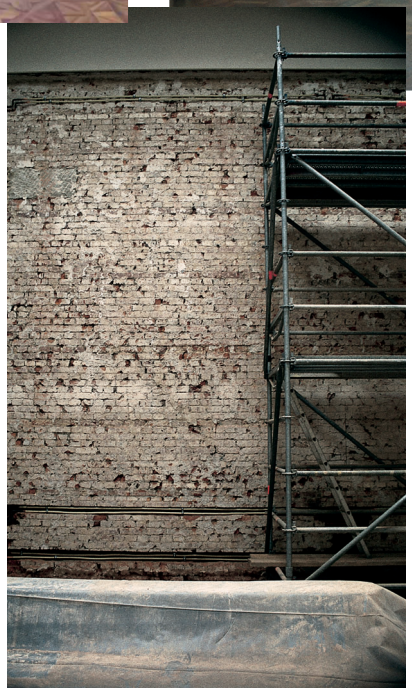
Michael Kotterer, Henning Großeschmidt, Frederick P. Boody, Wolfgang Kippes.
Herausgeber/Editors

Klima in Museen und historischen Gebäuden: Die Temperierung
Climate in Museums and Historical Buildings: Tempering



Schloß Schönbrunn
Schönbrunn Palace

Kunstforum
Ostdeutsche
Galerie

Wissenschaftliche Reihe Schönbrunn, Band 9

HAFTCOURT Ltd.
CARE OF CULTURAL PROPERTY

TU WIEN
Technische Universität Wien
Vienna University of Technology

ZRMK INSTITUT

University of Ljubljana

WELTERBE · WORLD HERITAGE · PATRIMOINE MONDIAL

Start

Inhaltsverzeichnis / Table of Contents

Wolfgang Kippes
Vorwort 4–5
Preface 6–7

Autorenverzeichnis 9–12
List of Authors 9–12

Henning Großeschmidt
The Tempered Building: 14–48
Renovated Architecture – Comfortable Rooms – A "Giant Display Case"
Das temperierte Haus: 325–382
Sanierte Architektur – behagliche Räume – Großvitrine (Langfassung)

Jochen Käferhaus
Kontrollierte natürliche Lüftung und Bauteilheizung als probate Mittel der Schadensprävention am Beispiel von Schloß Schönbrunn. 49–76

Michael Kotterer
Internationale Standard-Klimawerte und Haustechnik in Museen und historischen Gebäuden in der Diskussion 77–98
International Standard Climate Values and Climate Control Systems in Museums and Historical Buildings under Discussion 383–404

Jan Holmberg
Comparison of Tempering and Conventional Convection Heating 99–106

Marjana Šijanec-Zavrl, Roko Žarnić
Thermal Response of Wall-Tempered Heritage Buildings – Monitoring and Simulation 107–127

Matjaž Malovrh, Matjaž Zupan, Miha Praznik
Neue Wege zum Beheizen historischer Gebäude 128–137

Felicitas Klein
Die Renovierung von fünf historischen Räumen in der Städtischen Galerie im Lenbachhaus, München, Teil 1 138–142
Renovation of Five Historic Exhibition Rooms in the Städtische Galerie im Lenbachhaus, Part 1 405–410

Andreas Hofer
Die Renovierung von fünf historischen Räumen in der Städtischen Galerie im Lenbachhaus, München, Teil 2 143–146
Renovation of Five Historic Exhibition Rooms in the Städtische Galerie im Lenbachhaus, Part 2 411–414

Jochen Münnich
Erweiterung und Umbau 1995/96 des Ernst Barlach Hauses, Stiftung Hermann F. Reemtsma, Teil 1 147–148
Expansion and Remodeling of the Ernst Barlach Haus, Stiftung Hermann F. Reemtsma, during 1995/96, Part 1 415–416

Gerhard Kahlert

Erweiterung und Umbau 1995/96 des Ernst Barlach Hauses, Stiftung Hermann F. Reemtsma, Teil 2 149–150

Expansion and Remodeling of the Ernst Barlach Haus, Stiftung Hermann F. Reemtsma, during 1995/96, Part 2 417–418

Gotthard Voß

Wohnen im Denkmal.
Sanierung des Wohn- und Geschäftshauses Barfüßerstraße 13 in Halle 151–154

Living in Historical Buildings. Restoration of Barfüßerstraße 13 in Halle, a Mixed Residential and Commercial Building 419–422

Thomas Becker

Erfahrungen mit der Temperierung in Italien 155–162

The Italian Experience 423–430

Jochen Käferhaus

Schloß Meseberg, künftiges Gästehaus der deutschen Bundesregierung, als Beispiel für Schadensprävention und Raumbeheizung durch Temperierung 163–169

Maria Ranacher

Gesundheit durch Thermische Kondensatprävention. Optimales Gebäudeklima für Kulturgut und Denkmalpflege (Kurzfassung) 170–187

Gesundheit durch Thermische Kondensatprävention. Optimales Gebäudeklima für Kulturgut und Denkmalpflege (Langfassung) 431–462

Alfons Huber

Das optimale Museumsfenster (Zusammenfassung) 188–191

The Optimal Museum Window (Summary) 463–466

Das optimale Museumsfenster (Langfassung) 467–506

Joachim Kleinmanns

Die Temperierung historischer Gebäude: Eine Methode zur Verhütung feuchtebedingter Bauschäden 193–200

Tempering of Historical Buildings: A Method for Preventing Building Damage due to Moisture 201–208

Dietmar Leipoldt

Kurzbericht über Heizkostenreduzierung / Energieeinsparungen / Investitionseinsparungen im Anlagenbau durch den Einsatz der Temperierung: Vergleichende Untersuchung im Gymnasium Waldstraße, Hattingen 209–214

A Short Report on the Reduction of Heating Costs, Energy Use and Capital Costs through the use of Tempering: A Comparative Study in the Waldstraße Secondary School, Hattingen 215–220

Michael Kotterer

Klimamessungen im Kunstforum Ostdeutsche Galerie Regensburg. Analyse und Dokumentation 221–244

Climate Measurements in the Kunstforum Ostdeutsche Galerie in Regensburg. Analysis and Documentation 245–268

Jochen Käferhaus

Kartause Mauerbach: Auf der Suche nach der schadenspräventiven Heizung für historische Gebäude. Vergleich von sechs unterschiedlichen Wärmeverteilsystemen und deren Auswirkung auf die Räume 269–324

Vorwort

Spätestens seit der ICCROM-Studie im Jahre 1960 mit dem Thema "Climatology and Conservation in Museums" (Rom 1960) wurde die Frage nach der Kontrolle des Raumklimas aus konservatorischer Sicht ein breit und heftig diskutiertes Thema. ICCROM hat sich damals ausschließlich auf raumklimatische Probleme der Konservierung von Kunstwerken in Museen bezogen und dabei die Frage aufgegriffen, die schon im 19. Jahrhundert zu parlamentarischen Diskussionen in Europa führte. In der Weiterentwicklung seit 1960 wurden nicht nur die allzu plakativen Feststellungen der zitierten ICCROM-Studie präzisiert, sondern es wurde auch festgestellt, daß eine ähnlich sensible Behandlung des Raumklimas in historischer Bausubstanz generell unverzichtbar ist. Entsprechend den Fortschritten bei den Erkenntnissen setzte sich dabei immer mehr die Einsicht durch, daß der Einsatz mechanischer Klimageräte niemals zum gewünschten Ergebnis führt und in der Unbeherrschbarkeit der maschinellen Ausstattung zusätzliche Risken entstehen.

Als generelle Schlußfolgerung einer mehr als 100jährigen Debatte kann festgehalten werden, daß die Lösung der Probleme nur eine sensible Nutzung der Bausubstanz zur Pufferung des Raumklimas verbunden mit möglichst wartungsfreien und wenig invasiven technischen Hilfsmitteln sein kann. Vor diesem theoretischen Hintergrund ist das Zustandekommen eines engagierten Forschungsprojektes zu sehen, dessen Ergebnisse in der vorliegenden Publikation zusammengefaßt werden. Als organisatorischer Rahmen für die Kooperation bot sich in den Jahren 1994/95 die EUREKA-Initiative EUROCARE an. Das Projekt selbst hatte die Bezeichnung EUROCARE EU-1383 PREVENT: Preventive Conservation. Innerhalb eines fünfjährigen Forschungszeitraumes wurden von den Partnern aus Deutschland, Schweden, Slowenien und Österreich achtzehn Einzelberichte vorgelegt.

Die Kooperation auf europäischer Ebene war nicht nur theoretisch ertragreich - so bestätigte sie u. a. die Effekte der von Henning Großeschmidt erarbeiteten, damals noch umstrittenen "Temperierung" - , sondern führte auch zu anderen innovativen technischen Lösungen (vergleiche die Beiträge von Jochen Käferhaus zur Schadensprävention in Schönbrunn und den Betrag von Alfons Huber über das optimale Museumsfenster). Darüber hinaus hat sie auch zu begeisternden persönlichen Freundschaften geführt und ich möchte an dieser Stelle allen beteiligten Personen meinen Dank aussprechen. Schließlich trug die Kooperation auch akademische Früchte, darunter eine Habilitation und drei Dissertationen.

Es fehlte jedoch eine übergreifende Publikation zum Thema "Klima in Museen und historischen Gebäuden und Temperierung". Bereits 1999 hatte Michael Kotterer vom Kunstforum Ostdeutsche Galerie Regensburg die Idee zu dieser Publikation und entsprechende Beiträge gesammelt, die PREVENT-Forschungsergebnisse und Ergebnisse zum Thema von außerhalb des PREVENT-Projektes zusammenführt. Die nunmehr vorliegende Publikation konnte schließlich als Koproduktion der Schloß Schönbrunn Betriebs- und Kulturges.m.b.H. und der Stiftung Kunstforum Ostdeutsche Galerie realisiert werden. Die editorische Hauptarbeit wurde von Henning Großeschmidt und Michael Kotterer geleistet. Bei der Physik der Wärmeübertragung wurden sie von Frederick Boody beraten, der auch für die Übertragungen ins Englische und die Redigierung der englischen Beiträge zeichnet.

Die Beiträge im Einzelnen:

Zwei umfangreiche Beiträge stellen den Hintergrund für alle der dargestellten Lösungsansätze dar. Henning Großeschmidt als Urheber der Temperierung stellt die Methode in Theorie und Praxis dar und faßt dabei die langjährige Diskussion um das "temperierte Haus" zusammen - in einer Abhandlung, die in dieser komplexen Form erstmals in englischer Sprache publiziert wird. Maria Ranacher, die für das Zustandekommen des Forschungsprojektes PREVENT große Verdienste erworben hat, beschreibt ihren Ansatz im Beitrag "Gesundheit durch thermische Kondensatprävention".

In unmittelbaren Zusammenhang mit dem Forschungsprojekt zu sehen sind die Beiträge von Jochen Käferhaus zur Schadensprävention durch natürliche Lüftung und Temperierung in Schloß Schönbrunn sowie zur schadenspräventiven Heizung in historischen Gebäuden (Vergleich unterschiedlicher Wärmeverteilsysteme in der Kartause Mauerbach bei Wien).

Michael Kotterer stellt die Forschungsergebnisse zu den Klimamessungen im Kunstforum Ostdeutsche Galerie Regensburg im Detail dar und faßt in einem weiteren Beitrag die internationale Debatte um Standard-Klimawerte in Museen und historischen Gebäuden zusammen.

Die slowenischen Partner Marjana Šijanec-Zavrl, Roko Žarnić, Matjaž Malovrh, Matjaž Zupan und Miha Praznik beschäftigten sich in theoretischer und praktischer Form mit den Erfahrungen um die Temperierung als innovative Heizmethode.

Jan Holmberg aus Schweden beschreibt die positiven schwedischen Erfahrungen mit der Temperierung.

Alfons Huber aus Wien befaßt sich mit der optimalen Behandlung des von außen nicht beschatteten Museumsfensters als Lösungsansatz für die Schadensprävention bei denkmalpflegerisch sensibler historischer Bausubstanz.

Jochen Käferhaus zeigt mit Daten aus Mauerbach verbesserte thermische Eigenschaften der temperierten Wand.

In Ergänzung zu diesen Beiträgen wird eine Reihe von Erfahrungsberichten vorgelegt, die alle die Nutzung der Temperiermethode zur Kontrolle des Raumklimas sowie zur Konservierung der Bausubstanz behandeln. Dazu gehören die Berichte von Felicitas Klein und Andreas Hofer über das Lenbachhaus München, von Jochen Münnich und Gerhard Kahlert über das Ernst-Barlach-Haus Hamburg, von Gotthard Voß über ein Baudenkmal in Halle als Wohnhaus, von Jochen Käferhaus über das Beispiel Schloß Meseberg, dem künftigen Gästehaus der deutschen Bundesregierung, von Thomas Becker über die Erfahrungen mit der Temperierung in Italien, von Joachim Kleinmanns, Universität Karlsruhe, über die Temperierung im Freilichtmuseum Detmold und von Dietmar Leipoldt aus Wuppertal über den Vergleich von Heizkörperheizung und Temperierung.

Für diese Publikation wählten wir einen neuen Weg: Die gedruckte Fassung wird mit einer CD-ROM ergänzt. Um die Lesbarkeit des Druckwerks zu erleichtern, sind zwölf Beiträge, teilweise in gekürzter Form, darin aufgenommen. Die Langfassungen sowie die übrigen Beiträge sind auf der CD wiedergegeben, wo der theoretisch interessierte Leser auch die umfangreichen detaillierten Forschungsergebnisse findet. Im gedruckten Inhaltsverzeichnis werden beide Quellen gleichzeitig angeführt.

April 2004

Wolfgang Kippes

Preface

At least since the 1960 ICCROM Study titled "Climatology and Conservation in Museums" (Rome 1960), the question of control of room climate has been widely and intensely discussed from a conservational point of view. ICCROM considered strictly room climate questions with regard to conservation of artworks in museums and thus addressed a question that in the 19th century had already led to parliamentary discussions in Europe. In further developments since 1960, not only were the all too simplistic conclusions of the ICCROM Study made more precise but it was also determined that a similarly sensitive treatment of the room climate in historic buildings was also necessary. With progress in perceptions, the understanding grew that the use of mechanical air conditioning systems never leads to the desired result and that the uncontrollability of mechanical equipment creates additional risks.

As a general conclusion to a more than 100-year debate, it can be said that the solution to the problem can only be a sensitive use of the building substance for buffering the room climate combined with use of the most maintenance free and least invasive possible mechanical assistance. Out of this philosophical background, an ambitious research project came into being, whose results are summarized in this volume. The organizational framework for the cooperation was provided in 1964-65 by the EUREKA initiative EUROCARE. The project itself had the designation EUROCARE EU-1383 PREVENT: Preventive Conservation. Within the five-year research period, eighteen individual reports were prepared by the partners from Austria, Germany, Slovenia, and Sweden.

This European-level cooperation was not just theoretically productive. It not only confirmed the, at that time still controversially discussed, effectiveness of Tempering, as developed by Henning Großeschmidt, but also led to other innovative new solutions (see the articles from Jochen Käferhaus on damage prevention in Schönbrunn Palace and from Alfons Huber about the optimal museum window). Additionally, it has led to enthusiastic personal friendships. I would like to express my thanks at this point to all who participated and to note that the cooperation has also borne academic fruit, including one habilitation and three doctoral dissertations.

Despite this, a book that covers all aspects of the subject of "Climate in museums and historic buildings and tempering" has been lacking. In 1999 Michael Kotterer of the Kunstforum Ostdeutsche Galerie, Regensburg, had the idea for this publication and started collecting articles that presented the results of the PREVENT research as well as additional reports on work on this topic from outside of the PREVENT project. The present volume has at last been realized as a co-production of the Schloß Schönbrunn Betriebs- und Kulturges.m.b.H. and the Stiftung Kunstforum Ostdeutsche Galerie. The main editorial work was performed by Henning Großeschmidt and Michael Kotterer. Frederick Boody reviewed the contributions for physical correctness of their treatment of heat transfer, translated articles originally written in German into English, and edited all English-language articles for grammar and usage.

The individual contributions:

Two extensive articles present the background for all of the problem solving approaches presented. Henning Großeschmidt, the inventor of practical tempering, presents it in both theory and practice and thus summarizes the twenty years of discussion about the "tempered building" in a work that is published for the first time in English in this detailed form. Maria Ranacher, who deserves great praise for the creation of the PREVENT research project, describes her approach in the contribution "Health through thermal condensation prevention."

The contributions from Jochen Käferhaus on damage prevention by means of natural ventilation and tempering in Schönbrunn Palace and on damage preventive heating in historic buildings (comparison of different heat distribution systems in the Cartusian Monastery in Mauerbach near Vienna) have a direct connection to the research project.

Michael Kotterer presents the results of climate measurements in the Kunstforum Ostdeutsche Galerie, Regensburg, and, in a further article, reviews the international debate on standard climate values for museums and historic buildings.

The Slowenian partners Marjana Šijanec-Zavrl, Roko Žarnić, Matjaž Malovrh, Matjaž Zupan and Miha Praznik report on both theoretical and practical work on tempering as an innovative method of heat distribution.

Jan Holmberg from Sweden describes the positive Swedish experience with tempering.

Alfons Huber from Vienna deals with the optimum way to handle museum windows that are not externally shaded from the sun, as an approach to damage prevention for preservation-sensitive historical building elements.

Jochen Käferhaus confirms with data from Mauerbach the improved thermal characteristics of tempered walls.

Supplementing these contributions are a series of reports on experiences with the use of tempering for room climate control and for conservation of the building substance. These include reports from Felicitas Klein and Andreas Hofer about the Lenbachhaus in Munich, from Jochen Münnich and Gerhard Kahlert about the Ernst-Barlach-Haus in Hamburg, from Gotthard Voß about an historic residential building in Halle, from Jochen Käferhaus about Meseberg Palace, the future guesthouse of the German government, from Thomas Becker about the experiences with tempering in Italy, from Joachim Kleinmanns, University of Karlsruhe, about tempering in the Open Air Museum in Detmold and from Dietmar Leipoldt from Wuppertal about the comparison of radiator heating with tempering.

For this publication we have chosen a new approach. A CD supplements the printed volume. To improve the readability of the printed volume, only twelve printed reports, some in shortened versions, are included. The full versions and all other reports are on the CD, where the theoretically interested reader can also find the complete detailed research results. The printed table of contents lists both sets of articles.

April 2004

Wolfgang Kippes

Vorbemerkung der Herausgeber / Note from the Editors

Die Temperierung ist keine Raumheizung.

In diesem Buch ist die Temperierung dem allgemeinen Sprachgebrauch folgend als Raumheizung angesprochen. Die Temperierung ist aber eigentlich keine Raumheizung. Sie ist ein Verfahren zur Wärmeverteilung, das Wärmeverlust ausgleicht. Ein Gebäude mit warmen Außenwänden benötigt keine in den Raum zielende Heizung.

Die Temperierung isoliert Räume thermisch gegen die Außenbedingungen. Sie regelt die Temperatur der Innenseite der Gebäudehülle. Der "warme Raum" entspricht dem "umbauten Raum", dem Volumen des Gebäudes. Zug und Staubumwälzung wie auch Luft- und Erdfeuchte-Probleme werden vermieden. Schichten zur Feuchtesperre und Wärmedämmung sind überflüssig, eine physikalische Wirkung erfüllt ihre Aufgabe.

Die Temperierung wird oft als "Heiz"-System betrachtet und als ungeeignet abgelehnt. Das Berechnungsverfahren für Heizungen berücksichtigt die Effekte warmer Bauteile aber nicht. So erklärt sich die Annahme, daß die Wirkung zu gering sei – obwohl "die Räume" warm sind – und daß die Temperierung mehr Energie verbraucht als herkömmliche Heizverfahren – obwohl das Gegenteil der Fall ist.

Geeignete andere Begriffe für die Temperierung sind Bauteiltemperierung, Wandtemperierung, Bauteilheizung oder, vielleicht, Wandheizung.

Tempering is not Room Heating

Although in several places in this book tempering is unfortunately discussed as a better or improved method of space heating, it in fact not a method of space heating at all. It is rather a means of heat loss compensation. Tempering does not heat spaces but rather isolates them thermally from the outside. It controls the temperature of the inside surfaces of the building envelope, creating a virtual "late spring – early summer" climate so that no heating of the room is necessary. Some advantages that result from tempering are the elimination of drafts and the circulation of dust as well as problems with excessive humidity of air, walls, and floors. Additional moisture barriers or thermal insulation are not necessary.

Thus, most concepts of room or space heating and the acknowledged calculational method used for sizing space heating systems do not apply to tempering. Much of the criticism of tempering, the many "reasons" why it cannot possibly work or why the energy consumption must be too high (when in fact it is lower than with space heating), are the result of considering it as space heating.

Correct usage includes tempering, wall tempering, wall-base tempering and wall-base heating. But, unfortunately, we, like non-experts, are so used to the existing terminology that we sometimes use the wrong terminology while meaning the correct effects.

Autorenverzeichnis / List of Authors

Dipl. Ing. Thomas Becker
Architekt
Faëst Ing. International
Via Rombon 41
I-20134 Milano
E-mail: thb@faesting.it

Henning Großeschmidt
Leitender Restaurator / Head Restorer
Landesstelle für die Nichtstaatlichen Museen in Bayern
Alter Hof 2
D-80331 München
E-mail: henning.grosseschmidt@blfd.bayern.de

Dipl. Ing. (FH) Andreas Hofer
Ingenieurgemeinschaft Hofer & Hölzl GmbH
Schöngeisinger Str. 24
D-82256 Fürstenfeldbruck
E-mail: ighuh@t-online.de

EUR. ING. Jan G. Holmberg
B. Sc. C. Eng. MCIBSE
Geschäftsführer der Haftcourt LTD
Außerordentlicher Wissenschaftlicher Mitarbeiter der
Königlich Technischen Hochschule Stockholm (KTH)
Institut für Gebäudetechnik (BYV) /
Managing Director of Haftcourt LTD
Associate Researcher at Royal Institute of Technology Stockholm (KTH),
Department of Building Sciences (BYV)
Haftcourt LTD
Care of Cultural Property
Dalagatan 78 B
S-11324 Stockholm
E-mail: janholmberg2002@yahoo.se

Univ. Doz. Alfons Huber M. A.
Restaurator / Conservator
Kunsthistorischen Museum Wien (KHM)
Sammlung alter Musikinstrumente (SAM)
Burgring 5
A-1010 Wien
E-mail: alfons.huber@khm.at

Dipl. Ing. Gerhard Kahlert
Ingenieurbüro Kahlert / Engineering Office Kahlert
Hauptsraße 87
D-45721 Haltern-Hullern

Dr. Jochen Käferhaus
Technisches Büro Dr. Käferhaus GmbH / Consulting Engineers
Neustadlgasse 9
A-2103 Langenzersdorf
E-mail: kaeferhaus@aon.at

Dr. Dipl. Ing. Wolfgang Kippes
Techn. Geschäftsführer / Technical Director
Schloß Schönbrunn Kultur- und BetriebsgesmbH

Schloß Schönbrunn
A-1130 Wien
E-mail: kippes@schoenbrunn.at

Dipl. Rest. Felicitas Klein
Leiterin der Restaurierungsabteilung / Head of Restoration Department
Städtische Galerie im Lenbachhaus
Luisenstraße 33
D-80333 München
E-Mail: felicitas.klein@gmx.de

Dr. Joachim Kleinmanns
Forschungsgruppe Erhalten historischer Bauwerke /
Preservation of Historical Buildings Research Group
Universität Karlsruhe
Hertzstraße 16
D-76187 Karlsruhe
E-mail: Joachim.Kleinmanns@arch.uni-karlsruhe.de

Michael Kotterer M. A.
Restaurator / Conservator
Stiftung Kulturforum Ostdeutsche Galerie
Dr. Johann Maier Str. 5
D-93049 Regensburg
E-mail: kogregensburg@t-online.de

Dietmar Leipoldt
Ingenieurbüro für techn. Gebäudeausrüstung / Engineering Office Leipoldt
Ottostraße 61
D-42289 Wuppertal
E-Mail: Ing.Buero.Leipoldt@t-online.de

Dipl. Ing. Matjaž Malovrh
Leiter des Zentrums für Bauphysik, Umwelt- und Energietechnik
Institut für Bauwesen ZRMK /
Head of the Center for Building Physics, Environment, and Energy
ZRMK Institute of Civil Engineering
Dimiceva 12
SI-1000 Ljubljana
E-mail: mmalovrh@gi-zrmk.si

Jochen Münnich
Geschäftsführendes Vorstandsmitglied / Managing Director
Ernst Barlach Haus
Stiftung Hermann F. Reemtsma
Parkstraße 51
D-22605 Hamburg

Mag. Dipl. Ing. Miha Praznik
Projektleiter
Institut für Bauwesen ZRMK /
Projekt Head
ZRMK Institute of Civil Engineering
Dimiceva 12
SI-1000 Ljubljana
E-mail: mpraznik@gi-zrmk.si.

Mag. art. Maria Ranacher
Restauratorin / Restorer
Kunsthistorisches Museum Wien (KHM)
und Naturhistorisches Museum Wien (NHM)
Burgring 7
A-1014 Wien
E-mail: maria.ranacher@nhm-wien.ac.at

Dr. Civil Eng. Marjana Šijanec-Zavrl
Leiterin der Abteilung für Bauphysik und Gebäudeklima
Institut für Bauwesen ZRMK
Außerordentliche wissenschaftliche Mitarbeiterin an der Universität Ljubljana, Fakultät für Ingenieurwesen und Geodäsie, Material- und Strukturforschung /
Head of the Department of Building Physics and Indoor Environment
ZRMK Institute of Civil Engineering
Associate Researcher at the University of Ljubljana, Faculty of Civil and Geodetic Engineering, Research in Materials and Structures
ZRMK Institute of Civil Engineering
Dimiceva 12
SI-1000 Ljubljana
E-mail: msijanec@gi-zrmk.si

Dipl. Ing. Gotthard Voß
Landeskonservator a. D.
ehemaliger Leiter des Landesamtes für Denkmalpflege Sachsen Anhalt /
Chief State Curator, ret.
former Head of the Sachsen Anhalt State Office for Historical Preservation
Alter Markt 27
D-06108 Halle/Saale
E-Mail: poststelle@lfd.mk.lsa-net.de

Prof. Dr. Civil Eng. Roko Žarnić
Inhaber des Lehrstuhls für Material- und Strukturforschung
Universität Ljubljana /
Head of Department for Research in Materials and Structures
University of Ljubljana
Jamova 2
SI-1000 Ljubljana
E-mail: rzarnic@fgg.uni-lj.si

Mag. Dipl. Ing. Matjaž Zupan
Beratender Bauphysiker / Consultant for Building Physics
Pfleiderer
Povhova ulica 2
SI-8000 Novo mesto
E-mail. zupan.matjaz@volja.net

Übersetzungen und fachlich beratender Mitherausgeber / Translation and Technical Editing

Dr. Frederick P. Boody
Übersetzungen vom Deutschen ins Englische
Stilistische Beratung der in Englisch schreibenden Autoren /
translated the articles written in German into English
edited the articles written in English for style and understandability
Außerordentlicher Professor an der
Fachhochschule Regensburg /
Adjunct Professor at the University
of Applied Sciences Regensburg
Präsident von / President of:
Ion Light Technologies GmbH
Lessingstraße 2c
D-93077 Bad Abbach
E-mail: boody@ion-light.com

The Tempered Building: Renovated Architecture - Comfortable Rooms - A "Giant Display Case”

Abstract

Tempering is an alternative method of *distributing* heat that has been developed since 1982 by the Landesstelle für die nichtstaatlichen Museen in Bayern (Bavarian Museum Service of the Bavarian State conservation Office) in public building projects, in cooperation with local building authorities. Its main characteristic is the continuous heating of the building shell, which normally is done with two heating tubes installed under the inside plaster at the base of outside walls on all floors. Without additional measures, tempering stops capillary rise of moisture, condensation, and damaging salt effects while stabilizing room climate and providing physiologically and conservationally appropriate as well as energy saving room heating. It is applicable to all sorts of buildings in old or modern construction such as museums, monuments, churches, dwelling houses etc..
In its minimal form it serves for the preservation of open air museums buildings and housed excavations.

Das temperierte Haus: Sanierte Architektur - behagliche Räume - „Großvitrine

Die „Temperierung“ ist eine alternative Methode der Wärme-Verteilung, die seit 1982 von der Landesstelle für die nichtstaatlichen Museen in Bayern beim Bayerischen Landesamt für Denkmalpflege in Zusammenarbeit mit Baubehörden in öffentlichen Bauvorhaben entwickelt wurde. Ihr Hauptmerkmal ist die kontinuierliche Beheizung der Gebäudehülle, die in der Regel durch zwei Heizrohre unter Putz an den Außenwandsockeln aller Geschosse geschieht und ohne Zusatzmaßnahmen folgende Wirkungen hervorruft: Ausschaltung von aufsteigender Feuchte, Kondensation und Schadsalzwirkung, Stabilisierung des Raumklimas, physiologisch wie konservatorisch zuträgliche und energiesparende Raumbeheizung. Wegen des Fehlens von Raumluftkonvektion sind auch Großräume beherrschbar. Dank der minimalen Installationstechnik eignet sich die Methode ferner für die Konservierung von Exponatgebäuden in Freilichtmuseen und behausten archäologischen Ausgrabungen.

contents

Summary
1. Long-term experience with tempering
1.1. Lowering the costs of eliminating wall dampness and stabilizing room climate through tempering
1.2 Conservationally and physiologically favorable room conditions through tempering
1.3 tempering and air exchange control produce a "Universal Climate”
2. "ICOM Recommendations”
3. Climate criteria for everyday use
3.1 Fundamental role of the building envelope
3.2 Slowly changing room climate as a goal of planning
3.2.1 Conservational goal: Slow variation of the equilibrium humidity
3.2.2 Conservationally sensible band of variation of the room climate
3.2.3 Dynamic room climate as a goal of planning
4. No internationally valid standard climate values possible
4.1 U-Value and heat distribution

4.2 Relative room air humidity and heat distribution
4.3 Hydrogen bonding
5. Climate guidelines based on experience
5.1 Rooms without extended occupancy
5.2 Continuously occupied rooms
6. Minimal climate control technology
6.1 Protection from light
6.2 Control of air exchange
6.2.1. Air humidification and dehumidification
6. 3 Tempering
6.3.1 Planning of tempering systems
6.3.2 Installation of tempering
6.3.3 "Radiators"
6.3.4 Regulation
6.3.5 Energy consumption
6.3.6 Thermography
6.3.7 Extreme example of "minimal tempering"
7. An Important Example of a Minimal Facility
8. Compact storage units and tempering
8.1 Normalization of the equilibrium humidity of stored artifacts by means of tempering
9. Ignorance of the facts of physics by theory and state of the art
References

Summary

As a result of long-term experience with "tempering" (pure wall-base heating as the simplest forms of wall heating) and controlled natural ventilation, the architectural and technical requirements for a conservationally as well as physiologically ideal building can be described as follows: The buffering ability of its envelope for reducing variations of outside temperature and solar radiation should be as high as possible. For this purpose, the walls must be airtight and possess more than a minimum amount of mass (rather than thermal insulation) while the windows must have double glazing (modern or historic styles) with seals, external shading, and light protection devices. Two heating tubes (foreline and return line, together forming a loop, with diameters of 15 or 18 mm, up to 22 mm in churches) are installed one above the other at the base of all walls belonging to the building envelope, including both the exterior and interior walls of cellar rooms. The tube for hotter outward flowing water is referred to as a foreline and not as a supply or feed line because it has no destination, the tubes themselves are the heaters (the journey is the destination), and at some point in the loop each tube turns around and retraces its path as the cooler return line. With this minimal form of tempering (two tubes at the wall base) conservational requirements are safely met. For dwellings, the return line is mounted at the height of the windowsill or two separate loops are used, one at the wall base and one at the bottom of the windowsills, which allows lower foreline temperatures.

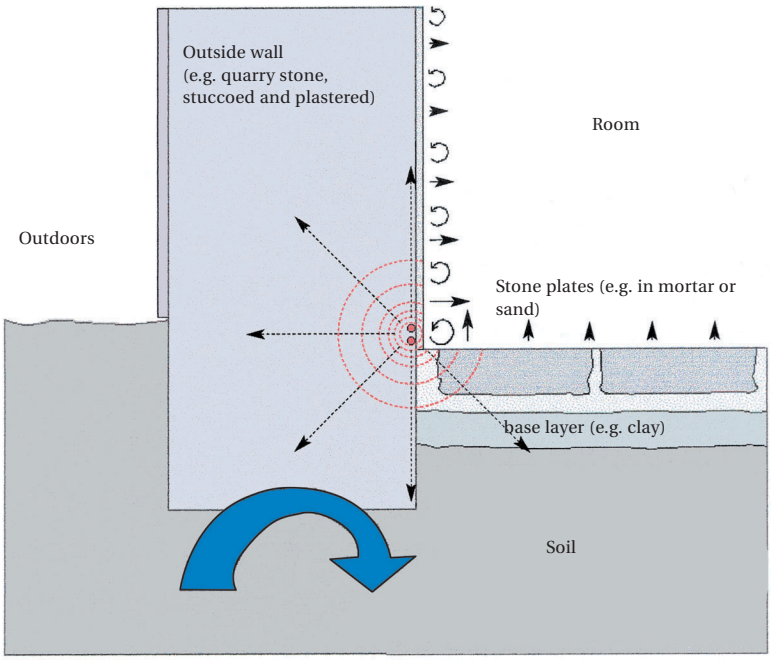
The hot strip of wall created at the wall base drives convection in the boundary layer between the bulk room air and the wall surface, uniformly heating the wall surface above the hot strip. The warm outer walls then radiatively heat the rest of the building, which results in a completely draft-free warm building with dust free air. Because there is no convection in the bulk of the room air, there are no air currents that entrain dust from the floor – as there are with conventional room-air convection heating systems. The walls are continuously heated, which means 24 hours per day, during the whole year for walls with earth contact (in summer with foreline temperatures of 30 °C and less) and only during the heating season for other walls.

In museum buildings, the heating capacity of the tempering tubes is limited for conservational purposes. Thus the room temperature, especially in win-

Figure 1:
Tempering. Mechanism of its functioning in an "historical" setting: Walls without thermal insulation or vapor barriers are kept dry by continuous heating (see Fig. 4)

Red dots:
Heating pipe loop (fore- and return line, bare copper, 15 mm) covered by a maximum of 15 mm of plaster
For earth-contact floors: The foreline should be slightly above the finished floor.
Long arrows:
Heat transfer due to thermal conduction: radially in the wall and floor away from the heating pipes
Red circles:
Heat accumulation with cylindrical isotherms (high temperature only near the pipes, see Fig. 9)
Round arrows:
Heat transfer due to convection: rising warm air flow in the boundary layer attached to the wall surface (Coanda effect)
Short arrows:
Heat radiated from the warm surfaces (high temperature only near the pipes, see Fig. 9)
Blue arrow:
Ground moisture. Thermal horizontal barrier due to the radial heat conduction

Based on a diagram by Miha Praznik, 61–ZRMK, Ljubljana.



ter, varies gradually in a range based on the mean outside temperature and thus on the mean absolute humidity of the outside air. In the same context, ventilation should be performed by means of exhaust fans which are under-sized by the usual standards (maximum exchange rate of 1 room volume per hour = 1 air change per hour = 1 ACH) and which are operated only "if needed," i.e. when people are present. (Exception: cooling at night during the hottest part of the summer.) In museums with a high number of visitors, a simple fresh air system has to be installed, which can be restricted to only the small flow rate necessary for renewing the air (max. 1 ACH) if the cooling load due to lighting and solar radiation is kept low.

Such an ideal building fulfills its conservational purpose by providing optimal room conditions, achieved at low cost through the use of the simplest technology, with low energy consumption (see below). In particular, the room climate is homogeneous – it is the same in all parts of the room and on all floors of the building – and it changes only slowly during the course of a day or a season. The relative air humidity (RH) is constant in the short term and varies slowly about a moderate mean value, which results in a slowly varying equilibrium moisture content of the stored artifacts. The need for air humidification is low; dehumidifiers are not necessary.

As a side effect of the continuous heating of the walls, the building substance is conserved due to moisture removal, protection against condensation, and inactivation of damaging salts. Because of these effects, the method does not only apply to the renovation of "normal" and old (historic) buildings but also to the conservation of open-air museum buildings and their furnishings. For this purpose two single-tube loops for every floor are sufficient, with the foreline of each loop making a ring around one half of every floor and the return line following the internal partition walls. Similarly, enclosed ("housed") archeological excavations are conserved by single-tube loops around their circumferences. Here, our experience that neither vapor barriers nor thermal insulation are

necessary for floors with ground contact in wall-heated rooms becomes understandable. Their functions are provided as side effects of tempering. This is true even in dwellings.

The negligible conservational damage potential resulting from these design principles, compared to conventional technology, and the fact that the heat distribution concept aims at the whole building envelope, including the stairwells, establish the special suitability of tempering as a heating system for museum buildings of any size. The homogeneous climate and the dust-free air are found throughout the building volume, so that the building functions as a "giant display case." The features described above provide the ideal basis for planning museums and other buildings with low capital and operating costs.

For the heating of living and office spaces, light protection, limitation of the heating capacity, and control of the air exchange rate are not needed. Ventilating by opening windows is possible: On the one hand, there is no need for a constant RH and, on the other hand, it does not result in significant energy losses because the heat is stored in walls and other massive parts of the building. In the case of thin-walled offices or dwellings, as in half-timbered houses, or for lowering the foreline water temperature, a second loop is mounted at the height of the lower edge of the windowsills, whose return line makes detours along the sides of the windows.

Energy consumption with tempering, in general, is lower than with the usual air heating because, in addition to the lower temperature of the room air, the drying out of the building envelope results in a lasting improvement of its U-value. Both effects make the influence of people on energy consumption negligible. This is of great importance for historic buildings, since the goal of (in Germany, government mandated regulations for) energy savings is achieved by directly heating the building envelope, which at the same time conserves the material – rather than through use of more modern implementations of false heat distribution concepts such as radiator/convector heating and installation of thermal insulation, which alters the external appearance, eliminates heat accumulation from solar radiation, and prevents the drying out of the walls.

1. Long-term experience with tempering

This year the Landesstelle (Landesstelle für die nichtstaatlichen Museen in Bayern beim Bayerischen Landesamt für Denkmalpflege, Munich, or Bavarian Museum Service of the Bavarian State Conservation Office) looks back on 21 years of experience with the dehumidification of air and the stabilization of climate in museum exhibition rooms and storerooms. From the beginning, emphasis has not been on the use of air conditioning or other mechanical room air systems, but on the testing of wall heating techniques in combination with the simplest measures for controlling air exchange. On this "long march of empiricism against the theories of HVAC-experts," it has been shown that the holistic effect of tempering (pure wall-base heating as the most simple wall heating technology) occurs in all types of buildings, independent of how they are built and used, and that this effect allows a great simplification of building renovation, climate control and heating technology, in general. This has led to an increased use of tempering, the details of which will be presented below (see Section 6.3). Before that, however, the three most important results of long-term experience with this minimal heating method will be discussed and, based on that, the requirements for room climate for everyday use will be defined.

1.1. Lowering the costs of eliminating wall dampness and stabilizing room climate through tempering

The first of these results is of great economic importance, especially in the case of historic buildings. Buildings whose envelopes exceed a minimum of mass (e.g. half-timbered constructions with massive fillings, log houses, or buildings with stone walls of any size) can be optimized for conservation of their furnishings

(including earth-contacted levels) in a simple and user friendly way and can, at the same time, themselves be preserved through installation of only a minimal amount of new hardware (Minimum installation: two wall-base heating tubes in or on the surface of each outer wall, one wall-base heating tube on each side of earth-contact partition walls, and one or more simple exhaust fans).

Expulsion of moisture from walls, deactivation of damaging salts, protection from condensation, thermal insulation and moisture isolation of floors with earth contact are side effects of tempering (Fig. 1). In addition, annual heating costs, despite the energy required for heating earth-contact walls during the summer, are lower than with conventional heating and air conditioning. This is because the amount of energy used during the heating season decreases by an even greater amount than that used during the summer, due to the lower rate of heat transfer through dry walls and the lower room air temperature (compared to convector heating) – independent of the behavior of humans. The above-mentioned effects occur already for the wall thickness of half-timbered houses. With respect to climate stabilization, however, this does not apply for light-walled structures, such as sheds with only external siding or glass walls. For such buildings, the structural prerequisites must first be satisfied, independent of the heating and air conditioning equipment. The ability of the building envelope to dampen the effect of changing outside temperatures and solar radiation must be improved by increasing the mass of the outer walls and by installing external shades.

1.2 Conservationally and physiologically favorable room conditions through tempering

It has been found that, through the simple means of a minimal tempering installation, quality of climate can be achieved in both conservational as well as physiological respects, which is contrary to the usual assumption that this can only be achieved with air conditioning systems. Thus the term "climate control" usually implies that room air must be conditioned to given values of temperature and RH throughout the year and that this can only be achieved by circulating the air continuously by means of an expensive "air conditioning system."

Particularly the basic functions of air conditioning systems – constantly moving the room air, treating it mechanically, and circulating it through ducts – result in certain flaws. Air conditioning has a negative effect on the feeling of comfort as well and, often, on short-term climate stability. It causes a higher demand for heat due to drafts, which often also cause unnecessary accumulation of dust on all surfaces. Through overheating or overcooling, germ infestation (when improperly maintained), and deionization, air conditioning reduces the quality of the "most important human nutrient," the air. Furthermore, it is difficult to determine the direction that conditioned air will take, as air rises when it leaves an outlet not only when heated but also when humidified, since both processes reduce its density. Similarly, both cooled and dehumidified air sink, since both processes increase air density. Most of these disadvantages also apply to radiator/convector heating, especially when combined with air humidifiers (see Section 4.1). Considering these characteristics, the use of the bulk of the air within rooms as a heat transfer medium should be avoided, if only for physiological reasons.

In contrast, a "radiation climate" – the room climate which results from the outside walls being heated directly and the inside wall surfaces being heated by radiation from facing walls, which occurs without heating and circulating the room air, as is the case with air heating systems – fulfills the two most important conservational criteria for climate. First, short-term fluctuations cannot occur either in closed-off rooms, if the joints of doors and windows are sealed, or in rooms in use, if the air exchange rate is controlled by use of ventilating fans. Second, the way by which this type of room climate is produced results inevitably in its homogeneity, which means the temperature is nearly identical in all parts of the room. Thus, there are no limits on the location of furniture or han-

ging objects, if a small distance (15 to 20 mm) is maintained between objects and the wall, in order to allow the warm air needed to heat the wall surface to rise.

Additionally, during the heating season, this method of wall heating causes a comfortable climate for visitors and staff in exhibition rooms and storerooms, since the unavoidable flaws of "air heating" or air conditioning described above, in particular drafts, do not occur. Thus, lower room temperatures than commonly assumed, especially much lower room air temperatures, are still perceived as comfortable. Thereby the need for and thus the costs of air humidification as well as the risk of condensation are considerably reduced; with air conditioning systems also the costs of heating fresh air. Further, there is no more need for air dehumidification (see Sections 3.2.2 and 6.2.1). From this it becomes clear that, contrary to common opinion, visitor friendly room conditions in museums can be produced without compromising conservation, if one deviates from the state (!) of the art. As this alternative concept of heat distribution includes the exterior walls of staircases, even there no convection occurs in the bulk of the air, even if the entrance doors of the several floors are open. The homogeneity of climate and the dust-free air therefore are found in the whole building, so that a tempered building has the quality of a "giant display case."

1.3 tempering and air exchange control produce a "Universal Climate"

Another result is increasingly being acknowledged by specialists. With continuous "wall heating" and control of the air exchange rate, a "Universal Climate" can be produced that is suitable for almost all materials found in museum collections. Thus, not only the basic requirements of conservation are fulfilled. Even more the scientific requirements can more easily be satisfied on this basis: The statement made by an exhibition concept can be optimized because the combination of materials in one room is not limited. It is not necessary to create various climate zones, which not only restrict the concept of a museum but also are costly. This applies equally to exhibition rooms and storerooms. And not only the additional costs and effort are eliminated, but also the potential for climate related damage, damage which is enhanced by two factors: the flaws of room air conditioning technology with regard to operating safety and the unpredictable behavior of visitors and staff. Because of its already mentioned main criterion, the absence of short-term fluctuations, such a Universal Climate is valid for all materials (with the exception of photographic materials, which at least in the storeroom should be stored only at low temperature and humidity, e.g. in a refrigerator). Even glass corrosion is determined not so much by the height of the RH as by the short-term fluctuations. On the other hand, artifacts from excavations – even at moderate RH – are safe only if they are completely desalinated.

2. "ICOM Recommendations"

As early as 1983, observations of the climate in tempered rooms (in the pilot project at the Starnberg City Museum) were reason for the Landesstelle to redefine its room climate guidelines in deviation from prevailing opinion, in particular deviating from the so-called "ICOM Recommendations." In fact, upon closer study these "recommendations" turn out to be an illusion, as Holmberg found out in 1995 in his study of world literature on RH [1].

In 1960, the International Council of Museums (ICOM) published a list of climate values from 37 locations, obtained from questioning archives, libraries, museums, and individual specialists. Evaluating this list, Holmberg's study found that: The values are not based on sufficient research; the list did not state whether the listed values were those followed by the various institutions, their goals, or rather just what they considered desirable; more than half of those asked recommended allowing considerable seasonal variation (up to 14 K and 20% RH). In the time following, nevertheless, a worldwide consensus formed in museum circles that the values "a constant 18 °C and 50% ± 5% RH" – the mean values of the list (!) – were ICOM recommendations. Until the 1990s, this narrow climate

band was considered the ideal basis for planning air conditioning systems, despite the directly resulting high capital costs and without any consideration of the region or the construction of the building (see Section 3.1). Temperatures here are quoted in the familiar unit °C which is referenced to water. The internationally accepted (S.I) unit of temperature, however, is the Kelvin (K) referenced to absolute zero (see Fig. 2). Two examples show the importance of the Kelvin scale for energetic considerations:

- Even at 0 °C the energy radiated by a surface, proportional to (273 K) 4 is still substantial.
- Basement rooms are surrounded by soil at 10 °C (283 K, see Fig. 3). After being heated for some weeks with wall base heating for the first time, the drying room shell reaches a temperature of 20 °C (293 K). The heating capacity needed to maintain this room temperature cannot be high (some hundreds of watts).

As explained in Section 1.1, empirically derived criteria for climate planning are advantageous not only for conservational but also for economical reasons, since their application enables considerable savings on climate control costs. Especially in times of reduced budgets, this is of particular importance for museums. Since the late 1980s, examples of this can increasingly be found, not only in the specialized literature but (35 years after the ICOM survey) also in Holmberg's study. This study was the first Swedish contribution to the PREVENT Project, whose main theme, besides the advantages of "natural ventilation" and the flaws of climate measuring techniques, was the effect of tempering.

3. Climate criteria for everyday use

The criteria explicitly confirmed by the PREVENT Project are:

- the "fundamental role of the building envelope" in the stabilization of room climate,
- that "slowly varying room climate" must be a design requirement, and
- the "international 'standard' values for climate are not generally valid," since they take into account neither the regional and seasonal characteristics of the location nor the construction of the building and its method of heating or air conditioning.

Since every exhibition room functions as a storeroom outside of opening hours, the following discussion of criteria does not differentiate between exhibition or storage rooms.

3.1 Fundamental role of the building envelope

Worldwide during the last 20 years, in museums with full air conditioning, damage to museum collections and building elements due to spectacular climate changes and condensation have been observed, particularly if – while putting up with high annual energy costs – the limits of the "ICOM recommendations" were aimed for, which are extremely narrow considering the seasonal changes of the outside climate.

This applies not only to old buildings with massive walls that were "renovated" by installation of the most modern air conditioning systems, such as the Semper Gallery in Dresden, where the damages showed soon after its reopening, or the Alte Pinakothek in Munich, where the dew point safety of the north wall of the upper floor is guaranteed not by the air conditioning system but rather by additional wall-base heating (an electrical resistance heating wire installed into the wall-base plaster shortly before the reopening). Particularly in buildings in which "modern" construction techniques were joined with climate control based on pure air conditioning, these flaws have often appeared unexpectedly. Examples are the "old" new building of the German National Museum in Nuremberg and the "Kunstbau" of the Lenbachhaus in Munich, which both have continuous condensation on their glass walls in winter, and the new building of the Kunst-

Figure 2:
Comparison of the Celsius and Kelvin temperature scales
The Celsius scale is based on the change of state of water.

The absolute temperature in Kelvin (K) is a measure of the vibration of the molecules

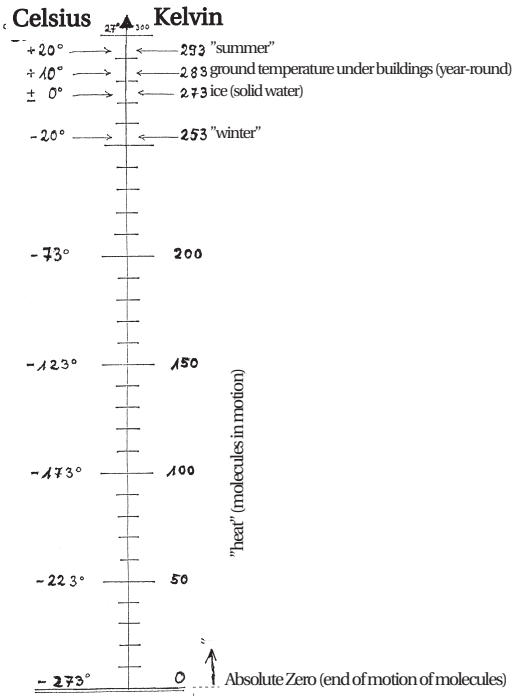
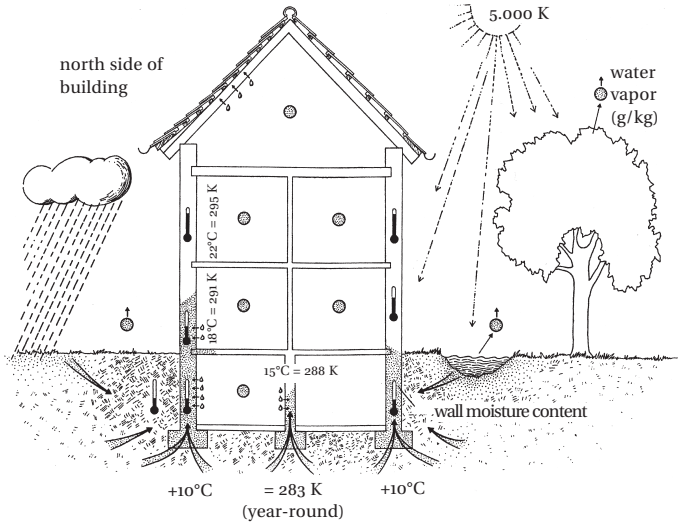


Figure 3:
Summer moisture in unheated buildings
Drawing: Hans Stölzl, Bavarian State Conservation Office, Munich



halle Bern, where in winter there was condensation on its light-construction outside walls and maximum air humidity next to the paintings hanging there, while during summer, as inevitably is the case with light construction, energy costs for cooling were high.

As a result of these experiences, the opinion in the museum world has gradually come to be that the building, particularly its envelope (its windows, roof, and outer walls), plays a fundamental role in climate control. In order to design a sensible climate control system, with economically justifiable capital and annual energy costs, above all the impact of changes in the outside climate and in solar radiation energy flow must be reduced. In the past, this was performed by a massive-walled building envelope with "airtight" joints and outside-shaded glass surfaces in combination with controlled air exchange. At the same time, heat from the artificial lighting – usually considered part of the "inside cooling load" – must be reduced by the choice and mounting of the lighting.

If, for example, solid connection of the lighting with building elements is avoided, the buffer effect of the inner heat storage masses is maintained, since they are not unnecessarily heated by heat from the lamps themselves through heat conduction from the lamp fixture and short-range heat radiation from the backside of the lamps. The distance of the lighting from the surfaces of exhibited or stored artifacts also plays an important role. It should not be determined only by esthetic/architectural considerations, but also by the simple physical fact that the light intensity at the object is reduced by the square of the distance – i.e., for the same light intensity at the object, the output of the lighting has to be increased by the square of the distance ratio.

In high-ceilinged rooms, therefore, mounting the lighting at the ceiling level means a greater amount of lamp power is required, which results not only in an avoidable higher energy consumption for lighting but also in a much higher amount of heat being given off by the artificial lighting. The main purpose of the air conditioning system, however, should be the treatment of fresh air when people are present and not, as is usually the case, compensation for the faulty buffering effect of the building envelope and internal building parts on outer and inner energy flows. On the contrary, it should only further reduce their impact on the room climate, after this impact has already been reduced by the buffering effect of the mass of the walls without the use of energy.

3.2 Slowly changing room climate as a goal of planning

As experience shows, the conservational quality of room climate, in contrast to the commonly held opinion discussed in Chapter 2, does not result from rigidly maintaining the room climate values against continuously changing natural and use-dependent influences, through the use of high capacity cooling and heating systems whose output is varied constantly by their control systems. The conservational quality results from letting the climate values vary slowly with changes in external and internal energy flows, which are reduced by the mass of the building and the deliberately under-sized heating and ventilating systems.

3.2.1 Conservational goal: Slow variation of the equilibrium humidity

The direct result of such an alternative climate concept is a room climate which varies slowly with the seasonally and time of day dependent mean outside climate values. The main conservational advantage of this "dynamic room climate" is that, for the greatest part of the year, particularly in winter and summer, the differences in both air temperature and vapor pressure between inside and outside is lower than with the conventional concept with its goal of a "static room climate." This has a controlling influence on a key conservational quantity, the "equilibrium humidity," which is of importance for almost all materials of the room shell and for artifacts and furnishings.

The equilibrium humidity is the humidity in the pores or fibers of a hygroscopic material. It depends on the temperature of the material and on the relative humidity of the surrounding air. When the temperatures of walls, room air, and artifacts are equal – i.e. in summer or during the heating period, in the case of "wall heating" – the humidity content changes constantly with ("is in equilibrium with") the relative humidity of the surrounding air. Due to the hysteresis effect, however, this accommodation cannot be continuous in both directions: With increasing water vapor content of the air, a hygroscopic material is quickly "invaded" by water molecules and capillary condensation takes place (sorption phase), caused by hydrogen bonding (see 4.1). In a comparable following drying phase (desorption phase), the drying is discontinuous due to this adhesion effect, as the water molecules tend to cling to the fine structures of the material. So, "the material retains" a certain quantity of the previously absorbed vapor, or, more correctly, these water molecules leave the material only at a lower value of the RH, compared to that of the sorption phase. In consequence, a drying phase, being discontinuous, causes more stress in the material than an analogous sorption phase.

In the case of conventional heating or air conditioning, i.e. when the material of the outer walls and of the objects near them are colder than the room air, this vicious circle creates an even greater damage potential: The lower temperature of the solid bodies means a lower amplitude or kinetic energy of the vibration of their molecules, which reinforces the adhesive effect of the gaseous molecules (vapor) and, at the same time, the hysteresis effect.

With the dynamic climate concept, the unavoidable climate variations are slowed-down and their amplitude is smaller. So, the equilibrium humidity can adjust itself in such a way that no relevant material stresses occur. In contrast,

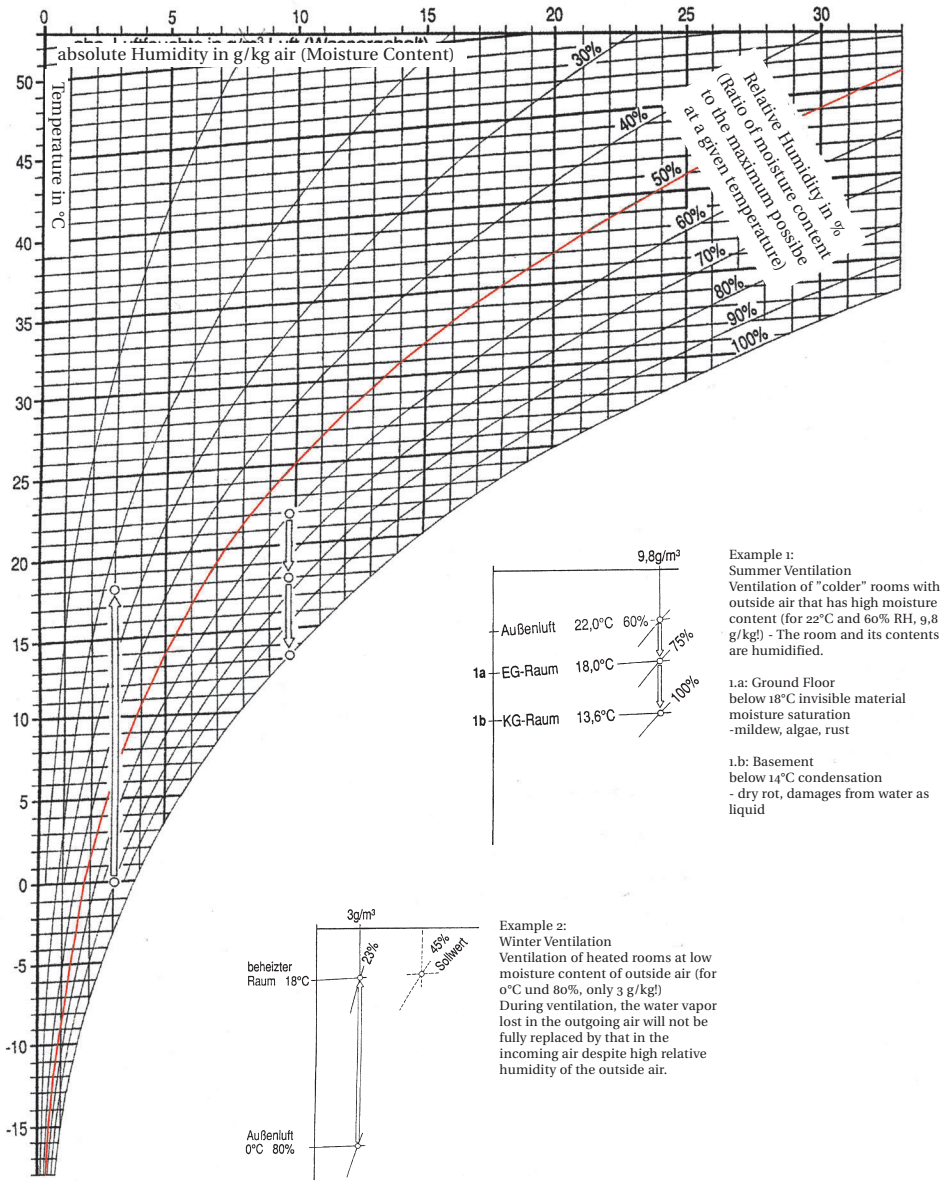


Figure 7:
Mollier-h, x-Diagram (Psychromatic Chart)
Dependence of the local value of the relative room air humidity on the moisture content of the outside air and the room air temperature as well as on the surface temperature of the building element.

Drawing: Erich Hackl, Munich

with static climate concepts – not considering very expensive or elaborate solutions – in addition to the above mentioned stress occurring during normal functioning of the hardware, further stresses are repeatedly caused by regulation errors or breakdowns of units, e.g. of the air humidity control system. So, "even" with air conditioning systems, sudden damages are possible, e.g. the flaking of paint. With a slowly varying room climate, however, for long stretches of the year it is unnecessary to interfere with this natural process through air humidification or dehumidification. This dramatically reduces the dependence of the room climate on hardware and its maintenance or on regulating software. Thus, the capital costs, energy consumption, conservational and building preservation

risks, and the danger of control errors are reduced. Furthermore, the physiological inconvenience of drafts and the constant manipulation of the breathed-in air are eliminated.

3.2.2 Conservationally sensible band of variation of the room climate

In the usual case, i.e. in buildings without expensive climate control systems and without technical staff, the most important conservational goal is slowing down variations of the equilibrium humidity. In order to achieve this without major effort, the large seasonal differences in the degree of the absolute outside air humidity (humidity ratio in grams moisture per kg dry air, see Section 4.1) must serve as a basis for planning. These differences are caused by the fact that the absolute humidity depends directly on the average outside temperature.

In the course of the year, therefore, large but slowly varying changes of room temperature and relative room air humidity must be allowed, e.g.

- Temperature range of 15 K: low of 12 C, for hard frosts, high of 27 C, for extreme solar radiation;
- Humidity range of 30% RH:
- low of 38% RH, for frost, if the room temperature shall be above 12 C, with as little humidification as possible; high of 68% RH, for times of extreme absolute humidity of the outer air in summer in rooms in contact with the ground or in very massive buildings, when the dehumidification is not done using dehumidifiers but rather through minimal room tempering.

Because of the periodic impact of daylight and artificial lighting, slow variations must also be allowed during the course of the day, however on a much smaller scale (e.g. 4 K and 8% RH), with their degree highly dependent on the fundamental role of the building envelope. When this is optimized as described above (Section 3.1), the installed capacity of the artificial lighting is held beneath 20 W/m2, the air exchange rate is held under 1 ACH in the presence of visitors, and the transmission heat demand is covered by tempering, then the climate fluctuation rate can be held at values of 0.5 K/h and 2% RH/h and the hysteresis effect has no conservational importance.

Only then are both heating and cooling system-caused short-term fluctuations and the totally unacceptable climate variations avoidable which frequently occur, even in totally climate controlled rooms, due to breakdowns or false reaction of control system components.

3.2.3 Dynamic room climate as a goal of planning

Equally favorable conservational, structural, energetical, and physiological effects overall, however, can only be achieved if slow variation of the room climate is fixed as a planning goal and thus becomes the decisive guideline for building construction, lighting, and climate control planning. With respect to air conditioning systems, this means that they should not have the task of room heating (wall heating should be used instead of air heating). Thus, the planning should be based on correspondingly lower capacities for air humidification and dehumidification, cooling, and air reheating, and on far lower amounts of air exchange. The air exchange rate should be limited to 1 m3 of fresh air per person per hour, to the extent that it is necessary for need-oriented air renewal when rooms are used by people, for which, even for groups of persons, a maximum air exchange rate of 1 ACH is sufficient in most cases. With tempering, the solution of this task results directly from the slowly varying operation of the wall-base heating tubes (if building construction and lighting are optimized) and from the use of small ventilation fans, depending on room occupancy (see Section 6.2).

4. No internationally valid standard climate values possible

Simple considerations demonstrate that internationally valid standard climate values are not possible. The seasonal means, extremes, and rates of change of

temperature and absolute humidity (which is temperature dependent) of outside air vary strongly with region. These values are additionally influenced by factors such as latitude, presence and size of bodies of water, and degree of forestation (see Fig. 3). Thomson [2], who is usually cited as the source of the call for maintaining a minimum RH of 50% year round, warned as early as 1986 against having this as a goal during winter in colder regions because of the danger of condensation on outside walls and ceilings under roofs, as well as nearby objects, when outside temperatures are low. He did not mention that this danger is an inherent flaw of the modern "air heating" concept, meaning convector heating or actual air heating and air conditioning (see Section 1.2).

4.1 U-Value and heat distribution

The various types of air heating, with their localized 3-D heating surfaces (radiator/convectors or duct outlets) create undirected air streams that circulate throughout the room. These streams primarily reach the ceiling area, whereas the wall surfaces are heated only accidentally (mainly higher up), with less warm air reaching the window niches, outside wall corners, and the lower parts of the wall surfaces. Thus, these systems can guarantee physiologically sufficient surface temperatures of outer walls and windows only when large amounts of heating air are circulated and the temperature of this air is considerably higher than the desired wall surface temperature. So, besides physiological inconveniences, such as drafts and the worsening of the inhaled air by "pollution" with dust and heat, they produce disadvantages for the building substance and for energy consumption (see next paragraph), because, with both methods, the primary goal is raising the room air temperature.
In fact, air heating systems do not attempt to maintain the thermal state of the inside surface of the building envelope (disregarding earth-contacted building parts), which in summer is an almost equally high temperature on the whole inner surface of the outer walls, with that of the surfaces of the interior walls being just as high (when there is no air cooling). Thus, during the heating period, large parts of the building envelope are insufficiently heated, as is explained in the next paragraph. In dwelling rooms, this provokes higher equilibrium humidity in the walls and objects near them, with the consequences being better dust adhesion, possible mold growth, and higher heat transmission through the outer walls, not to mention the danger of condensation. In the official interpretation, however, all of the above "is caused by the inhabitants," rather than poor building design, through their water vapor production combined with "improper ventilation." This interpretation is absurd; the reason why it is so can easily be understood by comparing winter with summer.

In summer, the outside absolute humidity is several times higher than in winter, because higher temperature means greater molecular vibration in solids, allowing more water to remain in the gaseous state ("in the air") since less hydrogen bonding is taking place. At the same time, the natural air exchange of rooms is low, because the temperature gradient between inside and outside air is low, while the behavior of the inhabitants and their water vapor production are the same. All of this leads to absolute room air humidity that is higher than in winter, but not to moist wall surfaces and mold growth, due to the homogeneous temperature of inner wall surfaces being as high as the room air temperature.

The fact that, with "air heating," wall surfaces in winter are colder in many places than the room air results in a potential for damage that is rarely correctly assessed. For example, in the case of dwellings, damage to window frames is usually blamed on the weather and mold growth on the dwellers (see above) rather than on constant condensation in winter. In addition, increased heat losses due to higher heat transmission through damp building parts are seldom openly discussed. Indeed, the U-value in the formula for transmission heat loss, which is actually a function of the wall's humidity, is taken as a constant of the given material in the official DIN formula for heat demand in the heating period,

based on a certain humidity content considered typical for the material's porosity, without considering the form of heat distribution ("air heating"/"wall heating") which also affects the wall's humidity. Capillary condensation, for example (see 4.2), is actually caused by "air heating."

The modern concept of museum heating – "air heating" with humidification, either by air conditioning or by locally heating the air with radiator/convectors plus humidifiers – results in the above mentioned higher equilibrium humidity, whereas the "wall heating" concept of the ancient Romans, the hypocaust heating system, allowed bathing water temperatures of about 45 °C in their public baths, even for the lowest outside temperatures, without danger of condensation (see Figs. 4 and 5). Comparison of Figs. 1 and 5 and Figs. 6 and 4 makes it obvious that with the heat distribution concept presented here, tempering of the building envelope, condensation is excluded for physical reasons, as it was 2000 years ago with its Roman predecessor. Here again our experience with wall-base heating becomes understandable, that no vapor barriers or thermal insulation need to be installed for walls or floors with earth contact, which also allows the protective screed under floor coverings to be omitted.

4.2 Relative room air humidity and heat distribution

In museums, the problem of condensation is intensified if, during frost periods, higher room temperatures ("18 °C") are desired. During the heating season the amount of water vapor in the outside air (the absolute air humidity) is low. Thus, any kind of room heating leads to a need for humidification in order to maintain a given relative humidity when maintaining the room temperature against a falling outside temperature (which also means falling outside absolute humidity). Heating the bulk of the room air, however, leads to an additional need for

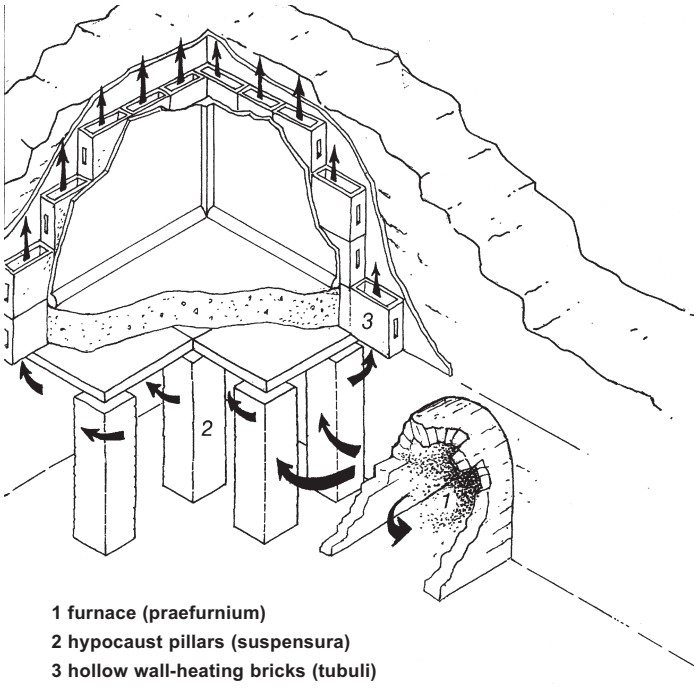


Figure 5:
Hypocaust heating, functional scheme.

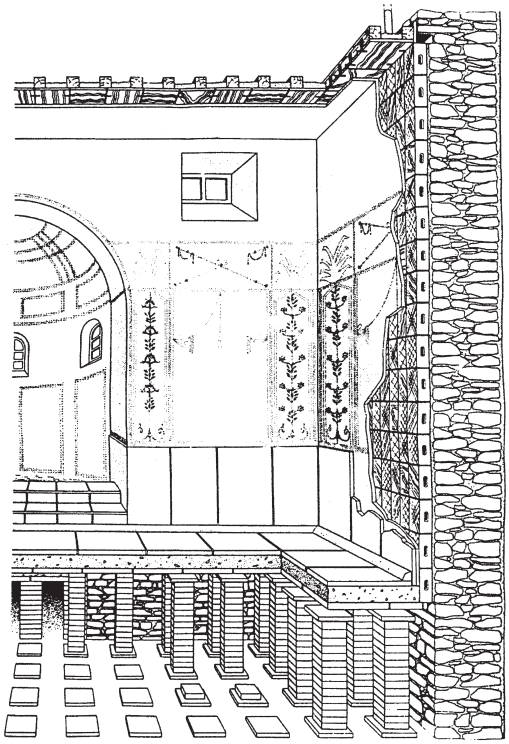


Figure 4:
Roman baths in Weißenburg, reconstructed cross-section of the northwest corner of the caldarium.

Figures 4 and 5: Moisture protection and room heating 2000 years ago: tempering of the building envelope using hypocaust heating — no plaster or wall-base damage due to moisture. From: Führer zu archäologischen Denkmälern in Bayern, Franken 1, Stuttgart 1984, p. 71.

humidification, because the pressure of the room air is higher than that of unheated room air (radiation heating) or that of the air in summer (when the outer absolute air humidity is high). With air heating, the air – since it is the heating medium – has a temperature of 30 to 40 °C in the upper part of the room. This causes higher air exchange (higher ventilation heat losses) and, thus, (compared to radiation heating) a greater amount of water vapor is carried away with the warm air lost to the outside through building joints and openings. This vicious circle is aggravated further, when higher values of RH ("55%") are aimed at, as the higher absolute humidity achieved by humidification means that colder locations and artifacts near them are made even damper by (invisible) capillary condensation in joints and material pores. At considerably lower surface temperatures – given the same absolute humidity – (visible) condensation occurs on the surface (for microclimatic measurement examples, see the article by Ranacher).

For the case of unheated room air (radiation heating), the interdependence of the demand for artificial humidification, room temperature, and desired RH can be illustrated by the following examples (see Fig. 7): A climate value pair of 18 °C and 55% RH corresponds to a humidity ratio of 7.1 g of water per kg of air, whereas at 18 °C and 40% it is only 5.2 g/kg. If, during the short periods with the lowest outside temperatures, 15 °C were allowed, the humidity ratio would be only 4.2 g/kg at 40%. If one takes the outside humidity ratio to be 0.8 g/kg, which would be the case for -15 °C and 90% RH, in the first case 6.3 g of water per kg of air would have to be added by humidification but only 3.4 g/kg in the latter case.

With wall-base heating tubes, due to the planar vertical (2-D) geometry of the heating surface (strip of plaster), there is only a slow one-dimensional (upwards) convective flow in the boundary layer (Coanda effect), which covers the whole wall surface since the heating tubes run the entire length of the bottom of the wall, and thus heats the complete wall surface. Furthermore, the physiological inconvenience of drafts and the constant manipulation of the breathed-in air are eliminated.

4.3 Hydrogen bonding

The invisible wetting of the "inner surface" of hygroscopic materials, capillary condensation, occurs even "on surfaces" (at boundary layers – which means also the inner surfaces of the capillaries) which are only a few K colder than the room air, due to the adhesive force resulting from the bipolar form of the water molecule (hydrogen bonding, see Fig. 8). But, for the case when the "inner" surfaces of walls and artifacts attached to them are equally warm or slightly warmer than

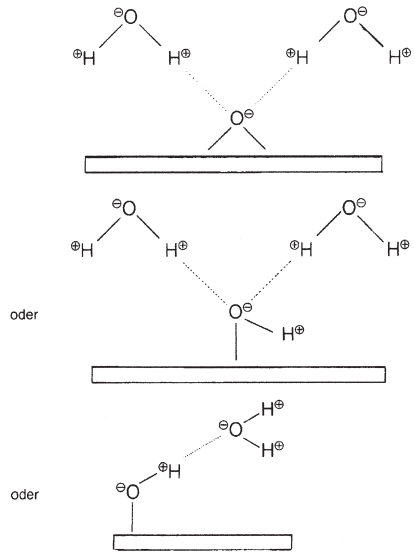


Figure 8:
Hydrogen bonds on hydrophilic surfaces
The rectangles represent three examples of the "inner surface" (capillary wall) of porous mineral materials (masonry, plaster, etc.) with possible forms of the adsorption of water molecules through formation of a hydrogen bond.

Through a slight temperature rise, i.e. due to a slight increase in the vibration of the molecules of the material including the bonding partner on the capillary wall, these weak bonds can be broken (start of the drying out of the material due to slow expulsion of the water molecules along the temperature gradient) or their formation can be hindered (elimination of rising and condensing moisture).

Drawing from Torraca, G.: Porous Building Materials. Vienna 1986, p. 13f

the room air ("wall heating"), the wetting effect of hydrogen bonding is greatly weakened or even eliminated. So, when – instead of heating the room air – the inner sides of the exterior walls of a room are heated ("wall heating" in winter) the kinetic energy of the bonding partners (atoms and molecules of the "inner surface" of the materials) is higher than the bonding force. This, in fact, is a weak force that can be broken even by the small rise in temperature of walls heated by the Coanda effect.

5. Climate guidelines based on experience

Based on long-term observations by the Landesstelle, which are increasingly being confirmed by the literature in the field, the following guidelines for climate planning can be given. These guidelines, which also apply to museums without specially trained personnel, hold up in everyday operation. They are summarized under the premise of a tempered building envelope with sealed joints, aiming at the goals of "meeting conservational requirements," "lowest possible energy use," and "minimizing the use of equipment."

5.1 Rooms without extended occupancy

For open air museum buildings and museums which are closed in winter, the guidelines for rooms without regular or extended occupancy are that, in the course of the year, the room temperature and the RH may vary slowly between the freezing point and 27 °C as well as between 40% and 70%. In particular, the values for RH are valid only for "wall heated" rooms, where the wall temperature is higher than the air temperature so that at no point is the temperature lower than the room (air) temperature (measured in the middle of the room), so that the relative humidity measured at that one point is not exceeded at any other point. Furthermore, considering already existing mold or rust, the relative humidity should only rarely reach the upper boundary and should not remain there for several weeks. During the majority of the time with high outside absolute humidity (i.e., summer), the room RH should be kept under 65% through moderate heating, which by itself prevents new mold formation as well as the growth of existing mold and enormously slows down the build-up of rust. This summer heating is usually only necessary in ground-contact rooms and in buildings with very thick walls, where a need for summer heating also exists from a physiological point of view.

5.2 Continuously occupied rooms

For storerooms with work areas that cannot be separated from the storeroom area and for "normal" museums, which are open during winter, the guideline is that (for physiological reasons), at the lowest outside temperatures, the room (air) temperature should only rarely fall below 15 °C. With "wall heating," such room conditions should be suitable for "walking" persons since the stagnant or only slightly moving room air reduces heat loss from the body's surface. Additionally, the perceived temperature is higher than the room (air) temperature because of the greater amount of heat radiated from the walls (particularly the bases). As with other kinds of room heating, when it is freezing outside or when room use requires higher air exchange rates, "wall heating" also creates a demand for humidification, but it is considerably lower than with "air heating." For large buildings, which have maintenance staffs for humidifiers or air conditioners, 16 °C should be allowed as the low temperature limit, in order to minimize the humidification demand and reduce energy costs. The humidity limits and restrictions given in Section 5.1 are equally valid here.

Following these guidelines enables energy-cost-intensive air dehumidifiers to be avoided and eliminates most of the need for air humidification. The upper temperature limit valid for summer should be reached as seldom as possible and should not be surpassed at all. This, however, should not be achieved through energy-cost-intensive cooling but rather, independent of mechanical equipment,

through improving the buffering effect of the building envelope, including external sun protection, and through reducing the heat dissipated by artificial lighting. If these guidelines are realized in connection with the minimal climate technology described below, a narrow short-term fluctuation band (max. 0.5 K and 2% RH per hour) can be maintained under everyday conditions. This was impressively shown by measurements in the Kunstforum Ostdeutsche Galerie in Regensburg, which were conducted as part of the PREVENT Project (see the article by Kotterer).

6. Minimal climate control technology

Given a building envelope that follows the guidelines presented in Section 3.1, the equipment for storerooms and museums required for low-cost climate control can usually be limited to three simple types: light protection (6.1), control of air exchange (6.2) and tempering (6.3). Section 6.3 also shows how to meet higher temperature requirements, i.e. how to heat assembly rooms, dwellings, and office buildings using tempering.

6.1 Protection from light

Only three key points with regard to protection from damages due to light will be mentioned. In storerooms and exhibition rooms, the highest possible reduction of the annual exposure to light must be strived for, particularly for uncovered freestanding objects made of organic material. This can be achieved through two simple measures: by excluding daylight completely outside of times of use and by maintaining light intensity, measured at a level of 2.5 m, below 300 Lux (paper and textiles below 100 Lux) during times of use. The radiation emitted by the room lighting should have as low a proportion of short wavelengths as possible, especially UV radiation. This can be achieved with existing lighting, which emits too much short wavelength radiation, if only reflected light is allowed into the exhibition level (no metallic reflecting surfaces). Finally, the heat load from artificial lighting and from daylight should be kept as low as possible. Simple measures for this have already been discussed in Section 3.1. To avoid the need for cooling, which is physiologically unfavorable and causes high installation, maintenance, and energy costs, the installed power of the artificial lighting must not exceed 20 W/m² (!) and measures for attenuating the impact of solar radiation through the transparent parts of the building envelope are indispensable. If outer shading is not possible, more complex measures, e.g. between the panes of the double-glazed windows, are indispensable (see the article by Huber).

6.2 Control of air exchange

A fundamental prerequisite for controlled air exchange is sealing the joints of outer doors and windows and installing an airlock entry. If this is done and if the above mentioned measures against inner and outer heat loads are also realized, ventilation can be performed with one or more low peak capacity (e.g. ca. 400 m³/hr) exhaust fans, depending on the size of the building, whose task is to assure a minimum air exchange rate of between 0.1 and 1 ACH. The fans can be mounted in a chimney, window, or the ceiling (with roof access) and should be operated only when needed, regulated by the user via a speed controller (see next paragraph and Section 6.2.1). The RH in the building changes only slowly under these circumstances. The small return flow of outside air needed for these low air exchange rates can flow through window and door seals, whose locations have been carefully chosen: The fans should be located opposite to where the replacement air enters, so that a "flushing" of the whole room (or a sequence of several rooms) occurs. Thus, windows close to the fan must be sealed. Furthermore, the joints through which the incoming air flows should be located so as to produce as low as possible dust and pollutant loads on the room air, e.g. facing away from the street to an inner court or park (for more on the theme of "natural ventilation" see the article by Käferhaus on Schönbrunn Palace).

As a rule, the ventilating fans will be operated continuously only in the beginning. For example, if before storing artifacts or mounting an exhibition it is necessary to remove building moisture or if the material humidity of objects to be stored must be reduced to a normal value, which is possible in a gentle way with the aid of the radiation from the warm walls (see Section 8). Later operation of the ventilating fans, instead of window ventilation, can be limited to strictly occupancy dependent needs, i.e., the actual need when people are present (the fresh air requirement for light activity is ca. 1 m^3 per person per hour). Thus, sudden change of the relative room air humidity can be avoided while air replacement at a rate sufficient for a small number of people takes place. Experience also shows that in summer, by limiting the air exchange rate to a maximum of 1 ACH, ventilation can be used for natural cooling during the night without sudden climate changes occurring.

These statements as to the amount of time the ventilating system must be operated are valid for all kinds of buildings and use, including buildings with central ventilating systems, if the building envelope is optimized according to Sections 3.1 and 6.1 and if the building is heated with tempering.

6.2.1. Air humidification and dehumidification

The second element of "minimal climate control technology" is a small air humidification capacity in the form of one or a few air humidifiers. These should work on the principle of evaporation because of the lower potential for damage: In contrast to other processes, if the regulating system fails, there is no fear of exceeding the upper humidity limit. Since during the heating season the need for humidification is fundamentally lower with wall heating than with other kinds of heat distribution, because it avoids heating the air, simple low-capacity humidifiers are sufficient, if cleaned regularly, particularly if water vapor losses can be further reduced by carefully tracking down and sealing leaky building joints. Thus, humidifiers that are clearly under-sized by usual standards should be purchased. If the humidifiers are already on hand, they should be operated at a low output setting. Then they operate more continuously and thus short-term fluctuations in humidity are lower.

During times of high outside absolute humidity (summer), "summer tempering" keeps the temperature of critical parts of the building, such as the cellar or ground floor, equal to that of the uncritical upper floors, which follow the mean outside temperature "without heating," simply by accumulating solar radiation. With summer tempering the temperatures in the whole building follow the mean outside absolute air humidity, so that equipment for air dehumidification is not necessary anywhere. This also goes for a cellar in a hill or a housed excavation. Based on the premise that the slowly varying climate changes during the course of a day (see Section 3.2.2.) are conservationally harmless, dehumidifiers are also not needed in buildings with high occupancies, e.g. museums with high numbers of visitors. The as-needed operation of a minimal ventilation system can remove a sufficient amount of the water vapor given off by people, preventing the upper air humidity limit from being exceeded.

6. 3 tempering

The third element of "minimal climate control technology" or the simplest way to profit from the advantages of the 2000-year-old principle of Roman hypocaust heating tempering. Depending on the planned capacity, a wide range of goals can be achieved:

- protection of historic buildings, open air museum buildings, or housed excavations from damages due to humidity, in general, and to salts from the ground, with advantages for the historic furnishings also
- sensible heating of huge volumes like churches, with advantages for their murals, altar pieces, and organs

– stabilization of the room climate of museums and storerooms in the simplest possible way without the need for climate zones (the museum as a "giant showcase")
– heating of dwelling or office buildings, including the stairwells, so that all rooms on all floors are comfortable (see Fig. 6).

In all cases, the goal must be a clearly raised temperature at the base of the wall. This may be due to the high temperature of two surface-mounted painted tubes in contact with the wall and the lower temperature of the strip of wall behind them, or to the medium-high temperature of the strip of plaster covering a plastered-over pair of tubes (plaster thickness in front of the forward-most edge of the tubes: 15 mm ± 5 mm). Only so, in addition to earth-contacting wall bases being dried out, is the main phenomenon necessary for heating of the whole wall surface strong enough: limited but continuous convection in the wall-air boundary layer. Convection strong enough to heat the whole wall surface occurs only with a surface temperature at the wall-base that is clearly higher than that of the rest of the wall and the room air (e.g. 25 K higher for plaster over the tubes or 35 K higher for bare tubes on the plaster) depending on the goals described above and on the outer temperature, see Fig. 9). For the situation represented in Fig. 9, with the 10 cm high strip of plaster over the tubes having a mean surface temperature of 40 °C, 40 W/m is "transferred into the room" (see Fig. 10).

Under these conditions, this alternative type of wall heating offers important advantages compared to other modern forms of wall heating: the installation can be restricted to one or two tube loops at the wall base, without additional thermal insulation and without any restriction on the placement of furnishings (other than a gap of 15 mm to the wall). Other better-known forms of wall heating, which ignore both boundary layer convection and the improvement of the U-value, are based either on a layer of thermal insulation and a grid of many

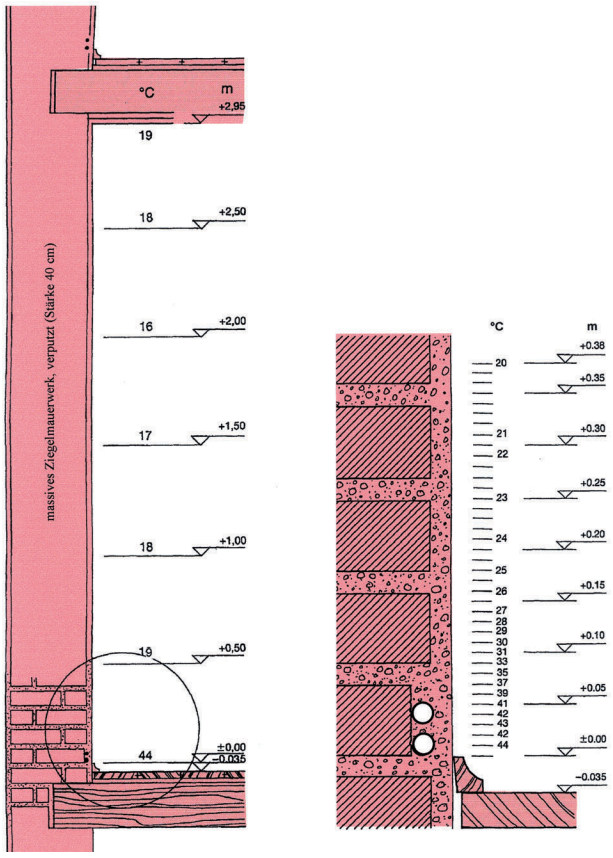


Figure 9:
Temperatures on the inner surface of a tempered outside wall
Measurements using an infrared thermometer.

Outside temperature – 10°C (tree at height of 1.8 m), room temperature 20.5°C (table top in middle of the room), Massive masonry outside walls (~1800 kg/m3, 40 cm thick), pipes under plaster of ~20 mm thickness, average hot water temperature 60°C (at the manifold for the given floor 63/57°C).

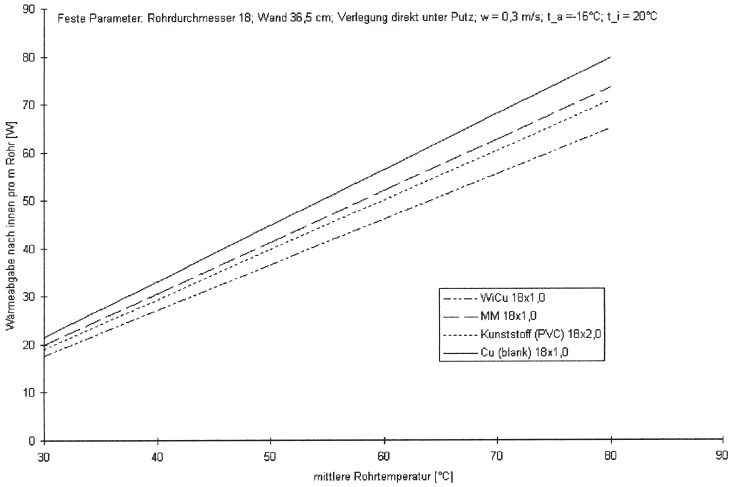
-The surface temperatures above the wall base (drawing on the left) are the result of continuously rising warm air, whose amount depends on the surface temperature of the pipe covering.

-The surface temperature of the strip of plaster in front of the pipes (drawing on the right) is ~20 K lower than the average water temperature, due to the poor thermal conduction of the material (typical for dry mineral materials!) for only 2 cm thickness despite continuous operation. Thus: "plaster thickness maximum 15 mm!"

-Thermography of the outsides of walls with heating pipes on the room side does not show the location of the pipes, despite high heating water temperature. This confirms the high thermal insulation capability of dry mineral materials (see Figs. 15 – 20 in the German version).

Drawing Rudolf Werner, Landesstelle für die nichtstaatlichen Museen in Bayern, Munich

Figure 10:
Heat transfer of various heating pipes installed directly under the plaster. From [4]
-Bare copper has the best heat transfer for the smallest external diameter.
-According to calculations based on unchanged wall moisture content, for a mean temperature of 60°C, the Cu tube (Ø 18 mm) emits 56 W/m.
-Thanks to the high thermal insulation of the dried-out wall, the performances are higher than calculated so that for a smaller pipe diameter, a similar performance will be achieved (e.g. 50 W/m for bare Cu (15 mm) and a minimum mean temperature of 60°C.



tubes per m², which is not allowed to be "shaded" by furnishings, or – as at the beginning of the "tempering age" – consist of double-wall shells, formed by adding a thin inner wall to the outside wall, the gap being heated by a band convector (location of furnishings not restricted).

The heat from the uniformly heated surface(s) of the exterior wall(s) is radiated toward the rest of the room, i.e. in the direction of the other portions of the room envelope and its furnishings. If this heating is performed at the exterior walls of all rooms of the building, the complete building envelope is heated, which results in a uniformly heated building. Combined with controlled, occupancy-dependant, low-level air exchange and external solar radiation protection for the windows, the whole building's relative humidity is also nearly uniform so that it functions as a "giant display case."

6.3.1 Planning of tempering systems

6.3.1.1 Thermal emissivity

To create functional security for tempering systems, in which both heating tubes under plaster and routed in the open (example on rafters in a roof) occur and for clarifying the question whether the thermal insulation of feed lines routed in the open is necessary, it is helpful to compare the thermal emissivity of various materials, with which the different strength of their thermal radiation will vary. Among crystalline materials, polished nonferrous metals are "bad" radiators. Mineral materials and materials with an amorphous structure, however, radiate more strongly. In the following the thermal emissivities of three important materials for "radiation heating" will be compared to a black body, which will make apparent the great difference in their thermal radiation:.

- black body.....1.0
- bare Cu (depending on how dirty).....0.05 – 0.15
- plaster, paint or clear lacquer on the same tube .....0.93 – 0.96

The practical importance of these values for "everyday heating" is only visible through measurements with a "passive" infrared thermometer, which is available for € 130. Contrary to the many times more expensive professional instruments, these do not measure the temperature of a surface with a measu-

ring beam but rather measure the thermal radiation emitted by the surface, which depends on the emissivity of the surface, and displays a temperature in °C. This instrument makes possible two important basic statements: For distant measurements it shows the combined effect of the various radiation heat sources on a single point in the room (e.g. where a person is sitting), while through exact orientation with the laser pointer the individual sources can be distinguished (plaster strips in front of tubes as well as painted tubes, wall surfaces above these, windows, lamps, etc.). For close up measurements, the actual heat radiation of the individual surfaces depending on surface material will be displayed. In the latter case one learns:

- For the same surface temperature a bare copper tube is "insulated" while nonmetallic surfaces "heat."
- The radiation from pipe insulation with a plastic jacket or a painted sheet metal jacket is the same as that from an uninsulated bare copper tube.

While stainless steel like copper belongs to the "bad" radiators (full power only after painting or under plaster), the radiation from iron pipe increases in the first weeks after installation due to patina formation. Thus not only the heating tubes but also the feed lines should be bare copper, starting at the heat source. The extra price for copper will be compensated by being able to do without the pipe insulation that the usual iron pipes require.

6.3.1.2 Transmission heat loss

With radiation heating, the heat loss due to the thermal transmission of the building shell can be estimated with a simple formula, previously used for sizing tile stoves, which gives the loss per m² of outside wall. One observes that the heat loss with radiation heating (= dry evenly-heated wall surface) decreases with increasing wall thickness or that a wall made of a nonporous material loses less heat than a wall of the same thickness made of a porous material. The formula is:

$$Q_T = (\lambda_{dry}/d)\ \Delta T_{max}\ ,$$

where λ_{dry} is the thermal conductivity of the wall material when dry, d is the wall thickness in m, and ΔT_{max} is the maximum temperature difference between inside and outside. If one supplements this formula with an additional factor, the room height h (in m), one gets the heat loss per meter of wall, W_{loss}:

$$W_{loss}\ [W/m] = h\ (\lambda_{dry}/d)\ \Delta T_{max}\ .$$

The comparison of this result with the heat given off per meter of heating loop, according to Fig. 10, allows one to answer the question, "How much heating performance per meter of outside wall is required?" Or put another way, "How many loops operating at what foreline temperature are required?" The result is sufficiently accurate for high-density walls (above 1400 kg/m3). The capacity required for the heat source is estimated as the product of the total pipe length (pipe length per m of wall x inside circumference of floor x number of floors) times the required heating capacity per meter of wall. In dwellings the result is rounded up so that, with boilers for combined space and hot water heating, enough capacity exists for rapidly heating the hot water.

As an example, the heat loss per meter outside wall of a rental building typical of 1900, with 50 cm thick outside walls of stuccoed solid brick (2000 kg/m3), sealed kastenfensters up to 1.2 m wide, and a room height of 3 m will be assessed. Maximum temperature difference (ΔT_{max}) is 35 K (outside: -15 °C, room: +20 °C); 0.4 W/m-K will be assumed for the thermal conductivity of the dry wall material (λ_{dry}):

$$W_{loss} = (0.4\ /\ 0.5)\ x\ 35\ x\ 3 = 84\ W/m\ \text{(per m wall!)}.$$

Experience shows that this heat loss can be compensated by a single standard heating loop (two tubes, foreline and return line, return above foreline), which can produce 100 W/m. With such a minimal installation, it is recommended to detour the return line up to the underside of the windowsill under each window or to install it at this height in the whole room (see Fig. 6d). One can reduce the ca. 65 °C foreline temperature required to obtaining 100 W/m from one meter of loop (= 2 m of tubes) by mounting extensions of the return line in the sides of the widow openings (see Fig. 6d). If one loop at the wall base and another at windowsill height (with return line detours into the sides of window openings) are used, a foreline temperature of 50 °C will scarcely ever be reached. For direct heating of high-density outside walls, a more exact differentiation between porous massive building materials, such as brick, and pore-free materials, such as granite, is not necessary because a similarly large reduction of the heat loss results for both. In the first case due to the water being driven out of the pores by tempering and in the second case due to the raising of the "AC thermal resistance" thanks to the high average wall temperature that results from long-term tempering.

6.3.2 Installation of wall-base tempering

Heating loops are normally installed at the bases of the inner sides of all exterior walls, consisting of a "foreline" tube (going away from the source) and a "return line" tube (returning to the source), mounted with the return line above the foreline (Ø = 12 – 22 mm), while a single tube is installed at the base of both sides of partition walls standing on soil. The single tube traverses from one side of the partition wall to the other through a hole drilled through the wall near to an outside wall and thus runs along both sides of several inside walls (see Fig. 6).

The best material for "active" heating tubes, i.e. for tubes which heat the surrounding material, is bare copper, due to its extraordinarily high thermal conductivity, its easy handling, and its comparatively small bending radius. Furthermore, copper tubes (with soldering fittings, see below) need only narrow grooves for installation under plaster because of their minimal wall thickness (1 to 1.5 mm for diameters of 12 to 22 mm). The use of copper in modern heating systems does not create the danger of corrosion in contrast to its use in water supply systems. There are two distinctive differences. First, the tubing of modern heating systems is sealed against the atmosphere and – except after (re-) filling – do not contain fresh water with new oxygen and new salts from the ground. Thus, the water in heating systems is "dead" water and inner corrosion for all materials is suppressed, even with the usual combination of ferrous and nonferrous metals. Second, a heating tube not in use cannot get colder than the material in contact with it. So, the plaster around heating tubes does not become wet due to condensation as it does with uninsulated fresh water tubes. Thus, corrosion of the outer surface of bare copper heating tubes in houses is also impossible, whether plastered over or free on the wall's surface. This does not apply to iron pipes, whose surface has to be protected. The corrosion resistance of copper heating tubes applies even under the plaster of earth-contacted walls, where no damage could be found after long nonfunctional periods, e.g. after one year.

In large halls and churches, a roll of soft copper tubing is advantageous for mounting under plaster, since it can be easily mounted using a tubing bender. In rooms of houses, one prefers straight pieces of tubing (5-m lengths). For best contact, for wall-surface installation, and to avoid an unnecessary plaster thickness for under-plaster installation, the connections (fittings) have to be solder fittings because their diameter only slightly exceeds that of the tubing, whereas the diameter at both ends of press fittings is about 8 mm greater than that of the tubing. The fittings are soft-soldered with electric soldering pliers, thus avoiding material embrittlement and the danger of smoke and fire, disadvantages of hard soldering with a flame.

AFigures 11 – 14:
Optimal pipe locations for thin walls or for foreline temperatures <50°C (compare to Fig. 6d). With this arrangement a tubing diameter of 15 mm is sufficient, so that with the use of solder fittings no slits need be made in the wall, rather for tubes installed on the unplastered wall a plaster thickness of 15 mm is satisfactory (see Section 6.3.2, p 23). Drawings Heiko Folkerts, Bernried

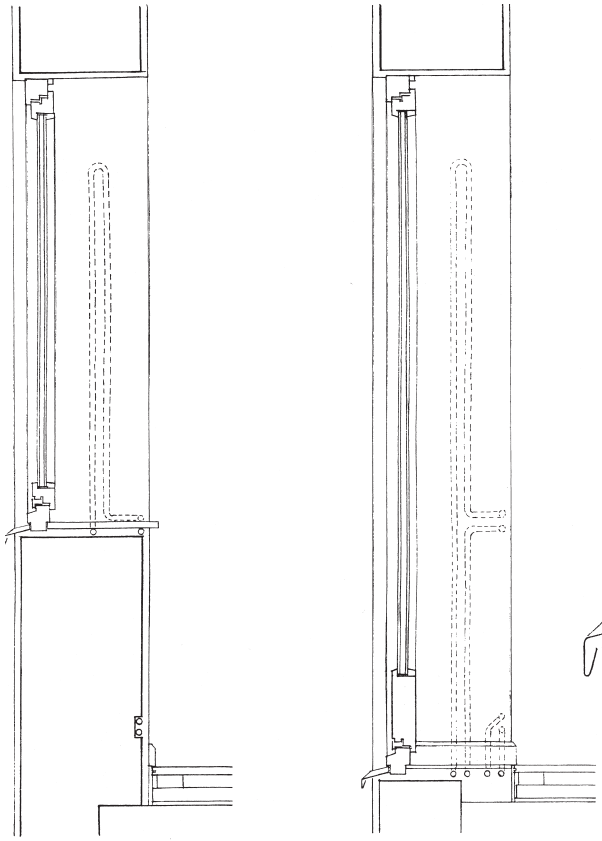
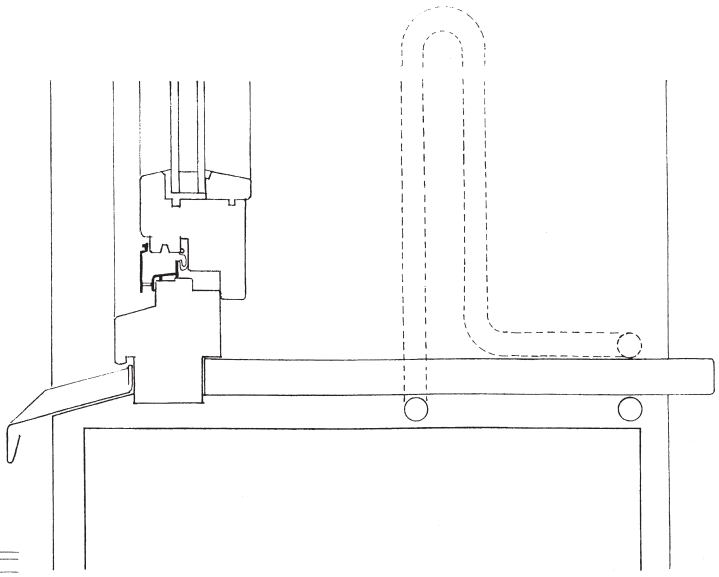
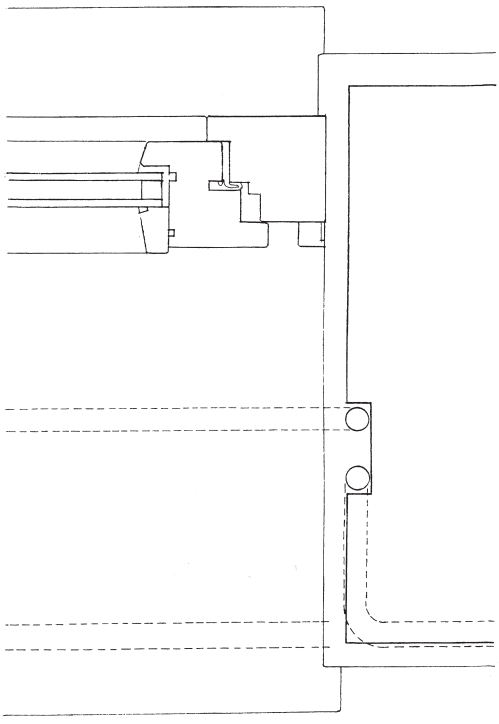


Figure 11:
Window and door axis (section) with wall-base and windowsill-level loops under plaster. M 1:20

Figure 12:
Windowsill (section) with windowsill-level loop (return line detours in the plaster of the sides of the window openings). M 1:5





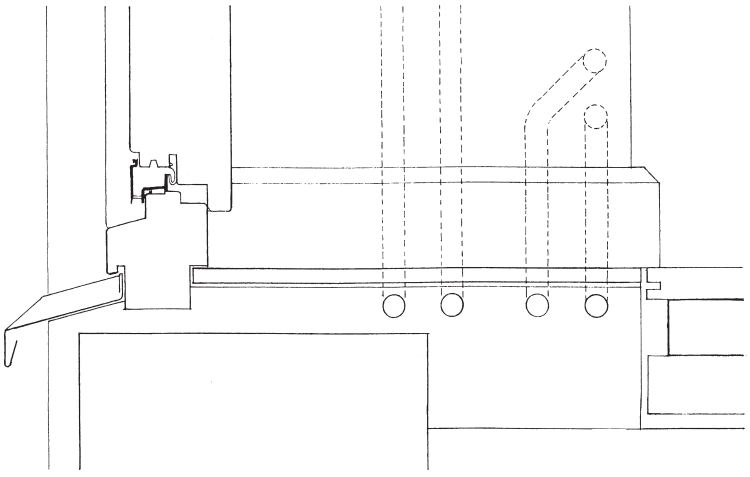


Figure 13:
Windowsill (top view), underneath the windowsill-level loop in contact with it (section of return line detours in the plaster of the sides of the window openings). M 1:5

Figure 14:
Door threshold (section) with the detours from wall-base and windowsill-level loops in the plaster of the sides of the window openings. The loops cross the threshold under a tile cover. Wall thickness 40 cm, stone windowsill 25 mm thick; floorboards on crossed joists. M 1:5

For installation both on the wall surface and under plaster, the tubing is mounted using pipe hangers (for single tubes) or double-tube clamps (for a pair of tubes). To avoid an unfinished appearance (open mounting) or unnecessary "buckles" (under plaster mounting), both mounts consist of galvanized steel without the usual elastic inserts. Three reasons allow direct contact of the mounts with the tubing:

- Without moisture, there is no risk of the development of a galvanic cell. In contrast to a coldwater tube, which is colder than either the wall material or the room air, a heating tube cannot get colder than its surroundings. Thus, (capillary) condensation occurs neither on the surface of the bare tube nor on its plaster covering.
- The temperature change, and thus movement, of a copper heating tube in contact with a massive (high heat capacity) material with temperature changes of the heating water is minimal due to the high thermal conductivity of the tubing and the buffering effect of the massive material-
- Contact with a massive material suppresses vibrations and thus noise due to the streaming medium.

For installation on the wall surface, the tubing needs to be forced into contact with the wall, so that as much heat transfer as possible occurs through conduction, except for smaller irregularities of the wall surface, which get heated by radiation. For adequate radiation intensity, surface-mounted tubing must be painted (e.g. with wall paint), since this raises its thermal emissivity, and thus the amount of heat radiated, by a factor of eight! On the other hand, copper tubing without a heating task (e.g. hanging from the ceiling in the boiler room without physical contact) needs no thermal insulation if left bare. (The heat emission from the surface of 60 °C bare copper tubing is the same as that from the surface of normal thermal insulation of the same tubes, when this surface is not a reflecting metal sheet or foil.) Both the function and the appearance of tubes mounted on the wall surface can be improved if the cavities between tube and wall are filled with normal fillers (aiming for a straight groove) before the tubing is painted.

For installation under plaster, the same mounting devices are used as mentioned above, again without elastic inserts, here to avoid the need for a thicker layer of plaster. Given solder fittings, the heating tubes are covered with a maximum of 20 mm of plaster (15 ± 5 mm) after being installed in a groove either in the plaster or the wall material (for a loop with two 15-mm diameter tubes, the groove is about 7 cm high, and 3 cm deep). For mounting on top of masonry that afterwards will be plastered, a total plaster thickness of 20 mm (for a 15-mm tube) or 25 mm (for an 18-mm tube) is sufficient, (e.g. a first layer with the thickness of the tube diameter followed by a thin second layer). For historic buildings where no groove in the wall material is possible, out of respect for the wall decoration, and the tubes are to be mounted at the wall-base only, they can be covered with plaster or concrete that tapers outward toward the bottom or is rectangular so that it forms a "plaster baseboard," which can be painted to resist wet cleaning, or covered with a thin tile.

The temperatures occurring in conventional heating or tempering systems do not affect plaster materials. Even gypsum plaster in contact with tempering tubes with a water temperature of 70 °C does not decompose [3], whereas until now it was assumed that dehydration is unavoidable at temperatures over 60 °C (for lime plaster see below). The risk of cracking of plaster in contact with heating tubes is not due to the temperature of the tubes but to their elongation with increasing temperature, which must not be hindered. Since the thermal expansion for copper is only 0.017 mm/(m-K) – so that the elongation of a 10-m tube for a temperature increase of 60 K is only 10 mm – cracking can easily be excluded if small cavities to accommodate the expansion are created in the wet plaster at the outer sides of all bends. This is possible if some simple advice is followed:

– The first step is a preheating period of several hours with the whole system at ca. 70 °C. This shows whether the connections are tight and all loops are functioning properly (no air enclosures). Further, a first drying effect on the wall's surface is achieved. The latter is more intense if the tubing is washed over with mortar water ("slurry"), increasing its thermal emissivity similar to painting, for in this transitional phase the tubing transfers heat only by radiation.
– Then follows the forming of the cavities in the plaster, room-by-room, beginning by closing the thermostats of the loops in a room. When the temperature of these tubes has dropped to human skin temperature (about 30 °C), over each bend of the tubing a batch of plaster is applied and smoothed until it is as thick as the lateral edge of the tube. Then each loop is heated for some minutes (inlet temperature at least 65 °C) by opening the valve until the return temperature is at least 50 °C. Thus, the sides of the bends are pressed into the soft plaster. In this simple way, cavities are formed which allow the elongation of each section of tubing during operation. After reaching the 50 °C return temperature, the valve is closed again so the plaster batches do not dry too fast.
– Immediately after the plaster at the bends is dry, the plastering of the grooves or the wall can begin, with the inlet temperature to the tubes set at about 30 °C. Due to the above mentioned points, there is no need for special plaster material or for any fabric to hold the plaster over the tubes, either because of corrosion, which occurs only with cold water tubes (due to condensation), or tubing temperatures or temperature changes, since space for elongation of the tubes has already been created and the plaster is not affected by the temperatures used.
– Whenever plastering over cold tubes (e.g. when the heat source is not yet available) a 15 mm wide by 20 cm long strip of insulation material (height according to tube diameter) has to be added before plastering at each change of direction on the outer side of the bend.

In rooms without temperature requirements, the heating tubes can also be mounted in the joint between the wall and floor covering or – one besides the other – directly under the floor covering (if it is mineral and not thicker than 3 cm!), with the first tube in contact with the wall. This applies to rooms with a height of up to 4 m and is independent of the outside wall thickness. For this case, where the emphasis is on conservation of architecture and stabilization of the RH at mean values, outside wall loops can be very long: Because of heat accumulation in the drying wall material around the tubes, one loop can supply several rooms on one side of a building.

In rooms with higher temperature requirements, the loop must be mounted above the floor covering, potentially covered by a strip of ceramic material (max. 2 cm thick), and the length of the loop should not exceed the length of the outside walls of 3 rooms. In the case of wooden baseboards, the loop must be mounted above the upper edge of the wood. In earth-contact rooms with wooden floor coverings, installation of an additional single-tube loop beneath the floorboards, at all wall bases at the height of the outside ground, guaranties a thermal barrier against rising dampness, independent of the height of the wooden floor and baseboard above the ground level.

In office buildings and dwellings, every room usually gets its own loop. Here, it is preferable to mount the tubes at two levels. For an exterior wall thickness of 40 cm or more, one loop is sufficient, if the return is mounted at the height of the lower edge of the windowsill, with detours along both sides of the windows (if possible in the sides of the window openings). For a wall thickness less than 40 cm, two separate loops should be installed, one at the wall base and one at the windowsill level (see Figs. 11 – 14). The above-mentioned detours along the windows, now made by the return tube of the second loop, are indispensable in half-timbered houses (or buildings with less than 20 cm wall thickness). This

Figure 6:
Examples of pipe placement

F Foreline
R Return line
OW Outside-wall loop
PW Partition-wall loop (in basements: for high-value applications; in ground floor rooms: for floors in contact with earth or outside air, or over unheated basement)

Foreline temperatures are given for routine operation over the course of a year, after the drying out phase which is performed at maximum foreline temperature

Lower foreline temperatures (< 50°C) and smaller pipe diameters (15 mm) are possible with a doubling of the pipes shown in 6d (loops at both wall-base and windowsill levels, with detours of the windowsill-level return line into the sides of the window openings)

Visible installation: tubing in contact with wall, painted

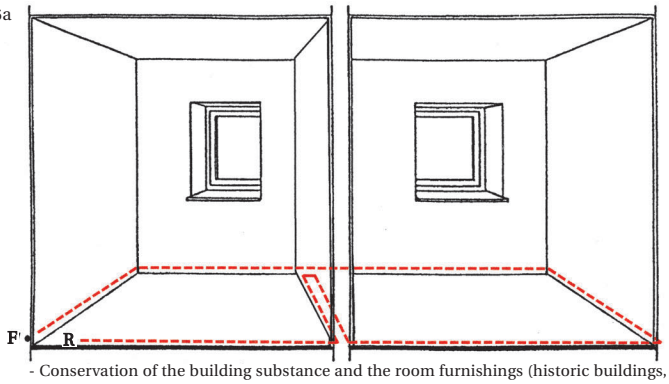
Invisible installation: only for mineral coverings (max. 1.5 cm plaster or equally thick stone chair rail molding; for wooden chair rail moldings, locate tubes above)

Separation of the pipes in loops = closest placement allowed by the solder fittings (soft soldering)

Tubing material: optimum performance with bare copper (for Cu heating tubes corrosion protection is not necessary)

Drawings Rainer Köhnlein, Landesstelle für die nichtstaatlichen Museen in Bayern, Munich and Michael Kotterer, Regensburg.

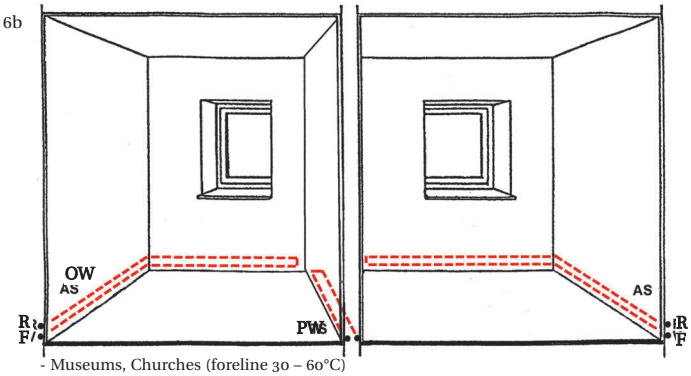
6a



- Conservation of the building substance and the room furnishings (historic buildings, exhibited buildings in open air museums, housed excavations; foreline ~ 30°C)
- Elimination of dampness and heating of cellars (foreline 30 – 40°C)

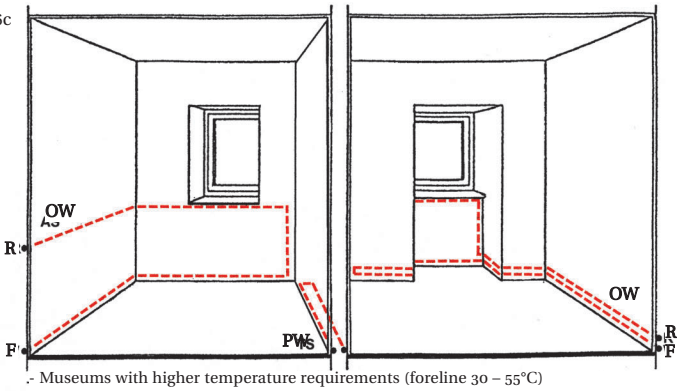
Ring layout shown is sufficient for half of the cellar of a single family house

6b



- Museums, Churches (foreline 30 – 60°C)
- Dwellings (wall thickness above 60 cm; foreline 30 – 65°C)

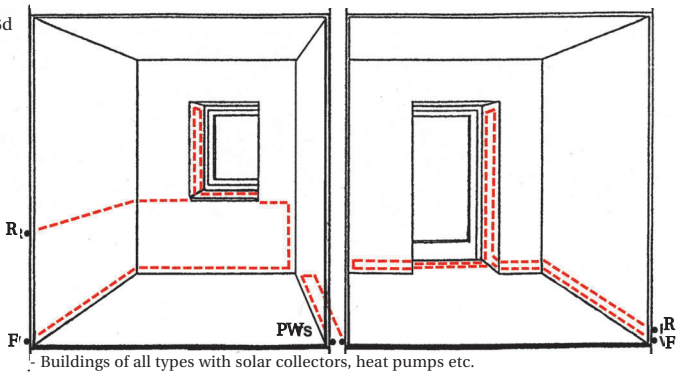
6c



- Museums with higher temperature requirements (foreline 30 – 55°C)
- Dwellings (wall thickness between 30 and 60 cm; foreline 30 – 65°C)

Windowsill level tubing in contact with the underside of the windowsill

6d



- Buildings of all types with solar collectors, heat pumps etc.
- Dwellings (light construction: porous wall materials, half-timbered, glass facades, foreline 30 – 65°C)

optimal installation (4 tubes plus detours on both sides of the windows) allows maximum foreline temperatures under 50 °C, which means return line temperatures under or about 40 °C. Thus, the advantages of new boiler designs can be realized and the contribution of solar collectors over the heating period can be considerable.

With ceiling-high wall paneling, if there is at least a 15-mm gap between it and the wall (allowing the warm air to rise behind the paneling so that a convection cell can form), for conservational purposes it is sufficient to mount a painted heating tube loop on the wall behind the baseboard of the paneling. This is because, by heating the whole shell, the protected warm air rising in the hollow space compensates for the radiation absorbing effect of the wooden baseboard. In living rooms, a second loop at the level of the windowsills should be added, if the paneling can be removed without damaging it. In any case, the tubes have to be in contact with the wall, with the wood kept at least at a distance of 5 mm. For walls without plaster, the tubes then have to be mounted in the joints of the masonry).

With only chest-high paneling, it is recommended to install the return line tube either on top of its upper edge, in contact with the plaster and painted, or in the plaster directly above or behind the horizontal wooden strip at the top of the paneling, so that from this second area of heat accumulation additional convection can occur, which heats the remaining portion of the wall. In order to prevent damage due to excessive dryness on the backs of paneling, showcases, or cupboards positioned close to the wall, 6-cm high strips of reflecting foil can be mounted on them, centered on the height of the heating tube runs. This dryness can occur because, when it is freezing outside, the surface temperature of the tubing, or its plaster covering, is much higher than the temperature of the air rising along the wall surface. This applies particularly if the tubing is installed on top of the plaster.

6.3.3 "Radiators"

In general, for dwelling or office room conditions in rooms with a continuously operated wall-base heating loop, "radiators" can be connected directly to the loop piping, because of the low additional heat demand, but only in the form of a single and purely radiating plate, without additional structure for enhancing convection. When radiating plates are installed, the functioning of the heating loop must remain independent of the setting of the radiator control valves. This "minimal heating system" (a pair of continuously heated, uninsulated, wall-base heating tubes whose temperature can vary only slowly and which extend the complete length of the outside walls of a room, with additional radiating plates beneath every window that can be switched on or off) is sufficient for producing, in a short time and in the simplest way, temperatures high enough for dwelling and office rooms.

An additional loop for supplying these radiating plates is not necessary since, shortly after running the wall-base tubes for the first time, the thermal conductivity of the wall material in their vicinity is reduced considerably due to drying out. After a period of 10 to 20 hours, through heat storage, the temperature spread (the difference between fore- and return lines) is reduced so much that enough reserve remains for additional radiating plates to be switched on. With loops of up to 30 m in length, a spread of less than 10 K occurs. Thus, if during continuous conservational operation (such as controlling the climate of a room) the heating tubes were at temperatures of, e.g., 38/30 °C, due to its "mean radiation temperature" of about 34 °C, the radiation plate would supplement the existing radiation from the wall base, so that the already "tempered" room would feel more comfortable. When it is freezing outside, by raising the water temperature, the loop can give higher performance within some minutes, thanks to the existing stored heat, so that at the wall base as well as at the radiator an increase of the surface temperature can occur rapidly.

6.3.4 *Regulation*

The hardware required for tempering is, due to the physics of the tempering process, very simple. This also applies to regulation of the temperature. If one builds a temperature limiter into the return line of each loop, at the return manifold or another location close to the end of the loop, then one gets self-regulation of the "wall/heating-tube system" at the set temperature, at a cost of about € 40 per loop. Since the heating water is cooled less if the heated area absorbs "external heat," the thermostat reduces the water flow accordingly. Since the heat flow to the area heated by a heating tube drops immediately when external heating occurs, heat starts to accumulate and thus the temperature starts to rise quickly in the vicinity of the heating tube. This applies in reverse if the outside temperature drops suddenly. Thus, contrary to common opinion, the regulation of tempering reacts in the short-term. However, because of the heat storage capability of the wall (its thermal inertia), room temperature does not change rapidly, so that sudden large increases or decreases of the heating water temperature are not required.

In this context, the generally bad experience with cost intensive electronic regulation technology ("control boxes"), which has become standard today, must be pointed out. On the one hand, optimum functioning of tempering technology for the lowest energy consumption is guaranteed only if energy can be stored from performance overshoots, which are prevented by continuous regulation. On the other hand, the self-regulating effects discussed above, in connection with slowly varying boiler regulation through an outside temperature sensor located under (!) the outside stucco of the north facing wall, lead to only gradu-ally varying room temperatures, with a maximum variation of 2 K during the course of a day. Such variations are irrelevant both conservationally and physiologically. But only this method of operation, through use of physical effects, leads to an energy consumption which is usually lower than with conventional heating processes and which cannot be reduced any more through complicated regulating processes.The often assumed delayed reaction of tempering is thus restricted to those situations where, as is the case when the heating is turned off temporarily or reduced nights and weekends, discontinuous operation aimed at saving energy gives up the advantage of stored heat.

6.3.5 *Energy consumption*

That the "reduced heating" in buildings with massive construction is not energetically sensible was shown in the Waldstraße School in Hattingen (built 1880 with 50 cm brick walls, Ú = 2000 kg/m3). Two-thirds of the building (all classrooms) is tempered with heating tubes. During the years 1996-1997, the city could not determine any energy savings with reduced heating nights and weekends, compared to the recommended slowly varying continuous operation. Further, the average energy consumption of the years since 2000 lies at about 18 kWh per m3 per year (see Table above), which means, that the requirements of the energy saving regulations are met by tempering alone (without thermal insulation of the heavy masonry walls or the old double windows – "kastenfenster" – having been repaired).

	1st heating period 9/96–9/97	1997 – 2000 (average of 4 years)	2001
Radiators/Convectors kWh/m3·a	35,97	24,61	20,58
Tempering kWh/m3·a	21,39	18,21	18,05
Heating Degree-Days	4.093	3.296	3.410

Source: City of Hattingen 3/2003

Table
Energy consumption in a school (building envelope with heavy masonry)

6.3.6 *Thermography*

In the above-mentioned textbook can be found a sentence regarding the calculation of the ceiling temperature for ceiling heating under flat roofs that is astounding for the usual heat loss calculations based on U-values. "In consideration of the relatively low number of very cold days and the storage capability of concrete ceilings, it is sufficient to use a (lowest) outside air temperature of -5 °C for the calculation." This is in agreement with the observations that could be made during the thermography of the outer surface of the outside walls of a tempered single-family house in Lengdorf, Bavaria, which was performed from 5:45 to 6:30 on 5 March 2002 at an outside temperature of -4.5 °C (Figs. 15 – 20). For only 26 cm thick uninsulated concrete walls that were heated with two heating tube loops with 60 °C foreline temperatures from early evening on, with the infrared camera one could indeed observe strong radiation from the outer surface but no variation in the amount of radiation that would indicate the location of the heating tubes on the inner surface.

The suspicion that thermographs, taken before dawn, of monolithic external walls with heating tubes on the inner surface do not show transmission losses but rather the re-radiation of the solar radiation absorbed during the previous day became firmer when the same wall, continued on unheated as a courtyard wall, in the same thermograph, was colored-coded yellow rather blue or black (Fig. 17: West wall of the courtyard, continued as west wall of the atelier, before sunrise). Also to see in the thermograph, a blue color-coded porous brick wall (heated in the same way) shows no lighter stripes in the tube area, but one can make out the joint network around the block surfaces. The plaster on the mortar of the horizontal joints and the massive perpendicular edges of the stones radiated lighter than those on the porous brick surfaces. More dimly, these details could also be seen on the north side (Fig. 20). Such color differences, which appear regularly on thermographs of tempered buildings, can only be explained by the fact that high-density (thus poor U-value!) mineral building materials, whose pore humidity is maintained under their "practical moisture content", store substantially more of the solar radiation energy and after the radiation ends re-radiate it much more slowly than less dense materials. Historical building and heating technology (high density materials with hypocaust wall heating or tile stoves) always result in direct solar energy use. This statement applies also to massive wood construction (log houses).

Thermographs of monolithic external walls with heating tubes on the inner surface, taken before dawn, do not show the positions of the heating tubes, which one would expect based on the high U-values of masonry walls or concrete. Comparison of the heating water temperature and the surface temperature of the plaster layer covering the tubes (see Fig. 9, right) shows that this is impossible (20 K lower temperature on the surface of a 20 mm thick plaster layer). Instead of seeing heatloss from the room's heating system, one sees the re-radiation of the solar radiation absorbed on the day before, which is of various intensities depending on the density of the (inthe heated case dry) walls and their average temperature (heated/unheated). This was confirmed by heat flux measurements (see Mauerbach), there: a) no higher heat transmission was seen at the heating tube level than at 30 cm higher; b) the solar energy gain of the directly heated outside walls was higher than that of an identical outside wall of a room heated with radiators!

Photos author; drawings Heiko Folkerts, Bernried; Thermography Thomas Böttler, Miesbach.

Figure 15:
Single-family house in Lengdorf, Bavaria, with courtyard and service buildings (atelier and garage) from the west. Courtyard, atelier, and garage walls of 26 cm concrete; atelier wall with 2 tube loops and without thermal insulation.

Figure 18:
Single-family house in Lengdorf, Bavaria from the north Courtyard and ground floor entry walls of concrete (26 cm thick); entry wall with 4 individual tubes and without thermal insulation.

Figure 16:
Schematic diagram of the routing of the heating tubes on the inside of the west wall of the atelier
(painted tubes in plastic clips with 1 cm gap to painted concrete wall surface)

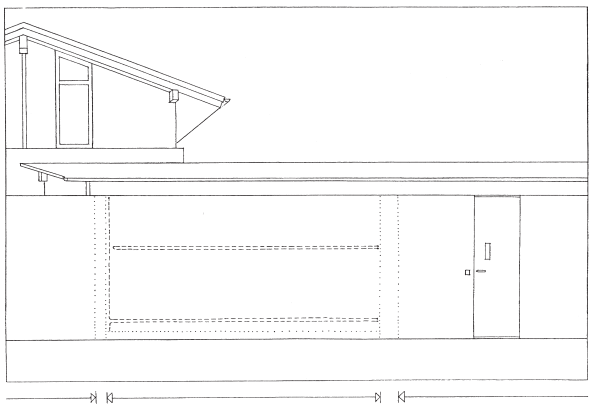


Figure 17:
Thermograph of the outside of the west wall of the courtyard, atelier, and garage (5-03-2002, 5:55, -4.4 °C; clear night after a sunny day, heating tubes operated since 18:00 of the previous day with Tm = 60 °C). The atelier wall appears a nearly homogenous white thanks to a long period of radiation. There are no lighter stripes discernable at the two tube levels. The colors of the remaining walls correspond to their mass density. Thus the courtyard wall (freezing cold air on both sides) is yellow, the wall of the unheated garage red, the light construction wall (above the windowsill level of the upper story) dark blue, the porous brick wall supporting it light blue, and its top green (higher storage mass due to mortar filling of hole ends). The upper loop is mounted 20 cm below the windowsill under plaster.

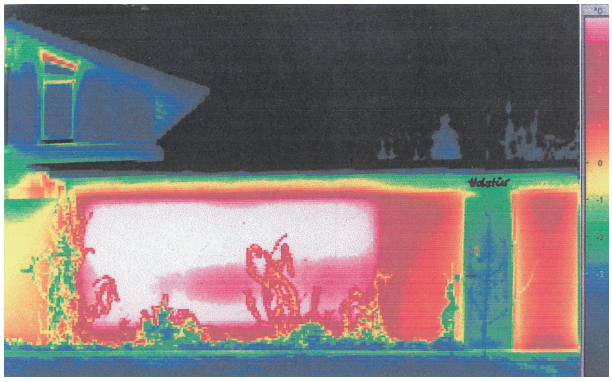


Figure 19:
Schematic diagram of the routing of the heating tubes on the inside of the north wall of the ground floor entry
(painted tubes in plastic clips with 1 cm gap to bare concrete wall surface behind the wardrobe).

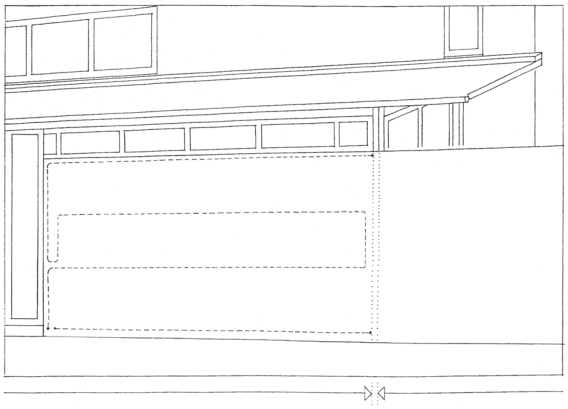


Figure 20:
Thermograph of the outside of the north wall of the courtyard and ground floor entry (5-03-2002, 6:30, -4.3 °C; dawn after a sunny day with clear night, heating tubes operated since 18:00 of the previous day with Tm = 60 °C). No lighter stripes discernable at the 4 heating tube levels of the ground floor wall. The dry concrete wall of the entry appears a homogeneous red. The courtyard wall (surrounded by freezing air) is green, the light construction wall on the upper floor is dark blue, analog to the west side.

Thermography of the remaining north wall, where the heating tubes are under plaster, shows similar results.

6.3.7 *Extreme example of "minimal tempering"*

An extreme answer to the question of "how long – for conservational purposes – can a tube loop be" is the museum in Ratibor Palace in Roth near Nuremberg. On the third floor, which has wood paneling reaching to the level of the windowsills, box windows (original lead glass windows outside and newer windows inside, both without seals) and a loam-filled ceiling under an uninsulated roof, a 75-m-long outside-wall loop of bare copper tubes with a diameter of 18 mm (foreline and return line each 37.5 m long) supplies all seven rooms on the north side, including the tower, and a further 70-m loop the six rooms on the south side. For an outside temperature of -15 °C, a room temperature of 8 °C can be maintained. This result is amazing not only because of the building characteristics and the length of the tubes, but also because the conditions for heat transmission from the tubes are bad: All tubes are bare and simply lie between the edge of the

Figure 21:
Alf Lechner Museum, Ingolstadt (northwest side). The space between the added glass façade (with entry) and the preexisting structure connects the air volumes of the ground and upper floors (12,590 m^3).

Figure 22:
Alf Lechner Museum, Ingolstadt (southwest side)
The rear-ventilated cladding has a gap of 25 cm to the outside wall.

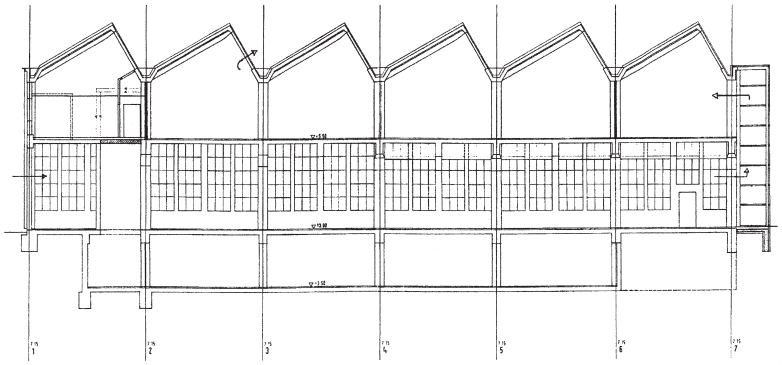


Figure 23:
Alf Lechner Museum, Ingolstadt (cross-section). The basement (1/3 of the floor area) lies northeast of the ground floor central row of columns. The flow of ventilating air is shown by the arrows.

Figure 24:
Alf Lechner Museum, Ingolstadt (inside view of the glass façade looking southwest). The gap between the glass façade and the preexisting structure forms a 10 m high shaft that is without hot-air currents in the heating season.

Photos of Figs. 21, 22, 24 und 20 by Michael Heinrich, Munich, the rest by the author.

wooden floor covering and the outside wall, below the level of the lower edge of the paneling. Thus, there is almost no physical contact so that the conduction path to the bulk of the wall is minimal, and internal radiation behind the paneling is severely reduced because the emission of bare tubes is 8 times lower than with painted tubes.

A further reduction in performance is caused by the surface temperature of the base of the paneling being low, which reduces both radiation into the room from the base and convection at the surface of the paneling. So, for hard frost, the temperatures at the distribution manifold are 70 °C (foreline) and 50 °C (return). The foreline temperatures could be lower or the room temperature higher if the foreline tube were in contact with the wall, plastered over or painted, and the return line tube were mounted above the upper edge of the pane-

Figure 25:
Alf Lechner Museum, Ingolstadt, Ground Floor.
Part of the central pillar loop (Ø 18 mm): the foreline (painted) is in physical contact with the joist and the north and south sides of the pillars, in each case changing from one to the other side at the pillar base in the screed. The return line (unpainted) was shoved into the cavity of the joist.

Figure 26:
Alf Lechner Museum, Ingolstadt, Upper Floor.
Wall pillars with sample for the sawtooth roof beam heating loop; at the wall base 2 heating tube loops before the "baseboards" are concreted in place: below the wall base loop (Ø = 18 mm), above the feed lines (Ø 22 mm) for the sawtooth roof beam loops.

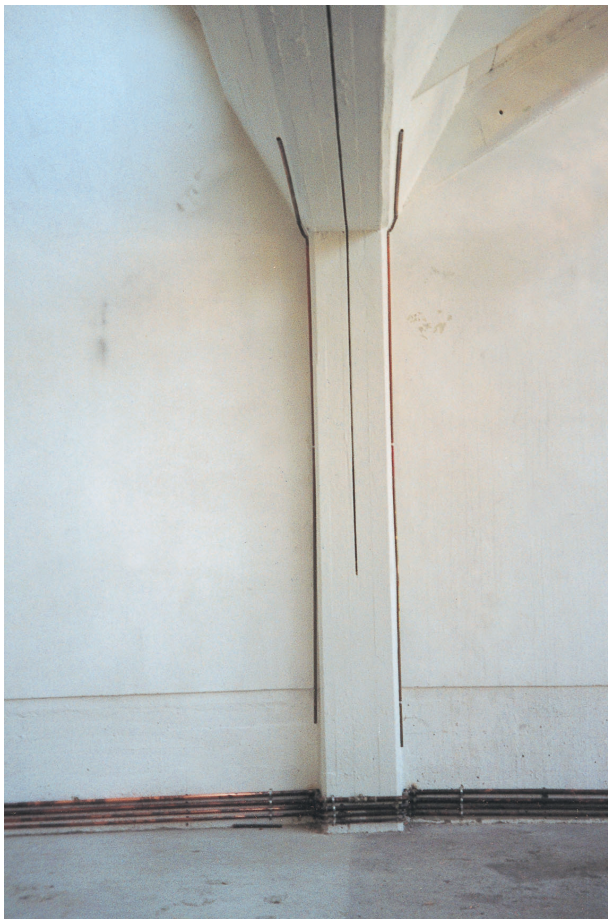


Figure 27:
Alf Lechner Museum, Ingolstadt, Upper Floor, View to West. .Part of one of the two heating loops on the beams supporting the sawtooth roof (Ø = 18 mm, in physical contact, painted): The single heating tubes above the lower edge of the concrete beam change at the central pillars to the other side of the beam.

Figure 28:
Alf Lechner Museum, Ingolstadt, Northeast Corner of Glass Façade , from inside. In the corner post are the feed lines to the two tube loops of the façade (Ø = 18 mm) at the heights of the floors (ground floor: 3rd and 4th horizontal steel U-beams, upper floor: 6th and 7th horizontal steel U-beams of the framework for supporting the glass. All tubes are painted and held in place by plastic clips. Left: ground floor loop foreline (in lower U-beam) and return line (in upper U-beam).

Figure 29:
Alf Lechner Museum, Ingolstadt, Ground Floor. Southwest wall, with wall-base and windowsill-height heating tubes (Ø = 18 mm), before the window niches were plastered and the concrete "baseboards" were poured.

ling, visible but painted or under the plaster. Due to physical principles, however, and despite all of the flaws, the main goal is achieved, namely the storage of heat in the masonry of the outer walls, which prevents the floor from getting cold. The case is an exemplary demonstration of how little the field of heating is oriented towards the phenomenon of heat storage, which small but continuously operated heating systems can produce.

7. An Important Example of a Minimal Facility

Alf Lechner Museum, Ingolstadt – Renovation and remodeling of an industrial building as a low-budget project with minimal moisture control and thermal insulation measures and minimally invasive housing systems technology (opened 2/2000).

The former automobile assembly building is a two-story 1950s concrete-skeleton industrial building with 24 cm thick aerated concrete infill, a basement under about one third, single-pane steel-framed glazing on the ground floor (3/4 room height), and an aerated concrete sawtooth roof on the upper floor with single-pane glazing. A new glass façade, supported by a post-and-beam steel frame, was built about three meters in front of the old northwest wall, which was removed from both stories, combining them into one gallery space. The gaps between the façade and the roof and the ends of the old walls were also filled with the glass-steel construction. Rear-ventilated metal cladding was installed on the three remaining outside walls, for hiding the windows and the rain gutters (distance from wall, 25 cm). (Figs. 21 - 24).

With a total heated volume of 13,600 m³, the museum includes, in addition to the two-story gallery for exhibitions (12,560 m³), a multi-function area on the upper floor (875 m³), with 2 offices, bath, and large workroom, as well as functional rooms in the basement (1280 m³), with a workshop, restroom facility, technical room (10 m²), and side rooms. Of the total cost of € 1.02 million, the most expensive items were the glass façade and the ventilated metal cladding.

Thanks to the building physics effects of the wall heating, thermal insulation and moisture control measures could be minimized. These were completely omitted in the earth-contacted areas of the building (2/3 of the ground floor area and the entire shell of the basement, normal concrete without a moisture barrier or thermal insulation). At the wish of the architect, the concrete outside walls each received a 1 meter high, 10 cm thick strip of thermal insulation where ground floor and first floor begin, the sides of the sawtooth roof received 2 cm, and the opaque roof areas and the retained ground floor glazing 10 cm. The window openings of the 2nd floor were filled with brick (1200 kg/m³). The glazing of the sawtooth roof was replaced with insulating glass (k = 1.5 W/m²·K), which was also used for the glass façade.

The ventilation system (€ 2556) consists of 2 exhaust fans with multi-leaf dampers in the glazing of the sawtooth roof at the southern end of the upper floor hall (max. air flow volume 2 x 3000 m3/h) and 2 fresh air multi-leaf dampers in the southern ground floor outer wall (air flow between the floors is through the broad gap to the glass façade, see flow arrows in Fig 23).

The heating system (net cost of € 36,046) consists of an area heating connection (€ 7055), a substation with regulation (€ 9561), and the tempering system (€ 19,429), whose heating tubes (uncoated copper, 18 and 22 mm diameter) have a total length of 1124 m, including manifold tubing. At the massive exterior building elements the tubing loops are mounted with physical contact, both under plaster: at the base of the massive outside walls (ground floor: return tube detours into the niches with windowsill contact, Fig. 29), as well as on plaster and painted: on the second floor, on both sides of the wall pillars and the beams supporting the sawtooth roof (Figs. 26 and 27), and on the ground floor, a single tube on both sides of the 6 pillars and under the hollow joist returning in its cavity (Fig. 25). In the glass façade, the tubing loops are mounted thermally separated, one loop for each floor, with each tube located in a separate horizontal U–beam of the glass façade (Fig 28). For an average tube temperature of 70 °C, the maximum specific heating capacity is ca.65 W/m (see Fig. 10). With 1124 m of tubing, this is equivalent to 73 kW or 5.4 W/m³ of finished volume.

Since November 2000, a minimum room temperature of 19 °C has been maintained in the heating season with this low maximum heating capacity with unusually low energy consumption. Thus the project, with its total heated volume of 13,600 m³, of which 12,590 m³ extends over two stories, is an impressive example for how far both heating and plumbing costs can be reduced with realization of all of the physical effects of the heating-tube tempering method and proper planning of the tube locations. As in this example, thermal insulation of earth-contacted walls and floors, including floating screed, is also not needed for new construction. For at least 19 °C, the yearly specific heating energy consumption was 20.4 kWh/m³ in the 2nd year of operation, for 3956 heating degree days (HDD), and 18.2 kWh/m³ for the 3rd year (3,723 HDD), thus showing the energetic importance of physically sensible heat distribution. A further tested example over two winters is the Kulturspeicher in Würzburg, which has a heated volume of 50,000 m3, of which ca. 40,000 m³ is continuous over three floors during the day because the doors of the exhibition rooms are open to the staircase (160 m long!). The minimum temperature of the building is 18 °C. There a minimal tempering system (2 heating tubes on all wall bases) was also sufficient and insulation of the basement floor (160 m long!) was not necessary.

8. Compact storage units and wall-base tempering

The optimal furniture for storerooms are roller shelves or compact storage units. In conventionally heated or air-conditioned storerooms in basements, however, these devices turn out to be "critical" pieces of furniture, whereas in wall-base heated basement rooms a closed compact unit can be positioned even in close vicinity to the exterior walls. This is not possible with "normal air conditioning," because the air that is conditioned by the "air machine" neither reaches into the closed roller-shelf unit nor is it able to heat the walls surrounding it. Thus, the walls stay cold and the disadvantage of cool room envelope surfaces is not compensated. For this reason, compact storage units are usually placed at great distances from the walls in rooms of heavy wall construction or in basements, so that expensive space remains unused. One often even hesitates to close the units in such rooms; the seals are removed or the individual compartments are kept at a distance from each other so that "the air is able to circulate." Only so, however, can the danger of mold growth be reduced – by giving up the dust protection. The confusion that results from considering only the symptoms is demonstrated by the fact that manufacturers often offer units with large holes in the sides, the "seals" now functioning only as shock absorbers.

If, however, the surfaces of the walls which surround such roller shelves or any other piece of furniture are heated directly and are kept warm, heat will be radiated from the walls to the furniture (without detouring through the bulk of the room air). Thus, no matter how big the storage unit might be, even if it filled the whole room, after some time there would be a uniform temperature, equal to the room temperature, whose direct result would be uniformly reduced RH inside the units, corresponding to that of the room air. Accordingly, the humidity of the material would also be reduced gradually and gently, throughout the whole cross-section, without the need for air constantly circulating between the stored goods (see Section 8.1). Thus, the material is gradually dried out, so that after a while the process continues with less energy consumption.

It must be emphasized again that, with tempering systems, the distance from the wall of furniture, roller shelves, and other objects is determined only by the fact that, for the wall surfaces to be tempered, small amounts of warm air must be able to rise continuously within the gaps, since there are no wall registers, rather only one or two heating tube loops installed in the wall base. Room for these warm air currents, however, is guaranteed if the gap is in no case less than 2 cm. In exceptional cases, that which was mentioned with regard to "paneling" in Section 6.3.2 (p 26) applies here also: in order to avoid the more intensive impact of radiation from the warm strip in the area of the tubes at maximum mean water temperature, it is sufficient to mount a strip of cardboard or of radiator reflection foil on the side of the piece of furniture or object at the appropriate height.

8.1. Normalization of the equilibrium humidity of stored artifacts by means of tempering

If one, on the one hand, wants to avoid cost intensive "climate control systems" while, on the other hand, normalize the material humidity of stored artifacts in a conservationally convenient way, it is actually only a question of slowly raising the temperature of the surfaces of the walls surroundings the inventory, because the material achieves this temperature equally slowly. Thus, the equilibrium humidity in the material gradually decreases without stress occurring at the surfaces of the objects.

In the long run, a lower but at the same time homogenous material humidity, throughout the whole cross-section of the stored artifacts is achieved so that, in the total collection, not only the activity of microorganisms and biological growth comes to a halt, but new occurrence of any forms of growth is also impossible. Furthermore even the conditions for insects ("wood worms") become less favorable: on one hand due to the lower material humidity, on the other hand due to the lack of cold periods between fall and the beginning of the heating

season, during which the formation of pupae necessary for reproduction would take place. During such a phase of "humidity normalization," the collection should be loosely placed. The compartments of compact storage units should be kept separated. While monitoring the RH, the continuous transport of the moisture emitted from the material must be guaranteed by ventilation. A low cost and at the same time safe solution is maintaining a constant, minimal air exchange rate (between 0.1 and 1 ACH) by means of an exhaust fan with speed control, as described in Section 6.2.

These findings show clearly the general importance of a "radiation climate," not only for the storerooms and for permanent exhibition areas in museums but also for buildings and uses of any kind.

9. Ignorance of the facts of physics by theory and state of the art

What has been said so far explains the fact that, for the time being, in the areas of room heating, air conditioning, and restoration/prevention of damage due to humidity or salt, standard theory and practice do not sufficiently take into account the facts of physics – in particular the effects of heat radiation. For that reason "all encompassing" and thus low cost concepts, as shown here, are rare.

References:

[1] JAN HOLMBERG, Relative Humidity in Historic Houses, Museums and Museum Storage Rooms, a Literature Study, 1st Swedish Contribution to the EUROCARE Research Project EU 1383 PREVENT, Technical University of Vienna, Vienna 1996.

[2] GARRY THOMSON, The Museum Environment, London ^{2}1986.

[3] Claus-Peter Berneth, Wandstrahlungsheizung – für Sanierung und Neubau. In: Deutsche Bauzeitung (2004) Nr. 1, S. 73.

[4] MARKUS ENGELBRECHT, Tempering – an Alternative Heating System, Diplom-Thesis, FH München 1995/96.

Jochen Käferhaus

Kontrollierte natürliche Lüftung und Bauteilheizung als probate Mittel der Schadensprävention am Beispiel von Schloß Schönbrunn.

Abstract

Durch genauere Klimamessungen, ergänzt durch Untersuchungen zum Luftwechsel des Gebäudes (Tracer-Gas- und a-Wert-Messungen) und CO_2-Messungen, wurde der für Baudenkmäler mit starker Besucherfrequenz wichtigen Frage nachgegangen, ob die an Raumschale und Ausstattung beobachteten Klimaschäden, wie allgemein angenommen, durch direkte Einwirkung des Besucheraufkommens (bis zu 10.000 Besucher pro Tag) hervorgerufen werden. Es gelang zunächst der Nachweis, daß die *unkontrollierte* natürliche Lüftung, die durch die Fugen der nicht abgedichteten Fenster und Außentüren im Zusammenspiel mit den historischen Lüftungskaminen entsteht, bei geringer Windbelastung einen einfachen Luftwechsel hervorruft, der konservatorisch unbedenklich ist und eine ausreichende Lufterneuerung auch bei größeren Besucherzahlen gewährleistet. Stärkere Windbelastung aber, und willkürliche Fensteröffnung durch das Personal, insbesondere wenn auch die Treppenhaustüren geöffnet sind, führen zu Luftwechselraten bis zum fünfzehnfachen, so daß wesentliche Klimastörungen entstehen, deren Folge die beobachteten Schäden sind.

Das in einem ersten Bauabschnitt realisierte Gesamtkonzept zur Prävention kombinierte die Temperierung der bis zu 5 m hohen Räume durch Sockelheizrohre (mit denen eine Mindestraumtemperatur von 17°C gehalten und die Wandfeuchte von fast 10% auf 1,5% gesenkt werden konnte) mit der „kontrollierten natürlichen Lüftung". Diese wurde mit Hilfe von möglichst einfachen Maßnahmen angestrebt: Abdichten der Fenster, Reaktivieren der bestehenden Abluftkamine in den Raumwänden, Ergänzung dieser Kamine durch Brandschutzklappen (um ihre Wirkung auch unterbinden zu können) sowie durch zugverstärkende Ventilatoren (deren Stromerzeugung durch Autorotation in einem Display anzeigt, ob sie aktiviert werden müssen), Reaktivieren der Zuluftkamine in den Treppenhäusern, deren Frischluft herbeigeführt wird über einen unterirdischen „Luftbrunnen" (ein wiedergefundenes eh. Bewässerungssystem von ca. 270 m Länge), der dank seiner Temperaturkonstanz im Sommer zur Kühlung und Entfeuchtung, im Winter zur Aufwärmung und Befeuchtung der Frischluft genutzt werden kann.

Dieses Konzept, mit dem über den größten Teil des Jahres ausreichende Raumklimaverhältnisse erreicht werden, könnte mit einfachen Ergänzungen wie einem Wärmetauscher (um im Hochsommer die Luftbefeuchtung durch den Erdkanal ausschalten zu können) und einem Bypass (zur direkten Frischluftansaugung) optimiert werden.

Controlled Natural Ventilation and Wall Heating
a Tested Method of Damage Prevention
as demonstrated in the example of Schönbrunn Palace

Through more exact climate measurement, including measuring the building's air exchange rate (tracer gas and a-value measurements) and CO_2 measurements, an important question for historic buildings with a large number of visitors was investigated: Whether, as is generally accepted, climate-caused damages to furnishings and room surfaces are caused by the direct effects of visitors (up to 10,000 visitors per day). It was possible to demonstrate that *uncontrolled* natural ventilation, which occurred through unsealed windows and

outer doors together with historical ventilation shafts, resulted in one air exchange per hour at low wind levels, which is conservationally harmless and guaranteed a satisfactory air exchange rate even for large numbers of visitors. Stronger wind levels, however, and arbitrary opening of windows by personnel, particularly when the doors to stairwells were open, led to air exchange rates of up to fifteen times per hour, so that significant climate changes occurred, whose result are the observed damages.

Our complete concept for prevention, realized in a first renovation phase, combines tempering of up to 5-m high rooms through wall-base heating pipes (with which a minimum room temperature of 17°C could be maintained and the wall humidity could be reduced from almost 10% to 1.5%) with "*controlled* natural ventilation." Ventilation is controlled using the simplest possible measures: sealing windows, reactivating the existing exhaust shafts in the room walls, adding fire dampers (for cutting off the air flow) as well as airflow-enhancing fans (whose electrical current production due to autorotation shows on a display whether they need to be activated) to the shafts, and reactivating the fresh air shafts in the stairwells, whose fresh air comes from an underground "air fountain" (a rediscovered, approximately 270-m long, former watering system), which thanks to its constant temperature can be used for cooling and dehumidification of the fresh air in summer and warming and humidification in winter.

This concept, with which satisfactory room climate conditions are reached for the largest part of the year, could be optimized with simple additions such as a heat exchanger (to be able to avoid air humidification due to the earth channel in midsummer) and a bypass (for direct fresh air intake).

1. Einleitung und Projektentwicklung

Der folgende Beitrag ist eine Zusammenstellung der Forschungsarbeiten des Autors, tlw. mit Co-Autoren, die dieser innerhalb der letzten zehn Jahre im Rahmen seiner Untersuchungen zur Schädensprävention in Schloß Schönbrunn gemeinsam mit dem Bauherrn erarbeitet und niedergeschrieben hat. Die Arbeit betrifft ausschließlich die mikroklimatische Schadensprävention. Dabei zeigt sich einmal mehr die Problematik, daß in historischen Bauten das Zusammenspiel von Bau und Haustechnik eigenen Gesetzen folgt und konventionelle Haustechnik, wenn sie „gegen" das Gebäude eingesetzt wird, nicht zu optimalen Ergebnissen führt. Man erkennt, daß möglichst wenig, dabei nur sinnvolle und notwendige Haustechnik eingesetzt werden muß und daß Schäden an den Kunstwerken auf Dauer nur im Zusammenspiel mit dem Gebäude und bei richtiger Betriebsführung verhindert werden können.

Musterbeispiel ist das schwedische Schloß Skokloster, gebaut von Carl Gustav Wrangel, in dem seit dem 30-jährigen Krieg Kunstschätze jeder Art ausgestellt sind, ohne jegliche Haustechnik und Heizung (die Ausstellung ist im Winter geschlossen), ohne daß wesentliche Schäden auftraten, obwohl es auch in Schweden Sommertemperaturen von über 30°C und Wintertemperaturen von unter –20°C gibt.

Warum wird also andernorts so aufwendige Technik eingebaut, die viel kostet, hohe Betriebskosten und Wartung fordert, meist ein Eigenleben mit der eingebauten Regelung führt und bei Ausfall der Versorgung steht und Schäden auslöst. Ist es da nicht sinnvoller, für Kunstdepots von vorne herein einfache „passive" Maßnahmen vorzusehen wie: Bevorzugung schwerer Baumassen, hygrisch ausgleichende Wandbeschichtungen, natürliche Schachtlüftung, Erdwärmetauscher, richtige(Kasten-)Fenster, richtige (äußere) Beschattung, Klimaschleusen, etc. und mit „warmen Wänden" und kontrollierter Lüftung, „richtiger" Regelung, die als Führungsgröße die Raumluftfeuchte nimmt, mit „richtiger" Beleuchtung etc., also mit einfachster und kostengünstiger Haustechnik ein Mikroklima zu schaffen, das extreme Werte puffert und Fehlsteuerungen und Ausfälle toleriert, dafür aber mit minimalen technischen Interventionen auskommt?

Architekten, Haustechniker und Restauratoren bemerken immer mehr, daß konventionelle Haustechnik, wie sie für ein Bürohaus oder eine Schule geplant wird, in historischen Bauten versagt. Erst das Studium historischer Haustechnik, die simple physikalische Gesetzmäßigkeiten wie Auftrieb und Strahlung nutzt, zeigt, daß diese gerade in historischer Bausubstanz einen wesentlichen Beitrag zur Schadensprävention erbringen kann, wie die folgenden Beispiele zeigen. In dieser Feststellung liegt ein erhebliches Diskussionspotenzial, da mit diesem Lösungsansatz vom Haustechniker für die Planung in historischen Bauten viel Erfahrung und bauphysikalisches Detailwissen gefordert wird und der übliche Grundsatz: „Viel eingebaute Technik hilft viel" hier nicht gilt.

Die Auseinandersetzung mit dem Thema: „Schutz des kulturellen Erbes" zeigte ein weiteres Phänomen: Untersucht man die Spezialliteratur auf Schadensprävention und schädigende Einflüsse in historischer Bausubstanz, so wird man „tonnenweise" Literatur über Temperatur und relative Feuchte und deren Auswirkungen auf Bau und Kunstgegenstände finden, jedoch kaum Hinweise auf das weitaus wichtigere Thema des Luftwechsels in historischen Bauten. Die folgenden Beiträge beschäftigen sich daher vorzugsweise mit Untersuchungen zum Luftwechsel im Schloß, ferner mit feuchten, erdberührten Wänden, dem Einbau von Bauteilheizung, mit der Dichtheit von Fenstern und der Messung und Simulation von Erdwärmetauschern als luftführende Bauteile.

Projektentwicklung zur Schaffung eines stabilen und schadenspräventiven Raumklimas in den Schauräumen von Schloß Schönbrunn zur optimalen Konservierung der Kunstobjekte

Im Folgenden wird ausschnittsweise ein Beitrag aus dem Jahre 1998 wiedergegeben. Er zeigt die Entwicklung eines Projektes zur Schaffung optimaler raumklimatischer Zustände in Schloß Schönbrunn. Schönbrunn ist als Kunstwallfahrtsort durch Besucher und Außenklima starken mikroklimatischen Belastungen ausgesetzt, die es zu minimieren gilt, will man die Kulturschätze noch vielen Generationen erhalten. Dazu ist es wichtig, behutsam, mit geringen Eingriffen und mit einem Minimum an Haustechnik, schadenspräventive Systeme zu schaffen und diese genau zu beobachten, um auf negative Entwicklungen möglichst rasch reagieren zu können.

Schlüsselfrage aller Überlegungen war die Klärung, ob die vielen Besucher schädigenden Einfluß auf die Kunstgegenstände nehmen oder ob es der hohe, unkontrollierte Luftwechsel im Schloß ist, der Schäden an den Einrichtungsgegenständen, wie z. B. an den Vieux-Laque-Tafeln, verursacht hat. Die klimatische Stabilität eines Museums hängt nämlich primär von baulichen Gegebenheiten und erst in zweiter Linie von technischen Hilfsmitteln ab.

Grundsatzidee

Die bisherigen Messungen zu Raumklima und Luftwechselzahlen ergaben **keinen** Hinweis auf einen signifikanten Einfluß der hohen Besucherzahlen auf das Mikroklima der Räume. Wir sprechen dabei von ca. 8.000 Besuchern pro Tag. Genauere Luftwechselmessungen in Schloß Schönbrunn mittels Tracergasmethode und Fensterfugenmessungen (a-Wert-Messungen) zeigten vielmehr, daß bei durchschnittlichen Außenklimaverhältnissen im Schloß ein ca. einfacher Luftwechsel durch die geschlossenen, alten Kastenfenster gewährleistet ist. Diese Luftwechselzahl reicht aus, um durchschnittliche Besucherzahlen ausreichend mit Frischluft zu versorgen. Sie entspricht Luftwechselzahlen, die zunehmend für historische Objekte empfohlen werden (- so diese nicht in Vitrinen aufzubewahren sind).

Anders sieht es jedoch aus, wenn größere Windlasten bzw. das Öffnen der Fenster, z. B. durch das Aufsichtspersonal, höhere Luftwechselzahlen bringen. Dieser hohe, unkontrollierte Luftwechsel hat sehr wohl radikalen Einfluß auf die mikroklimatischen Zustände im Schloß. Ferner ergaben Luftgeschwindigkeitsmessungen in den Kaminen, daß sich bei einem Temperaturgefälle von innen

nach außen ein natürlicher Auftrieb und ein erhöhter Luftwechsel einstellt. Aus beiden Ergebnissen und der Überlegung, daß ein konservatorisch optimales Raumklima dann entsteht, wenn das Außenklima, stark gedämpft in seinen jahreszeitlichen Schwankungen, nur geringfügigen Einfluß auf das Innenklima nimmt, wurden folgende, schadenspräventive Rahmenbedingungen definiert:

1. Das Innenraumklima spiegelt den durch die Gebäudehülle gepufferten Drei-Tages-Durchschnitt des Außenklimas.
2. Raumtemperatur und relative Feuchte weisen einen kurzzeitkonstanten, aber in Abhängigkeit zum Außenklima durch das Gebäude gepufferten, langsam gleitenden Verlauf auf.
3. So finden z.B. die Übergänge von Sommer- und Winterhalbjahr gleitend statt.
4. Die Innen- und Außenklimate zeigen einen möglichst geringen Unterschied in Wasserdampfpartialdruck und absoluter Feuchte (was nur möglich ist, wenn nicht konventionell geheizt wird).
5. Die Raumtemperaturen sinken im Winter langsam bis auf minimal 5°C ab und steigen während des Frühjahrs bis Sommer langsam auf 25–30° an. (Dies ist abhängig von der Lage des Raumes und der Fenstergröße, etc.).
6. Die relative Feuchte bewegt sich gleitend zwischen minimal 40% und maximal 60%, wobei eine möglichst geringe Änderungsgeschwindigkeit entscheidend ist.

Diese Ziele lassen sich am leichtesten erfüllen mit möglichst wenig Haustechnik und massiver, ausgleichender Bausubstanz, die in das mikroklimatische Konzept einbezogen wird. Dafür gelten folgende Vorgaben:

1. Temperatur und Feuchte im Schloß möglichst kurzzeitkonstant halten. Die Kurzzeit-Temperaturkonstanz im Gebäude ist (teilweise) schon deswegen gegeben, da schwere Baumassen einen Amplitudensprung in den Temperaturen verhindern, wenn die Außenhülle des Gebäudes geschlossen bleibt.
2. Minimierung des Einflusses des Außenklimas auf die Innenräume, indem der Luftwechsel kontrollierbar gemacht wird, damit das Außenklima nicht ungedämpft in die Prunkräume „durchschlägt".

Um den kontrollierten Luftwechsel zu erreichen, wurde folgendes Konzept entwickelt:

Da sich der sinnvolle Luftwechsel von „eins" über die Fensterfugen nur bei einem definierten Außenklima und definierten Druckunterschieden zwischen Innen und Außen (Luv und Lee) einstellt, muß nach einer Lösung gesucht werden, die auch bei Windstille bzw. bei Stürmen einen ähnlich konstanten, definierten Luftwechsel erlaubt. Daher müssen die natürlichen Öffnungen (Fensterfugen und Türen) (reversibel) abgedichtet und Pufferräume so kontrolliert gelüftet werden, daß ein möglichst geringer Außenluftwechsel stattfindet. Dann kann die entsprechend aufbereitete Außenluft von außen in die Schauräume geleitet werden, wo sie über Kamine abgesaugt wird.

Dabei muß gemessen werden, welche Konsequenzen dieser Eingriff für das Mikroklima und die gesamte Bausubstanz hat. Es könnte nämlich sein, daß ein konstanter, geringer Luftwechsel zwar für das museale Raumklima optimal ist, die hohen Besucherzahlen und deren negative Begleiterscheinungen (wie Eintrag von Feuchte, Staub, etc.) aber ungünstig auf das Mikroklima durchschlagen. Dies wäre dann der Fall, wenn der bislang mögliche höhere Luftwechsel besucherbedingte Temperatur- und Feuchtespitzen kompensiert hat.

3. Messung (über den Eintrag von CO_2) und Beobachtung der Auswirkungen der Besucherströme auf die Kunstgegenstände (Wärme, Feuchte und Staub, mechanische Zerstörung).

Der Einfluß der Besucher auf das Gebäude wird gemessen. Staubbelastungen werden analysiert und durch organisatorische Maßnahmen auf ein Minimum reduziert.

Abb. 1 zeigt die geplante Vorgangsweise:

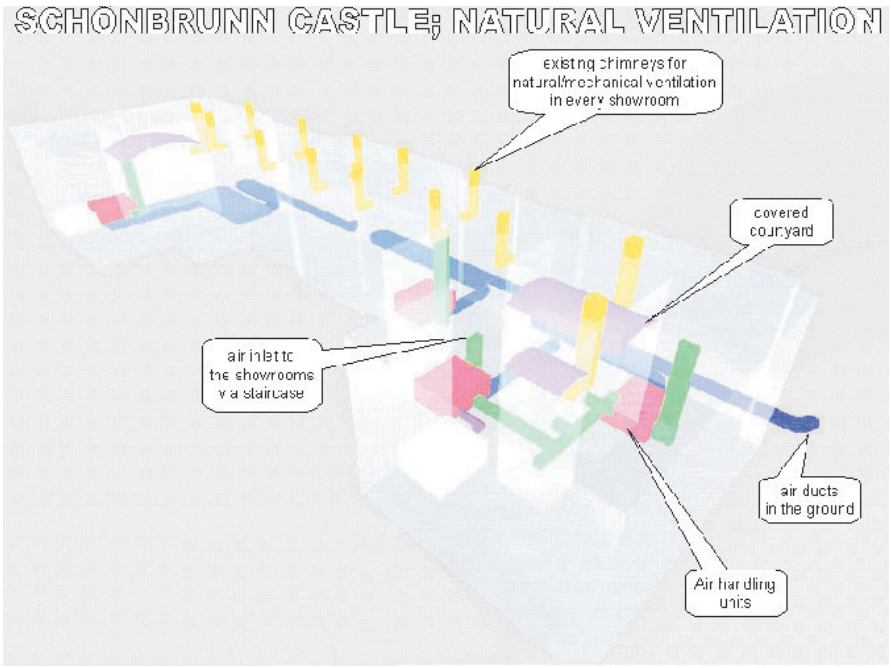


Abbildung 1:
3D-Animation der geplanten Luftführung in Schloß Schönbrunn mit Luftansaugung über einen Erdwärmetauscher und Raum-Absaugung über dezentrale Kaminschläuche

Folgende Maßnahmen wurden geplant:

1. (Reversibles) Abdichten der Fensterfugen und Öffnungen nach außen und Schaffung von Pufferräumen und Schleusen.
2. Nutzung des natürlichen Auftriebes der vielen Kamine der Schauräume zur Schaffung eines definierten Unterdruckes, ggf. mechanisch unterstützt durch zugverstärkende Ventilatoren, die durch ihre Autorotation im Luftstrom auf einem Display anzeigen, ob ihre Aktivierung notwendig ist.
3. Angebot einer entsprechend aufbereiteten Zuluftmenge im Quellluftverfahren für die Schauräume über ein Zuluftsystem, das Außenluft über einen „Energiebrunnen“ (im Erdboden verlegte Luftkanäle) ansaugt. Dabei wird die Erdreichtemperatur genutzt zur natürlichen Kühlung der Luft im Sommer bzw. zu ihrer Vorwärmung im Winter, so daß mit einem einfachen Luftwechsel bei geringstem maschinentechnischen Aufwand ausgeglichene Klimaverhältnisse gewährleistet werden.
4. Messung und Dokumentation der Entwicklung des Mikroklimas in den Schauräumen.

Um dieses Konzept so weit entwickeln zu können, wurden von 1993 bis 2002 folgende Untersuchungen und Maßnahmen durchgeführt:

1. Kontinuierliche Außen- und Raumklimamessungen, insbesondere im Vieux-Laque-Zimmer (vgl. Kapitel 2)
2. Wandfeuchtemessungen in den Gisela-Appartements (vgl. Kapitel 3)
3. Fugendichtheitsmessungen eines Fensters (vgl. Kapitel 5)
4. Luftgeschwindigkeitsmessungen des natürlichen Auftriebes in verschiedenen Kaminen und zwischen Schauräumen (vgl. Kapitel 6)
5. Tracergasmessungen zur Bestimmung der Luftwechselzahlen im Schloß in Verbindung mit CO_2-Messungen (vgl. Kapitel 7)
6. Berechnung eines qualitativen Luftvolumenmodels für das gesamte Schloß unter Berücksichtigung aller Kamine (vgl. Kapitel 8)
7. Einbau der kontrollierten Lüftung in Schloß Schönbrunn (vgl. Kapitel 9)
8. Nutzung eines historischen Erdstollens für die Luftansaugung mit Messung und dynamischer Simulation (vgl. Kapitel 10).

Als Grundsäulen der Schadensprävention in (historischen) Bauten wurden bereits erkannt: 1. die kontrollierte Lüftung und 2. warme Raumhüllflächen, die am einfachsten durch Bauteilheizung erreicht werden.

Grundlegende Forschungsarbeiten zum Raumklima (vgl. Kippes 1999[1]) ergaben wider Erwarten, daß nicht die Belastung des Schlosses durch die im Sommer mitunter sehr hohen Besucherzahlen (8.000–10.000 Personen pro Tag) den schädigenden Einfluss auf die Artefakte auslöst, sondern vielmehr das unkontrollierte Lüften der Schauräume, wenn nach Gutdünken die Fenster geöffnet werden, in der Hoffnung, die Luftqualiät zu verbessern. Da dem Menschen ein Sensus für relative Feuchte fehlt, wird dabei gerade im Hochsommer nicht bemerkt, daß vor Gewittern Luft mit hoher absoluter Feuchte eingelassen wird, was in Reaktion mit der kühleren Baumasse zu Kondensationsschäden führen kann. Umgekehrt wird die Raumlufttrocknung in Zeiten geringer absoluter Außenfeuchte nicht wahrgenommen. Das Studium dieser Schadenskausalität über 3 Jahre (1995 – 1998) führte zu den Messungen im Vieux-Laque-Zimmer, die in der Folge als Zusammenfassung wiedergegeben werden.

1 Vgl. Wolfgang Kippes: Raumklima in historischer Bausubstanz, Dissertation TU Wien, 1999

2. Querschnittmessung im Vieux-Laque-Zimmer

Zusätzlich zur langfristigen Erhebung von Klimadaten (innen und außen) wurden im Herbst 1998 im Vieux–Laque-Zimmer ausführliche Temperatur-, Luftgeschwindigkeits- und CO_2-Messungen durchgeführt, in Form einer Querschnittsmessung als möglichem Analyseinstrument zur Erklärung der Schäden an den Vieux-Laque-Tafeln.

Im Obergeschoß der Schauräume, im Vieux-Laque-Zimmer, befinden sich chinesische Lacktafeln, die 1765 von Maria Theresia eingebaut wurden. Diese seinerzeit schon historischen Lackparavents stammten aus dem kaiserlichen Hof aus Peking. Die Tafeln wurden auf die Innenwände des Vieux-Laque-Zimmers appliziert und zeigen nun mehr und mehr Schäden in Form von Rißbildungen, vor allen Dingen an der linken inneren (westlichen) Ecke in der Nähe eines inaktivierten, historischen Warmluftauslasses.

Ziel der Forschungsarbeit war es, durch ein systematisches Meßdatenerfassungsprogramm einen Kausalzusammenhang zwischen Innenraumklima, Außenklima, Besucherstrom und den Schäden an den Lacktafeln zu ergründen. Dazu wurde von den Projektteilnehmern, insbesondere von K. Prodinger eine Meßmethode entwickelt, die für eine „Querschnittsmessung“ zahlreiche Meßpunkte von außen nach innen bis hin zur Innenwand setzt und versucht, durch Interpretation der Meßergebnisse ein Klimaprofil nachzuweisen, das möglicherweise schadenskausal für die chinesischen Lacktafeln ist.

Dementsprechend wurden Außentemperatur und Außenfeuchte, ebenso die Windgeschwindigkeit an der Fassade, die Temperatur in der Mitte der Außenmauer, Temperatur und Feuchte im Meßraum, auf der Außenwand und im Luftzwischenraum zwischen Außenwand und Lacktafeln gemessen. Es wurden ferner auf den Lacktafeln raumseitig zahlreiche Meßfühler, in der Höhe gestaffelt, angebracht, ebenso Fühler auf den Rückseiten und auf der Innenmauer.

Ferner wurden CO_2-Fühler im Raum gesetzt, die die CO_2-Abgabe der Besucherströme messen und mit Werten eines CO_2-Fühlers im „Rössel-Zimmer“, der ca. 1 Jahr später nach Meßbeginn installiert wurde, vergleicht, wo keine Besucher Zutritt haben. Dank genauester Besucherstatistiken der Schönbrunn Kultur- und BetriebsgesmbH. lassen sich auf diese Weise Abhängigkeiten von Besucherzahlen und Schadstoffkonzentrationen in Schauräumen aufzeigen.

Außerdem wurde ein Luftgeschwindigkeitsfühler im Durchgang zum Vieux-Laque- Zimmer gesetzt, um mögliche Luftströmungen im Raum und ggf. daraus Luftwechselzahlen nachvollziehen zu können.

In einer Schlußphase des Meßprogramms wurden Kontakte an Fenstern gesetzt, um nachzuweisen, wann von dem Bedienungspersonal – relativ willkürlich und ohne Bedachtnahme auf Außenklimazustände – Fenster zum Lüften geöffnet werden.

Im Verlauf der Untersuchungen in der dreijährigen Meßkampagne stellten sich eine Reihe von Problemen und Ereignissen ein, die – angefangen von der Zerstörung von Außenluftfühlern durch Krähen, dem Wechsel von Subauftragnehmerfirmen, die gewählt wurden, um die Datenmengen auf Datenloggern zu speichern bis hin zu Computerviren, die durch den Datentransfer vom Schloß zum Eurocare Projektbüro in der TU Wien und von dort zum Autor dieser Studie „eingeschleppt" wurden und „letale Folgen" für die Meß-EDV und Festplatte hatten. Trotz dieser Widrigkeiten, die sich ähnlich auch bei anderen Projekten einstellten, konnten wesentliche Erkenntnisse erarbeitet und die Kausalität für die Schäden an den Lacktafeln ergründet werden.

Verständlicherweise gibt es Reibungsverluste, wenn bei langfristigen Meßkampagnen über mehre Jahre Daten erfaßt werden, zumal am Meßort der normale Besucherbetrieb ungestört weitergehen muß. In Schloß Schönbrunn werden im Sommer nicht nur bis zu 8.000 Menschen täglich durch die Schauräume „geschleust", sondern notwendige Erhaltungs- und Umbauarbeiten, die generell das Messen nicht erleichtern, müssen auch noch durchgeführt werden. Auch muß man beachten, daß in einem Kulturgut wie diesem strenge sicherheitstechnische Maßnahmen getroffen werden, die bis hin zur Stromabschaltung nachts reichen und auch erschwerend für Meßkampagnen wirken.

Auf Grund der vielen meßtechnischen Schnittstellen gab es auch einige meßtechnische Probleme. Die Fühler wurden im Sinne einer Querschnittsmethode versetzt. Dann folgte die erste meßtechnische Schnittstelle als Verknüpfung der Fühler mit einem Meßdatenerfassungssystem. Von diesem wurden die Daten via Telephon in einer bestimmten Formatierung auf eine EDV in der TU Wien gespielt. Von dort gingen die Daten per Telefonnetz bzw. Post zur weiteren Bearbeitung zum Autor.

Im Rahmen der Meßkampagne ließ sich der Nachweis erbringen, daß sich im Zwischenraum hinter den chinesischen Lacktafeln und den Wänden ein Mikroklima einstellt, welches anders ist, als jenes, das im Schauraum herrscht. Diese Diskrepanz ist die Kausalität für die Verformungen und Schäden an den Lacktafeln. Dabei wurde noch beobachtet, daß die Häufigkeit der Schäden im Bereich eines alten, inaktivierten Luftheizungskanals, der eine Verbindung zur historischen Luftheizungszentrale darstellt und nicht abgedichtet wurde, besonders signifikant ist.

Eine direkte Abhängigkeit zwischen der Anzahl der Besucher und einer möglichen Schadenskausalität, beispielsweise zwischen deren CO_2-Abgabe und den Schäden an den Tafeln, konnte nicht gefunden werden[2].

2 Vgl. Kippes 1999

Die Erfahrungen mit dieser Meßkampagne trugen dazu bei, u.a. ein Meßwerterfassungssystem für mikroklimatische Messungen auf EDV Busbasis mit digitalen Temperatur- und Feuchtesensoren zu entwickeln, ferner eine „Lüftungsampel", die die absolute Feuchte innen und außen vergleicht und über eine „Ampel" signalisiert, ob Fenster gefahrlos geöffnet werden können oder nicht. Generell kamen alle Ergebnisse der Forschungsarbeit bei der planerischen Umsetzung schadenspräventiver Maßnahmen in Schloß Schönbrunn zur Anwendung.

3. Wandfeuchtemessungen in den Giselaappartements

In den Jahren 2000 bis 2002 wurde im Bereich des westlichen EG von Schloß Schönbrunn ein Kindermuseum eingerichtet, und zwar in den Giselaappartements, (den Weißgold- und Bergel-Zimmern und dem Rennerzimmer). Die Prunkräume, ehemalige Privatgemächer von Mitgliedern des Kaiserhauses, sind nicht unterkellert und durch aufsteigende Feuchte belastet. Um eine geeignete Maßnahme gegen die Feuchteschäden im aufgehenden Mauerwerk zu finden, wurde eine Temperierung provisorisch eingebaut und Messreihen gestartet. Dabei wurden die Raumtemperaturen und Raumluftfeuchten gemessen und die Feuchteentwicklung in den Wänden langfristig durch ein Prüfinstitut der techni-

schen Universität Wien dokumentiert. Ferner diente diese Untersuchung dazu, die Begrenzung der Salzmigration zu belegen.

Das zur Beheizung und Trockenlegung gewählte System der „Temperierung“, ist eine Form der Bauteilheizung, die durch warme Außenwandoberflächen Räume beheizt und die Kondensation verhindert. Ferner unterbindet die leichte Erwärmung der Mauersockel das Aufsteigen von Feuchtigkeit und die Halokinese (Salzmigration). Zur wirksamen „thermischen Horizontalisolierung“ ist der kontinuierliche Heizbetrieb der Temperierrohre notwendig, die kraftschlüssig in den Sockelbereich der erdberührten Wände eingeputzt werden.

Für die versuchsweise Beheizung der Weißgoldzimmer Nr. 36 bis Nr. 39 wurden im Versuchszeitraum Herbst 1997 bis Januar 1998 die Bauteilheizungsrohre (ø 18 mm) über einen 1.000-l-Boiler mit elektrischer 6-kW–Patrone betrieben und im Rahmen einer Querschnittsmessung die Raum- und Mauertemperaturen und die rel. Raumluftfeuchte gemessen. Eine Zirkulationspumpe und ein Heizungsverteiler mit einem elektrischen kWh-Zähler waren neben einfachsten Regelkomponenten wie Thermostatventilen, etc. die weiteren Bestandteile des Heizungssystems.

Dabei wurden die feuchten Sockelmauern im anschließenden Rennerzimmer (Nr. 39A) unbeheizt gelassen und auch dort Proben gezogen, um Vergleichsergebnisse zu den durch Bauteilheizung behandelten Wänden zu haben.

Neben dem Nachweis der Wandtrocknung galt der Versuchsaufbau auch der Klärung, ob zwei jeweils nur an den Wandsockeln verlegte Rohre allein in der Lage sind, das geplante „Kindermuseum“ ausreichend zu beheizen, um ein möglichst schadenspräventives Raumklima mit möglichst wenig haustechnischen Eingriffen zu erreichen.

Die Technische Universität Wien (Abt. TVFA, Leitung Prof. Dr. T. Varga) hat als neutrale Instanz drei Messungen der Bauteilfeuchte durchgeführt: Vor Beginn der Beheizung, in der Mitte der Meßperiode und am Ende der Meßperiode. Sie belegten die trocknende Wirkung der Bauteilheizung auf die feuchten Wände und wiesen einen dauerhaften Austrocknungsprozess mit Inaktivierung der Schadsalzmigration nach (Abb. 2).

Abbildung 2:
Die Abbildung zeigt Diplomingenie Hauler, TU Wien, bei der Probenentnahme, Foto Autor.

Der Versuchs- und Messzeitraum – mit baubedingten Unterbrechungen – reichte von Dezember 1997 bis März 1999.

Folgende Ergebnisse konnten nachgewiesen werden:

Die Bauteilheizung, die nur am Sockel der erdberührten Wände der Gisela-Räume verlegt wurde, konnte selbst an kältesten Tagen eine Raumtemperatur von 17° bewirken, obwohl Messungen bewiesen, daß grobe Undichtheiten der Hülle (Fensterfugen, Baustellenöffnungen, etc.) eine hohe Luftwechselzahl verursachten.

Ferner konnte bei fast allen Feuchtemeßstellen eine signifikante Senkung der Bauteilfeuchte auf Werte unter 1,5% nachgewiesen werden, wobei die Aus-

gangsfeuchte teilweise 9,5 Volumenprozent und mehr betrug. Die unbeheizten Mauern des Vergleichsraumes Nr. 39A blieben nachweislich feucht.

Der Energieverbrauch lag bei 37.970 kWh für 153 m² bei 5 m Raumhöhe bzw. 765 m³. Bezieht man diesen Wert auf das beheizte Volumen, bedeutet dies ca. 49,5 kWh/m³·a. Dies ist ein hoher Wert (Laut der deutschen EnEV 2002 sollten *Altbauten* mit Raumhöhen bis zu 2,60 m keine Verbräuche von über 70 kWh/m²·a bzw. 22 kWh/m³·a haben).

Der Grund für den höheren Verbrauch liegt nicht – wie meist angenommen wird – darin, daß der Trockenkreis das ganze Jahr über betrieben werden muß (mit unterschiedlichen Vorlauftemperaturen bei Rücklauftemperaturen von min. 25°C). Ursachen sind vielmehr der durch die undichte Raumhülle erhöhte Luftwechsel, die zunächst schlechteren U-Werte der am Anfang der Meßperiode stark durchfeuchteten Wände und der durch die laufenden Umbauarbeiten verursachte diskontinuierliche Betrieb der Temperierrohre, belegt durch die Messungen der Vor- und Rücklauftemperatur. Bei diskontinuierlicher Beheizung feuchter Bauteile geht ein bereits erreichter Trocknungsgrad immer wieder verloren und muß nach dem Wiedereinschalten mit zusätzlichem Energieeinsatz erst wieder aufgebaut werden.

Insgesamt waren auch die Meßarbeiten wegen der Bautätigkeiten stark erschwert, da diese zu häufigen Störungen und Stromunterbrechungen führten.

An einer Meßstelle ging die Feuchte nicht auf die erwarteten Werte zurück. Eine endgültige Klärung konnte nicht gefunden werden. Eine mögliche Erklärung ist die fehlende Homogenität des Mauerwerks im Verein mit dem diskontinuierlichen Betrieb. Im Verlaufe des Austrocknungsprozesses der Außenmauern werden die Energieverbräuche auf die von der Norm geforderten Werte zurückgehen.

Anzumerken ist noch, daß die gesamte, betriebsbereite Heizungsinstallation mit Elektroboiler und Regelung für die vier Räume netto ca. € 7.300,– (öS 100.000,–) gekostet hat. Ferner konnte nachgewiesen werden, daß mit einer vergleichsweise geringen Heizleistung von nur 6 kW für ca. 150 m² bzw. 765 m³, also mit einer installierten spezifischen Leistung von nur 40W/m² bzw. 7.8W/m³ ein thermisch nicht optimiertes, historisches Gebäude ausreichend beheizt und gleichzeitig trocken gelegt werden kann.

Nota Bene:

Noch am 13.04.2002, also nach Abschluß aller Bauarbeiten und vor Eröffnung des Kindermuseums, wurden gegen 14.00 Uhr mit dem Hochfrequenz-Feuchtemessgerät MOIST 200, (Meßprinzip Mikrowellen) mit der Tiefenmessonde (ca. 30 cm) alle Außen- und Innenwände auf ihren Feuchtegehalt überprüft, inklusive der früher sehr feuchten Außenwände im Bereich des Zimmers Nr. 39A, das 1998

Abbildung 3:
Verlegedetail der Temperierrohre in den Weißgoldzimmern, Foto Autor.

während des Heizversuches nicht durch die Temperiermethode behandelt, später aber, im Zuge der Sanierungsarbeiten für die Umnutzung, mit einer Bauteilheizung versehen wurde.

In allen Wänden wurde an allen Stellen Feuchtegehalte von ca. 2–3% und im Bereich des Rennerzimmers von ca. 3,5% gemessen, Werte also, die weit unter den anfänglich gemessenen Feuchtewerten von 7% und mehr lagen und nun weit unter dem als „trocken" geltenden Wert von 5% Feuchtegehalt liegen und damit eine eindeutige und durchgängige Trocknung dieser Mauern dokumentieren.

Abbildung 3 zeigt die Einbaudetails der Temperierung: Am Sockel der feuchten Mauern der Trockenkreis unter dem Doppelboden, darüber das Doppelrohr aus CU 18x1 mm, das in einer Putzleiste aus Stuckaturgips eingemörtelt ist.

4. Kontrollierte Lüftung und natürliche Lüftung

Wie eingangs dargelegt, ist neben der Bauteilheizung die zweite wesentliche Säule der langfristigen und dauerhaften Schadensprävention in historischen Bauten die kontrollierte Lüftung, die verhindert, daß über Fugen und sonstige Öffnungen im Gebäude unkontrollierte außenatmosphärische Zustände eintreten und schädigenden Einfluß nehmen, nicht nur auf die Ausstattung und die Exponate, sondern auch auf erdberührte Mauern, wenn, infolge des durch die Temperaturdifferenz hervorgerufenen Kapillarkondensats feuchte Außenluft mit den Schadsalzen in den Mauern reagiert.

Die Grundprinzipien der natürlichen Lüftung für Schloß Schönbrunn wurden im Rahmen von Forschungsarbeiten zur Reaktivierung der natürlichen Lüftung im Corps de Logis in der „Neuen Burg", Wien, geklärt. Diese Arbeit kann auszugsweise auf der beigefügten CD nachgelesen werden. In der Folge wird eine kurze Zusammenfassung wiedergegeben.

Exkurs:

Die Reaktivierung der natürlichen Lüftung in der Neuen Burg, Wien, mit Meßkampagne zum Beweis der Funktionsfähigkeit und im Hinblick auf die Anwendung der Ergebnisse in Schloß Schönbrunn

Die historische Lüftung anzuwenden heißt, die alten, auf Empirie und Beobachtung gegründeten Handwerks- und Ingenieurkünste genau zu studieren und sie zusammen mit dem Gebäude als ein kybernetisches System zu verstehen. Dagegen ist es heute üblich, haustechnische Gerätschaften in Häuser einzubauen, ohne sie in den Baukörper zu integrieren.

Wenn man die natürliche Lüftung als ein integriertes, schadenspräventives System plant und zur Beheizung ein ebenso integriertes Bauteilheizungssystem als Einfachst-Technologie vorsieht, sind die Ergebnisse für den Nutzer und die Kunstgegenstände offensichtlich: Es gibt ein Maximum an Komfort und Klimastabilität bei einem Minimum an Investitions- und Energiekosten. Weiterhin haben die Kunstgegenstände beste Bedingungen (preventive conservation). Man weiß aus Erfahrung, daß übliche Klimatisierungsanlagen in historischen Bauten und Museen oft mehr Schaden als Nutzen angerichtet haben.

Die Reaktivierung der natürlichen Lüftung im "Corps de Logis" des Völkerkundemuseums in der Hofburg zeigt, daß sogar nach 100 Jahren die Einfachheit und die Effektivität der Technologie unschlagbar ist: Über einen sehr großen Lufteinlaß („Bronchien") im nahegelegenen Burggarten wird durch ein Tunnellabyrinth im Kellergeschoß Luft angesaugt (s. Abb. 4). Diese kann aufgrund der bauphysikalischen Eigenschaften des erdberührten Ziegelmauerwerks die Temperatur- und Feuchtespitzen der Außenluft kompensieren. Vom Kellergeschoß wird die Luft durch große Schächte mittels Schachtlüftung in die Schauräume gebracht, wo sie jeweils in den gegenüberliegenden Seiten des Raumes durch einen Abluftkanal, wiederum meist über den physikalischen Auftrieb, über Dach geführt wird. Falls der natürliche Auftrieb aufgrund zu geringer Temperaturdiffe-

Abbildung 4:
Historisches Tunnellabyrinth im KG des Völkerkundemuseums

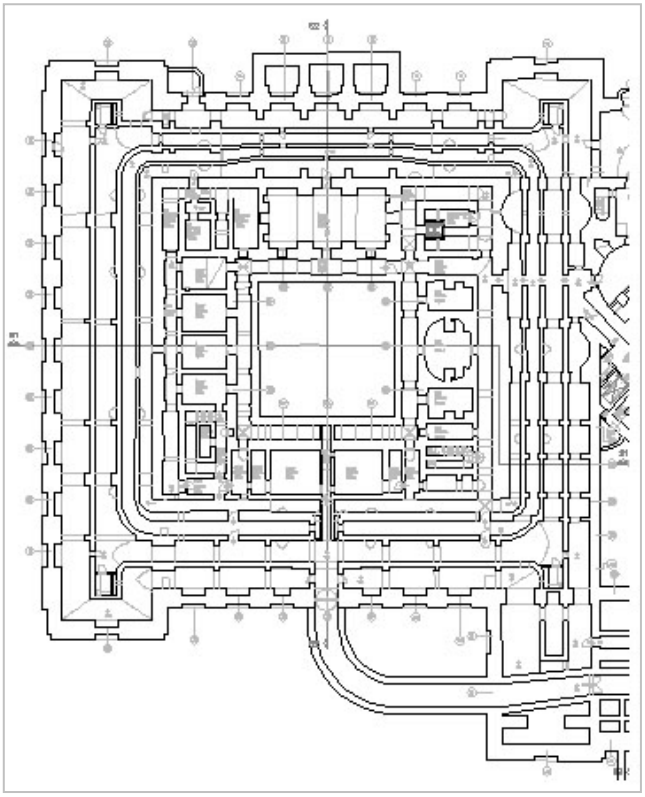
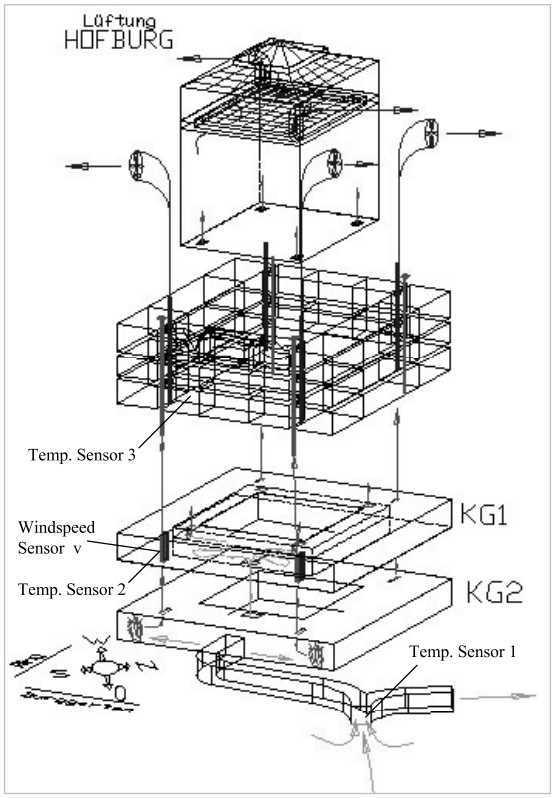


Abbildung 5:
Schema der historischen Lyftung im Völkerkundemuseum



renz nicht eintritt, hilft ein Ventilator im Dachraum, diese gleichmäßige Bewegung der Luft durch das gesamte Gebäude aufrecht zu erhalten (s. Abb. 5).

Anwendung dieser Ergebnisse auf das natürliche Lüftungssystem in Schloß Schönbrunn

Die Situation in Schönbrunn war folgende:

Die Luftwechselraten waren mehr oder weniger definiert durch die Luftdruckunterschiede auf beiden Seiten des Gebäudes, durch die Luftundichtheiten der Fenster und sonstiger Öffnungen des Schlosses und durch die bestehenden Luftströmungen durch die Kamine. Auch hat willkürliches Fensteröffnen der Mitarbeiter unkontrollierten Luftwechsel provoziert.

Die dadurch gegebene hohe Luftwechselzahl im Schloß hatte ein unstabiles Mikroklima in den Schauräumen mit Schäden insbesondere auch bei den Vieux-Laque-Tafeln zur Folge. Auch Staubeinträge von außen haben Schloß und Ausstattung sehr belastet.

Um diesen unkontrollierten Luftwechsel auf ein kontrolliertes Niveau zu bringen, wurden die vier folgenden Schritte vorgeschlagen:

- Abdichten der inneren Flügel der Kastenfenster
- Reaktivierung der bestehenden Kamine der Schauräume
- Einbau von Brandschutzklappen und Ventilatoren, um den Auftriebseffekt zu kontrollieren und gegebenenfalls zu verstärken bzw. auszuschließen
- Schaffung eines unterirdischen Luftbrunnens durch Nutzung eines historischen Gangsystems von ca. 270 m Länge (altes Bewässerungssystem).

Es sollte im Winter tagsüber ein einfacher Luftwechsel möglich sein, der nachts auf einen halben Luftwechsel reduziert werden kann. Im Sommer wäre es sinnvoll, tagsüber einen einfachen und nachts einen zweifachen Luftwechsel

herzustellen, um das Gebäude vorzukühlen. Dieses Lüftungssystem wird dann nicht aktiviert, wenn man sich von außen ungünstige mikroklimatische Zustände ins Haus holt.

Auch die Staubbelastung im Schloß, die eines der Hauptprobleme war, konnte man mit dieser kontrollierten Lüftung und einer sauberen Filterung der Außenluft besser in den Griff bekommen.

5. Fugendichtheitsmessungen im „Reichen Zimmer der Kaiserin" in Schloß Schönbrunn

Um in Schloß Schönbrunn den generellen Einfluß der Undichtheiten des Gebäudes auf die Fugenlüftung und die daraus resultierenden Luftwechselzahlen beurteilen zu können, wurden Fugendichtheitsmessungen durchgeführt, ferner Luftströmungsanalysen bei unterschiedlichem Windanfall wie auch Tracer-Gas-Analysen, um den Luftaustausch innerhalb des Schlosses nachvollziehen zu können. In der Folge werden die Ergebnisse dieser Maßnahmen wiedergegeben.

Im Jahre 1998 wurde im „Reichen Zimmer der Kaiserin" im Rahmen einer Fenstergüteprüfung und einer Luftwechselanalyse die Luftdurchlässigkeit eines alten, geschlossenen Kastenfensters untersucht. Diese ist durch die Luftmenge gekennzeichnet, die bei unterschiedlichem Luftdruck zu beiden Seiten des Fensters durch die Fugen strömt. Dies wurde durch Schaffung eines Unterdruckes in der temporären Meßkoje mittels eines Hochdruckgebläses in einer adaptierten Türe erreicht (s. Abb. 6–8).

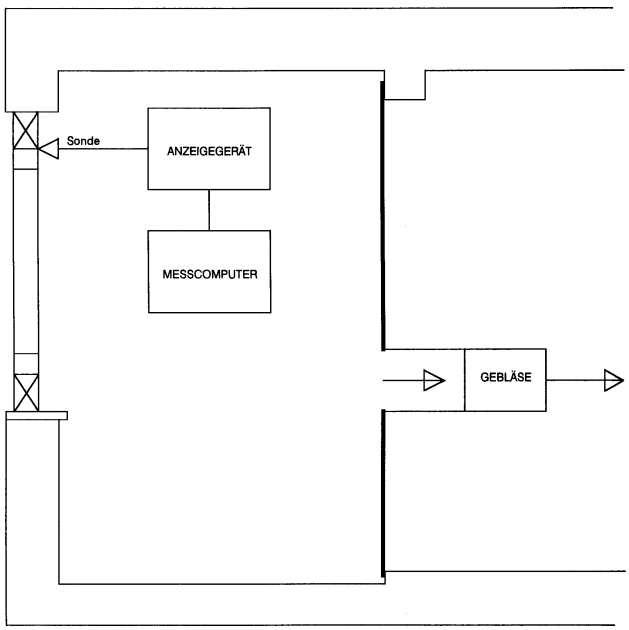
Als „Testfenster" wurde ein Kastenfenster im „Reichen Zimmer – Prunkbett" ausgewählt. Es handelt sich hier um ein Holz-Kastenfenster mit 2 Fensterebenen in einfacher Verglasung.

Prüfung

Die Beanspruchungsklassen, die in der Ö-Norm B 5300 definiert und auch im Prüfergebnis ausgeführt werden, legen den Prüfdruck für das jeweilige Prüfobjekt fest. Diese Klassen werden durch die Geländeform, die Einbauhöhe des Fensters und die Windgeschwindigkeit bestimmt. Die Prüfungen wurden bei einem Differenzdruck Innen – Außen von ca. 50 Pa, 150 Pa und 240 Pa durchgeführt. Dies entspricht ca. den Beanspruchungsklassen A und B.

Die Ergebnisse der Prüfung werden durch die längenbezogene Luftduchlässigkeit oder durch den Luftdurchlaßkoeffizient „a" beschrieben. Dieser gibt die

Abbildung 6:
Systemskizze Prüfung
Fugendichtheit der Fenster



Abbildungen 7 + 8:
links: Versuchskoje für Fenster im eingebauten Zustand, rechts: Fenster von außen, Fotos Autor.

Luftmenge an, die pro Stunde je 1m Fugenlänge in den Raum einströmt. Diese Luftmenge bezieht sich jedoch auf eine Druckdifferenz von einem Pascal. Zu beachten ist, daß ein nicht linearer Zusammenhang zwischen Druckdifferenz und Luftdurchlässigkeit besteht.

Der Luftdurchlaßkoeffizient „a“ ist eine Kennzahl für die Dichtheit eines Fensters, die von Fenster- Herstellern eingehalten werden muß. Die Anforderung ist a < 0,2 $m^3/hmPa^{2/3}$ (Ö-Norm 8110). Bei einer derartigen Dichtheit ist der notwendige 0,5-fache Luftwechsel nicht mehr gewährleistet. Diese Aussage trifft im Prinzip nur für neueste Fenstertypen zu und ist für historische Objekte in Frage zu stellen[3].

3 Vgl. W. Kippes 1999

Es wurde sowohl die Luftdurchlässigkeit der Baukörperanschlußfuge (zwischen Fensterstock und Mauerwerk) als auch die Luftdurchlässigkeit der Falzfuge (zwischen Stock und Fensterflügel) gemessen.

Bauanschlußfuge

Da die Norm eine praktisch luftdichte Bauweise der Bauanschlußfuge vorsieht, kann das Ergebnis laut Norm nur „bestanden“ oder „nicht bestanden“ heißen. Um eine sinnvolle Aussage zu erhalten, behandeln wir die Bauanschlußfuge wie eine Falzfuge.

Die Messung ergab, daß der Luftdurchlaßkoeffizient 0,175 $m^3/hmPa^{2/3}$ beträgt. Eine Interpretation hierfür wäre, daß die Bauanschlußfuge den Standart einer Falzfuge erfüllt und somit die gleiche Wirkung wie diese hat.

Falzfuge

Die Norm gibt im Meßbereich einen zulässigen Bereich für die Luftdurchläßigkeit an.

Die Messung ergab:

Der Luftdurchlaßkoeffizient beträgt für die unteren Falzfugen 0,59 $m^3/hmPa^{2/3}$ und für die Falzfugen der Oberlichte 0,63 $m^3/hmPa^{2/3}$. Dies entspricht ca. dem 3-fachen durch die ÖNORM vorgeschriebenen Grenzwert für moderne Fenster.

Luftwechsel

Die Größe des Luftwechsels durch Fensterfugen ist im Wesentlichen von der Luftgeschwindigkeit und dem Temperaturgefälle von innen nach außen bestimmt. Die jahreszeitlich bedingten Wind- und Temperaturschwankungen machen es notwendig, eine detaillierte Berechnung bei unterschiedlichen Witterungsverhältnissen durchzuführen.

Das Infiltrationsmodell nach M.H. Sherman für die Berechnung des Luftvolumenstromes durch Fugen wurde für eine Simulation der unterschiedlichen Witterungsverhältnisse herangezogen.

Stellungnahme

Grundsätzlich muß festgehalten werden, daß üblicherweise historische Fenster größere Leckraten als moderne Fenster aufweisen. Es liegt sogar die Vermutung nahe, daß historische Fenster aus hygienischen Gründen einen definierten Luftwechsel zuließen, der sich häufig im Bereich eines einfachen Luftwechsels einpendelt.

Im gegebenen Fall der Kastenfenster im Schloß Schönbrunn kann aufgrund der Meßergebnisse davon ausgegangen werden, daß im Winter bei entsprechender Temperaturdifferenz und gewissem Winddruck (-sog) ein einfacher Luftwechsel bei geschlossenen Fenstern erreicht werden kann. Im Sommer ist dieser Wert entsprechend geringer.

Um von den Imponderabilien des Außenklimas unabhängig zu sein und dennoch einen definierten Luftwechsel in den Schauräumen zu gewährleisten, wird versucht, die Leckrate der bestehenden Kastenfenster zu minimieren und durch geeignete Lüftungsmaßnahmen (kontrollierte Zu- und Abluft) die Luftwechselzahl gemäß Bedarf zu gestalten.

6. Luftströmungsmessungen im Schloß

In der Folge wird ein Forschungsbericht aus dem Jahre 1999 dokumentiert, der eine genaue Analyse der Luftbewegungen im Gebäude darstellt:

„Windatlas" für Schloß Schönbrunn

Einleitung

Ergänzend zu dem Luftvolumenmodell von Schloß Schönbrunn (vgl. in der Folge, Kap. 8), welches die Raumvolumina im Schloß zu den entsprechenden Abluft- und Kaminschächten über Dach in Beziehung setzt, um nachzuweisen, daß es möglich ist, durch Reaktivierung dieser Schächte einen halben bis einfachen Luftwechsel zu realisieren, werden in der Folge bei drei unterschiedlichen Außenwindzuständen – „Normalwind", Sturm, Windstille – die Luftströmungen innerhalb des Hauses bei „Normalbetrieb" im Schloß visualisiert.

In diversen detaillierten Untersuchungen (vgl. Kippes 1997[4]) wurde nachgewiesen, daß eine Lüftung in historischen Bauten dann schadenspräventiv ist, wenn sie kontrolliert ist und nur mit geringen Luftwechselzahlen arbeitet.

Messungen haben belegt, daß durch unkontrollierten Luftwechsel mit zu großen Luftwechselraten schadenskausale Zustände in den Schauräumen auftreten können. Wesentliche Einflußfaktoren auf das Raumklima sind Raumtemperatur und Feuchte, Wandoberflächentemperatur, innen, und – natürlich – absolute Feuchte und Temperatur der Außenluft.

Diese wesentlichen Erkenntnisse finden langsam auch in der entsprechenden Literatur ihren Niederschlag, da die üblicherweise unbeachteten oder hohen Luftwechselzahlen in historischen Gebäuden – langsam aber systematisch – sinnvoll niedrigen Werten im Bereich von einem halben bis einfachen Luftwechsel weichen.

Abgesehen von dem grundsätzlichen Problem der „richtigen" Luftwechselzahl in historischen Bauten ist auch zu klären, wie sich innerhalb eines historischen Gebäudes die Luft verteilt und welche Undichtheiten in der Außenhaut sowie in den Schächten unkontrollierte Lüftung und somit direktes „Durchschla-

4 Vgl. Wolfgang Kippes: Climate Management and Air Flow Control – Zu den Ursachen der Raumklimaschwankungen in Schloß Schönbrunn; Report Nr. 3, Austria within EU 1383 PREVENT, Wien 1997

gen“ von außenklimatischen Zuständen nach innen provoziert. Daher ist zu prüfen, welchen Einfluß das Außenklima, insbesondere die Windstärke und die Windrichtung, auf die Luftverhältnisse im Gebäude haben.

Versuchsaufbau

Aus diesem Grunde wurden im Schloß Schönbrunn bei drei unterschiedlichen Außenwindzuständen

- normale Windverhältnisse mit einer Windstärke von 10 m/sec am 15.02.1999
- Sturm mit 30 m/sec am 17.02.1999
- Windstille mit max. 5 m/sec am 19.02.1999

und bei normalem „Dienstbetrieb“ die Luftströmungen im Schloß Schönbrunn gemessen, mittels Strömungsprüfröhrchen visualisiert und durch Symbole in Übersichtspläne des Schlosses eingetragen.

Stärke und Windrichtung wurden durch eine 3 m lange Angel mit einem 2 m langen leichten Faden, an dessen Ende zwei Federn fixiert wurden, visualisiert.

Die folgenden Aufzeichnungen geben die jeweiligen Zustände wieder, wobei noch die Außenwetterdaten bezüglich Windstärke und Windrichtung von der Meßstelle beim Neptunbrunnen angefügt wurden.

Es lassen sich in vergleichender Kurzfassung folgende Zustände festhalten:

Normalwind 15.02.1999	Sturm von Süd 17.02.1999	Windstille 19.02.1999
EG: Sehr starker Zug durchs Stiegenhaus im großen Kaiserhof. Bei leichtem Wind wird das Gebäude durch die Undichtheiten merklich aufgeblasen; große Galerie um ca. 3 – 4 K kühler als Rest der Schauräume.	**EG:** Bei Sturm haben sich die Windrichtungen im Schloß gedreht. Es konnten sehr große Undichtheiten in der Sala terrena festgestellt werden. Bei der Blauen Stiege war kaum ein Sog nach oben zu bemerken; die Quellluft aus dem großen Kaiserhof geht in Richtung blaue Stiege (Tür war offen). Im Prinzip großer Zug im Stiegenhaus des großen Kaiserhofes. Ferner Luftbewegung gr. Kaiserhof – kl. Kaiserhof -Ausgang; Luftströmung Eingang Café – Blaue Stiege; kaum Strömung zur Geheimstiege.	**EG:** wie Normalfall
OG: Es lassen sich im OG West eindeutige Luftverteilungen in Richtung der Besucherströme zur blauen Stiege feststellen. Ein zweiter Luftkreis geht vom großen Kaiserhof in Richtung kleiner Kaiserhof. Ferner gibt es einen offensichtlichen Kurzschluß der Quellluft im großen Kaiserhof in das Stiegenhaus des großen Kaiserhofes. Es gibt definierte Luftströmungen; d.h. also, daß die Schachtlüftung wirkt. Ferner ist ein eindeutiger Zug von West nach Ost zu bemerken (Hauptwindrichtung!). Dabei kreisförmige Durchspülung der Schauräume West und Ost. Bei Windstille könnte auch die Abluftanlage des Shops die kreisende Windbewegung provozieren.	**OG:** Großer Zug durch gr. Galerie; zwei Kreise im Westtrakt, Zug durch die Fenster im Zeremoniensaal und in gr. Galerie; schwache kreisende Luftbewegung durch Vieux-Laque in Richtung Shop.	**OG:** wie Normalfall

Zusammenfassung

Resümierend und stark vereinfachend können folgende Tatbestände festgestellt werden:

1. Die Außenhaut hat große Undichtheiten und müßte für eine kontrollierte Lüftung im Schloß reversibel abgedichtet werden.
2. Die Zuluft müßte kontrolliert in das Schloß eingebracht werden und durch definierten Unterdruck in Abluftschächten nach außen transportiert werden.
3. Alle Türen zu den Stiegenhäusern sollten automatische Türschließer haben.
4. Die Lüftungsanlagen (Mariannenhof, Shop, gr. Kaiserhof, etc.) müßten auf die Lüftungssystematik und die geforderten Luftwechselzahlen einreguliert werden.
5. Es ist ein großer Zug über die bestehenden Kanäle vom Heizhaus Ost in Richtung Rösselzimmer und Vieux-Laque-Zimmer festzustellen (vgl. Staub und Schmutzspuren an der Tür zum Heizraum Ost).
6. Ohne stürmische Außenwindverhältnisse gibt es in den Abluftkanälen bzw. Kaminen durch Auftrieb (zumindest im Winter) recht gleichmäßige Luftbewegungen im Schloß, was durch offene Stiegenhäuser und durch Lüftungsanlagen (teilweise empfindlich) gestört wird.
7. Die Fenster- und Türfugen sowohl in der Sala terrena (Stehcafé im EG) als auch im OG in der großen Galerie sind spürbar (= sehr) undicht. Die restlichen Fensterfugen provozieren bei „normalen" Außenwindverhältnissen einen ca. einfachen Luftwechsel pro Stunde. Dies haben detaillierte Messungen ergeben.
8. Derzeit werden im OG West die Schauräume durch die blaue Stiege gut mit Zuluft versorgt. Dies ist eindeutig nachzuweisen durch ein höheres Temperaturniveau, in den Schauräumen, seit die Lüftungsanlage unter der blauen Stiege in Betrieb ist. Selbstverständlich müssen diese Luft- und Temperaturverhältnisse einreguliert werden.
9. Im OG Ost fehlt eine klar definierte Zuluft. Dieser Mißstand sollte durch Reaktivierung der Heizhäuser Ost und West verbessert werden.

7. Tracergas-Analysen

Um die komplexen Zusammenhänge des Außenlufteinflusses auf das Mikroklima in Schloß Schönbrunn detailliert zu untersuchen, wurde vom schwedischen Partner Jan Holmberg 1999 eine Spurengasanalyse in den Bereichen Blaue Stiege, Reiches Zimmer der Kaiserin, Große Galerie und Rösselzimmer durchgeführt.[5]

Sie hatte folgendes Ergebnis:

Die Messung hatte zum Ziel, mit Hilfe der passiven Spurengasanalyse die Luftwechselzahlen in genannten Bereichen nachzuweisen, insbesondere durch den Vergleich mit der Spurengasanalyse im Rösselzimmer, da dieses Zimmer keinen Besuchsverkehr hat, die Türfugen relativ gut gedichtet werden konnten und man damit die grundsätzliche Leckrate des Schlosses nachweisen konnte.

Ferner wurde noch in der Großen Galerie im bestehenden Abluftschlauch des offenen Kamines fliegend ein mechanischer Abluftventilator betrieben, der zeigen sollte, wie groß der natürliche Luftwechsel nur durch Auftrieb im Verhältnis zum Luftwechsel, verstärkt durch einen Abluftventilator, ist.

Die Messungen zeigten, daß in der 2. Meßperiode mit dem aktivierten Ventilator zwar Unterschiede zu jenen Messungen ohne aktiven Ventilator zu erkennen waren, diese aber nicht so signifikant groß waren, daß sie für die weitere Betrachtung der Luftwechselzahlen im Schloß von Bedeutung wären. Dies läßt den Schluß zu, daß stärkere treibende Kräfte wie Temperaturunterschiede oder Undichtheiten in der Hülle des Schlosses für die Luftwechselzahlen in den betreffenden Räumen verantwortlich sind (Meßorte s. Abb. 9).

Die Meßergebnisse im „Reichen Zimmer der Kaiserin" mit dem aufwendigen Glastunnel haben eindeutig bewiesen, daß im Tunnel und in den umliegen-

5 Jan Holmberg: Ventilation Measurement in Schloß Schönbrunn, Vienna with Passive Tracer Gas Technique; Report Nr. 5, Sweden within EU 1383 PREVENT, Stockholm Nov. 1996

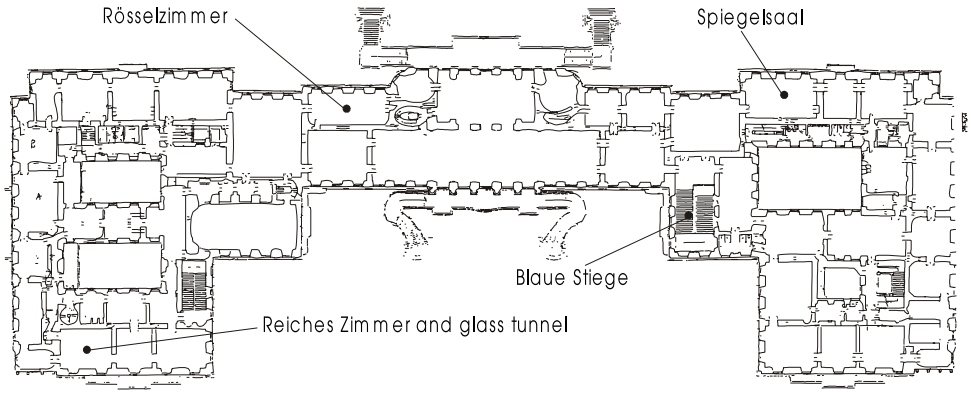


Abbildung 9:
Schematischer Plan des 1. OG mit den Meßorten.

den Zimmern ein nachweisbarer Luftwechsel stattfindet, während im abgedichteten „Reichen Zimmer“ (nach Dichtung der Fenster und sonstiger Undichtheiten) kaum ein Luftwechsel nachzuweisen ist. Somit ging die verfolgte Strategie, die zukünftige Schmutz- und Staubbelastung des „Reichen Zimmers“ auf ein Minimum zu reduzieren, voll auf: Da die Ausstattung des „Reichen Zimmers“ einmalig ist, war versucht worden, mit Hilfe des Glastunnels und der Reduzierung des Luftwechsels im verbleibenden Raum die Reinigungsintervalle zu minimieren. Jede mechanische Reinigung der textilen Ausstellungsstücke (z. B. durch vorsichtiges Absaugen) bedeutet einen Substanzverlust. Damit ist absehbar, wann von der historischen Substanz nichts mehr vorhanden sein wird.

Die Messungen im Rösselzimmer haben gezeigt, daß das Dichten der Fugen zu den Öffnungen zu den anliegenden Zimmern nachweislich erfolgreicher war, als das Dichten der Fensterfugen. Daraus folgt, daß es doch noch erhebliche Undichtheiten in der Hülle des Schlosses gibt, die nicht so offensichtlich wie Fenster- oder Türfugen sind.

8. Volumenmodell

Im Jahre 1997 wurden die Luftvolumina der Schauräume im Schloß kalkuliert, um für eine geplante kontrollierte Lüftung die Größenordnung des Luftwechsels und die entsprechend notwendigen Luftmengen zu kennen.

Vorweg

Die Untersuchungen über die Luftwechselzahlen im Schloß Schönbrunn haben gezeigt, daß eine sehr hohe Luftwechselzahl von ca. 15 im Schloß herrscht im Falle der Querdurchlüftung. Die Hauptursache ist in dem unkontrollierten Öffnen der Fenster durch das Aufsichtspersonal zu suchen. Das bestätigen auch die Untersuchungen im Vieux-Laque-Zimmer, die gezeigt haben, daß auf Grund der Fensterundichtheiten hinter den Lack-Tafeln im Innenraum zwischen Wand und Tafel teilweise Außentemperaturverhältnisse herrschen. Die unterschiedlichen Luftdruckverhältnisse auf der Luv- und Leeseite des Gebäudes tragen zu dem hohen Luftwechsel im Schloss bei.

Kippes 1997 wies sehr große Unterschiede zwischen den Luftwechselzahlen einer dichten Wohnung im zweiten Obergeschoß des Schlosses und den Schauräumen nach. Dies belegten auch die Tracergasmessungen von J. Holmberg 1996.

Diese unkontrollierten Luftwechselzahlen bedeuten ebenso unkontrollierten Einfluß des Außenklimas auf den Innenraum, so daß die schützende und zeitverzögernde, amplitudendämpfende Wirkung des starken Außenmauerwerks nur geringfügig wirksam wird – mit allen negativen Konsequenzen für die Kunstgegenstände. Weiters gelangen über die Fensterundichtheiten durch den Luftwechsel auch unerwünschte Mengen Staubes und anderer Luftschadstoffe in die Schauräume.

AUFGABENSTELLUNG

Die folgende Untersuchung geht von der grundsätzlichen Überlegung aus, daß abgedichtete Fenster den natürlichen Luftwechsel über die Fugen auf ein Minimum reduzieren.

Um aber die notwendige Lufterneuerung zu gewährleisten, sollen die bestehenden Kamine reaktiviert werden. Dabei gilt es, die Kaminquerschnitte zu klären und die Situierung der Kamine mit den entsprechenden Raumvolumina in Relation zu bringen, um nachzuweisen, ob diese Kamine geeignet sind, einen entsprechenden Luftwechsel für die daran angebundenen Schauräume zu schaffen.

VORGANGSWEISE

Anhand von planlichen Unterlagen wurde vor Ort geklärt, welche der Schächte für eine natürliche Lüftung einsetzbar sind. Diese wurden in einem Grundrißplan eingetragen (vgl. Abb. 10).

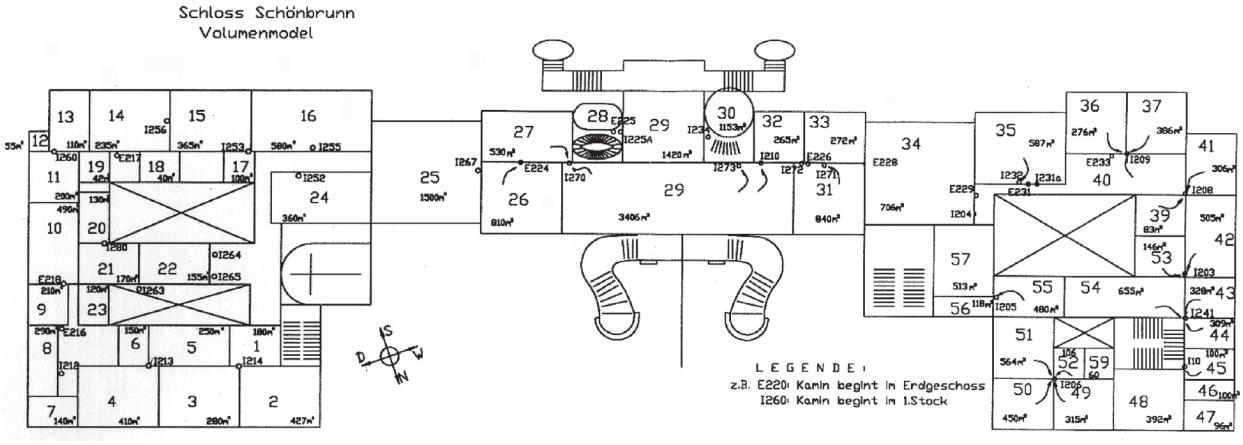


Abbildung 10:
Luftvolumenmodell

Setzt man die Schächte mit den Raumvolumina in Relation, ergibt sich, daß bei einer Luftgeschwindigkeit in den senkrechten Abluftkaminen von 1 m/s immer ein mindestens einfacher Luftwechsel der dazugehörigen Räume gewährleistet werden kann. Nachdem ein einfacher Luftwechsel angestrebt wird, sind diese Kanäle und deren Querschnitte geeignet, das angestrebte Projekt zu realisieren.

Sollte man aus spezifischen Notwendigkeiten eine höhere Luftwechselzahl für die Schauräume benötigen, um beispielsweise Nachtkühlung in überwärmten Räume bei entsprechend geeigneten außenklimatischen Verhältnissen durchführen zu können, kann man durch Erhöhung der Förderleistung der eingesetzten Ventilatoren für eine entsprechende höhere Luftwechselzahl sorgen.

Wichtig in diesem Zusammenhang ist, daß die Steuerung die absoluten Feuchtewerte des Innenklimas mit dem Außenklima vergleicht und den Ventilatorlauf freigibt, wenn keine negativen Auswirkungen auf Raumschale und Exponate zu befürchten sind. Eine dementsprechende Regelsoftware wurde vom Autor entwickelt.

Die einzusetzenden Ventilatoren sollten Rohrventilatoren mit drehzahlgeregelten, druckdifferenzgesteuerten Motoren mit der entsprechenden Förderleistung sein. Da in gewissen Situationen der Aufbau eines leichten Gegendruckes in den Schauräumen erforderlich ist, werden reversierbare Motoren vorgeschlagen.

Die nachströmende Luft soll aus definierten Bereichen kommen, sei es aus den Bereichen der Eingangshallen, wo vorkonditionierte Luft zur Verfügung steht, sei es über definierte Öffnungen oder Fugen, die dementsprechend staubgeschützt ausgeführt werden.

Es wird empfohlen, die Steuerung der Ventilatoren über eine Zweidraht-Busleitung zu bewerkstelligen, die in Verbindung mit der Innen- und Außenklimakontrolle erfolgt. Auch dieses Bussystem wurde vom Autor, da es am Markt in der Form nicht zur Verfügung stand, entwickelt.

Zusammenfassung:

Die Erarbeitung eines Volumenmodells für das Schloß Schönbrunn hat nach einer quantitativen Luftmengenberechnung gezeigt, daß die Idee der kontrollierten Lüftung der Schauräume über vorhandene, noch nicht belegte, vertikale Schächte (alte, historische Kaminschläuche, etc.) stichhaltig ist und auf Grund der gegebenen Schachtquerschnitte mindestens ein einfacher, meist sogar ein bis zu fünffacher Luftwechsel durch den Einsatz geeigneter Ventilatoren erreicht werden kann.

Voraussetzung für diese kontrollierte Lüftung in Schloß Schönbrunn ist die möglichst konsequente Abdichtung aller Öffnungen der Gebäudehülle wie Fugen, Fenster und Türen. Auch ein „kontrolliertes" Öffnen von Fensterflügeln zum Lüften sollte aus den genannten Gründen unterbleiben.

9. Einbau der kontrollierten Lüftung in Schloß Schönbrunn

Aufgrund der bislang dargelegten Forschungsergebnisse wurde die Entscheidung getroffen, in Schloß Schönbrunn eine kontrollierte Lüftung über Erdwärmetauscher, verbunden mit einem Abluftsystem über Ventilatoren in ca. 25 Kaminschläuchen für den West-, Mittel- und Osttrakt des Schlosses, als ein die Außenkonditionen moderierendes System einzubauen.

Abbildung 1 eingangs dieses Beitrags zeigt das geplante Modell, welches in seiner ersten Fassung den Erdwärmetauscher noch als durch den Ehrenhof in Richtung Hietzinger Tor neu zu verlegendes System aus Betonrohren vorsah. Erst die Entdeckung eines alten, ca. 250 m langen, unterirdischen, gemauerten, historischen Abwasserganges mit ca. 1,80 m Höhe und ca. 80 cm Breite ließ die Grundsatzentscheidung rasch reifen (s. Abb. 11).

Als Luftvolumen für die Schauräume des westlichen Traktes des Schlosses, für den Mitteltrakt und für den Osttrakt ging man von jeweils ca. 7.000 m^3 Luft/Stunde für einen ca. 1,5 fachen Luftwechsel aus, so daß in Summe eine kontrollierte Luftmenge von ca. 20 bis 25.000 m^3/h Luft für den kontrollierten Luftaustausch im Schloß geplant wurde. Für die ca. 7.000 m^3/h Luft der Schauräume des Osttraktes ist vorgesehen, die Fortsetzung des historischen, verfallenen Erdwärmetauschers östlich des Schlosses in Richtung „Meidlinger Tor" zu reaktivieren und die Luft durch bestehende Kellerräume im Kammergarten und den noch zu planenden Heizraum „Ost" zur Verteilung im Hause über bestehende große historische Warmluftkanäle in die Obergeschosse des Osttraktes zu führen.

Die Abluftventilatoren wurden in den als Abluftschläuche genutzten Kaminen eingesetzt, wobei vom Planer eine technisch interessante Novität entwickelt wurde:

Die äußerst leicht laufenden, waagrechten Ventilatoren drehen sich aufgrund des natürlichen Auftriebes durch Autorotation. Diese Umdrehung wird erfaßt und zur zentralen Leittechnik gemeldet, die aus den Werten die aktuell fließende Luftmenge errechnet und mit dem geforderten Sollwert vergleicht.

Ist im konkreten Fall aufgrund widriger Witterungsverhältnisse keinerlei Luftwechsel gefordert oder erlaubt, so werden die eingebauten Brandschutzklappen geschlossen und damit der natürliche Auftrieb und Luftaustausch gestoppt. Sollte aber eine größere, als die bislang durch natürlichen Auftrieb transportierte

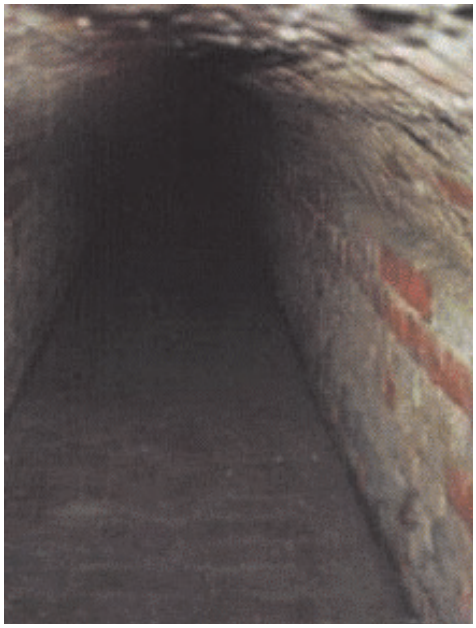
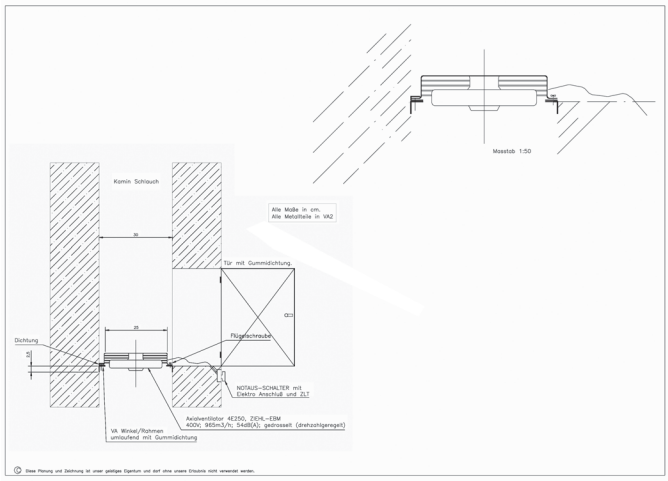


Abbildung 11:
Blick in den Erdwärmetauscher, Foto Autor.

Abbildung 12:
Einbaudetails der Abluftventilatoren der Kamine.



Luftmenge gefordert sein, wird den Ventilatoren genau so viel Strom zugeführt, daß die erwünschte Luftmenge transportiert und damit ausgetauscht wird.

Mit diesem System wird Strom gespart, so daß die Betriebskosten minimiert werden.

Die Zeichnung (Abb. 12) gibt einen Einblick in die Einbaudetails zum Abluftventilator, der in verschiedene, ungenutzte Kamine in Schloß Schönbrunn eingebaut wurde.

Die Abbildungen 13 und 14 zeigen den Kanal (Erdwärmetauscher) in den historischen Quellen bzw. in aktuellen Plänen und Erhebungen.

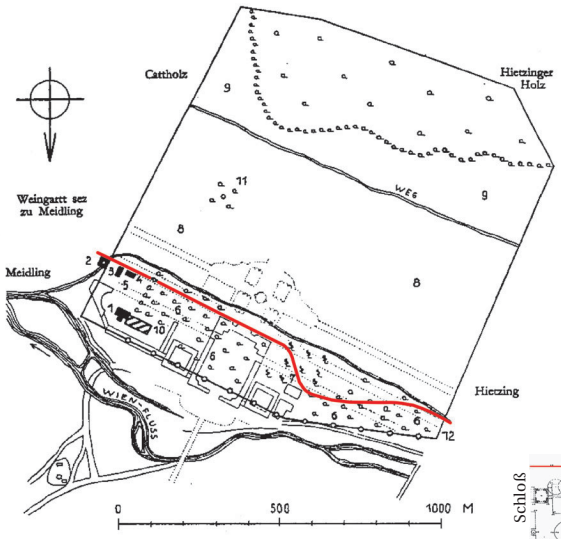


Abbildung 13:
Historische Quelle über den Kanal im Boden, der als Erdwärmetauscher genutzt wird, hier noch „Mühlbachkanal“, rot markiert. Quelle: Oskar Raschauer: Schönbrunn. Der Schlossbau Kaiser Josefs I.; Wien 1960, S. 14.

Beschreibung von
„Hof und Müll Catterburg“: 1569

1 Hauß
2 Müll
3 Mayr Hauß
4 Stall, Stadl, Schupfen
5 Hoff
6 Lust- oder Paumgartten
7 Weingartten
8 Veldt oder annPau
9 Wißmadt und Vieh Waidt

Lusthaus Schönbrunn 1642

10 Lusthaus
11 Schöner Brunnen
12 Tiergartenmauer mit 12 Stationen (1667) an der Nordseite

~ Mühlbach vor 1700
= = = = Mühlbachkanal nach 1700

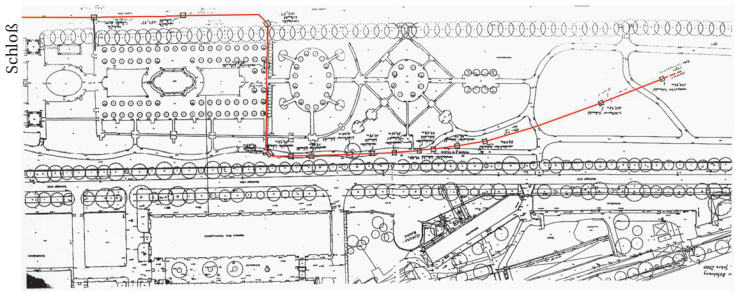


Abbildung 14:
Lageplan des Erdwärmetauschers im Schlosspark, rot markierte Linie.

10. Dynamische Simulation des Erdwärmetauschers

Der folgende Forschungsbericht aus dem Jahre 2002 über die Simulation des Lufttunnels West im Vergleich zu den faktischen gemessenen Zuständen im Erdwämetauscher zeigt, wie nah eine ordnungsgemäß gerechnete und interpretierte Simulation an die Realität kommt.

Temperaturunterschiede zwischen Theorie und Praxis von 1 bis 2 K sind verblüffend genaue Ergebnisse und zeigen, daß der Denkansatz, den Erdwärmetauscher einzusetzen, um Temperatur- und Feuchtamplituden der Außenluft zu verringern, der richtige Weg war, den schadenspräventiven, kontrollierten Luftwechsel in Schloß Schönbrunn einzuführen. Die Praxis bestätigte dies, da nach Implementierung der kontrollierten Lüftung im Schloß die Klagen über die „Hitzetage" verstummten und eine Glättung der Spitzen der Raumtemperatur- und Feuchtewerte in den Schauräumen eintrat.

Es soll an dieser Stelle jedoch nicht verhehlt werden, daß die Diskussion über die Regelalgorhythmen für die Steuerung der kontrollierten Lüftung „endlos" war und es schwierig war, die Regelkriterien klar und einfach zu formulieren. Es zeigte sich, daß ein gewünschter Befeuchtungseffekt bei zu großer Trockenheit im Schloß nicht einfach damit zu erreichen war, Luft mit einer über der erlaubten Grenze von 65% liegenden relativen Feuchte ins Schloß zu bringen. Erst die Mischung der verschiedenen zu „trockenen" Innenzustände mit den zu „feuchten" Außenverhältnissen im Schloß erlaubt die Herstellung eines optimalen Raumklimas.

Auch die nächtliche Vorkühlung der Baumassen im Sommer im Falle kühlerer Außentemperaturen nachts – immer unter strikter Beachtung, daß man sich von „außen" keine schlechteren Verhältnisse ins Schloß holt, als den Artefakten zuträglich ist – ist mit dem Einsatz des Erdwärmetauschers möglich und wird erfolgreich praktiziert.

Außerdem gilt immer, die wesentliche Grundregel der Schadensprävention zu beachten: Alle mikroklimatischen Veränderungen müssen – gepuffert durch die Baumassen – möglichst träge vor sich gehen.

Im Rahmen der Grundsatzüberlegungen zu den technischen Ausführungen stellten sich die Fragen, wie sich der zufällig gefundene, ca. 250m lange Erdwärmetauscher auf die konditionierte Zuluft auswirkt, wie viel an Kühlenergie im Sommer, an Heizenergie im Winter und an Befeuchtungsleistung man erwarten kann. Vor allem interessierte auch, in wie weit man den bestehenden Erdwärmetauscher mit Hilfe eines mathematischen Modells simulieren kann.

Dies sollte am einfachsten durch die dynamische Simulation und den Vergleich der Ergebnisse der faktischen Temperatur- und Feuchtemessung vor Ort mit denen der Simulation erfolgen.

Die Klärung dieser Fragen ist insofern von Bedeutung, als der Betreiber in Schloß Schönbrunn für den Bauteil „Ost" ebenfalls die Reaktivierung eines bestehenden Erdwärmetauschers mit historischen Kellerräumen umsetzen möchte, wenn die Ergebnisse des ersten Erdwärmetauschers „West" positiv zur Schadensprävention des Innenraumklimas beigetragen haben.

Wetterdaten

Gemessene Außenlufttemperaturen und relative Feuchten standen für das ganze Jahr zur Verfügung. Die solare Einstrahlung, die zwar nur einen geringe Auswirkung hat, wurde aus langjährigen Strahlungswerten abgeleitet und in stündliche Werte umgerechnet.

Aufbau des Erdwärmetauschers (Erdstollen)

Der Erdstollen ist 300 m lang und mit Vollziegeln ausgeführt. Die angenommenen Wärmeleitfähigkeiten wurden aus der Literatur entnommen und sind in der nachfolgenden Tabelle angeführt:

Materialien	Wärmeleitfähigkeit W/mK	Wärmekapazität kJ/m³K
Vollziegel	0.76	1564
Erdreich (höhere Feuchte)	2.0	2000

Die Geometrie des Erdwärmetauschers wurde aufgrund des zur Verfügung stehenden Lageplans und eines Ortstermins aufgenommen und entsprechend im Simulationsprogramm abgebildet. Die genauere Aufnahme durch Geometer und Kanal-TV-Firmen ergab: Die Breite des Stollens beträgt ca. 0,80 bis 1,10 m, die Höhe ca. 1,10 m, die Erdreichüberdeckung ca. 20 cm vor dem Westflügel des Schlosses bis ca. 1,10 m bei Zuluftbauwerk.

Der Grundwasserspiegel liegt nach Aussage der Betreiber ca. 1m unter dem Stollen. Aus dem Vergleich Simulation/Messung konnte kein wesentlicher thermischer Einfluß dieser Grundwasserschicht festgestellt werden, im Gegenteil, erst mit einer adiabatischen Randbedingung konnte eine gute Übereinstimmung mit den Meßergebnissen erzielt werden.

Die genaue Beobachtung und Analyse des Erdwärmetauschers hat gezeigt, daß eine – über das Jahr gesehen – fast durchgehende Befeuchtung des Stollens zu beobachten ist, die mit hoher Wahrscheinlichkeit aus dem nahen Grundwasser resultiert.

Annahmen Lüftung

Für die Lüftungsanlage, die ihre Zuluft aus dem Erdwärmetauscher erhält, wurde angenommen, daß sie zwischen 9 und 17 Uhr eingeschaltet ist und ca. 10.000m³/h befördert.

Methode

Die bauklimatischen Untersuchungen wurden mit Hilfe einer dynamischen Simulation durchgeführt. Das Programmpaket TRNSYS 15 erlaubt die detaillierte Modellierung eines Gebäudes, das auch mit unterschiedlichen Heizungssystemen oder solaren Komponenten ausgerüstet sein kann.

Temperaturen, Feuchtigkeitszustände und Wärmebeiträge der Raumgruppen werden in Zeitschritten von 15 Minuten berechnet in Abhängigkeit von

- Klima (Außentemperatur, direkte und diffuse Einstrahlung auf alle Gebäudeaußenteile, relative Feuchte, Wind),
- Nutzereinflüssen (Lüftung, innere Lasten durch Personen, Beleuchtung und Geräte),
- Qualität der Gebäudeteile (Speicherfähigkeit und Leitfähigkeit der Wärme und Feuchte, solare Transmission bei transparenten Bauteilen, etc.),
- Haustechnik (Erdreichwärmetauscher),
- Regelung.

Eine gewünschte Systemvariante wird aus bautechnischen Komponenten, dem Heizungssystem und dessen Regelung, einem Lüftungssystem usw. zusammengesetzt, die nun für jeden Zeitschritt den Einwirkungen von Außenklima und Nutzern ausgesetzt werden.

Die Modellierung des Erdreichwärmetauschers erfolgt durch die Teilung des Erdreiches und der Vollziegel in insgesamt 576 Teile, für die in jedem Zeitschritt (interner Zeitschritt 0.5 Minuten) die Wärme- und die Feuchtebilanzgleichung gelöst wurden.

Das Modell kann folgende physikalischen Prozesse abbilden:

- Wärmeleitung
- Wärmespeicherung
- Verdunstung
- Kondensation
- Wasserinfiltration und -diffusion vom Erdreich in den Kanal und in umgekehrter Richtung.

Nicht miteinbezogen werden Änderungen in den physikalischen Kennwerten wie beispielsweise die Änderung der Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt.

Der Kanal wurde in Durchströmungsrichtung mathematisch in 9 Abschnitte geteilt, wobei an den Meßstellen (E-Einlaufschacht; W-Wartungschacht) der Temperatur- und Feuchtezustand ausgegeben wurden, um die errechneten Werte mit den Messungen vergleichen zu können.

Die aus den Messungen der relativen Feuchten ableitbare Befeuchtung durch die – wahrscheinlich aus dem Grundwasser – eindiffundierende Feuchte wurde im Simulationsmodell durch Wasserinfiltration berücksichtigt.

Die ersten 4 Simulationsvarianten dienten der Abstimmung von Baustoffwerten und Randbedingungen (Einfluß Grundwasser).

Es wurden folgende Einflußgrößen untersucht:

- Wärmeleitfähigkeit Erdboden (stark von Feuchtegehalt abhängig)
- Wärmekapazität Erdboden (stark von Feuchtegehalt abhängig)
- thermischer Einfluß des Grundwassers
- Lüftungslaufzeiten und Höhe des Luftwechsels

Daraus wurde der Erdstollen, wie in den Annahmen (s.o.) dokumentiert, abgeleitet.

Thermisches Verhalten

Die simulierten und gemessenen Temperaturen sind in den folgenden Abbildungen 15 bis 17 dargestellt. Für die Wirkung des Erdwärmetauschers ist die Meßstelle am Wartungsschacht relevant. Es ergibt sich eine hervorragende Übereinstimmung mit den Meßergebnissen. Dies ist umso erstaunlicher, da über einen Teil der Meßzeit das Luftregime nicht bekannt war. Im Einzelnen lassen sich folgende Beobachtungen machen:

- Die Temperaturunterschiede liegen fast über den gesamten Meßzeitraum unter 1 K. Dies bedeutet aufgrund der Komplexität des physikalischen Modells und der vielen Unsicherheiten in der Messung ein hervorragendes Ergebnis.
- In einigen Perioden tritt sogar eine völlige Übereinstimmung auf, die wahrscheinlich aus der Übereinstimmung des Lüftungsverhaltens resultiert: z. B. November, Anfang Dezember, Mitte August. Anfang Oktober waren die Laufzeiten der Lüftungsanlage deutlicher länger, was am Temperaturprofil (Abb. 15) abgelesen werden kann.
- Abweichungen sind nur im Dezember feststellbar (Abb. 16). Allerdings ist bei ähnlichem dynamischen Profil (Absinken der Temperatur in der

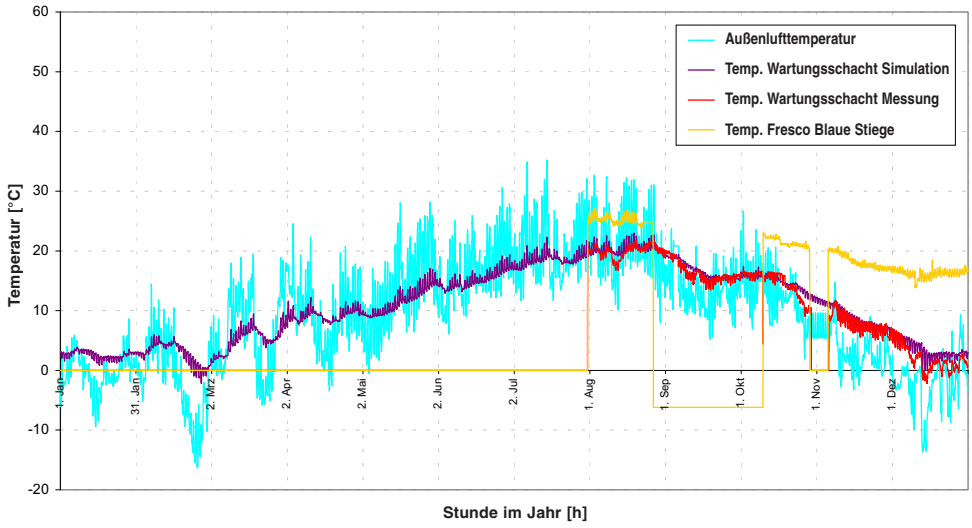


Abbildung 15:
Temperatur Außen, Stollen und Blaue Stiege Meßdaten von Aug. bis Dez. 2001.

Abbildung 16:
Temperatur Außen, Stollen und Blaue Stiege, Dezember 2001

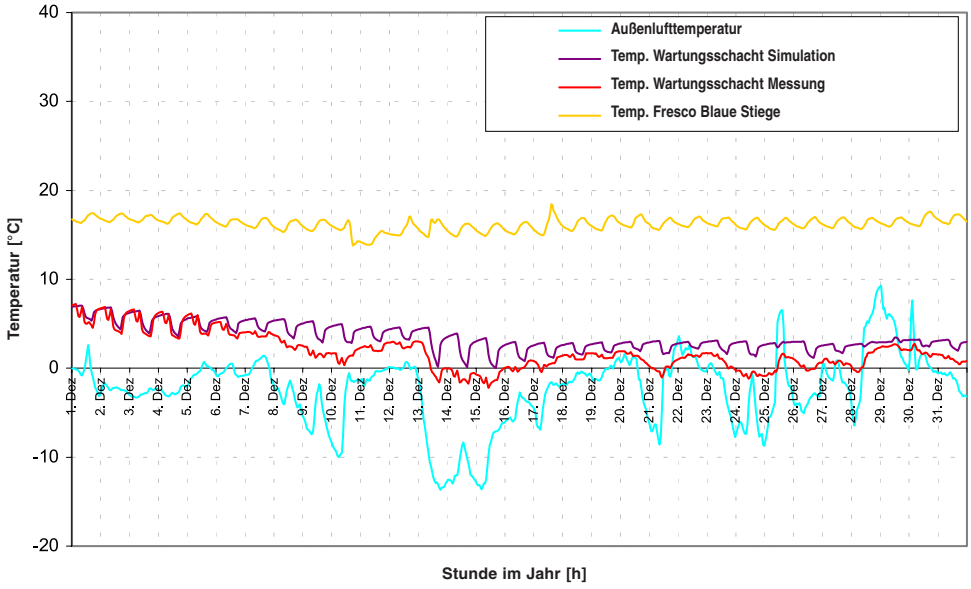
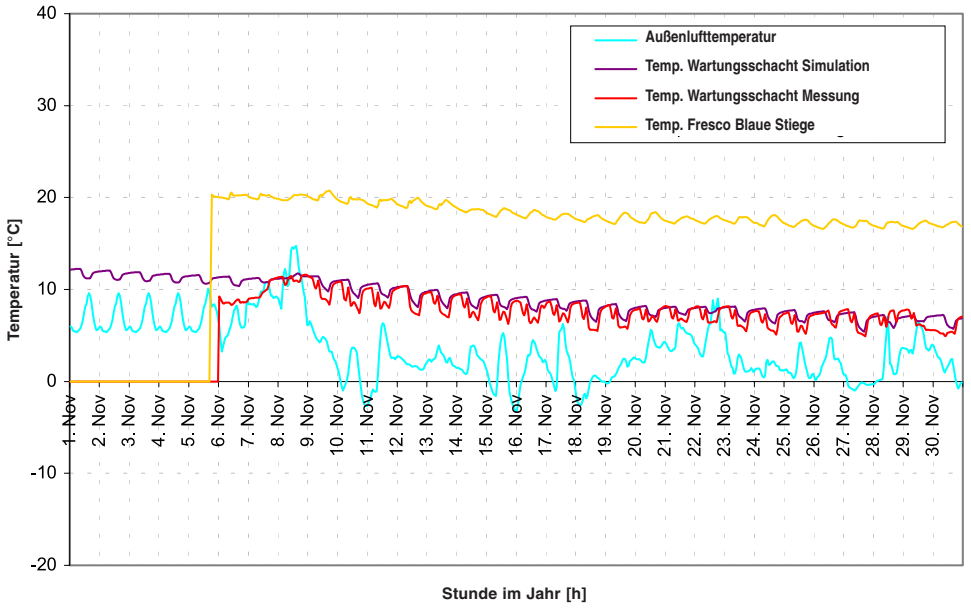


Abbildung 17:
Temperatur Stollen Wartungsschacht, Blaue Stiege November 2001.



Betriebszeit: Lüftung, außerhalb des Erdwärmetauschers: Ansteigen der Temperatur) wie beispielsweise am 11. und 12. Dezember oder 18.–20. Dezember eine weitgehende Übereinstimmung festzustellen.

Weiters ist zu beachten, daß die Meßstelle Wartungsschacht insbesondere außerhalb der Betriebszeit der Lüftungsanlage relativ stärker an die Außenlufttemperatur angekoppelt ist, da der Schachtdeckel nur aus einer Stahlplatte besteht und daher kaum einen Wärmewiderstand darstellt.

Die Temperatur an der Meßstelle Wartungsschacht entspricht daher in diesem Fall wahrscheinlich nicht dem Temperaturprofil an ungestörten Stellen des Stollens. Es ist auch anzunehmen, daß im Dezember die Lüftungsanlage an einigen Tagen entweder mit geringerer Leistung fuhr oder überhaupt abgeschaltet war (14–16. Dez., 24–25. Dez.).

Durch den Erdstollen kann in der Betriebszeit (8h pro Tag) die folgende Heiz- bzw. Kühlenergie gewonnen werden:

Sensible Wärmeänderung durch Erdwärmetauscher	**Heizung (Oktober bis April)**	**Kühlung (Juni bis August)**
kWh	13.192	–10.519

Leistungen/Energie		**Heizung**	**Kühlung**
Energie (geregelt)	kWh	13.192	–10.519
Energie (Betriebszeit Lüftung immer an)	kWh	4.275	–9.616
Maximale Heizleistung	kW	48.1	
Maximale Kühlleistung	kW		–46.8

Als Extremtemperaturen ergeben sich:

Maximal/Minimal-Temperaturen	**Außenluft-temperatur**	**Wartungsschacht-Simulation (1.1-31.12)**	**Wartungsschacht-Messung (1.8-31.12)**
	°C	°C	°C
Maximaltemperatur	35.2	23.0	21.7
Minimaltemperatur	–16.3	–2.2	–2.2

Kommentar:

- Die Übereinstimmung von Simulation und Messung ist in den Zeiträumen mit augenscheinlich gleichem Lüftungsregime (Höhe und Einschaltdauer der Lüftung) ausgezeichnet.
- Der Erdwärmetauscher beschränkt die maximale Temperatur auf 21,7°C bzw. das Temperaturminimum auf –2.2°C.
- Die Zulufttemperatur ist durch den langen Wärmetauscher sehr ausgeglichen.
- Die maximal erreichbare Kühlleistung liegt bei 46,8 kW, die max. Heizleistung knapp höher bei 48,1 kW, d. h. vergleichsweise hoch.

An den kritischen Tagen kann ein beachtlicher Beitrag des Stollens geleistet werden.

- Die resultierende Kühlenergie liegt mit ca. 10 MWh vergleichsweise niedrig, wobei in der Betriebszeit in den Sommermonaten zumeist eine Kühlung erfolgt. Der Heizenergiebeitrag beträgt ca. 13 MWh, wenn nur dann über den Erdwärmetauscher gefahren wird, wenn die Außenlufttemperatur unterhalb der Erdwärmetauschertemperatur liegt. Sonst ist der Heizenergiebeitrag ca. 4 MWh (Lüftung immer an).

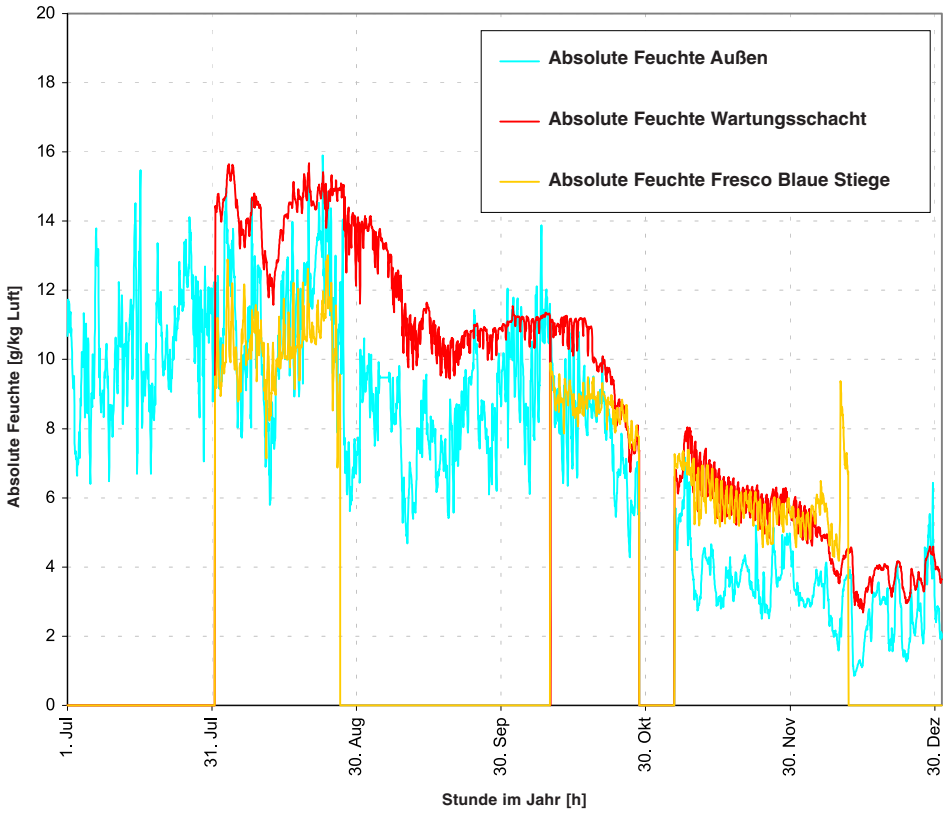
Feuchteverhalten

Die gemessenen absoluten Feuchtegehalte in der Außenluft, im Erdstollen sowie an der blauen Stiege sind in Abbildung 18 dargestellt.

Folgende Grundsatzaussagen wurden aus dieser Graphik abgeleitet:

- Fast im gesamten Jahr wird die Zuluft durch den Erdwärmetauscher befeuchtet. Die zugeführte Wassermenge beträgt bis zu 8 g/kg Luft. Die Entfeuchtungsleistung liegt im Sommer bei maximal 1 g/kg Luft.
- Die Feuchte an der blauen Stiege liegt im August im Bereich der Außenluftfeuchte (Abb. 8), d. h. sie war in dieser Zeit auch stark mit Außenluft direkt belüftet (oder die Lüftungsanlage war außer Betrieb, was nicht mehr eruiert werden konnte (s. o.).
- Im Winter erfolgt eine Befeuchtung mit ca. 2–5 g/kg Luft, was bei allgemeiner winterlicher Trockenheit eine wesentliche schadenspräventive Ergänzung ist.

Abbildung 18:
Absolute Feuchte Außen, Stollen und Blaue Stiege, 2. Halbjahr 2001 (mit Unterbrechungen)



Insgesamt tritt nur an wenigen Stunden im Jahr eine Entfeuchtung durch den Erdwärmetauscher ein.

Die resultierenden Befeuchtungsmengen sind im Simulationsmodell implementiert, daraus ergeben sich die in den Abbildungen 19 bis 21 dargestellten relativen Feuchten.

Abbildung 19:
Relative Feuchte Außen, Wartungsschacht und Blaue Stiege, August 2001

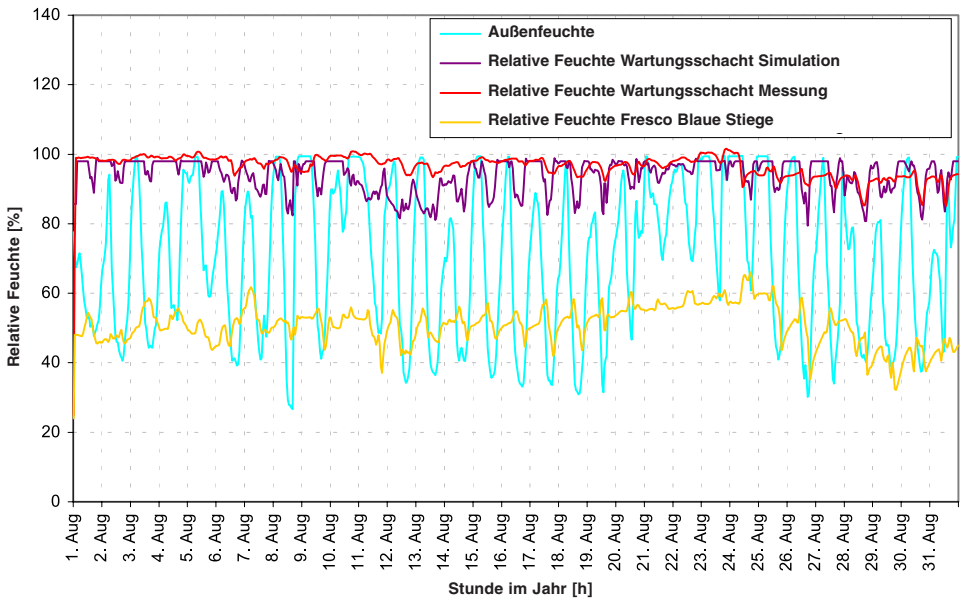


Abbildung 20:
Relative Feuchte Außen, Wartungsschacht und Blaue Stiege, 2001.

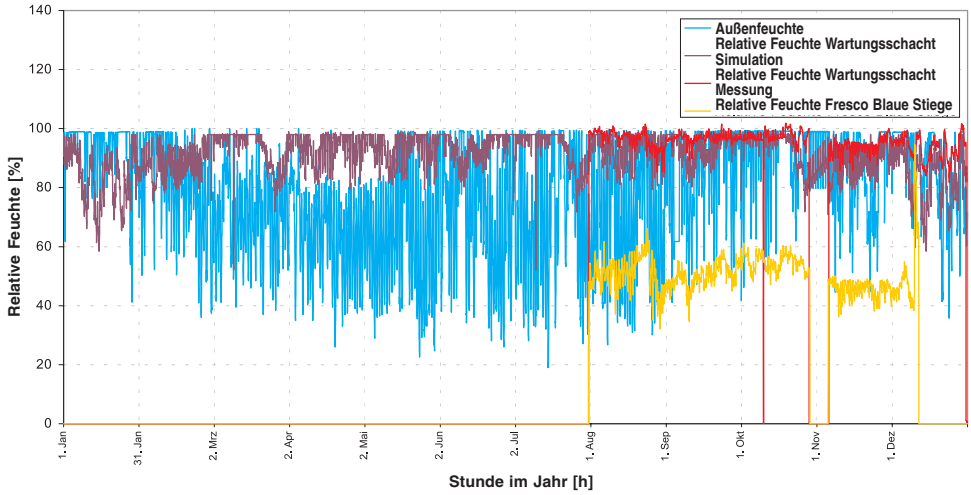
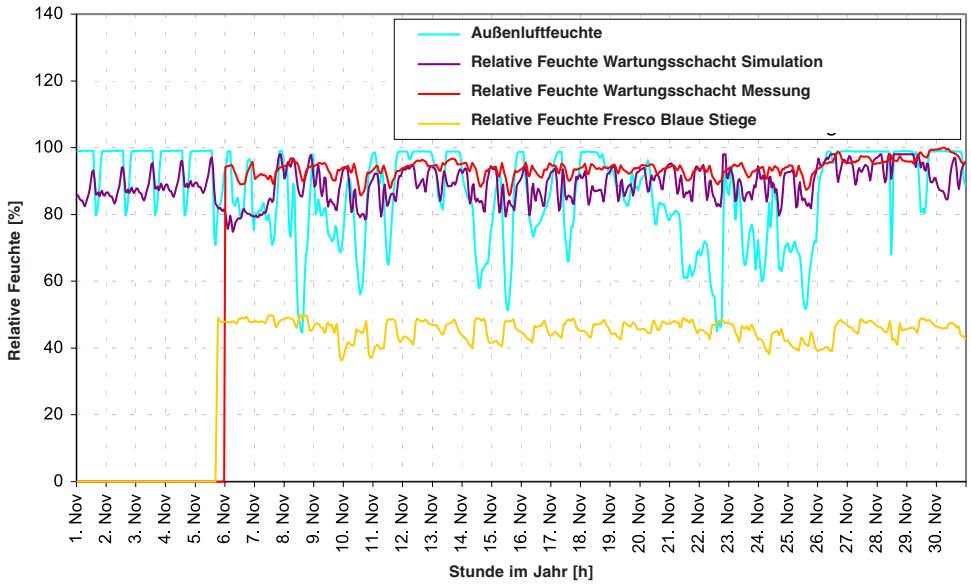


Abbildung 21:
Relative Feuchte Außen, Wartungsschacht und Blaue Stiege, November 2001



Die Verläufe der relativen Feuchte zeigen:

- Die relative Feuchte im Erdwärmetauscher liegt ganzjährig über 90%.
- Die Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation ist zum Großteil sehr gut
- Abweichungen ergeben sich insbesondere im Dezember, was hauptsächlich auf die unterschiedlichen Temperaturen zurückzuführen ist.

Die Abbildung 19 zeigt die relative Feuchteentwicklung außen, im Schacht und im Schloß (Blaue Stiege in der Nähe eines Exponates) im November.

Der Feuchteverlauf der relativen Feuchte in der Außenatmosphäre, im Erdwärmetauscher und im Schloß im November wird in der Abbildung 21 wiedergegeben.

Kommentar:

- Die Befeuchtung der einströmenden Zuluft bis ca. Oktober hat wahrscheinlich den hohen Grundwasserspiegel als Ursache. Dadurch stellen sich fast ganzjährig relative Feuchten im Erdwärmetauscher über 90% ein, sowohl während des Betriebes der Lüftungsanlage, als auch bei Stillstand.

– Indirekt wird die Befeuchtung auch durch die Länge des Kanals verstärkt, da damit eine sehr große Oberfläche zur Befeuchtung zur Verfügung steht.
– Diese Befeuchtung ist im Winterhalbjahr erwünscht. Im Sommerhalbjahr zeigen die Feuchtemessungen im Raum, daß die Feuchte keine schädigende Auswirkung auf die Exponate und das Mikroklima hat, da der Erdwärmetauscher zur Vergleichmäßigung des Mikroklimas im Schloß beiträgt.

Zusammenfassung und Schlußfolgerungen

Das Temperatur- und Feuchteverhalten des in Schloß Schönbrunn als Zuluftkanal genutzten unterirdischen Erdwärmetauschers (Weststollen) wurde anhand dynamischer Simulation untersucht. Dabei ergeben sich folgende, grundsätzliche Ergebnisse:

– Die Übereinstimmung von Simulation und Messung ist ausgezeichnet, von wenigen Zeitabschnitten abgesehen, in denen das Betriebsverhalten der Lüftungsanlage nicht nachvollzogen werden konnte.
– Im Erdwärmetauscher stellt sich ganzjährig eine relative Feuchte von über 90% ein, was im Vergleich zur Außenluftfeuchte zu einer Befeuchtung der Zuluft führt. Als Hauptursache dafür kommt insbesondere das nur 1m tiefer liegende Grundwasser in Frage. Das heißt, die durchstömende Luft wirkt auf das Mauerwerk entfeuchtend.
– Durch die Führung der Zuluft im Stollen können in der besonders heißen Periode im Sommer bis 46 kW an sensibler Kälte zugeführt werden.
– Im Winter können maximal 48 kW an Heizleistung zugeführt werden.

Aus den Simulationsrechnungen und den Messungen kann daher gefolgert werden:

– Im Winterhalbjahr bringt die Zuluftführung im Stollen sowohl thermisch als auch hygrisch große Vorteile. Die derzeitige Betriebsführung kann beibehalten werden.
– Im Sommerhalbjahr bringt der Erdstollen eine beachtliche Kühlleistung, besonders in der Hitzeperiode, die Ausströmtemperaturen sind erfreulich gering.

Die Befeuchtung der Zuluft ist nur bedingt erwünscht, insbesondere nicht bei schwülen Außentemperaturverhältnissen in den heißen Monaten.

Eine Lösung des Problems, im Hochsommer die beachtliche Kühlleistung des Erdwärmetauschers ohne die befeuchtende Wirkung zu nutzen, könnte in einem hocheffizienten Wärmetauscher bestehen, der im Sommer die Außenluft ansaugt und deren Temperaturüberschuß an die kühle, aber zu feuchte Luft aus dem Erdstollen abgibt.

Wenn sich im Sommer die Temperatur- und Feuchteverhältnisse im Erdwärmetauscher im Vergleich zur Außenatmosphäre schlechter darstellen, ist es ratsam, den geplanten (und derzeit noch nicht ausgeführten) Kurzschlußbypass der Luftansaugung ohne Erdwärmetauscher, der durch einfache Klappen geregelt wird, zu aktivieren.

In naher Zukunft sollen die Schauräume EG, Ost, renoviert werden, wobei wiederum Bauteilheizung und kontrollierte Lüftung aus dem Erdwärmetauscher Ost mit der Abluftführung über Dach durch die Kamine geplant ist.

Vor allem wird wieder ein genaues Monitoring-System für die Raumklimadaten geplant, welches den Beteiligten erlaubt, die Schadensprävention und Klimakonstanz im Schloß zu prüfen und zu belegen und bei Abweichungen zu reagieren, sei es z. B. im Winter bei zu großer Trockenheit durch Verminderung der Raumtemperaturen bzw. durch Aufstellen von dezentralen Befeuchtern.

Michael Kotterer

Standardklimawerte und Haustechnik für Museen und historische Gebäude in der Diskussion

Abstract

Das Kunstforum Ostdeutsche Galerie Regensburg beteiligte sich zusammen mit internationalen Partnern an dem EUREKA-Projekt 1383 PREVENT, das sich mit dem Klima in Museen und historischen Gebäuden beschäftigte. Klimamessungen in dem 1989-93 generalsanierten Museum, dessen Klimakonzept mit den Schlagworten „optimierte Gebäudehülle/Wandtemperierung/minimierte Lüftung“ charakterisiert werden kann, belegen sehr gute, klimastabile Verhältnisse. Der Restaurator muss wissen, zu welchen technischen Konsequenzen seine Forderungen in der Praxis führen und welche Optionen es gibt. Bisher galt die Vollklimaanlage als Lösung aller Klimatisierungsprobleme, die Aufgaben wie Heizen, Kühlen, Befeuchten, Entfeuchten, Lüften und Frischluftversorgung über das Medium Luft zentral bewerktstelligt. Eine genauere Betrachtung zeigt jedoch, daß zu viel Luftbewegung eher schlecht ist, Luft das falsche Heizmedium darstellt und Folgeprobleme entstehen, statt sie zu lösen. Es gilt die präventive Qualität von Gebäude und Einrichtung ins Auge zu fassen, um eine möglichst unaufwendige zusätzliche Aufbereitung der Raumluft zu benötigen. Die bisher übliche Vollklimaanlage ist in der Regel unter ganzheitlichem Blickwinkel wenig sinnvoll und teuer in Anschaffung und Unterhalt. In der Verknüpfung einer optimierten Gebäudehülle mit einer Wandtemperierung als Beheizung und einer minimierten Lüftung besteht jedoch ein alternatives Konzept mit konservatorischen, physiologischen und energetischen Vorteilen.

Ferner wird die Entwicklung der so genannten internationalen Standardklimawerte für Museen behandelt. Eine Literaturstudie Holmbergs belegt, dass die strikte Forderung nach Einhaltung von Werten der relativen Luftfeuchte von 55% ± 5% nicht als allgemein verbindlicher Standard anzusehen ist. Eine breite Diskussion muss auf Basis der relevanten neuesten Literatur einsetzen. Inzwischen gibt es einen neuen ASHRAE Standard für Museen, Bibliotheken und Archive, der Kurzzeitschwankungen und jahreszeitliches Gleiten berücksichtigt. Es sollen nicht mehr wie bisher starre Werte eingehalten werden, vielmehr gilt es, bestimmte Schwankungsbreiten zu kontrollieren (fluctuation control level).

International Standard Climate Values and Climate Control Systems in Museums and Historical Buildings under Discussion

The museum Kunstforum Ostdeutsche Galerie in Regensburg participated, with international partners, in the EUREKA-Projekt 1383 PREVENT, which was concerned with climate in museums and historical buildings. During the Museum's renovation from 1989 to 1993, an alternative climate concept was realized which can be characterized by the key words “optimized building envelope / wall tempering / minimized ventilation”. Long-term climate measurements as part of the PREVENT Project demonstrated that this concept produces very good, stable climate conditions. The restorer must know to which technical consequences his demands lead in practice and which options are available. Until now, complete central air conditioning systems, which perform all climate control tasks: heating, cooling, humidifying, dehumidifying, ventilating, and fresh air exchange together in one central unit, were the “solution” to all climate control problems. However, a detailed reexamination of each of these individual tasks shows that such systems are rather the “problem”; that, in general, air movement is bad, air is the wrong

medium for heating, and it is impossible to centrally perform all climate control tasks optimally (or for museums even adequately). The preventive quality of buildings and furnishings must be included in designing climate control systems, so that as little treatment of room air as possible is needed. Complete central air systems not only make little sense but are expensive to purchase and maintain. Optimized building envelopes with wall tempering and minimized ventilation have conservational, physiological, energetic, and cost advantages.

This article also considers development of the so-called international climate values for museums. According to a literature study by Holmberg, the rigid demand for maintaining 55% ± 5% relative air humidity should not be seen as a standard. A broad discussion based on relevant recent literature must be initiated. A new American Society of Heating, Refrigeration, and Air Conditioning Engineers standard for museums, libraries, and archives has been published, which takes short-term fluctuations and seasonal variations into account. Instead of the previous rigid values, specific fluctuation control levels are to be maintained.

Das Kunstforum Ostdeutsche Galerie Regensburg beteiligte sich zusammen mit internationalen Partnern an dem EUREKA-Projekt 1383 PREVENT. Zu den Partnern zählen das Schloss Schönbrunn Wien, die Sammlung alter Musikinstrumente SAM des Kunsthistorischen Museums Wien, die Technische Universität Wien, das Gradbeni Institut ZRMK (Institut für Bauwesen) Ljubljana, und das Haftcourt Ltd. Institut in Stockholm, das für die schwedische Denkmalpflege arbeitet[1]. Das Kunstforum Ostdeutsche Galerie brachte in das Projekt Langzeitklimamessungen in dem 1989-1993 renovierten Museum ein. Denn mit dem Konzept der Landesstelle für die Nichtstaatlichen Museen in Bayern „Wandtemperierung in Verbindung mit einer minimierten Lüftung und einer optimierten Gebäudehülle“ wurde erstmalig in einem grösseren Gemäldemuseum dieser neue Weg in der Museumsklimatisierung beschritten (Abb. 1-7, vgl. auch Beitrag über die Klimamessungen im Kunstforum Ostdeutsche Galerie auf der beiliegenden CD-ROM).

Bisher gilt die Vollklimaanlage als Lösung von Klimatisierungsproblemen. Der Restaurator und Konservator muss aber wissen, zu welchen technischen Konsequenzen und welchem Kostenaufwand seine Forderungen in der konventionellen Planungspraxis führen und welche Alternativen es gibt. Um alternative Möglichkeiten zu erkennen, sind die Themen Lüften/Frischluftwechselrate, Kühlen, Heizen, Befeuchten und Entfeuchten genauer zu hinterfragen. Ferner gilt es, die präventive Qualität von Gebäude und Einrichtung ins Auge zu fassen, damit eine möglichst unaufwendige Technik für die Raumluftaufbereitung ausreicht. Schliesslich wird dargestellt, welche so genannten internationalen Klimastandards bisher galten, wie sie entstanden und ob sie tatsächlich weiter empfehlenswert sind.

[1] Frederick P. Boody. Henning Großeschmidt, Wolfgang Kippes, Michael Kotterer (Hrsg.), Klima in Museen und Historischen Gebäuden: Die Temperierung. Wissenschaftliche Reihe Schloss Schönbrunn, Wien 2004.

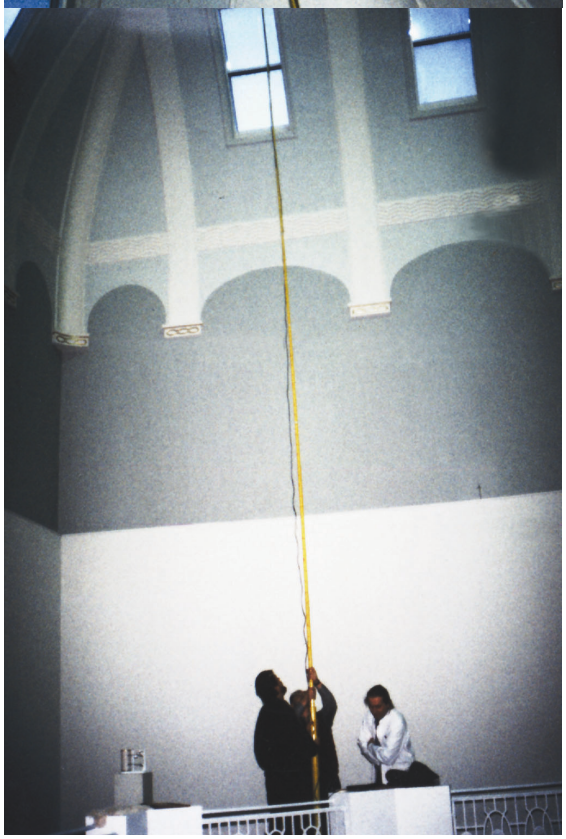
Abbildung 1:
Das Kunstforum Ostdeutsche Galerie Regensburg. Ansicht von Südosten. Foto Wolfram Schmidt, Regensburg.

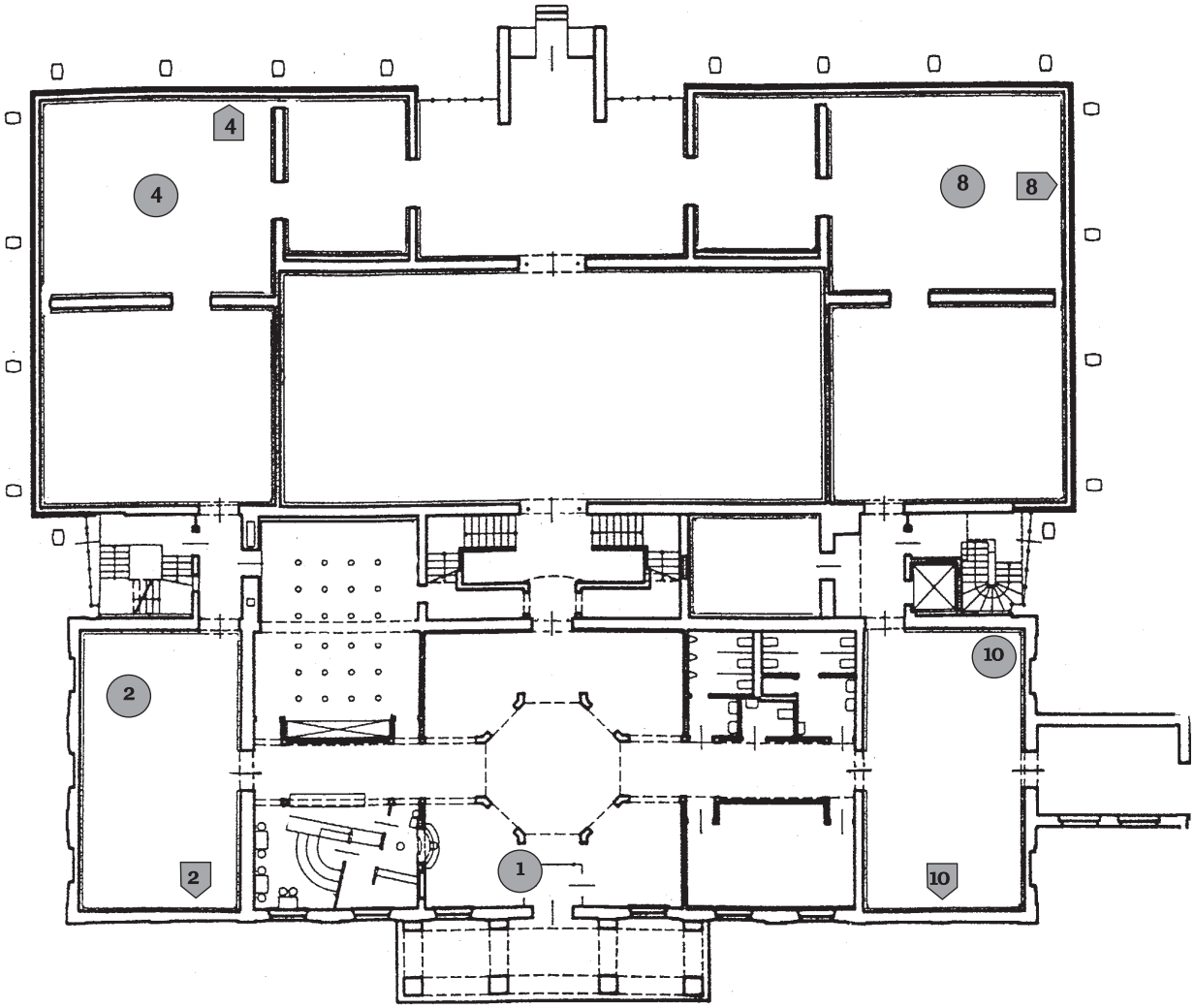
Abbildung 2:
Das Kunstforum Ostdeutsche Galerie Regensburg. Ansicht von Westen. Foto Autor.

Abbildung 3:
Fühler für Temperatur und relative Luftfeuchte hinter Gemälden an Außenwänden. Foto Autor.

Abbildung 4:
Fühler für Temperatur und relative Luftfeuchte in Raummitte, oft unter einer Bank montiert. Foto Autor.

Abbildung 6:
Temperaturmessung in der 16 m hohen Eingangshalle des Kunstforums Ostdeutsche Galerie. Foto Henning Großeschmidt, München.





1 Haupteingang

2 Raum 2

2 Ostwand Raum 2

4 Raum 4

4 Westwand Raum 4

8 Raum 8

8 Nordwand Raum 8

10 Raum 10

10 Ostwand Raum 10

Abbildung 5:
Verteilung der Klimameßpunkte während der Meßkampagene 1997 im Erdgeschoß des Kunstforums Ostdeutsche Galerie. Je Raum zwei Klimafühler: einer hinter einem Gemälde an einer Aussenwand, einer im Raum. Ein Raumfühler neben dem Haupteingang. Näheres siehe Artikel über die Klimamessungen im Kunstforum Ostdeutsche Galerie auf der diesem Buch beiliegenden CD-ROM. Abb. basierend auf einem Grundriß von Arnulf Magerl, Obertraubling.

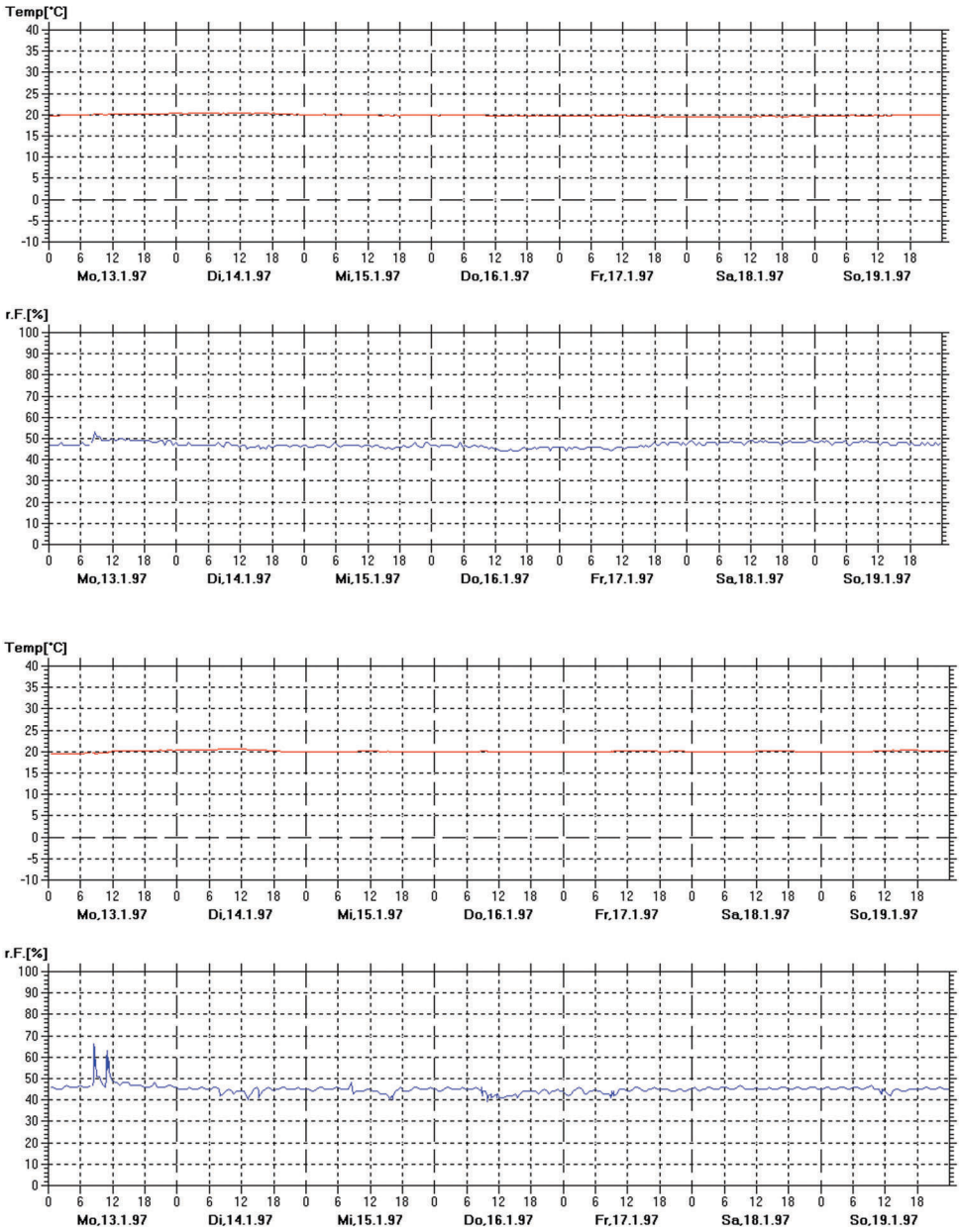


Abbildung 7a, b: Kunstforum Ostdeutsche Galerie. Wochenklimakurven vom 13.01.97 bis 19.01.97 bei max. Außentemperaturen von –10 °C. Die oberen Kurven zeigen die Klimawerte von Raum 2 hinter einem Gemälde an der Außenwand. Unten die in Raummitte gemessenen Werte (ca. 35 cm über dem Boden). Die Temperaturgleichheit hinter und vor dem Gemälde ist evident: das Kalte-Wand-Problem ist gelöst. Am Montag sind zwei Feuchtespitzen zu sehen, die von der Naßreinigung des Bodens herrühren. Die Reinigungskräfte nehmen nach der im Hause üblichen Frühstückspause ihre Arbeit wieder auf. Die Feuchtespitzen knapp über dem Boden mit dem Raumfühler gemessen sind stark ausgeprägt, hinter dem Gemälde verlaufen sie gedämpft. Näheres siehe Artikel über die Klimamessungen im Kunstforum Ostdeutsche Galerie auf der diesem Buch beiliegenden CD-ROM.

1. Zweifel an der Lösung Vollklimaanlage sind berechtigt.

„Mit Vollklimaanlagen kann in Gebäuden beliebiger Bauweise ein »Idealklima« künstlich hergestellt werden.“ Dies wird seit den 1960er Jahren bis heute für Museen als »die Lösung« proklamiert. Die Vollklimaanlage ist eine raumlufttechnische Anlage, welche die durch Bauweise, Einrichtung und Nutzung eines Gebäudes bedingten Einflüsse auf das Raumklima ausgleichen soll, so dass ein bestimmter Raumluftzustand in gegebenen Grenzen aufrecht erhalten wird[2]. Vollklimaanlagen beinhalten Komponenten zum Heizen, Kühlen, Befeuchten und Entfeuchten, mit denen sie die Raumluft zentral aufbereiten. Fehlen einzelne oder mehrere dieser Komponenten, spricht man von Teilklimaanlage oder von einer einfachen Lüftungsanlage. Zweifel am Vorteil der Vollklimaanlagen sind jedoch berechtigt, denn diese gewährleisten in der Praxis keineswegs immer stabile Bedingungen. Bei Vollklimaanlagen können Schwankungsbreiten der relativen Luftfeuchte auftreten, die nicht kleiner sind als in nicht klimatisierten

2 zum Teil direkt zitiert aus Günther S. Hilbert: Sammlungsgut in Sicherheit. Teil 2. Lichtschutz und Klimatisierung, Gebrüder Mann Verlag Berlin, 1987, S. 142.

Räumen. Eine sprechende Untersuchung legte May Cassar 1994 vor[3]. Keines der von ihr untersuchten, vollklimatisierten Museen, die mit dem Ziel geplant waren, eine Schwankungsbreite in der relativen Luftfeuchte von ± 5% über das ganze Jahr einzuhalten, erreichte das Ziel. Im Gegenteil: Andere Museen ohne Vollklimaanlage hielten sich annähernd genauso gut (Abb. 8).

Vollklimaanlagen wälzen grosse Mengen erhitzter und befeuchteter bzw. gekühlter und entfeuchteter Luft um. Sie benötigen aus physikalischen Gründen große Luftwechselraten (die Luftwechselrate wird in Wechselrate des Raumluftvolumens pro Stunde angegeben), in der Regel vom mindestens 4-fachen bis zum 8-fachen Luftwechsel pro Stunde und mehr. Zugerscheinungen und Staubaufwirbelung im Raum sind kaum vermeidbar.

Vollklimaanlagen müssen im Hinblick auf die jeweilige maximale Kühl- oder Heizlast groß dimensioniert werden. Entsprechend kostspielig sind Errichtung, Unterhalt und Betrieb. Mit ihrem enormen Luftdurchsatz können sie bei Regelungsstörungen im Raum sehr schnell starke Klimaänderungen hervorrufen und bis zur Aufhebung der Störung aufrecht erhalten. Vollklimaanlagen können daher plötzlich eine konservatorische Gefahr darstellen. Was ist ferner, wenn Einzelkomponenten ausfallen, die ganze Anlage steht oder ihr ökonomisch und ökologisch fragwürdiger Betrieb nicht mehr bezahlt werden kann? Da mit einer Vollklimaanlage meist versucht wird, die Mängel einer ungeeigneten Museums-

3 Tadj Oreszyn, May Cassar, Keith Fernandez: Comparative Study of Air-Conditioned and Non Air Conditioned Museums, in: IIC, Preventive conservation: Practice, theory and research, IIC Ottawa Congress, London 1994, S. 144-148. Ähnliche Studien anderer Autoren bei Bürogebäuden kommen zu den denselben Ergebnissen.

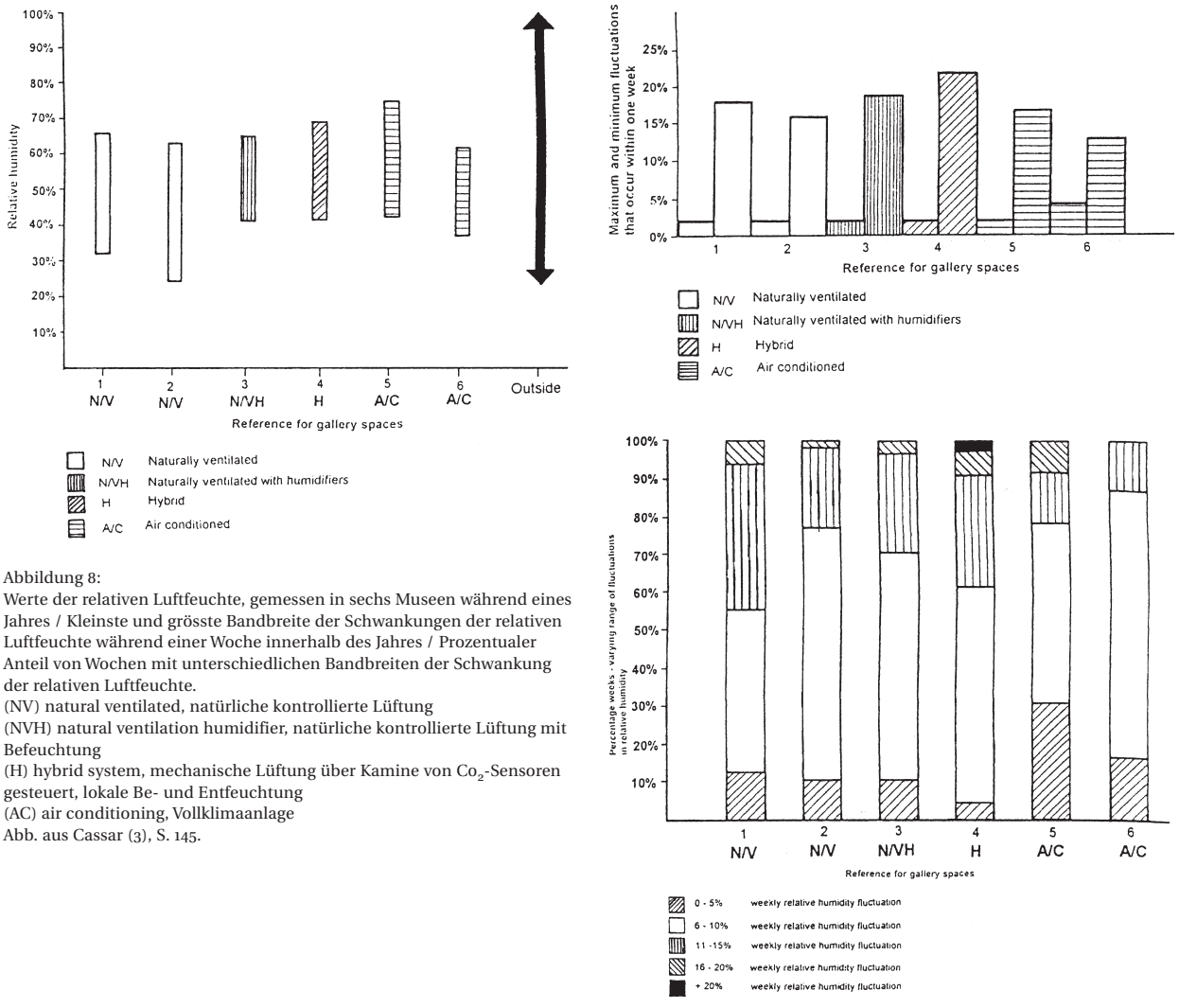


Abbildung 8:
Werte der relativen Luftfeuchte, gemessen in sechs Museen während eines Jahres / Kleinste und grösste Bandbreite der Schwankungen der relativen Luftfeuchte während einer Woche innerhalb des Jahres / Prozentualer Anteil von Wochen mit unterschiedlichen Bandbreiten der Schwankung der relativen Luftfeuchte.
(NV) natural ventilated, natürliche kontrollierte Lüftung
(NVH) natural ventilation humidifier, natürliche kontrollierte Lüftung mit Befeuchtung
(H) hybrid system, mechanische Lüftung über Kamine von Co_2-Sensoren gesteuert, lokale Be- und Entfeuchtung
(AC) air conditioning, Vollklimaanlage
Abb. aus Cassar (3), S. 145.

architektur zu kompensieren, müßten die Museen, die auf den kontinuierlichen Betrieb der Vollklimaanlage angewiesen sind, beim Ausfall eines solchen Systems ihre Kunstwerke unweigerlich evakuieren.

Eine weniger am Inneren, sondern vor allem am Äußeren orientierte „moderne" Museumsarchitektur setzt der Umsetzung konservatorischer Standards enge Grenzen. Voraussetzung für ein „gutes Museum" sind elementare bauphysikalische Erkenntnisse. Statt dessen haben sich unsere Museen in hochgradig technisierte, auf behagliche Raumtemperaturen gebrachte und lichtdurchflutete „Konservierungsmaschinen" gewandelt. Erst die Abkehr von diesem auch aus ökologischer Sicht überlebten Konzept und eine Rückbesinnung auf passive Bewahrungsmechanismen vermindert das Risiko für die uns anvertrauten Kulturgüter. Es ist bekannt, daß konservatorisch sinnvolle, präventive Konzepte in Wettbewerben und in der Planungspraxis gegen die Interessen der beteiligten Architekten, Planer und Gutachter nur schwer durchsetzbar sind, dies insbesondere, solange sich deren Honorar an der Menge eingebauter Technik bemisst[4].

2. Alternative Klimatisierungskonzepte

Passive und aktive Klimatisierungsmassnahmen

Die Museums and Galleries Commission London ist inzwischen von der Anregung von Vollklimaanlagen abgegangen und empfiehlt andere passive und aktive Klimatisierungsmaßnahmen. In dem Handbuch von May Cassar[5] werden eingehend Strategien beschrieben, wie man an Planungsarbeiten herangeht, um das Innenraumklima erfolgreich kontrollieren, stabilisieren, im Museumsalltag überwachen und unterhalten zu können. Die präventive Qualität von Gebäude und Einrichtung steht im Mittelpunkt. Man soll das Gebäude und seine Einrichtung so gestalten, daß man nur eine unaufwendige zusätzliche Aufbereitung der Raumluft benötigt.

Beispiele *passiver* Maßnahmen sind: Zu allererst eine massive Bauweise bzw. das Optimieren der Gebäudehülle durch Dämmen schwächerer Außenbauteile; die massive Gebäudehülle erfüllt die Eigenschaft der Dämpfungsfähigkeit gegenüber Außenklimaschwankungen. Weitere Maßnahmen sind das Abdichten von Fugen, um einen kontrollierten Luftwechsel zu ermöglichen und Störungen durch unkontrollierte Lüftung so gering wie möglich zu halten; das Schaffen klimastabilisierbarer Zonen durch einen Windfang und einen von den Ausstellungsbereichen abgetrennten Eingangsbereich; Abtrennung von Treppenhäusern (Kamineffekt) gegenüber Ausstellungsbereichen; die Herstellung besonders geschützter Bereiche für die empfindlichsten Objekte bzw. der Einsatz von Vitrinen (luftdicht, ggf. mit Silicagel klimastabilisiert) bis hin zu in Bilderrahmen integrierten, wenige Zentimeter tiefen „Gemäldevitrinen"; die Verwendung hygroskopischen, feuchtespeicherfähigen Materials beim Innenausbau; die Beschränkung der künstlichen Beleuchtung auf das konservatorisch sinnvolle Maß (Gemälde max. 150 Lux, Graphik 50–80 Lux), um unerwünschter sommerlicher Aufheizung zu begegnen, sowie außenliegender Sonnenschutz an Fenstern, Glasfassaden und Lichtdächern aus demselben Grund.

Zu den *aktiven* Massnahmen zählen die lokale Be- oder Entfeuchtung mit Einzelraumgeräten, die problemlos gewartet und ausgetauscht werden können – im Gegensatz zu zentral installierten Be- und Entfeuchtungskomponenten in Lüftungsanlagen. Ferner die Kontrolle der Lüftung: bei „natürlicher" Lüftung (ohne Ventilatoren) durch kontrolliertes Öffnen und Schließen von Fenstern, Schächten etc., bei „mechanischer", also motorbetriebener Lüftung z. B. durch Einsatz dezentraler minimierter Lüftungsanlagen in Form von Ventilatoren in Abluftkaminen, gesteuert von Sensoren.

Kleinere Museen brauchen oftmals keine mechanische Be- und Entlüftung sondern nur die Kontrolle der sog. „natürlichen" Lüftung. Grössere Museen brauchen dagegen oft eine mechanisch unterstützte Frischluftversorgung der Besucher, falls tatsächlich nötig, ggf. auch über zentrale raumlufttechnische

4 grösstenteils direkt zitiert aus: Andreas Burmester. Der moderne Museumsbau. Konzept des Überlebens oder überlebtes Konzept, in: Landesstelle für die nichtstaatlichen Museen (Hrsg.), Museum heute Nr. 13, München, Juni 1997, S. 19-29, hier S. 26. Erweiterte Fassung des Vortrages beim XXIV. Deutschen Kunsthistorikertag, Inszenierung der Kunst: Konservatorische und technische Grenzen des Machbaren, München 12. März 1997.

5 May Cassar: Environmental Management, Guidelines for museums and galleries, Museums & Gallery Commission, London 1995, S. XII: "The important subject of preventive conservation strategy has a chapter to itself – creating a good indoor environment is not simply a matter of installing a complete air conditioning system in the hope that it will cure all problems."

Anlagen, mit zentralen Be- und Entfeuchtern. Man sollte sich jedoch über die prinzipiellen Nachteile zentraler Anlagen im Klaren sein, ob nun als reine Lüftungs-, Teilklima- oder Vollklimaanlage ausgebildet: Sie brauchen Platz, sind bei historischen Gebäuden nur schwer integrierbar (Kanalnetz, Zentrale etc.) und bergen Probleme. Je mehr Aufgaben die Anlage erfüllen soll und je höher die gewählte Luftwechselrate ist, je grösser die Anlage also sein muß, desto mehr Investitions-, Unterhalts-, Energiekosten und Folgeinvestitionen fallen an.

Ein Klimakonzept, das die präventive Qualität des Zusammenwirkens des Baukörpers und seiner Einrichtung ins Auge faßt, um den Aufwand zusätzlicher Aufbereitung der Raumluft möglichst gering zu halten, ist vorteilhafter als die „blinde" Vollklimatisierung eines beliebigen Gebäudes mit nur geringer Dämpfungsfähigkeit, der Lösung mit dem größten Finanz- und Platzbedarf. Es ist nützlich, die Aufgabe Lüften und die Punkte Kühlen, Heizen, Befeuchten, Entfeuchten nochmals einzeln zu besprechen.

3. Lüften

3.1. Frischluftwechselrate

Ein wesentliches Kriterium zur Bewertung von Klimasituationen in Gebäuden berücksichtigte die allgemeine Diskussion bisher überhaupt noch nicht: Die Häufigkeit des Austausches des Raumluftvolumens gegen Außenluft. Holmberg schlug angesichts des Schadenspotentials zu hoher Frischluftraten bereits 1989 bei der ICOM-Konferenz in Den Haag eine neue Klassifikation/Bewertung von Museumsgebäuden vor[6]. Es wird dabei die aus natürlicher bzw. maschineller, kontrollierter und die aus unkontrollierter Lüftung (Baufugen, Fugen von Öffnungen etc.) stammende Frischluftmenge zusammen gemessen (Infiltrationsrate). Das Ergebnis wird anhand einer Tabelle bewertet: Unter einem halben Gebäudevolumen pro Stunde: sehr gut (Stufe A); bis zu einem Volumen pro Stunde: gut (Stufe B); bis zu zwei Volumen pro Stunde: befriedigend (Stufe C); bis zu 5 Volumen pro Stunde: schlecht (Stufe D); zwischen 5 und 10 Volumen pro Stunde: sehr schlecht (Stufe E).

Nur ein abgeschlossener Luftraum kann klimastabilisiert werden. Die meisten historischen Gebäude haben selbst nach Abdichtung von Fenstern und sonstigen Undichtigkeiten noch eine „natürliche Undichtigkeit" von min. 0,3. (meistens jedoch höher). Bessere Werte von 0,2 oder 0,1 sind nur bei modernen Gebäuden mit hohem Aufwand zu erreichen. Fensterlose, von Erdreich umgebene Kellerräume liegen in der Regel darunter. Um Schadstoffe aus Baumaterialien, Objekten oder ausgeatmetes Co_2 der Besucher etc. ab- und Frischluft zuzuführen, muss bei Raumbelegung (Besucher und Bedienstete) gelüftet werden. Zwar ist eine möglichst dichte Gebäudehülle Voraussetzung für einen kontrollierten Luftwechsel, andererseits gilt: Es gibt keine zu dichten, sondern nur schlecht gelüftete Gebäude. In der kontrollierten Lüftung liegt der Schlüssel zur Dämpfung der Einwirkung von Lüftungsereignissen (Klimaschwankungen) und der Belastung mit Luftschadstoffen von außen. Unnötig hohe Frischluftmengen verursachen hohe Aufbereitungskosten und Energieverluste, ferner hohen Filteraufwand, denn bei größeren mechanischen Lüftungsanlagen sind unbedingt entsprechende Filter vorzusehen.

Im Ausstellungsbereich genügt in der Regel (abhängig vom Besucheraufkommen) ein max. einfacher Luftwechsel pro Stunde. Die gängige deutsche Fachliteratur geht bei Museen von 10 m^3 Frischluft pro Besucher und Stunde aus. In den USA gelten 8 m^3/h, in Schweden 4 m^3/h noch als ausreichend [7]. Selbst diese Werte liegen noch deutlich über dem physiologischen Grenzwert von 0,5 m^3/h bei leichter Tätigkeit. In diesem Sinne werden raumlufttechnische Anlagen meist deutlich überdimensioniert. Die Grundlage dafür ist in Deutschland in der Versammlungsstätten-Richtlinie zu finden, die in Räumen ohne Raucherlaubnis bereits 20 m^3 pro Person in der Stunde vorschreibt, ohne daß dies physiologisch begründbar wäre. Für den Sammlungsbereich von Museen ist die Vorschrift jedoch nicht gültig. Dennoch wird die Vorgabe in der gängigen

6 Jan Holmberg: Technical classification of museum buildings, ICOM-ICAMT Den Haag 1989, in: EU 1383 PREVENT, Report No 7 from Swedish partners, Stockholm 1997, Teil D, hier S. 3.4. Holmberg beschreibt auch die „Tracer-Gas-Methode", mit der man die Infiltrationsrate auf einfachste Art messen kann.

7 vgl. (6)

Planungspraxis gerade in großen Museumsprojekten oft auf das gesamte Gebäude angewandt, obwohl die zu Grunde liegenden Nutzungsbedingungen allenfalls im Eingangsbereich oder im Vortragsraum/Medienraum oder bei Eröffnungsveranstaltungen gegeben sind. Oft sind auch übertrieben hoch angesetzte, fiktive Besucherzahlen, die doch nie erreicht werden, schuld an einer viel zu groß geplanten Anlage.

In Depots sind höhere Luftwechselraten generell abzulehnen. Für den dort geringfügigen Personenverkehr wäre ein max. 0,1-facher Luftwechsel pro Stunde bei Anwesenheit von Personen ausreichend. Dieser Wert könnte z. B. als Vorgabe für den Abluftventilator eines fensterlosen Depots gelten. Falls erforderlich wäre im Dauerbetrieb damit eine mechanische Grundlüftung zur Abführung von Schadstoffen garantiert.

3.2. Keine Überdimensionierung

Eine Überdimensionierung raumlufttechnischer Anlagen ist gerade im Museumsbereich unbedingt zu vermeiden. Bei ungünstigen Bedingungen neigen überdimensionierte Anlagen zu hochfrequentem dynamischen Lastwechsel, bedingt durch regeltechnisches Takten. Klein dimensionierte Anlagen haben diesen Nachteil nicht. Sie können nur konservatorisch unbedenkliche, langsame Änderungen im Raumklima verursachen. Das Gefährdungspotential bei Regelungsstörung oder Ausfall ist geringer.

Z. B. Lüftungsanlagen mit Fühlern für die relative Luftfeuchte: Nicht nur wegen des Hysteresephänomens (ein hygroskopischer Stoff wie in einem Feuchtefühler verändert seine elektrische Kapazität wegen der Haftfähigkeit des Wassermoleküls bei Wasserdampfaufnahme schnell, gibt aber aus dem gleichen Grund bei Abnahme der Umgebungsfeuchte den aufgenommenen Wasserdampf nur verzögert wieder ab) ist die Luftfeuchtemessung noch immer eine der schwierigsten und anspruchsvollsten meßtechnischen Aufgaben. Die besten, üblichen, kapazitiven Sensoren haben eine Genauigkeit von ca. ± 2%, realistisch für die meisten sind ± 3–5% und mehr. Mechanische Sensoren erreichen noch schlechtere Werte. Es gibt also sowohl bei der Erzeugung als auch bei der Einhaltung von Werten der relativen Luftfeuchte prinzipielle „Unsicherheiten", Werte-Toleranzen, in denen sich die Regelung von raumlufttechnischen Anlagen bewegt. Fehler durch unsachgemäße Handhabung, Bedienung und Positionierung von Meß-Sensoren kommen hinzu. Ein weiteres Problem ist die erforderliche regelmäßige Wartung und Rekalibrierung. Auch elektronische Handmeßgeräte, die mit den gleichen kapazitiven Sensoren arbeiten, sind an diese Toleranzen und die erforderliche Wartung und Rekalibrierung gebunden[8].

8 Jan Holmberg: Relative Humidity in Historic Houses, Museums and Museum Storage Rooms. A Literature Study, EU 1383, PREVENT-Report Nr. 1 der schwedischen Partner, Stockholm 1995. Enthält auch eine breite Darstellung über Klima-Meßtechnik und die damit verbundenen Probleme.

3.3. Alternative Lüftungskonzepte

3.3.1. Lüftungskonzept Kunstforum Ostdeutsche Galerie

Mit der Lüftungsanlage im Kunstforum Ostdeutsche Galerie, die Komponenten für Lufterwärmung und Befeuchtung, jedoch nicht für Kühlung hat, konnte seit der Sanierung zunächst ein 0,1- und 1,0-facher Luftwechsel gefahren werden. Ein einfacher Luftwechsel über die Lüftungsanlage stellte sich aber für viele Fälle als unnötig hoch heraus. Deshalb wurde die Anlage 1997 auf den Vierstufenbetrieb umgerüstet und kann seitdem zusätzlich auch mit 0,4 und 0,6 fachem Luftwechsel arbeiten. Der Frischluftanteil kann über die Frischluftklappe variabel eingestellt werden bzw. ganz ausgeschaltet und die Anlage nur mit Umluft betrieben werden. Obwohl die Gebäudedichtheit an einigen Stellen noch mangelhaft ist, gelingt es uns im Winter bei „geringer" Besucherfrequenz und minimalem für die Luftqualität erforderlichen Frischluftanteil mit min. 0,4-fachem Luftwechsel ausreichend zu befeuchten (auf min. 45% rel. Luftfeuchte). Mit höherem Frischluftanteil konnte im Januar 1998 während der Janosch-Sonderausstellung zwischen 10 und 16 Uhr bei ca. 0,6-fachem Luftwechsel pro Stunde auch ein Spitzentag mit 2.000 Besuchern ohne Probleme bewältigt werden. Das entspricht ca. 333 Besucher pro Sunde, verteilt auf den großen zentralen, für Sonderausstel-

lungen dienenden Saal (Rauminhalt ca. 2.000 m³) und drei kleinere Räume. Der Rauminhalt aller 20 klimakontrollierten Räume beträgt insgesamt ca. 10.000 m³.

Der Verzicht auf den Kühlteil und die „Nachtkühlung" mit einfachem Luftwechsel (d. h. wir lüften im Hochsommer nur nachts) waren wesentliche Bestandteile des Planungskonzeptes. Der gleichfalls zum Konzept gehörige außenliegende Sonnenschutz, der zunächst nicht realisiert werden konnte, erwies sich im Zeitraum mit stärkster Sonneneinstrahlung als essentiell. Seit dieser 1997 nachgerüstet wurde, überschreiten wir nur noch wenige Wochen Raumtemperaturen von 24°C und erreichen max. 26°C. Notwendig wäre der Kühlteil nur, wenn wir im Sommer dauerhaft hohe Besucherzahlen tagsüber bei hohen Außentemperaturen mit Frischluft versorgen müßten.

Bei Eröffnungen kann bei Bedarf der zentrale, große Sonderausstellungsraum optional fast die gesamte Zuluft der Lüftungsanlage erhalten, die normalerweise in alle Ausstellungsräume gleichmäßig verteilt wird. Da sich in den übrigen Räumen dann kaum Besucher aufhalten, können diese Räume vorübergehend abgeschaltet werden. So kann im Zentralraum bei Eröffnungen temporär ein ca. 1,3-facher Luftwechsel erreicht werden.

Da wir im Sommer bei normaler Besucherfrequenz eigentlich nur nachts lüften, besteht bei Eröffnungen im Saal für Sonderausstellungen, die meist um 11 Uhr vormittags stattfinden, bisweilen ein kleines aber vernachlässigbares Problem, da es sich nur über wenige Stunden erstreckt. Bei sehr hohem Besucheransturm und Besucherkonzentration in diesem Saal müssen wir dort dann auch am Tag lüften und holen zu dieser Uhrzeit hochsommerlich warme Luft ins Haus. Es wäre besser, wenn der Frischluftzustrom auf min. 24°C heruntergekühlt oder ohne Kühlteil über einen Erdkanal angesaugt werden könnte.

3.3.2. Lüftungskonzept Schloß Schönbrunn

Messungen in Schloß Schönbrunn bewiesen eindeutig, daß nicht der Massentourismus, sondern die Schwankungen des Außenklimas die starken Raumklimaschwankungen hervorriefen. Ursache war die überraschend hohe Rate des unkontrollierten Luftwechsels von max. 15 bis 17 pro Stunde[9]. Sie bewirkte, daß das Raumklima mit geringer Verzögerung dem Außenklima folgte. Bei 8.000 Besuchern an Spitzentagen ergibt sich innerhalb der Besuchszeit eine theoretische Belegungsrate von ca. 40 Personen pro Raum. Es wurde ein Lüftungskonzept erarbeitet, das den zu hohen unkontrollierten Luftwechsel senkt: Die unwillkürliche „Lüftung" über Fensterfugen wurde durch Abdichten verringert, Service- und Aufenthaltsräume für ankommende Besuchermassen und Besuchergruppen in neu überdachten Innenhöfen geschaffen, von denen aus die Besucher in kleinen Gruppen auf verschiedenen Touren durch unterschiedliche Raumfolgen geführt werden. Die Frischluftzufuhr geschieht nur noch dann, wenn Sensoren keine schädlichen Schwankungen (zu feucht, zu trocken) erwarten lassen. Über historische Kamine, am oberen Ende mit über die Drehzahl gesteuerten Abluftventilatoren versehen, wird die Luft kontrolliert durchs Haus bewegt, ökologisch sinnvoll vorbehandelt über Erdwärmetauscher („Luftbrunnen"). So will man sich an die hygienisch und konservatorisch sinnvolle Mindestluftwechselrate herantasten. Die Umsetzung dieses Konzepts ist derzeit fast abgeschlossen.

9 Wolfgang Kippes: Luftwechsel in historischen Bauten, Wien, 1999. Wolfgang Kippes: Clima management and air flow control. Zu den Ursachen der Raumklimaschwankungen im Schloß Schönbrunn, PREVENT, Report no.3, Austrian Partners, Wien 1997. Jan Holmberg: Ventilation measurements in Schloß Schönbrunn, Vienna, with tracer gas technique, PREVENT Report no. 5 from Swedish Partners, Stockholm/Wien Nov. 1996.

4. Kühlen

Wie soll man kühlen? Die Kühllast in einem Gebäude sollte durch passive Maßnahmen wie massive Bauweise, außenliegender Sonnenschutz, geeignete, reduzierte Beleuchtung (Anschlußleistung in unserem Haus 11,5 Watt/m², im Würzburger Kulturspeicher 15 Watt/m²) so klein wie möglich gehalten werden. Das Kühlen des Gebäudes durch Umwälzung großer Mengen gekühlter Luft (im Sinne einer Vollklimaanlage) erscheint eher als schlechteste Lösung, wenn man an den volkswirtschaftlichen und ökologischen Schaden denkt, der dadurch entsteht, daß moderne Museen mit großen Transparentflächen ohne Außenbeschattung

und hohen Lichtleistungen im Sommer mit hohem Energieaufwand ständig künstlich gekühlt werden müssen, während früher traditionell massive Bauweisen mit hohen statt breiten Fenstern im Sommer erträgliche Raumverhältnisse auch ohne Vollklimaanlage garantierten. Um einem zusätzlichen Temperatureintrag über Frischluft an heißen Sommertagen zu begegnen, empfiehlt es sich, Frischluft nur bei den kühlen Nachttemperaturen („Nachtkühlung“) zuzuführen. Lüftungsmotoren sollten außerhalb des transportierten Luftstromes und ggf. auch außerhalb des Gehäuses der Zentraleinheit angebracht sein, damit sie nicht auch noch unnötig die zugeführte Frischluft oder ggf. Umluft erwärmen (wir haben je nach Luftvolumenstrom eine Aufheizung von 1-5°C gemessen).

Sind in einem Gebäude die vorhandenen Raumvolumina zu klein, so daß während heißer Sommertage bei Besucherandrang tagsüber die Zuführung von Frischluft notwendig ist, und damit nicht bis nachts gewartet werden kann, so wäre eine alternative Maßnahme die Kühlung des aktuell notwendigen Frischluftzustromes bei kleinstmöglichem Luftwechsel mit einem Kühlteil. Dieser Planungsansatz ist nicht mit dem von „üblichen“ Vollklimaanlagen vergleichbar, weil bei Besucherandrang lediglich die physiologisch notwendige Frischluftversorgung die Behaglichkeit gewährleistet, nicht aber grundsätzlich Kühllasten des Gebäudes abgeführt werden sollen. In dieser Publikation wird auch ein temperiertes Museum mit minimierter Vollklimaanlage mit einfachem Luftwechsel vorgestellt, nämlich das Ernst Barlach Haus, Stiftung Hermann F. Reemtsma, Hamburg. Ökologisch sinnvoll kann die Vorkühlung von zugeführter Frischluft auch mit einem sogenannten Luftbrunnen geschehen. Dabei handelt es sich um eine Frischluftansaugung über einen im Erdreich verlegten, also „erdgekühlten“ Kanal großen Querschnittes, durch den die Frischluft langsam bewegt wird und sich dabei abkühlt.

5. Heizen

Bei konventioneller Beheizung müssen wir die sogenannte Raumtemperatur als ein Mittel aus der „höheren“ Heizlufttemperatur und der „tieferen“ Strahlungstemperatur der umgebenden Wände begreifen. Wegen der deutlich über der Wandtemperatur liegenden Heizlufttemperatur besteht ein verstärkter Befeuchtungsbedarf. Bei gleicher Raumtemperatur und gleicher relativer Luftfeuchte im Raum mit „Strahlungsheizung“ ist die absolute Luftfeuchte im Raum mit „Luftheizung“ daher höher. Als Wärmeträger aufgeheizte Luft hat aber einen höheren Luftdruck. Das bedingt erhöhten Luftwechsel mit Wasserdampf- und Energieverlusten. Im Museumsbereich sind deshalb konventionelle, durch Verteilung der Wärme mittels Aufheizung der Raumluftmasse wirksame Systeme nachteilig, wie die Luftheizung bzw. die Luftheiz-Komponente der Vollklimaanlage, Heizkörper- (genauer Konvektor-) -heizung und auch die Fußbodenheizung, die zwar in wesentlich geringerem Maße die Luft aufheizt, dafür aber von der gesamten, regelmäßig neu verstaubten Bodenfläche aus wirksam ist. Sie alle (die Fußbodenheizung entsprechend weniger) haben auf Grund ihres gleichen Wirkungsprinzips die gleichen konservatorischen, physiologischen und energetischen Nachteile. Doch welche Heizmethode ist dann günstig?

5.1. Temperierung

Mit der Temperierung als Heizsystem steht eine Alternative zur Verfügung. Sie erzeugt ein homogenes, konservatorisch günstiges Strahlungsklima. Konservatorisch wichtig ist, daß man im Sammlungsbereich bereits ab Temperaturen von 18°C für Besucher noch akzeptable Raumverhältnisse erreicht (bei entsprechender Auslegung können auch höhere Temperaturen ohne Probleme erreicht werden). Die Wärmestrahlung passiert die Luft ohne Heizeffekt auf diese und erreicht damit alle Raumbereiche ohne Zugerscheinungen, auch die Füße, die bei konventioneller Luftheizung „im Kalten“ stehen, weil die abgekühlte „Heizluft“ über dem Boden zum Heizkörper fließt. Eine Erhöhung der Lufttemperatur im oberen Raumteil (ab Kopfhöhe!), wie es durch das ständige Aufsteigen von

Warmluft bei Heizkörperheizung geschieht, unterbleibt. Der Körper kann den größten Teil der Stoffwechselwärme über die Lunge an die nicht aufgeheizte Raumluft/Atemluft abführen, während bei „Luftheizung“ durch das Einatmen der physiologisch zu warmen Heizluft die gesamte Wärme über die Haut abgeführt werden muss[10].

Die Wand-Temperierung kann, konservatorisch ebenfalls erwünscht, im Vergleich zu konventionellen Heizmethoden nur langsame Änderungen der Temperatur im Raum hervorrufen, da die pro Quadratmeter Außenwand installierte Leistung klein ist verglichen mit der in Luftheizregistern oder Heizkörpern, die kurzzeitig auf das gesamte Raumluftvolumen einwirken können. Die Temperierung ist energieeffizienter und im Einbau kostengünstiger als konventionelle Heizsysteme (Beispiele in dieser Publikation belegen bis zu 20%ige Energieeinsparung). Da zudem die nicht zu Heizzwecken dienende Raumluft nicht wärmer als die Wandoberflächen ist, minimieren sich auch die durch Lüftung verursachten Energie- und Wasserdampfverluste. Bei gleicher relativer Luftfeuchte kann die absolute Luftfeuchte geringer gehalten werden. Es reduziert sich der für Luftbefeuchtung notwendige Apparateaufwand.

Im Prinzip wirkt die Temperierung über die Erwärmung eines Putzstreifens vor eingeputzten Heizrohren am Wandsockel. Es entsteht ein minimaler Warmluftauftrieb ohne Staubtransport, der die Wärme über die Wandhöhe verteilt. Die Masse der Raumluft ist nicht am Heizen beteiligt. Die so erwärmte Wand strahlt in den Raum. Bei Fenstern (Wärmeverlustflächen ohne Speichermasse) können zusätzlich die Fensterbänke unterfahren und die Gewände mit Heizrohrschleifen versehen werden (näheres s. Großeschmidt) (Abb. 9 u. 10).

10 Henning Großeschmidt: Heizen und Sanieren im Museum und Architekturobjekt, in: Rheinisches Museumsamt (Hrsg.): Schutz für Museumsgut, Köln 1991, S. 31-58, hier S. 47-49. Henning Großeschmidt: Das temperierte Haus, sanierte Architektur und Grossvitrine, in: W. Fuger und K. Kreilinger (Hrsg.): Aspekte der Museumsarbeit in Bayern, Museumsbausteine Band 5, München 1994, S. 101-116; Henning Großeschmidt: Das temperierte Haus, sanierte Architektur und Grossvitrine, in (1).

Abbildung 9 u. 10:
Städelmuseum – Frankfurt am Main nach der Renovierung 1994-1999. Rot der Italienersaal, Grün der Holländersaal. Dieses Einbaubeispiel steht für eine Variante der Temperierung in besonders hohen Räumen unter einem unisolierten, ungeheizten Dach: Raumhöhe, ca. 6m, 2 Schleifen an Sockel bzw. Brüstung, 3. Schleife zur Kondensatsicherung an der Voute. Fotos Stefan Knobloch, Städelmuseum Frankfurt am Main.

5.2. *Planung einer Temperierung*

Im gesamten deutschsprachigen Raum gibt es derzeit nur wenige Büros mit genügender Erfahrung, die Temperieranlagen für Museen eigenverantwortlich planen. Da in der Regel vom Planer die Gewährleistung für bestimmte Raumklimawerte, nicht aber für eine bestimmte konservatorische Qualität des Raumklimas (gleitende Werte, keine Zugerscheinungen, keine Staubumwälzung, minimaler Befeuchtungsbedarf etc.) verlangt wird, greifen die meisten Büros auf „bewährte" Systeme bis hin zur Vollklimaanlage zurück, die nach wie vor Inhalt der Berufsausbildung sind. Wird ferner als Basis zur Berechnung des Honorars wie üblich die Bausumme, nicht aber ein bau- und betriebskostenminimierender Planungsaufwand herangezogen, fehlt ein entscheidender Anreiz. Konventionell denkende Planer werden deshalb nicht bereit sein, unbezahlte Zeit in die Entwicklung und Konzeption präventiver Maßnahmen zu stecken oder sich mit dem ihnen meist unbekannten System der Temperierung zu beschäftigen. Viele Planer sind darüber falsch informiert und lehnen es ab, da sie die physikalischen Zusammenhänge nicht kennen. Oft kommt es auch zur „Uminterpretation" zu einer wesentlich aufwendigeren Wandregisterheizung (Wandflächen von Rohrregistern durchzogen, die ist im Gewerbe eingeführt und teurer) oder zur einer Sockelleistenheizung (das sind kleine Konvektionsheizkörper entlang des Sockels, teurer), beide Systeme haben Nachteile. Daß sich die Temperierung jedoch als konservatorisch vorteilhafte Heizmethode bewährt, wurde durch das PREVENT-Projekt belegt. Die hier in internationalem Rahmen dargestellten Erfahrungen zeigen, daß eine Beauftragung zur Planung einer Temperierung nur sinnvoll ist, wenn sie ausdrücklich auf der Basis der veröffentlichten Vorgaben der Urheberbehörde (Landesstelle für Nichtstaatliche Museen, München) geschieht. Dann können auch Großprojekte wie der Würzburger Kulturspeicher (50.000 m³ umbauter Raum) kostengünstig realisiert werden[11].

5.3. *Die Kalte Wand*

Kalte Bereiche der Außenwandoberfläche, wie sie beim Betrieb von Konvektor- oder Luftheizungen und Vollklimaanlagen bestehen bleiben, da die Heizluft die Flächen nicht gleichmäßig bestreichen kann, bedeuten konservatorisch ein großes Problem (Abb. 11). In der Heizperiode kann sich bei einem Gemälde, das an einer kalten, weil unterversorgten Außenwand hängt, insbesondere bei Luftbefeuchtung lokal eine zu hohe Materialfeuchte oder gar Kondensat bilden[12]. Maria Ranacher dokumentierte als erste systematisch das Phänomen und prägte den Begriff „Kalte-Wand-Problematik" für auftretende Schäden. Ergänzend beschreibt sie die Verschmutzung der Wände und Raumecken als Folge konventioneller Beheizung.

Eines ihrer Beispiele für Temperaturmessungen an Gemälden im Kunsthistorischen Museum Wien (KHM), Tizians „Nymphe und Schäfer", zeigte am 20.02.1990 bei in der Saalmitte gemessenen Klimawerten von 21,5°C und 48% rel. Luftfeuchte folgende Werte: Malschichtoberfläche im oberen Bereich 21°C, unten nur 19,5°C; Wandoberfläche dahinter unten 14°C. An sehr kalten Wintertagen sank die Wandtemperatur bis auf 11°C. Die beträchtlichen Unterschiede zwischen Außenwand und Raumlufttemperatur von 7,5 bis 10,5°C bewirken ein intensives Kondensationsgeschehen. Die Wandbespannung hinter Tizians Bild zeigte Kondenswasser- und Rostflecken (siehe Abb. 11a u. b. im Artikel von Maria Ranacher in dieser Publikation). Als Konsequenz ergibt sich, daß Klimawerte sehr nahe am Objekt gemessen werden müssen, nicht „irgendwo" im Raum. Da die Schadensursache (Heizkörperheizung) bei der Sanierung des KHM beibehalten wurde, ergab sich eine groteske Hängesituation für die Bilder an den Außenwänden: Man hängte sie an Haltern mit ca. 15 cm Wandabstand außerhalb der Gefahrenzone. Doch nicht nur Gemälde vor der kalten Wand, sondern auch die Wandgestaltung und die Wand selbst können Schaden nehmen. Die ganzheitliche Konsequenz wäre daher die Temperierung der Gebäudehülle[13].

[11] Harald Weißmann: Die Temperierung des Kulturspeichers Würzburg, in: Oberste Baubehörde im Bayerischen Staatsministerium des Innern (Hrsg.): bau intern, Jhrg. 2003, Nr. 12, S. 241–243.

[12] Maria Ranacher: Bilder an kalten Wänden, Oberflächentemperatur-Messungen an Wänden und Bildern als Neuansatz für konservatorisch richtige Klimatisierung in Gemäldegalerien, in: Restauratorenblätter, Band 15, Wien 1995, S. 147-163, hier Abb. S. 154. Maria Ranacher: Mikroorganismen- und Schadinsektenbefall im Depot: Ursachen, Sanierung, Hygiene und Gesundheitsschutz, in: Landesstelle für die Nichtstaatlichen Museen (Hrsg.): Nicht ausgestellt! Das Depot – der andere Teil der Sammlung, München 1998. Maria Ranacher: Staub und Kondensatprävention. Der essentielle Beitrag zu Gesundheit, Sanierung und Prävention für Kulturgut und Architektur im Bereich Museum und Denkmalpflege, in (1). Siehe auch Volker Schaible: Überlegungen zum Phänomen der Schüsselbildung an Leinwandgemälden, in: Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung 2/1990, S. 235-250, hier Abb. 7, S. 238.

[13] vgl. (10).

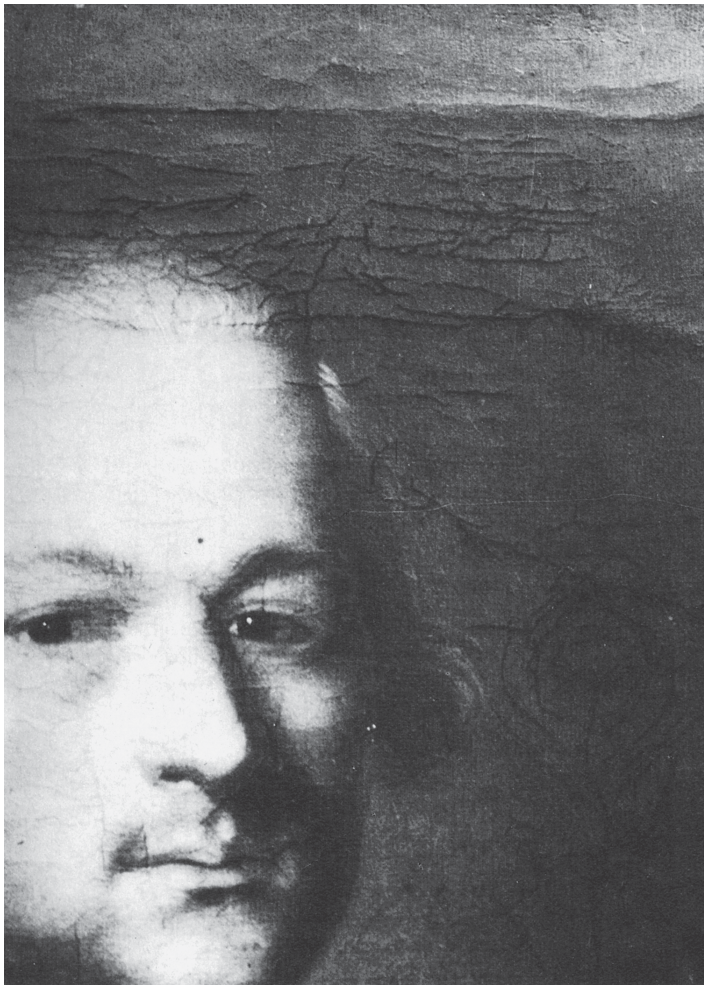


Abbildung 11:
Situation in einem vollklimatisierten Museum (18°C, 58% rF) im Januar: Kondenswasserbildung im Alterscraquelée eines an einer Außenwand hängenden Leinwandgemäldes aus dem 18. Jahrhundert. Foto aus Schaible, ZKK 2/1990, S. 238.

6. Entfeuchten

Bei einer konventionellen Entfeuchtung der Frischluft können Feuchtespitzen im Innenraum im Sommer gedämpft werden, wenn man es nicht vorzieht, diesen über eine geringe Raumtemperaturanhebung kostengünstiger zu begegnen. Die übliche Entfeuchtung durch Kühlung benötigt dreimal mehr Energie als eine Temperaturanhebung. Deshalb werden „Sollwertfeld-Regelungen" bei Vollklimaanlagen zunehmend zur Kosteneinsparung vorgeschlagen. Hilbert nennt Werte von 20°C und 45% rel. Luftfeuchte, die sich im Sommer auf 24°C und 55% erhöhen[14].

Bei aufsteigender Feuchte oder erdberührtem Mauerwerk ist die Temperierung die ideale Problemlösung, denn geringe, aber stetige Wärmezufuhr stoppt den Feuchtenachschub aus dem Erdreich, was bei Luftentfeuchtung nicht der Fall ist. Die leichte Anhebung der Oberflächentemperatur der vormals kühlen Mauer auch im Sommer bewirkt ferner, daß sich schwül-warme Sommerluft nicht als Kondensat dort niederschlagen kann und Schadsalze aktivieren würde, die durch Volumenänderungen bei Kristallisationszyklen Putzschäden nach sich ziehen. Putzschäden durch aufsteigende Feuchte und Kondensation werden dauerhaft ausgeschaltet, solange die Anlage betrieben wird (Beispiele enthält diese Publikation).

7. Befeuchten

Wegen des geringen Wassergehalts der winterlichen, kalten Außenluft (niedrige absolute Luftfeuchte), muß bei Aufheizung auf Wohnraumtemperaturen künst-

14 in (2), S.191.

lich befeuchtet werden. Nur so lassen sich für Objekte und Ausstattung aus hygroskopischem Material verträgliche Werte der relativen Luftfeuchte halten. Das Befeuchten sollte mit Maßen geschehen. Auf die Gefahr von Gebäudeschäden durch übermäßige Befeuchtung im Winter wird von vielen Autoren, die sich mit Klimaempfehlungen beschäftigen, hingewiesen. Dies ist unter anderem der Grund, weshalb man vom internationalen Standard 55% ± 5 % relative Luftfeuchte in Zonen mit kalten Wintern abgeht. In solchen Regionen sollte man wegen der Gefahr von Gebäudeschäden die untere Feuchtegrenze im Winter senken, wie dies in der einschlägigen Literatur schon lange empfohlen wird (siehe weiter unten).

Verdunstungsbefeuchter sind im Museumsbereich vorzuziehen. Sie können bei Defekt des regelnden Hygrostaten aus physikalischen Gründen nicht über ca. 70% rF befeuchten und somit keine übermässigen Feuchteschäden verursachen. Dampfbefeuchter dagegen blasen bei Nichtabschaltung immer weiter Dampf in den Raum und Kondensat bzw. 100% rF kann auftreten. Ultraschallbefeuchter können zu Ablagerungen von Restsalzen aus der Wasseraufbereitung an den Objekten führen und sind deshalb im Museumsbereich zu vermeiden.

Befeuchter zentraler raumlufttechnischer Anlagen (als Verdunstungs- bzw. Sprühbefeuchter und nicht als Dampfbefeuchter ausgebildet, vgl. oben) und die die feuchte Luft führenden Lüftungskanäle bedürfen intensiver Wartung und Pflege. Die Kanäle können oft gar nicht oder nur schlecht gereinigt werden, eine regelmäßige Hygieneuntersuchung der Kanäle wird fast nie durchgeführt. Nach 15–20 Jahren Betrieb muß oftmals saniert werden, wobei die nächste Anlagengeneration eingebaut wird. Will man die Verkeimung des Befeuchters und der Kanäle in Grenzen halten, so ist eine UV-Desinfektion des Wäscherwassers unumgänglich. Ansonsten müssen chemische Zusätze eingesetzt werden. Auch zu hartes Wasser verlangt chemische Zusätze. Im Kunstforum Ostdeutsche Galerie prüfen wir laufend die Keimzahl des Wäscherwassers, das aus einer Deionisationsanlage kommt. Wir reinigen Wanne und Gehäuse des zentralen Befeuchters regelmäßig. Eine UV-Desinfektionsanlage pumpt ständig das deionisierte Wäscherwasser um und entkeimt es. Auf chemische Zusätze im Wäscherwasser können wir so verzichten. Eine Hygieneuntersuchung auch des Luftkanalnetzes findet statt.

Obwohl Hygieneuntersuchungen von raumlufttechnischen Anlagen in Deutschland mit der VDI Richtlinie 6022 von 1998 (Verein Deutscher Ingenieure) geregelt und verbindlich sind, werden sie in der Praxis vielerorts nicht umgesetzt, weil Sanktionen der Kontrollbehörden für Arbeitsschutz (Gewerbeaufsichtsämter bzw. Berufsgenossenschaften), bisher kaum zu befürchten sind. Umfassende Hygieneuntersuchungen incl. Keimproben sind bei raumlufttechnischen Anlagen mit Befeuchtern alle zwei Jahre (bei Verdunstungs- bzw. Sprühbefeuchtern) bzw. alle drei Jahre (bei Dampfbefeuchtern) Pflicht. Bei raumlufttechnischen Anlagen sind regelmäßig kurzfristige Hygienekontrollen durchzuführen: Anlagen sind auf Verschmutzungen zu prüfen (gestaffelt je nach Anlagen-Teilen 14 tägig, bzw. alle 1, 3, 6 u. 12 Monate usw.) und ggf. durch Fachkräfte zu reinigen, Filter sind regelmäßig zu kontrollieren und bei auffälliger Verschmutzung unabhängig von Standzeiten und vorgeschriebenen Mindest-Austauschintervallen auszuwechseln; das Befeuchterwasser bei Verdunstungs- bzw. Sprühbefeuchtern ist 14 tägig auf die Keimzahl zu prüfen, die Befeuchterkammer mind. einmal pro Monat zu reinigen usw. . Eine Checkliste ist in der VDI 6022 enthalten.

Einzelne, mobile Raumbefeuchtergeräte sind im Vergleich dazu einfach und übersichtlich zu warten und jederzeit leicht zu ersetzten.

8. Werte der relativen Luftfeuchte: Empfehlungen in der Literatur

8.1. Zu strikte Forderungen

Zu Beginn des PREVENT-Projektes stellte der Schwede Jan Holmberg eine Literaturstudie zu Empfehlungen der relative Luftfeuchtigkeit in historischen Gebäuden, Museen und Depots zusammen[15]. Er stellte fest, daß die strikte Forderung

[15] vgl. (8). Zusammenfassung S. 3.

nach Einhaltung von Luftfeuchtigkeitswerten von 55% ± 5% durch verkürzt wiedergegebene und aus dem Zusammenhang genommene Teile der Fachliteratur entstand. Diese »Standards« wurden unkritisch verbreitet und verselbständigten sich. Sie sind weder besonders überzeugend, noch wissenschaftlich untermauert.

8.2. Kriegserfahrung

Gleichsam „sagenhaft" wirkte die Auslagerung des Bestandes der National Gallery London in einen Stollen in Wales während des 2. Weltkrieges nach. In dem Stollen herrschten konstant 17°C und 58% rF und die Klima-Schäden an den Gemälden kamen während dieser Zeit natürlich zum Stillstand. Kaum waren die Bestände wieder in das im Winter offensichtlich lokal unzureichend befeuchtete Museum zurückgeführt, riß eine Rubenstafel im sehr kalten Winter 1946/47. Die Geschichte, etwas anders als hier erzählt, nämlich mit Betonung auf den konstanten Werten im Stollen, wirkt bis heute nach.

8.3. Meinungsumfrage

Ein starker „Trendsetter" war zweifelsohne auch die von ICOM 1960 veröffentlichte *Meinungsumfrage (!)* über geeignete Klimabedingungen in Museen, Bibliotheken und Archiven[16]. Unklar blieb, ob und in welchem Grad die Antwortenden die angegeben Werte messen oder einhalten konnten. Es bestand jedenfalls die größte Übereinstimmung bei Luftfeuchtewerten zwischen 50% und 60% (=55% ± 5%). Sowohl diese Meinungsumfrage als auch zahlreiche andere Empfehlungen, insbesondere die Schwankungen der relativen Feuchte betreffend, führten zur Akklamation und Zementierung eines fragwürdigen internationalen Standards.

16 H. J. Plenderleith, P. Philippot: Climatology and Conservation in Museums, in: Museum, Vol. XIII, Nr. 4, UNESCO, Paris 1960, S. 243-289, ICOM-Umfrage Tabelle im Annex 1, S. 279. (ICCROM Studie: Climatology and Conservation in Museums, Rom 1960).

8.4. Zweifel an den aufgestellten Standards

Michalski konstatierte, daß viele Experten dem inzwischen vertrauten Wert von 50 oder 55% rF ± 5% folgen und führt aus[17]: Viele nehmen an, daß es sich um wissenschaftlich begründete Werte handelte, die sich am Minimum der zu erwartenden Schäden orientierten. Die Urheber dieser Werte wußten, daß sie damit mechanische Phänomene in den Vordergrund rückten und stärker berücksichtigten als etwa chemische Phänomene. Sie wußten, daß es eine schöne, runde Zahl war, und, daß die ausgewiesenen Schwankungsbreiten der relativen Luftfeuchte nicht unbedingt von den Notwendigkeiten der Artefakte abgeleitet waren. Wie zu früheren Zeiten auch schon orientierte man sich an der Durchführbarkeit und räumte Verschiebungen von ± 2%, ± 3%, oder ± 5% ein, beruhend auf den jeweiligen Möglichkeiten der Meßtechnik (vieles davon war naiv). So wurden Zahlen zu Standardwerten, zur idealen A- oder zur 1-Klasse. In der Museumswelt insgesamt wurde es zum Vergehen, nicht mit den Werten konform zu gehen. Obwohl nicht zwingend folgerichtig und durchführbar, so konnte man doch damit nichts falsch machen.

17 Sinngemäß übersetzt aus Stefan Michalski: Relative Humidity: A Discussion of Correct/Incorrect Values, in: ICOM-CC, 10th Triennial Meeting, Washington 1993, S. 624-629, hier Seite 624.

8.5. Vorschläge in der Fachliteratur

Was den Sicherheitsbereich der relativen Feuchte bei der Aufbewahrung von Museumsobjekten angeht, so findet man schon bei Thomson eine Eingrenzung auf einen Bereich zwischen 40% und 70% für organisches Material im Jahresverlauf[18]. Das CCI schlug bereits 1982 einen Sicherheitsbereich von 38–55% rF vor, mit einer täglichen Schwankungsbreite von ± 3% und einer jahreszeitlich bedingten Änderung von max. 5% pro Monat[19]. Der obere Feuchtewert zielt auf die Senkung der Materialfeuchte im Sommer, um die Förderung chemischer Abbauprozesse durch Feuchte zu minimieren. Berücksichtigt wurden die kalten Winter mit der Schwierigkeit, hohe Feuchteniveaus in beheizten Innenräumen zu halten, und die Gefahr von Bauwerksschäden durch Kondensat[20]. Dreiner hält das vorübergehende, kurzzeitige (!) Erreichen von Werten bis zu 70% rF im Sommer

18 Garry Thomson: The museum environment, 2. Ausgabe, London 1986
19 Zitiert nach Holmberg (8), S. 12, vgl. auch (17), Michalski arbeitet für das CCI
20 Nicht nur das CCI sondern auch alle anderen hier zitierten Autoren und viele weitere nicht genannte, die sich mit Klima in Museen beschäftigen, nennen für kalte Winter niedrigere relative Feuchtewerte von 40 oder 45% rF.

bei organischem Material für tolerierbar, wenn die Bedingungen sonst dauerhaft trockener und ausgeglichen sind und sich der Wechsel nicht plötzlich vollzieht[21].

Eine Pressemitteilung der Smithsonian Institution[22] sorgt seit Dezember 1994 in den USA für eine heftige Diskussion um die Standardklimawerte in Museen. Mit Verweis auf die hohen Investitions- und Betriebskosten von Vollklimaanlagen verabschiedete man sich vom strikten, konstanten, internationalen Standard und gab basierend auf Forschungsergebnissen der Wissenschaftler des Smithsonian Conservation Analytical Laboratory (CAL) bekannt, daß Museumsobjekte größere Sicherheitsbereiche tolerieren und ohne Schaden bei Klimawerten im folgenden Bereich verwahrt werden können: Temperatur zwischen 11–31°C und relative Luftfeuchte zwischen 35 und 65%. Holmberg kommentiert die heftigen Reaktionen als Aufschrei in den USA wegen der installierten Vollklimaanlagen[23]. Berger und Russell[24] mahnten im Verlauf der Diskussion an, dass die Forscher der CAL es leider unterließen darauf hinzuweisen, welche Schwankungen in welcher Zeit sie innerhalb dieses Bereiches meinen. Sie könnten deshalb sehr leicht mißverstanden werden, ja ihre Ausführungen könnten sogar gegen sie selbst gewendet werden. Außerdem sei nicht gesagt worden, mit welcher Art kostengünstiger Haustechnik die Werte erreicht werden sollen. Erhardt, Mecklen-

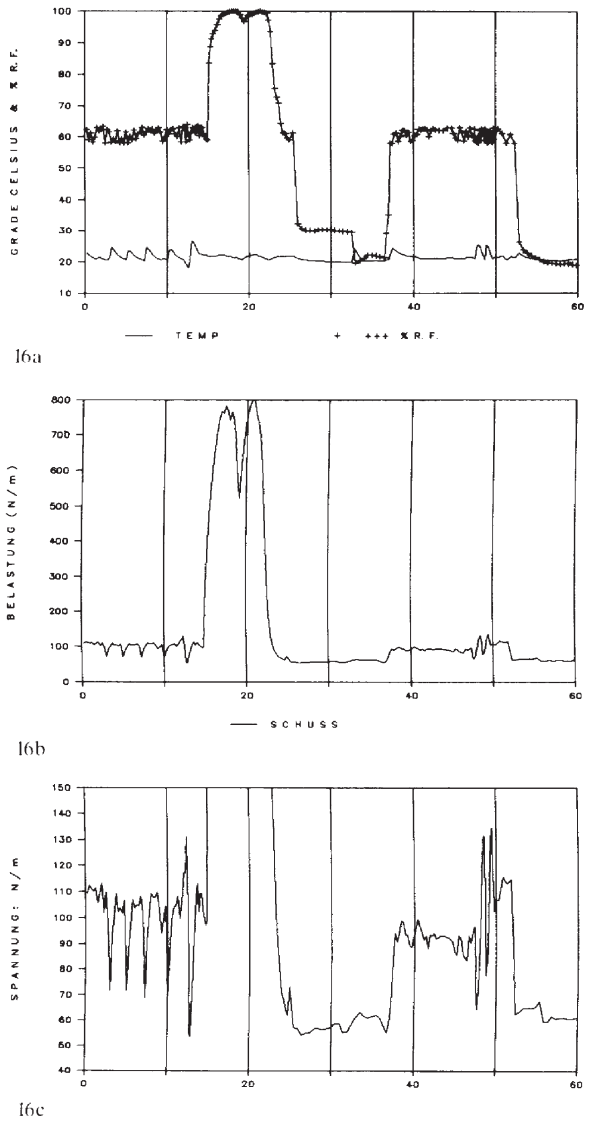


Abbildung 12:
16a: Zwischen dem Beginn der Meßserie und der 48. bis 50. Stunde wurden mit Hilfe einer Klimaanlage kleine Temperaturschwankungen hervorgerufen, wie sie ähnlich durch thermostatisch kontrollierte Klimaanlagen erzeugt werden. (Zentralheizung oder Airconditioner). 16b: Kurzfristige Temperaturschwankungen rufen starke Spannungsveränderungen hervor. Kurzfristige Feuchtigkeitsschwankungen haben dagegen unter „normalen" Bedingungen fast keinen Einfluss auf die Spannung. 16c: Dieselben Messungen wie 16b in einem größeren Maßstab zur Verdeutlichung des Effekts kleiner Temperaturschwankungen. Die Spannungsveränderungen, die in der 14. und 27. Stunde von Temperaturveränderungen von 5 – 6 °C hervorgerufen werden, sind bedeutend größer als die Veränderungen der rF von 20 – 60% in der 37. Stunde oder der Fall um 40% in der 53. Stunde. Der Fall der rF in der 33. Stunde von 30 auf 20% wird fast nicht registriert. Aus Berger/Russell, Restauro 3/89, Abb. 16, S. 198.

[21] K. Dreiner: Neue Untersuchungstechniken und Ergebnisse zu Klimaproblemen, Vortrag gehalten am 19. Juli 1997 Messe MUTEC München, Antwort auf eine Frage in der dem Vortrag folgenden Diskussion. Ein Forschungsbericht wird erscheinen: K. Dreiner, P. Klein, I. Zillich: Klimainduzierte Verformungen an Bildtafeln, Universität Hamburg, Ordinariat für Holzbiologie und Holztechnologie, Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft Hamburg.

[22] William Schultz, CAL scientists revise guidelines for museum climate control, in: Smithsonian Institution, The Torch, Dec. 1994, Nachdruck in waac Newsletter, Volume 17, number 1, Jan. 1995, S. 23, zitiert nach der Internetausgabe des waac newsletter unter http://palimpsest.stanford.edu/waac/wn/wn17/wn17-1/wn17-109.html.

[23] Jan Holmberg: The museum environment – Is the textbook still relevant? A critical review, in: Konservatorskolen det Konegelige Danske Kunstakademi, 25 years School of conservation, Jubilee Symposium Preprints, Kopenhagen Mai 1998, S. 57-70, hier S. 64. Gemeint ist das Buch von Garry Thompson, das Holmberg einst ins Schwedische übersetzte.

[24] Gustav Berger, William Russell: Letter to the editor, in: waac Newsletter, Volume 18, Number 1, Jan. 1996, zitiert nach der Internetausgabe, http://sul2.stanford.edu/waac/wn/wn18/wn18-1/wn18-110.html; Hinweise auf frühere Veröffentlichungen von Berger/Russell im Anhang; dies.: Interaction between canvas and paint film in response to environmental changes, in: Studies in Conservation, 39/2, Mai 1994; dies.: Untersuchungen zum Einfluss der Umwelt auf die Erhaltung von Leinwandgemälden, in: Restauro 3/1989, S 191-203

burg, Tumosa und McCormick-Godhart, die Forscher des CAL, präzisierten die Pressemitteilung unter Bezug auf eine vorherige Veröffentlichung von Erhardt und Mecklenburg[25].

8.6. *Risiken von Schwankungsbreiten*

Berger und Russell weisen darauf hin, daß bereits kleine plötzliche *Temperatur*änderungen, wie sie z. B. durch thermostatisch kontrollierte Anlagen (Zentralheizungen, Airconditioner) hervorgerufen werden, in einer vollklimatisierten Kammer an einem Teststück eines Leinwandgemäldes simuliert, Spannungsveränderungen hervorrufen. Bereits eine forcierte plötzliche Temperaturänderung von 3-6°C ruft stärkere Änderungen der Spannungskräfte hervor, als eine plötzliche Luftfeuchteänderung um ca. 40% bei demselben Versuchsdurchgang (Abb. 12). Spannungsveränderungen, die durch kleine plötzliche Feuchteänderungen im Bereich um 5% verursacht werden, zeichnen sich dagegen nur minimal ab. Kleine, plötzliche Änderungen der Temperatur sind also schädlich und müssen nach ihrer Meinung stärker als bisher gewichtet werden. Solche Ergebnisse veröffentlichten sie erstmals 1982.

Eine Einordnung der Risiken verschiedener Schwankungsbreiten findet sich in Form einer Tabelle bei Michalski[26], die bisherige Erkenntnisse und Ergebnisse zusammenzutragen versucht (Abb. 13).

Allgemein ist bekannt: Sammlungen und Objekte im historischen Zusammenhang, die nicht bei konstanten Werten gemäß dem erst wenige Dezennien alten „internationalen Standard" aufbewahrt werden, sondern jahreszeitlich langsam gleitenden Werten unterworfen sind, haben sich in vielen Fällen

[25] David Erhard, Marion F. Mecklenburg, Charles S. Tumosa, Mark McCormick-Goodhart: The determination of allowable RH fluctuations, in: waac newsletter (22),http://sul2.stanford.edu/waac/wn/wn17/wn17-1/wn17-108.html. Dies. More on climate control, waac newsletter vol. 18, Nr. 3, Sept. 1996, http://sul2.stanford.edu/waac/wn/wn18/wn18-3/wn18-307.html. David Erhard, Marion Mecklenburg: Relative humidity re-examined, in: Ashok Roy, Perry Smith (Hrsg.): Preventive Conservation. Practrice, theory and research, IIC-Preprints Ottawa Congress, London 1994, S. 32-38; weitere: Marion. F. Mecklenburg, Charles.S. Tumosa: An introduction into the mechanical behavior of paintings under rapid loading conditions, in: Marion. F. Mecklenburg, Art in Transit. Studies in the transport of paintings, National Gallery of Art, Washington 1991, S. 137-171; Marion. F. Mecklenburg, Charles. S. Tumosa: Mechanical behavior of paintings subjected to changes in temperature and relative

Abbildung 13:
Wirkung von falschen Werten der Luftfeuchtigkeit und Temperatur auf Kunstwerke. Tabelle nach Michalski (26), S. 7.

Effect of Incorrect RH and Incorrect Temperature on Museum Materials

	Stiff or brittle organic materials[a]	Flexible organic materials, chemically stable[b]	Flexible organic materials, chemically self-destructing[c]	Inorganic materials[d]
Damp (over 75% RH)	Mould. Softening of glue, some paint, wood. Canvas may shrink.	Mould. Softening of size, binders. Textiles may shrink.	Mould. Softening of size, binders.	Mould. Rapid corrosion of base metals.
Above or below a critical RH				For some: corrosion, crizzling, disintegration.
Above 0% RH			Disintegration and yellowing. If object life is 50 y @ 50%, then 100 y @ 30%, 200-400 y @ 10%.	
Fluctuation around a middle RH (stresses are zero)	Rate or risk of fracture growth: @±5%: P, V, A, W: none @±10%: P: tiny W, A: none-tiny @±20%: P: small W, A: tiny-small @±40%: P: severe W, A: small-severe	If brittle image layer, as P. If restrained by frame, etc., as W.	If brittle image layer, as P. If restrained by frame, etc., as W.	Fluctuations crossing a critical RH disintegrate some contaminated ceramics, stones, metal patina.
Temperature too high	Over 30°C, softening of some adhesives, waxes, pitch.	Over 30°C, softening of some adhesives, waxes, pitch.	Disintegration and yellowing. If object life is 50 y @ 20°C, then 200 y @ 10°C, 5000 y @ -15°C	Some minerals disintegrate.
Temperature too low	Embrittlement, e.g., acrylics below 5°C.	Embrittlement.	Embrittlement.	
Temperature fluctuation	Rate or risk of fracture growth: @±10°C: P, V, A: none-tiny @±20°C: P, V, A: none-small @±40°C: P, V, A, W: none-severe Plus indirect effects if RH fluctuates.	If brittle image layer, as P. If restrained by frame, etc., as W.	If brittle image layer, as P. If restrained by frame, etc., as W.	Some composites (e.g., weak enamelling), as P.

[a] For example, wood (W), oil and tempera paintings and polychrome (P), varnish (V), acrylic paintings (A).
[b] For example, non-acidic paper and textiles, parchment, stable B & W photographs.
[c] For example, acidic paper, acetate films, colour photographs.
[d] For example, metals, minerals, ceramics, glass.

humiditiy, in: Marion. F. Mecklenburg, Art in Transit, siehe oben, S. 173-216.

26 Stefan Michalski: Relative humidity and temperature guidelines: What´s Happening?, in: CCI Newsletter 14, Sept.1994, S. 6-8, hier Tabelle 1 S. 7.

27 Andreas Burmester: Die Beteiligung des Nutzers bei Museumsneubau und –sanierung: Oder welche Klimawerte sind die richtigen?, in: Fachinstitut Gebäude-Klima e.V. (Hrsg.): Raumklima in Museen und historischen Gebäuden, Bietigheim-Bissingen 2000, S. 9-20, hier S. 17.

sehr gut erhalten. Das ist immer dann der Fall, wenn die Aufbewahrungsbedingungen angemessen und das Raumklima frei von Störungen und plötzlichen Kurzzeitschwankungen waren. Den Kunstwerken schaden z. B. tiefere Temperaturen keineswegs. Noch um 1900 waren die meisten Museen im Winter ungeheizt. Erst danach setzte die Beheizung der Museen ein, jedoch zunächst ohne Befeuchtung, so daß massive Trocknungsschäden eintraten.

Burmester[27] sagt, daß die „selbstverständlichen internationalen Standards" mit ihren einfachen Angaben durchaus problembehaftet sind. Mit Belangen der präventiven Konservierung Vertraute geben sich allerdings keinerlei Illusionen über die Langlebigkeit derartig einfacher Werte hin: Die richtigen Klimawerte ergeben sich aus der sorgsamen Abwägung der Risiken, die eine genaue Kenntnis der Sammlungsbestände voraussetzt. Diese Risikoabwägung kann nur der Nutzer vornehmen. Nur mit einer differenzierten, konservierungswissenschaftlich fundierten Betrachtungsweise läßt sich eine gültige Antwort finden.

8.7. Neue Sollwerte für Temperatur und Luftfeuchte

In einer Tabelle stellt Burmester neue Sollwerte für die relative Luftfeuchte und Lufttemperatur für verschiedene Materialgruppen vor, bei denen nun jahreszeitlich bedingtes Gleiten inbegriffen ist[28]. Zum Beispiel Leinwandgemälde: Wochenwerte 50-55% rF, wobei stündlich ±2,5%, täglich ±5%, saisonal nochmals 5% im Sommer mehr und 5% im Winter weniger gegenüber den Wochenwerten unbedenklich sind. Dies ergibt übers Jahr einen Bereich von 40-65% rF; Temperatur 4 bis 28°C, wobei niedrigere Temperaturen für die Mehrzahl der Werke konservatorisch vorteilhafter sind. Änderung innerhalb einer Stunde sollen höchstens kleiner/gleich 1°C sein, erhöhte Temperaturen von 24-28°C sind höchstens für 150 h im Jahr zulässig. Allgemein: Die Änderungen sollten möglichst gering und die Häufigkeit von Schwankungen möglichst klein gehalten werden. Der relativen Feuchte wird eine höhere Priorität als der Temperatur zugewiesen, wobei grundsätzlich die Gesamtheit der Anforderungen zu beachten ist. Burmester meint aber, daß derartig enge Grenzen in Glas- oder Oberlichtbauten selbst mit großem technischen Aufwand nicht einzuhalten sind; die Vorgabe „stündlich ±2,5% rF" orientiert sich bewußt an der Grenze der Feuchtemeß- und Anlagentechnik (Anm. des Verf. s. o. unter Feuchtemeßtechnik, regeltechnisches Takten). Die Situation erfordert deshalb ein prinzipielles Umdenken im Museumsbau.

28 Siehe (27), S. 23 Tabelle 3: Sollwerte für die relative Feuchte und Temperatur direkt am betreffenden Objekt. Die Angaben gehen auf einen Vorschlag von W. Eckermann, Deutsches Zentrum für Handwerk und Denkmalpflege Fulda und vom Verfasser (Burmester, Anm. der Red.) zurück, der bereits in W. Berchthold, A. Burmester, W. Eckermann, H. Großeschmidt, J. Haas, J. Kaluza, G. Puttfarken, Chr. Schimmer, H.-G. Wolf und N. Anastasakou (Red.), Raumklima in Museen, Broschüre des Fachinstituts Gebäude-Klima e. V., Bietigheim-Bissingen 1999 publiziert wurde. Wochenwerte der relativen Luftfeuchte für Holz 55-60%; Papier 45-50%; Metall 0-40%. Bei gemischter Präsentation muss ein Kompromiss der Wochenwerte gefunden werden.

29 ASHRAE: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engeneers, ASHRAE Applications Handbook, Atlanta 1999, Chapter 20, Museums, Libraries, and Archives. Stefan Michalski: Setting standards for conservation: New temperature and relative humidity guidelines are now published, in: CCI Newsletter, No. 24, Nov. 1999, zitiert nach der Internetausgabe http://www.cci-icc.gc.ca/whats-new/news24/temperature_e.shtml.

Eine breite Diskussion muß auf Basis der relevanten neuesten Literatur, die hier nur auszugsweise zitiert werden kann, einsetzen. Inzwischen gibt es einen neuen ASHRAE-Standard[29] für Museen, Bibliotheken und Archive, der Kurzzeitschwankungen und jahreszeitliches Gleiten berücksichtigt. Es wird eine Unterteilung in die Kategorien AA, A, B und C vorgenommen. Die Kategorien bezeichnen eine Qualitätsstufe, nicht mehr wie bisher in Einhaltung starrer Werte, sondern in der Kontrolle der Bandbreite von Schwankungen (fluctuation control level), wobei AA dem alten Standard entspricht, dem qualitativ gleichgestellt nun A beiseite gegeben wird. Da sich die Materialfeuchte hygroskopischer Objekte entsprechend der Änderungen der rel. Feuchte oder Temperatur der Umgebungsluft ändert (Gleichgewichtsfeuchte), dies aber wegen des Hysterese-Effekts bei Feuchteanstieg oder -abstieg unterschiedlich ausfällt, sollte die Änderungsgeschwindigkeit des Raumklimas so gering wie möglich sein. Das jahreszeitlich bedingte langsame Gleiten von Raumtemperatur und absoluter Feuchte, aus dem eine geringe Änderungsgeschwindigkeit der rF und damit der Gleichgewichtsfeuchte ohne plötzliche Kurzzeitschwankungen folgt, erscheint ungefährlich. Es gelten die engst möglichen erreichbaren Toleranzen. Von einer Aufweichung der Klimastandards in konservatorischem Sinne kann deshalb nicht gesprochen werden. Änderungen finden in den engen Grenzen wie bisher statt, allerdings nicht mehr um einen internationalen überall und immer gleichen Mittelwert herum, sondern langsam auf und ab gleitend innerhalb bestimmter Sicherheitsbereiche, die je nach regionalen, saisonalen und sammlungsspezifischen Bedingungen zu formulieren sind.

Kurzzeitschwankungen unter Ausnutzung der Extremwerte der Sicherheitsbereiche sind nicht erlaubt.

9. Resümee

Es lohnt sich, so das Ergebnis des Projekts, in Bezug auf ein „ideales" Klima ganzheitlich zu denken, anstelle eines Festhaltens an starren Werten von Temperatur und relativer Luftfeuchte. In ein Klimakonzept einzubeziehen sind nicht nur die Möglichkeiten und Grenzen der Haustechnik, sondern auch die präventive, passive Qualität eines Gebäudes und seiner Einrichtung sowie die Frischluftwechselrate. Neue Vorschläge jenseits von Vollklimaanlagen erbrachten eine gute Alternative, wie Beispiele belegen. Zu diesem neuen Konzept gehört eine optimierte Gebäudehülle, die auf die Gebäudehülle zielende Wandheizung und eine minimierte Lüftung. Ein solches System bietet Vorteile in konservatorischer, physiologischer und wirtschaftlicher Hinsicht.

Neuer ASHRAE Standard
keine Einhaltung starrer Werte, sondern Kontrolle der Bandbreite von Schwankungen, Ausgangswerte 50% rF, 15-20°C. Dem alten Standard, in AA wiederholt, wird der Standard A gleichgestellt. Schlechtere Qualitätsstufen sind absteigend B, C, und D

Stufe AA
± 5% rF, ± 2°C Kurzzeitschwankungen, keine mit den Jahreszeiten gleitende relative Feuchte, während die Temperatur um 5 °C steigen oder fallen kann

Kein Risiko von mechanischen Schädigungen für Objekte und Gemälde. Einige Metalle und Mineralien können zerfallen, wenn 50%, die kritische materialtypische relative Feuchte, überschritten wird

Stufe A
± 10% rF, ± 2°C Kurzzeitschwankung, keine mit den Jahreszeiten gleitende relative Feuchte, während die Temperatur um 5° steigen oder um 10° fallen kann

oder ±5% rF, ±2°C Kurzzeitschwankung, mit den Jahreszeiten gleitende relative Feuchte von ±10%, während die Temperatur um 5° steigen oder um 10° fallen kann

Kleines Risiko von mechanischen Schädigungen für sehr empfindliche Objekte, kein Risiko von mechanischen Schädigungen für die meisten Kunstwerke, Fotografien und Bücher

Stufe B
wie Stufe A , jedoch unbegrenzter Temperaturrückgang im Winter (z. B. Saisonale Museen)

Stufe C
25-75% rF übers Jahr , Sommertemperatur nicht über 30°C

Stufe D
<75% rF übers Jahr

KASTEN 1

Zweifel an der Lösung Vollklimaanlage

- Lösung mit dem höchsten Finanzbedarf: hohe Investitions-, Betriebs-, Wartungs- und Folgeinvestitionskosten („Halbwertszeit“ der Anlagen ca. 10-15 Jahre)
- nur schwer in historische Bausubstanz integrierbar, hoher Platzbedarf
- die physikalisch erforderlichen, grossen Luftwechselraten führen zu Zugerscheinungen im Raum und zu Staubaufwirbelungen
- “Kalte-Wand-Problematik” nicht gelöst
- nicht immer stabile Bedingungen: Schwankungsbreiten der rF wie bei nicht vollklimatisierten Gebäuden möglich
- Gefahr bei mangelnder Wartung durch Mikroorganismen in Luftwäscher, Lüftungskanälen, Filter,
- Risiko des Ausfalls
- oft Kompensation ungeeigneter Museumsarchitektur, daher Evakuierung der Kunstwerke nötig bei Ausfall der Anlage

Alternative Klimatisierungskonzepte

Überblick über passive und aktive Klimatisierungsmassnahmen

Beispiele passiver Massnahmen

- präventive Qualität von Gebäude und Einrichtung optimieren
- Massive Bauweise erbringt gute Dämpfungsfähigkeit gegenüber Aussenklimaschwankungen
- Abdichten von Fugen, Fenstern etc., um kontrollierten Luftwechsel zu ermöglichen
- Einrichten abgeschlossener, klimastabilisierbarer Bereiche (“Zonen“), z. B.: Windfang am Eingang, Eingangsbereich gegenüber Schauräumen abtrennen, Treppenhäuser (Kamineffekt) abtrennen von Ausstellungszonen etc., Einrichten besonders geschützter Zonen für besonders empfindliche Objekte
- Feuchtepuffernde Materialien für den Innenausbau
- Klimastabilisierbare Vitrinen für Einzelobjekte
- vermeiden zu hoher Wärmelasten durch künstliche Beleuchtung durch geeignete Anordnung und konservatorisch sinnvolle Beschränkung auf z. B. max. 10-15 W/m2
- Sonnenschutz, Aussenbeschattung von Fensterflächen und Oberlichtern, um sommerlichen Wärmeeintrag zu minimieren

Beispiele aktiver Massnahmen:

- Be- oder Entfeuchtung z. B. mit Einzelraumgeräten
- Kontrollierte „natürliche“ und mechanische Lüftung
- falls nötig zentrale raumlufttechnische Anlagen, ggf. mit zentralen Be- oder Entfeuchtern

KASTEN 2

Lüften/Frischluftwechselrate/Infiltrationsrate

- Klassifikation von Museumsgebäuden anhand der Frischluftwechselrate/Infiltrationsrate nach Holmberg
- nur ein definiertes, abgeschlossenes Raumluftvolumen kann klimastabilisiert werden, deshalb Gebäude so dicht wie möglich machen
- wegen Schadstoffen aus Objekten und Einrichtung und wegen der Besucher muss kontrolliert gelüftet werden, Schlüssel zur Dämpfung unkontrolliert einwirkender Lüftungsereignisse/Klimaschwankungen
- hohe Frischluftmengen bedeuten das Einführen grösserer Mengen von gasförmigen und festen Schadstoffen: hohe Aufbereitungskosten, hoher Filteraufwand; grössere raumlufttechnische Anlagen nur wenn unbedingt notwendig
- in der Regel genügt im Ausstellungsbereich ein max. 1-facher Luftwechsel pro Stunde abhängig vom Besucheraufkommen
- in fensterlosen Depots ohne Personenverkehr Abluftventilator mit 0,1-fachem Luftwechsel pro Stunde zur Abfuhr von Schadstoffen
- keine grundsätzliche Überdimensionierung von raumlufttechnischen Anlagen, da diese bei ungünstigen Bedingungen zu hochfrequentem Lastwechsel neigen, bedingt durch regeltechnisches Takten, klein dimensionierte Anlagen haben diesen Nachteil nicht und können nur die konservatorisch erwünschten langsamen Änderungen im Raum bewirken

Kühlen

- Kühlung von Wärmelasten des Gebäudes und der Einrichtung sollte möglichst nicht notwendig sein (massive Bauweise, aussenliegender Sonnenschutz, geeignete, reduzierte Beleuchtung)
- an heissen Sommertagen nur nachts Lüften/Nachtkühlung. Kann wegen Besuchermassen nicht bis zur Nacht gewartet werden, evtl. Kühlung zugeführter Frischluft bei max. 1 fachem Luftwechsel um wenige Grad
- Ökologisch sinnvoll: Kühlen der zugeführten Frischluft mit einem sogenannten „Luftbrunnen“

Heizen

- Konvektoren, Luftheizung, Fussbodenheizung scheiden im Museumsbereich aus. Aufheizen der Raumluftmasse bedingt höheren Luftdruck (Wasserdampf- und Energieverluste), Staubaufwirbelung, „Kalte-Wand-Problematik“
- Temperieren der Wand erzeugt homogenes und physiologisch und konservatorisch günstiges Strahlungsklima ohne Zugerscheinungen. Masse der Raumluft ist nicht am Heizen beteiligt, reduzierte Wasserdampf- und Energieverluste, geringerer Apparateaufwand, kein Problem der »kalten Wand«, Energie- und Investitionseinsparung

Entfeuchten

- geringfügiges Anheben der Raumlufttemperatur ist kostengünstiger als Entfeuchtung der Raumluft
- „Sollwertfeld“-Regelung auch bei Vollklimaanlagen im Sommer
- Kondensaterscheinungen an kalten Wänden auch im Sommer durch Temperieren beherrschbar
- Bei aufsteigender Feuchte in Mauern Temperierung ideal zur Trockenlegung

Befeuchten

- Gefahr von Gebäudeschäden im Winter durch Befeuchtung bei ungleichmässiger Beheizung der Gebäudehülle durch „Luft“-Heizung
- Verdunstungsbefeuchter/Luftwäscher sind Dampf und Ultraschallbefeuchtern vorzuziehen
- Einzelraumgeräte sind übersichtlich zu warten und leicht zu ersetzen
- zentrale Befeuchter und das dazugehörige Luft-Kanalnetz müssen intensiv betreut und gewartet werden

Jan G. Holmberg

Comparison of Tempering and Conventional Convection Heating

Abstract:

In order to better understand the functioning of Tempering systems, the National Property Board of Sweden has installed a Tempering system and a conventional convection heating system in two almost identical pavilions at Salsta Palace in Sweden. The aim of the project was to measure the indoor and outdoor climate as well as the energy consumption for both so to be able to compare the two systems. Temperature and relative humidity (RH) have been measured within the walls in an attempt to understand the change of Moisture Content (MC) in the wall when a Tempering system is in use. The main result was that the Tempering system used 20% less energy than the conventional heating system.

Vergleich zwischen Temperierung und konventioneller konvektiver Heizung

Um die Funktionsweise der Temperierung zu veranschaulichen, führte das schwedische Nationale Liegenschaftsamt auf Schloss Salsta in Schweden eine wissenschaftliche Untersuchung durch. Dabei wurden die beiden nahezu identischen Pavillons des Schlosses genutzt: Im östlichen Pavillon wurde ein Temperiersystem, im westlichen eine konventionelle Heizkörperheizung installiert. Ziel dieses Projekts war ein Vergleich beider Heizsysteme durch Messungen des Außen- und Innenklimas und des Energiebedarfs in den beiden Gebäuden. Um Aufschluß über die Änderung des Feuchtigkeitsgehalts (MC) im Mauerwerk bei in Betrieb befindlicher Temperierung zu erhalten, wurden Temperatur und relative Feuchte (RH) in Bohrungen im Mauerwerk gemessen. Als Hauptergebnis stellte sich heraus, dass die Temperierung in dieser ersten Betriebsphase bei gleicher Raumtemperatur einen um 20% geringeren Energiebedarf als das herkömmliche konvektive Heizsystem hatte.

1. A case study at Salsta Palace in Sweden

The Salsta Palace is located 20 miles east of the university city of Uppsala. It was built by Count Nils Bielke. The corner stone was laid in 1613 on the grounds of a medieval castle. The present Baroque building was designed by the architect Tessin the elder and was commissioned by Count Bielke[1] in the year 1675. After about 200 years the building passed into the hands of the Brahe family who kept it for another century and finally the Swedish government purchased the palace and the land in 1976. The palace is at the present time not open to the public. It is unheated. The National Property Board of Sweden (SFV) is looking for an appropriate use for the building.

The two pavilions of the Salsta Palace are built on a foundation of granite stones. The walls are of brick, about 0.8 m thick for the ground floor and about 0.55 m for the upper floor. Framing is of wood joists. The attic is ventilated with outdoor air and the weather proofing is of sheet metal. The buildings are almost identical except for the windows, which are slightly different. See Figures 1-3.

As part of the EUREKA Project 1383 PREVENT we studied heating with a tempering system. Tempering systems have been installed at several locations, among them the Schloß Schönbrunn in Vienna, the Brezice castle in Slovenia and the Carthusian monastery in Mauerbach. As a result of PREVENT, SFV decided to test a tempering system in comparison to a conventional heating system with two pipes, pump circulation, convection heaters and thermostat valves.

[1] Count Bielke joined the allied Christian army as a General in 1685 and took a very active part in the victorious battle at Mohacs in the year 1687. He certainly passed Regensburg and Vienna. It is most likely that he had also been to Laibach, today's Ljubljana, where ZRMK is located.

Figures 1 and 2, the West and East pavilions. Both buildings have the same dimensions but slightly different size windows.
Drawing by SFS.

Figure 3, the West and East pavilions at Salsta Palace, Winter 1999.
Photo by Käferhaus. Langenzersdorf/Wien.

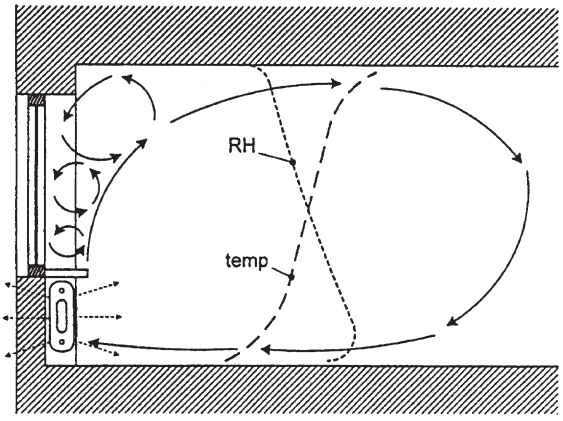
Today the two systems mentioned are in operation in the two small free-standing pavilions of the Salsta Palace: a traditional system based on convection and the wall tempering system based on conduction and radiation, according to Figures 4 and 5.

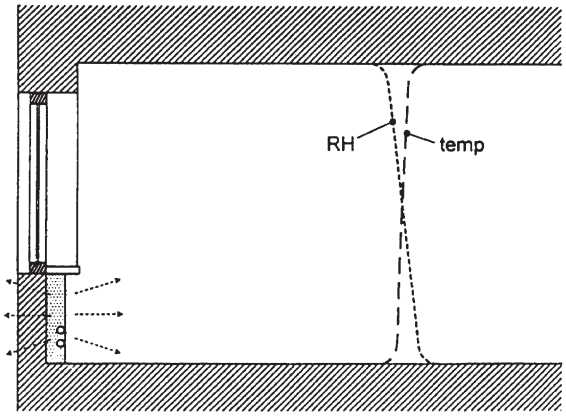
SFV has taken measures to level the heating demand for the two pavilions and a heat loss calculation shows that the East pavilion needs 7% more energy to keep the indoor temperature at the same level (15°C), as the West pavilion, at the design outdoor temperature (–17°C).

The tempering system in Salsta Palace has two Ø 18 x 1 mm Cu pipes embedded in the inner layer of the outer wall, 100 mm above the flooring in both the ground and upper floor. The pipes are placed only 20 mm deep in the wall and low temperature water (50–30°C) is circulated with a pump. The idea is that only the wall itself will be heated by the pipes and then will act as a radiation heater for the room. See Figure 6.

The radiation component will influence the Predicted Mean Vote, PMV, ISO 7730 (1984), and the Predicted Percentage of Dissatisfied, PPD, will decrease. Fanger (1970).

At the same time the heat flow through the outside walls will increase the wall temperature and dry out the building material, in this case brick and mortar. When the Moisture Content, MC, in the brick wall is decreased, then the thermal





Figures 4 and 5, Salsta Palace, comparison of expected temperature and RH gradients in the convection heated West pavilion with the Tempering heated East pavilion.
Drawing by the author.

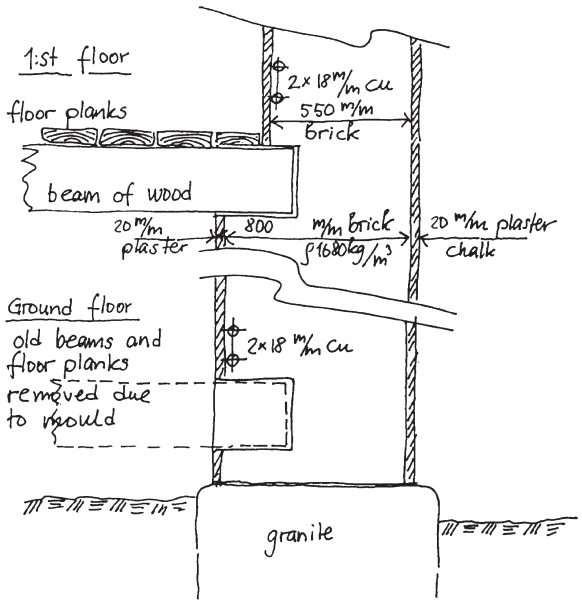


Figure 6, Salsta Palace, the outer wall of the East pavilion. The West pavilion has the same dimensions but concrete flooring on the ground floor. Drawing by the Author.

conductivity, λ, will also be decreased and the overall thermal transfer coefficient, U, will decrease. Grepmaier (1997), Grosseschmidt (1995). See Figures 7 and 8.

2. Measurements at the Salsta Palace

We have measured the heating energy used and the indoor climate in both pavilions for one year (1/9/1999 – 31/8/2000), and some results are worth mentioning. At the same time we measured the temperature and the RH in the brick walls, at a depth of about 0.3 m within the 0.55 m thick wall.

In order to be able to correctly compare the two buildings, we have measured the ACH (air change rate) in all rooms of both buildings. The result was 0.8 ACH on average in the West pavilion (with conventional heating) and 0.9 on average in the East pavilion (with Tempering). See Figure 9.

Measurement of indoor climate was done using the same equipment as in other PREVENT projects. Therefore we consider the accuracy of the instruments and the uncertainty and the level of confidence for the measurements to be of the same magnitude as in other PREVENT projects.

Tinytalk and Tinytag temperature loggers use 10k NTC thermistors with an accuracy of ± 0.2°C from 0 to 70°C according to the specification. RH loggers are accurate to 4% at 20°C with a temperature coefficient of 0.2%/K according to the specification. We have used the software OTLM 1,31 and 1,51 and transferred measurement data to EXCEL.

The ACH measurements were made using the same techniques and standards as we used for the PREVENT project for the Schönbrunn Palace. Holmberg & Kippes (1998).

Uncertainties in measuring campaigns for the years 1995-1998 have been evaluated to be less than ±1°C with 95% confidence and less than ±8% RH with 95% confidence, EU 1383 PREVENT Report No. 8 from the Swedish partners. Holmberg (1998).

Design and measured values are expressed in Table 1.

Table 1, Comparison of energy demand and use in the East and West pavilions at Salsta Palace, design values, measured values and recalculated values.

Item	Unit	Design value		Measured value		Recalculated value	
Building		E	W	E	W	E	W
Period		1999-09-01-2000-08-31		same		same	
T_{diff} wall	K	32	32	27	29	27	29
ACH		0.9	0.8	0.9	0.8	0.9	0.8
Q_{transm}	kW	7.65	7.24			7.65	7.24
Q_{vent}	kW	2.8	2.5			2.4	2.16
Durability	Degree-hours	96000	96000	81400	81400	55700	67350
E_{transm}	kWh	22950	21720				
E_{vent}	kWh	8400	7500				
E_{tot}	kWh	31350	29220	14326	20188	17406	19784
E_{diff}	%	7	0	-29	0	-18	0

3. Measurement result

We have not been able to keep the room air temperature at the design level of 15°C, due to the lack of a fully automatic control system. The 6 kW electric boilers used were operated at 50°C during the main part of the test period. Figure 10 presents outdoor and indoor temperature readings as well as supply water temperature and consumed energy in kWh. All Figures are from the logbooks and measured temperatures are all on level with logged temperatures.

It was clear that the East pavilion with the Tempering system was using less energy than the West pavilion when we compared design values for the buildings

Figure 7, Relation between RH and MC for brick.
Source: Nevander & Elmarsson.

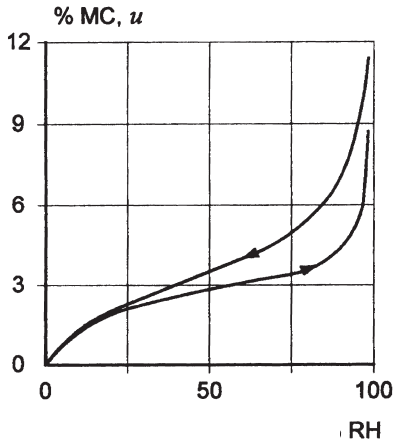
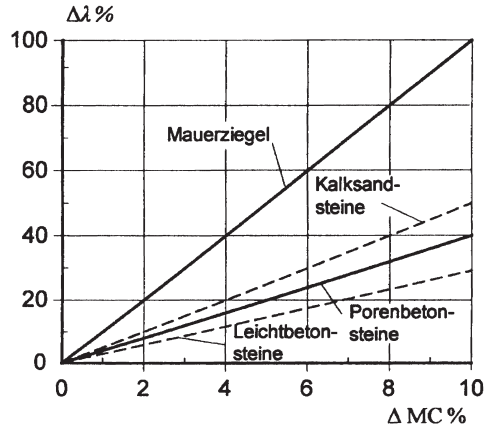


Figure 8, Relation between moisture content change, Δ MC, and thermal conductivity change, Δ λ, for brick (=Mauerziegel) and some other building materials.
Source: Grepmaier



with the measured indoor temperatures. Another interesting result was that the RH in the wall, as we measured it, decreased, and as a result the MC also decreased.

As can be seen in Table 1, the energy used in the East pavilion during the measurement period September 1999 to the end of August 2000 was 29% lower than the energy used in the West pavilion. If we recalculate the energy demand for the measured indoor temperatures (10°C in the East pavilion and 12°C in the West pavilion) the difference is 18%.

One explanation could be, and RH measurements in the walls support this conclusion, that the heat transmission coefficient for the bricks and mortar, λ, decreased in the East pavilion due to the Tempering system and thus the U-value of the walls was lower in the East pavilion. The East pavilion with its wall tempering system used 18% less energy than the West pavilion with is conventional heating system. The difference in energy used indicates that the λ-value for the bricks and mortar decreased about 25% in the East pavilion.

4. Heat loss from embedded pipes

Several solutions to the problem can be found in the literature. Rietschel (1960). Faxen (1937), according to Rydberg and Huber (1955), published the most exact solution. Rydberg and Huber give an approximate graphical solution for a single

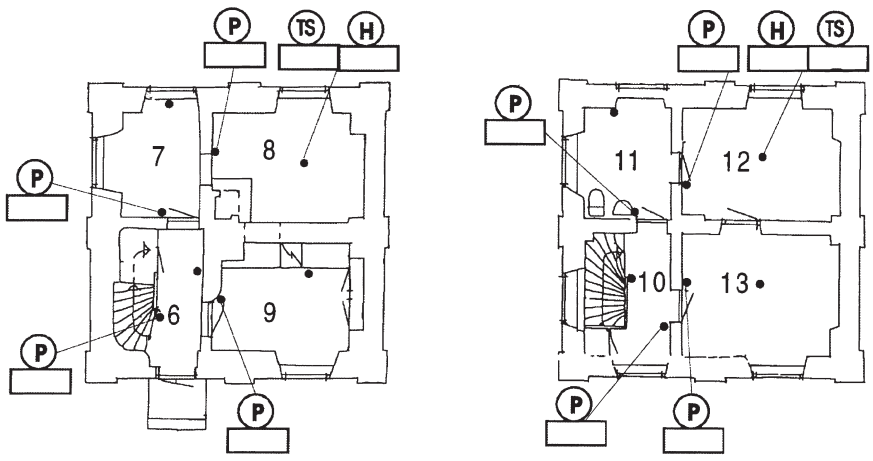


Figure 9, Salsta Palace, the East pavilion with measuring points for determination of ACH, P = gas collector, TS = temperature logger, H = RH logger, • = tracer gas emitter. Drawing by Pentiaq AB.

pipe in a slab or wall of concrete. They use the relation according to Figure 18 in their paper and, in the Salsta Palace case, if we have a pipe with a diameter of 0,018 m embedded 0,03 m in the wall, h/r is 3.3, Q/λ Θ is around 1.8, and the wall is of dry brick with λ close to 0.8 W/m-K, then the approximate heat loss is than around 40 W/m of pipe.

Elgeti (1971) has reduced the problem to a two-dimensional calculation. The heat loss is then according to Grepmeier (1997):

$$Q = \frac{2\,\pi\lambda T}{ln(K + \sqrt{K^2 - 1})} \qquad where \tag{1}$$

$$K = \frac{s^*}{R\pi}\left[1 + \left(\frac{\pi R}{2s^*}\right)^2\right] sin\left(\pi\frac{\alpha}{s^*}\right) \tag{2}$$

$$Q = heat\ loss\ in\ W/m\ of\ embedded\ pipe \tag{3}$$

$$T = T_p - T_{out} + \frac{\alpha}{s}\ (T_{in} - T_{out}) \tag{4}$$

$$s^* = \frac{\lambda}{\alpha_1} + s_1\frac{\lambda}{\lambda_1} + s_w + s_2\frac{\lambda}{\lambda_2} + \frac{\lambda}{\alpha_2} \tag{5}$$

where:

T_p, T_{out} *and* T_{in} are the temperatures in the pipe, outdoors and indoors in K

λ, λ_1 *and* λ_2 are the thermal conductivities for the brick and the inner and outer plaster in W/m K

α_1 *and* α_2 are the convection heat transfer coefficients for the inside and the outside of the wall

R is the radius of the pipe and α is the distance from the center of the pipe to the inside of the wall

and s_1, s_2 *and* s_w are the thicknesses of the inside and the outside plaster and the brick-wall in m.

In the Salsta Palace case we have:

T_p = average 30°C
T_{out} = 5°C
T_{in} = 15°C
α_1 = 8 W/m² K
α_2 = 25 W/m² K
the two λ = 0.8 W/m K
and plaster thicknesses s_1 and s_2 (inside and outside) of 0.02 m and wall thickness s_w of 0.6 m,
the pipes have a diameter of 18 mm, R = 0.009 m and they are mounted directly under the inner plaster layer, thus α = 0.03 m. To compensate for the real indoor temperature, which was measured with ORION loggers, the calculation was performed with a temperature difference between the heating pipes and the room of 15°C.

The heat loss Q was then around 27 W/m in the East pavilion.

During the first 12 weeks of the year 2000, the East pavilion had an average heat demand of 444 kWh/per week (according to measurements and the logbook) which corresponds to an average heat loss from a single pipe of 25 W/m.

Conclusions

The conclusion was that the tempering system was functioning as well as the conventional heating system. The tempering system had an energy use of 20% less than the conventional heating system. See Figure 10.

The MC expressed as RH in the brick wall in the tempering system building (East pavilion) decreased from 70 to 50% during the first spring the system was in operation. See Figure 11.

The heat loss from the embedded pipes in the East pavilion of Salsta Palace corresponds well with calculated values.

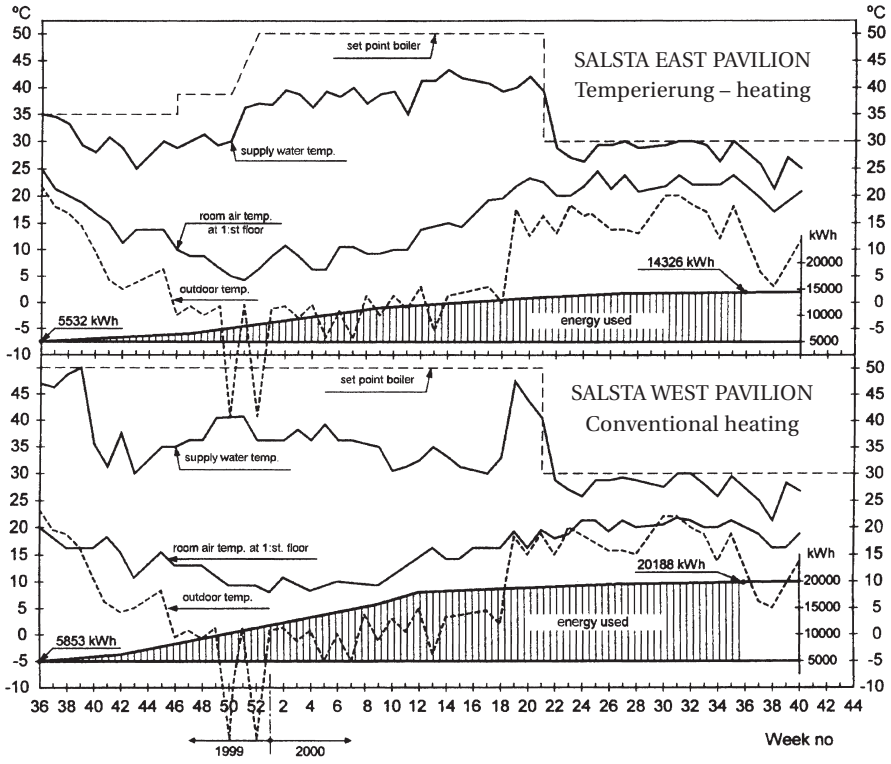


Figure 10, Salsta Palace, comparison of energy used in the East and the West pavilions during the heating season 1999–2000.

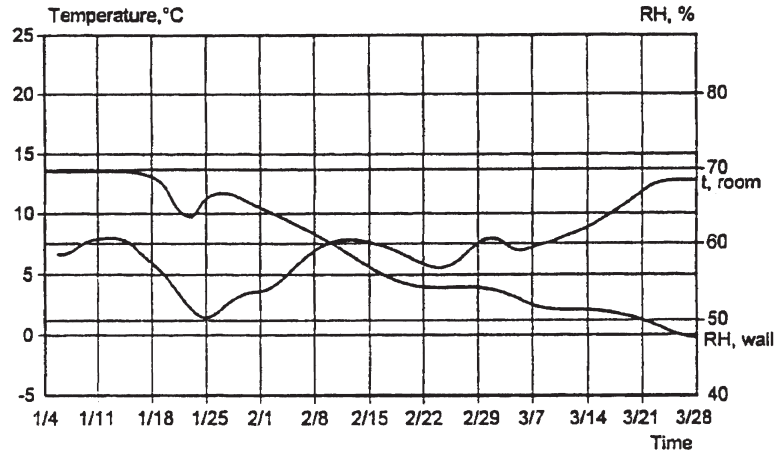


Figure 11, Salsta Palace, temperature in a room and RH in the wall on the upper floor in the East pavilion during the Winter of 1999. The tempering system had been in operation since December 1998.

References

ISO 7730, 1984.

Fanger, P. O. 1970, Thermal comfort analysis and applications in environmental engineering. McGraw-Hill, New York.

Grepmaier, K. 1997, Sanierung von feuchten Mauerwerk; Die Temperierung als übergreifende Alternativlösung, Technische Universität München, Lehrstuhl C für Thermodynamik.

Grosseschmidt, H. 1995, Die Temperierung, Verfahren zur thermischen Bausanierung, Raumtemperierung und Klimastabilisierung in Museen und anderen Gebäuden, Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege, München.

PREVENT, Projektbüro Eureka, EU 1383 PREVENT, 1998, Report Number 8 from Swedish partners, University of Technology, Vienna.

Holmberg, J. G. and Kippes, W. 1998, Airflow patterns in Schönbrunn Palace, ROOMVENT 6th International Conference on Air Distribution in Rooms, Royal Institute for Technology, Department of Building Services Engineering, Stockholm.

Rietschels Lehrbuch der Heiz- und Lüftungstechnik, 1960, Springer, Berlin, pp 403-417.

Faxen, O. H. 1937, Beräkning av värmeavgivningen från rör ingjutna i betongplattor, Teknisk Tidskrift Mekanik, Häfte 3, Stockholm.

Rydberg, J. and Huber, Chr. 1955, Värmeavgivning från rör i betong eller mark, Förlags AB VVS, Stockholm.

Elgeti, K. 1971, Der Wärmeverlust eines in einer Wand verlegten Rohres, HLH 22, No 3, Berlin.

Marjana Šijanec-Zavrl, Roko Žarnić

Thermal Response of Wall-Tempered Heritage Buildings – Monitoring and Simulation

Abstract:

Considerable scientific effort and financial resources are involved in conserving historic buildings and creating appropriate indoor climate conditions and thermal comfort for users, visitors, exhibited objects, and the building itself. In Slovenia, the idea of establishing a central monitoring system for heritage buildings was the first step realised as part of participation in the EUREKA Project 1383 PREVENT. In order to improve the indoor conditions in historic buildings and to realise preventive restoration strategy, an international co-operation was established through the PREVENT project based on the permanent monitoring of indoor climate in heritage buildings. The idea of using the "wall heating" method for energy-efficient improvement of microclimatic control in historic buildings was investigated as an additional step. In this paper, climate monitoring in different types of heritage buildings (heated and unheated) in Slovenia is described and the effects of wall tempering on indoor climate are presented in more detail, based on computer simulations and monitoring the performance of demo-installations. Further ideas for research on improving indoor climate and consequently integrated preventive conservation are also described.

Thermisches Verhalten von Baudenkmälern mit Wandtemperierung – Messungen und Simulation

Beträchtliche wissenschaftliche Anstrengungen und Geldmittel sind nötig, um historische Gebäude zu konservieren und darin sowohl thermische Behaglichkeit für Personal und Besucher, als auch geeignete Klimabedingungen für Ausstellungsobjekte und das Gebäude selbst herzustellen. Durch die Mitarbeit beim EUREKA-Projekt 1383 PREVENT wurde in Slowenien ein erster Schritt zur Errichtung eines zentralen Klima-Überwachungs-Systems in denkmalgeschützten Gebäuden getan. Mit dem Ziel, das Innenklima in historischen Gebäuden zu verbessern und präventive Massnahmen zu entwickeln, wurde in einigen denkmalgeschützten Gebäuden das Innenklima permanent gemessen. In einer zweiten Stufe wurde die Idee verwirklicht, die Temperierung in Demonstrationsobjekten einzusetzen als energieeffiziente Methode zur Kontrolle und Verbesserung des Mikroklimas in historischen Gebäuden. Der Beitrag beschäftigt sich mit der Auswertung und Dokumentation der Klimamesskampagnen in unterschiedlichen Typen denkmalgeschützter Gebäude (beheizt und unbeheizt). Die Auswirkungen der Temperierung auf das Raumklima werden in detaillierter Form dargestellt und Computersimulationen mit den Messergebnissen verglichen. Zukünftige Forschungsvorhaben werden vorgestellt.

Introduction

Historic buildings represent a very sensitive part of built-up areas. Research into appropriate methods, long-term monitoring, and controlling microclimate using heritage-friendly techniques could provide necessary criteria for appropriate use of historic buildings under today's more complex indoor climate.

There are several important issues to be solved related to microclimate and moisture control in historic buildings. The first issue is preventing moisture from entering the buildings and their elements, most often due to capillary rise resulting from the lack of moisture barriers in the basements of old structures. Further

Editor's ntoe:
Heating-pipe wall heating is a five-step process:
– Heat from the flowing hot water in the heating pipe is first transferred conductively to the thin strip of plaster in front of the heating pipes.
– Second, this hot strip heats the air in the boundary layer in front of the strip, which extends the height of the strip from about 10 cm to about 30 cm. This extended hot strip of plaster also radiatively heats the room, particularly the lower portion of the room.
– Third, the warm air in the boundary layer rises along the wall, convectively heating the rest of the wall surface and creating an initial wall temperature distribution that is decreasing with height above the floor.
– Fourth, the warm rest of the wall radiatively uniformly heats the room, particularly facing walls and furnishings.
– Fifth, the heated walls and furnishings reradiate the absorbed heat, leading to thermal equilibrium and a nearly uniform wall surface temperature throughout the room that is even more slowly decreasing with height above the floor than that produced by convection.

To correctly model wall heating, all of these steps must be included. Unfortunately, to date no one has fully modeled wall heating.

This volume includes the most complete modelling of wall heating yet published – the contribution from Šijanec-Zavrl and Žarnić, which describes their extensive modeling efforts as well as applications of tempering and the monitoring of tempered buildings in Slovenia. Due to limitations of the commercial software they used, however, their modelling lacks Step 3, the heating of the wall surface

by convective heat flow in the boundary layer. As discussed in their report, this can lead to significant discrepancies between the results of their models and measurements, particularly with regard to surface temperatures and the perceived need for a heating pipe located at 80 cm from the floor. In fact the installation in Brezice Castle hindered convective heat transfer to the boundary layer by insulating the pipes with boards (for aesthetic reasons) which reduced the ΔT that drives convection (see Fig. 12 and Chapter 2.2) and made it perform more like the simulation. Despite these limitations, the more advanced 3-D model that they use demonstrates many of the features of tempering measured experimentally.

issues are related to preventing inappropriate microclimatic conditions (indoor temperature, relative humidity, air velocity) in historic building structures and exhibited objects caused either by the installation of standard heating and air conditioning systems or by incorrect use and operation of the building.

The purpose of monitoring indoor climate in historic buildings is to obtain data on long-term indoor climate changes and their influence on building and furnishing materials that are of cultural value. The data are needed for mitigating the influence of moisture and temperature change on materials that should be preserved in good condition. That is especially the case when indoor surfaces are painted with frescos or covered by other kinds of valuable coatings on wooden panels or textile curtains. The measuring programs provide data that will be a valuable resource for supporting museum management decisions concerning the future use of historic buildings and the protection of exhibited objects. They also help in deciding the most suitable heating and ventilation systems in rooms open for public use. Efforts towards establishing monitoring systems to be used in Slovenian heritage buildings are under way. The first systematic measurements started in the huge Knight's Hall of Brezice Castle. Based on the experiences gained from these measurements, an improved system has been installed in Hrastovlje Church, one of the best-known Slovenian sacral monuments with indoor frescos. The approach to monitoring and making use of the information gained from it is described briefly for the above-mentioned heritage buildings.

In order to improve the indoor conditions in historic buildings, an international co-operation was established through the EUREKA Project 1383 PREVENT that generated the idea of using the "wall heating" (also: "tempering", "Temperierung", "wall tempering", "wall warming", "Hypothermos") method for energy-efficient improvement of microclimatec control in historical buildings. Wall heating is an alternative approach to preventive conservation of historic buildings, such as castles, churches, palaces, and all other types of representative massive buildings built in cold climates. Wall heating, as the very simple version with one or two levels of heating pipes located just below the inner wall surface, offers many benefits: moderate heating of the building, a good level of thermal comfort for occasional visitors, efficient use of energy, stabile indoor microclimate, warmer walls and prevention of moisture rising in the walls, no reduction of earthquake resistance of the structure (as in the case of wall cutting), and less restoration work due to less particulate deposition on walls and exhibits. Camuffo [1] stressed the importance of heating walls instead of indoor air in order to avoid cold wall condensation and damage. Großeschmidt [2] elaborated the principles of wall heating and the anticipated benefits were proven in many case studies [2-4].

To support wall heating installations in various historic buildings, research was carried out in the following areas: indoor climate in unheated and wall-heated rooms, thermal comfort for visitors in wall-tempered buildings, energy efficiency and energy use in wall-heated historic buildings and drying process in the heated wall with capillary rise.

1. Brezice Castle

1.1. Indoor climate management in the museum in Brezice Castle

Historic building management budgets are rarely sufficient to cover all needs concerning care for buildings, exhibits, and operating costs including energy consumption. Therefore, maintenance of appropriate indoor climate conditions (thermal comfort) and rational use of energy appears to be an important contemporary and future issue in historic building management.

Energy consumption in museums is related to the indoor climate conditions, for which there are different requirements for staff, visitors, exhibits, and the building itself. Since rooms and halls with representative character do not require the same level of thermal comfort as living/working space, the need for installed heating is expected to be lower. It is important that heating prolongs the

period during which events are held in the castle halls into the colder period of the year and that it reduces the danger of cold wall effects, especially in the case of walls painted with frescos.

In Brezice Castle (16th century, SE Slovenia, Figure 1) a microclimate monitoring system was installed [6, 7] to analyse the influence of indoor climate on the progressive deterioration of frescos and the outer layer of plaster, which had been noticed in recent years in the main hall of the castle (Knight's Hall). Occasional surface condensation was assumed to be one of the most important reasons for deterioration of the wall paintings and therefore should have been significantly reduced. In the past, some controversial events had been held in the Knight's Hall, such as a weeklong flower and gardening exhibition, with intensive moisture generation. There was a lot of interest in giving concerts and short-term exhibitions in the Knight's Hall. Microclimatic measurements in the Knight's Hall provided the necessary data for evaluation of the cold wall condensation risk during events.

1.2. Monitoring of indoor climate conditions

The renaissance Brezice Castle (Figure 4) was erected in 1529 and rebuilt in the baroque manner in 1694. The most important castle wall paintings are frescos from the beginning of the 18th century painted on the walls and ceilings of the Knight's Hall, in the staircase, and in the castle chapel. The frescos in the Knight's Hall are the biggest secular opus in Slovenia. In the past the structure of the castle and the paintings were partly damaged due to material deterioration and foundation settlement. The castle and the paintings are under permanent regard and restoration activities.

The large Knight's Hall is 31.1 m long, 9.6 m wide, and 7.8 m high (Figure 2). It stretches over the first and second floors of the east wing of the castle. The ground floor under the Knight's Hall is used as a wine cellar. The castle walls are massive stone masonry. Their thickness decreases gradually from ground floor to

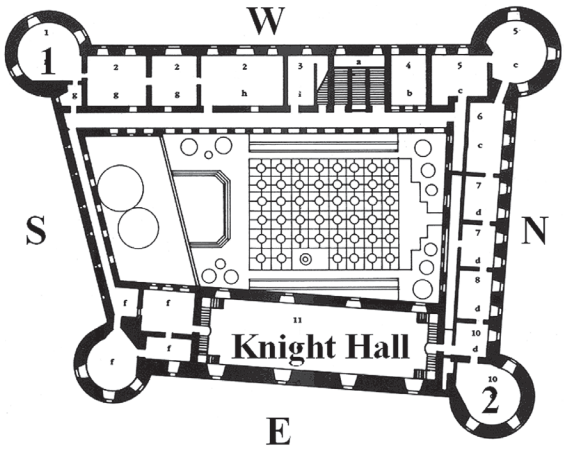


Figure 1.
Layout of Brezice Castle, temperature and relative humidity monitoring in wall-heated room in Tower 1, unheated exhibition room in Tower 2, unheated frescoed Knight's Hall. Courtesy of Archive of Posavski muzej Brezice.

Figure 2.
Knight's Hall in Brezice Castle. Photo Zvone Pelko, Brezice. Courtesy of Archive of Posavski muzej Brezice.

Figure 3.
Position of temperature measuring points
in the cross-section of the Knight's Hall of Brezice Castle

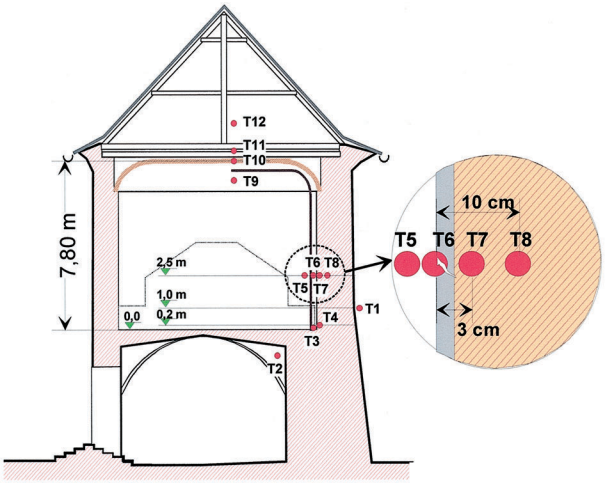


Figure 4.
Brezice Castle in Slovenia. Photo Zvone Pelko, Brezice. Courtesy of Archive of Posavski muzej Brezice.

roof. The outer walls are thicker than walls oriented to the courtyard. The roof and ceiling structures above the Knight's Hall are made of timber. The timber beams of the ceiling are covered with wooden boards thatched with reeds, which are in turn covered with about 40 mm of multi-layer plaster. To preserve the fresco painting quality, several preventive activities have been undertaken in the last decade. Since in recent years progressive fresco deterioration has been found in the stairways, the main idea was to assess the impact of outdoor air temperature and relative humidity as well as changes in indoor climate due to events. The main annual events in the Knight's Hall are concerts every second evening in August with audiences of about 300 persons.

Humidity fluctuations and moisture transport through the walls are conditions that activate other decay factors such as frost, soluble salts, corrosive gases from polluted air, and biodegradation. Decay caused by these factors usually develops severely at the wall surface or beneath it. In the case of wall paintings, the paint layers suffer most of the damage. In the case of the paintings in Brezice Castle, the most likely decay factor is water. The paintings are sufficiently high above the ground level so that they are not affected by rising moisture. The roof is maintained regularly so that rain does not leak onto the walls. Thus, the only source of water that can harm the paintings is condensation of moisture on the wall surface. In order to obtain data on the influence of water on decay, it was decided to measure temperature and relative humidity changes in one cross-section of the hall (Figure 3).

Altogether 12 temperature and 8 relative humidity measuring points are installed. A steel mast supports the instruments. The temperature sensors are Cu-Con and Ni-Ni/Cr thermocouples. The relative humidity sensors are capacitive polymer thin films (BMC Type GHTU) with a measuring range of 0 to 100% relative humidity with linearity of 2% in the recommended measuring range between 30% and 80% relative humidity. Sensors are connected to a data acquisition system that constantly samples results at ten-minute intervals. The sensors are installed at three levels inside the hall: 0,2 m above the floor, 2.5 m above the floor, and beneath the ceiling. Instruments are also installed beneath the hall's floor, in the wine cellar, and above it's ceiling, in the attic. One pair of instruments is installed outside the building to measure outer air temperature and relative humidity. Wall temperature and relative humidity are measured on the

wall surface and a few centimetres beneath the surface. The temperature is also measured in the plaster of the wall and ceiling. Additionally, the longitudinal deformations of the wooden ceiling structure are measured using six dilatometers to obtain data on the influence of wooden structure deformations on crack development in ceiling plaster.

1.3. Monitoring Results

Monitoring started in the last week of April 1997 and the measurements, at a rate of 6 readings per hour, continue today. In Figure 5, the data collected from selected points during the first 6 months are presented. The diagram shows that the wall temperature (T5) increased about 10 days after the increase of outdoor temperature (T1), with the delay due to heat accumulation in the masonry walls.

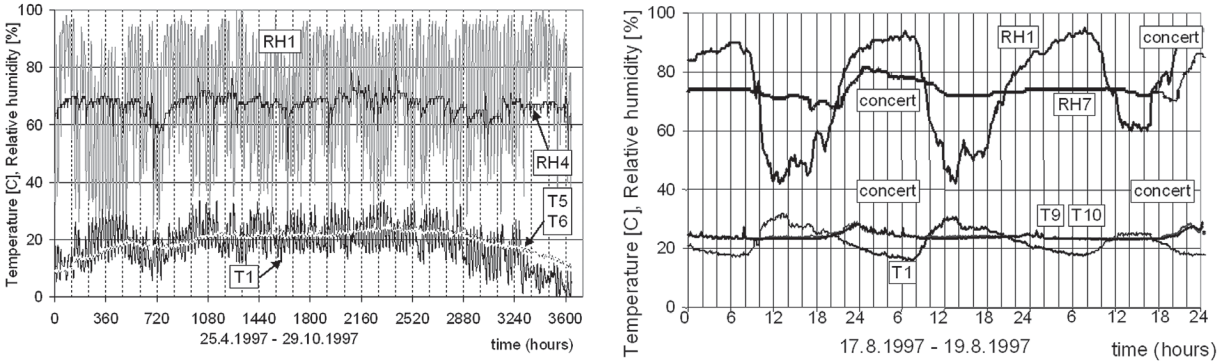
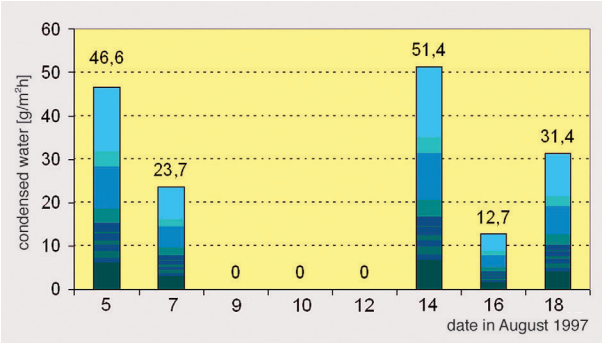


Figure 5.
One-half year of measurements at Brezice Castle: outdoor and indoor temperature and relative humidity (left); measurements during concerts in the Knight's Hall (right).

Differences between the indoor temperatures in the Knight's Hall, cellar, and attic have been observed as well as differences between temperatures measured on the wall surface and deeper inside the wall. The relative humidity measurements show stable conditions in the only occasionally occupied Knight's Hall.

The microclimate conditions are changed in the presence of a large group of people or objects that emit moisture or gases or radiate heat. This has been demonstrated by the temperature and relative humidity measurements. In August 1997, evening concerts were performed every second day with audiences of about 300 persons. Each person radiates about 100 W and emits a significant quantity of moisture. Before the concert start, the air temperature at the mid-height of the hall was about 24°C and beneath the ceiling about 25°C. The relative humidity of the indoor air was about 75% at the same time. The mid-day outdoor temperature was 32°C and the outdoor relative humidity at the time of the concerts was about 94%. Due to the presence of the audience, the indoor air temperature rose about 2°C at the mid-height of the hall and about 5°C below the ceiling. The relative humidity at the mid-height of the hall rose about 10% and beneath the ceiling about 12%. Better insight into temperature and relative humidity changes during the events can be obtained from the diagrams presented in Figure 5. These data show how sensitive even a large indoor volume can be to the short-time presence of a large audience. The main concern related to preservation of the frescos was moisture condensation on the plaster surface. It can lead to the capillary penetration of water solutions of agents beneath the surfaces of the paint and cause deterioration of and damage to the frescoes.

Figure 6.
Amount of water condensed on the inner surfaces of the frescoed walls during the series of concerts in 1997 in the Knight's Hall of Brezice Castle.



It can also be concluded that, due to a low ventilation rate, the microclimate in the large hall responds slowly to changing external climatic conditions, mainly because of it's massive masonry walls and relatively tight windows. Therefore, during moderate occupancy, the hall's frescos and exposed objects are not endangered. Figure 6 presents the amount of water condensed on the inner surfaces of the frescoed walls during the series of concerts in 1997. Analyses also showed [12] that in spring (April) the presence of about 100 visitors for 1 hour creates critical conditions for surface condensation on cold walls. Therefore, the long-term measurements will enable better insight into this phenomenon and provide data for development of tools for analysis and prediction of the deterioration processes.

Cracks form and propagate in painted plaster and in structural walls due to permanent expansion and shrinkage of timber structures. Significant deformation is caused after long dry periods when high humidity expands the floor timbers and ceiling planks. Figure 7 illustrates the case of rapid alternation of microclimatic conditions inside the attic of Brezice Castle due to summer showers that followed a long dry period. Increased outdoor humidity and lowered outdoor temperature was followed by increased humidity and lowered temperature in the attic. However, the microclimatic conditions did not change significantly in the hall below the attic due to better insulation from outdoor influences. The elevated humidity in the attic caused the expansion of timber joists that are fixed atop facade walls, consequently widening the existing cracks in perpendicular walls. This influence can be diminished by rearrangement of the joists' supports. The wooden planks expanded as well, having some effect on the pain-

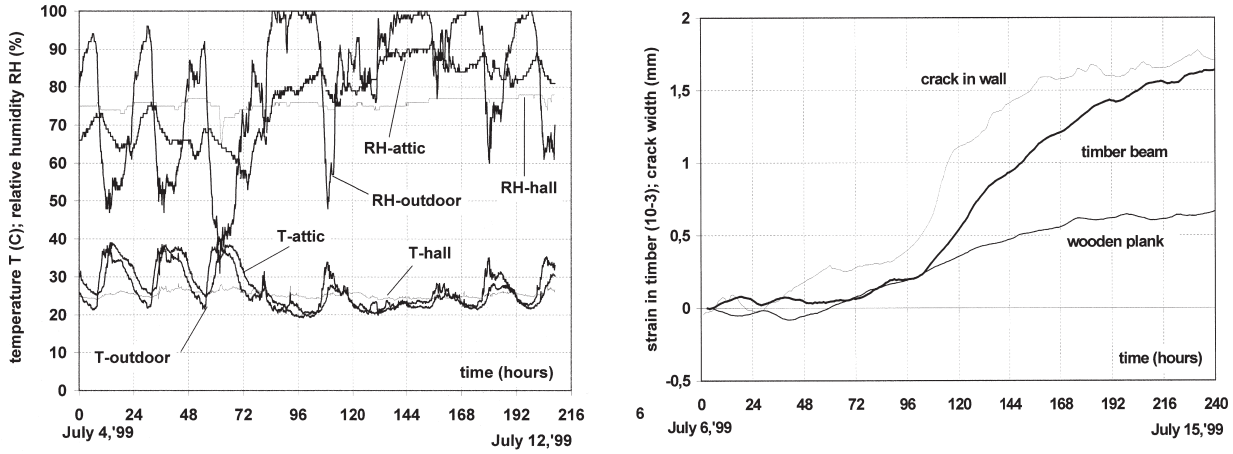


Figure 7.
Measured outdoor and indoor temperature and relative humidity (left), and timber expansion and crack propagation (right), in the attic of the Knight's Hall.

ted ceiling plaster, although part of this deformation is compensated by the reeds. The data gained from future long-term measurements are expected to provide the information needed for assessment of the effect of timber expansion on the decay of painted plaster.

2. Wall tempering in Brezice Castle

2.1. Simulation of wall tempering in auditorium

A low temperature wall heating system was found to be a promising solution to the cold wall surface condensation risk from occasional events, to assure suitable thermal conditions in cold seasons for the visitors, as well as to establish stable temperature and relative humidity conditions in exhibition rooms. The anticipated advantages of a simple wall heating system are low investment cost, simple installation, low operating cost due to energy efficiency, and stable indoor climate conditions due to heat storage in the massive castle walls. The performance of wall tempering was demonstrated in a tower-room auditorium of Brezice Castle.

A wall tempering system was installed into a round room in the southeast tower (Tower 1, Figures 1, 8) in order to study the expected benefits, possible side effects and to provide some basic design guidelines. The diameter of the round room is 8 m, the height is 3.7 m, and the thickness of the mixed stone and brick wall is from 1.8 m up to 2.5 m. The tower room is located on the first floor, above the unheated cellar and below the unheated exhibition rooms on the second floor. The floor and the ceiling of the round room are made of a wooden structure containing a pebble bed. There are three windows (1.2 m x 1.7 m) with double-glazing.

2.1.1. Simulation of heating at the wall floor joint

To determine the most appropriate position for the heating pipes in the wall, the temperature distribution was simulated. The simulation was based on two-dimensional steady-state heat transfer in solid materials using the finite element method (NISA), with convective heat transfer boundary conditions. The boundary conditions for the comparative analysis of the impact of various pipes positions were defined according to winter temperature conditions: outer air tempe-

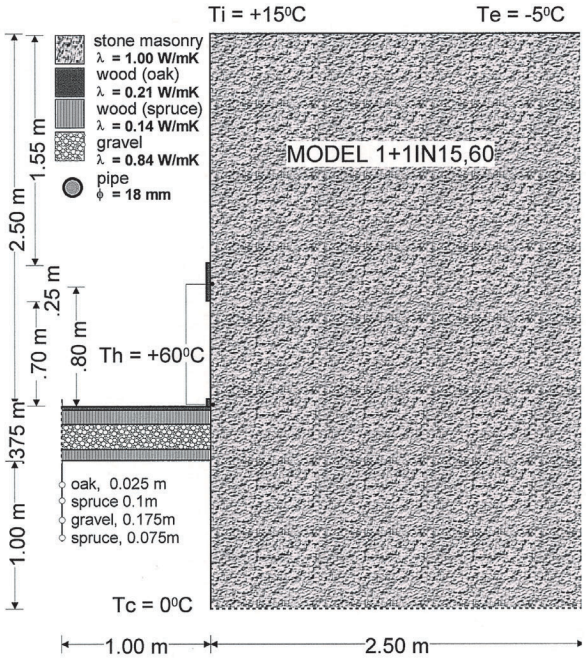
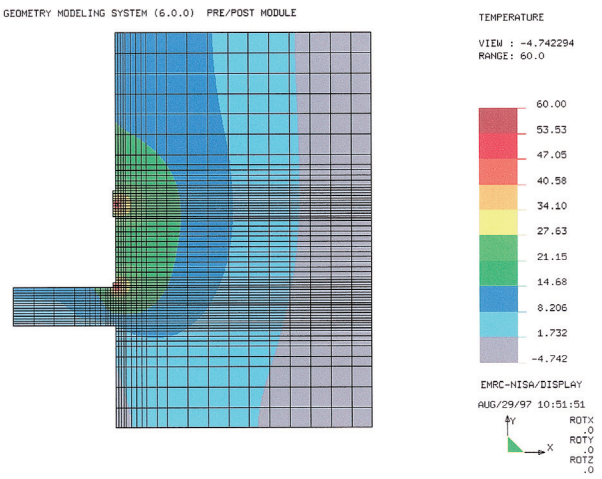


Figure 8.
Wall–floor joint cross-section in the round room in Tower 1, with geometrical data, material parameters, and boundary conditions.

Figure 9a.
Temperature distribution, case 1+1IN.



rature -5°C, cellar 0°C, target indoor air temperature 15°C. The temperature of the heating fluid in the pipe was 60^{0}C, following the heating curves for the heating system already installed for the offices in the castle. The cross-section of the lower part of the wall-floor joint was modelled and the temperature field in the solid building substance was simulated. The cross-section of the lower part of the wall-floor joint is shown in the Figure 8, together with thermodynamic data for the materials.

2.1.2. Results and discussion

The basic simple solution is installation of the heating source, i.e. two pipes in the lower wall – floor corner (2IN), (see Figure 9b). The system would be appropriate if the excessive moisture in the walls was to be removed, which is not the case in the room on the first floor. The more important target in this case was to raise the wall inner surface temperature and thus to increase the radiation heat transfer to humans from the indoor environment. The higher the temperature of the surrounding surfaces, the lower the indoor air temperature should be for a desired level of thermal comfort. Thermal comfort in the living space can be achieved with lower energy consumption if the surrounding walls are warm. Figure 9b shows the majority of the heat is stored in the wall behind the floor structure, so it cannot significantly contribute to the radiation heat transfer benefits.

Figure 9b.
Temperature distribution, case 2IN.

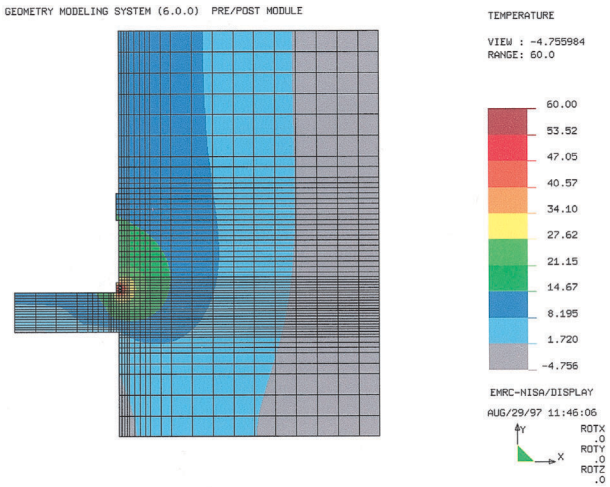
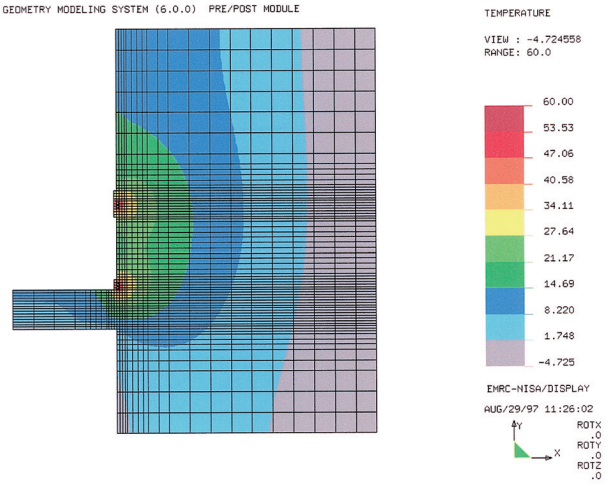


Figure 9c.
Temperature distribution, case 2+2IN.



Therefore, two more efficient pipe distributions were analyzed: two pipes (1+1IN) separated by 80 cm (one in the lower wall – floor corner and the other behind a decorative wooden board) (see Figure 9a) as well as four pipes (2+2IN) (see Figure 9c) distributed as in the previous case.

As shown in Figures 9a and 9c the heat storage volume is extended up to 1.5 m above the floor with a noticeable temperature rise in approximately 1/3 of the wall thickness. Doubling the number of pipes at the same geometrical position does not double the surface temperature rise. The heat is stored behind the wall inner surface (see Figure 9c). The case that was implemented (Figure 9a) showed only a minimal reduction in surface temperature compared to the other case (Figure 9c), which would have required a more complex (expensive) installation.

The surface temperatures in the lower part of the surrounding walls are compared in Figure 10 for various possible boundary conditions and pipes positions (see Figure 11). The goal of the preliminary analysis was to achieve the highest possible surface temperature rise in the area up to 1.8 m of wall height

(adult person) and wall surface temperature as uniform as possible due to the simple wall tempering installation.

Table 1. Surface temperature of heated wall – average temperature in the height up to 1.80 m.

Geometrical position of heating pipes	Indoor air temperature and average temperature of heating water	Wall surface temperature, average up to 1.80 m wall height
1+1 INSIDE	15 °C, 60 °C	19.7 °C
1+1 INSIDE	15 °C, 80 °C	22.3 °C
1+1 INSIDE	15 °C, 40 °C	17.2 °C
2 INSIDE	15 °C, 60 °C	16.9 °C
2+2 INSIDE	15 °C, 60 °C	21.2 °C

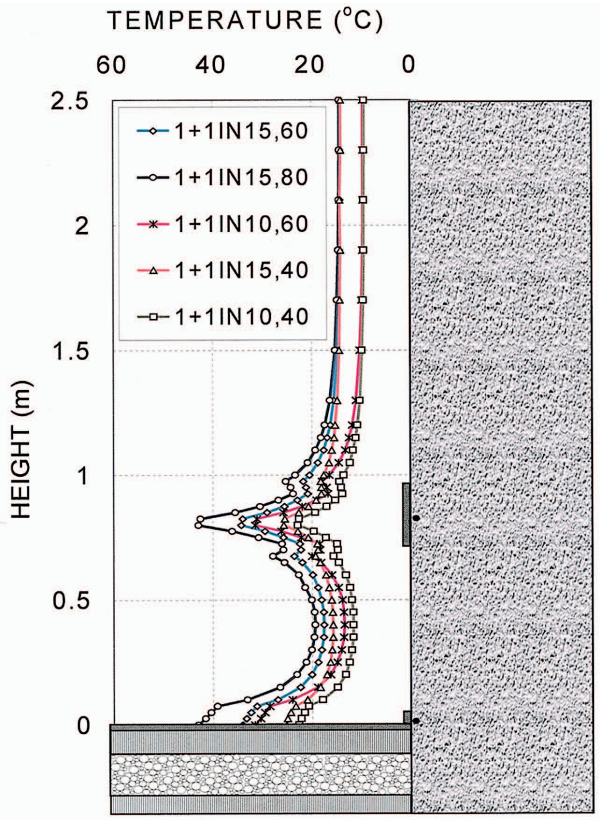


Figure 10.
Simulated surface temperature distribution for the case 1+1IN, considering different heating pipe temperatures and indoor air target temperatures

Figure 11.
Comparison of simulated wall surface temperatures for different distributions of pipes.

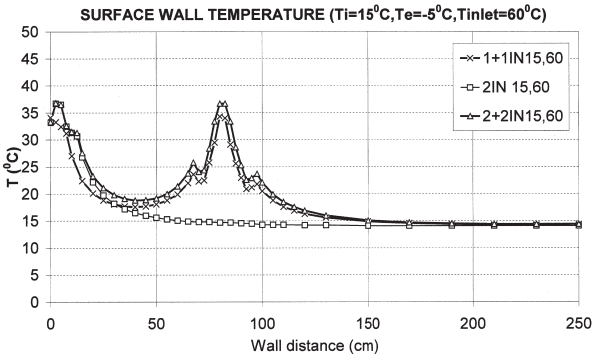


Figure 12.
Installation of wall tempering in the Auditorium in Brezice Castle. Photo Roko Žarnić, Ljubljana.

As the starting point for the test Tempering installation (Figure 12) the case with two pipes installed in the wall at two levels (see Figure 9a) was selected. The target indoor air temperature of 15°C with average temperature of the bottom part of surrounding surface 19.7°C leads to an effective indoor temperature around 17°C, convenient for exhibition areas. In case of occasional events in the room internal heat sources from occupants or additional heating device used only for a short time period can meet thermal comfort requirements.

2.1.3. Simulation of the temperature field in the wall tempered tower

The simulation of the temperature profiles in the walls and in the indoor spaces of the tower was based on assuming radial symmetry of the auditorium and neglecting the connections between the tower and the two connected wings of the castle. In the vertical cross-section, the unheated cellar, wall-tempered room in the first floor and unheated exhibition room in the second floor were modelled. The attic was assumed, as an unheated space, to have a temperature equal to the outer air, mainly due to the high air exchange rate and low air-tightness of the slanted roof. Steady-state conditions were assumed for the simulation due to the size limitation of the calculation model. Due to the cloudy late winter weather conditions during the period simulated, the massive brick-stone structure of the tower wall (average thickness of 2 m), and only three small windows that further reduce the already low impact of temperature oscillation due to winter solar radiation, the assumed steady-state conditions are very close to the actual situation. Additional confirmation of the steady-state assumption can be observed in Figure 13, where the measured indoor temperatures show very low daily oscillation in the wall-tempered tower as well as in the reference unheated tower. The boundary conditions used for simulation correspond to the measured temperatures on 25 March 1998: outdoor air temperature 4.2°C, ground temperature 10°C, temperature of water in pipes 40°C, upper heating pipe 80 cm from floor.

A far more important factor for the accuracy of the simulation, compared to the boundary conditions discussed above, is the indoor air exchange rate. It is well known that ventilation heat losses in an uninsulated brick building represent up to one third of the total heat losses. In contemporary well-insulated buildings with airtight windows, the magnitude of ventilation heat losses is the same as for transmission heat losses. The better the insulation of the envelope, the bigger the impact of ventilation losses and vice versa. In Brezice Castle the air exchange rate has not yet been monitored. Taking into account the average air tightness for new windows with a silicon seal and the measured air exchange rate for similar heritage buildings, an air exchange rate of 0.9 was assumed for the simulation.

2.1.4. Results and discussion

For the simulation, the PHYSIBEL – KOBRU86 + RADCON [9] advanced simulation tool was used, which allows not only heat transfer in solid materials but also the exchange of radiant heat between the inner surfaces of the room with uniform equivalent air temperature. Simulation of the temperature field in the walls and of the indoor air temperature in rooms for the whole of Tower 1 is presented in the Figure 13. The simulated inner surface temperatures correspond very well to the measured temperatures (Figure 17) in the vertical profile. Simulated surface temperatures were in general lower than the measured values. Simulated indoor air temperatures are very sensitive to the indoor air exchange rate, which has already been indicated to be a critical datum. In the simulated case, the calculated indoor air temperature was 16°C. This temperature is much lower than that measured, 19,6°C, so the assumed air exchange rate may be too high. Most likely, however, there is an additional reason for the difference between the simulated and measured indoor air temperatures. In spite of relatively firm arguments for a steady-state simulation, in reality there are inevitably moderate daily temperature oscillation and passive solar gain. These dynamic processes

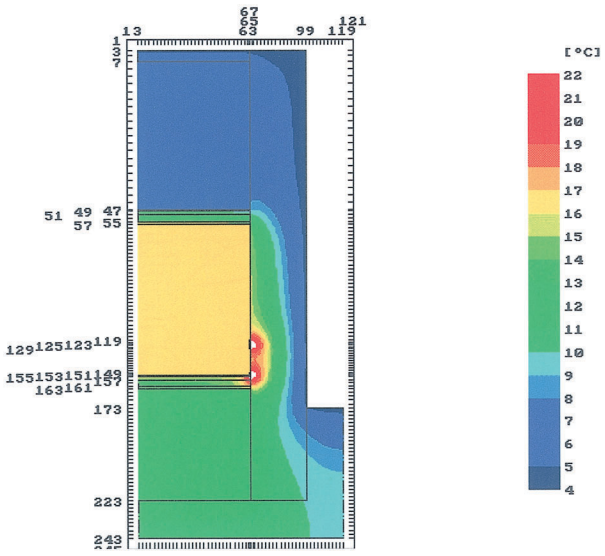


Figure 13.
Simulation of the temperature field in Tower 1. Boundary conditions: T outdoor air 4.2°C, ground temperature 10°C, temperature of water in pipes 40°C, distance between pipes 80 cm, simulated using PHYSIBEL – RADCON [9].

were excluded in the above case, although one could integrate them into the model in a simplified way if measured climate data were available. Thus, a basic requirement for future simulations is reliable data for the air exchange rate.

2.2. *Monitoring of operation*

In the auditorium test room in Tower 1 of Brezice Castle, the wall tempering system was installed in late 1997. Plastic-jacketed 18-mm diameter copper pipes were used in two loops of length 35 m each. The inlet pipe is in the lower, wall-corner, position; the outlet pipe is at a height of 80 cm above the floor. The pipes were installed just below the plaster surface and covered with wooden boards for aesthetic reasons only. Heat flux from the pipe is 50 W/m at a heating fluid temperature of 60°C. For occasional use, two radiators are installed and can be dismounted when suitable thermal performance of the wall tempering system has been demonstrated. At this stage of the operation, the heating loops are connected to the rest of the central heating system (90/70°C). Central regulation of the heating system dependent on constant indoor air temperature and outdoor temperature is implemented. The energy use is monitored as well as the inlet and outlet water temperature and heating fluid flow.

Microclimate parameters were monitored (Figures 14, 15, 16) to evaluate the performance of the wall tempering system. The test run of the heating system in the round room (1) started in the middle of November 1997 (Figure 14) and stopped on 26 November due to completion of the work of restoring the wall plaster. The plaster drying process was finished on 28 November. After that, the room was heated only by the heating pipes; the radiators were closed. Outside air temperature in the first half of December was lower than in the second. Thus, the inlet water temperature, which is controlled by central regulation, was higher (above 60°C) in the first half and lower (58°C) in the second half of December. As the outdoor temperature rose moderately, the indoor air temperature sank from 20°C to 15°C. Corresponding drops and rises in relative humidity show the opportunity for establishing appropriate stable microclimatic conditions for exhibition areas.

Microclimatic data for the reference room (Figure 15) showed a too high level of relative humidity for the arms collection (up to 80%), which correlates with a seasonal temperature decrease of the unheated room with high heat storage capacity. Wall tempering is a convenient technology for improving microclimatic conditions without visible hardware. Low temperature wall heating reduces indoor air temperature and energy consumption.

Figure 14.
Temperature and relative humidity in the round room in the Tower 1 – auditorium, heated by wall tempering. Diagrams show outdoor (1) and indoor (2) relative humidity, outdoor (4) and indoor (3) temperature.

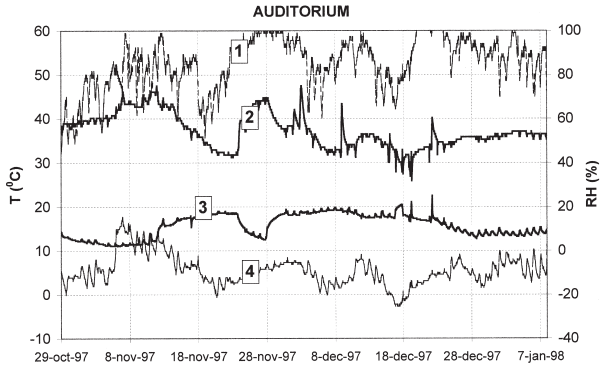
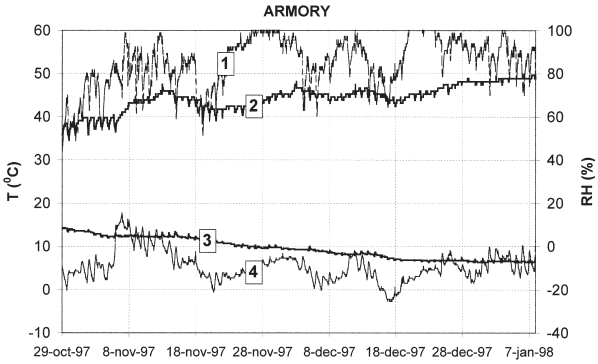


Figure 15.
Temperature and relative humidity in the unheated reference room, the armoury exhibition room in Tower 2. Diagrams show outdoor (1) and indoor (2) relative humidity, outdoor (4) and indoor (3) temperature.



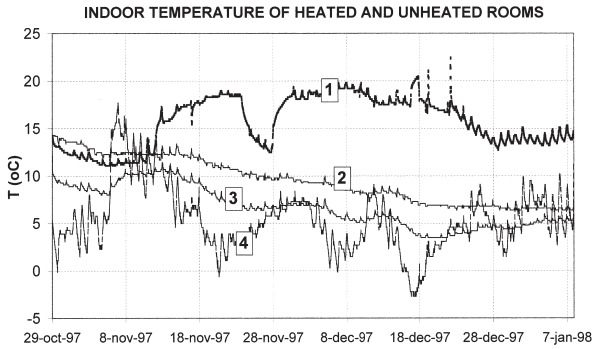


Figure 16.
Temperature of the round room (1) heated by wall tempering, reference unheated room (2) and unheated Knight's Hall (3) compared to outer air temperature (4).

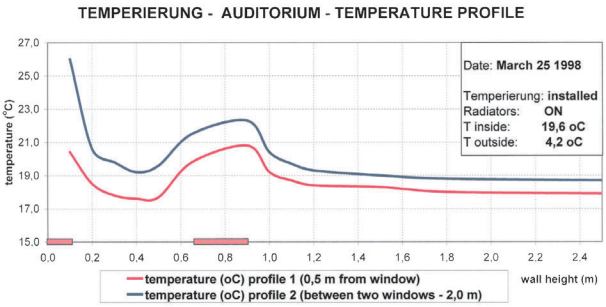


Figure 17.
Vertical temperature profile – measured values, wall tempering (1+1 pipe) in the Auditorium of Brezice Castle, March 25, 1998.

Temperature variations in Rooms 1 and 2 were compared with those in the Knight's Hall (Figure 16). Temperature oscillation and generally lower temperatures are observed in the hall, due to relatively larger windows, less compact form, and less wall heat storage capacity.

In Brezice Castle, wall tempering is being considered in the arms exhibition room, to reduce relative humidity, and in the Knight's Hall, to prevent surface condensation risk and its impact on fresco deterioration. In both cases, it would enable use of the castle rooms in colder periods for exhibition purposes. An additional heat source can meet human thermal comfort requirements rapidly and with little additional energy.

3. Simulation of thermal performance of wall-tempered buildings

Engineering design of wall tempering systems in massive buildings is based on slightly modified methods for space heating. Basically, the goal of these methods is the determination of energy demand and heating sources. However, when planning the wall tempering system for detailed needs of heritage buildings, our task is more specific and focused also on solving local heat transfer and building physics problems with a final goal of predicting microclimatic conditions for specific uses of heritage buildings with regard to people and exhibited objects.

The first goal is the determination/planning of the inner surface temperature (mean radiant temperature) of the heated walls. It contributes to the thermal comfort level and, together with the indoor air temperature, determines the effective temperature felt by people standing in the space. For example, in large halls (churches, castles) the idea is to provide thermal comfort for the users by

combining moderate indoor air temperature with warm lower portions of the walls, about the height of a person.

The second goal that can be met by detailed analysis of the temperature field within the building element is mitigation of the cold wall effect and the risk of surface condensation. This risk is much more serious when the massive building is occasionally used, intermittently heated and where the users produce additional moisture. This happens most usually in churches during the services.

Usually, there are two families of simulation tools available. One focuses heat transfer in the solid building elements in detail, the other focuses the thermal response of a building as a whole. The goal of the first tool is detailed two or three-dimensional analysis of the temperature field in a part of the building substance. The goal of the second, more general tool is determination of the resulting indoor air temperature and/or energy use in the building. The advanced PHYSIBEL simulation tool [9] enables combined analysis of both problems: determination of the temperatures in the building substance, produced by the heating pipe heat source, and determination of the resulting indoor air temperature and energy demand.

3.1. Salsta Castle

At Salsta Castle near Stockholm, Swedish, Austrian, and Slovenian partners are researching wall tempering as part of the EUREKA Project 1383 PREVENT and its follow-up activities. The plans for the installation were prepared by Technisches Buero Kaeferhaus, Austria [5], the monitoring system for determining heating performance is operated by Haftcourt Limited, Care of Cultural Property, Sweden [10], and the simulation of thermal performance was done by the Civil Engineering Institute ZRMK, Slovenia [11].

The goal of our work was to prove the suitability of the PHYSIBEL simulation software for predicting the thermal response of a wall-tempered building. In order to verify the simulation results we used measurements from Salsta Castle [5, 10]. The medieval castle (1675) is composed of a main building and two identical pavilions (Figure 18). The two-story pavilions have a gross ground floor area of 50 m^2. They are built of 55 cm thick brick walls, with an unheated loft below the pitched roof and 10 cm of mineral wool for loft insulation. The foundation soil is sand. The first story is 3 m high and the second story 2.8 m. Useful net floor area per story is 40 m^2. The double-glazed windows are equally distributed on all four facades. One of the pavilions is heated by a radiator system, the other, whose thermal response was simulated, is heated by a wall tempering system.

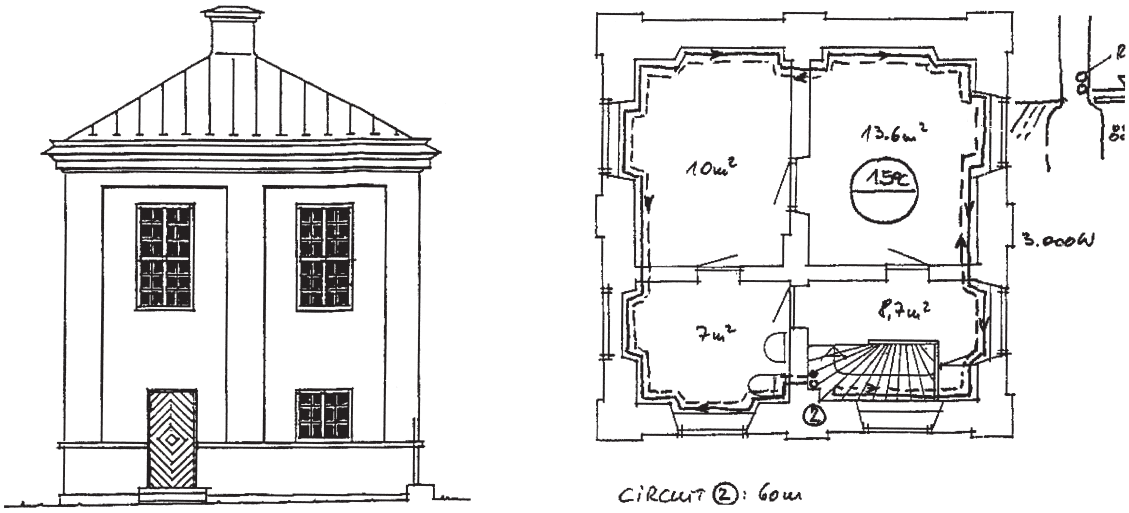


Figure 18.
Salsta East Pavilion [10], with plan of wall tempering [5].

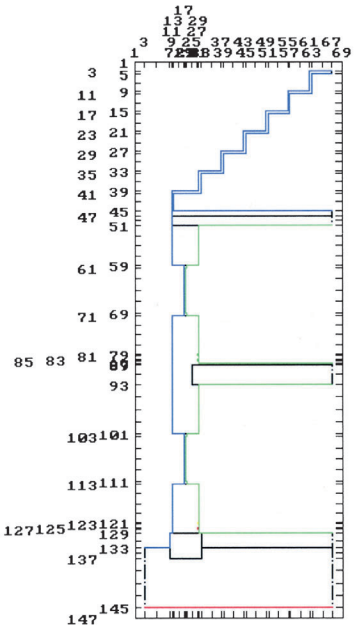
On both stories, two 18-mm diameter copper pipes were installed in the walls just under the plaster, one 10 cm above the other. Electric boiler power is 6 kW. The average heating fluid inlet temperature was 50°C and the average return temperature 30°C. Air, pipe, and wall temperature; RH and air exchange rate were monitored during the heating season of 1998/99. Between 9 and 13 March 1999, outdoor air temperature was –4.5 °C to -5°C, upper story air temperature was 8.5°C to 10°C, and lower story air temperature was 11.5°C to 13.5°C. The air exchange rate during this time, measured by the tracer gas method, was 0.9.

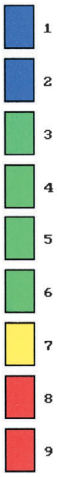
3.2. *Modelling the Salsta Pavilion*

When analysing the influence of wall tempering from a building physics perspective, the first step is modelling the real building for the purpose of temperature field simulation. The architecture of historic buildings is often complicated and thus subject to many simplifications due to computational limitations. In the first, rough approximation, wall tempering was simulated by a two-dimensional model of the building. In the cases below, steady-state conditions are assumed: outdoor air temperature –5°C, earth temperature 10°C, lower pipe temperature 30°C, and upper pipe temperature 50°C. The indoor air temperature and the temperature in the unheated attic were simulated using PHYSIBEL software (9). The PHYSIBEL simulation is based on a capacitance-resistance thermal network model.

3.2.1. Boundary conditions 2-D model

Figure 19.
2-D model and boundary conditions.





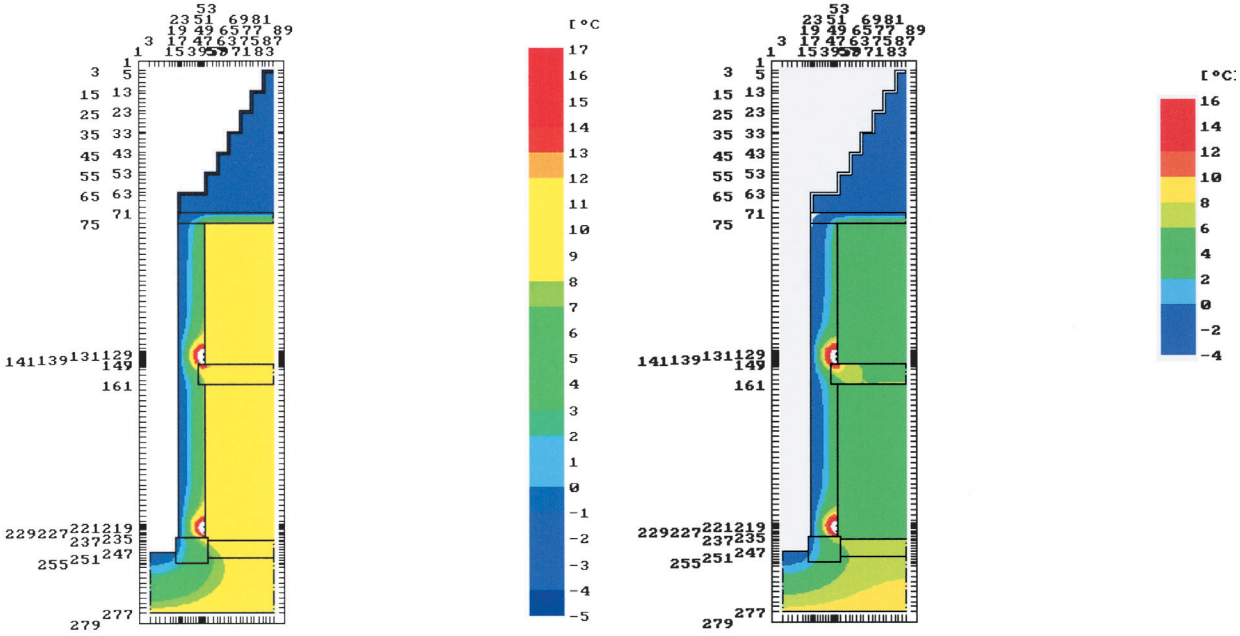
Boundary conditions (according to PHSYBEL):

1	bc_simpl	outside	-5°C
2	bc_free	*attic temp. - calculated*	
3	bc_free	*upper floor temp. - calculated*	
4	bc_free	*ground floor temp. - calculated*	
5	bc_simpl	pipe22	50°C
6	bc_simpl	pipe21	30°C
7	bc_simpl	pipe12	50°C
8	bc_simpl	pipe11	30°C
9	bc_simpl	floor, earth	10°C

3.2.2. Simulation results: 2-D model

The barrier we had to face with the available software was a limitation of the number of nodes in the simulation model due to limited computational memory. On the other hand, the simulation of wall-tempered buildings involves modeling elements with dimensions of different order of magnitude (i.e. pipe vs. wall and building). Inadequate density of the mesh and nodes may cause inaccurate results and numerical problems. Thus the modeling started with a very rough 2-D model, without windows:

Case 1 – without windows, no air exchange (Figure 20a) - the simulated indoor air temperature was too low compared to measured values, the model was obviously too far from reality, additional losses through windows and ventilation losses were not taken into account.
Case 2 – without windows, air exchange rate 0.9 (Figure 20b) – the simulated temperatures were again too low; because additional heat losses due to ventilation were introduced, the indoor air temperature dropped about 4°C compared to Case 1.



a) T in pipes: 30°C in lower pipes and 50°C in upper pipes; no air exchange; 1st-floor: T_{indoor} = 9.91°C, 2nd-floor: T_{indoor} = 9.23°C, T_{attic} = -3.95°C

b) T in pipes: 30°C in lower pipes and 50°C in upper pipes; air exchange rate 0.9/h; 1st-floor: T_{indoor} = 5.78°C, 2nd-floor: T_{indoor} = 4.90°C, T_{attic} = -4.14°C

Figure 20:
Simulation results – indoor air temperatures, obtained from two-dimensional model of the wall-tempered Salsta Pavillion, showing effect of air exchange rate.

Compared to the real building, the model should include more pipes and/or heating sources per specific volume to correspond better to the actual situation. In reality, this square shaped building has far less (nearly half less) volume per unit of wall perimeter (i.e. more heated wall per unit volume) than in the case of a long rectangular shaped building. The volume to perimeter ratio in the case of Salsta Pavilion is lower compared to a long rectangular building, for which 2-D modeling is a more realistic option. Additionally, due to corners and niches, the actual length of the heating pipe loop is about 20% longer than the inner perimeter. Finally, the vertical piping connection between the lower and the upper pipe loops has been neglected in the first step of the modeling.

The deficiencies of the basic 2-D model (Figure 20) were compensated for during the modeling of Case 3 (Figure 21) where the windows and a third pipe, although it does not exist in reality, were included:

Case 3 – windows, air exchange, more pipes per simulated volume (Figure 21) – the temperatures determined by the improved model were closer to the measured values, but still somewhat low.

The decision for initial 2-D modelling of Salsta Pavilion imposed an inappropriate assumption of a symmetrical longitudinal building. In the 2-D models presented partitioning walls and some parts of pipes are neglected and/or positioned approximately. To enable more accurate simulation of thermal response, development of a three-dimensional simulation model was found to be necessary.

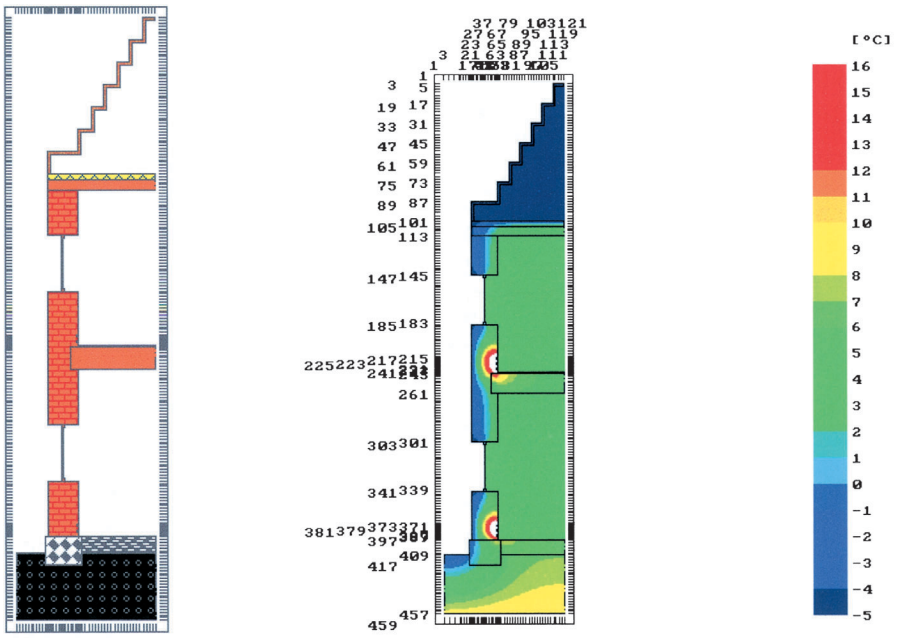


Figure 21.
2-D model of Salsta pavilion, improved with windows; air exchange rate 0.9.

Table 2. Simulation results – improved 2D model, with 2+1 pipes.

Nr. of nodes	$T_{air\text{-}ground\ floor}$ (°C)	$T_{air\text{-}upper\ floor}$ (°C)	$T_{air\text{-}attic}$ (°C)	Calculation of convection
N = 1470	6,61	6,11	-4,74	BASIC
N = 3083	5,45	6,36	-4,73	BASIC
N = 4687	5,84	5,73	-4,74	BASIC
N = 5636	5,69	5,56	-4,75	BASIC
N = 5636*	5,89	5,83	-4,73	IMPROVED*

3.2.3. Simulation results 3-D model

The goal of the 3-D model was to improve the geometrical characteristics of the simulation model comparing to the 2-D model. In Figure 22, the ground floor of the simulated building is presented where double symmetry is taken into account. Internal walls, windows, and heat losses due to air exchange rate are considered. The inner air temperature and the temperature field in the building

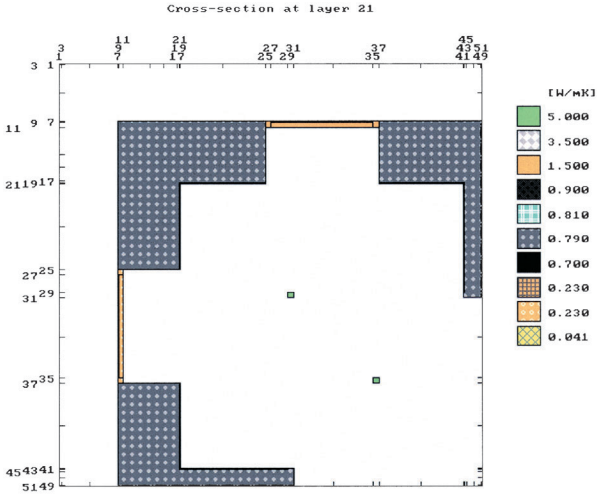


Figure 22
Salsta Pavilion, 3-D model, ground floor, double symmetry.

envelope were simulated. In order to finally show the desired influence of the warm surrounding walls, the effective temperature in certain nodes of the wall was simulated. In the nodes of consideration, the black globe thermometer characteristics were modeled, so that the simulated temperatures in those nodes represent the effective temperature, resulting from the indoor air temperature and radiation due to the mean radiant temperature of the surrounding surfaces. The nodes were positioned on the diagonal of the ground floor and upper floor, at heights of 0.85 m and 1.8 m.

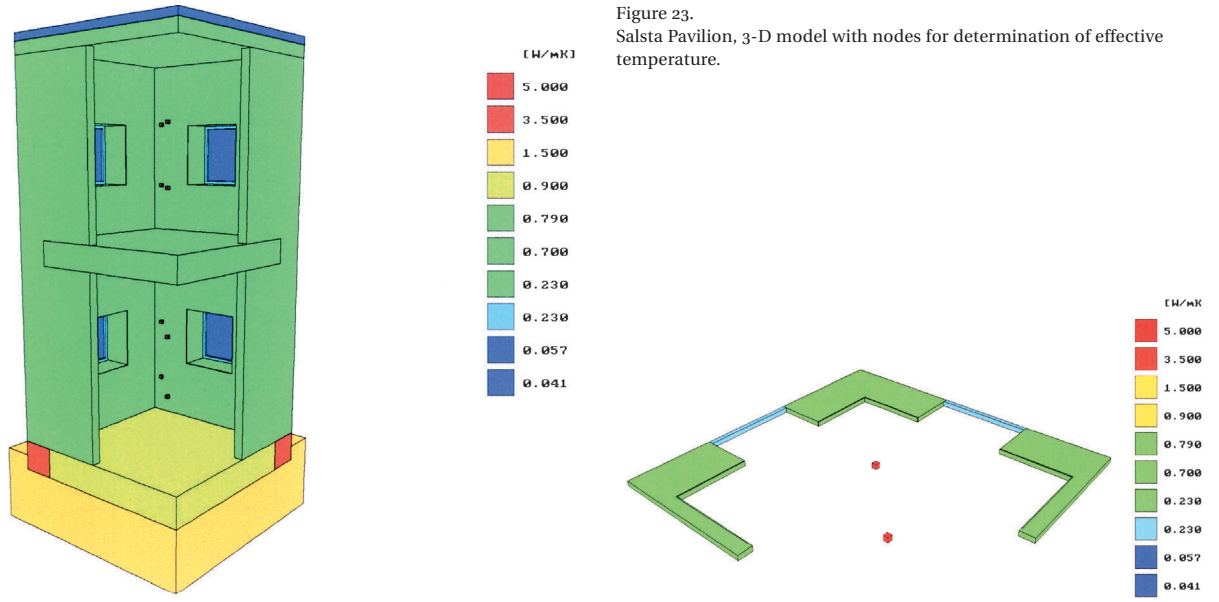


Figure 23.
Salsta Pavilion, 3-D model with nodes for determination of effective temperature.

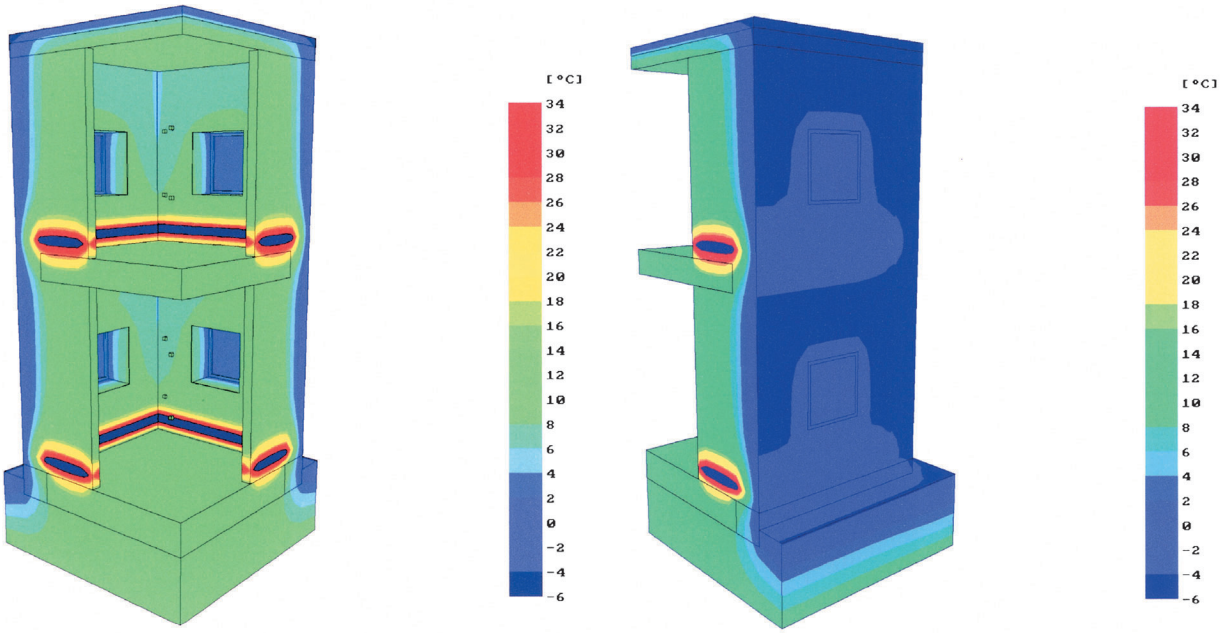


Figure 24.
Simulation of thermal response of the Salsta Pavilion. Dark areas in the ground floor and upper floor represent warmer areas due to the wall tempering pipes at 50°C and/or 30°C; air exchange rate 0.9.

Table 3. Simulation results of 3-D improved model of Salsta Pavilion.

	$T_{air\text{-}ground\ floor}$ (°C)	$Q_{c\ ground\ floor}$ (W)	$T_{air–upper\ floor}$ (°C)	$Q_{c\ upper\ floor}$ (W)
1.iteration	13.9	0	13.5	0
2.iteration	11.4	-115.7	10.9	-105.7
3.iteration	11.8	-100.4	11.3	-90.9
4.iteration	11.8	-100.1	11.2	-93.2

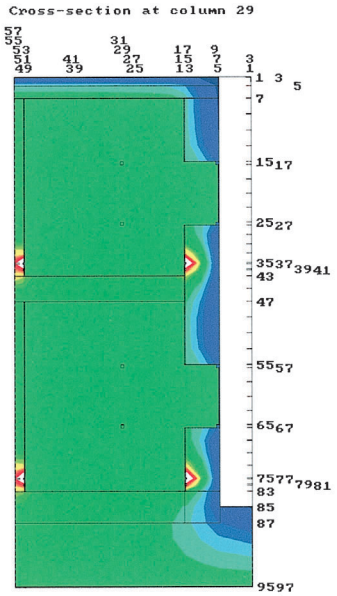


Figure 25.
Vertical cross-section of wall-tempered pavilion; temperature field with position of nodes for simulation of effective temperature.

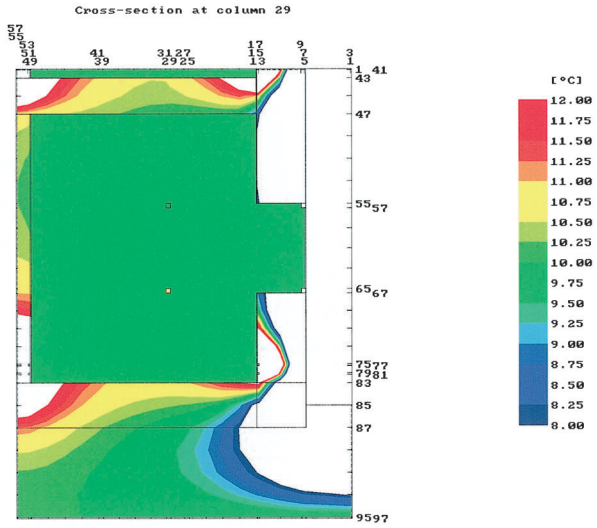


Figure 26.
Detailed presentation of temperature field on the lower floor and influence of warmer areas of surrounding walls on the effective temperature of two nodes.

Table 4. Salsta Pavilion, March 9–13, 1999: the results of PHYSIBEL steady state simulation of 3D wall heated model at air exchange rate of 0.9

Indoor air temperature and effective temperatures in selected nodes	°C
$T_{air\ –\ ground\ floor}$- indoor air	10.0
$T_{g1\ effective}$- ground floor, at 80 cm, closer to corner	10.8
$T_{g1A\ effective}$- ground floor, at 80 cm, middle of room	10.8
$T_{g2\ effective}$- ground floor, at 185 cm, closer to corner	9.9
$T_{g2A\ effective}$- ground floor, at 185 cm, middle of room	10.4
$T_{air\text{-}upper\ floor}$ – indoor air	9.8
$T_{u1\ effective}$- upper floor, at 80 cm, closer to corner	10.9
$T_{u1A\ effective}$- upper floor, at 80 cm, middle of room	10.7
$T_{u2\ effective}$- upper floor, at 185 cm, closer to corner	9.7
$T_{u2A\ effective}$- upper floor, at 185 cm, middle of room	10.2

Simulation results with the 3-D model (Table 3) showed good accuracy compared to the measured temperatures in Salsta Castle. The difference between the calculated and measured indoor air temperatures on the ground floor was below 1°C; the difference in the upper floor was around 1°C. The results are validated to be optimal within the accuracy of the available data on the building geometry, material characteristics, thermal characteristics of the wall tempering system and the assumption of steady-state conditions.

The most important information is the effective temperature in the selected nodes that can be felt by a user of the room. The effective temperature is a combination of the indoor air temperature and the mean radiant temperature. Simulation showed that, due to the warm walls, the effective temperature is 1°C – 2°C above the indoor air temperature, which was calculated (and measured) to be between 10°C and 12°C.

3.3. Discussion

With the simulations above, the suitability of the commercial building physics software PHYSIBEL [9] for the simulation of the thermal performance of wall tempered buildings was shown and verified using the measured performance characteristics of Salsta Pavilion. It was shown that reliable temperature fields and needed heating powers could be simulated. The possibility for simulating the effective temperatures felt by visitors in the tempered building due to radiant heat flows from the warm walls, allows optimization of the positioning of the pipes and temperature levels during the planning process. Thus, the desired thermal comfort parameters can be analyzed. Consequently, their influence on the human perception of thermal comfort and the efficient use of energy can be taken into account.

4. Conclusions and further research

Following a long period of monitoring indoor climate parameters using ordinary analog instruments and implementing conservative methods and technologies for improvement of microclimate, in recent years a more systematic approach was started in Slovenia. Permanent indoor climate monitoring was installed in reference heritage buildings, such as a castle, an unheated church monument, and some churches heated by alternative heating systems.

The measurement of indoor climate in these heritage buildings can provide valuable sources of data needed for optimal use and management of this type of cultural monument. The major dilemma is how much can cultural monuments and their interiors be exposed to visitors. Knowledge of the response of monu-

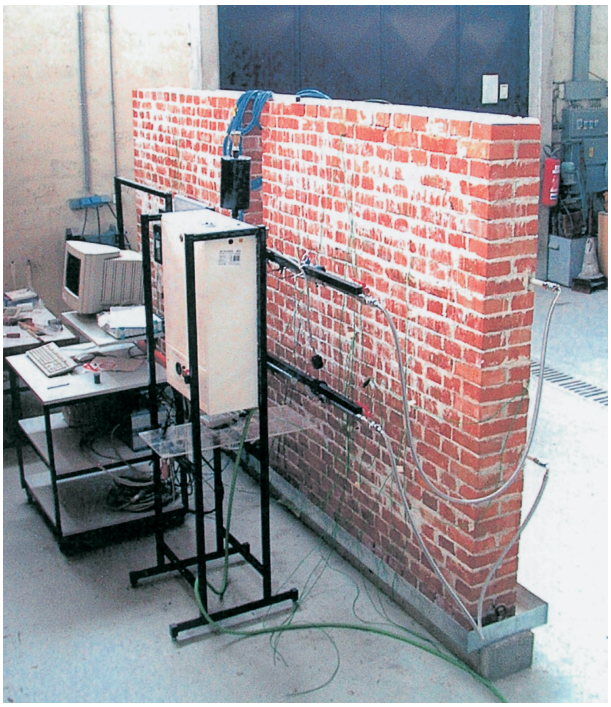


Figure 27.
Laboratory testing of wall tempering performance. Photo Marjana Šijanec-Zavrl, Ljublijana.

ment substance and exhibited objects to visitors' impact on indoor climate conditions is the essential starting point for making decisions.

One of the major problems is condensation on wall surfaces and on exposed objects. This influence can be moderated in severity by appropriate organisation of planned events and by investment in systems that lower the condensation risk. One of the available long-term solutions that can enable using of castle halls for larger events is introduction of controlled low temperature heating systems. These can regulate heat accumulation in massive walls during the whole year to avoid surface conditions that can lead to condensation. Wall tempering is a promising technology for energy efficient retrofit of massive buildings, especially in the case of lower thermal requirements. Warmer walls, reduction of relative humidity, and stable indoor climate conditions are desired for exhibition areas. On the other hand, low temperature radiation surfaces achieved by wall heating contribute to energy and cost savings in occupied rooms.

It was shown that the simulation of thermal performance can reliably predict temperature fields and needed heating power. The possibility for simulation of effective temperatures, felt by the visitors in the tempered building due to radiant heat flows from the warm walls, allows optimisation of the positioning of the pipes and temperature levels during the planning process. Thus, as a final goal, thermal comfort parameters can be analysed and consequently their influence on the human perception of thermal comfort and the efficient use of energy can be taken into account.

To show the ability of wall heating to prevention moisture from rising in massive brick walls, a laboratory experiment was prepared (Figure 27) where the drying process of the heated massive brick wall is monitored and compared with the energy used for drying the wall. The potential for using solar energy for this process will also be evaluated. To prove the energy saving potential, the consequent reduction of the U value will be analysed as well. In addition, the influence of the warming and drying process on contractions and cracks in different lime plasters, prepared according to old recipes suitable for cultural heritage buildings, will be analysed. Future work will focus on laboratory testing of the wall drying process accelerated by a wall tempering heating source. The potential for use of wall tempering as a non-destructive technique for temporary mitigation of capillary rise in cases of progressive deterioration on valuable fresco painting will be investigated in future.

Acknowledgements:

The work presented in this paper has been prepared within the framework of the EUREKA project 1383 PREVENT and national research projects, financed by the Ministry of Science and Technology of Slovenia, by the Civil Engineering Institute ZRMK internal research funds LARA and in co-operation with diploma theses at the University of Ljubljana, Faculty of Civil Engineering and Geodesy.

5. References

1. D. Camuffo, *Microclimate for Cultural Heritage, Developments in Atmospheric Science 23*, ISBN 0-444-82925-3, Elsevier, p. 187, 1998.
2. H. Großeschmidt, *Stabilisierung des Raumklimas als Grundlage sachgerechter Bewahrung oder: Das temperierte Haus, sanierte Architektur und Großvitrine*, Das Museumsdepot, Weltkunst Verlag Muenchen, pp. 49-79, ISBN 3-921669-27-8, Weltkunst Verlag GmbH, Muenchen, 1998.
3. EUREKA, EU 1383 PREVENT, 1995-97, partners from Austria, Sweden, Germany and Slovenia (CEI ZRMK), Set of reports.
4. M. Malovrh, M. Zupan, M. Praznik, *New Approach to Heating of Cultural Heritage Buildings,* Proceedings of OPET Workshop Wall Tempering in Historic Public Buildings, Ljubljana, Dec. 7, 2000, Eds.: M. Šijanec-Zavrl, K. Grepmeier, OPET Slovenia (CEI ZRMK), OPET Bavaria-Austria (ZREU), pp. 7, 2000.

5. J. Käferhaus, *Smart Building Services as a Way to Simplify Systems in Order to Improve Damage Prevention Especially in Historic Buildings*, Proceedings of OPET Workshop Wall Tempering in Historic Public Buildings, Ljubljana, Dec. 7, 2000, Eds.: M. Šijanec-Zavrl, K. Grepmeier, OPET Slovenia (CEI ZRMK), OPET Bavaria-Austria (ZREU), pp. 12, 2000.
6. R. Žarnić, M. Šijanec-Zavrl, *Performance Based Approach to Heritage Protection*, Proc. Of. International Conference on Conservation, Krakow 2000, 12 pages, in press, 2001.
7. M. Šijanec-Zavrl, R. Žarnić, I. Nemec, *Monitoring Indoor Climate in Medieval Castle*, PLEA 98, Eds.: E. Maldonado, S. Yannas. *Environmentally friendly cities*. London: James & James, pp. 307-310, 1998.
8. M. Šijanec-Zavrl, M. Malovrh, S. Jordan, *Low Temperature Wall Heating System in a Room of Medieval Castle*, PLEA 98, Eds.: E. Maldonado, S. Yannas. Environmentally friendly cities. London: James & James, pp. 311-314, 1998.
9. PHYSIBEL, *Users Manual*, Maldegem, Belgium, 1999.
10. J. Holmberg, *"Salsta Slott", EUREKA 1383 PREVENT, Jamforelse av energisystem Statens Fastighetsverk*, Uppsala Resultat av matningar 1998/1999.
11. M. Šijanec-Zavrl, R. Žarnić, *Analysis of Thermal Response of Wall Tempered Building, Case Study: Salsta Pavilion*, Proceedings of OPET Workshop Wall Tempering in Historic Public Buildings, Ljubljana, Dec. 7, 2000, Eds.: M. Šijanec-Zavrl, K. Grepmeier, OPET Slovenia (CEI ZRMK), OPET Bavaria-Austria (ZREU), pp. 13, 2000.
12. S. Smid, *Analysis of microclimatic parameter measurement in building heritage*, Diploma Thesis No. 1388, University of Ljubljana, mentors: R. Žarnić, M. Šijanec-Zavrl, 1999.
13. J. Klofutar, Diploma Thesis, University of Ljubljana, mentors: R. Žarnić, M. Šijanec-Zavrl GI ZRMK, 2000.
14. OPET Slovenija, Information leaflet, *Temperiranje v stavbah kulturne dediščine (Wall tempering in building heritage)*, 2001.

Neue Wege zum Beheizen historischer Gebäude

Abstract

In historischen Gebäuden war das Heizen nach heutigen Vorstellungen nicht vorgesehen. Um die Nutzbarkeit solcher Gebäude den heutigen Forderungen anzupassen, muss man mit großer Behutsamkeit vorgehen, da nicht nur die Bestimmung des Gebäudes und die Art der Nutzung zu beachten sind, sondern auch die Bauweise und die restauratorischen und bauphysikalischen Anforderungen. Ein Sonderfall sind Kirchen aufgrund ihrer Raumhöhe und Baumasse. Die konventionellen Kirchenheizungsarten und die Temperierung werden dargestellt und kommentiert. Die Temperierung von zwei Kirchen in Slowenien wird vorgestellt. Messungen von Raumtemperatur, relativer Luftfeuchte, Wandfeuchte, Energiebedarf und Luftbewegung in den Kirchen belegen konservatorische, physiologische und energetische Vorteile des Einsatzes der Temperierung als Kirchenheizung.

New Ways to Heat Historical Buildings

The heating of historical buildings according to today's standards was not anticipated. In order to adapt such buildings to today's demands one must be very cautious because not only the purpose of the building and the way it is used must be considered, but also the way it was built and the restorational and building physics demands. Churches are a special case due to the height of their rooms and building mass. Conventional ways of heating churches and tempering are illustrated and commented upon. The tempering of two churches in Slovenia is presented. Measurements of room temperature, relative air humidity, wall humidity, energy demand and air movement in the churches demonstrate the conservational, physiological, and energy consumption advantages of the use of tempering for heating churches.

1. Einleitung

In den meisten Gebäuden, die unser kulturgeschichtliches Erbe darstellen, vor allem in Kirchen, Schlössern, historischen Museen usw., war die Herstellung günstiger mikroklimatischer Bedingungen nicht in allen Gebäudebereichen eingeplant. Wegen ihrer Baumasse ist dies mit den heute üblichen Mitteln, d.h. Konvektions- oder Luftheizung, nur mit großem Aufwand möglich. Weil ferner die Instandhaltung der Gebäude meist sehr teuer ist, entscheiden sich die Eigentümer oft dazu, die Gebäude auch für andere Zwecke zu nutzen, um auf diese Weise zusätzliche Finanzquellen zu erschliessen. So halten sie kulturelle Veranstaltungen wie Konzerte in den Kirchen ab; Räume in Schlössern und Burgen werden für Ausstellungs-, Museums- oder Gaststättenbetrieb hergerichtet; viele denkmalgeschützte Gebäude werden als Museumsdepots genutzt.

Kirchen stellen aus dem Blickwinkel des Heizens einen besonderen Fall dar, vor allem wegen der aussergewöhnlichen Raumhöhen und der grossen Baumassen. Tiefe Temperaturen werden durch deren Wärmespeicherfähigkeit lange gehalten. In solchen Gebäuden ist es daher schwierig, in kürzerer Zeit die heute für Gottesdienste oder Veranstaltungen gewünschten Mindest-Raumtemperaturen herzustellen. Dennoch glaubt man – angesichts des Energiebedarfs der konventionellen Kirchenheizsysteme – an deren „Stoßbetrieb" festhalten zu müssen. Aus physiologischen Gründen sollte jedoch während der tiefsten Außen-

temperaturen die Temperatur in einer Kirche nicht unter 8 bis 12°C abfallen. Eine Mindestbeheizung ist daher nötig; unter ökologischen Gesichtspunkten sollte jedoch die Energieeffizienz beachtet werden.

Das Heizproblem in Kirchen wird durch Inventar verschärft, das sehr empfindlich gegenüber Klimaschwankungen und Staubablagerung reagiert. Daher sollte die allgemein übliche Wärmeübertragung durch Aufheizung der Luft im Raum vermieden werden, da hierdurch neben der Luftzirkulation die Umwälzung des Bodenstaubes, Schwankungen der Raumlufttemperatur, ein größerer Luftwechsel und niedrigere, schwankende relative Luftfeuchte verursacht werden. Wegen der Kunstwerke aus Holz, der Leinwandgemälde und auch wegen der Orgel sollte die Luftfeuchte nur mit geringen Kurzzeitschwankungen im Jahresverlauf gleiten, nicht unter 45% abfallen und nur selten über 65% ansteigen, was durch die übliche Heiztechnik nicht zu gewährleisten ist.

Die Art, wie ein Heizsystem seine Wärme in den Raum überträgt, spielt aber nicht nur aus konservatorischer, sondern auch aus physiologischer und energetischer Sicht die entscheidende Rolle. Die Wärme ist in dem Bereich nötig, wo sich die Menschen aufhalten. Die üblichen Systeme setzen entweder die Luft direkt als Heizmedium ein (Luftheizung, Heizkörperheizung), oder sie verursachen indirekt die Umwälzung der Raumluft (Fussbodenheizung, Bankheizung). Dadurch entsteht Zug, und, es wird viel ungenutzte Energie an die Decke abgegeben, während die Wand- und Fensterflächen kalt bleiben. Es kommt daher dort zur Kondensation, insbesondere bei Anwesenheit einer größeren Anzahl von Personen, wodurch der Energiebedarf weiter erhöht wird und – infolge der besseren Staubhaftung – die kalten Flächen verschmutzen.

2. Arten der Kirchenheizung

Als Kirchenheizung werden am häufigsten die Warmluftheizung, Fußboden- und Bankheizung eingesetzt.

2.1. Warmluftheizung

Die Warmluftheizung überträgt Wärme in den Raum durch Einblasen warmer Luft. Bei älteren Zentralanlagen wird das Frisch- und Umluftgemisch in einer zentralen Einheit geheizt und mit einem großen Ventilator durch Kanäle in den Raum befördert. Bei neueren Luftheizungen mit dezentralen „Wärmestationen“ wird nur das Heizwasser zentral beheizt und in Rohrleitungen zu den einzelnen Bodenstationen in die Heizregister geleitet, durch die die Einzelventilatoren Raumluft führen. Die Übertragung der Wärme an die Raumschale, Ausstattung und Menschen erfolgt ausschließlich durch Konvektion. Daraus folgen für die Luftheizung typische Nachteile, die bei den neueren Anlagen lediglich gemindert sind. Wegen der großen Luftmengen, die für die Übertragung genügender Wärmemengen nötig sind, kommt es zu starker Luftzirkulation mit größerer Luftgeschwindigkeit und damit zu Zugluft und zur Verwirbelung von Staub, der sich auf der Ausstattung (Bilder, Skulpturen, Stuck usw.) ablagert. Der Temperaturgradient kann sehr hoch sein: Bei Höhen von 10 m und mehr kann die Temperatur im Deckenbereich um bis zu 15 Grad höher liegen als im Aufenthaltsbereich der Personen.

Weil die Wärmeabgabe nicht konstant ist – normalerweise wird erst kurz vor dem Beginn der Veranstaltung eingeschaltet -, kann es vorkommen, daß die gewünschte Temperatur im Aufenthaltsbereich nicht erreicht wird. Um den Einfluß der kalten Hüllflächen mit ihrer zu geringen Wärmeabstrahlung zu vermindern, muß die Lufttemperatur höher sein, als im Fall warmer Wände. Obwohl dadurch aber – wegen der Zugluft – keine Behaglichkeit entstehen kann, wurde es üblich, die „Empfindungstemperatur“ als Planungsvorgabe zu nutzen, die als arithmetisches Mittel von Wand- und Lufttemperatur berechnet wird: Um z. B. bei einer Wandtemperatur von 5°C (Außentemperatur –15°C) „im Raum“ 12,5°C zu erreichen, soll die Raumlufttemperatur mindestens 20°C betragen. Die wichtigsten Ursachen für den erhöhten Energiebedarf sind die relativ lange Anheizzeit

bei ausgekühlter Bausubstanz und die Tatsache, daß nur ein Teil der freigesetzten Energie im Aufenthaltsbereich wirksam wird, wie die Lufttemperaturzunahme in der Höhe zeigt. Die hohen Baukosten und der umfangreiche Eingriff in den Boden, der meist archäologische Zeugnisse enthält, sind weitere Gründe, die gegen den Einbau einer Luftheizung sprechen.

2.2. Fußbodenheizung

Einen noch umfassenderen Baueingriff stellt der Einbau einer Fußbodenheizung dar; deswegen wird von Konservatoren davon abgeraten. Bei der Entfernung des bestehenden Bodens kann nämlich ein großer Teil des Baumaterials (Steinplatten, Mosaiken, usw.) zerstört werden. Die Regelung der Fußbodenheizung bzw. die Beheizung für kurze Zeitspannen ist wegen der großen Trägheit erschwert und der Energieverbrauch besonders bei unterbrochenem Betrieb groß. Genügend Flächen für die Einbringung der benötigten Wärme in den Raum gibt es oft nicht, weil die Bodentemperatur aus physiologischen Gründen begrenzt werden muß. Die Wandoberfläche kann nicht direkt erreicht werden, so daß ständig kalte Luft von den Seiten in Richtung der Bänke fließt. Durch die Fußbodenheizung allein wird oft nur eine ungenügende Erwärmung erreicht, so daß es nötig ist, zusätzliche Heizsysteme einzubauen.

2.3. Bankheizung

Die Bankheizung ist das Heizsystem, von dem angenommen wird, daß es den größten Wärmekomfort in den Kirchen herstellt. Es wird daher häufig eingebaut. Meist handelt es sich um Elektrosysteme, seltener um solche, die mit Warmwasser arbeiten. Die Bankstrahler oder Heizkörper sind meist unter den Sitzflächen eingebaut und sollen die Erwärmung auch im Bereich der Beine sicherstellen. Im gesamten Bankbereich entsteht jedoch ein starker Auftrieb, der durch den Kaltluftabfall von den Wänden noch verstärkt wird, da der Einfluß des Systems auf die Wände noch geringer als bei den anderen Systemen ist. Die Zirkulation der Luft verursacht aber nicht nur Zug, sondern bringt auch die Feuchtigkeit der Menschen und den Bodenstaub an die kühlen Wände, so daß diese besonders stark verschmutzen. Der Einsatz von Strom für die Heizung erhöht die Betriebskosten beträchtlich.

2.4. Temperierung

Die Temperierung wirkt durch Erwärmung der Sockel der umrahmenden Wände, bei erdberührten Flächen auch der Säulen und anderen Bauelemente mit Bodenkontakt. Sie wurde in den 80-er Jahren in Deutschland durch die bayerische

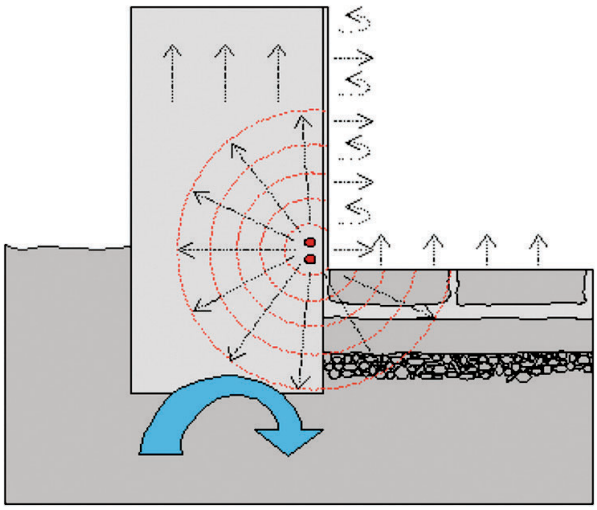


Abbildung 1:
Temperierungsschema. Grafik Miha Praznik, GI-ZRMK, Ljubljana.

Museumsberatung entwickelt. Ziel war nicht nur, so weit wie möglich konstante Temperatur- und relative Luftfeuchtewerte sicherzustellen, sondern auch den Schutz des Mauerwerks vor Kondensat und Bodenfeuchtigkeit. Außerdem sollte die dafür nötige Installation leicht einbaubar sein, bei möglichst geringen Bau- und Energiekosten. Das System besteht aus Kupferrohren mit Durchmessern zwischen 15 und 22 mm, Verteilungsrohren, die nicht nur die einzelnen Heizkreise, sondern auch den Bereich, in dem sie verlegt sind, mit Wärme versorgen, ferner dem Wärmeerzeuger, der Sicherheitsanlage und der Regelung.

Das Prinzip der Verbindung von Gebäude und Heizung zur Herstellung der gewünschten Aufenthaltsbedingungen ist in Form der Hypokaustenheizung schon seit den Römern bekannt. Der Wärmestau, der durch unter dem Putz verlegte Heizrohre in der Rohrumgebung entsteht, bewirkt eine hohe Temperatur in der dünnen Putzschicht vor den Rohren, so daß eine starke Wärmestrahlung von den Wandsockeln ausgeht. Außerdem bildet sich dort ein Warmluftauftrieb, der allmählich die restliche Fläche erwärmt. Die gesamte Wandoberfläche stellt schließlich den Heizkörper dar, der die Wärme in den Raum strahlt (Abb. 1). Dieser Prozess verläuft bis auf den Auftrieb ohne die Raumluft, dem Medium, das in den neuzeitlichen Heizsystemen die Wärme von den Heizkörpern zu den Hüllflächen überträgt. Es kommt daher nicht zur Zirkulation der Luft und des Staubes im Raum. Bauphysikalisch ist wichtig, daß die Wandoberflächentemperatur höher als die Lufttemperatur liegt, so daß es nicht zur Wasserdampf-Kondensation kommt. Weil die Wärmeabgabe kontinuierlich vorhanden ist, da das System das ganze Jahr betrieben wird, ist die Aufnahme von Kapillarfeuchtigkeit vermindert und die Feuchte in den Mauern nimmt ab. Die trockene Mauer stellt auch eine bessere Isolation dar.

3. Demonstrationsprojekte

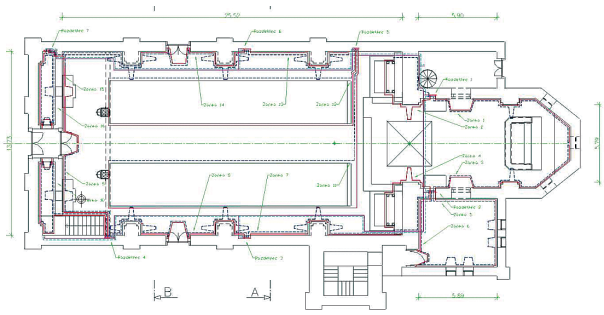
Anläßlich der Teilnahme des Instituts für Bauwesen ZRMK, Ljubljana, am EUREKA-Projekt 1383 PREVENT im Jahre 1995 haben wir uns in Slowenien intensiver mit der Problematik der Instandsetzung denkmalgeschützter Gebäude beschäftigt. In Verbindung mit der Denkmalpflege, dem slowenischen Restaurierungsinstitut und der Museumsbehörde begannen wir im Jahre 1995 mit Messungen des Mikroklimas im Rittersaal des Schlosses Brezice. Nach deren Ende bauten wir zu Versuchszwecken in einem kleineren Saal, dem Auditorium, eine Temperieranlage mit einer max. Leistung von 6 kW ein. Die erfreulichen Ergebnisse waren Auslöser für weitere Aktivitäten, wodurch ein stärkeres Interesse sowohl in Fachkreisen als auch bei potentiellen Investoren entstand. Wir fuhren mit Messungen in einigen bedeutenderen Kirchen fort. Ausgewählt wurden die Kirche in Lesce mit einer Bankheizung und die in Radovljica ohne Heizung. Die Messungen belegten die Umstände, die im 2. Kapitel beschrieben wurden. Im Folgenden wird die Temperierung von zwei Kirchen in Slowenien beschrieben, in denen auch Messungen und Funktionskontrollen abliefen. Die Ergebnisse und der Vergleich von Projektierung und praktischer Erfahrung wurden zur Grundlage für die Erstellung eines ganzheitlichen Programms der Instandsetzung von Kirchen und anderen bedeutenderen Baudenkmälern in Slowenien. 2002 wurde das ZRMK schließlich mit der Projektierung der Temperierung im gesamten Schloß Brezice beauftragt.

3.1. Die Pfarrkirche Sv. Martin in Teharje

Die Pfarrkirche Sv. Martin wurde in den Jahren 1906/1907 nach den Plänen von Adolf Wagner erbaut. Sie steht in exponierter Lage über dem Dorf, dort, wo seit dem 17. Jahrhundert Vorläuferbauten standen. Das Gebäude ist 41 m lang und 16 m breit, mit einem beheizten Volumen von 7700 m^3.

Für die Abschätzung der Wärmeleistung der Heizanlage war der Wunsch Grundlage, daß die Raumtemperatur bei –15°C nicht unter 8°C absinken soll (Abb. 2 u. 3). Für eine zunächst vorgesehene Bankheizung waren für Kirche und Sakristei 60 kW angenommen worden. Die Heizzentrale in der Kirche ist mit zwei

Abbildung 2 u. 3:
Die Pfarrkirche Sv. Martin in Teharje. Temperierungsanlage. Photo und Plan Matjaž Malovrh, GI-ZRMK, Ljubljana.



Ölkesseln auch für die Beheizung von Schule und Pfarrhaus dimensioniert. Während für diese Gebäude eine Spreizung der Heizwassertemperatur von 90/70°C vorgesehen ist, wird die Kirche auf max. 50/43°C geregelt. Die Emittlung des tatsächlichen Energiebedarfs der Kirche erfolgt mit einem Wärmemengenzähler.

Das Kirchenschiff hatte gerade eine ornamentale Neufassung erhalten. Da die historischen Putze verloren waren, wurden die zunächst für notwendig erachteten drei Verlegeniveaus an den Außenwänden zugelassen: Das wichtigste Niveau stellen die Rohre in der Wand-Boden-Ecke dar, die auch zur Ausschaltung der aufsteigenden Feuchte dienen. Das zweite Niveau befindest sich in 2,3 m Höhe, das dritte unter den Fenstern auf der Höhe von 6 m mit der Aufgabe, den Kaltluftabfall von den Fenstern zu verhindern. Ferner wurden die Bankpodeste umfahren. Insgesamt wurden 1254 m ummanteltes Kupferrohr mit einer Dimension von 15 x 1 mm und 18 x 1 mm verlegt. Eine Auswertung der ersten Heizperiode ergab, daß das Ziel mit max. Vorlauftemperaturen unter 50°C erreicht wurde, woraus zu schließen ist, daß weniger Schleifen ausgereicht hätten.

3.2. Die Pfarrkirche Sv. Tilen in Mokronog

Die Pfarrkirche Sv. Tilen aus dem 14. Jh. erlebte mehrere Umbauten. Die heutige Form entstand im Jahre 1824. Das Kirchenschiff war nicht bemalt. Der extrem durchfeuchtete Innenputz war auf bis zu 3 m Höhe entfernt. Es konnten daher zwei Schleifen in zwei Niveaus verlegt werden. Das Gebäude ist 27 m lang und 13 m breit. Das beheizte Volumen beträgt 3510 m^3, die berechnete Anschlußleistung 24 kW.

Es wurden 770 m ummanteltes Kupferrohr mit einer Dimension von 18 x 1 mm und 15 x 1 mm eingebaut (Wand-Boden-Ecke, 1,80 m) (Abb. 4 u. 5). Energieträger ist Flüssiggas (Erdtank 2000 l). Wärmeerzeuger ist ein Gas-Brennwertkessel. Die Heizwassertemperaturspreizung beträgt 50/43°C. Die Regelung erlaubt die Umstellung von Sommer- auf Winterbetrieb.

4. Regelung

Eine automatische, raumtemperaturabhängige Regelung ist nicht eingebaut. Da die Reaktion der Raumtemperatur auf Veränderungen der Außentemperatur wegen der großen Gebäudemasse sehr langsam ist, kann die Heizwassertemperatur händisch angepaßt werden. Die Anpassung kann auf folgende Weise geschehen:

Die Projektvorgabe für die min. Innentemperatur betrug +8°C bei einer Außentemperatur von -15°C .

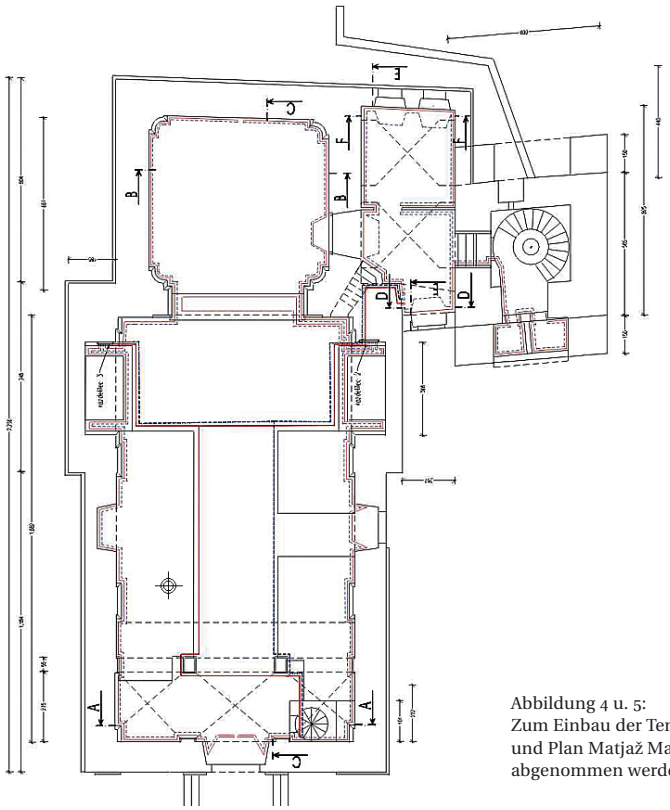


Abbildung 4 u. 5:
Zum Einbau der Temperierung in der Pfarrkirche siehe 3.2. Temperierungsanlage. Photo und Plan Matjaž Malovrh, GI-ZRMK, Ljubljana. Der alte durchfeuchtete Putz mußte abgenommen werden.

Veränderung der Temperatur des Heizmediums beim Eintritt in die Heizkreise

Die Temperatur des Heizmediums kann in einem Bereich von 28 bis 60°C variiert werden. Dabei bedeutet die untere Angabe die niedrigste erlaubte Temperatur und die höhere, die höchsterlaubte Temperatur. Mit zwei Fühlern wird die Einhaltung dieser Werte überwacht. Bei Überschreitung wird die Umwälzpumpe abgeschaltet und das Mischventil geschlossen. Falls das geschieht, sollen die Grenztemperaturen erhöht bzw. erniedrigt werden. Folgende Werte werden für die grobe Anpassung dieser Temperaturen im Jahresverlauf empfohlen, die Feineinstellung geschieht vor Ort:

Heizungsperiode	Außentemperatur °C	Vorlauftemperatur °C
Mai – September	+10 bis +32	35 bis 28
September – November	+10 bis 0	35 bis 40
November – Februar	0 bis -15	40 bis 50
Februar – Mai	+10 bis 0	40 bis 35
Bei Temperaturen unter –15°C über längere Perioden	Niedriger als -15°C	Max. 60°C

Veränderung der Durchflußmenge des Heizwassers

Durch Veränderung der Pumpenleistung von Hand kann die Durchflußmenge des Heizwassers und damit indirekt die Wärmeabgabe der Heizkreise beeinflußt werden. Der hydraulische Abgleich erfolgt auf der zweiten Pumpenstufe und bei geöffnetem Mischventil. Die Leistungsabgabe wird durch Umschaltung auf die niedrigere Pumpenstufe vermindert.

Schließen von Heizkreisen

Dies ist nur für die Kreise des zweiten und dritten Niveaus erlaubt. Wenn nicht besondere Umstände im Gebäude dagegen sprechen, können sie von Juni bis September abgeschaltet werden, zuerst die Kreise des dritten, später die des zweiten Niveaus, wobei die Pumpenleistung entsprechend verringert wird. Zur Zeit der Planung waren die Effekte dieser Methoden noch ungeklärt. Inzwischen haben wir Erfahrung mit Rücklauftemperaturbegrenzern, eingebaut am Ende jeder Schleife, mit denen die dargestellte Leistungsanpassung direkt erreicht werden kann.

5. Meßergebnisse

Die Temperierung war für uns neu. Deshalb war es nötig, die Temperatur- und Feuchteentwicklung durch Messungen zu verfolgen, um die Systemwirkung und deren Effekte zu studieren. Auf Grund der Messungen kann der Gebäudenutzer Korrekturen der Regelung durchführen, während der Projektant Schlüsse für die Projektierung der Temperierung in anderen Gebäuden ziehen kann.

In der Pfarrkirche in Teharje installierten wir an über 20 Stellen Temperaturmeßpunkte. Neben der Raum- und der Außentemperatur wurden die Wandtemperaturen an der Oberfläche und in mehreren Tiefen gemessen, ferner die relative Luftfeuchte im Raum und die Mauerfeuchte. Dies geschah durch Messung der relativen Luftfeuchte in Bohrungen als Indikator für die Materialfeuchte. Zeitweise wurde auch die Luftgeschwindigkeit in Wandnähe und im Raum gemessen. Uns interessierte vor allem die Änderung der Raumtemperatur in Abhängigkeit von der Außentemperatur und die Temperatur- und Feuchteänderung in der Mauer. Die Messungen liefen von September 1999 bis Mai 2000.

In der Pfarrkirche in Mokronog wurden Temperaturen und Luftfeuchtigkeit mit mehreren Dataloggern erfasst.

5.1 Ergebnisse der Temperatur- und Feuchtemessungen

Die ersten Resultate der Temperatur- und Feuchtigkeitsmessungen in der Pfarrkirche Teharje zeigen folgendes (vgl. Abb. 6-8):

- Die Raumtemperatur lag auch bei starkem Frost bei +10°C. Sie reagierte sehr langsam auf die Außentemperaturänderungen.
- Die mittlere Vorlauftemperatur betrug max. 48°C.
- Die Wandoberflächentemperatur auf der Höhe von 2,5 m vom Boden ist überall über 10°C, im Bereich der Rohrschleifen bis zu 25°C (Folge der geringen Vorlauftemperatur).
- Die Luftfeuchtigkeit in der Wandbohrung 1 m über dem Boden verminderte sich von 88 auf 82%.

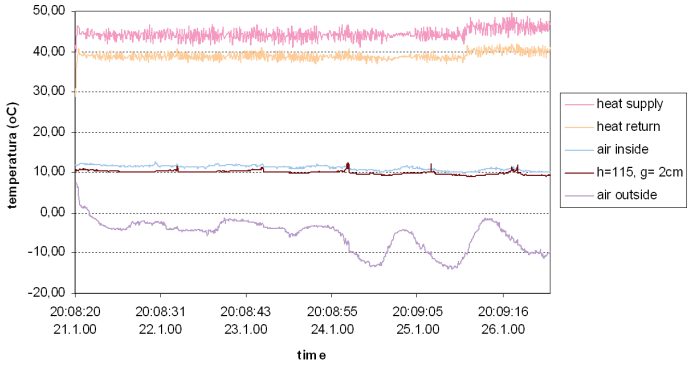


Abbildung 6:
Vorlauf- und Rücklauftemperatur, Raumtemperatur, Wandoberflächentemperatur, Außentemperatur bei kaltem Wetter (bis –13°C), Teharje.

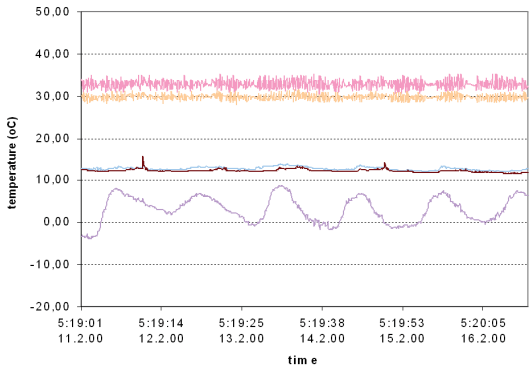
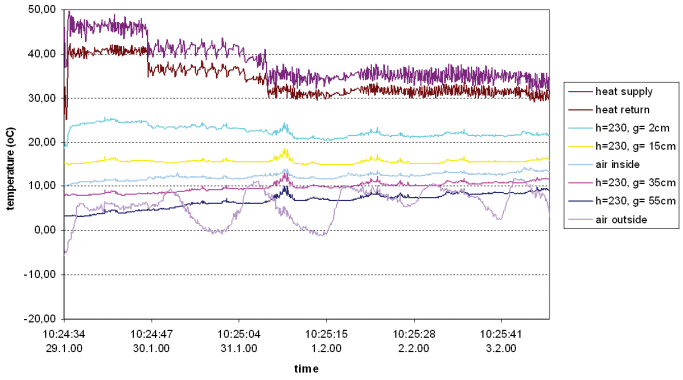


Abbildung 7:
Vorlauf- und Rücklauftemperatur, Raumtemperatur, Wandoberflächentemperatur, Außentemperatur, bei sonnigem Winterwetter, Teharje.

Abbildung 8:
Vorlauf- und Rücklauftemperatur, Wandtemperaturen in verschiedensten Tiefen, Raumtemperatur und Außentemperatur, Teharje.
Graphen: Matjaž Zupan, GI-ZRMK, Ljubljana.



5.2. *Thermografie*

Die Kontrolle des Rohrnetzes erfolgte auch mittels Thermografie, die die Temperaturen der Oberfläche anschaulich macht. Wir machten in beiden Gebäuden Aufnahmen (vgl. Abb. 9, 10 u. 11) und fanden heraus:

- Die Temperatur liegt auf allen Niveaus höher als 10°C, was die Messungen der Thermoelemente bestätigt.
- Alle Heizkreise heizen gleichmässig, die Rohre weisen keine Montageschäden auf.
- Die Temperaturprofile der Wandoberfläche entsprechen den Profilen, die wir durch die vorausgegangene Computersimulation erhielten (Heat2, Physibel).
- Die Verlegungstiefe der Rohre ist in einigen Fällen grösser als vorgesehen (Fehler der Ausführungsfirma).
- Die Sockelheizrohre sind streckenweise mit dem später eingebrachten hölzernen Bodenbelag zugedeckt worden, wodurch die Wärmeabgabe an die Wandoberfläche stark gemindert ist (minimaler Auftrieb).
- Im Aufenthaltsbereich ist die Strahlung der Wandoberfläche höher, was bei den sich im Raum aufhaltenden Menschen ein angenehmes Gefühl auslöst.
- Die Analyse der Oberflächentemperaturen der Wandaußenseite zeigt, dass die Temperatur im Bereich der Rohre nur wenige Zehntel °C höher als in anderen Wandbereichen ist (Wärmedämmung durch Mauerwerk).

5.3. *Luftbewegung*

Messungen der Luftbewegung zeigten, daß in Wandnähe Geschwindigkeiten von max. 0,5 m/s auftreten, wodurch weder Staubaufwirbelung noch Zugerscheinungen verursacht werden. Die Luftbewegungen im Kirchenraum selbst waren nicht dem Heizbetrieb zuzuordnen.

5.4. *Energiebilanz*

Die Daten über den gemessenen Energiebedarf in der ersten Heizperiode werden in der Folge vorgestellt.

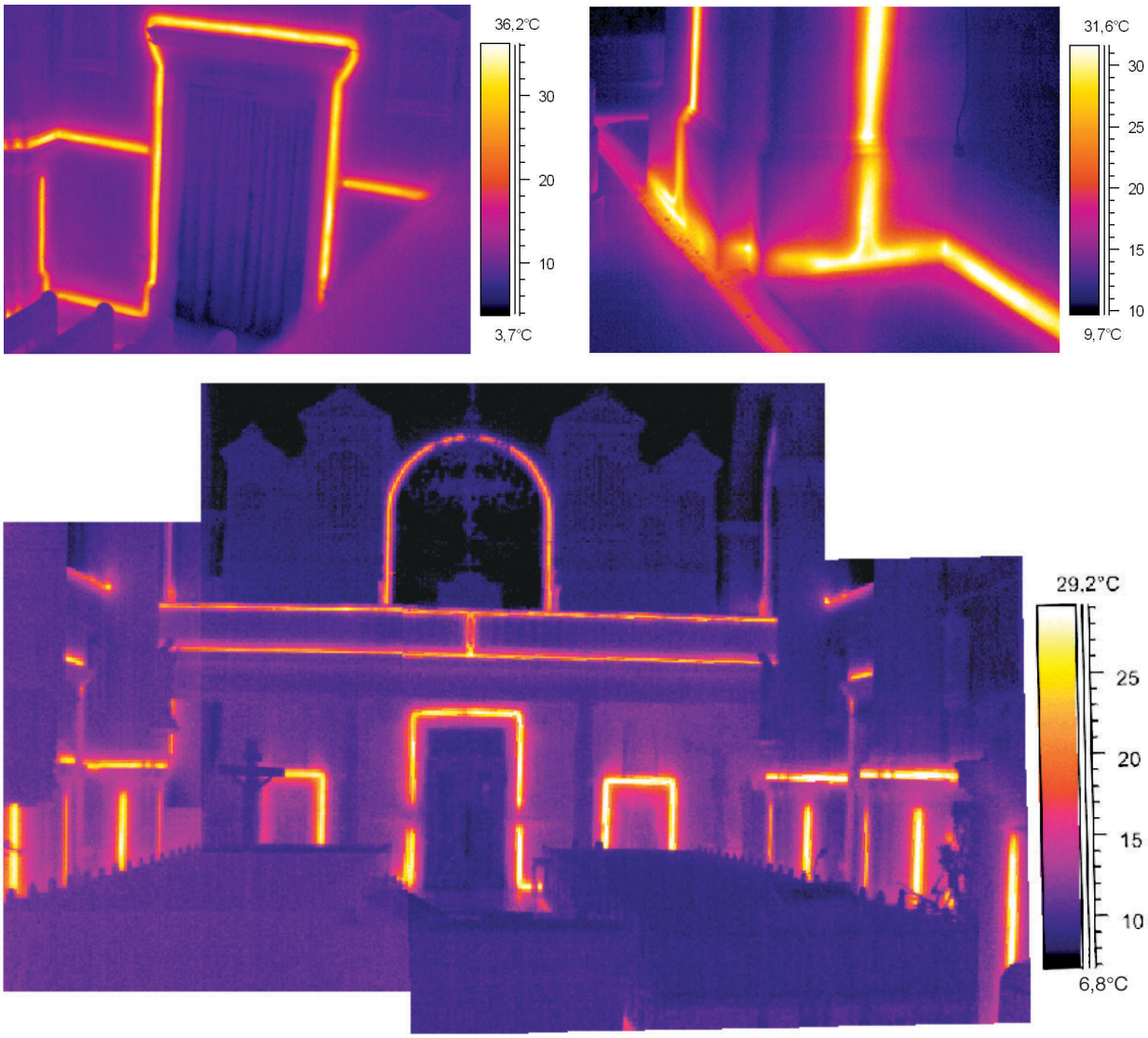
Teharje:

Der Wärmeenergiebedarf, gemessen auf Kalorimeter ABB SVM F2-10 V 6/4", lag in der Periode vom 18.10.1999 bis 20.8.2000 bei 89 MWh, was den verbrauchten 8900 Litern extra leichtes Heizöl entspricht. Der spezifische Bedarf der ersten Heizperiode lag damit bei 11,5 kWh/m³ (vgl. auch unten 6.).

Mokronog:

Der Flüssiggasverbrauch in der Periode vom 23.9.1999 bis 7.3.2000 lag bei 8270 Litern, was bei einem Brennwert von 7,3 kWh/l den gemessenen 60.400 kWh entspricht. Der spezifische Bedarf der ersten Heizperiode lag damit bei 17,2 kWh/m³.

Abbildung 9, 10 u. 11:
Thermografien der Kirche Teharje, Matjaž Zupan, Novo mesto.



6. Schlußbemerkung

Die Resultate zeigen, daß sich in beiden Kirchen die Mikroklimabedingungen sehr günstig entwickelten und die Wünsche der Gebäudenutzer erfüllt wurden. Der spezifische Energiebedarf der ersten Heizperiode entspricht in Mokronog angesichts der extrem feuchten und beschatteten Tallage den Erwartungen. In Teharje dagegen war der spezifische Bedarf bereits in der ersten Heizperiode erheblich geringer als erwartet. Er lag um bis zu 50% unter dem von Kirchen mit Bank- oder Luftheizung, die in üblichem Stoßbetrieb zu den Messen genutzt werden.

Nach dem Ende der Messungen schaltete ein neuer Pfarrer in Mokronog leider von Juni bis Oktober die Temperierung ab. Es ist daher ungewiß, ob sich der Bedarf in den nachfolgenden Heizperioden verringert hat; wir erhielten keine Nachrichten mehr aus Mokronog. Wir wissen nur, daß die Anlage weiter funktioniert.

Teharje hat nach Abschluß der Messungen durch Austrocknung des Mauerwerks den Energiebedarf offenbar weiter senken können. Wir hörten nach Ende

des Meßprogramms von Teharje weiter gesunkene Energieverbräuche. So wurden im letzten Jahr (2002) 6600 Liter leichtes Heizöl verbraucht. Das deutet darauf hin, daß das Mauerwerk trockener geworden ist, man muß allerdings auch sehen, daß die Außentemperaturen im Winter nicht so tief waren.

Zusammenfassung

Heizen war in historischen Gebäuden nach heutigen Vorstellungen, also zur Herstellung von Aufenthalts- oder Arbeitsbedingungen während der gesamten Heizperiode in allen Gebäudeteilen und zu allen Tageszeiten, nicht vorgesehen. Um die Nutzbarkeit solcher Gebäude den heutigen Forderungen anzupassen, muß man mit großer Behutsamkeit vorgehen, da nicht nur die Bestimmung des Gebäudes und die Art der Nutzung zu beachten sind, sondern auch die Bauweise und die restauratorischen und bauphysikalischen Anforderungen. Sinnvolle Planung und schonender Einbau des Heizsystems hängen also von der Zusammenarbeit von Fachleuten verschiedener Fächer ab. Baudenkmäler stellen einen besonderen Fall dar, insbesondere Kirchen, wo u.a. folgende Bedingungen zu erfüllen sind: Das System sollte nicht sichtbar sein, betriebsbedingte Temperaturschwankungen müssen so gering wie möglich ausfallen, der Feuchtegehalt des Mauerwerks soll verringert und feuchtebedingte Mauerschäden vermieden werden, die relative Luftfeuchtigkeit muß in den erforderlichen Grenzen liegen, der Heizbetrieb sollte keine Staubumwälzung verursachen.

Für die Beheizung zweier Pfarrkirchen wählten wir die Temperierung, die seit ca. 20 Jahren von der Münchner Museumsberatungsstelle erarbeitet wurde. Die Heiztechnik besteht im wesentlichen aus einer oder zwei Heizrohrschleifen, die in der Regel am Sockel der Außenwände unter Putz verlegt werden, mit einer Überdeckung von max. 15–20 mm. Durch Wärmestau in der Mauermasse in Rohrnähe entsteht am erhitzten Putzstreifen ein Warmluftauftrieb, der die Wandoberfläche erwärmt. Diese gibt die Wärme durch Strahlung in den Raum ab. Dadurch entstehen bauphysikalische und konservatorische Vorteile, die für Bauwerk, Innenausstattung und ausgestellte Kunstwerke gleichermaßen günstig sind:

Wandfeuchte aus Kondensat und aufsteigender Feuchte wird durch die Art der Wärmeübertragung im gesamten Gebäude ausgeschlossen. In den Räumen herrschen gleichförmige und stabile Temperatur- und relative Luftfeuchte-Werte, die (bei kontrollierter Lüftung) über das Jahr ohne kurzzeitige Schwankungen gleiten. Es besteht kein Bedarf an zusätzlicher Luftentfeuchtung. Befeuchtungsbedarf entsteht nur, wenn in Frostperioden höhere Raumtemperaturen gewünscht werden. Da die Beheizung der Räume über die Wärmeabstrahlung der Wände geschieht, wird keine Zirkulation der Luft im Raum verursacht, mit der sich der Bodenstaub verteilen würde.

Literatur

1. EU 1383 PREVENT: Possibilities for simulation of thermal behaviour of directly heated wall in the Temperierungsystem of space heating, Dr. Marjana Šijanec-Zavrl, Matjaž Malovrh, Dr. Jana Šelih, Dr. Roko Žarnić, Ivo Nemec, Report No. 2 from Slovenian partner, 1997.
2. Sanierung von feuchtem Mauerwerk, Diplomarbeit, TU München, 1996/1997.
3. Dr. Marjana Šijanec-Zavrl, Dr. Roko Žarnić „Nadzorovanje mikroklime v stavbah kulturne dediščine" (Die Mikroklimaüberwachung in Baudenkmälern), Gradbenik No.7/8, julij-august 2000.
4. M. Malovrh et al., Temperiranje cerkve Teharje, Projektdokumentation 1999.
5. M. Malovrh et al., Temperiranje cerkve Mokronog, Projektdokumetation 1999.

Felicitas Klein

Die Renovierung von fünf historischen Räumen in der Städtischen Galerie im Lenbachhaus, München - Teil 1*

* Der Text entstand als Gastvortrag in englischer Sprache, anläßlich des 4. Teilnehmertreffens der EUREKA 1383 PREVENT Projektpartner vom März 1997 in Regensburg und wurde 2003 re-übersetzt.

Abstract

Die Städtische Galerie im Lenbachhaus in München wurde nach der Eröffnung 1929 im Jahr 1972 durch einen Anbau und 1994 durch einen Neubau erweitert. Die Gebäudeteile wurden mit unterschiedlichen konventionellen Heizungs- und Klimaanlagen ausgestattet, die nicht immer zufriedenstellende Ergebnisse erbringen. Bei der Renovierung von fünf historischen Räumen 1996 wurden angesichts der speziellen Anforderungen und der Erfahrungen mit konventionellen Klimatisierungssystemen eine Temperieranlage in Verbindung mit Verdunstungsluftbefeuchtern eingebaut. Da die Wandbespannung erneuert wurde, konnten die Rohre unter Putz verlegt werden. Lediglich in einem Raum, dessen Holzvertäfelung nicht abgenommen werden kann, wurde die Installation auf die Fensternische in Kombination mit einem kleinen Heizkörper beschränkt. In allen Räumen wurden in den früheren Heizkörpernischen gekapselte Verdunstungsluftbefeuchter installiert, die mit einem speziellen Leckwarnsystem versehen sind. Die Ergebnisse sind sehr zufriedenstellend.

Renovation of Five Historic Exhibition Rooms in the Städtische Galerie im Lenbachhaus

Since its opening in 1929, two additions have been made to the Städtische Galerie im Lenbachhaus (1972 and 1984). These buildings were equipped with various heating systems with whose insidiousness one had to battle daily. As part of the renovation of the five historic rooms on the upper floor of the former residence building in 1996, it was decided to install a tempering system combined with evaporative humidifiers. Because the wall coverings were to be redone during the renovation work, the possibility of installing the tempering pipes underneath the wall plaster of the outside walls presented itself. Only in one room, where removing the valuable wall paneling was not possible, the installation was reduced to tubes in the niche in combination with a small radiator. In all rooms evaporative humidifiers were installed in the niches where the radiators were previously located. The humidifiers are equipped with a special housing and a leak warning *system. The result is very satisfactory.*

Die Städtische Galerie im Lenbachhaus hat ihren Sitz in der ehemaligen Villa des Münchener Malers Franz von Lenbach (1836-1904). Die Haus- und Gartenanlage ist nach Entwürfen des Architekten Gabriel von Seidel in den Jahren 1887 bis 1891 entstanden. Sie bestand aus dem Mitteltrakt, mit den Wohn- und Repräsentationsräumen und einem Seitenflügel mit den Atelierräumen. Mit dem Erwerb der Villa durch die Stadt München 1924 wurde die Gründung der Städtischen Galerie beschlossen und 1929 der rechte Seitenflügel angebaut. 1944/45 wurde das Gebäude schwer beschädigt und bis 1952 wieder instand gesetzt. Im Jahre 1972 erhielt das Museum einen Anbau und 1994 einen Neubau für Wechselausstellungen. Die Sammlung konzentrierte sich zunächst auf die Münchener Malerei und Grafik des 19. Jahrhunderts. Durch zwei wichtige Schenkungen zur Kunst des Blauen Reiters verlagerten sich in den Folgejahren die Sammlungsschwerpunkte auf moderne und zeitgenössische Kunst. Sie sind die Basis der heutigen internationalen Bedeutung des Museums.

Die Repräsentationsräume in Lenbachs Villa

Im Mitteltrakt der Lenbachvilla befanden sich die Wohn- und fünf Repräsentationsräume des Malers und seiner Familie. Die stimmungsvolle Inneneinrichtung der Repräsentationsräume im ersten Stock war eine Kombination aus Lenbachs eigenen Werken und Sammlungsstücken unterschiedlicher Epochen. Zeitgenossen bezeugen die beeindruckende Zusammenstellung, die zugleich Lenbachs Kenntnisse auf dem Gebiet der Kunst und sein Können als Maler hervorheben sollte. Der Mitteltrakt wurde im Krieg schwer beschädigt, so daß die fünf Räume als historische Räume 1952 rekonstruiert werden mußten. Ein Großteil der Innenausstattung blieb jedoch erhalten. In den folgenden Jahren wurden sie als Ausstellungsräume genutzt.

Klimatische Bedingungen in den historischen Räume vor der Renovierung 1996

Die Entscheidung, Lenbachs ursprüngliches Raumkonzept anhand von zeitgenössischen Fotografien und schriftlichen Zeugnissen zu rekonstruieren, bot die Chance durch bauliche Maßnahmen die klimatischen Bedingungen zu verbessern. Bis zu diesem Zeitpunkt wurden die fünf historischen Räume mit alten Heizkörpern beheizt und allein mit einem Verdunstungsbefeuchter viel zu gering befeuchtet. Die Heizkörper waren in den Fensternischen hinter einer Verblendung installiert und ließen sich nicht regulieren. Darüber hinaus waren auch die teilweise undichten Fenster mit einfacher Verglasung nicht geeignet, ein stabiles museales Ausstellungsklima zu erhalten. In vier der fünf Räume befinden sich mit farbigen Fassungen und Stukkaturen reich verzierte Holzdecken, die aufgrund der Klimaschwankungen entsprechende Schadensbilder zeigten. Die Wandbespannung aus dem Jahre 1952 war an vielen Stellen schwarz und fleckig geworden.

Priorität war es, für die originalen Kunstobjekte und die historische Ausstattung nach der Restaurierung ein konstantes Raumklima zu schaffen, welches auf die konservatorischen Erfordernisse abgestimmt sein sollte. Die geplante Klimatisierung sollte dauerhaft funktionieren, kostengünstig sein und geringen Wartungsaufwand erfordern. Die relative Luftfeuchte sollte 50-55% betragen und die Temperatur durchschnittlich 18°C, an sehr kalten Wintertagen nicht weniger als 16°C erreichen.

Die weitgehend schlechten Erfahrungen mit konventionellen Klimatisierungssystemen und die speziellen Erfordernisse der historischen Räume sprachen für den Einbau einer Temperieranlage in Verbindung mit Verdunstungsluftbefeuchtern. Ausgehend von den technischen und räumlichen Möglichkeiten sollte die Frischluftzufuhr, wenn erforderlich, durch gelegentliches Öffnen eines Fensters kontrolliert werden. In den Räumen war mit geringem Besucherverkehr zu rechnen.

Die Renovierung der historischen Räume

Vorderhand wurden strukturelle Verbesserungen vorgenommen. Alle Fenster erhielten eine Doppelverglasung und wurden abgedichtet. Um die klimatisierte Zone abzutrennen, wurde eine Glastür eingebaut. Da die Wandbespannung erneuert werden sollte, konnten die Rohre der Temperieranlage im Bereich der Außenwände unter Putz verlegt werden. Verdunstungsbefeuchter wurden in Nischen installiert, in denen sich zuvor die Heizkörper befanden, so daß keine Veränderungen der Raumgestaltung notwendig war. In einem der historischen Räume konnte aufgrund einer hölzernen Wandvertäfelung, abweichend vom bisherigen Konzept, nur eine reduzierte Temperieranlage eingebaut werden in Kombination mit einem kleinen Heizkörper, beides in der Fensternische. Sensoren für die Temperatur und die relative Luftfeuchtigkeit sind jeweils in einer Ecke eines Raumes angeordnet.

Die Temperieranlage ist seit Oktober 1996 in Betrieb. Zur Aufzeichnung der Klimawerte dient je ein Datenlogger in zwei Räumen. Alle 15 Minuten werden die Meßwerte von Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit auf einer Speicherkarte festgehalten und können als Grafik ausgelesen werden. Die Klimawerte haben sich als weitestgehend stabil erwiesen.

Abbildung 1:
Städtische Galerie im Lenbachhaus, Teilansicht. Foto Ernst Jank, Städtische Galerie im Lenbachhaus, München.

Abbildung 2:
Mitteltrakt der Lenbachvilla mit den historischen Ausstellungsräumen im ersten Obergeschoß. Foto Ernst Jank, Städtische Galerie im Lenbachhaus, München.

Abbildung 4:
Decke. Foto: Ernst Jank, Städtische Galerie im Lenbachhaus, München.

Abbildung 3:
Wandbespannung vor der Renovierung. Foto Ernst Jank, Städtische Galerie im Lenbachhaus, München.

Abbildung 5:
Wiederhergestellte Raumansicht. Foto Ernst Jank, Städtische Galerie im Lenbachhaus, München.

Abbildung 6:
Wiederhergestellte Raumansicht. Foto Ernst Jank, Städtische Galerie im Lenbachhaus, München.

Abbildung 7:
Wiederhergestellte Raumansicht. Foto Ernst Jank, Städtische Galerie im Lenbachhaus, München.

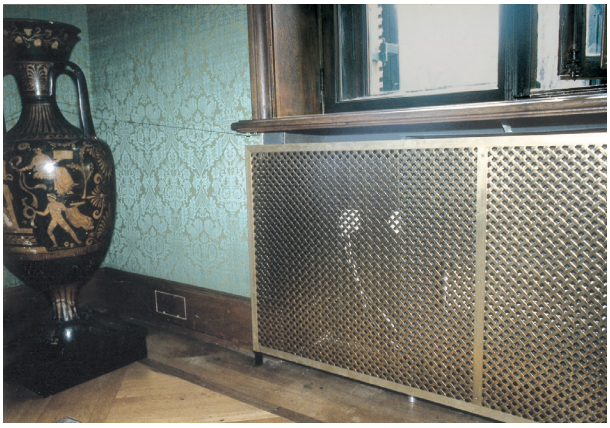
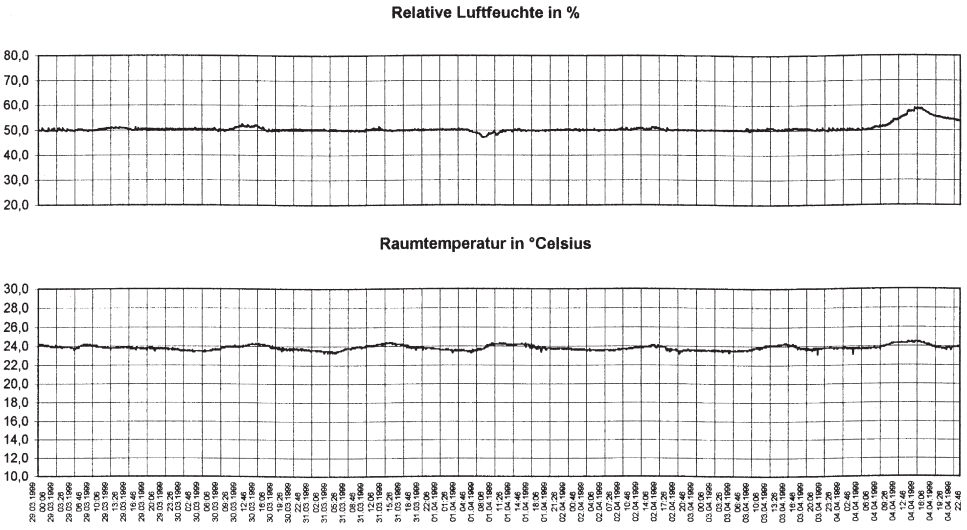


Abbildung 8:
Nische mit Verdunstungsluftbefeuchter an der Stelle des ehemaligen Heizkörpers. Foto Ernst Jank, Städtische Galerie im Lenbachhaus, München.

Abbildung 9:
Klimafühler in Raumecke. Foto Ernst Jank, Städtische Galerie im Lenbachhaus, München.

Abbildung 10:
Die Kurven der Woche vom 23. 3. 1999 bis 4. 4. 1999 zeigen die erwünschte Klimastabilität. Der Feuchteanstieg vom 04.04.1999 bewegt sich im Rahmen der konservatorisch zulässigen Feuchteänderung (unter 2% pro Stunde). Das erhöhte Temperaturniveau ist bedingt durch Steigstränge in die darüberliegenden Räume zur Versorgung des alten Heizsystems (Heizkörperheizung).



Andreas Hofer

Die Renovierung von fünf historischen Ausstellungsräumen in der Städtischen Galerie im Lenbachhaus - Teil 2

Die neue Heizungstechnik

Unser Büro erhielt von der Landeshauptstadt München den Auftrag, eine Planung für die Klimatisierung der historischen Räume zu erstellen, die dem heutigen Stand der Museumstechnik entspricht und denkmalpflegerisch akzeptabel ist. Von der Museumsleitung und unsererseits bestand der Wunsch, eine Temperieranlage einzubauen, wie sie in ähnlicher Form seit vielen Jahren in Museen erfolgreich angewandt wird. Das Ziel für das Raumklima war klar definiert. Die Temperieranlage soll, in Verbindung mit dezentralen Befeuchtern, ein saisonal gleitendes Raumklima erzeugen, mit einer unteren Raumtemperaturgrenze im Winter von 16°C und einer unteren Feuchtegrenze von 50% rF, bei Normaußenbedingungen.

Für eine zentrale, umfangreiche Lüftungstechnik, die zwangsweise ein Kanalsystem und einen großen Raumbedarf zur Folge gehabt hätte, wäre im Gebäude kein Aufstellungsort zur Verfügung gestanden und sie wäre auch nach denkmalpflegerischen Gesichtspunkten auszuschließen gewesen, da man sie nie in die Ausstattung der Räume hätte integrieren können.

Im Zuge der Restaurierung wurden die Wandbespannungen abgenommen und erneuert, wobei man so die Wände freilegte. Für uns ergab sich deshalb die Möglichkeit, an den Außenwänden Heizrohre zu verlegen, die dann wieder von den neuen Wandbespannungen überdeckt wurden. Mit herkömmlichen Heizkörpern ist dies natürlich nicht möglich, aber mit Heizrohren bzw. Bauteiltemperierungen.

Bauteiltemperierungen sind linienförmige „Heizflächen“, die nur aus zwei Rohren bestehen, die in der raumzugewandten Oberflächenschicht der Bauteile eingelegt werden. Sie liegen im Lenbachhaus dicht unter dem Innenputz der massiven Bauteile und sind wärmeleitend eingebettet. Man legt die Rohrschleifen nach Bedarf ein. Je höher der Wärmebedarf eines Raumes ist, um so mehr Rohrschleifen verwendet man. Das geschieht am Sockel aller Außenwände und gegebenenfalls auch an den Innenwänden, ferner an Leibungen, Stürzen, Brüstungen usw.. Die Einbausituation ist von den örtlichen Gegebenheiten und Möglichkeiten ebenso abhängig, wie von den bauphysikalischen Notwendigkeiten.

Die Funktionsweise der Bauteiltemperierungen ist denkbar einfach. Die knapp überputzten Rohre geben Wärme an das angrenzende Baumaterial ab. Dessen Oberfläche erzeugt einen minimalen Warmluftauftrieb, der die gesamte dem Raum zugewandte Oberfläche des Bauteils temperiert. Die daraus resultierende Wärmestrahlung der temperierten Bauteil-Oberfläche auf dem Temperatur-Niveau der gewünschten „Raumtemperatur“ hält den Raum konvektionsfrei mittels Strahlung warm.

Bei einem der fünf historischen Räume mußten wir von den Regeln der Temperiertechnik abweichen. Er hat eine wertvolle Außenwandvertäfelung, die der Restaurator nicht zerstörungsfrei demontieren konnte. Man einigte sich daher für diesen einen Raum auf eine Bestückung mit einem stark verkleinerten Heizkörper in Zusammenhang mit einer Bauteiltemperierung in der Nische, die durch die alte Öffnung für den ehemaligen Heizkörper zugänglich war.

Die Temperieranlage der historischen Räume ist an die bestehende Fernwärmeübergabestation angeschlossen, die das ganze Gebäude mit Wärme versorgt. An einem ungemischten Heizkreis hat man für die Temperieranlage einen

Abzweig installiert, der über eine Einspritzschaltung eigens geregelt wird. Dabei sind Wandoberflächentemperatur und Raumlufttemperatur Führungsgrößen für die Vorlauftemperatur. Dabei kontrolliert die Raumtemperaturmessung die Vorgaben der Wandtemperatur und die Heizungsregelung steuert bei eventuellen Abweichungen vom Mindestsollwert entsprechend gegen. Aufgeteilt ist die Anlage in zwei mengenregulierbare Kreise entsprechend den Außenwandlängen der Räume. Alle Armaturen, mit Ausnahme des Dreiwegeventiles am Heizkörper für den vertäfelten Raum, sind außerhalb des Ausstellungsbereiches. Somit ist heizungsseitig der größtmögliche Schutz vor Leckagen gegeben.

Die Luftbefeuchtung

Durch die Verlegung der „Heizflächen" an die Aussenwandoberflächen standen die ehemaligen Heizkörpernischen zum Einbau weiterer Technik zur Verfügung. Man konnte darin die gewünschten stationären Befeuchter unterbringen. Jeder Raum konnte so mit einem eigenen Befeuchter bestückt werden, den man dann wiederum verblendete bzw. in die Vertäfelung integrierte.

Die Wahl der Befeuchtungstechnik war nicht ohne Schwierigkeiten zu bewältigen. Grundsätzlich war die Befeuchtungsart festzulegen. Bei der Auswahl hatte die konservatorische Sicherheit oberste Priorität. Erstens sollte es ein System sein, das die Gefahr von Überfeuchtungen möglichst minimiert. Zweitens mußte das Problem von austretendem Wasser bei eventuellen Leckagen gelöst werden und drittens sollte so gleichmäßig wie möglich befeuchtet werden.

Prinzipiell standen drei Befeuchtungsmethoden zur Verfügung: Die Dampfbefeuchtung, die Ultraschallbefeuchtung und die Verdunstungsbefeuchtung. Bei der Bewertung der drei Verfahren stellte es sich als negativ heraus, daß die Dampfbefeuchtung und die Ultraschallbefeuchtung Wasserdampf liefern, der im Bereich des Luftaustritts einen Zuluftstrom von 100 % Feuchte erzeugt. Daß heißt, wenn sich die befeuchtete Luft beim Austritt aus dem Befeuchter auch nur geringfügig abkühlt, wären „Dampfschwaden" sichtbar. Das war für alle Beteiligten untragbar, da sich die Befeuchter im Bereich des Publikumsverkehrs befinden, von den möglichen Schäden am Inventar ganz zu schweigen.

Somit war das Verdunstungsprinzip favorisiert. Es führt aus physikalischen Gründen zu einer Beschränkung der oberen Leistungsgrenze und deshalb kann es nicht zu einer nennenswerten Überfeuchtung der Raumluft, weder durch den regulären Betrieb, noch durch Bedienungs- oder Steuerungsfehler kommen. Unter der Voraussetzung der sachgemäßen Wartung bestehen auch keine Bedenken bezüglich der Hygiene. Hätte man aber die Verdunstungsbefeuchter in der vorhandenen Nische in der Aussenwand aufgestellt und nur mit einem Abdeckgitter versehen, hätte der Nischenraum mit Sicherheit eine höhere Feuchte als wünschenswert angenommen. Außerdem hätte man den stationären Wasseranschluß der Befeuchter nicht genügend gegen Leckagen absichern können.

Um diese Probleme zu lösen, fertigte man für jeden Befeuchter ein spezielles Gehäuse an, das den Luftstrom des Befeuchters vom Nischenraum abkapselt und eventuell austretendes Wasser auffängt. Mittels eines Leckwarnsystems ist jedes Gehäuse zusätzlich gesichert und überwacht. Bei einem Wasseraustritt sammelt sich das Wasser am Boden des Gehäuses und das Leckwarnsystem schaltet, über eine Elektrode gesteuert, die Wasserzufuhr mit einem Magnetventil ab. Dadurch ist sichergestellt, daß die befeuchtete Luft sich nicht in der Nische sammeln und kein Wasser unkontrolliert austreten kann.

Die Befeuchter selbst werden über zwei Raumfeuchtefühler, die mit den Raumtemperaturfühlern in einer Einheit gekoppelt sind, geregelt. Als letzte Sicherheit gegen Schäden durch Fehlsteuerung der Befeuchtungstechnik ist noch eine Feuchtenotabsenkung in der Temperieranlage eingebaut. Sollte der Raumluftfeuchtefühler eine relative Feuchte von unter 45% rF messen, erhält die Temperieranlage den Befehl, die Vorlauftemperatur abzusenken und so die Räume abkühlen zu lassen. Die relative Feuchte steigt dadurch wieder an und die Temperieranlage schaltet sich erst bei Erreichen der Mindestfeuchte wieder zu.

So ist gewährleistet, daß beim Ausfall der Befeuchter die Räume nicht trocken geheizt werden.

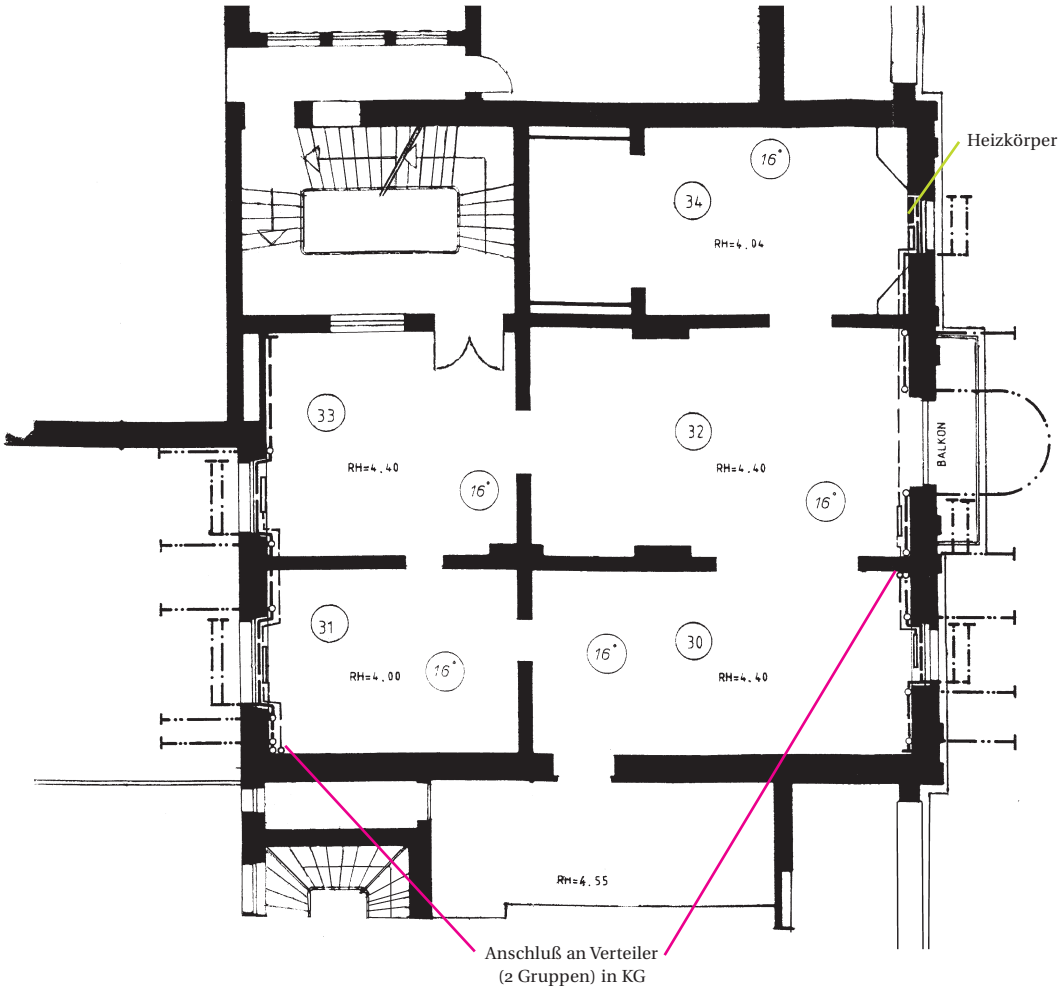


Abbildung 1:

— — — — — — Bauteiltemperierung auf Rohwand im Sockelbereich bestehend aus zwei übereinander liegenden Kupfer-Stegmantelrohren, durchgehend verlegt mit Bauteilkontakt

— · — · — · — · — Bauteiltemperierung im Putz in verkleideter Fensternische, bestehend aus zwei übereinander liegenden Kupfer-Stegmantelrohren, durchgehend verlegt mit Bauteilkontakt

— · — · — · — · — Bauteiltemperierung unter Putz auf Rohwand im Bereich der Fensterleibung bis Unterkante Fenstersturz, in den Raumecken bis Unterkante Decke oder als Türumfahrung in Raum 32, bestehend aus zwei nebeneinander liegenden Kupfer-Stegmantelrohren, durchgehend verlegt mit Bauteilkontakt

⊣ Bauteiltemperierungsende bzw. –umkehrpunkt

▭ Verdunstungsbefeuchter, gekapselt in Stahlblechgehäuse hinter Blende

— — — — — — Wasserleitung für Befeuchter verlegt mit Bauteiltemperierung im Sockelbereich, Kupfer-Stegmantelrohr 15 x 1 mm

Die Bauteiltemperierung wird ab dem Verteiler im KG ohne Abzweige verlegt. Entlüftungsmöglichkeiten in den Räumen sind nicht vorzusehen. Die Gruppen können vom Verteiler aus gespült, befüllt oder entleert werden.

Abbildung 2:
Verlegeschema Raum 32.

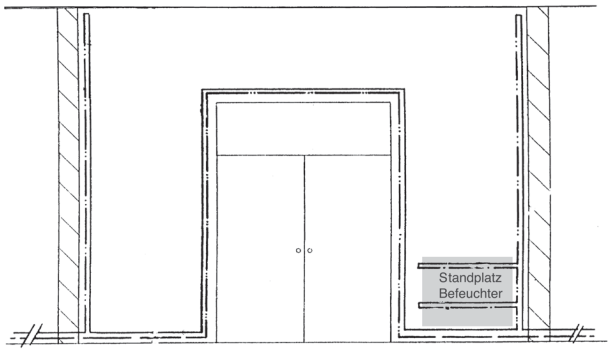
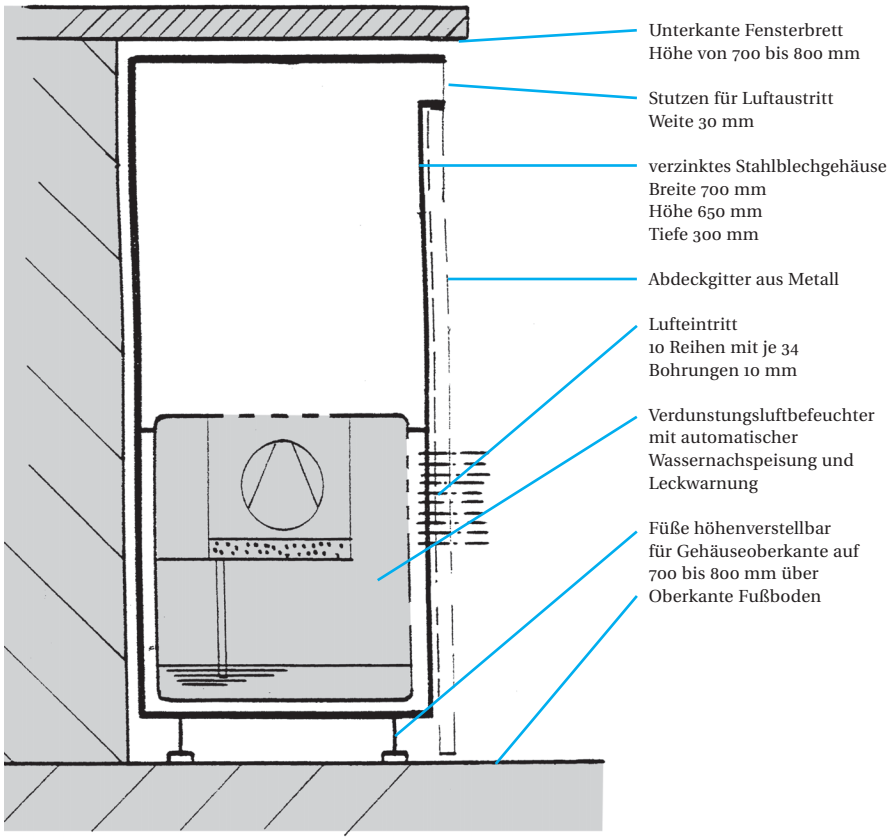


Abbildung 3:
Detail Befeuchter, Schnitt.



Jochen Münnich

Erweiterung und Umbau 1995/96 des Ernst Barlach Hauses, Stiftung Hermann F. Reemtsma – Teil 1

Abstract

Das Ernst Barlach Haus wurde im Jahre 1962 zur Aufnahme einer privaten Sammlung von Werken des Bildhauers Ernst Barlach als ebenerdiger Atrium-Bungalow mit ineinander übergehenden Räumen in einem Landschaftspark an der Elbe im Westen Hamburgs erbaut. Zur Klimatisierung wurden verschiedene konventionelle Heiztechniken und eine Klimaanlage verwendet. Beim Umbau 1995/96 entschied man sich für eine Kombination von Temperierung zur Trokkenlegung und Raumbeheizung und verkleinerter Teilklimaanlage mit maximal einfachem Luftwechsel. Sie entfeuchtet im Sommer auch die Zuluft, da lokal plötzlich Wetterlagen mit Gewittern und ergiebigen Regengüssen auftreten.

Die deutliche Verringerung des apparativen Aufwandes gegenüber konventioneller Vollklimatechnik führte zu wesentlichen Energie- und Investitionseinsparungen. Dies ist möglich, weil die Lüftungsanlage nur die Nacherwärmung der geringen Frischluftmenge leisten muss, wobei die Einblastemperatur auch geringfügig unter der Raumtemperatur liegen kann. Eine Qualitätssteigerung hinsichtlich konservatorischer Anforderungen wurde durch die geänderte Luftführung erreicht. Die Luftdurchströmung der Räume wurde umgedreht. Sie erfolgt nun von der Decke zum Fußboden, so daß der Staubeintrag der Besucher sich nicht auf den Exponaten ablagern kann, da er nicht in die Raumluft induziert wird.

Expansion and Remodeling of the Ernst Barlach Haus, Stiftung Hermann F. Reemtsma

The Ernst Barlach Haus was erected in 1962 to house a private collection of the works of the sculptor Ernst Barlach, as a single-story atrium bungalow with one room leading into another in a park on the Elbe River in west Hamburg. Various conventional heating systems and an air conditioning system were originally utilized for climatisation. During remodeling in 1995/96, it was decided to install a combination of a tempering system, for room heating and drying out the damp walls, and a ventilation system, with a maximum flow rate of one room air change per hour, that also dehumidifies the fresh air supply in summer, when sudden thunderstorms can cause pouring rains.

The noticeable reduction in the amount of hardware required for this simplified climatization system and in its operation resulted in substantial reductions in energy and investment costs. This is possible because the ventilating system does not have to heat the outside walls; it must only heat the small amount of fresh air to a temperature slightly below the room air temperature. An improvement in quality with regard to conservation requirements was also obtained by changing the direction of the flow of air through the rooms, which is now from ceiling to floor, so that dust brought in by visitors remains on the floor rather than settling out on the sculptures, because it is not blown up into the air.

Das Haus wurde 1962 vom Hamburger Architekten Werner Kallmorgen zur Aufnahme einer privaten Sammlung von Werken des Bildhauers Ernst Barlach im Jenischpark, einem englischen Landschaftspark an der Elbe im Westen Hamburg erbaut. Es wurde in Form eines ebenerdigen Atrium-Bungalows mit ineinander übergehenden Räumen konzipiert. Die Ausstellungsfläche betrug ca. 850 m².

Magazin- und andere Nebenflächen wurden dem Anspruch der Sammlung entsprechend eher zurückhaltend eingeplant. Dieser Altbau wurde in Stahlbeton-Skelett-Bauweise mit dazwischen gesetzten Ziegelmauerwerk (Doppelwandtechnik) ausgeführt, teilweise mit einem Kriechkeller, teilweise voll unterkellert. Als Heizung wurden je nach Örtlichkeit Deckenheizung, Fußbodenheizung oder Konvektoren eingebaut. Die Klimaanlage entsprach dem Stand der Technik zur Bauzeit, war jedoch zum Umbauzeitpunkt nicht mehr funktionsfähig. Als besonderes Problem erwies sich, daß das Gebäude in eine Hanglage mit Schichtenwasser gesetzt worden war. Der Gebäudesockel blieb wegen ständiger Durchnässung dauerhaft feucht. Die im Kriechkeller angeordneten, gemauerten Lüftungskanäle übertrugen diese Feuchtigkeit auf die Raumluft, deren Qualität darunter litt.

Die landschaftliche Einbettung in eine Uferrniederung der Elbe, etwa 5 km westlich des Stadtzentrums, bedingt Besonderheiten des Mikroklimas. Das Gebäude ist eng von einem Bestand alter Eichen und anderer Laubbäume umgeben, welche für den Jenischpark charakteristisch sind. Es ist – wenn auch unter gewisser Abdeckung durch umgebende Laubbäume – dem Windangriff aus Südwest, der gelegentlich stark böig ist, ausgesetzt. Das Gebäude ist im Sommer teilbeschattet. Diese Vorortlage Hamburgs ist bekannt für rasch wechselnde Wetterlagen und insbesondere lokale Gewitter mit ergiebigen Regengüssen.

Innerhalb einer Generation konnte die Sammlung des Ernst Barlach Hauses im Umfang mehr als verdoppelt werden. Dies führte zusammen mit erweiterten Öffnungszeiten und dem Trend zu häufigeren Sonderausstellungen zur Notwendigkeit einer Erweiterung um nahezu 50% der Ausstellungs- und Magazinflächen bei gleichzeitiger durchgreifender Modernisierung der gesamten Haustechnik. Die Arbeiten nahmen 1 1/2 Jahre in Anspruch und wurden im Sommer 1996 abgeschlossen. Das Museum wird im Schnitt von ca. 25.000 Besuchern p.a. besucht. Die Ansprüche an die Klima- und Lüftungstechnik hatten sich zunächst mit der permanenten Feuchtigkeit im Gebäudesockel zu befassen. Sodann sollte eine energiesparende, wirtschaftliche Lösung für die nachhaltige Herstellung eines Binnenklimas mit 55 % relativer Luftfeuchtigkeit als Leitwert gefunden werden (Schwankungsbreite Sommer: 60% ± 5%: Winter 50% ± 5%). Diese Werte sind unter restauratorischen Gesichtspunkten für die im Hause vorhandenen Materialien (Holz-, Bronze- und Gipsskulpturen sowie Graphik a. Papier) als optimal erachtet worden.

Zur Abwehr der von außen in den Gebäudesockel eindringenden Feuchtigkeit wurde zunächst das Gebäude auf der Anströmseite des Schichtenwassers und an den beiden Gebäudeflanken mit einer Spundwand umgeben. Damit konnte die Feuchtigkeitsbelastung bereits wesentlich reduziert werden. Weiter wurden nachträglich im Altbau ebenso wie im Neubau in Sockel- und Deckenbereichen Temperierleitungen eingelassen, welche die Gebäudehülle permanent heizen und damit trocken halten. Im Altbestand wurden auf Wunsch des Bauherrn einige Fußbodenheizungen belassen, die heute im Praxisbetrieb jedoch überflüssig sind und nicht genutzt werden. Lediglich im nicht klimatisierten, überdachten Atrium, welches ständig dem Außenklimaeinfluß ausgesetzt ist, wurde ebenfalls auf Wunsch des Bauherrn eine Fußbodenheizung neu eingebaut um die Nutzung des Innenhofes an kalten Tagen zu ermöglichen. Sie wird im praktischen Betrieb nur in seltenen Fällen aktiviert. Die Auslegung der raumlufttechnischen Anlage sah aus wirtschaftlichen Gründen nur geringe Kapazitätsreserven vor. In fortgeschrittener Bauphase wurde die Verstärkung durch eine Rückkühlanlage beschlossen, um dem Einfluss sich plötzlich ändernder Wetterverhältnisse – vor allem im Sommerhalbjahr – Rechnung tragen zu können.

Temperierung und raumlufttechnische Anlage arbeiten seit Sommer 1996 ihrer Auslegung entsprechend ohne Beanstandung. Die vorgegebene Schwankungsbreite des Leitwertes „relative Luftfeuchte“ (Sommer: 60% ± 5%, Winter: 50% ± 5%) wird im Betrieb eingehalten. Kurzzeitige Probleme entstehen lediglich bei drastischen Wechseln zwischen hoher und niedriger Außenluftfeuchte, wie sie für die geographische Lage Hamburgs zwischen Küsten- und Binnenlandklima nicht untypisch sind.

Gerhard Kahlert

Erweiterung und Umbau 1995/96 des Ernst Barlach Hauses, Stiftung Hermann F. Reemtsma – Teil 2

Anlagenbeschreibung für die Kombination einer Hüllflächentemperieranlage mit einer Teilklimaanlage mit reduziertem Luftwechsel (1-fach)

Im Rahmen der Erweiterung und Modernisierung des Ernst Barlach Hauses, galt es, ein Klimakonzept zu entwerfen, das möglichst viel von Bestand und Infrastruktur der haustechnischen Anlagen nutzen sollte. Es durften keine Veränderungen am inneren und äußeren Erscheinungsbild der Architektur erkennbar werden. Somit galt es, mit den vorhandenen Architekturdetails der Fensterprofile sowie der Schattenfugen an den Wandschlüssen der abgehängten Decken und Sockelanschlüsse der Fußböden eine auskömmliche Luftverteilung in den Ausstellungsräumen herzustellen.

Die Luftdurchströmung der Räume wurde umgekehrt. Sie erfolgt nun von der Decke zum Fußboden, damit der Schmutzeintrag durch die Besucher nicht unnötig in die Raumluft induziert wird und sich daher auch nicht auf den Exponaten ablagern kann. Die Zulufteinbringung wurde vollständig erneuert: Sie erfolgt über drei zentrale Schächte und verteilt sich, über Rundrohre geringen Durchmessers (10 cm) in den abgehängten Decken, zu den oberhalb der raumumspannenden Schattenfugen angeordneten Luftverteilern mit Lochblechschlitzauslaß. Die Abluftführung erfolgt über die ursprüngliche Zuluft-Einzellamelle am Fußpunkt der Atriumfenster bzw. über die Schattenfuge oberhalb des Sockelprofils der Wände. Die Anlagenkombination von Wandtemperierung und verkleinerter Teilklimaanlage mit nur 1-fachem Luftwechsel ergibt eine wesentliche Einsparung von Energiebedarf und Investitionskosten im Vergleich zur reinen Vollklimatechnik. Dabei kommt es nicht nur zu einer deutlichen Verringerung des apparativen Aufwandes bei der Haustechnik, sondern vor allem zu einer Qualitätssteigerung hinsichtlich der konservatorischen Anforderung (homogenes Raumklima, geringeres technisches Störpotential). Der Einsatz der Wandtemperierung als „Heizung“ ermöglicht die Deckung der Transmissionswärmeverluste, der durch Wärmeleitung in der Gebäudehülle eintretenden Verluste, unmittelbar an den Gebäudehüllflächen (Wärmebedarfsflächen) selbst, ohne daß die Raumluft dafür als Wärmeträger gebraucht und für den Beheizungszweck umgewälzt wird. Aus diesem Grund kann bei „Wandheizung“ die Zuluftmenge einer Teilklimaanlage stark verringert werden und ihre Temperatur gleich der Wand- bzw. Raumtemperatur sein bzw. knapp darunter liegen. Durch die Aufgabenteilung kann die Heizkomponente der Teilklimaanlage um den Transmissionsanteil verkleinert werden, d. h. daß sie im Winterlastfall nur noch die Lüftungswärmeverluste decken muß. Diese sind wesentlich geringer als bei konventionellen Anlagen, da diese die Gesamtwärmeverluste decken müssen, dies aber nur durch Bewegung großer Luftmengen mit hoher Übertemperatur leisten können. Daher entfallen bei “Wandheizung” auch die Zugerscheinungen. Zugleich ist die Luftqualität höher.

Die Aufgabe der Luftkonditionierung beschränkt sich im Winter nun darauf, eine verringerte Frischluftmenge zu behandeln durch geringere Erwärmung und Befeuchtung. Die Kühlkomponente, die im Sommer die Raumluftwerte auf max. 24°C und 65% relative Luftfeuchte beschränken soll, leistet dies ebenfalls mit geringerem Aufwand, in dem Maße wie durch bauliche Maßnahmen die Sonneneinstrahlung und die Kunstlichtkühllast gemindert wurden.

Abbildung 1:
Ernst Barlach Haus, Außenansicht. Bildarchiv Ernst Barlach Haus, Stiftung Hermann F. Reemtsma, Hamburg.

Abbildung 2:
Ausstellungsraum mit angrenzendem Atrium. Das Atrium ist mit Glas überdacht worden, nicht klimatisiert und heizt sich im Sommer auf, weshalb es mit einer Außenbeschattung versehen werden soll. Bildarchiv Ernst Barlach Haus, Stiftung Hermann F. Reemtsma, Hamburg.

Abbildung 3:
Ausstellungsraum mit benachbartem Atrium. Bildarchiv Ernst Barlach Haus, Stiftung Hermann F. Reemtsma, Hamburg.

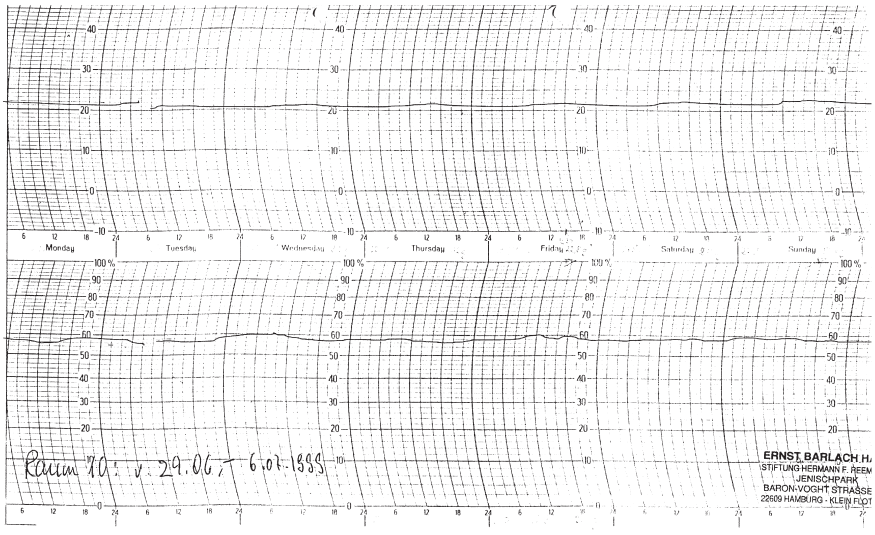


Abbildung 4:
Raumtemperatur und relative Luftfeuchte Raum 10, vom 29.06.99 bis 06.07.99. Außenlufttemperatur und relative Luftfeuchte 15:30 Uhr, Niederschlag, sämtlich gemessen von der Wetterstation Hamburg St. Pauli:
02.07.99: 20,7°C, 79% rF, 0,8 mm Niederschlag ca. 14:30 – 15:00 Uhr; 03.07.99: 29,9°C, 85% rF, 2,4 mm Niederschlag ca. 20:30 – 21:00 Uhr; 04.07.99: 27,3°C, 37% rF, 0 mm Niederschlag; 05.07.99: 27,3°C, 63% rF, 3,6 mm Niederschlag ca. 4:00 – 6:30 Uhr.

Gotthard Voß

Wohnen im Denkmal
Sanierung des Wohn- und Geschäftshauses Barfüßerstraße 13 in Halle

Abstract

Am Beispiel eines Fachwerkhauses in Halle wird gezeigt, daß die Kosten für die Instandsetzung niedriger sein können als die Neuerrichtung. Dies wird erreicht, indem möglichst viel alte Bausubstanz erhalten wird. Das ungedämmte Fachwerkhaus wurde mit einer Temperierungsanlage ausgestattet. Der Einsatz der Temperierung hat zwei Ziele: Das Gebäude wird vor aufsteigender Feuchte geschützt, der Einbau einer Horizontalsperre unter den Schwellen und den Holzfußböden kann entfallen. Durch konsequente Verlegung der Temperierschleifen im Innenputz der Gebäudehülle (an den Schwellen und in den Gebäudeecken der Außenwände mit Umwegschleifen beiderseits der Fenster) wird das Haus geheizt. Da die Temperierung als Strahlungsheizung wirkt, sind die Energieverluste durch Lüften gering. Der Einbau neuer „superdichter" Isolierglasfenster ist nicht nötig, sondern die alten Fenster können adaptiert werden. Nicht nur die Investitionskosten, sondern auch der Energiebedarf der Temperierung sind günstiger als bei konventioneller Heizung.

Living in Historic Buildings:
Renovation of the Residential and Commercial Building at 13 Barfüßerstraße in Halle

Using the example of a half-timbered building in Halle, it is shown that the costs for renovation can be lower than for new construction. This is achieved by retaining as much as possible of the existing building. A tempering system was installed in the uninsulated half-timbered building. The use of tempering has two goals. Because the building will be protected from moisture rising in the walls, the installation of horizontal barriers under the thresholds and the wooden flooring can be avoided. The building is heated through careful placement of the tempering loops in the plaster of the outside walls (along the thresholds and in the corners of the building with extension loops on both sides of the windows). The energy losses from airing are low because tempering is radiation heating. The installation of new "super tight" windows with insulating glass is not necessary; the old windows can be adapted. Not only the capital costs but also the energy requirements are lower with tempering than with conventional heating.

Der Slogan „Wohnen im Denkmal" will zumeist als mutmachende Werbung verstanden werden. Er ist auch als Aufruf zu verstehen und geht von einer Erfahrung aus, die für jeden, der in ein Denkmal einzieht, zu einem Erlebnis werden kann, wenn das Denkmal nicht nur seine Fassade bewahrt, sondern auch in seinem Inneren noch etwas von der ursprünglichen Wohnungsstruktur, den Raumproportionen, der greifbaren Materialität, überhaupt der Geschichtsspuren erfahren läßt. In einem solchen Haus begegnet man Wohn- und Lebensqualitäten, die in einem nach heutigen Normen sanierten Haus nur selten zu finden sind. Ein altes Haus braucht die Bereitschaft, historische Zustände, wenn sie noch erhaltbar sind, zu akzeptieren, Baudetails als wertvoll zu erkennen und sie in die neuen Gegebenheiten einzubeziehen. Weiter wird der, der sich wie ein Liebhaber der historischen Substanz nähert, erfahren, daß die Sanierung eines Denkmals gegenüber einem Neubau dann kostengünstiger ausfallen kann, wenn der Anteil der Erhaltung z. B. der Wände, der Putze, der Fenster und Türen, der Fußböden möglichst hoch ist. Dazu ist es notwendig, daß der Bauherr für sein

Haus eine Verantwortung übernimmt, die Erhaltung vom Architekten einfordert, sich nicht allein auf die Gutachter verläßt und nicht vorschnell dem Druck der Gewährleistung nachgibt. Zugegeben, ein derartiges Verhalten ist bei den derzeitigen Baugepflogenheiten ungewöhnlich. Doch der Erfolg kann dann so sein, daß der Bauherr in seinem Denkmal unvergleichlich wohnt.

Das Haus, das hier besprochen wird, steht in Halle, in der Barfüßerstraße. Es wurde am Ende des 17. Jahrhunderts erbaut und gehört zu den wenigen Häusern dieser Zeit, die in Halle und anderswo die große Veränderungswelle am Ende des 19. Jahrhunderts überstanden haben und die gegenwärtig überall in unseren Altstädten ganz besonders gefährdet sind. Die denkmalpflegerische Zielstellung für die Sanierung dieses Baudenkmals ging davon aus, das verputzte Fachwerkhaus mit jüngerem Satteldach in seiner äußeren Erscheinung nicht zu verändern. Die Einfachfenster sollten erhalten und zu Kastenfenstern umgebaut werden. 1993 waren die Hofgebäude abgebrochen worden, in denen seit der Erbauung bis zur Räumung des Hauses in den achtziger Jahren eine Tischlerei und Glaserei gearbeitet hatte. Bei dieser Maßnahme wurde der Anschluß an das Vorderhaus nicht genügend abgesichert, so daß es zu einem Schwammbefall kommen mußte.

Der Zustand im Erdgeschoß der hofseitigen zweigeschossigen Fachwerkwand sowie der beiden Holzbalkendecken in der hinteren Gebäudehälfte war so schadhaft, daß diese wichtigen konstruktiven Bauteile weitgehend erneuert werden mußten. Ebenso unumgänglich war die Auswechslung sämtlicher Schwellen und einiger Stilenden der Giebel- und der Mittelwände im Erdgeschoß. Für die Ausmauerung der Gefache konnten die im Haus und von einem Abbruchhaus in der Mittelstraße geborgenen Lehmsteine wieder verarbeitet werden. Auch der geborgene Lehm wurde trocken zwischen den Deckenbalken auf eine Einschubschalung wieder eingefüllt und auf diese Weise ein guter Schall-, Wärme- und Brandschutz zwischen den Geschossen erreicht. Im Dachraum wurde zur Wärmedämmung zwischen die mit Bohlen verstärkten Sparren Papierflocken eingeblasen, die innen von Schalung und außen von Dämmplatten gehalten werden. Der oberste Dachbereich ist als Kaltdach ausgebildet. Auf der rückwärtigen Dachfläche liegen als Doppeldeckung geborgene handgestrichene Biber und auf der Vorderseite alte Maschinenbiber aus DDR-Produktion. Während die Vorderfassade ein ungestrichener Kalkputz auf Rohrgeflecht überzieht, wurde hofseitig auf die z. T. erhaltenen Lehmausfachungen und auf die Lehmsteine im Fachwerk des Erdgeschosses, das als neue Zutat bewußt gezeigt wird, ein Lehmputz und darüber eine dünne Kalkputzschicht aufgetragen. Der rükkwärtige Anbau setzt sich in seiner Form und der Detailausbildung bewußt gegen den Altbau ab.

Von älteren Putzen aus Kalkmörtel auf den Innenwänden und -decken konnten in der vorderen Gebäudehälfte größere Flächen erhalten werden. Im Bereich der Treppe ließen sich auf den Fachwerkhölzern dunkle Bemalungen, die mit einem breiten Streifen auf die Gefache übergriffen, feststellen. Wegen des hier vorhandenen umfangreichen Schwammbefalls konnten die interessanten Befunde leider nicht erhalten werden. Die Wände und Decken im Erdgeschoß, innerhalb der hinteren Gebäudehälften, in den Geschossen darüber und im Dachraum erhielten einen doppellagigen Lehmputz auf Rohrgeflecht.

Alle Fenster und sämtliche Innentüren konnten erhalten werden. Sie wurden abgebeizt, die Fenster repariert, anschließend neu verglast und zusammen mit den Doppelfenstern in die vorhandenen, sehr sorgfältig profilierten Bekleidungen wieder eingefügt.

Die Beheizung des Hauses erfolgt mittels einer sogenannten Bauteilerwärmung. Dazu sind zunächst im Dachgeschoß eine mit Gas beschickte Warmwasserheizzentrale und in allen drei Geschossen jeweils eine Verteilung installiert, von der ausgehend jeder einzelne Raum gesondert mit Wärme versorgt wird. Diese Heizung basiert auf Wärmespeicherung und Trocknung der Baumasse der Außenwände, wodurch gleichzeitig ein Wärmedämmeffekt entsteht. So liegen im

Putz der Außenwände Kupferleitungen, vor allem an deren Sockeln, ferner die Fensteröffnungen begleitend und in den Gebäudeecken.

Erwärmt wird auch der Gebäudesockel unterhalb der Erdgeschoßfußböden. Die dabei erreichte Trocknung hebt die Kapillarwirkung des Mauerwerks auf und verhindert so das Aufsteigen von Feuchtigkeit. Auf diese Wirkung vertrauend, die natürlich die kontinuierliche Erwärmung auch während der Sommermonate voraussetzt, wurde auf eine Horizontalsperre unter den Schwellen und unter den Holzfußböden verzichtet. Die bisher über sieben Jahre laufende Erwärmung und gleichzeitige Gebäudetrockenhaltung sorgt für ein stets ausgeglichenes Raumklima. Der bei dieser Heizungsart aufzuwendende Energieverbrauch hält dem Vergleich mit herkömmlichen Heizsystemen durchaus stand.

Während des Bauablaufes hat es regelmäßige Baustellenbegehungen mit der Unteren Denkmalschutzbehörde der Stadt Halle gegeben. Dabei wurde immer wieder der sehr behutsame Umgang mit der Bausubstanz als beispielhaft hervorgehoben. Da es keine die historische Aussage des Baudenkmals beeinträchtigenden Veränderungsansprüche seitens der Bauherrschaft gegeben hat, entstanden auch keinerlei Differenzen mit dem Denkmalschutz. Zwischenzeitlich wurden je nach Bedarf ein Holzschutzsachverständiger und ein solcher für heiztechnische Fragen, im besonderen die Bauteilerwärmung betreffend, konsultiert. Außerdem wurde ein Restaurator für die Untersuchung der Fassadenfarbigkeit und einer für die Fassungen im Inneren des Gebäudes hinzugezogen. Zwingend für den kontinuierlichen Bauablauf war die regelmäßige Anwesenheit einer Bauleitung, da ständig Detailfragen und Unvorhergesehenes zu entscheiden waren. Das Sanierungsergebnis kann als dem Baudenkmal in jeder Weise angemessen betrachtet werden. Sowohl das Äußere als auch das Innere des Gebäudes sind nach den notwendigen Erhaltungsmaßnahmen, die zwangsläufig zu Veränderungen in der Erscheinung führen müssen, immer noch wiederzuerkennen, und somit ist ein wesentliches Sanierungsziel erreicht. Sowohl der Laden und die Wohnung im Erdgeschoß als auch die der Bauherrenschaft in den oberen Geschossen haben eine Wohnqualität, die es lohnend macht, in diesem Denkmal zu wohnen.

Abbildung 1:
Straßenansicht vor der Instandsetzung 1995. Foto Gotthard Voß, Halle.

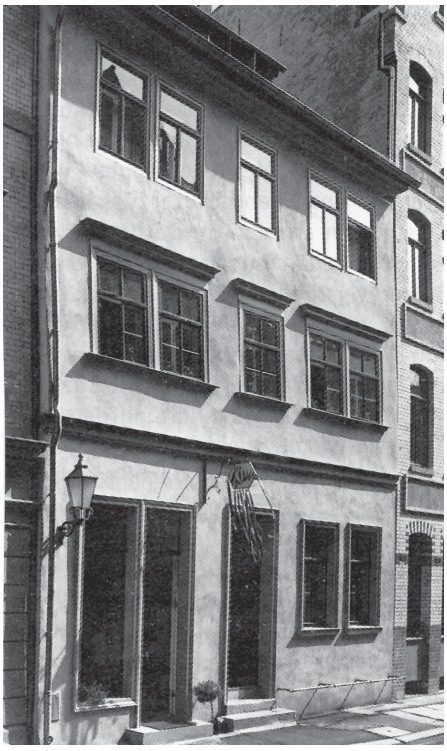


Abbildung 2:
Straßenansicht nach der Instandsetzung 1997. Foto Siegrid Schütze-Rodemann, Halle.

Abbildung 3:
Hofansicht vor der Sanierung, Winter 1996. Foto Gotthard Voß, Halle.

Abbildung 4:
Hofansicht mit neuem Anbau nach der Sanierung 1997. Foto Siegrid Schütze-Rodemann, Halle.

Abbildung 5:
Diele im 1. Obergeschoß, nach der Sanierung 1996. Foto Siegrid Schütze-Rodemann, Halle.

Thomas Becker

Erfahrungen mit der Temperierung in Italien

Abstract

Außerhalb eines Forschungszusammenhangs wurde in Italien vom Autor und zwei weiteren beteiligten Planern die Temperierung unter kommerziellen Bedingungen getestet. Anhand von drei Musterbeispielen wird die Erprobung der Temperierung erläutert. Am Palazzo Cattaneo, Ala Ponzone, in Cremona, einem Adelspalast aus dem 16. Jahrhundert, wurden die Temperierrohre wegen der Wandmalereien nicht unter dem Wandputz installiert, sondern am Sockel auf Putz angemörtelt. In der in den 1930er Jahren erbauten Kirche Sacro Cuore in Monza und einem Haus aus dem 19. Jahrhundert in Arco am Gardasee wurde die Installation unter Putz erprobt. In allen Fällen hat sich die Temperierung bewährt und als zur Trockenlegung, Konservierung und Beheizung angemessene, kostensparende, einfach zu installierende und zu bedienende Methode erwiesen, trotz anfänglicher, planerischer Unsicherheiten.

Inzwischen sind vom Autor ca. 100 weitere Projekte mit Temperieranlagen durchgeführt worden.

The Italian Experience

The author and two additional planners have tested tempering in Italy under commercial conditions without any relationship to research. The testing of tempering will be described using three examples: In the Palazzo Cattaneo – Ala Ponzone in Cremona, a noble's palace from the 16th century, the tempering pipes were attached at the wall base with mortar rather than being installed under the plaster because of murals. In the Sacro Cuore Church in Monza, built in the 1930's, and a 19th century house in Arco on Lake Garda, installation under plaster was tested. In all cases tempering proved itself and demonstrated itself simple to install and operate, cost saving, and appropriate for heating, conservation, and drying out wet walls, despite initial uncertainties with the planning.

Since then the author has carried out about 100 additional projects with tempering systems.

Dies ist ein kurzer Bericht über die Erfahrungen einer Gruppe von drei Personen[1], die, außerhalb einer jeglichen koordinierten wissenschaftlichen Initiative, also auch außerhalb des PREVENT Projektes, aus verschiedenen Tätigkeitsbereichen heraus Interesse an der Temperierung als Methode gewonnen haben. Aus den ersten gemeinsamen Versuchen ist eine systematische Zusammenarbeit geworden, die ziemlich bald auch kommerziellen Charakter annehmen mußte. Vorab die für die Temperierung relevanten Charakteristika Italiens bzw. der Po Ebene:

- extrem hohe Luftfeuchtigkeit, im Winter (Nebel) wie im Sommer (Mücken, Tropenklima)
- viele schöne alte Gebäude, ohne Keller, häufig ohne Fundamente, mit Lehmmörtel
- es gibt keine Bauphysiker (nur Professoren, die nicht bauen)

Der eingangs erwähnte Umstand, daß sich nämlich die Arbeit außerhalb eines wie auch immer finanzierten Forschungszusammenhanges abspielt, ist mit ein Grund dafür, daß für aufgewendete Zeit und professionelle Kompetenz eine

[1] Dipl. Ing. Arch. Thomas Becker, Autor dieses Textes; Dr. Ing. Daniele Fraternali, Energieberater; Carlo Vecchio, Planer von Heizungs- und Lüftungsanlagen.

andere Form der Bezahlung notwendig wurde. Das schafft nicht gerade ideale Arbeitsbedingungen, um eine alles andere als dem „anerkannten Stand der Technik“ entsprechende, geschweige denn in DIN oder äquivalenten Standards erfaßte Methode zur Mauerwerkssanierung und/oder Raumbeheizung auszuprobieren. Denn darum geht es ja: ausprobieren, dh. ein Problem erkennen und formulieren, eine Hypothese einer technischen Lösung aufstellen, sie praktisch umsetzen, feststellen, wo was warum nicht so funktioniert, wie man wollte, Verbesserungsversuche machen etc., vor allem aber den Fall nicht ausschließen, daß die ganze Anordnung von einer oder mehreren falschen Voraussetzungen ausgegangen war und nun nochmals von vorn angefangen werden muß.

Da spielt kein Kunde mit. Nicht allein in Deutschland kennt man die „Gewährleistung“; auch in Italien, wo ein solcher Terminus nur schwerlich als Hauptmerkmal der Beziehung zwischen einem Bauherrn und dem Planer seines Vertrauens denkbar wäre, erwartet jener sich von diesem doch, daß die vorgeschlagenen technischen Maßnahmen zu einem guten Prozentsatz zum projektierten Ergebnis führen. Also müssen Sicherheitsmargen eingebaut werden, welche einerseits die Kosten in die Höhe treiben, andererseits eine genaue Bestimmung der Effizienz kompromittieren: die ewige Ungewißheit, ob der Gürtel auch ohne den Hosenträger gehalten hätte. Umgekehrt – um nun auch von konkreten Fällen zu sprechen – mußten wir leider mehrfach nachträglich Hosenträger einbauen, wo wir dem Gürtel allein zuviel zugetraut hatten. Die folgende Beschreibung von drei bezeichnenden Beispielen ist daher zugleich die von nicht immer restlos erfolgreicher Anwendung der Temperierung wie der vorläufigen Unmöglichkeit, zu verbindlichen Aussagen, d. h. wissenschaftlich stichhaltigen Theorien und daraus ableitbaren technischen Regeln, zu gelangen.

1. Palazzo Cattaneo, Ala Ponzone, Cremona

Ein Adelspalast aus dem 16. Jahrhundert, der, wie das eigentlich fast immer so ist, nach und nach erhebliche Umbauten und Umgestaltungen erfuhr, die am stärksten eingreifende gegen 1800 im klassizistischen Stil. Seit etwa 20 Jahren verlassen, in ziemlich ruinösem Zustand, vor allem mit satt durchnäßten Mauern infolge kaputter Dächer, konnte sich einer der Erben, ein römischer Herzog, 1994 zu dem Entschluß durchringen, das Gebäude sehr sorgfältig und in allen Einzelheiten zu restaurieren, um es, vermittels einer eigens geschaffenen Agentur, zu den verschiedensten Zwecken und Anlässen als Herberge und Rahmen gewiß nicht alltäglicher Art in Teilen oder ganz zu vermieten. Der Architekt, Prof. Alberto Grimoldi, hat, wie in allen von ihm verantworteten denkmalpflegerischen Projekten, auch in diesem Fall die haustechnischen Anlagen vollständig aus dem Mauerwerk heraushalten wollen, gemäß seiner Auffassung, daß einerseits nicht nur der künstlerische und kunstgeschichtliche Anschauungswert eines Denkmals, sondern, und vor allem, auch die historische Substanz erhalten werden müsse, andererseits die elektrischen und hydraulischen Einbauten die wichtigste kulturelle Äußerung unserer Zeit gegenüber der vergangenen darstelle und daher der Zeitgenosse hierfür durchaus sichtbare Verantwortung auf sich zu nehmen habe. Der in Rede stehende kann als Musterfall für alle Gebäude gelten, in denen aus verschiedenen Gründen nicht nur nicht unter Putz installiert werden kann, sondern auch sonstige Möglichkeiten beschränkt sind (für die Temperierung vor allem die Umfahrung der Fensterflächen, die womöglich farbig gefaßt oder gar freskiert sind).

Wird nicht nur die Kontrolle der Feuchtigkeitsprobleme (aufsteigende und Kondensfeuchte) gewünscht, sondern auch Raumbeheizung, besteht ein Hauptproblem darin, genug Laufmeter Rohr „unterzubringen“. Eine Vorbemessung folgt der Faustregel: bei einem angenommenen Energiebedarf von 25-30W/m² sollte die Meterzahl der notwendigen verlegten Strecke von Rohrpaaren (Vorlauf und Rücklauf) etwa der Zahl der Quadratmeter der Geschoßfläche der zu beheizenden Räume entsprechen. Bei einer mittleren Raumgröße von 15 m² im normalen Wohnungsbau ist das Zahlenverhältnis zwischen den Längenmetern der die

Abbildung 1:
Ovaler Salon, nach Westen. Nur die Kuppel liegt im Außenbereich. Eine Ringleitung auf dem Architrav deckt ihren Wärmebedarf (s. Schnitt). Foto Alberto Grimoldi, Mailand.

Abbildung 2:
Palazzo Cattaneo, Ala Ponzone. Schnitt. Zeichnung Autor.

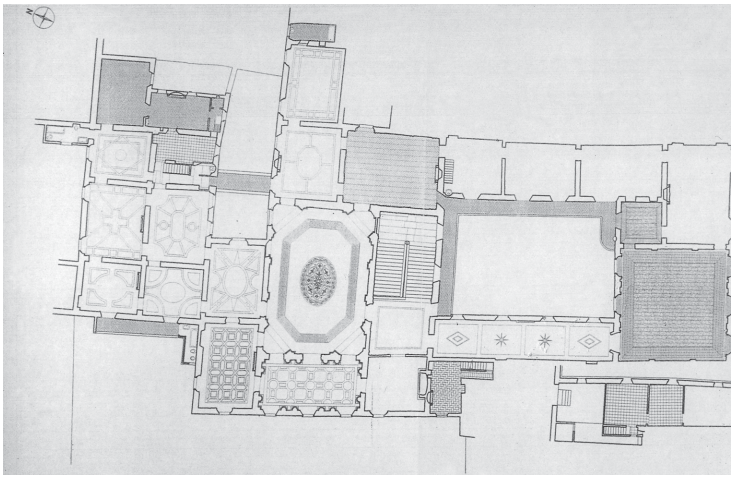


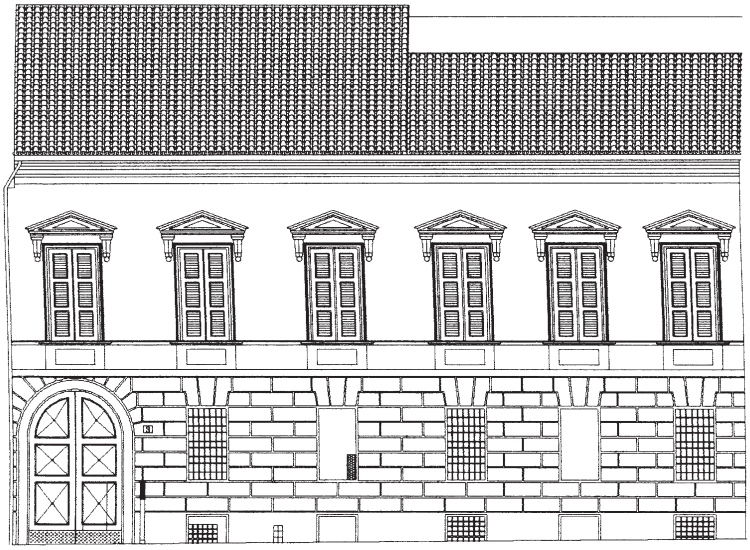
Abbildung 3:
Palazzo Cattaneo, Ala Ponzone. Grundriss Erster Stock. Zeichnung Autor.

Abbildung 5:
Loggia: Die Rohrschleife an den beiden Außenwänden des einfach verglasten Leichtbaus (Vorlauf im Mörtelprofil am Sockel, Rücklauf frei an der Brüstung geführt) genügt zur Temperierung dieses Durchgangsbereichs. Foto Alberto Grimoldi, Mailand.

Abbildung 4:
Pompejanische Galerie. Die haustechnischen Leitungen sind *auf* den Bauteilen montiert: Am Sockel der Außenwände unter einem Mörtelprofil die beiden Heizrohrschleifen, davor auf dem Boden unter einer hohlen Stuhlleiste die elektrischen Leitungen, die auch die vor der Wand montierten Standleuchten versorgen. Foto Alberto Grimoldi, Mailand.

Abbildung 6:
Palazzo Cattaneo, Ala Ponzone. Datenübersicht. Zeichnung Autor.

PALAZZO CATTANEO - ALA PONZONE



Palazzo Cattaneo – prospetto verso via Oscasali

GEBÄUDEDATEN:

a) Gebäudeteile mit Temperierungsanlage

. Grundfläche:	m^2	2698
. Durchschnittliche Raumhöhe:	m	3.6
. Volumen:	m^3	9672

b) Gebäudeteil (Zentrale Säle) mit Konvektionsheizung

. Grundfläche:	m^2	200
. Durchschnittliche Raumhöhe:	m	6.25
. Volumen:	m^3	1250

DATEN HEIZUNGSANLAGE:

a) Gebäudeteile mit Temperierungsanlage

. Gesamte Rohrlänge:	lfm	2200
. Thermische Gesamtleistung:	kW	80
. Thermische Gesamtleist. pro m^2 beheizte Grundfläche:	W/m^2	29.7
. Thermische Gesamtleist. pro m^3 beheizter Raum:	W/m^3	8.3
. Energieverbrauch nach 4 Monaten Betrieb, einschließlich Mauerwerksentfeuchtung	MWh	65
. Spezifischer durchschnittlicher Energieverbrauch pro m^2 beheizte Grundfläche:	kWh/m^2	24.1
. Spezifischer durchschnittlicher Energieverbrauch pro m^3 beheizter Raum:	kWh/m^3	6.7

b) Gebäudeteil mit Konvektionsheizung:

. Thermische Gesamtleistung:	kW	35
. Durchschnittlicher Energieverbrauch nach 4 Monaten Betrieb:	MWh	27
. Spezifischer durchschnittlicher Energieverbrauch während der Heizperiode pro m^2 beheizte Grundfläche:	kWh/m^2	135
. Spezifischer durchschnittlicher Energieverbrauch während der Heizperiode pro cbm beheizter Raum:	kWh/m^3	21.6

Räume bildenden Wandflächen und den Geschoßflächen etwa 1:1 (natürlich nicht in jedem einzelnen Raum, sondern im Gesamtdurchschnitt einer Wohnung). Die notwendige Umfahrung der Fensterleibungen und sonstiger kältestrahlender Flächen und Kanten gleicht die „gesparten" Längenmeter der nichttragenden Innenwände aus, die keinen Wärmeverlust haben und somit keinen Wärmebedarf darstellen.

Mit Zunahme der Raumgröße und Abnahme der Anzahl der einzelnen Räume sinkt aber die Zahl der verfügbaren Längenmeter erheblich unter die Geschoßfläche. Zudem verringert sich mit dem größeren Abstand der strahlenden Wände zueinander bzw. zur Raummitte die Effizienz. Es wird also unumgänglich, alle Wände abzufahren, zumal bei alten Bauten auch die meisten "nichttragenden" Wände direkt fundiert sind. Dennoch fehlen häufig, wie z. B. im Palazzo Cattaneo, noch viele Meter in der Bilanz, für deren Unterbringung uns beim besten Willen nichts mehr einfiel. Da sich diese sichtbar in einen anspruchsvollen Kontext einfügen müssen, ist die enge Zusammenarbeit einer Art zwischen Architekt und Klimaingenieur gefordert, an welche beide oft nicht gewöhnt sind. In der irrigen, unserer damaligen Unerfahrenheit geschuldeten Annahme, die Röhrchen müßten gegen die Raumluft isoliert werden, damit der Wärmefluß voll der anliegenden Wand zugute komme, hatten wir eine vom Architekten vorgeschlagene Holzabdeckung gutgeheißen: ein Denkfehler.

Fazit:

- die Raumbeheizung ist bis zu Außentemperaturen über 0°C zufriedenstellend, darunter wird's rapide ungemütlich;
- aus bisher ungeklärten Gründen konnte die aufsteigende Feuchtigkeit an bestimmten Stellen nicht blockiert werden.

Der Bauherr, lange Zeit mit Enthusiasmus und Geduld bereit, das Projekt zu fördern, gibt für die empirischen Forschung zur Klärung jener offenen Fragen nun keine Gelder mehr. Er verlangt, um seine Zwecke nicht zu gefährden, die Wiederbelebung eines bestehenden Systems von gemauerten Warmluft-Kondukten, mit deren Hilfe bei bevorstehenden Anlässen die Temperatur um einige Grad hochgezogen werden kann: der Hosenträger (da wir diese Planungsleistung nun freilich unbezahlt zu erbringen haben, müssen wir den eigenen Gürtel etwas enger schnallen).

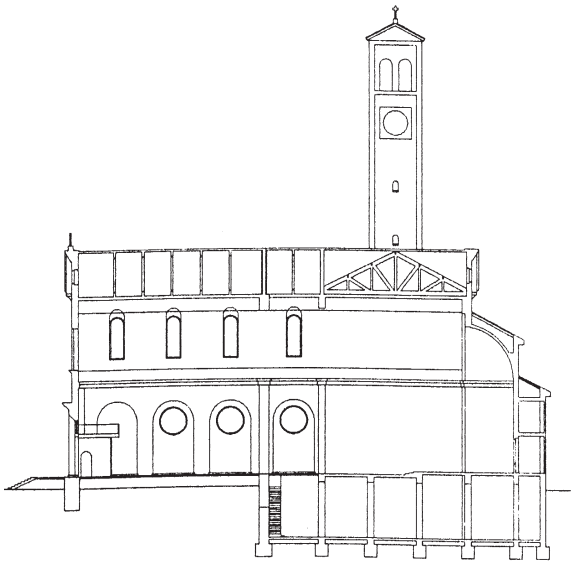
2. Die Kirche Sacro Cuore in Monza

Auch ein Musterfall, diesmal für das Gegenteil. Das Gebäude ist historisch allenfalls als Beispiel für schlechte Architektur der 30er Jahre, in Mussolinis Ägide, interessant (in jenen Jahren sind auch qualitätvolle Gebäude entstanden, aber das ist hier nicht Gegenstand). So durfte und sollte alles unter Putz gebracht werden, wir konnten in dieser Art riesigen Halle ohne Rücksicht auf nicht existente komplexe Architektur-Details, also mit niedrigen Kosten, soviel Rohr, im Sinne sowohl der Gesamtlänge als auch der Anzahl der Kreise, verlegen, wie wir für angebracht hielten.

Zuvor bestand eine Luftheizung, mit deren Kapazität von 350 kW (!) gerade mal die Hälfte der Kirchenhalle (1035 m^2; 16600 m^3) an den Wochenenden bedient wurde; diese Kirchenhälfte ist unterkellert, ein einziger riesiger Raum von 750 m^2 und 5 m Höhe, der, weil feucht und kalt, nie benutzt worden war. Die eingebaute Temperierungsanlage wird mit 70 kW gefahren und wärmt nun außer der ganzen Kirche auch noch den genannten Keller, an allen Tagen. Die Verbräuche (Methan) und Betriebskosten haben die der alten Luftheizung nicht nur relativ, sondern auch absolut nicht überschritten (rd. 5.100 €/Jahr).

Da die Anlage also von Anfang an ein voller Erfolg war, ist der Kunde, vor allem der Wirtschafter der relativ großen und ziemlich vermögenden Gemeinde, sehr zufrieden. Das Budget ist nicht nur eingehalten worden, sondern betrug überhaupt nur die Hälfte der Summe, welche aufgrund von zuvor erstellten Planungen für andere, konventionelle Heizungen veranschlagt worden war.

CHIESA SACRO CUORE, MONZA



GEBÄUDEDATEN:

a) Kirchensaal:		
. Grundfläche:	m^2	1035
. Durchschnittliche Raumhöhe:	m	16.0
. Volumen:	m^3	16586
b) Untergeschoß (Mehrzwecksaal):		
. Grundfläche:	m^2	748
. Durchschnittliche Raumhöhe:	m	5.1
. Volumen:	m^3	3817

ANLAGEDATEN:

. Gesamte Rohrlänge:	lfm	2000
. Thermische Gesamtleistung:	kW	70
. Thermische Gesamtleist. pro m^2 beheizte Grundfläche:	W/m^2	39.3
. Thermische Gesamtleistung pro cbm beheizter Raum:	W/m^3	3.4
. Spezifischer durchschnittlicher Energieverbrauch während der Heizperiode pro m^2 beheizte Grundfläche:	kWh/m^2	33.6
. Spezifischer durchschnittlicher Energieverbrauch während der Heizperiode pro cbm beheizter Raum:	kWh/m^3	2.9

Abbildung 7:
Kirche Sacro Cuore. Datenübersicht. Zeichnung Autor.

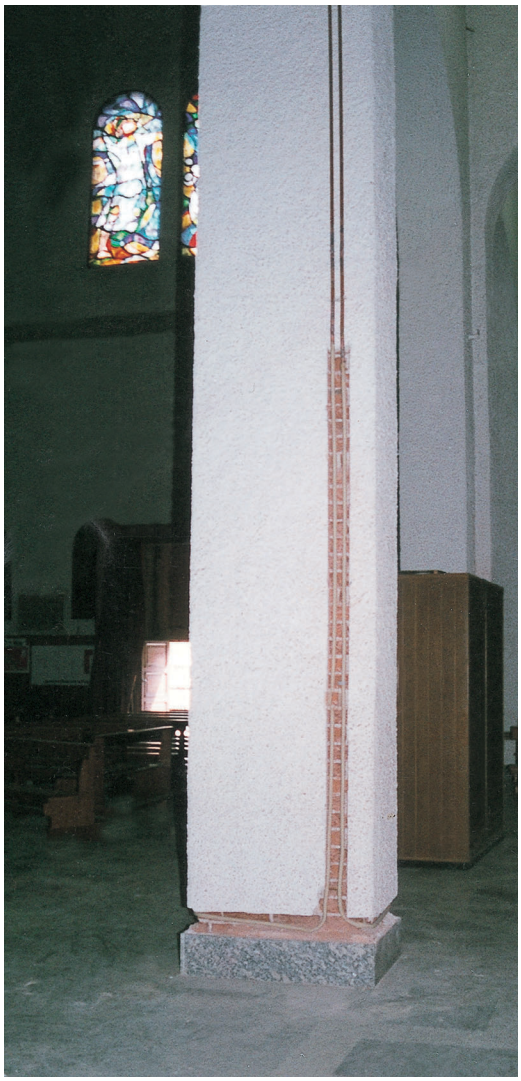
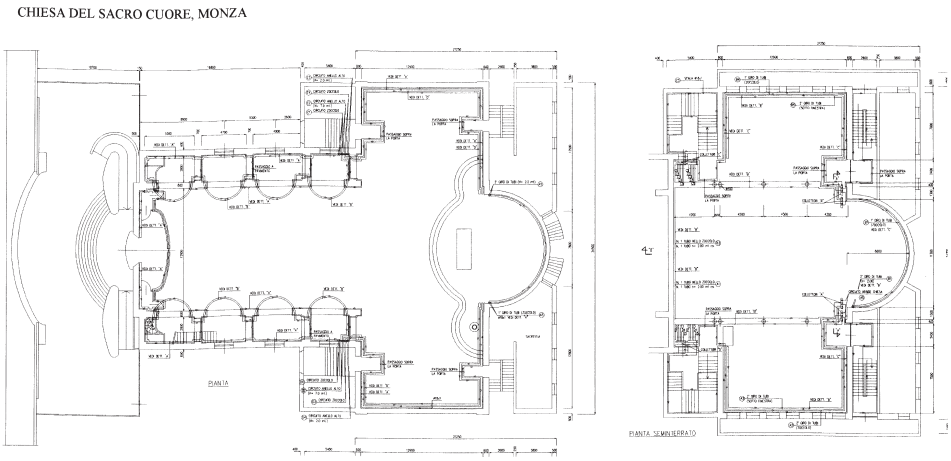


Abbildung 8a u. b:
Kirche Sacro Cuore. Einbau der Temperierung. Der Putz mußte nicht erhalten werden. Fotos Autor.

Abbildung 9:
Kirche Sacro Cuore. Temperieranlage. Planzeichnung Carlo Vecchio, Mailand.



Bei solch beeindruckenden Ergebnissen sind die Möglichkeiten, am Objekt weiterzuforschen, nicht beschnitten worden. Wir haben dies weidlich ausgenutzt, um nun über Modem mit der Steuerungszentrale verbunden, Statistiken aufstellen zu können: Was passiert, wenn von 3 nur 2 oder gar nur 1 Kreis bei welcher Außentemperatur mit welcher Vorlauftemperatur gefahren wird etc.?

Bleibt als offene Frage nur: was wäre wenn die Rohre nicht unter Putz hätten gelegt werden können…

3. Haus in Arco, Gardasee

Ein Wohnhaus aus dem vorigen Jahrhundert, Bruchsteinmauerwerk, welches nach vielen Verunstaltungen während der vergangenen Dekaden von seinem letzten Erwerber radikal saniert wurde. Hier wurden die Rohre unter Putz gelegt nicht nur, weil auf die Erhaltung etwaiger Substanz kein besonderer Wert gelegt wurde, sondern vor allem die „Unsichtbarkeit“ der Heizung gab den Ausschlag. Trotz der relativ ungünstigen Lage der Rohre unter OKF, mit Holzfußboden jedoch ohne Sockelleisten, hat die Anlage während des ersten Winters voll den Erwartungen der Nutzer entsprochen. Wir vermuten, wie auch ein weiterer Fall, ein mittelalterlich „rückgebautes“ Schlößchen in Cividale im Friaul, zu bestätigen scheint, daß die Temperierung in Steinmauerwerk sehr rasch ihre Effizienz unter Beweis stellt, da dieses meist wesentlich geringere Wassermengen enthält als Ziegelmauerwerk (womöglich gar mit Lehmmörtel, wie im Palazzo Cattaneo).

4. Schlußbetrachtung

Die drei umrissenen Beispiele sind eine Auswahl aus rund 100 inzwischen realisierten Projekten, die in mehrfacher Hinsicht jeweils einen Typ für die Wahl der Art des Einbaus repräsentieren:

Art des Einbaus
- nicht unter Putz
- unter Putz
- Bruchsteinmauerwerk

Motivation
- Baudenkmal
- low budget
- ästhetisch

Diese Gesichtspunkte sind nicht in erster Linie wissenschaftliche, sondern zum einen praktische, zum andern kommerzielle Merkmale, womit ich zum Ausgangspunkt zurückkehre: die Arbeitsbedingungen des forschenden Planers (der praktische Kriterien vornan stellen muss) und Verkäufers (der zusehen muß, daß er seine Ware los wird). Der Kunde will nicht wissenschaftlichen Erkenntniswert honorieren, sondern er will, und zwar ohne Diskussionen:

– es warm haben
– sowenig als möglich für die Erstellung ausgeben (und wenn dann auch noch ein Planungshonorar ausgewiesen wird, ist der Unwillen schon groß)
– sowenig als möglich für den Betrieb ausgeben

Außerdem will er

– beim Einbau, sofern währenddessen die Nutzung der Räume nicht unterbrochen wird, möglichst keinen Schmutz (hierin decken sich seine Interessen unter Umständen mit denen des Denkmalpflegers)
– den Betrieb regulieren, d. h. bestimmen können, in welchen Räumen wann er es lieber etwas kühler oder wärmer haben möchte (aus subjektiv-physiologisch-psychologischen Gründen heraus, welche er in der Regel, wie gesagt, nicht zu diskutieren wünscht).

Nach dem Grade, in dem diese Erwartungen erfüllt werden können, bzw. in dem der potentielle Kunde sich im vorhinein überzeugen läßt, daß sie erfüllt werden (Gewährleistung), bemißt sich der Spielraum der weiteren Erforschung. In diesem Sinn können wir behaupten, daß es bisher gar nicht so schlecht gegangen ist.

Inzwischen konnten wir ca. 100 weitere Projekte mit Temperieranlagen durchführen.

Jochen Käferhaus

Schloß Meseberg, künftiges Gästehaus der deutschen Bundesregierung, als Beispiel für Schadensprävention und Raumbeheizung durch Temperierung

Abstract

Die Messerschmitt-Stiftung, München, läßt z. Zt. Schloß Meseberg in Brandenburg restaurieren, das die deutsche Bundesregierung als Gästehaus nutzen wird. Da bei konventionellen Heizmethoden Schäden an der historischen Substanz nicht ausgeschlossen werden können, ist bei diesem Projekt geplant, neben der Revitalisierung alter Kachelöfen die Temperierung zur Feuchtesanierung und konservatorisch zuträglichen Raumbeheizung einzusetzen. Verschiedene Einbaumöglichkeiten bei z. T. hochwertiger Wandgestaltung werden beschrieben. Eine bereits installierte Temperierung im ehemaligen Gärtnerhaus (zukünftiges Baubüro) gegenüber dem Schloß wird vorgestellt.

Meseberg Palace, Future Guesthouse of the Government, an Example of Damage Prevention and Room Heating through Tempering

The Messerschmitt Foundation in Munich is currently restoring Meseberg Palace in Brandenburg which the german government will use as an guest house. Since damage to the historical substance of the building can not be ruled out with conventional heating methods, it is planned to install tempering for drying out damp walls and for conservationally appropriate room heating, in addition to revitalizing the old tiled stoves. Various installation possibilities will be discussed for the walls, part of which are covered with valuable decoration or paneling. An already installed tempering system in the previous gardener's house (future construction office) across from the palace will be presented.

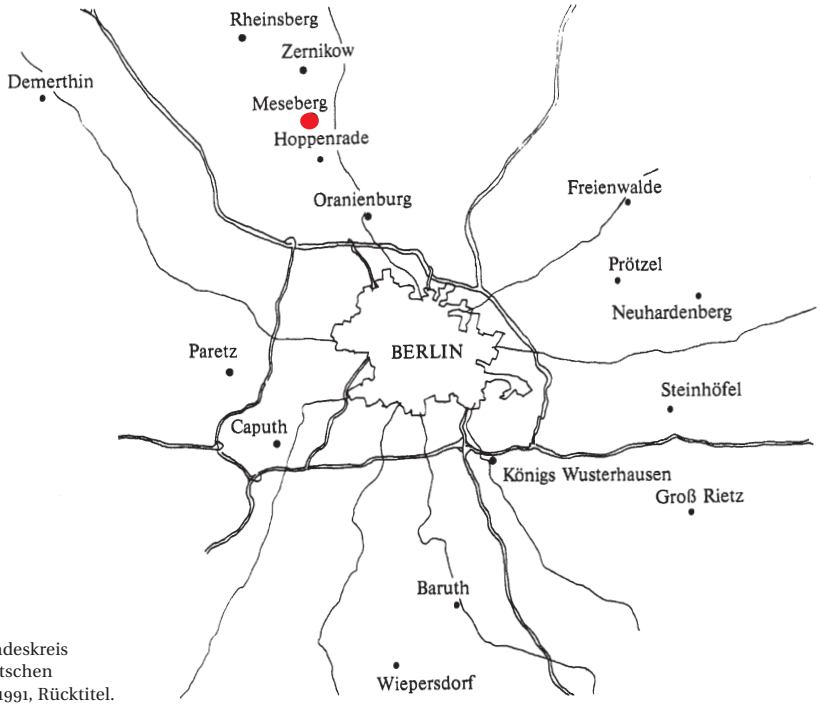


Abbildung 1:
Lageplan von Schloß Meseberg, aus: Freundeskreis Schlösser und Gärten der Mark in der Deutschen Gesellschaft e.V. (Hrsg.): Meseberg. Berlin 1991, Rücktitel.

Abbildung 2:
Schloß Meseberg, Übersichtsplan mit Nebengebäuden, Park und Grünflächen, Forschungsstand 2003. Zeichnung Uli Böhme, Berlin.

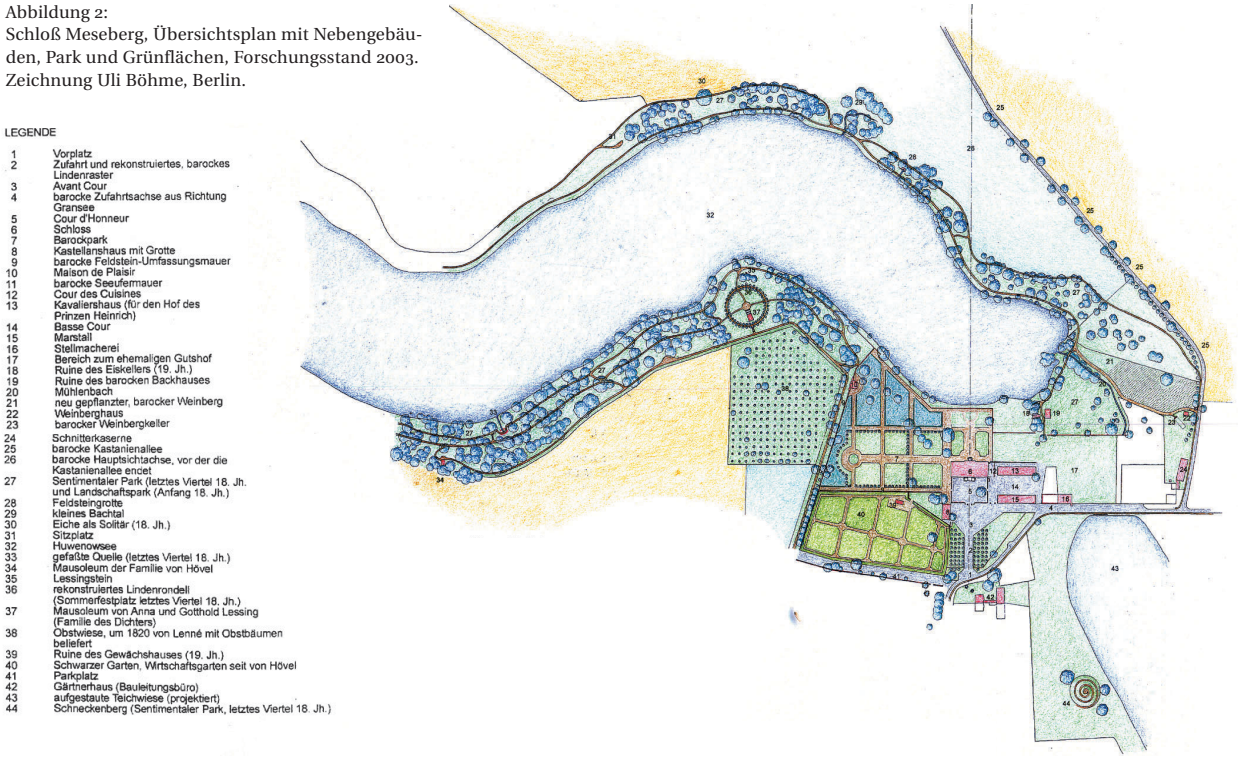


Abbildung 3:
Schloß und Ort Meseberg. Luftaufnahme Thomas Lang, Grünwald.

Abbildung 4:
Schloß Meseberg und Huwenowsee. Luftaufnahme Thomas Lang, Grünwald.

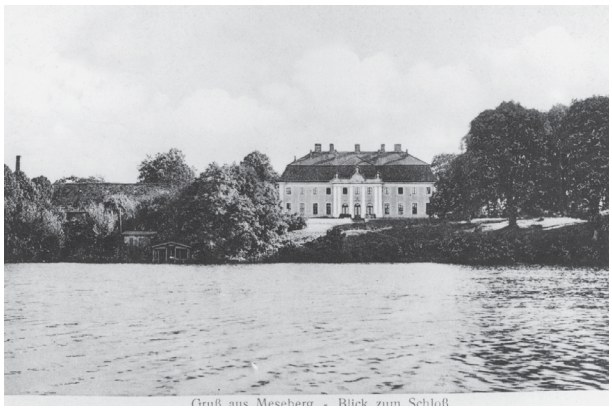


Abbildung 5:
Schloß Meseberg von der Seeseite, Postkarte aus den 1930er Jahren. Aus dem Besitz von Reinhardt Gruether, Hamburg.

Abbildung6:
Schloß Meseberg von der Eingangsseite, Zustand vor 1991. Foto Manfred Hamm, Berlin.

Abbildung 7:
Schloß Meseberg von der Eingangsseite, Zustand 2001, während der Restaurierung, mit rekonstruiertem, barocken Ehrenhof und freigelegtem und ergänzten Originalpflaster. Foto Beate Ahrens, Berlin.

Abbildung 8:
Schloß Meseberg von der Seeseite, Zustand 2001, während der Restaurierung, mit Pavillon und der in Rekonstruktion befindlichen barocken Grundstücksbegrenzungs- und Seeufermauer. Foto Uli Böhme, Berlin.

Abbildung 9:
Schloß Meseberg, Winterstimmung 2003. Foto Uli Böhme, Berlin.

Abbildung 10:
Schloß Meseberg, Eingangsrisalit. Foto Beate Ahrens, Berlin.

Meseberg liegt in Brandenburg im Norden Berlins. Park und Schloß wurden 1737 durch Hermann von Wartensleben in Auftrag gegeben, der 1723 Dorothea von der Groeben geheiratet hatte. Sie brachte das Gut Meseberg mit in die Ehe, dessen Herrenhaus bei einem großen Dorfbrand zerstört worden war. Das an dessen Stelle errichtete Barockschloß liegt am Huwenowsee und bildet mit seinem Park und den verschiedenen dazugehörigen Gebäuden wie Kavaliershaus,

Abbildung 11:
Schloß Meseberg, Risalit Seeseite. Foto Uli Böhme, Berlin.

Abbildung 12:
Schloß Meseberg, Risalit Seeseite, mittlere Vase und Monogrammkartusche. Foto Beate Ahrens, Berlin.

Abbildung 13:
Schloß Meseberg, Erdgeschoßraum, Zustand 2003. Foto Autor.

Marstall, Kastellanshaus, Stellmacherei und seinen Nutz- und Ziergärten bis hin zu Obstwiesen und einem Mausoleum ein prachtvolles Ensemble.

Der Architekt des Schlosses ist unbekannt. Gleichwohl galten das Haus und der durch den Gartenarchitekten Müntherus angelegte, terrassierte Barockgarten zur Erbauungszeit als Konkurrenz zu Rheinsberg. Die späteren zahlreichen Besitzer des Schlosses, unter ihnen Oberst Chr. L. von Kaphengst und Nachfahren von G. E. Lessing, hatten das Schloß wenig verändert. Ein Teil des Parks wurde aber mit Wirtschaftsgebäuden bebaut und zum Gutshof umgewandelt. Von der prächtigen beweglichen Innenausstattung ging seit 1945 durch Plünderung, Fremdnutzung und mangelnde Pflege fast alles verloren. Wand- und Türgliederungen, Paneele, sowie Deckenstuck und Kaminrahmungen blieben in desolatem Zustand erhalten.

1995 erwarb die von dem Flugzeugkonstrukteur Willy Messerschmitt geschaffene Messerschmitt-Stiftung, die größte private Stiftung für deutschen Denkmalschutz, den verwilderten Park und das baufällige Schloß, um beides nach denkmalpflegerischen Grundsätzen zu restaurieren. Das Gebäude soll auf denkmalgerechte Weise seiner besonderen Nutzung als Gästehaus der deutschen Bundesregierung zugeführt werden. Deswegen ist geplant, die Temperierung einzubauen.

Außen ist das Schloß vollständig, im Inneren in seinem konstruktiven Gefüge restauriert. Es beginnen nun die Arbeiten an der Innenausstattung.

Planungsüberlegungen zur Wärmeversorgung und –verteilung in Schloß Meseberg.

Schloss Meseberg als Beispiel für den Einbau einer schadenspräventiven Temperierung

Wegen der Ausstattung des Schlosses, insbesondere wegen der Holzvertäfelungen im Erdgeschoß gilt es, ein schadenspräventives System der Beheizung zu finden, das Schäden sowohl durch Austrocknung, als auch durch Kondensation verhindert, den Nutzern aber dennoch einen entsprechenden Komfort bietet und damit die sich oft widersprechenden Anforderungen der Konservierung und der Nutzung gleichzeitig erfüllt.

In Räumen mit Wandgestaltung entsteht bei allen haustechnischen Installationen wie Heizung, Elektrotechnik, Sicherheitstechnik und Brandschutz die grundsätzliche Frage, wie diese integriert werden können. Wenn man aber für die zukünftige Nutzung eine DIN-gerechte Erwärmung solcher Räume mit Raumtemperaturen um 20°C fordert, ein Betrieb vorhandener historischer Heizeinrichtungen mit Feuer jedoch ausscheidet, muß man ein Wärmeverteilsystem installieren.

Wenn die Wandverkleidungen zu ihrer Restaurierung abgenommen werden müssen, kann auf der Rohwand eine ausreichende Zahl von Heizschleifen montiert werden (mindestens je eine am Sockel und in Brüstungshöhe). Bei der Neumontage der Verkleidungen muß sichergestellt werden, daß ein durchgehender Hohlraum von ca. 2 cm entsteht, um die Temperierung der Wandflächen durch internen Warmluftauftrieb zu ermöglichen. Zur Verbesserung der Heizwirkung werden die Rohre angestrichen. Diese Situation ist in den meisten vertäfelten Erdgeschoßräumen des Schlosses gegeben. In Räumen ohne speziellen Wandbefund, wie in einigen anderen Erdgeschoßräumen, im Obergeschoß und zum großen Teil auch im Keller von Schloß Meseberg, können an Sockel und Brüstung der Außenwände zwei kleine Schlitze – ähnlich denen für Elektroleitungen – eingefräst werden. Die Abbildung 14 zeigt diese Verlegeart in Schloßhof im Marchfeld, Österreich.

Wenn zur Beheizung aber nur geringfügige Eingriffe in die Bausubstanz zugelassen werden sollen, diese Fräsung also nicht möglich ist, muß man adäquate Möglichkeiten der Führung der Rohre im Sockelbereich suchen. Neben einigen Heizrohren im Hohlraum der Holzböden, die aus konservatorischen Gründen nur der Trockenlegung und der Temperierung der Böden dienen, kommt zunächst in Frage, am Sockel der Außenwände eine kleinformatige Fußleistenheizung vorzusehen, die reversibel ist und auch Elektroleitungen aufnehmen könnte. Ein geringer Nachteil dieser Sockelleistenheizung ist der durch den

Abbildung 14:
Schloßhof, optimale Temperierverlegeart für Wohnnutzung in Räumen ohne speziellen Wandbefund. Foto Autor.

Abbildung 15:
Schloß Schönbrunn, Temperierschleife in Stucksockel. Foto Autor.

Abbildung 16:
Schloß Meseberg, Gärtnerhaus nach der Renovierung. Foto Uli Böhme, Berlin.

Abbildung 17:
Schloß Meseberg, Gärtnerhaus, vor dem Einputzen der Heizrohre. Foto Steffen Sabin, Frankfurt/Oder.

Abbildung 18:
Schloß Meseberg, Gärtnerhaus, vor dem Einputzen der Heizrohre. Foto Steffen Sabin, Frankfurt/Oder.

effizienten Warmluftauftrieb provozierte Staubtransport, der sich im Sockelbereich auf der Wandgestaltung niederschlagen kann.

Ist die Montage eines Kleinkonvektors am Sockel nicht möglich oder nicht erwünscht, kann eine offene Heizschleife in das Sockelprofil integriert, angespachtelt und in dessen Farbe gestrichen werden oder die beiden Rohre werden innerhalb eines mineralischen Profils mit entsprechender Oberflächengestaltung als Ersatz der hölzernen Fußleiste montiert. Abbildung 15 zeigt einen Wandsockel in Schloßhof, mit einem unteren Kreis zur Trockenlegung, im Zwischenboden verlegt. Darüber sieht man den Heizkreis, der vollständig in ein Gipsprofil eingebettet wurde und den Hauptteil des Wärmebedarfs des Raumes deckt. Vorbildliche Lösungen für diese Problemfälle wurden auch im Palazzo Cattaneo in Cremona, Italien, oder im Schloß Schönbrunn, Wien erarbeitet. In dessen Weissgoldzimmern konnte nur eine Heizschleife am Wandsockel montiert werden, die von den mit Heizeinsätzen ausgestatteten Kachelöfen unterstützt wird. Die Beispiele zeigen, daß es quasi für jeden Raum Möglichkeiten gibt, eine schadenspräventive Heizung mit einem Strahlungsklima als Raumwirkung einzubauen.

In Schloß Meseberg wird im fünf Meter hohen Erdgeschoß in den bis zur Decke vertäfelten Räumen, deren Vertäfelung zur Restaurierung abgenommen wird, eine Kombination dieser Verlegearten montiert: Zur Erhöhung der Heizleistung wird das Sockelprofil unter Beibehaltung der Abmessungen und der Ansicht ersetzt durch eine Anmörtelung einer Heizrohrschleife auf dem Roh-

wandsockel, auf deren Oberkante die Profilierung der Originalleiste aufgesetzt wird. In Brüstungshöhe wird eine zweite Heizschleife auf der Rohwand verlegt, mit Umwegen in den Fensterleibungen. Die Anspeisung der Heizkreise kann „unsichtbar“ und einfach vom KG aus über vorhandene Wandschlitze erfolgen. Was die Wärmeerzeugung anbelangt, so werden die Optionen einer Öl- bzw. Erdgaskesselanlage und einer Biomassezentrale (Hackschnitzel) in einem bereits wieder rekonstruierten Nebengebäude geprüft, um von dort die Gebäude des Ensembles mittels eines Nahwärmesystems zu versorgen.

Exkurs: Durchgeführte Temperierung im ehemaligen Gärtnerhaus (zukünftiges Baubüro) in der Meseberger Dorfstrasse 20 gegenüber dem Schloß

Das Gärtnerhaus ist ein Backsteinbau aus dem Jahre 1893, unterkellert, mit ausgebautem Dachgeschoß und schmalen Ziergiebeln. Die Abbildung 16 zeigt die Außenansicht, die Abbildungen 17 und 18 zwei Innenansichten mit verlegten Temperierschleifen vor dem Einputzen. Die Raumtemperaturregelung erfolgt über Thermostatventile, die in die jeweiligen Heizkreise integriert sind, die Vorlauftemperaturregelung über einen Außenfühler. Die Wärmeerzeugung geschah zunächst provisorisch mit dem vom Voreigentümer eingebauten Ölkessel. Inzwischen erfolgte die Umstellung auf eine bivalente Anlage, bestehend aus einem Festholzvergaserkessel und einer Flüssiggastherme im Keller der gegenüberliegenden rekonstruierten Scheune. Die Wärmeversorgung des Gärtnerhauses erfolgt nun über eine Nahwärmeleitung, so daß die Kellerräume des Wohnhauses nicht mit Haustechnik belastet sind.

Diese Form des konservatorischen Heizens ist gerade in Fällen angebracht, wenn man wie hier erdberührte Bereiche vor aufsteigender Feuchte und Bereiche mit – aus heutiger Sicht – ungenügender Dämmfähigkeit vor Kondensat schützen muß, dies auf konventionellem Wege jedoch nur mit großem technischen und finanziellen Aufwand erreichen würde. So gibt es auch keine einfachere Möglichkeit, Balkenköpfe in Mauerlöchern vor Durchfeuchtung und Pilzbefall zu schützen.

Gesundheit durch thermische Kondensatprävention
Optimales Gebäudeklima für Kulturgut in Museen und Denkmalpflege*

* Aktualisierte Fassung des Beitrages „Staub- und Kondensatprävention" anläßlich der 14. Jahrestagung des Österreichischen Restauratorenverbandes 1999, in: Mitteilungen des Österreichischen Restauratorenverbandes, Bd. 7, Wien 2000.

Abstract

Bislang zu wenig erkannt ist, daß vor allem drei Faktoren Kulturgüter massiv schädigen und auch für den Menschen ein ungesundes Ambiente erzeugen: Saisonal wiederkehrende Kondensation an der Gebäudehülle, Kapillarkondensation an wandnahen Objekten und Staub mit biologischen Partikeln, insbesondere Schimmelsporen. So weist einerseits Insektenbefall auf hohe lokale Feuchte hin, während Bohrmehl und Ausscheidungen wiederum Nährboden für Schimmel sind. Durch veraltete Heizungs- und Klimatisierungskonzepte und durch falschen Umgang mit der Technik ist gerade im Museumsbereich die bereits bauphysikalisch unhaltbare Situation zu einer beträchtlichen Gesundheitsgefährdung angewachsen, die man wegen der auf dem Luftwege verteilten Allergene, vor allem der lungengängigen Schimmelsporen, dringend aufzeigen muß.

Der Beitrag hat vier Schwerpunkte:

1. die Darstellung von Schäden infolge erhöhter Materialfeuchte und ihrer Ursache, der Kondensation an der Gebäudehülle, an deren Ausstattungsschichten und am außenwandnahen mobilen Kulturgut
2. die Darstellung der Staubproblematik anhand alter und neuer Methoden der Wärmeverteilung, der Staubumwälzung durch falsches Heizen, der Gefahr der Sporenverteilung durch Klimaanlagen
3. die Bekämpfung biogenen Befalls an Kulturgütern mittels Gasen und anderen Methoden, wobei giftfreien Methoden der Vorzug zu geben ist
4. Vorgaben für natürliche und künstliche Klimatisierung ohne Bumerangeffekt

Sanierung und Prävention durch Temperierung der Gebäudehülle, um auf technisch einfachem Wege ein gesundes, homogenes und stabiles Raumklima im gesamten Gebäude herzustellen, bisherige Schadensabläufe anzuhalten und den Problemkreislauf von Kondensation, Schimmel und Staub auf Dauer zu beseitigen.

Health trough Prevention of Condensation.
Optimal Building Climate for Preserving Cultural Artifacts and Historical Buildings.

It has been too little recognized that, above all, three factors cause massive damage to cultural artifacts and also create an unhealthy atmosphere for people: seasonally reoccurring condensation on the building shell, capillary condensation on objects near walls, and dust with biological particles, in particular mildew spores. On one hand insect infestation is a sign of high local humidity; on the other hand bore dust and excrement provide a breeding ground for mildew. Through outdated heating and climate control concepts and through false use of technology in museums this unacceptable situation has grown to be a considerable health hazard in particular in the area of museums. Allergens which are distributed by air circulation, above all mildew spores, which can enter the lungs, must be pointed out.

Die Gesamtfassung des Beitrags befindet sich auf der beiliegenden CD. Die hier gedruckte Version ist gekürzt, deshalb ergeben sich Auslassungen im Text, Literatur und Anmerkungen sowie in der Abbildungsfolge. Auslassungen im Text sind mit [...] gekennzeichnet, ausgelassene Abbildungen ergeben sich durch Sprünge bzw. Lücken in der Abbildungsnummerierung. Das Gleiche gilt für Anmerkungen und Literaturhinweise.

The contribution has four major points:

1. discussion of the damages due to raised humidity in materials and its cause: condensation on the building shell, on its finished surfaces, and on movable cultural artifacts near outer walls
2. discussion of the dust problem with old and new heat distribution methods; dust circulation due to incorrect heating, the danger of spore distribution through air conditioning systems
3. fighting pests on biogene infested cultural artifacts using gases and other methods, for which poison-free methods should be favored
4. requirements for natural and artificial climate control without the boomerang effect

restoration and prevention through tempering the building shell in order to create a sane, homogeneous, stable room climate, to stop previous damage processes, and to permanently stop the vicious circle of condensation, mildew, and dust.

Staub, Schimmel und Kondensation schädigen nicht nur Kulturgut, sondern auch die Gesundheit der Menschen. Kondensation an der Gebäudehülle, Kapillarkondensation in außenwandnahen Feinstrukturen und Staubumwälzung im Raum sind Schadensfaktoren, die durch falsche Wärmeverteilung und Klimatisierung entstehen und insbesondere wegen der dabei verstärkt in die Atemluft eingebrachten Schimmelsporen auch zu einer beträchtlichen Gesundheitsbelastung geworden sind. Ziel dieses Beitrags ist, die Kondensat-, Schimmel- und Staubproblematik an Beispielen von Kunst- und Kulturgut darzustellen und praxisbezogene konservatorische Vorgaben und technische Lösungen für Sanierung und Prävention anzubieten, die die Schadensursachen ohne Bumerangeffekt dauerhaft beseitigen.

Der Museumsstaub enthält Allergene

Staub ist nicht gleich Staub, sondern je nach Herkunft und Genese von unterschiedlicher Zusammensetzung. Schmutz und Staub enthalten neben jahreszeitlich bedingten Pollen immer Schimmelpilzsporen und Bakterien, also Allergene[1]. Schimmelpilzsporen bilden jedoch „den zahlenmäßig bedeutendsten Anteil biologischer Partikel in der Luft. In unseren Breiten stellen sie 96% der Jahressumme biologischer Partikel des Aeroplanktons, während Pollen nur 2% ausmachen". Schimmelpilze zählen daher „zu den häufigsten Auslösern infektiöser oder allergisch-immunologischer Erkrankungen, weit seltener sind andere Infektionserreger bzw. Allergene Auslöser wie Viren und Bakterien, Pollen und Staubmilben etc.", eine Tatsache, die kaum bekannt ist[2]. Menschen, die längere Zeit über Atmung oder Berührung mit Schimmelpilzen und Bakterien in Kontakt gekommen sind, können Sensibilisierungen, Allergien oder Mykosen entwickeln. Humanpathogene Pilze wie Aspergillus fumigatus oder bestimmte Arten von Rhizopus oder Mucor haben schwerste Krankheiten zur Folge, oft mit tödlichem Ausgang.

Für Atemorgane besonders gefährlich ist der unsichtbare Schwebstaub in der Luft, der neben Pollen und Feinstäuben wie Rauch, Ruß, Quarz, Asbest, Metall- und Talkpartikeln verschiedene Arten von Mikroorganismen wie Schimmelpilzsporen enthält[3]. Bei diesem Schwebstaub handelt es sich um kleinste Partikel von 0,5–10 Mikron, eine Teilchengröße, die eine besonders hohe Lungengängigkeit hat und von herkömmlichen Filteranlagen, Staubfiltern und von Staubsaugern ohne eingebaute Hepa-, Ultra-, oder Absolutfilter nicht ausgefiltert wird. Nachdem in Archiven und Restaurierwerkstätten Archivmaterial bzw. Museumsobjekte mit Pilz- und Bakterienbefall desinfiziert, gereinigt, konserviert und restauriert werden, sind Konservatoren und Restauratoren eine unmittelbar exponierte und potentiell gefährdete Gruppe[4].

1 Alexander Frank, Über intramurale Pilzsporenbelastung der Luft und deren medizinische Folgen, in: Schimmelbefall in Wohnbauten: Ursachen – Folgen – Gegenmaßnahmen. Internationales Symposium Innsbruck/Igls 11.-12.01.1990, Hrsg. Nils V. Kusterle u. Wolfgang Kusterle, Institut für Baustofflehre und Materialprüfung, Universität Innsbruck.

2 Gerhard Schultze-Werninghaus, Atemwegs- und Lungenerkrankungen durch Schimmelpilze, in: Schimmelbefall in Wohnbauten: Ursachen – Folgen – Gegenmaßnahmen (wie Anm.1).

3 Peter Trifonoff, Merkblatt zum Pilzbefall in RLT-Anlagen, Gesundheitsrisiken, Ursachen und gesundheitsschädigende Auswirkungen von Pilzbelastungen. Zusammenfassung zu beziehen bei Peter Trifonoff, Umweltanalytiker, Fa. Co-Plan, A-2344 Maria Enzersdorf.

4 Peter Neuhauser, Martin Schatta, Gesundheitsvorsorge in Archiven, Bericht über die mikrobiologischen und allergologischen Untersuchungen von Archivalien und Archivräumen, in: Der Archivar, Jg. 17, 1994, Heft 2, S. 120 –128. Indrid Hödl, Selbstschutz für Archivmitarbeiter, in: Restauratorenblätter, Bd. 14, Papier und Graphik, Wien 1994, S. 73–79.

Kondensation als Hauptursache des Verfalls

Museen und Depots beinhalten Objekte ganz unterschiedlicher Erhaltung und Provenienz. In ihrer staubbedeckten Oberfläche können Gemälde einen Pilz- und Bakterienrasen eingebettet haben. Mit Stärkekleister doublierte Gemälde können intensiv an der Rückseite und im Inneren von Brotkäfern befallen sein, ohne daß dies an der Vorderseite bemerkbar sein muß (Abb. 1a + 1b). Neben kontaminierten Gemälden stehen im Depot oft völlig intakte, die in Nahkontakt damit sekundär befallen werden können[5]. Daß Objekte im Museum oft schlecht erhalten sind, verdanken sie häufig schädigenden Bedingungen am Ort der früheren Verwendung, z. B. in Kirchen und Schlössern, wo sie über Jahrzehnte oder Jahrhunderte dem Klimawandel und der Kondensation im Gebäude ausgesetzt waren. Organische Bestandteile der Ausstattung wie Holz, Leinwand, Malschichten u. a. nahmen die höhere Feuchte auf, die durch Kondensation an kalten Außenwänden oder in der Nähe von ihnen gegeben war. Dadurch kam es allmählich zu einer Vorschädigung der wand- oder bodennahen Gegenstände und häufig zu einem Primärbefall durch Mikroorganismen[6].

Kondensat und vor allem das unsichtbare Kapillarkondensat bewirkt eine Erhöhung der Materialfeuchte, die wiederum den Vorabbau durch holzzerstörende Pilze begünstigt. Eine Vorschädigung des Holzes durch Pilze zieht dann Insektenbefall nach sich. Diese Schadorganismen können das Holz in der Folge bis zur Strukturauflösung schädigen. In der Stiftskirche Melk wurde aus der Zeit vor der Gesamtrestaurierung berichtet, daß einer der Engel durch resonatorische Erschütterung während des Orgelspieles vom Altar brach und in seine Bestandteile, die biogen bereits stark abgebaut waren, zerfiel. Insektenbefall kann unter Farbfassungen oder Vergoldungen lange verborgen bleiben, bis er die Oberfläche erfaßt, wie an den Putten von Peter Widerin um 1720 aus der nordseitigen Epiphaniekapelle der Stiftskirche zu sehen ist (Abb. 2a). Wie die Abbildung der Girlande zeigt, ist oft nur Holzmehl übrig geblieben, das von der Fassung zusammengehalten wird (Abb. 2b).

5 Maria Ranacher, Mikroorganismen- und Schadinsektenbefall im Depot: Ursachen, Sanierung und Gesundheitsschutz, in: Das Depot, der andere Teil der Sammlung, 9. Bayerischer Museumstag 1997, S. 53–71, Landesstelle für Nichtstaatliche Museen beim Bayerischen Landesamt für Denkmalpflege (Hrsg.), München 1998.

6 Maria Ranacher, Biogene Schädigung von Museumsgut als Niederschlag inadäquater Klimaverhältnisse: Wege der Sanierung als Wege der Gesundung, in: Mikroorganismen und biogene Schadensprozesse in der Kulturguterhaltung: Problemdefinitionen und Lösungsmöglichkeiten. Beiträge des Eurocare-Workshops vom 23.10.1995, S. 77–88. Die Publikation ist über den Österreichischen Restauratorenverband in Kopie erhältlich.

Sick Building Syndrom auch in historischen Gebäuden? [...]

Holzmehl, Pilzsporen, Bakterien und Geißeltierchen als Gesundheitsgefährdung [...]

Von Mikroorganismen befallene Objekte bzw. Gemälde mit dichtem Schimmelbefall an Vorder- wie Rückseite senden keimfähige Sporen aus, die sich aufgrund ihrer minimalen Partikelgröße von 0,3-1 Mikron im unsichtbaren Schwebstaub der Luft anreichern, bei ruhender Luft zu Boden sinken bzw. sich an Objekten und Ausstattung ablagern (Abb. 4a + 4b).

Es gibt aber auch raumgenerierte Mikroorganismen wie Schimmelpilze, die an Wänden und Decken vorkommen, an denen immer wieder Wasserdampf kondensiert. Für ihr Auftreten genügt bereits Staub, der nur wenige Keime enthält. Raumgenerierte Schimmelpilze sind meist eine Auswirkung der so genannten „Kalte-Wand-Problematik", deren Hauptkriterium die Differenz zwischen den Oberflächentemperaturen der kälteren Gebäudehülle und der wärmeren Raumluft ist, was bei luftumwälzenden Heizungen oder beim Betrieb von Klimaanlagen der Fall ist[9]. Die Folge dieses Temperaturunterschiedes, die durch zusätzliche Luftbefeuchtung dann noch verstärkt wird, ist immer neue Kondensation an kalten Bauteilflächen und Ecksituationen und an den ihnen nahen Objekten.

9 Maria Ranacher, Bilder an kalten Wänden, Oberflächentemperaturmessungen an Wänden und Bildern als Neuansatz für konservatorische Klimatisierung, in: Restauratorenblätter Bd. 15, Schutz und Pflege von Baudenkmälern, IIC-Austrian Group, Wien 1995, S. 147–166.

Kondensationsfolgen an Museumsgut:
Pilzbefall und Strukturauflösung, Trübungen und Deformationen

Konventionell beheizte wie unbeheizte Gebäude reagieren auf den saisonalen Temperaturwechsel mit Taupunktunterschreitung und Kondensation an den Oberflächen von Mauerwerk und Putz. Gefährlicher ist die verdeckte Kondensation an organischen Materialien im Mauerwerk. Das sind Bauhölzer wie die Auflager von Dachstühlen, Decken oder Böden aus Holz und andere verborgene Holzteile, die bei wiederkehrender Kondensation im Gebäude von Pilzen befallen werden. Ein Beispiel dafür ist die Decke bzw. der Boden des Festsaales von

Abbildung 3a:
Leinwandgemälde Detail, KHM GG-Depot. Das undoublierte Leinwandgemälde ist frei geblieben von Insektenbefall, der Keilrahmen hingegen weist Anobienbefall auf. Aufnahme Zustand 1994, Maria Ranacher, Wien.

Abbildung 3b:
Das Leinwandgemälde „Bildnis eines Herren mit Goldenes-Vlies-Kette“. Das im 19. Jh. mit Stärkekleister doubliert wies 1995 intensiven Brotkäferbefall auf, daß Bildränder fehlen. Fotoarchiv KHM, Wien.

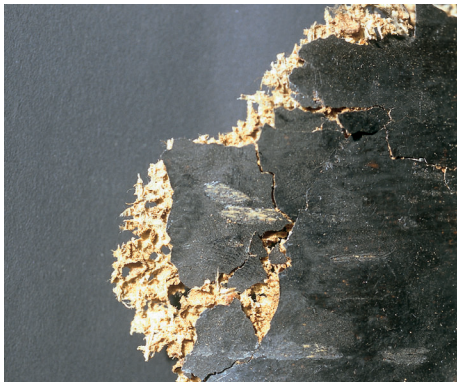


Abbildung 4a:
„Bildnis eines Herrn mit Golden Vlies Kette“. Detail der Bildseite mit biogenem Befall durch Brotkäfer und Schimmel, Zustand 1995, Fotoarchiv BDA, Wien.

Abbildung 4b:
Rückseite eines Gemäldes mit Pilzbefall, KHM Depot, Zustand 1995. Aufnahme Gerhard Walde, Wien.

Schloß Schleißheim bei München (Abb. 5a + 5b). Unter dem Marmorfußboden sind die Dippelbäume von Braunfäule angegriffen, wie die Abbildung von 1991 zeigt. Die Decke der Sala terrena unmittelbar darunter zeigte Stellen mit dunklem Pilzbefall. Beide Zeichen, die innere Zersetzung des Holzes und der Pilzbefall an der Wandmalerei sind eindeutige Beweise intensiver Kondensation. An den Gemälden der Bayerischen Staatsgemäldesammlungen im Schloss Schleißheim waren bereits im 19. Jh. weißliche Trübungen aufgetreten. Max von Pettenkofer hat dieses Phänomen 1863 als „Krepierung“ diagnostiziert (Bildung eines feinen lichtstreuenden Sprungnetzes im Firnis) und das wiederkehrende Auftreten hoher relativer Raumluftfeuchte dafür verantwortlich gemacht[10]. Wegen dieser fortbestehenden Klimasituation ließ die Leitung der Pinakothek die Gemälde vor einigen Jahren zurück nach München holen. An der hohen Luftfeuchte im Gebäude änderte sich seither nichts Wesentliches, da die Ursache, die zu geringe Temperatur der Aussenwände und Hängeflächen in Zeiten mit hoher absoluter Außenluftfeuchte, leider nicht beseitigt wurde.

Weitere Anzeichen von Kondensation im Gebäude sind beispielsweise rostende Eisenteile im Gebäude und Wasserfleckenbildung z. B. an textilen Wandbespannungen. Sehr oft ist in Räumen mit intensiver Kondensation ein muffiger und pilzbelasteter Geruch wahrnehmbar. Doch das sind noch nicht alle Beweise. Die Kondensationsproblematik konnte ich auch an tausenden Gemälden im Depot der Gemäldegalerie des KHM feststellen, als ich von 1993 bis 1996

[10] Max von Pettenkofer, Über die Ursache des Verderbens der Ölgemälde in der Galerie in Schleißheim, und, publiziert von Sybille Schmidt, Das Pettenkofersche Regenerationsverfahren, in: Zeitschrift für Kunsttechnologie Jg. 47, 1990, Heft 1, im Anhang S. 63–66. Max von Pettenkofer, Über Ölfarbe und Konservierung der Gemäldegalerien durch das Regenerationsverfahren, Braunschweig 1870.

Abbildung 5a:
Schloß Schleißheim bei München, Festsaal, Marmorboden mit Unterboden (18.Jh.). Die Dippelbäume und Bodenbretter sind durch Fäulnispilze angegriffen. Zustand 1991. Aufnahme Autorin.

Abbildung 5b:
Bauholz mit Würfelfäule aus der technologischen Mustersammlung der Abteilung für Konservierung und Restaurierung von Denkmalen des Bundesdenkmalamtes Wien. Detail, Aufnahme 1980, Autorin.

mit Präventions- und Konservierungsmaßnahmen und der systematischen Bekämpfung von Schadinsekten und Mikroorganismen befaßt war. Gemälde auf Leinwand zeigten immer wieder ganz ähnliche Schädigungen, vor allem Craqueluren und die dann folgende Schüsselbildung der Malschichten. Diese Schüsseln sind Deformationen, die ausschließlich auf die Einlagerung von Wasserdampfmolekülen an Schichtgrenzen zurückzuführen sind. [...]

Durch falsches Heizen und ungereinigte Klimaanlagen werden Pilzsporen verteilt

[...] Raumlufttechnische Anlagen ohne Hepafilter sind im Museum äußerst problematisch, solange man über den Inhalt der verteilten, potentiell gifthaltigen Luft wenig oder nichts weiß. Werden in einer RLT-Anlage krankheitserregende Keime nachgewiesen, sind entweder sofort Hepafilter zu montieren, oder es ist die Anlage fachgerecht zu reinigen oder gar deren Stilllegung zu veranlassen. Alles andere ist unverantwortlich!

Die Einhaltung der in Objektnähe gemessenen konservatorischen Eckwerte von 45% rF im Winter und höchstens 65% rF im Sommer ist essentiell, wenn wir erkennen, daß beim Myzel unter 65% rF der Wachstumsstillstand eintritt und bei 55% die Enzyme austrocknen. Klimamessung und Klimakontrolle sind also eminent wichtig, die Montage von guten Feuchtigkeitssensoren ist erforderlich. Viele Pilze vermehren sich exponentiell bei Temperaturen über 18°C und einer relativen Feuchtigkeit von über 80%, in der die Sporen keimen und das Myzel sich auf dem Nährboden rasch ausbreitet[12].

Die Sporenkonzentration bestimmt die Luftqualität

Das Argument, daß Pilzsporen ubiquitär seien, also überall in der Natur vorkämen und man präventiv nicht viel tun könne, zeigt einen Mangel an Detailwissen. Es hängt von der Konzentration der Sporen, d. h. der Sporenzahl pro m^3 ab, ob eine gesundheitliche Beeinträchtigung für Menschen gegeben ist. Auch ist je nach Stärke oder Schwäche des Immunsystems die physische Resistenz von Mensch zu Mensch verschieden. Zur Objektivierung der Belastung in der Luft dient ein Sporensampler, mit dessen Hilfe die Anzahl der Luftkeime leicht feststellbar ist. Der erste Wert gibt Auskunft über den Sporengehalt bei bewegter, der zweite bei ruhender Luft. Peter Trifonoff sagt zu Pilzbelastungen im Innenraum

[12] Michael Pantke, Waltraud Kerner-Gang, Hygiene am Arbeitsplatz – Bakterien und Schimmelpilze, Mykosen, Mykoallergosen, Hygiene-Maßnahmen, in: Maltechnik-Restauro 1/1988.

in seinem Merkblatt für Klimaanlagen: „Eine einzige Schimmelkultur kann 20 Millionen Luftsporen in der Minute bilden“ und „100 Sporen von Alternaria oder 3000 Sporen von Cladosporium Herbarum können einen Anfall von allergischem Asthma oder von Rhinitis auslösen”.

Diese Situation der Kontamination ist dem leitenden Personal in den Museen zu wenig bewußt, obwohl es für Objekterhaltung und Arbeitnehmerschutz verantwortlich ist. [...]

Vorbild Steiermärkisches Landesarchiv in Graz

Daß es einen Weg der Vernunft und der praktizierten Prävention gibt, zeigt das Steiermärkische Landesarchiv seit Jahren, weil hier Direktion und Belegschaft das von der Papierrestauratorin und Leiterin der Restaurierwerkstätten Ingrid Hödl zusammen mit Hygienikern und Ärzten entwickelte „Hygienepaket“ lückenlos durchführen[13]. Offensichtlich hat man in Graz erkannt, daß ein Archiv, ein Museum nur gewinnen kann, wenn hygienisch und gesundheitlich unbedenkliche Arbeitsbedingungen für alle geschaffen werden und niemand durch das von Schimmelpilzen und Bakterien befallene Museums- oder Archivgut gesundheitlich zu Schaden kommt. Die Vorgaben der Restauratorin wurden auch für den Neubau des Steiermärkischen Landesarchivs voll erfüllt: Dort ist jeder

13 Ingrid Hödl, Das 10-Punkte-Hygienepaket des Steiermärkischen Landesarchivs, in: Atlanti, International Institute on Archival Science, Nr. 6, Maribor 1996. Ingrid Hödl, Selbstschutz für Archivmitarbeiter, in: Restauratorenblätter Bd.14, IIC Österreich, Wien 1994, S. 73–79.

Abbildung 8a:
P. P. Rubens, „Ildefonsoaltar“ 1630/32, Kunsthistorisches Museum, Saal XIII. Gemäldeoberfläche rechts mit Anflugstaub, und kondensatgebundenem Feinstaub, Zustand während der Oberflächenreinigung Bildpflege 1990. Aufnahme Autorin.

Abbildung 8b:
Josef Hoffmann, „Charakterbild des Carbon“ 1884, Naturhistorisches Museum, Saal X, im Zustand 1999 während der Reinigung, rechts Staubablagerungen, Zustand 2002. Aufnahme Autorin.

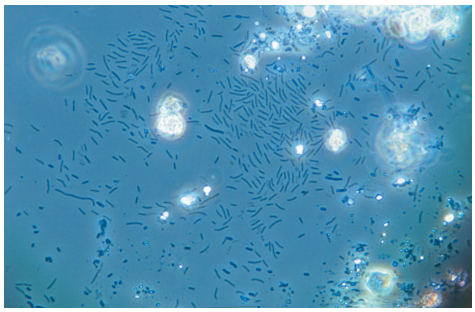


Abbildung 9a:
Staubprobe vom Gebäudesims im Stiegenaufgang, 2. Stock des Naturhistorischen Museums. Staub mit mineralischen Teilchen, Pilzsporen, Bakterien und Kokken, Vergrößerung, Zustand 2002. Mikroskopische Untersuchung Walter Url, Wien.

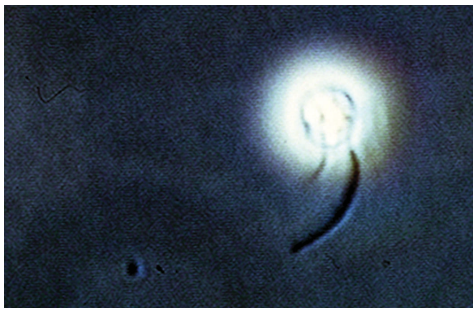


Abbildung 9b:
Staubprobe vom Gebäudesims im Stiegenaufgang, 2. Stock des Naturhistorischen Museums lebendem Geißeltierchen, Vergrößerung. Mikroskopische Untersuchung Walter Url, Wien.

Archiv- und Arbeitsraum mit Hepa-Partikelfiltern oder reinen Werkbänken ausgestattet, die bei der Arbeit mit befallenem Archivgut durch Ausfilterung aller biogenen und allergenen Partikel eine unbedenkliche Luftqualität gewährleisten.

Gemälde und Verstaubung durch Luftumwälzung [...]

In den Schausälen der Gemäldegalerie des KHM ist eine bauphysikalisch sehr ungünstige Wärmeverteilung seit der Einrichtung der Warmwasserzentralheizung gegeben. Sowohl die Raumheizung wie die Luftbefeuchtung erfolgten vor Sanierung der Gemäldegalerie (1990–1994) von der Raummitte her durch Heizkörper und darauf liegenden Verdunstungswannen, wobei die stark erwärmten und befeuchteten Luftströme zum kalten Lichtdach aufstiegen, dort abkühlten und seitlich an den Wänden herunter fielen. Bei diesem raumzentralen Wärmeangebot blieben die Außenwände und die oberen Drittel der inneren Trennwände kalt und nahmen Feuchtigkeit auf, so daß sich der mitgeführte Staub beim Auftreffen des Luftstroms vor allem im oberen Drittel der Wände ablagerte, ein Teil aber auch darunter in der Hängeebene der Gemälde. Dabei zeichneten sich die Rahmenränder der Bilder als Staubsilhouetten auf der Wandbespannung ab (Abb. 10a + 10b).

Durch die Sanierung hat sich diese Situation nicht grundlegend verändert, da entgegen dem Vorschlag der Autorin, die Außenwände durch eine Temperieranlage thermisch zu versorgen, bedauerlicherweise das veraltete Prinzip der Wärmeverteilung von der Raummitte aus beibehalten wurde. Nur die Leitungen und die Heizkörper wurden erneuert und die Regelungstechnik modernisiert. Die Heizwassertemperatur ist jetzt geringer, womit sich naturgemäß Thermik und Staubtransport verringerten. Außerdem geschieht die Luftbefeuchtung heute durch die Luftwäscher der Lüftung, so daß die eingeblasene Luft gereinigt ist. Die Luftgeschwindigkeit der Belüftung scheint allerdings zu hoch zu sein, da sich bei längerem Aufenthalt in der Gemäldegalerie ein leichtes Frösteln einstellt.

[...]

Um die Tragweite und die hohe Wirksamkeit falschen Heizens und belasteter Atemluft zu verstehen, darf man nicht nur die Wandtemperaturen untereinander vergleichen, die sich z. B. bei Heizkörperheizung maximal um 6 – 10 Grad unterscheiden, sondern muß diese mit der Oberflächentemperatur einer Heizkörperrippe oder eines Konvektorschachts (z. B. 60°C) vergleichen. Daß diese Heizflächen also über 40°C heißer als die Wände sind, erklärt erst den starken

Abbildung 10a:
Einblick in Saal I der Gemäldegalerie des Kunsthistorischen Museums, Zustand vor Sanierung 1990: Die Staubablagerungen an Wänden und Bildern zeigen den Verlauf Staub führender Luftströme und den Staubhorizont im oberen Drittel. Aufnahme 1990, Margarete Neundlinger, Wien.

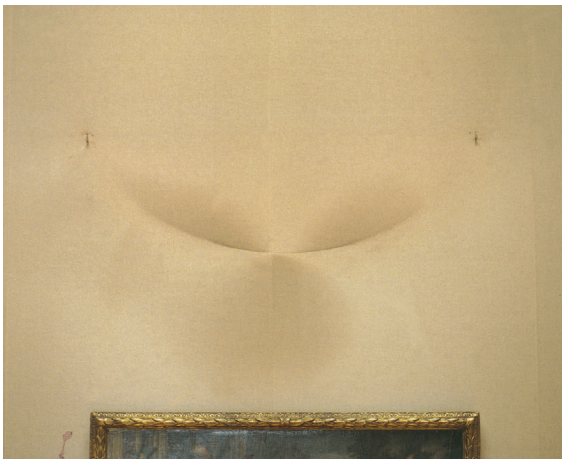


Abbildung 10b:
Einblick in Saal III der Gemäldegalerie des Kunsthistorischen Museums, vor Sanierung im Zustand 1990. Auf der Wandbespannung zeichnen sich Luftstromverlauf zur Kalten Wand und Staubanlagerungen um das hier hängende Rundbild von Veronese ab. Aufnahme Margarete Neundlinger, Wien.

Luftheizeffekt und in der Folge die starke Luftumwälzung der Heizkörperheizung.

Kondensation als Ursache von Pilzwachstum und Staubbindung

Die Bindung von Staub und Schmutz an Oberflächen im Innenraum wird verstärkt durch die Erhöhung der Materialfeuchte. Diese wird hervorgerufen durch Kapillarkondensat. Dies entsteht in unbeheizten Räumen durch saisonalen Anstieg der absoluten Feuchte der Außenluft, ohne daß die Wände dabei entsprechend wärmer werden, in beheizten Räumen durch ungleichmäßige Wärmeverteilung und technikbedingte Feuchteschwankungen, die die relative Feuchte der Raumluft kurzzeitig über 60% anheben, wie z. B. bei künstlicher Luftbefeuchtung.

Kondensation und Kapillarkondensation beschleunigen Pilzwachstum und alle deformationsmechanischen Vorgänge wie Craqueluren- und Schüsselbildung an Gemälden. Die Mikroklimasituation eines Gemäldes an einer kalten Wand (Kalte-Wand-Problematik) läßt sich durch berührungsfreie Messung der Oberflächentemperaturen von Wand und Bild mittels Infrarotthermometer gut erfassen[19]. Mit diesen Messungen wird es physikalisch plausibel, daß der unnütze und kostspielige Kreislauf – a) falsches Heizen, b) zu geringe Wandtemperatur, c) problematische Nachbefeuchtung – durch die Temperierung der Hüllflächen behoben wird.

19 Maria Ranacher, Oberflächentemperaturmessungen als Neuansatz für konservatorische Klimatisierung, in: Restauratorenblätter der Denkmalpflege, Schutz und Pflege von Baudenkmälern, IIC-Austrian Group, Wien 1995, S. 147–166.

Kalte-Wand-Problematik: Oberflächentemperaturmessungen von Gemälden an kalten Wänden

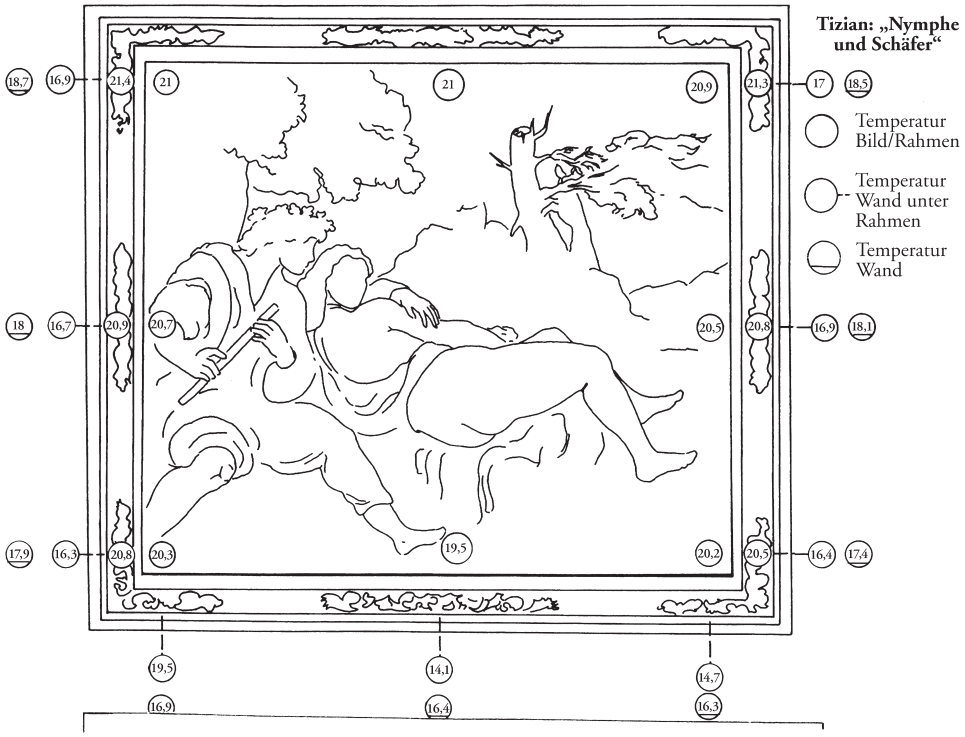
Tizians Gemälde „Nymphe und Schäfer“, Inv.-Nr. 1825, ist ein typisches Beispiel für die Kalte-Wand-Problematik, wie sie bis 1990 in der Gemäldegalerie des Kunsthistorischen Museums bestanden hatte (Abb. 11a). Das Gemälde hing in schräger Neigung an der Außenwand von Saal II der Italienischen Abteilung. Dort betrugen am 5.03.1990 um 9.00 die Raumklimawerte 21,5°C und 48% rF. Die Wandoberflächentemperaturen hinter dem Bild lagen unten, wo der Zierrahmen die Wand berührt, bei nur 14°C, oben bei 17°C, die Oberflächentemperaturen der Gemäldevorderseite unten bei 19,5°C, oben bei 21°C. Die Temperaturdifferenz zwischen Wand und Bild betrug also zwischen 5,5° oben und 7°C unten, am kältesten Punkt. Die von den Oberaufsehern in der Gemäldegalerie über Jahre gemachte Beobachtung, daß „im Winter die Wände rinnen“, hat sich sichtbar niedergeschlagen: Hinter den Bildern war die Wandbespannung im Winter tatsächlich feucht und hatte in mehreren Jahren durch die intensive Kondensation Wasserflecken ausgebildet (Abb. 11b). Anhand des h-x-Diagramms läßt sich das Verhältnis von Temperatur und relativer Luftfeuchte bei gegebenem Feuchtegehalt der Luft ablesen: Bei Raumklimawerten von 21,5°C und 48% rF zum Zeitpunkt der Messung führt die Abkühlung der Raumluft auf die obere Wandtemperatur von 17°C hinter dem Bild zu dem Wert von 64% rF, die Abkühlung auf die untere Wandtemperatur von 14°C an der Unterkante des Bildes zu dem Wert von 78% rF (Abb. 11 c).

Mit diesen hohen Feuchtewerten befinden wir uns im Bereich bester Wachstumsbedingungen für Schimmelpilze! Sinkt bei gleichem Raumklima die Wandtemperatur an der Bildunterkante auf nur 11°C ab, wie im Winter möglich, steigt dort hinter dem Bild die relative Feuchte sogar auf 90% an. Auf Grund dieser Unterschiede von Oberflächen- und Lufttemperatur lagern sich vermehrt Wasserdampfmoleküle in Grenzschichten, Craqueluren und Mikrostrukturen ein. Mit zunehmender Einlagerung werden sichtbare deformationsmechanische Vorgänge, wie die Schüsselbildung von Malschichten, ausgelöst[20]. Andererseits droht bei so hohen Luftfeuchtewerten das Schimmelproblem, weil die bei der Überschreitung des Grenzwertes von 65% rF Myzelwachstum, ab 85% rF das Auskeimen von Pilzsporen schlagartig beginnt.

Ein Gemälde mit dramatischen Schäden mit typischen Folgen der Kalte-Wand-Problematik ist das Bild „Reiterschlacht“ von Rugendas, das bis 1989 in

20 Volker Schaible, Überlegungen zum Problem der Schüsselbildung am Leinwandbild, in: Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung, Jg. 4 1990.

Abbildung 11a:
Tizians „Nymphe und Schäfer“, Außenwand von Saal II, Diagramm mit Oberflächentemperaturen an Wand und Bild, 5. März 1990, 9:00 Uhr. Zeichnung Autorin.



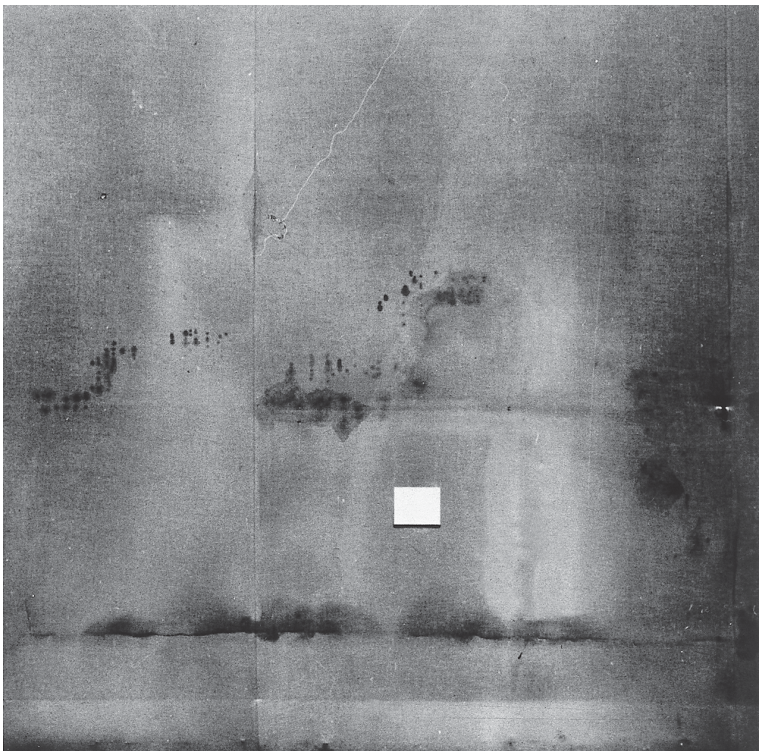


Abbildung 11b:
Wandbespannung hinter Tizians „Nymphe und Schäfer“, Abdruck des Zierrahmens in der unteren Hälfte, Abdruck des Keilrahmens und dunkle Wasserflecken aus mehreren Jahren zeugen von intensiver Kondensation, Zustand 1990. Aufnahme Margarete Neundlinger, Wien.

einer Doppelklimasituation an einer Außenwand der Sekundärgalerie hing. Das Ölgemälde auf Leinwand hatte nach unten zu, exakt bis zur Oberkante des Keilrahmenquerstücks nicht nur Malschichtschollen, sondern auch intensiven Schimmelbefall ausgebildet. Wie die Abbildung zeigt, war der Schimmelbefall dort am intensivsten, wo der Zierrahmen in Kontakt mit der Wand war, weil es hier am kältesten und feuchtesten war (Abb. 12a + 12b). Der Keilrahmen wirkte hier als Wärmedämmung und schützte das Bild von der Rückseite her vor Kondensation. An diesen geschützten Stellen ist die Gemäldeoberfläche intakt und plan geblieben und überdies völlig frei von Schimmelbefall!

Ein weiteres, von Kondensation geschädigtes Gemälde, eine aus einer Wandvertäfelung stammende Supraporte mit „Amoretten", jetzt im Depot der Gemäldegalerie ist auf hellem Hintergrund gemalt. Auf diesem hellen Grund tritt der Verlauf der dunklen, von Schmutz gefüllten Craqueluren besonders deutlich hervor, die fast alle exakt an den Kanten der Keilrahmen-Mittelstrebe rechts enden (Abb. 13a). Wieder zeigt sich, daß dort, wo der Keilrahmen als Wärmedämmung das Gemälde vor Kondensation schützte, die Malschicht intakt blieb und keine Schüsseln ausbildete. Das monochrom gemalte helle Bild zeigt den dunklen Pilz besonders deutlich, der sich an den wandexponierten Stellen als Feuchtigkeitsindikator eingenistet hat (Abb.13b). Dies ist ein Hinweis darauf, daß das Ausmaß Schimmelbefall von Bildern, die sich in feuchtebegünstigender Hängesituation befinden und befanden, kaum bekannt ist. Einen etwa vorhandenen dunklen Pilz kann man auf dunklen Bildern und gebräunten Firnissen kaum erkennen, dann wenn man ihn nicht vermutet.

Nach dieser Beweiskette von Messungen, aus denen für die Wirkung „Feuchteschaden" die Ursache „Temperaturdefizit an Außenwänden" abzuleiten ist, steht eines fest: Eine Wand, die thermisch nicht versorgt ist, wird Kondensat produzieren und Staub anziehen. [...]

Tausende Gemälde mit Kondensatschäden als Beweise für bauseitige Kondensation und Beispiele historisch belegter Kondensatschutzmassnahmen

Eine umfassende Gemäldeuntersuchung vermag Schäden und ihre Ursache und Auswirkungen zu erkennen und öffnet so den Blick fürs Ganze: Im Depot der Gemäldegalerie des Kunsthistorischen Museums sind etwa 90% der Gemälde-

Abbildung 12a:
G. Ph. Rugendas „Reiterschlacht", bis 1989 in der Sekundärgalerie des Kunsthistorischen Museums. Das Bild zeigt Schüsselbildung und Schimmelbefall in der unteren Hälfte. Aufnahme Margarete Neundlinger, Wien.
Abbildung 12b:
G. Ph. Rugendas „Reiterschlacht", Detail rechts unten mit typischen Kalte-Wand-Schäden, extremer Schimmelbefall und Schüsselbildung der Malschichten nur an den wandexponierten Stellen der vom Keilrahmen geschützte untere Rand ist unversehrt. Aufnahme Margarete Neundlinger, Wien.

Abbildung 13a:
Supraporte mit Amoretten, Kunsthistorisches Museum, GG-Depot. Das Detail zeigt Craqueluren und Schollenbildung an den wandexponierten Stellen, die Malerei über der Mittelstrebe des Keilrahmens blieb intakt. Fotoarchiv KHM, Wien.

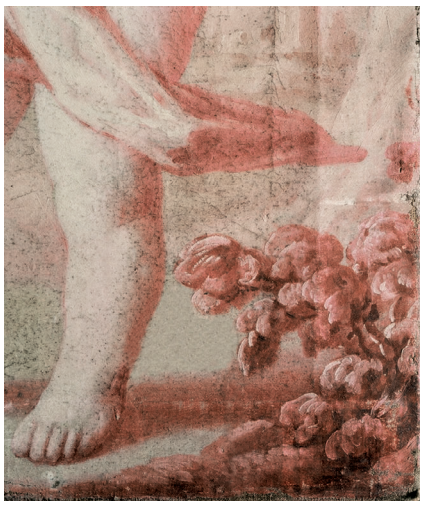
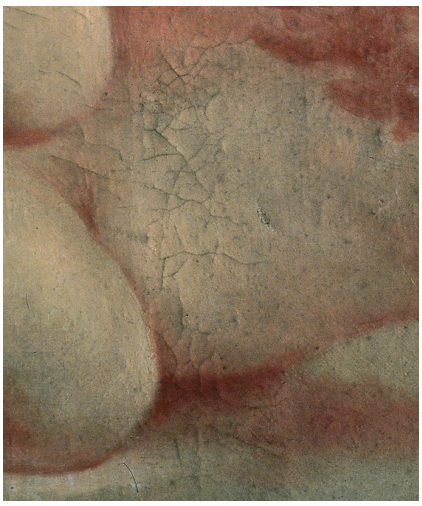


Abbildung 13b:
Supraporte mit Amoretten, Detail. In den Craqueluren der wandexponierten Stellen hat sich aufgrund der höheren Materialfeuchte dunkler Schimmel eingenistet, der auf der hellen Malerei gut zu sehen ist. Fotoarchiv KHM, Wien.



rückseiten mit Staub und alten und neueren Schimmel- und Bakterienflecken bedeckt. Nachdem der Staub nun weitgehend entfernt ist, sind all diese Bilder gut lesbare Zeugnisse für das Kondensationsgeschehen, das am Ort der früheren Hängung stattfand und Spuren und Schäden hinterlassen hat. Über die schlechte Erhaltung vieler Gemälde muß man sich nicht also wundern, wenn man die Klimabedingungen vor Ort untersucht hat.

Ein gut dokumentiertes Beispiel ist das Bild „Epiphanie der Könige“ von Michael Rottmayr in der Stiftskirche Melk (Abb. 14a). Das Gemälde war von Schimmel befallen, wie ich bei der Abnahme zur Restaurierung feststellen konnte. Der Schimmelbefall war trotz einer intakt gebliebenen und bauseits wohldurchdachten originalen Hinterlüftung mit Klimanische, Vertäfelung und Lüftungskanal (Abb. 14b) aufgetreten[21]. Warum? Weil die Epiphaniekapelle mit ihrer nordseitigen Lage zu den kältesten und kondensatanfälligsten Zonen der Stiftskirche gehört. Und weil die relative Luftfeuchte in der Stiftskirche zum Sinken der Bioresistenz der Ausstattungsmaterialien beigetragen hat. In den Sommermonaten 1978, bei Beginn der Restaurierung der Stiftskirche wurden 80 – 90% rF aufgezeichnet.

Bessere Voraussetzungen hatten die Barockgemälde im gut belüfteten Kreuzgang an der Wand zur Klosterkirche in Kloster Salem, Baden-Württemberg. Auch hier sorgten original erhaltene Klimaschutzmaßnahmen mit Lüftungslöchern in der Stuckrahmung für die Hinterlüftung der Gemälde (Abb. 15). Für die Innenwandsituation waren diese Erhaltungsbedingungen offensichtlich ausreichend, nachdem die Gemälde ohne Schimmelbefall geblieben sind.

Feuchteschutz für Gemälde war im 18. und frühen 19. Jh. durchaus noch ein wichtiges Thema und es wurden Speziallösungen erfunden: z. B. von der Wand wegklappbare Gemälde in Schloß Persenbeug an der Donau, NÖ[22]. Für ein venezianisches Renaissancegemälde „Madonna mit Kind und Heiligen“, das zu Kaisers Zeiten in der Wiener Hofburg hing (heute im Depot des KHM), ist Ende 19. Jh. ein Spezialrahmen angefertigt worden, der durch Seitenausschnitte an allen 4 Seiten die Hinterlüftung ermöglicht (Abb. 16). [...]

21 Manfred Koller, Helmut Paschinger, Ivo Hammer, Maria Ranacher, Kirche und Prälatursaal der Stiftskirche Melk: Untersuchungen und Restaurierungen, in: Österreichische Zeitschrift für Kunst und Denkmalpflege, Jg. 34, 1980.

22 Freundlicher Hinweis von Manfred Koller.

Abbildung 14a:
Stift Melk, Epiphaniekapelle mit Putten, Lindenholz vergoldet, Altarbild von Michael Rottmayr, im Zustand vor Restaurierung 1978. Die hohe Luftfeuchtigkeit hatte einerseits Feuchteschäden in Marmor und Stuckmarmor und anderseits biogenen Abbau der Holzskulpturen und am Gemälde Firniskrepierungen und Schimmelbefall verursacht. Aufnahme Inge Kirchhof, BDA, Wien.

Abbildung 14b:
Stiftskirche Melk, Epihaniekapelle, originale Klimanische mit Holzvertäfelung und wandseitigem Lüftungskanal mit Lüftungslöchern, der von unten nach oben in das Fenster mündet, Zustand 1978. Aufnahme Inge Kirchhof, BDA, Wien.

Abbildung 15:
Kreuzgang in Kloster Salem mit Gemälden in Bildnischen aus dem 18. Jh. . Die Stuckrahmen der Bildnischen haben Lüftungslöcher und erlauben so die Hinterlüftung der Gemälde. Aufnahme 1992 Autorin.

Abbildung 16:
Gemälde „Madonna mit Kind und Heiligen“, venezianisch, 15. Jh., mit Zierrahmen aus dem 19. Jh., GG Depot KHM. Der Zierrahmen erlaubt durch Lüftungsschlitze an allen vier Seiten die Hinterlüftung des Bildes. Aufnahme 2003, Autorin.

Die neuen Vorgaben – Theoretische und praktische Vorgaben für optimale Erhaltung [...]

1) Klima und Mikroklima:

Für organische Materialien gelten möglichst gleichmäßige Temperatur- und Feuchtewerte innerhalb der konservatorischen Eckwerte von min. 45% rF im Winter und max. 65% rF im Sommer, möglichst frei von Kurzzeitschwankungen im Tagesgang. Die Klimawerte sollen im Jahresgang mit der mittleren Monatstemperatur gleiten[24]. Mikroklima im Einzelraum und Makroklima im Gebäude sollten harmonisch aufeinander abgestimmt sein und dürfen nicht wesentlich differieren, damit es nicht zu Luftzug und Konvektion kommt. Voraussetzung dazu sind isotherme, d.h. gleiche Temperaturverhältnisse an den Raumhüllflächen, die in unserem saisonal stark ausgeprägten Klima nur durch Nichtbeheizen der Raumluft und thermische Stabilisierung der Gebäudehülle erreichbar sind.

2) Wärme- und Feuchtespeicherkapazität der Bauhülle:

Museumsbau und Ausstattung sollen über eine gute Wärme- und Feuchtespeicherfähigkeit verfügen. Am besten geeignet ist die Ziegelbauweise, weil Ziegelwände gegenüber Beton eine 20-fach höhere Kapillarität haben und bei Klimaänderungen mit sehr hoher Kapazität reagieren können. Ein Ziegelbau kann bekanntlich im Sommer kühlen und im Winter wärmen. Der Wert von Ziegelbauten für Gesundheit und Wohlbefinden der Menschen, wie auch für Kulturgut kann aus

[24] Günther S. Hilbert, Sammlungsgut in Sicherheit, Teil 2, Lichtschutz und Klimatisierung, Berliner Schriften zur Museumskunde, Bd. 6, Berlin 1987.

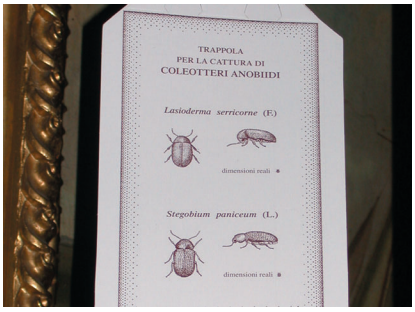


Abbildung 17: Pheromonfalle für Stegobium paniceum im Depot der Gemäldegalerie. Aufnahme 2003, Autorin.

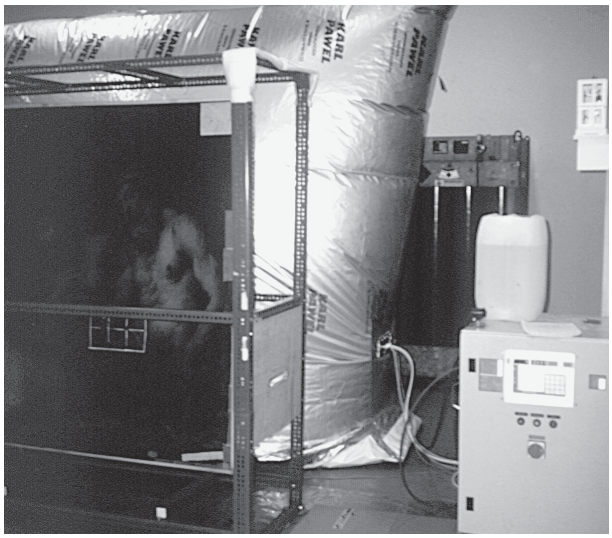


Abbildung 18a:
Testbegasung an 6 insektenbefallenen Bildern im Depot der Gemäldegalerie 1996. Die Bilder werden im Foliensack mit Argon bzw. Stickstoffgas bei computergesteuerter Befeuchtung durch 3 Wochen behandelt. Aufnahme Autorin.

Abbildung 18b:
Die neue, 1998 in Betrieb genommene Inertbegasungsanlage im neuen Depot des KHM. Aufnahme Autorin.

biologischen und bauphysikalischen Gründen nicht hoch genug eingeschätzt werden. Fehlt entsprechendes Ziegelmaterial in der Bauhülle, so muß das Speicherdefizit im Inneren durch klimapufferndes Material (Holz, geeignete Textilien) als Unterstützung für das Raumklima kompensiert werden.

Richtige Verteilung von Wärme statt permanenter Luft- und Staubumwälzung! Hüllflächen konsequent temperieren statt die Atemluft als Heizmedium missbrauchen!

[...] Beispiele temperierter Bauten in Österreich sind das Lapidarium und die Hausbesorgerwohnung in der Kartause Mauerbach (Abb. 20a + 20b), die ebenerdigen Gisela- und Prinzenräume in Schloß Schönbrunn (Abb. 21) ebenso die überdachten Höfe in Schloss Schönbrunn und die Volière im Schönbrunner Tiergarten. Zur Gänze temperiert ist das Museum im Ledererhaus in Purgstall an der Erlauf, Niederösterreich. Die Temperierung ist hier unter Putz verlegt was in den kleinen Räumen ein großer Vorteil ist (Abb. 22), ebenso die Volks- und Hauptschule dort. In Mannersdorf sind eine Schule[35] und ein historisches Gebäude mit Temperieranlagen ausgestattet. Temperierbeispiele sind weiters das Schloß Trautenfels in der Steiermark, Teile der Hofburg Innsbruck und die Kunst- und Wunderkammer (Abb. 25a) und in die Rüstkammer von Schloß Ambras bei Innsbruck (Abb. 26b). Die Vorteile der Temperierung Klimastabilisierung, Kondensatvermeidung und Einsparung von Betriebskosten führten nun auch zur Temperierung des neuen Textildepots und zur Temperierung des inzwischen sanierten Gemäldedepots des Kunsthistorischen Museums (Abb. 24). In der Museumszene ausserhalb Wiens hat sich die Temperiermethode bereits zum „State of the Art" entwickelt, wie Sanierungsfortschritte im Museum Carolino Augusteum in Salzburg zeigen.

35 Jochen Käferhaus, Temperierung eines historischen Gebäudes in Mannersdorf a. Lgb. durch WW-Kollektoren auf der benachbarten Schule, Vorstellung eines Projektes zum Niederösterreichischen Umweltpreis „Kreisläufe – eine runde Sache".

Best Board: Eine interessante Variante der Sockelleistenheizung ist Best Board, eine ursprünglich in den USA entwickelte Sockelheizleiste für Wohnbauten, die in Österreich in Material und Technik verfeinert und zierlicher in Größe und Form erzeugt wird[36]. Diese Sockelheizleiste wird ebenfalls konsequent an der Gebäudehülle verlegt und sorgt für Wohlbefinden im Wohnbereich.

36 Die Sockelleistenheizung kommt der Temperierung am nächsten.

Elektrische Technik in der Temperierung: Dort wo keine Heizzentralen errichtet oder keine Warmwasserohre verlegt werden können, wird die elektrische Methode angewandt, die ebenfalls zu guten Ergebnissen führen kann. Die Heizdrahtschleifen müssen vollständig in mineralischer Überdeckung in Putz oder Stein verlegt werden.

Thermische Gebäudesanierung durch sinnvolle Wärmeverteilung oder bloß durch Wärmedämmung?

Die derzeit in Europa forcierte und von der öffentlichen Hand geförderte Methode, Heizenergie ohne Änderung der Wärmeverteilungsart nur durch Wärmedämmung mit Vollwärmeschutzfassaden einzusparen, wird auch als thermische Gebäudesanierung bezeichnet. Doch ist diese Art der „Sanierung" wenig durchdacht und verdient den Namen nicht. Die an der Außenseite der Gebäudehülle aufgebrachten Wärmedämmplatten werden mit Putzträgern versehen und überputzt (Abb. 22a + 22b). Abgesehen davon, daß Art und Charakter der Fassade völlig verändert werden und die Oberflächen wegen der starken Nachtabkühlung in wenigen Jahren verschmutzen, entsteht bei Beibehaltung falschen Heizens in vielen Fällen eher Schimmel an kühl bleibenden Raumflächen, als dies ohne Wärmedämmung der Fall gewesen wäre, da sich wegen der Behinderung der Wasserdampfabgabe nach außen Feuchte in der Wand anreichert und diese Oberflächen schneller feucht werden. An der vor mehreren Jahren „sanierten" Fassade der Berufsschule II in Linz. sind an den Außenseiten der Nord- und Nordwestseite schwarze Schimmelflecken zu sehen, dies, obwohl das Styropor nicht in Plattenform, sondern als Granulat in den Putz eingearbeitet ist.

Die Außendämmung von Fassaden ist für den Denkmalschutz unbrauchbar, weil sie diese grundlegend verändert und daher nur sehr begrenzt – wenn überhaupt- eingesetzt werden kann (Abb. 23a + 23b). Österreichs Umweltminister

Abbildung 22a + 22b:
Wien-Inzersdorf, Purkytgasse 12. Zwei Häuser Anfang 20. Jh.. Das Haus auf der linken Seite hat an der Straßenfassade das Wärmedämmverbundsystem, eine 5cm starke Beschichtung von Putz auf Styropor über dem altem Putz aufgebracht, das rechte Haus ist im Vorzustand mit altem Putz. Aufnahmen März 2003, Autorin.

Bartenstein hat bereits 1999 die thermische Gebäudesanierung neben der Müllvermeidung als die vorrangigste der nationalen Maßnahmen zur Erfüllung der österreichischen Vorhaben zum Umweltabkommen von Kyoto genannt[37]. Damit erkennt das Ministerium das große Einsparungspotential an, das durch Verringerung der Heizwärmeverluste nutzbar wäre. Doch wurde zur Behebung dieses Defizits die falsche Methode gewählt – ein Beratungsfehler? Offensichtlich, denn zu den Verlusten durch Wärmeleitung über die Gebäudehülle kommen die durch Warmluftaustritt über Fugen und Öffnungen. Beides wird durch die Wandtemperierung verringert. Die Temperiermethode war den Ministerien 1990 und dem Parlament seit 1995 bekannt und sollte längst einbezogen werden. Mit dem Vorliegen der Ergebnisse des Forschungsprojektes PREVENT ist die Politik aufgefordert, eindeutige Vorgaben für energiesparende Wärmeverteilung im Gebäude zu machen.

Will die Bundesregierung das Kyoto-Ziel erreichen, so müssen alle Möglichkeiten der Nachhaltigkeit ausgeschöpft werden. Vor allem muß jene Methode gefördert werden, die bauphysikalisch, gesundheitlich, ökologisch wie ökonomisch die meisten Vorteile zur Erreichung dieses Zieles in sich vereinigt. Die Temperiermethode bietet sich als echte „thermische Gebäudesanierung“, die diesen Namen auch verdient, an, denn sie wirkt „sanierend“ auf „thermischem“ Wege, und ist vorrangig unter die Maßnahmen zur Erreichung der Ziele des Kyoto-Abkommens einzureihen und in das Förderprogramm des Bundes/der Länder aufzunehmen.

37 „Klimaschutzziel ist erreichbar“, Zeitungsbericht in: Der Standard, Wirtschaftsteil, 18./19. Dezember 1999.

Sanierung und Prävention bei Museumsgut und Architektur durch Nachhaltigkeit bei der Behebung der Schadensursachen

Aus den vorangegangenen Situationsdarstellungen kondensatgefährdeter Bauten geht hervor, daß Sanierung und Prävention problemorientiert, ursachenbehebend und zukunftsweisend sein müssen.

Die Temperiermethode anzuwenden bedeutet für die Gebäudesanierung, Gebäudeerhaltung und für die Gesundheit der Menschen eine vierfach wirksame synergetische Wirkung:

- Trockenlegung von durchfeuchtetem Mauerwerk in Erdgeschoß und Keller
- präventive Gebäudeerhaltung durch Trockenhaltung und Bioresistenz von Mauerwerk und Holzbauteilen

Abbildung 23a:
Wien X, Ettenreichgasse 42-44, Wohnhaus der Gemeinde Wien Mitte 20. Jh.. Die glatten Fassaden wurden in den letzten Jahren rundum mit einer Vollwärmeschutzfassade ausgestattet, mit dem optischen Effekt, daß Fenster und Bauschmuck nun tiefer liegen und der neue Putz weder in Dichte noch in mineralischer Struktur und Farbe an den alten Putz herankommt. Aufnahme März 2003, Autorin.

Abbildung 23b:
Wien III, Hainburgerstraße 27. An dieser reich gegliederten Fassade wäre die Anbringung des 5cm starken Wärmedämmverbundsystems unmöglich, die Temperierung hingegen wäre an der Innenseite installierbar und kann das Sockelgeschoß trocken halten, wodurch es aufgewertet wird. Aufnahme März 2003, Autorin.

Abbildung 24:
Einblick in das sanierte Gemäldedepot des Kunsthistorischen Museums. Die Temperierrohre sind auf Putz verlegt. Aufnahme Autorin 2004.

Abbildung 25a:
Schloss Ambras bei Innsbruck, Kunsthistorisches Museum. Einblick in die Kunstkammer, deren Gemälde an der temperierten Außenwand hängen, wobei die Temperierrohre sichtbar, d. h. auf Putz verlegt sind. Aufnahme März 2003, Margot Rauch, Schloss Ambras, Innsbruck.

– Temperierung der Gebäudehülle und behagliche Beheizung der Räume
– stabiles und homogenes Raumklima mit guter Atemluft.

Durch die neuen Vorgaben wird „Sanierung statt Abriß“ und damit die authentische Erhaltung von Gebäuden auch ökonomisch sinnvoll und über Förderung im Rahmen des Abkommens von Kyoto finanzierbar. Mit dem Forschungsergebnis von PREVENT ist die Temperiermethode in Österreich nun kein Insider-Tip mehr, sondern eine staatlich anerkannte Trockenlegungs- und Heiz-

Abbildung 26a:
Ansicht des Ledererhauses in Purgstall, Niederösterreich. Das am Ufer der Erlauf gelegene Heimatmuseum ist seit 1997 temperiert und dadurch optimal vor Feuchtigkeit geschützt. Aufnahme 1998, Autorin.

Abbildung 26b:
Schloss Ambras bei Innsbruck, Kunsthistorisches Museum, Rüstkammer von außen gesehen, Aufnahme März 2003, Margot Rauch, Schloss Ambras, Innsbruck.

methode, die die wirtschaftlichen Chancen der Substanzerhaltung unseres architektonischen Erbes in Städten und in Dörfern dramatisch erhöht[39].

[...]

39 Ivan Neswadba (Hrsg.), „Innovative Systeme" Hypokaustenheizung mit Trocknungseffekt, Stand November 2002, Schriften des Bundesministeriums für Arbeit und Wirtschaft 2002, S. 2–66.

Resumee

Ein thermisch optimal sanierter Museumsbau oder ein Architekturobjekt in der Denkmalpflege, das korrekt temperiert ist wird biogen nicht mehr angegriffen, weil das Mauerwerk einschließlich der Gebäudehülle trocken bleibt (Abb. 25). Damit ist die in den Vorgaben genannte essentielle Forderung nach Bioresistenz für Bauwerk und Ausstattung erfüllt. Ein temperiertes Haus bleibt frei von Kondensation und Schimmel, was vor allem im Wohnbau, ob Alt- oder Neubau, in Schulen und Krankenhäusern etc. von größtem gesundheitlichen Vorteil ist. Dies gilt natürlich auch für das Museum und andere Kulturbauten, denn ein optimal saniertes, staubfreies und gepflegtes Haus ist für sein Publikum und sein Personal eine Wohltat in Bezug auf Gesundheit und Wohlbefinden.
Für das Architekturerbe unserer unverwechselbaren Städte und Dörfer – ein von der Politik in Sonntagsreden immer wieder betonter Teil der österreichischen und europäischen Identität – sind die originale Erhaltung und unverfälschte Weitergabe an die nächsten Generationen wesentliche Elemente. Durch Temperierung der Gebäude kann die durch Feuchte und Schadsalze bedingte Desolation thermisch gestoppt werden und die Baudenkmäler – ohne verfälschende Materialeinbringungen und ohne sich ständig wiederholende Schäden wie Putzerneuerung, Injektage und Dränagierungen optimal erhalten werden.

Die Thermische Sanierung durch Temperierung ist für die Gesundheit der Menschen und für die Erhaltung unseres Architekturerbes von entscheidendem Vorteil weil sie
1) die Trockenlegung des Mauerwerks und das Ende der Salzschäden bewirkt
2) durch Kondensatprävention im Mauerwerk einen dauerhaften Feuchteschutz garantiert
3) die Partikelbelastung der Atemluft gegen Null senkt und damit die Gesundheit der Menschen (besonders der Allergiker) fördert
4) eine ökologisch und bauphysikalisch einwandfreie Heizmethode ist und
5) ökonomische eine große Energieeinsparung von 29% an Heizung und Haustechnik bringt.

Damit sind Sanierungen im Kulturerbe und im Besonderen im Architekturerbe konservatorisch seriös, ökologisch und ökonomisch einwandfrei druchführ-

bar[40]. Damit ist endlich eine vorteilhafte Alternative der Feuchtesanierung und Prävention gegenüber den unseriösen Brutalsanierungen von historischen Gebäuden, den dubiosen Methoden der Feuchtebekämpfung und unnötigen Horizontalisolierungen vorhanden. Die Temperierung als thermische Bausanierung und als sanfte und gesunde Gebäudeheizung muss nun einer breiten Öffentlichkeit d.h. möglichst vielen Entscheidungsträgern und möglichst vielen Bürgerinnen und Bürgern bekannt werden, damit das Kyotoziel verwirklicht werden kann.

[40] Die in Investoren- und Architektenkreisen kolportierte Meinung, daß Neubauen billiger käme als die Sanierung eines Altbaues, ist teilweise eine gesteuerte Falschmeldung, teilweise hat die bisher ungelöste Kondensat- und Feuchteproblematik von Altbauten und das Chaos ungekonnter Erdgeschoß- und Kellersanierungen Verwirrung gestiftet und horrende Kosten verursacht.

Das optimale Museumsfenster

Abstrakt

Bei historischen Kastenfenstern ohne außenliegenden Sonnenschutz wird untersucht wie man den sommerlichen Wärmeeintrag mit Maßnahmen innerhalb des Fensterkastens verringern kann. Die Wirksamkeit verschiedener Kombinationen von Lichtschutzmaterialien und das Infrarot-Rückhaltevermögen unterschiedlicher Gläser und Lichtschutzfolien werden beschrieben. Der Wärmeabfluß im Fensterkasten während der Nacht und die Wirksamkeit der Zwangsbelüftung des Fensterkastens werden dargestellt. Ergänzend werden kleinere Anschlußleistungen für Kunstlicht diskutiert, die eine Minimierung mechanisch unterstützter Lüftung erlauben. Die Untersuchung bezieht zweischalige historische Lichtdächer mit ein.

The optimal museum window

The reduction of heat transfer in summer into historical Kastenfensters without external solar protection using measures within the window case was studied. The effectiveness of various combinations of solar protection materials and the infrared transmission of various glasses and solar protection foils were characterized. The heat flow in the window casement at night and the effectiveness of forced circulation of the window casement were clarified. Additionally, smaller artificial light fixtures that allow minimization of mechanical ventilation were discussed. The study included historical two-layer glass ceilings.

Kurzfassung

Die Sammlung alter Musikinstrumente (SAM) des Kunsthistorischen Museums in Wien wurde 1988 wegen unzuträglicher klimatischer Bedingungen geschlossen. Werte der relativen Luftfeuchte unter 20% im Winter und Raumtemperaturen bis zu 30°C im Sommer bei minimalem innenliegenden Lichtschutz hatten zu schweren Licht- und Klimaschäden geführt. Durch die extreme Trockenheit haben nahezu alle aus organischen Materialien (Holz, Elfenbein, Schildpatt, etc.) gefertigten Objekte irreversible Schwundschäden erlitten. Das Kunstlicht beschränkte sich auf Raumlüster, die bei starker Sonneneinstrahlung abgeschaltet wurden.

Im November 1993 wurde die Sammlung nach einer umfassenden Sanierung wieder eröffnet, bei der allerdings weder Außenbeschattung und Wärmeschutzverglasung der originalen Kastenfenster noch der Einbau einer Lüftungsanlage möglich war. Die Fenster wurden repariert, alle Innenflügel erhielten eine Dichtung, die Hälfte auf der Rückseite auch eine zweite Scheibe, von schwachen, gegen den Flügel gedichteten Rahmen gehalten. Im Fensterkasten wurden Sonnen- und Lichtschutzeinrichtungen montiert. Die neue Kunstlichtanlage wurde gegen die Empfehlung des Nutzers auf eine heute übliche Leistung ausgelegt (ca. 40 W/m^2). Auch die vom Nutzer vorgeschlagene alternative Raumbelüftung wurde nicht realisiert. Sie hätte Luft aus dem Kellergeschoß mit leichtem Überdruck über historische Schächte in die Räume gefördert (Luftbrunnen), die dann über Fugen in den Fensterbänken über die Fensterkästen abgeströmt wäre. Lediglich je ein Walzenlüfter wurde als Abluftventilator in zwei weit voneinander entfernten Fensternischen montiert, womit ein knapp einfacher Luftwechsel möglich ist.

Im Hochsommer 1994 stiegen die Raumtemperaturen im Sammlungsbereich auf bis zu 32°C an – also höher als vor der Schließung! Dies bedeutete für das Museumspersonal einen regelrechten Schock. Gerade die Sanierung der Fenster in Verbindung mit Licht- und Wärmeschutzmaßnahmen war erst nach umfangreichen Versuchen und Messungen umgesetzt worden. So war es z. B. gelungen, durch gezielte Kombination verschiedener Lichtschutzeinrichtungen die Oberflächentemperatur der Innenscheiben bei direkter Sonnenbestrahlung

von über 40°C auf max. 31,5°C abzusenken. Wie es dennoch im Sommer zu diesem extremen Anstieg der Raumtemperatur kam, blieb daher zunächst unerklärlich.

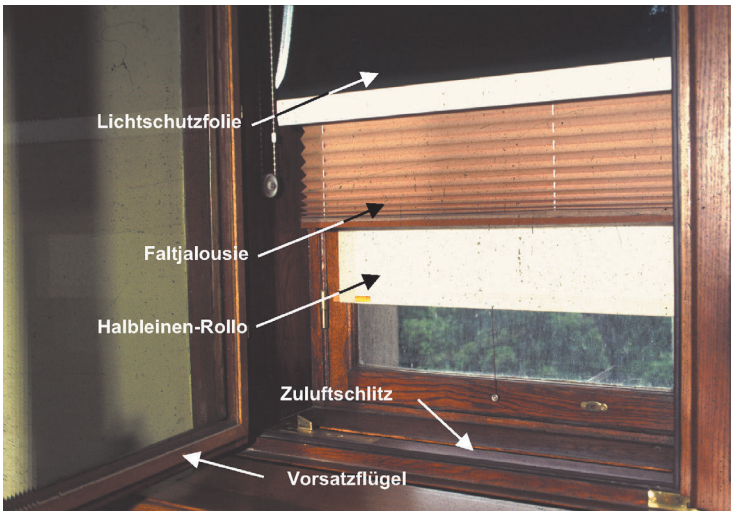
Das Ziel des Teilprojekts „PREVENT/SAM" war anfangs daher die Klärung der Energieflüsse im Fenster- und Wandbereich, um den hier vermuteten zur Wärmeakkumulation führenden Wirkungsmechanismus aufzudecken und Maßnahmen zur Senkung der Obergrenze der sommerlichen Raumtemperaturen ableiten zu können. Zur Optimierung eines Kastenfensters ohne Außenbeschattung für museale Zwecke im Sommerfall wurden folgende Ziele definiert:

- Minimierung der Aufheizung der Raumluft durch die als Wärmetauscherfläche wirksame Innenscheibe (d.h. geringstmögliche Oberflächentemperatur der Innenscheibe),
- Minimierung des Gesamtstrahlungseintrags in den Raum in der Zeit direkter Sonneneinstrahlung.

Dies bedeutet, zunächst eine möglichst wirksame Beschattung *im* Kastenfenster zu installieren, ferner Maßnahmen zur Minimierung des Wärmeflusses aus dem Fensterkasten nach innen sowie zur Verbesserung der Wärmeabfuhr nach außen zu ergreifen und diese in den kühlen Nachtstunden noch weiter zu steigern. Im Detail ergaben sich folgende Fragestellungen:

- Beschreibung der Wärmeflüsse im historischen Kastenfenster bei direkter Sonnenbestrahlung,
- Untersuchung der Wirksamkeit von Sonnenschutzmaßnahmen im Fensterkasten,
- Beschreibung der Wirksamkeit verschiedener Kombinationen von Lichtschutzmaterialien,
- Untersuchung des Infrarot-Rückhaltevermögens unterschiedlicher Gläser und Lichtschutzfolien,
- Erfassung des Wärmeabflusses im Fensterkasten während der Nacht,
- Untersuchung der Wirksamkeit von Zwangsbelüftung des Fensterkastens in der Nacht,
- Erstellen einer Wärmebilanz am Kastenfenster und im Ausstellungsbereich (Was heizt mehr: Sonne oder künstliche Beleuchtung?).

Um die Wärmeflüsse genauer nachvollziehen zu können, erfolgten die Messungen nach der von Karl Prodinger entwickelten Methode der Querschnittsmessung. Dabei wird ein möglichst dichtes Temperaturprofil innerhalb der Bereiche gelegt, in denen die Wärmeflüsse stattfinden. Um diese nicht nur im Fensterbereich, sondern auch über die Wand dokumentieren zu können, wurden neben Temperaturfühlern Wärmefluß-Sensoren eingesetzt. Als Eckdaten wurden



Kastenfenster mit Lichtschutzeinrichtungen. Aus: A. Huber, Das optimale Meuseumsfenster.

die Außenluft- und die Raumtemperatur in jeweils 1 m Entfernung vom Fenster gemessen, dazwischenliegend die Temperaturen der Außen- und Innenscheiben sowie im Fensterkasten zwischen den jeweiligen Sonnenschutzfolien.

Zunächst wurden die verwendeten Beschattungseinrichtungen (traditionelles Leinenrollo, textile aluminiumbeschichtete Faltjalousie und silberbedampfte Kunststofffolie) einzeln auf ihre temperaturabsenkende Wirksamkeit untersucht. Durch Kombination von zuerst zwei, dann drei Schichten wurden Wechselwirkungen zwischen reflektierenden und nicht reflektierenden Schichten untersucht. Dabei bestätigte sich die Hypothese von der „Hierarchie des Lichtschutzes", wonach bei Kombination von reflektierenden und nicht reflektierenden Materialien die reflektierende Schicht im Fensterkasten *nicht* näher zur Strahlungsquelle Sonne, sondern hinter dem Innenflügel montiert sein muß, während das nicht reflektierende Material in der Nähe der Außenscheibe die beste Wirkung zeigt.

Zwei Maßnahmen erwiesen sich als besonders effizient: Die Belüftung des Fensterkastens sowie die Montage von Vorsatzflügeln (bzw. nicht beweglichen leichten Glasrahmen) an der Rückseite der Innenfenster. Letzteres wandelt das Einfachfenster in ein Verbundfenster um, mit ähnlicher Wirkung, als wenn eine Wärmeschutzverglasung eingesetzt würde. Beide Maßnahmen bewirken jeweils eine Verringerung des Wärmeeintrags aus dem Fensterkasten in den Raum um rund 30%. Auch hier bestätigte sich die aus der Hierarchie des Lichtschutzes resultierende und häufig kontrovers diskutierte Ansicht, wonach Wärmeschutzgläser (bzw. Zweitverglasungen) beim Kastenfenster am Innenflügel montiert werden müssen, um den Durchgang der durch Strahlungsabsorption im Fensterkasten generierten Wärme nach innen zu verringern. *Anmerkung*: Der noch immer saubere Zwischenraum zeigt, daß eine Zweitverglasung, die dicht ausgeführt wird, keine selbstständigen Flügelrahmen für die Reinigung benötigt.

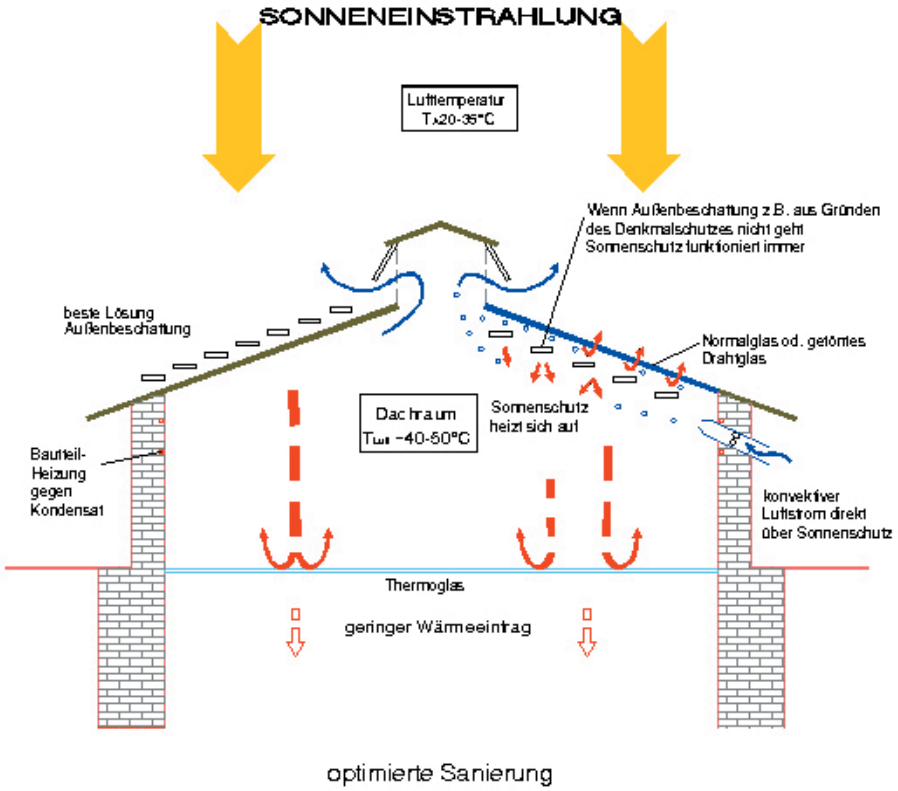
Die Untersuchungen wurden auf die Sanierung von zweischaligen Lichtdächern ausgeweitet. Dabei bestätigte sich, daß nur bei Außenbeschattung eine außenliegende Wärmeschutzverglasung zielführend ist. Ohne dies führt sie nämlich, wie sich überraschend zeigte, zu einem höheren Temperatureintrag ins Gebäude im Vergleich zu älteren Einfachverglasungen, die meist mit einem Drahtnetz armiert und leicht getönt waren und daher eine bessere Filterwirkung hatten.

Die eingangs gestellte Frage konnte zuletzt sehr einfach beantwortet werden: Bei weitgehend abgedunkelten Fenstern führt der Betrieb einer elektrischen Raum- und Objektbeleuchtung im Hochsommer zu einem *Anstieg* der Raumtemperaturen, da die zusätzlich eingesetzte elektrische Energie einen höheren Wärmeeintrag bewirkt, als der durch Fenster mit Innenbeschattung und die Außenwände eines Raumes verursachte. Dies gilt besonders bei den heute in Museen und Ausstellungen üblich geworden Anschlußleistungen, deren unerwünschte Heizwirkung nur mit starken Lüftungsanlagen mit großer Kühlkapazität in Grenzen gehalten werden kann (s. Punkt 4).

Die Meßergebnisse lassen sich für den Hochsommerfall in folgenden Kernaussagen zusammenfassen:

1. Um in Bauten mit schwerer Gebäudehülle und Kastenfenstern ohne Außenbeschattung den Wärmeeintrag durch direkte Sonneneinstrahlung zu minimieren, sind Lichtschutzeinrichtungen *im* Fensterkasten erforderlich, deren Reihenfolge relevant ist (schwerer Stoff zum Außenflügel hin, reflektierendes Material zum Innenflügel hin). Der Masse des Materials kommt mehr Bedeutung zu als dem Reflexionsvermögen.
2. Wenn der Fensterkasten mechanisch belüftet werden kann, ist eine Isolierverglasung eher zweitrangig. Ggf. ist sie am *Innen*flügel zu montieren. Im Idealfall addieren sich die Wirkungen von Kastenbelüftung und Zweitverglasung des Innenflügels.
3. Das Abdunkeln der Fenster und die Installation einer Kunstlichtanlage führen im Hochsommer zu einem erhöhten Wärmeeintrag. Installierte

Sanierung eines Lichtdaches.



Lichtleistungen von ca. 10 W/m² Ausstellungsfläche erlauben noch eine gute Ausleuchtung. Bei solchen Leitungen treten zeitweise bereits Raumtemperaturen von über 26°C ein.

4. Um den erhöhten Wärmeeintrag des Kunstlichts zu kompensieren, ist die Installation einer Lüftungsanlage erforderlich. Bei reduzierten Luxmengen (z. B. max. 150 Lux am Objekt) kann die Lichtleistung auch in höheren Räumen auf bis zu 10 W/m² beschränkt werden. In schwerer Bausubstanz genügt bei derart reduzierten Anschlußleistungen eine Abluftanlage mit geringer Luftwechselrate (ca. 1 V/h). Durch intelligente Steuerung und Nachtlüftung wird die Temperaturobergrenze (26°C) bei mäßigem Besucheraufkommen kaum noch überschritten.
5. Zweischalige Lichtdächer mit außenliegenden Wärmeschutzgläsern ohne Außenbeschattung bewirken einen höheren Temperaturanstieg im Dachraum als altes einfaches Drahtglas.

In der auf beiliegender CD befindlichen Zusammenfassung sind alle Erkenntnisse aus dem Projekt im Detail aufgelistet. Die 130 Seiten umfassende Gesamtstudie ist auf der *Homepage* des Kunsthistorischen Museums (www.khm.at) abrufbar (Links: Sammlungen/Sammlung alter Musikinstrumente/Forschung).

Joachim Kleinmanns

Die Temperierung historischer Gebäude: Eine Methode zur Verhütung feuchtebedingter Bauschäden

Anmerkung des Herausgebers: Der folgende Beitrag (überarbeitete Fassung) wurde unter gleichem Titel zuerst anläßlich der Tagung der Vereinigung Europäischer Freilichtmuseen in Detmold vom 23. bis 25. September 1994 veröffentlicht. Der Tagungsband mit dem Titel „Konservierung von Holzbauten, Kopien historischer Gebäude in Freilichtmuseen“ erschien im Auftrag der Vereinigung Europäischer Freilichtmuseen beim Landschaftsverband Westfalen-Lippe/Westfälisches Freilichtmuseum Detmold 1995 (Hrsg. Stefan Baumeier). Joachim Kleinmanns ist Architekturhistoriker und arbeitete für das Westfäliche Freilichtmuseum Detmold, bevor er 1994 zur Universität Karlsruhe wechselte.

Abstract

Versalzung des Mauerwerks, Pilze und Algen und in der Folge auch der Schädlingsbefall an Holzbauteilen sind die Hauptschädigungsarten, die als Folge von Feuchtigkeit in historischen Gebäuden in Freilichtmuseen auftreten können. Eine Kontrolle der Klimabedingungen ist unumgänglich, um Schäden zu vermeiden. Ende der 1970er Jahre wurde im Westfälischen Freilichtmuseum Detmold begonnen, die Raumfeuchte durch Wärmezufuhr zu beeinflussen. Von 1979 bis 1987 wurden zunächst konventionelle Heizungsanlagen installiert, die nur unzureichende Wirkung in der Schadensprävention erreichten. Erst ab 1988 konnten mit dem Einbau mehrerer Temperieranlagen zufriedenstellende Ergebnisse erzielt werden. Sowohl feuchtebedingte Bauschäden, als auch der objektspezifische Energiebedarf im Vergleich zum Einsatz der konventionellen Heizsysteme haben sich drastisch verringert.

Tempering of Historical Buildings:
A Method for Preventing Building Damage due to Moisture

Salination of masonry, fungi and algae, and, as a result, also pest infestations in wooden building parts are the major forms of damage due to humidity in historical buildings in open-air museums. Control of the climate conditions is indispensable for avoiding damage. At the end of the 1970's the Westfalian Open-Air Museum in Detmold started trying to influence room humidity through heating. From 1979 until 1987 conventional heating systems were installed, which were unsatisfactory at preventing damage. Only after 1988, with the installation of several tempering systems, could satisfactory results be achieved. Both moisture dependent building damage and building specific energy requirement were drastically reduced in comparison to the use of conventional heating systems.

Abbildung 1:
Teilansicht des „Paderborner Dorfes“ im Westfälischen Freilichtmuseum Detmold. Wärmeversorgung der Häuser zentral mit einer Nahwärmeleitung. Foto Westfälisches Feilichtmuseum Detmold.

Schäden durch Feuchtigkeit im historischen Gebäude sind allgemein bekannt: Versalzung von Mauerwerk, Befall mit bestimmten holzzerstörenden Insekten, Pilzen, im schlimmsten Fall dem Echten Hausschwamm. Die Schädigung reicht von einer Beeinträchtigung bzw. Zerstörung der Oberflächen, z. B. Anstrichen und Putzen, bis zur Gefährdung der Standsicherheit der konstruktiven Teile. Doch nicht nur die historische Bausubstanz leidet unter diesen Feuchteschäden, auch die historische Ausstattung der Häuser aus zum Teil noch empfindlicheren Materialien wie Furnieren, Papier, Leder oder Textil ist in starkem Maße gefährdet.

Versalzung

Salze sind in unterschiedlicher Konzentration in natürlichen und künstlichen Baustoffen enthalten. Als Fremdsalze gelangen sie zusätzlich über die Einwirkung luftverunreinigender Substanzen (vor allem SO_2 und SO_3) in Baustoffe. Schließlich steigen bei fehlender Horizontalisolierung erhebliche Salzmengen durch die Kapillaren aus der Grundfeuchte in das Mauerwerk auf.[1] Sie wären damit allein, selbst in hoher Konzentration, noch nicht schädlich. Erst durch Schwankungen des Feuchtegehaltes kommt es zu einem rhythmischen Wechsel zwischen Kristallisation und Auflösung. Der Kristallisationsdruck, der durch die Volumenvergrößerung beim Aufbau des Kristallgitters und beim Einbau von Wassermolekülen in dieses Gitter (= Hydratation) entsteht, übertrifft die Festigkeitsparameter der Oberflächenschichten fast jeden Steins und aller Putzmörtel.[2]

1 Faller und Karotke, 1988, S. 63.

2 Röntsch und Schwarz 1991, S. 68.

Mikrobielle Schadensprozesse: Flechten, Algen und Moose

Flechten, Algen und Moose entwickeln sich in vegetationsreicher Umgebung auf nahezu allen Festkörperoberflächen bei ausreichend feuchter Bewitterung, z. B. durch Spritzwasser im Sockelbereich eines Bauwerks. Sie sind zumindest indirekt an der Zerstörung von Bausubstanz beteiligt, indem sie durch Speichern von Feuchtigkeit ein Mikroklima schaffen, bei dem Pilze sich positiv entwickeln.[3] Inwieweit Schäden durch Entmineralisierung an Naturstein, die sogenannte Bioerosion, auf Flechten, Algen und Moose zurückgeführt werden kann, wurde im BMFT-Verbundprojekt „Steinzerfall" erforscht. Danach sind „Mikroorganismen (...) Wegbereiter für chemische und physikalische Anfgriffe."[4] Im Gebäudeinneren wird der mikrobielle Schadensprozeß an Putzen und Malschichten ebenfalls durch Feuchtigkeit verursacht.[5] Diese stammt aus der Raumluft, fällt als Kondensat an oder steigt als Grundfeuchte in der Wand auf.

3 Sutter 1986, S. 28.

4 Bock 1991, S. 56.

5 Petersen und Krumbein 1991, S. 58f.

Holzzerstörende Pilze

Von Bedeutung für die Schädigung verbauter Hölzer sind saprophytische Pilze, die - im Gegensatz zu Parasiten - von totem organischem Material leben. Der Pilzkörper besteht aus Pilzfäden, den sogenannten Hyphen, deren Gesamtheit das Mycel bildet. Dieses überwuchert das Holz, durchdringt die Holzzellen und baut die Holzsubstanz ab. Mit fortschreitender Zerstörung des Holzes kommt es zur Ausbildung des Fruchtkörpers, der die Pilzsporen produziert. Diese werden durch Luftzug, Wind und Regen verbreitet und beginnen zu keimen, sobald sie auf einen geeigneten Nährboden treffen.[6]

Schimmelpilze bauen in der Regel keine Holzbestandteile ab[7] und beeinflussen damit die konstruktive Sicherheit nicht. Wo Schimmelpilze auftreten, herrschen allerdings auch Wachstumsbedingungen für gefährlichere Pilzarten. Bläuepilze sind ebenfalls für die konstruktive Sicherheit bedeutungslos; sie schädigen aber gefaßte Holzoberflächen, beginnend mit kraterartigen Durchbrüchen bis zur völligen Zerstörung der Malschicht.[8] Die übrigen Pilze (Moderfäule, Braunfäule) bauen Holzsubstanz ab und gefährden damit die Standsicherheit.

Das Wachstum der Pilze ist maßgeblich durch die Holzfeuchte bestimmt. Die anspruchslosen Schimmelpilze entwickeln sich z. B. bei Holzfeuchten zwischen 30% und 80%, Moderfäule entsteht erst bei höheren Werten. Nur der Echte

6 Sutter 1986, S. 28-32.

7 Sutter 1986, S. 36.

8 Sutter 1986, S. 38.

Hausschwamm ist in der Lage, zu trockenes Holz durch Transport von Wasser im Mycel soweit zu benetzen, daß ein Abbau möglich wird. Die Holzfeuchtigkeit jedoch steht in direkter Abhängigkeit zur umgebenden Luftfeuchtigkeit (neben Kontakt zu feuchtem Mauerwerk, Erdreich, Wassereinbruch u.ä.), d. h. Holz ist hygroskopisch. Die Hygroskopizität findet bei einer Feuchte des Holzes zwischen 0% (darrtrocken) und 30% (Fasersättigung) statt. Ein Beispiel: Echter Hausschwamm, der in einem Temperaturbereich zwischen 3 und 26°C wächst (optimal 21 -22°C), benötigt eine Holzfeuchte zwischen 20% und 55% (optimal 30% - 40%). Bei 20°C wird eine Holzfeuchte von 20% bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von ca. 87% erreicht.

Die Klasse der Basidiomyceten (am bekanntesten: Kellerschwamm, Hausschwamm) ist in der Lage, den Stoffwechsel in der Trockenstarre auf ein Minimum einzuschränken und so bis zu elf Jahre Trockenheit zu überstehen.[9] Die Überlebensdauer ist allerdings abhängig von der Temperatur. So überlebt Serpula lacrimans (Echter Hausschwamm) in der Trockenstarre bei 7,5°C sieben Jahre, bei 20°C zwei Jahre, und war bei 27°C nicht überlebensfähig.[10]

9 Sutter 1986, S. 32.

10 Bavendamm 1974, S. 136.

Holzzerstörende Insekten

Von den holzzerstörenden Insekten interessieren in unserem Zusammenhang lediglich die Trockenholzinsekten. Bei diesen bestehen Unterschiede nicht nur hinsichtlich der bevorzugten Holzarten und der Verwertung der einzelnen Nährstoffe im Holz durch die Insektenlarven, sondern auch hinsichtlich der klimatischen Bedingungen für ein optimales Larvenwachstum. Entwickelt sich z. B. die Hausbocklarve bei einer Temperatur von 28-30 °C am günstigsten, stellt die Nagekäferlarve bei über 22 °C ihr Wachstum bereits ein.[11]

Die Luftfeuchtigkeit beeinflußt das Larvenwachstum ebenfalls. Der Splintholzkäfer benötigt für ein normales Larvenwachstum eine Holzfeuchtigkeit von mindestens 8%, der gewöhnliche Nagekäfer und auch der Hausbock 10% bis 12%. Solche Werte werden bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 60% bei 20 °C erreicht; dann liegt die Holzfeuchtigkeit zwischen 10% und 12%.[12] Wo notwendig, kann die Holzfeuchte durch möglichst direkte Temperierung - etwa an Balkenköpfen im Mauerwerk - unter 10 % gesenkt werden.

Daraus könnte man nun schließen, daß sich Schäden durch holzzerstörende Insekten kaum durch eine Steuerung der relativen Luftfeuchte verhindern lassen. Dem ist jedoch nicht so, da so wichtige, in ganz Europa verbreitete Nagekäfer wie Anobium punctatum (Gewöhnlicher Nagekäfer) Kernholz nur nach vorhergegangenem Pilzbefall heimsuchen,[13] läßt sich über eine Verhinderung des Pilzwachstums auch ein Nagekäferbefall vermeiden. Auch die Nagekäfer Xestobium rufovillosum (Totenuhr, Bunter Nagekäfer) und Coelostethus pertinax (Trotzkopf) bevorzugen pilzbefallenes Eichenholz.[14]

11 Sutter 1986, S. 60.

12 Sutter 1986, S. 60.

13 Sutter 1986, S. 78.

14 Sutter 1986, S. 92 und 96.

Klimamessung

Eine Kontrolle der Klimawerte im historischen Bauwerk ist zur Schadensverhütung unumgänglich. Dazu gibt es eine Reihe von Geräten, die mehr oder weniger genau, komfortabel und störungsanfällig sind. Am weitesten verbreitet sind auch heute noch einfache Thermohygrographen, die die Temperatur- und Feuchtewerte kontinuierlich auf ein Datenblatt aufzeichnen. Diese Geräte messen trotz regelmäßiger Wartung (Regeneration der verstaubten und verkürzten Haare in 14-tägigem Abstand) und Eichung (mittels elektronischer Kontrollmessungen) recht ungenau. Zudem kann eine kontinuierliche Überwachung der Messungen keine Feinschwankungen des Klimas erfassen (1 cm Aufzeichnungsbreite entsprechen vier Stunden!).[15]

Genauer sind tragbare oder stationäre elektronische Meßgeräte. Komfortabler als Handmeßgeräte sind elektronische Meß- und Aufzeichnungsstationen mit einer variablen Anzahl von Fühlern bzw. Gebern. Solche Geräte eignen sich auch zur zentralen Überwachung der Klimawerte mehrerer Gebäude.

15 Großeschmidt 1992, S. 30.

Das Westfälische Freilichtmuseum Detmold hat zur Raumklimaüberwachung 1993 einen sogenannten Thermo-Hygro-Datenlogger angeschafft. Dieser besteht aus einem PC mit der Software CAN-Recorder unter Windows. Das Gerät ist mit vier Sensoren ausgestattet (eine höhere Anzahl ist möglich), von denen drei die Temperatur und die relative Luftfeuchte in unterschiedlichen Räumen eines Museumsgebäudes messen, ein vierter mißt die Werte in der Bausubstanz einer Außenwand. Die Software ermöglicht die Eingabe eines individuellen Meßintervalls (Abtastrate zwischen 1 Sekunde und 20 Stunden) und zeichnet alle Messungen auf. Die Ausgabe ist sowohl tabellarisch als auch graphisch möglich. Werden vorher individuell für die einzelnen Sensoren eingegebene Grenzwerte über- bzw. unterschritten, meldet der Rechner dies in einem speziellen Alarmfenster.

Wie auch bei den Datenblättern der herkömmlichen Thermohygrographen genügt das Lesen nach Wechsel des Aufzeichnungsträgers nicht, denn Schäden können dann bereits eingetreten sein. Die laufende Überwachung der Meßanzeigen kann durch Laien erfolgen. Es ist also möglich, das Aufsichtspersonal im Museum dazu einzusetzen, regelmäßig die Klimawerte abzulesen und bei Erreichen bzw. Über- oder Unterschreiten der Grenzwerte umgehend Meldung zu erstatten.

Lösungsexperimente

Da der Zusammenhang zwischen Temperatur und Feuchte erkannt war, wurde im Westfälischen Freilichtmuseum Detmold schon Ende der siebziger Jahre begonnen, die Raumfeuchte durch Wärmezufuhr zu beeinflussen.[16] Anlagen, die auf die freilichtmusealen Bedürfnisse zugeschnitten waren, fehlten aber noch; so wurden zunächst in den Jahren zwischen 1979 und 1987 sieben konventionelle Heizungsanlagen installiert. Aus optischen Gründen bevorzugte die Museumsleitung Fußbodenheizungen oder Plattenheizkörper, die sich in Wandfarbe streichen ließen und damit fast „unsichtbar" wurden. In ein Gebäude wurde wegen der besonders wertvollen barocken Wand- und Deckenmalereien eine temperatur- und feuchtegesteuerte Klimaanlage eingebaut.

16 Kleinmanns 1989.

Abbildung 2-4:
Montagebeispiele der Temperierrohre in der Fasanerie: Keller, auf Putz am Wandsockel; Erdgeschoß, hinter Holzstoßleiste mit Lehmfüllung; Erdgeschoß, hinter Fußleiste aus ca. 1 cm starken Steinplatten (beide Beispiele vor Montage der Abdeckung). Fotos Henning Großeschmidt, München.

Da einerseits die Heizungen von Ingenieuren nach DIN berechnet und andererseits zu Anfang auch keine Klimamessungen vorgenommen wurden, waren die Anlagen zur Temperierung überdimensioniert und es konnte durch die Beheizung der Museumsgebäude zur Übertrocknung kommen. Außerdem entstanden nun größere Klimaspannungen in den Räumen: Am und über dem Heizkörper war die Luft warm und zu trocken, in der entgegengerichteten Raumecke war es deutlich kühler und feuchter. Die Differenzen erzeugten einen Luftstrom mit entsprechender Staubaufwirbelung. Günstiger wirkten sich da schon die Fußbodenheizungen aus, die die Wärme großflächig bei insgesamt niedrigerer Vorlauftemperatur verteilten. Ein Nachteil aber blieb: In den kühleren Außenwänden konnte es durch die warme Innenluft während der Abkühlung auf dem Weg nach draußen zu unkontrollierbarer Kondensatbildung kommen. Schäden durch die beschriebenen Anlagen wurden trotz ihrer systemimmanenten Mängel bisher allerdings nicht beobachtet.

Die römische Hypokaustenheizung

Bei den beschriebenen Nachteilen herkömmlicher Heizungen schien die Lösung des Münchener Ingenieurs Karl Assmann optimal, der sich das Prinzip der römischen Hypokaustenheizung zunutze gemacht hat: nämlich eine Beheizung aller Verlustflächen, also der erdberührenden Fußböden und Außenwände was bei den Römern mittels Rauchgasen geschah, die die Hohlräme dieser Flächen durchströmten. Die Hypokaustenheizung wurde von den Römern seit dem ersten Jahrhundert v. Chr. angewandt. Aus einem backofenartigen Feuerungsraum, der sich unterhalb oder außerhalb des Hauses befand, zogen die heißen Feuergase durch einen Kanal in einen Hohlraum, der unter dem zu beheizenden Raum lag. An der entgegengesetzten Seite verließen die Rauchgase das Heizsystem durch die Rauchgaskanäle in den Wänden, den so genannten Tubuli.[17]

[17] Faber 1957, S. 69; Hüser 1979.

Die Temperierung

Die Temperieranlagen greifen dieses Prinzip auf. Assmann hatte bereits 1978 eine Wand-Bodenschalen-Temperierung in einem Studetenwohnheim erprobt. 1982 kam ein solches „Temperiersystem" erstmals in einem Museum zur Anwendung und wurde seitdem ständig an historische Bausubstanz angepaßt und vereinfacht. Nach einer Informationsreise zu den bayerischen Freilandmuseen in Fladungen und Bad Windsheim und einer Beratung durch die Landesstelle für die Nichtstaatlichen Museen in München wurde 1988 die erste Temperieranlage im Westfälischen Freilichtmuseum Detmold installiert: Bei einem historischen Fachwerkgebäude, das als Betriebsgebäude des Museums genutzt werden sollte, wurden sowohl zusammenhängende Wand- Bodenschalen eingebaut,als auch Bodenschalen allein mit offenen Randfugen(Austritt von Warmluft an den Außenwänden, Eintritt von Raumluft an den Innenwänden). Bis heute wurden im Westfälischen Freilichtmuseum 17 Temperieranlagen installiert und weitere sind in Planung. Dabei wurden auch Bauten, die bereits Schadensbilder durch zu hohe Feuchte zeigten, mit geringem Aufwand nachträglich temperiert. Es zeigte sich, daß jedes Objekt seine spezielle Lösung benötigte und diese auch gefunden wurde. Eigene Lösungen wurden in Detmold ab 1991 erarbeitet: Bei dem in einem Stück umgesetzten Tagelöhnerhaus aus Rösebeck sollte das Erdgeschoß von Temperierleisten freigehalten werden, weil die Installation nicht ohne größere Eingriffe in die Substanz möglich war. Dadurch kam es in Detmold unabhängig von parallelen Entwicklungen in Bayern zu reinen Rohrlösungen: Um das Erdgeschoß trotzdem temperieren zu können, wurden die Heizrohre, diesmal bereits ohne das frühere Kupferblech zur Wärmeverteilung, direkt unter der Kellerdecke entlang der Außenwände verlegt. Konsequent weitergedacht erhielt die in situ im Museum stehende fürstliche Fasanerie Rohre in der Wand-Bodenecke über dem Bodenbelag.

Als Wärmequellen können verschiedene Erzeuger und Energien dienen. Neben zentralen Heizwerken, denen in Detmold der Vorzug gegeben wird, sind

dezentrale Kleinstationen möglich. Ökologisch sinnvoll und praktisch auch durchführbar ist die Nutzung von Solarenergie. Ebenso lassen sich kleine Gasheizungs-Thermen verwenden, die eine preiswerte Übergangslösung bis zum Bau einer Nahwärmeleitung darstellen und aus Flüssiggastanks gespeist werden können. Energetisch und ökologisch weniger geeignet sind Elektroboiler und Elektrokompaktstationen, die als Übergangslösung aber durchaus ihre Berechtigung haben können. Elektrokompaktstationen (Wärmetauscher) sind aufgrund ihrer geringen Abmessungen bei sehr eingeschränktem Platzangebot durchaus eine Problemlösung (Tauchsieder mit Umwälzpumpe in Patrone mit Ausdehnungsgefäß, Verteiler, Füll- und Entleerungsarmatur; z. B. 2 kW, 6 kW oder 9 kW Leistung).

Alle diese genannten Arten beruhen auf einer Wärmeverteilung durch Warmwasserrohre (Kupferrohre, meist mit einem Durchmesser von 15 mm). Daneben können auch elektrische Kabelheizungen verwendet werden (Dachrinnenheizung), deren Betrieb jedoch aus energetischen und ökologischen Gründen ebenfalls nur in Ausnahmefällen sinnvoll ist.

Auswirkungen

Temperierung nach den hier beschriebenen Grundsätzen ist eine Strahlungsheizung; sie erfordert geringeren Energiebedarf als eine „Luftheizung", auch und insbesondere bei erhöhten Luftwechselraten, wie sie in denExponatgebäuden vorliegen.[18] Durch die Wärmezufuhr in der Bausubstanz wird der U-Wert durch die trocknende Wirkung erheblich verbessert, und zwar bei 1% Trocknung um 10%.[19] Gleichzeitig wird die Kapillarwirkung unterbrochen.

Insgesamt wird dadurch eine Reduzierung der relativen Luftfeuchtigkeit erreicht. Damit wird tierischen und pflanzlichen Schädlingen die Wachtumsgrundlage entzogen. Da auf eine Wärmedämmung verzichtet werden kann (einerseits wegen des verbesserten U-Wertes, andererseits wegen des bei Nur-Temperierung geringen Temperaturunterschieds zwischen innen und außen) und außerdem Feuchtigkeit nicht in die Wand, sondern aus der Wand heraustransportiert wird, besteht nicht die Gefahr von Kondensatbildung in der Außenwand. Von außen einwirkende Feuchtigkeit bzw. Nässe (z. B. Schlagregen) wird durch die Wärmezufuhr in der Wand schnell wieder nach außen abgegeben; sie schlägt nicht nach innen durch, wie es bei nicht-temperierten Häusern beobachtet wird. Die Außenseite eines temperierten Gebäudes erfordert einen geringeren Pflege-

18 Großeschmidt 1992, S. 11.

19 Großeschmidt 1992, S. 11.

Abbildung 5: Unterschiedlicher Erhaltungszustand der Fassade von Haus Ludovici im Westfälischen Freilichtmuseum Detmold. Erd- und Obergeschoß temperiert, Dachgeschoß nicht temperiert. Foto Westfälisches Freilichtmuseum Detmold.

aufwand, da Putze und Anstriche wesentlich länger halten. Als Beispiel kann der Vordergiebel des Hauses Ludovici im Freilichtmuseum Detmold dienen, der dort nach Südwest ausgerichtet ist. Im Bereich des Giebeldreiecks waren bereits nach zwei Jahren Standzeit deutlich Witterungsschäden erkennbar. Im Bereich des Wandkastens ist der Kalkanstrich noch intakt. Der Grund ist einzig die Temperierung im Erd- und Obergeschoß. Da beim Bau des Hauses eine Leitungsführung zur Nachrüstung des Dachbodens bereits berücksichtigt worden war, konnte das Giebeldreieck mit geringem baulichen Aufwand nachtemperiert werden.

Die hier vorgestellte Gebäudetemperierung dient also der Feuchtesanierung, Klimastabilisierung und Temperierung bei einem geringen Installationsaufwand bzw. -eingriff und einem geringen Energiebedarf. Sie verhindert Schäden durch mikrobielle, pflanzliche oder tierische Schädlinge sowie durch Salze und reduziert Witterungsschäden.

Literatur

Bavendamm, W.: Die Holzschäden und ihre Verhütung. Stuttgart 1974.

Bock, E.u.a.: Belastung von Natursteinen mit salpetersäurebildenden Bakterien - eine Bewertung am Beispiel von ausgewählten Beispielen. In: Snethlage, Rolf (Hg.): Jahresberichte aus dem Forschungsprogramm Steinzerfall - Steinkonservierung, Bd. 1/1989. Berlin 1991, S. 47-56.

Faber, Alfred: Entwicklungsstufen der häuslichen Heizung. München 1957.

Faller, Alexander/Ekkehard Karotke: Die Rolle der Feuchte bei der Verwitterung von Baustoffen durch Salze. In: Feuchteschutz bei historischen Mauerwerksbauten. Karlsruhe 1988 (=Arbeitshefte des Sonderforschungsbereichs 315, Sonderheft), S. 63-70.

Großeschmidt, Henning (Bearb.): Die Temperierung. Verfahren zur thermischen Bausanierung, Raumtemperierung und Klimastabilisierung in Museen und anderen Gebäuden. Hg. von der Landesstelle für die Nichtstaatlichen Museen beim Bayerischen Landesamt für Denkmalpflege. München 1992.

Hüser, H.: Wärmetechnische Messungen an einer Hypokaustenheizung in der Saalburg. In: Saalburg-Jahrbuch 36/1979, S. 12-30.

Kleinmanns, Joachim: Klimaschutz von Exponaten im Westfälischen Freilichtmuseum Detmold. In: Raumklima im Freilichtmuseum. Klimastabilisierende Maßnahmen. Internationales Symposium im Freilichtmuseum des Bezirks Oberbayern an der Glentleiten 5./6. Mai 1988. Großweil 1989, S. 36-39.

Petersen, K./W. E. Krumbein: Mikroorganismen beschleunigen den Zerfall mittelalterlicher Wandgemälde in der Krummhörn am Beispiel der Wandmalerein in der ev.-ref. Kirche in Eilsum. In: Snethlage, Rolf (Hg.): Jahresberichte aus dem Forschungsprogramm Steinzerfall - Steinkonservierung, Bd. 1/1989. Berlin 1991, S. 57-69.

Röntsch, Heinrich/Hans-Jürgen Schwarz: Salz - der Intimfeind von Wandmalereien. In: Berichte zur Denkmalpflege in Niedersachsen, 11. Jg./1991, S. 68-71.

Sutter, Hans-Peter: Holzschädlinge an Kulturgütern erkennen und bekämpfen. Handbuch für Denkmalpfleger, Restauratoren, Konservatoren, Architekten und Holzfachleute. Bern, Stuttgart 1986.

Anhang

Liste der beheizten und temperierten Gebäude des Westfälischen Freilichtmuseums Detmold

Heizungen

1979 Valpagenhof (Fußbodenheizung und Plattenheizkörper)
1979 Scheune Westendorf (Fußbodenheizung)
1979 Schönhof (Luftheizung mit Temperatur- und Feuchteregelung)
1979 Hof Segering-Hidding (Fußbodenheizung)
1981 Hof Zeddies (Fußbodenheizung und Plattenheizkörper)

1986 Haus Stahl (Plattenheizkörper)
1987 Haus Düsterdieck-Kumlehn (Fußbodenheizung und Plattenheizkörper)

Temperieranlagen

1988 Leibzucht Grote (Boden-Wandschalen, Sockeltemperierleiste)
1988 Handwerkerhaus aus Blomberg (Bodenschale, Sockeltemperierleiste)
1989 Haus Ludovici (Bodenschale, Sockeltemperierleiste, Wandschale)
1991 Haus Finckeldei (Bodenschale, Sockeltemperierleiste)
1991 Bäckerei Witte (Boden-Wandschalen)
1992 Tagelöhnerhaus aus Rösebeck (Bodenschalen, Sockeltemperierleiste, Sockeltemperierrohre mit Leibungsumwegen)
1992 Haus Kayser-Henke (Bodenschale, Sockeltemperierleiste)
1992 Handwerkerhaus aus Medebach (Bodenschale, Sockeltemperierleiste)
1993 Haus Sommer (Fußbodenheizung, Sockeltemperierleiste)
1993 Speicher Sommer (Sockeltemperierleiste)
1993 Fasanerie (Fundamenttemperierung)
1993 Haus Moven (Fundamenttemperierung)
1993 Leibzucht Lindhorst (Fundamenttemperierung)
1993 Speicher Valpertz (Fundamenttemperierung)
1994 Haus Golücke (Fundamenttemperierung)
1994 Kuhstall Hilmer-Borgolte (Fundamenttemperierung)
1994 Haupthaus Büssing-Brand (Fundamenttemperierung)
1994 Haus Vinsebeck (Fundamenttemperierung)
1994 Magazin Alter Schafstall, Klosterdomäne Dalheim (Fundamenttemperierung)
1999 Leibzucht Lindhorst (Erweiterung der Fundamenttemperierung)
1999 Haupthaus Große-Endebrock (Fundamenttemperierung)
1999 Valpagenhof (Beseitigung der Plattenheizkörper und Ersatz durch Fundamenttemperierung)
1999 Haus Meise (Fundamenttemperierung)
2000 Pastorat aus Allagen (Fundamenttemperierung und Sockeltemperierrohre mit Leibungsumwegen)
2000 Zentralmagazin Fliegerhorst Detmold (Sockeltemperierrohre mit Leibungsumwegen)
2001 Kapellenschule Werthenbach (Fundamenttemperierung und Sockeltemperierrohre mit Leibungsumwegen)

Anmerkung des Herausgebers: Die hier verwendeten Begriffe benötigen eine Erklärung. *„Sockeltemperierleiste“* steht vor allem für die Abkehr von Wand- und Bodenschalen in den 1980er Jahren. In diesen Temperierschalen waren flache Heizelemente montiert, bestehend aus zwei Kupferrohren, die mit einem 12 cm hohen Blechstreifen verbunden waren (keine Kleinkonvektoren, wie bei der Sockelleistenheizung).

Vor diesen wurde schwebend eine Holzleiste montiert, so daß in dem so gebildeten Schacht Luft unten ein- und oben aus ihm austreten konnte (keine Schale, Leistungssteigerung nur linear, also geringer als beim Kleinkonvektor).

Wurden lediglich Heizrohre in Materialkontakt verlegt, sprach man zunächst von *Fundamenttemperierung*, da man in Detmold bei der Aufstellung von Fachwerkhäusern auf Streifenfundamenten oder Bodenplatten oft den Steinsockel unter der Schwelle als einfachsten Einbauort für die Rohre nutzte. Dabei verlegte man die Rohre möglichst nah der Geländeoberfläche, ggf. mit einer dünnen Abdeckung aus Lehm.

Der Begriff *Sockeltemperierrohre* wird verwendet, seit man Heizrohre im heutigen Sinne der Temperierung im Sockelbereich der Raumwände einbaut (in der Wand-Boden-Ecke, oberhalb der Bodenoberfläche), in allen Geschossen, sowohl auf Putz, als auch unter Putz, ggf. mit Umfahrung von Fenster und Außentüren.

Joachim Kleinmanns

Tempering of Historical Buildings: A Method for Preventing Building Damage Due to Moisture

Editors' Note: The following article (revised version) was originally published under the same title for the Meeting of the Association of European Open Air Museums in Detmold from 23–25 September 1994. The meeting's Proceedings, entitled "Conservation of Wooden Buildings, Copies of Historical Buildings in Open-Air Museums" was published for the Association of European Open Air Museums by the Landschaftsverband Westfalen-Lippe/Westfalian Open-Air Museum in Detmold 1995 (Ed. Stefan Baumeier). Joachim Kleinmanns is an historian of architecture and worked for the Westfalian Open-Air Museum in Detmold before he changed to the University of Karlsruhe in 1994.

Abstract

Salination of masonry, fungi and algae, and, as a result, also pest infestations in wooden parts of buildings are the major forms of damage due to humidity in the historical buildings of open-air museums. Control of the climate conditions is indispensable for avoiding damage. At the end of the 1970's the Westfalian Open-Air Museum in Detmold started trying to influence room humidity through heating. From 1979 until 1987 conventional heating systems were installed, which were unsatisfactory at preventing damage. Only after 1988, with the installation of several tempering systems, could satisfactory results be achieved. Both moisture dependent building damage and building-specific energy requirements were drastically reduced in comparison to the use of conventional heating systems.

Die Temperierung historischer Gebäude:
Eine Methode zur Verhütung feuchtebedingter Bauschäden

Versalzung des Mauerwerks, Pilze und Algen und in der Folge auch der Schädlingsbefall an Holzbauteilen sind die Hauptschädigungsarten, die als Folge von Feuchtigkeit in historischen Gebäuden in Freilichtmuseen auftreten können. Eine Kontrolle der Klimabedingungen ist unumgänglich, um Schäden zu vermeiden. Ende der 1970er Jahre wurde im Westfälischen Freilichtmuseum Detmold begonnen, die Raumfeuchte durch Wärmezufuhr zu beeinflussen. Von 1979 bis 1987 wurden zunächst konventionelle Heizungsanlagen installiert, die nur unzureichende Wirkung in der Schadensprävention erreichten. Erst ab 1988 konnten mit dem Einbau mehrerer Temperieranlagen zufriedenstellende Ergebnisse erzielt werden. Sowohl feuchtebedingte Bauschäden, als auch der objektspezifische Energiebedarf im Vergleich zum Einsatz der konventionellen Heizsysteme haben sich drastisch verringert.

Figure 1:
Partial view of the "Paderborn Village" in the Westfalian Open-Air Museum in Detmold. Heat is supplied by a district heating system with a central boiler and a ring distribution pipe. Foto Westfälisches Feilichtmuseum Demold.

Damage to historic buildings caused by humidity is known to all of us: Salification of masonry, infestation by specific wood destructive insects, fungi, or genuine dry rot in the worst case. The damages range from spoiled or destroyed surfaces such as paints and plasters to impaired stability of the structural elements. Not only the historic buildings themselves suffer from the impact of humidity. Their historic furnishings are also at serious risk because these are often made of much more delicate materials such as veneers, paper, leather, or textiles.

Salification

Salts are contained in natural and artificial building materials in varying concentrations. Additional salts are introduced to the building materials by way of polluting substances in the air (chiefly SO_2 and SO_3). And finally, considerable quantities of salts rise with ground moisture[1] into the walls through capillaries, if no horizontal isolation has been provided. Even in high concentrations, the salts alone are not yet dangerous. But variations in the humidity content cause alternating crystallization and solution. The pressure caused by increasing volume during the formation of crystal lattices and the inclusion of water molecules into these lattices (hydration) exceeds the stability parameters of the surface layer of almost every stone and plaster.[2]

1 Faller und Karotke, 1988, p. 63.

2 Röntsch und Schwarz 1991, p. 68.

Microbial damage processes: Lichen, algae and mosses

Lichen, algae, and mosses develop in an environment of rich vegetation on almost all solid surfaces, if these are exposed to sufficiently wet weather, e.g. to water splashing against the base of a building. They are at least indirectly involved in the destruction of the building substance, because — by retaining moisture — they create a microclimate in which fungi can best develop.[3] A joint BMFT (German Research Ministry, now BMBF) research project on the deterioration of stone revealed the extent to which damage by demineralization of natural stone — described as bio-erosion — may be caused by lichen, algae, and mosses. According to this study, "micro-organisms ... are the pathmakers of chemical and physical attacks."[4]

Inside buildings, the microbial processes of deterioration of plasters and paints are likewise caused by humidity[5] derived from the air inside the room, condensation, and moisture rising from the ground into the walls.

3 Sutter 1986, p. 28.

4 Bock 1991, p. 56.

5 Petersen und Krumbein 1991, p. 58f.

Wood destructive fungi

Damage to the wood which forms part of a building is done by saprophytic fungi which — contrary to parasites — live on dead organic material. The body of the fungus consists of threads or hyphae, all of which are formed by the so called mycelium, which overgrow the wood, penetrate into the wood cells, and destroy their substance. In the course of progressive destruction, the fungus develops the fruiting body which produces the spores. These are scattered by drafts, wind, and rain and start to germinate as soon as they find a suitable fertile soil.[6]

Mold usually does not destroy wood,[7] and does not affect the structural safety of a building, but wherever mold occurs, the conditions are favorable for other, more dangerous species of fungi. Blue mold likewise does not affect the structural safety of a building, but it damages painted wooden surfaces, starting with crater-like holes and leading up to complete destruction of the paint layer.[8] The remaining fungi (soft and brown rot) cause wood to decompose and thus jeopardize structural stability.

The growth of fungi is essentially determined by the degree of humidity of the wood. The undemanding mold fungus for instance develops in 30% to 80% humidity in the wood, soft rot only at higher values. Only genuine dry rot is able to wet overly dry wood by transporting water in the mycelium until decomposition becomes possible. The humidity of the wood, however, is in direct relation to the humiditiy of the surrounding air (apart from contact with moist walls, soil,

6 Sutter 1986, p. 28-32.

7 Sutter 1986, p. 36.

8 Sutter 1986, p. 38.

penetration of water, and the like), i.e. wood is hygroscopic. The hygroscopicity ranges from 0% humidity (kiln dry) to 30% (fiber saturation). To give an example: genuine dry rot growing at temperatures between 3°C and 26°C (optimum 21-22°C) requires 20% to 55% humidity of the wood (optimum 30% to 40%). At 20°C, the humidity in the wood will be 20% at a relative air humidity of approximately 87%

During dry rigor, the class of basidiomycete (the most common species are cellar rot and dry rot) is in a position to reduce its metabolism to a minimum and can overcome eleven years of dryness.[9] The period of survival, however. depends on the temperature. sepula lacrimans (genuine dry rot) survives seven years at 7.5°C in its dry rigor, two years at 20°C, but does not survive at all at 27°C.[10]

9 Sutter 1986, p. 32.

10 Bavendamm 1974, p. 136.

Wood destructive insects

In this instance, we are merely interested in those insects which destroy dry wood, and this is where we find differences not only with respect to the preferred species of wood and the use of individual nutritive substances in the wood by the larvae of the insects, but also with respect to the climatic conditions required for optimum growth of the larvae. While the larvae of hylotrupes bajulus, known as house longhorn beetle, develop most favorably at a temperature of 28-30°C, the knawing beetle larva stops growing at temperatures above 22°C.[11]

11 Sutter 1986, p. 60.

The humidity of the air also influences the growth of the larvae. The bark beetle requires a wood humidity of at least 8% for normal growth of its larvae, the common knawing beetle and the house longhorn beetle require 10% to 12%.

These values are reached at 60% relative air humidity at 20°C. The humidity of the wood then ranges between 10 and 12%.[12] Where needed the humidity of wood can be held below 10% by direct tempering of material. e.g. the ends of ceiling beams in the masonry.

12 Sutter 1986, p. 60,

The above seems to imply that damage by wood destroying insects can hardly be avoided by controlling the relative humidity of the air. But this is not the case. As the important knawing beetles (e.g. anobium punctatum) only attack the durable heart wood after prior infection with fungi,[13] avoiding fungi also means avoiding beetles. Xestobium rufovillosum (death watch, colored knawing beetle) and also coelostethus pertinax prefer oak which has been infected by fungi.[14]

13 Sutter 1986, p. 78.

14 Sutter 1986, pp. 92 & 96.

Climate measurement

Monitoring the climatic values in historic buildings is indispensable to avoiding damage. There is a series of instruments, each of which is more or less accurate, easy to operate or reliable. The most commonly used instruments are still simple thermohygrographs, which continuously chart temperature and humidity values. The measurements of these instruments are not very accurate, in spite of regular servicing (regeneration of the dusty and shortened hairs every two weeks) and calibration (by electronic measurement). In addition, continuous monitoring of the measurements cannot record the minute fluctuations in the climate (1 cm of recording width corresponds to 4 hours).[15]

15 Großeschmidt 1992, p. 30.

Portable or stationary electronic instruments are more accurate. Electronic measurement and logging stations are more efficient, because they are equipped with a variable number of sensors and probes. These instruments are also suitable for central monitoring of the climatic values of several buildings.

The Westphalian Open Air Museum Detmold has acquired a so-called Thermo-Hygro Data Logger to monitor the climate inside its buildings. It consists of a PC with CAN Recorder software running under Windows. The Logger is equipped with 4 probes (more are possible), three of which measure the temperature and relative air humidity in the different rooms of a museum building, the fourth probe measures these values within an outer wall. The software allows for input of individual measurement intervals (between 1 second and 20 hours) and records all measurements. The output is in the form of tables and graphs. If

the values are outside preset individual limits for the different sensors, this will be indicated by the computer in a special alarm window. As with the charts of traditional thermohygrographs, reading the charts after the chart paper has been changed is not sufficient. Continuous monitoring of the displayed measurements by trained specialists, however, is not necessary. It is possible to teach museum supervisors how to read the climatic values regularly and to report any outside of limit values.

Experiments to solve the problem of humidity

Since the connections between temperature and humidity were already known, the Westphalian Open Air Museum had started to influence the humidity inside buildings by adding heat as early as the end of the seventies.[16] But heating systems tailored to the requirements of the Open Air Museum were still missing. In the years 1979 to 1987, seven traditional heating systems were installed. For optical reasons, the museum management preferred underfloor systems or flat radiators which could be painted in the colors of the walls to be made almost "invisible." In one building, a temperature and humidity controlled air conditioning system was installed to preserve the very valuable baroque paintings on the walls and ceiling.

16 Kleinmanns 1989.

Since the heating systems were specified by engineers in accordance with DIN standards and as no initial climatic measurements had been made in the first place, the heating systems were overdimensioned and the heated rooms were at risk of drying out. In addition, the systems created higher climatic stresses in the rooms. At and above the radiators, the air was warm and too dry; in the opposite corner the air was noticibly cooler and moister. These differences caused air currents and stirred up dust.

Floor heating systems proved more efficient, as the heat is more evenly distributed over larger areas at lower supply temperatures. But one disadvantage remained. In the cooler outer walls, the warm interior air could cause uncontrollable condensation of the moisture contained in the air on its way from inside to

Figures 2-4:
Installation of tubes in the Fasanerie: Cellar, on-plaster at wall base; Ground floor, behind wooden molding with clay filling; Ground floor, behind baseboard of ca. 1 cm thick stone plates (the two latter examples before the molding is mounted).
Photos Henning Großeschmidt, München.

outside. However, no damage due to said heating systems has been observed, although these definitely have some inherent deficiencies.

The Roman Hypocaust heating system

Because of the disadvantages of traditional heating systems described above, the solution of Karl Assmann of Munich appeared to be optimal, making use of the principle of the Roman hypocaust. All areas and surfaces subject to heat loss, i.e. the floors and outer walls touching the ground are heated by the flow of combustion gases. This heating system was used by the Romans from the first century before Christ. From a stove-type combustion chamber (fornax) outside the building, the hot smokey hot gases are conducted through a hollow space (hypocaustum) underneath the room to be heated. The gases leave the hollow space through closely spaced channels in the walls, so called tubuli.[17]

17 Faber 1957, p. 69; Hüser 1979.

Tempering Systems

Tempering systems adopt this principle. As early as 1978, Assmann tested a floor- and wall-shell tempering system in a student dormitory. In 1982, this type of tempering system was first introduced in a museum, and since then has been continuously simplified and adapted to historic buildings.

After an information trip to the Bavarian Open Air Museums in Fladungen and Bad Windsheim and consultation with the Bavaian Museums Service in Munich (Landesstelle für die nichtstaatlichen Museen in Bayern) in 1988, the first tempering system was installed in the Westphalian Open Air Museum in Detmold. In an historic half-timbered building, which was to be used as the museum operations building, floor and wall shells and baseboard heating were installed. To date, 17 tempering systems have been installed in Detmold, and further projects are being planned. In the course of these operations, even buildings which were already heavily damaged by excessive humidity were subsequently tempered at relatively low costs. We found that each building required an individual solution – which could be found in each case.

Some museum-own solutions were worked out in Detmold from 1991 onwards. In a day laborer's house, which had been transported from Rösebeck in one piece, the ground floor was to be kept free from baseboard heating because its installation was not possible without major damage to the substance of the building. In order to still be able to heat the ground floor, heating pipes were installed under the basement ceiling, along the walls, this time without the copper sheeting, which connected the two tubes of the baseboard tempering system. This is how in Detmold, independently from parallel developments in Bavaria, we came to tempering by directly heating the building mass.

Proceeding consistently, the pheasantry of the princes of Lippe, originally erected on its present site within the museum boundaries, was then equipped with a heating-pipe tempering system above the flooring. Three further museum buildings have followed this development.

Different heat sources can be used for the generation of the required heat. Apart from district heating plants, which have been given preference in Detmold, decentralized small heating stations are possible. Solar energy is ecologically sensible and practically feasible, because there is also an energy requirement in the summer when enough sunlight is available. Small gas heating systems for individual floors may likewise be used as an economical transition solution, until district heating ducts between buildings can be installed. These may be fuelled by liquified gas. Although energetically and ecologically less appropriate, electric boilers and electric compact stations may be acceptable as transition solutions. Electric compact stations (heat exchangers) are desirable solutions from the point of view that they require little space (immersion water heating and circulation pump in a cartridge, provided with an expansion vessel, manifolds, faucet for filling or draining; ratings of 2 kW, 6 kW, or 9 kW).

All these types of tempering systems utilize hot water pipes (copper tubes with a diameter of 15 mm) for the distribution of heat. In addition, electric cable heating systems may be used (gutter heating). These, however, must remain exceptions for ecological reasons.

Effects

Tempering as described here means radiation heating as a result of heating of the building mass. Such systems require less energy than "air heating systems," particularly at the high air change rates prevailing in open air museums.[18] Adding heat to the building structure improves its U-value, due to its drying effect, i.e. 1% drying will decrease the U-value by 10%.[19] At the same time, the capillary effect is interrupted.

[18] Großeschmidt 1992, p. 11.

[19] Großeschmidt 1992, p. 11.

In the end, the relative air humidity is reduced. The drier air deprives animal and plant pests of the conditions required for growth. Additional heat insulation is not required due to decreased U-values and the lower temperature difference between inside and outside air. Humidity does not penetrate into the wall, but is driven out, excluding the risk of condensation in the outer wall. Moisture penetrating from outside (from high humidity or heavy rain) is rapidly transported out again, if the wall is heated, and cannot penetrate inside as in many untempered buildings.

The outside of a tempered building requires much less care, because plaster and paint last for a longer period of time. The front gable of the Ludovici house in the museum, which points toward the southwest, can serve as an example. Weathering damage was already obvious here after two years. But the lime paint of the wall is still intact where the wall is heated. And since supply and return pipes for potential tempering of the attic were installed when the house was reerected, the gable triangle could later also be equipped with a tempering system at relatively low expense.

The tempering systems presented here serve to dehumidify the buildings in which they have been installed, to give them a more stable climate, and enable them to be kept at appropriate temperatures, without much installation work or damage to the building and with low energy consumption. They prevent damages due to microbial, animal, or plant pests as well as due to salts and reduce weathering damage.

Figure 5:
Different conditions of the facade of the Ludovici House in the Westfalian Open-Air Museum in Detmold. Ground floor tempered, upper floor not tempered. Photo Westfalian Open-Air Museum in Detmold.

Literature

Bavendamm, W.; Die Holzschäden und ihre Verhütung. Stuttgart 1974.

Bock, E. u. a.: Belastung von Natursteinen mit salpetersäurebildenden Bakterien - eine Bewertung am Beispiel von ausgewählten Beispielen. In: Snethlage, Rolf (ed.): Jahresberichte aus dem Forschungsprogramm Steinzerfall - Steinkonservierung, Bd. 1/1989. Berlin 1991, p. 47-56.

Faber, Alfred: Entwicklungsstufen der häuslichen Heizung. München 1957.

Faller, Alexander/Ekkehard Karotke: Die Rolle der Feuchte bei der Verwitterung von Baustoffen durch Salze. In: Feuchteschutz bei historischen Mauerwerksbauten. Karlsruhe 1988 (= Arbeitshefte des Sonderforschungsbereichs 315, Sonderheft), p. 63-70.

Großeschmidt, Henning (Bearb.): Die Temperierung. Verfahren zur thermischen Bausanierung, Raumtemperierung und Klimastabilisierung in Museen und anderen Gebäuden. Hg. von der Landesstelle für die Nichtstaatlichen Museen beim Bayerischen Landesamt für Denkmalpflege. München 1992.

Hüser, H.: Wärmetechnische Messungen an einer Hypokaustenheizung in der Saalburg. In: Saalburg-Jahrbuch 36/1979, p. 12-30.

Kleinmanns, Joachim: Klimaschutz von Exponaten im Westfälischen Freilichtmuseum Detmold. In: Raumklima im Freilichtmuseum. Klimastabilisierende Maflnahmen. Internationales Symposium im Freilichtmuseum des Bezirks Oberbayern an der Glentleiten 5./6. Mai 1988. Großweil 1989, p. 36-39.

Petersen, K/W. E. Krumbein: Mikroorganismen beschleunigen den Zerfall mittelalterlicher Wandgemälde in der Krummhörn am Beispiel der Wandmalereien in der ev.-ref. Kirche in Eilsum. In: Snethlage, Rolf (ed.): Jahresberichte aus dem Forschungsprogramm Steinzerfall - Steinkonservierung, Bd. 1/1989. Berlin 1991, p. 57-69.

Röntsch, Heinrich/Hans-Jürgen Schwarz: Salz - der Intimfeind von Wandmalereien. In: Berichte zur Denkmalpflege in Niedersachsen, 11. Jg./1991, p. 68-71.

Sutter, Hans-Peter: Holzschädlinge an Kulturgütern erkennen und bekämpfen. Handbuch für Denkmalpfleger, Restauratoren, Konservatoren, Architekten und Holzfachleute. Bern, Stuttgart 1986.

Appendix

List of buildings of the Westphalian Open Air Museums Detmold which have been provided with heating systems:

Heating systems:

1979 Valepage Farm (floor heating and panel radiators)
1979 Westendorf Barn (floor heating)
1979 Schönhof (air heating system using temperature and humidity control)
1979 Segering Hidding Farm (floor heating)
1981 Zeddies Farm (floor heating and panel radiators)
1986 Stahl House (panel radiators)
1987 Düsterdieck-Kumlehn House (floor heating and panel radiators)

Tempering systems

1988 Dower House Grote (floor-wall shells, baseboard tempering)
1988 Craftsman's House from Blomberg (floor shell, baseboard tempering)
1989 Ludovici House (floor and wall shells, baseboard tempering)
1991 Finckeldei House (floor shell, baseboard tempering)
1991 Witte Bakery (floor/wall shells)
1992 Day Laborer's House from Rösebeck (floor shell, baseboard tempering, wall base tempering with extensions on both sides of outer doors and windows)
1992 Kayser-Henke House (floor shell, baseboard tempering)
1992 Craftsman's House from Medebach (floor shell, baseboard tempering)
1993 Summer House (floor heating, baseboard tempering)

1993 Summer Barn (baseboard tempering)
1993 Pheasantry (foundation tempering)
1993 Moven House (foundation tempering)
1993 Dower House Lindhorst (foundation tempering)
1993 Valpertz Granary (foundation tempering)
1994 Golücke House (foundation tempering)
1994 Hilmer-Borgolte Cowshed (foundation tempering)
1994 Büssing-Brand Main House (foundation tempering)
1994 Vinsebeck House (foundation tempering)
1994 Magazin Old Sheep Barn, Dalheim cloister grounds (foundation tempering)
1999 Leibzucht Lindhorst (extension of foundation tempering)
1999 Große-Endebrock Main House (foundation tempering)
1999 Valpagenhof (removal of the plate radiators and replacement with foundation tempering)
1999 Meise House (foundation tempering)
2000 Pastorat from Allagen (foundation tempering system, baseboard tempering with extensions on both sides of outer doors and windows)
2000 Central Magazin Fliegerhorst Detmold (baseboard tempering with extensions on both sides of outer doors and windows)
2001 Werthenbach Chapel School (foundation tempering, wall-base tempering with extensions on both sides of outer doors and windows)

Editors' Note:
The terms used here require some comment. The word "*baseboard tempering*" stands for the turning away from the wall or floor shells of the 1980s. In these shells there were flat heating elements made of 2 copper heating pipes connected with a 12 cm high copper sheet (no baseboard convectors as with baseboard heating).

Wooden baseboards were mounted in front of the heating elements with a small distance above the floor, so that air could enter the shaft so formed from underneath and exit from above (no shell; only a linear increase of heat transfer with temperature, thus lower output than with baseboard convectors)

If only heating pipes in contact with the foundation were used, one spoke of "*foundation tempering*" as with the placement of half-timbered buildings on strip foundations or slabs. Often the base of the stone foundation, underneath the sill, was used as the simplest location for the tubing. The pipes were installed as close to the ground surface as possible, sometimes with a thin clay covering.

Later, the term *wall-base tempering* was used since the heating pipes were installed at the base of the room walls in the current sense of tempering (in the wall-floor joint above the floor surface), on all floors, on-plaster as well as under plaster, sometimes with detours around the windows and outside doors.

Dietmar Leipoldt

Kurzbericht über Heizkostenreduzierung, Energieeinsparungen und Investitionseinsparungen im Anlagenbau durch den Einsatz der Temperierung: Vergleichende Untersuchung im Gymnasium Waldstraße, Hattingen

Anmerkung des Herausgebers:
Zum Energiebedarf des Gymnasiums Waldstraße in Hattingen siehe auch: H. Großeschmidt. Das temperierte Haus, Kapitel 6.3.7.2.

Abstract

Gebäudebeheizung durch Temperierung hat gegenüber konventionellen Heizanlagen den Vorteil, daß der Energieverbrauch gesenkt und somit die Heizkosten reduziert werden. Deshalb entschied man sich 1996 im Gymnasium in der Waldstraße in Hattingen für die Installation eines Temperiersystems im Großteil der Klassenzimmer. Aus finanziellen Gründen konnten in den Räumen jedoch keine neuen Fenster eingebaut werden. Die alten, einfach verglasten Kastenfenster erhielten lediglich einen neuen Anstrich und wurden nicht abgedichtet. Auf Isoliermaßnahmen an Wänden und Decken wurde verzichtet, lediglich in einigen Dachbereichen wurden Dämmmaßnahmen durchgeführt. In einem Drittel des Gebäudes wird weiterhin konventionelle Heizung verwendet (Treppenhäuser teilweise kurz zuvor renoviert, in Aula und Musikübungsraum wollte man die Wandvertäfelung zum Einbau einer Temperierung nicht abnehmen, Verwaltungsräume konnten nicht in Umbaumaßnahmen mit einbezogen werden). Es ergab sich eine Investitionseinsparung von 21% gegenüber konventioneller Heiztechnik. Der Verbrauchswert liegt mindestens 25% unter dem vergleichbarer Schulen.

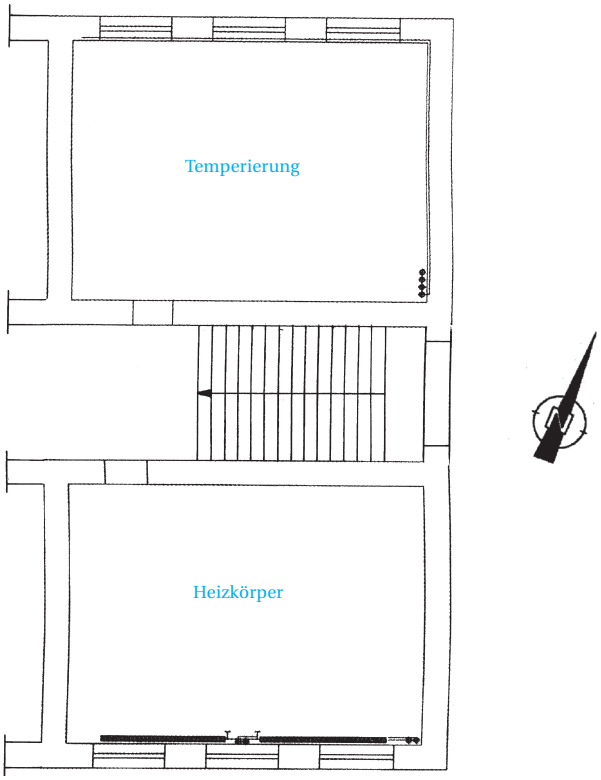


Abbildung 1:
Versuchsräume mit unterschiedlicher Beheizung im Gymnasium, Waldstraße, Hattingen. Grundriß.

Short Report about Heating Cost Reduction, Energy Savings and Capital Cost Savings in Installing Utilities through the use of Tempering: A Comparative Study in the Waldstraße Secondary School, Hattingen

Tempering buildings has an advantage over conventional heating systems, energy requirement and thus heating costs are reduced. So, it was decided in 1996 to install a tempering system in the majority of the classrooms of the Waldstraße Secondary School in Hattingen (Germany), a brick building from 1880. For financial reasons, no new windows could be installed in the rooms. The old single-glazed double casement windows received only new paint and were not sealed. No insulation was added to the walls and ceilings; this was done only in some roof areas. In a third of the building, conventional heating with warm water radiator/convectors continues to be used (the stair wells were partially renovated a short time earlier, it was not desired to remove the paneling in the auditorium and music practice room, the administration rooms could not be included in the renovation). The capital costs were 21% lower than with the radiator/convector heating system while the energy consumption was at least 25% lower than that of comparable schools.

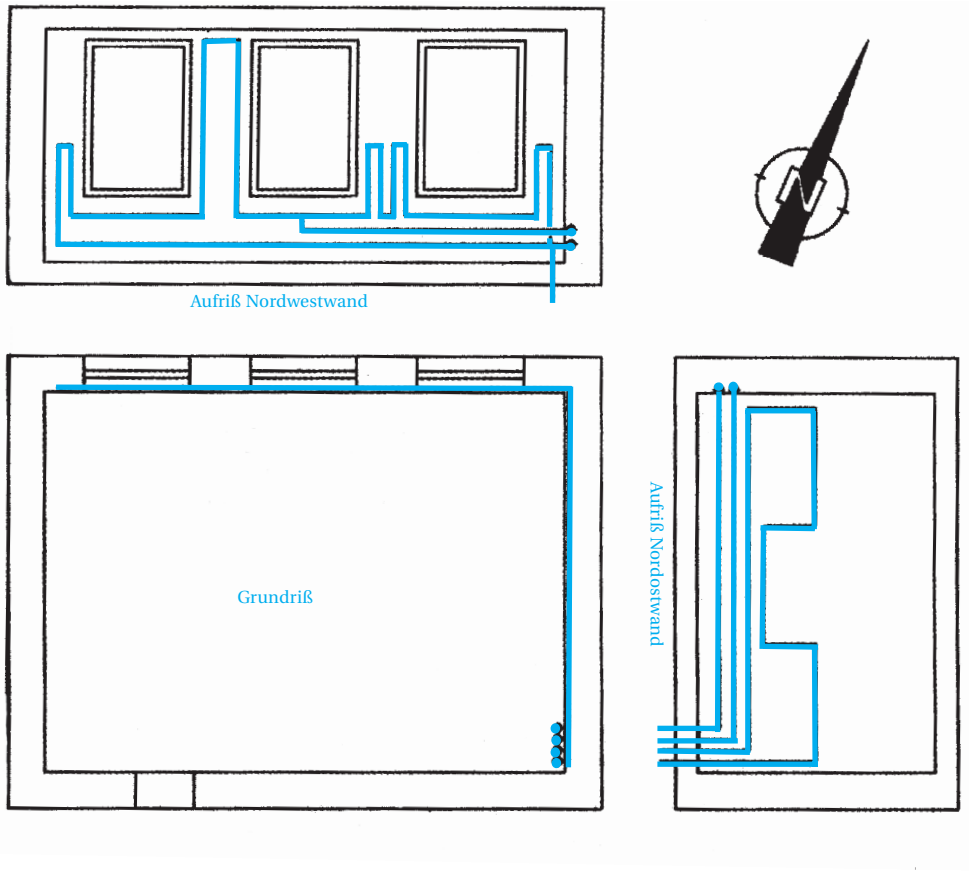


Abbildung 2:
Grundriß, Aufriß Nordostwand, Aufriß Nordwestwand des temperierten Raumes.
Länge der Temperierschleifen: Nordostwand 16 m (ohne Anbindeleitungen zur NW-Wand), Nordwestwand 45 m.
Die Berechnung für die Rohrleitungslänge erfolgte in Anlehnung an den nach DIN 4701 berechneten Wärmebedarf. Diese Berechnungsgrundlage ist jedoch nur bedingt geeignet,da Faktoren wie Behaglichkeit, besserer U-Wert, Speicherfähigkeit des Gebäudes und die dynamischen Verhältnisse im Mauerwerk nicht berück-sichtigt werden.
Unter Berücksichtigung dieser Faktoren können vom Heizrohr wesentlich höhere äquivalente Wärmeleistungen angenommen werden. Eine Reduzierung der Rohrleitungslänge kann somit erfolgen.

Die Maßnahme zum Einbau einer Temperieranlage wurde zuerst als Versuchsreihe in der Baumaßnahme Gymnasium Waldstraße durchgeführt: Ein Eckraum (Nordwesten) wurde mit dem Temperiersystem ausgerüstet, ein identischer Raum (Südosten) mit konventioneller Heizung. Beide Räume wurden energetisch gezählt und erhielten zur Temperaturerfassung innerhalb und außerhalb der Räume je 27 Meßpunkte. Alle Meß- und Zählpunkte bestanden aus geeichten Meßfühlern.

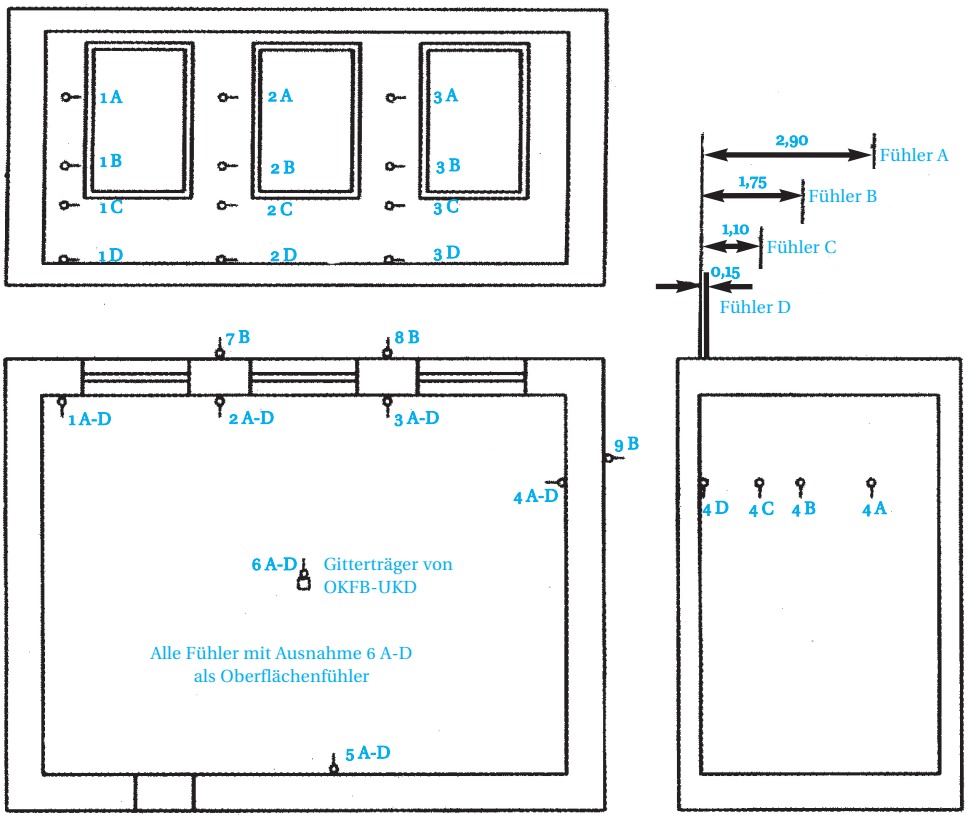


Abbildung 3:
Anordnung der Meßfühler im temperierten Raum.
Höhen der Meßfühler D-A gemessen ab Oberkante Fußboden: 0,15 m, 1,15 m, 1,75 m, und 2,90 m.
Grundriß, Aufriß Nordostwand, Aufriß Nordwestwand.

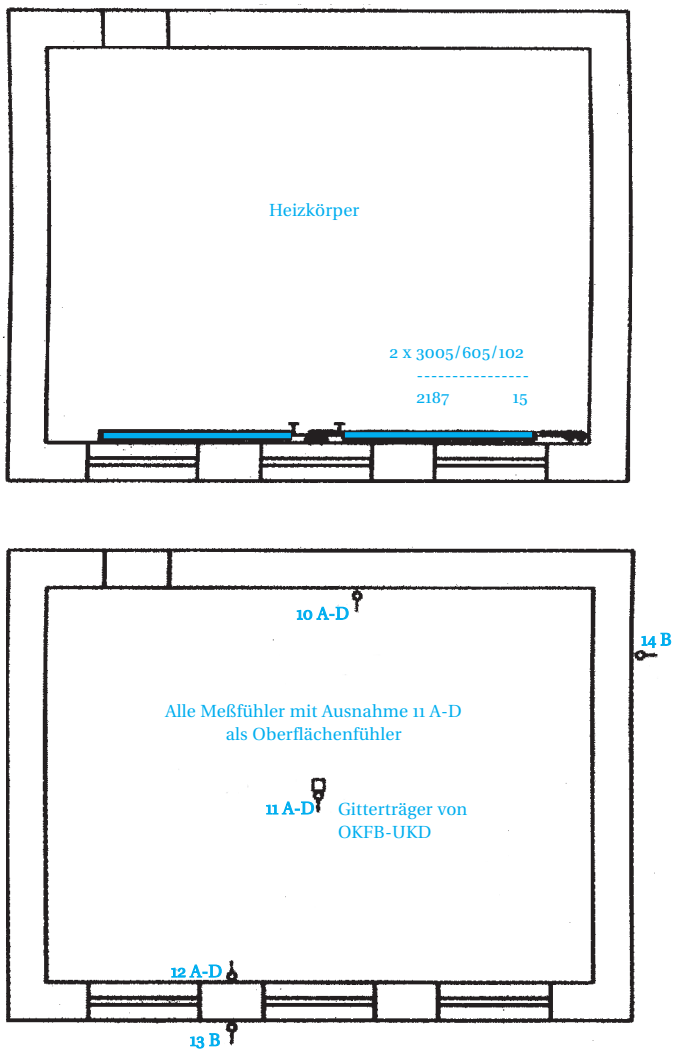
Während dieses Zeitraumes, vom 01. November 1995 bis 30. Juni 1997 (= 20 Monate) wurden gerundet 2,7 Mio. Meßwerte, jeweils bei einem Meßwertsprung 0,2 K aufgezeichnet, abgespeichert und anschließend ausgewertet. Nach Analyse der Auswertung stellte sich heraus, daß es sich lohnen würde, das gesamte Heizungssystem in der Altliegenschaft Gymnasium Waldstraße, erbaut um 1880, auf Temperiersystem umzustellen.

Die vorhandene Kessel- und Brenneranlage - erdgasbetrieben - wurde bereits im Jahre 1994/95 erneuert. Hätten zum damaligen Zeitpunkt schon die unten aufgeführten Ergebnisse vorgelegen, wären die Kessel- und Brenneranlage, die Energieschiene, die Kaminanlage, die Sicherheitsschiene usw. in diesem Projekt um 10 % der Anlagenkosten gemindert worden.

Der Altbauteil, ohne Verwaltung, wurde vom 04. Juli 1996 bis 17. August 1996 über eine Nutzfläche von 2.255 m² - 27 Klassen und Nebenräume sowie Vorbereitungsräume - mit dem sogenannten Temperiersystem ausgerüstet. Analogleistung laut Wärmebedarfsberechnung vom 15. Mai 1996 = 180.911 W, gesehen über die sogenannte Hüllfläche. Die Kosten der Anlage, bestehend aus konventioneller Heizungsanlage und Temperiersystem, betrugen laut Abrechnung der ausführenden Heizungsfirma netto € 32.560,00 einschl. Schlitzfräsung und -schließung im Bereich Temperiersystem.

Die Hochrechnung bzw. der Kostenvergleich bei Einbau einer konventionellen Radiator-Konvektor-Heizung hätte Kosten in Höhe von netto € 41.504,00 ergeben. Insgesamt wurden 1.600 lfdm. Temperiersystem (kunststoffummanteltes Kupferrohr sauerstofffrei) eingebaut, zuzügl. der notwendigen technischen Zubehörteile sowie 28 Heizkörper. Hier waren die Möglichkeiten des Umbaus zum Temperiersystem nicht gegeben, und zwar in Treppenhaus, Aula, Musikübungsraum und einigen anderen Räumlichkeiten. Die Herstellungskostendifferenz beträgt bei diesem Projekt belegbar 21%. Der Energiekostenvergleich über die gesamte Liegenschaft in der Zeit nach Einbau des Temperiersystems im

Abbildung 4-5:
Anordnung der 2 Heizkörper an der Südostwand des Heizkörperraumes (Größe der Heizkörper: Länge je 3005 mm, Höhe 605 mm, Tiefe 102 mm).
Anordnung der Meßfühler D-A im Heizkörperraum (Höhen ab Oberkante Fußboden): 0,15 m, 1,15 m, 1,75 m, und 2,90 m).



Vergleich zur Zeit davor zeigt eine Energiekosteneinsparung > 20 % auf. Die Vergleichszeiträume: Altbestand - Jahre 1993, 1994 bis 30. Oktober 1995 - mit Temperiersystem ab 01. November 1995 bis 30. Juni 1997.

Weitere technische Aussagen: Die Bedienungsfreundlichkeit des Temperiersystems gegenüber der normalen statischen Heizung ist besser, da Regelkomponenten eingespart werden können, d. h. Fehlerquoten werden reduziert. Ferner ist die Unfallgefahr in den Klassenräumen geringer, da vorstehende technische Teile nicht vorhanden sind.

Schon bei der Anordnung der Versuchsräume wurden die Wandbereiche mit Ölfarbe gestrichen, um festzustellen, ob aufgrund der thermischen Belastungen Rißbildungen im Wand- und Ölanstrich entstehen. Die Begutachtung durch das Hochbauamt der Stadt Hattingen schloß damit ab, daß keine Rißbildungen nach dem Betrieb 1995/96 vorlagen, obwohl Tiefsttemperaturen von -12° C als Außentemperatur mit Vorlauftemperaturen über 65° C aufgezeichnet wurden.

Der Winter 1996/97 zeigte Temperaturen von -22° C auf. Hier konnte nach eingehender Kontrolle der Wandoberfläche im gesamten umgebauten Gebäudebereich eine Rißbildung ebenfalls nicht festgestellt werden

Die Aussagen der Lehrer und Schüler über das Empfinden während des Schulunterrichtes in den Klassenräumen mit eingebautem Temperiersystem bestätigen einen besonders angenehmen Luftzustand.

Feststellung und Ausblick:

1.Kosteneinsparung im Investitionsbereich

2.Verbrauchskostenreduzierung

3.Reduzierung der Wartungs- und Instandhaltungskosten

4.Verbesserung der Raumluftzustände innerhalb der Klassen.

Theoretische Untersuchungen und Auswertungen an modernen Werkstoffen in Verbindung mit dem Temperiersystem bis zur Holzbauweise sind in umfangreichem Rahmen bereits durchgeführt und werden zur Zeit dokumentiert. Bereits veröffentlicht wurden die umfangreichen Auswertungen zum Gymnasium Waldstraße, die hier im Überblick vorgestellt wurden. Die Auswertung ist einschl. der dazugehörigen Diagramme bei der Kontaktadresse erhältlich (s.o.).

Dietmar Leipoldt

A Short Report on the Reduction of Heating Costs, Energy Use and Investment Costs through the use of Tempering for Heating Buildings: A Comparative Study in the Waldstraße Gymnasium in Hattingen Germany

Editors' Note:
For more information on energy consumption at the Waldstraße Gymnasium in Hattingen see also: H. Großeschmidt, in this publication.

Abstract

Tempering buildings has an advantage over conventional heating systems, energy requirement and thus heating costs are reduced. So, it was decided in 1996 to install a tempering system in the majority of the classrooms of the Waldstrasse Gymnasium (secondary school) in Hattingen (Germany), a brick building from 1880. For financial reasons, no new windows could be installed in the rooms. The old single-glazed casement windows received only new paint and were not sealed. No insulation was added to the walls and ceilings; this was done only in some roof areas. In a third of the building, conventional heating with warm water radiator/convectors continues to be used (the stair wells were partially renovated a short time earlier, it was not desired to remove the paneling in the auditorium and music practice room, the administration rooms could not be included in the renovation). The capital costs were 20% lower than with the radiator/convector heating system while the energy consumption was at least 25% lower than that of comparable schools.

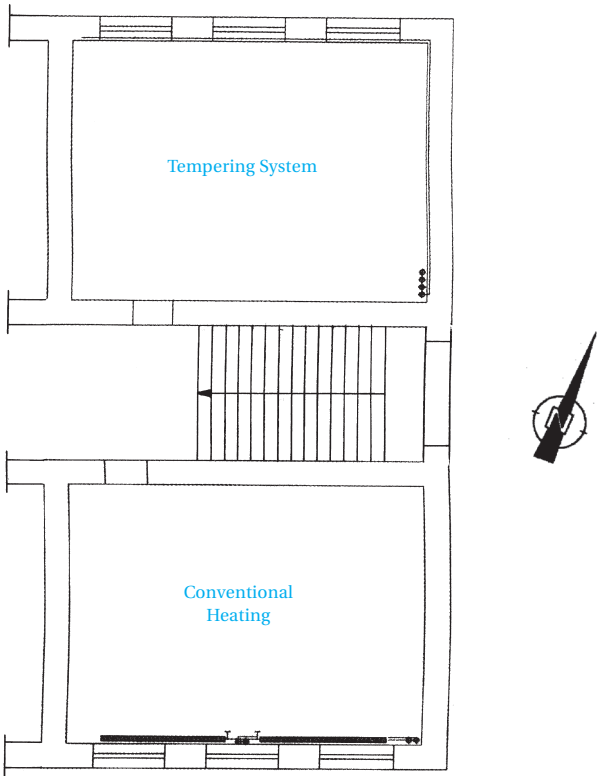


Figure 1:
Comparative location of the test rooms with different heating in the Waldstrasse Gymnasium, Hattingen. Plan View.

Kurzbericht über Heizkostenreduzierung, Energieeinsparungen und Investitionseinsparungen im Anlagenbau durch den Einsatz der Temperierung: Vergleichende Untersuchung im Gymnasium Waldstraße, Hattingen

Gebäudebeheizung durch Temperierung hat gegenüber konventionellen Heizanlagen den Vorteil, daß der Energiebedarf gesenkt und somit die Heizkosten reduziert werden. Deshalb entschied man sich 1996 im Gymnasium in der Waldstraße in Hattingen für die Installation eines Temperiersystems im Großteil der Klassenzimmer. Aus finanziellen Gründen konnten in den Räumen jedoch keine neuen Fenster eingebaut werden. Die alten, einfach verglasten Kastenfenster erhielten lediglich einen neuen Anstrich und wurden nicht abgedichtet. Auf Isoliermaßnahmen an Wänden und Decken wurde verzichtet, lediglich in einigen Dachbereichen wurden Dämmmaßnahmen durchgeführt. In einem Drittel des Gebäudes wird weiterhin konventionelle Heizung verwendet (Treppenhäuser teilweise kurz zuvor renoviert, in Aula und Musikübungsraum wollte man die Wandvertäfelung zum Einbau einer Temperierung nicht abnehmen, Verwaltungsräume konnten nicht in die Umbaumaßnahmen einbezogen werden). Es ergab sich eine Investitionseinsparung von 20% gegenüber konventioneller Heiztechnik. Der Verbrauchswert liegt mindestens 25% unter dem vergleichbarer Schulen.

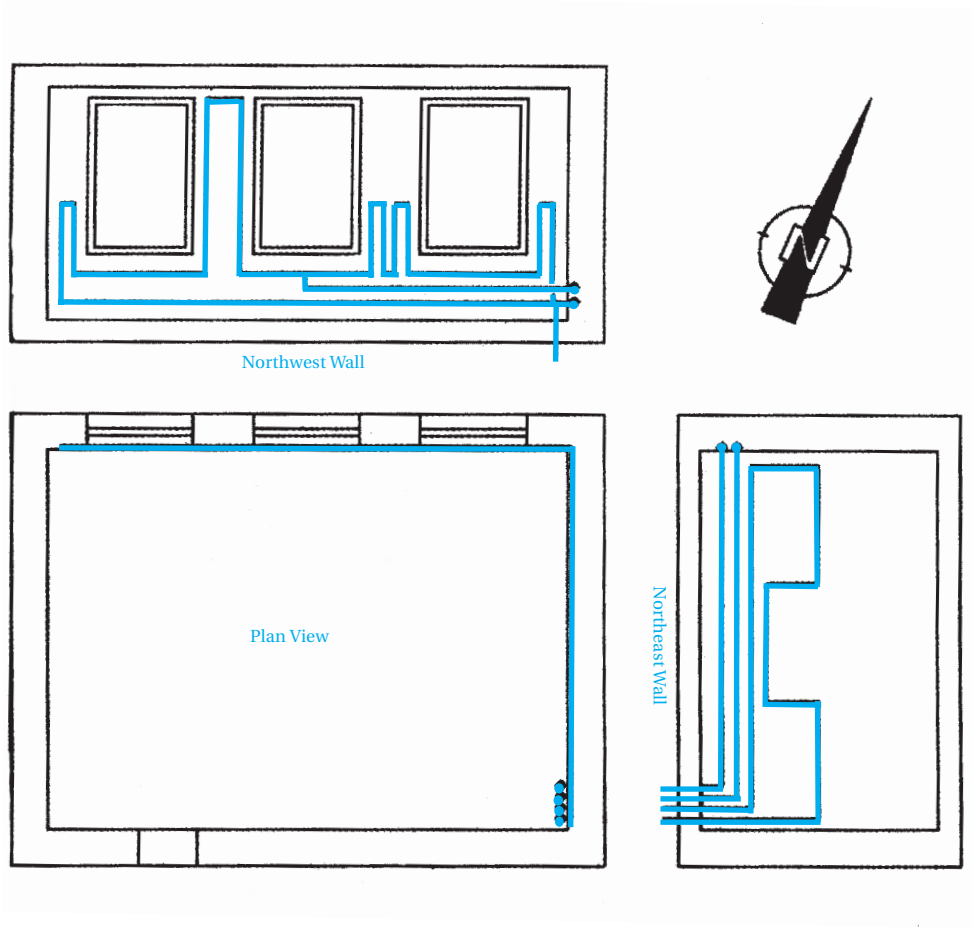


Figure 2:
Plan view and elevations of the northwest and northeast walls of the tempered room.
Lengths of the tempering loops: northeast wall 16 m (without the connection lines to the nw wall), northwest wall 45 m.
Calculation of the pipe lengths was based on the calculated heating demand according to DIN 4701. This is only partially appropriate as a basis for calculation. Factors such as comfort, better U-values, heat storage capability of the building, and dynamic conditions in the walls must be taken into account. Accounting for these factors, the heating pipes have considerably higher equivalent heating performance. This can result in a reduction of the heating pipe length.
Plan View, elevations of Northwest and Northeast Walls.

A tempering system was installed first as part of a series of tests during the renovation of the Waldstraße Gymnasium. One corner room (northwest) was equipped with a tempering system and an identical room (southeast) with conventional heating. The energy use and inside and outside temperatures at 27 measuring points were recorded for each room. All of the measuring points consisted of standardized measurement sensors.

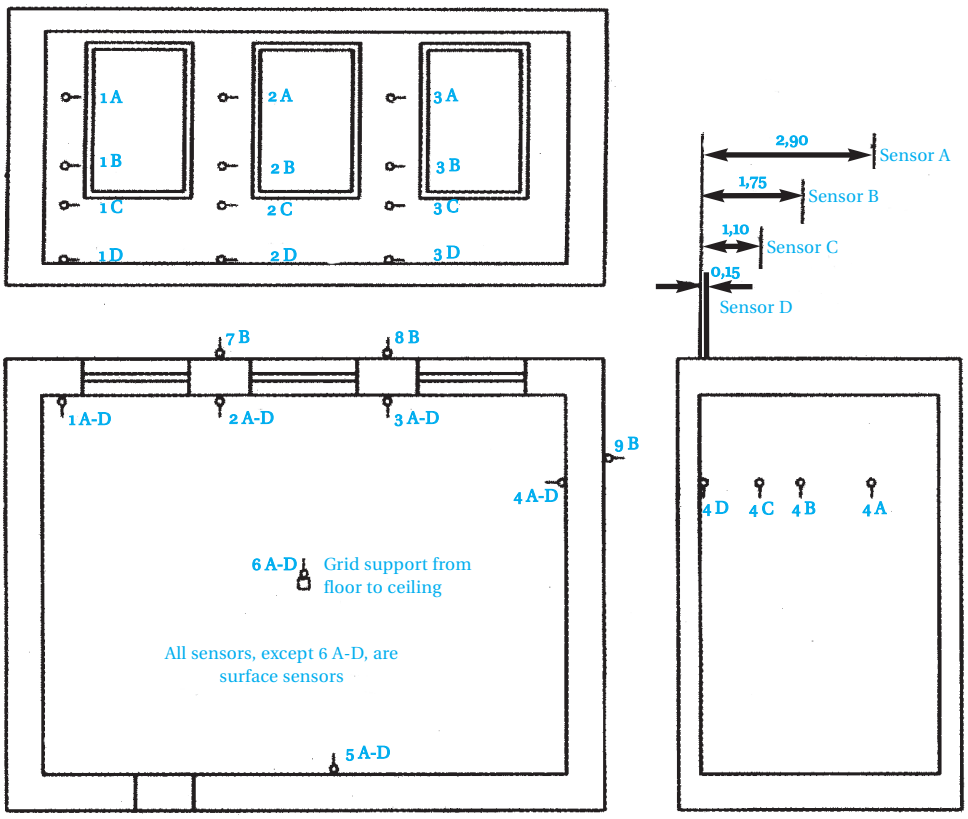


Figure 3:
Positions of sensors in the tempered room. Heights of sensors D–A, measured from the surface of the floor: 0,15 m, 1,15 m, 1,75 m, 2,90 m.
Plan View, Side Views of Northwest and Northeast Walls.

During the 20 months between 1 November 1995 and 30 June 1997, around 2.7 million measurements, each representing a temperature change of 0.2 K, were recorded and later evaluated. Analysis of the data showed that it would be worthwhile to exchange the complete heating system in the old part of the Waldstraße Gymnasium, which was built around the turn of the century, for a tempering system.

The existing gas fired furnace had already been replaced in 1994/95. If the results given below had been available at that time, the costs for the furnace and the rest of the heating system could have been reduced by 25% of total equipment costs.

Between 4 July 1996 and 17 August 1996 the old building, except for the administration area, was equipped with a tempering system over a usable area of 2255 m^2 – 27 class, side and preparation rooms. As calculated (over the building surface) before installation (15 May 1996) the heating requirement of this area is 181 kW. All together 1600 meters of wall heating pipes (plastic coated oxygen free copper) were installed, plus necessary accessory parts, as well as 28 radiators, for areas where wall heating was not considered practical, including the staircase, auditorium, music practice room, and some other rooms.

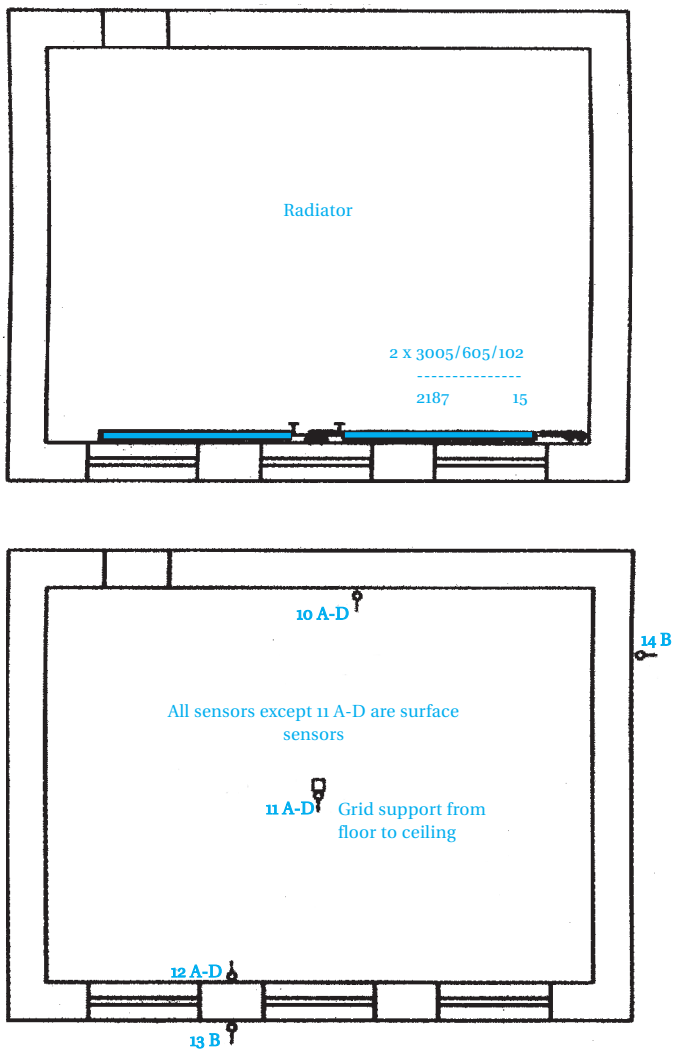
The cost of this combined conventional heating / tempering system, including cutting and recovering the slots in the plaster for the heating pipes in the area in which tempering was installed, was € 32,560 not including VAT. The projected cost for the installation of a conventional warm water heating system, as area heating, was € 41,504 not including VAT. Thus the difference in installed costs between the two types of heating systems is demonstrably 21% for this project.

Comparing energy costs for the whole building complex shows a savngs of >20% for the time after installation of the tempering system, compared to the time before. The time periods for the comparison were 1 January 1993 – 30 October 1995 and 1 November 1995 – 30 June 1997.

Figures 4-5:

Positions of the 2 radiator/convectors on the southeast wall of the radiator room. Size of the radiators:
Length 3005 mm,
Height 605 mm,
Depth 102 mm.

Positions of the measurement sensors in the radiator room: Height of Sensors D–A, above the surface of the floor:
0,15 m, 1,15 m, 1,75 m, 2,90 m.



Since components for regulation can be neglected, which means that sources of error are reduced, operation of the tempering system is easier than that of normal warm water heating systems. Furthermore, the danger of accidents in the class rooms is smaller since there are no exposed parts of the heating system.

No cracks in the wall surface were visible following operation in 1995/96, although outside temperatures as low as -12 °C were recorded. During the winter of 1996/97 even lower outside temperatures of -22 °C were recorded. However, intensive inspection of the whole wall surface of the remodeled building areas found no cracks.

According to statements from teachers and pupils, the air in the classrooms with tempering systems installed is comfortable during lessons.

Conclusions and a look into the future:

Compared to conventional (radiator/convector) warm water heating systems, tempering systems result in

1. reduced investment costs,
2. reduced operating costs,
3. reduced service and maintenance costs,
4. improved air conditions in class rooms.

Extensive theoretical studies and evaluations of modern materials in connection with tempering systems, including buildings with wooden structures, have already been performed and are currently in the process of documentation. Extensive additional evaluations are being documented which can not mentioned or presented here. The evaluation, including diagrams of Waldstraße Gymnasium, Hattingen, is published and available (see contact adress).

Michael Kotterer

Klimamessungen im Kunstforum Ostdeutsche Galerie Regensburg: Analyse und Dokumentation*

* Der Beitrag entstand ursprünglich als Vortrag in englischer Sprache. Er wurde für diese Publikaton re-übersetzt. Der Anhang zum Artikel wurde in Englisch belassen.

Abstract

In den Jahren 1989-93 wurde das Kunstforum Ostdeutsche Galerie Regensburg saniert. Als erstes größeres Kunstmuseum, das Gemälde und Skulpturen ausstellt, entschloß man sich, ein neuartiges Klimatisierungskonzept zu realisieren. Es besteht in einer optimierten Gebäudehülle, der Temperierung als Heizsystem und einer minimierten Lüftung. Das Konzept war von der Landesstelle für Nichtstaatliche Museen in München entwickelt worden. Um die konservatorischen Vorteile dieses Systems zu dokumentieren, wurden im Rahmen des EUREKA-Projekts 1383 PREVENT die Klimawerte an Außenwänden (hinter Bildern) und in Raummitte gemessen und verglichen. Im Beitrag werden die Messungen dargestellt und ausgewertet. Dabei zeigt sich in der Homogenität und Konstanz der erreichten Klimabedingungen die konservatorische Qualität des Konzeptes.

Climate Measurements in the Kunstforum Ostdeutsche Galerie in Regensburg: Analysis and Documentation

The Kunstforum Ostdeutsche Galerie in Regensburg was the first large art museum that exhibits paintings and sculpture to realize a new climatization concept, after it was renovated during the years 1989-93. This concept consists of an optimized building envelope, a tempering system (continuous heating of the exterior walls), and minimized ventilation. The concept was developed by the Landesstelle für die nichtstaatlichen Museen in Bayern (Bavarian Museum Service). As a contribution to the Eureka project 1383 PREVENT, the climate values on outer walls behind paintings and in the middle of the room were measured and compared in order to document the conservational advantages of this concept. This conservational quality is demonstrated by the homogeneity and constancy of the achieved climate conditions

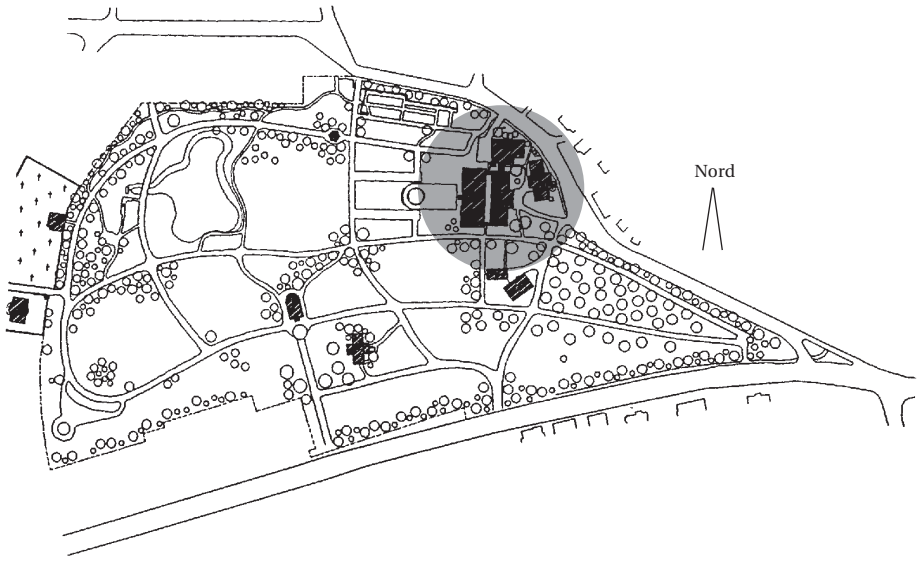


Abbildung 1:
Lage des Kunstforums Ostdeutsche Galerie im Stadtpark Regensburg. Zeichnung Arnulf Magerl, Neutraubling.

1. Lage

Nordwestlich vom Zentrum Regensburgs liegt im Stadtpark das Kunstforum Ostdeutsche Galerie (Abb. 1). Der Gesamtkomplex des Museums besteht aus mehreren Gebäuden. Die Klimamessungen, die den deutschen Beitrag zum PREVENT-Projekt bilden, fanden in der sogenannten Kunsthalle und im Galeriegebäude statt. Der Bau für die Graphik-Sammlung und das Schützenhaus mit Verwaltungsräumen, Restaurierungswerkstatt und Bibliothek waren nicht Bestandteil des Projekts

Der Kern der Kunsthalle wurde 1871 erbaut und in den Jahren 1910 und 1962 erweitert, erst um Kuppel und Säulenportikus, dann um je eine Fensterachse seitlich ergänzt. Das Galeriegebäude wurde im Jahre 1970 hinter der Kunsthalle errichtet. Eine dazwischenliegende Zone mit dem zentralen Treppenhaus, Nottreppenhäusern und Übergängen verbindet die Gebäude miteinander (Abb. 2-3). In den Jahren 1989 bis 1993 wurden der Komplex renoviert. Die Ausstellungsbereiche sind durch Glastüren von den Treppenhäusern, Übergängen und der kuppelüberwölbten Eingangshalle abgetrennt. Die Depots für nicht ausgestellte Kunstwerke befinden sich im Keller des Galeriegebäudes.

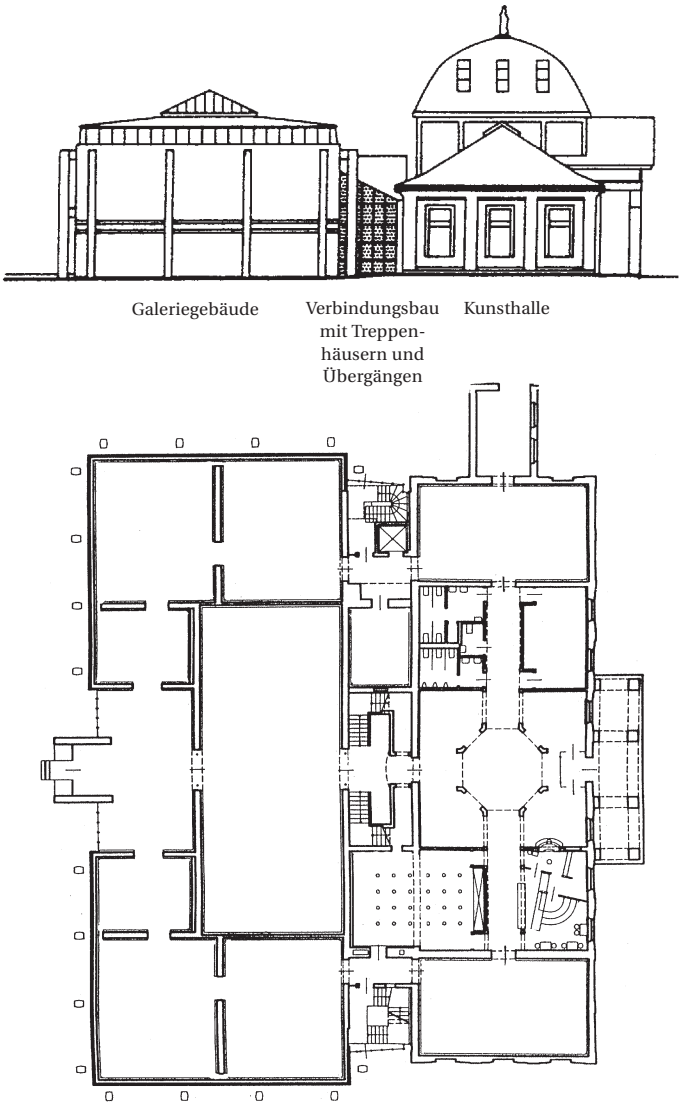


Abbildung 2-3:
Kunstforum Ostdeutsche Galerie, Grundriß und Ansicht von Süden. Zeichnungen Arnulf Magerl, Neutraubling.

Abbildung 4:
Kunsthalle von Südwesten, daneben der Graphiktrakt, seitlich rechts das Schützenhaus. Foto Wolfram Schmidt, Regensburg.

Abbildung 5:
Galeriegebäude von Südwesten, 1996, noch ohne den außenliegenden Sonnenschutz. Foto Autor.

2. Ziele der Temperierung

Von 1989 bis 1993 wurde das Museum einer Sanierung unterzogen. Neben einer Verbesserung der Infrastruktur und effektiverem Sonnenschutz lag das Hauptaugenmerk dabei auf einer Optimierung des Raumklimas. Dazu wurde ein Heizungs- und Lüftungssytem ausgewählt, das folgende drei Anforderungen miteinander verbindet: höchstmöglichen Standard an Schutzwirkung für Sammlung und Gebäude, geringstmöglichen Energieverbrauch und Rücksichtnahme auf die physiologischen Bedürfnisse von Personal und Besucher. All dies mußte innerhalb des engen Rahmens einer vorgegebenen Gebäudesstruktur integrierbar sein.

Zur Lösung dieser Aufgabe entschied man sich beim Kunstforum Ostdeutsche Galerie - und damit erstmalig bei einem größeren Kunstmuseum, das hauptsächlich Gemälde ausstellt - für die Installation einer Temperierung mit Wandschalen an den Außenwänden.[1] Die in diesen Schalen integrierten Sockelheizleisten erwärmen die eingeschlossene Luft und gleichen so die Wärmeverluste, die durch Wärmeleitung der Gebäudehülle bedingt sind, auf deren gesamter Innenfläche aus, also auch „direkt hinter den Gemälden“. So kann weder an den Wänden, noch an den Gemälden Kondensat auftreten.

1 Konstruktion der Wandschale s. Anhang.

Die Alternative zur Wandbeheizung, also der Versuch, die Gebäudemasse über den Umweg der Raumuft zu heizen, verursacht nicht nur Staubverfrachtungsprobleme, sondern bringt auch einen übermäßigen Befeuchtungsaufwand mit sich. Bei Erwärmung von Luft verringert sich ihre relative Feuchte und der Luftdruck steigt. Die zur Wärmeverteilung notwendige, ständige, starke Luftumwälzung und der Luftaustausch verursachen hohe Verluste an Wasserdampf und Energie durch Öffnungen und Undichtigkeiten des Gebäudes. Der Befeuchtungsbedarf ist also bei der Benutzung der Raumluft als Heizmedium aus prinzipiellen Gründen unvermeidbar hoch, egal, ob eine Vollklimaanlage oder eine andere konventionelle Heizmethode, die über die Raumluft arbeitet, im Einsatz ist.

Daraus ergibt sich im Museum, daß die Anforderungen an eine Lüftungsanlage minimiert werden müssen durch Beschränkung auf die Aufgaben Lüften und Befeuchten, und daß die Gebäudehülle (Außenwände, Dach, Fenster) optimiert und direkt beheizt werden muß.

Diesen Forderungen Rechnung tragend konnte durch die Wahl der Wandtemperierung im Kunstforum Ostdeutsche Galerie die Lüftungsanlage entsprechend verkleinert geplant und gebaut werden. Die Teilklimaanlage mit einem maximalen Luftwechsel von einem Raumluftvolumen pro Stunde kann weder kühlen noch entfeuchten. Die Komponenten für Befeuchtung und Aufheizung der Frischluft konnten klein ausfallen. Der Entwurf für dieses ganzheitliche Klimatisierungskonzept - optimierte Gebäudehülle, Wandtemperierung und

minimierte Lüftung – wurde von der Landesstelle für nichtstaatliche Museen in Bayern, München, beigesteuert.

Im Folgenden wird hauptsächlich die konservatorische Qualität der Wandtemperierung dargestellt, die das typische Schadenspotential konventioneller Beheizung vermeidet, insbesondere das Problem der „kalten Außenwand“ als Hängefläche, mit maximalen Werten der relativen Luftfeuchte oder gar Kondensat an und hinter den dort hängenden Bildern bei gleichzeitig auftretenden Trocknungsschäden in anderen Raumbereichen, ferner die Gefahr von Kurzzeitschwankungen und ein erhöhter Befeuchtungsaufwand.

3 Meßstellen

Um die positiven Auswirkungen der Temperierung zu demonstrieren, wurde die Temperatur und die relative Luftfeuchtigkeit an den Außenwänden hinter ausgestellten Gemälden gemessen. Die Sensoren hinter den Kunstwerken waren in einer Höhe von etwa 1,5 m an der Wand befestigt und über ein Verlängerungskabel mit Datenloggern verbunden, die in erreichbarer Nähe an der Wand angebracht waren. Ferner wurden Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit vor den Gemälden gemessen, möglichst in Raummitte. Die Datenlogger hierfür befanden sich meistens unter den Sitzbänken - in einer Höhe von 40 cm (unsichtbar für den Besucher) - oder an anderen passenden Stellen - in der Höhe von 1,0 m, 1,8 m oder 2 m, in Rücksichtnahme auf den Wunsch des Sammlungsleiters nach möglichst geringer Störung der Ausstellung durch die Meßgeräte (Abb. 6 - 7). Die Messungen wurden in allen vier Ecken und in beiden Stockwerken des Museums durchgeführt. Im Depot, in dem sich die nicht ausgestellten Kunstwerken befinden und das im Keller des Galleriegebäudes liegt (die Kunsthalle hat keinen Keller), wurden die Temperatur und die relative Luftfeuchtigkeit in der Höhe von 1,5 m etwa in der Mitte des Raumes gemessen. Schließlich wurden die Außenklimabedingungen mit Messungen von Temperatur und Luftfeuchtigkeit dokumentiert und zwar in einem Dachgarten, wo sich auch die Frischluftansaugung der Lüftungsanlage befindet.[2]

3.1 Höhe der Meßstellen

Die jeweilige Höhe der Meßstellen ist in Abb. 10 in Klammern angegeben. Meßstellen in verschiedenen Höhen stellen in einem temperierten Raum kein Problem dar, weil das Raumklima strahlungsdominiert und deshalb nahezu homogen ist. Dies wissen wir sowohl aus eigener Erfahrung als auch aus einer wissenschaftlichen Untersuchung eines temperierten Raumes in der Alten Staatsgalerie Stuttgart, die Stohrer (Fachhochschule für Technik, Stuttgart) im Jahre 1991 durchführte.[3] An einer über 7 m hohen und 15 m breiten, temperierten Wand konnte er eine maximale Temperabweichung von 1,5° C ermitteln. Stohrer maß auch die Raumlufttemperatur vor der Wand stellte ebenfalls eine maximale Abweichung von 1,5° C fest.

Es konnte also kein signifikanter Gradient hinsichtlich der Lufttemperatur festgestellt werden. Beide, sowohl das Beispiel Alte Staatsgalerie Stuttgart , als auch das des Kunstforums Ostdeutsche Galerie wurden von Hofer geplant, so daß die Konstruktion der Wandschalen in beiden Fällen praktisch identisch ist. Die Thermographien im Bericht von Stohrer illustrieren – mit kleinen Einschränkungen - die typische homogene Verteilung der Temperatur an den Oberflächen von Wandtemperierschalen (Abb. 8). In einem Teil des Raumes in der Alten Staatsgalerie in Stuttgart waren keine Wandschalen angebracht, sondern nur das Sockelheizband hinter einer Blende. Die Thermographie zeigte, daß diese vereinfachte Form der Temperierung zu einer gleichwertigen homogenen Verteilung der Wandoberflächentemperatur führt und bestätigt die Angaben Großeschmidts.[4] Auch in der ca. 16 Meter hohen, kuppelüberwölbten Eingangshalle des Kunstforums Ostdeutsche Galerie (Abb. 9) konnte bei Messungen kein signifikanter Gradient der Lufttemperatur gefunden werden, die Abweichung betrug 1,5-2,4 °C.[5]

2 Nähere Angaben zu den verwendeten Meßgeräten und der Software zur Auswertung der Ergebnisse siehe Annex.

3 M. Stohrer, M. Repp, Bericht BPL 139/91. Meßtechnische Analyse des Wandtemperiersystems, der Innendämmungsvarianten und des Raumklimas im Musterraum der Alten Staatsgalerie Stuttgart während des Heizbetriebs. Forschungs- und Entwicklungsgemeinschaft für Bauphysik e.V. an der Fachhochschule für Technik Stuttgart, 25.03.1991. Die fehlerhafte Wärmeversorgung der Temperierleiste der Wandschale im Musteraum führte allerdings zu einer kritisch zu betrachtenden Schlußfolgerung des Gutachtens. Hofer teilte mit, daß die Wärmeversorgung falsch, weil stark taktend und dadurch mit zu geringer mittlerer Leistung gefahren wurde, ohne daß er Einfluß nehmen konnte. So wurden die Wände zeitweise von der Lüftungsanlage „beheizt“ und nicht - wie vorgesehen - allein durch die Wandheizung (vgl. (3), S. 8 u. Anl. 27). In der Folge kam Stohrer zur irrigen Annahme einer Tauwassergefährdung auf der Innenseite der Außenwände: Die Berechnung einer Luftprobe aus einer „falsch wärmeversorgten“ Wandschale nach dem Glaser-Verfahren ist aber sinnlos (vgl. (3), S.11).

4 s (3) Anl. 24

5 Die kuppelüberwölbte Eingangshalle nutzt eine Mixtur verschiedener Temperierformen. Im Obergeschoß auf dem balkonartigen Umgang wird eine offene, einfache Schale mit einem Kleinkonvektor benutzt, im Erdgeschoß an der Ostwand ein Kleinkonvektor mit Blende entlang des Wandsockels, an der Westwand eine geschlossene Schale (vgl. Annex).

Abbildung 6-7:
Luftfühler für Temperatur und relative Feuchte, hinter einem Bild an einer Außenwand und unter einer Sitzbank in Raummitte montiert. Fotos Autor.

Abbildung 9:
Messung der Temperaturverteilung/schichtung in der ca. 16 m hohen kuppelüberwölbten Eingangshalle des Kunstforums Ostdeutsche Galerie. Wir konnten keinen relevanten Temperatur-Unterschied der Luft in der Höhe feststellen. Fotos Henning Großeschmidt, München.

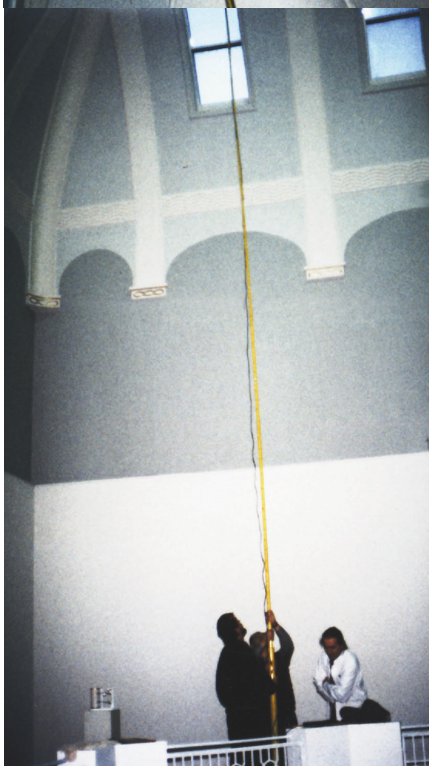
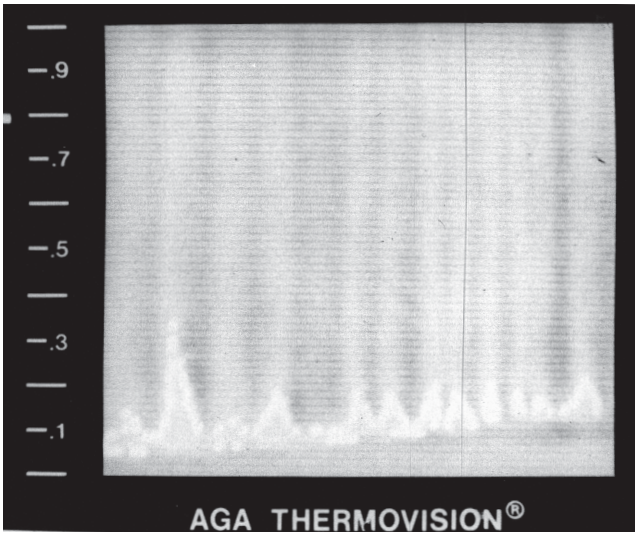
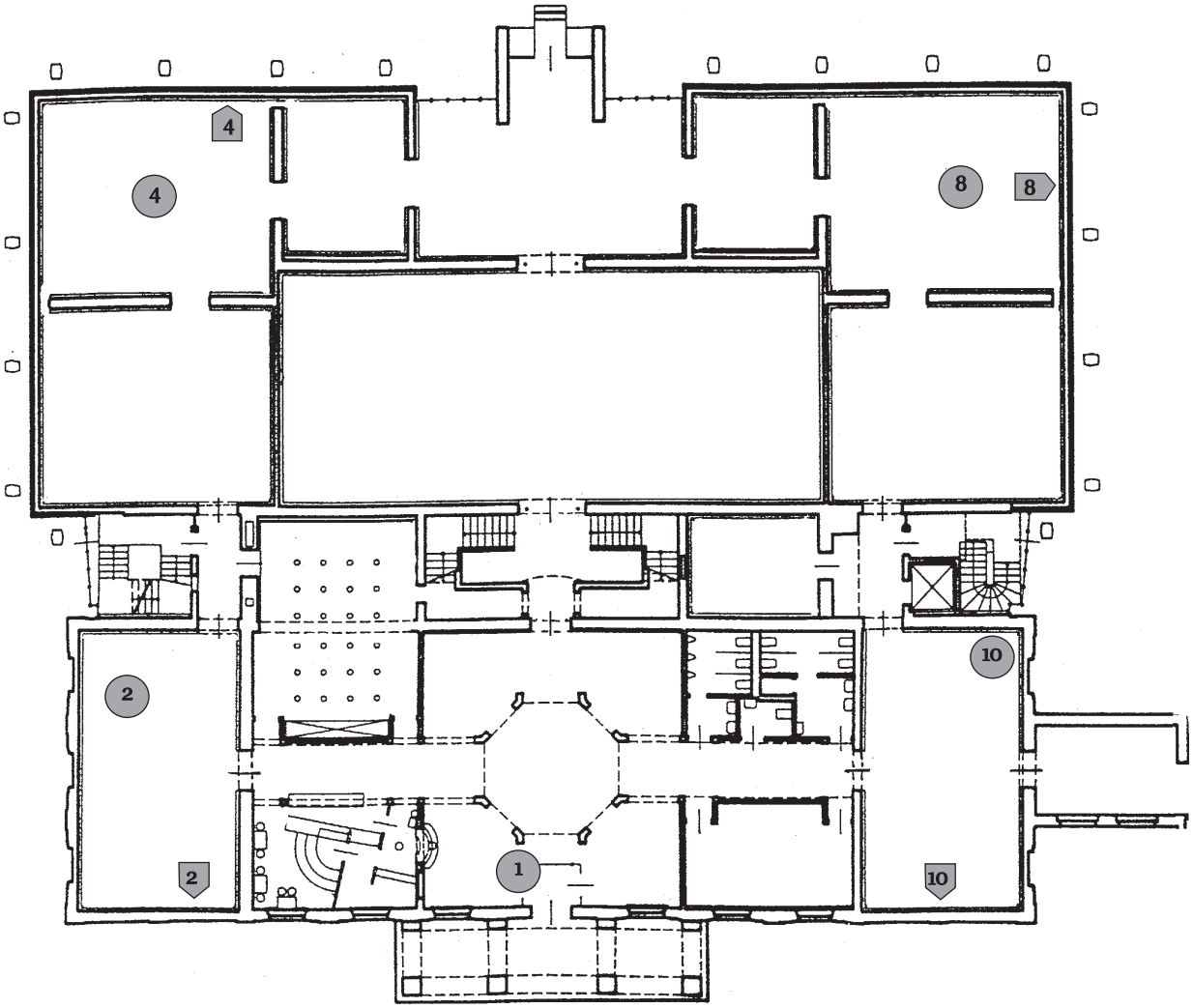


Abbildung 8:
Die Thermographie aus dem Bericht von Stohrer/Repp (3) kann die typische, homogene Temperaturverteilung bei Temperierung illustrieren. An der Ober- fläche einer über 7 m hohen und 15 m breiten Wandtemperierschale im Mus-terraum der alten Staatsgalerie Stuttgart konnte Stohrer eine maximale Tem-peraturabweichung von 1,5° C ermitteln. Auch bei der Messung der Raumlufttemperatur vor der Wand stellte er eine maximale Abweichung von 1,5° C fest. Am Fuß der Wand sieht man den Heizstreifen. Abb. aus (3), Anl. 12.

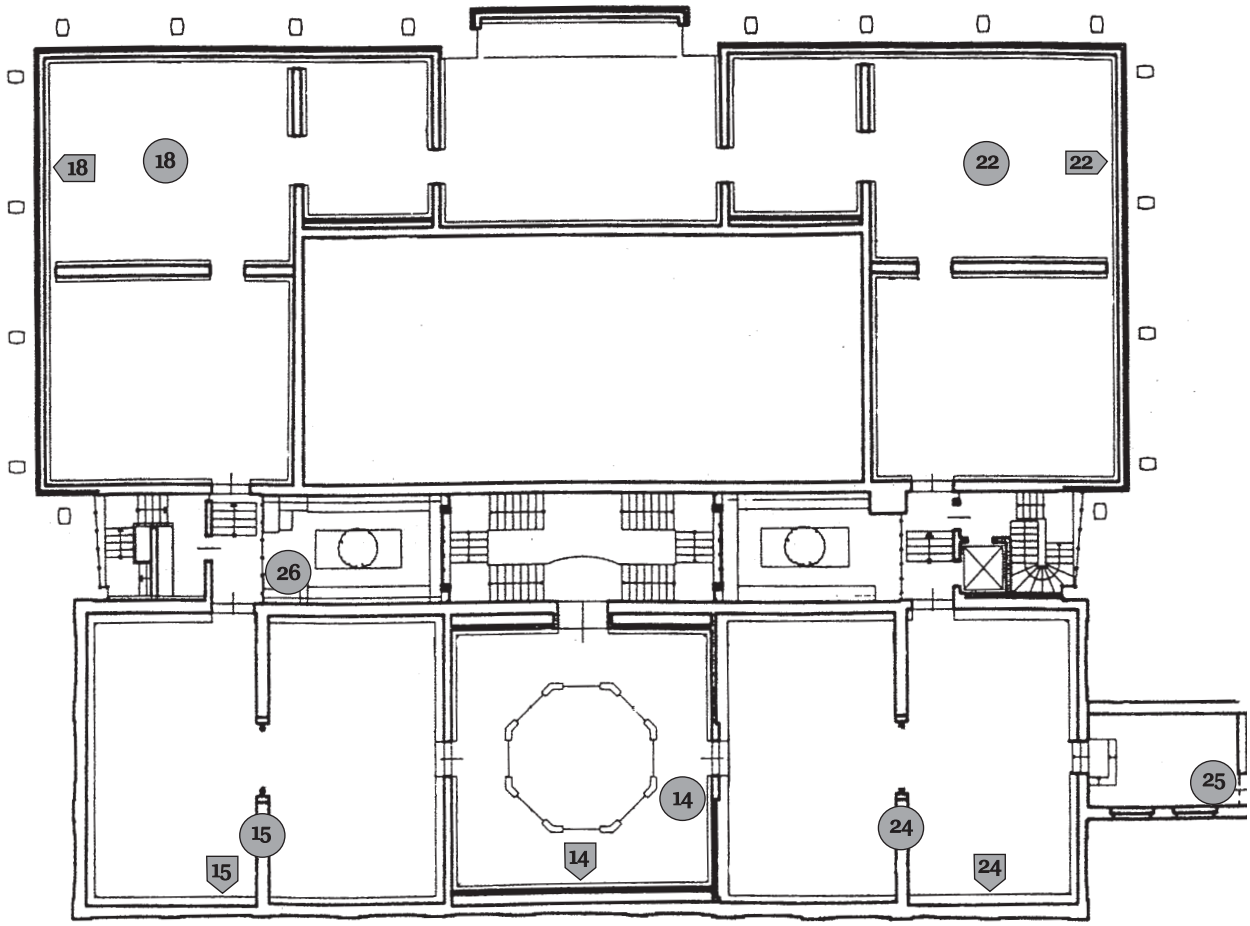




Meßstellen Erdgeschoß

1	Haupteingang, raumseits (2 m)
2	Raum (0,35 m)
2	Ostwand (1,4 m)
4	Raum (0,4 m)
4	Westwand (1,4 m)
8	Raum (0,4 m)
8	Nordwand (1,4 m)
10	Raum (0,4 m)
10	Ostwand (1,4 m)

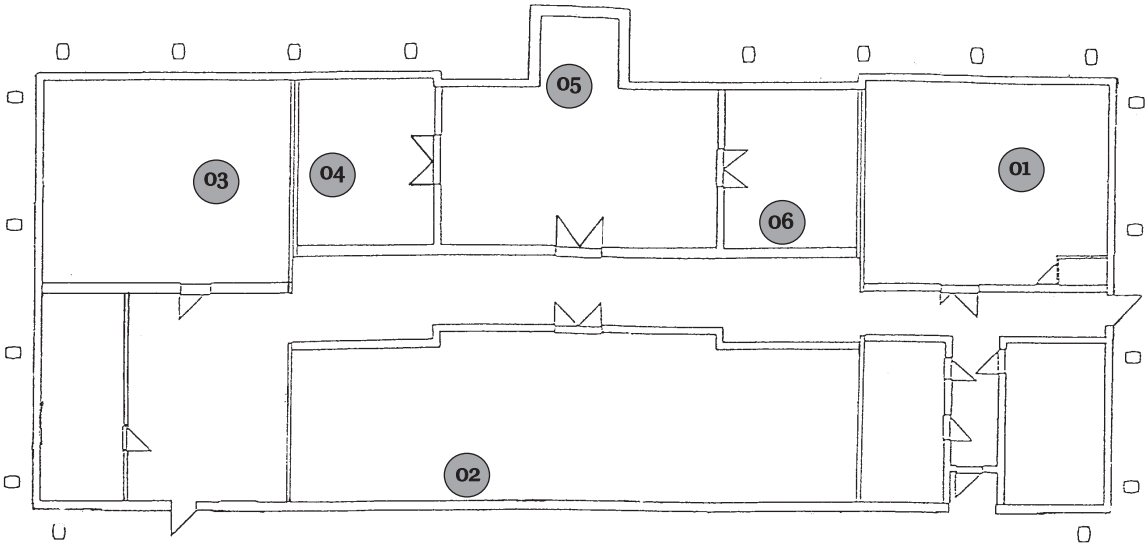
Abbildung 10:
Meßstellen Erdgeschoß.
Grundriss Arnulf Magerl,
Neutraubling.



Meßstellen Obergeschoß

14	Raum (4 m)
14	Ostwand (1,4 m)
15	Raum (2,45 m)
15	Ostwand (1,4 m)
18	Raum (0,4 m)
18	Südwand (1,4 m)
22	Raum (0.4 m)
22	Nordwand (1,4 m)
24	Raum (2,45 m)
24	Ostwand (1,4 m)
25	Verbindungstür zum Graphiktrakt (2,0 m)
26	Dachgarten, außen (0,65 m)

Abbildung 11:
Meßstellen Obergeschoß.
Grundriß Arnulf Magerl,
Neutraubling.



Meßstellen Kellergeschoß

01 Depot (1,7 m)

02 Depot (1,2 m)

03 Depot (1,7 m)

04 Depot (1,1 m)

05 Depot (1,3 m)

06 Depot (1,3 m)

Abbildung 12:
Meßstellen Kellergeschoß.
Grundriß Arnulf Magerl,
Neutraubling.

4. Meßergebnisse

Die PREVENT-Meßkampagne im Kunstforum Ostdeutsche Galerie reichte über ein Jahr, von Januar 1996 bis Januar 1997.[6]

Um den Effekt der Temperierung zu demonstrieren, werden im Folgenden Beispiele aus der kältesten Woche der Meßperiode besprochen. Die Außentemperaturen erreichten zwischen dem 13. und 17. Januar 1997 minus 10°C (Abb. 13).

4.1 Raum 2, Kunsthalle

Die Temperaturgleichheit hinter dem Gemälde und im Raum ist evident. Der Feuchteverlauf der Wochenkurve weist am Montag zwei Spitzen auf, die mit der Naßreinigung des Bodens zusammenhängen. Die Naßreinigung wurde durch die im Hause übliche Frühstückspause des Reinigungspersonals unterbrochen und dann wieder aufgenommen. Hinter dem Gemälde sind die Feuchtespitzen gedämpft. Der Feuchteverlauf ist ansonsten auffallend flach und gleichmäßig. Die Vergrößerung der Feuchtekurven (Tageskurve vom Montag, große Sklalierung der Feuchtewerte) zeigt die geringen Schwankungsbreiten deutlicher. Die Schwankungen unter 2% rF sind eher aufzeichnungstechnisch bedingt, die Sensoren können nur Änderungen größer 2% rF wahrnehmen (Abb. 14-17).[7] Ein mechanischer Thermohygrograph schreibt unter ähnlichen Bedingungen flache Kurven (Abb. 18).

Die Kurven sind typisch für alle Ausstellungsräume, gleichgültig ob sie in der Kunsthalle, dem Galeriegebäude oder im Süden, Norden, Osten oder Westen liegen.

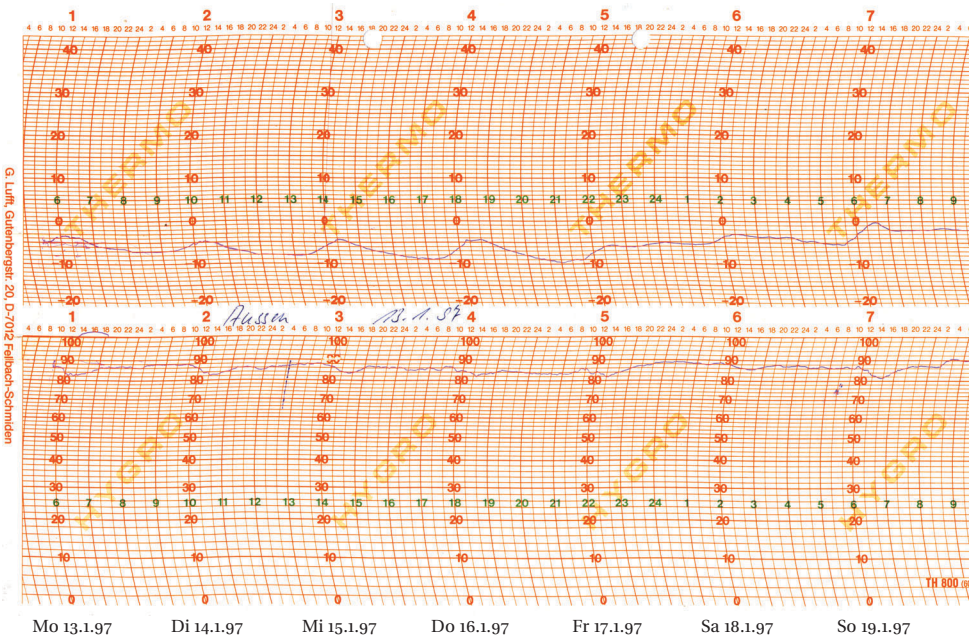
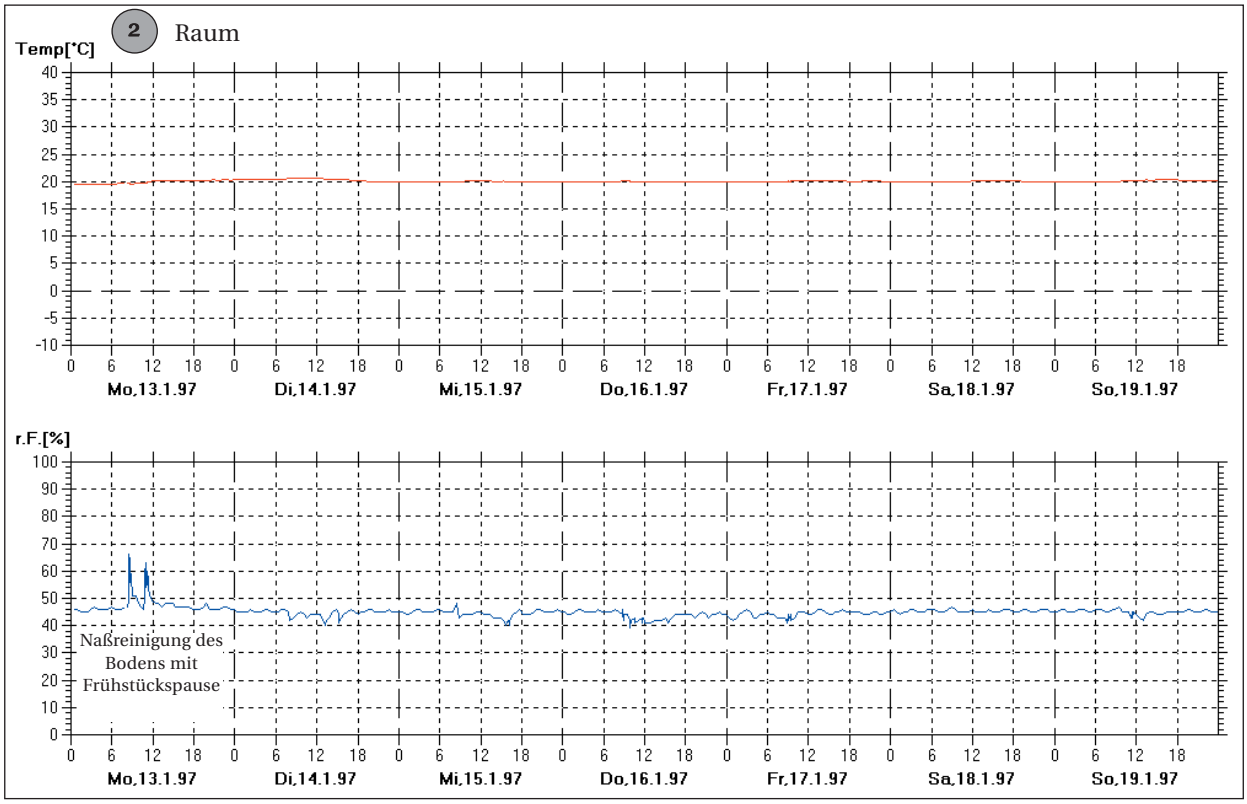


Abbildung 13:
Der Verlauf des Außenklimas ist als Thermohygraphenblatt gegeben, da in der hier besprochenen Woche der Datenlogger für das Außenklima nicht funktonierte (vgl. Annex: Difficulties during the measurement campaign). Die Werte snd verläßlich und kontrolliert durch Handmessungen

6 Eine Beschreibung der im Kunstforum Ostdeutsche Galerie verwendeten Meßtechnik und Meßeinrichtungen findet sich im Annex; ebenso ein Überblick über aufgetretene Schwierigkeiten während der Meßperiode. Holmbergs Report des Schwedischen PREVENT-Partners Nr 8, Evaluation of uncertainties in the EU 1383 measuring campaigns, 1996-1998, enhält einen Überblick über alle Meßkampagnen und die dabei aufgetretenen Schwierigkeiten. Holmberg dort Seite 10: „Für die Temperaturmessungen innerhalb des EU 1383 PREVENT-Projekts wird eine Abweichung von weniger als ±1° C in 95% der Zeit angenommen, die Messungen der relativen Luftfeuchte wurden mit einer Abweichung von ±8 % in 95% der Zeit erhoben.“ Leser, die mit der Feuchtemeßproblematik nicht vertraut sind, müssen sich einarbeiten, um die hohe Qualität der Messungen zu erfassen. Als Einführungslektüre empfiehlt sich etwa Holmberg, EU 1383 PREVENT, Report No. 1 from Swedish partners, Relative Humidity, RH, in historic houses, museums and museums storage rooms, a literature study, Wien, Stockholm 1995, Kapitel 5, Measuring RH, und, Kapitel 6, Meßfehler.

7 Kontrolleinrichtungen oder Hygrostaten in Klimaanlagen arbeiten mit elektronischen Sensoren. Marktübliche kapazitive Feuchtefühler können im allerbesten Fall Feuchteschwankungen ab 2 % rF erfassen. Deshalb werden Feuchtefühler mit einer Genauigkeitsangabe von ±3% bis ±5% charakterisiert, auch in den technischen Regeln für Klimaanlagen finden sich solche Schwankungsbreiten wieder. Es gibt also sowohl bei der Erzeugung als auch bei der Überwachung von Feuchtewerten prinzipielle Unsicherheiten. Mechanische Thermohygrographen erreichen bestenfalls eine Genauigkeit von ±5%, eher jedoch ±10%.



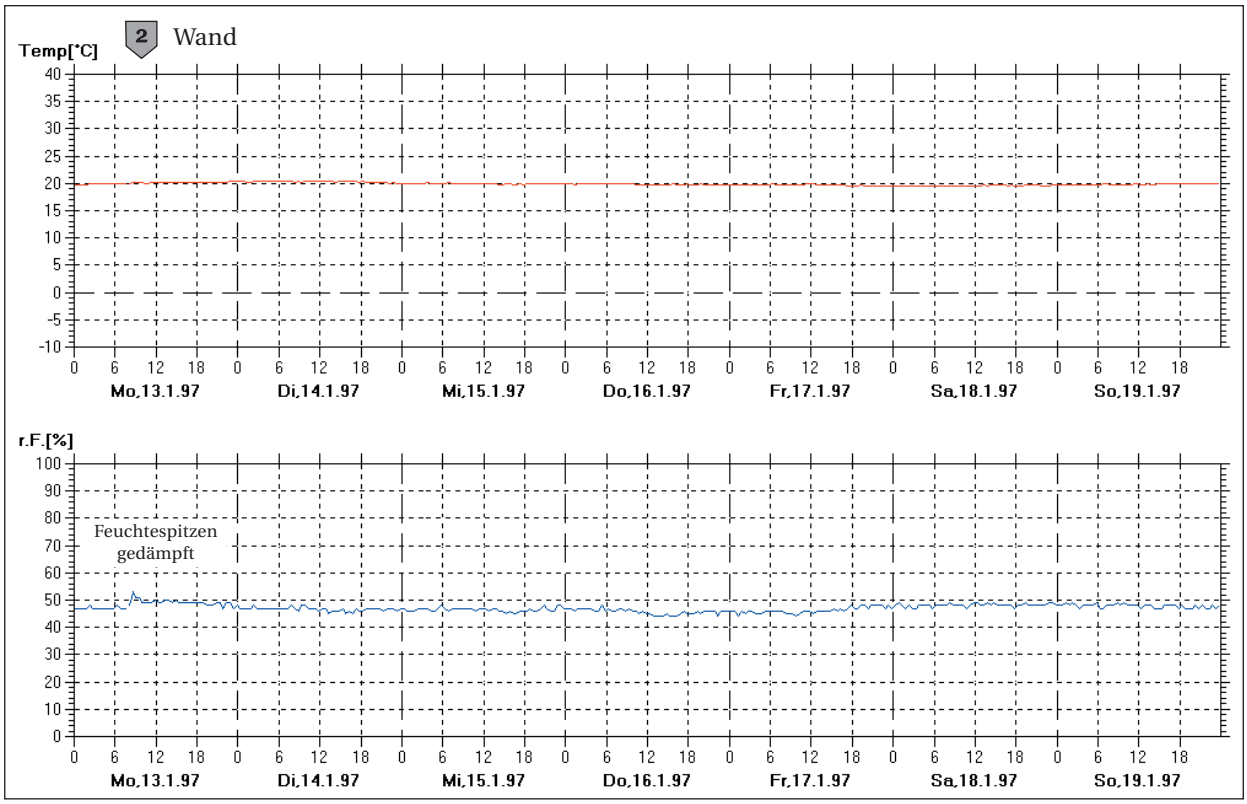
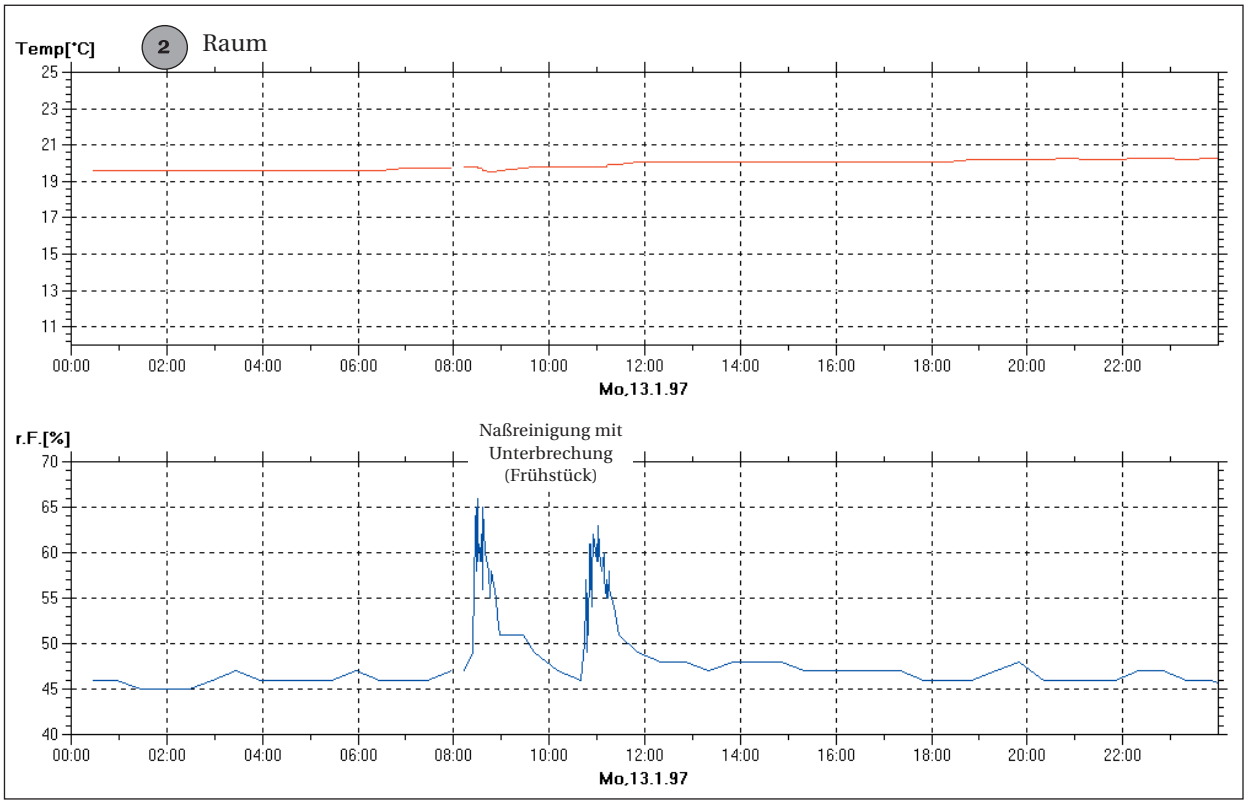


Abbildung 14-15:
Temperatur- und Feuchtekurven Raum 2. Der Fühler der Raumkurve ist nur ca. 35 cm über dem Boden an einem Sockel montiert und zeigt die von der wöchentlichen Naßreinigung des Bodens herrührende Feuchte stark an. Das Reinigungspersonal nimmt die Naßreinigung nach der im Hause üblichen Frühstückspause wieder auf.



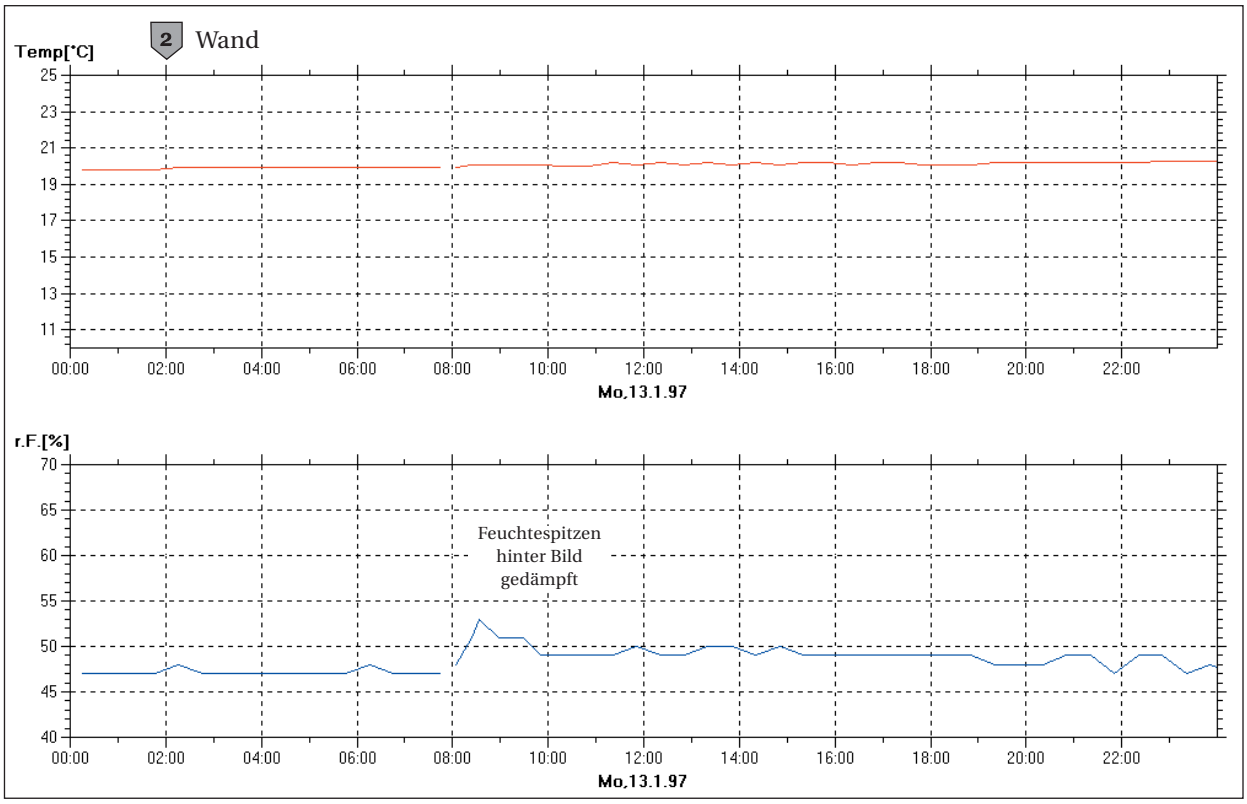
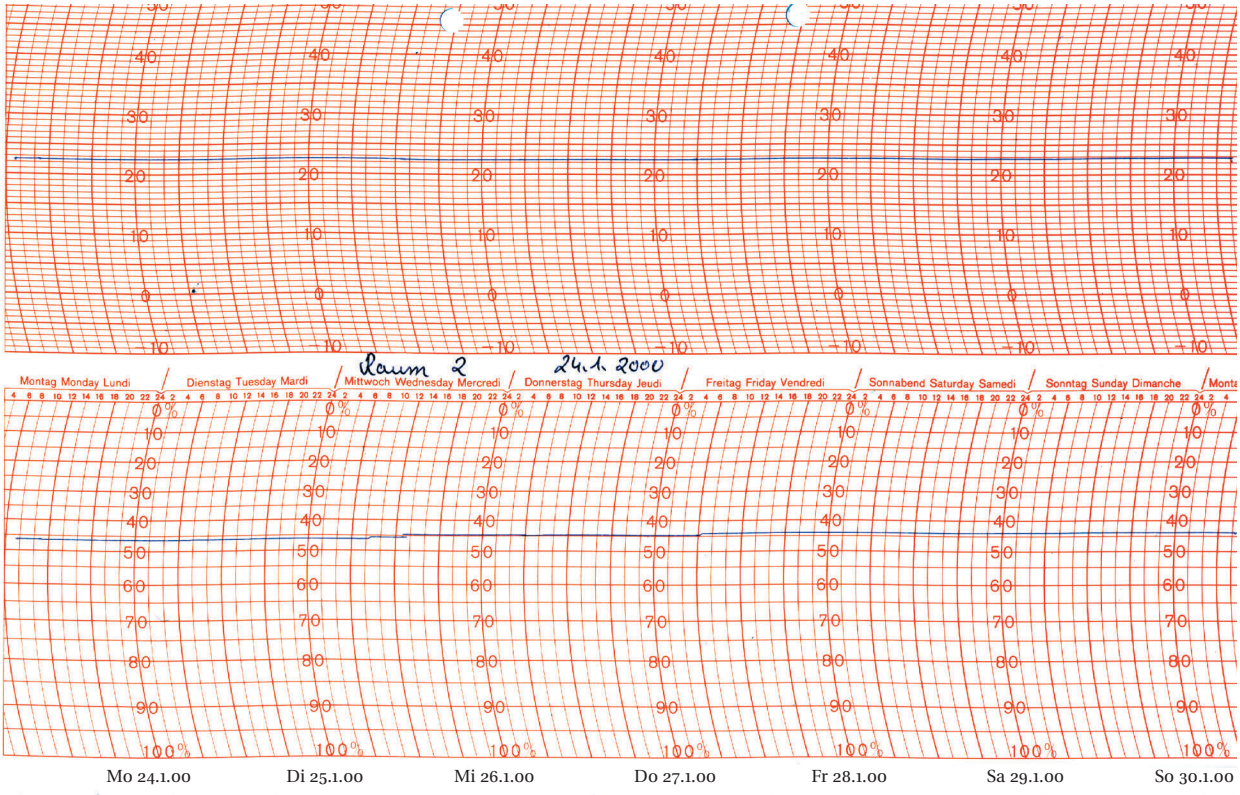


Abbildung 16-17:
Temperatur- und Feuchtekurven Raum 2. vergrößerte Skalierung.

Abbildung 18:
Temperatur und relative Feuchtkurve aufgezeichnet unter ähnlichen Bedingungen mit einem mechanischen Thermohygrographen (max. Außentempertur in dieser Woce -10 ° C)



4.2 Raum 8, Galeriegebäude

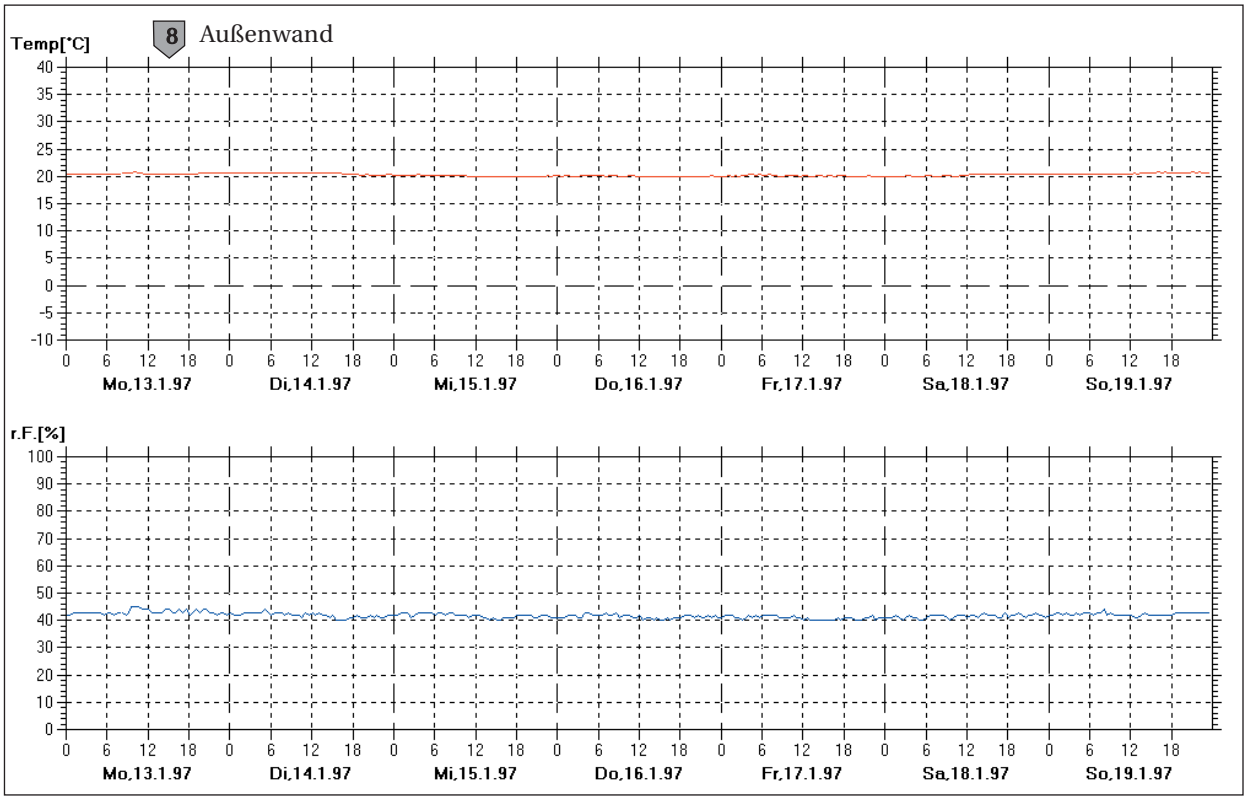
Das Beispiel zeigt den Temperatur- und Feuchteverlauf für eine Nordwand im Erdgeschoß des Galeriegebäudes (Abb. 19-20).

Die Regulierung der Wandtemperierung erfolgt über zwei Methoden. Im Probebetrieb nach der Gebäudesanierung wurde zunächst eine Voreinstellung der Durchflußbegrenzer im Rücklauf der Temperierschleifen vorgenommen. Die Schleifen sind nach Raumgruppen in Abhängigkeit von der Himmelsrichtung und den verschiedenen Gebäuden mit unterschiedlicher Mauerkonstruktion zusammengefaßt. Bei der Kunsthalle liegt 50 cm starkes Ziegelmauerwerk vor, beim Galeriegebäude ein Stahlbetonskellett mit Ziegel-Ausfachung (24 cm Stärke), außenliegender Wärmedämmung und vorgehängten Natursteinplatten. Die Einstellung der Durchflußbegrenzer fand an Hand von Oberflächentemperaturmessungen an den Wänden statt.

Der zweite Methode ist die automatische Regelung der Vorlauftemperatur über die DDC-Anlage (Digital Data Controll). Die Vorlauftemperatur wird stockwerksweise (nicht nach Gebäuden, sondern nach Stockwerken gleich für Kunsthalle und Galeriegebäude) laufend über einen Graphen berechnet, der von der Außentemperatur (Außenfühler an der Nordwand) und der Wandtemperatur abhängt. Die Wandtemperatur wird an je einer Stelle im Erdgeschoß und im Obergeschoß von einem Mauer-Temperaturfühler erfasst, der - von innen gesehen - am Ende des ersten Drittels der Mauerstärke fest installiert ist.[8]

Auf die beschriebene Weise wird überall eine weitgehend einheitliche Wandtemperatur erreicht (vgl. auch Handmeßbogen Abb. 27).

8 In den Depots im Kellergeschoß des Galeriegebäudes wurde eine andere Lösung installiert, die weiter unten näher beschrieben wird.



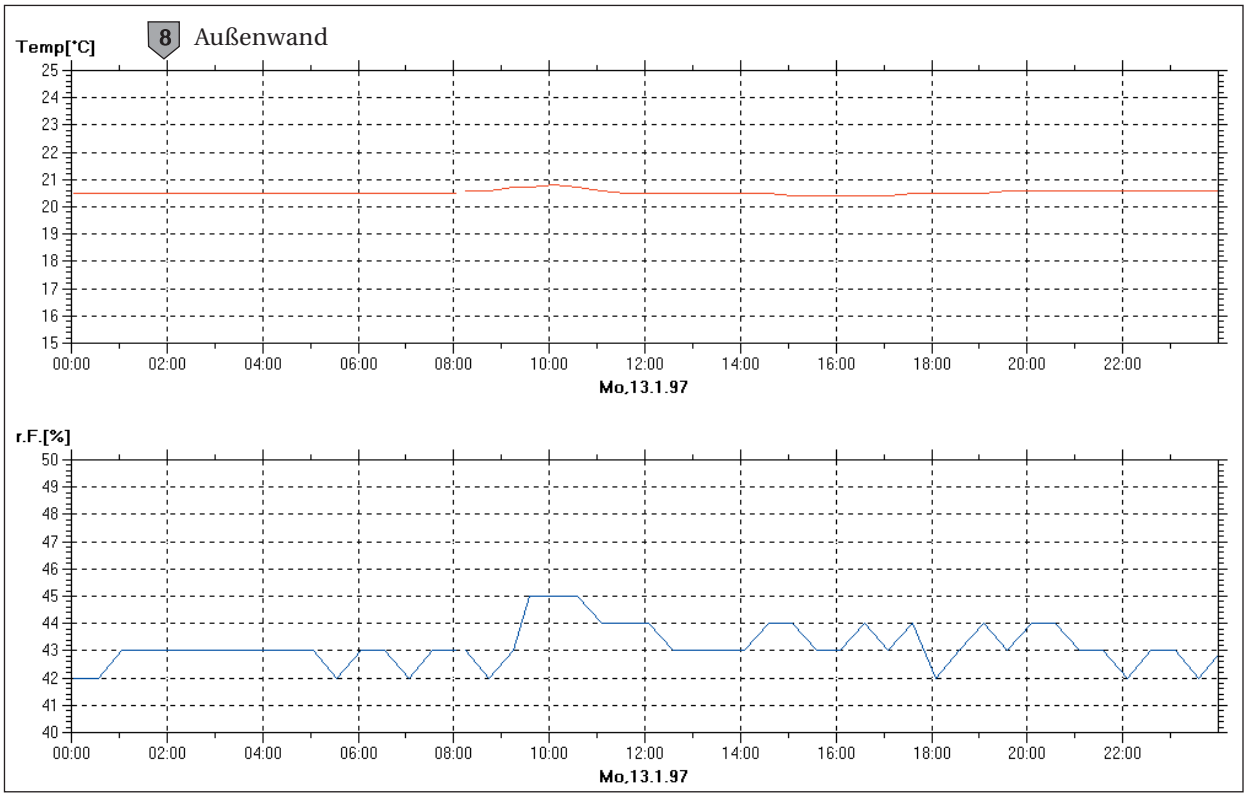


Abbildung 19-20:
Temperatur- und relative Feuchtekurve Nordwand Raum 8, normale und vergrößerte Skalierung.

4.3 Raum 10, Kunsthalle

Raum 10 wies in der Zeit vor der abgebildeten Woche eine zu tiefe Wandtemperatur auf, während die Wandtemperaturen in den anderen Räume in Ordnung waren. Durch Öffnen des Durchflußbegrenzungsventils im Rücklauf der entsprechenden Temperierschleife wurde entgegengewirkt. Allerdings wurde das Ventil zu weit geöffnet (das Ventil läßt sich leider nur ungenau bedienen). Am Montag morgen (13.01.1997) stellten wir fest, daß der Temperaturanstieg noch anhält und drosselten das Ventil wieder. Am Nachmittag findet sich bei Raum 10 deshalb keine Eintragung der Wandtemperatur im Handmeßbogen (vgl. Abb. 27).

Die Graphen spiegeln den Abfall der Temperatur nach der Drossselung des besagten Ventils wieder. Überlagert wird dies von weiteren Störungen: Raum 10 hat eine als Tapetentür ausgebildete Verbindungstür zu technischen Räumen des Graphiktrakts, die normalerweise verschlossen bleibt. Diese Tür wurde jedoch wegen technischer Arbeiten an mehreren Tagen hintereinander geöffnet und offen stehen gelassen. Zu trockene und kältere Außenluft strömt in den Raum. Die Werte stabilisieren sich wieder, wenn die Tür geschlossen wird. Am Montag ist bei geöffneter Tür auch ein Peak der Feuchtekurve nach oben zu sehen, der wieder mit der Naßreinigung (Raumpflegedienst) zusammenhängt. Hinter dem Gemälde laufen sämtliche Feuchteschwankungen gedämpft ab (Abb. 21-24).

Mithilfe der Meßergebnisse wurde zunächst versucht, das Nutzerverhalten durch Aufklärung zu verändern. Nur ein definiertes, abgeschlossenes Luftraumvolumen kann klimastabilisiert werden. Das Passieren besagter Tür für Transporte etc. nimmt eigentlich nur wenige Minuten in Anspruch, aus „unerklärlichen Gründen“ aber wird die Tür, wie deutlich auf den Graphen zu sehen, oft wesentlich länger - bisweilen Stunden - offen gehalten (sie ist nicht mit einem Selbstschließer versehen). Der Versuch zur Sensibilisierung des Personals brachte keinen Erfolg (die Klimatisierung als „Schikane“ des Restaurators). Inzwischen wurde die Tapetentür gegen eine selbstschließende Glastür ausgetauscht, die wie überall im Haus (z. B. Windfang an Haupteingang, Haupttreppenhaus und Nottreppenhäusern, Übergänge von der Kunsthalle zum Galeriegebäude) die Ausstellungsräume gegen nicht klimastabilisierte Bereiche ausreichend abschließt.

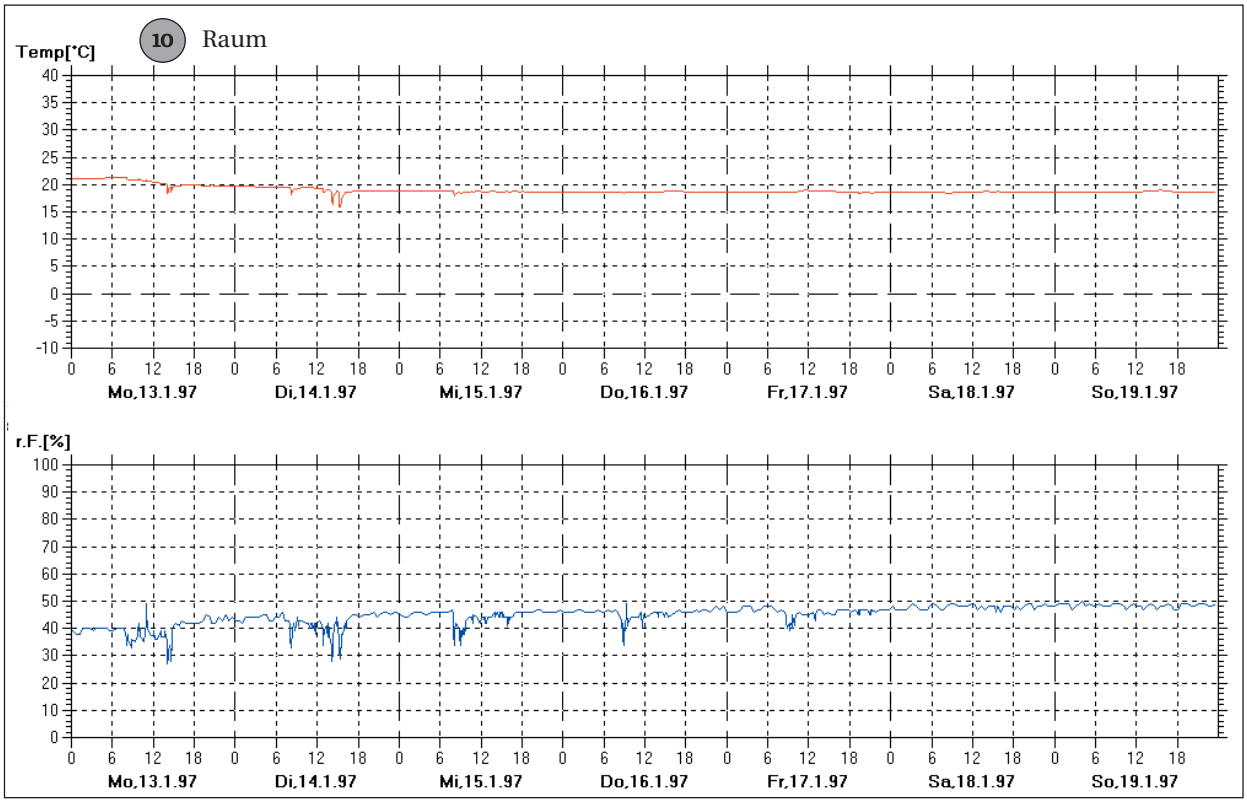
4.4 Raum 15 und 24, Kunsthalle

In beiden Räumen herrscht ein tieferes Temperaturniveau als in den übrigen Ausstellungsräumen. Der in beiden Räumen konstruktiv gleiche Raumabschluß, der teilweise direkt vom Dach gebildet wird, hat Schwachstellen. Die in beiden Räumen gewählte Sonderform der Temperierung hat außerdem prinzipielle Mängel und wirkt nur eingeschränkt, was hier nicht näher besprochen werden soll: Im Sommer 1997 konnten Nachbesserungsarbeiten in beschränktem Umfang ausgeführt werden, deren Ergebnis zufriedenstellend war.

4.5 Depots, Galeriegebäude

Die Depots für nicht ausgestellte Gemälde und Plastiken liegen im Keller des Galeriegebäudes (die Kunsthalle ist nicht unterkellert). Als Beispiel für einen typischen Kurvenverlauf wird der von Depot 1 abgebildet (Abb. 25-26).

Bei ergänzenden Baumaßnahmen im Sommer/Herbst 1997 wurden neben den bereits bestehenden geschlossenen Wandschalen an den Außenwänden zusätzlich je eine Temperierrohrschleife am Sockel der Trennwände montiert (auf Putz, in Anstrich), um einen besseren Schutz vor aufsteigender Feuchte zu erreichen. Bei dieser Gelegenheit mußte die Steuerung der Temperierung im Depotbereich verändert werden. Sie geschieht nun - anders als im Erd- und Obergeschoß - nicht mehr über die DDC Anlage, sondern in den Depoträumen selbst mit einfachen, kostengünstigen, thermomechanisch wirkenden Vorlaufthermo-



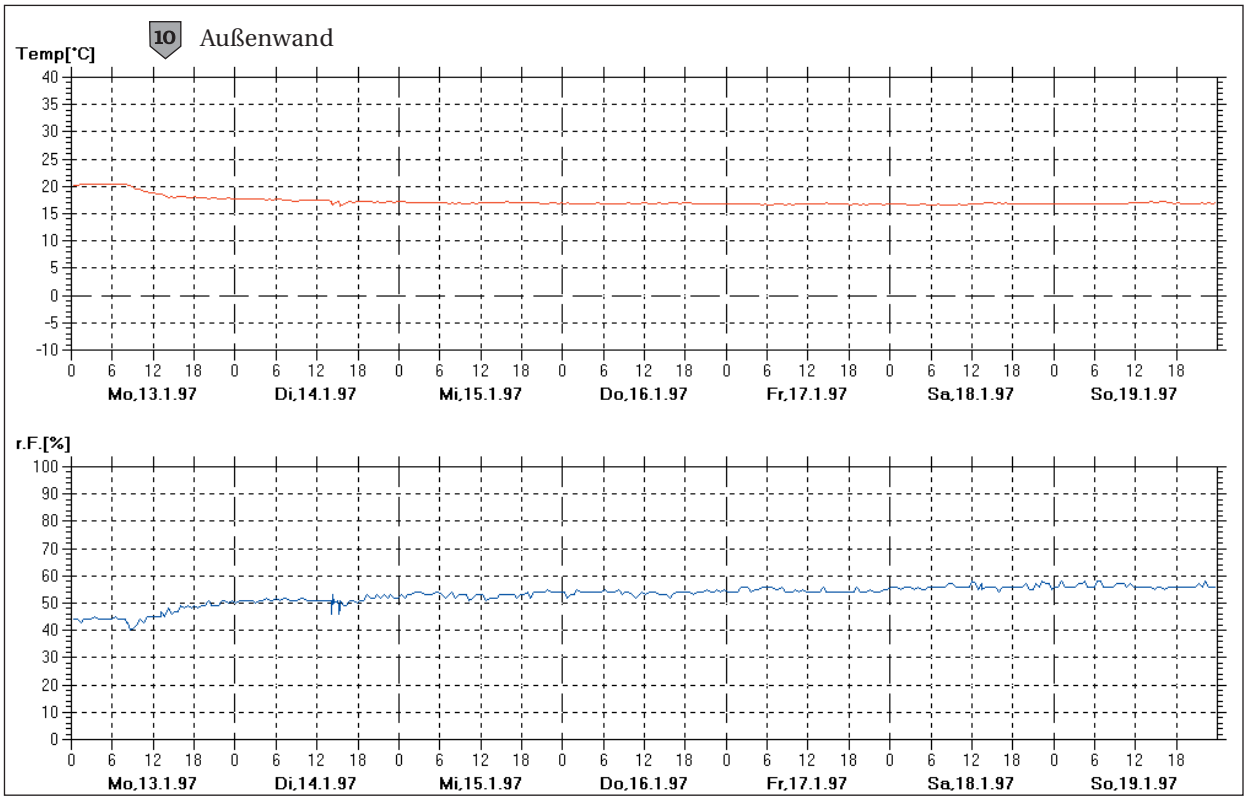
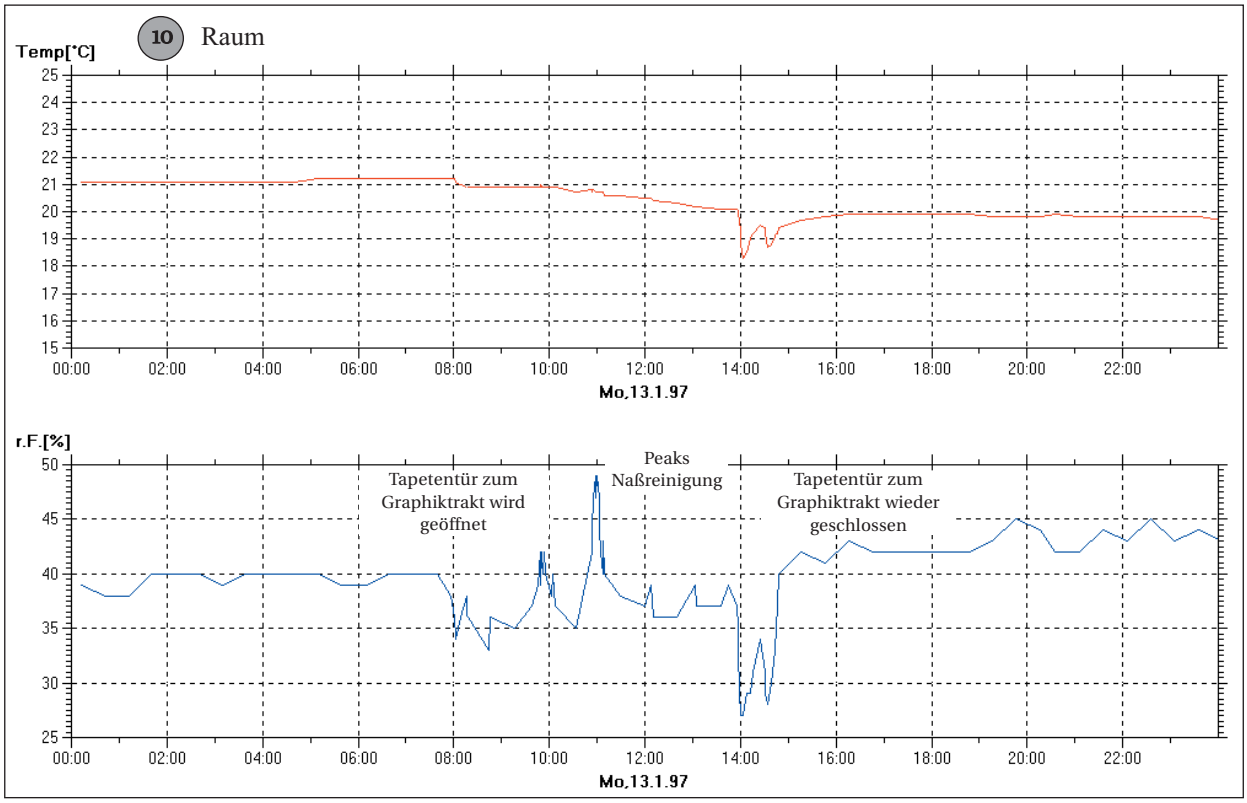


Abbildung 21-22:
Temperatur- und relative Feuchtekurven Raum 10: Die Schwankungen an 5 Tagen werden durch das Öffnen der Tapetentür zum Graphiktrakt verursacht (technische Arbeiten, Transporte). Dort herrscht eine niedrige relative Luftfeuchte und die Temperaur ist niedriger, manchmal wird offenbar auch die Außentür des Graphiktraktes zum Parkplatz geöffnet und noch kältere Außenluft srtrömt ein. Am Anfang der Woche reduzierten wir irrtümlich die Temperierung zu stark (ohne Handmessung, vgl. Abb. 27).



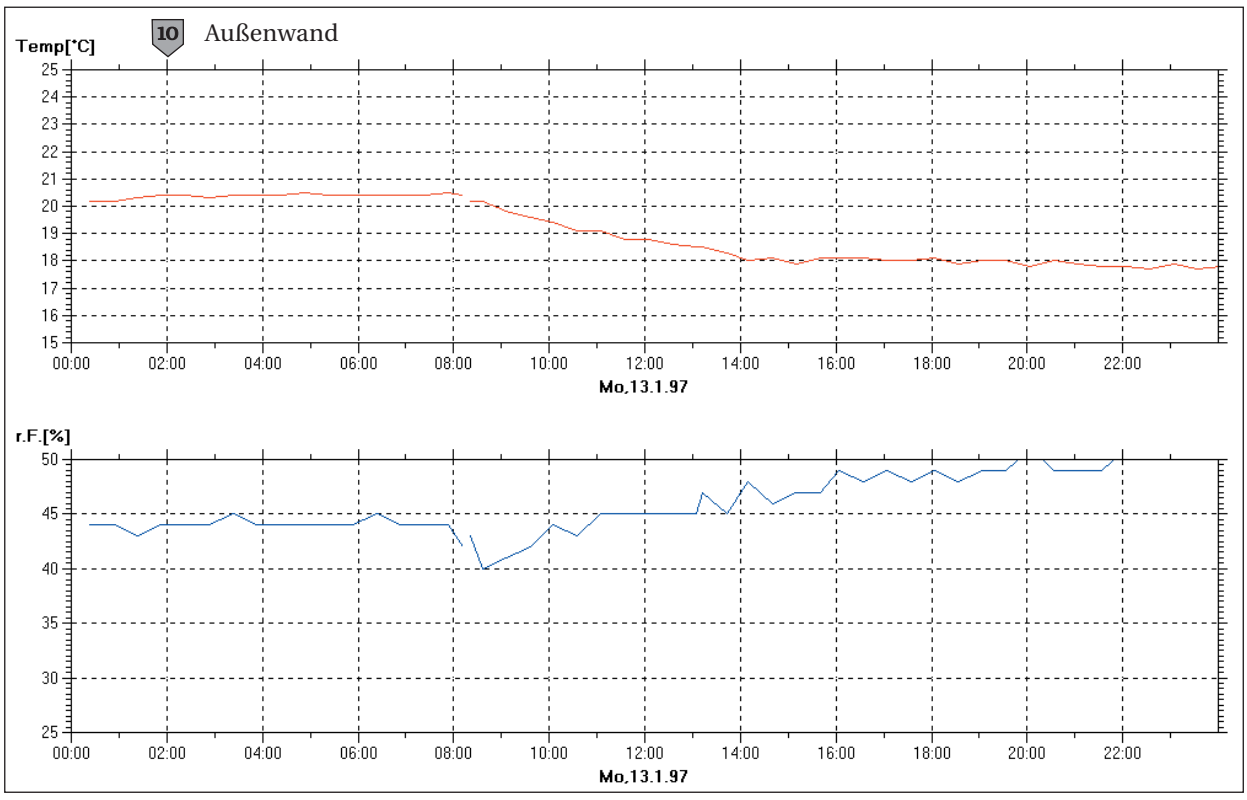
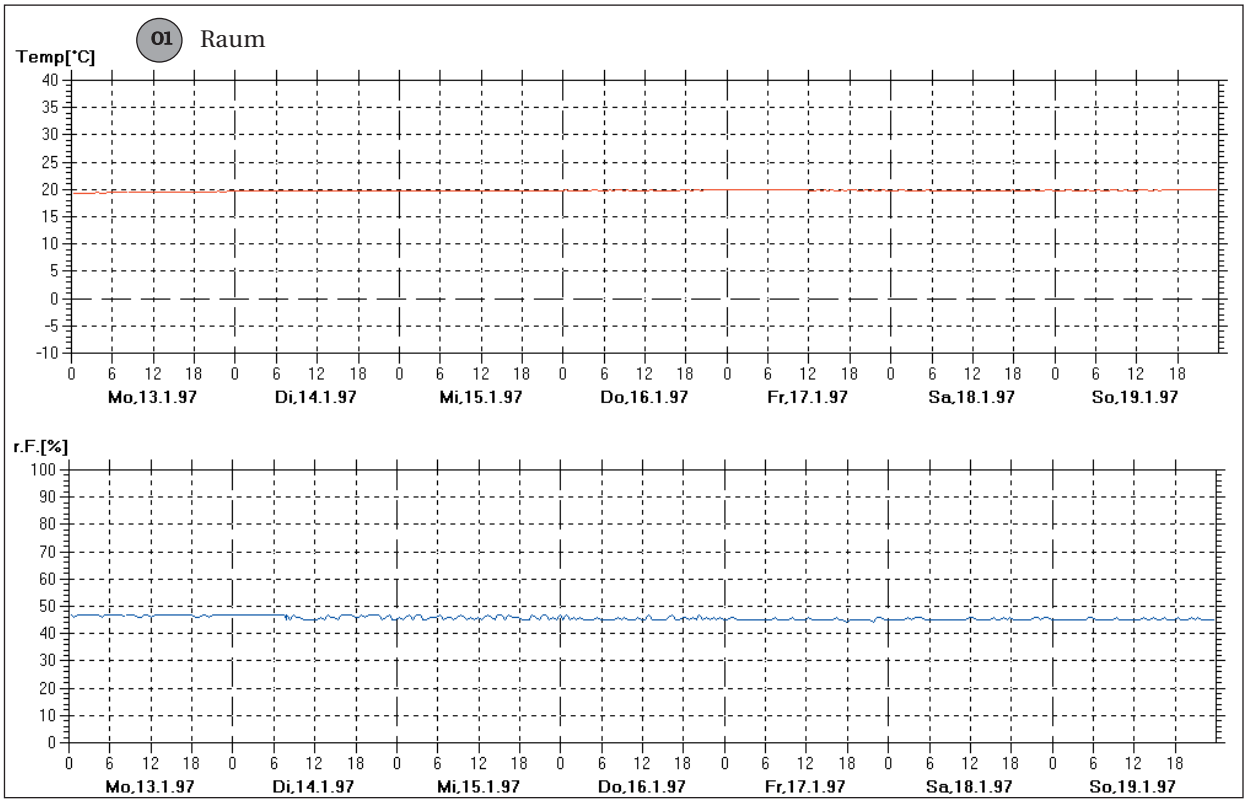


Abbildung 23-24:
Temperatur- und relative Feuchtekurven Raum 10, vergrößerte Skalierung. Schwankungen verlaufen hinter dem Gemälde gedämpft.



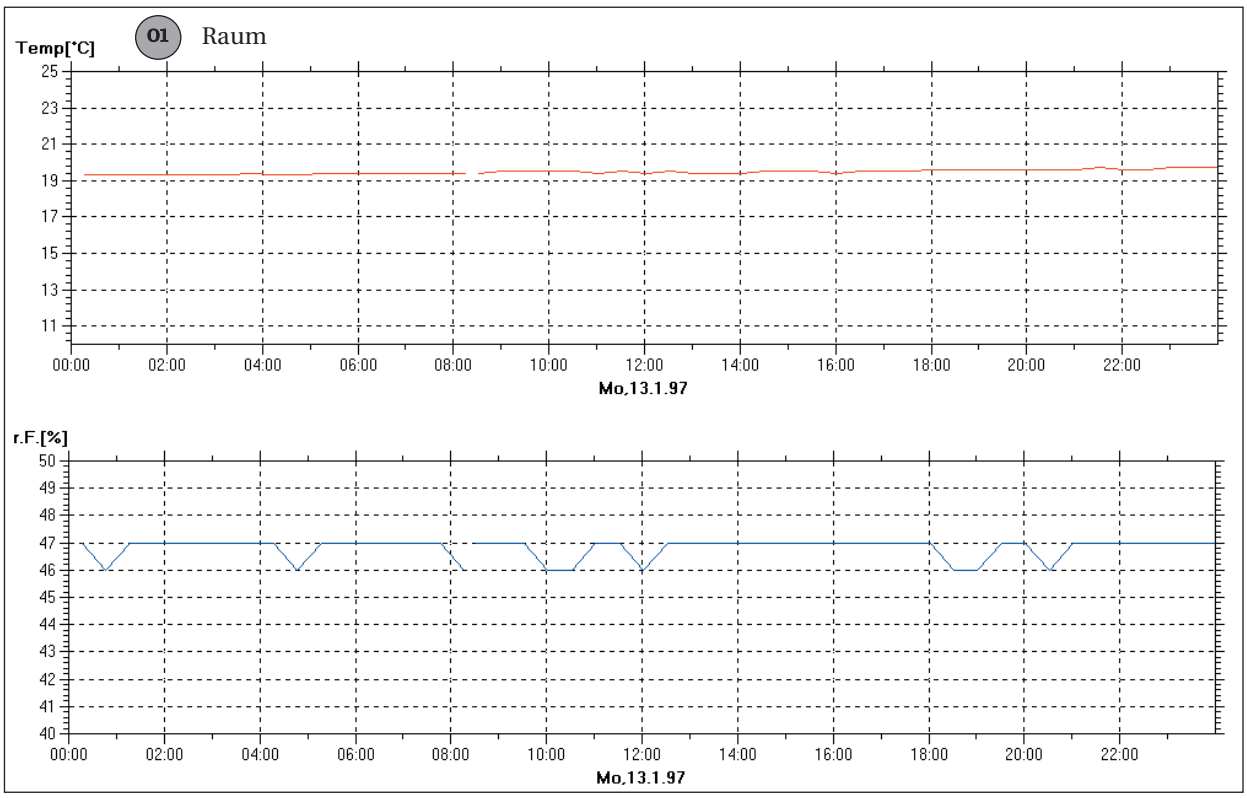


Abbildung 25-26:
Temperatur- und relative Feuchtekurven Depot 01, Wochenkurve und vergrößerte Skalierung.

staten mit Rücklaufanlegefühlern, die sich nach der jeweiligen Rücklauftemperatur öffnen und schließen und so auf den Wärmebedarf der *Wand* reagieren.[9]

4.6 Handmeßbogen

Der Hausmeister kontrolliert (unabhängig von den Meßaufzeichnungen des PREVENT Meßaufbaus) routinemäßig bei Rundgängen sämtliche Raumluftwerte und die Oberflächentemperaturen der Außenwände. Dazu stehen ihm entsprechende Handmeßgeräte zur Verfügung um sich vorort zu orientieren. Der Handmeßbogen gibt schnell einen Überblick über die Werte in den Ausstellungsräumen (Abb. 27).

5. Ergänzende Feststellungen

Das Raumklima im Sommer war, wie erwartet, nicht zufriedenstellend. Wir erreichten einmal sogar 31 °C Innentemperatur. Dies bewies, daß ein zwar geplanter, aber aus finanziellen Gründen nicht gebauter, außenliegender Sonnenschutz unerläßlich ist. Dieser Sonnenschutz wurde schließlich aufgrund der PREVENT Messungen 1997 nachgerüstet (vgl. Annex, Abb. 31-36). Seitdem überstiegen die Innenraumtemperaturen in der Regel nicht mehr die 24 °C. Nur wenige Wochen im Jahr erreichen wir max. 26 °C. Im besonders heißen Sommer 2003 (Außentemperatur längee Zeit >35 °C) erreichten wir einige Tage in enem Raum im Obergeschoß 27,4 °C.

6. Schlußbetrachtung

Die Temperierung wirkt wie beabsichtigt und zeigt die gewünschten Effekte. Das Innenraumklima erweist sich als sehr homogen und stabil. Das Kalte-Wand-Problem ist gelöst.

Es gibt nur minimale Kurzzeitschwankungen. Die Änderungen im Tagesverlauf und von Tag zu Tag liegen in konservatorisch engen Grenzen. Die Änderungsgeschwindigkeit ist reduziert. Die Änderung des Feuchtegehaltes der Objekte ereignet sich ebenso langsam. Wir erstreben keine Einhaltung der „klassischen“ Klimawerte im Sinne von 18-20° C und 50-55% rF übers ganze Jahr, sondern lassen die relative Luftfeuchte zwischen 45 % (Winter) und 60% (Sommer) gleiten.

Seit der Sanierung könnte im Winter auch eine rel. Luftfeuchte um 55% ohne Probleme aufrecht erhalten werden (ein entsprechender Testbetrieb wurde durchgeführt), sie sind jedoch aus konservatorischen Gründen nicht nötig.[10]

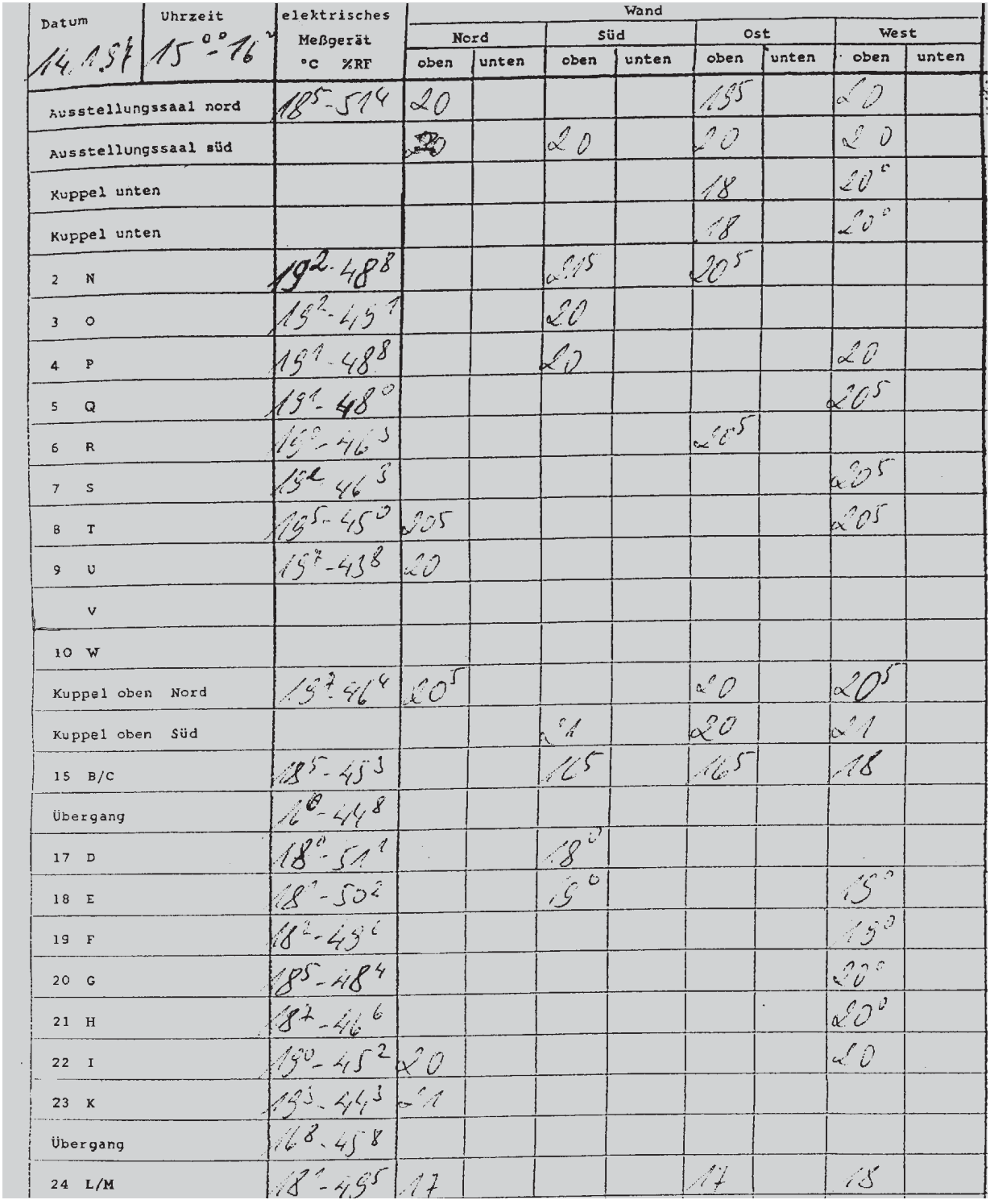
Ein zu großer Luftwechsel verursacht bei ungünstigen Bedingungen dynamisch taktende Lastzustände die sich in Regelschwankungen auf den Graphen zeigen. Die mechanische Belüftung mit einfachem Luftwechsel pro Stunde erwies sich in unserem Fall als noch unnötig groß. Im Herbst 1997 wurde deshalb die Lüftungsanlage auf Vierstufenbetrieb umgerüstet. Seitdem kann nun wahlweise mit ca. 0,1-fachem, ca. 0,4-fachem, ca. 0,6-fachem oder 1,0 fachem Luftwechsel gefahren werden. Bereits der 0,4 fache Luftwechsel reicht aus, um die in den Grahpen gezeigten Feuchtewerte im Winter aufrecht zu erhalten (ein entsprechender Testbetrieb wurde durchgeführt). Zu diesem Ergebnis trägt der im Vergleich zu konventionellen Konzepten geringere Luftdruck bei, da die Lüftungsanlage keine Raumbeheizungsaufgabe hat und die Einblastemperatur - ohne Nachteil („Strahlungsheizung“!) - unter der Raumtemperatur liegen kann. Dadurch sind die Feuchteverluste durch Gebäudefugen und Öffnungen niedrig.[11]

Der Heizenergieverbauch wurde nicht gemessen. Es kann jedoch folgende qualitative Aussage getroffen werden: Bei gestiegenem Komfort (die Ausstellungsräume waren vor der Sanierung nicht genügend heizbar) veringerte sich der Gesamt-Heizenergiebedarf: Wir verbrauchen seit der Sanierung weniger Gas. An diesem Ergebnis haben natürlich auch die Erweiterung der Kunstlichtbeleuchtung und die Verbesserung der Wärmespeicherfähigkeit der Gebäudehülle ihren Anteil.

9 Solche thermomechanischen Regler gibt es auch kombiniert mit 2 Anlegefühlern: Regler auf Vorlaufventil, 1. Fühler an Rücklaufrohr, 2. in Wandputz zur direkteren Regelung durch die Wandtemperatur. In den meisten Fällen dürfte - als billigste Lösung ohne DDC-Anlage - die Steuerung der Einzelschleifen über Rücklauftemperaturbegrenzer (am Rücklaufende eingebaut) bei üblicher Kesselregelung über die Außentemperatur (Mindestvorlauftemperatur 30°C auch im Sommer), ausreichen. Die Themostatventile sind wartungsfrei und einfach zu bedienen.

10 Vgl. hierzu Beitrag Kotterer zur Revision internationaler Klimawerte für Museen an anderer Stelle in dieser Publikation.

11 Bei der Janosch Ausstellung im Januar 1998 konnten wir an Spitzentagen den Frischluftbedarf von 3000 Besuchern mit 0,6 fachem Luftwechsel pro Stunde decken. Galeriegebäude und Kunsthalle haben zusammen ein Volumen von ca 10 000 m^3. Zusätzlich zur Umrüstung auf Vierstufenbetrieb wurde 1997 die Möglichkeit eingebaut, die Führung des Lüftungsstromes im Kanalnetz zu ändern. Seitdem kann bei Ausstellungseröffnungen die gesamte Luftmenge, die normalerweise in alle Ausstellungsräume gleichmäßig verteilt wird, zum großen, zentralen Ausstellungssaal des Galeriegebäudes geschickt werden. Auf diese Weise wird dort temporär ein mehrfacher Luftwechsel erreicht. Naturgemäß halten sich dort bei Eröffnungen die meisten Besucher auf und die übrigen Ausstellungsräume können kurzzeitig abgeschaltet werden.
Im Sommer nutzen wir die kühleren Nachttemperaturen zum Lüften. Tagsüber ist die Lüftung stark gedrosselt oder ganz abgeschaltet, wenn immer möglich. So vermeiden wir das unnötiges Aufheizen der Raumluft, zumal der Ventilationsmotor zusätzlich Wärme an den Luftstrom abgibt. Eine Anordnung des Motors nicht nur außerhalb des zu transportierenden Luftstromes, sondern auch außerhalb der Zentraleinheit der Lüftungsanlage wäre daher optimal.



Datum	Uhrzeit	elektrisches Meßgerät	Wand							
			Nord		Süd		Ost		West	
14.1.97	15°-16°	°C %RF	oben	unten	oben	unten	oben	unten	oben	unten
Ausstellungssaal nord		18.5-51.4	20				19.5		20	
Ausstellungssaal süd			20		20		20		20	
Kuppel unten							18		20°	
Kuppel unten							18		20°	
2 N		19.2-48.8			20.5		20.5			
3 O		19.2-45.1			20					
4 P		19.1-48.8			20				20	
5 Q		19.1-48.0							20.5	
6 R		19.2-46.3					20.5			
7 S		19.2-46.3							20.5	
8 T		19.5-45.0	20.5						20.5	
9 U		19.2-43.8	20							
V										
10 W										
Kuppel oben Nord		19.2-46.4	20.5				20		20.5	
Kuppel oben Süd					20.1		20		20.1	
15 B/C		18.5-45.3			18.5		18.5		18	
Übergang		20.0-44.8								
17 D		18.0-51.1			18.0					
18 E		18.1-50.2			19.0				19.0	
19 F		18.2-43.6							19.0	
20 G		18.5-48.4							20.0	
21 H		18.2-46.6							20.0	
22 I		19.0-45.2	20						20	
23 K		19.3-44.3	20.1							
Übergang		16.8-45.8								
24 L/M		18.1-49.5	17				17		18	

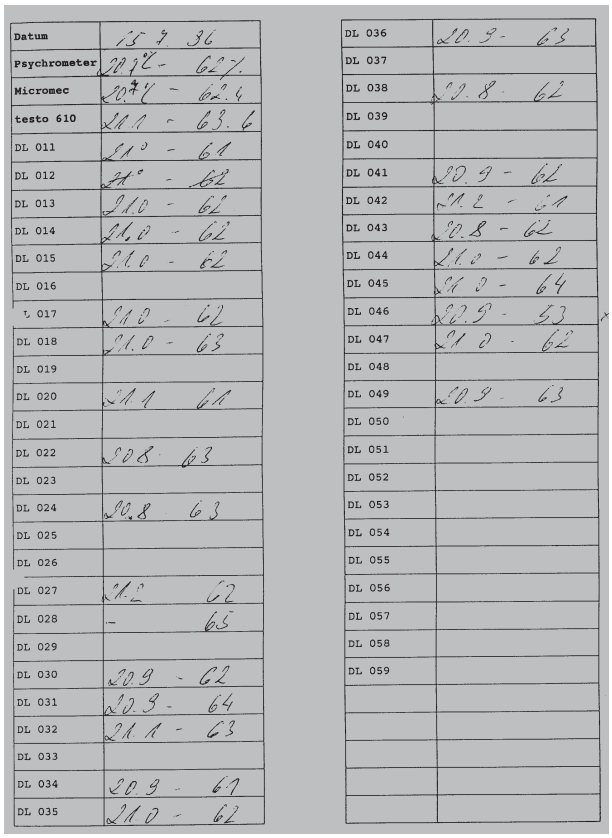
Abbildung 27:
Handmeßbogen. Die Raumnummern und die Nummern der Datenlogger stimmen überein. „Elektrisches Meßgerät“ meint Lufttemperatur und relative Luftfeuchte gemessen mit dem „Testo 610“ (vgl Annex: Measurement instruments). „Wand oben“ meint die Wandtemperatur gemessen in ca 1.4 m Höhe über Fußboden mit Infrarotstrahlungs-Thermometer „ILM Therm“. Die von den Ausstellungsräumen durch Glastüren abgetrennten „Übergänge“ sind etwas kühler. "Kuppel" meint die kuppelüberwölbte Eingangshalle, die im ebenerdigen Bereich zur Ostseite große Fensterflächen hat (dort Wand 18° C). Während seiner wöchentlichen Rundgänge kontrolliert der Hausmeister routinemäßig alle Werte und trägt sie in den Handmeßbogen ein. Auf diese Weise bleiben Fehlfunktionen der Anlagen oder Abweichungen zur DDC-Anzeige des Steuercomputers nicht lange verborgen. Die dafür verwendeten Hand-Meßgeräte (vgl. Annex) erreichen zwar nicht die Präzison des PREVENT-Meßaufbaus, sind aber hinreichend genau für diese Zwecke.
Die Außentemperatur des abgebildeten Tages betrug -5 bis -8°C.

Annex:

Measurement instruments

For the actual measurements, SEL-LOG 30S data loggers with air temperature and humidity sensors were used, which were developed and built by the firm Meßtechnik Neher, Nürnberg, and which were loaned to us for these measurements by the Bavarian Museum Service (Landesstelle für die nichstaatlichen Museen, München).

With these data loggers, the time interval between measurements can be programmed for between 10 seconds and 30 minutes. In our case, every ten seconds a measurement was taken, because we wanted to obtain the most accurate possible record of events. However, in order to save memory, the data loggers are designed to record a measurement value only if the value has changed by more than a specified amount. If the current measurement value shows no change when compared to the previous value, then the data logger records a new value only every 30 minutes (for quality control purposes). Thus the data logger does not record a long series of constant values, for which only the time has changed, but rather only the time and value at which measured values change. Thus, for slowly changing measurement values, with this selective but at the same time dynamic method of operation, very high resolution long-term measurements can be made with reasonable memory requirements.



Datum	15.7.36	DL 036	20.9 - 63
Psychrometer	20.2 - 62.7	DL 037	
Micromec	20.4 - 62.4	DL 038	21.8 - 62
testo 610	21.1 - 63.6	DL 039	
DL 011	21° - 61	DL 040	
DL 012	21° - 62	DL 041	20.9 - 62
DL 013	21.0 - 62	DL 042	21.2 - 61
DL 014	21.0 - 62	DL 043	20.8 - 62
DL 015	21.0 - 62	DL 044	21.0 - 62
DL 016		DL 045	21.0 - 64
DL 017	21.0 - 62	DL 046	20.9 - 63
DL 018	21.0 - 63	DL 047	21.0 - 62
DL 019		DL 048	
DL 020	21.1 61	DL 049	20.9 - 63
DL 021		DL 050	
DL 022	20.8 - 63	DL 051	
DL 023		DL 052	
DL 024	20.8 63	DL 053	
DL 025		DL 054	
DL 026		DL 055	
DL 027	21.2 62	DL 056	
DL 028	- 65	DL 057	
DL 029		DL 058	
DL 030	20.9 - 62	DL 059	
DL 031	20.3 - 64		
DL 032	21.1 - 63		
DL 033			
DL 034	20.9 - 61		
DL 035	21.0 - 62		

Figure 28-29:
We regularly compare the measurement values of the dataloggers and of our two other electronic measurement instruments against an Assmann psychrometer. An original comparison check sheet summarizes all values of the measurement. Our SEL-LOG 30 S dataloggers can realize changes in temperature from 0,5°C and relative humidity from 2%. We only allow differences of ± 1°C and ± 2% rh in the value compared to the Assmann psychrometer. The control mesasurments were carried out allways by the same person (housekeeper and museum technician Josef Passauer) to have the same deviation by handling the instrument. Photo author.

The Pt-100 sensors can resolve a temperature change of 0.5°C. The output voltage signal of the capacitive relative humidity sensors (Model IH-3602-L, HyCal, USA) varies by 3 volts for 0–100% relative humidity and, according to the data sheet of the manufactorer, at 50% RH deviates by only ±1% over 5 years (?). The humidity sensors can resolve a relative humidity change of 2% and have accuracy of ±2%

The data loggers are equipped with an RS 232 interface. With a PC and the Windows program Smartgraph (Weiland-Maierhofer GmbH, Velden, Germany) the stored data can be read from the magnetic cards of the data loggers and continuously stored on discs and administered. Smartgraph can graph the data with various formats, according to ones purpose, and print these out on a printer.

Although, according to the manufacturers specifications, the sensors have good long-term stability, approximately every six months all instruments were gathered together in one room and checked against an Assmann psychrometer (Dosch, Berlin). Data loggers whose displayed values deviated by more than ±0.5°C and ±2% RH from the psychrometrically measured values were recalibrated. These quality control measurements were documented by instrument number, displayed value, etc., in a measurement log. They were always carried out by the same person so as to have almost the same deviation in the psychrometer control measurment due to handling of the instrument (Figs. 28–29).

For additional measurements of air temperature and relative humidity "by hand" two separate instruments were used together. One, a Testo 610 (Testo GmbH, Lenzkirch, Germany), has measurement ranges of -20 °C – +70 °C and 0 – 100%RH, and system accuracies of ±0.4 °C (-20 – 0 °C), ±0.2 °C (0 – +70 °C), and ±2% RH (2 – 98% RH). The other, a Mikromec data logger with a Rotronic SA-100 hygrometer (Rotronic AG, Bassersdorf, Switzerland), has measurement ranges of -20 – +50 °C and 0 – 95% RH and accuracies of ±0.5 °C and ±1% RH. These instruments were also checked every six months and calibrated, if needed.

Finally an infrared thermometer (ILMtherm 600, Neher, Nürnberg) was used for measuring the surface temperature of walls, paintings, frames, and so on without touching them. This instrument's accuracy is given as ±2 °C, when the emissivity of the measured object is 0.95, and ±1°C, for a limited measurement range of 0 – 50 °C.

Problems during the measurement campaign

During the measurement campaign it was not possible to operate the complete measurement system, with all the loggers, at the same time. At any given time individual instruments were unavailable for various reasons (e.g. repair, calibration, power supply etc.).

Over all, however, sufficient measurements and experience exist such that the data recorded by the operational data loggers can be correctly interpreted and a typical picture of the results of the measurements can be presented.

One difficulty with our measurements was due to the data loggers' power supplies. During the day the data loggers were powered from the electrical net and, for safety reasons, at night from built-in rechargeable batteries (at night electricity from the net is mostly shut off in the Museum). Some of the data loggers, however, were not plugged in continuously during the day, because there was no outlet in physical reach, and had to be connected to the outlets by means of an extension cord for a given amount of time during the day. This was forgotten in some cases.

A further problem was related to the data loggers' rechargeable batteries themselves. The data loggers were delivered in two groups. The first group, delivered in the Summer of 1995, consisted of 13 loggers which were used for measurements in the roof area of the gallery building, which are not discussed here. The second group was delivered late 1995 / early 1996. In September of 1996 the batteries of the first group started having operational problems (due to longer use), and had therefore to be removed from the measuring system. The problem

of the batteries is generally known (memory-effect due to incompletely charge or discharge). For various reasons, unfortunately, replacement of the batteries did not occur until after the end of the measuring campaign. Other PREVENT partners have also reported problems with operation of their measuring systems.[12]

Wall shells. Construction details.

12 See (6)

Construction details of our wall shells are given in Fig. 30. They are integrated with baseboard heaters in most places. They were designed in 1989. The current state of the art in tempering indeed no longer uses separate heated wall shells but rather heating pipe loops under the plaster in the baseboard area of a single monolithic wall. The renovation of the Kunstforum Ostdeutsche Galerie was done before this simplification of tempering by Großeschmidt.

German engineers often choose well-known baseboard convectors, instead of heating-pipe loops, because they fear the official calculations according to DIN 4108. Wall baseboard convectors, instead of heating tubes under plaster, have bad regulating performance. Heating is not linear with water temperature. (Beginning with foreline temperatures greater than 40 °C, they rapidly show higher output, because they are constructed as convectors and aim to heat masses of air . The result is dust transport by high velocity air streams. A third disadvantage occurs sometimes, a cracking noise, as a reaction to changes in dimension, when suddenly cooling down or heating up.

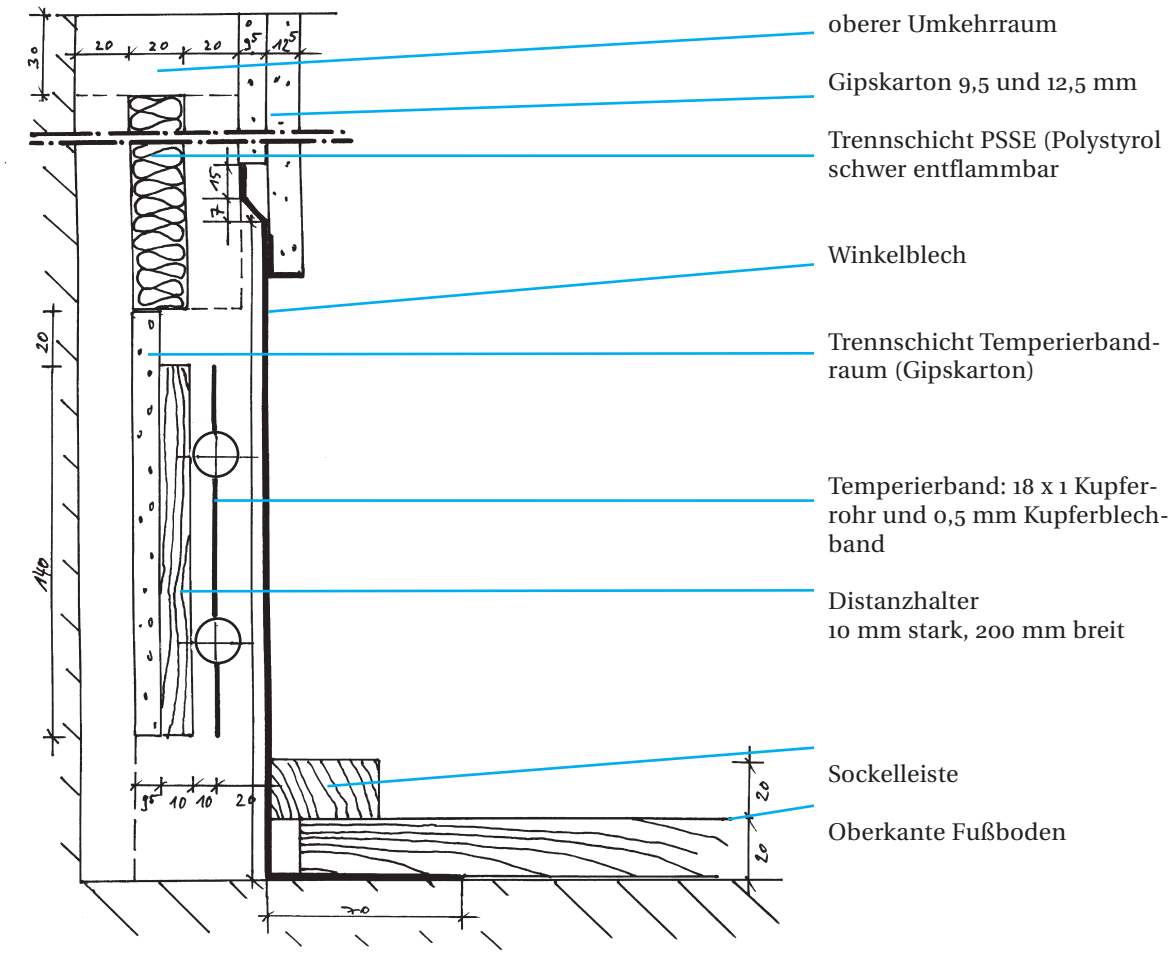


Figure 30:
Wall heating design used in the Kunstforum Ostdeutsche Galerie

External sun protection

External sun protection was applied in Fall 1997 to glass areas of the Art Hall roof, the glass-enclosed staircases and passageways between the Art Hall and the Gallery Building, glass areas of the Gallery Building roof and glass areas of the west facade of the Gallery Building (Figs. 31–36). The sun protection mixes fixed perforated metal sheet and automatic motorized roll-up blinds.

Thanks

Special thanks to housekeeper and museum technician Josef Passauer, who carried out most of the measurents during the measurement campaign in the Kunstforum Ostdeutsche Galerie.

Figures 31–36:
External sun protection: Gallery Building, view from southwest. / Kunsthalle and Gallery Building, view from southeast. / Connecting passageways and staircases between Gallery Building and Kunsthalle, view from south. / Roof of the main staircaise betwen Gallery Building and Kunsthalle, in the background roof of Gallery Building. / South front of the main staircase. / View from the main staircaise to outside. The outer sun protection is transparent from the inside, a tree and part of the roof of the Gallery Building can be seen through the sun protection. In the case of fabric roll shades, dark shades are better than light shades for transparency, because the eye is able to see the brighter environment behind the shade. A light shade is too shiny for the eye and makes it impossible to see the landscape.

Michael Kotterer

Climate Measurements in the Kunstforum Ostdeutsche Galerie in Regensburg: Analysis and Documentation

Abstract

The Kunstforum Ostdeutsche Galerie in Regensburg was the first large art museum that exhibits paintings and sculpture to realize a new climatization concept, after it was renovated during the years 1989-93. This concept consists of an optimized building shell, tempering (continuous outer-wall heating), and minimized ventilation. The concept was developed by the Landesstelle für die nichtstaatlichen Museen in Bayern (Bavarian Museum Service). As a contribution to the Eureka project 1383 PREVENT, the climate values on outer walls behind paintings and in the middle of the room were measured and compared in order to document the conservational advantages of this concept. This conservational quality is demonstrated by the homogeneity and constancy of the achieved climate conditions

Klimamessungen im Kunstforum Ostdeutsche Galerie Regensburg: Analyse und Dokumentation

In den Jahren 1989-93 wurde das Kunstforum Ostdeutsche Galerie Regensburg saniert. Als erstes grösseres Kunstmuseum, das Gemälde und Skulpturen ausstellt, entschloss man sich, ein neuartiges Klimatisierungskonzept zu realisieren. Es besteht in einer optimierten Gebäudehülle, der Temperierung als Heizsystem und einer minimierten Lüftung. Das Konzept war von der Landesstelle für Nichtstaatliche Museen in München entwickelt worden. Um die konservatorischen Vorteile dieses Systems zu dokumentieren, wurden im Rahmen des EUREKA-Projekts 1383 PREVENT die Klimawerte an Aussenwänden (hinter Bildern) und in Raummitte gemessen und verglichen. Im Beitrag werden die Messungen dargestellt und ausgewertet. Dabei zeigt sich in der Homogenität und Konstanz der erreichten Klimabedingungen die konservatorische Qualität des Konzeptes.

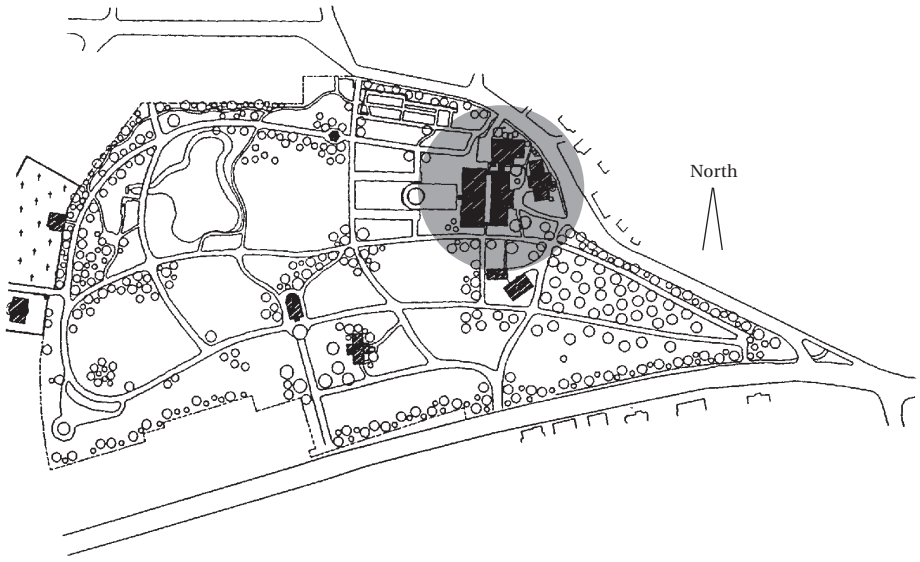
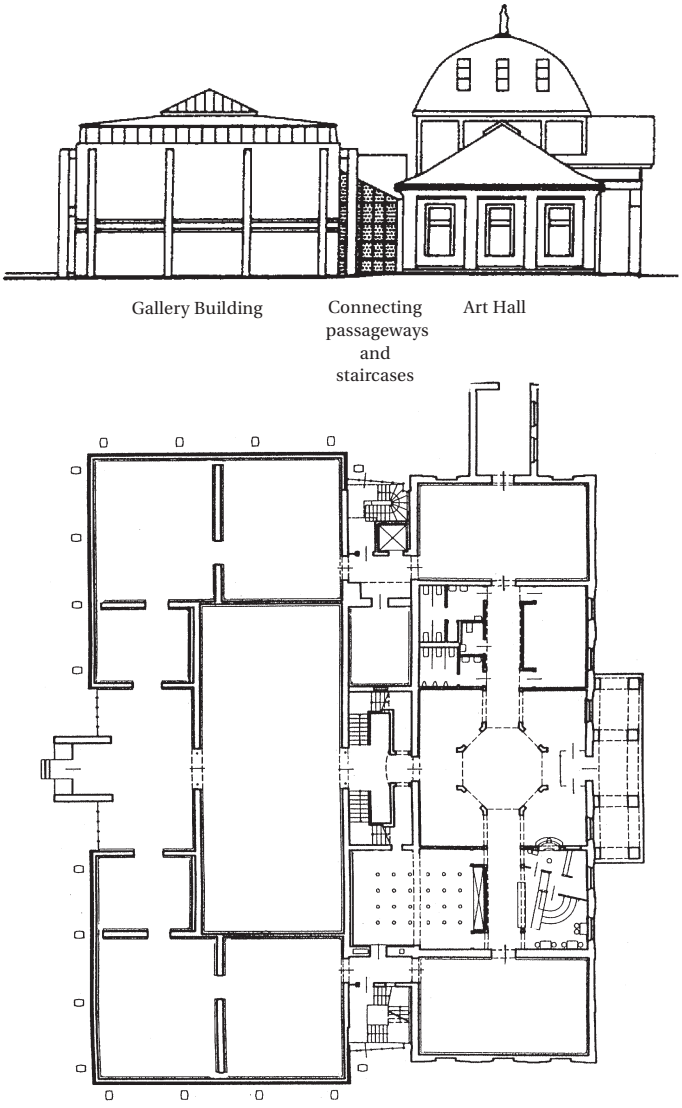


Figure 1:
Location of the Kunstforum Ostdeutsche Galerie in the Regensburg City Park. Drawing Arnulf Magerl, Neutraubling.

1. Location

The Kunstforum Ostdeutsche Galerie lies just west of the Regensburg old town in the City Park (Fig. 1). The museum complex consists of several buildings. The Graphic Arts Wing, in which the Graphics Collection and the Graphic Arts Exhibition Hall are located, and the Schützenhaus, in which administration, restoration workshop, and library are located, were not part of the measurement project. The climate measurements, which constitute the German contribution to the PRE-VENT Project, were made in the Art Hall and the Gallery Building, in which paintings and sculpture are exhibited.

The core of the Art Hall was built in 1871 and expanded and modified in 1910 and 1962. The Gallery Building was erected in 1970 next to the Art Hall (Figs. 2-3). Connecting the two buildings is a center section with stairways and footbridges. The buildings were most recently modified between 1989 and 1993 as part of a general renovation. The exhibition areas are separated by glass doors from the stairways, footbridges, and the cupola-crowned entry hall. The storerooms for unexhibited art works are located in the basement of the Gallery Building.



Figures 2-3:
Kunstforum Ostdeutsche Galerie, Ground Floor, View fom South. Drawings Arnulf Magerl, Neutraubling.

Figure 4:
View from southeast: left the Art Hall, in the background the Graphic Arts Wing, rigtht the Schützenhaus. Photo Wolfram Schmidt, Regensburg.

Figure 5:
View from southwest: the Gallery Building, 1996, without external sun protection. Photo author.

2. The Goals of "Tempering"

Between 1989 and 1993 the Kunstforum Ostdeutsche Galerie underwent a general renovation. Apart from improvement of the infrastructure and protection from sunlight, the primary target was optimization of the room climate. An integrated solution was to be found by utilizing a heating and ventilating system which linked three aspects: the highest possible standard of damage prevention for collection and building, the lowest possible energy consumption, and consideration of the physiological needs of visitors and staff. However, all of this would have to be done within the tight constraints of the existing building substance. The solution chosen for the Kunstforum Ostdeutsche Galerie, as the first large art museum that mainly exhibits paintings, was the installation of a wall heating system as double-walled shells on the exterior walls.[1] Integrated baseboard heaters within the shells heat the enclosed air, compensating for building transmission losses "directly behind the paintings." Thus no condensation occurs on the surfaces of paintings or walls and room air is heated only by radiation from the walls.

1 For construction details see appendix.

The alternative to wall heating, attempting to heat the building's mass through the detour of the room air, not only causes dust problems but leads to a high demand for humidification. Heating air lowers its relative humidity and raises its pressure. The resulting higher air exchange causes high water vapor loss via the joints and openings of the building. Thus, out of principle, the demand for humidification is unavoidably high as a direct consequence of the use of the room air as the heating medium, regardless of whether a high-tech air conditioning system or a conventional heating system is used. Thus it follows that the demands on the "air conditioning" system in a museum should be minimized by limiting it to ventilation and humidification and by optimizing and directly heating the building envelope (exterior walls, roof, windows).

Following this recommendation, through the choice of wall heating for the Kunstforum Ostdeutsche Galerie, it's ventilating system could be designed on a correspondingly reduced scale. This "partial" air conditioning with a maximum air exchange rate of one building volume per hour (1 ACH) has neither a cooling nor a dehumidification component. And the size of both the humidification and fresh air reheating units could be decreased. The rough draft of this "holistic" climatization concept — optimized building envelope, wall heating, minimized ventilation — was created by the Landesstelle für die nichtstaatlichen Museen in Bayern (Bavarian Museum Service).

In particular, the conservational quality of wall heating is shown, which, in the form of tempering, avoids the damage potential of typical museum heating,

i.e., the problem of the "cold wall" as an exhibition surface: maximum relative humidity levels behind the paintings combined with the risk of damage due to objects becoming overly dry due to very low humidity in other parts of the room, short-term fluctuations of room climate, and high demand for humidification.

3. Location of the Measurement Points

To demonstrate the effect of tempering, the temperature and relative humidity in front of outer walls and behind exhibited paintings were measured (Fig. 6). The sensors behind the paintings were mounted on the wall at a height of nearly 1.5 m and were connected with a flexible extension cable to data loggers, which were mounted separately on the wall nearby. For every measuring point behind a painting, we were also interested in the room temperature and humidity in front of the painting, which was measured in the middle of the room, if possible (Fig. 7). Most of these room air sensors were connected to data loggers mounted under benches at a height of 40 cm (invisible to visitors) or other suitable points at heights of 1.0 m, 1.8 m, and 2.4 m (selected on the basis of aesthetics). Measurements were made in all four corners and on both floors of the buildings.

In the storerooms for unexhibited art in the basement of the Gallery Building (the Art Hall has no basement) the temperature and relative humidity of the room air were measured nearly in the middle of the room at a height of 1.5 m.

Finally, the outdoor climate conditions were documented with measurement of the air temperature and humidity in a little roof garden, where the fresh air inlet for the ventilation system is located.[2]

3.1. Heights of Measurement points

Having the room air measurement points at various heights creates no problems with tempered rooms because the room climate is radiation dominated and thus nearly homogeneous (the height of each of the sensors from the floor is given, in parentheses, in Fig. 10). We know this from experience as well as from a scientifically characterized tempered room in the Alte Staatsgalerie (Old State Gallery) in Stuttgart, which was studied in 1991 by Stohrer of the Stuttgart University of Applied Sciences.[3] Over a total height of 7 m, for 15 m widths on a tempered wall, a maximum temperature variation of 1.5 °C could be determined (Fig. 8). Stohrer also measured the room air temperature and similarly found a maximum variation of 1.5 °C. Thus no significant gradient in room air temperature was measurable. Because the tempering of the sample room of the Alte Staatsgalerie Stuttgart and that of the Kunstforum Ostdeutsche Galerie were both designed by Hofer, the construction of the wall shells in both cases is practically identical, the thermographs in the Stohrer report can, despite limitations, illustrate the typical homogeneous temperature distribution on the surface of a wall shell (Fig. 8). A part of the Stuttgart sample room was without a wall shell. It was heated "only" with a baseboard heater mounted underneath a facing. Thermography showed that this simplified form of tempering resulted in an equally homogeneous wall surface temperature distribution[4] and supports the statements of Großeschmidt. In the 16-m high cupola-topped entry of the Art Hall of the Kunstforum Ostdeutsche Galerie, we could also find no relevant evidence of temperature stratification of the air and measured a difference of max. 1.5–2.4 °C (Fig. 9).[5]

2 Measrement equipment see Annex

3 M. Stohrer, M. Repp, Report BPL 139/91. Experimental analysis of a wall tempering system of the internal insulation type and the room climate of a sample room in the Alte Staatsgalerie in Stuttgart during heating operation. Forschungs- und Entwicklungsgemeinschaft für Bauphysik e.V. an der Fachhochschule für Technik Stuttgart, 25.03.1991. Because of incorrect regulation of the supply of heat to the sample room of the Alte Staatsgalerie Stuttgart, by the way, some of the final conclusions of the report must be looked at very critically. According to a personal communication from Hofer, in Stuttgart, rather than operating as he had specified, too little heat was supplied, periodically rather than continuously, to the wall-shell heating system. The foreline temperature showed oscilation between high and low values which led to a too low mean temperature. Thus the wall shells were temporarily "heated" by the ventilation system (warmed and humidified air) and not by the wall heating (see (3), p. 8 a. Ap-pendix 27). As a result, Stohrer unfortunately came to the (incorrect) conclusion that there is a theoretical danger of condensation in the wall shell on the insides of the outer walls, at the lowest point (which, as discussed above, was not correctly heated and thus was too cold and showed, in contact with the humidified air, the risk of condensation). In particular, the calculation, according to the Glaser-process, for an air sample from an "improperly heated" wall shell appears unfortunate (see (3), p.11).

4 See (3) Appendix 24

5 The cupola-crowned entrance hall uses a mixture of tempering forms. On the upper floor, a balcony which encircles the entrance hall, an open, simple shell of nearly 4 m height with a small baseboard convector is used. The east wall of the ground floor has a simple baseboard convector along the wall base and the west wall has a closed shell as every-where else in the museum (see appendix).

Figures 6-7:
Measurement of climate near the wall. Temperature and humidity sensors hanging behind a painting. / Measurement of room climate. Temperature and humidity sensors, together with a data logger, were often mounted under a bench. Photos author.

Figure 9:
Temperature distribution measurement in the nearly 16 m high Entrance Hall of the Kunstforum Ostdeutsche Galerie. We could find no relevant evidence of temperaure stratification of the air. Photo Henning Großeschmidt, Munich.

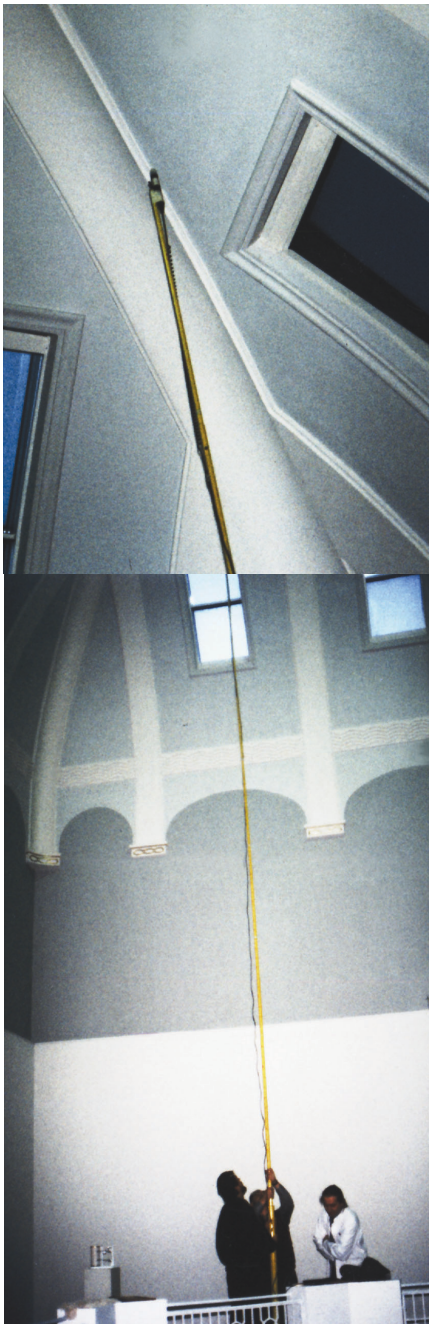
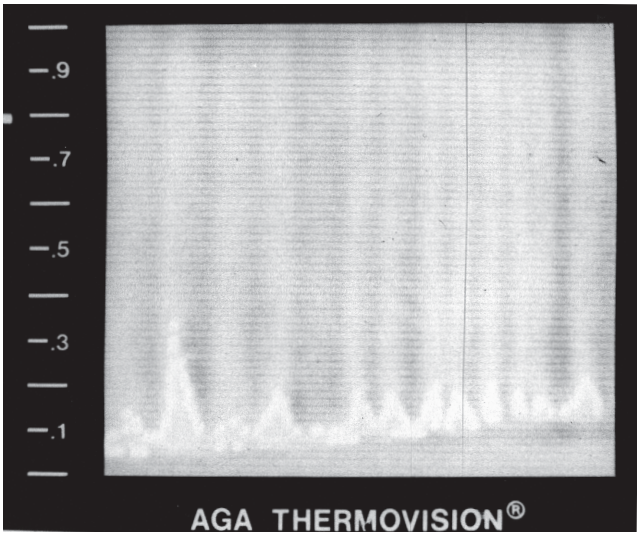
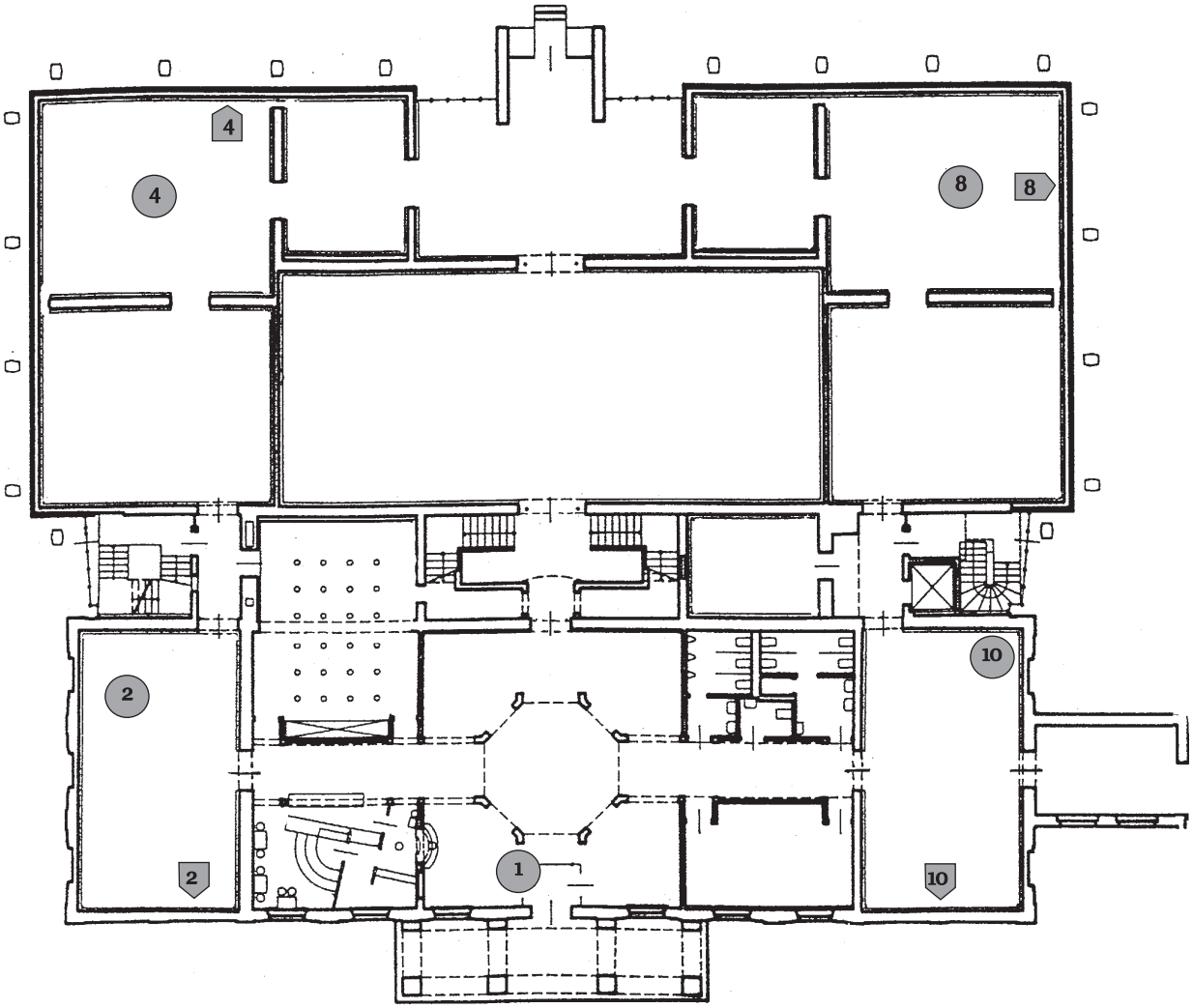


Figure 8:
A thermograph from the Stohrer report (see (3), Appendix 12) illustrates the typical homogeneous temperature distribution on the surface of a wall-shell. Over a total height of 7 m, for 15 m widths on a tempered wall, Stohrer could determine only a maximum temperature difference of 1.5 °C. The heating strip can be seen at the base of the wall.





Measurement points, ground floor:

1 Main Entrance, roomside (2 m)

2 Room (0,35 m)

2 Wall East (1,4 m)

4 Room (0,4 m)

4 Wall West (1,4 m)

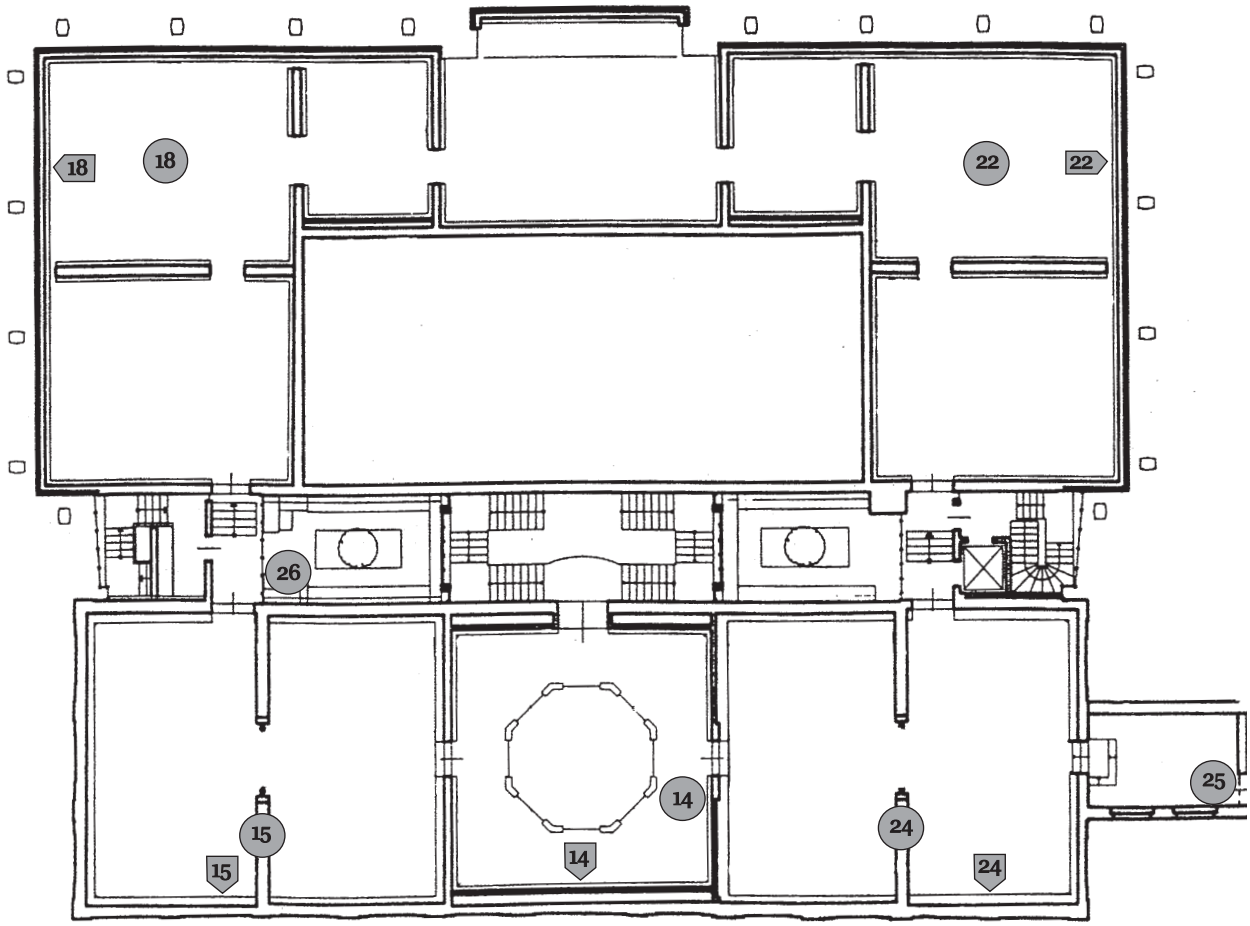
8 Room (0,4 m)

8 Wall North (1,4 m)

10 Room (0,4 m)

10 Wall East (1,4 m)

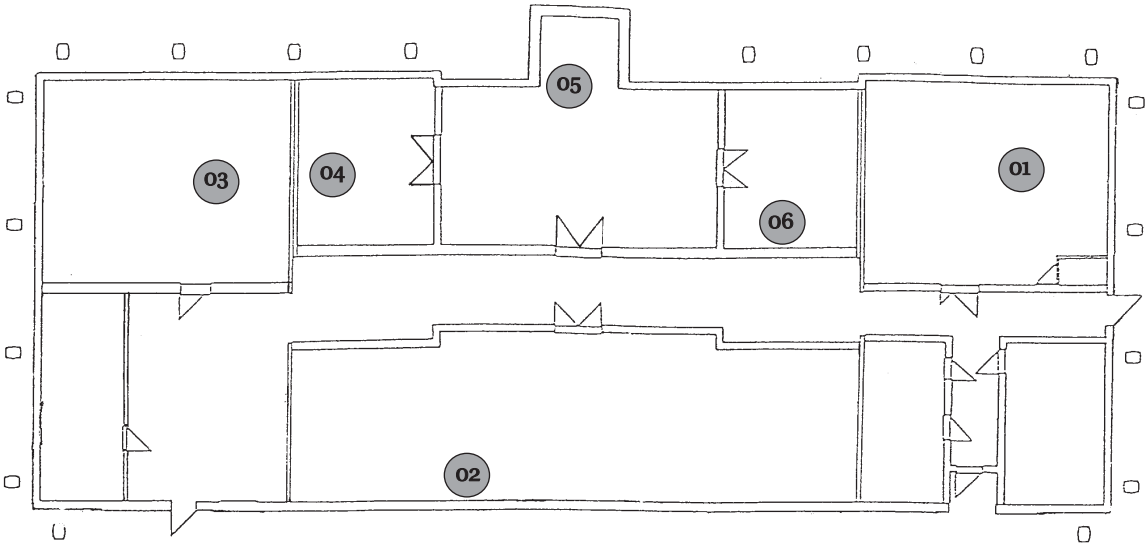
Figure 10:
Ground floor measurement points. Based on a drawing of the ground floor by Arnulf Magerl, Neutraubling.



Measurement points, first floor:

- 14 Room (4 m)
- 14 Wall East (1,4 m)
- 15 Room (2,45 m)
- 15 Wall East (1,4 m)
- 18 Room (0,4 m)
- 18 Wall South (1,4 m)
- 22 Room (0.4 m)
- 22 Wall North (1,4 m)
- 24 Room (2,45 m)
- 24 Wall East (1,4 m)
- 25 Door Graphic Art Building (2,0 m)
- 26 Outdoor, Roof Garden (0,65 m)

Figure 11:
First floor measurement points. Based on a drawing of the first floor by Arnulf Magerl, Neutraubling.



Measurement points, basement:

01 Storeroom (1,7 m)

02 Storeroom (1,2 m)

03 Storeroom (1,7 m)

04 Storeroom (1,1 m)

05 Storeroom (1,3 m)

06 Storeroom (1,3 m)

Figure 12:
Measurement points in basement storerooms. Based on a drawing of the basement by Arnulf Magerl, Neutraubling.

4. Measurement Results

The PREVENT measurement period at the Kunstforum Ostdeutsche Galerie lasted for one year, from January 1996 until January 1997.[6]

In order to demonstrate the effects of tempering, examples from one of the coldest weeks of the measurement period will be discussed. During 13-17 January 1997, the outside temperature reached -10 °C (Fig. 13).

4.1. Room 2, Art Hall

From the temperature chart for this room, it is evident that the temperatures behind the monitored painting and in the room are equal. The weekly humidity chart shows two peaks on Monday, which are related to mopping of the floor. The mopping was interrupted by the cleaning staff's usual break for breakfast and resumed thereafter. Behind the painting the humidity peaks are moderated. The humidity chart is otherwise strikingly flat and regular. Enlargement of the humidity chart (daily chart for Monday with expanded humidity scale) shows more clearly the very small fluctuation bands (Figs. 14-17). Since the sensors can only detect RH variations of greater than 2%, fluctuation bands of 2% or less are not quantitatively meaningful.[7]

These charts are typical for all exhibition rooms, whether they are located in the Art Hall, the Gallery Building, or on the south, north, east, or west sides of the buildings. A mechanical thermohygrograph records no peaks under these conditions (Fig. 18).

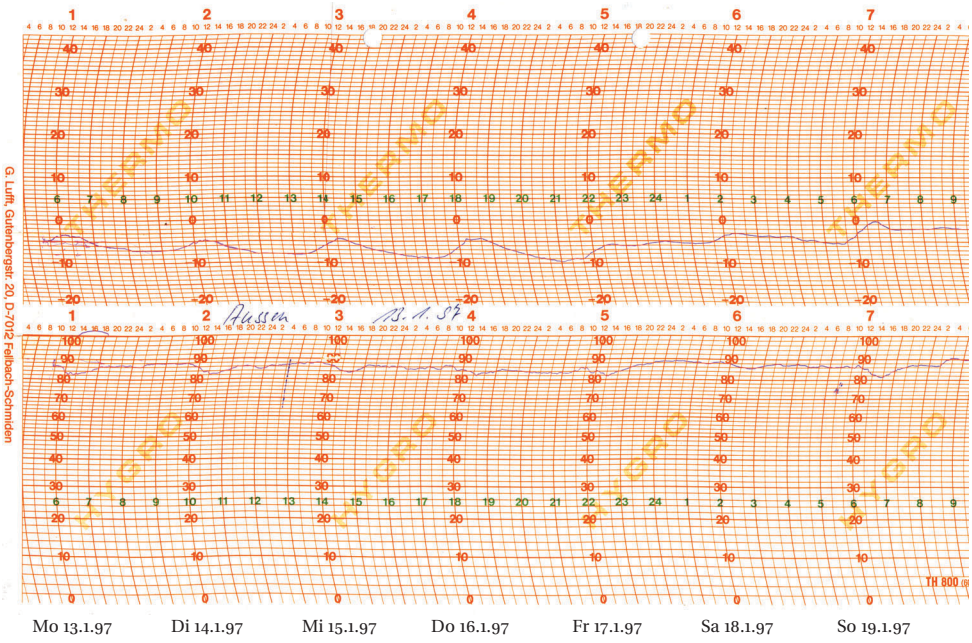
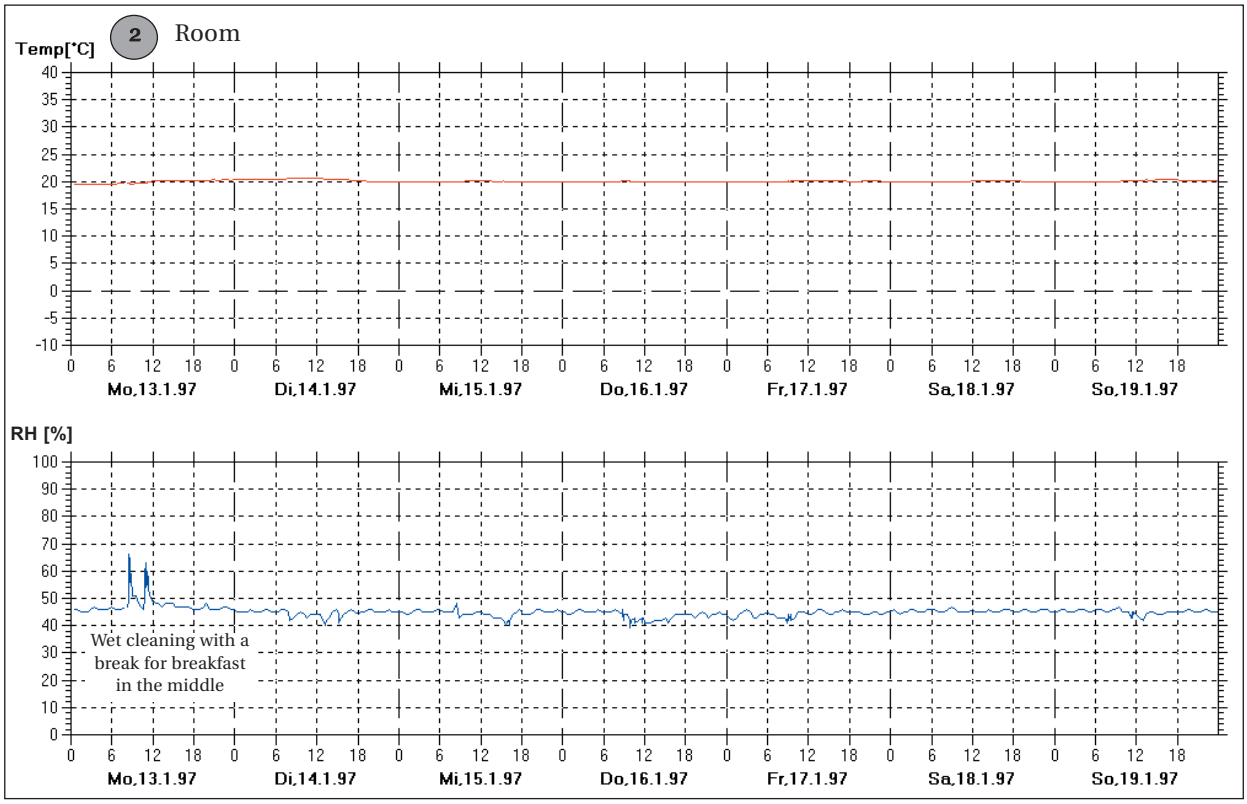
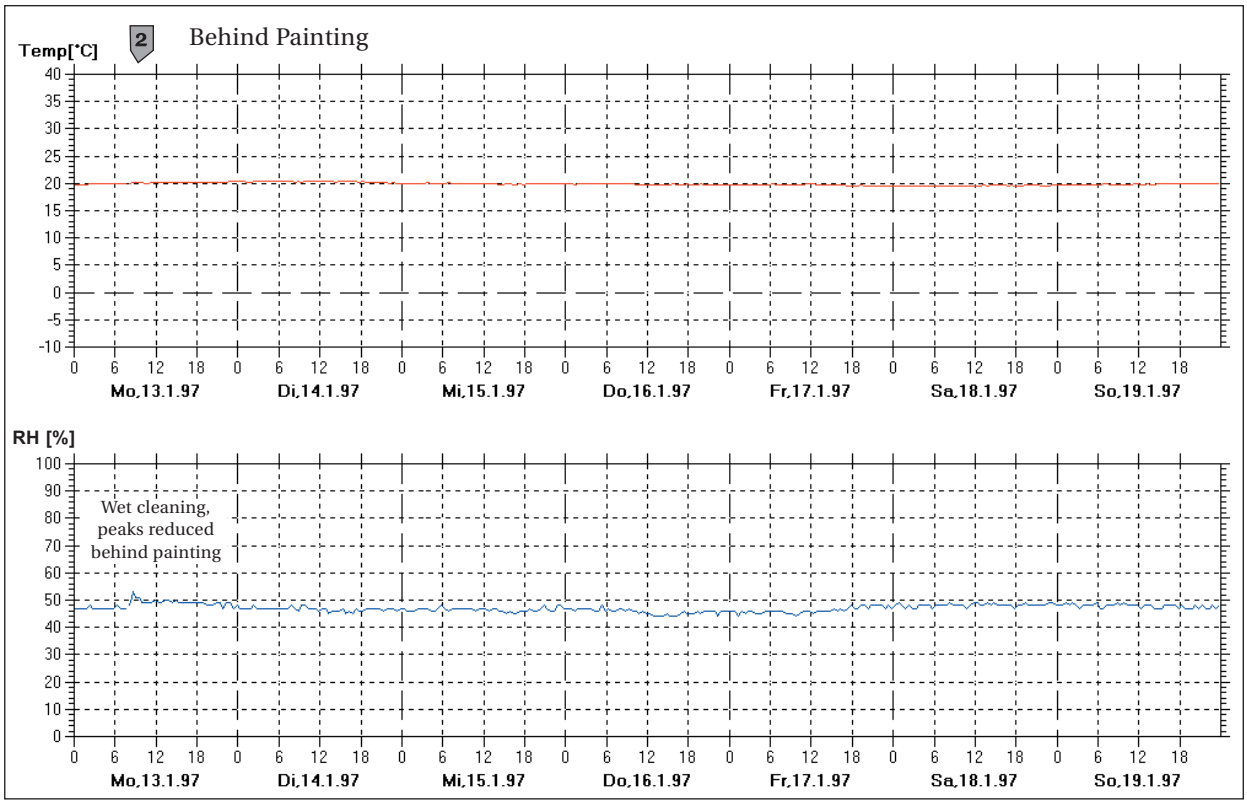


Figure 13:
The weekly outdoor temperature variation must be presented as a chart from a mechanical thermohygrograph because, in the week discussed, the data logger for outdoor temperature and humidity did not work correctly (see also annex: difficulties during the measurement campaign). The minimum and maximum temperatures are reliable and were checked by additional measurment by hand.

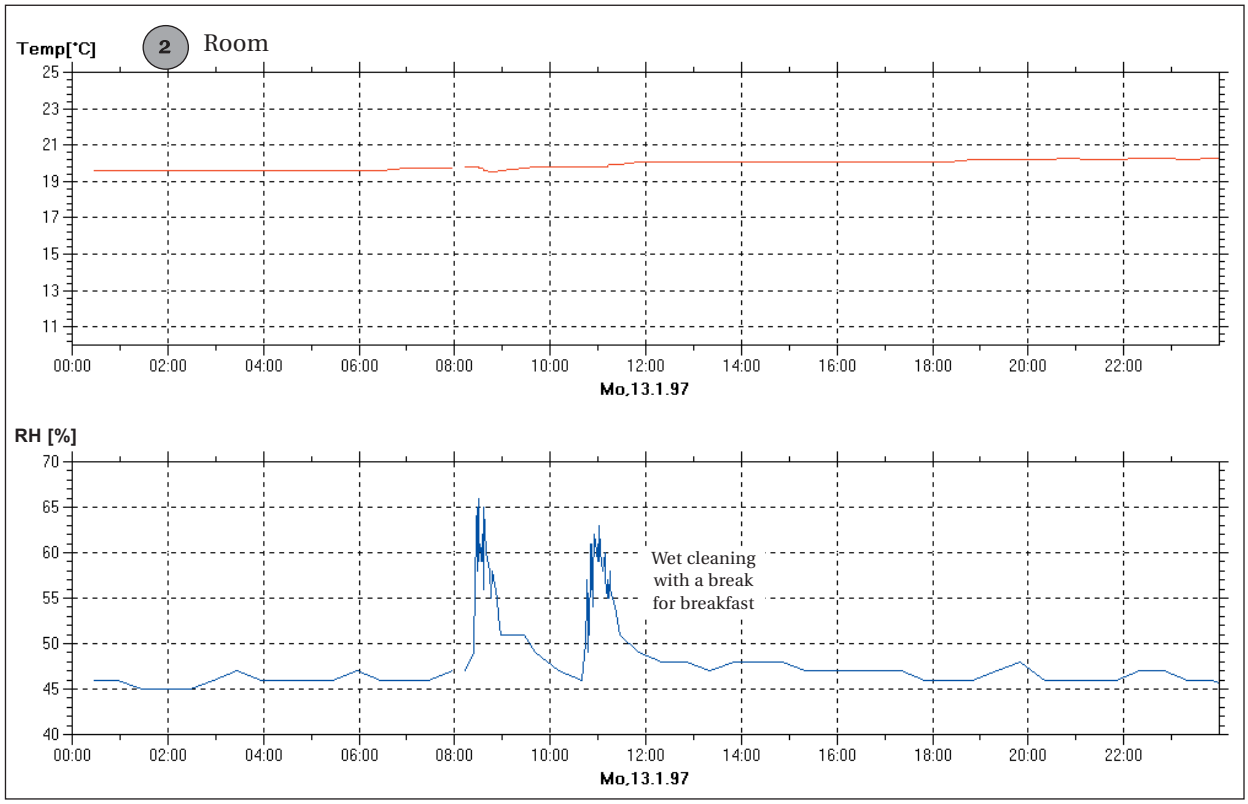
6 A description of the measuring instruments and devices used in the Kunstforum Ostdeutsche Galerie is given in the annex; also an overview on difficulties with the measurement campaign are given in Holmberg's Report No. 8 from Swedish Partner, Evaluation of Uncertainties in the EU 1383 Measuring Campaigns, Years 1996 – 1998, page 10:
"The estimation is that temperature measurements in the EUREKA EU 1383 PREVENT project have been made with an uncertainty of less than ±1°C with 95% confidence and that RH measurements have been made with an uncertainty of less than ±8% with 95% confidence."
Readers who are not familiar with the difficulties in measuring air humidity must work in the field to be able to understand this statement and the high quality of the measurements. A first reading is, for example, Holmberg, EU 1383 PREVENT, Report No. 1 from Swedish Partners, Relative Humidity, RH, in Historic Houses, Museums and Museum Storage Rooms, a Literature Study, Vienna, Stockholm 1995, Chapter 5, Measuring RH, and, Chapter 6, Measurement Errors.

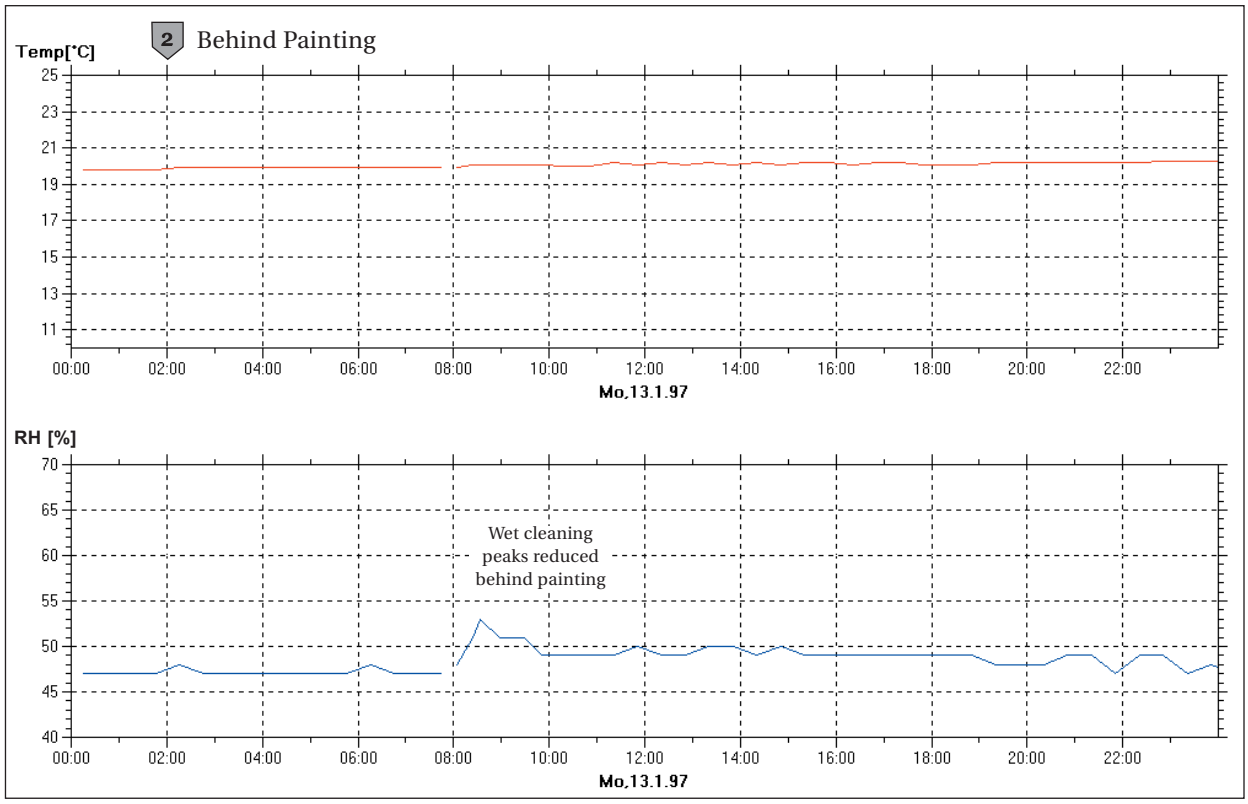
7 The control devices or hygrostats of air conditioning plants work with electronic sensors. Common electronic sensors can, in the best case, record humidity variations with an accuracy of 2% RH. Therefore fluctuation bands for RH are given with a specification of ±3–5% RH, also in the official technical rules for air conditioning plants. There is thus a level of uncertainty in creating an indoor climate, and a corresponding level of uncertainty when checking it. Mechanical thermohygrographs have an accuracy of ±5% RH, but more realistically ±10% RH.





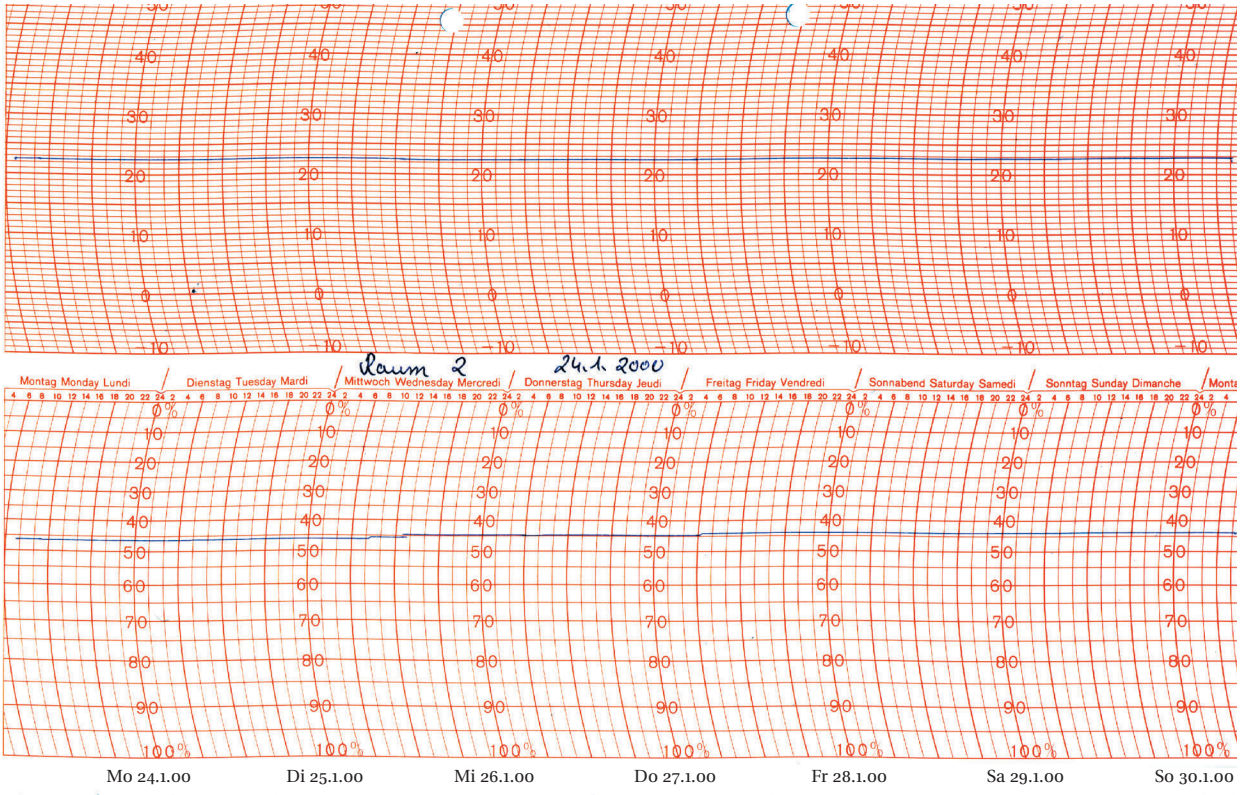
Figures 14–15:
Temperature and humidity charts for Room 2. The room humidity and temperature sensors are mounted only 35 cm above the wet floor and show a big change on Monday during wet cleaning. The cleaning personnel normally take a breakfast break in the middle of their work.





Figures 16-17:
Temperature and humidity charts for Room 2, enlarged scale.

Figure 18:
Temperature and humidity charts for Room 2, recorded under the same conditions with a mechanical Thermohygrograph (max. outdoor Temperatures this week -10 °C)



4.2. Room 8, Gallery Building

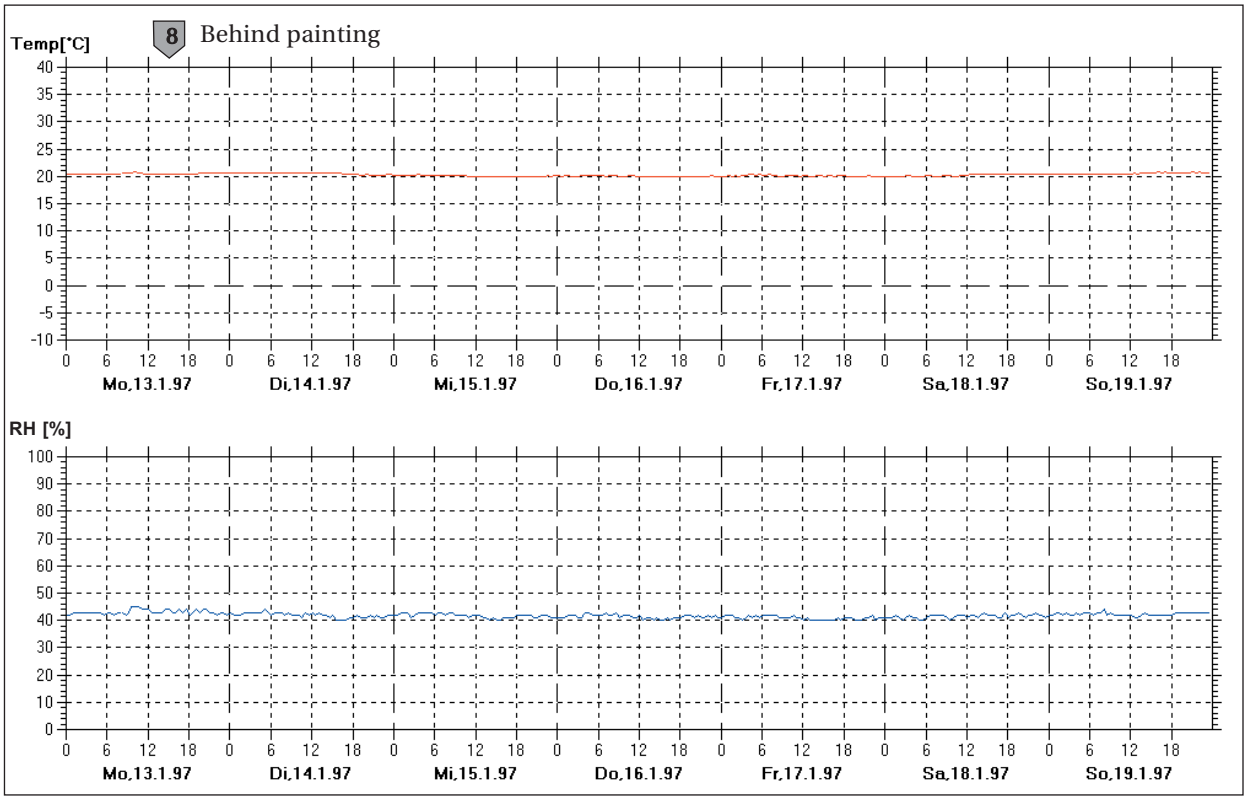
This example charts the temperature and humidity for a northern wall on the ground floor of the Gallery Building.

Regulation of the wall heating occured through the following mechanisms: First, a preliminary setting of the flow restrictors in the return lines of the tempering loops was established in a test run following renovation of the building. The heating loops are grouped according to their solar orientation (N, S, E, or W) and the wall construction of the rooms they serve. In case of the Art Hall, there is a 50-cm thick brick wall; the Gallery Building has a skeleton of reinforced concrete with brick filling (24 cm thick) and exterior insulation behind a 3-cm stone shell. The preliminary settings of the flow restrictors were adjusted with the help of temperature measurements at the wall surface.

The second mechanism is automatic regulation of the supply water temperature through a digital data control system. The supply temperature is continuously determined by floor, rather than by building (i.e., it is the same for the same floors in both the Art Hall and the Gallery Building), according to a graph, which depends on the outside temperature (outside sensor on the north wall).[8]

Using the method described above, uniform wall temperatures are achieved to a great extent (see Figs. 19-20 and, also, the manually-recorded data, Fig. 27).

8 In the storerooms in the basement of the Gallery Building, a different solution was installed, which will be described later.



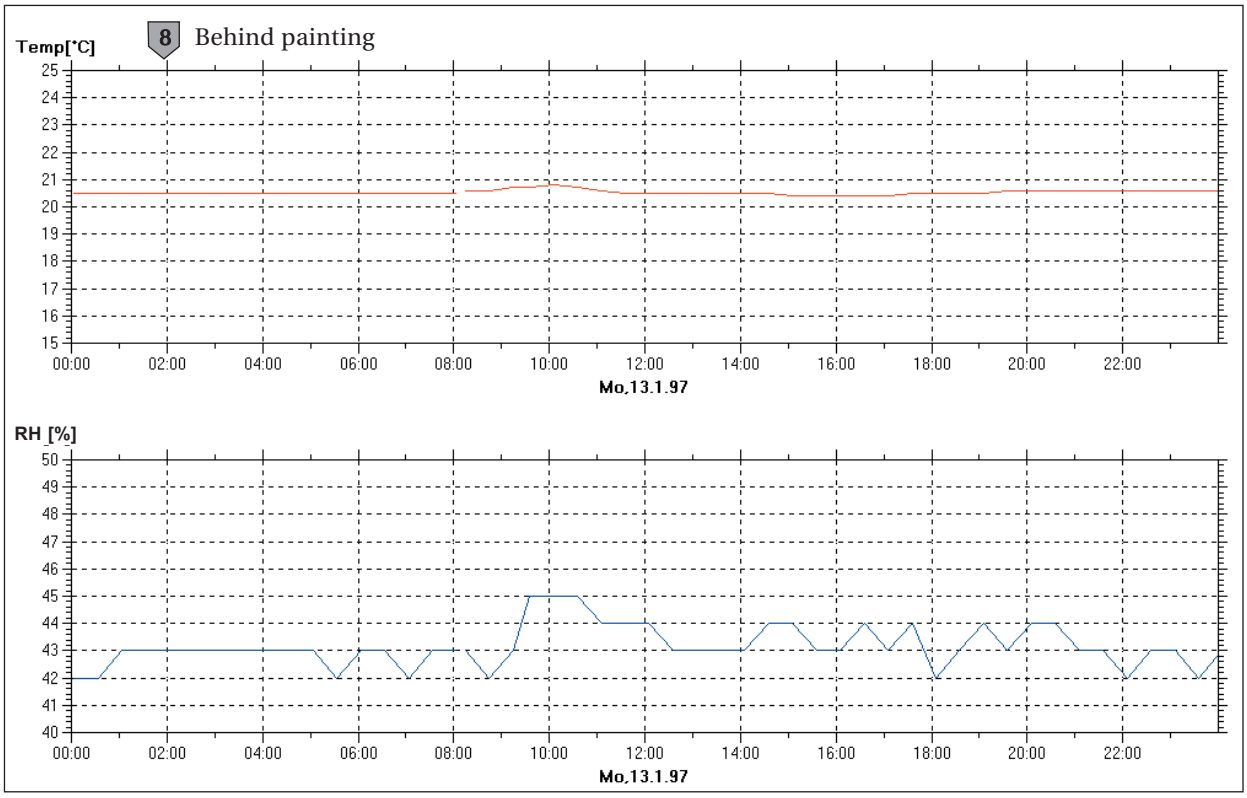


Figure 19-20:
Temperature and humidity charts for the north wall of Room 8, normal and enlarged scales.

4.3. Room 10, Art Hall

The temperature in Room 10 was too low before the week under discussion, although the temperatures in the other rooms were satisfactory. This was corrected by opening wider the flow restriction valve in the return line of the tempering loop serving it. On Monday morning (13.01.1997) we discovered, by feel and not by measurement, that the temperature was still rising and we reduced the opening of the valve, again by feel, but too much. There is no entry for the wall temperature in the manually-recorded data sheet for Room 10 (see Fig. 27).

The charts reflect the decline of the temperature after the throttling of the valve, overlayed by additional disturbances: Room 10 had a wall paper-camouflaged connecting door to the technical rooms of the Graphics wing, which normally was always closed. Several days in a row, however, this door was opened and left open because of technical work (transport). Colder, overly dry air flowed into the room during these times. (There is a door from the technical rooms to the outside leading to the parking lot, this door was open too several times.) When-ever the door was closed, the measured values stabilized again. On Monday, a peak of the humidity curve can be noticed during the time the door was open, which again was caused by mopping (room cleaning service). The same humidity fluctuations were measured behind the painting, but attenuated (Figs. 21–24).

At first the results of the measurements were used to attempt to change the behavior of users, by making them aware of the problem: that although using the door (for transporting things, etc.) actually took only a few minutes, often the door was left open considerably longer — sometimes for hours (it was not equipped with a self-closing mechanism). Attempts to explain the problem and make the complete staff sensitive to it did not result in lasting success. (Air conditioning as harassment of the conservator). Since then the wallpaper-covered door has been replaced by a self-closing glass door of the type which, elsewhere in the building (e.g. air lock entry at the main entrance, main and emergency staircases, passages from the Art Hall to the Gallery Building), sufficiently close off the exhibition halls from areas that are not climate stabilized.

4.4. Rooms 15 and 24, Art Hall

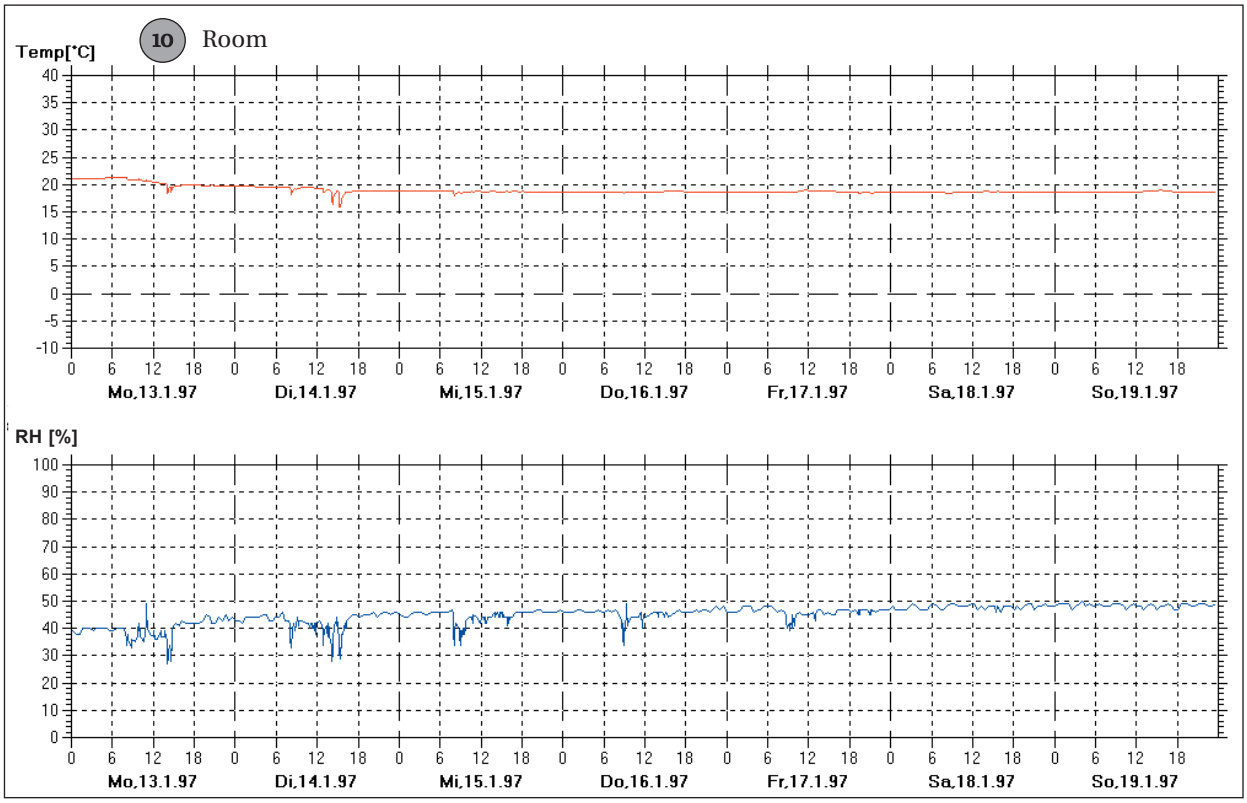
In both rooms there are lower temperatures than in the other exhibition rooms (see manually recorded data sheet, Fig. 27). Only in these two exhibition rooms is the ceiling formed directly by the roof. The special tempering design chosen for both rooms makes compromises and its effect was limited, which is mentioned here but will not be discussed further. The walls and ceiling were not as optimally heated as they should be. During the summer of 1997, a limited amount of work on improving the condition was performed successfully.

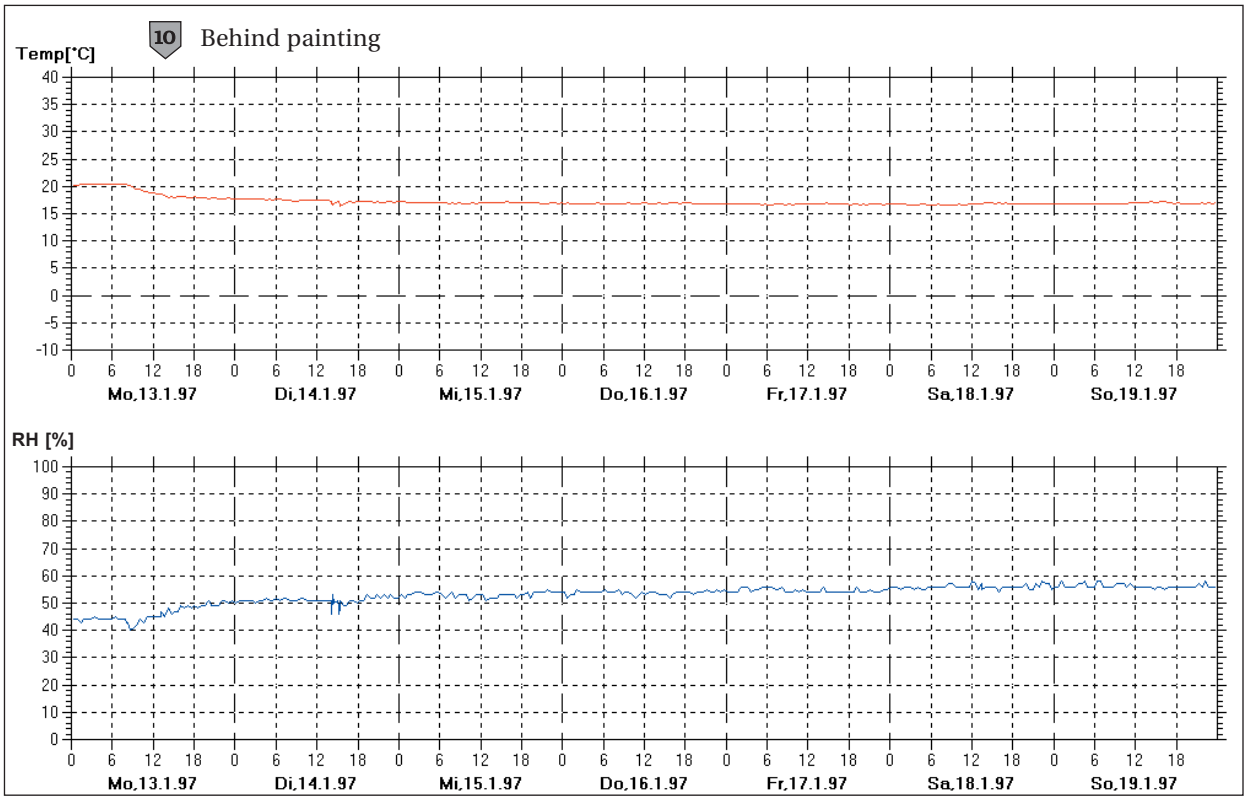
4.5 Storerooms, Gallery Building

The storerooms for unexhibited paintings and sculptures are in the basement of the Gallery Building (the Art Hall does not have a basement). A chart for Storeroom 1 is shown as a typical example (Figs. 25–26).

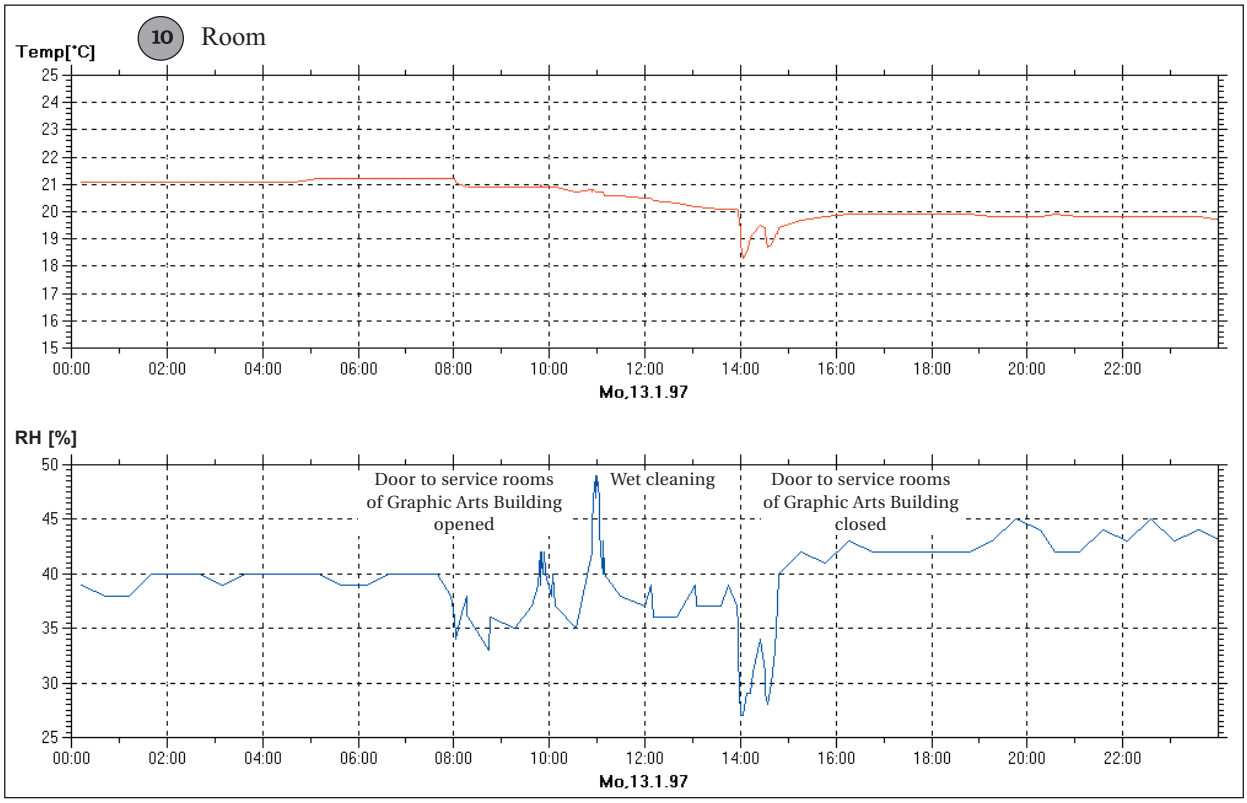
As part of supplementary building modifications in Summer/Fall 1997, tempering loops were added to the baseboard areas of the inside walls, in addition to the existing closed wall shells at the outer walls, in order to reduce dampness due to moisture rising from the soil. At this time the control of the tempering loops in the storerooms had to be changed. Now, as opposed to the ground and upper floors, the control is not performed by the DDC-System, but rather with simple and inexpensive mechanical thermostat valves in the storerooms at the end of the heating loops, which open and close according to the respective water return-line temperature.[9]

9 Such mechanical thermostatic valves also exist in combination with a sensor for the return line temperature and can replace motor driven valves, which are regulated by electronic sensors in the room. In nearly all cases, regulation without a DDC system, with only thermostatic valves and pre-regulation of the supply line temperature based on an outside sensor, is the cheapest and simplest way. The valves are easy for staff or housekeepers to handle, as opposed to a DDC system.





Figures 21–22:
Temperature and humidity charts for Room 10: The peaks for five days come from opening of the door to the service rooms of the Graphic Arts Building (technical tasks, transport), which have lower humidity and temperature and have an exchange with outdoor air (open door to the parking lot). At the beginning of the week, in error, we reduced the wall heating too much (no measurement "by hand," see Fig. 27).



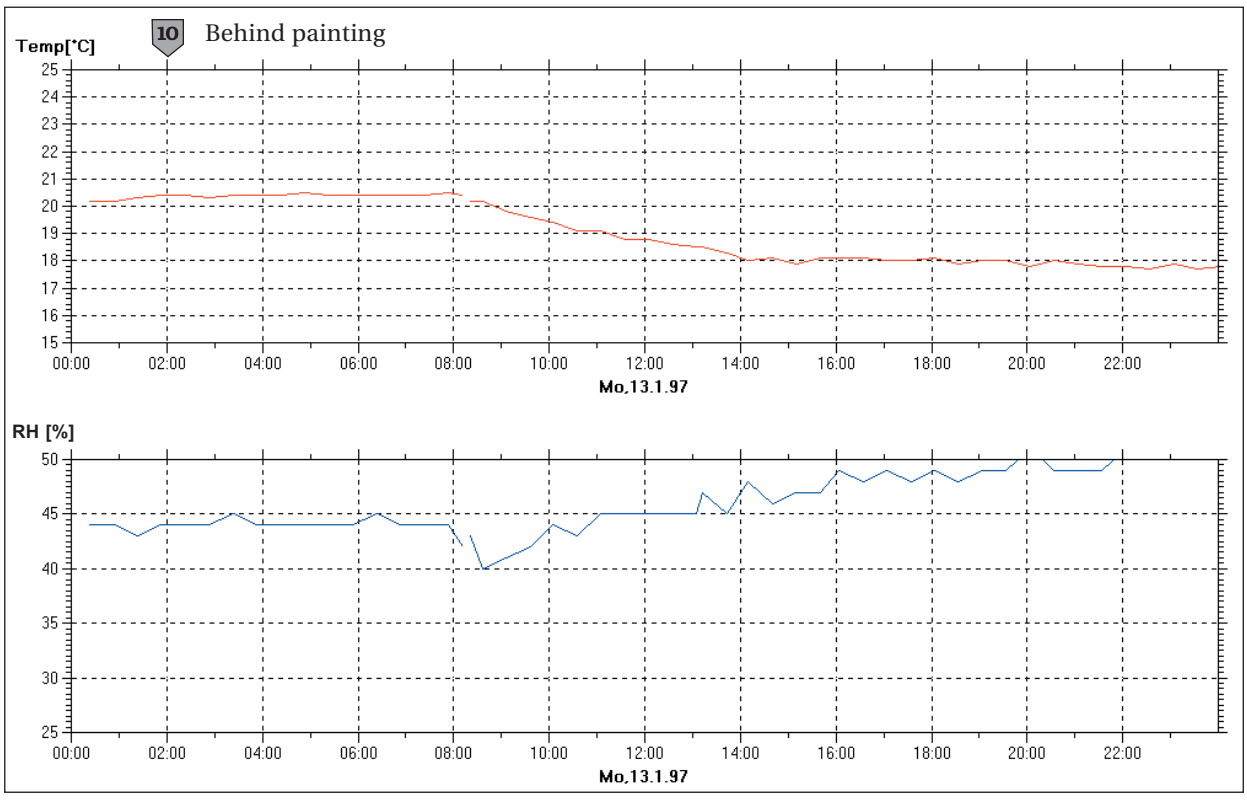
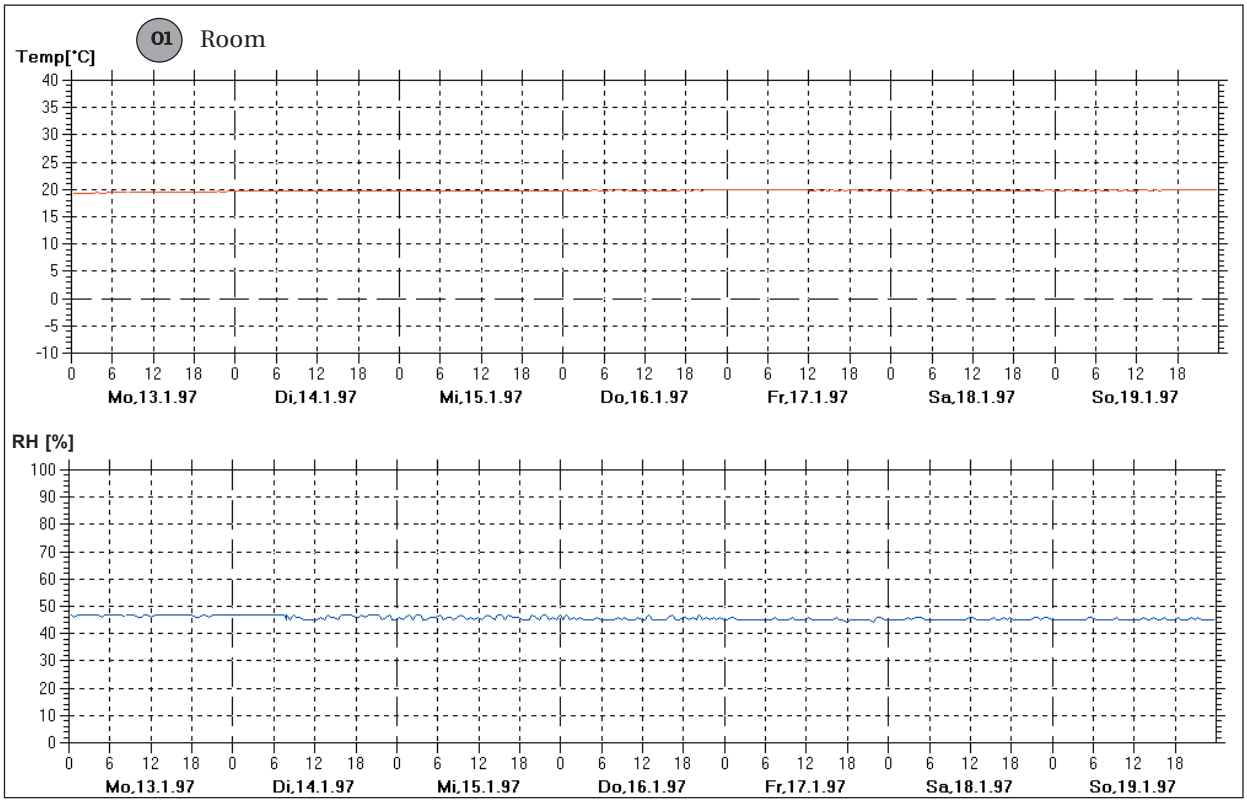
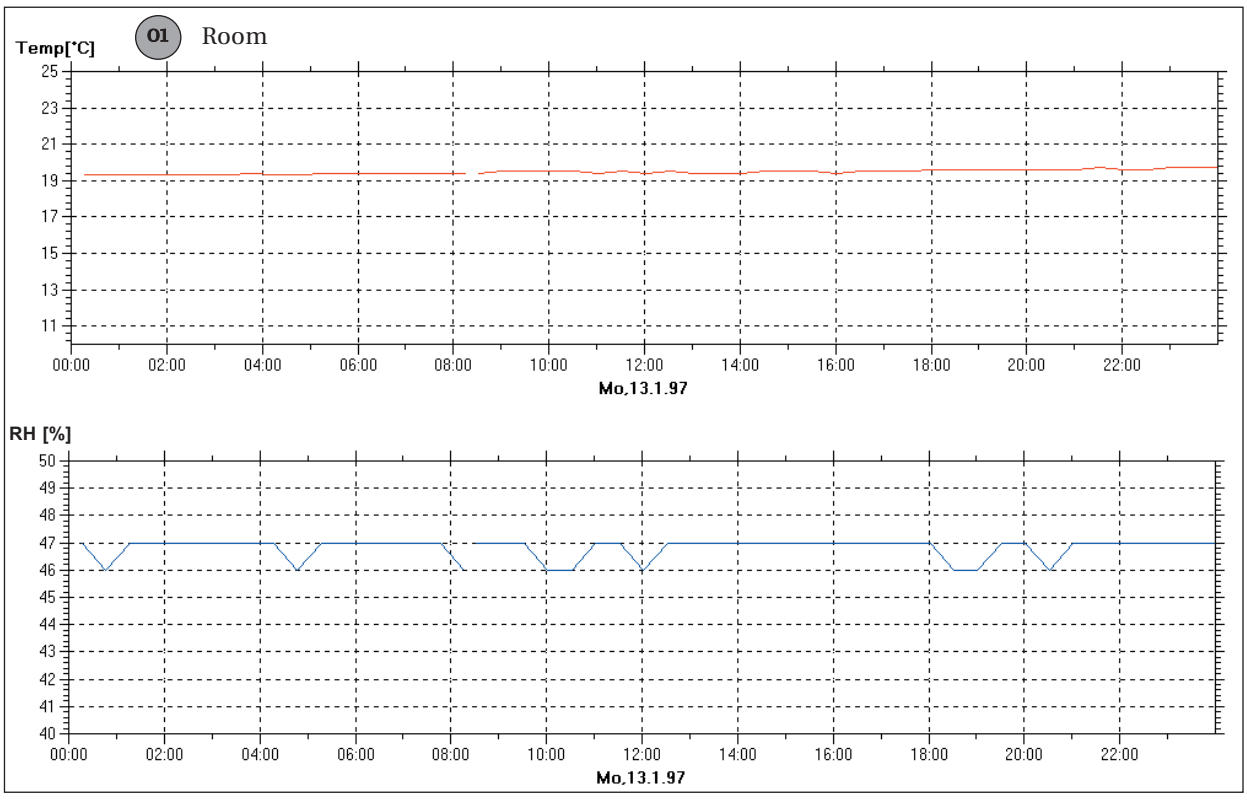


Figure 23–24:
Temperature and humidity charts for Rsoom 10, enlarged scale. Peaks reduced behaind painting.





Figures 25–26:
Temperature and humidity charts for Storeroom 01, normal scale and enlarged scale.

4.6 Manually-Entered Data Sheet

During his rounds, the building housekeeper routinely records (independently of the measuring records of the PREVENT measuring system) all the room air values and the surface temperatures of the outside walls. For that purpose appropriate hand-held instruments are available to him, in order to get information at the particular spot. The manually-entered data sheet quickly gives an overview of the measured values in the exhibition rooms (Fig. 27).

5. Additional Observations

The room climate during the summer was, as expected, not satisfactory. We reached indoor temperaures of 31 °C. This proved that planned, but for financial reasons not installed, sun protection was absolutely necessary. This was added in Fall 1997 as part of the PREVENT Project (Figs. 31–36). Since then as a rule the temperatures in summer do not exceeded 24 °C. Only on a few weeks of the year do we reach a maximimum of 26 °C. During the very hot summer of 2003 (outside temperature >35 °C for a long time) we reached 27.4 °C in one room on the upper floor for a few days.

6. Conclusions

Tempering shows the desired effects. Indoor climate is very stable and homogeneous. The cold wall problem is solved.

There are no short-time fluctuations. Variations from day to day are within preservational borders. The velocity of changes is reduced. Therefore any change in the water content of materials is also slow. Indoor fluctuations (caused by seasonal variations) occur very slowly. Under these cicumstances we do not aim at climate stability in the sense of 18–20 °C and 50–55% RH over the year.[10] The humidity level is deliberately kept around 45% RH in winter and never exceeds 60% in summer.

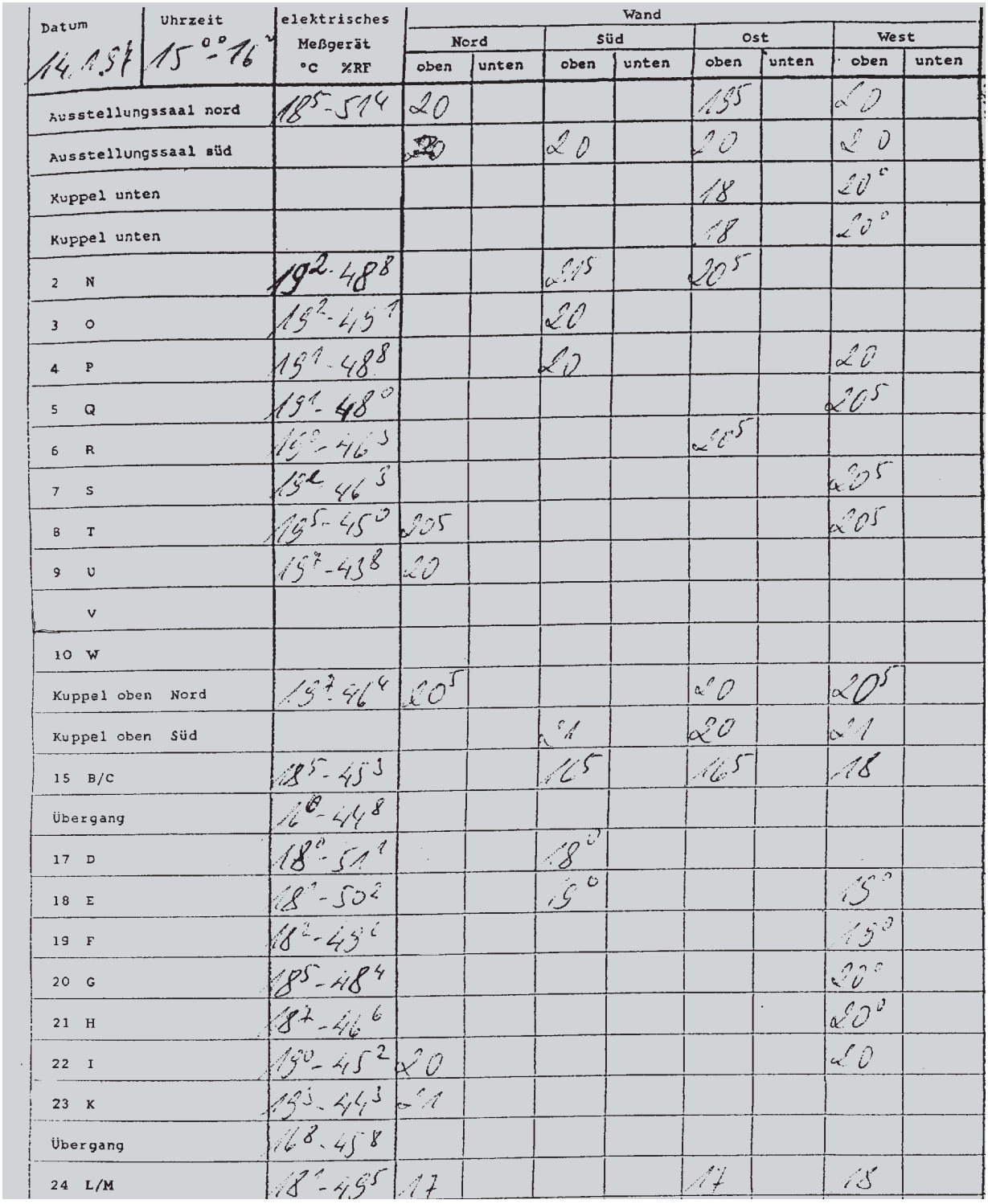
Since the renovation, it is also possible to maintain RH values around 55% in winter with 0.6 air exchanges per hour (an appropriate test run was carried out), however, this is not necessary for conservational reasons.[11]

Under unfavorable conditions, too high an air exchange rate causes dynamic pulsed loading conditions, which can be seen in regulation changes on the charts. An air change rate of once per hour has proved to still be unnecessarily high in our case. In Fall 1997 therefore, we changed to three-level operation. Since then one can choose to operate with about 0.3 , 0.6, or 1.0 air exchanges per hour. In winter 0.6 air exchanges per hour is sufficient to reach the humidity levels shown on the charts. Part of this result, of course, is the lower air pressure, because our ventilation plant does not heat air for heating purposes. The circulated air is thus not overheated, often cooler than the room temperature, and so the humidity losses through joints are lower (exfiltration).[11]

The amount of heating energy consumed was not measured. However, the following qualitative statement can be made: Even with higher comfort levels (the exhibition rooms could not be heated adequately before the renovation), the total amount of heating energy consumed was reduced; we use less gas since the renovation. Part of this results, of course, from the fact that the amount of artificial lighting in the exhibition rooms and the heat storage capability of the buildings was increased.

10 See Kotterer, article on Standard Climate Values for Museums, elsewhere in this publication.

11 On peak days during the Janosch exhibition in January 1998, we easily handled 2000 visitors between 10 a.m. and 4 p.m. with 0.6 air exchanges per hour. Combined, the Gallery Building and Art Hall have a volume of about 10,000 m3. In addition to upgrading to three-speed operation, the ability to change the distribution of air flow in the ventilation duct network was added. Now the total ventilating air volume, which normally is evenly distributed to all exhibition rooms, can be directed to the big, central exhibition hall of the Gallery Building for exhibition openings, especially in summer. Thus, temporarily, multiple air exchanges per hour can be achieved. Naturally, most visitors gather there during openings and the ventilation ducts of other exhibition rooms can be shut off for this short period of time. In summer, we use the cooler outdoor temperatures at night to ventilate. During the day, the ventilation is reduced or switched off, whenever possible, to avoid heating the room air. Because the ventilation motor's waste-heat heats up the air stream, a design with the motor outside the air stream and outside the central unit would be better.



Datum	Uhrzeit	elektrisches Meßgerät	Wand							
			Nord		Süd		Ost		West	
14.1.97	15°-16°	°C %RF	oben	unten	oben	unten	oben	unten	oben	unten
Ausstellungssaal nord		18.5-51.4	20				19.5		20	
Ausstellungssaal süd			20		20		20		20	
Kuppel unten							18		20°	
Kuppel unten							18		20°	
2 N		19.2-48.8			20.5		20.5			
3 O		19.2-49.1			20					
4 P		19.1-48.8			20				20	
5 Q		19.1-48.0							20.5	
6 R		19.2-46.3					20.5			
7 S		19.2-46.3							20.5	
8 T		19.5-45.0	20.5						20.5	
9 U		19.1-43.8	20							
V										
10 W										
Kuppel oben Nord		19.1-46.4	20.5				20		20.5	
Kuppel oben Süd					20.1		20		20.1	
15 B/C		18.5-45.3			18.5		18.5		18	
Übergang		18.0-44.8								
17 D		18.0-51.1			18.0					
18 E		18.1-50.2			19.0				19.0	
19 F		18.2-49.6							19.0	
20 G		18.5-48.4							20.0	
21 H		18.2-46.6							20.0	
22 I		19.0-45.2	20						20	
23 K		19.3-44.3	20.1							
Übergang		18.8-45.8								
24 L/M		18.1-49.5	17				17		18	

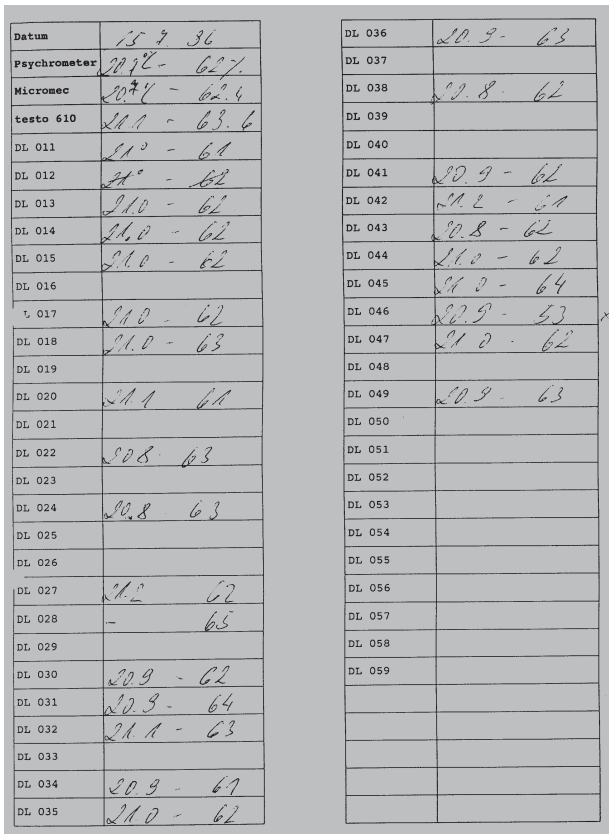
Figure 27:
Manually-Entered Data Sheet .
The room numbers are the same as the room numbers of the data loggers. "Elektrisches Meßgerät" means the temperature and relative humidity of the room air were measured with the "Testo 610" (s. Annex). "Wand oben" means the surface temperature of the outer wall at a height of nearly 1.40 m, measured with an infrared thermometer "ILM Therm." The "Übergänge" are separated from the collection rooms by glass doors and are not part of the exhibition area, they are slightly cooler. Rooms 15 and 24 are also cooler for the reasons discussed above (see 4.4.). "Kuppel" means the cupola topped entrance hall, whose lower level has large windows on the east side (their wall: 18°C). During his weekly rounds, the building house-keeper routinely checks all values for control purposes. The manually-entered data sheet quickly gives an overview of the measured values in the exhibition rooms. The accuracy indeed can not reach the quality of the mounted dataloggers in the rooms, but is sufficient enough to detect technical defects or deviations from the DDC system. The outdoor temperature this day was -5 to -8°C.

Annex:

Measurement instruments

For the actual measurements, SEL-LOG 30S data loggers with air temperature and humidity sensors were used, which were developed and built by the firm Meßtechnik Neher, Nürnberg, and which were loaned to us for these measurements by the Bavarian Museum Service (Landesstelle für die nichstaatlichen Museen, München).

With these data loggers, the time interval between measurements can be programmed for between 10 seconds and 30 minutes. In our case, every ten seconds a measurement was taken, because we wanted to obtain the most accurate possible record of events. However, in order to save memory, the data loggers are designed to record a measurement value only if the value has changed by more than a specified amount. If the current measurement value shows no change when compared to the previous value, then the data logger records a new value only every 30 minutes (for quality control purposes). Thus the data logger does not record a long series of constant values, for which only the time has changed, but rather only the time and value at which measured values change. Thus, for slowly changing measurement values, with this selective but at the same time dynamic method of operation, very high resolution long-term measurements can be made with reasonable memory requirements.



Datum	15.7.96	DL 036	20.9 - 63
Psychrometer	20.2 - 62.7	DL 037	
Micromec	20.4 - 62.4	DL 038	21.8 62
testo 610	21.1 - 63.6	DL 039	
DL 011	21° - 61	DL 040	
DL 012	21° - 62	DL 041	20.9 - 62
DL 013	21.0 - 62	DL 042	21.2 - 61
DL 014	21.0 - 62	DL 043	20.8 - 62
DL 015	21.0 - 62	DL 044	21.0 - 62
DL 016		DL 045	21.0 - 64
DL 017	21.0 - 62	DL 046	20.9 - 63
DL 018	21.0 - 63	DL 047	21.0 - 62
DL 019		DL 048	
DL 020	21.1 61	DL 049	20.9 - 63
DL 021		DL 050	
DL 022	20.8 - 63	DL 051	
DL 023		DL 052	
DL 024	20.8 63	DL 053	
DL 025		DL 054	
DL 026		DL 055	
DL 027	21.2 62	DL 056	
DL 028	- 65	DL 057	
DL 029		DL 058	
DL 030	20.9 - 62	DL 059	
DL 031	20.3 - 64		
DL 032	21.1 - 63		
DL 033			
DL 034	20.9 - 61		
DL 035	21.0 - 62		

Figures 28–29:
We regularly compared the measurements of the dataloggers and our two other electronic measurement instruments with an Assmann psychrometer. An original comparison check sheet summarizes one such comparison. Our SEL-LOG 30 S dataloggers can measure changes in temperature from 0.5 °C and relative humidity from 2%. We only allow differences of ±1°C and ±2% RH, compared to the Assmann psychrometer. The control measurments with the Assmann psychrometer were always carried out by the same person (housekeeper and museum technician Josef Passauer) to have the same deviation due to handling of the instrument. Photo author.

The Pt-100 sensors can resolve a temperature change of 0.5°C. The output voltage signal of the capacitive relative humidity sensors (Model IH-3602-L, HyCal, USA) varies by 3 volts for 0–100% relative humidity and, according to the data sheet of the manufactorer, at 50% RH deviates by only ±1% over 5 years (?). The humidity sensors can resolve a relative humidity change of 2% and have accuracy of ±2%

The data loggers are equipped with an RS 232 interface. With a PC and the Windows program Smartgraph (Weiland-Maierhofer GmbH, Velden, Germany) the stored data can be read from the magnetic cards of the data loggers and continuously stored on discs and administered. Smartgraph can graph the data with various formats, according to ones purpose, and print these out on a printer.

Although, according to the manufacturers specifications, the sensors have good long-term stability, approximately every six months all instruments were gathered together in one room and checked against an Assmann psychrometer (Dosch, Berlin). Data loggers whose displayed values deviated by more than ±0.5°C and ±2% RH from the psychrometrically measured values were recalibrated. These quality control measurements were documented by instrument number, displayed value, etc., in a measurement log. They were always carried out by the same person so as to have almost the same deviation in the psychrometer control measurment due to handling of the instrument (Figs. 28–29).

For additional measurements of air temperature and relative humidity "by hand" two separate instruments were used together. One, a Testo 610 (Testo GmbH, Lenzkirch, Germany), has measurement ranges of -20 °C – +70 °C and 0 – 100%RH, and system accuracies of ±0.4 °C (-20 – 0 °C), ±0.2 °C (0 – +70 °C), and ±2% RH (2 – 98% RH). The other, a Mikromec data logger with a Rotronic SA-100 hygrometer (Rotronic AG, Bassersdorf, Switzerland), has measurement ranges of -20 – +50 °C and 0 – 95% RH and accuracies of ±0.5 °C and ±1% RH. These instruments were also checked every six months and calibrated, if needed.

Finally an infrared thermometer (ILMtherm 600, Neher, Nürnberg) was used for measuring the surface temperature of walls, paintings, frames, and so on without touching them. This instrument's accuracy is given as ±2 °C, when the emissivity of the measured object is 0.95, and ±1°C, for a limited measurement range of 0 – 50 °C.

Problems during the measurement campaign

During the measurement campaign it was not possible to operate the complete measurement system, with all the loggers, at the same time. At any given time individual instruments were unavailable for various reasons (e.g. repair, calibration, power supply etc.).

Over all, however, sufficient measurements and experience exist such that the data recorded by the operational data loggers can be correctly interpreted and a typical picture of the results of the measurements can be presented.

One difficulty with our measurements was due to the data loggers' power supplies. During the day the data loggers were powered from the electrical net and, for safety reasons, at night from built-in rechargeable batteries (at night electricity from the net is mostly shut off in the Museum). Some of the data loggers, however, were not plugged in continuously during the day, because there was no outlet in physical reach, and had to be connected to the outlets by means of an extension cord for a given amount of time during the day. This was forgotten in some cases.

A further problem was related to the data loggers' rechargeable batteries themselves. The data loggers were delivered in two groups. The first group, delivered in the Summer of 1995, consisted of 13 loggers which were used for measurements in the roof area of the gallery building, which are not discussed here. The second group was delivered late 1995 / early 1996. In September of 1996 the batteries of the first group started having operational problems (due to longer use), and had therefore to be removed from the measuring system. The problem

of the batteries is generally known (memory-effect due to incompletely charge or discharge). For various reasons, unfortunately, replacement of the batteries did not occur until after the end of the measuring campaign. Other PREVENT partners have also reported problems with operation of their measuring systems.[12]

Wall shells. Construction details.

12 See (6)

Construction details of our wall shells are given in Fig. 30. They are integrated with baseboard heaters in most places. They were designed in 1989. The current state of the art in tempering indeed no longer uses separate heated wall shells but rather heating pipe loops under the plaster in the baseboard area of a single monolithic wall. The renovation of the Kunstforum Ostdeutsche Galerie was done before this simplification of tempering by Großeschmidt.

German engineers often choose well-known baseboard convectors, instead of heating-pipe loops, because they fear the official calculations according to DIN 4108. Wall baseboard convectors, instead of heating tubes under plaster, have bad regulating performance. Heating is not linear with water temperature. (Beginning with foreline temperatures greater than 40 °C, they rapidly show higher output, because they are constructed as convectors and aim to heat masses of air . The result is dust transport by high velocity air streams. A third disadvantage occurs sometimes, a cracking noise, as a reaction to changes in dimension, when suddenly cooling down or heating up.

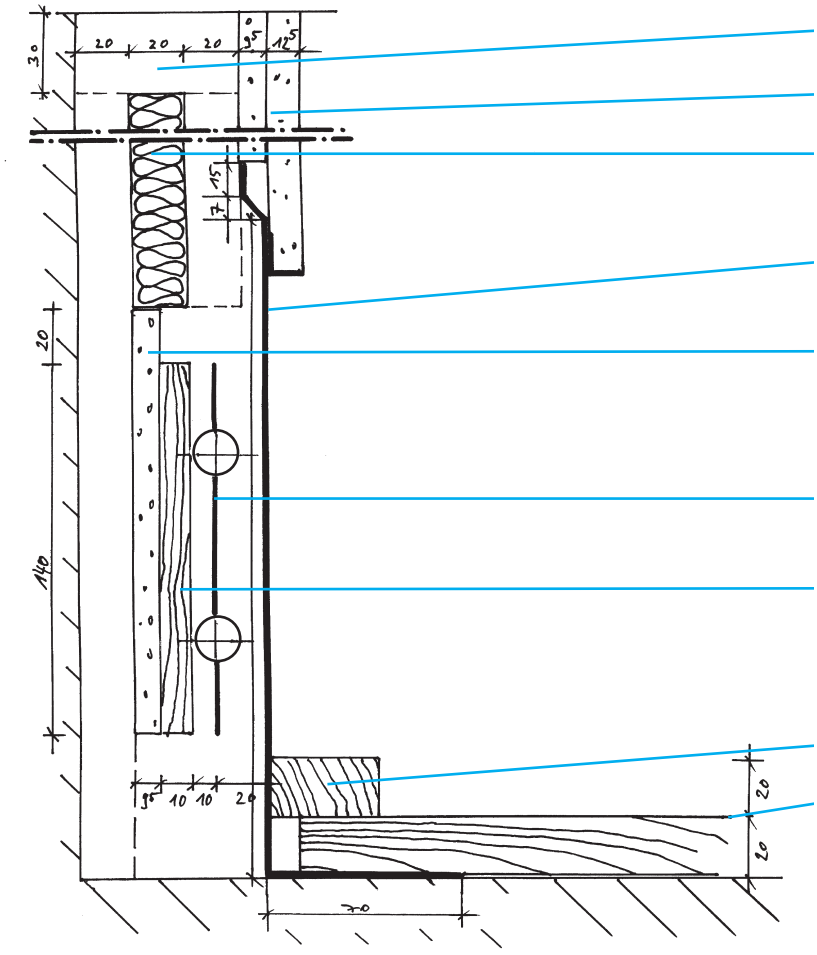


Figure 30:
Wall heating design used in the Kunstforum Ostdeutsche Galerie

External sun protection

External sun protection was applied in Fall 1997 to glass areas of the Art Hall roof, the glass-enclosed staircases and passageways between the Art Hall and the Gallery Building, glass areas of the Gallery Building roof and glass areas of the west facade of the Gallery Building (Figs. 31–36). The sun protection mixes fixed perforated metal sheet and automatic motorized roll-up blinds.

Thanks

Special thanks to housekeeper and museum technician Josef Passauer, who carried out most of the measurents during the measurement campaign in the Kunstforum Ostdeutsche Galerie.

Figures 31–36:
External sun protection: Gallery Building, view from southwest. / Kunsthalle and Gallery Building, view from southeast. / Connecting passageways and staircases between Gallery Building and Kunsthalle, view from south. / Roof of the main staircaise betwen Gallery Building and Kunsthalle, in the background roof of Gallery Building. / South front of the main staircase. / View from the main staircaise to outside. The outer sun protection is transparent from the inside, a tree and part of the roof of the Gallery Building can be seen through the sun protection. In the case of fabric roll shades, dark shades are better than light shades for transparency, because the eye is able to see the brighter environment behind the shade. A light shade is too shiny for the eye and makes it impossible to see the landscape.

Jochen Käferhaus

Kartause Mauerbach: Auf der Suche nach der schadenspräventiven Heizung für historische Gebäude. Vergleich von sechs unterschiedlichen Wärmeverteilsystemen und deren Auswirkungen auf die Räume

Abstract

Als vermeintlich „ideale“ Gelegenheit, die konservatorische Verträglichkeit konventioneller Heizsysteme im Vergleich mit der Temperierung (Bauteilheizung) durch Messungen zu untersuchen, bot sich die eh. Kartause Mauerbach bei Wien, mit ihren baugleichen und gleichorientierten Mönchszellen, die getrennt von einander entlang eines Verbindungsganges stehen. Seitens der Bundesbaudirektion Wien und des österreichischen Bundesdenkmalamtes wurde der Vorschlag aufgegriffen, diese Untersuchungen an verschiedenen Installationen in einigen Zellen innerhalb des EUREKA-Projekts 1383 PREVENT vorzunehmen.

Auf Grund der vielen durch Bauarbeiten und Komponentenausfall verursachten Meßprobleme und Betriebsunterbrechungen wurde die anfänglich auf zwei Jahre angelegte Messung auf eine dritte Heizperiode ausgedehnt. Es zeigte sich, daß eine Meßaufgabe dieses Ausmaßes über einen solch langen Zeitraum in einem Objekt, in dem gleichzeitig gebaut wird, nur schwer durchführbar ist. Durch Feuchte- und Staubeinwirkung fielen häufig heizungs-, meß-, regel- und EDV-technische Komponenten aus. Stromunterbrechungen setzten Pumpen, Regelung und zentrale Wärmebereitstellung immer wieder außer Kraft.

Daher entfiel für die Temperierung immer wieder die Voraussetzung dafür, ihre Effekte mit derart geringem Installationsaufwand zu erreichen sowie für die Energieeinsparung durch Bauteiltrocknung: die kontinuierliche Wärmezufuhr. Zwischenzeitlich erreichte Ergebnisse mußten mit neuem Energieeinsatz wieder aufgebaut werden. Zudem wiesen die Zellen beträchtliche Unterschiede in der Belastung durch Bodenfeuchte auf. Als sich abzeichnete, daß die Effekte der Temperierung, insbesondere ihre konservatorischen Vorteile, trotz der Schwierigkeiten nachweisbar waren, wurde entschieden, in anderen Bereichen der Kartause Temperieranlagen fest einzubauen. Gegen Ende des Projekts konnte eindrucksvoll nachgewiesen werden, daß ein richtig montiertes Temperierrohr (bei starker Feuchtebelastung des Wandsockels möglichst nahe der Boden-Wand-Ecke) die aufsteigende Feuchte wirksam stoppt.

Abb. 1:
Blick auf die Zellen des Ostraktes der Kartause Mauerbach. Foto Alfons Huber, Wien.

The Search for Damage-Preventing Heating for Historical Buildings: Comparison of Six Different Heat Transfer Systems in Monks Cells in the Cartusian Monastery in Mauerbach near Vienna

The Cartusian Monastery in Mauerbach near Vienna, with its separate but identically built and oriented monk's cells lying along a connecting passageway, presents an ideal opportunity to measure the difference in the conservational suitability of tempering (wall heating) systems compared to that of conventional heating systems. The Austrian Federal Building Directorate in Vienna and the Federal Office of Preservation approved this study being performed on various installations in several cells as part of the project EUREKA 1383 PREVENT.

Due to the many measurement problems caused by construction work and component failures, the originally two-year-long measurement period was extended through a third heating season. It was demonstrated that a measurement task of this magnitude over such a long time period in a building in which construction is occurring simultaneously is difficult to carry out. Heating, measurement, control and data acquisition components failed frequently due to the effects of moisture and dust. Power interruptions repeatedly made pumps, controls, and the central hot water supply unavailable.

Thus the basic requirement for tempering to be able to achieve its effects with this type of minimal installation, the continuous transfer of heat, was lakking and thus also the energy savings from drying out the walls. With each interruption, energy had to be stored in the walls again before the full effects could be achieved again. Additionally the cells had noticeably different problems with ground moisture. However, after it was shown that the effects of tempering, particularly its conservational advantages, could be demonstrated despite all of the problems, it was decided to permanently install tempering into other areas of the monastery. Near the end of the project it could be impressively proved that a properly mounted heating pipe (as close as possible to the wall–floor corner for heavily moisture-laden wall bases) effectively stops the rise of moisture in a wall.

Inhaltsübersicht

0 Vorweg
1 Zusammenfassung
2 Aufgabenstellung
2.1 Kriterien für die Bewertung der Heizsysteme
2.2 Bauliche Voraussetzungen und Wärmeerzeugung
2.3 Wärmeerzeugung
2.4 Stromversorgung
2.5 Hydraulische Schaltung für die Raumheizungen
2.6 Codierung der Fühler
2.7 Meßanordnung Außenklima
2.8 Aufbau der Meßanordnung in einem Raum
3 Ausgangssituation mit Lageplan
3.1 Technische Beschreibung der Wärmeverteilsysteme
3.2 Details zur Wandtemperierung
3.3 Die Versuchsanordnung
4 Meßanordnung
5 Probleme
6 Thermographieaufnahmen, Wärmeflußmessung
7 Meßdaten und Auswertung
8 Stellungnahme
9 Empfehlungen
10 Anlagen

Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abb. 1 Blick auf die Ost-Zellen der Kartause Mauerbach
Abb. 2.5.1 Standardschaltung des hydraulischen Kreises
Abb. 2.8.1 Standard-Meßanordnung (Raumquerschnitt)
Abb. 3.1.1 Lageplan
Abb. 3.1.2 Heizungsschema
Abb. 3.1.3 Heizungsverteiler der Temperierzelle
Abb. 3.1.4 Blick auf die Nordseite von Zelle 6 mit dem Außenklima-Fühler
Abb. 3.3.1 Blick in die Kachelofenzelle
Abb. 3.3.2 Blick in die Heizleistenzelle
Abb. 3.3.3 Blick in die Heizkörperzelle
Abb. 3.3.4 Blick in die Fancoil-Zelle
Abb. 3.3.5 Blick in die Temperierzelle
Abb. 3.3.6 Blick in die Hypokaustenzelle (Wandschale)
Abb. 3.3.7 Detail des Hypokaustensystems mit transparenter Acrylwand
Abb. 3.3.8 Erfassung der Holztafelbewegung
Abb. 4.1.1 Schaltbild des Datentransfers
Abb. 4.1.2 Fühleranordnung (Wandansicht)
Abb. 5.1.1 Zeitleiste der relevanten Ereignisse
Abb. 5.1.2 Detail der Temperierzelle (5/1) mit Anordnung der Sensoren
Abb. 6.1.1 Anordnung der Häuser 3-6
Abb. 6.1.2 Thermographie von Haus 3 (Kachelofen- und Heizleistenzelle)
Abb. 6.1.3 Thermographie von Haus 4 (Fancoil Heizkörper)
Abb. 6.1.5 Thermographie von Haus 5 (Temperierung und Wandschale)
Abb. 6.1.4 Fühleranordnung zur Wärmeflußmessung (Temperierzelle)
Abb. 6.1.5 Wärmefluß in der Rohrebene und 40 cm darüber
Abb. 7.1.1 Raumtemperaturen 01.02.-21.02.1997
Abb. 7.1.2 Raumtemperaturen 12.02.-15.02.1997
Abb. 7.1.3 Relative Raumluftfeuchten 01.02.-21.02.97
Abb. 7.1.4 Relative Raumluftfeuchten 12.02.-15.02.1997
Abb. 7.1.5 Temperatur der Außenwand-Innenseiten 12.02.-15.02.1997
Abb. 7.1.6 Temperatur der Außenwand-Außenseiten 12.02.-15.02.1997
Abb. 7.1.7 Temperatur in der Wandmitte 12.02.-15.02.1997
Abb. 7.1.8 Temperatur auf den Holztafeln 12.02.-15.02.1997
Abb. 7.1.9 Holzbewegung 12.02.-15.02.1997
Abb. 7.1.10 Außentemperatur und -luftfeuchte vom 12.02. – 28.02.1997
Abb. 7.1.11 Temperaturen in der Kachelofenzelle 20.02.-21.02.1997
Abb. 7.1.12 Temperaturen in der Heizleistenzelle 20.02.-21.02.1997
Abb. 7.1.13 Temperaturen in der Heizkörperzelle 20.02.-21.02.1997
Abb. 7.1.14 Temperaturen in der Fancoilzelle 20.02.-21.02.1997
Abb. 7.1.15 Temperaturen in der Temperierzelle 20.02.-21.02.1997
Abb. 7.1.16 Temperaturen in der Wandschalenzelle 20.02.-21.02.1997
Abb. 7.1.17 Außentemperatur und Raumtemperaturen 01.03.-27.03.1998
Abb. 7.1.18 Feuchte in den Zellen 01.03.-31.03.1998
Abb. 7.1.19 Temperaturen Außenwand innen 18.03.-22.03.1998
Abb. 7.1.20 Temperaturen in der Wand 18.03.-22.03.1998
Abb. 7.1.21 Temperaturen Außenwand außen 18.03.-22.03.1998
Abb. 7.1.22 Temperaturen der Holztafeln 18.03.-22.03.1998
Abb. 7.1.23 Zellentemperaturen 01.04.-01.05.1997
Abb. 7.1.24 Zellenfeuchten 01.04.-01.05.1997
Abb. 7.1.25 Zellentemperaturen 26.07.-29.07.1997
Abb. 7.1.26 Zellenfeuchten 26.07.-29.07.1997
Abb. 7.1.27 Temperatur Außenwand innen 26.07.-29.07.1997
Abb. 7.1.28 Temperatur in der Wand 26.07.-29.07.1997
Abb. 7.1.29 Temperatur Außenwand außen 26.07.-29.07.1997
Abb. 7.1.30 Temperatur Holztafeln 26.07.-29.07.1997
Abb. 7.1.31 Energieverbrauch

Tab. 2.6.1 Code für die Kabelbezeichnung
Tab. 2.7.1 Erfassung des Außenklimas
Tab. 2.8.1 Meßstellen für die Klimauntersuchung eines Raumes
Tab. 2.8.2 Ausgänge aus der Regel- und Steuereinheit
Tab. 2.8.3 Auflistung der Meßstellen für die Vorsatzschale
Tab. 4.1.1 Liste der Fühler
Tab. 5.1.1 Ereignisse im tabellarischen Überblick
Tab. 5.1.2 Messung der Bodenfeuchte in den Meßzellen

0 Vorweg:

Der ursprüngliche Titel des PREVENT-Projektes : "Vergleichende Untersuchungen von Heiz- und Klimasystemen in Museen und Schlössern" weist auf das wesentliche Forschungsziel hin: nämlich eine möglichst ideale, d. h. schadenspräventive Heiztechnik für historische Gebäude und Museen zu finden. Es ging also darum, durch Vergleich der im Bereich der Museen und der Denkmalpflege verwendeten Systeme zur Raumbeheizung jenes System zu finden, welches das geringste konservatorische Schadenspotential für das Raumklima und zugleich eine schadenspräventive Wirkung für Bausubstanz und Raumschale aufweist. Nach der bisherigen Literatur wurde diese Frage bislang nicht systematisch untersucht.

Aus konservatorischer Sicht besteht sowohl in der Denkmalpflege als auch im Museumsbereich ein Hauptproblem darin, daß auch heute noch vor ca. 100 Jahren entstandene Formen der Heizung und Befeuchtung bzw. vor mehr als 40 Jahren entstandene Formen der Klimatisierung als „Stand der Technik“ eingesetzt werden, obwohl sie immer wieder Schäden an Exponaten und oft auch an der Bausubstanz verursachen. Während der „unklimatisiert“ bewahrte Großteil der im privaten und öffentlichen Besitz befindlichen Kunstwerke die letzten 400 - 500 Jahre ohne schwerwiegende Klimaschäden überstanden hat, stellen die Restauratoren in den letzten Jahrzehnten mit ihrer intensiven Ausstellungstätigkeit und Kulturgutvermarktung zunehmend zum Teil gravierende Schäden an Objekten in Museen fest - „trotz“ des Einsatzes höchst komplexer haustechnischer Systeme.

Als Hauptursache für die in beheizten Räumen an Raumschale und Exponaten beobachteten Klimaschäden wird zunehmend die in der Heizperiode von den üblichen konvektiven Heizsystemen verursachte starke Erhöhung der Raumlufttemperatur angesehen, da diese die Raumluft als Heizmedium einsetzen. Daraus resultiert gerade dann, wenn die saisonale Wasserdampfmenge gering ist, nicht nur eine extrem geringe, sondern auch stark schwankende relative Raumluftfeuchte. Kunstgegenstände und Ausstattungen in ungeheizten Räumen, deren Klima durch schwere Bausubstanz gepuffert ist, überstehen dagegen Winterperioden meist schadensfrei. Diese Feststellungen müßten Fachleute zum Nachdenken anregen, liegt doch in ihnen ein möglicher Lösungsansatz für die Frage nach der optimalen, schadenspräventiven Haustechnik.

Als „ideale“ Gelegenheit zur meßtechnischen Untersuchung bot sich die ehemalige Kartause Mauerbauch bei Wien an. Seitens der Bundesbaudirektion Wien und des österreichischen Bundesdenkmalamtes wurde der Vorschlag aufgegriffen, in sechs Mönchszellen sechs verschiedene Heizsysteme zu installieren. Man beschloß, zunächst die bauphysikalische Eigendynamik der Zellen zu studieren und dann die Auswirkungen der unterschiedlichen Wärmeverteilsysteme miteinander zu vergleichen, wobei man davon ausging, daß die in Lage, geographischer Orientierung und Bausubstanz nahezu identischen Zellen gleiche bauphysikalische Bedingungen aufweisen, was sich später nicht bestätigte. In Haus 5 wurde eine wesentlich höhere Bodenfeuchte festgestellt, was sich im Verlauf des Projektes dennoch nicht als Nachteil herausstellte. Vielmehr traten die Vorteile des in Zelle 5/1 eingebauten Systems dadurch nur umso klarer hervor.

In der Folge wird der zu Beginn des Prevent-Projektes aufgestellte Fragenkatalog verkürzt wiedergegeben, um die Kernfrage vor Augen zu führen, nämlich

die Beurteilung der untersuchten Heizsysteme nach konservatorisch relevanten Gesichtspunkten:

1. Welches Heizsystem weist unter den vorgefundenen baulichen Gegebenheiten (nicht unterkellerter Ziegelbau ohne Feuchtesperren, Erdgeschoß unter nicht saniertem Dach) das geringste konservatorische Schadenspotential für das Raumklima auf (richtungsweisend für Museen)?
2. Welches Heizsystem schont unter den Gegebenheiten bei Einbau und Betrieb am meisten die Bausubstanz und die Raumschale (richtungsweisend für die Baudenkmalpflege)?
3. Welches Heizsystem hat unter den Gegebenheiten den geringsten Energiebedarf?
4. Lassen sich die Erkenntnisse auf andere Gebäudeformen und Bauweisen übertragen?
5. Lassen sich Schlußfolgerungen ableiten, um bei einem bereits bestehenden konservatorisch schädlichen Heizsystem die Schadensmechanismen zu minimieren?

Aus den gewonnenen Daten sollten verbindliche Grundlagen für die zukünftige Haustechnikplanung in historischen Bauten und Museen erstellt werden können.

1. Zusammenfassung

Im Mittelpunkt des Forschungsprojektes stand die Frage nach dem Heizsystem (besser: Wärmeverteilsystem) mit dem geringsten konservatorischen Schadenspotential, als wesentliche Arbeitshypothese für den Einsatz schadenspräventiver Haustechnik.

In der Kartause Mauerbach bei Wien sollten in sechs Mönchszellen, die am östlichen Kreuzgang nach Osten angebaut waren, sechs unterschiedliche Wärmeverteilsysteme eingebaut und in ihrer Wirkung auf Bausubstanz und Raumklima verglichen werden, und zwar solche, die den Raum durch Aufheizung der Raumluft beheizen, und andere, die dies durch direkte Abgabe von Strahlungswärme bzw. durch die Strahlung der beheizten Wandoberflächen leisten.

Die zunächst als gleich erachteten Zellen wiesen bei genauerer Untersuchung deutliche Unterschiede in der Feuchte des Zellenbodens auf, der aus Kostengründen nicht - wie vorgesehen - durch eine Estrichschicht verschlossen wurde. Man beschloß daher, in drei Zellen Trennwände einzuziehen, so daß nur drei Häuser mit sechs Halbzellen mit den erforderlichen heizungstechnischen Installationen versehen wurden.

Als Luftheizsysteme erhielt Zelle 4/1 zwei Heizkörper (Radiator/Konvektoren) und Zelle 4/2 einen Heizlüfter mit Warmwasser-Heizregister (Fancoilgerät).

Als Strahlungsheizsysteme erhielten Zelle 3/1 einen Kachelofen, Zelle 3/2 zwei Sockelheizleisten an den Außenwänden, Zelle 5/1 eine Temperierung unter Putz (Außenwände: Vorlauf am Sockel, Rücklauf in Brüstungshöhe, Wand-Deckenecke: Ringleitung an allen Wänden; s. Abb. 5.1.2!), 5/2 eine Hypokaustenheizung an den Außenwänden (Wandschalen mit Sockelkonvektoren).

Alle sechs Zellen wurden mit Regelungseinheit, Wärmemengenzählung und Meßfühlern ausgestattet, so daß alle raumspezifischen Daten aufgezeichnet werden konnten: Raumtemperatur, Temperaturen auf der Wandinnen- und außenseite und im Wandquerschnitt, relative Luftfeuchte innen und außen, Temperaturgradient an der raumseitigen Wandoberfläche, Heizmediumstemperatur und Energieverbrauch.

Später wurden in die Zellen Tafelbild-Dummies mit Bewegungssensoren eingebracht. Mit diesen konnten die Formatänderungen der Tafeln tendenziell erfaßt werden, d. h. nicht die absoluten Maße der Änderungen, sondern die Richtung und Häufigkeit der Bewegungen. Alle Meßdaten wurden auf einem 64-Kanal-Datenlogger gespeichert, von dort in eine zentrale EDV übertragen und ausgelesen.

Auf Grund der vielen durch Bauarbeiten und Komponentenausfall verursachten Meßprobleme und Betriebsunterbrechungen wurde die anfänglich auf zwei Jahre angelegte Messung auf eine dritte Heizperiode ausgedehnt. Es zeigte sich, daß eine Meßaufgabe dieses Ausmaßes über einen solch langen Zeitraum in einem Objekt, in dem gleichzeitig gebaut wird, nur schwer durchführbar ist. Durch Feuchte- und Staubeinwirkung fielen häufig heizungs-, meß-, regel- und EDV-technische Komponenten aus (Mischer, Sensoren, Raumtemperaturfühler, EDV-Speichermedien). Stromunterbrechungen setzten Pumpen, Regelung und zentrale Wärmebereitstellung immer wieder außer Kraft. Daher entfiel für die Temperierung immer wieder die Voraussetzung für Energieeinsparung durch Bauteiltrocknung, die kontinuierliche Wärmezufuhr. Zwischenzeitlich erreichte Effekte mußten dann mit neuem Energieeinsatz wieder aufgebaut werden.

In Haus 5 herrschten über die ersten beiden Jahre wesentlich höhere Werte der relativen Feuchte als in den übrigen Zellen. Im ersten Jahr stellte man dort einen besonders hohen Grundwasserspiegel fest. Dabei lag der Bodenwassergehalt in der Zelle 5/1 (Wandtemperierung) sogar um 4% höher als in der anderen Halbzelle desselben Hauses.

Aufgrund dieser internen Feuchtequelle lag die absolute Luftfeuchte (g Wasser/kg trockene Luft) in Haus 5 deutlich höher als in den übrigen Häusern, wie das Beispiel vom 26.07. bis 29.07.1997 zeigt: Außen 10 bis 11,4 g/kg, Haus 4 ca. 12 g/kg, Haus 5 ca. 13,1 (5/1 Temperierung) bzw. ca. 13,8 (5/2 Wandschale).

Als man aber am Ende des zweiten Meßjahres in der Zelle 5/1 die Wärmeverteilung verbesserte, normalisierte sich dort die Feuchtesituation rasch: In Erwartung des Estrichs war das Vorlaufrohr in 30 cm Höhe über dem ungesperrten Rohboden und nur an den Außenwandsockeln verlegt worden. Nachdem zusätzlich, an allen Wänden umlaufend, ein Elektroheizkabel in 5 cm Höhe über Rohboden eingemörtelt war, sank die Raumluftfeuchte signifikant und die Oberflächen der Wandsockel und des Bodens trockneten.

Damit konnte besonders eindrucksvoll der Nachweis erbracht werden, daß eine richtig montierte Temperierleitung (bei starker Feuchtebelastung also möglichst nahe aller Boden-Wand-Ecken) bei kontinuierlichem Betrieb nicht nur einen Teil des Raumwärmebedarfs deckt, sondern auch die aufsteigende Feuchte wirk-sam stoppt und zusammen mit den übrigen Rohren der Anlage die Raumhüllflächen trocken hält, so daß die Werte der relativen Feuchte signifikant zurückgehen und der Energiebedarf der Gesamtanlage dem vergleichbarer Heizsysteme entspricht. Er lag nach 5 Monaten im Mittelfeld der anderen Zellen. Dann wurden die Messungen beendet, so daß die weitere Verringerung des Energiebedarfs, die bei fortschreitender Wand- und Bodentrocknung erfahrungsgemäß eintritt (siehe Lapidarium), nicht mehr nachgewiesen werden konnte.

Zwei Versuche zeigten, daß die Wandtemperierung mit ihrer minimalen Heiztechnik in der Lage ist, auch kurzfristig die Raumtemperatur zu erhöhen: Als man vor dem Einbau des Heizkabels am 10.04.1997 durch Erhöhung der Vorlauftemperatur versuchte, auf die Bodenfeuchte einzuwirken, stieg die Raumtemperatur innerhalb eines Tages von 15° C auf 21° C (s. Abb. 7.1.23), ohne daß sich die Sockelfeuchte veränderte. Dadurch wurde bestätigt, daß die Wärmeleitfähigkeit von Mauerwerk mit hohem Rohgewicht schlechter ist, als nach dem unter konstanten Temperaturbedingungen für ein Material ermittelten Wärmeleitfähigkeitswert anzunehmen wäre. Im zweiten Beispiel am 18.03.1998, stieg die Raumtemperatur innerhalb von 7 Stunden von 12,5° C auf 17° C, als man nach dem Heizkabel-Alleinbetrieb die Heizrohre zur Herstellung der Solltemperatur hinzuschaltete (s. Abb. 7.1.17)

Die größte Konstanz des Raumklimas mit gleichmäßigen Wandoberflächentemperaturen und geringen Unterschieden zwischen Raumluft- und Wandtemperatur zeigten die Zellen mit den vom Bauteilwärmebedarf direkt beeinflußten Systemen (Temperierung, zwischen den Rohren gemessen, und Hypokaustenheizung). Die größten Unterschiede waren in den Zellen zu verzeichnen, deren Systeme mit freier Raumluftkonvektion arbeiten (Heizkörper, Fancoil).

In der Zelle mit der Temperierung wirkten sich äußere Einflüsse wie Ausfall der Heizung, Kälteeinfall durch Öffnen der Türen bzw. wesentliches Wärmeüberangebot nur in sehr gedämpften Temperatur- und Luftfeuchteschwankungen aus. Die geringsten Bewegungen der Tafelbilder traten in der Zelle mit dem Kachelofen und dem Fancoil auf. Letzteres ist durch die starke und gleichmäßige Umwälzung des relativ kleinen Luftvolumens durch den Ventilator gegeben, wobei die Staubverteilung nicht untersucht wurde. Die im Vergleich dazu stärkeren Tafelbewegungen in der Temperierzelle sind dadurch zu erklären, daß die Tafelunterkante vor dem eingeputzten Rücklaufrohr hing, ohne daß auf der Tafelrückseite eine Abschirmung (Heizkörper-Reflexionsfolie, wie für diesen Fall im Museum vorgesehen) angebracht wurde. Vor diesem Hintergrund sind die Bewegungen erstaunlich gering.

Die Frage, welches Heizsystem gleichzeitig für den Nutzer den höchsten „Komfort“ und für die Exponate den geringsten „Klimastreß“ bietet, wurde durch Vergleich von Raumluft- und Wandoberflächentemperatur beantwortet. Bei großem Unterschied war in der Zelle keine Behaglichkeit gegeben. Dies war z .B. in der Heizkörperzelle der Fall. In den Zellen, deren Heizsysteme direkt auf die Wandoberfläche zielten, wie Fußleistenheizung, Kachelofen, Wandtemperierung und Wandschale, gab es auf Grund der der Raumlufttemperatur gleichen Wandoberflächentemperaturen behagliche Bedingungen.

Aus Energiespargründen wurde im Winter in allen Zellen bei tiefster Außentemperatur eine max. Raumtemperatur von 15° C angestrebt. Bei Außentemperaturen über 15° C schalteten die konventionellen Systeme ab. Das Wandtemperiersystem dagegen wurde kontinuierlich gefahren, mit einer Rücklauftemperaturregelung, um die geforderten mindestens 25° C im Rücklauf zu halten. So konnte nachgewiesen werden, daß es bei kontinuierlichem Betrieb in der Lage ist, das Aufsteigen von Feuchte zu verhindern und die Wandfeuchte zu verringern und so - in Verbindung mit der geringen Raumlufttemperatur - trotz des Dauerbetriebes geringere Energieverbräuche als Heizsysteme zu erreichen, die mit freier Raumluftkonvektion arbeiten.

Der Vergleich des Energiebedarfs erfolgte in der dritten Heizperiode (vom 6.11.1997 bis 26.03.1998), da erst im Oktober 1997 die ordnungsgemäße Funktion der Temperierung und ein annähernd kontinuierlicher Heizbetrieb gegeben waren. Den geringsten Energiebedarf hatte der Kachelofen. Dann folgten gleichauf die Fußleistenheizung und die Temperierung, wobei deren Bedarf bei zunehmender Wand- und Bodentrocknung noch sinken würde. Von der Heizkörperheizung über den Fancoil bis zur Wandschale nahm der Energieverbrauch dann weiter zu. Der Bedarf der Heizkörperheizung wäre bei DIN-gemäßer Zuleitungsverlegung (gedämmt, im Boden) höher ausgefallen als bei der aus Kostengründen gewählten Anbindung (gedämmt, am Sockel aufliegend), da bei Dämmungs-Oberflächentemperaturen zwischen 18 und 31° C eine leichte Wandtemperierwirkung besteht (s. Anlage 2, oben).

Als sich abzeichnete, daß die Effekte der Temperierung nachweisbar waren, wurde entschieden, in anderen Bereichen der Kartause die Temperierung ebenso einzubauen: In das Lapidarium, in die zwischen den Zellen neu eingebauten Bäder und in Zelle 2, die von den Heizversuchen ausgeklammert war. Diese Bauteilheizungen zeigten einmal mehr, daß das einfache Wärmeverteilsystem gerade im historischen Bereich mit erdberührten, feuchten Mauern seine Stärken zeigt. Diese Stärken sind geringer Energieverbrauch, große Klimakonstanz und große Behaglichkeit dank der warmen, trockenen Außenwand-Oberflächen. Der spezifische Energiebedarf des Lapidariums von 26 kWh/m³ und Jahr ist eher Niedrigenergiehäusern zuzurechnen und nicht historischen Bauwerken mit extrem schwerer feuchter Baumasse, wie hier ca. 80 cm dickem Mischmauerwerk.

Die Erfahrungen aus der Forschungsarbeit in Mauerbach konnten noch während des Projektes in andere Projekte eingebracht werden wie in Schloß Schönbrunn bei der Planung der schadenspräventiven Heizung und Lüftung, im Monturen- und Tapisseriedepot für das Kunsthistorische Museum Wien, im

Wiener Völkerkundemseum bei der Reaktivierung der natürlichen Lüftung bis hin zur Temperierung von ca. 6.000 m² Nutzfläche in einer der ältesten Kasernen Österreichs (EG der HTBLA in Krems/Donau), die der Forschungsgruppe neben weiteren ca. 40 Projekten für reine Bauteilheizung in Auftrag gegeben wurden. Dazu kamen Temperieranlagen in schwedischen Schlössern (Schloß Salsta) sowie die mikroklimatische Sanierung eines Bücherspeichers der Bibliotheka Hertziana in Rom.

Folgende im Zusammenhang mit Bauteilheizung immer wieder auftretende Fragen konnten durch Ergänzung des bestehenden Meßaufbaus durch Wärmeflußsensoren beantwortet werden :

1. Fließt in der Ebene eines in die Außenwandinnenseite eingeputzten Temperierrohres mehr Wärme nach außen als in einer von der Rohrebene entfernten Ebene?

Antwort: Bei gegebener Wandstärke ist der Wärmefluß nach außen in der Rohrebene nicht größer, als in einer anderen Ebene (s. Abb. 6.1.5).

2. Ist der Wärmeverlust einer Außenwand mit eingeputztem Temperierrohr größer, gleich oder kleiner, verglichen mit der baugleichen und gleichorientierten Außenwand eines mit Heizkörperheizung beheizten Raumes?

Antwort: Der Wärmefluß nach außen in einer Außenwand mit eingeputztem Temperierrohr ist nicht größer, sondern kleiner ist als der einer baugleichen und gleichorientierten Außenwand eines mittels Heizkörpern beheizten Raumes.

2. Aufgabenstellung

In der Kartause bestand die einmalige Gelegenheit, in sechs gleichartigen Räumen die Auswirkungen verschiedener Heizsysteme auf Raumschale, Raumklima und Energieverbrauch zu untersuchen. Für die Messungen wird u. a. die Querschnittsmethode durch eine repräsentative Wand gewählt, wobei die Auswahl für alle 6 Räume identisch sein muß. Es wird dabei vorausgesetzt, daß alle 6 Räume im gleichen Ausbaustadium stehen. Da noch Umbauten mit Putzarbeiten anstehen, wird eine mindestens 2-jährige Meßdauer gewählt. Besser wäre eine 4 bis 5-jährige Meßdauer, da der Feuchtegehalt des Mauerwerks von der Art der Beheizung abhängt. Es wird auch vorgeschlagen, bei zumindest einem Raum innerhalb der langen Meßperiode einen Wechsel des Heizsystems durchzuführen, um die vermuteten Unterschiede im Energiebedarf eindeutig nachweisen zu können. Für die Untersuchung wurden die folgenden Heizsysteme vorgeschlagen:

- Kachelofen
- Sockelleistenheizung
- klassische Heizkörperheizung mit Radiator/Konvektoren unter dem Fenster
- Warmluft-Gebläseheizung
- Temperierung
- Vorsatz-Wandschale mit Kleinkonvektor zwischen Wand und Schale.

Die Begehung der Räume in Mauerbach hat ergeben, daß die Räume nicht als ident anzusprechen sind. Es wurde daher beschlossen, von den 5 Zellen nur 3 auszuwählen und in der Mitte zu teilen. Es wird in jeder Raumhälfte je ein Heizsystem installiert. Damit die Messungen nicht durch die Teilung beeinflußt werden, werden immer verwandte Heizsysteme zusammengefaßt:

Haus 3: Kachelofen und Sockelleistenheizung
Haus 4: Fan Coil und Heizkörperheizung
Haus 5: Temperierung und Wandschale.

Bei der Planung des Versuchsaufbaues ist dafür Sorge zu tragen, daß die Nachnutzung der Räume ohne großen Aufwand erfolgen kann.

2.1 Kriterien für die Bewertung der Heizsysteme:

Unter den Bedingungen der vergleichbaren Anordnung der Meßstellen und der Energiemessung wird der Versuch Klarheit schaffen über den Wahrheitsgehalt verschiedener Thesen, nach denen einzelne Heizmethoden besonders sparsam sein sollen, andere hingegen erheblich mehr Energie benötigen. Die Untersuchung ist von grundsätzlichem Wert, da sie auf neutraler Basis die Eigenschaften der Heizsysteme vergleicht. Kriterien für die Bewertung von Heizsystemen sind:

-Konstanz von relativer Luftfeuchte und Lufttemperatur
-Energiebedarf
-Auswirkungen auf die Bauhülle (Wandoberflächen, Putzeigenschaften)
-Regelbarkeit
-Toleranz gegen Fehlerzustände (Vollast und Unterbrechung).

2.2 Bauliche Voraussetzungen und Wärmeerzeugung, Adaptierung der Räume:

Die Räume sind in einem noch nicht adaptierten Zustand. Die Fenster sind defekt, es fehlen die Türen und die bestehenden Zwischenwände müssen ausgetauscht werden. Im Sinne geringer Kosten sollen die Fenster mit 0,5 mm PE-Folie so weit rekonstruiert werden, daß über die Versuchsdauer thermisch brauchbare Bedingungen geschaffen werden können (2 bis 3 Lagen PE-Folie, mit Luftpolster dazwischen). Weiters ist eine Wärmedämmung auf der Decke der Zellen vorgesehen, um die Heizkosten gering zu halten. Diese entfiel aufgrund des chronischen Geldmangels.

Die Bodenfeuchte stieg von der Kachelofenzelle hin zur Zelle 5 mit den Wandtemperier- und Hypokaustensystemen ganz entscheidend an. Es haben Messungen und Beobachtungen des Schimmelbefalles im davor liegenden Kreuzgang bewiesen, daß sich unter Zelle 5 ein flächiges Grundwasser in einer Tiefe von ca. 1 - 2,5 m befindet. Dies läßt auch die Vermutung zu, daß die anschließende letzte, „außer Konkurrenz“ laufende Eckzelle 6, im Gegensatz zu den übrigen Zellen, deswegen eine Unterkellerung hatte, da anscheinend schon die Baumeister des Klosters auf das Feuchteproblem aufmerksam wurden.

2.3 Wärmeerzeugung

Die Wärmeerzeugung erfolgt in üblicher Weise mit Gaskessel in der Heizzentrale. Auf eine Überströmstrecke am Ende der Hauptverteilleitung ist zu achten, da die Räume unterschiedlichen Wärmebedarf haben werden.

2.4 Stromversorgung

In jedem Raum muß eine Stromversorgung mit 230 V und max. 10 A für die Dauer des Versuches vorhanden sein.

2.5 Hydraulische Schaltung für die Raumheizungen

Damit alle Räume eine vergleichbare Ausgangsbasis erhalten, sind Wärmemengenzähler an den Übergabestellen der Heizwärme in den Raum zu installieren. Eine elektrische Beheizung wäre für den Versuch einfacher, schafft aber bei der Nachnutzung der Räume die größeren Probleme.

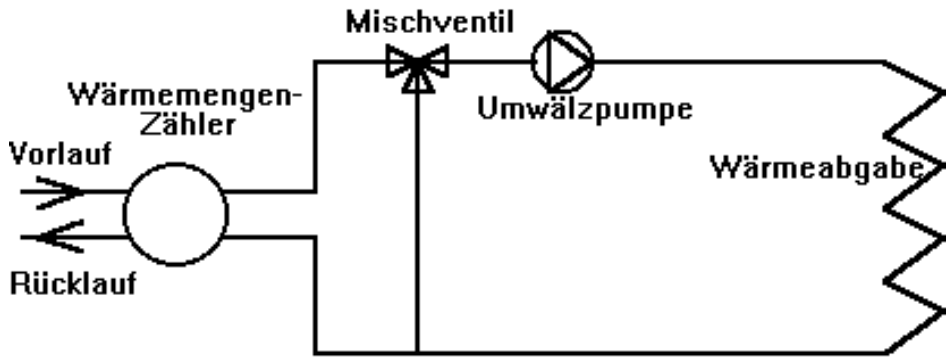
Die Regelung soll für alle Räume von der hydraulischen Seite her einheitlich gestaltet werden. Bild 2.4.1 zeigt die Standardschaltung.

Die Schaltung wird von der Meß- und Regelstation auf konstante Raumtemperatur hin gesteuert über ein Mischventil mit Motorsteuerung und Endlagenschaltern.

2.6 Codierung der Fühler

Die Fühlercodierung erfolgte nach den Meßbereichsgruppen, so daß bei jedem Meßbereich offene Anschlußpositionen für Veränderungen möglich sind. Falls z. B. bei der Außenwand weitere Sensoren (Licht, Wärmestrahlung, Niederschläge....) mit eingebunden werden sollen, wird der Meßbereich Außenwand um die Positionen erweitert, während alle anderen Positionen unverändert bleiben. Die

Abb. 2.4.1 Standardschaltung des hydraulischen Kreises



Kurzbezeichnung in der 2. Spalte dient als Gedächtnisstütze zur raschen Zuordnung eines Fühlercodes zur Fühlerfunktion. Die Buchstaben bis zum Bindestrich zeigen die Funktion des Fühlers, die Buchstaben nach dem Bindestrich zeigen den Ort. Die Kurzbezeichnung ist nicht räumlich gebunden. Die Spalte „Fühler" gibt eine Kurzinformation über den Hersteller bzw. über technische Fühlereigenschaften.

Der Code xA103 ist die Kabelbezeichnung und wird nach folgendem Schlüssel gelesen:

Tab.2.6.1:
Code für die Kabelbezeichnung.

Code	*Information*
X	Raumnummer
A, D, R	Analog-, Digitalsignal, Regelleitung
1	Gruppe, aus der der Meßwert kommt: 0...Außenklima 1...Außenwand außen 2...Außenwand innen, Schalenraum 3...Raumklima 4...Heizsystem
06	Fühlernummer

2.6 Meßanordnung Außenklima

Das Außenklima wird für alle Räume über eine Meßstelle erfaßt:

Tab.2.7.1:
Erfassung des Außenklimas.

Pos.	*Kurzbez.*	*Meßstelle Außenmessung*	*Fühler*
A001	Ta	Außentemperatur	E+E
A002	Va	Luftbewegung*	E+E
A003	Fa	Außenfeuchte	E+E

* entfiel aus Kostengründen

2.7 Aufbau der Meßanordnung in einem Raum

Das folgende Bild zeigt die grundsätzliche Anordnung der Sensoren in einem Raum.

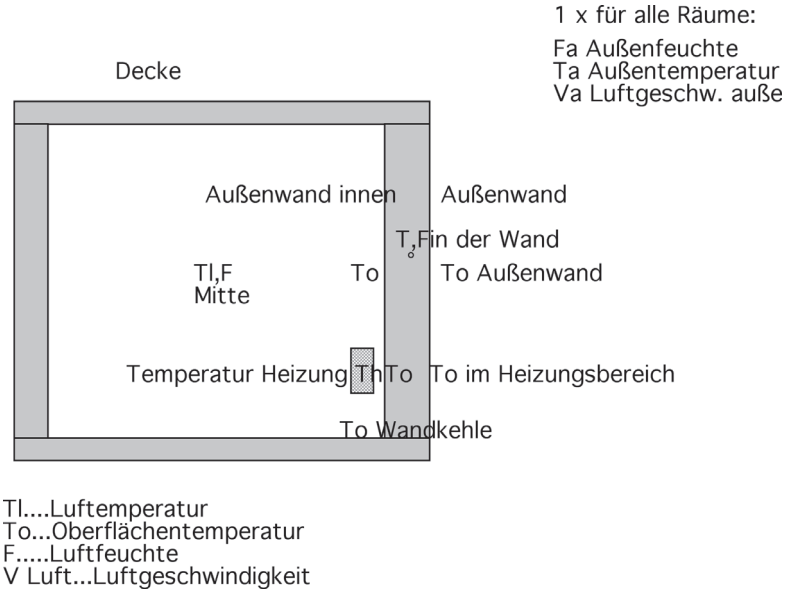


Abb. 2.8.1:
Standard-Meßanordnung (Raumquerschnitt)

Die Lufttemperatur in Raummitte ist Führungsgröße für die Beheizung. Die rel. Luftfeuchte wird mitgeschrieben, um ihre Beeinflussung durch verschiedene Heizsysteme untersuchen zu können, da dies ein wesentliches konservatorisches Kriterium ist.

Pos.	***Kurzb.***	***Meßstelle***	***Fühler***
		1. Außenmessungen	
xA101	To-AWa	Oberflächentemp. Außenwand, außen	Pt
xA102	To-AWha	Oberfl.Temp. Außenwand, im Heizbereich	Pt
xA103	T-AWi	Temperatur in der Außenwand, Wandmitte	E+Es
xA104	F-AWi	Feuchte in der Außenwand, Wandmitte	E+Es
		2. Oberflächentemp. innen, Außenwand	
xA201	To-AWk	Oberfl.Temp. in der Wandkehle zw.Fußb.u.AW	Pt
xA202	To-AW	Oberfl.Temp. Außenwand, außerhalb der Heizung	Pt
xA202	To-AWh	Oberfl.Temp. Außenwand, im Heizungsbereich	Pt
		3. Innenraum	
xA301	Tl-Mi	Lufttemperatur in Raummitte	E+E
xA302	F-Mi	Luftfeuchte in Raummitte	E+E
		4. Heizsystem	
xA401	To-Hzg	Luft- oder Oberflächentemperatur der Heizung	Pt

Tab. 2.8.1:
Auflistung der Meßstellen für die Klimauntersuchung eines Raumes

Das geplante Meßsystem hat aufgrund des installierten Prozessors die Möglichkeit, neben der Datenregistrierung auch Steuer- und Regelfunktionen zu übernehmen. Es fallen dabei keine weiteren Kosten an, da die Ausgänge im System bereits vorhanden sind und nur entsprechend programmiert werden müssen.

Pos.	*Kurzb.*	*Ausgang*	*Aktuator*
xR01	Vent.auf	Regelventil öffnen	Motor
xR02	Vent.zu	Regelventil schließen	Motor
xR03	Tür	Türkontakt	Lampe
xR04	Störung	Störung in der Heizungsregelung	Lampe
xR05	Pumpe	Umwälzpumpe ein/aus nach Außentemp.	Pumpe

Tab. 2.8.2:
Ausgänge aus der Regel- und Steuereinheit

Die geplante Meßanordnung ist verwendbar bei den Heizsystemen:
Kachelofen
Sockelleistenheizung
Heizkörper
Fancoil
Temperierung.

Die Vorsatzschale benötigt eine veränderte Positionierung der Meßstellen, um die Zustände in den beheizten Zonen bzw. Zwischenräumen abklären zu können. Es wird vorgeschlagen, die Bohrung für die Messungen in der Wand zwar durchzuführen, die Meßwerte aber nur sporadisch über Handgeräte festzustellen. Die Sensoren aus der Wandmitte werden im Zwischenraum zwischen der Wand und der Vorsatzschale eingesetzt. Durch die Änderung werden Anzahl und Kosten der Sensoren niedrig gehalten.

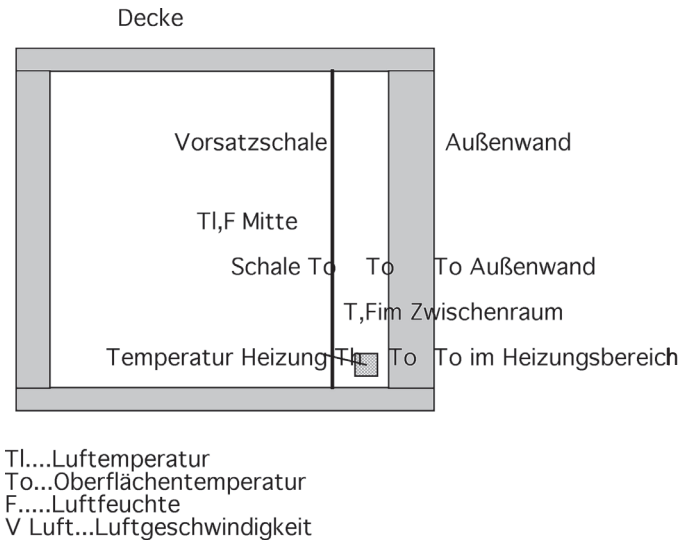


Abb. 2.8.3:

Tab. 2.7.3:
Auflistung der Meßstellen für die Vorsatzschale

Pos.	*Kurzb.*	*Meßstelle*	*Fühler*
		1. Außenmessungen	
xA101	To-AW	Oberflächentemp. Außenwand, außen	Pt
xA102	To-AWh	Oberfl. Temp. Außenwand, im Heizbereich	Pt
		2. Meßpunkte im Zwischenraum	
xA201	To-AWk	Oberfl.Temp.in der Heizzone	Pt
xA202	To-AW	Oberfl.Temp.Außenwand außerhalb Heizzone	Pt
xA203	Tl-Z	Temperatur im Zwischenraum	E+E
xA204	F-Z	Feuchte im Zwischenraum	E+E
xA205	To-Vo	Oberfl.Temp.der Vorsatzschale	Pt
		3. Innenraum	
xA301	Tl-Mi	Lufttemperatur in Raummitte	E+E
xA302	F-Mi	Luftfeuchte in Raummitte	E+E
		4. Heizsystem	
xA401	To-Hzg	Luft- oder Oberflächentemperatur der Heizung	Pt

Die Messung von Temperaturprofilen und der Luftbewegungen in den Versuchsräumen erfolgt punktuell, da der Meßaufwand für eine kontinuierliche Messung sehr groß wäre. Ebenfalls aufschlußreich wird der Vergleich des nach Norm gerechneten Wärmebedarfes mit den tatsächlich benötigten Wärmemengen sein.

3. Ausgangssituation mit Lageplan

3.1 Technische Beschreibung der Wärmeverteilsysteme

Innerhalb einer Meßperiode von drei Jahren soll durch genaue Messungen diejenige Raumheizung gefunden werden, die das geringste systemimmanente konservatorische Schadenspotential aufweist. Die Frage nach konservatorisch unbedenklichen Heizsystemen wurde in der einschlägigen Literatur bislang noch nicht systematisch untersucht. Aus diesem Grunde wird die optimale Konstellation von 6 (fast) identischen Zellen im vorliegenden Projekt genutzt und in den einzelnen Zellen ein jeweils anderes Wärmeverteilsystem eingebaut. Dabei werden die Auswirkungen auf Raum und Inventar und die entsprechenden Energieverbräuche gemessen.

Die ursprüngliche Planung sah die Zellenbeheizung mittels konventioneller Heizkörper vor. Dies wurde vorerst in der ersten Zelle 1/0, der sogenannten Prälatenzelle („Präzel“) durchgeführt. Diese war nicht Bestandteil der vorliegenden Meßkampagne.

Im Erschließungsgang zu den Zellen wird der Heizungshauptstrang verlegt, so daß nach der Meßperiode und den entsprechenden Ergebnissen und Entscheidungen jedes mögliche System gewählt und eingebaut werden kann.

Die Hauptverteilung (nahtloses Rohr, Dimension 42,4 x 2,6 bis 1") wird bis zum Ende des Ganges (Zelle 6/0) im Erdreich verlegt und entsprechend isoliert.

Die Beheizung der Zellen erfolgt durch die bestehende Kesselanlage mit einem Gaskessel (40 kW), der für die Ausweitung der Beheizung durch einen weiteren Gaskessel (100 kW) erweitert wurde.

Ab den Eingangstüren der Zellen 3, 4 und 5 werden die eigens subgeregelten Verteilerkreise in Kupfer gemäß der folgenden Beschreibung verlegt und mit dem Hauptstrang verbunden. Alle Subkreise in den Zellen erhalten eine außentemperaturgeregelte Mischersteuerung und werden über einen Raumfühler und einen

Abb. 3.1.1:
Kartause Mauerbach, Lageplan, Hauptgeschoß. Übersicht über die Zellenheizungen.
Zellengröße: 5,23 m x 4,63 m = 24,2 m^2 x 3 m Raumhöhe = 72 m^3

1 Mönchschor
2 Laienkirche
3 Kapitelsaal
4 Sakristei
5 Kreuzgang (ambitus)
6 Refektorium
7 Bibliothek
8 Zelle des Sakristans
9 Kapelle
10 Jodokkapelle
11 Kaiserstiege
12 kleiner Kaisersaal
13 Davidzimmer
14 großer Kaisersaal
15 Kaiserkapelle
16 Billardzimmer
17 Archiv
18 Prälatur
19 Kanzlei
20 Zellen des Osttraktes
21 Zellen des Nordtraktes
22 Brunnenhaus
23 Novizenstöckel
24 Locus colloqui
25 Zellen des Westtraktes
26 Prokuratur

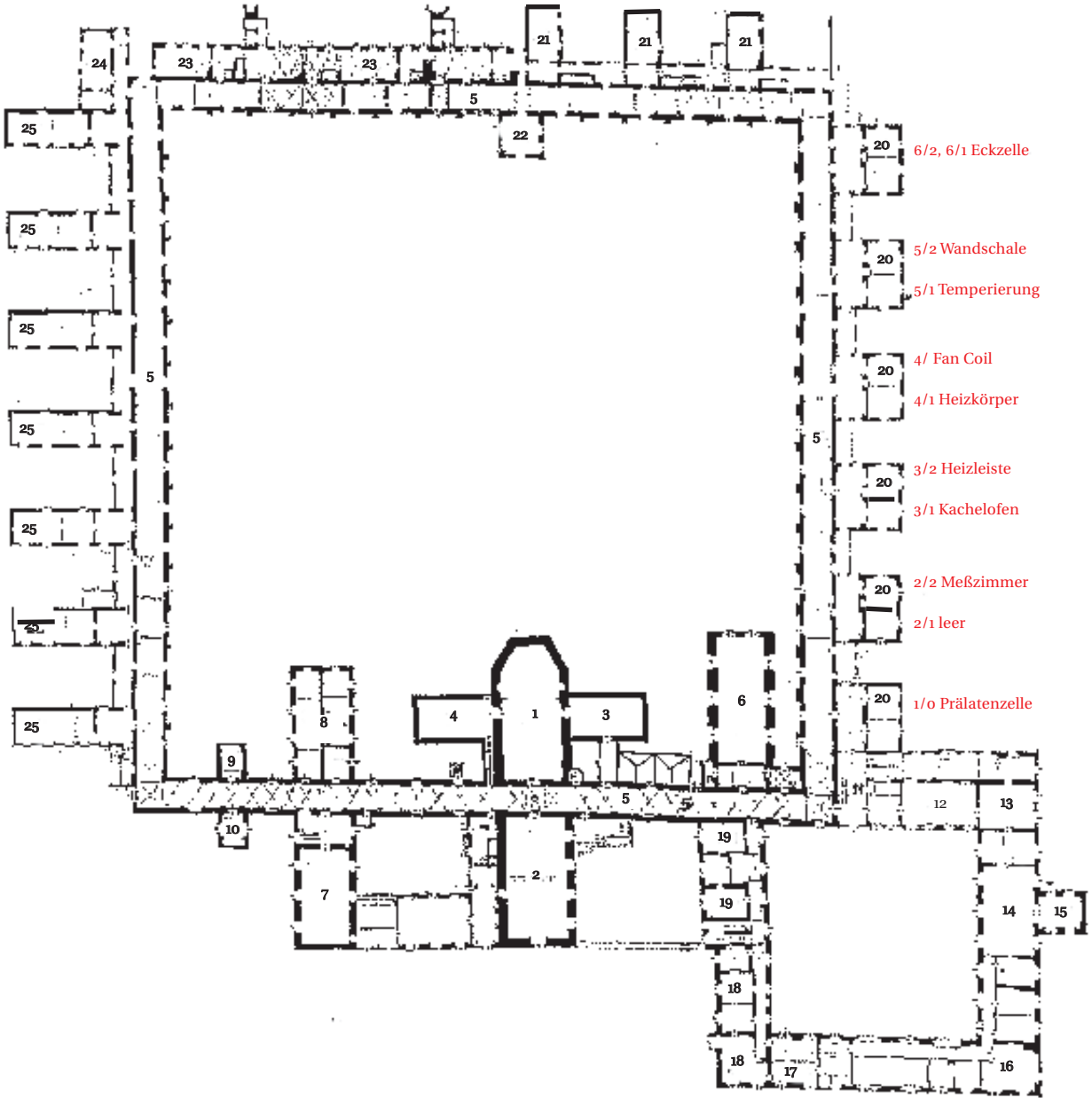
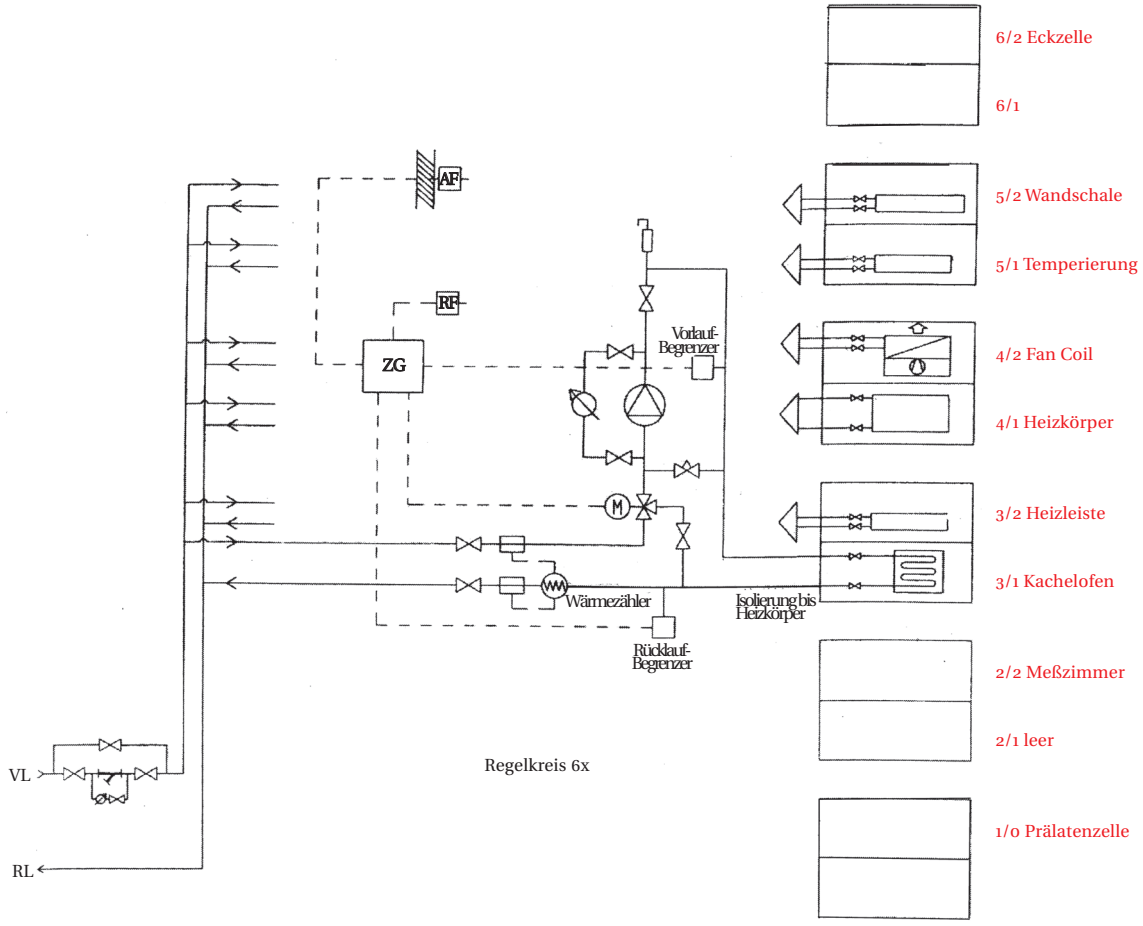


Abb. 3.1.2:
Heizungsschema



zentralen Regelungscomputer so geregelt, daß die geforderte Raumtemperatur von 18 bzw. 20° C gleich in allen Zellen erbracht wird.

Bei der Temperierzelle wurde ferner beachtet, daß kontinuierlich, also auch im Sommer eine Mindestheizungsrücklauftemperatur von 25° C gehalten wurde.

Die Eckzelle 6, die „außer Konkurrenz" mit gemessen wurde, erhielt als minimale Wandtemperierung umlaufend im Sockelbereich entlang der Putzunterkante eine 1-Rohr-Ringleitung mit Vorlaufthermostatventil und Anlegefühler am Rücklauf.

Im ersten Winter wird diese Temperierung noch nicht aktiviert, damit Meßdaten einer unbeheizten und aufgrund der Oberflächengeographie offensichtlich stark grund- und außenfeuchtebelasteten Zelle während einer Heizperiode zur Verfügung stehen.

Jeder Zellenheizkreis wurde für eine Leistung von 3 kW ausgelegt. Bei der Berechnung des Wärmebedarfes stellt sich die Grundsatzproblematik der thermischen Wertung des U-Werts. Dieser ist ein theoretischer Wert, der ohne Berücksichtigung der Art der Heiztechnik von einer gegebenen Materialfeuchte des Außenbauteils bzw. seiner Schichten ausgeht (sog. praktischer Feuchtegehalt).

Im gegebenen Fall sind aber die Außenbauteile offensichtlich durchfeuchtet, was praktisch zu schlechteren U-Werten führt, als dies die theoretische Rechnung ergäbe. Die Beheizung der Zellen wird teilweise eine (mehr oder minder starke) Trocknung der Bauteile zur Folge haben, so daß sich die U-Werte

Abb. 3.1.3 u. 3.1.4:
Heizungsverteiler der Temperierzelle. Analoge Konstruktion in den übrigen Zellen, ohne die Deckenringleitung (s. Kap. 3.3). Foto Alfons Huber, Wien.
Blick auf die Nordseite von Zelle 6 mit dem Außenklima-Fühler (rechts neben dem Fenster).

verbessern und der Wärmebedarf der Zellen teilweise abnehmen wird. Diese Trocknung der Außenwände wird erheblich von der Art und Weise der Beheizung und Wärmeverteilung in der Zelle abhängen und aus diesem Grund ein wesentlicher Meßparameter sein.

Die eingebrachte Wärme wird mit einem berührungslosen Ultraschall-Wärmemengenzähler gemessen und im zentralen Datenlogger der meßtechnischen Anordnung gespeichert.

Das zentrale Regelgerät wird die sechs unterschiedlichen Wärmeverteilsysteme gemäß der Außentemperatur so regeln, daß die geforderten Bedingungen erbracht werden.

Folgende Wärmeverteilsysteme sind in den entsprechenden Zellen vorgesehen:

Zelle 3/1	Kachelofen
Zelle 3/2	Heizleiste
Zelle 4/1	konventionelle Heizkörper
Zelle 4/2	Fancoil als Luftheizgerät
Zelle 5/1	Temperierung mittels WICU-Rohrschleife
Zelle 5/2	Wandschale (Hypokauste)
Zelle 6	thermische Horizontalsperre mittelsWICU-Ringleitung („außer Konkurrenz“).

Nachdem alle Wärmeverteilsysteme der Erkenntnisgewinnung bei der Suche des optimalen Heizsystems in historischen Gebäuden dienen, werden sie nach dem Versuchsablauf wieder demontiert. Dies ist der Grund, warum sie bis auf die Zuleitung zu den Zellen zwar gemäß den Regeln der Technik, aber dennoch nur provisorisch montiert werden. Hierbei steht die Vermeidung verlorenen Aufwandes im Vordergrund.

Alle Heizsysteme müssen hydraulisch abgeglichen sein.

Mit der Beheizung der Zellen wurde teilweise Ende Dezember 1995 begonnen. Alle heizungstechnischen Arbeiten für die Meßanordnung waren Ende Januar 1996 fertiggestellt.

3.2 Details zur Wandtemperierung

Die konventionellen Wärmeverteilsysteme wurden nach den Regeln der Technik installiert und bedürfen keiner genaueren Beschreibung, da sie allenthalben bekannt sind. Daher werden sie nur kursorisch erklärt.

Nur bei dem Hypokaustensystem und der Temperierung werden in der Folge Details beschrieben, die für das Verständnis der Systeme von Bedeutung sind. So gibt es beispielsweise bei dem System der *Wandschale* ein offenes und ein geschlossenes System. Im vorliegenden Fall wurde eine dichte Wandschale der eigentlichen Mauer vorgesetzt, wobei eine Zwischenwand aus Gipskarton zur Trennung von Auf- und Abtrieb, zwischen Wand und Deckschale montiert wurde. Teilweise bestehen die Deck- und Zwischenwand aus Acryl, um mögliche Kondensatspuren nachweisen zu können.

Zwar stellt die *Temperierung* eine Einfachsttechnologie dar, es müssen aber dennoch einige „Spielregeln" beachtet werden, die in der Folge kurz beschrieben werden.

Vermeidung von Rißbildung im Putz bei der Montage gemäß der Wandtemperiermethode

Folgende Details waren bei der Verlegung von Wandtemperierrohren zu beachten:

1. Nach vollständiger Installierung des Heizsystems soll die Anlage auf die maximale Temperatur hochgefahren werden (Entgasung).
2. Danach soll das Temperiersystem permanent auf ca. 35° C Vorlauftemperatur betrieben werden. Dies entspricht der mittleren Rohrausdehnung.
3. Die Längenausdehnung der Heizrohre erfolgt im Bereich der Bögen. Bei Rohrbiegungen muß beidseitig neben jede Biegung weiches Material wie z. B. Streifen von aufgeschnittenen Dämmschläuchen bündig mit der Rohroberfläche eingelegt werden.
4. Die Heizleitungen sollen während ständiger Beheizung eingeputzt werden. Dadurch entsteht keine Rißbildung.
5. Es ist eine Putzüberdeckung der Heizleitung von mind. 8 mm erforderlich (zu 2. - 5. s. Großeschmidt, Das temperierte Haus, Kap. 6.3.2.)
6. Die Montageweise der Rohre „in" der Wand (in leitender Verbindung mit dem Massivmaterial) erlaubt wegen der Wärmespeicherung keine plötzlichen Längenänderungen (im Gegensatz zur Führung in Luft).
7. Bei Verzicht auf den WICU-Schutzmantel wäre die Putzüberdeckung mind. 12 mm stark zu wählen. Verputzen des blanken Rohres ist bei laufendem Betrieb möglich, da an der warmen Rohroberfläche keine Korrosion möglich ist (bei Gipsputz entfällt sie auch beim kalten Rohr).
8. Im Gegensatz zu Kaltwasserleitungen kühlen Heizrohre von Temperieranlagen nicht unter die Wandtemperatur ab. Sie sind daher „thermisch korrosionsgeschützt", da es kein Kondensat im umgebenden Putz gibt.
9. Die Rohrführung erfolgt in Schleifen von einem Verteiler mit Entlüfterdosen, immer als Umweg und ohne Abzweigungen. Bei mehreren Räumen gleicher Exposition ist auch nur eine Schleife möglich.
10. Der Massenstromabgleich erfolgt an den Rücklaufventilen, wobei kürzere Kreise am Verteiler mit Hilfe der Taco-Setter gedrosselt werden.
11. Die Betriebsweise erfolgt in gleitendem Dauerbetrieb ohne Nachtabsenkung.
12. Die Vorlauf-Regelung erfolgt mit einem Außenfühler als einem Massefühler unter Putz der Nordwand. Die einfachste Raumregelung erfolgt durch Vorlaufthermostatventile mit Rücklaufanlegefühler an jeder Schleife am Verteiler.

3.3 Die Versuchsanordnung

Beheizung Zelle 3/1: Kachelofen

Gemäß der Leistungsblätter und Details der Herstellerfirma wird eine Speicher-Heizwand als ein viereckiger Kachelofen aufgebaut, der die nach konventioneller Berechnung geforderte Leistung von 3 kW erbringt.

Abb. 3.3.1 - 3.3.6:
Blick in die Zellen.
Fotos Alfons Huber,
Wien.

Abb. 3.3.1:
Blick in die Kachelofenzelle. Kachelofen links gemauert.

Abb. 3.3.2:
Blick in die Heizleistenzelle (Kleinkonvektoren noch ohne Blende).

Abb. 3.3.3:
Blick in die Heizkörperzelle (Zuleitungen noch ohne Wärmedämmung).

Nach konventionellem Rechenansatz ist bei einer Vorlauftemperatur von 80° C ca. 6 m² = 1,5 m x 2 m x 4 unverputzte Speicherheizwand an der betreffenden Stelle vor der Innenwand vorzusehen.

Die ca. 6 m² Speicherheizwand in Form eines Kachelofens zu bauen, bedeutet, ca. 240 Speichersteinläufe oder -bogen, 66 lfm Modulrohr (einem Alu-Verbundrohr), 180 kg Speichersteinmörtel und ca. 20 Endsteine.

Beheizung Zelle 3/2: Heizleiste

Für die geforderte Heizleistung von 3 kW ist nach konventionellem Rechenansatz an beiden Außenmauern je eine Heizleiste des Typs II A zu verlegen, die bei einer Auslegungsspreizung von Tv/Tr = 65/55 ° C ca. 340 W/m erbringen. Es sind also sind ca. 9 m Heizleiste erforderlich, um die geplante Leistung zu erbringen.

Die Heizleisten sind gemäß der Detailpläne an der Außenwand zu fixieren und mit der entsprechenden Holzverkleidung zu versehen.

Aufgrund des Coanda-Effektes wird durch den Luftauftrieb die Wärme der Fußleistenheizung auf die Wand übertragen, die die Wärme als Strahlungswärme in den Raum abgibt.

Beheizung Zelle 4/1: Radiator/Konvektor

In der Zelle 4/1 werden als Wärmeverteilung 2 Heizkörper mit einer Leistung von je 1.500 W vorgesehen.

Die Zuleitungen zu den Heizkörpern werden auf Putz mit der notwendigen Dämmung montiert.

Abb. 3.3.4:
Blick in die Fancoil-Zelle. (Gerät an Fenster links).

Abb. 3.3.5:
Blick in die Temperierzelle (Heizrohre noch nicht eingeputzt)

Abb. 3.3.6:
Blick in die Hypokaustenzelle (Wandschale). Vgl. auch Abb. 3.3.7.

Beheizung der Zelle 4/2: Fan Coil

In der Zelle 4/2 wird als Wärmeverteilgerät ein Fancoilgerät (Heizlüfter) mit entsprechender Leistung (3 kW) vorgesehen.

Dieses Gerät wurde zur Beheizung gewählt, da oftmals in historischen Gebäuden, insbesondere Museen und Kirchen, mittels Luftheizung Wärme in den Raum gebracht wird.

Beheizung der Zelle 5/1: Temperierung

Beim System der Temperierung wird eine 18 mm WICU-Kupferrohrschleife am Sockel (Vorlauf) und an der Brüstung (Rücklauf) in einem Wandschlitz mit ca. 10 mm Putzüberdeckung kraftschlüssig eingeputzt, wobei zu beachten ist, daß bei den jeweiligen Umlenkpunkten der Richtungsänderung des Rohres entsprechende Freiräume mit Polsterung gelassen werden, damit sich das Kupferrohr entsprechend der Wärmedehnung verlängern kann (s. Großeschmidt, Das temperierte Haus, Kap. 6.3.2.). Ein zweiter Kreis, eine 18 mm WICU-Ringleitung, fährt die raumbegrenzenden Wände unterhalb der Decke ab.

Beheizung der Zelle 5/2: Wandschale

An den Außenwänden wird auf entsprechenden Kanthölzern (5 x 8 cm) in einem Abstand von ca. 5 cm zur Trennung von Auf- und Abtrieb eine Gipskartonplatte (Dicke: 1,3 mm) montiert. Mit einem Abstand von 8 cm zu dieser wird eine zweite Gipskartonplatte aufgebracht. Am Fuß der Konstruktion werden gemäß Auslegungsblatt Kleinkonvektoren der Type III A installiert. Die von diesen erzeugte

Abb. 3.3.7:
Detail des Hypokaustensystems mit transparenter Acrylwand

Warmluft zirkuliert um die Trennschicht und erwärmt die raumseitige Schale. Diese gibt die Wärme in den Raum ab (Vergl. die schwächere Heizleiste in Regensburg). Ein ca. 2,3 m breiter Streifen beider Schalen besteht aus transparentem Material, damit Feuchteerscheinungen an Mauer und Wandschale feststellbar sind.

Das folgende rechte Photo zeigt die Konstruktion zur Erfassung der Holztafelbewegung.

Abb. 3.3.8 Erfassung der Holztafelbewegung

4. Messanordnung

Die folgende 3D-Zeichnunge verdeutlicht nochmals, wo die entsprechenden Temperatur- und Feuchtefühler jeweils an oder in den Wänden oder auch im Raum verteilt wurden. Alle Meßfühler wurden auf einem 16-Kanal bzw. 64-Kanal Datenlogger der Firma Grant (GB) geleitet und von dort auf einen Computer mit Festplatte gesammelt.

Von der EDV wurde dann mittels Diskette die Daten ausgelesen und in die Bearbeitungs-EDV des Autors übertragen. Die Daten wurden bearbeitet und als Excel-file in der vorliegenden Form archiviert.

Das folgende Schaubild zeigt die Anordnung des Meßdatenflusses:

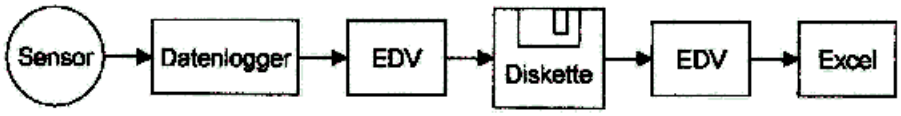


Abb. 4.1.1:
Schaltbild des Datentransfers

Tab. 4.1.1:
Liste der Fühler

Bez	*Zweck*	*Meßgröße*	*Hersteller*
T	Temperatur in der Mitte des Raumes	°C	E+E
F	Feuchte in der Mitte des Raumes	%rH	E+E
Awh	Temperatur an der Außenwandoberfläche im Heizungsbereich innen	°C	PT100
Awha	Temperatur an der Außenwandoberfläche im Heizungsbereich außen	°C	PT100
AW	Temperatur an der Außenwandoberfläche in 1,5 m Höhe innen	°C	PT100
Awa	Temperatur an der Außenwandoberfläche in 1,5 m Höhe außen	°C	PT100
HolzT	Temperatur an der Holztafeloberfläche (Ölgemälde-Dummy)	°C	PT100
Awi	Temperatur in der Außenwand	°C	PT100
Hzg	Temperatur des Heizmediums	°C	PT100
Hbwg	Bewegung der Holztafeloberfläche		Schieberegler
VL	Vorlauftemperatur	°C	PT100
RL	Rücklauftemperatur	°C	PT100
Ta	Außentemperatur	°C	E+E
Fa	Außenfeuchte	%rH	E+E

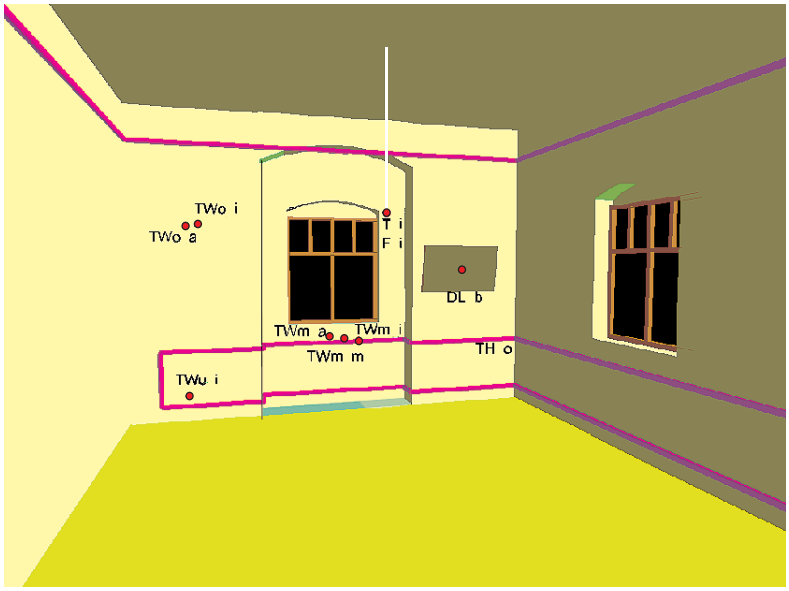


Abb.4.1.2:
Fühleranordnung
(Wandansicht)

Rohrventilatoren

Aufgrund des Fehlens von Fensterflügeln und budgetären Mitteln zur Renovierung der Fenster wurden die Fensterlöcher mit Luftposterfolie verschlossen. Dadurch gab es für die feuchten Zellen keine Möglichkeit mehr, über Fenster oder über Fugenlüftung die Raumfeuchte abzuführen. Um dennoch in den Zellen einen lebensnahen Luftwechsel zu simulieren, wurden in jeder Meßzelle in die Fensterfolien jeweils ein Rohreinschubventilator mit einer Luftleistung von ca. 150 m³/h eingesetzt und mit gleichen Laufzeiten programmiert. Dabei wurde darauf geachet, daß diese Laufzeiten in Summe ähnlich lang waren, wie üblicherweise Fenster zum Lüften in einem Haushalt geöffnet werden. Dies entsprach für alle Zellen gleich einer Laufzeit von ca. 3x30 min/Tag.

5. Probleme

Die folgende Zeitleiste gibt einen Überblick über Probleme und Ereignisse:

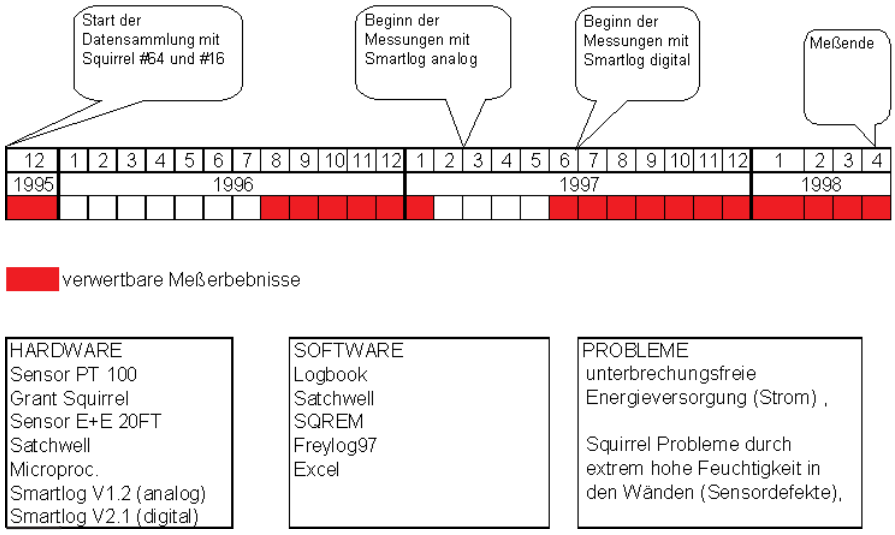


Abb. 5.1.1:
Zeitleiste der relevanten Ereignisse.
Grafik aus Jan Holmberg, Evaluation of uncertainties in the EU1383 PREVENT measuring campaigns year 1996-1998, Report No 8 from Swedish partners, Vienna, April 1998.

Die folgende Liste gibt einen tabellarischen Überblick aller Ereignisse:

Tab. 5.1.1:
Ereignisse im tabellarischen Überblick.

Datum	*Ereignis*
11.95	Beginn der Installationsarbeiten
02.96	Inbetriebnahme der Heizung und der Datenaufzeichnung
18.02.96	48 Kanal Squirrel Daten-Logger defekt
05.96	Zelle 6: Wandfühler T und F repariert
06.96	Heizung wurde abgestellt wegen Badmontage zwischen Zelle 2 und 3
11.07.96	Bodenproben von allen Zellen entnommen
06.09.96	Folie auf Zellenböden aufgelegt
12.09.96	Lüftungsrohre in Fenstern montiert
10.96	Ost- und Westfenster mit Mineralwolle gedämmt
14.10.96	Ventilatoren in Betrieb genommen
15.10.96	Ventilatoren in Lüftungsrohre montiert
15.10.96	Kabelriß während Baggerarbeiten
11.96	2 Raumthermostate und ein Mischer getauscht, da defekt
04.12.96	Folie von Zellenboden entfernt
14.12.96	Kachelofen: Kabelbruch bei Raumthermostaten
14.12.96	Hypokaustenzelle: Pumpe von Unbekannten abgeschaltet
14.12.96	Meßanordnung aus Meßraum in den Flur verlegt
17.12.96	48 Kanal Squirrel-Logger wieder montiert

04.01.97	Zeitschaltuhr für Lüfter montiert
04.01.97	alle Pumpen auf Stufe 1 außer Temperierzelle
10.01.97	Mischereinheiten gedämmt
10.01.97	Fehlmesseung bei 48 Kanal Squirrel Logger
21.01.97	48 Kanal Squirrel Logger wieder montiert
21.01.97	Wandfühler vom Sockelbereich hinter die Wandtafeln versetzt
28.01.97	Thermografieaufnahmen
01.97	Sollwert für Raumtemperatur von 15°C auf „18°C“ erhöht (20° C erreicht)
06.02.97	Sollwert für Raumtemperatur von 18°C auf „15°C“ gesenkt (17° C erreicht)
12.02.97	48 Kanal Squirrel Logger wieder defekt
01.04.97	Beginn der Wärmeflußmessungen (Ende: Aug. 97)
10.04.97	Heizversuch in der Temperierzelle
11.04.97	Temperatur- und Luftfeuchte-Raumfühler in Zelle 6 montiert
28.06.97	Kesselstörung: Temperierung außer Betrieb
30.09.97	Regelungscomputer defekt
10.97	Temperierzelle: Heizkabel in Wand-Boden-Ecke eingeputzt, Stromzähler für Heizkabel montiert
10.97	Allein-Betrieb des Heizkabels ohne Temperierrohre (bis 18. 03. 1998)
17.10.97	16 Kanal Squirrel Logger abgebaut
11.97	48 Kanal Squirrel Logger durch 64 Kanal Logger ersetzt
06.11.97	neuer Regelungscomputer montiert
06.11.97	Software- Wärmemengenzähler auf Null gestellt
06.11.97	Temperierzelle: Sollwert Raumtemperatur auf 14° C gesetzt
06.11.97	defekter Raumthermostat in Wandschalenzelle getauscht
06.11.97	Beginn Verbrauchsvergleich (Ende: 26.03.1998)
02.98	Klimaschock simuliert
18.03.98	Temperierzelle: Zuschaltung der Heizrohre zum Heizkabel
08.98	Ende Wärmeflußmessungen
26.03.98	Ende der Messungen

Folgendes Problem ist besonders erwähnenswert: Obwohl alle Heizsysteme die Solltemperatur stets erreichten, stellten sich unterschiedliche relative Luftfeuchten ein. Insbesondere in den Halbzellen 5/1 und 5/2 (Temperierung, Wandschale) lagen sie meist deutlich über den Feuchten der anderen Zellen. Dies konnte schon dadurch nachvollzogen werden, daß nur an dieser Stelle des östlichen Kreuzganges die Wand aufgrund ihrer starken Durchfeuchtung gänzlich grün durch Algenbefall war. Messungen der Bodenfeuchte am 11.07.1997 gaben schließlich Aufschluß über den sehr unterschiedlichen Wassergehalt der Zellenböden. Der weitaus höchste Wassergehalt wurde im Zellenboden der Zelle 5/1 (Temperierung) nachgewiesen, dann folgte die Kachelofenzelle. Deutlich geringer liegen die Bodenfeuchten in Hypokausten- und Heizkörperzelle, darunter wieder die in den Zellen mit Heizleiste und Fancoil.

Raum Nr.	Heizung	Folie	Probe feucht	Probe trocken	Sättigung	Wassergehalt	Sättigung
		g	g	g	g	%	%
3.1	Kachelofen	0,35	14,07	12,65	17,85	**11,54**	42,28
3.2	Heizleiste	0,35	18,31	16,8	24,23	**9,18**	45,17
4.1	Heizkörper	0,35	19,83	17,99	26,5	**10,43**	48,24
4.2	Fan-Coil	0,35	14,28	13,27	19,65	**7,82**	49,38
5.1	Temperierung	0,35	21,54	18,8	26,85	**14,85**	43,63
5.2	Wandschale	0,35	16,54	14,95	21,02	**10,89**	41,58

Tab. 5.1.2:
Messung der Bodenfeuchte in den Meßzellen

Die Ergebnisse zeigen 2 Gruppen:

1. Geringere Bodenfeuchte in den Halbzellen mit Heizleiste, Fan-Coil und Wandschale
2. Große Bodenfeuchte in den Halbzellen mit Kachelofen, Heizkörper und Temperierung (3/1, 4/1, 5/1)

Dabei fällt allerdings die extreme Bodenfeuchte in der Halbzelle mit Temperierung auf. Ferner erstaunt es, daß die drei nach Südosten gelegenen Zellen deutlich höhere Werte zeigen als die im gleichen Haus liegenden, nach Nordosten weisenden Zellen.

Zu Beginn der Forschungsarbeiten ging man davon aus, daß in allen Zellen neben neuen Fundamenten auch Estriche auf Rollierung von ca. 20 cm Höhe eingebracht würden, so daß die vom Zellenboden aufsteigende Feuchtigkeit gestoppt wäre. Leider gab es für diese Maßnahmen keine Budgetmittel mehr, so daß die Horizontalisolierungen entfielen. Stattdessen wurde nur am Rand ein Rollierungsstreifen von 1 m Breite und gleicher Höhe hinter einer Brettschalung eingebracht. Die Installation aller Heizsysteme wurde nun auf ein 5 cm über dieser Schicht liegendes Niveau bezogen. Wegen der geringen Wärmeleitfähigkeit mineralischen Materials waren daher weder die Heizleiste, noch die Temperierung, deren untere Leitung dadurch 30 cm von der Wand-Rohbodenecke entfernt waren, in der Lage, auf die aufsteigende Feuchte einzuwirken. Dies wurde im Oktober des 2. Meßjahres in der Temperierzelle korrigiert durch Wegräumen der Rollierung und Anmörteln eines an allen Wandsockeln in der kritischen Zone umlaufenden elektrischen Heizkabels (s. Abb. 5.1.2).

Bevor dieser Zusammenhang erkannt war, versuchte die Arbeitsgruppe, die starke Feuchtebelastung durch Auflegen von Folien auf den Zellenböden zu verringern, bzw. durch Aufdecken und Schließen der Folien Auswirkungen auf die Feuchte im Raum zu erhalten. Leider konnte keinerlei Unterschied zwischen dem Zustand mit und ohne Folie beobachtet werden, was damit zu erklären ist, daß durch Folienstöße und Wandanschlüsse und die untemperierte unterste Wandsockelzone selbst noch starker Feuchteaustausch stattgefunden hat.

Abb. 5.1.2:
Detail der Temperierzelle (5/1) mit Anordnung der Sensoren. Das Bild zeigt den Zustand während der Montage des Heizkabels in der Rohboden-Wand-Ecke. Der Kies ist vor die Brettschalung umgelagert. Der obere Wärmeflußsensor liegt zwischen den eingeputzten Temperierrohren, der untere (für die Arbeiten demontiert) mit seinem unteren Ende auf dem Putz vor dem Vorlaufrohr (heller Streifen). Rechts von der Raumecke ist der Putzoberflächentemperaturfühler am Vorlauf und oben die Meßanordnung für Bewegung und Oberflächentemperatur der Bildtafel zu sehen.

6. Thermographieaufnahmen, Wärmeflußmessungen

Thermographieaufnahmen von den Außenseiten der Meßzellen, aufgenommen am 28. Januar 1997 zwischen 6:13 und 6:57, erbrachten überraschende Ergebnisse. Auf dem folgenden Photo sieht man zunächst die Situation der Zellen in natura.

Abb. 6.1.1:
Anordnung der Häuser 5-6.

Die Thermographieaufnahmen (Abb. 6.1.2 bis 6.1.4) zeigen die Oberflächentemperaturen der Ostwände der Häuser 3 bis 5. Sie liegen zwischen + 4,9° C an den Folienflächen, wo die unteren Fensterflügel fehlen, bzw. + 3,02° C an den erhaltenen Oberlicht-Doppelfenstern, und - 1,2° C an den Giebelflächen der Kaltdächer. Allgemein gilt die Annahme, daß durch eine direkt beheizte Außenwand ein größerer Wärmefluß nach außen fließt, als durch die eines Hauses mit konventioneller Heizung (konvektive Radiatorenheizung). Zwei Beobachtungen scheinen dies zu bestätigen: Während die Erdgeschoßwand von Haus 5 (Wandheizung) auf ganzer Fläche eine intensive Rotfärbung zeigt, treten bei den Häusern 3 und 4 nur die schwächeren Wandbereiche (Fensternischen, Stärke 50cm) vor der übrigen Wandfläche (Stärke 80 cm) deutlicher hervor. Betrachtet man aber Thermographien stärkerer temperierter Außenbauteile in Kenntnis der Rohrpositionen, so stellt man fest, daß die Temperaturfarben nichts mit der Lage der Rohre, dafür umso mehr mit Stärke und Rohgewicht des Wandaufbaus zu tun haben.

Dies wurde untermauert durch eine im April 1997 vom österreichischen Bundesministerium für Wirtschaft während der Messungen in Auftrag gegebene Studie zum Wärmefluß. Dabei wurden die Wärmeflusse in der Außenwand von Heizkörperzelle (4/1) und Temperierzelle (5/1) verglichen. Die Ergebnisse widerlegten die o. a. Annahme: Im Vergleich zur Wand des konventionell beheizten Raumes floß nicht nur weniger Wärme nach außen durch die direkt beheizte Wand, sondern darüberhinaus nahm diese Wand mehr Wärme bei Sonneneinstrahlung auf als die Außenwand der „luftbeheizten“ Zelle. Es drängt sich daher die Vermutung auf, daß Thermographien stärkerer temperierter Außenbauteile weniger die Transmissionswärmeverluste zeigen, als vielmehr die Abstrahlung der Strahlungsgewinne des Vortages, die in den trockenen, weil temperierten Bauteilen besser eingespeichert werden als in normal feuchten Außenwänden. Vor diesem Hintergrund sieht man auch die folgenden Thermographieaufnahmen „mit anderen Augen“.

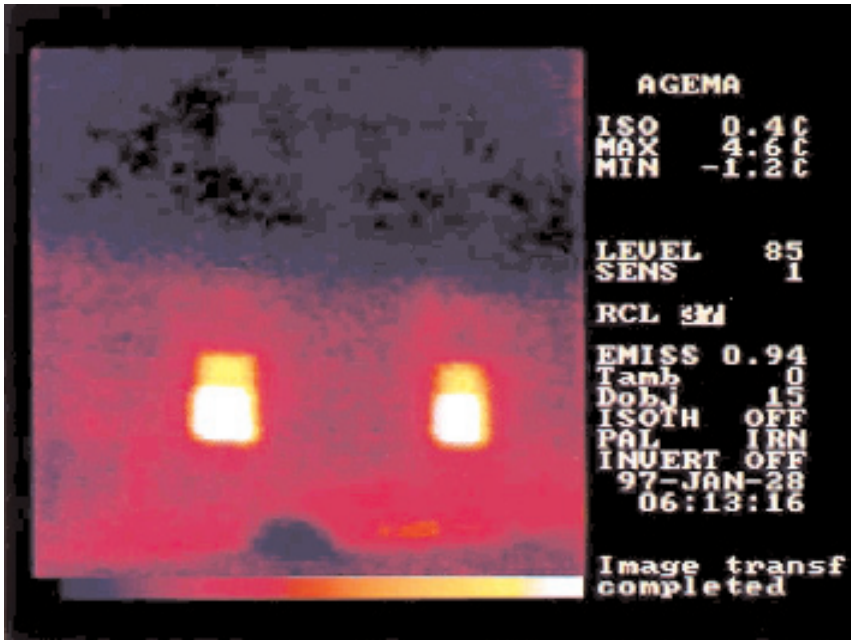


Abb. 6.1.2:

Die Unterschiede in den verschieden starken Wandflächenbereichen zeigen sich bei den luftgeheizten Räumen im folgenden Bild deutlicher.

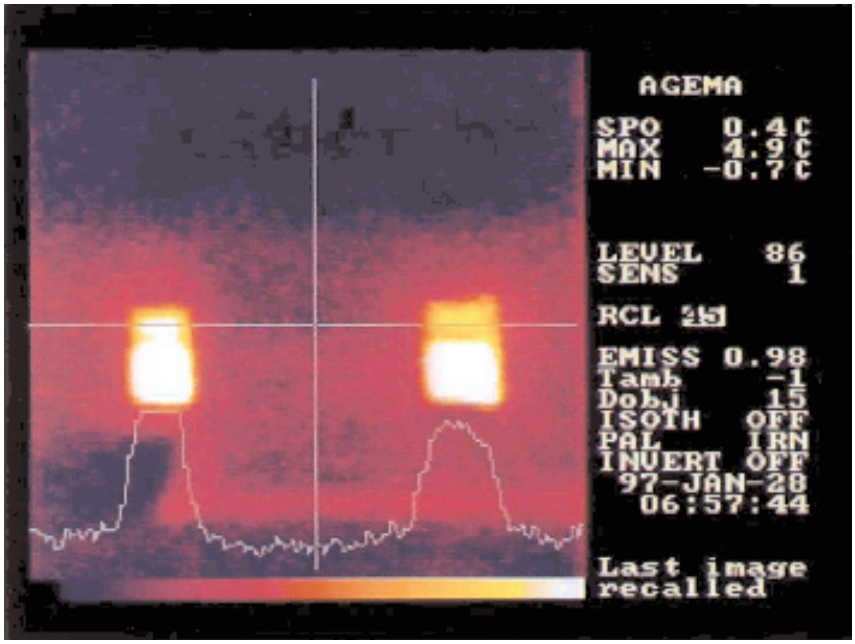


Abb. 6.1.3:
Thermographieaufnahme von Haus 4 (Heizkörper- und Fancoilzelle)

Bei Haus 5 mit den Wandheiztechniken zeigt sich die stärkste Abstrahlung, die nach der Wärmeflußmessung als Folge der verbesserten Strahlungswärmeaufnahme gedeutet werden kann.

Abb. 6.1.4 Thermographieaufnahme von Haus 5 (Temperierung und Wandschale)

Die wichtigsten Ergebnisse der Wärmeflußmessung sind in Abb. 6.1.6 zu sehen:

1. In der Ebene eines unter dem Innenputz einer Außenwand liegenden Temperierrohres (HWau, dunkelblau) ist der Wärmefluß außen nicht höher als in einer ca. 40 cm darüber befindlichen Ebene (HWao, hellgrün).
2. Bei gleicher Raumtemperatur ist der Wärmefluß in der Außenwand, der von einem Temperierrohr ausgeht, geringer als der durch einen Heizkörper verursachte (HRao, rot).
3. Selbst bei einer um 6 K höheren Raumtemperatur (Temperierzelle 22° C, Heizkörperzelle 16° C) konnte dieses Phänomen der geringeren Verluste einer direkt beheizten Außenwand nachgewiesen werden.

Das verblüffende Meßergebnis, daß eine direkt beheizte Außenwand einen geringeren Wärmefluss nach außen und eine höhere Wärmeaufnahme bei äußerer Zustrahlung hat als die Außenwand eines konventionell beheizten Raumes, hat wohl zwei Gründe:

1. Die temperierte Wand wird trocken, da sie nicht nur Feuchte nach außen abgibt, sondern zugleich keine neue Feuchte aus der Raumluft aufnimmt.
2. Die Kerntemperatur der temperierten Wand ist stabiler als die von Wänden konventionell beheizter Räume (s. Abb. 7.1.7).

Diese Ergebnisse widersprechen den der üblichen Planungspraxis zu Grunde liegenden Annahmen zu Wärmeleitung, Wärmespeicherung und Wärmebedarfsberechnung.

Auch eine weitere Forschungarbeit zur Erhaltung von Wandmalereien (Buildfresc) zeigt, daß die Phänomene einer vertiefenden Analyse wert sind.

Wärmeflußmessungen an Außenwänden des Kreuzganges in der wämeren Jahreszeit, lassen vermuten, daß ein Teil der aufgenommenen Energie in das anstehende Erdreich abfließt, ohne eine Trocknung des Bauteils zu bewirken. Würde durch ein Temperierrohr eine Trocknung im erdnahen Sockelbereich herbeigeführt, könnte die Globalstrahlung ebenfalls zur Bautteiltrocknung eingesetzt, die Salzmigration gestoppt und die wertvollen Wandmalereien gerettet werden.

Die folgenden Photos zeigen die Fühleranordnung zur Wärmeflußmessung in der Temperierzelle.

Abb. 6.1.5:
Fühleranordnung zur Wärmeflußmessung (Temperierzelle)
- Bild 1: Detail der Temperierzelle (innen)
- Bild 2: Detail der Temperierzelle (außen)

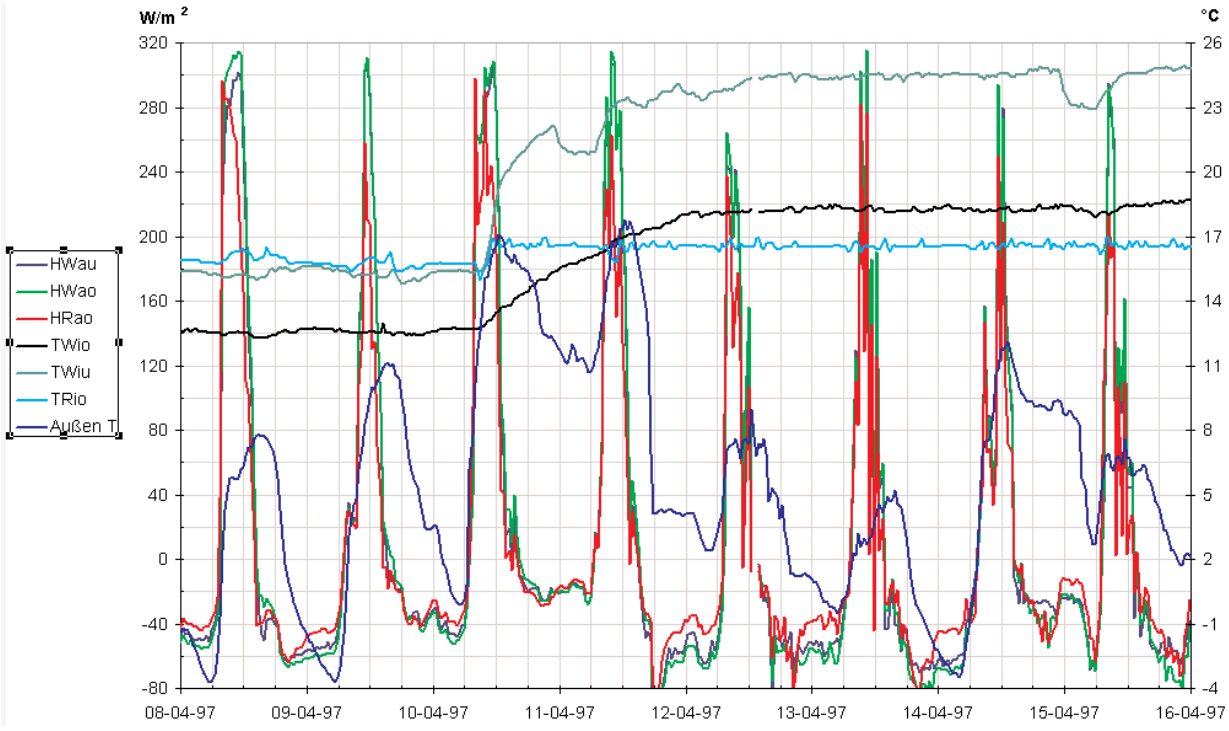


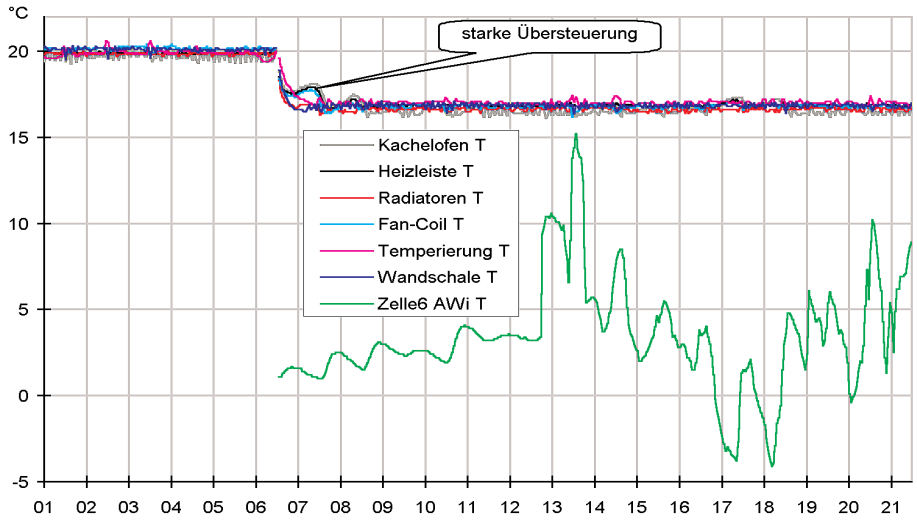
Abb. 6.1.6:
Wärmefluß in der Rohrebene und 40 cm darüber

7. Meßdaten und Auswertung

Aus der großen Datenmenge wurden möglichst plausible Meßergebnisse und Meßkurven mit saisonal typischen und kritischen Zuständen ausgewählt. Die Monatsübersicht des Februar 1997 bis zum 21. zeigt z. B. den Versuch, den Verlauf der Raumtemperaturen beim Absenken der Leistung der Heizsysteme zu beobachten (Abb. 7.1.1). Die im Januar eingestellten „hohen" Raumtemperaturen von ca. 20° C wurden ab dem 6.02.1997 wieder auf das geforderte Maß von ca. 17° C gesenkt.

Dabei trat eine deutliche Übersteuerung bei Kachelofen, Heizleisten und Fancoil ein, während die Temperierung die gleichmäßigste Kurve bei der Absenkung aufweist. Seit diesem Tag zeigte der Außenfühler wieder taugliche Werte an, so daß nachvollzogen werden kann, daß der Vorgang bei ca. 1° C Außentemperatur stattfand. Zwischen dem 12. und 14.02. gab es eine Außentemperaturschwingung von 3 auf 15° C und zurück. Daher wurde vom 12.02. bis zum 15.02. eine Lupe produziert, um die Temperaturverläufe im Detail nachvollziehen zu können.

Abb. 7.1.1: Raumtemperaturen



Die Lupe vom 12.02. - 15.02.1997 (Abb. 7.1.2) zeigt sehr gleichmäßige Raumtemperaturen von ca. 17° C in allen Zellen an, bei einer Außentemperatur, die von + 3 bis 15° C schwankt.

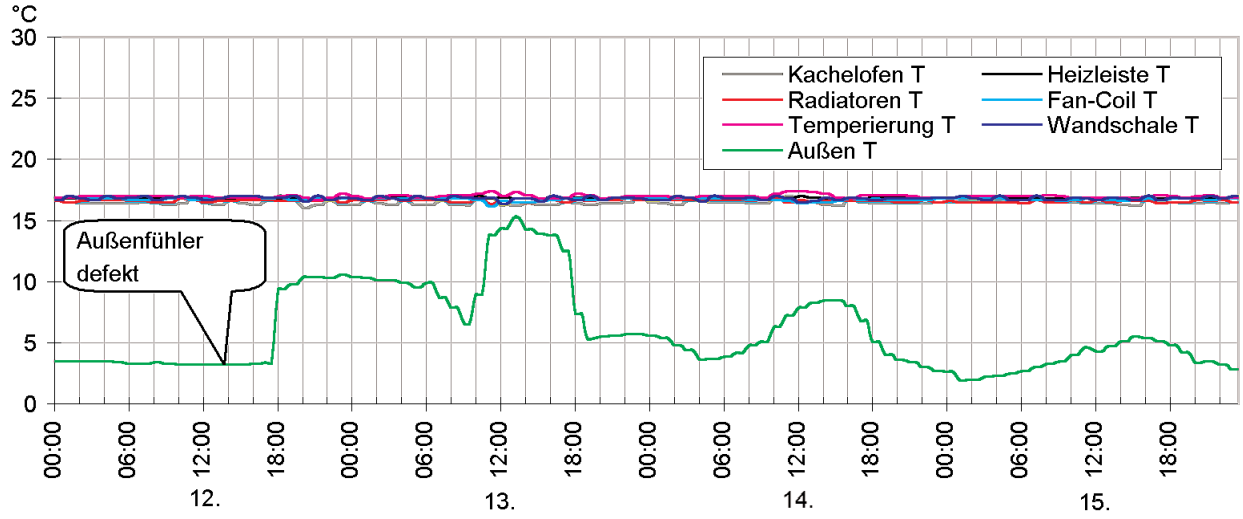


Abb. 7.1.2: Raumtemperaturen 12.2-15.2.97

Am 21.02.1997 war bei einem Logger wieder ein Meßausfall, da wieder einmal ohne Vorwarnung der Forschungsgruppe der Strom abgeschaltet wurde.

Die relative Feuchte in diesem Zeitraum (Abb. 7.1.3) bewegt sich in den Zellen erwartungsgemäß. Sie ist in der Heizkörperzelle am geringsten, da hier die höchste Lufttemperatur vorliegt: Im Gegensatz zum Fancoilgerät, dessen Lüfter die Konvektion unabhängig von der Wassertemperatur erzwingt, hängt die Konvektion beim Heizkörper direkt von der Temperatur seiner Heizflächen ab. Der Unterschied fällt jedoch nicht so deutlich aus wie bei „korrekter“ Rohrmontage (ge-dämmt im Boden in Raummitte), da die beiden Heizleitungen am Sockel, die die Heizkörper versorgen, trotz ihrer Wärmedämmung ständig geringe Wärme-

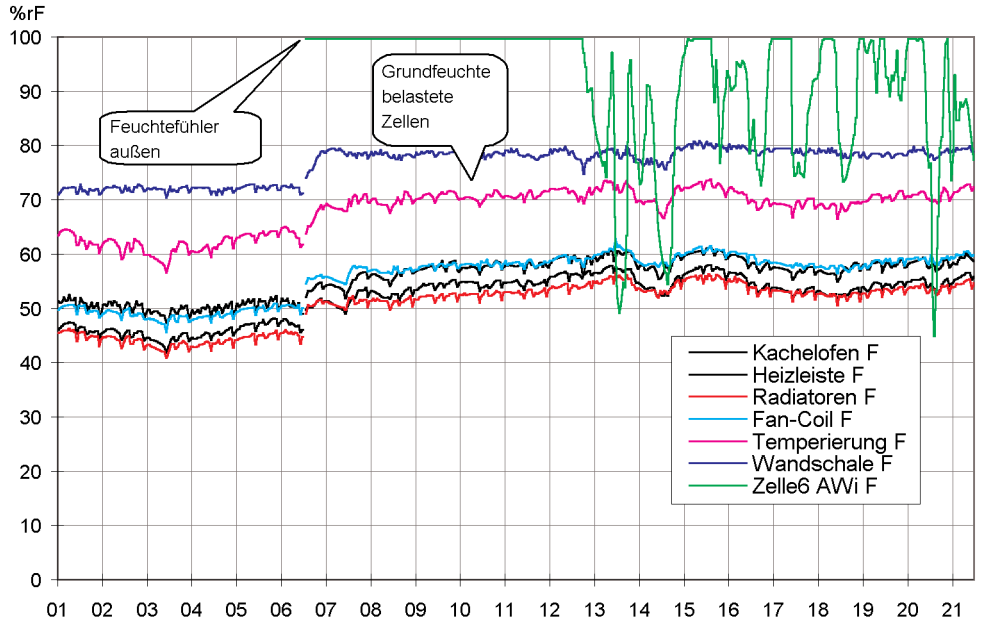


Abb. 7.1.3:
Relative Raumluftfeuchten 01.02-21.02.97

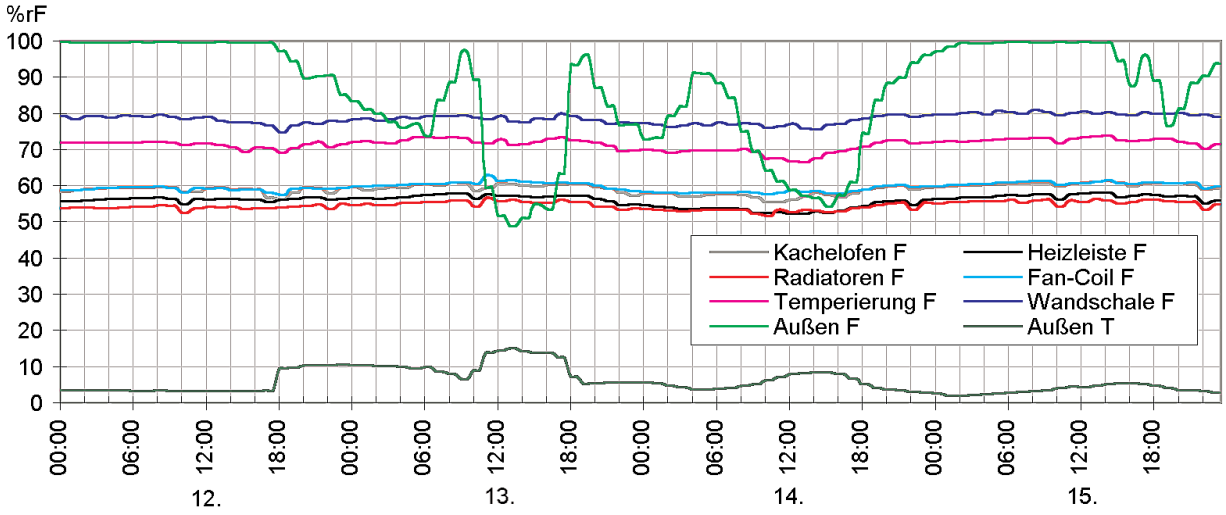


Abb. 7.1.4:
Raumfeuchte 12..-15.2.97

mengen auf 3/4 derGesamtlänge der Außenwände der Zelle abgeben (s. Anlage 2). Die Feuchte in der Temperierzelle ist noch relativ hoch, da ihr Einfluß auf die Bodenfeuchte wegen der zu hohen Rohrposition noch zu gering ist (s. Abb. 7.1.18). Die Feuchte in der Wandschalenzelle liegt um weitere 10% höher, da ihre Wirkung auf die Wandbodenecke noch geringer ist. Die Außenfeuchte ab dem 13.02. (Außenfeuchtefühler wieder intakt) betrug zwischen 45% und 98%.

Die Lupe vom 12.02. - 15.02.1997 (Abb. 7.1.2) zeigt sehr gleichmäßige Raumtemperaturen von ca. 17° C in allen Zellen an, bei einer Außentemperatur, die von + 3 bis 15° C schwankt.

Die Lupe der relativen Luftfeuchte (Abb. 7.1.4) zeigt den bereits angedeuteten Verlauf in den Zellen, wobei die Zellen 5/1 und 5/2 (Temperierung und Wandschale) auf Grund des hohen Grundwasserspiegels während der gesamten Meßperiode stär-ker mit Feuchte belastet waren. Um den Einfluß des offenen Bodens auf die rel. Luftfeuchte der Zelle nachvollziehen zu könnnen, wurden die beiden Zellenböden „in Ersatz“ für den fehlenden Estrich versuchsweise mit Folien abgedeckt. Meßbare Auswirkungen konnten jedoch nicht nachgewiesen werden.

Die Temperaturen an der Außenwand-Innenseite (Abb. 7.1.5) zeigen ähnliche Verläufe, die sich - abgesehen von der Wandschale - weitgehend unabhängig von der Außentemperatur zwischen 13 und 14 ° C bewegen. Die geringsten Kurzzeitschwankungen zeigen in der Vergrößerung (s. untere Grafik) die Kurven von Kachelofen (grau) und Temperierung (pink). Wieder ist zu erkennen, daß die Temperaturkurve der Wandschale erheblich über der Wandoberflächentemperatur der anderen Zellen liegt, wird doch im Zwischenraum der Wandschale durch einen Konvektor die Luft soweit erhitzt, daß die Schalenoberflächentemperatur ausreicht, um den zu geringen Einfluß auf die Fensternischen zu kompensieren. Hier war aus Gründen der Mittelknappheit die Ausbildung einer Schale unterblieben und es waren nur die beiden Verbindungsleitungen ohne Wandkontakt verlegt worden.

Der Verlauf der Temperatur auf der Außenwandaußenseite (Abb. 7.1.6) zeigt die höchste Außenwandtemperatur bei der Kachelofenzelle, gefolgt von der Heizkörperzelle. Dieses Ergebnis erstaunt, weil man vermutet, daß die Temperierzelle auf Grund der eingeputzten Heizrohre die wärmste Außenwandoberfläche hat. Es bestätigt sich einmal mehr die durch die Wärmeflußanalyse vom April 1997 belegte Hypothese, daß sich bei direkter Beheizung eines Außenbauteils der Wärmefluß nach außen verringert. Ursache ist die Verbesserung des U-Werts durch die Bauteil-trocknung, die Folge des stetigen Wärmegefälles im Bauteil und des Kondensatschutzes der Bauteiloberfläche ist, Effekte, die in der Nähe der Heizrohre durch Wärmeleitung und über ihnen durch Warmluftauftrieb hervorgerufen werden.

Auch das folgende Bild der Temperatur in Wandmitte (Abb. 7.1.7) zeigt einen verblüffend höheren Wert bei der Kachelofen- und der Heizkörperzelle. Dies kann aber die Folge der etwas günstigeren Exposition der beiden Zellen gegenüber den anderen sein. Ferner ist bemerkenswert, daß die Temperatur der Wandmitte in der Fancoilzelle am niedrigsten ist.

Wieder zeigt die Kurve der Temperierzelle den geringsten Tagesgang, sowie weniger Kurvenschwankungen mit geringerer Amplitude als die der anderen Zellen. Dies tritt im Sommerfall noch deutlicher hervor (s. Abb. 7.1.28)

Die Temperatur auf dem Tafelbild (Abb. 7.1.8) zeigt bei Kachelofen und Wandtemperierung die gleichmäßigste Ausprägung. Dagegen zeigen sich bei den mit der Raumluftmasse arbeitenden Systemen, Heizkörper und Fancoil deutlich die Regelhysteresen. Dies gilt auch für die Wandschale und die Heizleiste, da der Kleinkonvektor ebenfalls rasch zu hohe Leistung bringt.

Die höheren Ausschläge bei der Temperierung erklären sich daraus, daß die Tafelunterkante knapp über der Putzabdeckung des Rücklaufrohres an der Wand anliegt. Der Auftrieb steigt also *vor* der Tafel auf, so daß der Fühler auf der Oberfläche die wechselnde Leistung zeigt.

Die Erfassung der Holzbewegung in der Lupe vom 12.02. bis 15.02.1997 ((Abb. 7.1.9) läßt erkennen, daß die Temperierung und der Kachelofen die geringsten Kurzzeitschwankungen zur Folge haben. Die Holzbewegungen in der Heizkörper-, Wandschalen- und Heizleistenzelle zeigen dagegen ebenso wie die in der Fan-coilzelle ständige regelungsbedingte Kurzzeitänderungen. Dabei dürfen die Abweichungen nicht als quantitatives Abbild der tatsächlichen Holzbewegungen gesehen werden. Sie zeigen nur die Änderung der Bewegungsrichtung an. Der

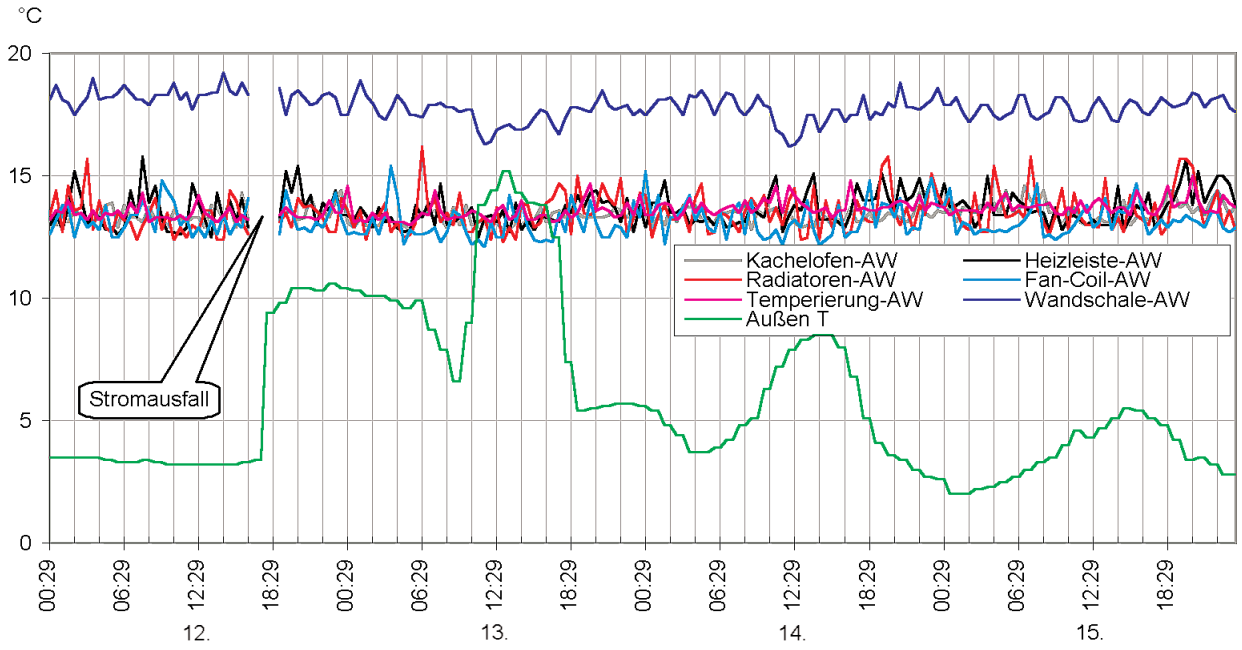
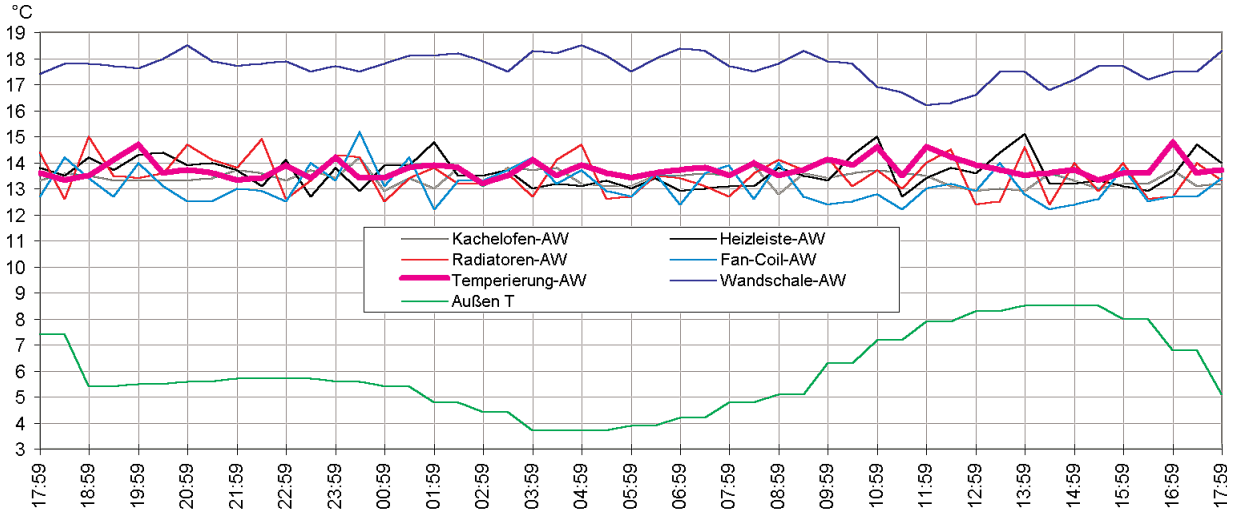


Abb. 7.1.5:
Temperatur der Außenwand-Innenseiten 12.2-15.2.1997



Detail aus Abb. 7.1.5:
Tagesgang der Temperatur der Außenwand-Innenseiten 14.-15-02.1997

Grund für die starke Ausprägung der Änderungen bei der Temperierung liegrt in der falschen Hängung (s. o.). Die Forderung nach Erfassung der Holzbewegung wurde erst im Laufe der Meßkampagne gestellt. Da marktübliche Sensoren bei Kauf den Budgetrahmen des Projektes gesprengt hätten, wurde hierfür vom Team ein einfacher Sensor entwickelt.

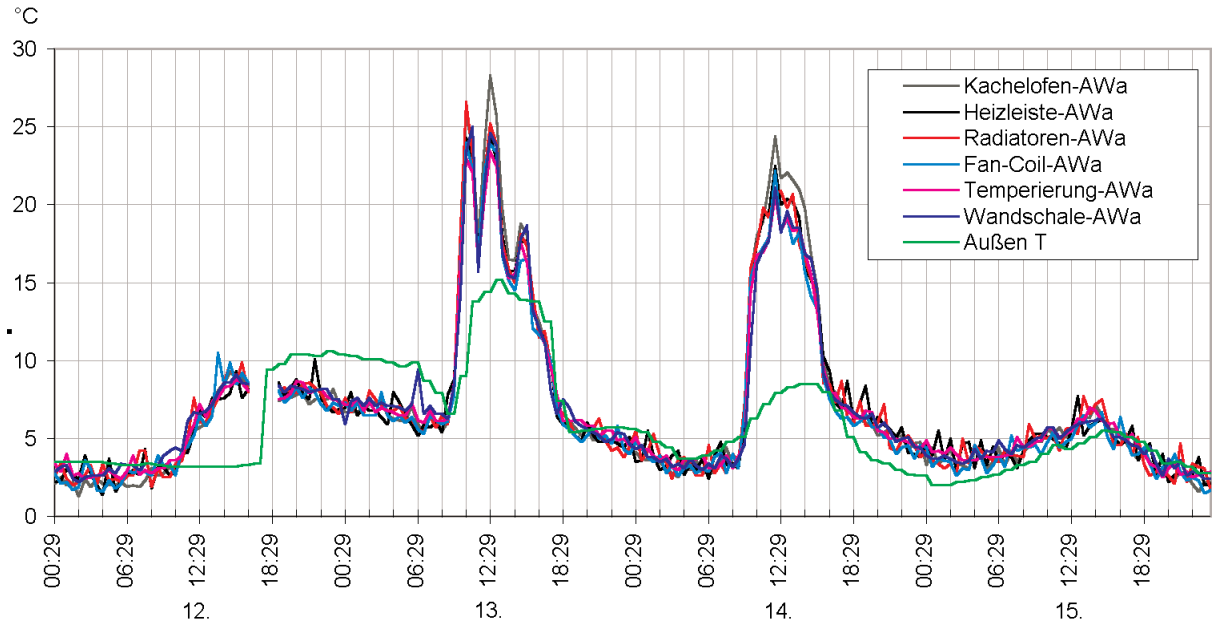


Abb. 7.1.6:
Temperatur der Außenwand-Außenseiten 12.02.-15.02.1997

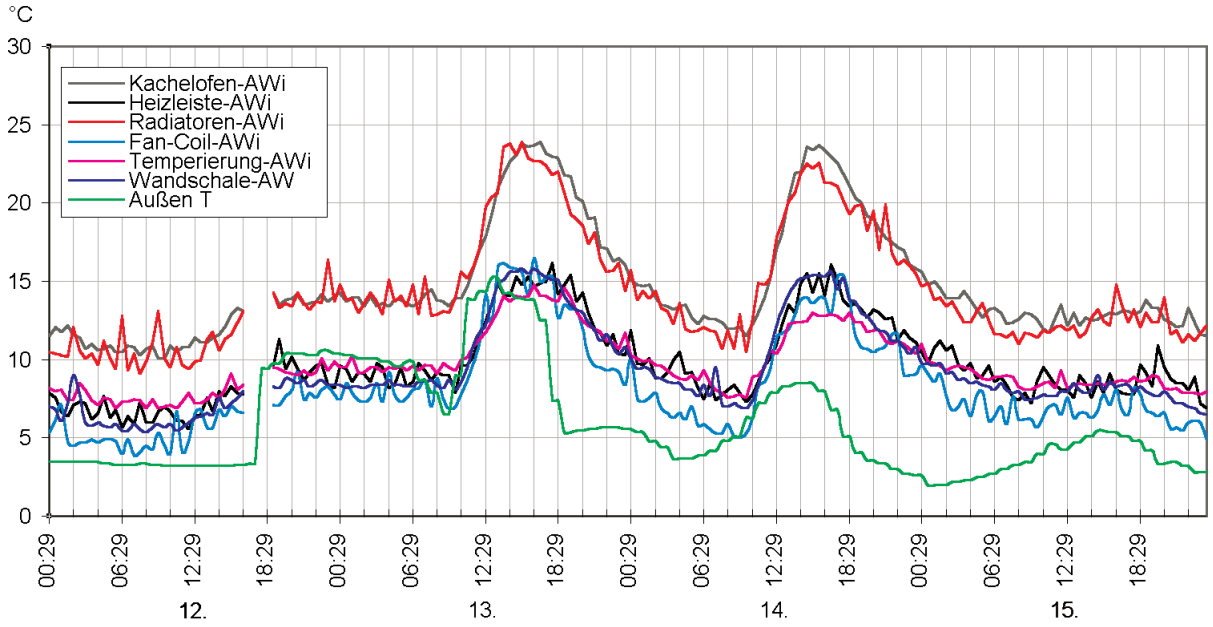


Abb. 7.1.7:
Temperatur in der Wandmitte 12.02.-15.02.1997

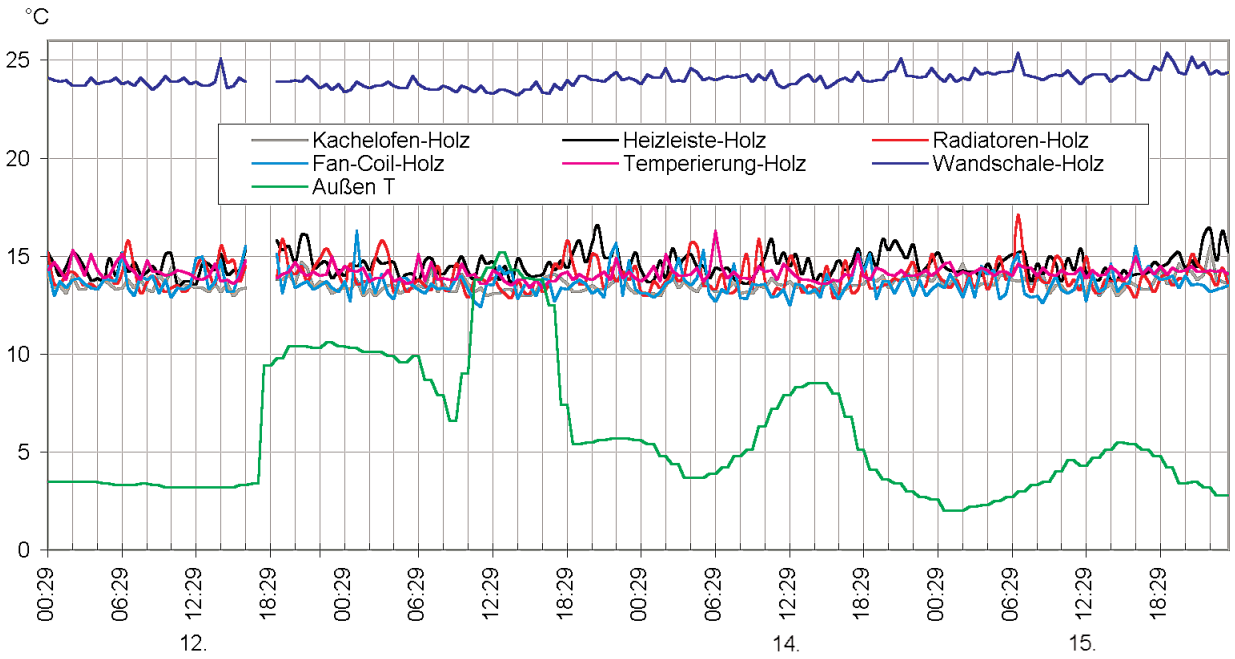


Abb. 7.1.8:
Temperatur auf den Holztafeln 12.02-15.02.1997

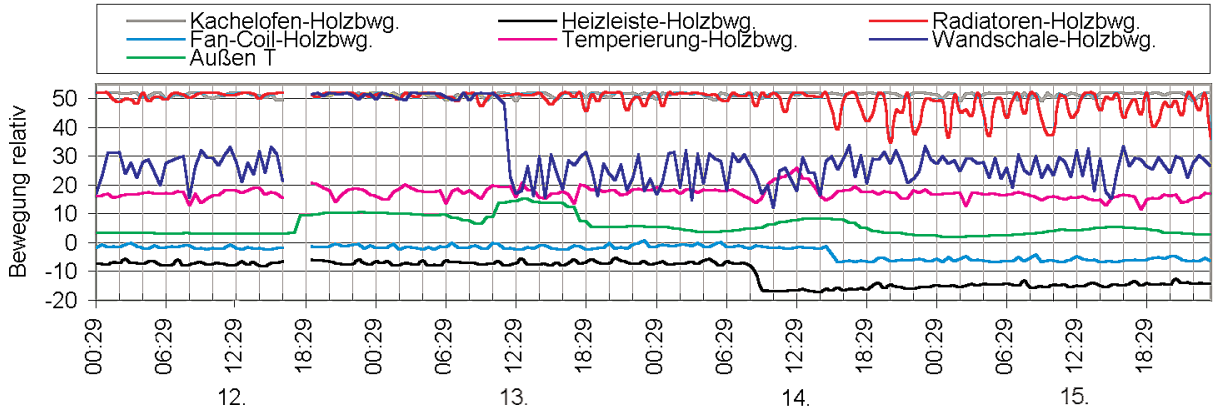


Abb. 7.1.9:
Holzbewegung 12.02-15.02.1997

Weitere aufschlußreiche Lupen im Februar 1997 sind jene vom 20. bis zum 21.02.. Die folgende Graphik zeigt zunächst das Außenklima des Monats ab dem 12.02., als der Außenfühler wieder voll funktionsfähig war.

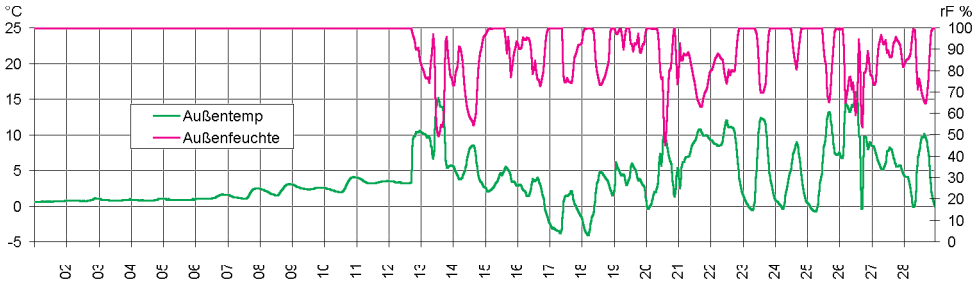


Abb. 7.1.10:
Außentemperatur und Außenluftfeuchte vom 2.02. - 28.02.1997

Die Betrachtung der Temperaturen in der Wandmitte (nächste Abb. 7.1.11-16, Awi blau) zeigt eindeutig, daß diese bei Kachelofen, Temperierung und Hypokauste am gleichmäßigsten sind.

Die Temperatur der Holztafel (K-HOLZ, schwarz) liegt bei der Temperierung sehr nahe bei der unteren Wandtemperatur. Bei der Heizkörperzelle liegt die Holztemperatur ebenfalls dicht bei der unteren Wandtemperatur. Die Außentemperatur in den zwei verschiedenen Höhen, nämlich unten und ca. 2 m höher, liegt bei der Temperierung fast identisch. Bei der Heizkörperzelle liegt der obere Meßbereich R-AWa (dunkelblau) etwas über der roten Außentemperatur im Bodenbereich. Dies muß im Vergleich zur Temperierzelle erstaunen, da dort die eingeputzten Heizrohre einerseits eine größere Wandoberflächentemperatur außen hätten vermuten lassen, ebenso wie einen höheren Wärmefluß am Fuße der Mauer, wo das Vorlaufrohr kraftschlüssig in der Mauer eingeputzt ist.

Auch hier läßt sich wiederum der Nachweis erbringen, daß mit einer Temperierung ausgerüstete Außenwände durch die Stützung der Wandmitteltemperatur geringerer Beanspruchung durch thermische Spannungen (= de facto Mikrozerstörung und künstliche Alterung) ausgesetzt sind, da es in einer solchen Mauer weniger Temperatursprünge gibt.

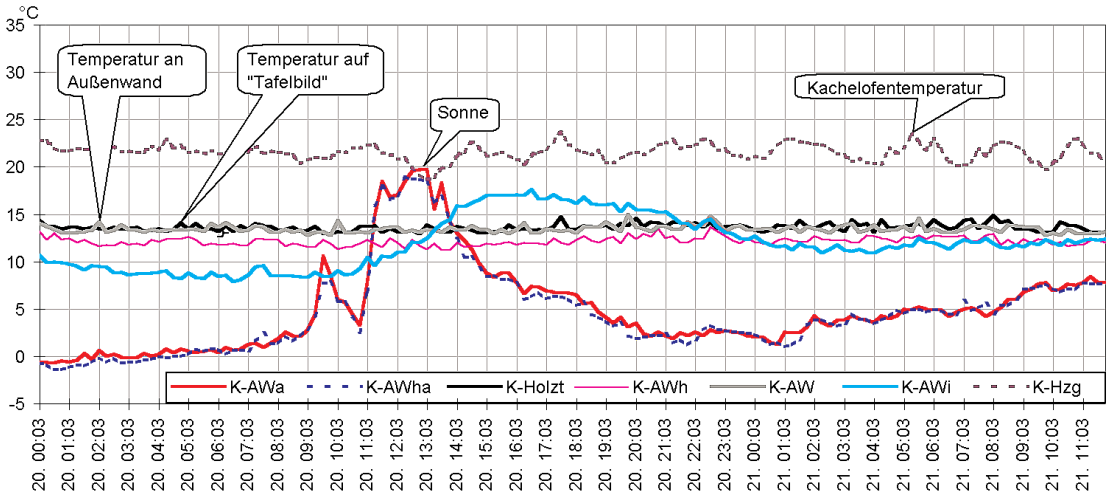


Abb. 7.1.11:
Temperaturen in der Kachelofenzelle 20.02.-21.02.1997

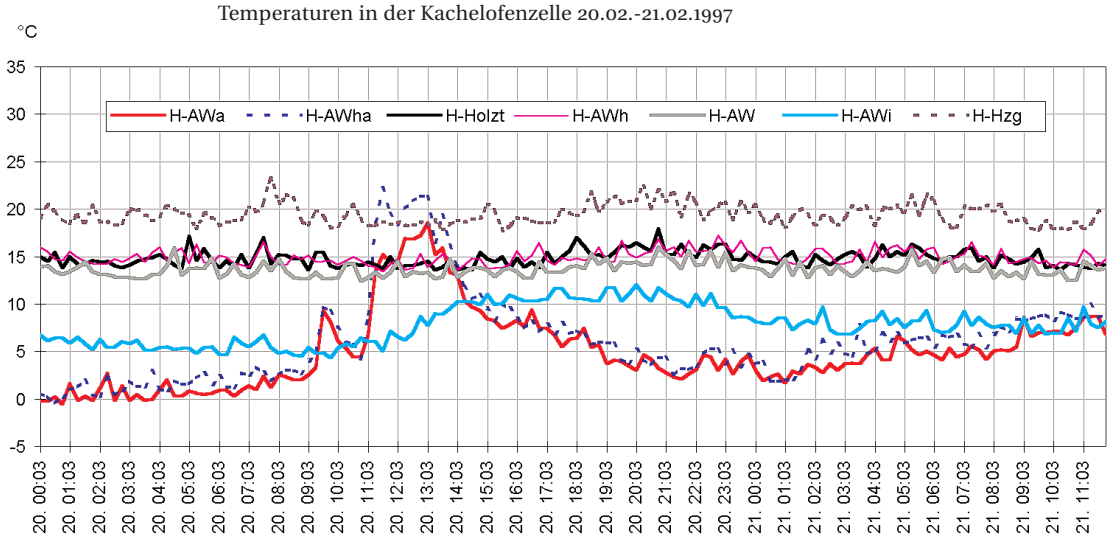


Abb. 7.1.12:
Temperaturen in der Heizleistenzelle 20.02.-21.02.1997

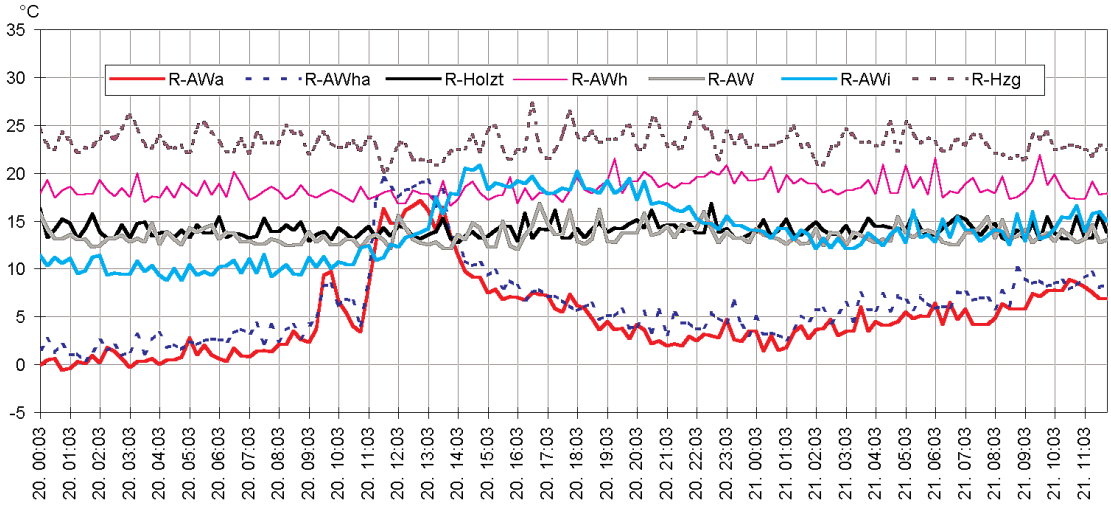


Abb. 7.1.13:
Temperaturen in der Heizkörperzelle 20.02.-21.02.1997

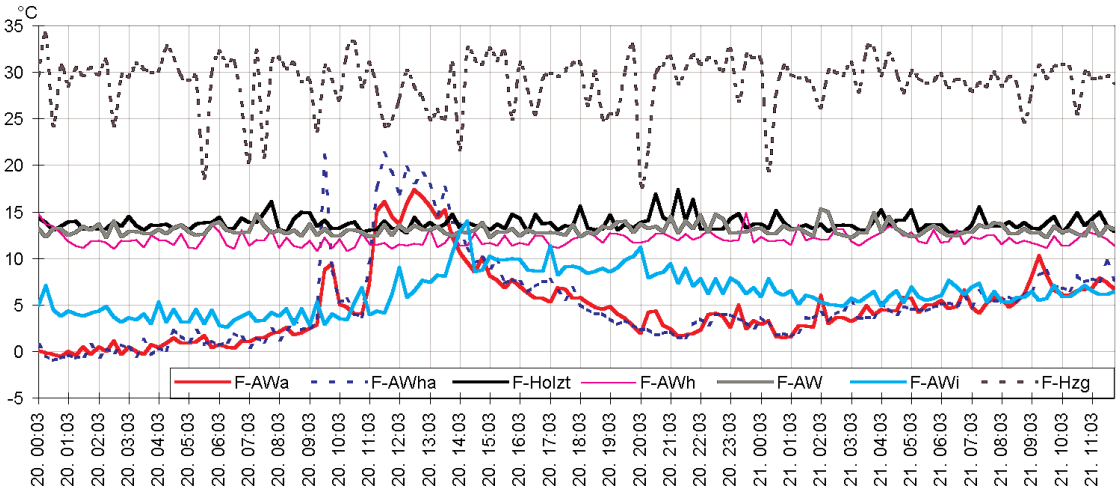


Abb. 7.1.14:
Temperaturen in der Fancoilzelle 20.02.-21.02.1997

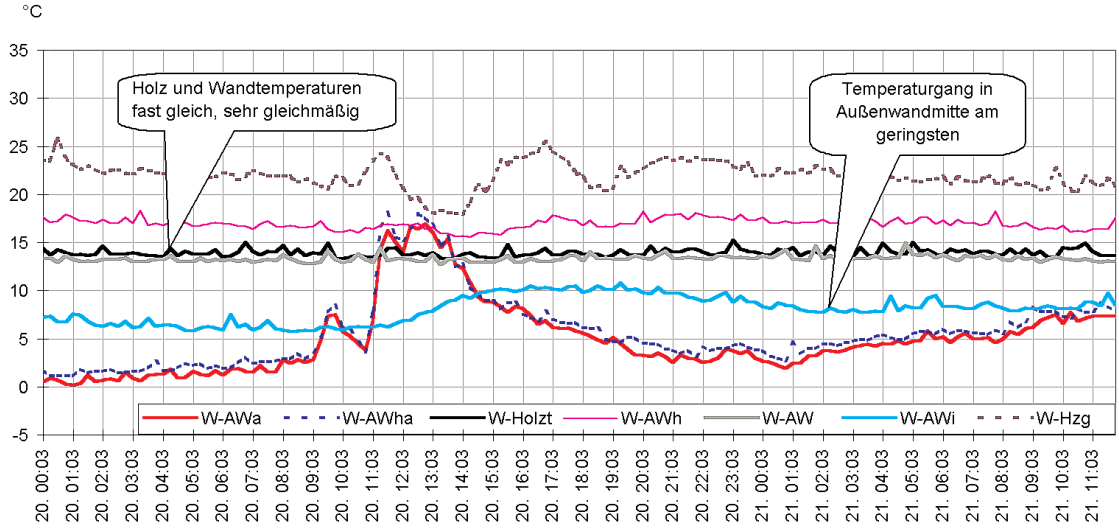


Abb. 7.1.15:
Temperaturen in der Temperierzelle 20.02.-21.02.1997

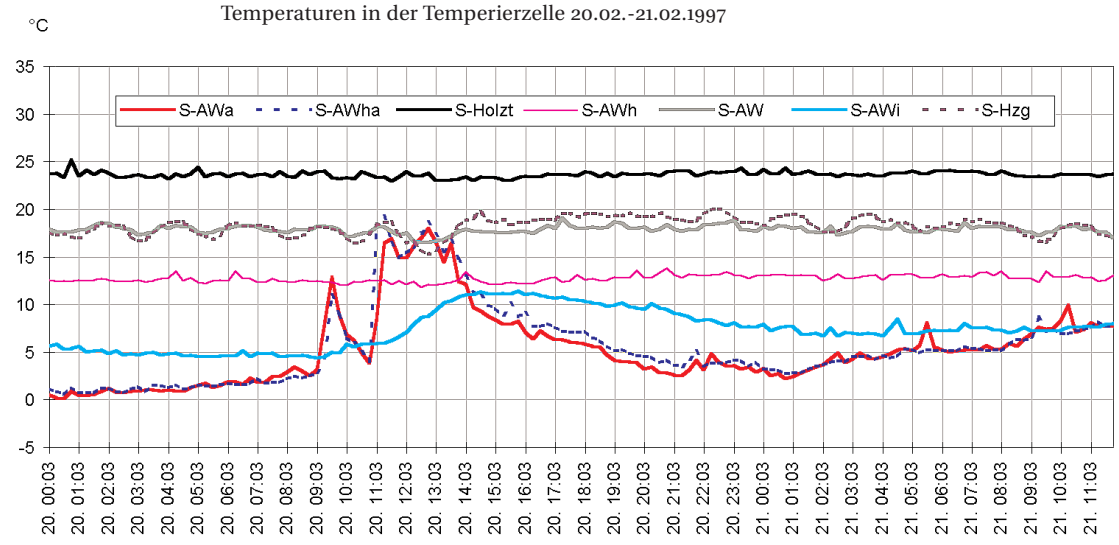


Abb. 7.1.16:
Temperaturen in der Wandschalenzelle 20.02.-21.02.1997

Als letzter Winterfall wird nochmals der März 1998 diskutiert, wo man im Überblick Außentemperaturen von -7 bis fast 20° C hat.

Die Graphik des Raumtemperaturverlaufs zeigt, daß wieder ein Mischer Störungen hatte und später ganz ausfiel (Fancoilheizung). In der Temperierzelle wurde Ende Oktober 1997 ein selbstregelndes Elektro-Heizband mit 2 kW Leistung zusätzlich installiert. Es wurde um 30 cm tiefer als das bestehende Temperierrohr montiert, da der berechtigte Verdacht bestand, daß dieses einen zu geringen Einfluß auf die Sockel- und Bodenfeuchte hat, da es nicht direkt in der Boden-Wand-Ecke montiert wurde - man hatte ja noch auf einen Fußbodenaufbau mit Estrich gehofft, der dann aus Kostengründen entfallen ist -, sondern in Höhe Rohboden + 30 cm. Diese (zu hohe) Montage hatte, wie die letzten zwei Meßjahre bewiesen haben, nicht verhindern können, daß die Zelle wegen der hohen Bodenfeuchte kontinuierlich eine zu hohe Raumluftfeuchte aufwies.

Zur Messung des Stromverbrauches wurde das Heizkabel an einen eigenen Stromsubzähler gehängt.

Der Verlauf der Raumtemperatur zeigt, daß es bis zu Außentemperaturen um 5° C die verlangte Raumtemperatur von 15° C halten konnte. Ging aber die Temperatur unter den Gefrierpunkt bzw. unter -5° C, so reichte das Heizkabel von seiner Heizleistung nicht aus, um die Raumtemperatur von 15° C zu halten. Es wurde daraufhin mit Hilfe der eingebauten Regelung die Warmwasserheizung so gesteuert, daß in jedem Fall die geforderten 15° C Raumtemperatur, die die Grundlage der Vergleichbarkeit der Zellen gewährleistet, eingehalten wurde. Gegen Ende des Monats März 1998 war dann wieder einmal der Mischer - wie schon zu Beginn des Monats - in der Fancoilzelle kaputt. Diese fiel auf 10° C Raumtemperatur, wobei sie vorher über 20° C warm war.

Generell machen die Unregelmäßigkeiten in der Heizwärmeversorgung der Zellen den Vergleich der Energieverbräuche der Zellen sehr schwierig, wenn nicht sogar unmöglich.

Der Vergleich der relativen Luftfeuchte außen und in den Zellen zeigt zum ersten Mal im März 1998 den kaum mehr erhofften Erfolg, daß sich die relative Luftfeuchte in der Temperierzelle - trotz des hohen Grundwasserspiegels und hoher Außenluftfeuchte (zwischen 60 und 90%) - dem Feuchtemaß der anderen Zellen - um die 50% - angeglichen hat. Nur die relative Feuchte in der Wandschalenzelle blieb weiterhin um die 65 - 70%.

Endlich konnte der Nachweis erbracht werden, daß mit einer richtig situierten Temperierleitung auch starker Drang von flächigem Grundwasser ins aufsteigende Mauerwerk und in den Raum hinein wirksam bekämpft werden kann.

Abgesehen von der Wandschalenzelle zeigen die Temperaturen an der Außenwand innen in der folgenden Lupe (18.03. - 22.03.1998) einen sehr konstanten Verlauf, wobei hervorzuheben ist, daß auch das Fancoilgerät eine zackenarme Temperaturlinie um die 15° C aufweist, dies aber mit einer sehr hohen Luftkonvektion schafft. Die Wandschale muß, wie erwähnt, die Unterversorgung der Fensterachse kompensieren.

Die Temperatur auf der Außenwand außen ist wiederum bei der Kachelofenzelle und der Fußleistenheizung am höchsten. Die Temperierzelle befindet sich mit Heizkörper- und Fancoilzelle im Mittelfeld.

Im Rahmen einer Querschnittsmessung, die die Temperaturprofile der Außenwände von außen nach innen aufnimmt, kann man die Temperaturverläufe in den entsprechenden Bauteilen der verschiedenen Zellen vergleichen. Betrachtet man die Temperatur auf der Außenwand-Innenseite in 0,5 m über Fußbodenoberkante und in ca. 2,00 m Höhe, so zeigen die Zellen mit Kachelofen, Heizleiste, Fancoil und Temperierung einen geringen, die Zellen mit Heizkörperheizung und Hypokauste einen hohen Gradienten (s. Anhang, Datenblätter mit Temperaturangaben).

Auch die Temperatur in der Wandmitte zeigt den gleichmäßigsten Verlauf bei der Temperierung. Dies ist wegen der eingeputzten Heizrohre leicht nach-

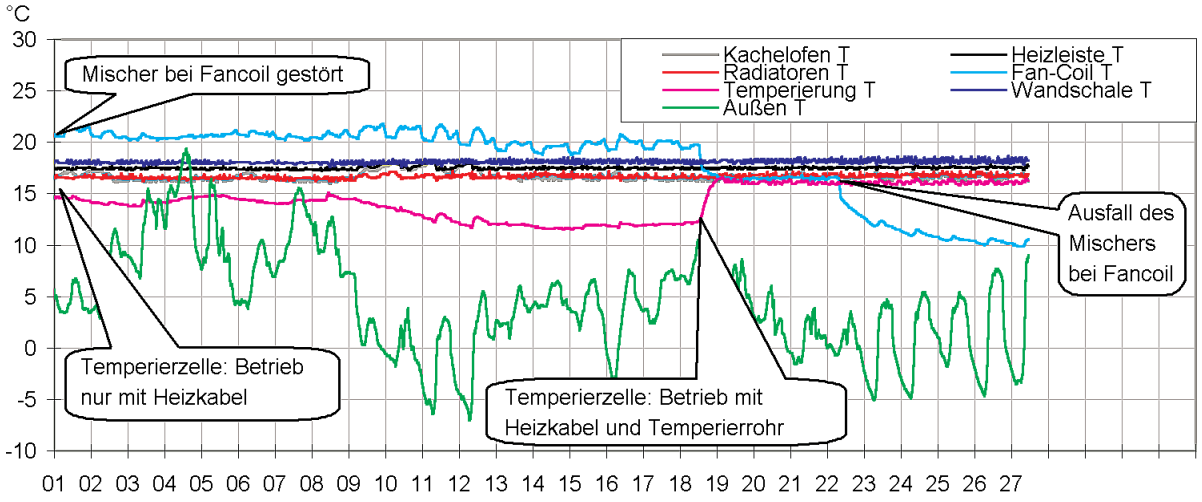


Abb. 7.1.17:
Außentemperatur und Raumtemperaturen 1.03.-27.03.1998

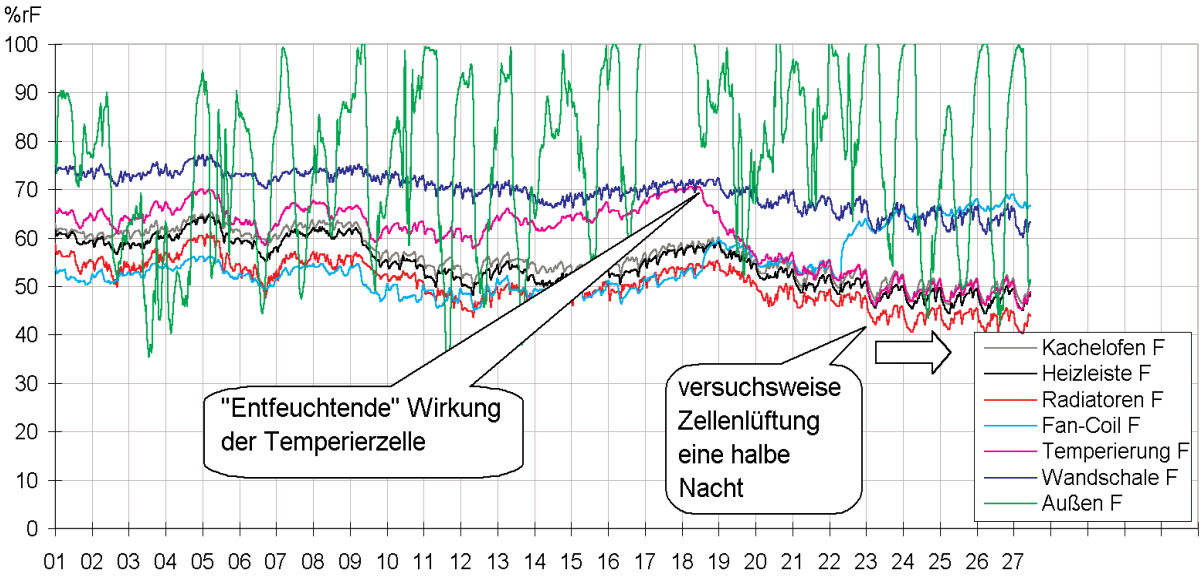


Abb. 7.1.18 Feuchte in den Zellen 1.03.-27.03.1998

zuvollziehen. Die restlichen Zellen laufen gemäß der Außentemperatur in fast parallelen Amplitudenausschlägen mit.

Die Temperatur in der Wandmitte bei der Heizkörperzelle (mit ziemlichen Zacken), beträgt 6,5 - 14,5° C und bei der Temperierzelle 8,5 - 17° C als sehr glatte Linie. Insgesamt ist zu bemerken, daß generell der Temperaturverlauf nach der Aufheizphase vom 18.-19.03. sehr geglättet bei der Temperierung ist. Dagegen ist bei der Heizkörperzelle die Tagesamplitude wesentlich höher

Auch hier läßt sich wiederum der Nachweis erbringen, daß mit einer Temperierung ausgerüstete Außenwände durch die Stützung der Wandmitteltemperatur geringerer Beanspruchung durch thermische Spannungen (= de facto Mikrozerstörung und künstliche Alterung) ausgesetzt sind, da es in einer solchen Mauer weniger Temperatursprünge gibt.

Abb. 7.1.19: Temperaturen Außenwand innen 18.03.-22.03.1998

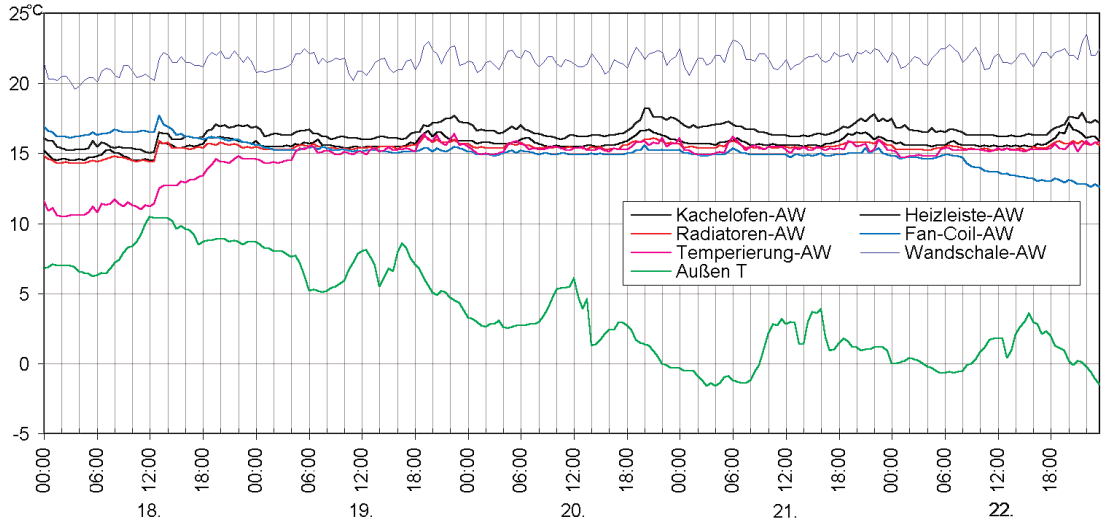


Abb. 7.1.20: Temperaturen in der Wand 18.03.-22.03.1998

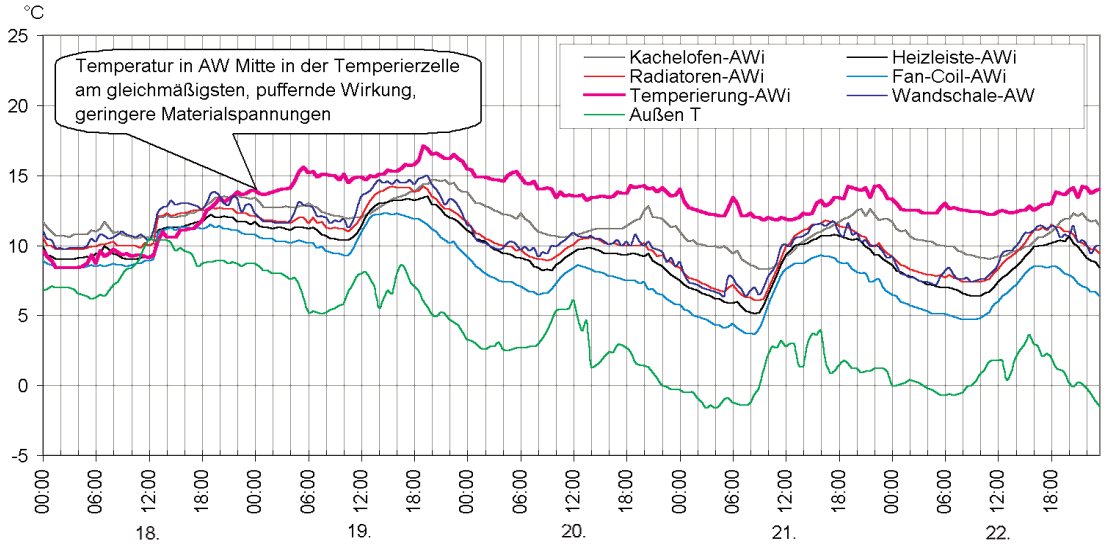
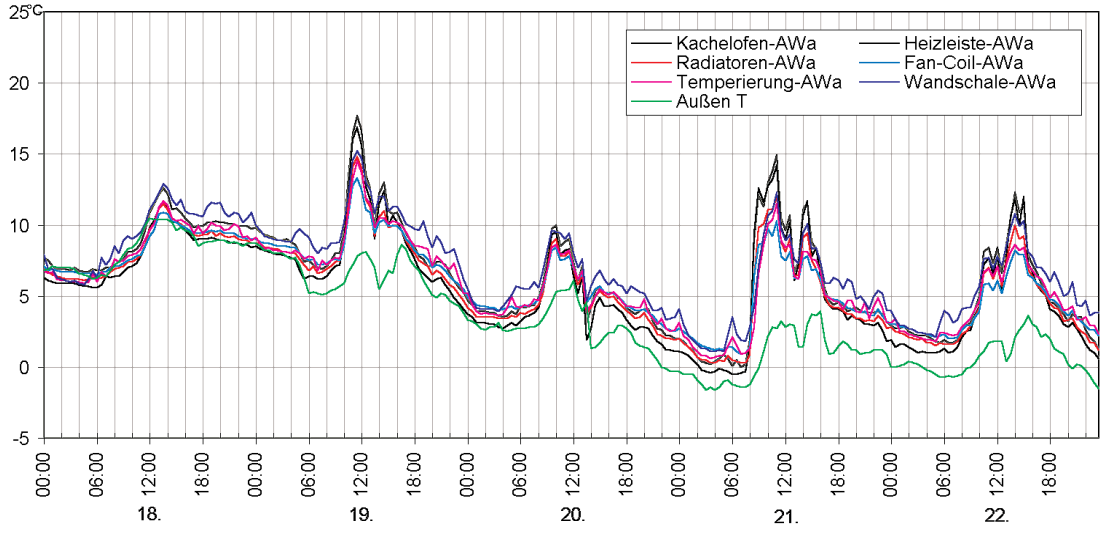


Abb. 7.1.21: Temperaturen Außenwand außen 18.03.-22.03.1998



Die Temperatur im Lupenzeitraum vom 18.03. bis zum 22.03.1998 zeigt wiederum bei allen Tafelbildern eine ziemlich gleichmäßige Temperatur, die etwas über der Raumtemperatur liegt (Abb. 7.1.22). Nur in der Wandschalenzelle liegt die Holztemperatur naturgemäß höher als bei den anderen Zellen, da die Wandschale wegen der unterversorgten Fensterachse höher temperiert werden muß, um die geforderte Raumtemperatur zu erreichen.

Die Temperaturen im Überblick im April 1997 zeigen Außentemperaturen, die von -4 bis +20° C schwanken; es waren also Zeiten, wo es schon wärmere Außentemperaturen mit Sonnenschein gab (Abb. 7.1.23). Vor dem 10. April gab es einige Regelprobleme in den Zellen. So war z. B. die Temperatur in der Kachelofenzelle zu gering, weil wieder einmal der Mischer ausgefallen ist. Nach dem 10.04. wurde dann in der Temperierzelle versucht, durch starke Steigerung der Leistung das Problem der aufsteigenden Feuchte in den Griff zu bekommen. Dies hatte zum Ergebnis, daß die Raumtemperatur in einem Tag bis auf 22° C anstieg (um 7 K).

Auf dem nächsten Meßdatenblatt (Abb. 7.1.24) ist die relative Luftfeuchte außen und in den Zellen zu verfolgen. Die Außenfeuchte (grün) schwankte zwischen 30 und 90%. Die Feuchte der Wandschalenzelle blieb weiterhin bei 80 - 85%. Jene der Temperierzelle sank von über 70 bis unter 40%, was gegen Ende des Monats wie bei der hohen Raumtemperatur von ca. 24° C nicht verwunderlich war. Der Rest der Zellen schwankte zwischen 50 und 70% relative Feuchte.

Die letzte Lupenbetrachtung betrifft den Juli 1997 als eindeutigen Sommerfall. In der Zeit vom 26.07. bis 29.07.1997 zeigt die Temperatur in den nun unbeheizten Zellen einen ziemlich gleichmäßigen Verlauf um 20° C (Abb. 7.1.25). Die Außentemperatur schwankt im Tag-Nacht-Rhythmus zwischen 13 und 26° C. Naturgemäß ist die Raumtemperatur in der Temperierzelle um ca. 2,5 K höher als in den anderen Zellen, da diese ja im Sommer auch mit einer Minimalrücklauftemperatur vom 25° C läuft.

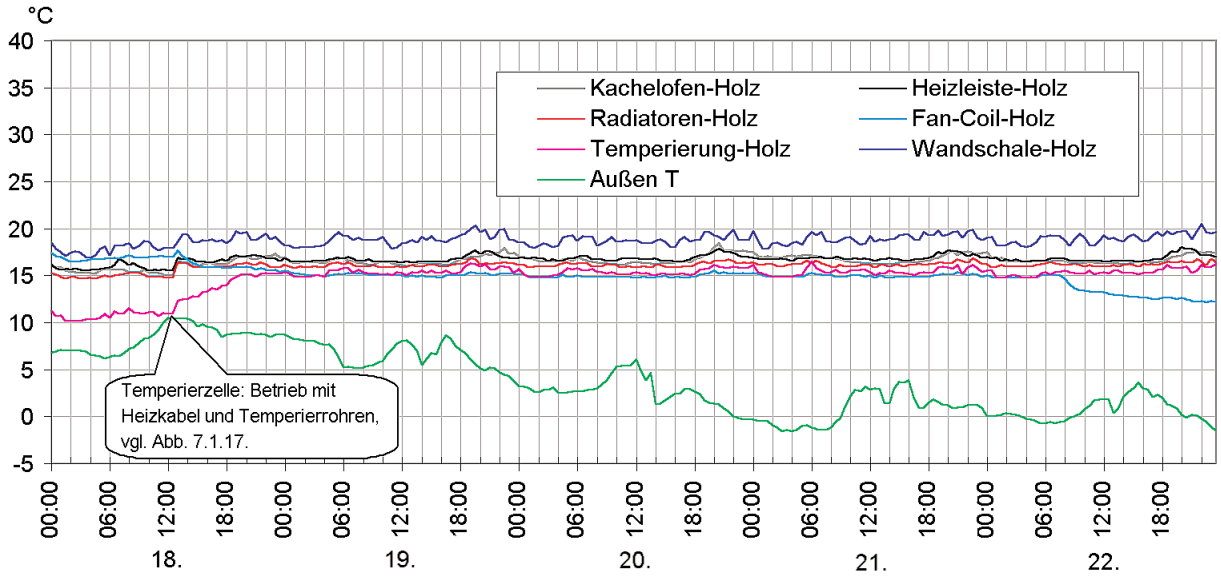


Abb. 7.1.22:
Temperaturen der Holztafeln 18.03.-22.03.1998

Die relative Luftfeuchte in diesem Zeitraum ist in den unbeheizten Zellen sehr hoch. Sie liegt zwischen 80 und 93%. Wegen der leichten Temperierung liegt die Raumtemperatur der Temperierzelle um 2,5 K höher. Daher ist dort die Feuchte am niedrigsten. Sie liegt aber noch bei ca. 75-77%, da die Korrektur der Wärmeverteilung (Temperierung der Wandodenecken) ers im Oktober erfolgte. Die relative Außenluftfeuchte schwankt zwischen 60 und 98% (Abb. 7.1.26).

Die Temperatur in den Zellen an der inneren Außenwand beträgt - wie schon durch die Raumtemperatur dargestellt - ca. 20 - 21° C. Bei der Temperierzelle beträgt sie 23° C.

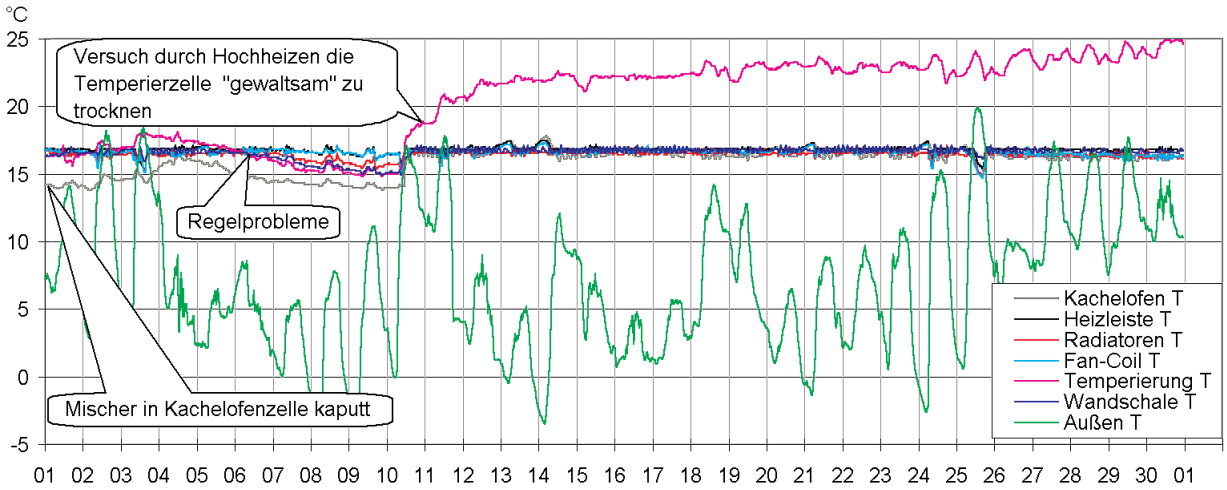


Abb. 7.1.23:
Zellentemperaturen 1.04.-1.05.1997

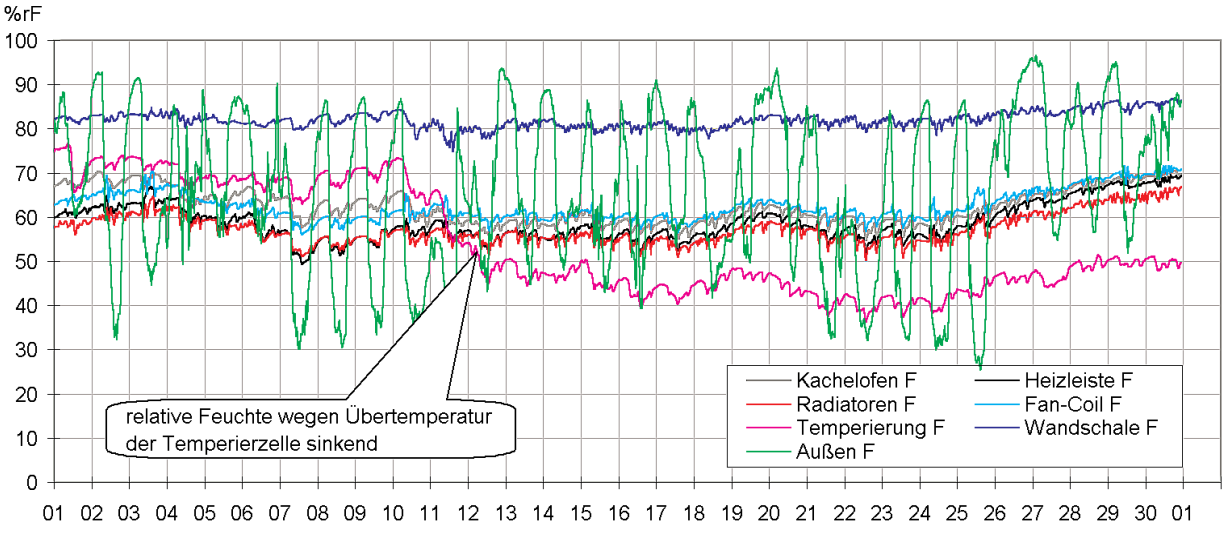


Abb. 7.1.24:
Zellenfeuchten 1.04.-1.05.1997

Betrachtet man nun die Temperatur in der Außenwandmitte, so hat wiederum die leicht temperierte Außenwand der Temperierzelle den gleichmäßigsten Verlauf mit flacher Amplitude, wogegen alle anderen Zellen eine starke Amplitude zeigen, die versetzt dem Temperaturverlauf der Außentemperatur folgt. Der Anstieg erfolgt dabei schneller als die Abkühlung, außer bei der Temperierung, wo eine längere Verzögerungeintritt (Abb. 7.1.27-29).

Die Temperatur auf der Außenwand außen ist bei der Kachelofen- und der Heizleistenzelle am höchsten. Dies kann nur damit erklärt werden, daß die Sonne mehr und länger auf diese Zellen schient, zumal als nächste Zelle von dem Temperaturverlauf auch die Heizkörperzelle erscheint, die ebenso etwas mehr der Sonne exponiert ist als die restlichen Zellen. Die Außenwandtemperatur der Temperierzelle liegt im Mittelfeld.

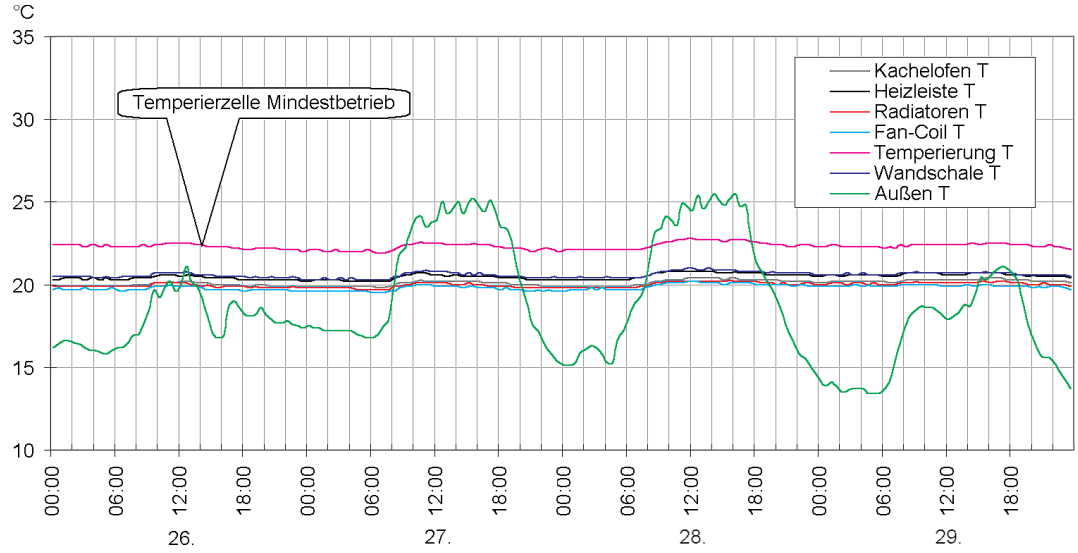


Abb. 7.1.25:
Zellentemperaturen 26.07.-29.07.1997

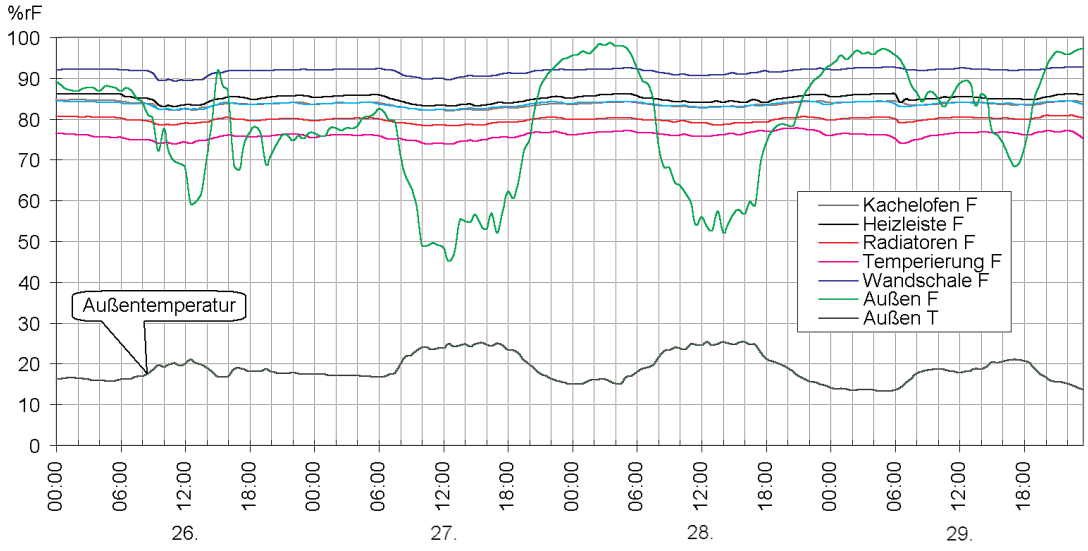


Abb. 7.1.26:
Zellenfeuchten 26.07.-29.07.1997

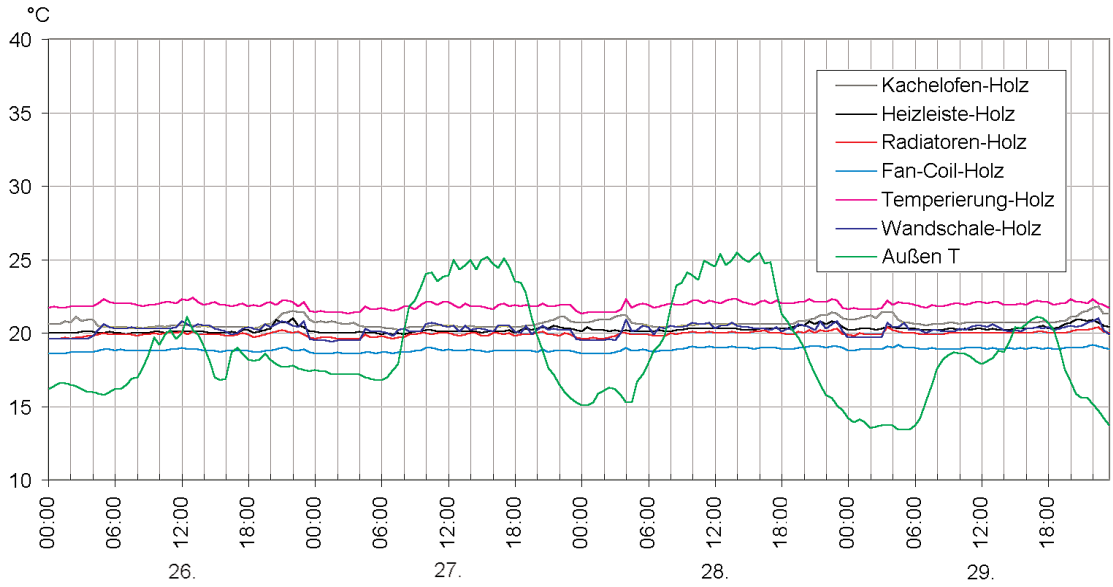


Abb. 7.1.27: Temperatur Außenwand innen 26.07.-29.07.1997

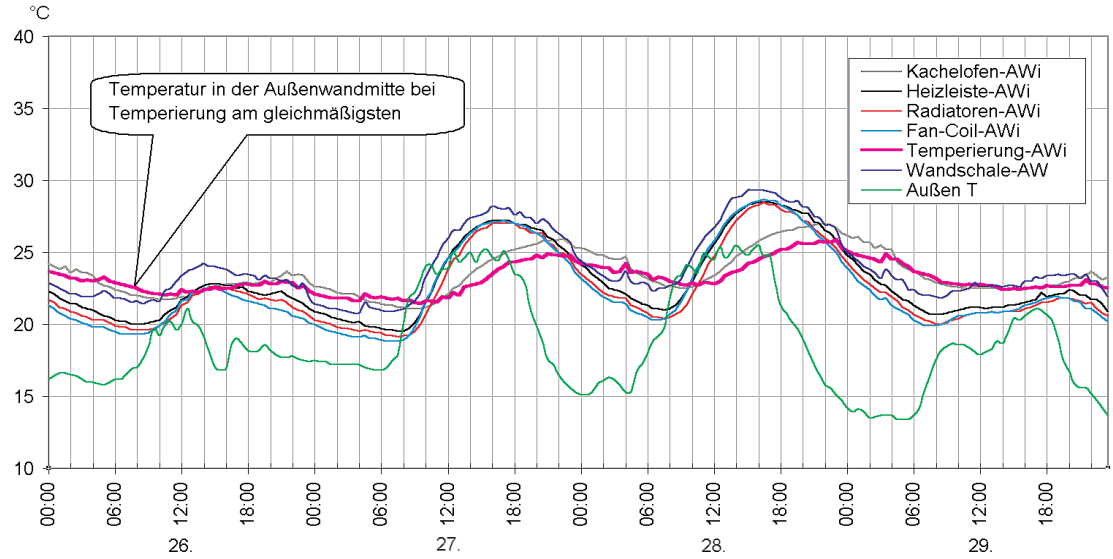


Abb. 7.1.28: Temperatur in der Wand 26.07.-29.07.1997

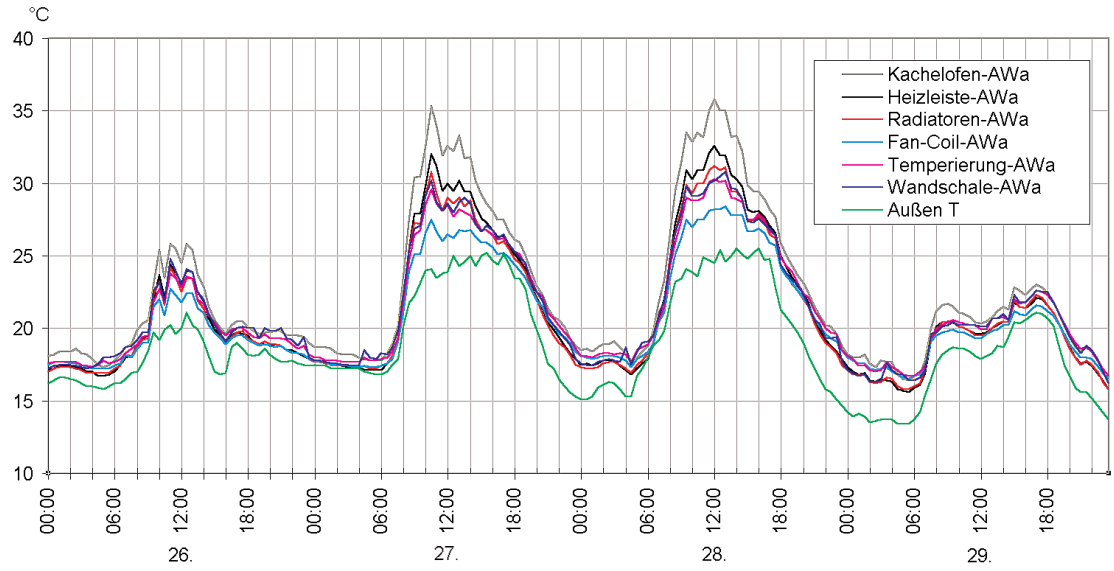


Abb. 7.1.29: Temperatur Außenwand außen 26.07.-29.07.1997

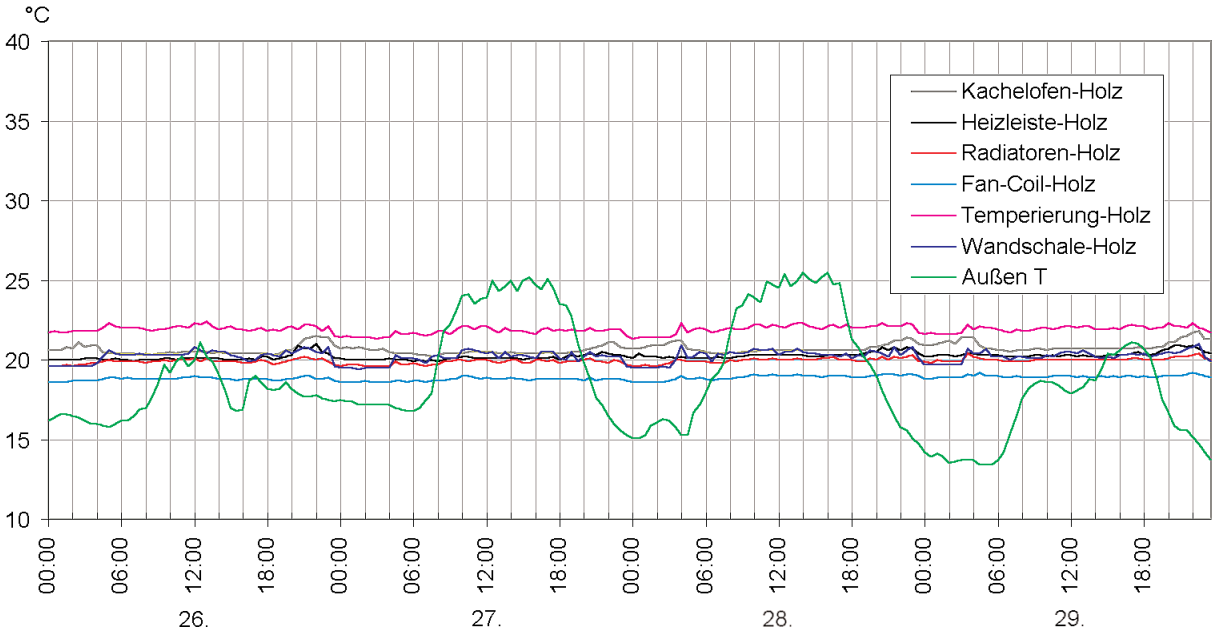


Abb. 7.1.30:
Temperatur Holztafeln 26.07.-29.07.1997

Die Temperatur auf der Holztafel (Abb. 7.1.30) ist bei der Fancoilzelle mit 18° C am kühlsten. Bei der Temperierzelle mit rund 23° C entspricht sie der Wandtemperatur und ist als ausgeglichenste aller untersuchten Kurven zu bezeichnen.

Nachdem durch die Temperierung als Bauteilheizung in dieser Zelle immer "Sommerzustand" herrscht, wird es hier keine Kondensationserscheinungen auf den kühlen, erdberührten Mauern und somit auch keine Gefahr für Bauteile bzw. Wandmalereien oder Exponate und Einrichtungsgegenstände geben.

Auch hier wurde einmal mehr deutlich, daß im Sommerfall, wo die restlichen Zellen wie üblich nicht beheizt werden, die Temperatur dieser Zellen mehr dem Temperaturgang der Außentemperatur und damit den kühleren Nachttemperaturen unterworfen ist, als z. B. in einer temperierten Zelle, wo die Außenwand weniger stark dem Tages- und Nachtgang der Temperatur folgt, da sie durch die Temperierung eine geglättete Temperaturlinie einnimmt.

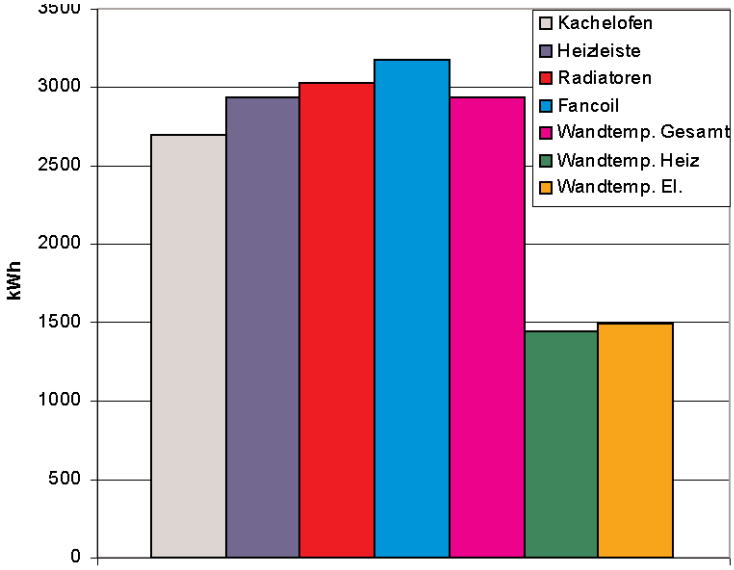
Energieverbräuche

Durch die zahlreichen Betriebsstörungen als Folge der Baustellensituation ist ein Verbrauchsvergleich nur schwer möglich. Umso erfreulicher war die Tatsache, daß der aus deutschen Projekten bekannte geringe spez. Energiebedarf von Temperieranlagen in Massivbauten (s. Leipoldt) im parallel zu den Messungen mit einer Temperierung sanierten Lapidarium des Klosters mit 26 kWh/m³-a bei einer Mindestraumtemperatur von 17° C bei tiefster Außentemperatur erreicht wurde.

Für den Vergleich der Zellen wurde der Zeitraum vom 06.11.1997 bis zum 26.03.1998 gewählt, wo bis auf den Mischerdefekt in der Fancoilzelle am 22.03.1998 keine größeren Komponentenausfälle auftraten und es in den Zellen ähnliche Temperaturverhältnisse gab.

Ende Oktober 1997 war in der Temperierzelle der Mangel der zu hohen Position des unteren Heizrohres durch Anmörteln eines Elektro-Heizkabels in der Boden-Wand-Ecke beseitigt worden. Bis zum 18.03.1998 wurden durch den Alleinbetrieb des Heizkabels 12 - 15° C gehalten. Am 18.03.1998 wurden die Temperierrohre hinzugeschaltet und die Solltemperatur hergestellt. Daher setzte sich seitdem der Energiebedarf der Temperierzelle aus dem Wärmebedarf der Warm-

Abbildung 7.1.31:
Energieverbrauch



wasserheizung und dem Strombedarf des Heizkabels zusammen. Verblüffenderweise stieg der spez. Bedarf aber kaum an, obwohl gegen den äußeren Temperaturabfall eine um 4,5 K höhere Raumtemperatur als in den Wochen zuvor gehalten wurde. Der Gesamtverbrauch der Temperierzelle nach knapp 5 Monaten systemgemäßem Betrieb, der sich bei fortschreitender Hüllflächentrocknung erfahrungsgemäß veringert hätte, entsprach dem der Zellen mit gleicher Raumtemperatur (Kachelofen, Heizkörper, Fancoil). Den größten Bedarf hatte die Wandschalenzelle, wobei hier die wegen der zu hohen Heizelementposition ebenfalls mangelhafte Einwirkung auf die überhöhte Bodenfeuchte nicht wie in der Temperierzelle kompensiert wurde (Abb. 7.1.31).

Abschließend sei noch auf die Handmeßprotokolle von A. Huber in der Anlage verwiesen, die zusätzlichen Aufschluß über die mikroklimatischen Zustände in den Zellen geben.

8 Stellungnahme

Generell sind nach dieser Meßdatenanalyse folgende Fakten festzuhalten:

- Als Heizungssystem, welches unter den vorgefundenen Gegebenheiten (nicht unterkellerte Bausubstanz, Ziegelbau ohne Obergeschoß, etc.) das geringste konservatorische Schadenspotential aufweist, hat sich einerseits der Kachelofen und andererseits die Temperierung erwiesen. Da aus verständlichen Gründen der Einsatz eines Kachelofens nicht immer möglich ist, ist die Temperierung mit ihrer Einfachsttechnologie und fehlertoleranten Verlegemöglichkeit als Heizungssystem zu empfehlen. Es hat sich im Rahmen der Meßkampagne gezeigt, daß gerade bei Fehlern oder Ausfällen der Wärmebereitstellung wie bei zu hohen oder zu geringen Raumtemperaturen jegliche Änderungen im beheizten Raum selbst nur sehr gepuffert und langsam auf die mikroklimatischen Zustände im Raum durchschlagen.
- In diesem Zusammenhang ist es sehr wichtig, darauf zu verweisen, daß mit der Temperierung der Temperaturgradient auf der Außenwandinnenseite von unten nach oben bis hin zur Decke bis auf 1 K genau immer sehr gleichmäßig war. Ferner sind die Außenwände immer "strahlend" warm, so daß die Raumlufttemperatur abgesenkt bleiben kann. Durch

die im Vergleich zu luftheizenden Systemen wesentlich niedrigere Raumlufttemperatur gibt es weniger Luftwechsel und damit weniger Wasserdampfverluste aus dem Raum. Der Befeuchtungsbedarf ist gering.

- Da die Wandoberfläche direkt beheizt wird, gibt es in temperierten Räumen an keiner Stelle das "Problem der kalten Wand": Kondensat und Staubanlagerung an Raumschale und Exponaten entfallen.
- Auf die Frage, welches Heizsystem unter den vorgegebenen baulichen Gegebenheiten nun die Bausubstanz am meisten schont, liegt es nahe, auch die Temperierung zu empfehlen, da neben der o. a. hygrischen Belastung aufgrund der sehr langsamen Temperaturänderungen in den Bauteilen auch die thermische Beanspruchung der Bauteile deutlich verringert wird.

  Ferner ist das Problem der Wandverschmutzung durch Staubverfrachtung, die sich aufgrund unterschiedlicher Partikelaufladung an kalten feuchten Außenwänden niederschlägt (vgl. Dario Camuffo: Wall Temperature and the Soiling of Murals, Sonderdruck aus: Museum Management and Curatorship, 1991, 10, S. 373-383) am leichtesten durch Temperierung lösbar.

  Ferner hat die direkte Beheizung der Außenbauteile und erdberührten Wände zur Folge, daß sich im Sommer aufgrund der erhöhten Wandoberflächen- und Wandkerntemperaturen kein Kondensat auf den Bauteilen niederschlägt, da es keine entsprechenden Temperaturdifferenzen zwischen feuchtegesättigter warmer Außenluft und üblicherweise kalten Bauteilen gibt. Dies ist gerade für historische, ggf. bemalte Wände ein nicht zu unterschätzender Vorteil, der ebenfalls stark für den Einsatz der Temperierung im historischen Bereich spricht.
- Die Frage, welches Heizungssystem am meisten die Innenausstattung schont, wurde schon vorweg damit beantwortet, daß die "Kalte-Wand-Problematik" durch die Temperierung ausgeschlossen werden kann. Dies hat der Vergleich zwischen Außenwandoberflächentemperatur innen und Temperatur des "Tafelbildes" gezeigt: Es gab zwischen beiden Temperaturen in der Temperierzelle kaum Differenzen.

  Zwar gab es ebenso wenig Differenzen in der Fancoilzelle, doch ist dieses Phänomen wohl mit dem sehr kleinen Raumvolumen und dem kräftigen Ventilator des Fancoilgerätes zu erklären. Für den Ventilator war es ein leichtes, das gesamte Raumvolumen der Fancoilzelle in kürzester Zeit mitsamt den Oberflächen der umhüllenden Wände zu erwärmen.

  Dabei sprechen gegen dieses konvektive Heizsystem jedoch drei Gründe im Sinne der Schonung der musealen Innenausstattung. Die Messungen haben ergeben, daß gerade in der Fancoilzelle der Kern der Außenwände immer kühl bleibt, und daß sowohl aufsteigende Feuchte als auch Kondensatfeuchte nicht ausgeschlossen werden können. Leider konnte mit den vorhandenen Budgetmitteln kein Nachweis darüber geführt werden, wie stark die Fancoilzelle durch die großen umgewälzten Luftmassen die Einrichtungsgegenstände wie das "Tafelbild" mit Staub belastete. Nachdem die Wirkung einer Temperierung aber ausschließlich auf Strahlung beruht, kann die Verstaubung der Kunstgegenstände durch diese Heizungsart als sehr klein eingestuft werden. Auch dieses Argument spricht eindeutig für den Einsatz einer Temperierung zur bestmöglichen Schonung der Inneneinrichtung.
- Auf die Frage der Schonung der Bausubstanz bei Einbau eines Heizsystems kann für die Wahl einer Temperierung nur positiv für diese argumentiert werden. Meist ist es in allen baulichen Gegebenheiten möglich, im Sockelbereich - eventuell sogar hinter mineralischen Sockelleisten durch einfaches Ritzen des Putzes die Temperierrohre zu verlegen. Sicherlich ist die Verlegung von Fußleistenheizungen oftmals einfacher,

doch ist das ästhetische Problem, daß im Sockelbereich eine starke Fußleiste der jeweiligen Außenwand vorgesetzt wird, inakzeptabel. Ferner hat die Erfahrung gelehrt, daß die Fußleistenheizung an sich durchwegs warme Außenwände schafft, die höhere Luftgeschwindigkeit aber, die durch den effektiven Kleinkonvektor herrscht, nach einer gewissen Zeit der Nutzung eine starke Staubbelastung der unteren Mauerteil eher vorruft, die eine entsprechende Verschmutzung zur Folge hat.

Vergleicht man auch den baulichen Aufwand einer Temperierung in Form von zwei eingestemmten, dünnen Kupferleitungen im Sockelbereich mit dem großen baulichen Aufwand z. B. bei Einbau einer Fußbodenheizung, so ist auch bei diesem Vergleich klar zu erkennen, daß die Wahl eindeutig auf eine Temperierung fällt, da im anderen Fall oft irreparable Schäden in historischen Bauten in Kauf genommen werden müssen. Zwar ist der Einbau von Heizkörperen in historischen Bauten mit geringeren Eingriffen verbunden, man hat dann aber immer sichtbare "Fremdkörper" im Raum. Bei der Temperierung nutzt man Wände als Heizkörper.

- Was nun den Energieverbrauch der untersuchten Wärmeverteilsysteme anbelangt, so wurde schon festgehalten, daß der Kachelofen den geringsten Energieverbrauch hatte. Anfänglich sind die Temperierung und die Wandschale durch sehr hohe Energieverbräuche aufgefallen. Diese Verbräuche waren aber, wie die Analyse der Verbräuche und der raumklimatischen Verhältnisse gezeigt haben, mit der abnorm hohen Feuchte in der Raumluft und in den Außenbauteilen zu erklären. Erst nachdem in einem zweiten Anlauf die Wärmequelle der Temperierung in richtiger Höhe über dem Boden, nahe der Boden-Wand-Ecke, eingebaut wurde, reduzierte sich der absolute und spezifische Energieverbrauch der Temperierung auf jene Werte, die im Schnitt auch die anderen Wärmeverteilsysteme gebraucht haben. Bestätigung für dieses letztlich erfreuliche Phänomen findet man in der Wärmemengenzählung des Lapidariums der Kartause Mauerbach, in welchem ebenfalls eine Temperierung eingebaut werden konnte. Dort haben genaue Messungen über mehrere Jahre trotz des kontinuierlichen Betriebs über das ganze Jahr wegen der Gefahr der aufsteigenden Feuchte bei einer Raumhöhe von ca. 4,50 m einen spezifischen Heizenergieverbrauch von weniger als 26 kWh/m³ (bzw. 120 kWh/m²) im Jahr bei Raumtemperaturen von ca. 17° C ergeben, welcher letztlich fast schon in Bereiche von Energiesparhäusern fällt und der Wärmeschutzverordnung entspricht.
- Die Frage, ob sich diese gewonnenen Erkenntnisse auch auf andere Gebäudeformen übertragen lassen, läßt sich mit einem klaren "Ja" beantworten: Natürlich kann eine Temperierung in historischen Bauten mit großer Baumasse den Vorteil der ausgleichenden, schadenspräventiven Erwärmung besonders gut zeigen. Es haben aber viele Beispiele auch des Autors gezeigt, daß der Einsatz dieser Wandheizungsart auch bei Leichtbauten bzw. hoch wärmegedämmten Wohnbauten ebenso gute Ergebnisse zeigt, wie dies im vorliegenden Fall, im historischen Bereich, nachzuvollziehen war.
- Die Schlußfolgerungen, die sich aus den gewonnenen Erkenntnissen bei bereits bestehenden, konservatorisch schädlichen Beheizungssystemen finden lassen, könnte man folgendermaßen artikulieren:

Man sollte versuchen, durch Wegschaltung konvektiver Heizungssysteme wie Heizkörper und reiner Luftheizungssysteme und durch den kontinuierlichen Betrieb von Heizleitungen in Wandkontakt, wo es geht, die Bausubstanz zur möglichst trägen und ausgleichenden Beheizung von Objekten zu integrieren. Ferner sollte versucht werden, den direkten Einfluß des Außenklimas auf die Innenräume zu verhindern. Dies erreicht man durch Abdichten und Beschattung der Fenster, durch

kontrollierte Lüftung und durch Schaffung von Pufferräumen und Schleusen.

Bestehende zentrale Befeuchtungs- oder Entfeuchtungsanlagen und auch Klimaanlagen mit Kühlung sollten nach Möglichkeit durch geeignete Meßdatenerfassungssysteme genauestens beobachtet werden. Dabei sollte kontrolliert werden, ob ihr Einsatz gerechtfertigt ist, indem die Reaktion des Gebäudes bzw. der Kunstgegenstände auf diese Eingriffe festgehalten und diskutiert wird.

Generell muß getrachtet werden, daß in historischen Bauten mit wertvoller Bausubstanz und wertvollen Exponaten die Raumlufttemperatur insbesondere im Winter nicht zu stark ansteigt, damit die an sich schon trockene Raumluft durch Beheizung nicht noch mehr an Feuchte verliert. In diesem Zusammenhang sei nochmals darauf hingewiesen, daß zentrale Befeuchtungsanlagen, z. B. in Form von Dampfluftbefeuchtern, im Bereich von historischen Gebäuden bzw. Museen sich ebenso wenig als zielführend erwiesen haben wie Ultraschallbefeuchter, die im Oberflächenbereich der Bilder zur Ablagerung von Partikeln führen. Falls Befeuchtungsgeräte notwendig sind, sollten nach Möglichkeit dezentrale Verdunstungsgeräte, von zentraler Wasserversorgung gespeist, eingesetzt werden.

9 Empfehlungen

Aus der vorgehenden Stellungnahme hat sich schon die folgende Empfehlung herauskristallisiert:

Das Ergebnis der Untersuchung hat eindeutig gezeigt, daß die Temperierung ein optimales System für die Beheizung historischer Gebäude bzw. Museen darstellen kann, wenn ihr Einsatz genau geprüft und im Detail ordnungsgemäß geplant wird.

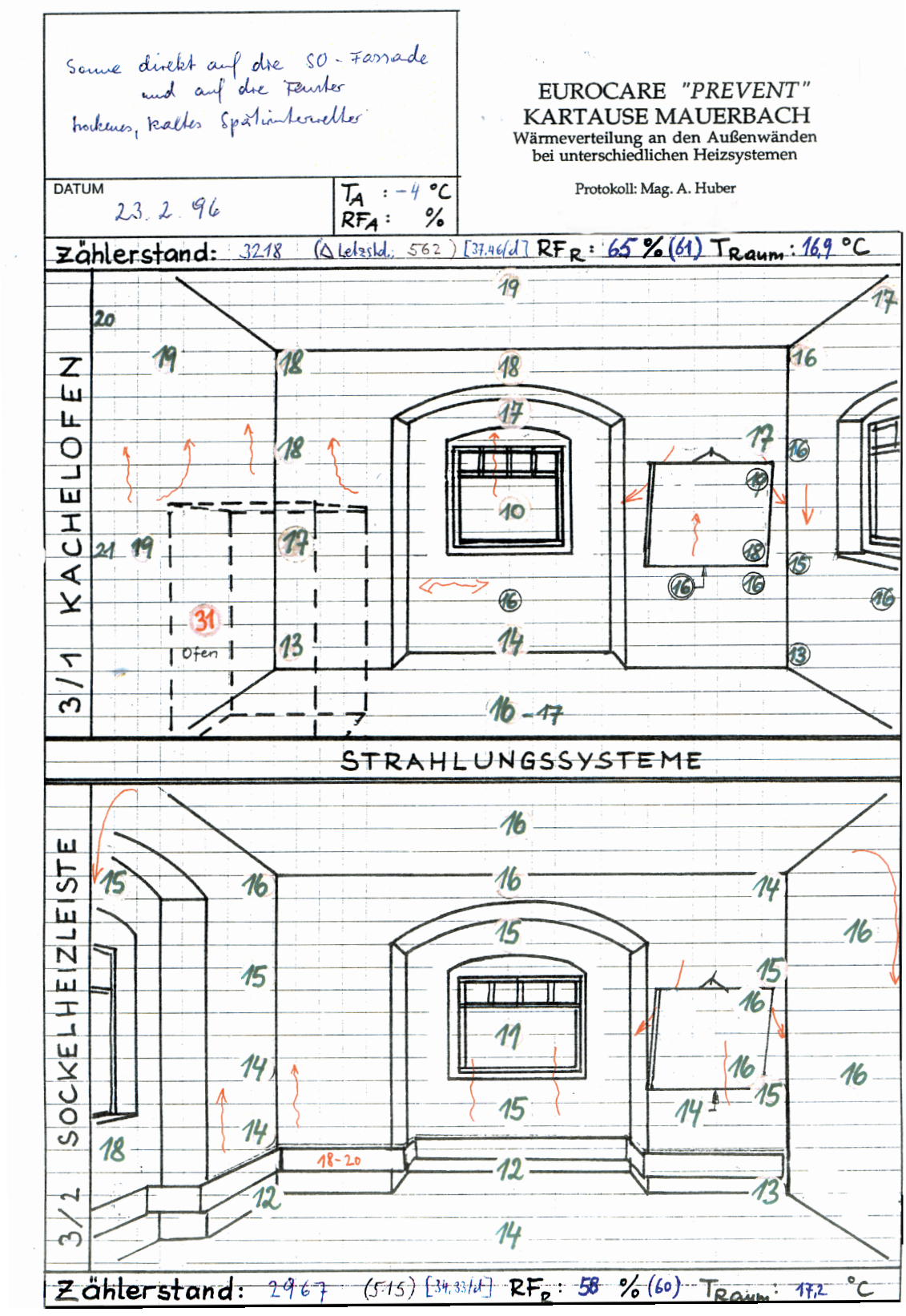
Es muß an dieser Stelle nochmals klar betont werden, daß die Temperierung kein Allheilmittel für die Lösung aller mikroklimatischen Anforderungen bzw. Mißstände darstellen kann. Sie ist aber - und das haben die drei Jahre intensiver Forschungsarbeit gezeigt - ein System der Wärmeverteilung, das gerade im historischen Bereich eine Reihe von entscheidenden Vorteilen bringt - nicht zuletzt auch den, daß diese Technologie sehr einfach und kostengünstig ist und (meistens) überall leicht eingebaut werden kann.

Aus den Erfahrungen des Forschungsprojektes EUROCARE-Prevent kann nur noch einmal betont werden, wie wichtig es ist, den Einbau einer Temperierung bei feuchtebelasteten Mauern genauestens zu planen, damit Fehlschläge, wie sie in den ersten Jahren der Meßkampagne durch falsche Montage aufgetreten sind, vermieden werden.

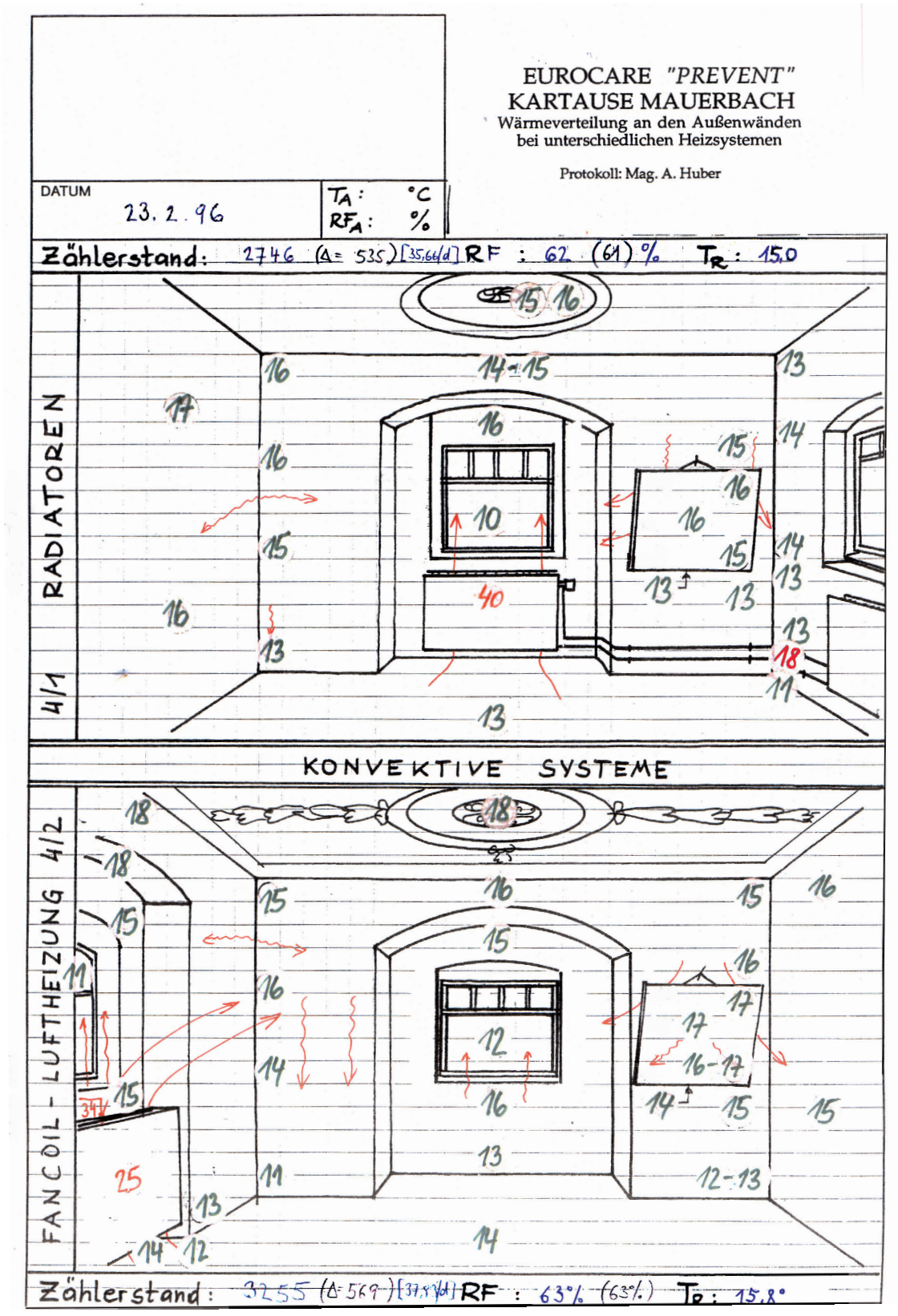
Generell ist zu sagen, daß die meßtechnische Erfassung von bauphysikalischen und haustechnischen Phänomenen keinesfalls durchgeführt werden sollten, wenn gleichzeitig Baumaßnahmen stattfinden. Es hat sich wieder einmal gezeigt, daß sich Bauarbeiten und Meßarbeiten gegenseitig ausschließen.

Anlagen

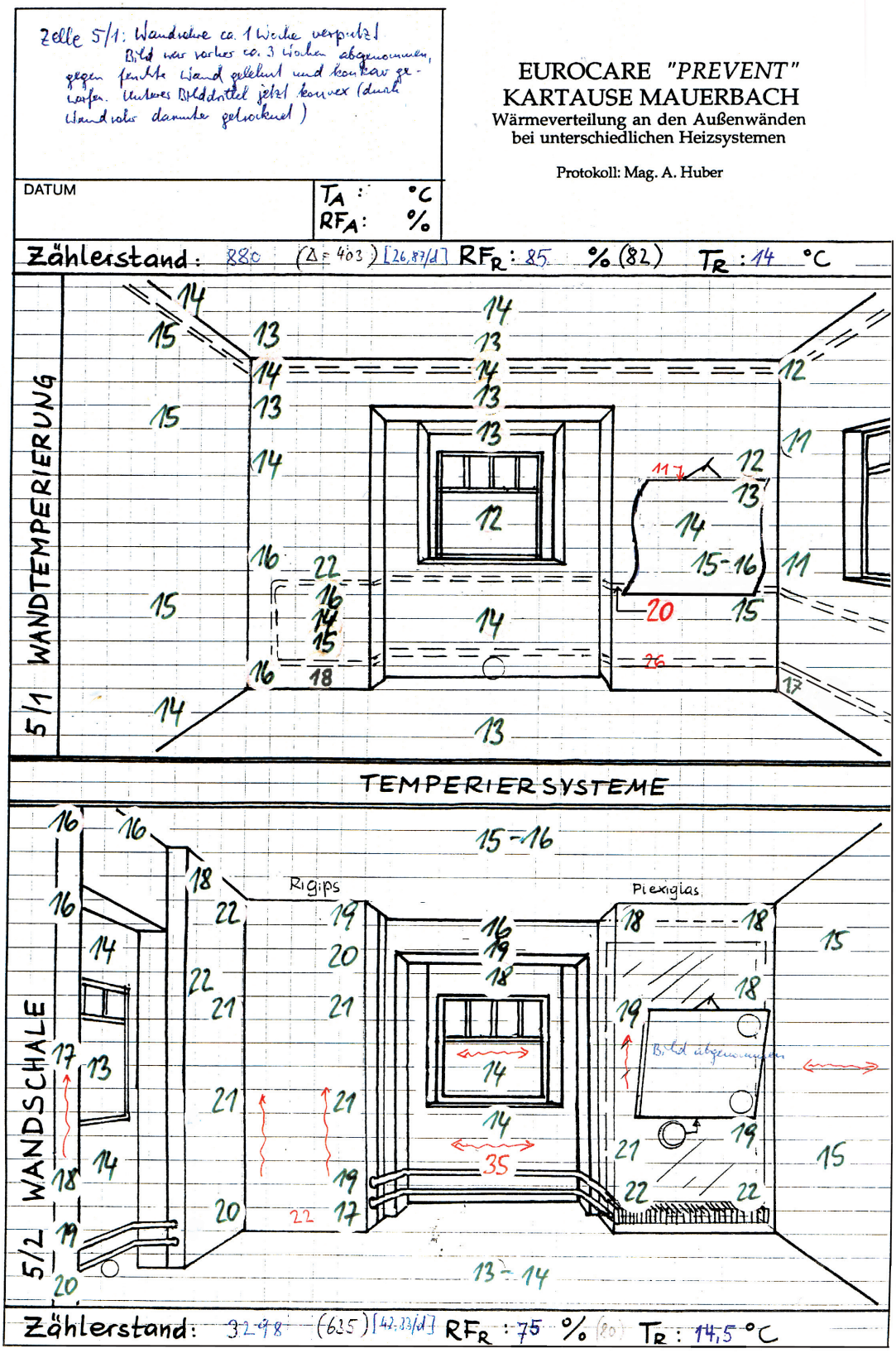
Anlage 1:
Temperaturen in Zelle 3/1 (Kachelofen) und Zelle 3/2 (Heizleiste).
Alfons Huber, Wien.



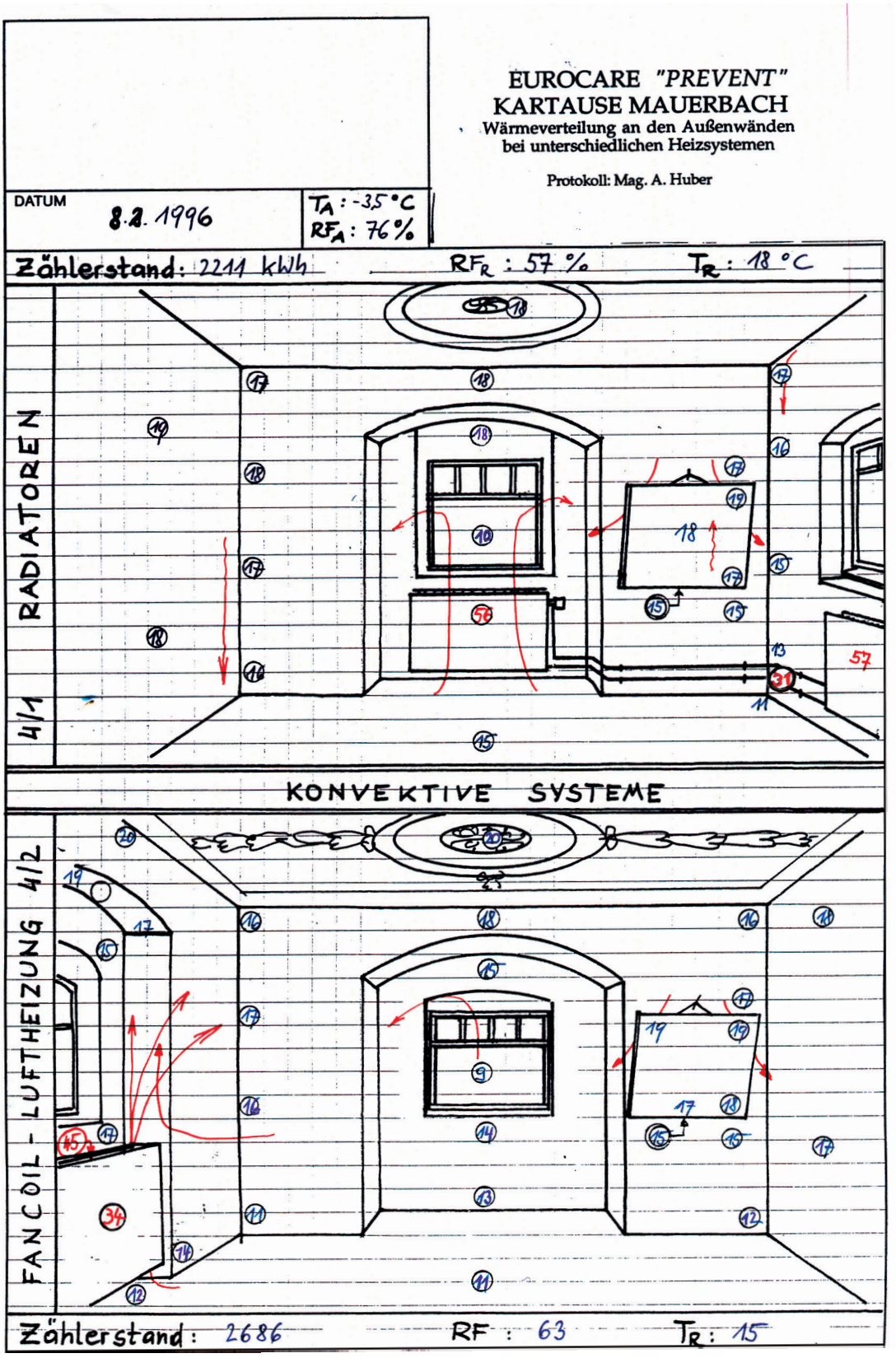
Anlage 2:
Temperaturen in Zelle 4/1 (Heizkörper) und Zelle 4/2 (Fan Coil).
Alfons Huber, Wien.



Anlage 3:
Temperaturen in Zelle 5/1 (Temperierung) und Zelle 5/2 (Wandschale).
Alfons Huber, Wien.



Anlage 4:
Temperaturen in den Zellen 4/1 (Radiatoren)und 4/2 (Fancoil).
Alfons Huber, Wien.



Anlage 5:
Entwicklung des Datenerfassungssystems

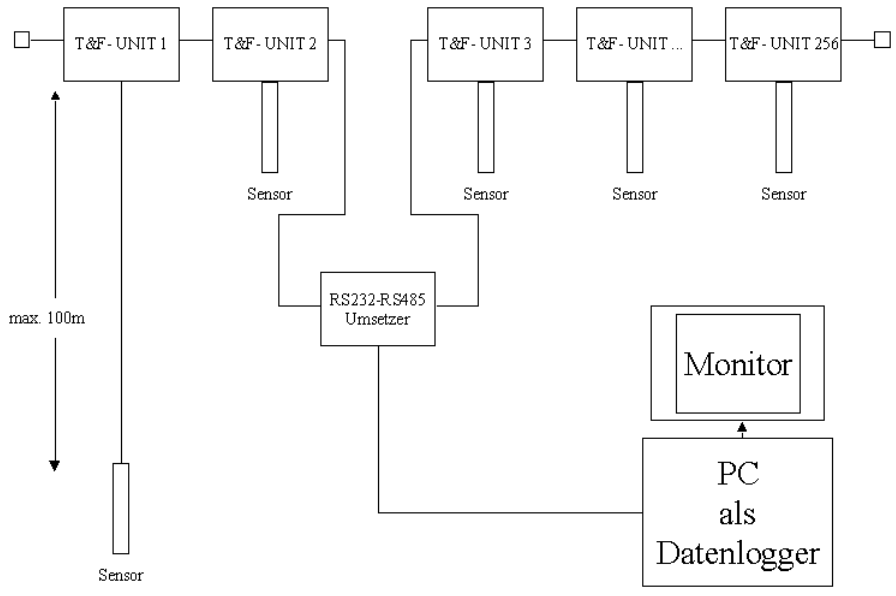
Entwicklung des Datenerfassungssystems, Bussystem für die Messung von Temperatur-, Luftfeuchte, Lux, UV, etc.

Da sich die anfangs verwendeten Meßdatenlogger als unzuverlässig erwiesen, und die bisherige Verkabelung aller Sensoren im Bereich der Kartause mehr als 5 km Meß- und Datenkabelverlegung erforderte, entwickelte die Forschergruppe mit dem Autor zusammen ein eigenes Datenerfassungssystem mit Datenloggern und einem Bussystem mit einem einzigen Bus-Kabel für die Verbindung zu den Fühlern. Ferner wurden nicht mehr analoge Meßfühler, sondern digitale eingesetzt, welche die prinzipielle Problematik der Meßdatenwandlung vom analogen zum digitalen Signal umgehen durch digitale Meßdatenerfassungssensoren. Mit einem PC konnten bis zu 256 Meßunits mit je einem Feuchte- und Temperaturfühler automatisch ausgelesen werden. Diese bis zu 512 Meßwerte werden mit Datum und Uhrzeit vom PC in eine Datei abgelegt (geloggt), die mit Datenbankprogrammen (z. B. Excel, Access...) bearbeitet werden kann.

Herzstück war eine Temperatur- und Feuchte-Einheit, die als digitales Modul feuchteseitig auf 8, temperaturseitig auf 25 Stützpunkte kalibriert und linearisiert ist. In der Feuchtemessung geht die individuelle Hysterese des Sensors (Micro Cap II) in die Messung ein, d. h. es wird erkannt, ob sich der Feuchtewert von oben oder von unten an den wahren Wert annähert, und es wird daraufhin die halbe Hysterese subtrahiert oder addiert. Durch diesen Algorhithmus und die Einbeziehung der Temperaturdrift des Moduls werden hohe Genauigkeiten des Feuchtewertes erreicht (ca. 2%). Der Temperatursensor ist ein Halbleitersensor (KTY 10-16), der eine extrem niedrige Alterungsdrift und einen beinahe linearen Kennlinienverlauf besitzt. Durch diese Eigenschaft sind Messungen auf 0,1° C Genauigkeit möglich. Durch die bereits im Modul erfolgende Digitalisierung ist es möglich, die Meßwerte bis zu einer Entfernung von 2,5 km seriell zu übertragen (mit einem speziellen Fehlerbehebungsprotokoll), ohne das Ergebnis dadurch zu beeinflussen.

Das Bussystem (basierend auf der genormten RS485-Schnittstelle) wird am Anfang und am Ende mit einem Abschlußwiderstand versehen, Der Computer kann an jedem beliebigen Punkt des Busses eingeschleift werden. Auch das Kabel von der Bus-Unit zum Sensor kann auf bis zu 100 m verlängert werden, womit es möglich ist, die Busleitung durch längere Stichleitungen zu erweitern. Die Anzahl

IPrinzipschaltbild



der Messungen ist bei der PC-Variante praktisch unbegrenzt, bei der "Stand Alone"-Variante kann bis zu 3 Monaten geloggt werden.Ferner ist durch Einschleifen in den Bus die Integration einer Echtzeituhr möglich, die das DCF-77 Signal des deutschen Zeitzeichensenders umsetzt. Dies ermöglicht eine Synchronisierung mehrerer Meßaufbauten. Die Verbindug der einzelnen Units erfolgt durch eine paarweise verdrillte Vier-Draht-Leitung, welche mit verschraubbaren 5-poligen DIN-Steckern versehen wird. Auch die Verbindung von der Unit zum Sensor kann mit einer solchen Leitung verlängert werden. Alle Sensoren sind künstlich vorgealtert und sollten daher nur alle ca. 24 Monate nachkalibriert (bzw. kontrolliert) werden.

Henning Großeschmidt

Das temperierte Haus: Sanierte Architektur – behagliche Räume – „Großvitrine“

Abstract

Die „Temperierung“ ist eine alternative Methode der Wärme-*Verteilung*, die seit 1982 von der Landesstelle für die nichtstaatlichen Museen in Bayern in Zusammenarbeit mit Baubehörden in öffentlichen Bauvorhaben entwickelt wurde. Ihr Hauptmerkmal ist die kontinuierliche Beheizung der Gebäudehülle, die in der Regel durch zwei Heizrohre unter Putz an den Außenwandsockeln aller Geschosse geschieht und ohne Zusatzmaßnahmen folgende Wirkungen hervorruft: Ausschaltung von aufsteigender Feuchte, Kondensation und Schadsalzwirkung, Stabilisierung des Raumklimas, physiologisch wie konservatorisch zuträgliche und energiesparende Raumbeheizung. Wegen des Fehlens von Raumluftkonvektion sind auch Großräume beherrschbar. Dank der minimalen Installationstechnik eignet sich die Methode ferner für die Konservierung von Exponatgebäuden in Freilichtmuseen und behausten archäologischen Ausgrabungen.

The Tempered Building: Renovated Architecture – Comfortable Rooms – “Giant Display Case”

Tempering is an alternative method of *distributing* heat that has been developed since 1982 by the Landesstelle für die nichtstaatlichen Museen in Bayern (Bavarian Museum Service) in public building projects, in cooperation with the building authorities. Its main characteristic is the continuous heating of the building shell, which normally is done with two heating pipes installed under the inside plaster at the base of outside walls on all floors. Without additional measures, tempering stops capillary rise of moisture, condensation, and damaging salt effects while stabilizing room climate and providing physiologically and conservationally appropriate as well as energy saving room heating. It is applicable to all sorts of buildings in old or modern construction such as museums, monuments, churches, dwelling houses etc.. In its minimal form it serves for the preservation of open air museums buildings and housed excavations.

Kurzfassung: Temperieren statt „Heizen – Dämmen – Feuchtesanieren – Klimatisieren“

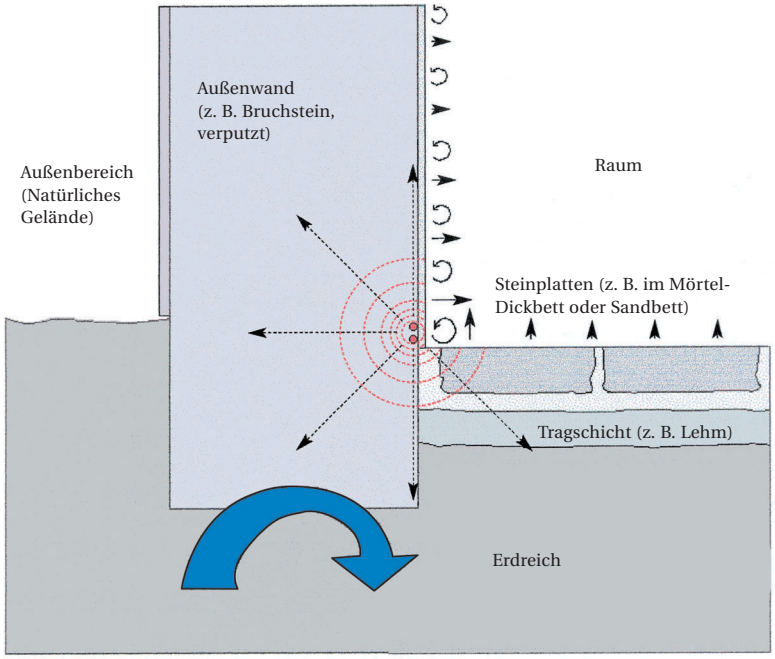
Die „Temperierung“ ist eine alternative Methode der Wärme-*Verteilung*, die das Ziel der Raumbeheizung durch *Temperierung der Gebäudehülle* erreicht. Dazu werden *zwei Heizrohre* auf Putz (in Wandkontakt) oder unter Putz (Stärke 15 ± 5 mm) in allen Geschossen *an den Außenwandsockeln* und *je ein Rohr beidseitig der Sockel der Trennwände* montiert, die auf erd- bzw. außenluftberührten Böden stehen (Rohrdurchmesser im Regelfall 12 – 18 mm, in Großräumen 22 mm). Durch die kontinuierliche Beheizung der Rohre – in erdberührten Räumen ganzjährig, in anderen Räumen während der Heizperiode – entstehen *drei Effekte* (Abb. 1):

- *im Bauteil* im Rohrnahbereich ein Wärmestau,
- an der raumseitigen *Bauteiloberfläche* in der Rohrebene eine eng begrenzte, maximal 10 cm hohe, streifenförmige Zone mit höherer Oberflächentemperatur,
- von dort ausgehend eine starke *Wärmestrahlung* in Raumrichtung im Verein mit einem stetigen, minimalen *Warmluftauftrieb* entlang der Wandfläche.

Abbildung 1:
Die Temperierung. Wirkungsmechanismus in „historischer“ Situation: Bauteile ohne Wärmedämmung und Feuchtesperre, durch kontinuierliches Wärmeangebot trocken gehalten (s. Abb. 4)

Rote Punkte:
Heizrohrschleife (Vor- und Rücklauf, CU blank, 15 mm)
im Innenputz bei max. 15 mm Überdeckung
Bei erdberührten Böden: 1. Leitung (Vorlauf) knapp über dem Fertigfußboden
Lange Pfeile:
Wärmeverteilung durch Wärme*leitung:* radial im Material der Wandbodenecke
Rote Kreise:
Wärmestau mit zylindrischen Isothermen (Hochtemperatur nur im Rohrnahbereich, s. Abb. 9)
Rundpfeile:
Wärmeverteilung durch *Konvektion*: Warmluft-Auftrieb, an der Wandoberfläche anliegend (Coanda-Effekt)
Kleine Pfeile:
Wärme*abstrahlung* der Bauteiloberfläche (Hochtemperatur nur im Rohrnahbereich, s. Abb. 9)
Blauer Pfeil:
Bodenfeuchte. Thermische Horizontalsperre durch die radiale Wärmeausbreitung

Basierend auf einer Grafik von Miha Praznik, ZRMK, Ljubljana.



Nach einer ersten Betriebsphase bei maximaler Leistung der Anlage, die zur Temperierung der raumbegrenzenden Oberflächen dient und die je nach Feuchtegrad des Baukörpers einige Wochen bis zu zwei Monaten dauert, stellt sich unter fortschreitender Trocknung der Bausubstanz die gewünschte *„Raumtemperatur“* ein. Im folgenden Dauerbetrieb wird der erreichte Zustand gehalten bei Wassertemperaturen im Vorlauf, die saisonal gleiten zwischen 27 und 40°C (bei rein konservatorischer Zielsetzung) bzw. 65°C (bei Raumbeheizung; durch Verdopplung der Rohrlänge kann die Maximaltemperatur des Vorlaufs auf unter 55°C beschränkt werden). Auf diesem bauphysikalisch sinnvollen Weg ergibt sich ohne Zusatzmaßnahmen die Lösung aller Aufgaben und Probleme, die durch die Oberflächentemperatur der Raumhüllflächen beeinflußbar sind, bei konventionellem Konzept aber mit aufwendigen Einzelmaßnahmen behandelt werden. Bei Temperierung der Gebäudehülle treten folgende *Sekundäreffekte* ein:

- *Optimale Raumbeheizung* in Gebäuden aller Nutzungen, Konstruktionsarten und Raumhöhen (einschließlich Kirchen), da jede heizbedingte Luftbewegung und Staubverteilung in Einzelraum und Gebäude unterbleibt, abgesehen vom Auftrieb am Bauteil, der für die Temperierung der Oberflächen oberhalb der Rohre erforderlich ist, auf Grund der geringen Luftgeschwindigkeit aber keinen Staub transportiert.
- Schutz der Hüllflächen und der Ausstattung des Raumes vor *Kondensat*, Senkung von zu hoher relativer Luftfeuchte („*Luftentfeuchtung*“), kurzzeitstabiles *Raumklima* mit homogener Raumtemperatur und – bei Luftwechselkontrolle – homogener relativer Luftfeuchte, deren Höhe dank der geringen Raum*luft*temperatur – je nach Höhe der gewählten „Raumtemperatur“ – ganz ohne oder mit nur geringem Bedarf an *Luftbefeuchtung* im mittleren Bereich gehalten wird.
- Ausschluß der Auskeimung von Pilzsporen bzw. des weiteren Wachstums vorhandenen *Bakterien- und Pilzbefalls* an der Gebäudehülle und an den Innenbauteilen. Bei Schwammbefall entfällt der Gifteinsatz an Bauholz und Mauerwerk, der Holzaustausch beschränkt sich auf den Befallsbereich. Im Depot nimmt ein mit höherer Feuchte eingelagerter Bestand durch die Wärmestrahlung der Raumhüllflächen bei langsamer Abgabe

seiner überschüssigen Feuchte allmählich die Raumtemperatur an. Korrosion und Schimmelwachstum kommen kurzfristig zum Stillstand.
- *Unterbrechung des Feuchtetransports* durch aufsteigende Feuchte („thermische Horizontalsperre"), Inaktivierung der Schadsalze durch langsame Bauteiltrocknung von innen nach außen mit der Folge der Ausbildung fadenförmiger Kristalle im Porenraum der oberflächennahen Bauteilschicht und Unterbindung der zyklischen Umkristallisation (da diese Effekte unabhängig von der Salzart eintreten, sind weder Salzanalysen noch ein spezielles Mikroklima in Wandnähe erforderlich).
- Angleichung der Oberflächentemperatur ungedämmter *erdberührter Bodenflächen* an die Raumlufttemperatur durch bloße Randbeheizung, Trocknung und thermischer Feuchteschutz dieser Flächen ohne sperrende Schichten und ohne zusätzliche Leitungen.
- *Energieeinsparung* bei der Beheizung von Neu- und Altbauten, „*thermische Gebäudesanierung*" von Gebäuden im Bestand in Ersatz für Wärmedämmmaßnahmen (Folge der Materialtrocknung: Senkung der Wärmeverluste durch Wärmeleitung der Gebäudehülle in Verbindung mit Erhöhung der Wärmespeicherfähigkeit des Baukörpers; Folge der geringen Lufttemperatur: Senkung der durch Lüftung bzw. durch Luftwechsel verursachten Wärmeverluste).

In *Museen* kann dann die mechanische *Lüftung* (abgesehen von Nachtlüftung im Hochsommer) auf die Zeiten der Anwesenheit von Personen beschränkt werden, bei Luftwechselraten von max. 1 V/h, wenn zur Vermeidung von Kühlungsbedarf besonnte Glasflächen eine *außenliegende Beschattung* erhalten und die *Anschlußleistung des Kunstlichtes* nicht höher als 15 W/m³ liegt. Die Homogenität des Raumklimas tritt unabhängig von der Raumhöhe ein (das Dachgeschoß des Regensburger Salzstadels am Brücktor zeigt auf 18 Meter Höhe einen Temperaturunterschied von 1 Grad). Hierin liegt die Bedeutung der Methode für Großräume. In *Kirchen* z. B. entfallen die regelmäßigen Intervalle der Innenrenovierung, da die für alle konventionellen Kirchenheizsysteme typische Raumverschmutzung durch Kondensation und Staubumwälzung unterbleibt. Wird die *Orgel* von der Emporenschleife durchfahren (zwei freie Rohre), minimieren sich die internen Wechsel der Materialfeuchte und Kondensationszyklen scheiden aus, so daß für die Stimmung der Instrumente kaum mehr Anlaß besteht.

Da für rein konservatorische Zwecke die Installation von maximal zwei Heizrohren mit geringem Durchmesser ausreicht, erlaubt die Methode – nach der zur Klimastabilisierung erforderlichen Abdichtung der Bau- und Öffnungsfugen – nicht nur die Konservierung von Bausubstanz und Raumausstattung von *Baudenkmälern,* sondern auch von *Exponatgebäuden* in Freilichtmuseen. Der hierfür erforderliche Energiebedarf übersteigt nicht den von Luftentfeuchtern, die bei konventionellem Konzept allein zur Senkung der rel. Luftfeuchte eingesetzt werden müssten, ohne die Schadsalzproblematik zu lösen. Es entfallen die üblichen *materialersetzenden*, den Schadensmechanismus aber nicht ausschaltenden Pflegemaßnahmen an historischer Substanz. In Exponatgebäuden genügt es in der Regel, je zwei Einrohr-Ringleitungen spiegelbildlich um die beiden Hälften der Geschosse zu führen – ihre Vorlauf-Hälfte an den Außenwänden, ihre Rücklauf-Hälfte an den entsprechenden Trennwandsockeln.

Ähnliches gilt auch für behauste *archäologische Ausgrabungen,* die durch Temperierung auf einfachste und schonende Weise konserviert werden können. Nach Umfahrung der Ränder mit einer Ringleitung oder einer Schleife (gegebenenfalls ergänzt durch Leitungen an der Decke der Behausung bzw. – in hohen Schutzräumen – an Besichtigungsstegen) und Schließen der Fugen der Behausung sind die freigelegten Bauteile nämlich vor Bodenfeuchte, Schadsalzaktivität, Kondensation und Algenbefall geschützt. Ebenso können selbst große *Bergkeller* durch Materialtemperierung mit geringem Aufwand nutzbar gemacht werden, wobei sich die erste Betriebsphase entsprechend verlängert. Beide Beispiele belegen die überraschende Effizienz, die die Heizrohr-Temperierung in ihrer

Minimalform gerade im erdberührten Bereich hat. Die Diskrepanz zwischen den dort eintretenden großen Effekten und dem dafür erforderlichen geringen Installationsaufwand wird verständlich, wenn man bedenkt, daß bei Dauerbeheizung erdberührter Räume durch Akkumulation von Erd- und Heizwärme in den Außenbauteilen und dem angrenzenden Erdreich ein starker Wärmestau entsteht [1]. Daß unter Gebäuden schon zur Herstellung, erst recht aber zur Aufrechterhaltung einer höheren Bauteil- bzw. Raumtemperatur ein minimaler Energieaufwand ausreicht, wird deutlich, wenn man auf der Kelvin-Skala die absolute Temperatur des 10°C „kalten" Erdreichs (283 K) mit der eines 20°C „warmen" Raumes (293 K) vergleicht (Abb. 2).

Die direkte Temperierung der Bauteile bietet also nicht nur ein großes Potential für die Erhaltung von historischer Bausubstanz, sondern sie ist auch die *ökonomisch sinnvolle Alternative* zu den üblichen „kalten" Konservierungs- und Sanierungsverfahren und bietet einen Ausweg aus dem durch die *Energieeinsparverordnung* entstandenen Dilemma: Der Jahresheizwärmebedarf von Wohnbauten in Massivbauweise verringert sich allein durch Temperierung der Gebäudehülle und Abdichtung vorhandener Alt-Doppelfenster bzw. entsprechende Ergänzung von Einscheibenverglasungen – also ohne *gestaltverändernde* „Wärmeschutz"-Maßnahmen wie Außen- oder Innendämmung und Neufenster – auf das in der Verordnung vorgegebene Maß („7 Liter pro m²"), obwohl die Feuchtesanierung – analog der Luftentfeuchtung mit Luftentfeuchtern – durch Energieeinsatz geschieht.

Einerseits wird eben dadurch erst über die Sanierung hinaus die ganzjährige Nutzung erdberührter Räume zu Wohn-, Ausstellungs- oder Lagerzwecken ohne weiteren Apparateeinsatz ermöglicht. Dies ist direkt aus dem Temperaturvergleich der Geschosse ableitbar (Abb. 3). Dabei beträgt die zu diesem Zweck erforderliche Heizleistung außerhalb der „Heizperiode" in nicht unterkellerten Erdgeschossen zwischen 5 – 15 Watt pro laufenden Meter Wandsockel (Abschaltung während der Hochsommermonate möglich), in Kellern max. 30 W/m (bei Dauerbetrieb auch im Hochsommer). Andererseits verringert sich der Wärmebedarf in der Heizperiode durch diese „Sommertemperierung". Durch sie wird nämlich eine nachhaltige „U-Wert-Verbesserung" erreicht wird, so daß der Gesamtverbrauch in der Regel unter dem von konventionell und nur in der Heizperiode beheizten Massivbauten liegt. Die Energieeinsparung wird also im Wesentlichen durch Optimierung der Wärmeverteilung erzielt, so daß der Grund für die *Befreiung* von den Auflagen der EnEV vorliegt (Erreichung des Ziels „durch andere als in dieser Verordnung vorgesehene Maßnahmen").

Generell kann die Temperierung der erdberührten Bauteile also konventionelle *Sanierungsmaßnahmen* sinnvoll *ersetzen*, die im Sommer für sich allein den Kondensatschutz dieser Flächen und die Luftentfeuchtung der Räume nicht gewährleisten können: So entfallen Maßnahmen wie Schadsalzbehandlung, Außenisolierung, Wärmedämmung, Horizontalsperren, Tränkungen usw.; Sanierstatt Normalputz reicht aus. Oberflächliche Regenabführung vorausgesetzt, ist bei verdichteter Anfüllung des Erdreichs auch die Dränage nicht erforderlich. Zur Gewährleistung der *thermischen Feuchtesperre* ist folgende *Voraussetzung* zu erfüllen: Die Innenseite des Außen-Mauerwerks muß eine homogene Oberfläche erhalten, ohne größere Poren und ohne sichtbare Fugen, z. B. durch Verputzen bzw. durch Schließen der Lücken vorhandener, noch stabiler Putzflächen oder durch sorgfältiges Nachmörteln des Fugennetzes (bei Sichtmauerwerk); alle Fugen und Risse der Estriche müssen gefüllt werden. Um auch bei stark porösem oder ohne Mörtel gefügtem Mauerwerk auf die Außenisolierung im Erdreich verzichten zu können, ist eine ganzflächige Putzschicht auf der Innenseite zwingend. Im Sandbett verlegte Bodenbeläge, z. B. Ziegel, benötigen in der Regel nach Ausfugung mit Sand keine weitere Behandlung. Diese einfachen, auf empirischem Wege gefundenen Grundsätze werden bestätigt durch *das* historische Beispiel ganzheitlicher Heiztechnik, die Hypokaustenheizung. Bei näherer Betrachtung stellt man das Fehlen der heute als unverzichtbar angesehenen

Abbildung 2:
Vergleich der Temperaturskalen von Celsius und Kelvin
Die Celsius-Skala bezieht sich auf die Zustandsänderung von Wasser.
Die Absolute Temperatur in Kelvin (K) ist ein Maß für die Wärmeschwingung der Moleküle eines Stoffes.

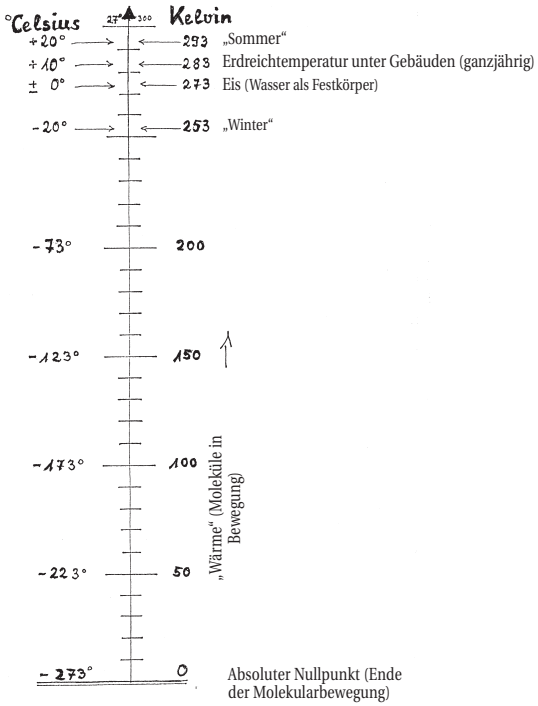
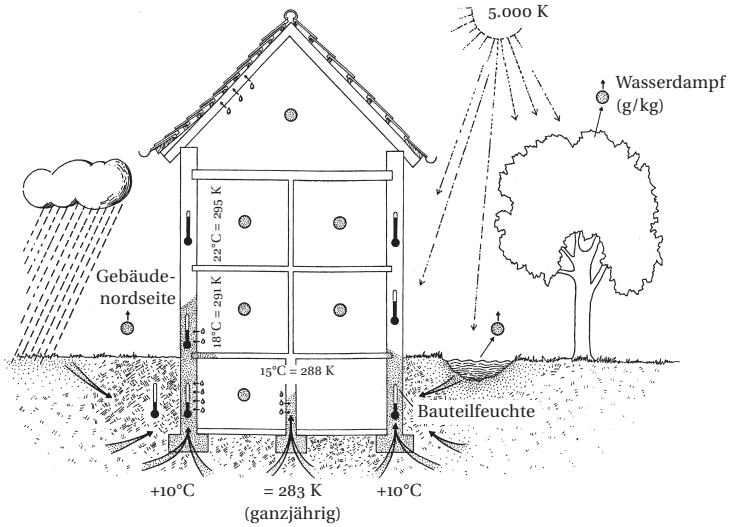


Abbildung 3:
Sommerfeuchte im unbeheizten Gebäude
Zeichnung Hans Stölzl, Bayer. Landesamt für Denkmalpflege, München.



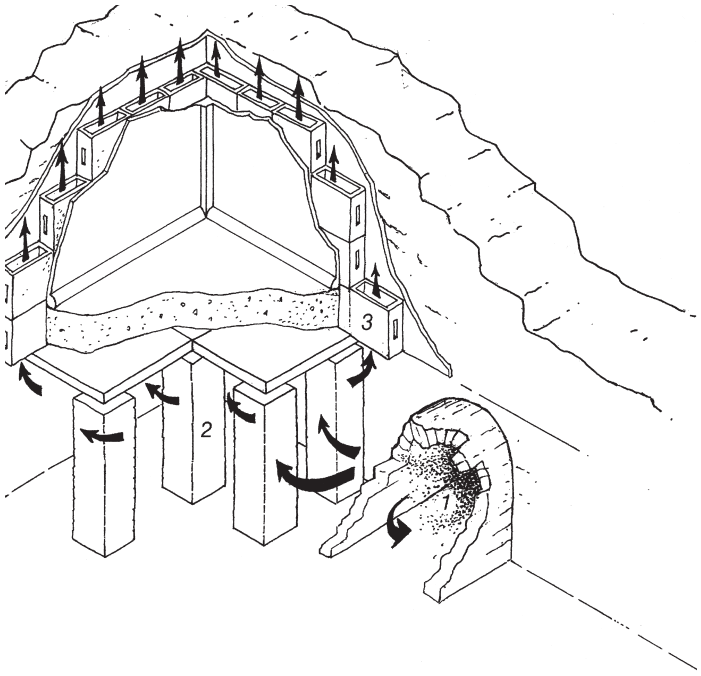


Abbildung 5:
Hypokaustenheizung, Funktionsschema: 1 Feuerungsraum, 2 Hypokaustpfeiler, 3 Wandheizungsziegel (tubuli)

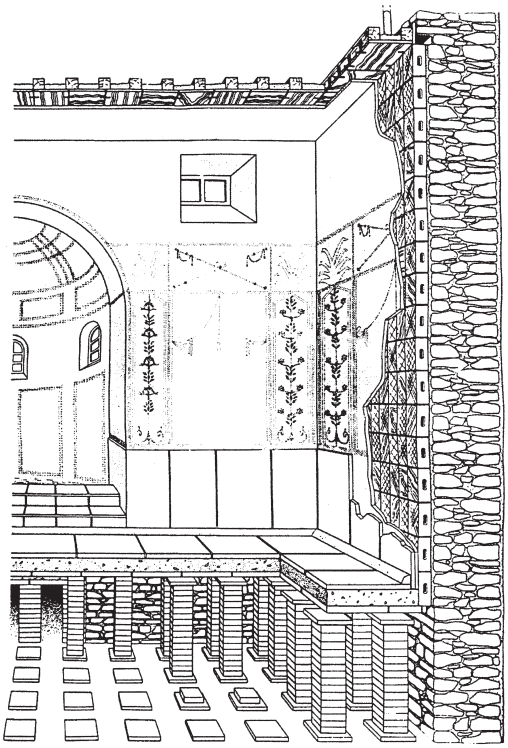


Abbildung 4:
Weißenburger Thermen, Schnittrekonstruktion der Nordwestecke des Caldariums aus: [2]

Abbildung 4 und 5: Feuchteschutz und Raumbeheizung vor 2000 Jahren: Temperierung der Gebäudehülle durch Hypokaustenheizung – Keine Putz- und Sockelschäden durch Feuchte

Schichten fest (Wärmedämmung, Feuchtesperre), deren Funktionen schon immer durch Wärme „an der richtigen Stelle“ erfüllt wurden. Dies gilt für den erdberührten Bereich wie für das Außenmauerwerk, das auch im Winter trotz hoher Wassertemperaturen in den Thermen (~ 45°C) kondensatfrei blieb (Abb. 4 und 5).

In *Großräumen* wird je eine Heizrohrschleife in entsprechenden Höhen montiert, in Kirchen an den Sockeln der Umfassungswände, ggf. auf der Empore, bei großer Grundfläche Einrohrringleitungen um die Bankpodeste, unter Einbindung der Basen von Säulen und Pfeilern); in Glasfassaden erfolgt eine freie Führung angestrichener Rohre im Halteapparat; Trennwandsockel der nicht unterkellerten Räume erhalten beidseitig je ein Rohr. Bei *Wohnraumanforderungen* kann in Gebäuden mit starkem Mauerwerk (50 cm und mehr) der Rücklauf der einzigen Schleife in Brüstungshöhe montiert werden, bei Stärken unter 50 cm mit Umwegschleifen in den Leibungen. In Gebäuden mit geringeren Wandstärken wird eine zweite Schleife in Höhe der Brüstung montiert, in Fachwerkbauten längs der Brustriegel, wobei hier deren Rücklaufumwegschleifen beidseitig der Fenster zwingend sind; Leichtbauten erhalten eine analoge Rohrführung in einer Aufdopplung der inneren Schalung der Außenwand.

Bei höherer Temperaturanforderung in *erdberührten Räumen* bis hin zur Wohnraumnutzung können bei mineralischen Bodenbelägen zur Temperierung des Bodens anstelle einer Fußbodenheizung mit Wärmedämmung ein bis zwei Umwegschleifen der Trennwandleitung im Dickbett oder Ausgleichsestrich des Plattenbelages verlegt werden (Rohrabstand 50 bis 100 cm, Vorlauf im Dauerbetrieb ca. 30°C). Bei wechselnder Raumnutzung erlauben sie durch zeitweise Anhebung des Vorlaufs die rasche Herstellung höherer Bodentemperaturen (z. B. bei Wechsel zwischen Ausstellungsbetrieb und museumspädagogischer Nutzung). Bei Holzböden genügt die Rohrführung an den Wandsockeln (Abb. 6).

Das erste Heizrohr einer Wandschleife liegt grundsätzlich möglichst in der Wand-Boden-Ecke direkt über der Oberkante des Bodenbelags. Der *Durchmesser* der Heizrohre beträgt 12 – 18 mm in normalen Raumgrößen, bis 22 mm in Großräumen. Der Rohrabstand in einer Schleife entspricht der lichten Weite des Paßstücks des Rohrbogens oder die Oberkante des Rücklaufrohres liegt in Höhe der Fensterbankunterkante. Bei zwei Schleifen wäre dies das Höhenmaß des Vorlaufs der zweiten Schleife. Die *Montage* erfolgt in der Regel knapp unter Putz oder Steinleiste (Stärke max. 15 mm), bei hölzernen Sockelleisten direkt über diesen. Bei Holzleisten über 5 cm Höhe in nicht unterkellerten Räumen wird zusätzlich eine Ringleitung in der Raumecke montiert (vor oder hinter der Leistenunterkante), bei Erneuerung des Bodenaufbaus in der Rohbodenecke. Das beste Material ist Kupfer blank. Korrosionsprobleme in Verbindung mit Putz oder Estrich treten nicht auf, weder bei frischem Material, wenn es bei handwarmen Rohren aufgebracht wird, noch nach dem Abbinden, da ein Heizrohr bei Nicht-Betrieb Umgebungstemperatur annimmt. Die spätere Betriebstemperatur der an der Wand verlegten Rohre ist nach oben nicht begrenzt, bei Rohren im Bodenaufbau genügen max. 35°C Vorlauf. Da Risse in Putz oder Estrich nicht durch die Rohrtemperatur, sondern durch Zwängspannungen entstehen, werden zu deren Vermeidung die kalten Rohre mit entsprechender Toleranz montiert und nach Putzauftrag kurz aufgeheizt (min. 60°C), so daß an den Richtungsänderungen im noch weichen Material Hohlräume entstehen (s. Kap. 6.3.2). Bei Aufputzmontage (Rohre in Wandkontakt und angestrichen) ist die Pufferwirkung des Mauerwerks für betriebsbedingte *Leistungsschwankungen* geringer. Dies gilt umso mehr bei Rohrverlegung auf Holz, da die freie Rohroberfläche bei Unterbrechungen auf Raumtemperatur abkühlt. Als Anstrichmaterial kann hier Klarlack aufgetragen werden.

Bei Neubau wie Sanierung sollte der Einbau der Temperieranlage gegen Ende der Rohbauphase abgeschlossen sein, so daß die Inbetriebnahme so bald wie möglich, ggf. noch bei provisorischen Fenstern erfolgen kann. Dadurch wird die *Bauzeit verkürzt*, da sich die Warte- und Trocknungszeiten bei den mit neuem

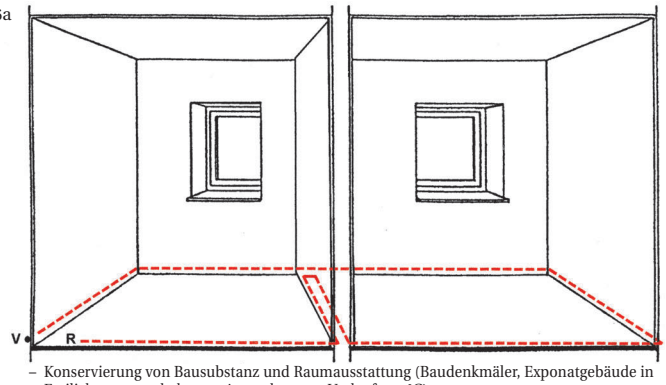
Abbildung 6:
Beispiele für die Rohranordnung

V Vorlauf
R Rücklauf
AS Außenwand-Schleife
TS Trennwand-Schleife (in *Kellern*: bei höherwertiger Nutzung; in *EG-Räumen*: bei nicht unterkellerten bzw. außenluftberührten Böden, über unbeheizten Kellerräumen)
Vorlauftemperatur-Angaben: Routinebetrieb im Jahresablauf, nach Trocknungsphase mit maximaler Vorlauftemperatur
Bei Verdopplung der Rohrführung nach 6d (Sockel- und Brüstungsschleife mit Leibungsumweg des oberen Rücklaufs) geringere Vorlauftemperaturen (< 50°C) und geringer Rohrdurchmesser möglich (15 mm).

Sichtbare Montage: Rohre in Wandkontakt, gestrichen
Unsichtbare Montage: Überdeckung nur mineralisch (max. 1,5 cm Putz oder gleichstarke Stein-Stoßleiste; bei Holzstoßleiste Rohre darüber anordnen)
Rohrabstand bei Schleifen = lichtes Maß des Löt-Fittings (Weich-Lötung)
Rohrmaterial: Optimale Leistung bei blankem Kupfer (bei CU-*Heiz*rohren Korrosionsschutz nicht erforderlich)

Zeichnungen Rainer Köhnlein, Landesstelle für die nichtstaatlichen Museen in Bayern, München und Michael Kotterer, Regensburg.

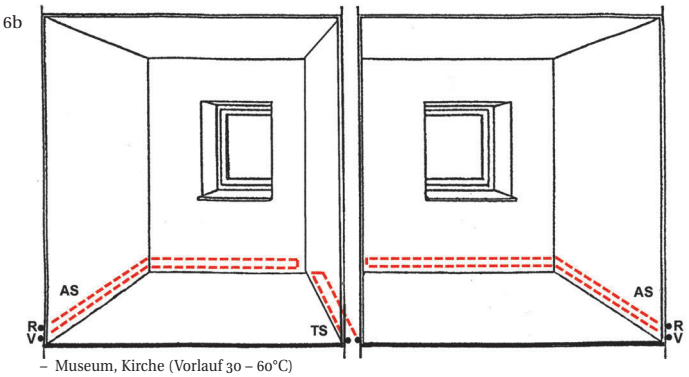
6a



– Konservierung von Bausubstanz und Raumausstattung (Baudenkmäler, Exponatgebäude in Freilichtmuseen, behauste Ausgrabungen; Vorlauf ~ 30°C)
– Feuchtesanierung und Beheizung von Kellern (Vorlauf 30 – 40°C)

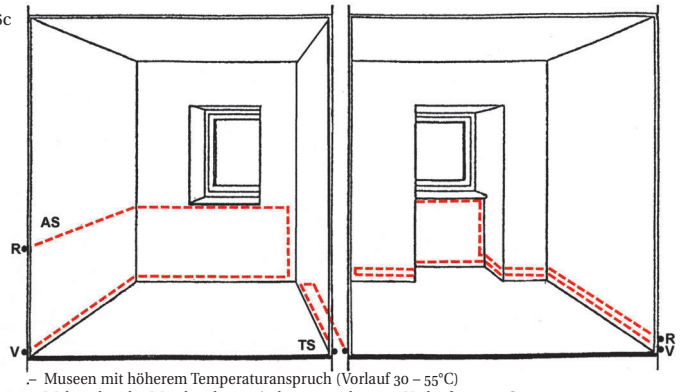
Dargestellte Ringführung ausreichend für den halben Kellergrundriß eines Einfamilienhauses

6b



– Museum, Kirche (Vorlauf 30 – 60°C)
– Wohngebäude (Wandstärke ab 60 cm; Vorlauf 30 – 65°C)

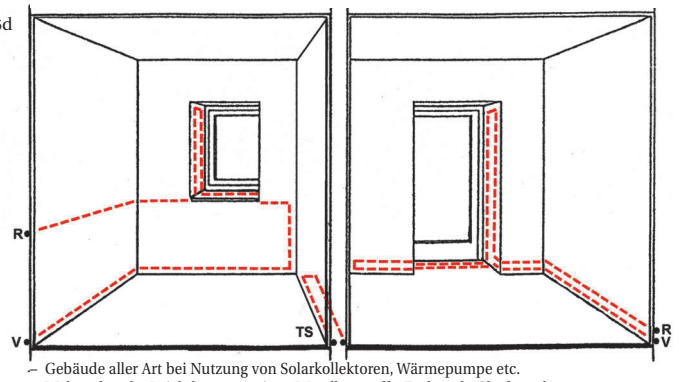
6c



– Museen mit höherem Temperaturanspruch (Vorlauf 30 – 55°C)
– Wohngebäude (Wandstärken zwischen 30 und 60 cm; Vorlauf 30 – 65°C)

Brüstungsrohr in Berührung mit Fensterbankunterkante

6d



– Gebäude aller Art bei Nutzung von Solarkollektoren, Wärmepumpe etc.
– Wohngebäude (Leichtbau: porosierte Wandbaustoffe, Fachwerk, Glasfassaden; Vorlauf 30 – 65°C)

Feuchteeintrag verbundenen Ausbaumaßnahmen verringern. Die erste ungeregelte Betriebsphase zur Trocknung der oberflächennahen Bauteilschichten, die die Voraussetzung für eine sinnvolle Einregulierung ist, endet dann mit der Bauzeit.

Die aus der Temperierung der Gebäudehülle folgende Raumklimaqualität wird auch durch *Wandheizung und Betonkernaktivierung* erreicht. Bei Temperierung ist der Aufwand jedoch wesentlich geringer: Die Rohrlänge pro laufendem Wandmeter ist wesentlich geringer und weder an den Rückseiten der Rohre, noch an den Bauteilen selbst wird eine Wärmedämmung benötigt, da sich deren Funktion aus der Materialtrocknung und der Optimierung des Wärmespeichervermögens ergibt. Durch Wärmeflußmessung wurde ein theoretisch angenommener erhöhter Wärmedurchgang im Rohrbereich im Vergleich zur übrigen Wandfläche nicht bestätigt; stattdessen wurde an einer baugleichen und gleich exponierten Wand bei Heizkörperheizung ein höherer Wärmedurchgang im Vergleich zur temperierten Wand festgestellt [3].

Einleitung: Der Bedarf an alternativer Wärmeverteilung ist evident

Das Verfahren der Temperierung wurde seit 1982 in öffentlichen Bauvorhaben entwickelt von der LANDESSTELLE FÜR DIE NICHTSTAATLICHEN MUSEEN IN BAYERN (von 1978 bis 1990 beim Bayerischen Nationalmuseum, seitdem beim Bayerischen Landesamt für Denkmalpflege) in Zusammenarbeit mit Baubehörden und freiberuflichen Fachleuten. Ausgangsbasis waren die im Pilotprojekt Stadtmuseum Starnberg beobachteten bauphysikalischen Effekte von kontinuierlich beheizten Außenwand-Vorsatzschalen und Sockelheizleisten: Der tatsächliche Wärmebedarf war deutlich geringer als der nach DIN berechnete; ohne Zusatzmaßnahmen ergab sich die Ausschaltung von aufsteigender Feuchte, Schadsalzaktivität und Kondensation; Wärmeschutzmaßnahmen konnten auf die Dämmung des Daches beschränkt werden. Nach Abdichten der außergewöhnlich vielen Baufugen trat schließlich auch die Klimastabilisierung ein, wobei der Luft*be*feuchtungsbedarf bei Frost minimal war, während der *Ent*feuchtungsbedarf dank der Raumtemperierung ganz entfiel. Eine derartige Diskrepanz zwischen dem nach konventionellem Planungsansatz „erforderlichen“, allgemein anerkannten Aufwand und dem bei Temperierung der Gebäudehülle tatsächlich nötigen zeigte sich in späteren Projekten regelmäßig. Bald stellte sich heraus, daß diese Gesamtwirkung mit viel geringerem Aufwand erreichbar ist.

Die Quintessenz dieser Entwicklung, die vor 20 Jahren im Museumswesen begann, findet im allgemeinen Bauwesen zunehmend Beachtung: Warme und trockene Räume und ein zugleich konservatorisch und physiologisch günstiges Raumklima lassen sich durch „Temperierung“ der Gebäudehülle (d.h. durch Beheizung von Gebäuden mittels Sockelheizrohren) viel besser und einfacher herstellen, als – wie allgemein üblich – durch direkten Eingriff in den Raumluftzustand mit Hilfe von Heizkörpern und Raumlufttechnik. Zunehmend wird erkannt, daß die Nachteile konventioneller Verfahren zur Raumbeheizung und Klimatisierung direkt daraus folgen, daß sie ihre Ziele durch Einwirkung auf die freie Luft im Raum verfolgen: Durch Aufheizung der Raumluftmasse in den schachtartigen Hohlräumen der Heizkörper und Verteilung der Wärme im Raum durch „Selbst-Umwälzung“ der „Heizluft“ oder durch ständige Konditionierung der Raumluft in der Zentrale einer Klimaanlage und mechanische Umwälzung dieser „teuren“ Luft mit Hilfe von Ventilatoren und Kanälen im Gebäude. Dabei werden nicht nur einfachste physikalische Fakten mißachtet („warme Luft steigt nach oben“), sondern die Luft, das wichtigste „Lebensmittel“ des Menschen (s. 1.2.3.1), wird als technisches Medium mißbraucht. Daß diese Erkenntnis nicht durch die haustechnische Fachwelt herbeigeführt wurde, sondern durch den Museumssektor, könnte auf der Tatsache beruhen, daß die Forderung nach Klimastabilität den *kontinuierlichen* Betrieb von Heizanlagen voraussetzt, also ohne Temperaturabsenkungen wie bei Nacht-, Montags- oder Wochenendabsenkung. Dabei zeigen sich folgende Effekte:

– die energetische Relevanz des zuliefernden Rohrnetzes, dessen Wärmeabgabe deutlich wird,
– der große Einfluß, den kleine, kontinuierlich angebotene Energiemengen auf speicherfähige Bauteile ausüben,
– die höhere Nutzung der täglichen solaren Zustrahlung dank trockener Bauteile mit höherem Anfangs-Wärmeinhalt am Morgen.

Die konservatorische, bauphysikalische, physiologische und energetische Relevanz der Methode der „Temperierung“ wird im folgenden mit besonderem Blick auf die Problematik im Museum näher erläutert, da man hier allgemein davon ausgeht, daß sich physiologisch angenehme Raumverhältnisse und konservatorisch erforderliche Klimaqualität gegenseitig ausschließen. Dieses Dilemma entsteht aber nur bei konventionellem Konzept, also bei direktem Eingriff in den Raum*luft*zustand. Eine andere Facette zeigt das Museumsdepot, dessen Hauptaufgabe die Langzeit-Konservierung der nicht ausgestellten Sammlung ist. Neben seiner konservatorischen Bedeutung hat es bei großen Stückzahlen und Großobjekten auch eine wirtschaftliche: Der „angetroffene Zustand“ der Objekte einschließlich der Beschaffenheit aller ihrer Oberflächen soll möglichst ohne Arbeitsaufwand und ohne Konservierungsstoffe beibehalten werden können. Die bloße Einlagerung eines unkonservierten Objektes in ein Depot soll dazu führen, daß weder Lichtschäden, noch Malschichtlockerungen oder Korrosion weiter fortschreiten, daß ohne Einsatz biozider Mittel die Aktivität vorhandener pflanzlicher Schädlinge und Mikroorganismen beendet und ein Neubefall unmöglich ist und daß die Lebensbedingungen für Insekten verschlechtert werden, dies alles mit möglichst geringem Energieaufwand.

Die Problematik verschärft sich noch um die bauphysikalische Komponente, wenn man, stellvertretend für historische Bausubstanz mit originaler Oberfläche, ein Exponatgebäude im Freilichtmuseum mit ganzteiltransferierten Originalbauteilen betrachtet: Das Gebäude muß nicht nur Schutzhülle für das Inventar sein, sondern der Baukörper selbst, insbesondere die aufwendig konservierte äußere Oberfläche der Gebäudehülle, sollten nach dem Wiederaufbau im Museum ohne ständige Reparaturmaßnahmen erhalten werden können. Dies gilt erst recht für Baudenkmäler, die zu Wohnzwecken genutzt werden, da hier die äußeren und inneren Oberflächen ohne gestaltverändernde „Verbesserung“ durch Wärmedämmung und Dampfsperren auskommen sollten, bei möglichst geringem Energiebedarf und ohne Durchfeuchtung der Außenbauteile. Dazu gesellt sich das Problem der aufsteigenden Feuchte, das möglichst ohne Eingriff in die Bausubstanz oder gar Austausch der Mauersockel zu lösen ist. Gleichzeitig soll die Methode auch für Neubauten vorteilhaft sein, und zwar für alle Nutzungsarten wie für alle Bauweisen.

Wie kann man nun all diese aus konventioneller Sicht hochgesteckten Ziele nicht nur überhaupt, sondern auch noch mit minimalem finanziellen Aufwand erreichen? Wie kann man ferner generell die Kosten in relevantem Maße senken, die heute als Standard angesehen werden für das Bauen und Sanieren, das Heizen und Klimatisieren, den Feuchte- und Wärmeschutz?

1. Langzeiterfahrung mit Temperierung

In diesem Jahr blickt die Landesstelle zurück auf mehr als 20 Jahre Erfahrung mit alternativer Raumheiztechnik, deren physikalische „Nebeneffekte“ wie Heizenergieeinsparung, Bauteiltrocknung, Luftentfeuchtung und Klimastabilisierung sowie Konservierung von Bausubstanz und Raumausstattung zu deutlichen Kosteneinsparungen bei den meisten Bauaufgaben führen. Sie sind daher gleichermaßen relevant für Neu- wie Altbauten, für Baudenkmäler, Kirchen, Exponatgebäude in Freilichtmuseen, Bergkeller wie behauste archäologische Ausgrabungen. Von Anfang an wurden die Ziele nicht, wie sonst üblich, mit Klimageräten, raumlufttechnischen Anlagen, speziellen Baumaterialien oder Konservierungsstoffen verfolgt, sondern mit Wandheiztechniken in Verbindung mit einfachsten Maßnahmen zur Luftwechselkontrolle. Trotz der zunehmenden Zahl an

Objekten, die die umfassende Wirkung bei immer geringerem Aufwand sichtbar machten, schien die Entwicklung zunächst nur auf einem „Langen Marsch der Empirie gegen die Theorie der Fachwelt“ durchsetzbar zu sein, obwohl gegen Ende der 1980er Jahre nachgewiesen wurde, daß die Effekte durch Sockelheizrohre allein erreichbar sind, also ohne die bis dahin von den Fachleuten als notwendig erachteten Wand- und Bodenschalen mit integrierten „Heizkörpern“ wie Heizleisten oder Kleinkonvektoren.

Derartige Widerstände, die gerade in dieser Phase zunächst regelmäßig auftraten, deckten bald das „Gürtel-Hosenträger-Phänomen“ auf: Der empirischen Beobachtung, daß Sockelheizrohre sanieren und heizen („Gürtel hält Hose“), steht auch heute noch allzu oft die theoretische Überlegung entgegen, daß die Heizleistung wegen zu geringer Raumluftkonvektion (!) nicht ausreichen kann und Heizkörper bzw. Klimaanlage sowie Maßnahmen zur Trockenlegung, Bodenisolierung, Wärmedämmung etc. („Hosenträger“) zusätzlich erforderlich sind. Auch heute noch gleicht die amtliche Beratung, die die Vorteile der Methode und ihr großes Einsparpotential zu allgemeiner Nutzung bereit stellt, oft einem „Hindernisrennen“ gegen die meist unglückliche Handhabung der Honorarordnung durch öffentliche Auftraggeber (Honorarhöhe nicht nach Einsparungsleistung entsprechend § 29,2 HOAI, sondern nach Höhe der Bausumme), gegen kommerzielle Interessen von Firmenvertretern oder gegen die DIN-Norm-Keule schwingende Planer, beide unabsichtlich „unterstützt“ durch die allgemeine DIN-Gläubigkeit, die in allen Ebenen anzutreffen ist, obwohl die Normen nicht verbindlich sind (s. Kap. 8), ihre Einhaltung jedoch zu einer Summe aufwendiger Einzelmaßnahmen mit sich überlappenden Effekten führt. Erschwerend wirkt die Argumentation namhafter Gutachter, deren Vermutungen (!) oft mehr Gewicht haben als die inzwischen nach Hunderten zählenden Beispiele. Es gilt also weiterhin, die bei „musealem“, d. h. kontinuierlichem Heizbetrieb beobachteten, inzwischen ausreichend erforschten großen Wirkungen kleiner, stetig an die Gebäudehülle abgegebener Energiemengen nicht nur für den Laien, sondern gerade für die Fachwelt verständlicher zu beschreiben, deren Ausbildung bis heute nicht auf die ganzheitliche Wahrnehmung kleiner Wirkungsquanten und die vernetzte Betrachtung von Feuchte- und Wärmephänomenen an Bauteilen ausgerichtet ist.

Die durch die reine Rohrlösung gelungene starke Vereinfachung der Heiz- und Klimatisierungstechnik sowie der Feuchtesanierung führte zu einer zunehmenden Anwendung der Temperiermethode in Bauwerken aller Konstruktions- und Nutzungsarten. Der Grad der Vereinfachung wird an einem Großbeispiel, dem Alf Lechner Museum in Ingolstadt, gezeigt (Kap. 7). Zuvor jedoch werden die drei wichtigsten Erkenntnisse dargestellt, die sich aus der Langzeiterfahrung mit einfachster Wandheiztechnik ergaben:

- Temperierung senkt Kosten für Feuchtesanierung, Heizung und Klimastabilisierung.
- Temperierung schafft durch „Strahlungsklima“ zugleich konservatorisch und physiologisch günstige Raumverhältnisse.
- Temperierung und Luftwechselkontrolle schaffen ein „Universal-Klima“.

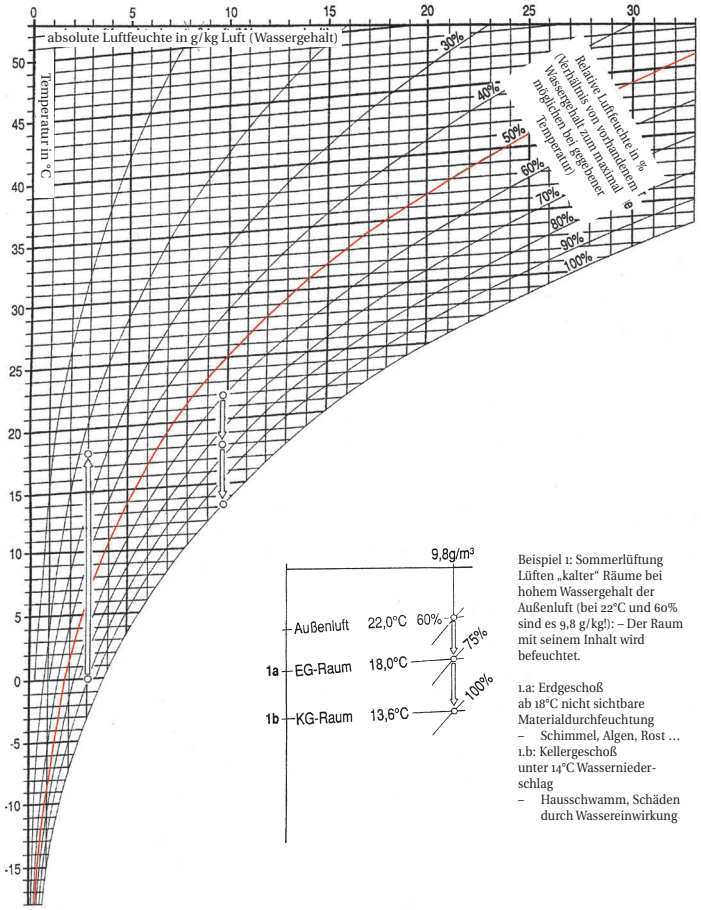
Dann werden die daraus ableitbaren Anforderungen an ein alltagsgerechtes Raumklima formuliert. Schließlich wird der technische Mindestaufwand erläutert, mit dem man die integrierte Aufgabenstellung „Heizen – Dämmen – Feuchtesanieren – Klimatisieren“ noch sicher lösen kann, anstatt zahlreiche teure Einzelmaßnahmen durchzuführen.

1.1 Temperierung senkt Kosten für Feuchtesanierung und Klimastabilisierung

Die erste Erkenntnis ist von ökonomischer, im Fall eines Baudenkmals auch von denkmalpflegerischer Bedeutung: Mit minimaler technischer Ausstattung können Bauwerke in allen ihren Ebenen bauphysikalisch saniert, auf nutzerfreundliche Weise konservatorisch optimiert und zugleich selbst konserviert werden (Mindestfall: zwei Sockelheizrohre an den Innenseiten aller Außenwände, je ein

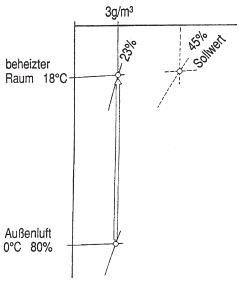
Rohr beidseitig der Trennwandsockel des Kellers bzw. nicht unterkellerten Erdgeschosses, Abdichtung der Bau- und Öffnungsfugen, evtl. ein Abluftventilator). Gebäude, deren Hülle über eine Mindestmasse und deren Glasflächen über eine Außenbeschattung verfügen, erreichen diese Ziele mit geringem Energieeinsatz und ohne sommerlichen Kühlaufwand. Bei entsprechender Auslegung (z. B. durch Installation einer zweiten Heizrohrschleife in der Brüstungsebene der Außenwände mit Rücklaufumweg in den Laibungen) sind auch bei geringen Wandstärken ohne Wärmedämmung Wohnraumtemperaturen zu erzielen.

Zur universellen Nutzung und zum Feuchteschutz von Räumen mit erdberührten Bauteilen, die keine solare Zustrahlung erfahren, ist aber generell auch im Sommer ein minimaler Heizbetrieb erforderlich (Leistungen zwischen 5 und 15 W pro m Wandsockel, in Kellern bis zu 30 W/m), da die Räume nach Abstellen der Heizung für Wohnzwecke zu kalt und für die Lagerung vieler Materialien zu feucht werden (Abb. 2, 3 und 7). Dies gilt oft auch für Neubauten trotz Dränage und Außendämmung. Da aber bei Temperierung solcher Räume zum Zweck der



Beispiel 1: Sommerlüftung
Lüften „kalter" Räume bei hohem Wassergehalt der Außenluft (bei 22°C und 60% sind es 9,8 g/kg!): – Der Raum mit seinem Inhalt wird befeuchtet.

1.a: Erdgeschoß
ab 18°C nicht sichtbare Materialdurchfeuchtung
– Schimmel, Algen, Rost …
1.b: Kellergeschoß
unter 14°C Wasserniederschlag
– Hausschwamm, Schäden durch Wassereinwirkung



Beispiel 2: Winterlüftung
Lüften beheizter Räume bei geringem Wassergehalt der Außenluft (bei 0°C und 80% sind es nur 3 g/kg!)
Der beim Lüften austretende Wasserdampf wird trotz hoher relativer Außenluftfeuchte nicht ersetzt.

Abbildung 7:
Mollier-h,x-Diagramm
Abhängigkeit des *örtlichen* Wertes der relativen Raumlufteuchte vom Wassergehalt der Außenluft sowie von der Raum*luft*temperatur bzw. von der Bauteil-*Oberflächen*temperatur

Zeichnung Erich Hackl, München

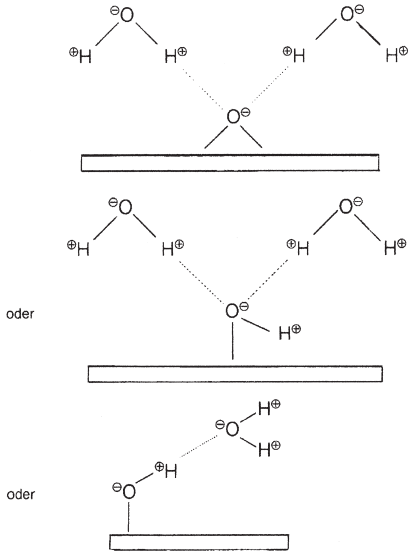


Abbildung 8:
Wasserstoffbrücken an hydrophilen Oberflächen
Die Balken repräsentieren zwei Beispiele der „inneren Oberfläche" (Kapillarwand) poröser mineralischer Stoffe (Mauerwerk, Putz etc.) mit möglichen Formen der Adsorption des Wassermoleküls durch Bildung einer Wasserstoffbrücke.

Durch geringfügige Temperaturerhöhung, d. h. durch geringe Verstärkung der Wärmeschwingung der Moleküle des Materials einschl. der Bindungspartner an der Kapillarwand kann diese schwache Bindung gebrochen werden (Beginn der Materialtrocknung durch langsame Verdrängung von Wassermolekülen im Wärmegefälle) bzw. kann ihre Neubildung verhindert werden (Ausschaltung von aufsteigender und Niederschlagsfeuchte).

Zeichnung aus: Torraca, G.: Poröse Baustoffe. Wien 1986, S. 13f.

Luftentfeuchtung die Trockenlegung und Schadsalz-Inaktivierung, der Kondensatschutz und die energetische Verbesserung der Außenbauteile physikalische Nebeneffekte sind, kann auf die konventionellen Maßnahmen ohne Einbuße verzichtet werden.

Dies erfordert an der Raumseite das Vorhandensein oder die Herstellung einer Schicht, die keine Fugen und Großporen, sondern nur noch Kapillaren hat, da in einer solchen Schicht die Bewegung von *flüssigem* Wasser nicht mehr möglich ist, sondern nur noch die von Einzelmolelkülen („Wasserdampf") durch Bildung von Wasserstoffbrücken (Abb. 8). Diese Bewegung kann durch die geringe Wärmeabgabe des *Warmluftauftriebs* oberhalb einer Rohrstrecke unterbunden werden, da nur eine geringfügige Erhöhung der Temperatur der raumnahen Bauteilschicht erreicht werden muß. Die daraus folgende leichte Erhöhung der Wärmeschwingung der Moleküle der Materialschicht läßt keine Neubildung von Wasserstoffbrücken mehr zu. Bei zunehmender Oberflächentemperatur kommt es dann auch zu einer langsamen Verdrängung von Wassermolekülen nach außen (s. auch Kap. 4.1). Natursteine ohne Mörtelfugen oder poröse Steine müssen also verputzt werden, während bei normal gebrannten Ziegeln und Steinen mit Kapillaren nach sorgfältiger Nachbesserung des Fugennetzes ein Zustand in Sichtmauerwerk bestehen bleiben kann. Die Trockenlegung der *Sockel* von Kellerwänden bzw. nicht unterkellerten Erdgeschoßwänden erfolgt durch die *„thermische Horizontalsperre"*, die sich bei kontinuierlicher Sockelbeheizung dadurch ergibt, daß sich – ausgehend vom faustgroßen Wärmestau in der unmittelbaren Rohrumgebung – geringe Wärmemengen *radial*, also gleichzeitig nach allen Seiten, in der Sockelzone ausbreiten und zylindrische Isothermen herstellen (Abb. 1).

Bei Temperierung ist auch aus energetischer Sicht der Verzicht auf die aufwändigen konventionellen Feuchte- und Wärmeschutzmaßnahmen sinnvoll. Nach Ablauf der ersten Heizperiode, in der die Trocknung der gesamten Gebäudehülle bei erhöhtem Energieeinsatz forciert werden sollte (Vorlauftemperatur so lange wie nötig mindestens 60°C), beginnt der Wärmebedarf zu sinken (auch in den erdberührten Bereichen), so daß je nach Masse des Baukörpers und Feuchtegrad der Bausubstanz nach einem oder wenigen Jahren der Jahresheizenergiebedarf trotz der „Sommertemperierung" geringer wird als bei konventioneller Klimatisierung zur Luftentfeuchtung bzw. bei üblicher Beheizung nur während der Heizperiode.

Während der späteren Heizperioden ist der Wärmebedarf im Vergleich zu „Luft"-Heizung aber nicht nur durch Trocknung des Mauerwerks und Optimierung seines Speicherverhaltens geringer, sondern, unabhängig vom Nutzerverhalten, auch dadurch, daß die *Raumluft* eine „geringe" Temperatur hat, d. h. eine Temperatur, die nicht über der Wandoberflächentemperatur (z. B. 20°C) liegt. Daher gibt es bei Temperierung nicht das Entweichen von Warmluft zur Zimmerdecke und in das Treppenhaus wie bei „luftheizenden" Verfahren, und die an Fugen und Öffnungen heizbedingt aus dem Gebäude austretenden Luftmengen sind klein – „es zieht nicht" beim Lüften. Im Vergleich dazu vagabundieren bei Heizkörperheizung große Warmluftmengen im Gebäude umher und ständig treten heizbedingt große Luftmengen mit hohem Energieinhalt aus. Einen 60 Grad heißen Heizkörper verläßt die Luft mit 58°C – nicht mit „Raumtemperatur". Die stets zu hörende „Fach"-Aussage, bei Strahlungsheizung sei die Raum*luft*-temperatur geringfügig niedriger als bei Heizkörperheizung, ist daher grotesk. Am unteren Ende eines nicht geschlossenen Kippfensters kommt nicht einfach warme Luft, sondern das Heizmedium an!

Die genannten Effekte stellen sich bereits bei Fachwerk-Wandstärken ein. Ausbesserungen der Gefache sollten grundsätzlich mit schwerem Material ausgeführt werden. Bei Leichtbauten wie Scheunen mit Brettschalung oder Glasbauten wäre schon im Hinblick auf die Klimastabilisierung – unabhängig von der heiz- und klimatechnischen Ausstattung – zunächst die bauliche Voraussetzung zu schaffen: Die Fähigkeit der Gebäudehülle, die Wirkung von Sonneneinstrahlung

und Außentemperaturschwankung zu dämpfen, müßte verbessert werden: bei Leichtbauten z. B. durch Erhöhung der Masse der opaken Bereiche (Dämpfung der Temperaturspitzen durch Vorratsbildung!), bei Glasbauten durch äußere Beschattung der transparenten Flächen (Dämpfung durch Reflexion). Dann kann auch hier durch einfache Rohrführung das Klima stabilisiert werden, z. B. durch offene Verlegung angestrichener Heizrohre auf den Füllungen oder Vormauerungen bzw. im Halteapparat von Glasfassaden (thermisch vom Metall getrennt, Abb. 25).

1.2 Temperierung schafft durch „Strahlungsklima" zugleich konservatorisch und physiologisch günstige Raumverhältnisse

Die zweite Erkenntnis, die sich aus dem musealen Sektor allmählich auf den allgemeinen Bausektor überträgt, ist, daß im Zusammenspiel derart einfacher Mittel sowohl in konservatorischer als auch in physiologischer Hinsicht eine hohe Klima-Qualität eintritt, ein „Strahlungsklima", das nicht durch Manipulation der Raumluft, sondern durch die gleichförmige Wärmeabstrahlung der Raumhüllflächen erzeugt wird. Dem steht die noch immer weit verbreitete Annahme gegenüber, daß eine hohe Klima-Qualität nur mit teuren Klimaanlagen erreichbar sei. Diese Annahme resultiert aus zwei falschen, weltweit bisher kaum hinterfragten Anschauungen:

1. „Das konservatorische Ziel des optimalen und besucherfreundlichen Klimatisierens ist nur erreichbar, wenn die Raumluft ganzjährig auf bestimmte, in allen Regionen gleiche Werte von Temperatur und relativer Luftfeuchte hin konditioniert wird, und zwar auf Werte, die vom Material der jeweiligen Objekte verlangt werden".
2. „Der einzige Weg zu einer entsprechenden Einwirkung auf die Raumluft ist, sie fortwährend durch einen Apparat zu schleusen und im Gebäude umzuwälzen, im Idealfall mittels Klimaanlage mit möglichst weit verzweigtem Kanalsystem".

Diesem Konzept, das noch heute den meisten Großprojekten zu Grunde liegt, entziehen bereits zwei einfache Tatsachen die Basis:

Zu 1.: Im Normalfall besteht ein Objekt aus verschiedenen Materialien (ein Gemälde z. B. aus einem Textil oder einer Holztafel und verschiedenen Arten von Malschichten).

Zu 2.: Ein Bild an einer *kalten* Wand (z. B. einer Außenwand bei konventioneller Heizung) nimmt mehr Feuchte aus der Raumluft auf als ein Bild an einer *warmen* Wand (z. B. der Innenwand desselben Raums).

1.2.1 „Luftheizung" schafft konservatorisch absurde Raumverhältnisse

Gerade die spezifische Wirkungsweise von Klimaanlagen aber (die Raumluft wird dauernd bewegt, apparativ behandelt und in metallischen Kanälen geführt; der Einfluß auf Außenbauteile ist ungenügend, durch Möblierung bzw. Nutzung der Wand als Hängefläche wird er z. T. ganz ausgeschaltet) bedingt gewisse Mängel, die, bis auf den Kostenaspekt, auch für die Heizkörperheizung gelten: Die Kosten von „guten" Klimaanlagen sind allein deswegen so hoch, weil sie ein äußerst aufwendiges Kanalsystem benötigen. Denn während die Führung unbehandelter Luft relativ einfach ist, wie ein frei aufgestellter Ventilator zeigt, erschwert eine physikalische Grundtatsache es, den Weg erwärmter oder gekühlter bzw. be- oder entfeuchteter Luft außerhalb der Kanäle, d.h. im freien Raum, zu bestimmen. Nicht nur wärmere Luft steigt nämlich auf, da sie leichter als kältere ist, sondern auch feuchtere Luft ist leichter als trockenere und steigt daher ebenfalls, so wie nicht nur kältere, sondern auch trockenere Luft absinkt.

Luftbefeuchten heißt nämlich, daß schwerere Luftmoleküle wie das Sauerstoff- und das Stickstoff-Atompaar sowie die Dreiergruppe Kohlendioxid durch die entsprechende Zahl leichter Wasserdampf-Moleküle (ein schweres Sauerstoffatom im Verbund mit zwei „federleichten" Wasserstoffatomen) aus dem Raum verdrängt werden, daß also bei gleich bleibender Molekülzahl der Anteil leichte-

rer Moleküle ansteigt. So „verschlägt es einem den Atem“, wenn man einen „vollklimatisierten“ Großraum im Winter, also bei beheizter und befeuchteter Raumluft, „von oben“ betritt, über eine Galerie oder eine hinunter führende Rampe. Luftentfeuchten bedeutet das Gegenteil: Der örtliche Entzug von leichten Wasserdampf-Molekülen erlaubt schwereren Molekülen, aus der Umgebung in die Raumluft hinein zu diffundieren.

Verstärkt wird das Problem, wenn räumliche Bedingungen für „Kamineffekte“ wie ein Treppenhaus oder eine Galerie in den klimatisierten Bereich integriert sind. Umso schwieriger wird es, einen örtlich vom Fühler festgestellten Bedarf über den Luftweg zu decken. Der ständige Regelungsbedarf, der aus dieser Schwierigkeit folgt, läßt eine Kurzzeit-Stabilität des Klimas gar nicht zu. Die gleiche physikalische Ursache bedingt die Durchfeuchtung des Bildes an der Außenwand, das dem befeuchteten Heizmedium, das bereits durch die Änderung des spezifischen Gewichts irregeleitet ist, den Weg zur Wandfläche hinter sich weiter erschwert. Ebenso wird weder die Wand, an der eine Vitrine steht, noch der Vitrineninhalt vom Heizmedium erreicht, so daß sie auskühlen. Der Wasserdampf dagegen findet durch Diffusion stets die kälteren Stellen eines Raumes.

1.2.2 Strahlungsklima: Konservatorische Vorteile

Im Gegensatz dazu entsteht durch direkt beheizte Wandflächen ein „Strahlungsklima“, ein schwankungsarmes, weil thermostabiles Raumklima, das – ohne Bewegung und Behandlung der Raumluftmasse – durch die Abgabe der in den Bauteilen gespeicherten Wärme ausschließlich durch Wärmestrahlung geschaffen wird. Dennoch ist nicht jede *Wandheiztechnik* für das Museum geeignet. Handelsübliche Wandheizregister z. B. sind stark strahlende Wandteilflächen, die wie ein frei stehender Kachelofen mit erhöhter Oberflächentemperatur eine Fernwirkung erzielen sollen und daher bei der Raumeinrichtung frei gelassen werden müssen, das Raumkonzept also einschränken. Die Sockelleistenheizung wiederum – ein Kleinkonvektor hinter einer schachtbildenden Blende – hat bereits allein wegen ihrer wandlangen Ausbildung einen positiven Einfluß auf die Wand, da schon bei Schwachbetrieb nicht nur der Wandsockel trocken und warm wird, sondern bereits dann schon von ihm ein schwacher Auftrieb ausgeht. Steigt jedoch die Wassertemperatur durch die Regelung auf 40°C oder höher, z. B. weil der Thermostat öffnet, so nimmt die Heizleistung plötzlich stark zu, da die feinen Konvektorschächte jetzt aktiviert werden. Da der Wärmebedarf des Raumes wegen des vorgenannten Effektes aber geringer als das neue Wärmeangebot ist, steigt die Temperatur der Wandoberfläche und deren Wärmeabstrahlung rasch an und der Thermostat verringert wieder den Wasserfluß. Wegen der weiter laufenden Konvektion kühlt der Kleinkonvektor nun kurzfristig auf die Temperatur der im unteren Raumteil kühleren Luft ab und reduziert seine Leistung. Seine unmittelbare Umgebung hält durch Speichereffekte die Grundversorgung aber aufrecht. Aus diesem Wirkungsablauf erklären sich die beiden bei Sockelleistenheizung zu beobachtenden Mängel, die (konservatorisch nur bei Wandgestaltung relevante) Verstaubung der Sockelzone und die leichten, durch die Längenänderung verursachten Knackgeräusche.

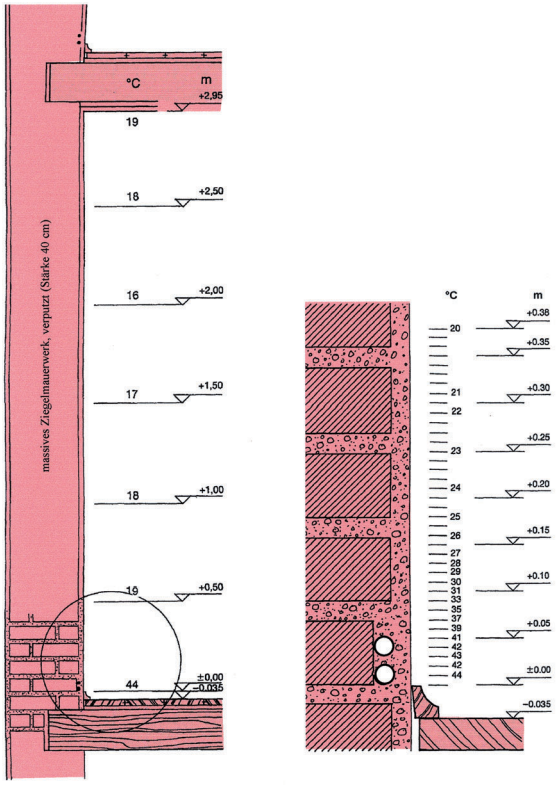
Die Methode der *Temperierung* dagegen vermeidet all diese Mängel, da sie aus der Analyse der Nachteile der vorhandenen Heizsysteme entwickelt wurde. Diese Vorgehensweise führte nach einiger Zeit zu der Minimalform, die bei stetiger Betriebsweise, dank der Nebeneffekte, noch ausreichend leistungsfähig ist. Übrig blieb nicht ein käufliches „Produkt“, sondern ein „Konzept“, das den am Bau Beteiligten (Bauherr, Architekt, Projektant, Heizungsbauer, Maurer/Putzer, Bodenleger) ermöglicht, durch Abstimmung ihrer Vorstellungen und Leistungen unter Verwendung einfachster Bauteile ein auf den jeweiligen Baukörper abgestimmtes ideales Ergebnis zu erreichen. Bei kontinuierlichem Betrieb von zwei Sockelheizrohren wird auf ganzer Länge der Außenwände eines Raumes von dem durch sie erhitzten ca. 10 cm hohen Putzstreifen ein ständiger Warmluftauftrieb hervorgerufen, so wie es an einer sonnenbeschienenen Wand nur zeitweise

Abbildung 9:
Temperaturen an der Innenoberfläche einer Außenwand bei Temperierung

Meßanalyse mittels Infrarot-Thermometer
Außentemperatur – 10°C (Baum in 1,8 m Höhe), Raumtemperatur 20,5°C (Tischplatte in Raummitte),
Massivmauerwerk (~ 1800 kg/m³, 40 cm Stärke), Rohre unter Putz von ~ 20 mm Stärke, mittlere Heizwasser-Temperatur 60°C (am Stockwerksverteiler 63/57°C)

- Die Oberflächentemperaturen über der Sockelzone (linke Zeichnung) sind Ergebnis des kontinuierlichen Warmluftauftriebes, dessen Stärke von der Temperatur der Rohrabdeckung abhängt.
- Die Oberflächentemperatur des Putzstreifen vor den Rohren (rechte Zeichnung) ist auf Grund der schlechten Wärmeleitfähigkeit des Materials (typisch für trockene mineralische Stoffe!) bei nur 2 cm Stärke trotz Dauerbetrieb bereits ~ 20 K geringer als die mittlere Wassertemperatur. Daher: „Putzstärke max. 15 mm!"
- Thermografien der Außenseite von Wänden mit Heizrohren auf der Raumseite zeigen trotz hoher Heizwasser-Temperatur nicht den Rohrverlauf. Sie bestätigen die hohe Wärmedämmfähigkeit von trockenem mineralischen Material (s. Abb. 15 – 20).

Zeichnung Rudolf Werner, Landesstelle für die nichtstaatlichen Museen in Bayern, München



geschieht. Dort ist dieses „Flimmern" der aufsteigenden Luftschicht noch lange nach dem Ende der Einstrahlung sichtbar. Der nur vom Sockel ausgehende Auftrieb ist zwar viel geringer als der an der bestrahlten Wand oder der aus einem Heizkörper kommende. Da er aber stetig wirksam ist (24 Stunden lang) und die gesamte Außenwandinnenseite ununterbrochen „bestreicht", kann seine Heizleistung, sein Wärmeinhalt „geringfügig" sein – im Vergleich zur Heizluftmenge des Heizkörpers. Abgesehen von der Wärmestrahlung der unmittelbaren Rohrumgebung (Putzoberflächentemperatur vor den Rohren ca. 40°C bei 20 mm Putzüberdeckung und 60°C mittlerer Wassertemperatur) geht von der darüber befindlichen Wandfläche zwar lediglich eine geringe Strahlung aus, als Folge der Wärmeübertragung des Auftriebs, der sich von ca. 30°C im Sockelbereich auf seinem Weg zur Decke auf unter 20°C abkühlt (Abb. 9; Kap. 6.3.1). Dies ist für „den Raum" aber ausreichend, da es auf die gesamte über der Sockelzone liegende Restfläche seiner Außenwände zutrifft. Die (auf beliebige Weise *erzeugte*) Wärme wird also ausschließlich an den Innenflächen der Gebäudehülle verteilt, von dieser gespeichert und zum größten Teil als Strahlungswärme in die Räume abgegeben. Die übrigen Raumhüllflächen und das Inventar nehmen sie auf und speichern sie ebenfalls. Die homogene Raumtemperatur entsteht durch unendliche Reflexion zwischen den Außenwänden („Heizkörper") und den übrigen Festkörpern, den Trennwänden und dem Mobiliar.

Damit sind die wichtigsten konservatorischen wie physiologischen Kriterien für ein *Optimalklima* erfüllt: Die in Strahlungsaustausch mit den Außenwänden stehenden übrigen Raumhüllflächen und im Raum befindlichen Gegenstände, insbesondere die in Außenwandnähe, können im Winter nicht abkühlen – wie im Sommer in kalten Nächten, wenn die „unbeheizte" Außenwand durch Abstrahlung eines Teils der tagsüber gespeicherten Sonnenwärme den Raum warm hält. In der kalten Sommernacht bleibt der Raum, auch der, in dem Schränke bzw. Vitrinen vor den Außenwänden (= „vor der Heizung") stehen, warm, weil er „nicht abkühlen kann", nicht aber, weil von irgendeiner Stelle im Raum eine starke Strahlung „in den Raum hinein" wirkt oder weil seine Raum-

luftmasse aufgeheizt wäre. Für die „Raumtemperatur“ ist also der vom Sockel hervorgerufene Auftrieb wichtiger, als die von ihm ausgehende Wärmestrahlung, weil nur der Auftrieb den Wärmebedarf der über der Sockelzone befindlichen „Hauptfläche“ der Wand decken kann. Die Möblierung muß zur Wandoberfläche einen geringen Abstand einhalten (ca. 2 cm), damit der für ihre Versorgung erforderliche Auftrieb nicht unterbrochen wird. Die Außenwand-Oberflächen können so auch nicht kälter als die Raumluft werden. Dadurch ist nicht nur der gesamte Baukörper vor Kondensation geschützt, sondern auch die Feuchteaufnahme außenwandnaher Objekte ausgeschlossen (zur Bedeutung dieser Tatsache für den Wärmebedarf s. Kap. 4.2). Die Raumluftmasse selbst bleibt „kühl“, der (lufttemperaturabhängige!) Fugenluftwechsel ist daher klein, so daß sich im geschlossenen Raum keine Kurzzeit-Schwankungen des Raumklimas ergeben. Dies gilt auch für den genutzten Raum, wenn der Luftwechsel des Gebäudes reduziert bzw. durch Lüftereinsatz kontrolliert ist. Aus der Entstehungsart des Klimas folgt seine „Homogenität“, d.h. es herrschen in allen Raumteilen annähernd die gleichen Werte, so daß weder die Möblierung, noch die Exponathängung eingeschränkt sind.

Da bei Temperierung im Gegensatz zur Sockelleistenheizung die Menge der an der Wand aufsteigenden Warmluft und die Geschwindigkeit des Auftriebs sehr gering sind, unterbleibt jede *Verstaubung* des Wandsockels, wie auch bei plötzlich ansteigender Vorlauftemperatur eine rasche Erhöhung der Raumtemperatur unmöglich ist. Während nämlich ein stärkerer Vorlauftemperaturanstieg beim Kleinkonvektor eine deutliche Steigerung von Temperatur und Geschwindigkeit der Auftriebsluft hervorruft, da seine Schächte fast so heiß wie das Heizwasser werden, kann beides bei einem gleichen Anstieg der Wassertemperatur einer eingeputzten Temperierschleife nur geringfügig gesteigert werden: Die Oberfläche des abdeckenden Putzes bildet lediglich eine flache Ebene; diese ist wegen der schlechten Wärmeleitfähigkeit des mineralischen Materials um bis zu 20 Grad kühler als das Heizwasser. Auch bei *auf Putz* verlegten Heizrohren, deren Oberfläche so heiß wie die der Sockelkonvektoren wird, ist die Fähigkeit, Luft aufzuheizen, viel geringer, da die freie Oberfläche nur einen Bruchteil der Konvektorfläche ausmacht und keine Schächte vorhanden sind. Wenn auf Putz verlegte Rohre mit stark wechselnden Temperaturen gefahren werden, so ist eine leichte Verstaubung im Nahbereich der Rohre, im Gegensatz zur Unterputz-Verlegung, nicht auszuschließen. Da aber bei Sockeltemperierung generell, im Gegensatz zur Heizkörper-Heizung eine durch die Wärmeverteilung verursachte Luftbewegung im Raum fehlt, bleiben auch deren Folgen aus, die Verstaubung von Raumschale und Raumausstattung und die Zugerscheinungen, die ein höheres Wärmebedürfnis hervorrufen.

1.2.3. Strahlungsklima: Physiologische Vorteile

Hier zeichnet es sich bereits ab, daß das allseits beklagte Dilemma „Erfüllung der konservatorischen Anforderungen oder Besucherfreundlichkeit“ nur beim „modernen“ unganzheitlichen Technikkonzept (Manipulation der Raumluft) entsteht, während das Strahlungsklima den Gegensatz durch Vermeidung der physiologischen Beeinträchtigungen gar nicht erst entstehen läßt.

1.2.3.1 Physiologische Relevanz der Raumlufttemperatur

Die Lunge und das damit verbundene Blutgefäßsystem dienen nicht nur der Sauerstoffversorgung des Körpers („Lebensmittel Luft“) bei gleichzeitiger Abfuhr des Kohlendioxides, das beim Stoffwechsel entsteht, sondern auch der Abfuhr der dabei ebenfalls entstehenden Wärme. Dank einer Lungenfläche von ca. 100 m^3 und dem Tatbestand, daß wir fortwährend ein- und ausatmen, ist die Wärmetauschfunktion der Lunge sehr groß. Da aber die Körperkerntemperatur zur optimalen Funktion des Stoffwechsels annähernd konstant bei 37°C liegen sollte, mit einer Schwankungstoleranz von einem halben Grad, ist es von großer Bedeutung, welche Temperatur die Raumluft, also die Luft, die wir einatmen, hat.

Denn nur wenn die Raumluft deutlich kälter als die Körperkerntemperatur ist (wenn sie z. B. 20°C hat), ist die Kühlfunktion der Lunge gegeben; ist sie aber wesentlich wärmer als 20°C, kehrt die Lunge ihre Funktion ins Gegenteil und wird zum ebenso effizienten „Heizgerät". Welchen entscheidenden Anteil an der Wärmeregulation des Körpers die Wärme-Abgabe über die Lunge hat, zeigt sich daran, daß beim Anstieg der Lufttemperatur die Wasserdampfabgabe des Körpers zur Erzeugung von „Verdunstungskälte" sprunghaft zunimmt: Sind es bei 10°C (Straße) 30 Gramm pro Stunde, und bei 15°C (Hausflur) 31 g/h, so müssen bei 20°C (strahlungsgeheizter Raum) bereits 39 g/h abgegeben werden, bei 25°C (Raumluft bei Fußbodenheizung) sind es schon 65 g/h und bei 30°C (Heizkörperheizungsluft in Nasenhöhe; s. 1.2.4) gar 100 g/h.

1.2.4 „Luftheizung" schafft physiologisch absurde Raumverhältnisse

Bei „Luftheizung" hat die Luft im oberen Raumdrittel eine wesentlich höhere Temperatur (z. B. 40°C) als im übrigen Raum, da sie gerade den Heizkörper (bei einer Wassertemperatur von z. B. 60°C) mit ca. 58°C verlassen hat. In diesem Teil des Heizluftkreislaufes aber befindet sich die Nase, so daß dank der Lungenfläche mit dem nach geschalteten Blutgefäßsystem und der Atemfrequenz die Wärmeaufnahme über die Atmung intensiv ist (wir atmen das Heizmedium ein!). Es wird also nicht nur die physiologisch ideale Abgabe von Stoffwechselwärme an die riesige Lungenfläche verhindert, sondern die als „Kühlaggregat" konzipierte und während der Jahrtausende mit reiner Strahlungsheizung auch als solches funktionierende Lunge wird zum „Heizregister", so daß die Körperkerntemperatur rasch anzusteigen droht. Wegen der geringen Toleranz von 0,5 Grad muß der „Zu-warm"-Fühler des Körpers sofort reagieren durch Ausschalten der über die gesamte Hautoberfläche verteilten Kältefühler. Nur dann kann der Durchmesser der Hautgefäße erweitert werden, damit wir – in Verbindung mit verstärkter Herztätigkeit – an der Haut eine wesentlich größere Wärmemenge abgeben können, als es „früher", d. h. zu Zeiten der Strahlungsheizung, erforderlich war.

Seit es den Heizkörper gibt, müssen wir im Winter nämlich nicht nur die gesamte Stoffwechselwärme, sondern auch die eingeatmete Heizwärme an der (bekleideten!) Körperoberfläche abgeben. Nach Abschaltung der Kältefühler ist aber die Abstrahlung von Körperwärme nach allen Seiten gleich stark, also auch zu Wandflächen hin, die – wegen der schlechten Wärmeverteilung bei „Luftheizung" – kalt bleiben, dem Körper also zu wenig Wärme zustrahlen. Die trockene Haut aber ist zur Körperwärmeabgabe viel weniger geeignet als die Lunge, da ihre Fläche mit 2,5 m² ca. 40-mal kleiner als die Lungenfläche ist und die Kleidung eine deutliche Steigerung der Wärmeabstrahlung gar nicht erlaubt. Daher muß die heiztechnikbedingte Kreislaufschwerarbeit unterstützt werden durch die Aktivierung der Schweißdrüsen, damit die Hautkühlung verstärkt wird durch Abgabe von Verdunstungswärme. Während dies aber bei der stets feuchten Lunge in unvergleichbar größerem Maße und „nebenbei" geschieht, wodurch ihre große Kühlfähigkeit mitbegründet ist, stellt es bei der Haut eine aufwendige Sonderleistung dar, die „früher" (s. o.), wie die erhöhte Kreislaufleistung, nur bei „schweißtreibender" Tätigkeit erforderlich wurde. Heute aber prägen beide Ausnahmephänomene die Befindlichkeit des Körpers fast den ganzen Tag über, da fast alle Räume und Verkehrsmittel „luftgeheizt" sind.

Dies alles ist physiologisch absurd, da der sitzende oder im Raum gehende Mensch nur dann Behaglichkeit empfindet, wenn die Haut trocken ist und der Wärmedurchgang durch die Haut genau dem Teil der beim Stoffwechsel produzierten Wärmemenge entspricht, der gerade über Wärmeleitung und Blutfluß zur Körperoberfläche strömt. Unter optimalen Raumverhältnissen, z. B. in einem Raum mit 20°C im Sommer oder in einem strahlungsgeheizten Raum mit gleicher Temperatur im Winter, würde die übrige Stoffwechselwärmemenge durch Wärmeleitung und durch das venöse, auf seinem Weg zur Lunge aufgewärmte

Blut zur durch das Atmen ständig neu gekühlten Lunge strömen und dort unbemerkt abgegeben.

Durch „luftheizende“ Verfahren wird aber die Behaglichkeit nicht nur unmittelbar beeinträchtigt, sondern es entstehen noch andere Mängel, die allgemein als unvermeidbare Begleiterscheinungen der Raumbeheizung im Winter bzw. der Raumklimatisierung hingenommen werden. Die Qualität der Raumluft wird generell gemindert: durch den in der Schwebe gehaltenen, die Schleimhäute in ihrer Luftreinigungsaufgabe überfordernden Feinstaub, durch Deionisierung der Luft in metallischen Schächten von Konvektoren oder in Lüftungskanälen, bei schlechter Wartung auch durch Keimbelastung, die bei Heizkörperheizung auch durch die zwingend erforderlichen Luftbefeuchter hervorgerufen werden kann (s. Beitrag Ranacher), durch wesentliche Unterkühlung der Luft, während die Kühlursache (z. B. Einwirkung von starkem Kunstlicht oder von Sonnenstrahlung durch unbeschattete Glasflächen auf die Körperoberfläche) weiter besteht, wodurch beim Atmen die Schleimhäute in ihrer Staubbinde- und -transportfunktion beeinträchtigt werden. Tatsächlich geschieht dies alles ja mit dem wichtigsten Lebensmittel des Menschen im Raum, in dem er sich bewegt, und nicht mit einem technischen Medium in einem geschlossenen Apparat. Die Verwendung von Luft als technischem Medium im freien Raum ist daher generell fragwürdig.

1.2.5 Strahlungsklima schafft physiologisch sinnvolle Raumverhältnisse

Bei „Wandheizung“, insbesondere in ihrer universellen Form der Temperierung, wird das oben angesprochene Dilemma aufgehoben: Im Sommer wird in erdberührten Räumen die Luftentfeuchtung von den warmen Wänden geleistet, nicht von lärmenden Apparaten, die die Wände kalt lassen. Im Winter fehlen nicht nur die Zugerscheinungen und die Staubaufnahme über die Atemwege. Auch die Wärmeregulation des Körpers bleibt ungestört, da bei „kühler“ Luft und bei mittlerer relativer Luftfeuchte die Kühlfunktion der Lunge optimal ist. Die Stoffwechselwärme kann weitgehend an der Lungenoberfläche abgegeben werden, die Haut trägt zu dieser Aufgabe ihren natürlichen Teil bei. Zusätzliche Wärme wird nicht aufgenommen. Daher spricht der „Zu-warm“-Fühler nicht an, die Kältefühler bleiben, wie im Sommer bei unbeheizter Luft, aktiv und passen den Durchmesser der Hautgefäße ständig an die Wärmeabstrahlung der Wände an (kühlere Wandfläche = engere Gefäßstellung = geringere Wärmeabstrahlung des Körpers, wärmere Fläche = weitere Gefäßstellung = stärkere Abstrahlung), die Schweißdrüsen sind nicht in Tätigkeit, die Kreislauf-Mehrbelastung fehlt, da die Hautgefäße nicht ständig „auf weit“ gestellt sind und die Pumpleistung des Herzens somit nicht erhöht werden muß.

Durch das Zusammenspiel von ruhender, den Körper isolierender Luft und „selbstbestimmter“ Wärmeabgabe an der Körperoberfläche werden nicht nur geringere Raumtemperaturen als bei luftbewegenden Heiztechniken als behaglich empfunden, sondern auch wesentlich geringere Raumlufttemperaturen. Dadurch wiederum sinkt der Aufwand für die künstliche Luftbefeuchtung erheblich, bei Klimaanlagen auch der für die Frischluft-Nacherwärmung. Die Kältefühler der Haut können bei reinem Strahlungsklima auf Temperaturunterschiede sofort reagieren, z. B. durch Verengung der Hautgefäße auf dem Weg von wärmeren Räumen in aus konservatorischen (oder ökonomischen) Gründen geringer temperierte. In Großräumen wie Kirchen ist es nicht erforderlich, das gesamte Raumluftvolumen zu beheizen, wie das bei der „anerkannten“ Luftheizung wegen der Thermik unvermeidlich ist. Es muß lediglich im Aufenthaltsbereich des Menschen eine „warme Wanne“ entstehen, durch die Zustrahlung von den unteren Wandbereichen, ggf. auch von den Rändern der Bankinseln. Die daraus resultierende, das Wärmebedürfnis verringernde „Inversionslage“ (kühleres Raumluftvolumen über wärmerer Bodenzone) ist gerade deswegen möglich, weil in diesem wärmeren Raumteil nicht die Luft wärmer ist, sondern die Flächenränder stärker strahlen (Wärmestrahlung kann Luft ja nicht “heizen”) und weil zur

Verteilung der Wärme neben dem Warmluftauftrieb an der Wandoberfläche keinerlei Luftbewegung im Raum hervorgerufen wird.

Es unterbleibt der Kühleffekt, der bei der Dauerkonvektion von Luft-, Heizkörper- und Bankheizung ständig wirksam ist. Dieser Kühleffekt tritt auch bei der Fußbodenheizung auf, die meist als reine Strahlungsheizung mißverstanden wird. Dabei wird übersehen, daß sie zwangsläufig Konvektion erzeugt, da ihre große, den gesamten Boden einnehmende Heizfläche unter der Raumluftmasse angeordnet ist: Alle paar Minuten ruft diese Anordnung eine nicht kontinuierliche „Stoßkonvektion" hervor, da sich die unterste Luftschicht durch Wärmeleitung soweit aufheizt, daß sie die Raumluftmasse zusammen mit dem Bodenstaub von der Raummitte aus umwälzen kann. Nur dieser unerwünschte Vorgang führt der frostberührten Außenwand – ebenso unkontinuierlich – Wärme zu, da die erwünschte Strahlungswärme ja nur der dem Strahler parallelen Fläche zu gute kommt, also der Decke (die wiederum nur den Schultern und der Schädeldecke parallel ist, während die übrige Körperfläche zu den Wandflächen gerichtet ist). Diese Tatsachen machen deutlich, daß besucherfreundliche Raumverhältnisse in Museen und Kirchen ohne Kompromisse im konservatorischen Bereich nur durch „Strahlungsheizung" herstellbar sind, also nur wenn der Stand (!) der Technik verlassen wird.

1.3 Temperierung und Luftwechselkontrolle schaffen ein „Universal-Klima"

Eine dritte Erkenntnis findet in Fachkreisen zunehmend Anklang: Bei kontinuierlich wirkender „Wandheizung" in Verbindung mit der Kontrolle von Luftwechsel und Tages-/Kunstlichtwärme entsteht ein „Universal-Klima", das für fast alle in musealen Sammlungen vorkommenden Materialien geeignet ist, da es auf eine für alle Materialarten gleichermaßen wichtige Größe dämpfend einwirkt: Auf die Geschwindigkeit, mit der sich die Klimawerte ändern. Es wird nicht nur der konservatorischen Grundforderung gerecht. Vielmehr läßt sich auf dieser Basis auch der wissenschaftliche Anspruch befriedigen, die Aussagekraft eines Ausstellungskonzeptes durch unbegrenzte Materialkombination in einem Raum zu optimieren. Es entfällt also der Anlaß zur Ausbildung unterschiedlicher Klimazonen, die nicht nur das museale Konzept einschränken, sondern auch kostenträchtige Baumaßnahmen und eine aufwendige Klimatisierungskonzeption verursachen. Dies gilt gleichermaßen für die Räume der Schausammlung, wie für das Depot. Damit entfällt aber nicht nur der entsprechende Aufwand, sondern ein Schadenspotential, das durch drei Faktoren verschärft wird: Durch den Mangel der Raumlufttechnik an Funktionssicherheit, durch die Gebäudestruktur (Treppenhäuser, Galerien etc.) und durch das unkalkulierbare „Lüftungsverhalten" von Besuchern und Personal. Ein solches Universal-Klima hat wegen seines bereits angesprochenen Hauptkriteriums, der Freiheit von Kurzzeit-Schwankungen, Gültigkeit für alle Materialarten mit Ausnahme von fotografischem Material, das zumindest im Depot nur bei geringer Temperatur und Luftfeuchte, z. B. im Kühlschrank, aufbewahrt werden sollte. So ist selbst die Glaskorrosion weniger von der Höhe der relativen Luftfeuchte bestimmt, als von deren Kurzzeit-Schwankung. Ähnliches gilt auch für Bodenfunde mit ihren starken Bodensalz-Einlagerungen.

2. „ICOM-Richtlinien"

Bereits 1983 im Pilotprojekt Stadtmuseum Starnberg waren die Beobachtungen des Klimas in temperierten Räumen für die Landesstelle Anlaß, die Anforderungen an das Raumklima in Abweichung von der allgemeinen Anschauung neu zu definieren, insbesondere abweichend von den sog. ICOM-Richtlinien. Tatsächlich entpuppen sich diese bei näherem Hinsehen als Phantom, wie Holmberg 1995, in seiner weltweit angelegten Literaturstudie zur relativen Luftfeuchte, herausfand [4]. Der Internationale Museumsrat (ICOM) veröffentlichte 1960 eine Liste von Klimawerten, die sich aus der Befragung von Archiven, Bibliotheken,

Museen und einzelnen Fachleuten, insgesamt 37 Stellen, ergab. Bei der Auseinandersetzung mit dieser Quelle stellte Holmberg fest:

- Die Angaben beruhen *nicht* auf ausreichender *Forschung*.
- Aus der Liste geht nicht hervor, ob die Werte in den Institutionen *eingehalten oder* nur als *wünschenswert* angesehen wurden.
- Mehr als die Hälfte der Befragten empfahlen erhebliche *saisonale Schwankungsbreiten* (von bis zu 14 Grad und 20%).

Trotzdem bildete sich in der Folgezeit in Museumskreisen weltweit die Meinung, daß die Werte „18°C konstant und 50% +/- 5%“ – die lediglich die Mittelwerte der Liste darstellen – eine Empfehlung von ICOM seien. Bis in die 1990er Jahre galt dieser enge Rahmen als ideale Vorgabe für die Planung von Klimaanlagen, trotz der daraus direkt folgenden hohen Investitionskosten und unbesehen der Region und der Gebäudekonstruktion (s. Kap. 3.1).

Wie in Kapitel 1.1 schon ausgeführt, sind dagegen die aus der Empirie abgeleiteten Kriterien für die Klimaplanung nicht nur konservatorisch und physiologisch, sondern auch ökonomisch vorteilhaft, da ihre Beachtung erhebliche Einsparungen in der Beheizung bzw. Klimatisierung und der Sanierung von Gebäuden ermöglicht. Gerade in Zeiten knapper Haushaltsmittel haben sie daher nicht nur für die Bestandssanierung und die Baudenkmalpflege, sondern auch für den musealen Sektor besonderes Gewicht. So finden sich Hinweise darauf seit den späten 1980er Jahren nicht nur zunehmend in der Fachliteratur, sondern, 35 Jahre nach der ICOM-Befragung, auch in Holmbergs Studie. Sie bildete den ersten schwedischen Beitrag zum PREVENT-Projekt, das neben den Vorteilen der „Natürlichen Lüftung“ und den Mängeln der Verfahren zur Klimamessung die Wirkungsweise der Temperierung zum Gegenstand hatte.

3. Alltagstaugliche Klima-Kriterien

Durch das PREVENT-Projekt bestätigte sich die Erfahrung der Landesstelle, daß folgende Klima-Kriterien relevant sind:

- Die *Gebäudehülle* hat eine *Basisfunktion.*
- Das „*gleitende Raumklima*“ muß Planungsvorgabe für die Heiz- und Klimatechnik sein.
- Die sog. „*internationalen Standardklimawerte*“ können *nicht allgemeingültig sein*, da sie weder die regionalen und saisonalen Besonderheiten des Standorts, noch die Gebäudekonstruktion und die Art der Beheizung bzw. Klimatisierung berücksichtigen.

Da jeder Ausstellungsraum außerhalb der Öffnungszeiten Depotfunktion hat, wird in der folgenden Erörterung der Kriterien zunächst nicht zwischen Sammlungs- und Depotraum unterschieden.

3.1 Basisfunktion der Gebäudehülle

Weltweit wurden in den letzten 20 Jahren Objekt- und Bauschäden durch spektakuläre Klimaeinbrüche und Kondensation beobachtet, insbesondere wenn, unter Inkaufnahme hoher Jahresenergiekosten, die engen Grenzen der „ICOM-Richtlinien“ angestrebt wurden, die bei Betrachtung der saisonalen Unterschiede des Außenklimas unsinnig erscheinen müssen. Dies gilt nicht nur für Altbauten mit schwerem Mauerwerk, die eine Klimaanlage erhielten (Beispiele: Sempergalerie Dresden, wo sich die Schäden nach der Eröffnung zeigten oder Alte Pinakothek München, wo die Taupunktsicherheit der Nordwand der Obergeschoß-Kabinette nicht durch die Klimaanlage, sondern durch „Sockeltemperierung“ durch ein vor der Eröffnung noch im Sockelputz installiertes elektrisches Heizkabel gewährleistet wird).

Gerade in Gebäuden, in denen die „moderne“ Bauweise und die Klimatisierung mittels reiner Raumlufttechnik zusammentrafen, traten die Mängel häufig wider Erwarten auf (Beispiele: Alter „Neubau“ des Germanischen Nationalmuseums Nürnberg oder Kunstbau des Lenbachhauses München, beide mit winterlichem Dauerkondensat an den Glaswänden, oder Neubau des Kunsthauses

Bern, wo im Winter an den Leichtbau-Außenwänden Kondensat und maximale Luftfeuchten an Bildern auftraten, während im Sommer, wie in Leichtbauten zwangsläufig, hohe Energiekosten für Kühlung anfielen. Letzteres ist grundsätzlich in den Obergeschossen moderner Museumsbauten zu beobachten, soweit die Glasflächen in den Dachkonstruktionen nur innere Beschattungsvorrichtungen aufweisen). Als Folge dieser Erfahrungen setzt sich in der Museumswelt allmählich die Erkenntnis durch, daß dem Gebäude, insbesondere seiner Hülle, d.h. seinen Außenbauteilen, bei der Klimatisierung eine Basisfunktion zukommt.

Damit nämlich eine sinnvolle Klimatechnik mit volkswirtschaftlich vertretbaren Investitions- und Jahresenergiekosten konzipiert werden kann, müssen zunächst die Änderungen von Außenklima und Energiefluß der Solarstrahlung gedämpft werden, was durch eine „fugendichte" Gebäudehülle mit schwererer Außenwandkonstruktion und Außenbeschattung der Glasflächen in Verbindung mit kontrolliertem Luftwechsel immer schon geleistet wurde. Zugleich muß die – meist als Teil der „inneren Kühllast" hingenommene – Heizwirkung des Kunstlichtes durch Auswahl und Montageart der Lichtquellen verringert und verzögert werden.

Wird z. B. jegliche feste Verbindung von Leuchten mit Bauteilen vermieden, so bleibt die Pufferwirkung der inneren Speichermassen erhalten, da ihre unnötige Aufheizung – durch die Wärmeabgabe der Leuchten selbst in Form von Wärmeleitung im Leuchtensockel und Kurzdistanz-Wärmeabstrahlung der Leuchtenrückseite – entfällt. Hierbei spielt auch die Entfernung der Installationsebene der Beleuchtung von der Objektebene eine bedeutende Rolle: Sie sollte nicht nur von ästhetisch/architektonischen Gesichtspunkten bestimmt werden, sondern vom simplen physikalischen Sachverhalt, daß die am Objekt wirksame Beleuchtungsstärke mit dem Quadrat der Entfernung der Lichtquelle abnimmt. Bei hohen Räumen ist daher die Montage der Beleuchtung in der Deckenebene gleichbedeutend mit dem Bedarf an hoher Leistung der Leuchtmittel, woraus neben vermeidbarem Energiebedarf eine viel höhere Heizleistung des Kunstlichts folgt. Die Hauptaufgabe der Klimatechnik sollte aber in der Aufbereitung der Frischluft bei Anwesenheit von Personen liegen, nicht aber, wie dies in der Regel der Fall ist, darin, die mangelnde Pufferwirkung von Gebäudehülle und Innenbauteilen für äußere und innere Energieflüsse zu kompensieren. Die Technik soll vielmehr die Einwirkung der Energieflüsse auf das Raumklima weiter verringern, nachdem deren Wirkung bereits ohne Energieeinsatz durch die Bausubstanz gedämpft bzw. durch sinnvolle Lichttechnik begrenzt ist.

3.2 Gleitendes Raumklima als Planungsziel

Wie die Erfahrung zeigt, erwächst die konservatorische Qualität eines erzeugten Raumklimas, entgegen der in Kapitel 2 geschilderten allgemeinen Anschauung, gerade nicht aus dem starren Einhalten von Klimawerten im Raum gegen die sich ständig ändernden natürlichen und nutzungsbedingten Einflüsse, mittels leistungsfähiger Geräte, deren Leistung durch Regelung ebenfalls ständig wechselt. Die Qualität entsteht vielmehr aus dem Gleiten der Werte entsprechend der durch Gebäudemasse und bewußt unterdimensionierte Klimatechnik gedämpften Änderungen der äußeren und inneren Energieflüsse.

3.2.1 Konservatorisches Ziel: Gleitende Änderung der Gleichgewichtsfeuchte

Direkte Folge eines solchen alternativen Klimakonzeptes ist ein langsam mit den äußeren jahres- und tageszeitlichen Mittelwerten gleitendes Raumklima. Der wesentliche konservatorische Vorteil dieses „dynamischen Raumklimas" liegt darin, daß im Jahresverlauf, insbesondere im Winter und Hochsommer, sowohl das Temperatur-, als auch das Dampfdruckgefälle zwischen Raum und Außenbereich geringer sind als beim konventionellen Konzept mit dem „statischen Raumklima" als Ziel. Dies hat entscheidenden Einfluß auf eine konservatorische Schlüsselgröße, die für fast alle Materialien von Bedeutung ist, die "Gleichgewichtsfeuchte", d.h. die Poren- bzw. Faserfeuchte des Materials, die von der

relativen Luftfeuchte abhängig ist und sich mit dieser ständig ändert („im Gleichgewicht steht"). Beim dynamischen Konzept kann sie sich diesem unvermeidbaren, aber verlangsamten Vorgang so anpassen, daß keine Materialspannungen entstehen. Im Gegensatz dazu werden beim statischen Konzept, durch Ausfall oder Regelfehler der Einrichtung zur Luftfeuchteregulierung, solche Spannungen immer wieder hervorgerufen, so daß langfristig irreversible Materialdeformation eintritt. Bei gleitendem Raumklima dagegen ist es über weite Strecken des Jahres gänzlich unnötig, durch Luftbe- oder -entfeuchtung in diesen natürlichen Vorgang einzugreifen, wodurch sich die Abhängigkeit des Raumklimas von Apparaten und deren Wartung drastisch verringert. Neben den Investitionskosten sinken daher der Energiebedarf und das konservatorisch/bauphysikalische Risiko sowie die Gefahr von Regelungsfehlern und von Kondensation. Schließlich entfällt auch die physiologische Beeinträchtigung durch Zugerscheinungen und ständige Manipulation der Atmungsluft.

3.2.1.1 Gleichgewichtsfeuchte und Materialtemperatur

Die Gleichgewichtsfeuchte ist aber auch von der *Materialtemperatur* abhängig, da die hygroskopische Feuchteaufnahme im wesentlichen über den Wasserstoffbrückeneffekt (s. Kap. 4.3.1) abläuft. Dieser kann durch leichte Materialtemperaturerhöhung ausgeschaltet werden, wie es bei Wandtemperierung (Strahlungsheizung) schonend geschieht. Die Erfahrung zeigt, daß dieser Zusammenhang auch für salzbelastete Bauteile gilt, da deren besondere Neigung zur Feuchteaufnahme auf demselben Phänomen beruht. Allgemein wird jedoch angenommen, daß „die Temperatur" keinen Einfluß auf die Hygroskopizität von Salzen habe.

3.2.2 Konservatorisch sinnvolle Schwankungsbreite des Raumklimas

Das wichtigste konservatorische Ziel ist also nicht die Vermeidung, sondern die Verlangsamung der Änderung der Gleichgewichtsfeuchte. Um dies ohne größeren Aufwand zu erreichen, müssen die großen saisonalen Unterschiede des Wasserdampfgehaltes der Außenluft, der absoluten Außenfeuchte (Abb. 7) der Planung zu Grunde gelegt werden. Diese entstehen dadurch, daß die absolute Feuchte direkt von der mittleren Außentemperatur abhängig ist. Im Jahresablauf sollten daher nicht nur aus ökonomischen, sondern gerade auch aus konservatorischen Gründen größere Änderungen von Raumtemperatur und relativer Luftfeuchte gleitend zugelassen werden. In Häusern ohne höherwertige klimatechnische Ausstattung und ohne technisches Personal können ohne konservatorische Nachteile bei der Temperatur z. B. mehr als 15 Grad, bei der relativen Feuchte bis zu 30 % als Jahresschwankung zugelassen werden, wenn sichergestellt ist, daß die Änderungen nur gleitend erfolgen können:

- Raumtemperaturen zwischen z. B. 10 – 12°C bei extremem Frost und 26°C bei extremer Sonneneinstrahlung,
- Werte der rel. Luftfeuchte zwischen 38% bei Frost (wenn bei Raumtemperaturen über 12°C der Befeuchtungsaufwand minimiert werden soll) und 65% bei Sommerhitze in erdberührten Räumen, in Gebäuden mit Schwerstbauhülle oder in Exponatgebäuden von Freilichtmuseen (wenn die Entfeuchtung nicht durch Geräte, sondern durch minimale Raumtemperierung erfolgt).

Wegen der periodischen Einwirkung von Tages- und Kunstlicht sollten auch im Tagesablauf gleitende Änderungen zugelassen werden, jedoch in wesentlich kleinerem Maßstab als im Jahresverlauf (z. B. 4 Grad und 8%), wobei ihre Größenordnung in besonderem Maße von der Basisfunktion des Gebäudes bestimmt wird. Nur so sind technisch bedingte Kurzzeitschwankungen vermeidbar, die inzwischen als wesentliche Schadensursache im Museum erkannt sind – neben völlig inakzeptablen Großschwankungen, die auch in vollklimatisierten Räumen immer wieder auftreten, und zwar durch Ausfall von Aggregaten oder Fehlreaktion von Regelkomponenten. Im Hinblick auf die Problematik der Gleichgewichtsfeuchte dürfen Änderungen des Raumklimas nur gleitend erfolgen, wobei

die Werte möglichst selten um mehr als 0,5 Grad und 2% pro Stunde schwanken sollten. Gerade diese Vorgabe engster stündlicher Schwankungsgrenzen, die konservatorisch entscheidend ist, konnte in Projekten mit Temperierung eingehalten werden, die mit einfachsten Mitteln optimiert wurden, während die Fachwelt annimmt, daß dies nur mit raumlufttechnischen Anlagen möglich ist.

3.2.3 Gleitendes Raumklima als Planungsziel

Diese konservatorisch, bauphysikalisch, energetisch und physiologisch gleichermaßen günstige Gesamtwirkung kann nur erreicht werden, wenn die gleitende Veränderung des Raumklimas als Planungsziel festgeschrieben wird und somit die entscheidende Vorgabe für die baulichen, licht- und klimatechnischen Planungen wird. Auf Klimaanlagen bezogen bedeutet dies, daß die zu bewegenden Luftmengen erheblich geringer sind, wenn nicht nur die Aufgaben der Raumbeheizung und Raumkühlung entfallen (Wand- statt Luftheizung im Winter, bauliche und kunstlichttechnische Begrenzung des Temperaturanstiegs im Sommer), sondern die Anlage nur noch die Frischluftmenge aufzubereiten hat, die zur Lufterneuerung bei Personenbelegung zu fördern ist. Da bei derart verbesserten Raumbedingungen die Stoffwechselwärmeabgabe weitgehend über die Atmung erfolgt (die eingeatmete Luft ist ja deutlich kälter als die Lunge), entfällt neben der Verstärkung der Hautdurchblutung meist auch der Einsatz der Schweißdrüsen zur Hautkühlung, beides bei beheizter Luft unverzichtbar, um nicht nur die Stoffwechselwärme, sondern auch die über die Atmung aufgenommene Wärme an der Haut abgeben zu können. Unter diesen Bedingungen kann die Frischluftmenge verringert werden (Basis 1 bis max. 5 m^3 pro Person und Stunde, wozu meist eine Luftwechselrate von max. 1 Raumvolumen pro Stunde genügt). Die Folge ist, daß wesentlich geringere Kapazitäten an Luftbe- und -entfeuchtung, Kühlung und Luftnacherwärmung ausreichen.

Im alternativen Konzept folgt die Lösung dieser Aufgabe bei gegebener baulicher und lichttechnischer Optimierung direkt aus dem gleitenden Betrieb der Sockelheizrohre und einer von der Belegung abhängigen Raumbelüftung, z. B. durch den Einsatz von Kleinlüftern bzw. von Teilklimaanlagen kleiner Leistung (s. Kap. 6.2.1: Luftbe- und -entfeuchtung).

4. Keine international gültigen Standard-Klimawerte möglich

Die einfache Anschauung sagt bereits, daß es keine international gültigen Klimawerte geben kann: Zum Einen sind bereits in den verschiedenen Regionen eines Landes die Unterschiede des Außenklimas erheblich, da sich nicht nur die saisonalen Mittelwerte, sondern auch die Extremwerte und die Änderungsgeschwindigkeit der regionalen Außentemperatur und der davon wesentlich abhängigen absoluten Außenluftfeuchte stark unterscheiden. Diese Unterschiede werden weiter verstärkt von anderen Faktoren wie Breitengrad, Größe der Wasserflächen, Grad der Bewaldung. Im Folgenden soll nun der große Einfluß auf Raumklima und Bauphysik genauer dargestellt werden, der ausgeht von den grundlegenden physikalischen Unterschieden der beiden Arten der Wärme*verteilung* – der Verteilung „auf dem Weg über die Raumluftmasse im freien Raum“ („Luft“-Heizung wie Heizkörperheizung, Luftheizung und Klimaanlage, aber auch Fußbodenheizung) gegenüber der Verteilung „an der Außenwandoberfläche über Auftrieb mit der Folge großflächiger Abstrahlung geringer Wärmemengen“ (Strahlungsheizung wie Sockelleistenheizung, Temperierung; nicht Wandheizung mit Registerflächen).

4.1 Bauteilfeuchte und Art der Wärmeverteilung

Während sich die Museums-Fachwelt bis heute auf *Thomson* beruft mit ihrer Forderung nach ganzjähriger Einhaltung einer relativen Luftfeuchte von mindestens 50%, warnte dieser bereits 1986 – angesichts von Bau-, Ausstattungs- und Exponatschäden in Gebäuden mit neuen raumlufttechnischen Anlagen – davor, im Winter in kälteren Regionen derartig hohe rel. Raumluftfeuchten anzustreben,

weil bei tiefen Außentemperaturen Kondensationsgefahr entsteht an Außenwänden, Dachkonstruktionen und Gegenständen, die sich in deren Nähe befinden[5]. Es fehlt bei ihm jedoch noch jeder Hinweis darauf, daß die eigentliche Schadensursache die mangelhafte Wärmeverteilung der konventionellen Heiz- und Lüftungstechnik ist, die im Winter zu einem Temperaturdefizit der inneren Oberfläche der Gebäudehülle (d. h. der Innenseiten der Außenbauteile) gegenüber der Raumluft führt. Die konservatorische wie ökonomische Relevanz dieser Abhängigkeit wird deutlich, wenn man realisiert, daß die Kondensation bei alternativer Beheizung (Temperierung der Hüllflächen) aus physikalischen Gründen ausgeschlossen ist, während sie bei konventioneller Klimatisierung geradezu provoziert wird. Dies gilt generell für „Luft"-Heizung mit Befeuchtung, wie Heizkörperheizung mit Luftbefeuchtern, Voll-Klimaanlage und für Kirchen empfohlene Luftheizung mit Befeuchtung.

Ursache für die Kondensatgefahr ist, daß konventionelle Heizsysteme und raumlufttechnische Anlagen primär auf die Erhöhung der Raum*luft*temperatur abzielen und nur eine sekundäre, eher zufällige thermische Wirkung an den raumseitigen Flächen der Gebäudehülle erreichen. Sie stellen nämlich nicht wie Sockelheizrohre oder Sockelheizleisten einen Warmluftauftrieb an den Wandsockeln bereit, der dank der Thermik ausschließlich die Bauteiloberfläche bestreicht und deren gesamte Fläche versorgt. Vielmehr ist die Arbeitsluft (!) bei Heizkörperheizung wie bei Klimaanlage nach dem Passieren der Austrittsöffnungen fortan ungeführt und unterliegt somit der freien Raum- bzw. gar der Gebäudethermik. Sie erreicht daher die Oberflächen der Außenbauteile nur zufällig, vor allem deren oberen Bereich, weniger die mittleren und unteren Wandteile und die Raumaußenecken. Wegen des Kaltluftabfalls am Fenster werden auch die Fensterleibungen und Stürze nur ungenügend versorgt.

Im Folgenden wird erläutert, warum das Kondensationsproblem in der Heizperiode in Regionen mit kalten Wintern noch verschärft wird, wenn zur Forderung „min. 50% rF" bei gleicher Heiztechnik der Wunsch nach höherer Mindest-Raumtemperatur (z. B. 18°C) bei tiefster Außentemperatur kommt.

4.2 Relative Luftfeuchte und Art der Wärmeverteilung

Es ist kaum bekannt ist, daß „Luft"-Heizung einen zusätzlichen Befeuchtungsbedarf im Vergleich zur Strahlungsheizung hervorruft. Bereits im *geschlossenen Raum* mit dichten Fugen, also bei gleich bleibender absoluter Feuchte, wird in der Heizperiode allein dadurch, daß die Raumluft erwärmt wird, um die Auskühlung der Außenbauteile zu verhindern, ein Abfall der rF hervorgerufen (den man mit geringerer Aufheizung mildern könnte!). Dabei ist die Raumlufttemperatur (zumindest in der oberen Raumhälfte) wesentlich höher als „im Sommer", im unbeheizten Raum. Im *genutzten* Gebäude – mit Baufugen und ständig benutzten Öffnungen – ist daher unter gleichen Bedingungen auch der Luftwechsel wesentlich höher als im Sommer. Da an den Fugen und Öffnungen aber nicht nur eine ständige Wasserdampfverdrängung durch Austritt von Warmluft mit dem darin enthaltenen Wasserdampf stattfindet, sondern die Wasserdampfmenge in der nachströmenden Außenluft saisonbedingt gering ist, fällt die Absenkung der rF wesentlich höher aus als bei gleicher Heiztechnik im ungenutzten, fugendichten Raum bzw. bei der ohne Luftaufheizung wirksamen Strahlungsheizung. Bei fallender Außentemperatur wird die Wasserdampfverdrängung durch „Luft"-Heizung immer stärker, da die Heizleistung und damit die Lufttemperatur weiter ansteigen muß, während die absolute Außenluftfeuchte immer geringer wird.

Bei „Luft"-Heizung ist der Bedarf an künstlich erzeugtem Wasserdampf also wesentlich höher als bei Strahlungsheizung, wenn eine gewählte rel. Luftfeuchte aufrechterhalten werden soll. Bei entsprechender Luftbefeuchtung wird der Luftwechsel aber weiter erhöht, da das Dampfdruckgefälle nach außen ansteigt. Welche Bedeutung die Höhe der geforderten Raumtemperatur für den Befeuch-

tungsbedarf hat, wird deutlich beim Vergleich der absoluten Feuchten: So entspricht dem Wertepaar 18°C und 55% rel. Luftfeuchte 7,1 g Wasser pro kg Luft, während es bei 18°C und 40% nur 5,2 g sind. Würden während der kurzen Phasen mit tiefster Außentemperatur 16°C zugelassen, so wären es bei 40% nur 4,5 g. Geht man von 0,8 g äußerer Absolutfeuchte aus (entsprechend z. B. -15°C und 90%), müßten durch Luftbefeuchtung im ersteren Fall 6,3 g, im zweiten 4,4 g, im letzteren jedoch nur 3,7 g künstlich erzeugter Wasserdampf pro kg Luft bereitgestellt werden. Bei Strahlungsheizung wäre nun nicht nur bei gegebener Raumtemperatur der Befeuchtungsbedarf geringer als bei „Luft"-Heizung, sondern eine Raumtemperatur von 16°C bei tiefster Außentemperatur wäre für den Besucher durchaus akzeptabel, da die „empfundene" Temperatur höher läge.

4.3 U-Wert (k-Wert) und Bauteilfeuchte

Sieht man von Gebäuden ab, deren Außenwände in sog. Passivbauweise erstellt sind (z. B. 40 cm Dämmstoff zwischen zwei Schalungen), so folgt aus Kap. 4.1, daß „Luft"-Heizungen generell für Bauwerke in Mauerwerks-, Fachwerk- und Metall-Glaskonstruktion ungeeignet sind, somit also nicht nur für Bestand und Baudenkmal, sondern auch für Neubauten dieser Art: Diese Heizungsart kann eine ausreichende Temperierung der Gebäudehülle nur dann gewährleisten, wenn sie große Luftmengen kontinuierlich bewegt und diese frei im Raum zirkulierende Heizluft eine deutlich höhere Temperatur als die angestrebte Bauteil-Oberflächentemperatur hat. Entsprechend groß sind bereits die konservatorischen und physiologischen Belastungen. In der Regel aber verhindert die nur sporadische, oft ästhetisch bedingte Heizkörperanordnung jede Gleichmäßigkeit der Wärmeverteilung, so daß die Temperatur der Hüllflächen in der Heizperiode an vielen Stellen über längere Zeit unter der mittleren Raumlufttemperatur liegt. Das gilt nicht nur für die Bauteiloberfläche selbst, sondern für die ihr nahen Ausstattungsschichten und Objekte. Die Konsequenz für diese Stellen ist Feuchteaufnahme aus der Raumluft, obwohl der in Raummitte oder an der Innenwand gemessene Wert der rF nicht hoch ist. Dies ist nicht nur konservatorisch nachteilig, sondern bedingt auch einen höheren Heizwärmebedarf, da der von der Porenfeuchte abhängige U-Wert verschlechtert wird.

4.3.1 Kapillarkondensat und Wasserstoffbrücke

Warum die bei „Luft"-Heizung unzureichend erwärmten Stellen (an denen sich Raumluft abkühlt) bereits bei normalfeuchtem Raumklima Feuchte aus der Raumluft aufnehmen, liegt an der *Kapillarkondensation* [6], [7], die bereits bei nur geringem Temperaturdefizit der Außenbauteil-Oberfläche gegenüber der Raumlufttemperatur beginnt. Schimmelbildung ist ein untrügliches Zeichen davon (s. Ranacher zum „Kalte-Wand-Problem"). Dieser unsichtbare ständige Niederschlag in feinen Fugen und Materialporen (Poren-Durchmesser im Nanometer-Bereich, d. h. im Milliardstel-Meter-Bereich) beruht auf der starken *Ad*häsionsneigung der Wassermoleküle (Durchmesser 0,3 nm) in sehr feinen Hohlräumen auf Grund der dipol-artigen Molekülform (die auch die Ursache der starken *Ko*häsion in der Flüssigkeitsphase ist): Während die symmetrisch gebauten Moleküle der anderen Gase, die zusammen mit Wasserdampf das Gasgemisch „Luft" bilden, nur minimale Anziehungskräfte ausüben (Van-der-Waals-Kräfte), bilden die unsymmetrischen „polaren" Wassergasmoleküle („Wasserdampf") die wesentlich stärkeren *Wasserstoffbrücken* aus (Abb. 8), z. B. zu OH-Gruppen der Cellulose (Leinwand, Holz) oder zu Sauerstoffatomen bzw. OH-Gruppen an der „inneren Oberfläche" mineralischer Stoffe (an den Kapillarwänden von Mauerwerk und Putz). Darauf beruht auch das Hysteresephänomen (s. Kotterer), das Messung wie Regulierung der rel. Luftfeuchte problematisch macht, da Feuchteaufnahme- und -abgabevorgänge bei hygroskopischem Material nicht analog ablaufen können. Bei einem Feuchteanstieg der Umgebungsluft wird mehr

Feuchte aufgenommen, als bei einem Feuchteabfall gleichen Ausmaßes abgegeben wird.

4.3.2 Schadsalzinaktivierung

In diesem Zusammenhang muß man auch die verstärkte Feuchteaufnahme von Bauteilen neu betrachten, in deren Porenraum lösliche Salze vorkommen. Im Normalfall ist dies in Kellern und nichtunterkellerten Erdgeschossen mit unisolierter, historischer Bausubstanz der Fall. In solchen Räumen liegen in der warmen Jahreszeit mit ihrer hohen absoluten Außenluftfeuchte zu geringe Oberflächentemperaturen an den Raumseiten der Wände vor, die – wie auch das Vorkommen der Schadsalze in den Poren – durch die direkte Erdberührung verursacht sind. Aus Abb. 7 kann man dieses Temperaturdefizit der Raumhüllflächen als ausreichende Ursache für die während dieser Zeit stets hohe rel. Luftfeuchte solcher Räume erkennen, ohne daß man eine Feuchteverdunstung aus dem Porenraum annehmen muß. In herkömmlichen Sanierungskonzepten werden die Faktoren dieses komplexen Sachverhalts einzeln betrachtet, so daß gewöhnlich keine dauerhaften, geschweige denn preisgünstigen Lösungen des Problemkreises erreicht werden.

Allein aus der bisherigen Darlegung der physikalischen Hintergründe (4.1ff) ist aber bereits ableitbar, daß der kleinste gemeinsame Nenner der Einzelphänomene die Herstellung einer saisonal sinnvollen Oberflächentemperatur der Raumhüllflächen ist. Eine molekular-physikalische Feinbetrachtung, bei der die Temperatur als Maß der Wärmeschwingung der Moleküle gesehen wird (Abb. 2), läßt folgende Schlüsse zu:

- Die temperierte Wandoberfläche erlaubt keine Kapillarkondensation mehr. Weder an den Porenwänden, noch an den Salzionen werden durch Wassermoleküle aus der Raumluft neue Wasserstoffbrücken gebildet.
- Von der gesamten Wandinnenseite geht ein geringes kontinuierliches Wärmegefälle nach außen aus. Dadurch kommt es zu einer allmählichen nach außen gerichteten Verdrängung von Porenwasser.
- Hinter dem zurückweichenden Porenwasser können sich nur fadenförmige Salzmoleküle in den Porenraum hinein bilden (Verarmungs-Kristallisation). Eine Belastung der Phasengrenze zur Raumluft (z. B. der Oberfläche einer Wandmalerei) ist nicht möglich.
- Es ist nicht erforderlich, eine hohe rel. Luftfeuchte *in Wandnähe* aufrechtzuerhalten, um die Salzionen in Lösung zu halten. Es ist fraglich, wie dieser häufig gegebene Ratschlag bezahlbar und technisch sicher realisiert werden soll, ohne im gesamten Raum den gleichen Wert zuzulassen. Damit wäre die Raumnutzung jedoch unnötig eingeschränkt.

Selbst ein Raum mit Wandmalerei auf salzbelastetem Mauerwerk kann bei „thermischer Sanierung“ durch Temperierung also eine physiologisch zuträgliche Temperatur und eine mittlere rF haben. In Verbindung mit einer Minimallüftung bei Anwesenheit von Personen ist er daher auch für Veranstaltungen nutzbar. Dies zeigt die Erfahrung, nach der in solchen Räumen nach Temperierung und Ersatz des losen Putzes durch Normalputz, auf beiden Wandseiten eine weitere Schadensbildung durch die im Porenraum „unverändert“ vorliegenden Salze ausgeschaltet war. Die bei „Luft“-Heizung oder plötzlicher Absenkung der rF (z. B. durch einen Luftentfeuchter) auftretende oberflächliche Salzkristallisation mit der Folge der Farbabblätterung kann also nicht als Beweis gelten für die so oft von Experten geäußerte Annahme, daß bei salzbelastetem Mauerwerk jede Raumbeheizung schädlich sei. In *beiden* Fällen wird die Verdunstung von Porenfeuchte in die Raumluft angeregt, da die Raumluft entfeuchtet wird (zur „Luft“-Heizung s. 4.2). Die Annahme belegt also lediglich, daß es neben der geschilderten praktischen Erfahrung keine Forschung zum Verhalten von löslichen Salzen im Wärmegefälle eines belasteten Bauteils gibt.

4.3.3 Kapillartaupunkt und Mollier-h,x-Diagramm

Kapillaren mit einem Durchmesser um 5 nm füllen sich bereits ab einer rF von 75% durch Kapillarkondensation mit Wasser. Dieser Vorgang würde bei einem Raumklima von 20°C und 55% rF bereits bei einer Oberflächentemperatur einer Außenwand von 15,5°C einsetzen. Mithilfe des Mollier-h, x-Diagramms (Abb. 7) läßt sich dies voraussagen. Man bestimmt durch Aufsuchen des Schnittpunkts der Raumklimawerte die momentane Wasserdampfmenge der Raumluft (absolute Feuchte, ablesbar auf der oberen Waagerechten in Gramm pro kg trockene Luft). Von hier aus fährt man auf der entsprechenden Linie der Absolutfeuchte zur 75%-Kurve und liest von dem neuen Schnittpunkt aus links die Temperatur ab. Dieser eigentlich für Werkstoffe mit hohem Anteil an Feinkapillaren geltende "Kapillartaupunkt" scheint für den Alltag vorteilhaft, obwohl Stoffe mit hohem Anteil an größeren Poren bei gleichem Temperaturdefizit zur Raumlufttemperatur weniger Wassermoleküle aus der Raumluft aufnehmen. So beträgt der „praktische Feuchtegehalt", der unter normalen Wohnbedingungen in der Heizperiode (bei Luftheizung) eintretende volumenbezogene Feuchtegehalt, bei Ziegel und Kalkputz z. B. 1,5%, bei Kalkzementputz 3%, bei Gasbeton 3,5% und bei Beton 5%. Das Verbesserungspotential ist erheblich, wenn man bedenkt, daß die Leitfähigkeit um 7 – 10% pro Volumenprozent Bauteilfeuchte steigt. Dies gilt besonders für Baustoffe mit sehr hohem Feinporengehalt wie Beton, da sie eine wesentlich höhere Gleichgewichtsfeuchte haben als Stoffe mit überwiegend größeren Poren, z. B. Ziegel. So kann aus Beton das gesamte sorptiv gebundene Porenwasser durch Dauerbeheizung eines Bauteils im Winter vertrieben werden, wodurch nicht 5 Volumenprozent, sondern bis zu 10 Gewichtsprozent an Wasser entfernt werden könnten. Diese Annahme wird durch die Betrachtung von Thermografien der Außenseiten temperierter Betonwände gestützt (s. 6.3.7.1). Da das Verhalten des Wasserdampfmoleküls in Feinstrukturen und Kapillaren so stark abweicht von dem im freien Raum, spricht man auch vom *Nanoklima*, das letztlich die Bauteilfeuchte bestimmt, im Gegensatz zum üblichen Ausgangspunkt der Betrachtung, dem Raumklima.

Sichtbare Kondensation entsteht erst, wenn die Temperatur der Bauteiloberfläche wesentlich unter der Lufttemperatur liegt. In o. a. Beispiel läge der „Taupunkt" bei 10,5°C. Bei Klimamessungen ist also nicht die Ermittlung der Taupunkttemperatur (der Temperatur, bei der 100% rF erreicht werden), sondern des Kapillartaupunktes wichtig, da dieser angibt, welche Temperatur der Wand und des wandnahen Materials nicht unterschritten werden darf, damit in Feinstrukturen keine unsichtbare Feuchteaufnahme stattfindet. Näherungsweise sucht man dazu in Abb. 7, wie oben beschrieben, die Temperatur auf, bei der bei gegebener absoluter Raumluftfeuchte 75% rF eintreten.

4.3.4 Fehleinschätzung der örtlichen Gleichgewichtsfeuchte im Winter

Wenn diese Zusammenhänge bereits im nicht-klimatisierten Raum mit stärkerer Personennutzung (Büro, Wohnung) gelten, muß dies im „konventionell" klimatisierten Museum noch stärker der Fall sein. Da jedoch bei der bauphysikalischen Bewertung eines Raumklimas in der Regel nur der Taupunkt betrachtet wird, nicht aber der Kapillartaupunkt, wird das Schadenspotential für die Bausubstanz wird nur selten richtig eingeschätzt. So werden feuchtebedingte Schadensfälle wie Schimmelbildung in Fensterleibungen und Außenwandecken, Schwammausbildung an Balkenköpfen in Mauerlöchern, Rahmenschäden an Fenstern usw. häufig auf äußere Einflüsse („Wetter") zurückgeführt statt auf das winterliche Dauer-Kapillarkondensat, das bei „Luft"-Heizung an den Raumseiten der betroffenen Bauteile möglich ist. An diesen Stellen entspricht die tatsächliche Materialfeuchte eben nicht der Gleichgewichtsfeuchte, die sich bei der in Raummitte gemessenen rel. Luftfeuchte ergeben würde, sondern der, die sich aus der höheren örtlichen Luftfeuchte ergibt, die aus dem Temperaturdefizit des Bauteils gegenüber der Raumluft resultiert.

4.3.5 Fehleinschätzung des Einflusses der Materialfeuchte auf die Wärmeverluste

Auch die Erhöhung der Wärmeverluste durch höheren Wärmedurchgang in Bauteilen, die ausgerechnet in der Heizperiode feucht sind, wird kaum offen diskutiert. Stattdessen gilt für den Feuchteschutz im Hochbau der energetisch unhaltbare DIN-Lehrsatz: „Die in der Sorptionsphase (Winter) von einem Bauteil aufgenommene Wasserdampfmenge muß in der Desorptionsphase (Sommer) wieder abgegeben werden können". Und die Schlüsselgröße der Wärmebedarfsberechnung, der U-Wert, gilt unabhängig von der Art der Wärmeverteilung als Konstante, obwohl er vom „praktischen Feuchtegehalt" des Bauteils abhängt. Da dieser bei „passiven" Bauteilen, d. h. solchen, die kälter als die Raumluft sind, von der relativen Feuchte der wandnahen Luft abhängt, wird er in der Heizperiode durch Luftheizung verschlechtert, durch „Wand"-Heizung dagegen verbessert – im Vergleich zu dem im Sommer, ohne Heizbedarf, hinnehmbaren Wert!

So wird die in der Physik der Wärmeabgabe der Wandheizung begründete Senkung des Wärmebedarfs gleich zweimal „weg gerechnet": Weder der Vorteil der wesentlich geringeren Raumlufttemperatur, also die vom Nutzerverhalten unabhängige Senkung des Lüftungswärmebedarfs, noch die Senkung des Transmissionwärmebedarfs, durch Zwangstrocknung der Außenwand und Ausschluß der Wiederbefeuchtung, kommen rechnerisch zum Tragen. Im Vergleich ergeben sich bei DIN-gemäßer Berechnung der Wandheizung daher wesentlich höhere Installationskosten als bei konventionellen Systemen, nicht nur weil wesentlich mehr Rohrlänge als erforderlich errechnet wird (Register statt max. zwei Schleifen), sondern weil auf der Rohwand eine Wärmedämmschicht gefordert wird, obwohl mit Betriebsbeginn die Wandtrocknung einsetzt. Die Wandheizung scheidet daher meist schon im Vorfeld der haustechnischen Planung aus, obwohl jeder „Anwender von DIN-Normen" vom Herausgeber, dem Deutschen Institut für Normung e.V. (s. Kap. 9), um Mitteilung gebeten wird, wenn er auf „eine Möglichkeit einer unrichtigen Auslegung stößt", die z. B. zur Überdimensionierung einer technischen Anlage oder zu einer überflüssigen Maßnahme führt (s. Kap. 6.3.7).

Der kleinste gemeinsame Nenner der angesprochenen Mängel findet sich, wie dargelegt, in der Temperatur der Wandoberfläche: Wird dem in der Raumluft enthaltenen Wasserdampfmolekül an den äußeren (sichtbaren) und inneren (unsichtbaren) Materialoberflächen keine Energie entzogen („Wandtemperatur gleich Lufttemperatur"), ist also an einer Wandoberfläche die Wärmeschwingung der Materialmoleküle (deren Maß die Temperatur ist) ausreichend stark, so wird die Bildung von Wasserstoffbrücken verhindert, d. h. bereits das Kapillarkondensat ausgeschlossen. Dies ist im Sommer in Massivbauten gewährleistet durch die in der Gebäudehülle gespeicherte Wärme, die an der Raumseite der Außenbauteile auch nachts eine ausreichend hohe Wärmeschwingung der Moleküle aufrecht erhält. Dieser Zustand muß in der Heizperiode vom eingesetzten Heizsystem beibehalten werden. Wandheizsysteme, die die gesamte Raumseite der Außenbauteile bedienen – wie es die Hypokausten-Wandheizung (Abb. 4 und 5) bereits vor 2000 Jahren tat – leisten also allein durch ihr physikalisches Prinzip Feuchte- und Wärmeschutz zugleich. Hinzuzufügen bleibt, daß die Wasserstoffbrückenbildung auch für die aufsteigende Bodenfeuchte (in erdberührten Wandsockeln ohne Horizontalsperre) der „Motor" ist. Daher ist auch sie durch ein geringes Wärmegefälle in den betroffenen Bauteilen durch Sockeltemperierung auf einfachste und für den Raum vorteilhafte Weise auszuschalten.

5. Klimavorgaben aus der Praxis

Nach den Langzeitbeobachtungen der Landesstelle, die durch die Fachliteratur zunehmend bestätigt werden, können unter den Prämissen optimierte Gebäudehülle (mit dichten Bau- und Öffnungsfugen, außenbeschatteten Transparentflächen und temperierten Außenbauteilen) und kontrollierte Bedarfslüftung (Luftwechsel nur bei Anwesenheit von Personen und entsprechend ihrer Zahl) Vorgaben für die Klimaplanung gemacht werden, die auch in Museen ohne Fachperso-

nal dem Alltagsbetrieb standhalten. In den folgenden beiden Absätzen werden sie formuliert mit der Zielrichtung „Einhaltung der konservatorischen Anforderungen bei möglichst geringem Bedarf an Energie und minimiertem Apparateeinsatz“.

5.1 Räume ohne längeren Personenaufenthalt

Als Vorgabe für Depots ohne längeren Personenaufenthalt, für die im Winter geschlossenen Exponatgebäude in Freilichtmuseen und für Museen ohne Winterbetrieb gilt, daß die Raumtemperaturen im Jahresverlauf zwischen dem Gefrierpunkt und 26°C und die relative Luftfeuchtigkeit zwischen 40 und 70% gleiten können. Da die örtliche relative Luftfeuchte von der örtlichen Materialtemperatur abhängig ist, kann die genannte Obergrenze jedoch nur für „wandgeheizte“ Räume gelten, in denen an keiner Stelle die (in Raummitte gemessene) Raumtemperatur unterschritten, der Feuchtewert also nirgendwo überschritten wird. Im Hinblick auf bereits vorhandenen Schimmel und Rost sollte auch in solchen Räumen die obere Feuchtegrenze möglichst selten erreicht werden und nicht über mehrere Wochen vorliegen. Während der überwiegenden Zeit mit höherer absoluter Außenfeuchte (Sommer) sollten durch leichte Temperierung 65% unterschritten werden. Durch diese Maßnahme allein wird bereits die Neubildung von Schimmel und das Wachstum vorhandenen Pilzbefalls verhindert und Rostbildung stark verlangsamt. Diese Sommertemperierung ist in der Regel nur in erdberührten Räumen und in Erdgeschossen von Bauwerken mit Schwerstmauerwerk erforderlich, wo auch aus physiologischer Sicht im Sommer ein Wärmebedarf besteht. Bei Bodenfunden aus Eisen gilt die Feuchteobergrenze nur für vollentsalzte Exponate, während bei Restchlorgehalten auch bei minimalen Luftfeuchtewerten noch Korrosion beobachtet wurde.

5.2 Räume mit ständigem Personenaufenthalt

Als Vorgabe für Depots mit Arbeitsplätzen, die nicht vom Depotraum abgetrennt werden können, und für das “normale” gering frequentierte Museum mit Winterbetrieb gilt abgesehen von der Feuchteuntergrenze von 40% rF, daß bei tiefsten Außentemperaturen aus physiologischen Gründen 15°C nur selten unterschritten werden sollten. Bei „Wandheizung“ wären derartige Raumtemperaturen für den im Raum sich bewegenden Menschen gut erträglich, da die ruhende Luft durch ihre geringe Wärmeleitfähigkeit die Wärmeabgabe der Körperoberfläche verringert, ferner vom Sockel, dem „Heizkörper“, eine starke Wärmestrahlung ausgeht. Die empfundene Temperatur liegt also über der Raumtemperatur. Werden in Frostphasen Temperaturen unter 15°C zugelassen, kann die Feuchteuntergrenze mit minimalem Befeuchtereinsatz noch gehalten werden.

Bei nutzungsbedingt höherem Luftwechsel (stärker frequentiertes Museum mit höherer Temperaturuntergrenze) tritt bei Frost, wie bei jeder Art der Raumbeheizung, auch bei „Wandheizung“ ein länger andauernder Befeuchtungsbedarf ein, jedoch auf wesentlich niedrigerem Niveau als bei „Luftheizung“. Für große Häuser, die über Wartungspersonal für Luftbefeuchter oder über Klimaanlagen verfügen, sollte zur Minimierung des Aufwands und zur Minderung der Energiekosten 16°C als Untergrenze zugelassen werden. Die oben erwähnten Feuchtegrenzen im Jahresverlauf gelten mit den angegebenen Einschränkungen auch hier.

Diese Vorgaben erlauben den Verzicht auf energiekostenintensive Luftentfeuchtung und reduzieren weitestgehend den Bedarf an Luftbefeuchtung. Die im Sommer gültige obere Temperaturgrenze (26°C) sollte möglichst selten erreicht oder gar überschritten werden. Dies sollte jedoch nicht durch ebenfalls energiekostenintensive Kühlung angestrebt werden, sondern apparateunabhängig durch Verbesserung der Pufferwirkung der Gebäudehülle einschließlich außenliegender Beschattung der Glasflächen und durch Reduzierung der Abwärme des Kunstlichts (Anschlußleistung von max. 15 Watt pro qm Grundfläche). Werden diese Vorgaben in Verbindung mit der im Folgenden näher beschriebenen minimalen

Klimatechnik umgesetzt, so kann auch die geringe Kurzzeit-Schwankungsbreite (max. 0,5°C und 2% pro Stunde) unter Alltagsbedingungen eingehalten werden. Dies zeigte eindrücklich die Meßstudie im Kunstforum Ostdeutsche Galerie in Regensburg, die im Rahmen des PREVENT-Projektes durchgeführt wurde. Dieses erste größere Gemäldemuseum mit Temperieranlage ist mit Außenbeschattung und gering dimensionierter Teilklimaanlage (max. einfacher Luftwechsel, nur Be-, keine Entfeuchtung, keine Kühlung) ausgestattet. Auch im Würzburger Kulturspeicher mit seinem tagsüber zusammenhängen Luftvolumen von ca. 40.000 m^3, das ähnlich ausgestattet ist, bestätigten Messungen dieses Klimakonzept [8].

6. Minimale Klima- und Heiztechnik

Unter der Prämisse der zur Gebäudehülle gemachten Vorgaben (s. Kap. 3.1) in Verbindung mit Wandheiztechnik kann sich die klimatechnische Ausstattung in der Regel auf drei im Folgenden beschriebene einfache Einheiten beschränken, wobei dies nicht nur für Depoträume, sondern gleichermaßen für Museumsbauten mit geringer bis mittlerer Besucherfrequenz gilt. Die Ausführungen zum Thema Raumbeheizung beziehen sich auch auf nicht museal genutzte Gebäude, wie Wohn- oder Bürobauten.

6.1 Lichtschutz

Die Frage des Lichtschutzes soll hier nur in ihren drei Kernpunkten gestreift werden: Im Museum, besonders aber im Depot muß die größtmögliche Absenkung der Jahreslichtmenge angestrebt werden, vor allem für Objekte aus organischem Material. Mit zwei einfachen Maßnahmen kann dies erreicht werden, nämlich durch völligen Tageslichtausschluß außerhalb der Nutzungszeiten und durch Beschränkung der Beleuchtungsstärke während der Nutzungszeit auf Werte unter 300 Lux (unterhalb von 2,5 m Höhe). Dabei soll das von den Lichtquellen ausgehende Licht einen möglichst geringen Anteil an kurzwelliger Strahlung haben, insbesondere an UV-Strahlung. Bei einer vorhandenen Beleuchtung mit zu hohem UV-Anteil ist dies bereits dadurch gegeben, daß nur reflektiertes Licht in der Objektebene zugelassen wird. Schließlich sollte die Wärmeabgabe von Kunst- und Tageslicht so gering wie möglich gehalten werden. Einfache Maßnahmen dazu wurden bereits im Kapitel 3.1 angesprochen. Zu ergänzen bleibt, daß eine zu große Raumluftaufheizung durch das Kunstlicht dadurch vermieden wird, daß die Anschlußleistung 15 W/m^2 nicht überschreitet. Die zwei erwähnten größeren Gemäldemuseen zeigen, daß bei geringem Anteil an Tageslicht sogar unter dieser Obergrenze eine gute Ausleuchtung erreicht wird. Der Kulturspeicher Würzburg hat eine max. Anschlußleistung von 15 W/m^2, das Kunstforum Ostdeutsche Galerie Regensburg eine von 12 W/m^2!

6.2 Lüftung

Die Lüftung kann je nach Gebäudegröße durch einen oder mehrere Abluftventilatoren geringer Maximalleistung erfolgen, deren Aufgabe die Herstellung eines Minimalluftwechsels zwischen 0,1 und 1 Raumvolumen pro Stunde ist, montiert z. B. in Kamin, Decke zum Dach oder Fenster, in Betrieb nur „bei Bedarf“, d. h. bei Anwesenheit von Personen, reguliert durch den Nutzer mittels Drehzahlsteller unter Beobachtung der sich unter diesen Umständen nur langsam ändernden relativen Luftfeuchte. Die Nachströmung der für diesen geringen Luftwechsel erforderlichen Außenluftmenge kann durch Fugen von Fenstern und Türen erfolgen. Die Stellen für Ventilator und Nachströmung müssen sich gegenüber liegen, so daß eine „Spülung“ des gesamten Raumes bzw. einer Raumfolge möglich ist. Fenster im Nahbereich des Ventilators müssen daher abgedichtet werden. Ferner sollten die Eintrittsfugen mit Blick auf eine möglichst geringe Staub- und Luftschadstoffbelastung der Raumluft angeordnet werden. Sog. Luftbrunnen (Erdkanäle mit geschützter Lufteintrittsöffnung), die ohne jeden Energieeinsatz im Winter eine Vorwärmung und leichte Befeuchtung der Außenluft, im Sommer

eine Kühlung und Entfeuchtung bewirken, sind aus Museumsbauten des 19. Jahrhunderts bekannt (s. Schönbrunn-Beitrag Käferhaus).

Ist die Dämpfung der Außenklimaschwankungen durch die Gebäudehülle Bestandteil des Klimakonzeptes, wird die Lüftung nur zu Zeiten in Dauerbetrieb gehalten, in denen mit Hilfe der Temperierung z. B. nach Baumaßnahmen Baufeuchte abgeführt oder die zu hohe Materialfeuchte eines frisch geborgenen Bestandes normalisiert werden soll. Später kann der Einsatz der Lüftung auf den reinen personenbedingten Bedarf beschränkt werden, d. h. auf die Zeiten der Anwesenheit von Personen und auf den dann vorliegenden tatsächlichen Bedarf (bei Strahlungsklima liegt der Frischluftbedarf bei leichter Tätigkeit nicht höher als ca. 1 m^3 pro Person und Stunde, nicht wie meist vorgegeben bei 20 m^3/h). Bei solch geringen Frischluftmengen kann eine für geringere Personenzahlen noch ausreichende Lufterneuerung stattfinden, ohne daß plötzliche Veränderungen der relativen Raumluftfeuchte provoziert werden. Werden im Hochsommer bei höchster Außentemperatur Raumtemperaturen von bis zu 26°C akzeptiert (moderne Vorgabe für Vollklimaanlagen im nicht-musealen Bereich), kann bei optimierter Gebäudehülle auf Kühlung verzichtet werden. Die Erfahrung zeigt, daß bei Beschränkung der Luftwechselrate auf max. 1 Raumvolumen pro Stunde die Lüftung im Sommer zur natürlichen Kühlung während der Nachtstunden eingesetzt werden kann, ohne daß Kurzzeitschwankungen auftreten. Die Aussagen zu den Betriebszeiten der Lüftung gelten für alle Gebäudearten bzw. Nutzungsweisen, also auch für Bauten mit Lüftungsanlagen, wenn die Gebäudehülle entsprechend Kapitel 3.1 optimiert ist und die Heizaufgabe durch Wandheiztechnik erfüllt wird. Anlagen zur Behandlung der Frischluft, die Filterung und klimatische Konditionierung ermöglichen, sind erst in Häusern mit großer Besucherzahl erforderlich, wenn Luftwechselraten ab 2 V/h geleistet werden müssen.

6.2.1 Luftbe- und -entfeuchtung

Als zweite Einheit der bei Strahlungsklima möglichen „minimalen Klimatechnik“ ist in Häusern ohne Lüftungsanlage eine geringe Kapazität zur Luftbefeuchtung bereitzustellen in Form eines bzw. weniger Luftbefeuchter. Diese sollten nach dem Verdunstungsprinzip arbeiten, weil dadurch das Gefährdungspotential geringer ist: Im Gegensatz zu anderen Verfahren droht bei Ausfall der Regelung kein Überschreiten der Feuchteobergrenze. Da der Befeuchtungsbedarf in der Heizperiode bei Wandheizung durch das Vermeiden der Luftaufheizung grundsätzlich geringer ist als bei anderen Arten der Wärmeverteilung (s. Kap. 4.2), genügen bei regelmäßiger Reinigung einfache Geräte geringer Leistung, insbesondere wenn die Wasserdampfverluste weiter verringert werden durch sorgfältiges Aufspüren und Abdichten der Baufugen. Die Geräte sollten daher deutlich unterdimensioniert beschafft oder – wenn bereits vorhanden – bei kleiner Förderleistung betrieben werden, nicht nur wegen des geringen Bedarfs, sondern damit durch lange Laufzeiten weniger Regelintervalle auftreten.

In temperierten Gebäuden wird in Zeiten hoher absoluter Außenfeuchte (Sommer) die Temperatur kritischer Gebäudeteile wie Keller oder Erdgeschoß durch die „Sommer-Temperierung“ den unkritischen Obergeschossen angeglichen, die der mittleren Außentemperatur durch Akkumulation der Solarstrahlung, also „ohne Beheizung”, folgen. Damit wird die Temperatur im Gesamtgebäude der mittleren absoluten Außenluftfeuchte angepaßt, so daß Geräte zur Luftentfeuchtung nirgendwo benötigt werden. Dies gilt unter der Prämisse, daß mit dem Tagesablauf gleitende Klimaveränderungen konservatorisch unbedenklich sind, auch für Häuser mit hoher Personenbelegung, da bereits der bedarfsabhängige Betrieb einer Minimallüftung (Basis: Bei Belegung 1 m^3 Frischluft pro Person und Stunde) die durch Wasserdampfabgabe der Menschen mögliche Überschreitung der Luftfeuchte-Obergrenze verhindern kann.

6.3 Temperierung

Die dritte Einheit der „minimalen Klimatechnik“ bildet die Raumbeheizung durch Sockeltemperierung. Die in diesem Beitrag diskutierten Minimalformen können jedoch nur dann entstehen, wenn das Gewerk Heizung konstruktiv verknüpft wird mit den Gewerken Rohbau, Putzen, Bodenlegen, Innenausbau und Fassadenbau. Gerade dies aber deckt in fast jedem Projekt anfangs Vorurteile und Mißverständnisse von Architekten, Planern und Handwerkern auf, die ständig neu hervorgerufen werden, weil in der Ausbildung wie in der Produktinformation eine ganzheitliche Vernetzung von „Wärme“, „Feuchte“ und „Material“ nicht erfolgt. So sind nicht nur die Stellungnahmen von Einzelgewerksnehmern, sondern auch die von Gutachtern oft von physikalisch unbegründetem Sicherheitsdenken geprägt, das generell eine der Hauptursachen der Kostenexplosion im Bauwesen darstellt. Leider wagen Vertreter von Baubehörden nur selten, die „Bedenkenflut“ durch Nutzung von empirisch entstandenem Alternativwissen einzudämmen, obwohl dadurch eine spürbare Entlastung der öffentlichen Haushalte im Bausektor erreicht würde.

6.3.1 Ziel der Temperierung: Die Temperatur der Wandoberfläche, nicht die der Raumluft

Zunächst muß nochmals betont werden, daß das Ziel der Temperierung die Herstellung einer günstigen Oberflächentemperatur der Außenwände ist. Im Lehrbuch dagegen wird für alle Arten von Heiztechnik als Ziel des Heizens die „Erhöhung der Raumlufttemperatur“ angegebenen, obwohl alle Nachteile konventioneller Heizverfahren daraus folgen. Für die Verfahren, die die Raumluftmasse direkt als Heizmedium einsetzen, wie die Heizkörperheizung oder die Voll-Klimaanlage, kaschiert die Lehrbuchaussage den Tatbestand, daß die Temperatur der Raumluft zumindest im oberen Teil des Raumes stets deutlich über derjenigen Temperatur der Wandoberfläche liegt, die durch luftheizende Verfahren überhaupt erreicht werden kann. Die Lufttemperaturerhöhung ist also nicht ein sinnvolles, gewähltes Ziel, sondern physikalische Folge eines falschen Wärmeverteilungsprinzips.

Die Erfahrung zeigt nun, daß für das alternative Ziel „Temperierung der Wandoberfläche“ keine Heizrohrregister, „Hypokausten“-Wandschalen oder Sockelkonvektoren erforderlich sind. Im Regelfall wird, meist unter Putz, an jedem Außenwandsockel je eine Heizrohrschleife befestigt, d.h. ein Vor- und ein Rücklaufrohr übereinander (Durchmesser 15 bis 22 mm, je nach Wandlänge, Abstand 25 bis 40 mm, entsprechend der lichten Weite, die sich aus dem Paßstück am Schleifenende, dem Fitting, ergibt), an den Trennwandsockeln beidseitig je ein Einzelrohr, das in Außenwandnähe durch eine Bohrung auf die andere Wandseite geführt wird und daher mehrere Trennwände beidseitig abfährt (Abb. 6). Durch den Heizbetrieb werden warme Materialstreifen an den Wandsockeln erzeugt, von denen – wie von einer sonnenbeschienenen Wandoberfläche – ein wandgebundener Warmluftauftrieb (Coanda-Effekt) gebildet wird. Camuffo [9] wies nach, daß senkrechte Raumhüllflächen bereits bei einem Temperaturunterschied zur Raumluft von 0,1 – 1,0°C einen Einfluß auf die wandnahe Grenzschicht der Luft ausüben (Bildung von feinen Auf- oder Abtriebsströmungen).

Dieser thermisch aktive Streifen am Wandsockel entsteht durch den Wärmestau, den eine solche Heizrohrschleife (Höhe 7 bis 9 cm, je nach Rohrdurchmesser) im schlecht (!) wärmeleitfähigen mineralischen Material der Rohrumgebung hervorruft. Bereits bei geringeren Vorlauftemperaturen erfolgt durch geringfügige Temperaturerhöhung im Sockelmaterial die Trockenlegung nichtunterkellerter Wände. Die geringe Wärmeabstrahlung der Rohrebene und der minimale, dem Kaltluftabfall an der Wandfläche entgegenwirkende Auftrieb bewirken schon eine spürbare Temperierung des Raumes, die für Kirchenräume oder als Lager genutzte Keller meist schon ausreicht. Beim Ziel „Raumbeheizung“ ist die Höhe der Raumtemperatur direkt abhängig von der Stärke des Warmluftauftriebs, der von der Oberflächentemperatur der Putzschicht vor den

Rohren bestimmt wird. Ein für Raumtemperaturen über 18°C erforderlicher, stärkerer Auftrieb (der auch hinter der Möblierung wirksam ist, wenn 2 cm Wandabstand eingehalten werden) entsteht bei einer einzelnen Rohrschleife am Wandsockel mit einer höheren Vorlauftemperatur (Mauerwerk um 30 cm benötigt bei stärkerem Frost dann mittlere Rohrtemperaturen von ca. 60°C, stärkeres Mauerwerk unter 55°C) oder bei je einer Schleife an Sockel und Brüstung mit einem maximalen Vorlauf von 55°C (bei starkem Mauerwerk unter 50°C).

Die Montage der Rohre kann auf oder unter Putz erfolgen. Im Aufputzfall entsteht der auftriebserzeugende Materialstreifen durch die hohe Temperatur der wandberührend montierten, angestrichenen (!) Rohroberflächen und die geringere Temperatur des dahinter liegenden Putzstreifens, im Unterputzfall dagegen durch die fast gleichmäßig um bis zu 20 Grad unter der Rohrtemperatur liegende Temperatur des Putzstreifens, der die eingeputzten Rohre abdeckt (Abb. 9). Das endgültige Ziel einer ausreichend hohen Wärmeabstrahlung der gesamten Wandfläche tritt nur ein, wenn alle Faktoren zusammenwirken. Die wichtigsten Regeln lauten:

Unterputzmontage:

- geringstmögliche Putzüberdeckung (15 +/- 5 mm) oder Steinriemchen entsprechender Stärke (kein Holz als Abdeckung: Oberkante Holzfußleiste unter Unterkante des ersten Rohres!)
- sorgfältiges Einmörteln der Rohre zur Vermeidung von Hohlräumen.

Aufputzverlegung:

- guten Wandkontakt herstellen
- Abstrahlung durch Anstrich optimieren.

Allgemein:

- kontinuierlicher Betrieb bei einer der Außentemperatur angemessenen Vorlauftemperatur
- an erdberührten Wänden im Sommer mindestens 30°C Vorlauftemperatur (Anhebung des Sockels der Heizkurve)
- Möblierung in 2 cm Abstand zur Wandoberfläche.

Abb. 9 zeigt eine Messung der Wärmeabstrahlung der Innenseite einer Wohnraum-Außenwand bei –10°C Außentemperatur und 20,5°C Raumtemperatur (Tisch in Raummitte). Die in 50-cm-Schritten mit dem Infrarot-Thermometer gemessenen Oberflächentemperaturen sind durch den Auftrieb entstanden, der am Wandsockel durch die Übertemperatur eines ca. 10 cm hohen Putzstreifens hervorgerufen wurde. Dessen in 1-cm-Schritten gemessene Oberflächentemperatur betrug im Mittel 40°C, als Folge einer mittleren Temperatur der 2 eingeputzten Heizrohre von 60°C (Vorlauf 63°C, Rücklauf 57°C). Die Stärke der Putzüberdeckung war mit mindestens 2 cm eher hoch. Bei 15 ± 5 mm wäre der Effekt bereits bei geringerer Wassertemperatur (z. B. bei 59/53°C), bei Betrieb einer zweiten Schleife in Brüstungshöhe gar bei 50/44°C erreicht worden. Die rasche Abnahme der Oberflächentemperatur oberhalb der Rohrebene beweist die *schlechte Wärmeleitfähigkeit* trockener mineralischer Baustoffe, deren U-Wert durch Entfernung der mit „praktischer Bauteilfeuchte“ bezeichneten hygroskopischen Feuchtigkeitsmenge verbessert wurde. Unterhalb eines waagerechten Rohres oder rechts und links von einem senkrechten Rohr nimmt die Oberflächentemperatur noch schneller ab, da in diesen Fällen der Auftrieb nicht wirksam ist. Dies zeigen auch Thermografien von Außenwandinnenseiten mit eingeputzten Temperierschleifen: Die Hochtemperaturfarben Weiß, Rot und Gelb beschränken sich auf den unmittelbaren Rohrnahbereich, dann folgt beidseits ein schmaler grüner Saum und die überwiegende Wandfläche zeigt die Farbe Blau für die Umgebungstemperatur (hier = Raumtemperatur).

6.3.2 Rohrmontage, Einputzen der Rohre

Aus der nun vorliegenden Langzeiterfahrung können für die Rohrmontage die folgenden Prinzipien formuliert werden. Zur Überwindung der oben angesprochenen Verständigungsschwierigkeiten gerade in diesem Bereich soll dies ausführlich geschehen.

1. Als **Rohrmaterial** wird sowohl auf wie unter Putz blankes Kupfer verwendet, da im Vergleich zu anderen Materialien die Wärmeübertragung wesentlich besser (s. Abb. 14) und die Wandstärke geringer ist. Dabei sind die Punkte 7 und 8 zu beachten. Die Nachteile der Kunststoffummantelung (Leistungsminderung, größere Schlitztiefe bzw. Putzstärke) können also vermieden werden. In Räumen mit normaler Grundfläche wird in der Regel Stangenmaterial verarbeitet (Länge bis 5 m). In Großräumen mit langen, ungegliederten Wandstrecken (Hallen, Kirchen etc.) sind bei Unterputzverlegung weiche Kupferrohre von der Rolle vorteilhaft. Bögen bis 90° sind mittels Biegezange herstellbar, so daß nur wenige Verbindungsstellen notwendig werden. Ausdehnungsbögen sind auch bei längeren Strecken nicht erforderlich, wenn schleifenweises Hochheizen bei noch feuchtem Putz vorgenommen wird (s. 10).
2. **Rohrverbindungen** werden mit Lötfittings ausgeführt, nicht mit Preßfittings, da diese starke Wülste haben. Zur Vermeidung von Rohrversprödung wird weich gelötet, wenn möglich mit der elektrischen Lötzange. Dabei entfällt jede Gefahr von Brand oder Rauchbildung, ein Vorteil, der besonders bei Nachrüstungen in ausgestatteten Räumen von Bedeutung ist. Die Verbindungsstellen werden nicht weiter behandelt (Korrosion s. 7).
3. Die **Rohrdurchmesser** betragen in der Regel 15 mm, bei größeren Wandlängen auch 18, in Großräumen wie Kirchen 22 mm.
4. Die **Dichtigkeitsprüfung** nach Fertigstellung der Anlage erfolgt zunächst mit Luftdruck, damit ohne Wasserablassen und bei trockenen Rohren nachgebessert werden kann. Nach 24 Stunden Druckhaltung (4 bar) wird die Anlage befüllt, auf Maximalleistung gebracht (min. 70°C Vorlauf) und diese über einige Stunden gehalten.
5. Bei **Aufputz-Montage** sind Halterungen erforderlich, z.B. Rohrhaken oder Blechschellen mit 1,5 mm Wandstärke (z.B. HILTI DFB 18), die soweit wie möglich Wandkontakt erzwingen, so daß die Wärme an die Putzstreifen hinter den Rohren weitgehend durch Wärmeleitung übertragen wird. Die Rohre müssen angestrichen werden (z.B. mit der Wandfarbe, der Farbton spielt keine Rolle). Dadurch steigt die Abgabe von Strahlungswärme um mehr als das Achtfache! Dies erhöht nicht nur die Abstrahlung in Richtung Raum, sondern auch in Richtung Wand, so daß die Putzstrecken ohne Rohrkontakt besser erwärmt werden. Dadurch wird auch der für die Flächentemperierung erforderliche Warmluftauftrieb verbessert, wovon letztlich die Raumtemperatur abhängt. Bei Rohren auf naturfarbenem Holz, z.B. an Fensterelementen oder auf Dachgebälk, kann Klarlack verwendet werden.
6. In der Regel geschieht die Montage **unter Putz**, mit einer Putzüberdekkung des Rohrscheitels von 15 +/- 5 mm, entweder in einem Wandschlitz (bei Rohrpaaren von 18 mm Ø: 8 cm hoch, 20 mm tief, bezogen auf die Rohwand) oder ohne Schlitzung auf der Rohwand, wenn eine Gesamtputzstärke von 25 mm möglich ist (Ausgleichsputz 18 – 20 mm, Feinputz 5 mm, bzw. bei 15 mm Ø: 15 – 17 mm plus 5 mm). Rohre auf der Rohwand am Wandsockel können unter leicht nach unten auslaufender Putzergänzung verlegt werden.
7. **Korrosion** durch frischen Putz wird sowohl für das CU-Rohr als auch für das Weichlot durch handwarmen Betrieb der Rohre beim Einputzen ausgeschlossen. Im Normalbetrieb von Temperieranlagen findet auch in Betriebspausen keine Korrosion statt: Da Heizrohre im Gegensatz zu

Kaltwasserrohren kein Frischwasser führen und somit weder Sauerstoff, noch Bodensalze erneuert werden, kommt die minimale interne Anfangskorrosion bald zum Stillstand; Heizungswasser ist dann "totes" Wasser. Außerdem können Heizrohre im Gegensatz zu Kaltwasserrohren auch außerhalb des Heizbetriebes nicht unter die Wandtemperatur abkühlen. Am Deckputz entsteht also kein Kondensat, sondern es stellt sich eine normale Porenfeuchte ein, die weder am blanken Kupferrohr, noch am Lot Korrosion hervorruft. Rohre an erdberührten Bauteilen sind auch im Sommer in leichtem Betrieb. Da es Wochen dauert, bis nach Ausbleiben der Wärmezufuhr wieder eine hohe Bauteilfeuchte eingetreten ist, sind weder Stillstandszeiten wie bei Ausfall des Wärmeerzeugers, noch eine Betriebspause im Hochsommer schädlich. In diesem Fall sollte das Erreichen von höheren Werten der rel. Luftfeuchte (über 65%) Anlaß sein, die Wärmezufuhr wieder einzuschalten.

8. Die **Rohrbefestigung** unter Putz erfolgt weitgehend ohne Rohrhalter, da bei Beachtung von 9. und 10. keine Spannungen in den Rohrstrecken auftreten und der sich anformende Putz dann die Rohrhalterung optimal, auf ganzer Rohrlänge, übernimmt. Zur Montage werden die Heizrohre nur provisorisch fixiert mit schräg in Mauerfugen eingeschlagenen Stahlnägeln, die nach der Betriebsprobe (s. 4.) durch Putzbatzen ersetzt werden (s. Nr. 10). An einzelnen Stellen kann es notwendig sein, das Rohr an die Wandfläche zu ziehen. Bei Kupferrohren genügen dazu die Blechschellen (s. 5.). Eine Polsterung unterbleibt: a) bei sorgfältigem Einputzen unter Vermeidung von Hohlräumen entfällt die Schallbildung; b) da das Einputzen bei handwarmem Rohr geschieht, entfällt auch die bei Berührung verschiedener Metalle in feuchter Umgebung mögliche Kontaktkorrosion; c) auch die Beschädigung der Rohrwand durch Reibung beim Heizbetrieb entfällt, da wegen des Masseverbunds nur gleitende Temperaturänderungen erfolgen und die Längenänderungen erst an den Rohrbögen wirksam werden (s. 12.).
9. Auch an den **Rohrbögen** erfolgt keine Abpolsterung. Daher müssen die Angaben unter Punkt 10 eingehalten werden. Da die Montage bei kaltem Rohrzustand geschieht, müssen die Rohrbögen Abstand zu Bauteilen wie Raumecken, Fensterstürzen etc. haben, damit sie sich beim Heizbetrieb verlängern können ohne anzustoßen (bei gerader Rohrlänge bis 5 m genügt 1 cm, bis 20 m 2 cm Abstand, s. 12.).
10. Zum Ersatz der Nägel durch **Putzbatzen** läßt man die Leitungen auf „Handwärme" abkühlen (Vorlauf unter 30°C). Dann wird neben jeden Nagel und an jedem Bogen ein Putzbatzen auf die Leitung gesetzt und auf dem Rohrscheitel abgezogen. Sofort danach, also wenn der Putz noch weich ist, wird jede Schleife einzeln durch Öffnen ihres Thermostatventils (s. 15.) kurzzeitig wieder hochgeheizt (auf min. 60°C), und zwar solange, bis ihr Rücklauf mit min. 45°C zurückkommt. Dadurch nimmt die Schleife annähernd ihre maximale Länge ein und drückt mit allen Bögen in den noch weichen Putz Hohlräume, in die die Rohrbögen beim späteren Heizbetrieb hinein gleiten. Nach dem Hochheizen wird wieder auf Minimalbetrieb geschaltet, um die Putzbatzen trocknen zu lassen. Danach werden die Nägel entfernt.
11. Das **Einputzen** der Rohre kann sofort danach geschehen, aber auch beliebig später. Putzrisse können nicht mehr auftreten, weder durch Längenänderung der Rohre (Hohlräume an den Rohrbögen), noch durch Temperaturänderungen (nur gleitende Änderungen möglich). Der Einsatz von Putzträgern unterbleibt daher. Das Einputzen geschieht wieder bei „Handwärme" (unter 30°C). Wenn ein Raum fertig ist, kann man zur Sicherheit die Schleife(n) wieder hochfahren, muß sie jedoch nach spätestens 20 Minuten wieder auf unter 30°C abkühlen lassen. Während des Putztrocknens empfiehlt es sich, die Anlage im Minimalbetrieb

Abbildung 10 – 13:
Optimale Rohranordnung für geringere Wandstärken bzw. für Vorlauftemperaturen <50°C (vergleiche Abb. 6d). Bei dieser Anordnung genügt für Wohnräume ein Rohrdurchmesser von 15 mm, so daß bei Verwendung von Löt-Fittings die Wand nicht geschlitzt werden muß, sondern für die auf der Rohwand verlegten Rohre eine Putzstärke von 20 mm ausreicht (s. Kap. 6.3.3). Zeichnungen Heiko Folkerts, Bernried.

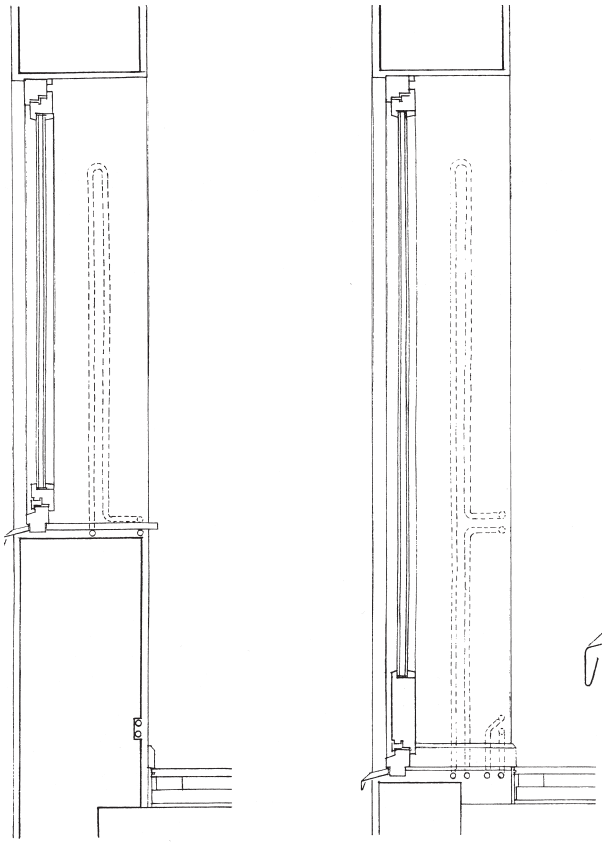
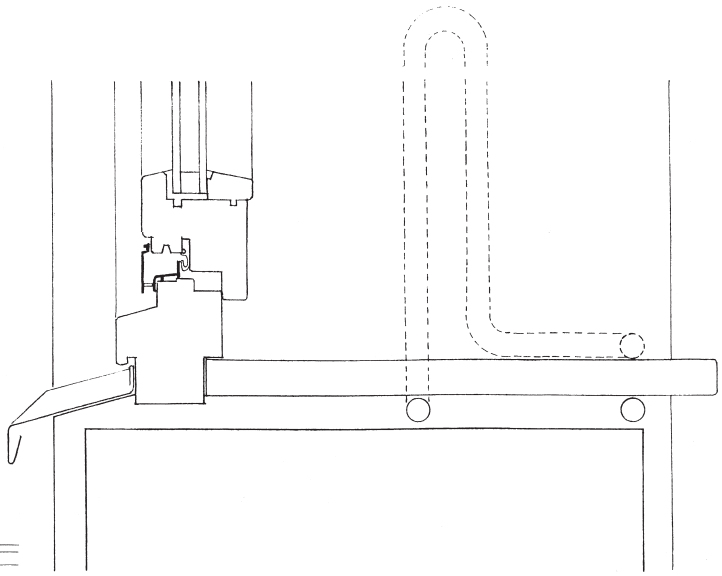
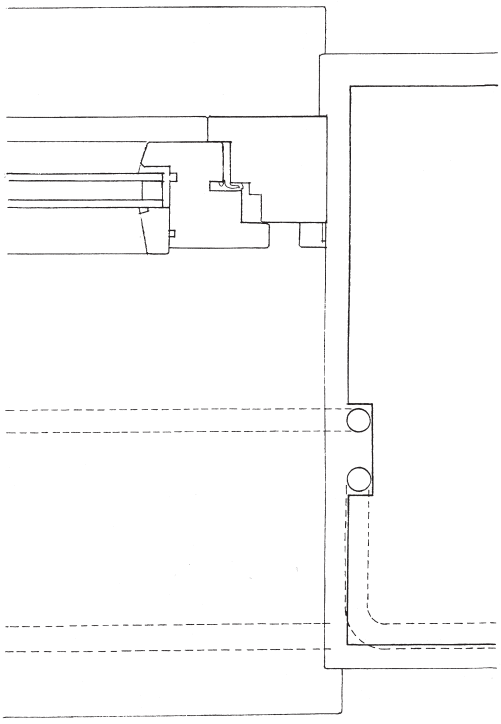


Abbildung 10:
Fenster- und Türachse (Schnitt) mit Sockel- und Brüstungsschleife unter Putz. M 1:20

Abbildung. 11:
Fensterbank (Schnitt) mit Brüstungsschleife (Rücklaufumweg im Leibungsputz). Wandstärke 40 cm, Stein-Fensterbank 25 mm stark. M 1:5





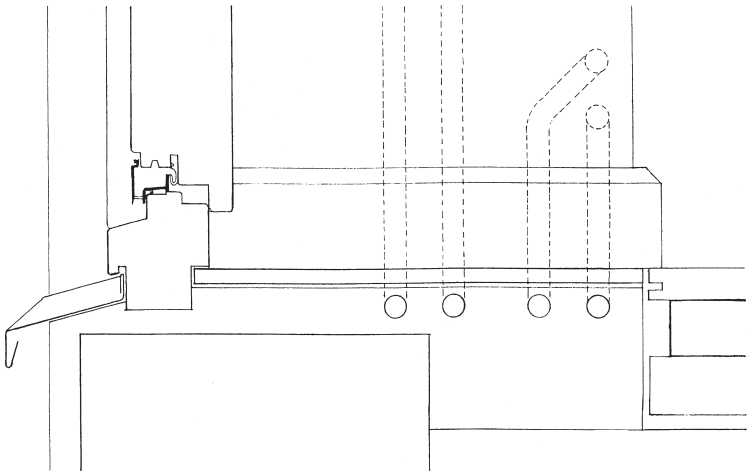


Abbildung 13:
Türschwelle (Schnitt) mit den Umwegen von Sockel- und Brüstungsschleife im Leibungsputz. Die Schleifen kreuzen die Schwelle unter Fliesenabdeckung. Dielenboden auf Kreuzlager. M 1:5

Abbildung 12:
Fensterbank (Draufsicht), darunter Brüstungsschleife in Materialkontakt (Rücklaufumweg im Leibungsputz geschnitten). M 1:5

laufen zu lassen. Bei Sumpfkalk siehe Punkt 12. Alle **Angaben gelten auch für Rohre in Estrichen!** Auch hier treten dank der kurzen Aufheizzeiten und der wenigen Heizrohre pro Flächeneinheit keine Schäden auf.

12. Zum Einputzen kann jedes **Putzmaterial** verwendet werden, wenn Punkt 7 und 11 beachtet werden. Bei Sumpfkalk ist zur Karbonatisierung Feuchte im Putz erforderlich. Nach Schaffung der Hohlräume in den Putzbatzen (Normalputz) durch Hochheizen geschieht das Einputzen daher zwar bei Handwärme. Danach werden die Schleifen jedoch abgestellt. Putzrisse durch Rohrdehnung sind ausgeschlossen: Wegen des geringen Ausdehnungskoeffizienten (0,017 mm pro m und Grad) bleibt die Dikkenänderung, wegen der geschaffenen Hohlräume auch die Längenänderung ohne Wirkung. Ferner laufen wegen des Massekontakts regelungsbedingte Temperaturänderungen durch den Speichereffekt nur langsam und im Bereich von weniger als 10 Grad ab. Aus diesen Gründen und wegen des Korrosionsschutzes durch die Rohrwärme ist zum Einputzen ein Spezialputz nicht erforderlich. Auch Gipsputz ist tauglich [12].
13. Bezogen auf ein Einfamilienhaus ist die Anordnung von min. 2 **Steigsträngen** sinnvoll, die sich im Grundriß gegenüberliegen. Sie werden ohne Wärmedämmung (s. 14.) in den Wandschlitz einer Trennwand gelegt, dort wo diese in die Außenwand übergeht. Bei dünner Überputzung entstehen in diesen Raumecken angenehme Kachelofen-Effekte. Vom Heizungskeller aus werden die Zuleitungen entlang der beiden Seiten von Trennwandsockeln im angrenzenden Estrich ungedämmt verlegt. Dadurch sind diese Wandsockel bereits trockengelegt. Ferner erlaubt diese Anordnung der Steigstränge kurze L-förmige Heizschleifen, so daß annähernd alle Räume einzeln versorgt werden können.
14. Eine **Wärmedämmung** von Zuleitungen aus Kupfer ist (im Gegensatz zu Leitungen aus Eisen) nicht erforderlich, da der Dämm-Effekt auf physikalischem Weg eintritt: Im Estrich bzw. unter Putz, wo ungedämmte Eisenrohre in Betriebspausen nicht korrosionssicher wären, entsteht ein Wärmestau als Folge der geringen Leitfähigkeit mineralischen Materials. Bei freier Führung eines Kupferrohres in Luft (ohne Materialkontakt) tritt der Dämm-Effekt durch die geringe Wärmeabstrahlung des blanken Kupfers ein, während ein ungeschütztes Eisenrohr im Gegensatz zum Kupferrohr in Betriebspausen korrodieren und zunehmend mehr Wärme abstrahlen würde.
15. Um die **Einzelraum-Regelung** zu ermöglichen, erhält jede Schleife ein Thermostat-Ventil. In die Schleifen von erdberührten Wänden werden Rücklauftemperaturbegrenzer eingebaut, stets am Ende der Schleife (im Raum, kurz vor dem Eintritt des Rücklaufs in die Steigleitung). Sie messen die Wassertemperatur des Rücklaufs. Damit ist das Energieangebot von der Wandtemperatur und nicht von der Raumtemperatur abhängig. Schleifen von außenluftberührten Wänden können auch mit einem Heizkörper-Thermostat („Raum-Fühler“) geregelt werden, der an beliebiger Stelle der Schleife gesetzt wird. In beiden Fällen werden Ventilunterteile in “Durchgangsform” im Rohrverlauf montiert und mit eingeputzt. Die Kunststoffkappe bleibt bis zum Aushärten des Putzes auf dem Gewinde, auf dem später der Thermostatkopf aufgeschraubt wird. Dazu muß ein wenig Putz darum herum weg gestochen werden. Wenn die Dichtigkeitsprüfung sorgfältig – wie oben beschrieben – durchgeführt worden war, ist das Risiko, daß eine eingeputzte Schraubverbindung geöffnet werden muß, sehr gering.
16. Um **Luft** in Heizschleifen während des Anlagenbetriebs zu verhindern, wird hinter der Therme ein Absorptions-Luftabscheider in den Hauptvorlauf gesetzt. Ferner erhalten die Steigleitungen an ihren oberen Enden je einen Handentlüfter. Da die Schleifen durch ihre Thermostaten einzeln absperrbar sind, benötigen sie keinen eigenen Entlüfter, auch

wenn im Rohrverlauf senkrechte Umwege wie Leibungsschleifen an Fenstern auftreten (s. 17. und 18.).

17. Um beim **Befüllen** die Luft aus den Schleifen zu entfernen, wird jede Schleife einzeln befüllt. Dazu werden die Ventile der anderen Schleifen geschlossen.
18. Tritt beim **späteren Betrieb** Luft in einer Schleife auf, werden zur Entlüftung die Nachbarventile geschlossen und die Luft mit der Vorlaufpumpe (bei Anlagen mit Verteilern mit einer Hilfspumpe am Verteiler) heraus gedrückt. Das Spülen mit Frischwasser ist abzulehnen, da dem „toten" Anlagenwasser neue Luft und neue Salze zugeführt werden.

6.3.3 Rohrpositionen

In Abb. 6 sind die wichtigsten Varianten der Rohrführung abgebildet. Im Gegensatz zu handelsüblichen Wandheizungen, bei denen örtlich Rohrregister auf ganzer Wandhöhe ausgebildet werden, beschränken sich Installationen von Temperieranlagen dank der konsequenten Einbeziehung des Warmluftauftriebes in das Wärmeverteilungs-Konzept auf wenige Bereiche der Außenwandfläche: Im Minimalfall (kein Temperaturanspruch oder – bei stärkerem unporosierten Wandquerschnitt – auch im Wohnfall an den Wänden ohne Fenster) sind es die Wandsockel. Im Maximalfall (hoher Temperaturanspruch bzw. bei geringer Wandstärke) werden die Brüstungsebenen und evtl. auch die Öffnungskanten (Fenster- und Außentürlaibungen) zusätzlich belegt. Auf diese Weise treten keine Leitungen in den für Montagen oder für die Bildhängung vorgesehenen Wandflächen auf. Wird die in Abb. 6 dargestellte Leitungsgeometrie verdoppelt (z. B. 1. Schleife am Sockel, 2. Schleife in Höhe der Unterkante der Fensterbank), können entweder bei gleicher Vorlauftemperatur höhere Raumtemperaturen auch bei sehr tiefen Außentemperaturen gehalten werden, oder Raumtemperaturen, die bei Strahlungsheizung physiologisch ausreichend sind, bei geringeren Vorlauftemperaturen. Diese Rohranordnung zeigt Abb. 10. Die maßstäblichen Details sind aus Abb. 11 – 13 zu entnehmen. Dargestellt sind Rohre mit einem Durchmesser von 15 mm.

In Räumen ohne Temperaturanspruch (Trockenlegung, Luftentfeuchtung, Klimastabilisierung) kann die Montage der Heizrohre auch zwischen Rohwand und Seitenkante des Bodenbelags (wo Randfuge und Wandputz zusammentreffen) erfolgen oder unter mineralischem Belag (neben dem Lot der Wandoberfläche!), wenn dieser nicht stärker als 3 cm ist, und zwar in Kontakt mit der Belagsunterseite, direkt im Verlegemörtel. Dies gilt für beliebige Raumhöhen und unabhängig von der Außenwandstärke. Dabei können Außenwandschleifen sehr lang sein: Eine Schleife kann alle Räume einer Gebäudeseite versorgen.

Bei höherem Temperaturanspruch müssen die Heizrohre oberhalb des Bodenbelags bzw. – bei hölzerner Sockelleiste – über dieser montiert und die Schleifenlänge auf die Länge der Außenwände von max. 3 Räumen beschränkt werden. Meist wird durch Anordnung von 2 bis 3 Steigsträngen eine Einzelraumversorgung angestrebt. Außerdem ist dann zumindest das Ausfahren der Fensternische mit dem Rücklauf erforderlich, wobei dieser in Kontakt mit der Unterkante der Fensterbank verlegt wird. In den Leibungen können mit dem Rücklauf Umwegschleifen ausgebildet werden. Bei Wandstärken unter 36 cm sollten für Wohnanforderungen gleich zwei Schleifen montiert werden, eine am Sockel, die zweite in Brüstungshöhe, deren unteres Rohr in Höhe der Fensterbankunterkante liegt. Leibungsschleifen werden dann erst ab Fachwerkstärke nötig.

Bei höheren hölzernen Sockelleisten (ab 6 cm) sollte zur sicheren Gewährleistung der Trockenlegung unabhängig von den über der Sockelleiste zur Raumbeheizung montierten Rohren in die Ecke von Rohwand und Rohboden eine eigene Leitung gelegt werden, entweder als den Einzelraum umfahrende Ringleitung oder als eine mehrere Außenwandsockel als „Vorlauf" abfahrende Leitung, die als „Rücklauf" über die zugehörigen Trennwände zurückkehrt.

Wenn raumhohe Vertäfelungen einen Abstand von min. 15 mm zur Wand haben, so daß hinter ihnen Luft aufsteigen kann, genügt es, eine Heizrohrschleife in Anstrich hinter dem Sockelprofil am Rohwandsockel zu befestigen, da der geschützte Warmluftauftrieb im Hohlraum die gesamte Schale temperiert und die strahlungsdämpfende Wirkung des Holzes am Sockel kompensiert. Bei nur brüstungshohen Lamperien empfiehlt es sich, das Rücklaufrohr auf der oberen Deckleiste zu verlegen oder neben ihr, zwischen Holz und Wand, einzulegen, damit von diesem zweiten Wärmestaubereich ein weiterer Teilauftrieb ausgehen kann, der die Restfläche der Wand bedient. Bei höherem Temperaturanspruch in Gebäuden mit geringeren Wandstärken empfiehlt es sich auch hier, wenn der Befund es zuläßt, zwei Schleifen zu verlegen, eine am Rohwandsockel, die zweite im Bereich der Deckleiste, am besten darüber. Um den Eingriff in die Bausubstanz zu minimieren, wäre die Verlegung des Rücklaufrohres unter der Deckleiste und des Vorlaufes über ihr möglich, wobei auch dieses Rohr nicht eingeschlitzt, sondern wie die anderen drei nur angestrichen werden müßte. Bei dieser Montage ist ein geringes Strömungsgeräusch hörbar, wenn eine sich völlig ruhig verhaltende Person im Raum allein ist.

In Räumen mit nur durch Pfeiler gegliederten Fensterreihen (Schulräume etc.) sollten zur besseren Fensterversorgung hölzerne Fensterbänke um 6 bis 10 cm schmäler geschnitten werden. Die zweite Schleife kann dann ohne Leibungsumwege in den entstehenden Kanal gelegt, der ausgemörtelt wird, abgedeckt evtl. mit einem mit der Fensterbankoberkante bündigen Fliesenstreifen von max. 15 mm Stärke auf Klebemörtel.

Auf den Rückseiten von neu zu montierenden Vertäfelungen oder von wandnah stehenden Vitrinen und Schränken können, insbesondere bei auf Putz verlegten Rohren, in Höhe des Rohrverlaufs 6 cm hohe Streifen von Heizkörper-Reflexionsfolie angebracht werden, so daß die bei Frost deutlich über der Auftriebstemperatur liegende Oberflächentemperatur der Rohre bzw. der Putzabdeckung keine Trocknungsschäden durch Wärmestrahlung hervorrufen kann. Dies gilt besonders für großformatige Bilder, die über eine in Brüstungshöhe verlegte Leitung herabreichen. Dank seines geringen Gewichts kann der Folienstreifen in Rohrhöhe einfach auf der Keilrahmenrückseite befestigt werden.

6.3.4 Zusatzheizkörper?

Grundsätzlich können an Sockelheizschleifen Heizkörper angeschlossen werden, z. B. zur raschen Temperaturerhöhung bei sporadischer Raumnutzung. Da jedoch bereits bei schwachem Dauerbetrieb der Rohre der Grundwärmebedarf des Raumes gedeckt ist, bleibt nur ein geringer Zusatz-Wärmebedarf übrig, der durch Zuschaltung reiner Strahlplatten (einlagige Plattenheizkörper ohne Konvektorbleche), bei gleichzeitiger Erhöhung der Vorlauftemperatur, gedeckt werden kann, ohne daß die Qualität des „zugfreien“ Strahlungsklimas verloren ginge. Dabei muß die Heizschleife unabhängig von der Stellung des Heizkörperventils in Funktion bleiben. Diese Aufgabe kann aber ebenso gut durch die zweite Schleife erfüllt werden, wenn diese durch Öffnen ihres Thermostatventils bei Bedarf hinzu geschaltet wird.

Diese „Minimalheizung“ (ungedämmte, die Gesamtlänge der Außenwandsockel abfahrende Heizrohre in gleitendem Dauerbetrieb mit daran angeschlossenen zuschaltbaren Strahlplatten) reicht nicht nur aus, um z. B. im Büro auf einfachste Weise während der Arbeitsstunden ausreichende Temperaturen für sitzende Tätigkeiten zu erreichen, sondern auch für Wohnzwecke. Eine zusätzliche Schleife für die Versorgung der Strahlplatten ist bei Dauerbetrieb der Sockelschleife nicht erforderlich, da bereits kurze Zeit nach der Erst-Inbetriebnahme die Wärmeleitfähigkeit des Mauerwerks im Nahbereich der Rohre durch Materialtrocknung deutlich sinkt. Durch den Wärmestau verringert sich daher die „Spreizung“ (der Temperaturunterschied zwischen Vor- und Rücklauf) so erheblich, daß noch genügend Reserve für hinzu geschaltete Strahlplatten bleibt. Bei Schleifenlängen von bis zu 30 m stellt sich im Dauerbetrieb beispielsweise eine

Spreizung von weniger als 10 Grad ein. Selbst wenn also die Heizrohre zur Klimatisierung eines Raumes bei z. B. 38/30°C laufen würden, würde die Strahlplatte kurze Zeit nach Einschaltung eine „mittlere Strahlungstemperatur" von ca. 34°C erreichen, so daß im bereits „temperierten" Raum die Empfindungstemperatur rasch ansteigen würde. Bei einer solchen bauphysikalisch sinnvollen kontinuierlichen Deckung des Grundwärmebedarfs aber kann ein ganzer Kreis bei Frost durch Steigerung der Vorlauftemperatur kurzfristig auch deutlich mehr Leistung abgeben, so daß bald Behaglichkeit herrschen würde, da eine Erhöhung der Wassertemperatur dank des vorhandenen Wärmestaus am Sockel sowohl dort, wie am Heizkörper rasch eine erhöhte Oberflächentemperatur hervorrufen würde. Dies gilt natürlich auch für eine zweite Heizschleife, die anstatt eines Radiators – als wandlanger „Zusatz-Heizkörper" – am Sockel oder in Höhe der Fensterbank-Unterkante montiert ist.

6.3.5 Trägheit der Temperierung?

Diese Beobachtung widerspricht der allgemeinen Annahme, daß die Methode der Temperierung – im Gegensatz zu den anerkannten Heizverfahren – keine rasche Leistungssteigerung zulassen würde. Dieser Annahme liegen zwei „Denkfehler" zu Grunde: Zum einen wird nicht erkannt, daß die Methode nicht „die Wände aufheizen", sondern nur die Auskühlung ihrer Oberflächen verhindern muß. Zum anderen beruht die rasch spürbare Wirkung der üblichen Verfahren eben nicht darauf, daß die „Raumtemperatur" schnell gesteigert würde, sondern vielmehr darauf, daß nur die Luft-Temperatur hochschnellt. Dadurch tritt aber eine physiologisch widersinnige Gesamtwirkung ein, die bei Erhöhung der Strahlungsleistung einer „Wandheizung" gar nicht möglich ist. Sie wurde in Kap. 1.2.4 bereits ausführlich dargestellt. Wegen ihrer physiologischen Bedeutung sei sie hier noch einmal verkürzt wiederholt: Der Körper wird über Lunge und Blutkreislauf von innen beheizt. Er muß daher zusätzlich zur über die Atmung aufgenommenen Heizwärme wegen des Wegfalls der „Lungenkühlung" die gesamte, dauernd gebildete Stoffwechselwärme an der Hautoberfläche abgeben, während sich die Luft bewegt, die dort abgegebene Wärme also zügig abführt. Gleichzeitig strahlt er zu den Wänden mehr Wärme ab, da die Hautgefäße auf weit gestellt sind und der falsche Raumluftkreislauf die Oberflächentemperatur der Wände nicht ausreichend anheben kann. Zu diesen Zugerscheinungen an der Körperoberfläche wirkt sich die verstärkte Staubbelastung der Raumluft auf die Atemwege aus.

Bei einer Steigerung der Wärmeabstrahlung der Wände dagegen bleibt die Raumluftmasse weiterhin in Ruhe und im Vergleich zur Lungentemperatur kühl, so daß weder ihre isolierende Wirkung an der Körperoberfläche verloren geht, noch die Abgabe der Stoffwechselwärme über die Lunge behindert wird. Die rasche Steigerung der Behaglichkeit durch Leistungssteigerung der „Minimal-Wandheizung" beruht also darauf, daß sie weder Zugerscheinungen, noch verstärkte Wärmeabstrahlung der Körperoberfläche hervorruft, und daß aus strahlungsphysikalischen Gründen bereits eine geringe Erhöhung der (mittleren) Wandoberflächentemperatur intensiv empfunden wird.

6.3.6 Regelung

Ist aus physikalischen Gründen schon die Heiztechnik selbst denkbar einfach, so gilt dies auch für die Regelungstechnik. Baut man in den Rücklauf jeder Schleife, z. B. im Verteilerkasten oder an einer für den Nutzer zugänglichen Stelle am Ende des Rücklaufs, einen Rücklauftemperaturbegrenzer ein, kommt es bei Kosten von ca. 30 € pro Schleife zur Selbstregelung des „Systems Wand/Heizrohr" auf dem eingestellten Temperaturniveau. Da das Heizwasser weniger stark entwärmt wird, wenn das Bauteil „Fremdwärme" aufnimmt, vermindert der Thermostat den Wasserdurchfluß entsprechend. Da sich der Wärmefluß im Bauteil beim Auftreten von Fremdwärme sofort verringert, kommt es rasch zum Wärmestau in der Heizrohrumgebung und somit, entgegen landläufiger Anschauung, zu kurz-

fristiger Reaktion des Reglers. Dies gilt entsprechend umgekehrt für den Fall, wenn die Außentemperatur plötzlich abfällt. Die allgemein angenommene Trägheit der direkten Bauteilbeheizung beschränkt sich also auf die Fälle, wo auf Energieeinsparung zielender instationärer Betrieb, z. B. zeitweises Abstellen oder Nacht- und Wochenendabsenkung den Vorteil von Speichergewinnen aufhebt.

6.3.6.1 Absenkbetrieb im Massivbau

Daß der Absenkbetrieb bei Massivbauten energetisch nicht sinnvoll ist, zeigte sich wieder in dem von Dampfheizung auf Temperierung (Heizrohre an Sockel, Brüstung und Leibung) umgerüsteten Gymnasium Waldstraße in Hattingen von 1880, dessen Gebäudehülle aus 50 cm starken Vollziegeln besteht (Kap. 6.3.7.3). In den Jahren 1996/1997 verglich die Stadt den in Schulen üblichen Absenkbetrieb (Nacht-, Wochenend- und Ferienabsenkung) mit dem empfohlenen gleitenden Dauerbetrieb und stellte keine Energieeinsparung durch zeitweise Absenkung der Vorlauftemperatur fest. Man behielt daher lediglich die Ferienabsenkung bei. Generell ist eine Nachtabsenkung dann nicht sinnvoll, wenn die Gebäudehülle wärmespeicherfähig ist, da der Energiespeicher in der zustrahlungsfreien Zeit verstärkt an Speicherwärme verliert: Zum Verlust durch verringerte Versorgung kommt der erhöhte Wärmebedarf, verursacht durch das Fehlen der Zustrahlung und die Feuchteaufnahme über Kapillarkondensat. Dagegen kann eine *Tag*absenkung durch aus sinnvoll sein, da der Wärmebedarf mit Beginn der diffusen Zustrahlung sinkt.

In diesem Zusammenhang muß auf die generell schlechte Erfahrung mit heute zum Standard gewordenen kostenintensiven elektronischen Regeltechniken („Schaltschrank“) hingewiesen werden. Einerseits ist die optimale Funktion der Heizrohrtechnik bei geringstem Energieeinsatz nur dann gegeben, wenn Speichergewinne aus Leistungsüberschüssen gebildet werden können, was durch ständiges Regeln verhindert wird. Andererseits führen die angesprochenen Selbstregeleffekte, in Verbindung mit einer gleitenden Kesselregelung durch einen unter (!) dem Außenputz der Nordwand liegenden Außentemperaturfühler, dazu, daß die Schwankungen der Raumtemperatur sich nur gleitend ergeben, und zwar im Tagesverlauf im Bereich von max. 2 Grad. Sie sind daher sowohl konservatorisch, als auch physiologisch irrelevant. Erst diese Betriebsweise aber führt durch Nutzung der physikalischen Effekte zu einem Energiebedarf, der in der Regel unter dem konventioneller Heizverfahren liegt und durch aufwendige Regelverfahren nicht weiter reduziert werden kann. Es ist daher für Massivbauten ab Fachwerkstärke absurd, das Regelprogramm von Heizkesseln ständig stärker zu differenzieren, so daß eine Änderung der Einstellung nur noch durch den Kundendienst erfolgen kann. Eine Verbesserung der Nutzung äußerer und innerer Wärmeangebote durch optimiertes Speicherverhalten kann dadurch nicht erreicht werden.

6.3.7 Planung von Temperieranlagen

Realisiert man schließlich, daß durch jede Art der Wandbeheizung durch Bauteiltrocknung und Optimierung der Aufnahme der Solarstrahlung (s. nächsten Absatz) der Transmissionswärmeverlust ebenso verringert wird, wie es beim Lüftungswärmeverlust durch das Nichtbeheizen der Raumluftmasse der Fall ist, so erkennt man, daß generell der Wärmebedarf bei Wandbeheizung aus physikalischen Gründen deutlich unter dem konventioneller Raumheizungen liegt, wo ja zwangsläufig eine hohe Lufttemperatur herrscht, zugleich aber wegen der schlechten Verteilung der Wärme größere Außenwandflächen zu kühl bleiben und daher über das Kapillarkondensat aus der Raumluft während der Heizperiode feucht und damit leitfähiger gehalten werden. Feuchtemessungen an temperierten Außenwänden (Vollziegel), u.a. mit Hochfrequenztechnik, ergaben über den gesamten Bauteilquerschnitt einen Feuchtegehalt von 2 – 3 Masseprozent (Quelle: Käferhaus 4/2002). Ein Gehalt von 5% gilt als „trocken“.

6.3.7.1 Thermografien

Im o. a. Lehrbuch findet sich zur Berechnung der Deckentemperatur bei Deckenheizungen unter Flachdach der für die übliche Wärmebedarfsberechnung auf der U-Wert-Basis erstaunliche Satz: „In Anbetracht der verhältnismäßig geringen Anzahl der sehr kalten Tage und der Speicherfähigkeit von *Betondecken* genügt es, der Berechnung eine (tiefste) Außenlufttemperatur von –5°C zugrunde zu legen“. Dazu passen die Beobachtungen, die man auf Thermografien von Außenwand-Außenseiten eines temperierten Wohnhauses in Lengdorf, Lkr.Erding, machen konnte, die am 5.03.2002 bei –4,5°C Außentemperatur von 5:45 bis 6:30 entstanden (Abb.14–19). Bei nur 26 cm starken ungedämmten Betonwänden, die mit zwei Heizrohrschleifen mit 60°C Vorlauf vom Vorabend an beheizt worden waren, konnte man mit der Infrarotkamera auf der Außenseite zwar eine starke Abstrahlung, nicht aber die heißen Rohrtrassen auf der Innenseite nachweisen.

Der Verdacht, daß vor Tagesanbruch aufgenommene Thermografien monolithischer Außenbauteile mit Heizrohren auf der Innenseite nicht die Transmission zeigen, sondern die Abstrahlung der am Vortage eingespeicherten Sonneneinstrahlung, erhärtet sich, wenn dieselbe Wandkonstruktion, als Hofwand weiterlaufend, auf derselben Thermografie bei Frost gelb statt blau oder schwarz erscheint (Abb. 16: Westwand des Hofes, weiterlaufend als Westwand des Ateliers, vor Sonnenaufgang). Auch die in der Thermografie darüber liegende, auf gleiche Weise beheizte blau erscheinende Porenziegelwand wies keine hellen Streifen im Rohrbereich auf; dafür war aber das Fugennetz von den Blockflächen zu unterscheiden: Der Putz auf dem Lagerfugenmörtel und den massiveren senkrechten Kanten der Steine strahlte heller als der auf den poröseren Ziegelflächen. Die Erscheinungen waren in abgeschwächter Form auch auf der Nordseite zu sehen (Abb. 19). Solche Farbunterschiede, die auf Thermografien temperierter Gebäude regelmäßig auftreten, lassen sich nur erklären aus der Tatsache, daß mineralische Baustoffe mit hohem Rohgewicht (also schlechtem U-Wert!), deren Porenfeuchte durch Temperierung unter ihrem „praktischen Feuchtegehalt“ gehalten wird, wesentlich mehr Energie aus der Sonneneinstrahlung aufnehmen und sie nach Ende der Einstrahlung wesentlich langsamer abgeben, als leichtere Stoffe. Historische Bau- und Heiztechnik (hohes Rohgewicht mit Hypokausten-Wandheizung oder Kachelofen) ergab stets direkte Sonnenenergienutzung. Das Gesagte gilt ebenfalls für Vollholz-Konstruktionen.

Thermografien der Außenseite von Außenwänden mit Heizrohren auf der Innenseite, aufgenommen vor Tagesanbruch bei Frost, zeigen nicht den Verlauf der Rohre, wie man es nach den hohen U-Werten von Mauerwerk oder Beton erwarten müßte. Bereits der Vergleich von Heizwassertemperatur und Oberflächentemperatur der Putzabdeckung auf der Raumseite (s. Abb. 9 rechts) zeigt, daß dies unmöglich ist (20 K weniger Temperatur auf der Oberfläche einer 20 mm starken Putzabdeckung). Statt der Heizwärmeverluste der Räume ist die Abstrahlung der am Vortag aufgenommenen Solarwärme zu sehen, die entsprechend dem Rohgewicht der (im beheizten Fall trockenen) Bauteile und ihrer mittleren Temperatur (beheizt/unbeheizt) unterschiedliche Intensität hat. Dies wird durch Wärmeflußmessungen bestätigt (s. Mauerbach): a) *In* der Rohrebene kein höherer Wärmedurchgang feststellbar als 30 cm darüber. b) Der Solarwärmegewinn der direkt beheizten Außenwand war höher als der einer gleichartigen und gleich exponierten Außenwand eines mit Heizkörpern beheizten Raumes!

Fotos Autor; Zeichnungen Heiko Folkerts, Bernried; Thermografien Thomas Böttler, Miesbach.

Abbildung 14:
Wohnhaus in Lengdorf, Lkr. Erding, mit Hof und Nebengebäude (Atelier und Garage) von Westen.
Hof-, Atelier- und Garagenwand in 26 cm starkem Beton; Atelierwand mit 2 Rohrschleifen, ohne Wärmedämmung.

Abbildung 17:
Wohnhaus in Lengdorf, Lkr. Erding, von Norden.
Hof- und EG-Dielenwand in Beton (26 cm stark); Dielenwand mit 4 Einzelrohren, ohne Wärmedämmung

Abbildung 15:
Schema des Heizrohrverlaufs auf der Innenseite der Westwand des Ateliers
(angestrichene Rohre in Kunststoffclips in 1 cm Abstand vor der angestrichenen Betonwand)

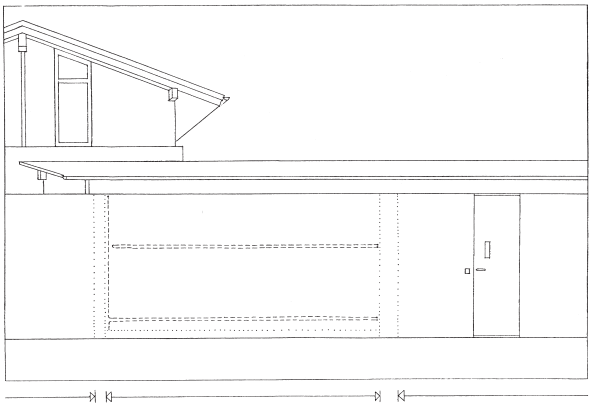


Abbildung 16:
Thermografie der Westwand-Außenseite von Hof, Atelier und Garage (5.03.2002, 5:55, -4,42°C; klare Nacht nach sonnigem Tag, Heizrohre seit 18:00 am Vortag mit t_m 60°C betrieben). Die Atelier-Wand zeigt dank längerer Einstrahlung fast homogenes Weiß. In den beiden Rohrebenen sind keine helleren Streifen feststellbar. Die Farben der übrigen Bauteile entsprechen ihren Rohgewichten: So zeigen die von Frost umgebene Hofwand Gelb, die Wand der unbeheizten Garage Rot, die Leichtbauwand (ab Brüstung OG) Dunkelblau, die Porenziegel-Brüstung Hellblau, deren verputzte Mauerkrone Grün (größere Speichermasse durch Mörtelfüllung der Hochloch-Enden). Die Brüstungsschleife liegt 20 cm unter der Fensterbank im Putz.

Abbildung 18:
Schema des Heizrohrverlaufs auf der Innenseite der Nordwand der EG-Diele
(angestrichene Rohre in Kunststoffclips in 1 cm Abstand vor der rohen Betonwand hinter Garderobenschrank)

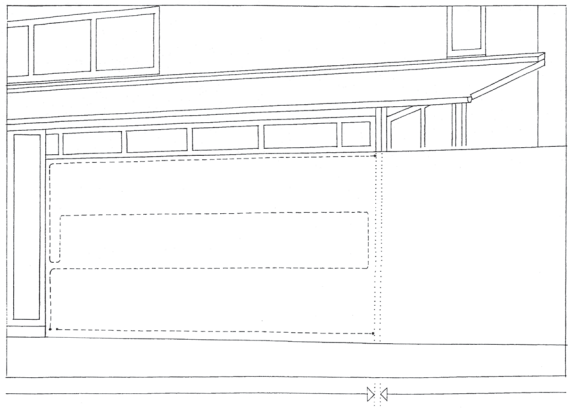


Abbildung 19:
Thermografie der Nordwand-Außenseite von Hof und EG-Diele (5.03.2002, 6:30, -4,3°C; Sonnenaufgang nach klarer Nacht und sonnigem Vortag, Heizrohre seit 18:00 am Vortag mit t_m 60°C betrieben).

In der Rohrebene der EG-Wand sind keine helleren Streifen feststellbar. Die trockene Betonwand der Diele zeigt homogenes Rot. Die Hofwand (im Frost) ist grün, die Leichtbauwand im OG ist dunkelblau analog der Westseite.

Die restliche Nordwand mit eingeputzten Heizrohren zeigt einen analogen Befund.

6.3.7.2 Emissionszahlen

Um die Funktionsicherheit von Temperieranlagen herzustellen, in denen auch offen verlegte Heizrohre vorkommen (z. B. auf Dachgebälk), und zur Klärung der Frage, ob die Wärmedämmung von ebenso verlegten Zuleitungen erforderlich ist, ist es hilfreich, die Emissionszahlen verschiedener Materialien zu vergleichen, mit denen die unterschiedliche Stärke ihrer Wärmeabstrahlung angeben wird. Bei gleicher Oberflächentemperatur ergeben sich deutliche Unterschiede in der Stärke der Wärmeabstrahlung. Unter den Stoffen mit kristallinem Gefüge sind die Nichteisenmetalle in poliertem Zustand „schlechte“ Strahler, da sie ein wenig ausgeprägtes Oberflächenrelief haben. Mineralien und Stoffe mit amorphem Gefüge dagegen strahlen stärker, da ihr Oberflächenrelief unzählige Teilflächen ausbildet. Im Folgenden werden die Emissionszahlen von drei für das Thema „Strahlungsheizung“ wichtigen Materialien mit dem Schwarzen Körper ver-

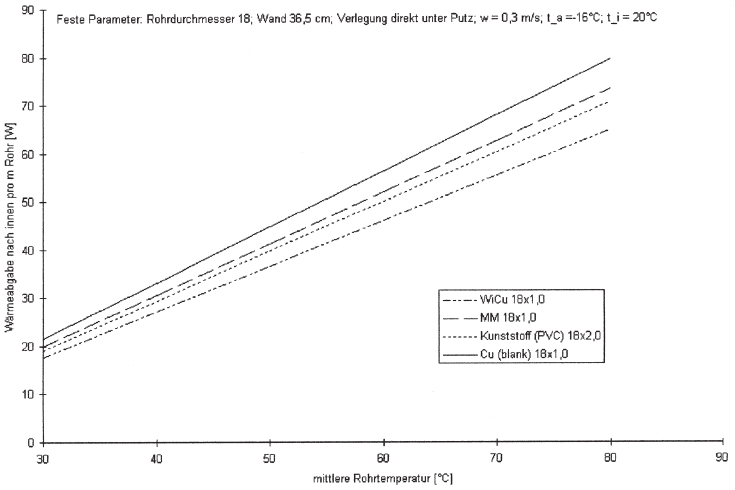


Abbildung 20:
Wärmeabgabe verschiedener, direkt unter dem Innenputz verlegter Heizrohre an den Raum. Aus [10]
- Blankes Kupfer zeigt die beste Wärmeübertragung bei geringstem Außendurchmesser.
- Nach den auf unverändertem Wandfeuchtegehalt beruhenden Berechnungen leistet das CU-Rohr (Ø 18 mm) bei t_m 60°C 56 W/m.
- Dank der höheren Wärmedämmung der trockenen Wand sind die Leistungen höher als errechnet, so daß bei geringerem Rohrquerschnitt eine ähnliche Leistung erreicht wird (Annahme: CU-blank (15 mm) bei t_m 60°C min. 50 W/m).

glichen, wodurch der erhebliche Unterschied in der Wärmeabstrahlung sichtbar wird:

- Schwarzer Körper 1,0
- CU blank (je nach Grad der Verschmutzung) .....0,05 – 0,15
- Putz, Farbe oder Klarlack auf demselben Rohr .....0,93 – 0,96

Die große praktische Bedeutung dieser Zahlen für den „Heizalltag“ wird erst sichtbar bei Messungen mit dem bereits für ca. 130 € erhältlichen „passiven“ Infrarot-Thermometer. Im Gegensatz zu den mehrfach teureren professionellen Geräten mißt es nicht mit einem Meßstrahl die Oberflächentemperatur eines Gegenstandes, sondern empfängt dessen Wärmeabstrahlung entsprechend dem Emissionsgrad des Materials an seiner Oberfläche und zeigt sie in °C an. Das Gerät erlaubt daher zwei grundlegend wichtige Aussagen: Bei Fernmessung zeigt es die Gesamteinwirkung der verschiedenen Strahlungswärmequellen auf einen Punkt im Raum (auf die z. B. einen Arbeitsplatz repräsentierende Position des Meßgeräts), wobei durch genaue Ausrichtung mit dem Laserpointer die Einzelquellen gut unterscheidbar sind (Putzstreifen vor Rohr bzw. Rohranstrich, Wandfläche darüber, Fenster, Lampe etc.). Bei Nahmessung wird die tatsächliche Wärmeabstrahlung der Einzeloberfläche in Abhängigkeit vom Oberflächenmaterial angezeigt. Dabei stellt man fest:

- Bei gleicher Oberflächentemperatur ist ein blankes Kupferrohr „gedämmt“, während die nichtmetallische Oberfläche „heizt“!
- Die Abstrahlung einer Rohrdämmung mit Kunststoffmantel oder gestrichenem Blechmantel entspricht der des ungedämmten blanken Rohres!

Während Edelstahl wie Kupfer zu den „schlechten“ Strahlern gehört (volle Leistung erst bei Anstrich oder unter Putz), nimmt die Abstrahlung von Schwarzstahl („Eisen“) in den ersten Wochen nach der Montage durch Patinabildung zu. Daraus folgt, daß schon die Zuleitungen ab Wärmeerzeuger, nicht erst die Heizleitungen, in CU blank ausgeführt werden sollten. Ihr Mehrpreis wird durch den Verzicht auf die Rohrdämmung wettgemacht, während die üblichen Schwarzstahlrohre gedämmt werden müssen.

6.3.7.3 Transmissionswärmebedarf

Bei Strahlungsheizung kann der Wärmeverlust durch Wärmeleitung der Gebäudehülle mit einer einfachen Formel abgeschätzt werden, die früher zur Auslegung von Kachelöfen Anwendung fand und den Bedarf pro m³ Außenwand angab. Man beachte, daß die Wandstärke „unter dem Bruchstrich steht", der Wärmebedarf sinkt also bei Strahlungsheizung (= bei trockener gleichmäßig erwärmter Wandoberfläche) mit steigender Wandstärke – oder: eine Wand aus unporosiertem Material hat einen geringeren Wärmebedarf als eine gleich starke aus porosiertem. Die Formel lautet: Q_T = (lambda trocken / Wandstärke in m) x maximale Temperaturdifferenz zwischen innen und außen. Ergänzt man diese Formel durch den zusätzlichen Multiplikator „Raumhöhe" (in m), so erhält man den Bedarf des lfm der Wand. Der Vergleich des Ergebnisses mit der Leistungsangabe einer Heizschleife in W/m nach Abb. 20 erlaubt die Beantwortung der Frage, wie viel Heizleistung pro Laufmeter Außenwand bereitzustellen ist bzw. wie viele Schleifen bei welcher Vorlauftemperatur erforderlich sind. Das Ergebnis ist ausreichend genau für Mauerwerk mit höherem Rohgewicht (ab 1400 kg/m³). Die Abschätzung der Leistung des Wärmeerzeugers ergibt sich aus der Gesamtlänge der Rohrmeter (Rohrlänge pro lfm Wand x innerem Geschoßumfang x Geschoßzahl), multipliziert mit der pro lfm erforderlichen Leistung. Im Wohnhaus wird das Ergebnis soweit aufgerundet, daß für Kombithermen eine genügende Kapazität für die rasche Aufheizung des Brauchwasserspeichers entsteht.

Als Beispiel sei hier der Wärmebedarf eines Laufmeters Außenwand eines für die Zeit um 1900 typischen Miethauses ermittelt, mit 50 cm starken Außenwänden (0,5 m) aus verputzten Vollziegeln (2.000 kg/m³), abgedichteten Kastenfenstern von bis zu 1,20 m Breite und einer Raumhöhe von 3 m. Die Temperaturdifferenz sei 35 K (außen -15°C, Raum +20°C); als lambda trocken der direkt beheizten Ziegelwand wird 0,4 W/mK angenommen. Es ergibt sich folgendes:

Q_T = (0,4 : 0,5) x 35 x 3 = 84 W/m (für den lfm Wand!).

Wie die Erfahrung zeigt, ist dieser Wärmebedarf durch eine Schleife bzw. 100 W/m Sockelputz zu decken. Bei einer derartigen Minimalausführung empfiehlt es sich, den Rücklauf in der Fensterbrüstung zur Unterkante der Fensterbank zu führen oder gleich in dieser Höhe zu verlegen (s. Abb. 6c). Die zugrunde liegende max. Vorlauftemperatur von ca. 65°C wird unterschritten, wenn der Rücklauf Umwegschleifen in den Laibungen erhält (s. Abb. 6d). Wird je eine Schleife am Sockel und eine in Brüstungshöhe (mit Rücklaufumweg in den Leibungen) verlegt, werden 50°C kaum noch erreicht.
Bei Direktbeheizung von Außenbauteilen mit höherem Rohgewicht ist eine genauere Differenzierung zwischen *porenhaltigen* Massivbaustoffen wie Ziegeln und *porenfreien* wie Granit nicht erforderlich, da eine ähnlich große Senkung des Wärmebedarfs erfolgt, im ersten Fall durch Porenwasserverdrängung und Feuchteschutz, im zweiten Fall durch die Erhöhung des „thermischen Wechselstromwiderstands" dank der durch Dauertemperierung höheren mittleren Wandtemperatur.

6.3.7.4 Lüftungswärmebedarf

Die Lehrbuch-Definition des Lüftungswärmebedarfs lautet, unabhängig von der Art der Wärmeverteilung: „Der LWB entspricht der zur Aufheizung der eindringenden Kaltluft aufzuwendenden Energie". Diese unzulässige Verkürzung verschleiert einerseits den tatsächlichen Lüftungswärme-Gesamtverlust bei „Luft"-Heizung und verschweigt andererseits die Tatsache, daß der LWB bei Strahlungsheizung aus physiologischen und physikalischen Gründen gering ist. Bei Strahlungsheizung gilt grundsätzlich:

- Es besteht ein geringerer Bedarf an Lüftung: Die Qualität der Raumluft ist höher, da sie nicht beheizt und nicht verstaubt wird. Luftbewegung

(Luftzug) durch das Heizen entfällt. Die „inneren“ Wärmeverluste durch Luftaufheizung (Wärmestau unter der Decke, Kamineffekt des Treppenhauses) entfallen, da bei konsequenter Umfahrung der Geschosse keine Thermik in Raum und Gebäude entsteht. Die „äußeren“ Verluste durch Warmluftaustritt aus Fugen und Öffnungen sind wesentlich geringer, da die Raumlufttemperatur im Fensterbereich um bis zu 30 K unter der einer „Luft“-Heizungs-Situation liegt.

Entsprechend zeigt die Erfahrung, daß in unserem Beispiel durch den Überschuß von 16 K pro lfm Heizschleife auch der Lüftungswärmebedarf Q_L wie der Bedarf der Fensterfläche Q_F gedeckt ist (bei dichten Verbund- bzw. Kastenfenstern)!

6.3.7.5 Fazit für Rohranordnung und Betriebsweise

Bei mittelstarkem und starkem Massivmauerwerk mit dichten Kasten- oder Verbundfenstern mit bis zu 1,20 m Breite genügt für Wohnraum-Temperaturen bereits der Dauerbetrieb von je einem dünn überputzten Heizrohrpaar pro Außenwandsockel (Rücklauf in Höhe Fensterbankunterkante, evtl. mit Umwegschleifen in den Leibungen). Heizkörper sind nicht erforderlich. Bei Wandstärken von weniger als 50 cm sind zur Absenkung der Obergrenze der Vorlauftemperatur zwei Schleifen erforderlich, wenn möglich je eine an Sockel und Brüstung. Generell gilt dies bei gleich starkem, aber porosierten oder bei schwächerem massiven Mauerwerk und bei breiteren Fenstern. Ebenfalls durch zwei Schleifen wird eine sichere Beherrschung von Fachwerk erreicht, wenn der Rücklauf der oberen Schleife auf beiden Seiten der Fenster eine Umwegschleife erhält.

Bei auf Putz montierten, angestrichenen Heizrohren ist der Wandkontakt durch Ausspachteln zu optimieren. Bei Unterputzmontage erfolgt eine gute Wärmespeicherung in der nahen Rohrumgebung, wodurch eine nicht-kontinuierliche Wärmelieferung (z. B. bei Brauchwasser-Vorrangschaltung) in der Regel abgepuffert wird. Bei Aufputzmontage dagegen ist die Aufladung des dahinter liegenden Mauerwerks gering. Betriebsunterbrechungen sollten daher nur kurz sein. Dies gilt um so mehr bei Rohrverlegung auf Leichtbauschalungen und Dachbalken oder bei freier Rohrverlegung im Dachgebälk, da die Strahlungs- und Auftriebsleistung der Temperieranlage hier – mangels Speichereffekten – ganz von der momentanen Rohrtemperatur abhängt. In diesen Fällen muß die Heizwärmelieferung kontinuierlich sein bzw. sie darf während einer Zeitspanne von 2 – 3 Stunden nicht länger als 15 Minuten unterbrochen sein. Dies wird z. B. durch einen Heizungs-Pufferspeicher erreicht oder durch Beschränkung der Ladezeiten des Brauchwasserspeichers auf zwei bis drei Intervalle pro Tag.

6.3.7.6 Jahresheizwärmebedarf kWh/m³·a

Welch große Bedeutung die Vermeidung der Aufheizung der Raumluft zum Zweck der Wärmeverteilung gerade in öffentlichen Gebäuden hat, zeigt ein in speicherfähiger Bauweise (50 cm Vollziegel) errichtetes Schulgebäude von 1880 mit 11.500 m³ umbauten Raum (Gymnasium Waldstraße, Hattingen/Ruhr), in dem seit 1996 2/3 des Volumens (die Unterrichtsräume) mit der Temperierung beheizt sind, während das restliche Drittel (Treppenhaus, Aula, Sonderräume) Heizkörperheizung erhielt. Wegen uneinheitlicher Nutzung des Kellergeschosses (Teilbeheizung) und unterschiedlich in den freien Dachraum ragenden Obergeschoßräumen ist von einem mittleren A/V-Verhältnis auszugehen. Die originalen Kastenfenster wurden nicht saniert, so daß zahlreiche Oberlichter nicht ganz zu

	1. Heizperiode 9/96-9/97	1997 – 2000 (4-Jahresdurchschnitt)	2001
Heizkörper-Heizung kWh/m³·a	35,97	24,61	20,58
Temperierung kWh/m³·a	21,39	18,21	18,05
Gradtagzahlen	4.093	3.296	3.410

Quelle: Stadtbauamt Hattingen 3/2003

schließen sind. Die Heizung wird wie folgt betrieben: Mindestraumtemperatur 20°C, keine Nacht- und Wochenend-, sondern nur Ferienabsenkung, kein Betrieb in den Monaten Juni, Juli und August. Der Energiebedarf der beiden Kreise ab Heizraum wird durch Wärmemengenzähler getrennt erfaßt.

Die Zahlen widerlegen die Lehrmeinung, nach der der Jahres-Energiebedarf eines Gebäudes eine reine Gebäudeeigenschaft sei und das Heizsystems darauf keinen Einfluß habe: Bei großem Fugenanteil der Außenwände (unbehandelte Altfenster) und bei unkalkulierbarem Nutzerverhalten (Schüler) sind bei „Luft"-Heizung die Lüftungswärme-Verluste zwangsläufig erheblich höher als bei „Wand"-Heizung. Es ist daher physikalisch unhaltbar, für alle Heizsysteme in der Wärmebedarfsberechnung für den Raumluftwechsel in der Heizperiode einen *festen* Wert von *geringer* Höhe (0,6 Raumvolumen pro Stunde) anzusetzen, wie auch die Senkung des Energiebedarfs durch Direktbeheizung der Gebäudehülle zu leugnen, indem den Wandbaustoffen ein heizsystem-unabhängiger U-Wert zugeordnet wird. Beides geschieht auch in der neuen EnEV.

Selbst wenn man die Werte des Temperierkreises um 15% verschlechtert, um sich dem Primärenergiebedarf entsprechend der Energie-Einsparverordnung anzunähern, bewegen sie sich nach der 1. Heizperiode im Bereich der für mittlere A/V-Verhältnisse angegebenen Werte. Damit ist der Tatbestand des § 16 Abs. 2 gegeben: Es entfällt der Zwang zur Änderung der U-Werte (der rechnerischen Wärmedurchgangskoeffizienten) der Außenbauteile durch Montage von Wärmedämmung und Wärmeschutzfenstern, da „die Ziele dieser Verordnung durch andere Maßnahmen in gleichem Umfang erreicht werden". Dieser Zusammenhang ist von höchster Bedeutung für die kostengünstige Sanierung von Gebäuden des Bestands und von Baudenkmälern, wobei hier die Möglichkeit des Erhalts der Authentizität besonders zu Buche schlägt.

7. Grossbeispiel für Minimalanlage

Alf Lechner Museum, 85049 Ingolstadt, Esplanade 9

- Sanierung und Umbau eines Industriegebäudes als Low-budget-Projekt mit Minimalmaßnahmen zum Feuchte- und Wärmeschutz und minimalinvasiver Haustechnik (Eröffnung 2/2000).

Die ehemalige Automobil-Fertigungshalle ist ein zweigeschossiger, nur zu einem Drittel unterkellerter Industriebau der 1950er Jahre in Betonskelettbauweise mit 24 cm starker Porenbeton-Ausfachung, Einscheiben-Stahlrahmen-Verglasung im EG (3/4 Raumhöhe), Porenbeton-Sheddächern im OG mit Einscheibenverglasung. Dank der bauphysikalischen Effekte der Bauteilheizung konnten die Wärme- und Feuchteschutzmaßnahmen minimiert werden: An den erdberührten Flächen (2/3 des EG-Bodens und Hüllflächen des KG, Normalbeton ohne Feuchtesperre und Wärmedämmung) wurde ganz darauf verzichtet. Als Wärmedämmung erhielten die Außenwände auf Wunsch des Architekten an den Geschoßgrenzen je einen 1 m hohen Streifen von 10 cm Stärke, die Seiten der Sheds 2 cm, die opaken Dachflächen und die erhaltene EG-Verglasung 10 cm. Die Fensteröffnungen der Galerie wurden mit Lochziegeln (1200 kg/m^3) zugesetzt. Die Erneuerung der Shedverglasung geschah durch Wärmeschutzverglasung ($k = 1{,}5$ W/m^{2}K), die auch bei der Vorbau-Verglasung Verwendung fand (Abb. 21 bis 23).

Das Museum mit einem beheizten Gesamtvolumen von 13.600 m^3 umfaßt neben der zweigeschossigen Galerie (12.560 m^3) einen Mehrzweckbereich im OG (875 m^3) mit 2 Büros, Bad und großem Arbeitsraum sowie Funktionsräume im KG (1.280 m^3): Werkstatt, WC-Anlage, Technikraum (10 m^2) und Nebenräume. Das zweigeschossige Galerievolumen entstand, indem die Nordwestwände von EG und OG durch einen Stahl-Glas-Vorbau in Pfosten-Riegel-Konstruktion ersetzt wurden (Abb. 24). Bei einem Gesamtaufwand von 1.02 Mio. € waren die teuersten Einzelmaßnahmen der Vorbau und die hinterlüftete Metallverkleidung der 3 verbliebenen Außenwände zur Unterdrückung der Fensterachsen und Regenfallrohre (Abstand zur Wand 25 cm).

Abbildung 21:
Alf Lechner Museum, Ingolstadt, (Nordwestseite).
Der Glasvorbau mit dem Eingang verbindet das Luftvolumen von Erd- und Obergeschoß (12.590 m³).

Abbildung 22:
Alf Lechner Museum, Ingolstadt (Südwestseite).
Die hinterlüftete Verkleidung hat 25 cm Abstand zur Außenwand.

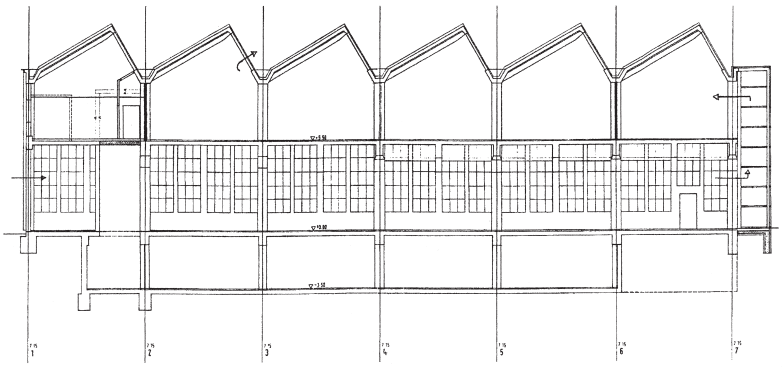


Abbildung 23:
Alf Lechner Museum, Ingolstadt (Schnitt)
Der Keller (1/3 der Grundfläche) liegt nordöstl. der EG-Mittelstützen.
Zeichnung Florian Fischer, München

Abbildung 24:
Alf Lechner Museum, Ingolstadt, Innenansicht des Glasvorbaus nach Südwest
Ein „Schacht" von 10 m Höhe ohne Thermik in der Heizperiode.

Fotos Nr. 21, 22, 24 und 28 Michael Heinrich, München, die übrigen vom Autor.

Die Lüftung (2.556 €) besteht aus 2 Abluftventilatoren mit Jalousieklappen in der Shedverglasung am südlichen Ende der OG-Halle (max. Luftmenge 2 x 3.000 m³) und 2 Zuluft-Jalousieklappen in der südlichen EG-Außenwand (Luftführung durch beide Geschosse über den Vorbau).

Die Heizeinrichtung (netto 36.046 €) besteht aus einem Fernwärmeanschluß (7.055 €), einer Unterstation mit Regelung (9.561 €) und einer Temperieranlage (19.429 €), deren Heizrohre (CU blank, (Ø 18 und 22 mm) eine Gesamtlänge incl. Verteilleitungen von 1.124 m haben. An den massiven Außenbauteilen sind die Rohrschleifen in Materialkontakt montiert – *unter Putz*: an den Außenwandsockeln (EG: Rücklaufumweg in den Nischen mit Fensterbank-Kontakt; Abb. 25), *auf Putz* (in Anstrich): im OG beidseitig der Wandpfeiler und Sheddachträger (Abb. 26 und 27), im EG (Einzelrohr) beidseitig der 6 Pfeiler und unter dem

Abbildung 29:
Alf Lechner Museum, Ingolstadt, Nordostecke des Glasvorbaus von innen.
Im Eckständer Zuleitungen zu den beiden Rohrschleifen der Fassade
(Ø 18 mm) in Höhe der Geschosse (EG: 3. und 4., OG.: 6. und 7. Querprofil des Glashalteapparates). Alle Leitungen angestrichen und in Kunststoffclips gehalten. Links Vorlauf (im unteren) und Rücklauf (im oberen U-Profil) der EG-Schleife.

Abbildung 25:
Alf Lechner Museum, Ingolstadt, Erdgeschoß.
Südwestwand mit Sockel- und Brüstungsheizrohren (Ø 18 mm) vor dem Aufputzen der Brüstungen und dem Anbetonieren des Sockelprofils.

Unterzug (Abb. 28), thermisch getrennt: im Glasvorbau in Höhe der Geschosse in je 2 U-Profilen der Glasfassade (Abb. 29). Die maximale Heizleistung der Rohre beträgt bei einer mittleren Rohrtemperatur von 70°C ca. 65 W/m. Das bedeutet 73 kW oder 5,4 W/m³ umbautem Raum.

Mit dieser geringen maximalen Leistung wird seit November 2000 in der Heizperiode eine Mindest-Raumtemperatur von 19°C gehalten – bei außergewöhnlich geringem Energiebedarf. Damit ist das Projekt mit seinem beheizten Gesamtvolumen von 13.600 m³, davon 12.590 m³ über zwei Geschosse zusammenhängend, ein eindrucksvolles Beispiel dafür, wieweit bei Realisierung aller physikalischen Effekte der Heizrohr-Temperiermethode und konsequenter Planung des Rohrverlaufs sowohl der heiz- wie der sanierungstechnische Aufwand reduziert werden kann. Wie hier würde auch bei Neubauten die Dämmung der erdberührten Wände und der Böden incl. der schwimmenden Estriche entfallen. Bei mindestens 19°C lag der Jahres-Heizenergieverbrauch pro m umbauten Raum im 2. Betriebsjahr mit 3.956 Gradtagzahlen (GTZ) bei 20,4 kWh/m³·a, im 3. Jahr (3.723 GTZ) bei 18,2 kWh/m³·a und zeigt damit die energetische Bedeutung einer physikalisch sinnvollen Wärmeverteilung. Das Projekt Kulturspeicher Würzburg mit 50.000 m³ beheiztem Volumen, davon ca. 40.000 m³ tagsüber ebenfalls über zwei Geschosse zusammenhängend (Mindesttemperatur 18°C) ist ein weiteres über diesen Winter bereits erprobtes Beispiel. Auch hier war eine minimale Temperieranlage (je 2 Heizrohre an allen Wandsockeln) ausreichend und die Bodendämmung des Untergeschosses entfiel [8].

Abbildung 28:
Alf Lechner Museum, Ingolstadt, Erdgeschoß.
Teil des Mittelpfeilerkreises (Ø 18 mm): Der Vorlauf (angestrichen) liegt in Materialkontakt auf der Unterseite des Unterzuges und den Nord- und Südseiten der Pfeiler, jeweils am Pfeilerfuß im Estrich auf die Rückseite wechselnd. Der Rücklauf (blank) wurde in den Hohlraum des Unterzuges eingeschoben.

Abbildung 27:
Alf Lechner Museum, Ingolstadt, Obergeschoß.
Wandpfeiler mit Muster für Shedträger-Heizschleife; am Sockel 2 Heizrohrschleifen vor dem Anbetonieren des Sockelprofils: unten die Sockelschleife (Ø 18 mm), darüber die Versorgungsleitungen (Ø 22 mm) für die Shedträgerschleifen.

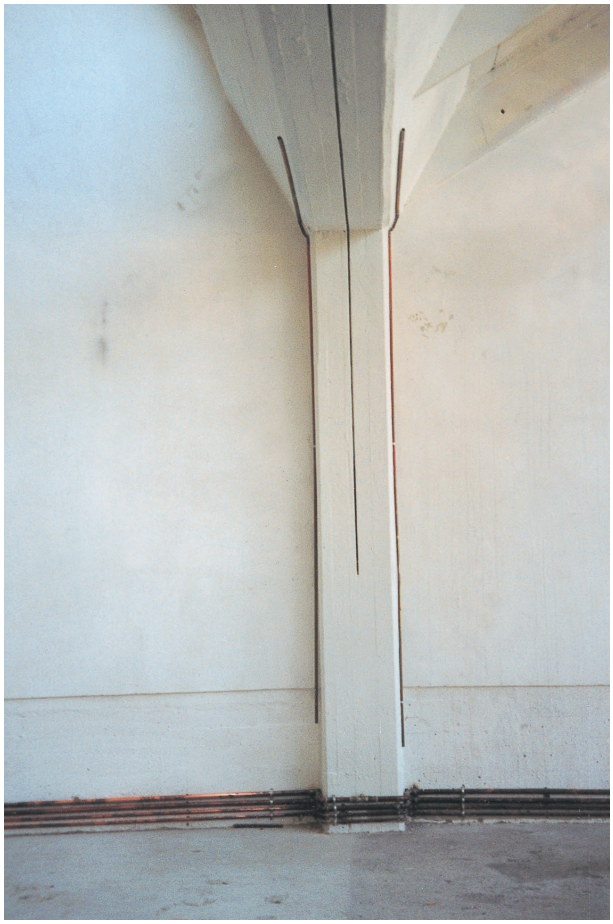


Abbildung 26:
Alf Lechner Museum, Ingolstadt, Obergeschoß,
Blick nach Westen. Teil eines der beiden Shedträgerkreise (Ø 18 mm, in Materialkontakt, angestrichen): Oberhalb der Unterkante der Betonträger die Heizrohre, die an den Mittelpfeilern auf die andere Trägerseite wechseln.

8. Vergleich Temperierung / Vollklimaanlage

Quellen: Hochbauamt Ingolstadt bis 04/2003, Nürnberger Nachrichten vom 11.04.2000

Der in der Tabelle durchgeführte Zahlenvergleich erscheint zunächst als ein Vergleich von „Äpfeln und Birnen". Betrachtet man ihn aber vor dem *Ziel*, das die klimatechnischen Anlagen der beiden Museen erreichen sollen, der Erzeugung eines konservatorisch zuträglichen Klimas ohne Kurzzeitschwankungen, so zeigen Stichproben aus der kontinuierlichen Klimaaufzeichnung des Stadtbauamtes Ingolstadt, daß dieses Ziel mit dem in dieser Schrift dargestellten Gesamtkonzept „Optimierte Gebäudehülle, Temperierung (Temperierung), kontrollierter Luftwechsel" mit wesentlich geringerem Investitions- und Energieaufwand erreicht wurde, als gemeinhin für große Gebäude als Standard angenommen. Die Temperaturspitzen im OG des Alf Lechner Museums im Hochsommer wären auch noch vermieden worden, wenn der Empfehlung der Landesstelle, die Sheds außen zu beschatten, nachgekommen worden wäre.

Nach Auskunft des Hochbauamtes der Stadt Ingolstadt stellte es sich heraus, daß das Lechner-Museum mit seiner minimalen Haustechnik bezüglich Behaglichkeit und Energieeinsatz eine ideale Versammlungsstätte ist. Seit Mitte des Jahres 2000 werden Veranstaltungen mit 800 bis 1000 Besuchern abgehalten. Der mittlere Jahresheizwärmebedarf von 2001 und 2002, bezogen auf die mittlere Gradtagzahl von 3.500 incl. 15 % Zuschlag (fiktiver Anlagenverlust und „Warmwasseranteil") entspricht 20,23 kWh/m³·a bzw., bezogen auf Raumhöhen von 2,6 m, 63,12 kWh/m²·a. Dies wären 1,9 l Öl/m³·a oder 6 l/m²·a (bei 2,6 m Raumhöhe) für Wohnhausbedingungen. Dieser Verbrauch entspricht der Parole des Bauministeriums, ausgegeben für Wohnbauten zum Inkrafttreten der neuen Energieeinsparverordnung: „max. 7 l/m²·a", trotz über 11 m zusammenhängendem Großvolumen, ungünstigem A/V-Verhältnis und minimalem Dämmstandard. Der geringe Energiebedarf ist im Wesentlichen also die physikalische Folge des Heizens ohne Einsatz der Raumluft als Heizmedium, woraus auch die konservatorische und die physiologische Qualität des Raumklimas folgen.

9. DIN-Normen/Regeln der Technik/Stand der Technik/Vereinbarungen im Bauvertrag

Zitate in Anführungszeichen, Anmerkungen in Klammern

9.1 Gültigkeit von DIN-Normen in der Rechtsprechung

„Meersburger Urteil", Az. 4/C33-35/83, Bundesverwaltungsgericht Meersburg 22.05.1987:

„Die Normenausschüsse des Deutschen Instituts für Normung sind so zusammengesetzt, daß ihnen der für ihre Aufgabe benötigte Sachverstand zu Gebote steht. Daneben gehören ihnen aber auch Vertreter bestimmter Branchen und Unternehmen an, die deren Interessenstandpunkte einbringen. Die Ergebnisse ihrer Beratungen dürfen daher im Streitfall nicht unkritisch als `geronnener Sachverstand´ oder als reine Forschungsergebnisse verstanden werden.

Zwar kann den DIN-Normen einerseits Sachverstand und Verantwortlichkeit für das allgemeine Wohl nicht abgesprochen werden. Andererseits darf aber nicht verkannt werden, daß es sich dabei zumindest auch um Vereinbarungen interessierter Kreise handelt, die eine bestimmte Einflußnahme auf das Marktgeschehen bezwecken. Den Anforderungen, die etwa an die Neutralität und Unvoreingenommenheit gerichtlicher Sachverständiger zu stellen sind, genügen sie deswegen nicht. Besondere Zurückhaltung ist gegenüber technischen Normen dort geboten, wo ihre Aussagen Bewertungen entgegengesetzter Interessen einschließen, die an sich einer demokratisch legitimierten politischen Entscheidung in der Form einer Rechtsetzung bedürften. Als Ersatz für derartige rechtliche Regelungen sind sie ungeeignet".

Objekt	Ingolstadt: Alf Lechner Museum (Kap. 7)			Nürnberg: Neues Museum
1. Gebäude	Ehemaliges Industriegebäude (EG 5 m hoch, OG mit Sheds bis 6 m hoch, verbunden durch Glasvorbau), alle Glasflächen nach NW; zu 2/3 nicht unterkellert, keine Feuchte- und Wärmeisolierung der erdberührten Flächen (s. 3.2!)			Neubau mit Glasfassade (1.500m²) nach Osten
1.1 Umbauter Raum (u. R.)	13.600 m³ beheizt, davon zusammenhängend 12.900 m³ (zweigeschossig)			81.000 m³
1.2 Verhältniszahlen des u. R.	1			5,5
2. Klimatechnik	1.124 m Hüllflächen-Heizrohre, 2 Abluftventilatoren (max. 6.000 m³/h), keine Kühlung und Außenbeschattung (nur textile Einlage in Shedverglasung)			Vollklimaanlage (Förderleistung bis 200.000 m³/h), innen liegende Beschattung
2.1 Raumtemperatur min./max.	EG min. 19°C/max. 26°C OG min. 17°C/max. 28°C (an 1 Tag kurzzeitig max. 31°C aufgetreten)			19°C – 26°C
2.2 Kosten Klimatechnik	44.480 €			15,34 Mio. €
2.3 Verhältniszahlen der Technik-Kosten	1			344
2.4 Spezifische Klimatechnik-Kosten)	3,27 €/m³ u. R.			189,18 €/m³ u. R.
2.4 Verhältniszahlen Klimatechnik-Kosten	1			57,8
3. Jährlicher Heiz-Energiebedarf Jahr / MWh	2000 / 190	2001 / 278	2002 / 247	?
3.1 Gradtagzahlen (BRD-Mittel: 3500)	3.647	3.956	3.723	
3.2 Spezifischer Heizenergiebedarf kWh/m³ u. R.·a	14,0	20,4	18,2	max. Wärmeeintrag der Glasfassade 700 kW (Kühlleistung rechnerisch 467 W pro m² unbeschattete Glasfläche)
3.3 Betriebsweise	Dauerbetrieb ohne Nachtabsenkung 2000: bis 15.11. min. 15°C seit 15.11.2000 min. 19°C			

Regel-Vorspann der DIN-Taschenbücher. Herausgeber: DIN Deutsches Institut für Normung e.V.

„Die Normen des Deutschen Normenwerkes stehen jedermann zur Anwendung frei. Festlegungen in Normen sind aufgrund ihres Zustandekommens nach hierfür geltenden Grundsätzen und Regeln fachgerecht. Sie sollen sich als anerkannte Regeln der Technik einführen. Bei sicherheitstechnischen Festlegungen in DIN-Normen besteht überdies eine tatsächliche Vermutung dafür, daß sie anerkannte Regeln der Technik sind. DIN-Normen sind nicht die einzige, sondern eine Erkenntnisquelle für technisch ordnungsgemäßes Verhalten im Regelfall. Es ist auch zu berücksichtigen, daß DIN-Normen nur den zum Zeitpunkt der jeweiligen Ausgabe herrschenden Stand der Technik berücksichtigen können.

Durch das Anwenden von Normen entzieht sich niemand der Verantwortlichkeit für eigenes Handeln. Jeder handelt insoweit auf eigene Gefahr. Jeder, der beim Anwenden einer DIN-Norm auf eine Unrichtigkeit oder eine Möglichkeit einer unrichtigen Auslegung stößt, wird gebeten, dies dem DIN unverzüglich mitzuteilen, damit etwaige Mängel beseitigt werden können“. (Beispiel: Strahlungsheizanlagen werden bei DIN-gemäßer Leistungs- und Wärmebedarfsberechnung überdimensioniert, so daß der aus dem Wirkungsprinzip folgende Kostenvorteil zunichte gemacht wird).

9.3 Allgemein anerkannte Regeln der Technik/Stand der Technik

Honorarordnung für Architekten und Ingenieure. Kommentar. Pott und Dahlhoff, 1990.

„Die Einführung des Begriffs der allgemein anerkannten Regeln der Technik (a.a.R.d.T.) ist von weit reichender haftungsrechtlicher Bedeutung. Er ist vom bloßen `Stand der Technik´ abzugrenzen. Letzterer zeigt lediglich, was technisch machbar ist, setzt aber keine Bewährung in der Praxis voraus. Damit fehlt dem Stand der Technik eine wesentliche Voraussetzung für die allgemeine Anerkennung als technische Regel.

Die Verwendung von (nur) behördlich/amtlich zugelassenen Baustoffen, Bauteilen oder technischen Systemen genügt weder den Anforderungen der 1. Grundleistung, noch denen des § 4 Nr. 2 Abs. 1 VOB/B. Denn derartige Zulassungen werden regelmäßig für neue, noch nicht abschließend erprobte Materialien etc. beantragt und erteilt, die zwar dem `derzeitigen Stand der technischen Erkenntnisse´ entsprechen, für die aber die praktische Bewährung und damit eine unverzichtbare Voraussetzung für die Anerkennung als technische Regel noch aussteht (s. Hinweis in der Zulassungsurkunde). Durch die Berufung auf eine `bloße´ behördliche Zulassung bei noch ausstehender Anerkennung als a.a.R.d.T. ist daher bei Funktionsmängeln keine Freistellung von der Haftung gerechtfertigt". (Dies gilt z.B. für die sog. Betonkernaktivierung als angeblich ideale Wandheizung mit Kühlfähigkeit, deren Herstellungskosten im Vergleich zur Temperierung honorarfreundlich hoch sind und deren Regelung physikalisch bedingt aufwendig ist).

9.4 Bauvertrag: Abweichung von den a.a.R.d.T und Normen

VOB für Architekten und Ingenieure. Aktuelles Praxishandbuch. Von Motzke, Gross, Kromik et alii, 1999.

„Das Werkvertragsrecht fordert als Leistung den Erfolg und nicht die Handlung (z. B. die Durchführung einer Maßnahme nach DIN). Es kann daher ein anderer Technikstandard als der in den a.a.R.d.T. oder den DIN-Normen niedergelegte vereinbart werden, wenn dadurch ein mangelfreies zweckgerechtes Werk zu gewährleisten ist. Die dem zu Grunde liegenden Regeln können auf Praxis beruhen, müssen also weder durch Regelwerksetzer wie z. B. DIN, VDI, VDE erarbeitet worden, noch in den a.a.R.d.T. enthalten sein. Diese geben nämlich die wissenschaftlichen, technischen und handwerklichen Erfahrungen im Bauwesen wieder, die sich ändern können. Juristisch maßgeblich sind daher die im Bauvertrag getroffenen Vereinbarungen". (Es ist also formaljuristisch korrekt, wenn z. B. zur Herstellung einer Temperieranlage als alleinige Vertragsbasis diese Schrift und die in ihr enthaltenen Regeln vereinbart werden. Es zeigt sich immer wieder, daß nur unter Anerkennung der hier zusammen gefaßten Langzeiterfahrung einer Fachbehörde zugleich die Herstellungs-Mehrkosten, die bei DIN-Betrachtung anfallen, vermieden und die physikalischen Nebeneffekte, die aufwendige anerkannte Sanierungsmaßnahmen ersetzen, erreicht werden können).

10. Zusammenfassung

Als Fazit langjähriger Erfahrung mit einfachsten Formen von Wandheizung und kontrollierter Lüftung konnten die baulichen und haustechnischen Voraussetzungen für ein konservatorisch ideales Gebäude mit physiologisch günstigen Raumklimabedingungen und geringem Energiebedarf bezeichnet werden. Die aufgeführten Planungsvorgaben sind im Prinzip für alle Konstruktions- und Nutzungsarten von Gebäuden einschließlich Wohnbauten gültig.

Ein *Museumsgebäude* mit Sockeltemperierung bei begrenzter Rohrheizleistung und mit optimierter Dämpfungsfähigkeit der Gebäudehülle (durch Fugenabdichtung, außenliegenden Sonnenschutz, geringe kontrollierte Lüftung bei Belegung) fungiert durch seine thermisch sanierte Architektur als „Großvitrine": Die Oberflächentemperatur seiner Raumschale ist homogenisiert und gleitet

langsam im Tagesgang und Jahresverlauf. Dabei folgt sie der langsamen Änderung der mittleren Außentemperatur, von der die saisonale *mittlere* absolute Außenluftfeuchte bestimmt wird, also mit dieser ebenfalls langsam gleitet. Die Folge des Zusammenspiels von Raumtemperierung und kontrollierter Minimallüftung ist eine im gesamten Raum homogene, *kurzzeitstabile* relative Luftfeuchte, die ohne größeren Regelungsaufwand im Jahresverlauf zwischen konservatorisch sinnvollen saisonalen Grenzwerten gleitet: > 40% im Winter, wenn Luftbefeuchtung bei noch besucherfreundlichen Temperaturen vermieden werden soll; < 65% im Sommer in erdberührten Räumen, wenn hier Luftentfeuchtung und Trockenhaltung der Bausubstanz durch leichtes Temperieren geschieht. Saisonal sinnvolle Raumtemperaturen im Hochsommer von über 20°C, die in dieser Zeit in Obergeschossen auch in schwerer Bausubstanz ohne Beheizung vorliegen, müssen in erdberührten Räumen durch Wärmezufuhr erst hergestellt werden. Bei Temperierung stellen sich erfahrungsgemäß Werte von unter 60% ein. Dadurch ist die Gleichgewichtsfeuchte des Materials von Raumschale und Ausstattung normalisiert und ihre Änderung bleibt unschädlich, da sie sich, selbst bei Betriebsstörungen, wegen der Speichereffekte nur gleitend ändern kann. Pflanzlicher bzw. mikrobieller Befall kann nicht neu entstehen, vorhandener Befall nicht weiter aktiv sein. Technik zur Luftentfeuchtung entfällt, der Luftbefeuchtungsbedarf minimiert sich.

In *Großräumen* wie Kirchen erlaubt die beim Temperieren ruhende Raumluft die Ausbildung einer „warmen Wanne" im Aufenthaltsbereich des Menschen. Bei Temperierung der Orgel durch eine frei vor dem Wandsockel durch das Gehäuse geführte angestrichene Rohrschleife entfallen Korrosion, Schimmelbildung und regelmäßiger Stimmungsaufwand. Bei *Stahl-Glasfassaden* werden Heizrohre thermisch getrennt (mit Plastikhaltern) in den Halteapparat integriert. Bei *Wohn- und Büronutzung* bzw. in Gebäuden ohne Anspruch an Klimakonstanz entfällt die Leistungsbegrenzung der Heizrohre und die Fensterlüftung ist energetisch unproblematisch.

Der hohe Aufwand konventioneller Verfahren bei Feuchte- und Schadsalzproblematik ist darin begründet, daß kein Bezug hergestellt wird zwischen der Bauteil-Oberflächentemperatur und dem wichtigsten Bewegungsmechanismus der Wassermoleküle in Kapillaren – der *Wasserstoffbrückenbildung*. Es ist daher kaum bekannt, daß bereits eine geringfügige Erhöhung der raumseitigen Oberflächentemperatur eines Bauteils sowohl die – den U-Wert verschlechternde – Feuchteaufnahme aus der Raumluft durch Kapillarkondensat verhindert (durch die erhöhte Molekularschwingung an der „inneren" Oberfläche des Materials, den Kapillarwänden), als auch die Feuchte- und Schadsalzwanderung zum Stillstand bringt (durch das daraus folgende, nach außen gerichtete geringe Wärmegefälle im Bauteil). Verbesserung der Fugensituation (Öffnungs-, Bau- und Mauerwerksfugen) und Minimaltemperierung stellen also die wirksamste und kostengünstigste Art der Konservierung von Architektur und Raumaustattung dar. Der dazu erforderliche geringe Energiebedarf erlaubt den Einsatz der Methode zum Feuchteschutz von Baudenkmälern, Exponatgebäuden in Freilichtmuseen und behausten Ausgrabungen, anstelle der üblichen materialersetzenden „Erhaltungsmaßnahmen". Entsprechend besteht bei Sanierung von Altbau und Baudenkmal ein wesentliches Einsparpotential: Historisches Mauerwerk bleibt nach Ausfugung trotz Salzbelastung erhalten, Putze werden ausgebessert, nicht durch „Sanier"-Putz ersetzt, für „Opfer"-Putz besteht kein Anlaß, da sich die Funktionen von Feuchtesperre, Salzbehandlung und Sanierputz wie auch die Funktion der Wärmedämmung aus der Art der Wärmeverteilung ergeben. Dies gilt auch für den Feuchteschutz der Dachflächen in genutzten Dachräumen, wo stärkere Holzschalungen (z. B. 9 cm) als Wärmedämmung ausreichen. Es genügt die Reparatur und Abdichtung vorhandener Kasten- oder Verbundfenster.

Dank des bei Temperierung wirksamen Zusammenhangs von Trocknung der Gebäudehülle, Verbesserung der Solar- und Erdwärmeakkumulation und geringer Raumlufttemperatur eröffnet sich für die *Bestands- und Baudenkmal-*

pflege ein Ausweg aus dem „Wärmeschutz-Dilemma“. Die Energieeinsparung in ungedämmten temperierten Massivbauten beweist, dass die seit den 1960er Jahren festgestellten erhöhten Heizwärmeverluste, deren Verringerung seit dem Energieschock 1972 durch Außendämmung unter Beibehaltung der „Luft“-Heizung versucht wird, eben nicht durch das hohe Rohgewicht des Baumaterials verursacht werden, das unter natürlichen Bedingungen (bei dem stets „instationären“ Tag-Nacht-Geschehen und der nur zeitweise vorhandenen Solareinstrahlung) wegen seines hohen thermischen Wechselstromwiderstandes zum Vorteil wird, sondern durch die fehlerhafte Wärmeverteilung der „neuen“ luftheizenden Verfahren (Heizkörper, Klimaanlage). Seit deren flächendeckender Einführung (1960er Jahre!), die in Altbauten meist unter Ersatz vorhandener, die Luft nicht aufheizender Kachelofenheizung erfolgte, treten Wärmeverluste auf dem *Luftweg* auf, deren Größenordnung zu Zeiten der Strahlungsheizung unbekannt war. Weltweit ist seitdem nämlich die in den Gebäuden von den Heizeinrichtungen erzeugte Wärme in einer großen Warmluftmenge enthalten, die z. T. ungenutzt zur Decke strömt bzw. im Gebäude umher vagabundiert, z. T. das Gebäude über Fugen und Öffnungen ohne Speichereffekt verläßt. Zugleich ist im Winter die Materialfeuchte derjenigen Außenbauteile, deren Versorgung wegen des falschen Weges der Warmluft zu gering ist, durch Kapillarkondensat höher als im Sommer.

Das Phänomen, daß sich bei kontinuierlichem Heizbetrieb die Oberflächentemperatur ungedämmter, nicht unterkellerter Böden an die Raumlufttemperatur angleicht, ist bereits bei Konvektionsheizung zu beobachten, und zwar auch in Großräumen wie Industriehallen mit Luftheizung. Es beruht auf der durch die Erdwärme unterstützten Wärmeakkumulation im trocknenden Bodenaufbau [1]. Während bei „Luftheizung“ die Angleichung erst nach einem Dreivierteljahr eintritt und die Oberflächentemperatur in Außenwandnähe abfällt, verstärken sich bei Temperierung alle Effekte: Durch die Randbeheizung wird der Abfluß der Erdwärme in die unterkühlte Außenzone behindert, so daß die Oberflächentemperatur ab 10 cm Näherung zur Außenwand *an*steigt und sich die Zeitspanne der Angleichung auf bis zu 3 Monate verkürzt. In diesem Zusammenspiel von langsamem Steigern der Materialtemperatur und dadurch verbesserter Erdwärmeakkumulation ist auch begründet, daß behauste archäologische Ausgrabungen durch Temperierung auf einfachste und schonende Weise konserviert werden können.

Aus dem gleichen Grund ist auch der Energiebedarf, der nach den ersten Wochen des Trockenheizens außerhalb der Heizperiode zum Trockenlegen und Temperieren und zur Luftentfeuchtung von Kellern durch Sockelheizrohre anfällt, so gering, daß neben der auf konventionellem Wege gar nicht erreichbaren ganzheitlichen Gesamtwirkung auch der ökonomische Vergleich für die Temperierung als Sanierungsmaßnahme spricht: Im Keller des oben dargestellten ehemaligen Fabrikgebäudes wurden die Ziele bei einem Raumvolumen von 1.280 m^3 (340 m^2) im Juli 2001 bei 20°C Raumtemperatur mit einer Dauerleistung von 2,1 kW erreicht (1,6 W/m^3). Ein Luftentfeuchter mit gleicher Leistung würde salzbedingte Putzschäden verstärken, die Raumlufttemperatur stärker anheben und Lärm machen.

Literaturangaben

[1] Klopfer, H.: Müssen Industriefußböden wärmegedämmt werden? In: Beton (1995), Heft 6, S. 426f.
[2] Führer zu archäologischen Denkmälern in Bayern, Franken 1, Stuttgart 1984, S. 71.
[3] Käferhaus, J.: Mauerbach, s. CD.
[4] Holmberg, J.: Relative Humidity in Historic Houses, Museums and Museum Storage Rooms, a Literature Study. 1. schwedischer Beitrag zum Forschungsprojekt EUREKA 1383 PREVENT. Hrsg. Technische Universität Wien. Wien 1996.
[5] Thomson, G.: The Museum Environment. London ^{3}1986.
[6] Weber, H.: Fassadenschutz und Bausanierung. Ehningen bei Böblingen ^{4}1988, S. 5f.
[7] Torraca, G.: Poröse Baustoffe. Wien 1986, S. 12ff, S. 21ff.

[8] Weißmann, H.: Die Temperierung des Kulturspeichers Würzburg. In: bau intern (2003) Nr. 12, S. 241–243.
[9] Camuffo, D.: Wall Temperature and the Soiling of Murals. In: Museum Management and Curatorship (1991) 10, S. 373ff. Winkelmann, U.: Staub im Museum. MUSEUM AKTUELL (2003) Nr. 97, S. 4183 und 4184.
[10] Engelbrecht, M.: Die Temperierung – ein alternatives Heizsystem. Diplomarbeit. München 1996, S.92.
[11] Recknagel, Sprenger, Hönmann: Heizung + Klimatechnik. München 1992, S. 798.
[12] Berneth, Claus-Peter: Wandstrahlungsheizung - für Sanierung und Neubau. In: Bauzeitschrift (2004) Nr. 1, S. 73.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung: Temperieren statt "Heizen – Dämmen – Feuchtesanieren - Klimatisieren"
Einleitung: Der Bedarf an alternativer Wärmeverteilung ist evident
1. Langzeiterfahrung mit Temperierung
1.1 Temperierung senkt Kosten für Feuchtesanierung und Klimastabilisierung
1.2 Temperierung schafft durch "Strahlungsklima" zugleich konservatorisch und physiologisch günstige Raumverhältnisse
1.2.1 "Luftheizung" schafft konservatorisch absurde Raumverhältnisse
1.2.2 Strahlungsklima: Konservatorische Vorteile
1.2.3 Strahlungsklima: Physiologische Vorteile
1.2.3.1 Physiologische Relevanz der Raumlufttemperatur
1.2.4 "Luftheizung" schafft physiologisch absurde Raumverhältnisse
1.2.5 Strahlungsklima schafft physiologisch sinnvolle Raumverhältnisse
1.3 Temperierung und Luftwechselkontrolle schaffen ein "Universal-Klima"
2. "ICOM-Richtlinien"
3. Alltagstaugliche Klima-Kriterien
3.1 Basisfunktion der Gebäudehülle
3.2 Gleitendes Raumklima als Planungsziel
3.2.1 Konservatorisches Ziel: Gleitende Änderung der Gleichgewichtsfeuchte
3.2.2 Konservatorisch sinnvolle Schwankungsbreite des Raumklimas
3.2.3 Gleitendes Raumklima als Planungsziel
4. Keine international gültigen Standard-Klimawerte möglich
4.1 Bauteilfeuchte und Art der Wärmeverteilung
4.2 Relative Raumluftfeuchte und Art der Wärmeverteilung
4.3 U-Wert (k-Wert) und Bauteilfeuchte
4.3.1 Kapillarkondensat und Wasserstoffbrücke
4.3.2 Schadsalz-Inaktivierung
4.3.3 Kapillartaupunkt und Mollier-h,x-Diagramm
4.3.4 Fehleinschätzung der örtlichen Gleichgewichtsfeuchte im Winter
4.3.5 Fehleinschätzung des Einflusses der Materialfeuchte auf die Wärmeverluste
5. Klimavorgaben aus der Praxis
5.1 Räume ohne längeren Personenaufenthalt
5.2 Räume mit ständigem Personenaufenthalt
6. Minimale Klima- und Heiztechnik
6.1 Lichtschutz
6.2 Lüftung
6.2.1 Luftbe- und –entfeuchtung
6.3 Temperierung
6.3.1 Ziel der Temperierung: Die Temperatur der Wandoberfläche, nicht die der Raumluft
6.3.2 Rohrmontage, Einputzen der Rohre
6.3.3 Rohrpositionen
6.3.4 Zusatzheizkörper?
6.3.5 Trägheit der Temperierung?

6.3.6 Regelung
6.3.6.1 Absenkbetrieb im Massivbau
6.3.7.Planung von Temperieranlagen
6.3.7.1 Thermografien
6.3.7.2 Emissionszahlen
6.3.7.3 Transmissionswärmebedarf
6.3.7.4 Lüftungswärmebedarf
6.3.7.5 Fazit für Rohranordnung und Betriebsweise
6.3.7.6 Jahresheizwärmebedarf
7. Großbeispiel für Minimalanlage
8. Vergleich Temperierung/Vollklimaanlage
9. DIN-Normen/Regeln der Technik/Stand der Technik/Vereinbarungen im Bauvertrag
10. Zusammenfassung

Michael Kotterer

Standard Climate Values and Climate Control Systems in Museums and Historical Buildings under Discussion

Abstract

The museum Kunstforum Ostdeutsche Galerie in Regensburg participated, with international partners, in the EUREKA-Projekt 1383 PREVENT, which was concerned with climate in museums and historical buildings. During the Museum's renovation from 1989 to 1993, an alternative climate concept was realized which can be characterized by the key words "optimized building envelope / wall tempering / minimized ventilation". Long-term climate measurements as part of the PREVENT Project demonstrated that this concept produces very good, stable climate conditions. The restorer must know to which technical consequences his demands lead in practice and which options are available. Until now, complete *central air* conditioning systems, which perform all climate control tasks: heating, cooling, humidifying, dehumidifying, ventilating, and fresh air exchange together in one central unit, were the "solution" to all climate control problems. However, a detailed reexamination of each of these individual tasks shows that such systems are rather the "problem"; that, in general, air movement is bad, air is the wrong medium for heating, and it is impossible to centrally perform all climate control tasks optimally (or for museums even adequately). The preventive quality of buildings and furnishings must be included in designing climate control systems, so that as little treatment of room air as possible is needed. Complete *central air* systems not only make little sense but are expensive to purchase and maintain. Optimized building envelopes with wall tempering and minimized ventilation have conservational, physiological, energetic, and cost advantages.

This article also considers development of the so-called international climate values for museums. According to a literature study by Holmberg, the rigid demand for maintaining 55% ± 5% relative air humidity should not be seen as a standard. A broad discussion based on relevant recent literature must be initiated. A new American Society of Heating, Refrigeration, and Air Conditioning Engineers standard for museums, libraries, and archives has been published, which takes short-term fluctuations and seasonal variations into account. Instead of the previous rigid values, specific fluctuation control levels are to be maintained.

Internationale Standard-Klimawerte und Haustechnik in Museen und historischen Gebäuden in der Diskussion

Das Kunstforum Ostdeutsche Galerie Regensburg beteiligte sich zusammen mit internationalen Partnern an dem EUREKA-Projekt 1383 PREVENT, das sich mit dem Klima in Museen und historischen Gebäuden beschäftigte. Klimamessungen in dem 1989-93 generalsanierten Museum, dessen Klimakonzept mit den Schlagworten „optimierte Gebäudehülle/Wandtemperierung/minimierte Lüftung" charakterisiert werden kann, belegen sehr gute, klimastabile Verhältnisse. Der Restaurator muss wissen, zu welchen technischen Konsequenzen seine Forderungen in der Praxis führen und welche Optionen es gibt. Bisher galt die Vollklimaanlage als Lösung aller Klimatisierungsprobleme, die Aufgaben wie Heizen, Kühlen, Befeuchten, Entfeuchten, Lüften und Frischluftversorgung über das Medium Luft zentral bewerktstelligt. Eine genauere Betrachtung zeigt jedoch, daß zu viel Luftbewegung eher schlecht ist, Luft das falsche Heizmedium darstellt und Folgeprobleme entstehen, statt sie zu lösen. Es gilt die präventive Qualität von Gebäude und Einrichtung ins Auge zu fassen, um eine möglichst

unaufwendige zusätzliche Aufbereitung der Raumluft zu benötigen. Die bisher übliche Vollklimaanlage ist in der Regel unter ganzheitlichem Blickwinkel wenig sinnvoll und teuer in Anschaffung und Unterhalt. In der Verknüpfung einer optimierten Gebäudehülle mit einer Wandtemperierung als Beheizung und einer minimierten Lüftung besteht jedoch ein alternatives Konzept mit konservatorischen, physiologischen und energetischen Vorteilen.

Ferner wird die Entwicklung der so genannten internationalen Standardklimawerte für Museen behandelt. Eine Literaturstudie Holmbergs belegt, dass die strikte Forderung nach Einhaltung von Werten der relativen Luftfeuchte von 55% ± 5% nicht als allgemein verbindlicher Standard anzusehen ist. Eine breite Diskussion muss auf Basis der relevanten neuesten Literatur einsetzen. Inzwischen gibt es einen neuen ASHRAE Standard für Museen, Bibliotheken und Archive, der Kurzzeitschwankungen und jahreszeitliches Gleiten berücksichtigt. Es sollen nicht mehr wie bisher starre Werte eingehalten werden, vielmehr gilt es, bestimmte Schwankungsbreiten zu kontrollieren (fluctuation control level).

The Kunstforum Ostdeutsche Galerie in Regensburg participated, together with international partners, in the EUREKA-Project 1383 PREVENT). Partners included Schloß Schönbrunn in Vienna, the Collection of Ancient Music Instruments of the Kunsthistorisches Museum in Vienna, the Technical University of Vienna, the Gradbeni Institute ZRMK (Institute of Civil Engineering) Ljubljana, and the Haftcourt Ltd. Institute in Stockholm, which works for the Swedish Museums Board. The Kunstforum Ostdeutsche Galerie contributed long-term climate measurements in the Museum, which was renovated in 1989-1993, to the project. The concept of the Bavarian Museum Service (Landesstelle für die Nichtstaatlichen Museen in Bayern) for a new method of museum climate control "wall tempering combined with minimized ventilation and an optimized building envelope" was tested for the first time in a large painting museum (Figs. 1–6) Details of climate measurements in the Kunstforum Ostdeutsche Galerie are given in a companion report elsewhere in this publication.[1]

1 Henning Großeschmidt, Michael Kotterer, Wolfgang Kippes, Frederick Boody (Eds.), Climate in Museums and Historical Buildings. Tempering. Schönbrunn Palace Scientific Series, Vienna 2004.

Until now, complete *central air* conditioning systems were considered the solution for climate control problems. Restorers and curators must know, however, to which technical consequences and financial costs their demands lead, with conventional planning practice, and which alternatives are available. To recognize alternative possibilities, the subjects of ventilation / fresh air exchange rate, cooling, heating, humidifying, and dehumidifying will be considered in more detail. Furthermore, the preventative quality of buildings and furnishings will be considered so that the simplest equipment for treating room air is sufficient. Finally, the prevailing so-called international climate standards will be

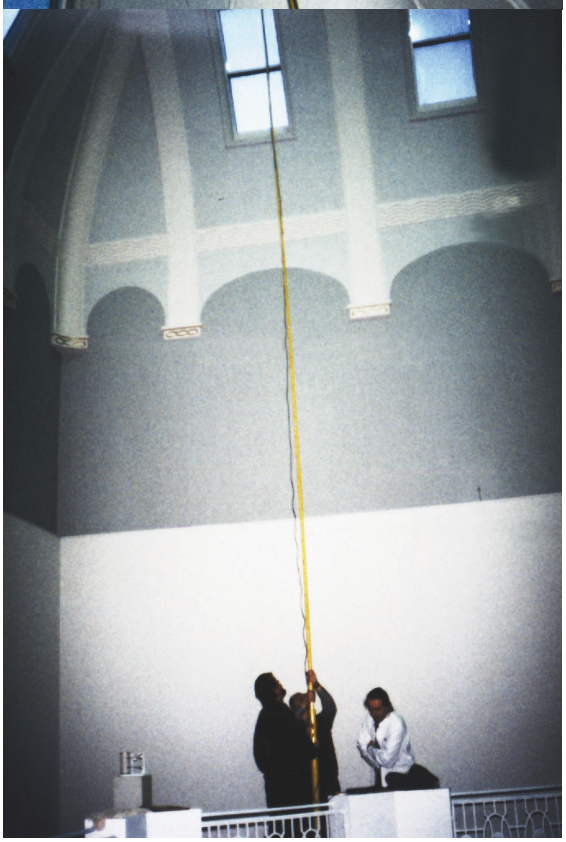
Fig. 1:
The Kunstforum Ostdeutsche Galerie Regensburg. View from southeast. Photo Wolfram Schmidt, Regensburg.

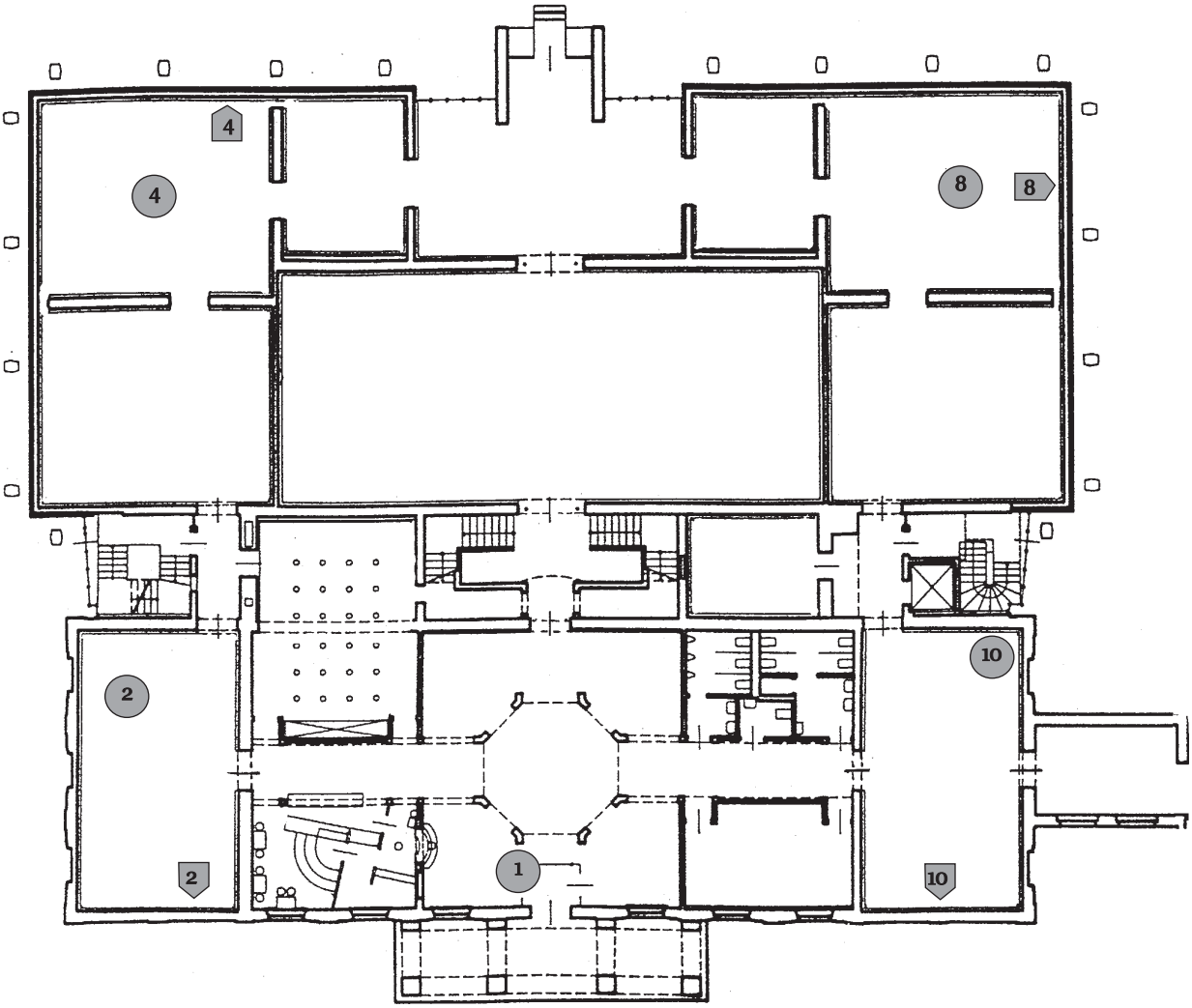
Fig. 2:
The Kunstforum Ostdeutsche Galerie Regensburg. View from southwest. Photo Wolfram Schmidt, Regensburg.

Fig. 3:
Sensor for temperature and relative air humidity behind paintings on outer walls. Photo author.

Fig. 4:
Sensor for temperature and relative air humidity in the room middle, often mounted under a bench. Photo author.

Fig. 5:
Temperature measurements in the 16-m high entrance hall. Photo Henning Großeschmidt, Munich.





1 Main Entrance
2 Room
2 Wall East
4 Room
4 Wall West
8 Room
8 Wall North
10 Room
10 Wall East

Fig. 6:
Distribution of the climate measuring points on the ground floor of the Kunstforum Ostdeutsche Galerie... per room two measuring points, one behind a painting on an outer wall and one in the room. Details of climate measurements are in an accompanying report on the CD-Rom. The figure is based on a floor plan by Arnulf Magerl, Neutraubling

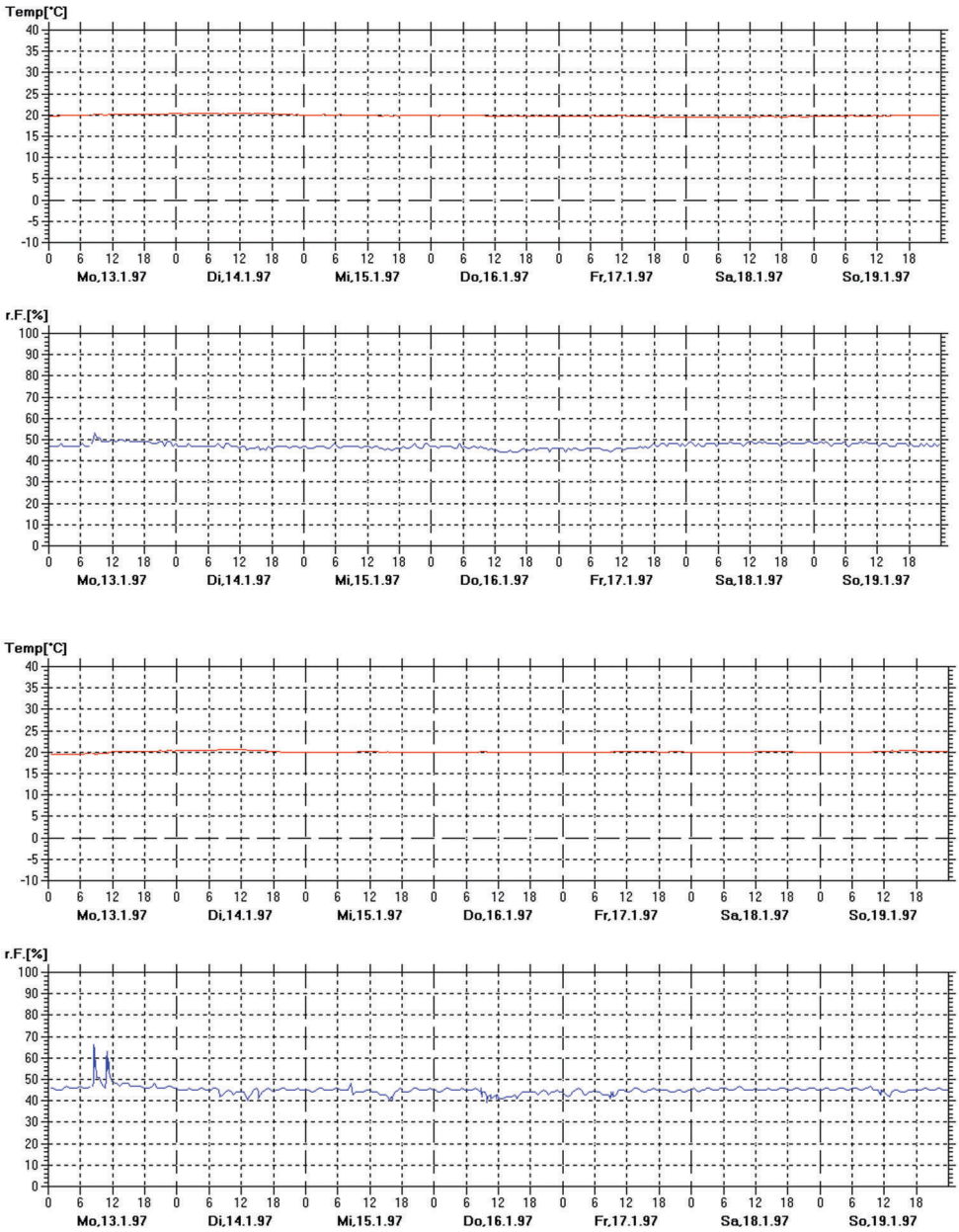


Fig. 7a,b:
Weekly climate curves for maximal outside temperatures of -10°C. The upper curves show the climate values behind a painting on an outer wall, the lower the room values. The temperature uniformity behind and in front of the painting is evident; the cold wall problem has been solved. On Monday, two humidity peaks can be seen that were caused by wet cleaning of the floor. The cleaning staff continue their work after their usual breakfast break. The humidity peaks measured just above the floor are pronounced, behind the painting they are reduced. Otherwise the humidity curves are very flat and balanced.

presented, how they came about, and whether they actually continue to be recommendable.

1. Doubts about the Complete Central Air System Solution are justified

"An 'ideal climate' can be artificially created in buildings of any type of construction with complete central air conditioning systems." This has been proclaimed as "the solution" for museums since the 1960's. Complete central air systems are mechanical systems for conditioning room air that are supposed to even out the effects of a building's type, furnishings, and use on the room climate, so that a desired state of the room air can be maintained within given boundaries.[2] Complete central air systems contain components for heating, cooling, humidifying, dehumidifying, and ventilation / fresh air exchange with which the room air is conditioned centrally. If one or more of these components are missing, one speaks of a partial central air system or of a simple ventilation facility. Doubt

[2] Portions quoted directly from Günther S. Hilbert: Sammlungsgut in Sicherheit. Part 2. Lichtschutz und Klimatisierung, Gebrüder Mann Verlag Berlin, 1987, p. 142.

about the advantages of complete central air systems is valid however, because these in practice by no means guarantee always-stable conditions. Fluctuation ranges in the relative air humidity can occur with complete central air systems that are not smaller than those in non air-conditioned rooms. A corresponding study was published by May Cassar in 1994.[3] None of the fully air conditioned museums that she studied that were planned with the goal of maintaining fluctuations in relative air humidity within a range of ±5% over the whole year achieved that goal. Conversely, other museums without complete central air systems performed just as well (Fig. 8)

Complete central air systems circulate large quantities of heated and humidified or cooled and dehumidified air. They require large air exchange rates for physical reasons, in general from a minimum of 2 ACH up to 8 ACH and more (air exchange rate is given in ACH, air changes per hour, the number of room air volumes exchanged per hour). Drafts and stirring up the dust in the room is scarcely avoidable.

Complete central air systems must be quite large, based on the maximum cooling or heating load. Their installation, maintenance, and operation are correspondingly expensive. With their enormous air throughput, in case of disturbances, they can cause strong climate changes very rapidly and maintain them until the disturbance is corrected. Complete central air systems can thus

3 Tadj Oreszyn, May Cassar, Keith Fernandez: Comparative Study of Air Conditioned and Non Air Conditioned Museums, in: IIC, Preventive Conservation: Practice, Theory and Research, IIC Ottawa Congress, London 1994, pp. 144-148.. Similar studies of other authors on office buildings come to the same result.

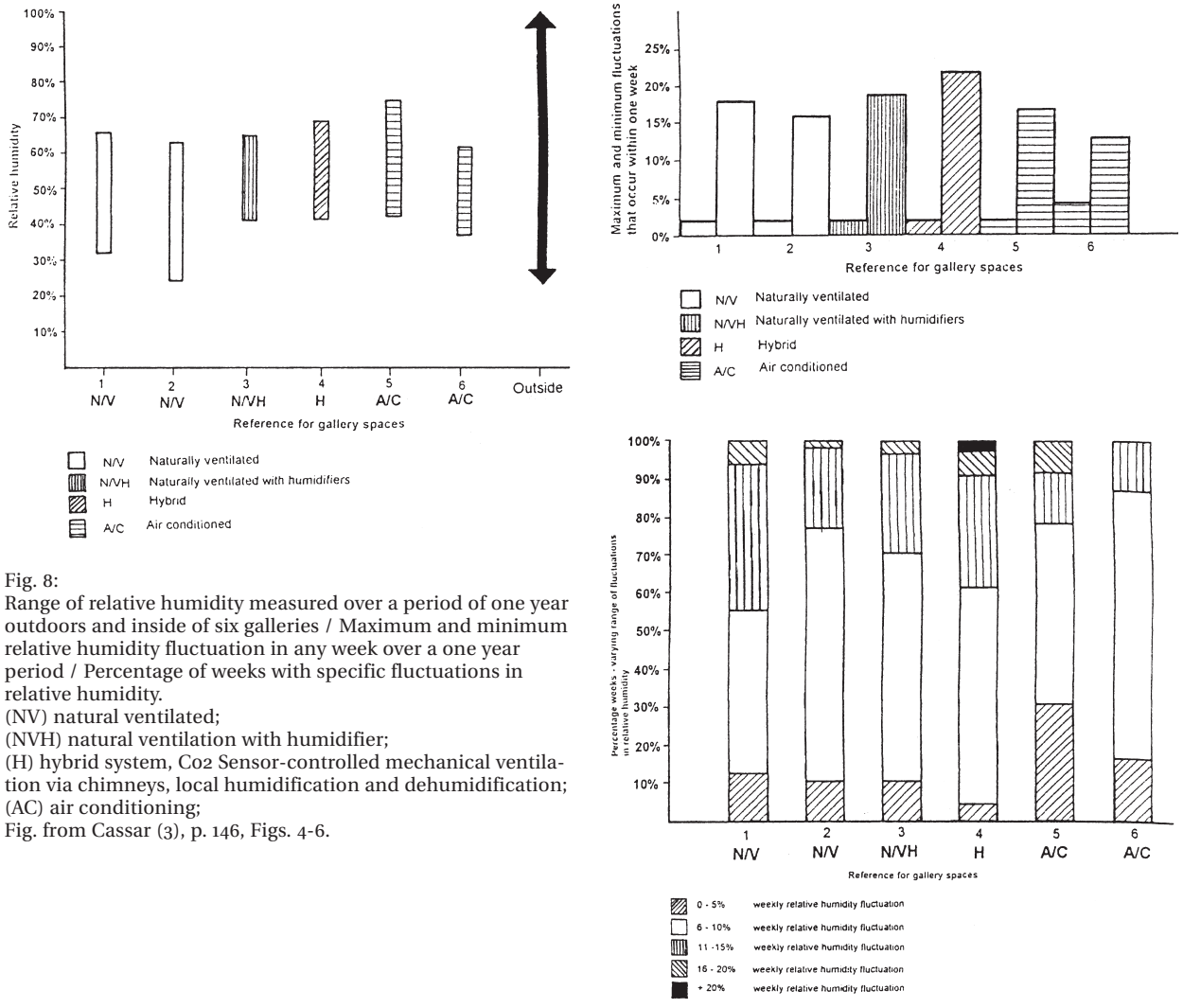


Fig. 8:
Range of relative humidity measured over a period of one year outdoors and inside of six galleries / Maximum and minimum relative humidity fluctuation in any week over a one year period / Percentage of weeks with specific fluctuations in relative humidity.
(NV) natural ventilated;
(NVH) natural ventilation with humidifier;
(H) hybrid system, Co2 Sensor-controlled mechanical ventilation via chimneys, local humidification and dehumidification;
(AC) air conditioning;
Fig. from Cassar (3), p. 146, Figs. 4-6.

suddenly present a conservational danger. What is less likely if single components fail, that the whole facility will be idled or that the cost of its economically and ecologically questionable operation will become too high? Since complete central air systems are mostly used in an attempt to compensate for the deficiencies of inappropriate museum architecture, the museum that is dependent on the continuous operation of a complete central air system would undoubtedly have to evacuate its works of art if the central air system fails.

"Modern" museum architecture, which is oriented less towards the interior and above all towards the exterior, leaves narrow limits for achieving conservational standards. The prerequisite for a "good museum" is an elementary understanding of building physics. Instead our museums have converted themselves into high-tech "conservation machines" that have comfortable room temperatures and are flooded with light. Only turning away from this ecologically outlived concept and returning to passive conservation mechanisms minimizes the risk to the cultural artifacts entrusted to us. It is known that conservationally sensible preventive concepts are difficult to achieve in competitions and planning practice against the interests of the architects, planners, and consultants involved, particularly as long as their fees are based on the amount of technical hardware installed.[4]

[4] 4. The largest part is quoted directly from Andreas Burmester: Der moderne Museumsbau. Konzept des Überlebens oder überlebtes Konzept, in: Museum Heute Nr. 13 published by the Landesstelle für die nichtstaatlichen Museen, Munich, June 1997, pp. 19-29, see p. 26.

[5] May Cassar: Environmental Management, Guidelines for Museums and Galleries, Museums & Gallery Commission, London 1995, p. XII: "The important subject of preventive conservation strategy has a chapter to itself – creating a good indoor environment is not simply a matter of installing a complete air conditioning system in the hope that it will cure all problems."

2. Alternative Climate Control Concepts

Passive and active climate control methods

The Museums and Galleries Commission of London no longer suggests complete central air systems and recommends other passive and active climate control methods. In the Handbook from May Cassar[5] strategies are described in detail for how one goes about the planning work, in order to successfully be able to control, stabilize, in the everyday life of the museum monitor, and maintain the interior climate. The preventive quality of buildings and their furnishings are the central point. The building and its furnishings should be so designed that only minor conditioning of the room air is necessary.

Examples of passive methods are, above all, massive walls as well as the optimization of the building envelope through insulation of lighter-built external building parts; a massive building envelope has the characteristic of being able to attenuate exterior climate fluctuations. Additional methods are: Sealing joints, enabling controlled air exchange and minimizing problems due to uncontrolled ventilation; establishment of climate stabilized zones through airlock entries (vestibules with airtight doors) and separation of entrance areas from exhibition areas; separation of stairwells from exhibition areas (chimney effect); establishment of specially protected areas for the most sensitive artifacts as well as the use of display cases (air tight, potentially climate stabilized with silica gel) up to the use of "painting display cases," few centimeter thick glass integrated into the picture frames; use of hydroscopic moisture storing materials for interiors; limiting artificial lighting to a conservationally sensible level (max. 150 lux measured at the object in case of paintings, 50-80 lux in case of works on paper), in order to combat unwanted heating in summer, as well as external sun protection on windows, glass walls, and skylights for the same reason.

Active methods include local humidification or dehumidification with individual room devices, which can be maintained and exchanged without problems, in contrast to centrally installed humidifying and dehumidifying components in ventilation systems. Furthermore, the control of the ventilation through "natural" ventilation (without fans) by controlled opening and closing of windows, shafts, etc., and by "mechanical", motor driven ventilation e.g. through use of decentralized minimized ventilation systems in the form of fans in exhaust chimneys, controlled by sensors.

Smaller museums often require no mechanical ventilation, rather only control of the so-called "natural" ventilation. Larger museums on the other hand

often require a mechanically assisted fresh air supply for visitors. If truly necessary, possibly using central ventilation and air cooling systems with humidification and dehumidification. One should be clear however about the principal disadvantages of central facilities, whether as pure ventilation, partial air conditioning or complete central air systems. They require space, are difficult to integrate into historical buildings (ducting, central unit, etc.), and have problems. The more tasks the facility must fulfill and the higher the chosen air exchange rate is, the larger the facility must be and the higher the capital, maintenance, energy, and follow-on capital costs.

A climate concept that considers the preventative quality of the cooperation of the building structure and its furnishings in order to minimize the effort required for additional conditioning of the room air is more advantageous than the "blind" complete air conditioning of a given building with only minimal buffering capacity, which is the solution with the highest financial and space requirements. It is useful to discuss once again the task of ventilating and the points cooling, heating, humidifying, and dehumidifying individually.

3. Ventilation

3.1 Fresh air exchange rate

An essential criterion for evaluating climate situations in buildings has not been considered in the general discussion up to now: the frequency of the exchange of the room air volume with exterior air. Holmberg[6] proposed as early as 1989, at the ICOM Conference in Den Haag, a new classification / evaluation of museum buildings in view of the damage potential of too high of fresh air rates. The amounts of fresh air from natural and mechanical, controlled and uncontrolled ventilation (building joints, joints from openings, etc) are measured (infiltration rate). The results are evaluated according to a table. Under half a building volume per hour: excellent (level A), up to one volume per hour: good (level B), up to two volumes per hour: moderate (level C), up to 5 volumes per hour: poor (level D), between 5 and 10 volumes per hour: very bad (level E).

Only an enclosed air space can be climate stabilized. Most historical buildings, even after sealing the windows and other leaks, have a minimum “natural leakage” of 0.3 volumes per hour (generally however even higher). Even better values of 0.2 to 0.1ACH can be achieved only with modern buildings and with great effort. Windowless earth contact basement rooms, as a rule, lie under these values. Occupied rooms (visitors or staff) must be ventilated in order to remove pollutants from building materials, artifacts, or exhaled CO_2 from visitors, etc. and to supply fresh air. Indeed a maximally tight building envelope is required for controlled air exchange, on the other hand: there are no too-tight buildings, only poorly ventilated buildings. The key to attenuating the effects of ventilation incidents (climate fluctuations) and the accumulation of pollutants from outside lies in controlled ventilation. Unnecessarily high amounts of fresh air cause high conditioning costs and energy consumption, as well as high level of filtration, because appropriate filters are definitely necessary with large mechanical ventilation systems.

Up to one ACH is sufficient as a rule in exhibition areas (dependent on the number of visitors). In the German technical literature, 10 m^3 per museum visitor and hour is the basic fresh air standard. In the USA 8 m^3/h and in Sweden 4 m^3/h are considered sufficient.[7] These values still lie clearly above the physiological limit of 0.5 m^3/h for light activity. In this sense, ventilation and air conditioning systems are mostly clearly over-sized. The basis for this in Germany is to be found in the regulations for locations where people congregate, for which 20 m^3/h is prescribed, even for rooms without approval for smokers, without this having a physiological basis. For the areas in museums where collections are housed, however, the German regulation is not valid. Still, in common planning practice, these regulations are applied to the whole building, even though the conditions of use are based on situations that may exist only in the entrance area or in a

6 Jan Holmberg: Technical Classification of Museum Buildings, ICOM-ICAMT Den Haag 1989, in: EU 1383 PREVENT, Report No 7 from Swedish partners, Stockholm 1997, Part D, see p. 3.4:. Holmberg also describes the “Tracer Gas Method” with which one can very simply measure the infiltration rate.

7 compare to (6).

lecture hall/media room or at vernicages. Also, exaggeratedly high, fictitious numbers of visitors that have never been reached, are often the reason that facilities are designed to be too large.

High air exchange rates are generally to be avoided in storerooms. A maximum of 0.1 ACH, when occupied, is sufficient because of the low personnel traffic. This value, for example, could be used as the target for an exhaust fan in a windowless storeroom. If necessary, in continuous operation this would guarantee a base level of mechanical ventilation for removing pollutants.

3.2 No over dimensioning

Over dimensioning of ventilating and air conditioning systems must definitely be avoided in museums. During unfavorable conditions, over-dimensioned facilities tend to high frequency dynamic load changes, due to the clock frequencies of regulators. Under-dimensioned facilities do not have this disadvantage. They can only cause slow changes in room climate that are conservationally of no concern. The potential for danger in case of regulation problems or failure is smaller.

For example, ventilation and air conditioning systems with sensors for relative humidity. The measurement of air humidity is still one of the hardest and most demanding measurement tasks, not only because of the hysteresis phenomenon (hygroscopic materials, as in humidity sensors, change their electrical capacitance rapidly due to the binding capability of water molecules when adsorbing water vapor but, for the same reason, release the adsorbed water vapor with a delay when the humidity of the surroundings decreases). The best conventional capacitive sensors have an accuracy of ca. ±2%, however ±3–5% and more is realistic for most. Mechanical sensors have even worse levels of accuracy. In principle, there are "uncertainties" in maintaining as well as achieving given relative humidity levels, the tolerance levels between which ventilation and air-conditioning systems regulate. In addition, there are errors due to improper handling, operation, or positioning of measurement sensors. A further problem is the need for regular maintenance and recalibration. Hand-held electronic instruments, which operate with the same capacitive sensors, are also bound by these tolerances and the necessity for maintenance and recalibration.[8]

[8] Jan Holmberg: Relative Humidity in Historic Houses, Museums and Museum Storage Rooms. A Literature Study, EU 1383, Prevent-Report No. 1 from Swedish partners, Stockholm 1995. Contains also a broad presentation of climate measuring technology and its associated problems.

3.3 Alternative Ventilation Concepts

3.3.1 Ventilation Concept of the Kunstforum Ostdeutsche Galerie

The ventilation facility of the Kunstforum Ostdeutsche Galerie, which has components for heating and humidification of the air but not for cooling, could be operated after the renovation at air exchange rates of 0.1 and 1.0 ACH. However, and air exchange rate of 1.0 ACH turned out to be unnecessarily high in many cases. Thus, in 1997 the ventilating facility was modified to allow operation at four levels with the addition of exchange rates of 0.4 and 0.6 ACH. The fresh air portion can be varied using a fresh air damper, which can be set to different positions or completely closed so that the facility operates only with recirculated air. Although the building is still not tight in some places, for “low” numbers of visitors and the minimum fresh-air fraction needed for air quality we were able to humidify adequately in winter with min. 0.4 ACH (minimum of 45% relative humidity). In January 1998 during the Janosch special exhibition between 10 and 16 o’clock with 0.6 ACH, even a peak day with 2000 visitors could be handled without problems with a higher fresh-air fraction. That corresponds to ca. 333 visitors per hour, divided between the large central room used for special exhibitions and three smaller rooms. The total volume of all 20 climate controlled rooms is ca. 10,000 m^3.

Doing without a cooling component and use of “night cooling” with one ACH (i.e., we ventilate only at night in midsummer) were an essential part of the planning concept. External sun protection, which belonged equally to the concept but could not be realized at first, demonstrated itself as essential during the period of strongest solar radiation (We reached 31 °C). Since this was added in

1997, we have exceed room temperatures of 24 °C for only a few weeks and have reached a maximum of 27.5 °C (for 40 °C outside). A cooling component would be necessary only if, in summer with high outside temperatures, we had to continuously supply fresh air during the day for a large number of visitors.

If needed for openings, the central large special exhibition hall can optionally receive almost all of the air from the ventilation facility, which normally would be divided equally among the exhibition rooms. Because hardly any visitors are in the other rooms during this time, ventilation for these rooms can temporarily be closed off. This way an air exchange rate of 1.3 ACH can be reached temporarily in the central room during openings.

Because, for normal numbers of visitors, we ventilate only at night in summer, for openings in the special exhibitions hall, which normally take place mornings at 11 o'clock, there is a small problem that can however be neglected because it lasts only a few hours. For very high rates and concentrations of visitors in this hall, we must also ventilate there during the day and bring the, at this time of the day, hot midsummer air into the building. It would be better if the fresh air supply could be cooled down to a minimum of 24°C or, without a cooling subsystem, could be drawn in through a cool sub-surface channel in the earth.

3.3.2 Schönbrunn Palace Ventilation Concept

Measurements in Schönbrunn Palace have clearly demonstrated that it was not large number of visitors but rather variations in outside climate that resulted in strong variations in room climate there. The cause was the surprisingly high rate of uncontrolled air exchange of up to 15 to 17 ACH.[9] This resulted in the room climate following the external climate with little delay. For 8,000 visitors on peak days, during opening hours each room would theoretically house 40 persons. A ventilation concept was developed to reduce the high uncontrolled air exchange rate. The unwanted ventilation through widow joints was reduced by sealing them. Service rooms and lounges were created in newly covered courtyards for crowds and groups of visitors, from which the visitors could be led in small groups on various tours through different room sequences. Fresh air was then supplied only when sensors detected no dangerous climate variations (too humid, too dry). Through historic chimneys equipped at the top with exhaust fans with regulated rotation speeds, air movement through the building is controlled and the air is pretreated in an environmentally sensible manner using a ground-to-air heat exchanger (a luftbrunnen or "air well"). Thus is a hygienically and conservationally sensible minimum air exchange rate approached. The realization of this concept is nearly complete.

9 Wolfgang Kippes: Luftwechsel in historischen Bauten, Vienna 1999. Jan Holmberg: Ventilation Measurements in Schloß Schönbrunn, Vienna, with Tracer Gas Technique, PREVENT Report No. 5 from Swedish Partners, Stockholm /Wien Nov. 1996. Wolfgang Kippes: Climate Management and Air Flow Control. Zu den Ursachen der Raumklimaschwankungen im Schloß Schönbrunn, PREVENT, Report No.3, Austrian Partners, Vienna 1997.

4. Cooling

How should one cool? The cooling load in a building should be kept as small as possible through passive measures such as massive walls, external sun protection, and appropriate reduced lighting (11.5 W/m² installed load in our building, 15 W/m² in the Kulturspeicher in Würzburg [a large, heating-pipe tempered museum]). Cooling a building by circulating large amounts of cooled air (as with a complete central air system) seems the worst possible solution when one considers the economic and environmental damages that occur at modern museums with large transparent surfaces, without external shading, and with high light levels in summer that must be continuously artificially cooled, with correspondingly high energy consumption. However, in earlier times, traditional massive-walled buildings, with high rather than wide windows, guaranteed tolerable rooms in summer without complete central air systems. In order to avoid additional heating through the entry of fresh air on hot summer days, it is recommendable only to supply fresh air at cool night temperatures (night cooling). Ventilation motors should be located outside of the transported air stream and, if possible, outside the housing of the central unit, so that they also do not

unnecessarily heat the supplied fresh or recirculated air (we have measured a temperature rise of 1-5°C depending on air volume-flow rate).

If the existing room volumes in a building are too small, so that during hot summer days with many visitors it is necessary to supply fresh air during the day and thus not possible to wait until night, an alternative measure would be to cool the necessary daytime fresh air flows with a cooler at the lowest air exchange rate possible. This approach to planning is not comparable with "customary" complete central air systems because, when the visitor load is heavy, only the fresh air physiologically necessary for comfort is provided, but not that required for the basic cooling loads of the building. In this publication a tempered museum with a minimized complete central air system, with an air exchange rate of one ACH, will also be presented, namely the Ernst Barlach Haus, Stiftung Hermann F. Reemtsma, Hamburg. Environmentally sensible precooling of fresh air supplies can also occur using so-called Luftbrunnen ("air wells"). Fresh air is drawn in slowly through large cross-section channels below the constant temperature level in the ground where it is "earth cooled" (or "earth heated" in winter).

5. Heating

With conventional heating, the so-called "room temperature" is some composite of the "higher" heating air temperature and the "lower" radiation temperature of the surrounding walls. Because the temperature of the heating air is clearly higher than that of the wall, there is an amplified need for humidifying. For equal room temperature and relative air humidity to those in a room with "radiation heating," the absolute air humidity in a room with "air heating" is higher. As a heat transfer medium, the higher temperature "heated" air has higher air pressure. This causes increased air exchange, resulting in water vapor and energy losses. In museums, conventional systems that distribute heat by heating the room air mass are at a disadvantage. This includes forced air central heating, the heating component of a complete central air system, and radiator (or more correctly convector) heating, but also floor heating. Even though floor heating indeed heats the air to a much smaller extent, the heat rises from the complete floor area, carrying dust with it that is regularly recoated on the floor. These all have (floor heating correspondingly less), due to their identical principles of operation, the same conservational, physiological, and energy consumption disadvantages. Which heating method is then most advantageous?

5.1. Tempering

Tempering is a now a proven alternative method of heating. It produces a homogeneous, conservationally advantageous radiation climate. It is important conservationally that acceptable room conditions for visitors are reached in collection areas at temperatures as low as 18°C (with appropriate layout higher temperatures can also be reached without problem). The radiant heat passes through the air without heating it and thus reaches all room areas without creating drafts, including the feet, which are left "standing in the cold" with conventional air heating because the cooled off "hot air" flows over the floor to the radiator. An increase of the air temperature in the upper part of the room (from head height upward) does not occur as it does with convective heating due to the continuous rise of warm air. With tempering, the body can transfer a large part of the heat of metabolism to the cooler room air via the lungs, while, with "air heating," breathing physiologically too warm hot air requires that the entire heat of metabolism must be lost through the skin.[10]

In comparison to conventional heating methods, wall tempering can cause only slow changes of room temperature, which is conservationally desirable, because the installed performance per square meter of outer wall is small compared to hot air registers or radiator/convectors, which can affect the whole room air volume in a short time. Tempering is more energy efficient and less expensive to install than conventional heating systems (examples in PREVENT

[10] Henning Großeschmidt: Heizen und Sanieren im Museum und Architekturobjekt, in: Schutz für Museumsgut, Rheinisches Museumsamt: Cologne 1991, pp. 31-58, see pp. 47-49. Henning Großeschmidt: Das temperierte Haus, sanierte Architektur und Großvitrine, in: W. Fuger und K. Kreilinger (Eds.): Aspekte der Museumsarbeit in Bayern, Museumsbausteine Volume 5, Munich 1994, pp. 101-116; Henning Großeschmidt: Das temperierte Haus, sanierte Architektur und Großvitrine, in (1). (1) is the most extensive publication about tempering and also contains many tips with regard to its installation.

publications document energy savings of order 20%). Because the room air is not warmer than the wall surface since it is not used for heating purposes, the energy and water vapor losses caused by ventilation are also minimized. The absolute air humidity can be kept lower for the same relative air humidity. This reduces the size of the apparatus required for air humidification.

In principle, tempering works by heating a strip of plaster at the wall base, usually by 1 or 2 small diameter hot-water heating pipes, located 0.5 to 1.5 cm under the surface of the plaster but also possibly on the surface. This results in slowly rising warm air next to the wall, which distributes the heat uniformly over the rest of the wall surface. The so warmed wall radiates into the room. Since the mass of the room air is not involved, dust is not transported. For windows (heat loss surfaces without storage mass), the heating pipes can be routed underneath the windowsills or as loops in the sides of the window openings (for more details see Großeschmidt in (1)).

5.2. Planning a Tempering System

In all of the German-speaking part of Europe, there are only a few planning offices with enough experience to be able to plan tempering systems for museums on their own. Because, as a rule, guarantees are sought from the planner for specific room climate values, but not for specific conservational qualities of the room climate (slowly changing climate values, no drafts, no circulation of dust, minimal need for humidification, etc.), most offices use "proven" systems up to complete central air systems which, as always, are part of the standard education in the field. If, as usual, the planner's fee is based on the total building cost,

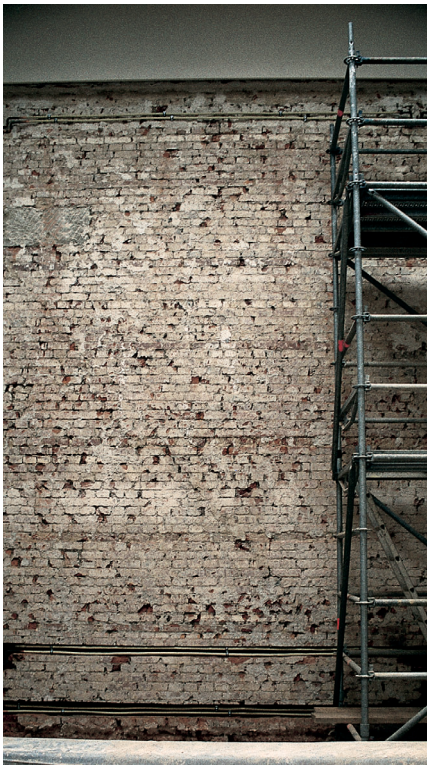


Fig. 9-10:
Städelsches Kunstinstitut Frankfurt am Main after renovation 1994—1999. The Italian Hall (red) is in the foreground and the Hollander Hall (green) is seen through the door. This installation is an example of a variation of tempering used for rooms with high walls under a unheated glass roof: ceiling height 6m, 2 loops are located at the wall base and ca. 80 cm above the floor, a 3rd loop is located in the edges of the vaulted ceiling to insure against condensation. Photos: Stefan Knobloch, Städisches Kunstinstitut Frankfurt am Main.

rather than on the amount of planning effort to minimize building and operating costs, a decisive motivational factor is missing. Conventional thinking planners are thus not prepared to put unpaid time into conceiving and developing preventive measures or to busying themselves with the, to them, mostly unknown method of tempering. Many planners are falsely informed about tempering and thus reject it because they do not understand the physical relationships. Tempering also often suffers from "reinterpretation" into a significantly more complex wall-array heating system (wall areas with arrays of pipes, which have been introduced to the market and are expensive) or to a baseboard heating system (small convective heat exchangers along the whole base of the wall, expensive). Both systems have disadvantages. That tempering, however, is a conservationally advantageous heating method has been documented by the PREVENT Project. The experiences presented here within an international framework show that a contract to plan a tempering system only makes sense when it is explicitly based on the published recommendations of the original developer of tempering, H. Großeschmidt of the Bavarian Museum Service (Landesstelle für Nichstaatliche Museen) in Munich. Then even large projects, such as the Würzburg Kulturspeicher (50,000 m³ finished volume), can be realized at a reasonable price.[11]

5.3 The Cold Wall

Cold areas on the surfaces of outer walls, which exist during the operation of warm water/convector, air heating, or complete central air systems because the hot air cannot uniformly interact with all surfaces, are a large conservational problem (Fig. 8). In the heating season, paintings that hang on cold (because they are under heated) exterior walls, particularly with air humidification, can locally have too high material moisture content or even condensation.[12] Maria Ranacher was the first to systematically document this phenomena and coined the term "cold wall problem" for the damages to paintings caused by humidity in winter. In addition, she described the soiling of paintings, walls, and room corners resulting from conventional heating.

One of her examples of temperature measurements in the Kunsthistorisches Museum (KHM) in Vienna, Titian's "Nymph and Shepard," had the following temperatures: upper region of the paint layer surface 21 °C, underneath only 19.5 °C, and on the wall surface behind it 14 °C, for 21.5 °C und 48% RH measured in the middle of the hall on 20.02.1990. On very cold winter days, the wall temperature sank as low as 11 °C. The considerable 7.5 to 10.5 °C temperature difference between outer wall and room air caused intensive condensation. The wall covering behind Titian's painting showed condensation and rust spots (See Figs. 11a & b in the article by Maria Ranacher in this publication). Consequently, climate values must be measured very near to an object, not "somewhere" in the room. Since the cause of the damages (radiator heating) was retained during the renovation of the KHM, a grotesque situation resulted for hanging paintings on the outer walls. They are hung on holders ca. 15 cm from the wall, out of the danger zone. Not only paintings in front of the cold wall, but also the wall decoration and the wall itself can be damaged. The complete solution is thus tempering of the building envelope itself.[13]

6. Dehumidification

Humidity peaks in the summer in interior spaces can be attenuated using conventional dehumidification of the fresh air, if it is not preferred do this less expensively through a small increase in room temperature. Conventional dehumidification through cooling requires three times more energy than raising the temperature. Thus, "Set Point Field Regulation" is increasingly proposed for saving costs with complete central air systems. Hilbert gives values of 20 °C and 45% RH, which are increased in summer to 24 °C und 55% RH.[14]

For rising moisture or earth-contact walls, tempering is the ideal solution to the problem, since the disruption of the hydrogen bonds of the water molecules

11 Harald Weißmann: Die Temperierung des Kulturspeichers Würzburg, in: Oberste Baubehörde im Bayerischen Staatsinterium des Innern (ed.): bau intern, 2003, No. 12, pp. 241-243.

12 Maria Ranacher: Bilder an kalten Wänden, Oberflächentemperatur-Messungen an Wänden und Bildern als Neuansatz für konservatorisch richtige Klimatisierung in Gemäldegalerien, in: Restauratorenblätter, Vol 15, Vienna 1995, pp. 147-163, see Fig. on p. 154. Maria Ranacher: Mikroorganismen- und Schadinsektenbefall im Depot: Ursachen, Sanierung, Hygiene und Gesundheitsschutz, in Das Depot – der andere Teil der Sammlung, Landesstelle für die nichtstaatlichen Museen: Munich 1998.
Maria Ranacher: Staub und Kondensatprävention. Der essentielle Beitrag zu Gesundheit, Sanierung und Prävention für Kulturgut und Architektur im Bereich Museum und Denkmalpflege, in (1).
See also Volker Schaible: Überlegungen zum Phänomen der Schüsselbildung an Leinwandgemälden, in: Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung 2/1990, pp. 235-250, see Fig. 7, p. 238.

13 compare to (10)

14 in (2), p.191.

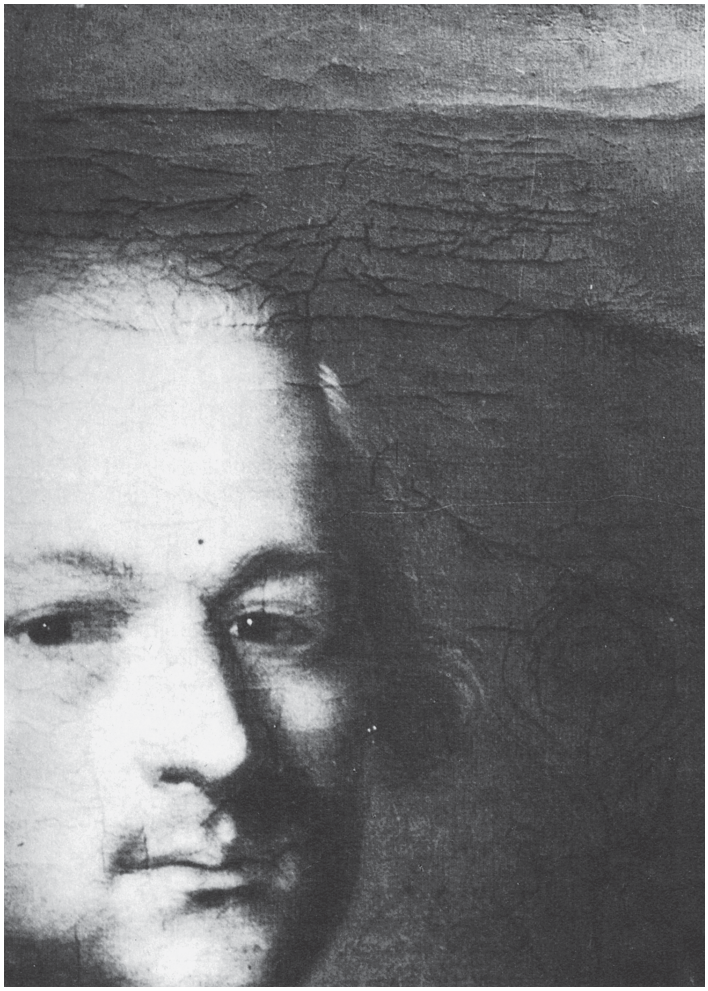


Fig. 11: Situation in January in a museum with complete air conditioning (18°C, 58% RH): Formation of condensed water on the age craquelé of an 18th century canvas painting hanging on an outer wall. Photo from Schaible, ZKK 2/1990, p. 238.

in the wall capillaries by the low but continuous supply of heat stops moisture intrusion from the soil, which is not the case with dehumidification of the air. Additionally the slight increase of the surface temperature of the previously cool wall, even in summer, prevents the moisture in the warm humid summer air from condensing out on the surface and activating damaging salts, which through the volume changes of crystallization cycles would damage the plaster. Plaster damages due to rising moisture and condensation will be continuously prevented as long as the facility is operating (examples are contained in this publication).

7. Humidification

Due to the low moisture content of cold winter outside air (low absolute air humidity), it must be humidified when it is heated up to the temperature of living spaces. Only so can values of relative air humidity be maintained that are bearable for artifacts and furnishings made of hydroscopic materials. The humidification must occur within limits. The danger of damages to buildings from excessive humidification in winter has been pointed out by many authors who make climate recommendations. This is, among others, the basis for deviation from the "international standard" of 55% ± 5% relative air humidity in regions with cold winters. In such regions the lower humidity limit should be reduced in winter because of the danger of building damage, as has long been recommended in the relevant literature (see below).

Evaporative humidifiers are preferable for use in museums. In case of an error by the regulating hygrostat, they cannot humidify above ca. 70% RH, for physical reasons, and thus cannot cause excessive moisture damages. If steam humidifiers are not shut off, they continue to blow out steam into the room until 100% RH is reached and condensation occurs. Ultrasonic humidifiers can lead to deposits of the residual salt from the water conditioning on the exhibited artifacts and thus are to be avoided in museums.

The humidifiers in ventilation and air conditioning systems (evaporative or spray humidifiers but not steam humidifiers, as discussed above) as well as the ventilation ducts that channel the humid air require intensive maintenance and care. Often the ducts are impossible or very difficult to clean and regular hygienic testing of the ducts is almost never carried out. Often, after 15–20 years of operation, they must be renovated, whereby the next generation of ventilation and air conditioning systems will be installed. If one wishes to keep the contamination of the ducts and humidifiers in bounds, UV disinfection of the wash water is unavoidable. Otherwise, chemical additives must be employed. Also, water that is too hard requires chemical additives. At the Kunstforum Ostdeutsche Galerie, we continually check the bacteria count of the wash water that comes out of a deionizer. We regularly clean the central humidifier's reservoir/housing. A UV sterilizer continuously circulates the deionized wash water and sterilizes it. Thus, we can do without chemical additives to the wash water. Hygienic testing includes the air ducts.

Although hygienic tests of ventilation and air conditioning systems are required in Germany and are regulated by VDI Regulation 6022 from 1998 (Verein Deutscher Ingenieure), in practice they are not carried out at many places because sanctions from the oversight authorities (industrial inspection authorities or trade associations) up until now have been scarcely to be feared. Thorough hygienic tests, including bacteria samples, are required for ventilation and air conditioning systems with humidifiers, every two years for evaporative or spray humidifiers and every three years for steam humidifiers, and must be carried out by independent laboratories. Regular short notice hygienic monitoring of ventilation and air-conditioning systems is to be carried out by museum personnel and external specialists: facilities are to be checked for contamination (depending on which facility part, every 1, 3, 6 or 12 months) and, if needed, cleaned by specialists; filters are to be checked regularly and changed if there is visible contamination or leakage, independent of the actual service life and prescribed replacement intervals; the water of evaporative and spray humidifiers is to be checked for bacteria count every 14 days and the humidifier chamber/housing is to be cleaned at least once a month. A check list is included in VDI 6022.

Individual portable room humidifiers are in comparison simple and straightforward to maintain and easy to replace at any time.

8. Values for relative air humidity: Recommendations in the literature

8.1. Overly strict requirements

At the beginning of the PREVENT Project, the Swede Jan Holmberg performed a literature search on recommendations for relative air humidity in historical buildings, museums and storerooms.[15] He established that the strict requirement for maintaining air humidity values of 55%, ±5% resulted from shortened, repeated, and taken out of context portions of the technical literature. These "standards" were self-established and spread uncritically. They are neither very convincing nor well supported scientifically.

15 compare to (8). Summary p. 3.

8.2. War Experience

Almost "legendary" was the effect of storing the collections of the National Gallery of London in a mine tunnel in Wales during World War II. The tunnel was a constant 17 °C und 58% RH and, of course, during this time climate-caused damages to the paintings came to a standstill. Scarcely were the collections returned

to the, in winter apparently locally inadequately humidified museum, when a Rubens panel tore in the very cold winter of 1946/47. The story, told somewhat differently as here, namely with emphasis on the constant values in the mine, lingers until today.

8.3. Questionnaire

A strong "trendsetter" was without doubt the questionnaire (!) about appropriate climate conditions in museums, libraries, and archives published by ICOM in 1960.[16] It remained unclear whether and to which degree the responders could measure or achieve the values they gave. The greatest agreement was found for air humidity levels between 50% and 60% (= 55% ±5%). This questionnaire, as well as many other recommendations, especially with regard to variations in relative humidity, led to the acclamation and the fixation of a questionable international standard.

8.4. Doubts about the established Standards

Michalski[17] stated: "By the 1960's and 1970's, designers worldwide demanded specifications by which to build. The familiar numbers, 50% RH or 55% RH, emerged from many experts ... As before, feasibility became the determinant that determined fluctuations of ±2%, ±3%, or ±5%, depending on ones experience and ones concept of measurement (much of which was naive).

The numbers became standards: Class A, Class I, ideal! Museum users assumed that the values were scientific, based on a significant minimum deterioration. The originators knew 50% emphasized mechanical phenomena and neglected chemical phenomena; they knew it was a nice round number and that the specified fluctuations were not derived from artifact needs. But in the museum word at large, non-conformity became transgression.

The 'best available' feasibility argument assumed that even if it did insignificant good, it could do no harm..."

8.5. Proposals in the Technical Literature

With regard to the safe range of relative humidity for the storage of artifacts in museums, one finds in Thomson a limitation to a range of between 40% and 70% for organic material in the course of a year.[18] As early as 1982, the CCI proposed a safe range of 38%–55% RH with a daily variation of ±3% and a seasonally determined variation of at most 5% per month.[19] The upper humidity level aimed at sinking the material moisture content in summer in order to minimize the facilitation of chemical degradation processes by moisture. In the cold of winter, the difficulty of maintaining high moisture levels in heated inner spaces and the danger of damage to building materials due to condensation were taken into consideration.[20] Dreiner considered reaching levels up to 70% RH in summer for short durations (!) tolerable if the long-term conditions are dryer and steadier and the change is not sudden.[21]

A press release from the Smithsonian Institution[22] has caused heated discussion about standard climate levels in museums since December 1994 in the USA. With reference to the high capital and operational costs of complete central air systems, they distanced themselves from the strict, constant international standard and presented research results from scientists at the Smithsonian's Conservation Analytical Laboratory (CAL) that artifacts in museums tolerate larger safety ranges and can be stored without damage for climate values in the following range: temperature between 11 and 31 °C and relative air humidity between 35% und 65%. Holmberg commented on the strong reaction in the USA as an outcry because of the many complete central air installations.[23] In the course of the discussion, Berger and Russell[24] reminded that the researchers at CAL had unfortunately failed to state the rate at which the climate may vary within this range. Thus, they could very easily be misunderstood, the values could even be used against them. Additionally, it was not stated with which type

16 H. J. Plenderleith, P. Philippot: Climatology and Conservation in Museums , in: Museum Vol. XIII, No. 4, UNESCO, Paris 1960, pp. 243-289, ICOM Questionnaire Table in Annex 1, p. 279. (ICCROM Study: Climatology and Conservation in Museums, Rome 1960).

17 Quoted from Stefan Michalski: Relative Humidity: A Discussion of Correct/Incorrect Values, in: ICOM-CC, 10th Triennial Meeting, Washington 1993, pp. 624-629, here p. 624.

18 Garry Thomson: The Museum Environment, 2nd Edition, London 1986

19 Cited from Holmberg (8), p. 12, compare also (17), Michalski works for the CCI

20 Not only the CCI but also all of the other authors cited here and many others not named who concern themselves with museum climate give lower relative humidity levels of 40% or 50% RH for the cold of winter.

21 K. Dreiner: Neue Untersuchungstechniken und Ergebnisse zu Klimaproblemen, Presented at MUTEC, 19 July 1997 Munich, Answer to a question during the discussion following the talk. A research report would be published: K. Dreiner, P. Klein, I. Zillich: Climate-induced deformations of panel paintings, Universität Hamburg, Ordinariat für Holzbiologie und Holztechnologie, Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft, Hamburg.

22 William Schultz, CAL scientists revise guidelines for museum climate control, in: Smithsonian Institution, The Torch, Dec. 1994, reprinted in waac Newsletter, Volume 17, Number 1, Jan. 1995, p. 23, quoted from the internet edition of the waac newsletter, http://palimpsest.stanford.edu/waac/wn/wn17/wn17-1/wn17-109.html

23 Jan Holmberg: The museum environment – Is the textbook still relevant? A critical review, in: Konservatorskolen det Konegelige Danske Kunstakademi, 25 years School of Conservation, Jubilee Symposium Preprints, Copenhagen May 1998, pp. 57-70, see p. 64. Referring to the book by Garry Thompson, that Holmberg translated into Swedish.

24 Gustav Berger, William Russell: Letter to the editor, in: waac Newsletter, Volume 18, Number 1, Jan. 1996, quoted from internet edition, http://sul2.stanford.edu/waac/wn/wn18/wn18-1/wn18-110.html
Information about earlier Gustav Berger, William Russell, publications in appendix.

of affordable central air system the levels could be achieved. Erhardt, Mecklenburg, Tumosa and McCormick-Godhart, the CAL researchers, made the press release more precise by referring to an earlier publication by Erhardt and Meklenburg, "Relative Humidity Re-Examined."[25]

8.6 Fluctuation Width Risks

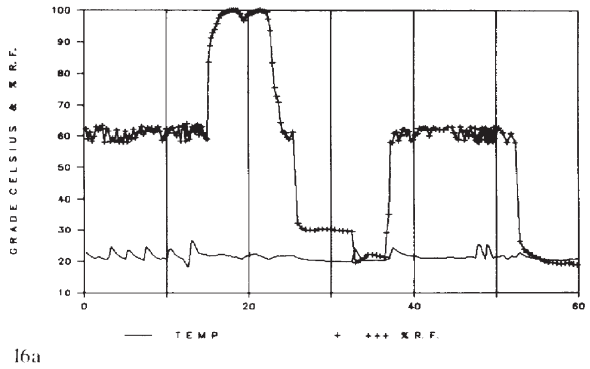
Berger and Russell point out that even small sudden temperature changes, e.g. such as those due to thermostatically controlled facilities (central heating, air conditioning), caused changes in the stress in a test piece of a simulated painting on canvas in a fully climatized chamber. A sudden forced temperature change of 3–6 °C caused a greater change in stress than a sudden air humidity change of ca. 40% for the same test run (Fig. 9). Stress variations due to small sudden humidity changes in the range of 5% are minimal. Sudden small temperature changes are thus damaging and, according to their opinion, must be given greater importance than before. They published such results for the first time in the early 1980's.

A classification of the risks of various fluctuations can be found in a table in Michalski[26] that tries to bring together the knowledge and results up until now (Fig. 10).

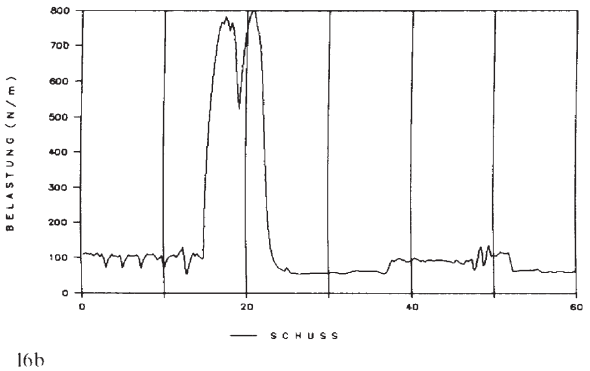
Gustav Berger, William Russell: Interaction between canvas and paint film in response to environmental changes, in: Studies in Conservation, 39/2, May 1994. Berger/Russell: Untersuchungen zum Einfluß der Umwelt auf die Erhaltung von Leinwandgemälden," in: Restauro 3/1989, pp. 191-203.

25 David Erhard, Marion F. Mecklenburg, Charles S. Tumosa, Mark McCormick-Goodhart: The determination of allowable RH fluctuations, in: waac newsletter, Volume 17, number 1, Jan. 1995, p. 19 http://sul2.stanford.edu/waac/wn/wn17/wn17-1/wn17-108.html;
David Erhard, Marion F. Mecklenburg, Charles S. Tumosa, Mark McCormick-Goodhart: More on climate control, waac newsletter vol. 18, Nr 3, Sept. 1996, http://palimpsest.stanford.edu/waac/wn/wn18/wn18-3/wn18-307.html.
David Erhard, Marion Mecklenburg: Relative humidity re-examined, in: Ashok Roy, Perry Smith (Eds.): Preventive Conservation. Practice, Theory and Research, IIC-Preprints Ottawa Congress, London 1994, pp. 32-38; further: Marion. F. Mecklenburg, Charles.S. Tumosa: An introduction into the mechanical behavior of paintings under rapid loading conditions, in: Marion. F. Mecklenburg, Art in Transit. Studies in the transport of paintings, National Gallery of Art, Washington 1991, pp. 137-171; Marion. F. Mecklenburg, Charles. S. Tumosa: Mechanical behavior of paintings subjected to changes in temperature and relative humiditiy, in: Marion. F. Mecklenburg, Art in Transit, see above, pp. 173-216

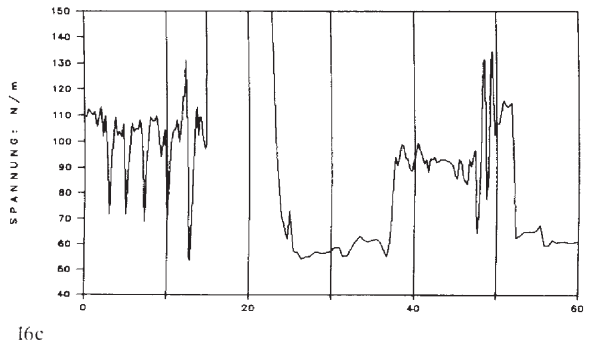
26 Stefan Michalski: Relative humidity and temperature guidelines: What's Happening?, in: CCI Newsletter 14, Sept.1994, S. 6-8, see Table 1 p. 7.



16a



16b



16c

Abbildung 12:
16a: Between the start of the measurement series and the 48th to 50th hours small temperature fluctuations were caused with the help of an air conditioner, similar to how they are caused by thermostatically controlled central AC systems (central heating or air conditioning) 16b: Short-term temperature fluctuations cause strong tension/stress variations. Conversely, short-term humidity fluctuations have almost no effect on the tension under "normal" conditions. 16c: The same measurements as 16b at a larger scale to make the effect of small temperature fluctuations clearer. The tension changes, which are caused in the 14th and 27th hours by temperature changes of 5–6°C, mean more than the changes of the RH from 20–60 % in the 37th hour or the fall of 40% in the 52nd. The fall of RH in the 33rd hour from 30 to 20% was hardly recorded. From Berger/Russell, Restauro 3/89, p. 198.

It is generally known that collections and artifacts in historical connection that have not been stored according to the so called "international standards", which have been in existence only a few decades, but rather under seasonally slowly changing levels have in many cases been well preserved. This was always the case when the storage conditions were appropriate and the room climate was free from disturbances and sudden short-term fluctuations. Low temperatures, for example, do not damage works of art. In 1900, most museums were still not heated in winter. Only afterwards was heating of museums instituted, however at first without humidification so that massive damages due to drying out occurred.

Burmester[27] said that the "self-evident international standards" with their simple prescriptions are certainly problematic. Those who are familiar with preventive conservation have no illusions about the longevity of such simple statements. Correct climate values result from careful weighing of the risks, which requires an exact knowledge of the makeup of the collection. This weighing of the risks can only be performed by the museum's personnel. Only with a differentiated, conservation-science-based approach can a valid answer be found.

8.7 *New Values for Temperature and Air Humidity*

In a table, Burmester presented new values for relative air humidity and temperature for various material groups, which include slowly changing seasonal variations.[28] For example, for paintings on canvas: weekly RH of 50–55%, whereby variations of ±2.5% hourly, ±5% daily, and seasonally 5% more in summer or 5% less in winter are harmless compared to the weekly values. This gives a yearly RH range of 40–65%, for temperatures of 4–28 °C, whereby lower temperatures

27 Andreas Burmester: Die Beteiligung des Nutzers bei Museumsneubau und –sanierung: Oder welche Klimawerte sind die richtigen? in: Fachinstitut Gebäude-Klima e.V. (Eds.), Raumklima in Museen und historischen Gebäuden, Bietigheim-Bissingen 2000, pp. 9-20, see p. 17.

28 See (27), p. 23 Table 3: Sollwerte für die relative Feuchte und Temperatur direkt am betreffenden Objekt. The data trace back to a proposal by W. Eckermann, Deutsches Zentrum für Handwerk und Denkmalpflege Fulda, and Burmester that was previously published in W. Berchthold, A. Burmester, W. Eckermann, H. Großeschmidt, J. Haas, J. Kaluza, G. Puttfarken, Chr. Schimmer, H.-G. Wolf und N. Anastasakou (Eds.), Room climate in museums, Brochure from the Fachinstitut Gebäude-Klima e.V., Bietigheim-Bissingen 1999. Weekly values of the relative air humidity for wood 55-60%; paper 45-50%; metal 0-40%. For mixed presentations, a compromise of the weekly values must be found.

Fig. 10:
Effect of incorrect RH and temperature on museum materials. Table from Michalski (26), p. 7.

Effect of Incorrect RH and Incorrect Temperature on Museum Materials

	Stiff or brittle organic materials[a]	Flexible organic materials, chemically stable[b]	Flexible organic materials, chemically self-destructing[c]	Inorganic materials[d]
Damp (over 75% RH)	Mould. Softening of glue, some paint, wood. Canvas may shrink.	Mould. Softening of size, binders. Textiles may shrink.	Mould. Softening of size, binders.	Mould. Rapid corrosion of base metals.
Above or below a critical RH				For some: corrosion, crizzling, disintegration.
Above 0% RH			Disintegration and yellowing. If object life is 50 y @ 50%, then 100 y @ 30%, 200-400 y @ 10%.	
Fluctuation around a middle RH (stresses are zero)	Rate or risk of fracture growth: @±5%: P, V, A, W: none @±10%: P: tiny W, A: none-tiny @±20%: P: small W, A: tiny-small @±40%: P: severe W, A: small-severe	If brittle image layer, as P. If restrained by frame, etc., as W.	If brittle image layer, as P. If restrained by frame, etc., as W.	Fluctuations crossing a critical RH disintegrate some contaminated ceramics, stones, metal patina.
Temperature too high	Over 30°C, softening of some adhesives, waxes, pitch.	Over 30°C, softening of some adhesives, waxes, pitch.	Disintegration and yellowing. If object life is 50 y @ 20°C, then 200 y @ 10°C, 5000 y @ -15°C	Some minerals disintegrate.
Temperature too low	Embrittlement, e.g., acrylics below 5°C.	Embrittlement.	Embrittlement.	
Temperature fluctuation	Rate or risk of fracture growth: @±10°C: P, V, A: none-tiny @±20°C: P, V, A: none-small @±40°C: P, V, A, W: none-severe Plus indirect effects if RH fluctuates.	If brittle image layer, as P. If restrained by frame, etc., as W.	If brittle image layer, as P. If restrained by frame, etc., as W.	Some composites (e.g., weak enamelling), as P.

[a] For example, wood (W), oil and tempera paintings and polychrome (P), varnish (V), acrylic paintings (A).
[b] For example, non-acidic paper and textiles, parchment, stable B & W photographs.
[c] For example, acidic paper, acetate films, colour photographs.
[d] For example, metals, minerals, ceramics, glass.

have a conservative advantage for the majority of works. The maximum rate of temperature change should be less than or equal to 1°C per hour; temperatures of 24–28 °C are allowable for a maximum of 150 hours per year. In general: The magnitude of changes and the frequency of fluctuations should be as small as possible. Relative humidity is given a higher priority than the temperature, where-by fundamentally the entirety of the requirements is to be observed. Burmester believes, however, that such narrow limits cannot be met in glass or skylight buildings, even with great technical effort. The guideline "±2.5% RH hourly" knowingly orients itself on the limit of humidity measurement and control technology (author's note: see above under humidity measurement, regulation frequencies). The situation thus requires a fundamental rethinking in the design of museums.

A broad discussion must be based on the relevant recent literature, only excerpts of which can be quoted here. In the meantime, there is a new ASHRAE standard for museums, libraries, and archives[29] that considers short-time fluctuations and slow seasonal variations. It is broken down into categories AA, A, B and C, with the categories represent quality levels based on the maintenance of ranges of fluctuations (fluctuation control level) and not on maintaining fixed absolute levels, as before. Category AA represents the old standard while A is the qualitatively equal new standard. Since the material moisture content of hydroscopic artifacts changes accordingly with changes in relative humidity and temperature of the surrounding air (equilibrium moisture content), but this varies between increasing and decreasing moisture content due to the hysteresis effect, the rate of change of the room climate should be kept as low as possible. Seasonally dependent slow variation of room temperature and absolute moisture content, which results in slowly changing RH and thus equilibrium moisture content without sudden short-term fluctuations, does not appear to be dangerous. The tightest possible achievable tolerances are to be used. Thus, one cannot speak of a softening of the standards in a conservative sense. Changes occur in the same narrow borders as before, but not, however, with one constant international mean value, rather they slide slowly up and down within given safety ranges, which are determined according to regional, seasonal, and collection specific conditions. Short term fluctuations within the extremes of the given safety ranges are not allowed.

[29] ASHRAE: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, ASHRAE Applications Handbook, Atlanta 1999, Chapter 20, Museums, Libraries, and Archives. Stefan Michalski: Setting standards for conservation: New temperature and relative humidity guidelines are now published, in: CCI Newsletter, No. 24, Nov. 1999, quoted from the internet publication http://www.cci-icc.gc.ca/whatsnew/news24/temperature_e.shtml.

9. Summary

The result of the project is that with regard to an "ideal" climate it pays to think holistically, instead of hanging on to inflexible levels of temperature and relative humidity. Not only the possibilities and limits of building technical systems are to be considered in a climate concept but also the preventative passive quality of the building and its furnishings as well as the fresh air exchange rate. A new proposal beyond complete central air systems provides a good alternative, as shown by examples. To this new concept belong an optimized building envelope, wall heating which targets the building envelope, and minimized ventilation. Such a concept offers advantages with regard to conservational, physiological, and economical aspects.

BOX 1

Doubts about the complete AC system solution

- Solution with the highest financial requirements: high capital, operating, maintenance and follow-on capital costs ("half life" of the hardware ca. 10-15 years)
- difficult to integrate into historic buildings, high space requirement
- the physically necessary high air exchange rates lead to drafts and to blowing dust into the air
- "cold wall" problem not solved
- conditions not always stable: relative air humidity fluctuation levels as high as in not fully climatized buildings are possible
- danger with inadequate maintenance due to microorganisms in humidifiers, air ducts, filters
- risk of breakdown
- often compensation for inappropriate museum architecture, thus evacuation of the artworks is necessary if the equipment breaks down

Alternative climate control strategies

Overview of passive und active climate control measures

Examples of passive measures

- optimazation of the preventive quality of buildings and furnishings
- massive-walled buildings provide good buffering capacity for external climate fluctuations
- sealing of joints, windows, etc., to enable controlled air exchange
- establish self-contained climate controlled zones, e.g.: air lock entrances, separate entrance area from exhibition rooms, separate staircases (chimney effect) from exhibition zones, etc. establish specially protected zones for especially sensitive artifacts
- humidity buffering materials for building interiors
- display cases in which the climate can be stabilized for individual artifacts
- avoidance of too high heat loads from artificial lighting through appropriate arrangements and conservationally sinful limitation to e.g. max. 10–15 W/m^2
- sun screening, external shading of window areas and skylights, in order to minimize heat entry

Examples of acitve measures

- humidifying and dehumidifying, e.g. with individual room devices
- controlled "natural" and mechanical ventilation
- if necessary central ventilation and air conditioning systems, if needed with central humidifiers or dehumidifiers

BOX 2

Ventilation / Fresh air exchange rate / Infiltration rate

- classification of museum buildings based on their fresh air exchange rate / infiltration rate according to Holmberg
- only a defined, self-contained air volume can be climate stabilized, thus make buildings as tight as possible
- controlled ventilation necessary because of toxins from artifacts and furnishings and because of visitors, key to the reduction of uncontrolled ventilation events and climate fluctuations
- large amounts of fresh air mean the introduction of large amounts of gaseous and solid pollutants; high conditioning costs, high filter effort; large ventilation systems only when absolutely necessary
- as a rule up to a max. of one ACH is sufficient in exhibition areas, depending on the number visitor
- in windowless storerooms without visitors, exhaust fans with 0.1 ACH for exhaust of toxins
- no categorical over dimensioning of ventilation systems because under unfavorable conditions these tend to high frequency load changes, due to regulation clock rates, small dimensioned systems do not have this disadvantage and can only cause the conservationally desired slow changes in room

Cooling

- cooling of building and furnishings heat loads should not be necessary to the extent possible (massive walled buildings, external sun screens, appropriate reduced lighting)
- on hot summer days ventilate/cool only nights. Due to the amount of visitors it may not be possible to wait until night, potentially few degree cooling of additional fresh air at maximal 1 ACH
- ecologically sinful: cooling of the fresh air with a so-called "air well"

Heating

- radiator/convectors, air heaters, floor heaters are being eliminated from museums. Heating up the room air mass causes higher room air pressure which drives water vapor and energy losses, stirs up dust, "cold wall" problem
- tempering the wall creates homogeneous and physiologically and conservationally advantageous radiation climate without drafts. The mass of the room air does not take part in heating, reduced water vapor and energy loss, smaller apparatus required, no "cold wall" problem, energy and capital cost savings

Dehumidification

- a small increase in room air temperature is less expensive than dehumidification of the room air
- "set-point field regulation" also in summer for complete HVAC systems
- condensation on cold walls controllable in summer also with tempering
- tempering ideal for drying out rising moisture in walls

Humidification

- danger of building damage in winter with humidification due to uneven heating of the building envelope with "air" heating
- evaporative humidifiers and air purifier/humidifier combinations (air washers) are preferable to steam and ultrasound humidifiers
- individual room humidifiers are simple to maintain and easy to replace
- central humidifiers and their corresponding duct networks must be intensively monitored and maintained

BOX 3

New ASHRAE Standard

no maintenance of fixed climate values, rather control of the fluctuation levels, Initial value 50% RH, 15-20°C. The new fluctuation levels are designated A, B, C, D in order of decreasing quality while the old standard is retained as level AA, which is considered equal in quality to level A.

Level AA

±5% RH, ±2°C short-term fluctuations, no seasonal RH change, up 5°C, down 5°C seasonal possible

"No risk of mechanical damage to artifacts and paintings. Some metals and minerals may degrade if 50% RH exceeds a critical RH."

Level A

±10%RH, ±2°C short-term, no seasonal RH change, up 5°C, down 10°C possible

or ±5%RH, ±2°C short-term, seasonal RH change ±10%RH, up 5°C, down 10°C seasonal possible.

"Small risk of mechanical damage to high vulnerability artifacts, no mechanical risk to most artifacts, paintings, photographs, and books."

Level B

"Level B is similar to A, but permits unlimited winter setback in temperature, as needed by seasonal museums"

Level C

"25-75% RH year round, temperature not to exceed 30°C in summer"

Level D

<75% RH year round

Felicitas Klein

Renovation of Five Historic Exhibition Rooms in the Städtische Galerie im Lenbachhaus – Part 1

Abstract

Since its opening in 1929, two additions have been made to the Städtische Galerie im Lenbachhaus (1972 and 1984). These buildings were equipped with various heating systems with whose insidiousness one had to battle daily. As part of the renovation of the five historic rooms on the upper floor of the former residence building in 1996, it was decided to install a tempering system combined with evaporative humidifiers. Because the wall coverings were to be redone during the renovation work, the possibility of installing the tempering pipes underneath the wall plaster of the outside walls presented itself. Only in one room, where removing the valuable wall paneling was not possible, the installation was reduced to tubes in the niche in combination with a small radiator. In all rooms evaporative humidifiers were installed in the niches where the radiators were previously located. The humidifiers are equipped with a special housing and a leak warning system. The result is very satisfactory.

Die Renovierung von fünf historischen Räumen in der Städtischen Galerie im Lenbachaus, München

Die Städtische Galerie im Lenbachhaus in München wurde nach der Eröffnung 1929 im Jahr 1972 durch einen Anbau und 1994 durch einen Neubau erweitert. Die Gebäudeteile wurden mit unterschiedlichen konventionellen Heizungs- und Klimaanlagen ausgestattet, die nicht immer zufriedenstellende Ergebnisse erbringen. Bei der Renovierung von fünf historischen Räumen 1996 wurden angesichts der speziellen Anforderungen und der Erfahrungen mit konventionellen Klimatisierungssystemen eine Temperieranlage in Verbindung mit Verdunstungsluftbefeuchtern eingebaut. Da die Wandbespannung erneuert wurde, konnten die Rohre unter Putz verlegt werden. Lediglich in einem Raum, dessen Holzvertäfelung nicht abgenommen werden kann, wurde die Installation auf die Fensternische in Kombination mit einem kleinen Heizkörper beschränkt. In allen Räumen wurden in den früheren Heizkörpernischen gekapselte Verdunstungsluftbefeuchter installiert, die mit einem speziellen Leckwarnsystem versehen sind. Die Ergebnisse sind sehr zufriedenstellend.

A Short History of the Museum

The Lenbachhaus was originally the private villa of the painter Franz von Lenbach. It was designed by architect Gabriel von Seidel and built between 1887 and 1891. In 1925, the City of Munich acquired the building and garden and the Städtische Galerie im Lenbachhaus (Municipal Gallery in the Lenbachhaus) was established, with the collection concentrating on paintings from 19th century Munich. In 1944/5 the building was badly damaged. Reconstruction was completed in 1952. In the following years, the Städtische Galerie im Lenbachhaus received two important donations with paintings from the Blue Rider. It is this collection that constitutes the basis of today's world-renowned Lenbachhaus.

The Main Building

The central building of the Lenbach villa contained the living and reception rooms of the painter and his family. It is here that Lenbach displayed his varying collection of paintings and his own works, which were arranged according to his

own personal preference. These works of art were intended to impress Lenbach's friends and contemporaries and testify to his knowledge of art and his talent as a painter. The five reception rooms on the first floor were badly damaged during the war and had to be reconstructed as historic rooms in 1952. Although the furnishings, which were originally quite opulent, survived for the most part, the rooms were thereafter used as exhibition spaces.

Condition of the historic Lenbach Galleries before the Renovation

The renovation of the five Lenbach galleries was primarily necessary due to their extraordinarily bad climate conditions and also coincided with the decision of the Director to reconstruct Lenbach's original conception and arrangement of the rooms, using the aid of contemporary photographic and written documentation. Up until the recent renovation, the rooms had been heated with an old heating system and humidified at far too low a level. Radiator/Convectors were located in every room, mostly in the window niches and covered with a screen. Due to their old age, they were no longer adjustable. The humidifier had to be filled by the museum staff with a watering can. This was an unpopular task as the nearest water supply could be reached only by a long staircase. Furthermore, the windows, with their single-pane glass and loose fittings, did not achieve acceptable climate conditions for a museum setting. In four of the five rooms are richly decorated and painted wooden ceilings with fragile plaster moldings which, due to dryness in the winter, were in bad condition. The cloth wall coverings, which were installed in 1952, had become black and stained in certain areas. Before the renovation, paintings by Lenbach and modern works related to him, hung on the walls. The different art and decorative objects of the original arrangement, as well as the ceilings, are all very sensitive to climate and, after being restored, should only be displayed under the specific climate conditions appropriate to a museum. Therefore, the establishment of constant climate conditions was considered absolutely necessary for the renovation of the historic rooms.

The planned climatization system was to be effective, affordable, space efficient, and require little maintenance. The task was to establish 50-55% relative air humidity with a usual temperature of ca. 18°C and, on very cold winter days, a minimum temperature not less than 16°C.

Since the opening of the Städtische Galerie im Lenbachhaus, it has received two additions, which were completed in 1972 and 1994. All of the buildings were equipped with different conventional air conditioning systems, with whose disadvantages one had to battle on a daily basis. The requirement for an air conditioning system in the Lenbach Galleries and the experience with conventional climatzation systems led to the choice of a tempering system with local evaporating humidifiers. The flow of fresh air should, due to technical and spatial considerations, be controlled by the occasional opening of a window, when necessary. It was to be expected that these rooms would not receive a large number of visitors.

Conditions after Renovation of the Lenbach Galleries

First, structural problem areas, such as the window fittings, had to be reworked. All windows received a second pane of glass and seals. A glass door was installed in order to separate the climatized area. The tempering in the rooms is invisible. The evaporating humidifiers were installed in the newly empty niches where the radiator/convectors previously had been located. The sensing elements for temperature and humidity are located in one corner of each room.

The tempering system has been in operation since October 1996. Data loggers for monitoring the climate are located in two rooms. Measurements of the humidity and temperature are saved on a memory card every 15 minutes. They can be read out on a chart. Both humidity and temperature are quite stable. During the first months, the new equipment had to be adjusted to achieve the most satisfying results.

Fig. 1:
Städtische Galerie im Lenbachhaus, Partial View. Photo Ernst Jank, Städtische Galerie im Lenbachhaus, Munich.

Fig. 2:
Central Part of the Lenbach Villa with the historical exhibition rooms on the middle floor. Photo Ernst Jank, Städtische Galerie im Lenbachhaus, Munich.

Fig. 4:
Ceiling. Photo Ernst Jank, Städtische Galerie im Lenbachhaus, Munich.

Fig. 3:
Cloth wall covering before the renovation. Photo Ernst Jank, Städtische Galerie im Lenbachhaus, Munich.

Fig. 5:
View of gallery after renovation. Photo Ernst Jank, Städtische Galerie im Lenbachhaus, Munich.

Fig. 6:
View of gallery after renovation. Photo Ernst Jank, Städtische Galerie im Lenbachhaus, Munich.

Fig. 7:
View of gallery after renovation. Photo: Ernst Jank, Städtische Galerie im Lenbachhaus, Munich.

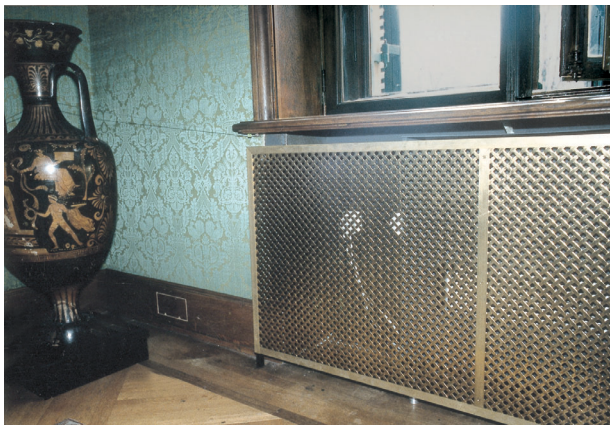


Fig. 8:
Window niche with evaporating humidifier in place of the earlier radiator/convector. Photo Ernst Jank, Städtische Galerie im Lenbachhaus, Munich.

Fig. 9:
Climate sensor in corner of room. Photo Ernst Jank, Städtische Galerie im Lenbachhaus, Munich.

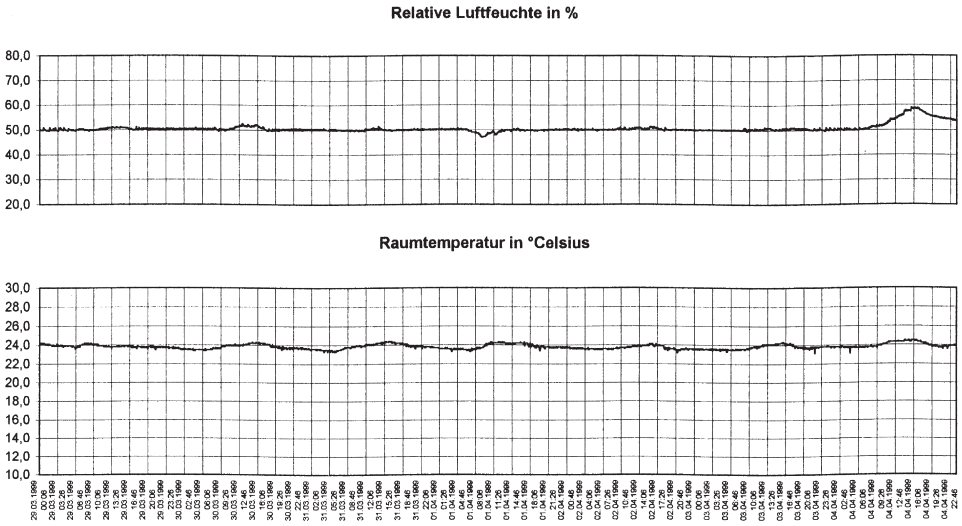


Fig. 10:
Climate in Lenbach gallery after renovation during the week of 29.03.1999 to 4.04.1999. The charts Relative humidity (above) and Room temperature (below) show the desired climate stability. The rate of humidity rise on 4.04.1999 is within the range of conservationally admissible humidity change (under 2% per hour). The increased temperature is due to the hot water supply for the old heating system in the rooms above (radiator/convector heating).

Andreas Hofer

Renovation of Five Historic Exhibition Rooms in the Städtische Galerie im Lenbachhaus – Part 2

The New Method of Heating

Our office received a contract from the City of Munich for a climatization system for the five historic rooms in the middle section of the Lenbachhaus Gallery. We were to plan a climatization system using the best modern technology appropriate to the needs of historic buildings with valuable contents.

The museum's management and we proposed installing a tempering system for heating the rooms, as they have been applied successfully for many years in other museums. The desired climate conditions were clearly defined. The tempering system, together with local humidifiers, was to generate a slowly varying seasonal climate in the rooms. The minimum room temperature in winter was specified as 16°C with a minimum relative humidity of 50%, for an external temperature of -16°C.

We also proposed a tempering system for several other reasons. First, the space requirement for an air conditioning system, especially the ducts, made it impossible to realize such a system in this historic building. Second, the substantial destruction that would have been caused to the valuable historic interior of the exhibition rooms did not allow the integration of such a system. Third, no other system offers so many possibilities as tempering for an efficient installation that also maintains the authentic historic appearance.

The simplest form of tempering, heating pipe tempering, requires only minimal modification to building structure and hardware to implement. The heat from warm water flowing in two small-diameter (18 mm) tubes is conducted to the strip of plaster covering the tubes. There it drives convection in the boundary layer between the room air and the wall surface, transferring heat to the rest of the wall. The whole wall surface, which is relatively uniform in temperature except for the first 30 cm above the heating tubes, then radiates the heat into the room. The heat transfer occurs without any convection in the mass of the room air – thus very little air is moved by the heating system. Only radiation from the warm walls heats the air, contents, and other walls of the room to maintain the design air temperature, in our case 16°C.

Every wall can be equipped with the heating tubes, but normally they are required only for the outside walls. That is because with radiation heat transfer, unless heat is lost through floor or ceiling, the inside walls can be neither warmer nor colder than the outside walls, because they are in radiative equilibrium with the outside walls. The tubes are normally located at the base of the walls, in addition they can be located, for example, in reveals, at lintels, or in spandrels, i.e. near locations where more heat is lost. Where the tubes are actually located depends on both the layout and structural demands of the walls. The length of the tubes depends on the heating requirement of the room. The higher the heating requirement, the greater the length of pipe needed.

Installing heating tube tempering thus consists simply of installing two small-diameter tubes in the walls. At the Lenbachhaus, the tubes are installed under the plaster of the outside walls, in grooves cut into the brickwork. This installation was made possible because, in the course of the renovation, the cloth wall coverings were removed for repairs, giving us the possibility to install the required heating tubes. Conventional heating panels, for instance, could never have been installed this way because they are too big and their radiation is too

concentrated in one spot and thus would have damaged the wall coverings and objects mounted on the wall surface.

In one of the five historic room we had to use another method of heating. This room has historical wooden paneling on the external wall. The restorer found no possibility of removing the paneling without damaging it. Thus, we decided to use heating tubes only in the niche below the window, together with a much smaller radiator.

The energy for heating the complete Lenbachhaus is delivered directly as hot water from a district heating station. A heat exchanger transfers heat to the internal flow loops that heat the Lenbachhaus, including those for tempering the historic rooms. The temperature of the tempering supply lines is controlled according to the external wall temperature (sensor 15 cm behind outer surface). The higher the wall temperature, the lower the temperature of the heating water. In addition to the wall temperature, a second sensor checks the air temperature inside the room. The information from both temperature sensors is transmitted to the control unit and the flow rate is regulated accordingly. The heating loops for the five rooms are divided into two groups, each with its own flow control. All valves, except for the three-way-valve at the radiator in the room with the wooden paneling, are located outside the exhibition areas. This decreases the danger of water damage in case of a leak in the heating system.

Humidification

Because of the installation of the heating tubes in the surface of the external walls, the former radiator niches could be used for other purposes. We chose to install humidifiers here. Each room is equipped with its own humidifier, which is covered by a grill integrated into the paneling.

The choice of the method of humidifying the air in the rooms was not without difficulty. Above all, conservatorial safety had to be considered. The system should never allow the danger of over-humidification. Second, the problem of water damage in case of a leak or burst pipe had to be solved. Third, the humidification of the air in the room had to be as uniform as possible.

Here we had to choose between three kinds of humidification: steam, ultrasonic or evaporative. But which of the three methods would be the best for the application in the historic rooms? Steam and ultrasonic humidification produce an airflow with a relative humidity of 100%. This means that, in the case of declining temperature, the vapor condenses and you can see it as clouds coming out of the grill. This is not acceptable for visitor or restorer. The humidifiers are in areas of visitor traffic and the damage to the interior could be dramatic.

For this reason we selected evaporative humidification. This method has a natural capacity limit and thus there is never a danger of over-humidification, either in regular operation or in case of operating or control errors. With appropriate maintenance, there are no concerns about hygiene. The humidifiers are controlled by two room air humidity sensors, which are combined with the room temperature sensors in one unit.

If the humidifiers had simply been installed in the niches under the windows, without any further precautions, not only would the space between the external wall and the grill assuredly have had too high a relative humidity, but there would also not have been sufficient protection against leaks from the humidifiers or their connections to the water supply lines.

To solve these problems, we constructed special housings that enclose each of the humidifiers. They separate the moist airflow from the niches and collect any water from overflow of the humidifiers or burst tubes. Integrated in each of the housings is a leak control system that closes a valve that shuts off the water supply pipe. Thus we can be sure that there is no accumulation of moist air in the niches or uncontrolled release of water from the humidifiers (see Figure 3).

The final precaution against damage due to an error in the control of the humidification hardware is to decrease the temperature of the tempering system

in a humidity emergency. Should the room air humidity sensor measure a relative humidity under 45%, the control unit reduces the temperature of the water in the supply lines of the tempering system, lowering the temperature of the air in the exhibition rooms and allowing the relative humidity to rise. Thus, if the humidifier is out of order, the humidity emergency decrease prevents dry heating.

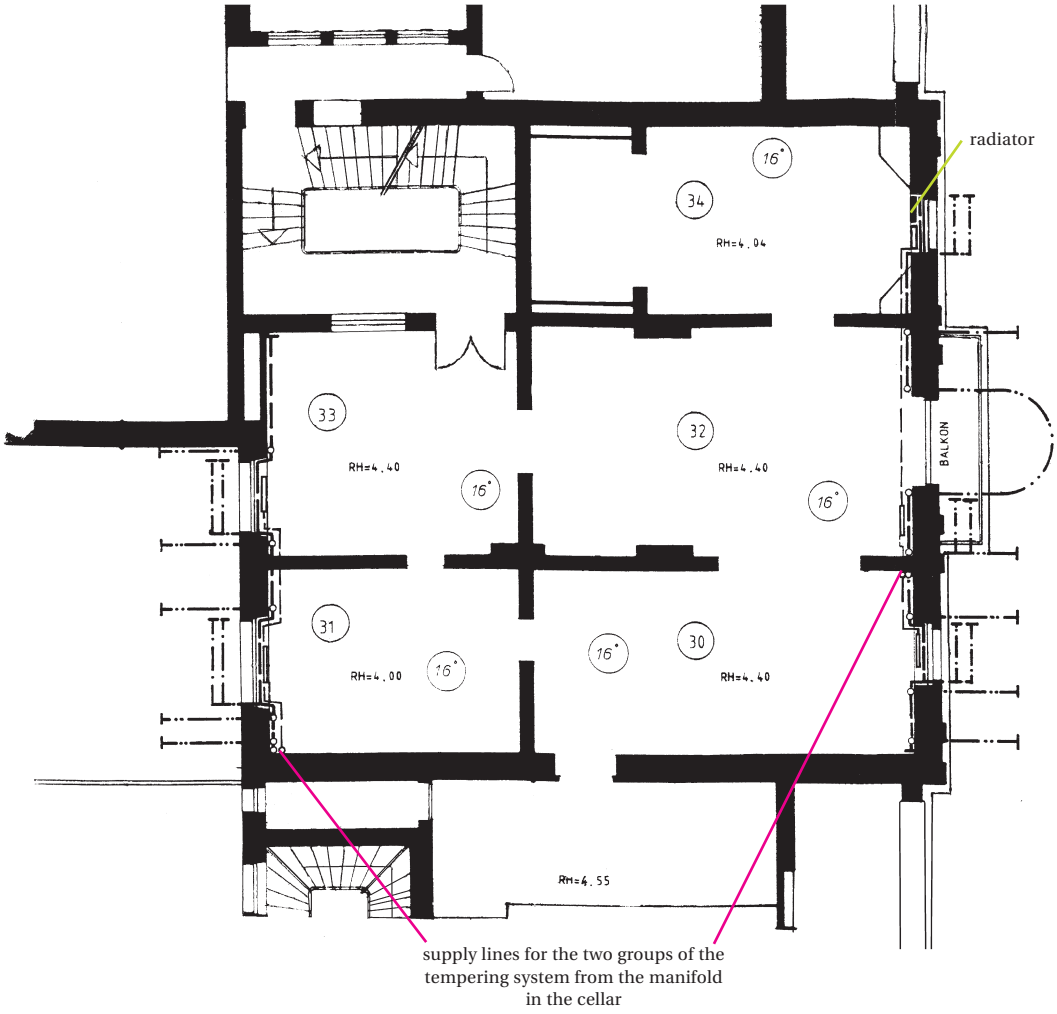


Fig.1:

– – – – – – Heating pipe tempering plastered into grooves at the base of a masonry wall; consisting of two (one above the other) plastic-clad copper tubes.

—·—·—·— Heating pipe loops in the plaster in covered window niches; consisting of two (one above the other) plastic-clad copper tubes.

—··—··—··— Heating pipe loops plastered into grooves in the wall surface near the edges of the window openings (up to the bottom of the lintels), in the room corners (up to the ceiling), and surrounding the balcony door in Room 32; consisting of two parallel plastic-clad copper tubes.

⊣ End or reversal point of heating pipe.

▭ Evaporating humidifier, enclosed in sheet steel housing behind a grill.

— — — — — — Water supply for humidifier installed with heating pipes at the wall base, plastic-clad copper tubing 15 x 1 mm

The heating pipe loops have no branches after the manifolds. Valves for bleeding the pipes within the rooms are not provided. The pipe groups can be cleaned, filled or emptied from the manifolds.

Fig. 2:
Schematic Layout of Tempering in Room 32; Position of Humidifier

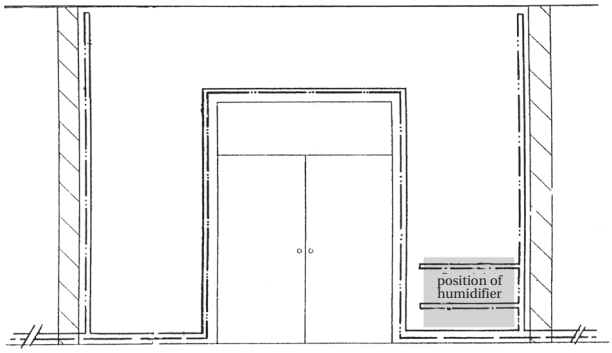
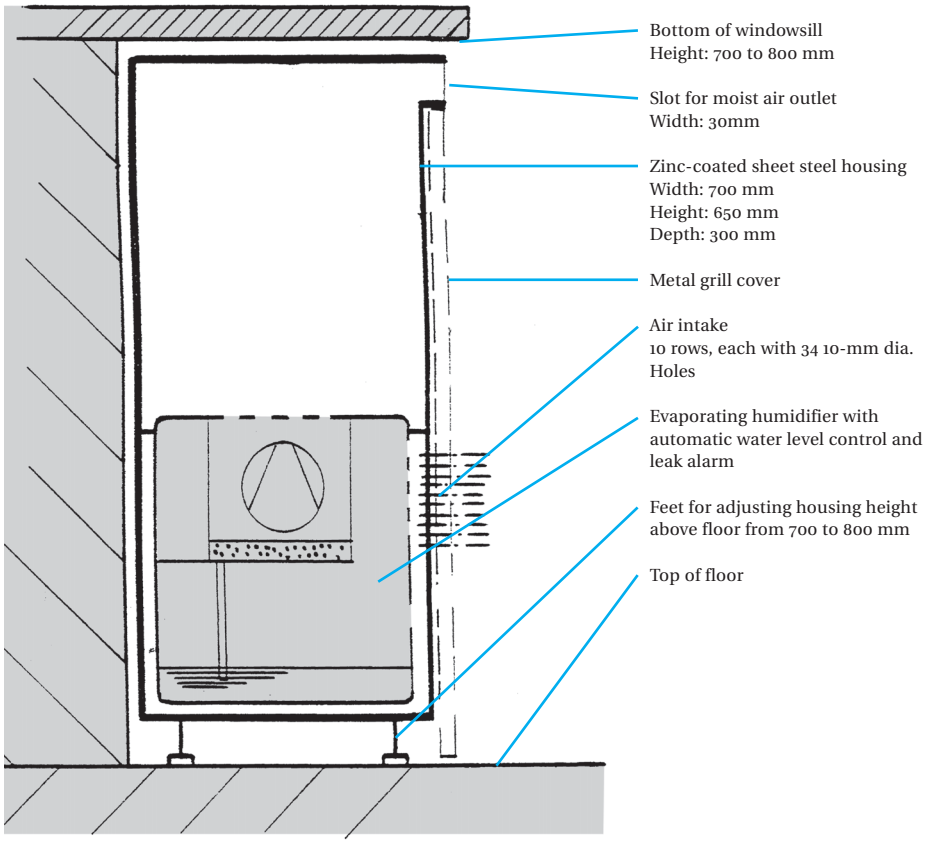


Fig. 3:
Humidifier Detail, cross-section



Jochen Münnich

Expansion and Reconstruction of the Ernst Barlach Haus, Stiftung Hermann F. Reemtsma, during 1995/96 – Part 1

Abstract

The Ernst Barlach Haus was erected in 1962 to house a private collection of the works of the sculptor Ernst Barlach, as a single-story atrium bungalow with one room leading into another in a park on the Elbe River in west Hamburg. Various conventional heating systems and an air conditioning system were originally utilized for cimatization. During remodeling in 1995/96, it was decided to install a combination of a tempering system, for room heating and drying out the damp walls, and a ventilation system, with a maximum flow rate of one room air change per hour, that also dehumidifies the fresh air supply in summer, when sudden thunderstorms can cause pouring rains.

The noticeable reduction in the amount of hardware required for this simplified climatization system and its operation resulted in substantial reductions in energy and capitalcosts. This is possible because the ventilating system does not have to heat the outside walls; it must only heat the small amount of fresh air to a temperature slightly below the room air temperature. An improvement in quality with regard to conservation requirements was also obtained by changing the direction of the flow of air through the rooms, which is now from ceiling to floor, so that dust brought in by visitors remains on the floor rather than settling out on the sculptures, because it is not blown up into the air.

Erweiterung und Umbau 1995/96 des Ernst Barlach Hauses, Stiftung Hermann F. Reemtsma

Das Ernst Barlach Haus wurde im Jahre 1962 zur Aufnahme einer privaten Sammlung von Werken des Bildhauers Ernst Barlach als ebenerdiger Atrium-Bungalow mit ineinander übergehenden Räumen in einem Landschaftspark an der Elbe im Westen Hamburgs erbaut. Zur Klimatisierung wurden verschiedene konventionelle Heiztechniken und eine Klimaanlage verwendet. Beim Umbau 1995/96 entschied man sich für eine Kombination von Temperierung zur Trockenlegung und Raumbeheizung und verkleinerter Teilklimaanlage mit maximal einfachem Luftwechsel. Sie entfeuchtet im Sommer auch die Zuluft, da lokal plötzlich Wetterlagen mit Gewittern und ergiebigen Regengüssen auftreten.

Die deutliche Verringerung des apparativen Aufwandes gegenüber konventioneller Vollklimatechnik führte zu wesentlichen Energie- und Investitionseinsparungen. Dies ist möglich, weil die Lüftungsanlage nur die Nacherwärmung der geringen Frischluftmenge leisten muss, wobei die Einblastemperatur auch geringfügig unter der Raumtemperatur liegen kann. Eine Qualitätssteigerung hinsichtlich konservatorischer Anforderungen wurde durch die geänderte Luftführung erreicht. Die Luftdurchströmung der Räume wurde umgedreht. Sie erfolgt nun von der Decke zum Fussboden, so dass der Staubeintrag der Besucher sich nicht auf den Exponaten ablagern kann, da er nicht in die Raumluft induziert wird.

The building was built by the architect Werner Kallmorgen of Hamburg in 1962 in order to house a private collection of works by the sculptor Ernst Barlach, and is located in Jenisch Park, an English landscape park on the Elbe River in the west part of Hamburg. It was designed as a single-floor atrium-bungalow with connecting rooms. The exhibition area was about 850 m^2. Rather limited storage

areas and other auxiliary space were originally included in keeping with the requirements of the collection. This older building was constructed with a reinforced-concrete skeleton with brick walls in between (double-wall-technique). It is built partially over a low-ceilinged utilities cellar and partially over a full-height basement. Depending on the location within the building, ceiling, floor, or convection heating was used. The air conditioning system was state-of-the-art when built but was not functioning at the time of reconstruction. The fact that the building is set into a slope with layers of groundwater turned out to be a particular problem. The building's foundation stayed permanently damp due to continuous groundwater intrusion. The masonry air channels in the low-ceilinged basement then transferred this moisture to the room air, whose quality suffered as a result.

The location of the building in a low-lying area on the bank of the Elbe, about 5 km west of the city center, produces its particular microclimate. Old oak and other deciduous trees characteristic of Jenisch Park closely surround the building. However, despite some protection from the trees, the building is exposed to gusts of wind from the southwest, which are very strong at times. The building is partially shaded in summer. Finally, this suburban Hamburg area is known for rapidly changing weather conditions and particularly for local thunderstorms with heavy rainfall.

Within one generation, the size of the collection of the Ernst Barlach House more than doubled. This led, together with extended opening hours and a trend toward having more frequent special exhibitions, to the simultaneous need for a nearly 50% expansion of the exhibition and storage areas and a drastic modernization of all of the building's technical systems. The work took 18 months and was completed in summer 1996. About 25,000 visitors per year frequent the museum.

The primary demand on the new climatization and ventilation systems was to deal with the permanent dampness of the foundation. Next an economical, energy efficient solution for establishing a constant interior climate, foremost characterized by 55% relative air humidity, was to be found (range of variation – summer: 60% ± 5%; winter: 50% ± 5%). This value has been determined to be optimal, from a restoration point of view, for the materials of the works of art in the building (wooden, bronze, and plaster sculptures; prints on paper).

To combat the moisture that was intruding into the building's foundation, the building was surrounded with a sheet piling on the side facing the flow of groundwater and the two adjacent sides. This considerably reduced the moisture problem. Furthermore, both in the original building and the addition, tempering pipes were installed under the wall plaster, near the floor and ceiling, which continuously heat the building shell, thus keeping it dry. In the original building, all of the existing heating systems were removed except for some of the floor heating, which was kept at the wish of the owner, but today is unnecessary and unused. Only in the covered Atrium, which is continuously exposed to the outside climate, was floor heating newly installed, also at the wish of the owner, to enable use of the inner courtyard on cold days. However, in practical operation, it is only seldom activated. The ventilation system is designed with only small capacity reserves for economic reasons. Well into reconstruction, it was decided to supplement this with a reserve cooling system, to take into account sudden changes of weather conditions – particularly in summer.

The tempering and ventilation systems have been operating as designed since summer 1996 without complaint. During operation the main control variable, relative air humidity, remains within its prescribed range (summer: 60% ± 5%, winter: 50% ± 5%). Short-term problems occur only with drastic changes between higher and lower outside humidity, which is not untypical for the geographical location of Hamburg between coastal and continental climates.

Gerhard Kahlert

Expansion and Reconstruction of the Ernst Barlach Haus, Stiftung Hermann F. Reemtsma, during 1995/96 – Part 2

Description of the combination of building shell tempering with an air heating and conditioning system with a reduced air exchange rate (1 air change/hour)

As part of the expansion and modernization of the Ernst Barlach House, a climatization concept was to be developed that would retain as much as possible of the substance and infrastructure of the building's technical systems. No visible changes in the inner and outer appearance of the exhibition architecture were allowed. Thus the goal was to use the existing architectural details of the window profiles as well as the shadow joints connecting the walls to the hanging ceilings and the wall bases to the floors for sufficient air distribution in the exhibition rooms.

The direction of airflow to the rooms was reversed. It now flows from ceiling to floor so that dirt from visitors is not unnecessarily suspended in the room air where it can then be deposited on the exhibited works of art. The fresh air supply was completely replaced. Fresh air flows through three central shafts and is then distributed through small diameter (10 cm) round ducts above the suspended ceilings to registers (slits in sheet-metal panels) located above the shadow joints which surround the room. The return air flows through the original air supply, single slots in the bottom of the atrium windows, as well as the shadow joints above the wall-base profiles.

The combination of wall tempering and a reduced, single air exchange per hour, room air conditioning system results in significant savings in energy use and investment costs compared to "full" air conditioning and heating systems. This system results not only in a noticeable reduction of the hardware required but more importantly to a quality increase with regard to conservation requirements (homogeneous room climate, low potential for damage caused by overreaction or failure of the climate control system).

The use of wall tempering for "heating" allows the building's heat losses due to conduction to be compensated directly at the building shell itself (heat loss surfaces). The room air is neither required as a heat carrier nor circulated for the purpose of heating. For this reason, with "wall heating" the airflow rate of an "air only" air conditioning and heating system can be greatly reduced and the temperature of the air is equal to or slightly below that of the wall or room temperature. Through this separation of tasks, the heating component of an "air only" system can be reduced by the amount of heat lost by conduction through the walls, since this is provided by the wall tempering system. The "air only" system's only purpose in winter is to condition the air itself and compensate for ventilation heat losses. These are drastically lower than with conventional systems, which must cover the total heat loss of the room through movement of a much larger amount of air at a high temperature, compared to the average room air temperature. Thus with "wall heating" drafts are eliminated also. At the same time the air quality is higher.

The air conditioning system's job in winter is limited to a small amount of heating and humidifying of a reduced amount of fresh air. The aim of the cooling component, which in summer should limit the room air to 24°C und 65% relative humidity, can also be achieved with less effort to the extent that solar heating and the heat load from artificial lighting are minimized by architectural measures.

Fig. 1:
External View. Photo Ernst Barlach Haus, Stiftung Hermann F. Reemtsma, Hamburg.

Fig. 2:
Atrium, viewed from Exhibition Room. The Atrium has a glass roof, is not climatized and, because it is not externally shaded, heats up in summer. Photo Ernst Barlach Haus, Stiftung Hermann F. Reemtsma, Hamburg.

Fig. 3:
Exhibition Room with neighboring Atrium. Photo Ernst Barlach Haus, Stiftung Hermann F. Reemtsma, Hamburg.

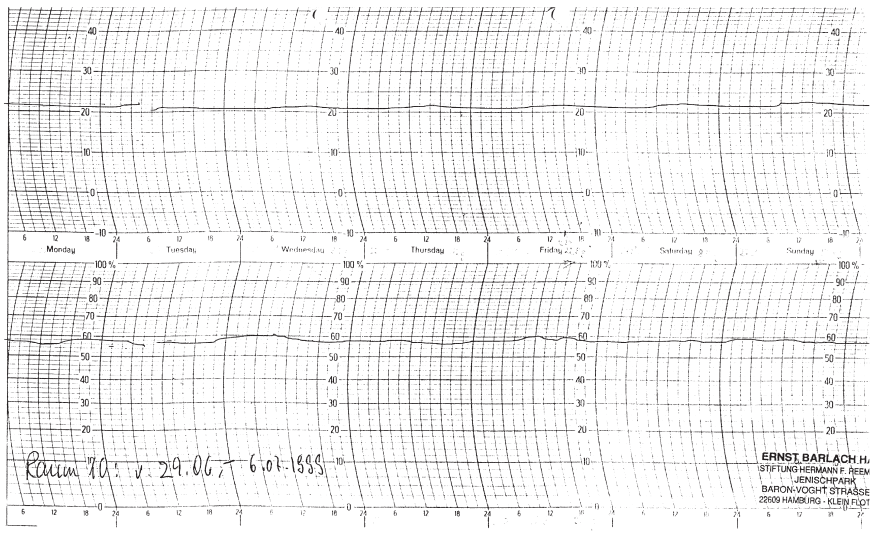


Fig. 4:
Room temperature and relative air humidity in Room 10 from 29/6/99 until 6/7/99. Outside air temperature and relative air humidity recorded at 15:30, precipitation, measured at Hamburg-St Pauli weather station:
2/7/99: 20.7°C, 79% RH, 0.8 mm precipitation; 3/7/99: 29.9°C, 85% RH, 2.4 mm ca.20:30 – 21:00; 4/7/99: 27.3°C, 37% RH, 0 mm; 5/7/99: 27.3°C, 63% RH, 3.6 mm ca.4:00 – 6:30.

Gotthard Voß

Living in Historical Buildings – Restoration of Barfüßerstraße 13 in Halle, a Mixed Residential and Commercial Building

Abstract

Using the example of a half-timbered building in Halle, it is shown that the costs for renovation can be lower than for new construction. This is achieved by retaining as much as possible of the existing building. A tempering system was installed in the uninsulated half-timbered building. The use of tempering has two goals. Because the building will be protected from moisture rising in the walls, the installation of horizontal barriers under the thresholds and the wooden flooring can be avoided. The building is heated through careful placement of the tempering loops in the plaster of the outside walls (along the thresholds with extension loops on both sides of the windows and in the corners of the building). The energy losses from airing are low because tempering is radiation heating. The installation of new "super tight" windows with insulating glass is not necessary; the old windows can be adapted. Not only the capital costs but also the energy requirements are lower with tempering than with conventional heating.

Wohnen im Denkmal
Sanierung des Wohn- und Geschäftshauses Barfüßerstraße 13 in Halle

Am Beispiel eines Fachwerkhauses in Halle wird gezeigt, dass die Kosten für die Instandsetzung niedriger sein können als die Neuerrichtung. Dies wird erreicht, indem möglichst viel alte Bausubstanz erhalten wird. Das ungedämmte Fachwerkhaus wurde mit einer Temperierungsanlage ausgestattet. Der Einsatz der Temperierung hat zwei Ziele: Das Gebäude wird vor aufsteigender Feuchte geschützt, der Einbau einer Horizontalsperre unter den Schwellen und den Holzfussböden kann entfallen. Durch konsequente Verlegung der Temperierschleifen in den Wohnräumen (an den Schwellen und Brustriegeln der Aussenwände mit Umwegschleifen beiderseits der Fenster) wird das Haus geheizt. Da die Temperierung als Strahlungsheizung wirkt, sind die Energieverluste durch Lüften gering. Der Einbau neuer „superdichter" Isolierglasfenster ist nicht nötig, sondern die alten Fenster können adaptiert werden. Nicht nur die Investitionskosten, sondern auch der Energiebedarf der Temperierung sind günstiger als bei konventioneller Heizung.

The slogan "living in historical buildings" is usually meant to be encouraging advertising. It can also be understood as a call to action and relates to an experience which can become an adventure for anybody who moves into an historical building which preserves not only its facade but also allows one to experience something of its original living conditions, the room proportions, the patterns and textures of old materials, and above all the historical traces of its having been lived in.

In such buildings one experiences living qualities that are rarely found in buildings that were renovated according to current standards. Old buildings require the readiness to accept historical conditions, if they are still preservable, to recognize structural details as being valuable and to include them in the new surroundings.

Furthermore, those who lovingly preserve the historical building substance will experience that the restoration of historical buildings, compared to building

anew, will be less expensive, if the proportion of the preserved substance (such as walls, plaster, windows and doors, and flooring) is as high as possible.

For this it is necessary that the owner takes responsibility for his building, urges the architect to preserve old substance, does not rely only on experts, and does not quickly give in to the pressure for certainty in providing a warranty on the work (in countries with building warranties). Such behavior is admittedly unusual in current building practice. But it can result in incomparable living quality for the future residents of the historical building.

The building discussed here is in the Barfüßerstraße in Halle. It was built at the end of the seventeenth century and is one of the few buildings from that time which survived the wave of radical building renovations in Halle and elsewhere at the end of the nineteenth century; buildings which are currently particularly endangered everywhere in the old towns of cities.

The preservation goal for this stuccoed half-timbered registered historical building with more recent saddle roof was to not change its outside appearance. The single-pane casement windows were to be kept, but with a second set of sashes added to the inside to form a double-casement or box window.

In 1993 the buildings at the rear of the courtyard, in which a carpentry shop and a glazier's shop had had their businesses, from the construction of the building until it became empty in the eighties, were torn down. In the course of demolition the connection to the front building was not sufficiently protected, so that it became infested with dry rot.

The condition of the ground floor of the two-story half-timbered wall facing the courtyard, as well as of both exposed beam ceilings in the rear half of the building, was so bad that these structurally important parts had to be replaced to a large extent. Replacement of all of the thresholds and the ends of some of the wooden beams of the gable and inside walls in the ground floor could also not be avoided.

Clay bricks rescued from the building itself and from a torn-down building in the Mittelstraße could be reused between the timbers. Also the rescued dry clay was refilled onto boards installed between the ceiling beams, thus good sound, heat and fire insulation between the stories was achieved. In the attic shredded recycled paper was blown in between the plank-reinforced rafters, where it is kept in place on the bottom by the planking and on the top by insulation panels. The uppermost area of the roof is uninsulated.

The roofing on the backside of the building is a double layer of reused handmade clay tiles and on the front side it is old machine-made clay tiles produced in post-war East Germany. Whereas the front facade is covered with an unpainted lime stucco on a wicker mesh, on the side facing the courtyard a clay stucco with a thin lime stucco layer on top was applied to the partially preserved clay filling between the timbers of the half-timbering and to the clay bricks between the exposed framing timbers of the ground floor. An addition to the rear side deliberately differentiates itself in its form and details from the old building.

In the front half of the building, large areas of older plaster, made of lime mortar, could be saved on the inner walls and ceilings. In the area of the stairs one could make out dark painting of the framing timbers, which overlapped onto the plaster between the timbers in a broad stripe. However, due to the extensive dry rot damage in this area, these interesting discoveries could not be preserved. The walls and ceilings received a double layer of clay plaster on a wicker mesh in the rear half of the ground floor, in the stories above and in the attic.

It was possible to preserve all windows and inside doors. They were stripped, the windows were repaired and fitted with new glass and together with the double windows were refitted into the existing, very carefully recontoured frames.

The building is heated by means of wall-base tempering. For that purpose a gas-fueled central warm-water heater is installed in the attic with distribution manifolds in each of the three stories, from which each room is separately provided with heat. This type of heating system is based on heat storage in and the

drying out of the material of the outer walls, through which a heat insulating effect occurs. Therefore copper pipes were run in the plaster of the outer walls, particularly following the window openings and in the corners of the building.

The building's foundation is also heated below the floors of the ground floor. The resulting drying neutralizes the capillary effect in the walls and thus prevents the rise of moisture. Trusting in this effect, of course with the condition that the wall heating is continued during the summer months, a horizontal moisture barrier underneath the thresholds and the wooden floors was not installed. The heating of the building, which has now run over seven years, provides a constant room climate as well as keeps the building dry. The amount of energy necessary for this kind of heating compares well to that of traditional heating systems.

The City of Halle's Office for the Protection of Historical Buildings made regular inspections during the rebuilding process. During these inspections, the very cautious dealing with the building substance was always praised as being exemplary. Since no requests for changes which would have reduced the historical value of the building were made by the building owner, no arguments with the Historical Buildings Protection Office arose. From time to time an expert for wood protection and another for technical heating questions, particularly with regard to tempering, were consulted. Additionally, a restorer was asked to examine the colors of the facade and another for those inside the building. Uninterrupted construction progress required the regular presence of a construction supervisor, since it was necessary to make decisions on questions regarding details and unexpected problems.

The result of the restoration can be considered as appropriate to the historical building in every respect. The outside as well as the inside of the building can still be recognized after the necessary preservation measures, which inevitably result in some changes of the buildings appearance, and thus an essential goal of restoration has been achieved. Both the store and the apartment on the ground floor as well as the apartment of the owners in the upper stories provide a quality of living that makes it rewarding to live in this historical building.

Fig. 1:
View from the street before Renovation, 1995. Photo Gotthard Voß, Halle.

Fig. 2:
View from the street after Renovation, 1997. Photo Siegrid Schütze-Rodemann, Halle.

Fig. 3:
View of the Courtyard before Renovation, Winter 1996. Photo Gotthard Voß, Halle.

Fig. 4:
View of the Courtyard with Addition after Renovation, 1997. Photo Siegrid Schütze-Rodemann, Halle.

Fig. 5:
Hall on 2nd Floor after Renovation. 1996. Photo Siegrid Schütze-Rodemann, Halle.

Thomas Becker

The Italian Experience

Abstract

The author and two additional planners have tested tempering in Italy under commercial conditions without any relationship to research. The testing of tempering will be described using three examples: In the Palazzo Cattaneo – Ala Ponzone in Cremona, a noble's palace from the 16th century, the tempering pipes were attached at the wall base with mortar rather than being installed under the plaster because of murals. In the Sacro Cuore Church in Monza, built in the 1930's, and a 19th century house in Arco on Lake Garda, installation under plaster was tested. In all cases tempering proved itself and demonstrated itself simple to install and operate, cost saving, and appropriate for heating, conservation, and drying out wet walls, despite initial uncertainties with the planning.

Since then the author has carried out about 100 additional projects with tempering systems.

Erfahrungen mit der Temperierung in Italien

Außerhalb eines Forschungszusammenhangs wurde in Italien vom Autor und zwei weiteren beteiligten Planern die Temperierung unter kommerziellen Bedingungen getestet. Anhand von drei Musterbeispielen wird die Erprobung der Temperierung erläutert. Am Palazzo Cattaneo, Ala Ponzone, in Cremona, einem Adelspalast aus dem 16. Jahrhundert, wurden die Temperierrohre wegen der Wandmalereien nicht unter dem Wandputz installiert, sondern am Sockel auf Putz angemörtelt. In der in den 1930er Jahren erbauten Kirche Sacro Cuore in Monza und einem Haus aus dem 19. Jahrhundert in Arco am Gardasee wurde die Installation unter Putz erprobt. In allen Fällen hat sich die Temperierung bewährt und als zur Trockenlegung, Konservierung und Beheizung angemessene, kostensparende, einfach zu installierende und zu bedienende Methode erwiesen, trotz anfänglicher, planerischer Unsicherheiten.

Inzwischen sind vom Autor ca. 100 weitere Projekte mit Temperieranlagen durchgeführt worden.

This report is about the experiences of a group of three people[1], from various fields of endeavor who are not part of research projects, such as the PREVENT Project, but who have developed an interest in tempering as a method. From our first common projects onwards, a systematic cooperation was established, which quite soon had to take on a commercial character as well[2]. While, as far as I can see, this commercial aspect is of some importance only for our (the Italian) case, it forms part of the following presentation.

To start with, the main tempering relevant characteristics of Italy, or more precisely the Po River Valley:

- extremely high air humidity, in winter (fog) as well as in summer (mosquitoes, tropical climate)
- many beautiful old buildings without cellars, often without foundations, and with clay-based mortar
- no "building physicists" (only professors who do not build)

The above mentioned condition, that the work was done outside of any context of research, thus with no external funding, is one reason that a commercial context had to be found for paying for the time and professional competence

[1] dipl. ing. arch. Thomas Becker, author of this text, dr. ing. Daniele Fraternali, energy consultant, p.i. Carlo Vecchio, planner of heating and air conditioning systems

of the people doing the work. This context, however, did not create ideal working conditions for testing methods for drying out walls and/or room heating which remain anything but the recognized "state of the art" and are not even defined in the DIN or other equivalent standards. But this was our approach: first to test methods, and so recognize and define problems; followed by formulating technical solutions; realizing these solutions in practical terms; determining what, where, did not work as expected and why; attempting improvements, etc.; and, above all, not excluding that the whole approach might have been based on false assumptions and thus must be redone entirely.

No customer would ever want to play this sort of game. In Germany a "Gewährleistung" (warranty) is an absolute requirement. Also in Italy, where it would be difficult to consider warranties a characteristic feature of the relationship between a client and a designer in which he has confidence, the client still expects the designer to ensure that, most of the time, the proposed technical measures lead to the projected results. Thus safety margins are necessary. These, however, raise building costs and make it difficult to determine exactly how large of safety margins are necessary. Sort of like deciding to wear suspenders as well as a belt in order to make sure that your pants do not fall down. You never know if the belt would have held without the suspenders. In several of our cases, unfortunately, where we depended only on the belt, we had to add suspenders later. The following descriptions of 3 typical examples therefore also describe applications of tempering that were not always completely successful, as well as the impossibility at this point to reach definite conclusions, i.e. technical rules deducible from scientifically compelling theories.

1. Palazzo Ala Ponzone-Cattaneo, Cremona

A 16th century noble's palace that has, as nearly always happens, experienced considerable rebuilding and remodeling, the most far reaching being in the Classical style in about 1800. In 1994, after it had stood empty for about 20 years in seemingly ruined condition, above all because its walls were soaked through due to damaged roofs and rising ground moisture, one of the heirs, a Roman duke, decided to restore the building and rent it out as an inn and as an out-of-the-ordinary setting for various events and occasions. The architect, Prof. Alberto Grimoldi, as in all of the historical restoration projects for which he has been responsible, attempted to completely prevent the installation of utilities (heating, plumbing, and electrical) from interfering with the buildings original masonry, in keeping with his views that, on one hand, not only the artistic and art-historical display value of historical buildings but, also, the original structure and substance of these buildings must be retained; and that, on the other hand, the electrical and hydraulic utilities installed in buildings demonstrate the most important cultural representations of our times compared to the past; thus contemporary users of a building must take visible responsibility for the consequences.

The Palazzo is a model case for buildings in which, because of large areas of intact plaster and wall murals, not only can utilities not be installed under plaster, but other possibilities are also limited (for tempering in particular, it may not be possible to install heating pipes around the windows because of colorful surfaces or even frescoes which must be preserved).

Thus, in most rooms, after restoration of the wall surfaces, heating pipes and electrical conductors were installed exclusively on the plaster surface at the base of the wall. The 18 mm diameter heating pipes were installed in contact with the wall, directly above the floor covering and covered with a plaster layer of minimum thickness. The electrical cables were installed in front of the pipes in hollow baseboards mounted on the floor covering. The electrical outlet boxes were mounted directly on top of these baseboards.

A major problem exists if, in addition to preventing freezing and controlling humidity problems (ground moisture rising in the walls and moisture from the air condensing on wall surfaces), room heating is also desired. It is often difficult

Fig. 1:
Palazzo Cattaneo, Ala Ponzone. Oval Salon, looking west. Only the cupola is in the external area. A ring warm-water line on the architrave supplies its heating needs (see cross-section). Photo Alberto Grimoldi, Milan.

Fig. 2:
Palazzo Cattaneo, Ala Ponzone. Cross-Section. Drawing Thomas Becker, Milan.

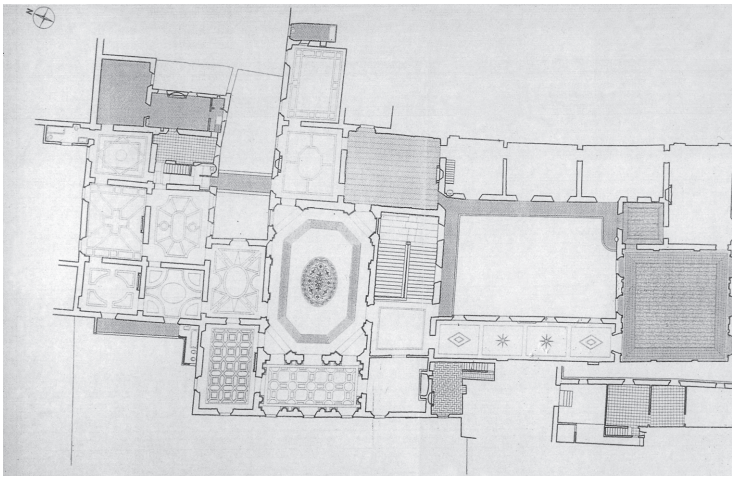


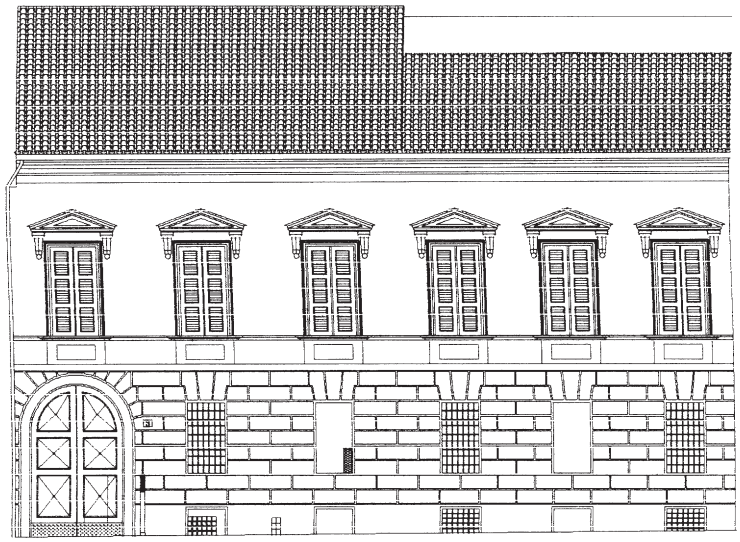
Fig. 3:
Palazzo Ala Ponzone-Cattaneo. First Floor. Drawing Thomas Becker, Milan.

Fig 5:
Palazzo Cattaneo, Ala Ponzone. Loggia: A pipe loop on the two outer walls of the thin-walled building part with single-pane glazing (foreline in layer of mortar at the wall base; return line mounted without a covering at the lower edge of the window-sills) is sufficient for tempering this area. Photo Alberto Grimoldi, Milan.

Fig. 4:
Palazzo Cattaneo, Ala Ponzone. Pompeian Gallery. The water and electrical lines are mounted *on* the building elements: The two heating pipes are under a layer of mortar at the base of the outer walls. On the floor in front of these, underneath a hollow molding, are the electrical cables, which also supply the lighting fixtures mounted on the wall. Photo Alberto Grimoldi, Milan.

Fig. 6:
Palazzo Cattaneo, Ala Ponzone.
Data. Drawing Thomas Becker,
Milan.

PALAZZO CATTANEO - ALA PONZONE



Palazzo Cattaneo – prospetto verso via Oscasali

BUILDING DATA:

a) parts **of building with Tempering System**

. surface:	m^2	2698
. average room height:	m	3.6
. volume:	m^3	9672

b) part of building with convection heating

. surface of heated rooms:	m^2	200
. average:	m	6.25
. volume:	m^3	1250

DATA OF HEATING PLANT:

a) parts of bulding with Tempering system

. total length of pipes installed:	lfm	2200
. total thermal capacity:	kW	80
. thermal capacity per m^2 of surface of heated rooms:	W/m^2	29.7
. thermal capacity per m^3 of volume of heated rooms:	W/m^3	8.3
. energy consumption after 4 months of exercise, including deumidification of brickwalls:	MWh	65
. specific average energy consumption per m^2 of surface of heated rooms:	kWh/m^2	24.1
. specific average energy consumption per m^3 of volume of heated rooms:	kWh/m^3	6.7

b) part of building with convection heating:

. total thermal capacity:	kW	35
. energy consumption after 4 months of exercise:	MWh	27
. specific average energy consumption per m^2 of surface of heated rooms:	kWh/m^2	135
. specific average energy consumption per m^3 of volume of heated rooms:	kWh/m^3	21.6

to find place for a sufficient length of heating pipe. For an assumed energy requirement of 25-30 W/m^2 (not 10 W/m^3!) the needed total length of the pipe pairs foreline + return line) corresponds roughly to the floor area of the rooms to be heated. Given an average room area of 15 m^2 in normal apartment buildings, the proportion between the sum of the lengths of the room walls and their floor area is about 1:1 (obviously not in every single room, but the overall average for an apartment). The length of heating pipes around windows and other high heat-loss surfaces and edges compensates for the length of nonstructural inside dividing walls, which have no heat loss.

With increasing room size and decreasing number of rooms, the sum of the available wall lengths falls below that of the total surface area. Moreover, unless wall height is increased, the effectiveness of radiant heating decreases with increasing distance between the radiant walls or to the center of the room. Thus it becomes necessary to install heating pipes on all walls; also because "non-structural" walls in old buildings often have their own foundations. Still, as in the case of Palazzo Cattaneo, many meters of wall for installing heating pipes are lacking. Thus, since more pipes must be visibly integrated into a difficult context, very close collaboration between architect and engineer is necessary, to which both are often not accustomed.

On many occasions, based on our incorrect assumption at the time, due to inexperience, that the pipes had to be insulated from the room air in order to assure full heat flow to the wall, we accepted the architect's proposal to place them behind the wooden baseboard. Under these conditions, the performance of heating pipes installed in the outer walls is decreased because the surface area of the wall base plaster covered by the insulating baseboard. Thus the amounts of heat convected and radiated from the heated strip of wall base are reduced. To insure the desired room temperature for events, the existing warm air channels in the walls were "revived." They are started a few hours before the beginning of events in order to raise the average room temperature. (Use of these channels was not part of our original plan. It is the suspenders added afterwards; additional unpaid design work performed under warranty. We must tighten our own belts for a while.)

2. The Sacro Cuore Church in Monza.

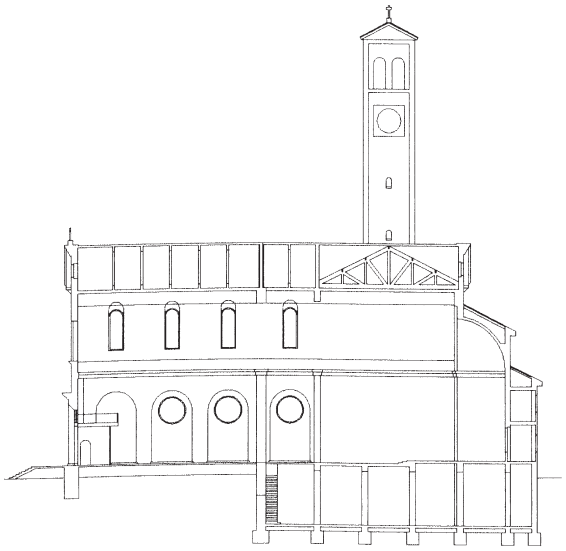
This is also a model case, but for the opposite situation. The building is historically interesting, at best, as an example of the bad architecture of the 1930s under the aegis of Mussolini (in those years quality buildings were also built, but that is not the subject to be treated here). Thus everything may and should be under plaster, allowing the installation, at a low price for this type of very large hall, of as much total length as well as number of pipe loops as we felt necessary, without consideration of nonexistent complex architectural details.

Previously a hot air heating system with a capacity of 350 kW (!) served only half of the 1035 m^2 church hall and only on weekends. The heated half of the church has a basement, a single very large 5-m high room of 748 m^2, which, being cold and damp, was never used before. The 70 kW tempering system, which was installed to replace this system heats not only the whole church but also the basement and all week long. The fuel (methane) and operating costs of the tempering system do not exceed those of the old air heating system (€ 10,000/year).

Because the installation was an evident success from the beginning, the customer, above all the financial officials of the relatively large and well to do community, were very satisfied. Only half of the budgeted sum, which was based on planning for a conventional heating system, was spent.

With such impressive results, we had the possibility to do further research on this building. We have taken advantage of this possibility, via a modem connection to the control center, to collect statistics about what happens if only 2, or

CHIESA SACRO CUORE, MONZA



BUILDING DATA:

a) Church hall:

. surface:	m^2	1035
. average room height:	m	16.0
. volume:	m^3	16586

b) underground (polyfunctional space):

. surface:	m^2	748
. average room height:	m	5.1
. volume:	m^3	3817

DATA PLANT:

. total pipelength:	lfm	2000
. thermal capacity:	kW	70
. thermal capacity per m^2 of surface of heated rooms:	W/m^2	39.3
. thermal capacity per m^3 of volume of heated rooms:	W/m^3	3.4
. specific average energy consumption per m^2 of surface of heated rooms:	kWh/m^2	33.6
. specific average energy consumption per m^3 of volume of heated rooms:	kWh/m^3	2.9

Fig. 7:
The Sacro Cuore Church. Data. Drawing Thomas Becker, Milan.

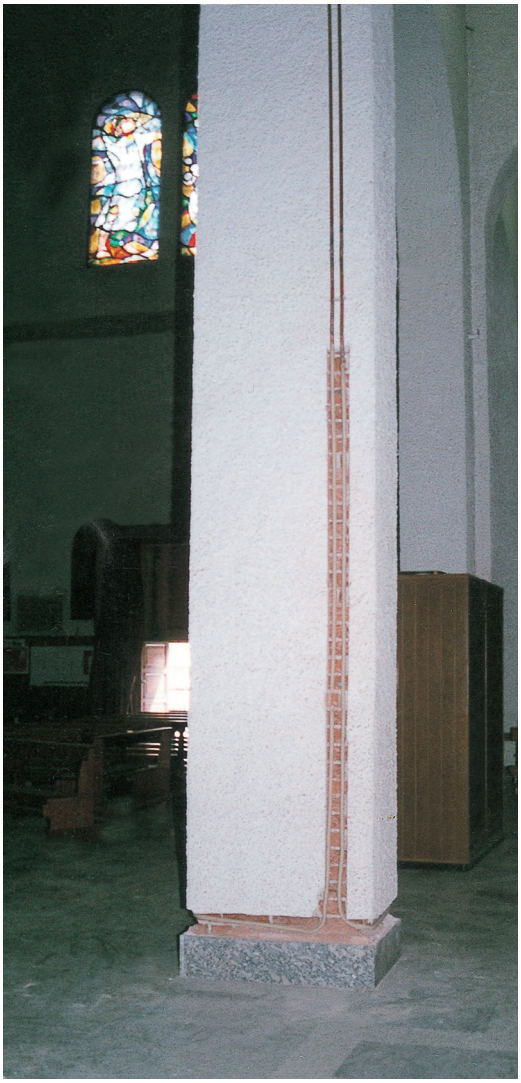


Fig 8a u. b:
The Sacro Cuore Church. Installation of the tempering system. There was no need to preserve the original plaster. Photos Thomas Becker, Milan.

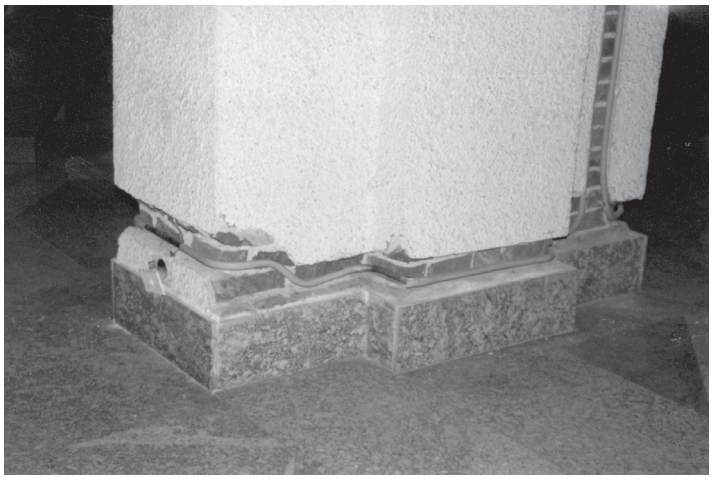
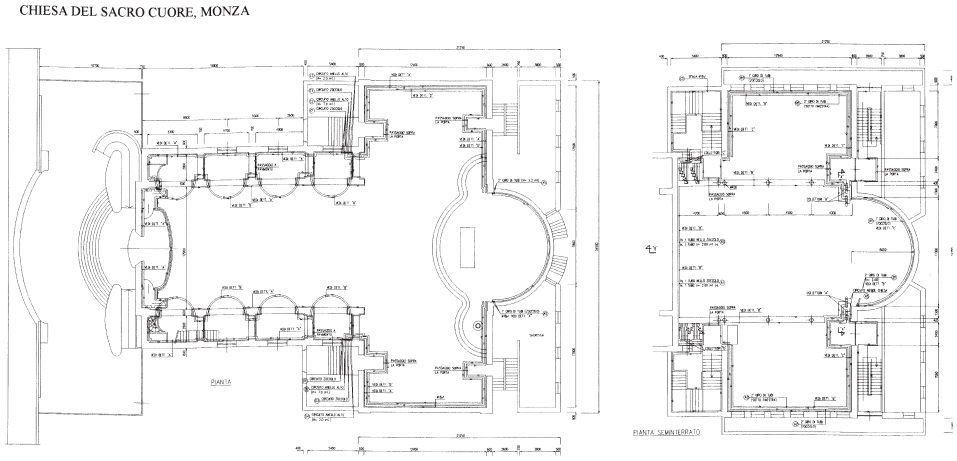


Fig. 9:
The Sacro Cuore Church. Tempering System Layout. Drawing Carlo Vecchio, Milan.



even only 1, of the 3 loops are operated with varying foreline temperatures for various outside temperatures.

3. House in Arco, Gardasee

This is a quarrystone-walled house from the last century, which was radically restored by its last owner after it had been disfigured many times during the previous decades. Here the heating pipes were installed under the plaster not only because there was no concern about the loss of existing building substance but, above all, because "invisibility" of the heating installation was the main concern. In spite of the relatively unfavorable location of the pipes, inside the walls but below pavement level and with a wood floor but without baseboards, during the past winters the tempering system completely met the expectations of the users. We suspect, as another case (a small medieval castle in Cividale in Friaul which was rebuilt in the original style) also seems to prove, that tempering demonstrates its efficiency very quickly with stone walls because they contain much smaller amounts of water than brick walls (especially with clay-based mortar, as in Palazzo Cattaneo).

4. Final considerations

The three cases outlined are a sample from about one hundred completed projects until now. Each represents in various respects one of the possible types of installation:

Installation Type:
- not under plaster
- under plaster
- stone walls

Motivation:
- historical building
- low budget
- aesthetics

These points of view are primarily not scientific but rather, on the one hand, practical and, on the other hand, commercial characteristics, with which I return to my starting point: the working conditions of the planner (who needs to give preference to practical criteria) and the seller (who must see to it that his goods sell) willing to do research at once. The customer does not want to honor scientific results but rather, without discussion, wants to:
- have a warm building
- spend as little as possible on installation (with considerable unhappiness resulting if there are additional charges for planning)
- spend as little as possible on operation.

In addition the customer wants

- to the extent that the use of the rooms is not interrupted, the smallest mess possible during installation (in this aspect the interests of the customer are, under certain conditions, the same as those of the restorer of historical buildings)
- to be able to regulate operation of the system, meaning to be able to decide in which rooms it is preferred to have it a little cooler or a little warmer (for subjective psychological reasons which, as a rule, he does not wish to discuss).

The degree to which these expectations can be fulfilled, or to which the potential customer can be convinced ahead of time that they will be fulfilled (warranty), determines the amount of flexibility available for further research. In this regard we can state that, so far, things have not been going badly.

Since then we carried out about 100 additional projects with tempering systems.

Maria Ranacher

Gesundheit durch thermische Kondensatprävention
Optimales Gebäudeklima für Kulturgut in Museen und Denkmalpflege*

* Aktualisierte Fassung des Beitrages „Staub- und Kondensatprävention" anläßlich der 14. Jahrestagung des Österreichischen Restauratorenverbandes 1999, in: Mitteilungen des Österreichischen Restauratorenverbandes, Bd. 7, Wien 2000.

Abstract

Bislang zu wenig erkannt ist, daß vor allem drei Faktoren Kulturgüter massiv schädigen und auch für den Menschen ein ungesundes Ambiente erzeugen: Saisonal wiederkehrende Kondensation an der Gebäudehülle, Kapillarkondensation an wandnahen Objekten und Staub mit biologischen Partikeln, insbesondere Schimmelsporen. So weist einerseits Insektenbefall auf hohe lokale Feuchte hin, während Bohrmehl und Ausscheidungen wiederum Nährboden für Schimmel sind. Durch veraltete Heizungs- und Klimatisierungskonzepte und durch falschen Umgang mit der Technik ist gerade im Museumsbereich die bereits bauphysikalisch unhaltbare Situation zu einer beträchtlichen Gesundheitsgefährdung angewachsen, die man wegen der auf dem Luftwege verteilten Allergene, vor allem der lungengängigen Schimmelsporen, dringend aufzeigen muß.

Der Beitrag hat vier Schwerpunkte:

1. die Darstellung von Schäden infolge erhöhter Materialfeuchte und ihrer Ursache, der Kondensation an der Gebäudehülle, an deren Ausstattungsschichten und am außenwandnahen mobilen Kulturgut
2. die Darstellung der Staubproblematik anhand alter und neuer Methoden der Wärmeverteilung, der Staubumwälzung durch falsches Heizen, der Gefahr der Sporenverteilung durch Klimaanlagen
3. die Bekämpfung biogenen Befalls an Kulturgütern mittels Gasen und anderen Methoden, wobei giftfreien Methoden der Vorzug zu geben ist
4. Vorgaben für natürliche und künstliche Klimatisierung ohne Bumerangeffekt

Sanierung und Prävention durch Temperierung der Gebäudehülle, um auf technisch einfachem Wege ein gesundes, homogenes und stabiles Raumklima im gesamten Gebäude herzustellen, bisherige Schadensabläufe anzuhalten und den Problemkreislauf von Kondensation, Schimmel und Staub auf Dauer zu beseitigen.

Health trough Prevention of Condensation.
Optimal Building Climate for Preserving Cultural Artifacts and Historical Buildings.

It has been too little recognized that, above all, three factors cause massive damage to cultural artifacts and also create an unhealthy atmosphere for people: seasonally reoccurring condensation on the building shell, capillary condensation on objects near walls, and dust with biological particles, in particular mildew spores. On one hand insect infestation is a sign of high local humidity; on the other hand bore dust and excrement provide a breeding ground for mildew. Through outdated heating and climate control concepts and through false use of technology in museums this unacceptable situation has grown to be a considerable health hazard in particular in the area of museums. Allergens which are distributed by air circulation, above all mildew spores, which can enter the lungs, must be pointed out.

The contribution has four major points:

1. discussion of the damages due to raised humidity in materials and its cause: condensation on the building shell, on its finished surfaces, and on movable cultural artifacts near outer walls
2. discussion of the dust problem with old and new heat distribution methods; dust circulation due to incorrect heating, the danger of spore distribution through air conditioning systems
3. fighting pests on biogene infested cultural artifacts using gases and other methods, for which poison-free methods should be favored
4. requirements for natural and artificial climate control without the boomerang effect

restoration and prevention through tempering the building shell in order to create a sane, homogeneous, stable room climate, to stop previous damage processes, and to permanently stop the vicious circle of condensation, mildew, and dust.

Staub, Schimmel und Kondensation schädigen nicht nur Kulturgut, sondern auch die Gesundheit der Menschen. Kondensation an der Gebäudehülle, Kapillarkondensation in außenwandnahen Feinstrukturen und Staubumwälzung im Raum sind Schadensfaktoren, die durch falsche Wärmeverteilung und Klimatisierung entstehen und insbesondere wegen der dabei verstärkt in die Atemluft eingebrachten Schimmelsporen auch zu einer beträchtlichen Gesundheitsbelastung geworden sind. Ziel dieses Beitrags ist, die Kondensat-, Schimmel- und Staubproblematik an Beispielen von Kunst- und Kulturgut darzustellen und praxisbezogene konservatorische Vorgaben und technische Lösungen für Sanierung und Prävention anzubieten, die die Schadensursachen ohne Bumerangeffekt dauerhaft beseitigen.

Der Museumsstaub enthält Allergene

Staub ist nicht gleich Staub, sondern je nach Herkunft und Genese von unterschiedlicher Zusammensetzung. Schmutz und Staub enthalten neben jahreszeitlich bedingten Pollen immer Schimmelpilzsporen und Bakterien, also Allergene[1]. Schimmelpilzsporen bilden jedoch „den zahlenmäßig bedeutendsten Anteil biologischer Partikel in der Luft. In unseren Breiten stellen sie 96% der Jahressumme biologischer Partikel des Aeroplanktons, während Pollen nur 2% ausmachen". Schimmelpilze zählen daher „zu den häufigsten Auslösern infektiöser oder allergisch-immunologischer Erkrankungen, weit seltener sind andere Infektionserreger bzw. Allergene Auslöser wie Viren und Bakterien, Pollen und Staubmilben etc.", eine Tatsache, die kaum bekannt ist[2]. Menschen, die längere Zeit über Atmung oder Berührung mit Schimmelpilzen und Bakterien in Kontakt gekommen sind, können Sensibilisierungen, Allergien oder Mykosen entwickeln. Humanpathogene Pilze wie Aspergillus fumigatus oder bestimmte Arten von Rhizopus oder Mucor haben schwerste Krankheiten zur Folge, oft mit tödlichem Ausgang.

Für Atemorgane besonders gefährlich ist der unsichtbare Schwebstaub in der Luft, der neben Pollen und Feinstäuben wie Rauch, Ruß, Quarz, Asbest, Metall- und Talkpartikeln verschiedene Arten von Mikroorganismen wie Schimmelpilzsporen enthält[3]. Bei diesem Schwebstaub handelt es sich um kleinste Partikel von 0,5–10 Mikron, eine Teilchengröße, die eine besonders hohe Lungengängigkeit hat und von herkömmlichen Filteranlagen, Staubfiltern und von Staubsaugern ohne eingebaute Hepa-, Ultra-, oder Absolutfilter nicht ausgefiltert wird. Bisher nicht bekannt und untersucht war das Vorkommen von Geißeltierchen im Staub. Bei der mikroskopischen Untersuchung von altem Staub auf Gesimsen in Hinblick auf Bakterien und Schimmelpilzsporen durch den Pflanzenphysiologen Dr. Walter Url, Naturhistorisches Museum Wien, wurden nicht nur Pilzsporen, Bakterien und Kokken gefunden, sondern auch lebende Geißeltierchen, sog. Flagellaten. Nachdem in Archiven und Restaurierwerkstätten Archivmaterial bzw. Museumsobjekte mit Pilz- und Bakterienbefall desinfiziert,

1 Alexander Frank, Über intramurale Pilzsporenbelastung der Luft und deren medizinische Folgen, in: Schimmelbefall in Wohnbauten: Ursachen – Folgen – Gegenmaßnahmen. Internationales Symposium Innsbruck/Igls 11.-12.01.1990, Hrsg. Nils V. Kusterle u. Wolfgang Kusterle, Institut für Baustofflehre und Materialprüfung, Universität Innsbruck.

2 Gerhard Schultze-Werninghaus, Atemwegs- und Lungenerkrankungen durch Schimmelpilze, in: Schimmelbefall in Wohnbauten: Ursachen – Folgen – Gegenmaßnahmen (wie Anm.1).

3 Peter Trifonoff, Merkblatt zum Pilzbefall in RLT-Anlagen, Gesundheitsrisiken, Ursachen und gesundheitsschädigende Auswirkungen von Pilzbelastungen. Zusammenfassung zu beziehen bei Peter Trifonoff, Umweltanalytiker, Fa. Co-Plan, A-2344 Maria Enzersdorf.

gereinigt, konserviert und restauriert werden, sind Konservatoren und Restauratoren eine unmittelbar exponierte und potentiell gefährdete Gruppe[4].

Kondensation als Hauptursache des Verfalls

Museen und Depots beinhalten Objekte ganz unterschiedlicher Erhaltung und Provenienz. In ihrer staubbedeckten Oberfläche können Gemälde einen Pilz- und Bakterienrasen eingebettet haben. Mit Stärkekleister doublierte Gemälde können intensiv an der Rückseite und im Inneren von Brotkäfern befallen sein, ohne daß dies an der Vorderseite bemerkbar sein muß (Abb. 1a + 1b). Neben kontaminierten Gemälden stehen im Depot oft völlig intakte, die in Nahkontakt damit sekundär befallen werden können[5]. Daß Objekte im Museum oft schlecht erhalten sind, verdanken sie häufig schädigenden Bedingungen am Ort der früheren Verwendung, z. B. in Kirchen und Schlössern, wo sie über Jahrzehnte oder Jahrhunderte dem Klimawandel und der Kondensation im Gebäude ausgesetzt waren. Organische Bestandteile der Ausstattung wie Holz, Leinwand, Malschichten u. a. nahmen die höhere Feuchte auf, die durch Kondensation an kalten Außenwänden oder in der Nähe von ihnen gegeben war. Dadurch kam es allmäh-

4 Peter Neuhauser, Martin Schatta, Gesundheitsvorsorge in Archiven, Bericht über die mikrobiologischen und allergologischen Untersuchungen von Archivalien und Archivräumen, in: Der Archivar, Jg. 17, 1994, Heft 2, S. 120 –128. Indrid Hödl, Selbstschutz für Archivmitarbeiter, in: Restauratorenblätter, Bd. 14, Papier und Graphik, Wien 1994, S. 73–79.

5 Maria Ranacher, Mikroorganismen- und Schadinsektenbefall im Depot: Ursachen, Sanierung und Gesundheitsschutz, in: Das Depot, der andere Teil der Sammlung, 9. Bayerischer Museumstag 1997, S. 53–71, Landesstelle für Nichtstaatliche Museen beim Bayerischen Landesamt für Denkmalpflege (Hrsg.), München 1998.

Abbildung 1a:
Josef Hickel, Familie des Kaisers Franz, Detail, KHM GG-Depot, Staubablagerungen und Pilzsporen wie Alternaria, Rhizopus Stolonifer, Penicillien, Bazillus und Bakterien an der staubbedeckten Oberfläche, Aufnahme 1995, Fotoarchiv KHM, Wien.

Abbildung 1b:
Josef Hickel, Gemälderückseite, Intensiver Brotkäferbefall infolge der alten Kleisterdoublierung, die an der Rückseite mit „Antoine“ (ehem. Restaurator an den Sammlungen des Allerhöchsten Kaiserhauses) signiert und mit „1905“ datiert ist. Damit lassen sich Befallsbeginn und Befallsdauer datieren. Aufnahme 1995, Fotoarchiv KHM, Wien.

Abbildung 2a:
Peter Widerin, Kopf des rechten Putto vom Epiphaniealtar der Stiftskirche Melk, um 1720. Zustand 1976 mit weit fortgeschrittenem Anobienbefall, Aufnahme während Holz- und Fassungsfestigung I. Kirchhof BDA, Wien.

Abbildung 2b:
Peter Widerin, Putto der Epiphaniekapelle, Detail der Blumengirlande mit Anobienbefall im Holzmehlstadium, Zustand 1976, Aufnahme Inge Kirchhof, BDA, Wien.

lich zu einer Vorschädigung der wand- oder bodennahen Gegenstände und häufig zu einem Primärbefall durch Mikroorganismen[6].

Kondensat und vor allem das unsichtbare Kapillarkondensat bewirkt eine Erhöhung der Materialfeuchte, die wiederum den Vorabbau durch holzzerstörende Pilze begünstigt. Eine Vorschädigung des Holzes durch Pilze zieht dann Insektenbefall nach sich. Diese Schadorganismen können das Holz in der Folge bis zur Strukturauflösung schädigen. In der Stiftskirche Melk wurde aus der Zeit vor der Gesamtrestaurierung berichtet, daß einer der Engel durch resonatorische Erschütterung während des Orgelspieles vom Altar brach und in seine Bestandteile, die biogen bereits stark abgebaut waren, zerfiel. Insektenbefall kann unter Farbfassungen oder Vergoldungen lange verborgen bleiben, bis er die Oberfläche erfaßt, wie an den Putten von Peter Widerin um 1720 aus der nordseitigen Epiphaniekapelle der Stiftskirche zu sehen ist (Abb. 2a). Wie die Abbildung der Girlande zeigt, ist oft nur Holzmehl übrig geblieben, das von der Fassung zusammengehalten wird (Abb. 2b).

6 Maria Ranacher, Biogene Schädigung von Museumsgut als Niederschlag inadäquater Klimaverhältnisse: Wege der Sanierung als Wege der Gesundung, in: Mikroorganismen und biogene Schadensprozesse in der Kulturguterhaltung: Problemdefinitionen und Lösungsmöglichkeiten. Beiträge des Eurocare-Workshops vom 23.10.1995, S. 77–88. Die Publikation ist über den Österreichischen Restauratorenverband in Kopie erhältlich.

Sick Building Syndrom auch in historischen Gebäuden?

Auch in historischen Gebäuden, wesentlich solider und qualitätvoller gebaut als unsere heutigen Bauten, können die Voraussetzungen für das Sick Building Syndrom entstehen, obwohl der Begriff eigentlich für Gesundheitsstörungen geprägt wurde, die in modernen, schlecht gebauten und daher ohne Raumlufttechnik kaum bewohnbaren Gebäuden entstehen können. Bei mangelnder Pflege, fehlender Nutzung und fehlender bzw. falscher Beheizung kommt es auch in historischen Bauten an ihren z. T. verborgenen Holzkonstruktionen zu Schädlingsbefall und zu mikrobiell belasteten Zersetzungsprodukten. Damit beginnt auch schon die Gefahr der Keimbelastung der Raumluft, die bei Luftumwälzung verstärkt wird.

In historischen Gebäuden ist oft eine „Alles-oder-Nichts-Praxis“ anzutreffen. Anstatt frühzeitig Sanierungsmaßnahmen zu starten, wartet man oft aus Spekulationsgründen solange, bis das Gebäude völlig heruntergekommen ist, um dann eine Totalsanierung oder auch den Abriß oder die Entkernung durchzusetzen. Diese Maßnahmen gingen oft mit schwerem Gifteintrag durch toxische Festigungsmittel einher. Aber auch heute noch finden toxische Bekämpfungsmaßnahmen nicht nur in der Schädlingsbekämpfung, sondern, wie den wenigsten bekannt, auch in der Vorratshaltung statt. In Museen wurde eine Vielzahl solcher giftiger Stoffe eingesetzt, wie die inzwischen verbotenen Gifte DDT, Quecksilbersublimat und Nuvan 7. Auch sind toxische Begasungen mit Äthylenoxid, Methylbromid oder Begiftungsmitteln wie Pyrethrum durchgeführt worden, ohne zu prüfen, ob der Gifteintrag wirklich gerechtfertigt ist. Oder es wurden flüssige Holzschutzmittel mit Pentachlorphenol verwendet, die darüber hinaus an vielen Objekten den Oberflächenaspekt stark veränderten. Auch dampften sie nach ihrer Anwendung noch lange aus, wie auch mit Giftgasen behandelte Objekte noch über längere Zeit ausgasen.

Daß in Museen und in der besonders gefährdeten Gruppe der RestauratorInnen diese Problematik oft nicht richtig bewertet wird, zeigte sich 1994/95 im Rahmen des Eurocare-Forschungsprojektes „Mikroorganismen und Schadinsekten in den Museen“ durch die Fragebogenaktion an 70 Museen und Sammlungen[7]. Demnach werden zur Kulturguterhaltung in Museen und Denkmalpflege noch Giftgase, sogar noch Zyklon-B eingesetzt, auch in Fällen, in denen Sauerstoffverdrängung durch ungiftige Gase wie Kohlendioxid bzw. Stickstoff oder Inertgase wie Argon durchgeführt werden könnte. Dem nicht genug, es werden noch immer giftigste flüssige Holzschutzmittel mit dem falschen Argument verwendet, nur durch sie sei Vorbeugung zu erreichen, anstatt Pheromonfallen, lückenlose Quarantäne- und Hygienemaßnahmen anzuwenden.

Information und Nachschulung über ungiftige und ökologisch verträgliche Methoden der Schädlingsbekämpfung und der Befallsprävention erscheinen für die meisten österreichischen Museen dringend erforderlich.

7 Barbara Matuella, Maria Ranacher, Zusammenfassung der Eurocare-Fragebogenaktion an österreichischen Museen, Wien 1994/95.

Holzmehl, Pilzsporen, Bakterien und Geißeltierchen als Gesundheitsgefährdung

Durch biogenen Befall entstehen Zersetzungs- und Stoffwechselprodukte wie Fraßmehl: aus insektenbefallenem Holz durch Anobium punctatum – gewöhnlicher Holzkäfer (Abb. 3a), Xestobium rufovillosum – großer Holzwurm, Lyctus bruneus – Splintholzkäfer, Hylotrupes bajulus – Hausbock, aus befallenen Gemälden durch Anobium stegobium – Brotkäfer (Abb. 3b), aus Textilien, Teppichen, Tierhäuten durch Tineola bissellia – Kleidermotte, Tinea pellionella – Pelzmotte, Anthrenus spec. – Teppichkäfer, Anthrenus flavipes – Museumskäfer. Diese Stoffwechselprodukte enthalten Allergene[8]. Insektenfraßmehl wiederum gibt Bakterien und Schimmelpilzen Nahrung, womit sich der Nahrungskreislauf der Schadorganismen schließt und das Giftpotential steigt. Von Mikroorganismen befallene Objekte bzw. Gemälde mit dichtem Schimmelbefall an Vorder- wie Rückseite senden keimfähige Sporen aus, die sich aufgrund ihrer minimalen Partikelgröße von 0,3-1 Mikron im unsichtbaren Schwebstaub der Luft anreichern, bei ruhender Luft zu Boden sinken bzw. sich an Objekten und Ausstattung ablagern (Abb. 4a + 4b).

Es gibt aber auch raumgenerierte Mikroorganismen wie Schimmelpilze, die an Wänden und Decken vorkommen, an denen immer wieder Wasserdampf kondensiert. Für ihr Auftreten genügt bereits Staub, der nur wenige Keime enthält. Raumgenerierte Schimmelpilze sind meist eine Auswirkung der so genannten „Kalte-Wand-Problematik“, deren Hauptkriterium die Differenz zwischen den

8 A. F. Schippers-Lammertse, Wann droht Insekten- und Schimmelbefall? in: Maltechnik-Restauro 1/1988, S. 44–49.

Abbildung 3a:
Leinwandgemälde Detail, KHM GG-Depot. Das undoublierte Leinwandgemälde ist frei geblieben von Insektenbefall, der Keilrahmen hingegen weist Anobienbefall auf. Aufnahme Zustand 1994, Maria Ranacher, Wien.

Abbildung 3b:
Das Leinwandgemälde „Bildnis eines Herren mit Goldenes-Vlies-Kette“. Das im 19. Jh. mit Stärkekleister doubliert wies 1995 intensiven Brotkäferbefall auf, daß Bildränder fehlen. Fotoarchiv KHM, Wien.

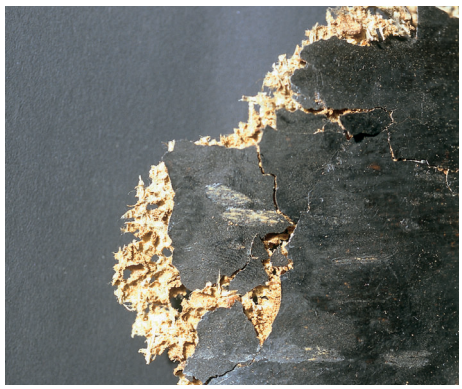


Abbildung 4a:
„Bildnis eines Herrn mit Golden Vlies Kette“. Detail der Bildseite mit biogenem Befall durch Brotkäfer und Schimmel, Zustand 1995, Fotoarchiv BDA, Wien.

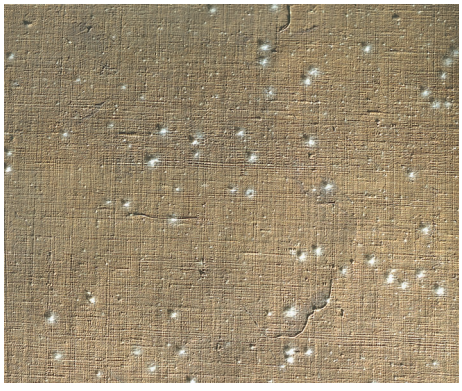


Abbildung 4b:
Rückseite eines Gemäldes mit Pilzbefall, KHM Depot, Zustand 1995. Aufnahme Gerhard Walde, Wien.

Oberflächentemperaturen der kälteren Gebäudehülle und der wärmeren Raumluft ist, was bei luftumwälzenden Heizungen oder beim Betrieb von Klimaanlagen der Fall ist[9]. Die Folge dieses Temperaturunterschiedes, die durch zusätzliche Luftbefeuchtung dann noch verstärkt wird, ist immer neue Kondensation an kalten Bauteilflächen und Ecksituationen und an den ihnen nahen Objekten.

9 Maria Ranacher, Bilder an kalten Wänden, Oberflächentemperaturmessungen an Wänden und Bildern als Neuansatz für konservatorische Klimatisierung, in: Restauratorenblätter Bd. 15, Schutz und Pflege von Baudenkmälern, IIC-Austrian Group, Wien 1995, S. 147–166.

Kondensationsfolgen an Museumsgut: Pilzbefall und Strukturauflösung, Trübungen und Deformationen

Konventionell beheizte wie unbeheizte Gebäude reagieren auf den saisonalen Temperaturwechsel mit Taupunktunterschreitung und Kondensation an den Oberflächen von Mauerwerk und Putz. Gefährlicher ist die verdeckte Kondensation an organischen Materialien im Mauerwerk. Das sind Bauhölzer wie die Auflager von Dachstühlen, Decken oder Böden aus Holz und andere verborgene Holzteile, die bei wiederkehrender Kondensation im Gebäude von Pilzen befallen werden. Ein Beispiel dafür ist die Decke bzw. der Boden des Festsaales von Schloß Schleißheim bei München (Abb. 5a + 5b). Unter dem Marmorfußboden sind die Dippelbäume von Braunfäule angegriffen, wie die Abbildung von 1991 zeigt. Die Decke der Sala terrena unmittelbar darunter zeigte Stellen mit dunklem Pilzbefall. Beide Zeichen, die innere Zersetzung des Holzes und der Pilzbefall an der Wandmalerei sind eindeutige Beweise intensiver Kondensation. An den Gemälden der Bayerischen Staatsgemäldesammlungen im Schloss Schleißheim waren bereits im 19. Jh. weißliche Trübungen aufgetreten. Max von Pettenkofer hat dieses Phänomen 1863 als „Krepierung“ diagnostiziert (Bildung eines feinen lichtstreuenden Sprungnetzes im Firnis) und das wiederkehrende Auftreten hoher relativer Raumluftfeuchte dafür verantwortlich gemacht[10].

10 Max von Pettenkofer, Über die Ursache des Verderbens der Ölgemälde in der Galerie in Schleißheim, und, publiziert von Sybille Schmidt, Das Pettenkofersche Regenerationsverfahren, in: Zeitschrift für Kunsttechnologie Jg. 47, 1990, Heft 1, im Anhang S. 63–66. Max von Pettenkofer, Über Ölfarbe und Konservierung der Gemäldegalerien durch das Regenerationsverfahren, Braunschweig 1870.

Abbildung 5a:
Schloß Schleißheim bei München, Festsaal, Marmorboden mit Unterboden (18.Jh.). Die Dippelbäume und Bodenbretter sind durch Fäulnispilze angegriffen. Zustand 1991. Aufnahme Autorin.

Abbildung 5b:
Bauholz mit Würfelfäule aus der technologischen Mustersammlung der Abteilung für Konservierung und Restaurierung von Denkmalen des Bundesdenkmalamtes Wien. Detail, Aufnahme 1980, Autorin.

Wegen dieser fortbestehenden Klimasituation ließ die Leitung der Pinakothek die Gemälde vor einigen Jahren zurück nach München holen. An der hohen Luftfeuchte im Gebäude änderte sich seither nichts Wesentliches, da die Ursache, die zu geringe Temperatur der Aussenwände und Hängeflächen in Zeiten mit hoher absoluter Außenluftfeuchte, leider nicht beseitigt wurde.

Weitere Anzeichen von Kondensation im Gebäude sind beispielsweise rostende Eisenteile im Gebäude und Wasserfleckenbildung z. B. an textilen Wandbespannungen. Sehr oft ist in Räumen mit intensiver Kondensation ein

muffiger und pilzbelasteter Geruch wahrnehmbar. Doch das sind noch nicht alle Beweise. Die Kondensationsproblematik konnte ich auch an tausenden Gemälden im Depot der Gemäldegalerie des KHM feststellen, als ich von 1993 bis 1996 mit Präventions- und Konservierungsmaßnahmen und der systematischen Bekämpfung von Schadinsekten und Mikroorganismen befaßt war. Gemälde auf Leinwand zeigten immer wieder ganz ähnliche Schädigungen, vor allem Craqueluren und die dann folgende Schüsselbildung der Malschichten. Diese Schüsseln sind Deformationen, die ausschließlich auf die Einlagerung von Wasserdampfmolekülen an Schichtgrenzen zurückzuführen sind. Wer viele Gemälde untersucht, wird feststellen, daß Schüsselbildung und Malschichtlockerung in der Gemäldefläche meistens nach unten hin zunehmen. Die Erklärung dafür ist einfach: Bei schräger Hängung kommen Gemälde unten in Kontakt mit der Außenwand. Bei konventioneller Wärmeverteilung war es laut meinen Oberflächentemperaturmessungen an diesen Kontaktstellen immer am kältesten und daher am feuchtesten.

Ein eindrucksvolles Beispiel, auf das ich später im Kapitel „Gemälde und Kalte-Wand-Problematik" nochmals eingehen werde, ist das Gemälde „Reiterschlacht" von Carl Philipp Rugendas. Das Gemälde hing bis 1990 in einer Doppelklimasituation an der Außenwand der Sekundärgalerie, in einem nahezu abgeschlossenen Mikroklima. Als Folge davon und aufgrund von Vorschädigungen wies das Bild verstärkte Schüsselbildung in der unteren Hälfte auf, wo die Leinwand vom Keilrahmen nicht gegen die Außenwand abgeschirmt war. Die geschützten Stellen dagegen blieben intakt. In gleicher Weise war auch der Schimmelbefall, der sich von den Craqueluren ausgehend an der Oberfläche verbreitet hatte, nach unten zu intensiver ausgebildet als nach oben und hörte genau an der Oberkante der unteren Keilrahmenleiste auf.

Durch falsches Heizen und ungereinigte Klimaanlagen werden Pilzsporen verteilt

Der negative Höhepunkt der Indoor-Pollution ist, daß die in der Raumluft vorhandenen Stoffwechsel- und Giftkomponenten durch die falsche Heizpraxis konvektiv verteilt werden. Am effizientesten geschieht dies durch ungereinigte Luftheizungen oder Klimaanlagen. Werden solche Anlagen nicht regelmäßig, d.h. mindestens 1x , besser 2x im Jahr gereinigt, sind sie Quellen für die Ausbreitung allergisierender bzw. sensibilisierender Pilze wie Chladosporium herbarum, Alternaria, Asperigillus niger, Aspergillus flavus, Penicillien oder humanpathogener Pilze wie Aspergillus fumigatus[11]. Raumlufttechnische Anlagen ohne Hepafilter sind im Museum äußerst problematisch, solange man über den Inhalt der verteilten, potentiell gifthaltigen Luft wenig oder nichts weiß. Werden in einer RLT-Anlage krankheitserregende Keime nachgewiesen, sind entweder sofort Hepafilter zu montieren, oder es ist die Anlage fachgerecht zu reinigen oder gar deren Stilllegung zu veranlassen. Alles andere ist unverantwortlich!

Die Einhaltung der in Objektnähe gemessenen konservatorischen Eckwerte von 45% rF im Winter und höchstens 65% rF im Sommer ist essentiell, wenn wir erkennen, daß beim Myzel unter 65% rF der Wachstumsstillstand eintritt und bei 55% die Enzyme austrocknen. Klimamessung und Klimakontrolle sind also eminent wichtig, die Montage von guten Feuchtigkeitssensoren ist erforderlich. Viele Pilze vermehren sich exponentiell bei Temperaturen über 18°C und einer relativen Feuchtigkeit von über 80%, in der die Sporen keimen und das Myzel sich auf dem Nährboden rasch ausbreitet[12].

Die Sporenkonzentration bestimmt die Luftqualität

Das Argument, daß Pilzsporen ubiquitär seien, also überall in der Natur vorkämen und man präventiv nicht viel tun könne, zeigt einen Mangel an Detailwissen. Es hängt von der Konzentration der Sporen, d. h. der Sporenzahl pro m^3 ab, ob eine gesundheitliche Beeinträchtigung für Menschen gegeben ist. Auch ist je nach Stärke oder Schwäche des Immunsystems die physische Resistenz von

11 Peter Trifonoff, Mikrobielle und andere Belastungen in Museen: Quellen, Verteilungsmechanismen, Gesundheitsrisiken, Beseitigung und Vermeidung, in: Beiträge des Eurocare Workshops 1995 (wie Anm. 6), S. 37-47.

12 Michael Pantke, Waltraud Kerner-Gang, Hygiene am Arbeitsplatz – Bakterien und Schimmelpilze, Mykosen, Mykoallergosen, Hygiene-Maßnahmen, in: Maltechnik-Restauro 1/1988.

Mensch zu Mensch verschieden. Zur Objektivierung der Belastung in der Luft dient ein Sporensampler, mit dessen Hilfe die Anzahl der Luftkeime leicht feststellbar ist. Der erste Wert gibt Auskunft über den Sporengehalt bei bewegter, der zweite bei ruhender Luft. Peter Trifonoff sagt zu Pilzbelastungen im Innenraum in seinem Merkblatt für Klimaanlagen: „Eine einzige Schimmelkultur kann 20 Millionen Luftsporen in der Minute bilden“ und „100 Sporen von Alternaria oder 3000 Sporen von Cladosporium Herbarum können einen Anfall von allergischem Asthma oder von Rhinitis auslösen”.

Diese Situation der Kontamination ist dem leitenden Personal in den Museen zu wenig bewußt, obwohl es für Objekterhaltung und Arbeitnehmerschutz verantwortlich ist. Auch die amtlich zuständige Aufsichtsbehörde ist zu wenig informiert über die Summe der vorkommenden Gifte in Museen und Sammlungen, weil das Personal der Museen sich bisher über den Gifteintrag wenig Gedanken macht. Restauratoren und Präparatoren, die mit kontaminierten Objekten zu arbeiten haben, stehen mit ihrem Anliegen oft alleine da, wenn sie für ihre Sammlungsbestände bessere Rahmenbedingungen, eine Anlagensanierung oder eine Luftfilterung für den Gesundheitsschutz erreichen wollen. Ihre Gesundheit leidet in vielen Fällen, weil die Vorgesetzten ihre oft schlimme Lage nicht erkennen bzw. nicht richtig einschätzen. Die Zahl der Betroffenen ist im Steigen begriffen und es hat den Anschein, daß sehr viel Aufklärungsarbeit geleistet werden muß, da hier der Arbeitnehmerschutz nicht greift. Es hilft nur seriöses Vorgehen durch Untersuchung und konsequente Sanierung unter Beachtung des Gesundheitsschutzes für alle.

Vorbild Steiermärkisches Landesarchiv in Graz

Daß es einen Weg der Vernunft und der praktizierten Prävention gibt, zeigt das Steiermärkische Landesarchiv seit Jahren, weil hier Direktion und Belegschaft das von der Papierrestauratorin und Leiterin der Restaurierwerkstätten Ingrid Hödl zusammen mit Hygienikern und Ärzten entwickelte „Hygienepaket“ lückenlos durchführen[13]. Offensichtlich hat man in Graz erkannt, daß ein Archiv, ein Museum nur gewinnen kann, wenn hygienisch und gesundheitlich unbedenkliche Arbeitsbedingungen für alle geschaffen werden und niemand durch das von Schimmelpilzen und Bakterien befallene Museums- oder Archivgut gesundheitlich zu Schaden kommt. Die Vorgaben der Restauratorin wurden auch für den Neubau des Steiermärkischen Landesarchivs voll erfüllt: Dort ist jeder Archiv- und Arbeitsraum mit Hepa-Partikelfiltern oder reinen Werkbänken ausgestattet, die bei der Arbeit mit befallenem Archivgut durch Ausfilterung aller biogenen und allergenen Partikel eine unbedenkliche Luftqualität gewährleisten. Im einigem Kontrast dazu stehen die folgenden Beispiele.

13 Ingrid Hödl, Das 10-Punkte-Hygienepaket des Steiermärkischen Landesarchivs, in: Atlanti, International Institute on Archival Science, Nr. 6, Maribor 1996. Ingrid Hödl, Selbstschutz für Archivmitarbeiter, in: Restauratorenblätter Bd.14, IIC Österreich, Wien 1994, S. 73–79.

Situationsbilder aus kontaminierten Museen und Sammlungen

Museums- und Archivmitarbeiter und Mitarbeiterinnen sind gefährdet, wenn sie ohne ausreichenden Schutz tagtäglich in kontaminierter Luft oder an kontaminierten Objekten arbeiten oder einer durch pathogene Keime verunreinigten Klima- oder Lüftungsanlage ausgesetzt sind. Gefährdet sind aber auch Museumsbesucher, vor allem Allergiker oder schwangere Frauen, die sich ohne Wissen und Warnung in kontaminierten Räumen mit hoher Luftkeimzahl aufhalten. Drei Beispiele sollen diese Situation illustrieren.

Im Musée de la Mode in Paris, einem Jugendstilbau, war 1995 die alte Luftheizung aus der Erbauungszeit noch immer in Betrieb. Der über Bodengitter ein- und austretende Heizluftstrom führte zu einer enorme Staubumwälzung mit dicken Ablagerungen an Wänden und Vitrinen. Anlässlich der Ausstellung „Mode à la Cour Imperiale de Vienne“ wurde diese Situation von uns, den die Leihgaben begleitenden österreichischen Museumsrestauratorinnen, beobachtet. Infolge einer derartig problematischen Umverteilung von Staub in den Ausstellungsräumen und in den Restaurierwerkstätten im Keller herrschten sehr schlechte Luftverhältnisse, mit dem Ergebnis, daß die Hälfte der Textilrestauratorinnen an

Atemwegserkrankungen – meist Asthma bronchiale – litt. Es ist zu hoffen, daß sich die Situation seither verändert hat.

Luftheizungen gab es vereinzelt bereits im 18. Jh. (z. B. Stift Melk, Festsaal). Technisch sehr verbessert, wurden sie in der 2. Hälfte des 19. Jh. große Mode. Auch die beiden k. u. k. Hofmuseen in Wien waren ursprünglich mit Luftheizungen (Heizstoff Braunkohle) ausgestattet. Von der Kuppelhalle ausgehend wurden die Säle mit Heizluft durchflutet, die weder befeuchtet noch gefiltert war. Dies war konservatorisch sehr nachteilig für die Objekte, wie man heute weiß. Derzeit haben nur mehr Eingangshalle, Stiegenhaus und Kuppelhalle des Natur- und des Kunsthistorischen Museums eine Luftheizung ohne Filterung und Befeuchtung.

Ein weiteres Beispiel von starker Kontamination der Raumluft mit Schimmelsporen ist die zum Kunsthistorischen Museum gehörende Wagenburg in Wien, die seit Jahren ein unerledigter Sanierungsfall ist. Die ebenerdigen Ausstellungs- und Depoträume sind nicht unterkellert, südwestseitig der Wagenburg ist das Straßenniveau noch dazu erhöht. Die Höfe und Gänge zwischen den einzelnen Gebäuden, Depots und Restaurierwerkstätten sind asphaltiert oder haben einen mit Asphalt verfugtes Kopfsteinpflaster. Die Mauern zeigen meterhoch Feuchte- und Salzschäden infolge aufsteigender Bodenfeuchte (Abb. 6a). Da lediglich Sanierputz aufgebracht wurde und eine grundlegende Feuchtesanierung und Maßnahmen für die Ableitung des Oberflächenwassers aber unterblieben waren, war es nicht verwunderlich, daß der Sanierputz bereits 1995, ein Jahr nach der Sanierung, stellenweise wieder abplatzte (Abb. 6b). Im Inneren der meist ebenerdigen Gebäude war die Luftfeuchtigkeit wegen der Mauerfeuchte und der geringen Oberflächentemperatur im Sommer ständig sehr hoch. Dies blieb auch nach der früheren Putzerneuerung so. Da die Poren des Sanierputzes durch Salzkristallisation gefüllt sind, steigt die Feuchte hinter ihm auf und dunstet in etwa 2 m Höhe mit entsprechenden Ausblühungen aus. In der Restaurierwerkstätte liegt die relative Luftfeuchte weit über dem konservatorischen Eckwert von 65%, obwohl hier geheizt wird. Da dies konventionell mit Luftaufheizung (Heizkörperheizung) geschieht, wird die Verdunstung durch den höheren Luftwechsel noch angeregt. In der Schauhalle der Wagenburg selbst liegt die relative Feuchte zwischen 60 und 70% in Sommermonaten auch höher, wodurch an den Kutschen ständig Schimmel auftritt. Ohne ursachenbehebende Sanierung bleibt jede noch so sorgfältige Behandlung des Pilzbefalls durch die Restauratorinnen und Restauratoren eine Sisyphusarbeit, weil eine so hohe Luftfeuchte bewirkt, daß der Schimmel wiederkommt.

Abbildung 6a:
Wagenburg in Schönbrunn, Gebäude mit Feuchteschäden, Zustand 1995. Aufnahme Autorin.

Abbildung 6b:
Wagenburg in Schönbrunn, Eingang zur Restaurierwerkstätte. Die unterlassene Feuchtesanierung führte zum Absprengen des neuen „Sanierputzes“, Zustand 1995. Aufnahme Autorin.

Abbildung 6c:
Wagenburg in Schönbrunn, Depot, Detail einer Kutsche mit Staub und Schimmelbefall am Leder. Aufnahme 1995 Autorin.

Abbildung 7:
Karyatide von Rudolf Weyr, 1886, im Saal X des Naturhistorischen Museums. Anflugstaub durch Konvektion, Zustand 2001. Aufnahme Autorin.

Zum Erhaltungsproblem für die Kutschen kommt die Gesundheitsgefährdung der Menschen, die dort arbeiten. Im Sommer bei hohen Temperaturen und hoher Luftfeuchtigkeit ist die Luftqualität in der Ausstellungshalle so schlecht, daß das Aufsichtspersonal gezwungen ist, in kürzeren Zeiträumen zu wechseln. Und es kommt immer wieder vor, daß auch Besucher allergische Reaktionen wie Niesen, Husten, Augenentzündungen zeigen oder Ausschlag bekommen. In solchen Fällen kurzer Exposition von Besuchern an kontaminierten Orten ist es für den behandelnden Arzt schwierig, eine Verbindung von Ursache und körperlicher Wirkung zu erkennen. Zur Vermeidung einer Gesundheitsgefährdung, ob bei Besuchern oder Mitarbeitern, ist die Wagenburg meiner Auffassung nach sogleich zu schließen, um sie korrekt zu sanieren, eine Maßnahme, zu der sich die Generaldirektion bis heute nicht durchgerungen hat.

Das dritte Beispiel, das Museum Carolino Augusteum in Salzburg machte 1994/95 Schlagzeilen. Durch die 27 Jahre lang nicht gereinigten Luftschächte der Klimaanlage wurden allergisierende und humanpathogene Pilzsporen verteilt und dadurch Museumspersonal und Museumsbesucher gefährdet. Über unser Eurocare-Forschungsprojekt wurde 1994 entdeckt, daß sich in den Luftschächten auch der humanpathogene Pilz Aspergillus fumigatus befand[14]. Die Gefährlichkeit dieser pilzkontaminierten Klimaanlage wurde dadurch unterstrichen, daß an diesem Museum drei Museumsmitarbeiter im Dienst und nicht etwa im Ruhestand, verstorben sind. Und es gibt zu denken, daß es von Seiten der Arbeiterkammer und der betroffenen bzw. eingeschalteten Restauratorinnen größter Anstrengungen bedurfte, die korrekte Reinigung der Klimaanlage durchzusetzen, eine Maßnahme, die doch in jedem Museum eine Selbstverständlichkeit sein sollte. 1999 war die Anlage erst teilweise gereinigt, ein Teil stand damals noch immer aus.

2003 jedoch ergab die Nachfrage zum aktuellen Stand eine erfreuliche Wende der Dinge. Die neue Direktion hat die Übersiedlung des Museums in die nun sanierten Räume der Neuen Residenz in die Wege geleitet. Diese neuen Museumsräume werden derzeit nach Stand des Wissens und der Technik mit einer Temperieranlage an den Hüllflächen und einer konservatorisch unbedenklichen Lüftungstechnik[15] eingerichtet.

14 Heinz-Dietmar Fürst, Das Salzburger Museum Carolino Augusteum und die Schimmelpilze, in: Beiträge des Eurocare-Workshops 1995 (wie Anm. 6).

15 Laut Telefonat mit Direktor Dr. Marx ist die Klimaanlage im alten Haus nun ganz gereinigt worden.

Arbeitsstättenverordnung – qualitativ verbessern statt verwässern

Von Gesetzgeberseite ist die neue Arbeitsstättenverordnung, BGBl. II Nr. 368 vom 13. 10.1998, in Kraft, in der es unter § 13.3 heißt: Klima- und Lüftungsanlagen „sind mindestens einmal jährlich, längstens jedoch in Abständen von 15 Monaten auf ihren ordnungsgemäßen Zustand zu überprüfen“, und zwar „nach größeren Instandsetzungen, Änderungen oder wenn begründete Zweifel am ordnungsgemäßen Betrieb bestehen“[16]. Was hier jedoch nicht formuliert ist, ist die verpflichtende Vorschreibung einer fachlich einwandfreien Reinigung im Falle des Nachweises gesundheitsschädigender Keime in der Anlage. Im Arbeitsübereinkommen der Bundesregierung vom 2.02.2000 ist auf Seite 26 unter dem Kapitel „Weniger Bürokratie und mehr Deregulierung im Sozialsystem“ unter Punkt 2 als Ziel wörtlich aufgenommen: „Änderung aller Regelungen, die eine – verglichen mit dem konkreten Nutzen für die Arbeitnehmer – unverhältnismäßig große Belastung für die Betriebe darstellen“.

Angesichts des Gefährdungspotentials von nicht gereinigten Klimaanlagen ist eine Lockerung der bisher ohnehin zu wenig strengen gesetzlichen Auflagen für RLT-Anlagen unter Umständen lebensgefährlich. Ging schon bisher die Tendenz zu laxer Handhabung der Vorschriften für die Überprüfung und Reinigung der Klimaanlagen zu Lasten der Arbeitnehmer, so wird mit dem neuen Text von vorne herein eine „Änderung aller Regelungen“ möglich, anstatt die Betriebe – auch die staatlichen – zur selbstverständlichen Wartung ihrer Einrichtungen zu verpflichten. Sollte die bisherige Verpflichtung zur Prüfung und Reinigung der Klimaanlagen wegfallen, wäre das eine eindeutige Verschlechterung des Arbeitnehmerschutzes. Sie muß daher unbedingt bestehen bleiben.

16 Bundesgesetzblatt für die Republik Österreich 1998, Teil II, Nr. 368, Verordnung der Bundesministerin für Arbeit, Gesundheit und Soziales, mit der Anforderungen an Arbeitsstätten und an Gebäude auf Baustellen festgelegt und die Bauarbeiterschutzverordnung geändert werden (Arbeitsstättenverordnung – AStV).

Problemkreis Konvektion und Staubverteilung durch falsches Heizen

Die oben angeführten Beispiele für die Problematik von mit Staub und Sporen belasteter Luft sollten aufzeigen, wie komplex und gefährlich dieser Problemkreis sich ausweiten kann, wenn man ihn nicht fachgerecht saniert. Nachdem nur Böden regelmäßig gereinigt werden, nicht aber Wände und Mauervorsprünge, ist meist viel alter Staub in Museumsräumen vorhanden (Abb. 7). Weiterer Staub dringt von außen über Fenster, Türen und undichte Baufugen ein oder er wird durch Besucher hereingetragen. Die Einrichtung von Schmutzschleusen ist daher notwendig. Man muß aber auch darauf drängen und erreichen, daß alle 3–5 Jahre eine Entstaubung der schwer erreichbaren Flächen und Mauervorsprünge erfolgt. Mit den Einsparungsmaßnahmen beim Reinigungspersonal und den Auslagerungstendenzen der Museen droht dieser Bereich zu verkommen, so daß wir durch intelligente Reinigungskonzepte gegensteuern müssen. In großen Häusern empfiehlt es sich daher, ein professionelles Reinigungskonzept durch eine Fachfirma erstellen und umsetzen zu lassen[17], bei sensiblen künstlerisch gestalteten Oberflächen sind RestauratorInnen zuzuziehen.

Die Verteilung der vorhandenen Grob- und Feinstäube im Innenraum erfolgt durch Konvektion. Diese Raumluftumwälzung entsteht z. B. dadurch, daß sich an Bauteilen mit unterschiedlichen Temperaturen Luftströme bilden, an wärmeren Flächen ein Auftrieb und an kälteren ein Abtrieb. Während die in unbeheizten Gebäuden durch Sonneneinstrahlung und saisonale Temperaturunterschiede hervorgerufene Staubumverteilung verhältnismäßig gering ist, werden in konventionell beheizten Gebäuden enorme Mengen an Feinstäuben und Partikeln durch bauphysikalisch nachteilige Wärmeverteilungsysteme wie Heizkörper und Elektro-Nachtspeichergeräte verbreitet, aber auch über Luftheizungen oder Lüftungsanlagen, wobei Filterung und Filterwechsel das Problem etwas mindert. Die aufgewirbelten Staubpartikel werden von kalten und daher feuchten Wänden angezogen und es entstehen Schmutzschleier, die Architekturoberflächen verdunkeln. Beispiele dafür waren die Kuppel in der Peterskirche oder das Innere der Rochuskirche in Wien vor der Restaurierung 2002. Schmutzschleier sind aus porösen Oberflächen kaum entfernbar, weshalb es so viele übermalende Restaurierungen an Architektur gibt, z. B. die erwähnte Kuppel der

17 Erich Zippel, Staub, eine Reinigungsherausforderung, in: Mitteilungen des Österreichischen Restauratorenverbandes Bd.7, Wien 2000, S. 76-80.

Peterskirche, die sich nun dunkler als die übrige jetzt restaurierte Wandausstattung abhebt, oder die Leimfarbenmalereien an Sockeln und Gesimsen und plastischen Bauteilen der beiden Hofmuseen.

Gemälde und Verstaubung durch Luftumwälzung

Durch heizungsbedingte Luftumwälzung droht auch eine intensive Verstaubung wandnaher Objekte wie Gemälde in ihrer Hängesituation. Zwei Beispiele aus dem Kunsthistorischen und dem Naturhistorischen Museum illustrieren dies. Der „Ildefonsoaltar" von Rubens hing bis zur Sanierung 1990 und bis zu dem Zeitpunkt der Bildpflege an der Außenwand von Saal XIII des KHM. Neben dem leicht und trocken abnehmbaren Anflugstaub war verhältnismäßig viel kondensatgebundener Feinstaub festzustellen (Abb. 8a). Das Gemälde im Naturhistorischen Museum, das „Charakterbild des Carbon", 1884 von Josef Hoffmann für das NHM gemalt, war im 2. Weltkrieg ausgelagert und anschließend restauriert und dabei teilweise übermalt worden. Seit den fünfziger Jahren hängt es wieder an der Innenwand von Saal X, einem der meistbesuchten Säle des NHM und hat ähnlich den Bauplastiken der Atlanten und Karyatiden seither viel Staub angelagert (Abb. 8b).

Wie im Eingangskapitel erwähnt, fanden sich bei der Analyse von Staubablagerungen auf einem Gemälde aus dem Hochparterre im Saal XIX, aber auch auf

Abbildung 8a:
P. P. Rubens, „Ildefonsoaltar" 1630/32, Kunsthistorisches Museum, Saal XIII. Gemäldeoberfläche rechts mit Anflugstaub, und kondensatgebundenem Feinstaub, Zustand während der Oberflächenreinigung Bildpflege 1990. Aufnahme Autorin.

Abbildung 8b:
Josef Hoffmann, „Charakterbild des Carbon" 1884, Naturhistorisches Museum, Saal X, im Zustand 1999 während der Reinigung, rechts Staubablagerungen, Zustand 2002. Aufnahme Autorin.

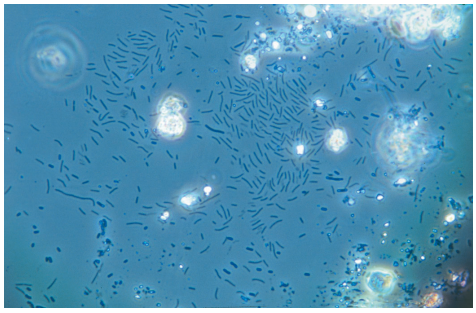


Abbildung 9a:
Staubprobe vom Gebäudesims im Stiegenaufgang, 2. Stock des Naturhistorischen Museums. Staub mit mineralischen Teilchen, Pilzsporen, Bakterien und Kokken, Vergrößerung, Zustand 2002. Mikroskopische Untersuchung Walter Url, Wien.

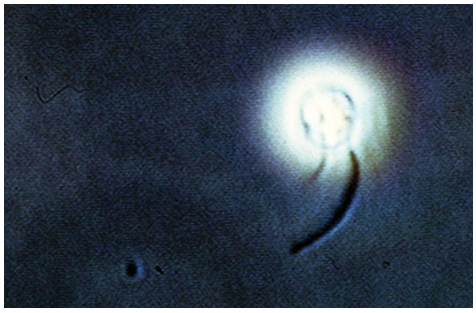


Abbildung 9b:
Staubprobe vom Gebäudesims im Stiegenaufgang, 2. Stock des Naturhistorischen Museums lebendem Geißeltierchen, Vergrößerung. Mikroskopische Untersuchung Walter Url, Wien.

Gebäudesimsen im 2. Stock, neben mineralischen Bestandteilen, Schimmelsporen, Bakterien und Kokken auch lebende zweifüßige Geißeltierchen! (Abb. 9a + 9b). Die intensive Ablagerung auf dem Gebäudesims im Treppenhaus zeigt, daß Staubpartikel allein durch die Thermik der Luftheizung in der ebenerdigen Eingangshalle im Gebäude bis in den 2. Stock weit umverteilt wurden.

In den Schausälen der Gemäldegalerie des KHM ist eine bauphysikalisch sehr ungünstige Wärmeverteilung seit der Einrichtung der Warmwasserzentralheizung gegeben. Sowohl die Raumheizung wie die Luftbefeuchtung erfolgten vor Sanierung der Gemäldegalerie (1990–1994) von der Raummitte her durch Heizkörper und darauf liegenden Verdunstungswannen, wobei die stark erwärmten und befeuchteten Luftströme zum kalten Lichtdach aufstiegen, dort abkühlten und seitlich an den Wänden herunter fielen. Bei diesem raumzentralen Wärmeangebot blieben die Außenwände und die oberen Drittel der inneren Trennwände kalt und nahmen Feuchtigkeit auf, so daß sich der mitgeführte Staub beim Auftreffen des Luftstroms vor allem im oberen Drittel der Wände ablagerte, ein Teil aber auch darunter in der Hängeebene der Gemälde. Dabei zeichneten sich die Rahmenränder der Bilder als Staubsilhouetten auf der Wandbespannung ab (Abb. 10a + 10b).

Durch die Sanierung hat sich diese Situation nicht grundlegend verändert, da entgegen dem Vorschlag der Autorin, die Außenwände durch eine Temperieranlage thermisch zu versorgen, bedauerlicherweise das veraltete Prinzip der Wärmeverteilung von der Raummitte aus beibehalten wurde. Nur die Leitungen und die Heizkörper wurden erneuert und die Regelungstechnik modernisiert. Die Heizwassertemperatur ist jetzt geringer, womit sich naturgemäß Thermik und Staubtransport verringerten. Außerdem geschieht die Luftbefeuchtung heute durch die Luftwäscher der Lüftung, so daß die eingeblasene Luft gereinigt ist. Die Luftgeschwindigkeit der Belüftung scheint allerdings zu hoch zu sein, da sich bei längerem Aufenthalt in der Gemäldegalerie ein leichtes Frösteln einstellt.

„Kleine Ursachen, große Wirkungen“ möchte man das Kapitel Staub und Konvektion im Museum übertiteln, denn in Museen mit Heizkörperheizung bzw. mit schlecht gewarteten raumlufttechnischen Anlagen besteht ein großer Teil der Erhaltungsarbeit an Ausstattung und Museumsgut in der periodischen Reinigung der Objekte von Staub. Begreift man erst einmal, daß genau diese uneffiziente Wärmeverteilung Ursache so viele negativer Auswirkungen ist, so erkennt man, daß man erst diese Ursache beseitigen muß, um den ganzen Problemkreis zu

Abbildung 10a:
Einblick in Saal I der Gemäldegalerie des Kunsthistorischen Museums, Zustand vor Sanierung 1990: Die Staubablagerungen an Wänden und Bildern zeigen den Verlauf Staub führender Luftströme und den Staubhorizont im oberen Drittel. Aufnahme 1990, Margarete Neundlinger, Wien.

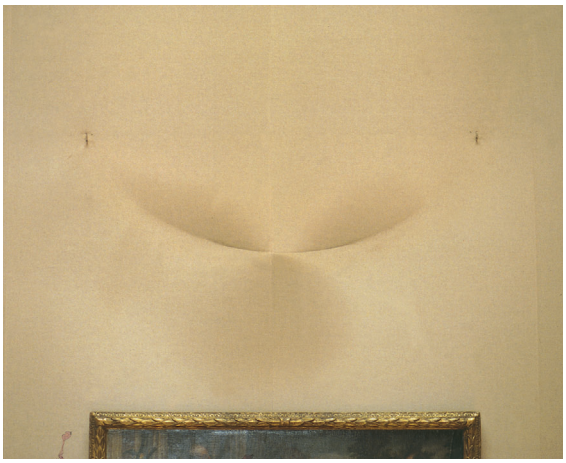


Abbildung 10b:
Einblick in Saal III der Gemäldegalerie des Kunsthistorischen Museums, vor Sanierung im Zustand 1990. Auf der Wandbespannung zeichnen sich Luftstromverlauf zur Kalten Wand und Staubanlagerungen um das hier hängende Rundbild von Veronese ab. Aufnahme Margarete Neundlinger, Wien.

entschärfen. Denn je größer der Unterschied der Temperaturen von Raumluft und Wandoberflächen durch falsches Heizen ist, desto intensiver sind Konvektion und Staubtransport und desto belasteter ist die Raumluft! Das Buch von Alfred Eisenschink „Falsch geheizt ist halb gestorben" bringt schon im Titel die physiologische Seite falschen Heizens auf den Punkt[18].

Je belasteter die Atemluft, desto höher ist die Krankheitsanfälligkeit des Menschen. In der Arbeitsmedizin sind Reaktionen auf hohe Raumluftbelastungen am Arbeitsplatz als „Montagsfieber" oder „Montagssyndrom" bekannt. Dies bedeutet, daß Krankheitssymptome, die über das Wochenende abgeklungen sind, am Montag bei Inhalation von belasteter Luft am Arbeitsplatz wieder aufflammen, was zu Husten, Atemnot, asthmatischen Anfällen etc. führt. Bei den Betroffenen hilft dann nur mehr Allergenkarenz (laut Pschyrembel, Handbuch der Arbeitsmedizin, München 1987).

Um die Tragweite und die hohe Wirksamkeit falschen Heizens und belasteter Atemluft zu verstehen, darf man nicht nur die Wandtemperaturen untereinander vergleichen, die sich z. B. bei Heizkörperheizung maximal um 6 – 10 Grad unterscheiden, sondern muß diese mit der Oberflächentemperatur einer Heizkörperrippe oder eines Konvektorschachts (z. B. 60°C) vergleichen. Daß diese Heizflächen also über 40°C heißer als die Wände sind, erklärt erst den starken Luftheizeffekt und in der Folge die starke Luftumwälzung der Heizkörperheizung.

18 Alfred Eisenschink, Falsch geheizt ist halb gestorben, Gesundheit und Rat für Millionen, Verlag Dr. Ingo Resch, D-82166 Gräfelfing, 1975, 7. Aufl. 1994.

Kondensation als Ursache von Pilzwachstum und Staubbindung

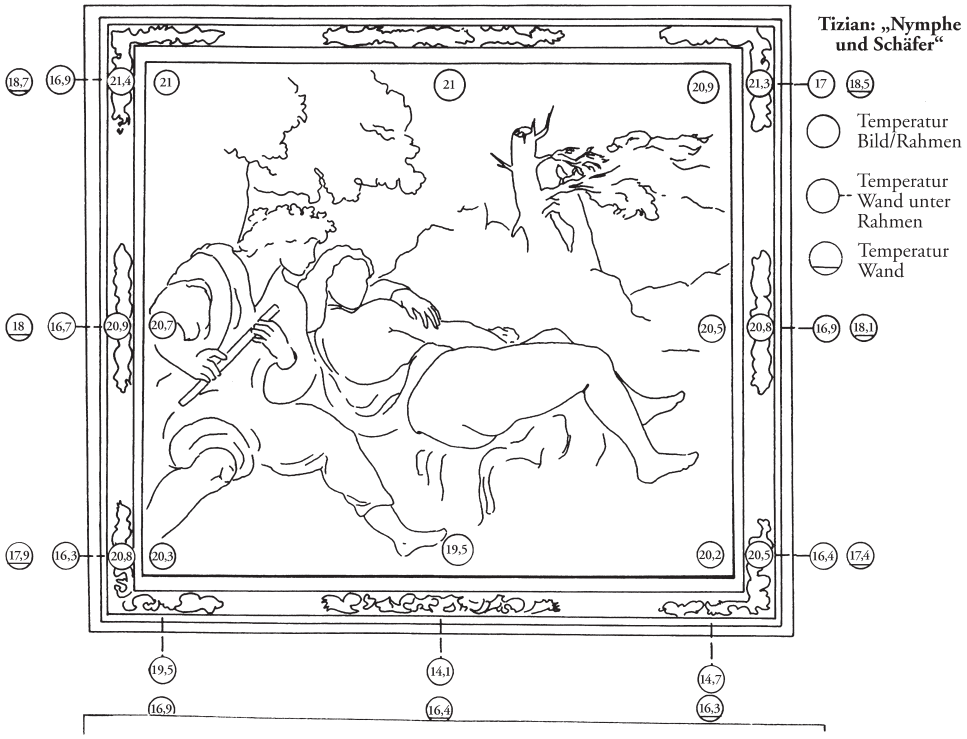
Die Bindung von Staub und Schmutz an Oberflächen im Innenraum wird verstärkt durch die Erhöhung der Materialfeuchte. Diese wird hervorgerufen durch Kapillarkondensat. Dies entsteht in unbeheizten Räumen durch saisonalen Anstieg der absoluten Feuchte der Außenluft, ohne daß die Wände dabei entsprechend wärmer werden, in beheizten Räumen durch ungleichmäßige Wärmeverteilung und technikbedingte Feuchteschwankungen, die die relative Feuchte der Raumluft kurzzeitig über 60% anheben, wie z. B. bei künstlicher Luftbefeuchtung. Die Feuchteabscheidung infolge solcher Klimaschwankungen führt zu verstärkter Bindung von Staub an kalten Oberflächen. Es kommt zu Staub-Inkrustation in Feinstrukturen und zu Ablagerung von Staubschichten, die zusammen mit Schimmelpilzsporen zu aggressiven und zerstörenden Kompressen werden können. Bei längerer Einwirkung werden Fassungsschichten zerstört, Malschichten und Leinwände vor allem an der Unterkante von Gemälden angegriffen und abgebaut, so daß sie völlig zerfallen können, wie im Depot der Gemäldegalerie an großformatigen Gemälden zu beobachten war, die früher ohne Zierrahmen direkt auf dem Boden standen.

Bei einer Wärmeverteilung nach veraltetem Stand der Technik bleiben die Außenwände kalt. Laut meinen Messungen im Kunsthistorischen Museum können Oberflächentemperaturen von Außenwänden des konventionell beheizten Gebäudes im Winter zwischen 11 und 17°C betragen, bei Raumtemperaturen von 20 – 22°C bzw. bei Sonneneinstrahlung bis zu 24°C. Wasserdampfmoleküle und Staub werden von den kalten Wänden und den ihnen nahen Gegenständen aus der wärmeren Raumluft angezogen. Damit wird der im Winter ohnehin zu trokkenen Raumluft Wasserdampf entzogen. Die Wärmeverteilung über die Luft verursacht ein inhomogenes und zu trockenes Raumklima, das ständig nachbefeuchtet werden muß, was angesichts der bakteriellen und regeltechnischen Probleme, die mit Luftbefeuchtern verbunden sind ein Dauerrisiko produziert.

Kondensation und Kapillarkondensation beschleunigen Pilzwachstum und alle deformationsmechanischen Vorgänge wie Craqueluren- und Schüsselbildung an Gemälden. Die Mikroklimasituation eines Gemäldes an einer kalten Wand (Kalte-Wand-Problematik) läßt sich durch berührungsfreie Messung der Oberflächentemperaturen von Wand und Bild mittels Infrarotthermometer gut erfassen[19]. Mit diesen Messungen wird es physikalisch plausibel, daß der unnütze und kostspielige Kreislauf – a) falsches Heizen, b) zu geringe Wandtemperatur, c) pro-

19 Maria Ranacher, Oberflächentemperaturmessungen als Neuansatz für konservatorische Klimatisierung, in: Restauratorenblätter der Denkmalpflege, Schutz und Pflege von Baudenkmälern, IIC-Austrian Group, Wien 1995, S. 147–166.

Abbildung 11a:
Tizians „Nymphe und Schäfer“, Außenwand von Saal II, Diagramm mit Oberflächentemperaturen an Wand und Bild, 5. März 1990, 9:00 Uhr. Zeichnung Autorin.



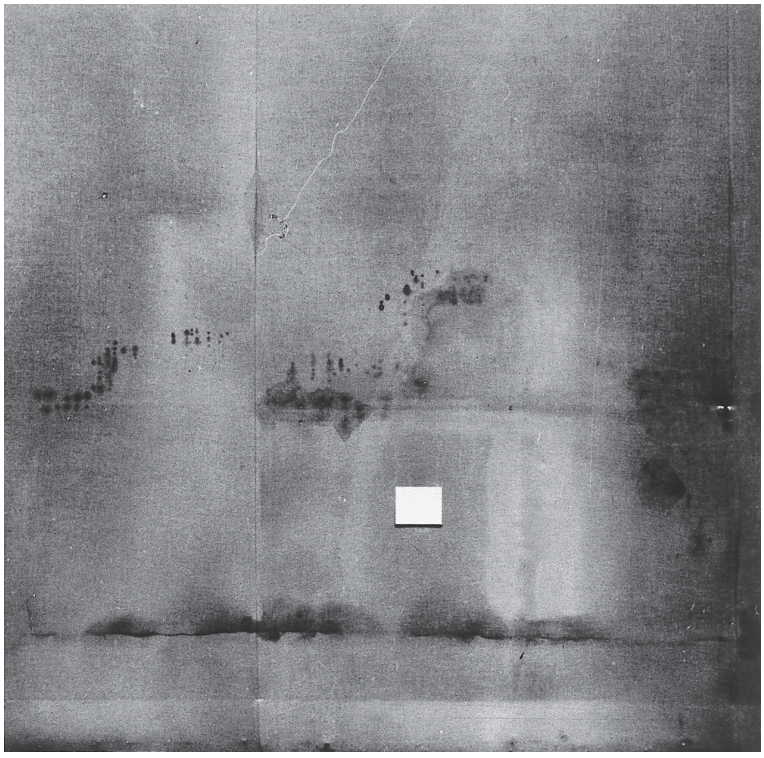


Abbildung 11b:
Wandbespannung hinter Tizians „Nymphe und Schäfer“, Abdruck des Zierrahmens in der unteren Hälfte, Abdruck des Keilrahmens und dunkle Wasserflekken aus mehreren Jahren zeugen von intensiver Kondensation, Zustand 1990. Aufnahme Margarete Neundlinger, Wien.

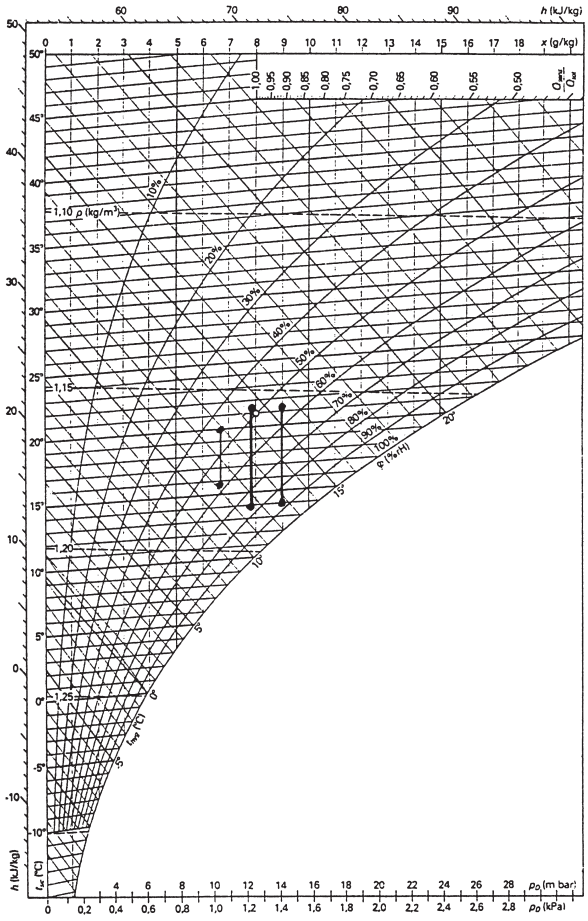


Abbildung 11c:
h-x-Diagramm mit Angabe der Temperatur- und Luftfeuchtewerte des Raumklimas und der Bild- und Wandtemperaturen, 5. März 1990, 9:00 Uhr. Diagramm Autorin.

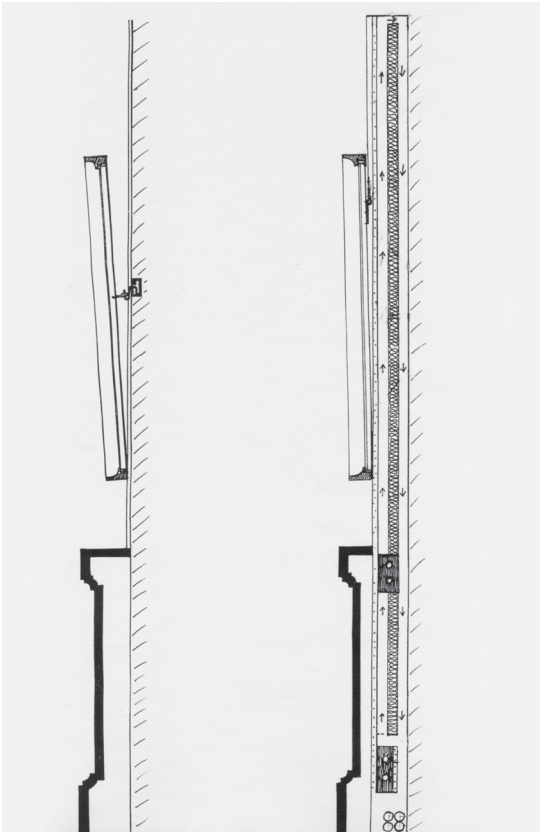


Abbildung 11d:
Sanierung der Kalte-Wand-Problematik für Gemälde an Außenwänden durch eine Temperier-Vorsatzschale: Über dem Temperierband im Sockelbereich hinter der Marmorverkleidung steigt die erwärmte Luft in die vordere Kammer auf, fällt in der hinteren Kammer herab und wird durch das Temperierband wieder erwärmt, um erneut aufzusteigen. Nach Planung Andreas Hofer, Fürstenfeldbruck, umgezeichnet v. d. Autorin.

blematische Nachbefeuchtung – durch die Temperierung der Hüllflächen behoben wird.

Kalte-Wand-Problematik: Oberflächentemperaturmessungen von Gemälden an kalten Wänden

Tizians Gemälde „Nymphe und Schäfer“, Inv.-Nr. 1825, ist ein typisches Beispiel für die Kalte-Wand-Problematik, wie sie bis 1990 in der Gemäldegalerie des Kunsthistorischen Museums bestanden hatte (Abb. 11a). Das Gemälde hing in schräger Neigung an der Außenwand von Saal II der Italienischen Abteilung. Dort betrugen am 5.03.1990 um 9.00 die Raumklimawerte 21,5°C und 48% rF. Die Wandoberflächentemperaturen hinter dem Bild lagen unten, wo der Zierrahmen die Wand berührt, bei nur 14°C, oben bei 17°C, die Oberflächentemperaturen der Gemäldevorderseite unten bei 19,5°C, oben bei 21°C. Die Temperaturdifferenz zwischen Wand und Bild betrug also zwischen 5,5° oben und 7°C unten, am kältesten Punkt. Die von den Oberaufsehern in der Gemäldegalerie über Jahre gemachte Beobachtung, daß „im Winter die Wände rinnen“, hat sich sichtbar niedergeschlagen: Hinter den Bildern war die Wandbespannung im Winter tatsächlich feucht und hatte in mehreren Jahren durch die intensive Kondensation Wasserflecken ausgebildet (Abb. 11b). Anhand des h-x-Diagramms läßt sich das Verhältnis von Temperatur und relativer Luftfeuchte bei gegebenem Feuchtege-

halt der Luft ablesen: Bei Raumklimawerten von 21,5°C und 48% rF zum Zeitpunkt der Messung führt die Abkühlung der Raumluft auf die obere Wandtemperatur von 17°C hinter dem Bild zu dem Wert von 64% rF, die Abkühlung auf die untere Wandtemperatur von 14°C an der Unterkante des Bildes zu dem Wert von 78% rF (Abb. 11 c).

Mit diesen hohen Feuchtewerten befinden wir uns im Bereich bester Wachstumsbedingungen für Schimmelpilze! Sinkt bei gleichem Raumklima die Wandtemperatur an der Bildunterkante auf nur 11°C ab, wie im Winter möglich, steigt dort hinter dem Bild die relative Feuchte sogar auf 90% an. Auf Grund dieser Unterschiede von Oberflächen- und Lufttemperatur lagern sich vermehrt Wasserdampfmoleküle in Grenzschichten, Craqueluren und Mikrostrukturen ein. Mit zunehmender Einlagerung werden sichtbare deformationsmechanische Vorgänge, wie die Schüsselbildung von Malschichten, ausgelöst[20]. Andererseits droht bei so hohen Luftfeuchtewerten das Schimmelproblem, weil die bei der Überschreitung des Grenzwertes von 65% rF Myzelwachstum, ab 85% rF das Auskeimen von Pilzsporen schlagartig beginnt.

Ein Gemälde mit dramatischen Schäden mit typischen Folgen der Kalte-Wand-Problematik ist das Bild „Reiterschlacht“ von Rugendas, das bis 1989 in einer Doppelklimasituation an einer Außenwand der Sekundärgalerie hing. Das Ölgemälde auf Leinwand hatte nach unten zu, exakt bis zur Oberkante des Keilrahmenquerstücks nicht nur Malschichtschollen, sondern auch intensiven Schimmelbefall ausgebildet. Wie die Abbildung zeigt, war der Schimmelbefall dort am intensivsten, wo der Zierrahmen in Kontakt mit der Wand war, weil es hier am kältesten und feuchtesten war (Abb. 12a + 12b). Der Keilrahmen wirkte hier als Wärmedämmung und schützte das Bild von der Rückseite her vor Kondensation. An diesen geschützten Stellen ist die Gemäldeoberfläche intakt und plan geblieben und überdies völlig frei von Schimmelbefall!

Ein weiteres, von Kondensation geschädigtes Gemälde, eine aus einer Wandvertäfelung stammende Supraporte mit „Amoretten“, jetzt im Depot der Gemäldegalerie ist auf hellem Hintergrund gemalt. Auf diesem hellen Grund tritt der Verlauf der dunklen, von Schmutz gefüllten Craqueluren besonders deutlich hervor, die fast alle exakt an den Kanten der Keilrahmen-Mittelstrebe rechts

20 Volker Schaible, Überlegungen zum Problem der Schüsselbildung am Leinwandbild, in: Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung, Jg. 4 1990.

Abbildung 12a:
G. Ph. Rugendas „Reiterschlacht“, bis 1989 in der Sekundärgalerie des Kunsthistorischen Museums. Das Bild zeigt Schüsselbildung und Schimmelbefall in der unteren Hälfte. Aufnahme Margarete Neundlinger, Wien.
Abbildung 12b:
G. Ph. Rugendas „Reiterschlacht“, Detail rechts unten mit typischen Kalte-Wand-Schäden, extremer Schimmelbefall und Schüsselbildung der Malschichten nur an den wandexponierten Stellen der vom Keilrahmen geschützte untere Rand ist unversehrt. Aufnahme Margarete Neundlinger, Wien.

Abbildung 13a:
Supraporte mit Amoretten, Kunsthistorisches Museum, GG-Depot. Das Detail zeigt Craqueluren und Schollenbildung an den wandexponierten Stellen, die Malerei über der Mittelstrebe des Keilrahmens blieb intakt. Fotoarchiv KHM, Wien.

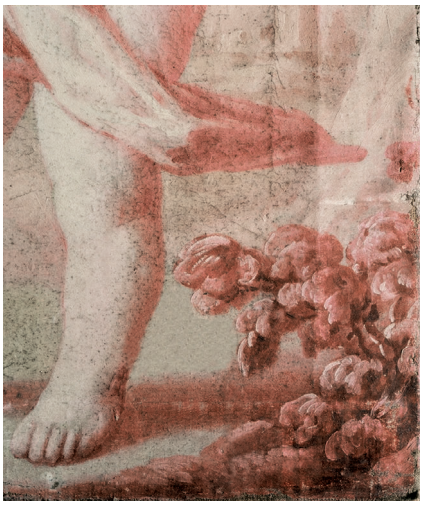
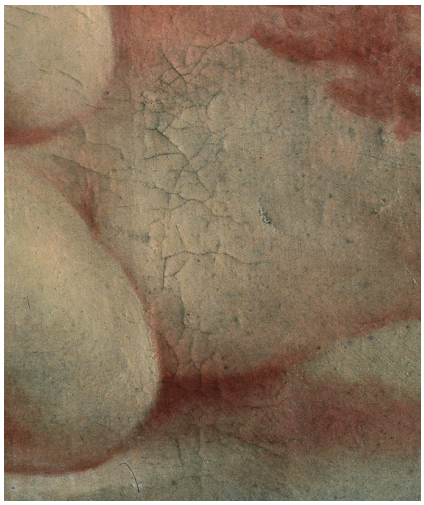


Abbildung 13b:
Supraporte mit Amoretten, Detail. In den Craqueluren der wandexponierten Stellen hat sich aufgrund der höheren Materialfeuchte dunkler Schimmel eingenistet, der auf der hellen Malerei gut zu sehen ist. Fotoarchiv KHM, Wien.



enden (Abb. 13a). Wieder zeigt sich, daß dort, wo der Keilrahmen als Wärmedämmung das Gemälde vor Kondensation schützte, die Malschicht intakt blieb und keine Schüsseln ausbildete. Das monochrom gemalte helle Bild zeigt den dunklen Pilz besonders deutlich, der sich an den wandexponierten Stellen als Feuchtigkeitsindikator eingenistet hat (Abb.13b). Dies ist ein Hinweis darauf, daß das Ausmaß Schimmelbefall von Bildern, die sich in feuchtebegünstigender Hängesituation befinden und befanden, kaum bekannt ist. Einen etwa vorhandenen dunklen Pilz kann man auf dunklen Bildern und gebräunten Firnissen kaum erkennen, dann wenn man ihn nicht vermutet.

Nach dieser Beweiskette von Messungen, aus denen für die Wirkung „Feuchteschaden“ die Ursache „Temperaturdefizit an Außenwänden“ abzuleiten ist, steht eines fest: Eine Wand, die thermisch nicht versorgt ist, wird Kondensat produzieren und Staub anziehen.

Was tun? Die Kondensation muß unbedingt unterbunden werden! Ist dies nicht möglich, müssen die Gemälde entfernt werden! Die für die Klimasanierung und Vorbeugung richtige Therapie ohne negative Nebenwirkungen ist das Nachführen von Wärme an der Außenwand. Im Schema des Sanierungsvorschlages von Andreas Hofer für die Außenwände der Gemäldegalerie ist ein älteres Beispiel für das technische Prinzip der Wärmeführung zu sehen: Über dem Sockelheizband hinter der Marmorverkleidung steigt warme Luft in die vordere Kammer der Vorsatzschale auf, kehrt oben um und fällt in die hintere Kammer hinunter, um über dem Sockelheizband wieder erwärmt aufzusteigen (Abb. 11d). Bei den großen Raumhöhen der Gemäldegalerie wäre ein zweites Heizband in Höhe der Marmorbrüstung vorgesehen gewesen. Inzwischen wurde im Bayerischen Landesamt für Denkmalpflege eine wesentlich einfachere Form der Wandtemperierung ohne Vorsatzschale mithilfe weniger eingeputzter Heizrohre entwickelt die in der Gemäldegalerie nicht in Diskussion stand.

Tausende Gemälde mit Kondensatschäden als Beweise für bauseitige Kondensation und Beispiele historisch belegter Kondensatschutzmassnahmen

Eine umfassende Gemäldeuntersuchung vermag Schäden und ihre Ursache und Auswirkungen zu erkennen und öffnet so den Blick fürs Ganze: Im Depot der Gemäldegalerie des Kunsthistorischen Museums sind etwa 90% der Gemälde-

rückseiten mit Staub und alten und neueren Schimmel- und Bakterienflecken bedeckt. Nachdem der Staub nun weitgehend entfernt ist, sind all diese Bilder gut lesbare Zeugnisse für das Kondensationsgeschehen, das am Ort der früheren Hängung stattfand und Spuren und Schäden hinterlassen hat. Über die schlechte Erhaltung vieler Gemälde muß man sich nicht also wundern, wenn man die Klimabedingungen vor Ort untersucht hat.

Ein gut dokumentiertes Beispiel ist das Bild „Epiphanie der Könige" von Michael Rottmayr in der Stiftskirche Melk (Abb. 14a). Das Gemälde war von Schimmel befallen, wie ich bei der Abnahme zur Restaurierung feststellen konnte. Der Schimmelbefall war trotz einer intakt gebliebenen und bauseits wohldurchdachten originalen Hinterlüftung mit Klimanische, Vertäfelung und Lüftungskanal (Abb. 14b) aufgetreten[21]. Warum? Weil die Epiphaniekapelle mit ihrer nordseitigen Lage zu den kältesten und kondensatanfälligsten Zonen der Stiftskirche gehört. Und weil die relative Luftfeuchte in der Stiftskirche zum Sinken der Bioresistenz der Ausstattungsmaterialien beigetragen hat. In den Sommermonaten 1978, bei Beginn der Restaurierung der Stiftskirche wurden 80 – 90% rF aufgezeichnet.

Bessere Voraussetzungen hatten die Barockgemälde im gut belüfteten Kreuzgang an der Wand zur Klosterkirche in Kloster Salem, Baden-Württemberg. Auch hier sorgten original erhaltene Klimaschutzmaßnahmen mit Lüftungslöchern in der Stuckrahmung für die Hinterlüftung der Gemälde (Abb. 15). Für die Innenwandsituation waren diese Erhaltungsbedingungen offensichtlich ausreichend, nachdem die Gemälde ohne Schimmelbefall geblieben sind.

Feuchteschutz für Gemälde war im 18. und frühen 19. Jh. durchaus noch ein wichtiges Thema und es wurden Speziallösungen erfunden: z. B. von der Wand wegklappbare Gemälde in Schloß Persenbeug an der Donau, NÖ[22]. Für ein venezianisches Renaissancegemälde „Madonna mit Kind und Heiligen", das zu Kaisers Zeiten in der Wiener Hofburg hing (heute im Depot des KHM), ist Ende 19. Jh. ein Spezialrahmen angefertigt worden, der durch Seitenausschnitte an allen 4 Seiten die Hinterlüftung ermöglicht (Abb. 16). Das Gemälde ist dadurch relativ gut erhalten. Eine andere Methode war im 18. und 19. Jh. der Versuch der Impermeabilisierung durch leinölhaltige Rückseitenanstriche. Die Tierbilder des Philipp Ferdinand Hamilton aus dem Schloß Eckartsau, NÖ, (jetzt Depot der Gemäldegalerie) zeigen graue Ölfarbanstriche an den Rückseiten aus der Zeit, als sie noch im Schloß hingen. Diese schwer löslichen Anstriche sind zwar heute ein Konservierungsproblem, waren damals aber in der Lage, Mikroorganismenbefall von den Rückseiten abzuhalten. Sie wurden wohl in dem Wissen angebracht, daß Leinöl kein günstiges Substrat für Pilzbefall ist.

In Summe zeigen die Beispiele für Feuchteschäden an Gemälden und historische Maßnahmen zum Feuchteschutz, daß sich die alten Baumeister der Schädigung durch Kondensation immer bewußt waren und Schutzmaßnahmen getroffen haben. Diese Maßnahmen konnten die Situation zwar verbessern, die Ursache für die Kondensation, das Temperaturdefizit des Bauteils, jedoch nicht aus der Welt schaffen.

Künstliche Luftbefeuchtung bringt Pilz- und Bakteriengefahr in Befeuchtern mit sich, die Verringerung des Befeuchtungsbedarfs reduziert diese Gefahr

Im Winter liegt die relative Feuchte in Räumen mit Heizkörperheizung zwischen 20 und 30%, was künstliche Befeuchtung erforderlich macht. Beim Einsatz von Befeuchtern mit Kaltverdunstung ist, wenn die sorgfältige Reinigung und vorbeugende Entkeimung fehlt, die Gefahr von Bakterienwachstum und Verbreitung über die Luft besonders groß. Wenn auch heute die „Legionärskrankheit" durch Legionella-Bakterien kaum mehr vorkommt, sind andere Bakterien wie z. B. Enterokokken, Staphylokokken, Klebsiella, Sproßpilze und die bereits erwähnten Schimmelpilze wie Alternaria alternata, Chladosporium, Penicillien u .a. Auslöser für Augenentzündungen, Schleimhautreizungen, Atemwegserkrankungen, Nebenhöhleninfekte und Bronchitis[23].

21 Manfred Koller, Helmut Paschinger, Ivo Hammer, Maria Ranacher, Kirche und Prälatursaal der Stiftskirche Melk: Untersuchungen und Restaurierungen, in: Österreichische Zeitschrift für Kunst und Denkmalpflege, Jg. 34, 1980.

22 Freundlicher Hinweis von Manfred Koller.

23 Peter Trifonoff, Innenraumbelastungen und Belastungen von RLT-Anlagen, Relevanz für Sick Building Syndrom, Relevanz für Building-Related-Illness-Infektionen und Allergien. Vortragsmanuskript für das Arbeitsinspektorat, Maria Enzersdorf 1999. Peter Trifonoff, Hygiene-Inspektion von Lüftungsanlagen für Ihre Gesundheit, Gemäß BGBL Nr. 368 Arbeitsstättenverordnung vom 1.01.1999, Folder.

Abbildung 14a:
Stift Melk, Epiphaniekapelle mit Putten, Lindenholz vergoldet, Altarbild von Michael Rottmayr, im Zustand vor Restaurierung 1978. Die hohe Luftfeuchtigkeit hatte einerseits Feuchteschäden in Marmor und Stuckmarmor und anderseits biogenen Abbau der Holzskulpturen und am Gemälde Firniskrepierungen und Schimmelbefall verursacht. Aufnahme Inge Kirchhof, BDA, Wien.

Abbildung 14b:
Stiftskirche Melk, Epihaniekapelle, originale Klimanische mit Holzvertäfelung und wandseitigem Lüftungskanal mit Lüftungslöchern, der von unten nach oben in das Fenster mündet, Zustand 1978. Aufnahme Inge Kirchhof, BDA, Wien.

Abbildung 15:
Kreuzgang in Kloster Salem mit Gemälden in Bildnischen aus dem 18. Jh. . Die Stuckrahmen der Bildnischen haben Lüftungslöcher und erlauben so die Hinterlüftung der Gemälde. Aufnahme 1992 Autorin.

Abbildung 16:
Gemälde „Madonna mit Kind und Heiligen“, venezianisch, 15. Jh., mit Zierrahmen aus dem 19. Jh., GG Depot KHM. Der Zierrahmen erlaubt durch Lüftungsschlitze an allen vier Seiten die Hinterlüftung des Bildes. Aufnahme 2003, Autorin.

Wegen den Risiken künstlicher Befeuchtung rückt ein wichtiger Grundsatz moderner konservatorischer Klimatisierung mit absoluter Notwendigkeit in den Mittelpunkt: Im Winter keine hohe Notwendigkeit der Luftbefeuchtung zu verursachen, also das Heizen, wenn möglich, nicht durch Aufheizung der Raumluft vornehmen, ferner nicht auf 55% rF, sondern maximal auf 45% rF zu befeuchten! Die Einhaltung des unteren Eckwerts von 45% rF im Winter ist für die meisten organischen Objekte ausreichend und hilft das „Gefahrenpotential Allergene in Befeuchtern" drastisch zu reduzieren. Die Reduktion des Nachbefeuchtungsbedarfes durch Wandtemperierung, d. h. durch Vermeidung hoher Lufttemperaturen und konsequentes Trockenhalten der Wände im Verein mit einer saisonal sinnvollen Untergrenze der relativen Luftfeuchte ist auf Dauer der einzig richtige Weg.

Analysen vor Sanierung

Bevor kontaminierte Räume und Objekte saniert werden, müssen die Ursachen des Sick Building Syndroms geortet, Gerüche zugeordnet, bauliche Mängel erkannt, Klimadaten erhoben und vor allem das gefährlichste Agens – die kontaminierten Stäube – mikrobiologisch und chemisch untersucht werden. Mikrobiologische Analysen sollten durch erfahrene Mikrobiologen, ein Hygieneinstitut oder ein Institut für Umfeldanalysen durchgeführt werden. Ebenso sollte die Dekontamination und das Ergebnis der Sanierung mikrobiologisch begleitet und, wo nötig, durch chemische Analysen gestützt werden.

Die neuen Vorgaben – Theoretische und praktische Vorgaben für optimale Erhaltung

Die Erhaltung von Gemälden und anderen Museumsobjekten aus organischem Material beginnt mit dem intakten klimatischen und hygienischen Umfeld eines Objektes, einer Sammlung. Eine wesentliche Voraussetzung dafür ist die optimierte Gebäudehülle des Museums. Gerade der Klimabereich ist der sensibelste Bereich mit den meisten Fehlerquellen. Aus diesem Grund ist ihm erhöhte Aufmerksamkeit zu widmen. Analog zu Paracelsus liegt der Schlüssel für die Heilung darin, daß schon die Vorgaben und technischen Mittel zur Klimatisierung selbst „Heilmittel" sein müssen, indem sie ohne Bumerangeffekt anwendbar, konservatorisch unbedenklich und ökologisch verträglich sind.

1) Klima und Mikroklima:

Für organische Materialien gelten möglichst gleichmäßige Temperatur- und Feuchtewerte innerhalb der konservatorischen Eckwerte von min. 45% rF im Winter und max. 65% rF im Sommer, möglichst frei von Kurzzeitschwankungen im Tagesgang. Die Klimawerte sollen im Jahresgang mit der mittleren Monatstemperatur gleiten[24]. Mikroklima im Einzelraum und Makroklima im Gebäude sollten harmonisch aufeinander abgestimmt sein und dürfen nicht wesentlich differieren, damit es nicht zu Luftzug und Konvektion kommt. Voraussetzung dazu sind isotherme, d.h. gleiche Temperaturverhältnisse an den Raumhüllflächen, die in unserem saisonal stark ausgeprägten Klima nur durch Nichtbeheizen der Raumluft und thermische Stabilisierung der Gebäudehülle erreichbar sind.

24 Günther S. Hilbert, Sammlungsgut in Sicherheit, Teil 2, Lichtschutz und Klimatisierung, Berliner Schriften zur Museumskunde, Bd. 6, Berlin 1987.

2) Wärme- und Feuchtespeicherkapazität der Bauhülle:

Museumsbau und Ausstattung sollen über eine gute Wärme- und Feuchtespeicherfähigkeit verfügen. Am besten geeignet ist die Ziegelbauweise, weil Ziegelwände gegenüber Beton eine 20-fach höhere Kapillarität haben und bei Klimaänderungen mit sehr hoher Kapazität reagieren können. Ein Ziegelbau kann bekanntlich im Sommer kühlen und im Winter wärmen. Der Wert von Ziegelbauten für Gesundheit und Wohlbefinden der Menschen, wie auch für Kulturgut kann aus biologischen und bauphysikalischen Gründen nicht hoch genug eingeschätzt werden. Fehlt entsprechendes Ziegelmaterial in der Bauhülle, so muß das Spei-

cherdefizit im Inneren durch klimapufferndes Material (Holz, geeignete Textilien) als Unterstützung für das Raumklima kompensiert werden.

3) Thermostabilität:

Die Umsetzung von Punkt 1 der Vorgaben, eine möglichst homogene Temperatur- und Feuchteverteilung und von Punkt 4, trockene kondensatfreie Außenbauteile, werden durch die Temperierung der Gebäudehülle zur Raumbeheizung anstelle der Beheizung der Raumluft erreicht. Für stark durchfeuchtete und durch Salzwanderung destabilisierte Erdgeschoßzonen ist die thermische Bausanierung zur Trockenlegung und zur Trockenhaltung geeignet, ferner hindert das überall gleichförmige Wärmegefälle in den Außenwänden die Feuchte von Schlagregen und Schnee am tieferen Eindringen in das Mauerwerk. Die konservatorische Forderung nach Thermostabilität von Gebäuden wird durch die Temperierung der Gebäudehülle erreicht[25].

4) Kondensatfreie Wände:

Raumhüllflächen und ihnen nahe Gegenstände, deren Oberflächentemperatur nicht unter der der Raumluft liegt, sind trocken und kondensatfrei. Dies ist der beste Schutz vor Besiedelung durch Mikroorganismen, weil Schimmelsporen bei mittlerer relativer Luftfeuchte inaktiv bleiben und sich nicht vermehren können[26]. Die neuere Konservierungsforschung hat die Klimavorgaben der Museen unter die Lupe genommen und vor dem Hintergrund der Mikrobiologie re-evaluiert[27]. Danach ist der obere konservatorische Grenzwert für die relative Feuchtigkeit mit 65% rF und das absolute obere Limit für kürzere Zeitspannen mit 75% rF festgelegt. Doch selbst die genauesten Vorgaben führen zu nichts, wenn sie nicht am Ort des Objektes eingehalten werden. Wir müssen also lernen, daß die Hauptaufgabe unserer Planungen die Herstellung isothermer Verhältnisse im Raum ist, da nur dann ein homogenes Raumklima möglich wird. Mit einer temperierten, thermostabilisierten und daher kondensatfreien Gebäudehülle ist diese Grundvoraussetzung für ein stabiles und homogenes Klima im ganzen Gebäude gegeben.

5) Bioresistenz:

Laut neuen polarographischen Forschungen ist Bioresistenz gegenüber Schimmelpilzen und Bakterien von der elektrischen Ladung abhängig[28]. Trockene Bausubstanz ist positiv geladen und hat daher eine gute Bioresistenz, das gleiche gilt für trockenes Holz, das von Pilzen nicht befallen werden kann. Mit Leinölfirnis, Leinölalkyd oder mit Ölfarbe imprägniertes oder beschichtetes Holz hat ebenfalls eine gute Bioresistenz, da gealtertes Leinöl eine positive Ladung aufweist und von Mikroorganismen nicht befallen werden kann.

6) Luftreinheit, Luftreinigung, Reinraumbedingungen:

Die entscheidende Reduktion von Sporen- und Staubbelastung der Luft wird geleistet über die Ausfilterung von 99,99% aller Stäube, Feinstäube, Sporen und anderer Allergene mittels Hepa-Filtern, was vor allem für die Risikogruppe der Schimmelpilz-Allergiker, für Kinder und werdende Mütter gesundheitsentscheidend ist. In Räumen ohne Filteranlagen, z. B. für den Wohnungs- und Ateliergebrauch, gibt es inzwischen erschwinglich gewordene Standgeräte mit Hepa-Filtern, die gute Dienste zur Luftreinigung leisten[29]. Bei der Arbeit an kontaminiertem Material im Museum sind reine Werkbänke mit Hepa-Filtern und qualitativ hochwertige Industriestaubsauger mit Absolut- oder Ultrafiltern wichtig, die über Fachfirmen zu beziehen sind[30].

7) Monitoring und Prävention bei Insektenbefall:

Biologische Pheromonfallen[31] leisten bei Insektenbefall in der Entdeckung und im weiteren Monitoring sehr gute Dienste (Abb. 17). Wichtig sind regelmäßige

[25] Henning Großeschmidt, Konservierung, Restaurierung, Klimatisierung, in: 10 Jahre Museumsarbeit in Bayern, Abteilung Nichtstaatliche Museen am Bayerischen Nationalmuseum (Hrsg.), München 1986, S. 46-54.

[26] Michael Pantke, Waltraud Kerner-Gang, Hygiene am Arbeitsplatz – Bakterien und Schimmelpilze, Mykosen, Mykoallergosen, Hygiene-Maßnahmen; in: Maltechnik-Restauro 1/1988.

[27] David Erhard, Marion Mecklenburg, Relative Humidity re-examined; in: Preprints of the Contributions to the Ottawa IIC Congress, 1994.

[28] Frantisek Makes, Josef Pühringer, Schimmelpilze, Materialtechnik und Polarographie, Ladungen und Feuchtedynamik. Vortrag am Symposium Consolidation and Destruction, Microbial Activities in Paintings, Skokloster Slott, Schweden. Frantisek Makes, Josef Pühringer, Electrical Charges on Material Surfaces and Treatments. Material Studies at the Royal Palace in Stockholm, Manuskript zum 8. Steinkongreß in Berlin, Sept. 1996.

[29] Die bisher extrem teuren Hepa-Standfiltergeräte gibt es nun als kleinere Standgeräte zu erschwinglichen Preisen, allerdings mit lautem Betriebsgeräusch.

[30] Sicherheitswerkbänke mit Hepa-Filtern werden im Steiermärkischen Landesarchiv benutzt. Industriestaubsauger mit Absolut- bzw. Ultrafilter mit einer Ausfilterung von 99,97 der Partikelgröße von 0,5 µ setzte ich im GG-Depot des Kunsthistorischen Museums ein. Bei extremem Feinstaubaufkommen erfolgt der Filterwechsel 1x pro Jahr, bei normalem Gebrauch hält der Filter ca. 2 Jahre. Sinkt die Saugleistung merkbar ab, muß der Filter gewechselt werden. Wichtig ist die auf den technischen Merkblättern angegebene Ausfilterung von Partikeln, die mindestens 99,90 % betragen sollte.

[31] R. E. Child, D. B. Pinninger, Insect Trapping in Museums and Historic Houses, in: Preprints of the Contributions to the Ottawa Congress 1994, Preventive Conservation Practice 1994, Theory and Research, S. 129-131. Gerhard Binker, „Insek-

ten-Management“ im Museum, in: Das Depot – der andere Teil der Sammlung, Bayer. Museumstag 1997 (wie Anm. 5), S. 75–76. Zur Schädlingsüberwachung ist ein Integrated-Pest-Management empfehlenswert. Bei unbekanntem oder gemischtem Insektenbefall sollte ein Museumsset mit verschiedenen Schädlingsfallen eingesetzt werden.

Wartung und periodisches Auswechseln der Fallen durch geschultes Personal oder durch Fachfirmen, wobei ein Wartungsvertrag empfehlenswert ist.

8) Bekämpfung und Monitoring von Insektenbefall:

Bei der Gebäudedurchgasung werden noch immer Giftgase wie Methylbromid und Zyklon B und das toxikologisch günstigere Gas Sulfurylfluorid (Vikane) eingesetzt. Laut den Untersuchungen Robert Koestlers sind alle diese Giftgase materialverändernd und zum Teil farbverändernd, weshalb das Metropolitain Museum New York ausschließlich Argongas verwendet[32]. Methylbromid ist außerdem ein schweres Umweltgift und einer der Hauptzerstörer der Ozonschicht (Wiener Umweltkonferenz 1995). Unbedenklich hingegen sind die Inertgase Helium und Argon sowie der unter Raumbedingungen inerte Stickstoff. Während der dreiwöchigen Inertbegasung und dem dabei herrschenden Sauerstoffentzug sterben die Insekten ab.

Im KHM wurde die Insektenbekämpfung mit Methylbromid gegen Brotkäferbefall und Anobien noch bis 1994 durchgeführt. Entsprechend meiner Zielrichtung eines giftfreien und nachhaltig orientierten Museums habe ich 1996 eine Testbegasung an 6 befallenen Gemälden durchführen lassen, die wichtige Erfahrungen und Vorgaben in Hinblick auf die Einrichtung einer museumseigenen Anlage zur Sauerstoffverdrängung lieferte (Abb. 18a). Je 3 Gemälde wurden im Folienzelt entweder mit Argon oder mit Stickstoff unter Zusatz von CO_2 während 3 Wochen behandelt. Die mikrobiologische Begleituntersuchung durch Michaela Berner ergab, daß Argon bei pilzbefallenen Bildern günstiger ist. Das Kunsthistorische Museum hat in der Folge 1998 im neuen Depot die erste österreichische Anlage zur Sauerstoffverdrängung mit Stickstoff eingerichtet, die allen Sammlungen des KHM, aber auch anderen Museen und Privaten zur Verfügung steht (Abb. 18b).

Das Monitoring der inzwischen lückenlos behandelten Gemäldebestände erfolgt mit biologischen Pheromonfallen, ergänzt durch konsequente Depothygiene. Die räumliche Trennung begaster und unbegaster Bestände ist zur Vermeidung jeglichen neuen Schädlingseintrages wesentlich, sei es über Objekte, Fenster, Lüftungsschächte und Gebäudefugen[33].

9) Depot – Quarantäne, Vermeidung weiteren Insektenbefalls und Pilzwachstums:

Von Schadorganismen und von Insekten befallene Objekte müssen, wie bereits betont, unbedingt räumlich getrennt von behandelten oder nichtbefallenen Objekten deponiert werden. Bei pilzbefallenen Museumsobjekten kann weiteres Pilz- und Bakterienwachstum durch Raumtemperierung unterbunden werden. Ist dies nicht möglich, kommen auch Kühllagerung oder Lagerung in Inertgas-Atmosphären in Frage. In unbelüfteten Depots sollte eine Lüftungsmöglichkeit bestehen oder Luftfiltergeräte von ausreichender Kapazität mit Hepa-Filtern eingesetzt werden. Kontaminierte Luft aus verpilzten Luftschächten sollte nur über Hepa-Filter ausgeblasen werden. Undichte Fugen und Öffnungen im Gebäude müssen abgedichtet und eventuell über Klebefallen gesichert werden.

10) Depot – Hygiene:

Entsprechend dem Hygienepaket des Steiermärkischen Landesarchivs (siehe Anm.13) ist die die regelmäßige Reinigung und die Flächendesinfektion erforderlich. Für Museums- und ArchivmitarbeiterInnen sind persönliche Hygiene, Händedesinfektion, die Verwendung von Papierhandtüchern, die Verwendung von Hautschutz, Schutzhandschuhen, Mund- und Nasenmasken und entsprechende Schutzkleidung zum Selbstschutz wichtig. Bei der Arbeit mit kontaminiertem Material ist die Verwendung von Staubsaugern mit Hepa-Filtern bzw. von reinen Werkbänken erforderlich.

32 Robert J. Koestler, Methods of Controlling Biodeterioration in Fine Art: An Overview in: Beiträge des Eurocare Workshops 1995 (wie Anm. 6), S. 7–14. Robert J. Koestler, E. Parreira, E. D. Santorno, and P. Noble, Visual effects of selected biocides on easel painting materials, in: Studies in Conservation 38, 1993, p 265-273. Gerhard Binker, Joachim Binker u. Geog Fröba, Zum Stand der Technik von Kulturgutbegasungen, in: Mikroorganismen und biogene Schadensprozesse in der Kulturguterhaltung: Problemdefinitionen und Lösungsmöglichkeiten (wie Anm. 6).

33 Maria Ranacher, Mikroorganismen und Schadinsekten im Depot: Ursachen, Sanierung, Hygiene und Gesundheitsschutz, in: 9. Bayerischer Museumstag 1997 (wie Anm. 5), S. 53–74.

Abbildung 17:
Pheromonfalle für Stegobium paniceum im Depot der Gemäldegalerie. Aufnahme 2003, Autorin.

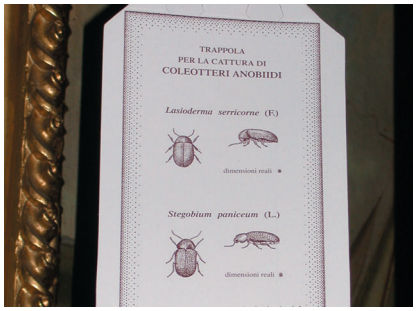


Abbildung 18a:
Testbegasung an 6 insektenbefallenen Bildern im Depot der Gemäldegalerie 1996. Die Bilder werden im Foliensack mit Argon bzw. Stickstoffgas bei computergesteuerter Befeuchtung durch 3 Wochen behandelt. Aufnahme Autorin.

Abbildung 18b:
Die neue, 1998 in Betrieb genommene Inertbegasungsanlage im neuen Depot des KHM. Aufnahme Autorin.

Richtige Verteilung von Wärme statt permanenter Luft- und Staubumwälzung! Hüllflächen konsequent temperieren statt die Atemluft als Heizmedium missbrauchen!

Aus der Erkenntnis der konservatorischen Mängel konventioneller Heiztechniken heraus hat der Restaurator Henning Großeschmidt am Bayerischen Landesamt für Denkmalpflege, zusammen mit dem Architekten Karl Assmann in München zu Anfang der achtziger Jahre dessen nach der Idee der römischen Hypokausten-Wandheizung (Abb.19 a +19 b) entwickelten Wandheizmethodik für Museen anwendbar gemacht. Nach Assmanns Tod 1988 gelang Großeschmidt eine immer stärkere Vereinfachung der Technik, bis hin zu bloßem Einsatz von zwei Sockelheizrohren. Inzwischen ist diese neue (von der Idee her historische) Methode der Wärmeverteilung in Maximal- und Minimalvarianten in vielen Museen, historischen Gebäuden und Neubauten erprobt und dokumentiert[34].

Während bei konventionellem Heizen die Wände des Gebäudes wegen des falschen Luftkreislaufes nicht überall ausreichend warm sind, nehmen temperierte Gebäudehüllflächen gleichmäßig Wärme auf und geben sie als Strahlungswärme an die anderen Raumhüllflächen und die im Raum befindlichen Gegenstände ab. Nur eine temperierte Fläche anzubieten ist nicht ausreichend. So ist die Bodenheizung allein nicht günstig, weil hier die Wände kalt bleiben. Es kommt durch den verkehrten Luftkreislauf besonders in hohen Räumen allmählich zur Wandverstaubung von oben her.

34 Henning Großeschmidt, Klimastabilisierung als Grundlage sachgerechter Bewahrung oder: Das temperierte Haus, sanierte Architektur und „Großvitrine“, in: 9. Bayerischer Museumstag (wie Anm. 5), S. 35–52.

Abbildung 19a u. 19b:
Originales Präfurnium einer Hypokaustenanlage u. originales Hypokaustum mit Wand-Hohlziegeln aus: Horst Fehr, Führer durch die Ausgrabungen am Silberberg Bad Neuenahr-Ahrweiler, Reihe Archäologie an Mittelrhein und Mosel, Bd. 7, Koblenz 1993, Abb. 39, S. 72, u. Abb. 41, S. 76.

Abbildung 20b:
Karthause Mauerbach bei Wien, Eingangsfront mit der dahinterliegenden um 1991 temperierten Hausbesorgerwohnung. Die extrem dicken Mauern sind inzwischen trocken und zeigen kaum mehr Feuchteflecken. Aufnahme 2002, Autorin.

Abbildung 20a:
Karthause Mauerbach bei Wien, Lapidarium. Temperierung der nicht unterkellerten Räume des Lapidariums mit ehemals großer Feuchteproblematik in Gelände und Mauerwerk, die seit dem ständigen Betrieb der Sockelheizrohre zum Stillstand gekommen ist. Aufnahme 2002, Autorin.

Die Heilung der Symptomatiken Kondensation und Staubtransport setzt ab dem Zeitpunkt ein, in dem man Wärme ohne Umwege dorthin bringt, wo sie am meisten gebraucht wird: an Böden und Außenwänden, an die Fensterflächen und an die Kältebrücken der Fensternischen. Diese neue bauphysikalisch günstige Wärmeverteilung bringt bei lückenloser und konsequenter Führung entlang der Stockwerksgrenzen der Gebäudehüllflächen endgültig die Lösung der Kalte-Wand-Problematik. Es genügt ein Vorlauf- und ein Rücklaufrohr in Wandberührung oder knapp unter Putz verlegt, das ständig mit Warmwasser versorgt wird, wobei unterschiedliche Energieträger wie Erdgas oder Öl, Sonnenenergie, Biomasse, Fernwärme etc. zum Einsatz kommen können. Ein seltenes Beispiel einer komplett und intakt erhaltenen Hypo- und Pericaustenanlage mit Präfurnium und Hypocaustum mit Rundziegelsäulchen, Bodenziegeln mit Estrich und Wandhohlziegeln ist in Bad Neuenahr-Ahrweiler am Mittelrhein erhalten (Abb. 19a + 19b).

Beispiele temperierter Bauten in Österreich sind das Lapidarium und die Hausbesorgerwohnung in der Kartause Mauerbach (Abb. 20a + 20b), die ebenerdigen Gisela- und Prinzenräume in Schloß Schönbrunn (Abb. 21) ebenso die

Abbildung 21:
Schloß Schönbrunn, Gisela- und Prinzenräume. Einblick in die von Johann Bergl 1773/74 ausgemalten Räume mit originaler Ausstattung die kürzlich restauriert wurden. Zur Kondensatprävention und Verbesserung der Klimasitutation der ebenerdigen Räume wirde die Temperieranlage unsichtbar hinter bzw. in den Boden integriert. Die Parapets wurden zusätzlich mit Glas geschützt.

Abbildung 22:
Museum im Ledererhaus in Purgstall an der Erlauf, Niederösterreich. Einblick in einen kleinen Museumsraum, dessen Temperierrohre knapp unter Putz verlegt sind.

überdachten Höfe in Schloss Schönbrunn und die Volière im Schönbrunner Tiergarten. Zur Gänze temperiert ist das Museum im Ledererhaus in Purgstall an der Erlauf, Niederösterreich. Die Temperierung ist hier unter Putz verlegt was in den kleinen Räumen ein großer Vorteil ist (Abb. 22), ebenso die Volks- und Hauptschule dort. In Mannersdorf sind eine Schule[35] und ein historisches Gebäude mit Temperieranlagen ausgestattet. Temperierbeispiele sind weiters das Schloß Trautenfels in der Steiermark, Teile der Hofburg Innsbruck und die Kunst- und Wunderkammer (Abb. 25a) und in die Rüstkammer von Schloß Ambras bei Innsbruck (Abb. 26b). Die Vorteile der Temperierung Klimastabilisierung, Kondensatvermeidung und Einsparung von Betriebskosten führten nun auch zur Temperierung des neuen Textildepots und zur Temperierung des inzwischen sanierten Gemäldedepots des Kunsthistorischen Museums (Abb. 24). In der Museumszene ausserhalb Wiens hat sich die Temperiermethode bereits zum „State of the Art" entwickelt, wie Sanierungsfortschritte im Museum Carolino Augusteum in Salzburg zeigen.

35 Jochen Käferhaus, Temperierung eines historischen Gebäudes in Mannersdorf a. Lgb. durch WW-Kollektoren auf der benachbarten Schule, Vorstellung eines Projektes zum Niederösterreichischen Umweltpreis „Kreisläufe – eine runde Sache".

Best Board: Eine interessante Variante der Sockelleistenheizung ist Best Board, eine ursprünglich in den USA entwickelte Sockelheizleiste für Wohnbauten, die in Österreich in Material und Technik verfeinert und zierlicher in Größe und Form erzeugt wird[36]. Diese Sockelheizleiste wird ebenfalls konsequent an der Gebäudehülle verlegt und sorgt für Wohlbefinden im Wohnbereich.

36 Die Sockelleistenheizung kommt der Temperierung am nächsten.

Elektrische Technik in der Temperierung: Dort wo keine Heizzentralen errichtet oder keine Warmwasserohre verlegt werden können, wird die elektrische Methode angewandt, die ebenfalls zu guten Ergebnissen führen kann. Die Heizdrahtschleifen müssen vollständig in mineralischer Überdeckung in Putz oder Stein verlegt werden.

Vorteile der Temperierung bei der Sanierung historischer Bausubstanz

Durch die thermische Versorgung der Gebäudestruktur gelingt es, feuchte Sockelzonen und Mauern trockenzulegen und im Gebäude einen dauerhaften Schutz vor Mauerverfall und Salzwanderung durch aufsteigende Feuchte aufzubauen. Thermisch unterstützte Gebäudehüllflächen und ihnen nahe Materialien sind nachhaltig vor Kondensation geschützt, weil sie nicht kälter als die Raumluft sein können. Voraussetzung ist allerdings der ständige Betrieb der Temperieranlage, während der Heizperiode im gesamten Gebäude, und außerhalb der Heizperiode in den Räumen mit Erdberührung. In niedrigen unterkellerten Räumen genügt meist eine Sockelheizschleife, in höheren Räumen wird in Brüstungshöhe

Abbildung 22a + 22b:
Wien-Inzersdorf, Purkytgasse 12. Zwei Häuser Anfang 20. Jh.. Das Haus auf der linken Seite hat an der Straßenfassade das Wärmedämmverbundsystem, eine 5cm starke Beschichtung von Putz auf Styropor über dem altem Putz aufgebracht, das rechte Haus ist im Vorzustand mit altem Putz. Aufnahmen März 2003, Autorin.

das zweite Rohr oder eine zweite Schleife gelegt. Über die sanfte Erwärmung der Wände gibt die Bauhülle Strahlungswärme in den Raum ab, wodurch für den Menschen ein Gefühl von Behaglichkeit entsteht, weil die Raumluft nicht in Bewegung kommt und die Gebäudestruktur, die „dritte Haut des Menschen", warm strahlt. So können für Architektur und Museumsgut isotherme Raumverhältnisse entstehen, was bedeutet, daß an Innen- und Außenwänden gleiche Oberflächentemperaturen herrschen. Damit fällt der große Problemkreis von Konvektion und Staubtransport weg. Mit einer Temperierung ausgestattete Häuser riechen gut, weil es keine feuchten Ecken gibt und weil die Atemluft unangetastet bleibt.

Die Vermeidung von Kondensation durch Temperierung der Außenwände ist vor allem für Betonbauten lebensnotwendig, weil Beton biologisch wie bauphysikalisch gegenüber Ziegelmauern große Nachteile hat: Wegen des hohen Feinporengehalts und der geringen Wasserdampfspeicherkapazität bestehen in Betonbauten, bei denen deutlich geringere Wandstärken als bei Mauerwerk statisch ausreichen, bei konventioneller Wärmeverteilung also geringere Oberflächentemperaturen und damit tritt frühzeitig Kapillarkondensat auf, ein hohes Risiko für Schimmelbefall! Gerade in Wohnbauten aus Beton wird die Schimmelentstehung besonders begünstigt, weil hier immer neuer Wasserdampf freigesetzt wird, durch falsches Heizen die Außenwände aber kondensatanfällig bleiben. Bei Schimmelbefall muß hier zuerst dekontaminiert und dann präventiv, d.h. thermisch richtig temperiert werden. Das ist die einzige Möglichkeit, Schimmel an Außenwänden zu verhindern! An dem Beispiel einer verschimmelten Wand im Wohnbereich erkennt man erst den Wert des thermischen Sanierens und der richtig ausgeführten thermischen Bausanierung.

Thermische Gebäudesanierung durch sinnvolle Wärmeverteilung oder bloß durch Wärmedämmung?

Die derzeit in Europa forcierte und von der öffentlichen Hand geförderte Methode, Heizenergie ohne Änderung der Wärmeverteilungsart nur durch Wärmedämmung mit Vollwärmeschutzfassaden einzusparen, wird auch als thermische Gebäudesanierung bezeichnet. Doch ist diese Art der „Sanierung" wenig durchdacht und verdient den Namen nicht. Die an der Außenseite der Gebäudehülle aufgebrachten Wärmedämmplatten werden mit Putzträgern versehen und überputzt (Abb. 22a + 22b). Abgesehen davon, daß Art und Charakter der Fassade völlig verändert werden und die Oberflächen wegen der starken Nachtabkühlung in wenigen Jahren verschmutzen, entsteht bei Beibehaltung falschen Heizens in

Abbildung 23a:
Wien X, Ettenreichgasse 42-44, Wohnhaus der Gemeinde Wien Mitte 20. Jh.. Die glatten Fassaden wurden in den letzten Jahren rundum mit einer Vollwärmeschutzfassade ausgestattet, mit dem optischen Effekt, daß Fenster und Bauschmuck nun tiefer liegen und der neue Putz weder in Dichte noch in mineralischer Struktur und Farbe an den alten Putz herankommt. Aufnahme März 2003, Autorin.

Abbildung 23b:
Wien III, Hainburgerstraße 27. An dieser reich gegliederten Fassade wäre die Anbringung des 5cm starken Wärmedämmverbundsystems unmöglich, die Temperierung hingegen wäre an der Innenseite installierbar und kann das Sockelgeschoß trocken halten, wodurch es aufgewertet wird. Aufnahme März 2003, Autorin.

Abbildung 24:
Einblick in das sanierte Gemäldedepot des Kunsthistorischen Museums. Die Temperierrohre sind auf Putz verlegt. Aufnahme Autorin 2004.

Abbildung 25a:
Schloss Ambras bei Innsbruck, Kunsthistorisches Museum. Einblick in die Kunstkammer, deren Gemälde an der temperierten Außenwand hängen, wobei die Temperierrohre sichtbar, d. h. auf Putz verlegt sind. Aufnahme März 2003, Margot Rauch, Schloss Ambras, Innsbruck.

vielen Fällen eher Schimmel an kühl bleibenden Raumflächen, als dies ohne Wärmedämmung der Fall gewesen wäre, da sich wegen der Behinderung der Wasserdampfabgabe nach außen Feuchte in der Wand anreichert und diese Oberflächen schneller feucht werden. An der vor mehreren Jahren „sanierten“ Fassade der Berufsschule II in Linz. sind an den Außenseiten der Nord- und Nordwestseite schwarze Schimmelflecken zu sehen, dies, obwohl das Styropor nicht in Plattenform, sondern als Granulat in den Putz eingearbeitet ist.

Die Außendämmung von Fassaden ist für den Denkmalschutz unbrauchbar, weil sie diese grundlegend verändert und daher nur sehr begrenzt – wenn überhaupt- eingesetzt werden kann (Abb. 23a + 23b). Österreichs Umweltminister Bartenstein hat bereits 1999 die thermische Gebäudesanierung neben der Müllvermeidung als die vorrangigste der nationalen Maßnahmen zur Erfüllung der österreichischen Vorhaben zum Umweltabkommen von Kyoto genannt[37]. Damit erkennt das Ministerium das große Einsparungspotential an, das durch Verringerung der Heizwärmeverluste nutzbar wäre. Doch wurde zur Behebung dieses Defizits die falsche Methode gewählt – ein Beratungsfehler? Offensichtlich, denn zu den Verlusten durch Wärmeleitung über die Gebäudehülle kommen die durch Warmluftaustritt über Fugen und Öffnungen. Beides wird durch die Wandtemperierung verringert. Die Temperiermethode war den Ministerien 1990 und dem Parlament seit 1995 bekannt und sollte längst einbezogen werden. Mit dem Vorliegen der Ergebnisse des Forschungsprojektes PREVENT ist die Politik aufgefordert, eindeutige Vorgaben für energiesparende Wärmeverteilung im Gebäude zu machen.

Will die Bundesregierung das Kyoto-Ziel erreichen, so müssen alle Möglichkeiten der Nachhaltigkeit ausgeschöpft werden. Vor allem muß jene Methode gefördert werden, die bauphysikalisch, gesundheitlich, ökologisch wie ökonomisch die meisten Vorteile zur Erreichung dieses Zieles in sich vereinigt. Die Temperiermethode bietet sich als echte „thermische Gebäudesanierung", die diesen Namen auch verdient, an, denn sie wirkt „sanierend" auf „thermischem" Wege, und ist vorrangig unter die Maßnahmen zur Erreichung der Ziele des Kyoto-Abkommens einzureihen und in das Förderprogramm des Bundes/der Länder aufzunehmen.

37 „Klimaschutzziel ist erreichbar", Zeitungsbericht in: Der Standard, Wirtschaftsteil, 18./19. Dezember 1999.

Sanierung und Prävention bei Museumsgut und Architektur durch Nachhaltigkeit bei der Behebung der Schadensursachen

Aus den vorangegangenen Situationsdarstellungen kondensatgefährdeter Bauten geht hervor, daß Sanierung und Prävention problemorientiert, ursachenbehebend und zukunftsweisend sein müssen. Die Zeiten ineffizienter und zugleich kostenintensiver Methodik in Feuchtesanierung, Klimatisierung und Heizung müssen echten Sanierungsprinzipien und vor allem einer effizienten Staub-, Schimmel – und Kondensatprävention weichen. Seriöse Sanierung bereits eingetretener Schäden erfordert die volle Bereitschaft zu echter Ursachenbehebung. Falls Zweifel aufkommen sollten: Es geht hier um nichts weniger als um Gesundheit, es geht im wahrsten Sinn des Wortes um gesund- oder krankmachende Verhältnisse im Architektur- und Museumsbereich und letztlich aber auch im Wohnbereich.

Die Hüllflächentemperierung ist ein nachhaltiges Wärmeverteilungsprinzip. Die Trocknung und Trockenhaltung der Wände geschieht rein thermisch, ganz ohne Materialeintrag und komplizierte Trockenlegungsverfahren. Damit gehören Gebäudeverwahrlosung durch kondensatbedingten Schädlingsbefall, feuchtebedingte Gefährung der Gebäudestatik und deren teure Behebung der Vergangenheit an. Weil temperierte Wände trocken bleiben entfallen Ursache und Auswirkung für kondensatbedingten Gifteintrag zur Schädlingsbekämpfung und Gebäudedurchgasung weg.

Die neuen Vorgaben für Klima, Thermostabilität und Kondensatfreiheit der Gebäudehülle und Bioresistenz sind sowohl für die Sanierung wie auch für die Prävention wesentlich, damit in Zukunft Schäden an dem uns anvertrauten Kultur- und Architekturgut vermieden werden können[38]. Bauphysikalisch richtige, gesundheitsfördernde wie ökologisch nachhaltige Methoden rechnen sich nicht nur im Vergleich zu konventionellen, additiven Methoden, sondern auch im Betrieb und in der künftigen Erhaltung der Bauten, ob es sich nun um ein unter Denkmalschutz stehendes historisches Gebäude oder um ein einfaches Wohnhaus handelt. Bei Alt- und Neubauten aus porösem, mineralischem Material wie Beton, Ziegel, Naturstein und Mörtel, fallen mit dem Einsatz der Tempe-

38 Henning Großeschmidt, Das temperierte Haus: Sanierte Architektur und „Großvitrine", 14 Jahre besucherfreundliche Schadensprävention mit Temperieranlagen, Landesstelle für die nichtstaatlichen Museen beim Bayerischen Landesamt für Denkmalpflege (Hrsg.), in: Aspekte der Museumsarbeit in Bayern, MuseumsBausteine Bd. 5, S. 101–116.

riermethode alle teuren Horizontalisolierungen weg, alle uneffizienten und kostspieligen Trockenlegungsverfahren und die durch wiederkehrende Salzschäden trotz „sanierender“ Putze regelmäßig anfallenden Putzerneuerungen der Sockelzonen gehören damit der Vergangenheit an! Ein thermisch optimal versorgtes Gebäude bleibt nämlich warm und trocken und selbst die Feuchte von Schnee oder Schlagregen dringt nicht mehr tief in die Fassade ein, sondern trocknet rasch wieder ab.

Die Temperiermethode anzuwenden bedeutet für die Gebäudesanierung, Gebäudeerhaltung und für die Gesundheit der Menschen eine vierfach wirksame synergetische Wirkung:

- Trockenlegung von durchfeuchtetem Mauerwerk in Erdgeschoß und Keller
- präventive Gebäudeerhaltung durch Trockenhaltung und Bioresistenz von Mauerwerk und Holzbauteilen
- Temperierung der Gebäudehülle und behagliche Beheizung der Räume
- stabiles und homogenes Raumklima mit guter Atemluft.

Durch die neuen Vorgaben wird „Sanierung statt Abriß“ und damit die authentische Erhaltung von Gebäuden auch ökonomisch sinnvoll und über Förderung im Rahmen des Abkommens von Kyoto finanzierbar. Mit dem Forschungsergebnis von PREVENT ist die Temperiermethode in Österreich nun kein Insider-Tip mehr, sondern eine staatlich anerkannte Trockenlegungs- und Heizmethode, die die wirtschaftlichen Chancen der Substanzerhaltung unseres architektonischen Erbes in Städten und in Dörfern dramatisch erhöht[39].

Im Idealfall konservatorisch richtiger Museums- oder Baudenkmalsanierung bleiben mit dem Wegfall des Problemkreises falsches Heizen, Kondensation und Staubverteilung noch genügend andere Aufgaben, wie z. B. das verfeinerte Monitoring für Sammlungsgut, bessere Prävention, Lichtschutz, Luftfilterung, Hygiene, optimale Klimakontrolle und vor allem mehr Potential für Konservierungs- und Restaurierungsarbeiten bestehen. Die frei werdenden Mittel können für anderes verwendet werden, z. B. für Hepa-Filter, für Wartung und die regelmäßige und fachgerechte Reinigung noch erforderlicher Klimaanlagen oder die Mittel werden für das Reinigungsbudget der Häuser verwendet.

39 Ivan Neswadba (Hrsg.), „Innovative Systeme“ Hypokaustenheizung mit Trocknungseffekt, Stand November 2002, Schriften des Bundesministeriums für Arbeit und Wirtschaft 2002, S. 2-66.

Resumee

Ein thermisch optimal sanierter Museumsbau oder ein Architekturobjekt in der Denkmalpflege, das korrekt temperiert ist wird biogen nicht mehr angegriffen,

Abbildung 26a:
Ansicht des Ledererhauses in Purgstall, Niederösterreich. Das am Ufer der Erlauf gelegene Heimatmuseum ist seit 1997 temperiert und dadurch optimal vor Feuchtigkeit geschützt. Aufnahme 1998, Autorin.

Abbildung 26b:
Schloss Ambras bei Innsbruck, Kunsthistorisches Museum, Rüstkammer von außen gesehen, Aufnahme März 2003, Margot Rauch, Schloss Ambras, Innsbruck.

weil das Mauerwerk einschließlich der Gebäudehülle trocken bleibt (Abb. 25). Damit ist die in den Vorgaben genannte essentielle Forderung nach Bioresistenz für Bauwerk und Ausstattung erfüllt. Ein temperiertes Haus bleibt frei von Kondensation und Schimmel, was vor allem im Wohnbau, ob Alt- oder Neubau, in Schulen und Krankenhäusern etc. von größtem gesundheitlichen Vorteil ist. Dies gilt natürlich auch für das Museum und andere Kulturbauten, denn ein optimal saniertes, staubfreies und gepflegtes Haus ist für sein Publikum und sein Personal eine Wohltat in Bezug auf Gesundheit und Wohlbefinden.
Für das Architekturerbe unserer unverwechselbaren Städte und Dörfer – ein von der Politik in Sonntagsreden immer wieder betonter Teil der österreichischen und europäischen Identität – sind die originale Erhaltung und unverfälschte Weitergabe an die nächsten Generationen wesentliche Elemente. Durch Temperierung der Gebäude kann die durch Feuchte und Schadsalze bedingte Desolation thermisch gestoppt werden und die Baudenkmäler – ohne verfälschende Materialeinbringungen und ohne sich ständig wiederholende Schäden wie Putzerneuerung, Injektage und Dränagierungen optimal erhalten werden.

Die Thermische Sanierung durch Temperierung ist für die Gesundheit der Menschen und für die Erhaltung unseres Architekturerbes von entscheidendem Vorteil weil sie
1) die Trockenlegung des Mauerwerks und das Ende der Salzschäden bewirkt
2) durch Kondensatprävention im Mauerwerk einen dauerhaften Feuchteschutz garantiert
3) die Partikelbelastung der Atemluft gegen Null senkt und damit die Gesundheit der Menschen (besonders der Allergiker) fördert
4) eine ökologisch und bauphysikalisch einwandfreie Heizmethode ist und
5) ökonomische eine große Energieeinsparung von 29% an Heizung und Haustechnik bringt.

Damit sind Sanierungen im Kulturerbe und im Besonderen im Architekturerbe konservatorisch seriös, ökologisch und ökonomisch einwandfrei druchführbar[40]. Damit ist endlich eine vorteilhafte Alternative der Feuchtesanierung und Prävention gegenüber den unseriösen Brutalsanierungen von historischen Gebäuden, den dubiosen Methoden der Feuchtebekämpfung und unnötigen Horizontalisolierungen vorhanden. Die Temperierung als thermische Bausanierung und als sanfte und gesunde Gebäudeheizung muss nun einer breiten Öffentlichkeit d.h. möglichst vielen Entscheidungsträgern und möglichst vielen Bürgerinnen und Bürgern bekannt werden, damit das Kyotoziel verwirklicht werden kann.

40 Die in Investoren- und Architektenkreisen kolportierte Meinung, daß Neubauen billiger käme als die Sanierung eines Altbaues, ist teilweise eine gesteuerte Falschmeldung, teilweise hat die bisher ungelöste Kondensat- und Feuchteproblematik von Altbauten und das Chaos ungekonnter Erdgeschoß- und Kellersanierungen Verwirrung gestiftet und horrende Kosten verursacht.

Alfons Huber

The Optimal Museum Window

Abstract

The reduction of heat transfer in summer into historical Kastenfensters without external solar protection using measures within the window case was studied. The effectiveness of various combinations of solar protection materials and the infrared transmission of various glasses and solar protection foils were characterized The heat flow in the window case at night and the effectiveness of forced circulation of the window case were clarified. Additionally, smaller artificial light fixtures that allow minimization of mechanical ventilation were discussed. The study included historical two-layer glass ceilings.

Das optimale Museumsfenster

Bei historischen Kastenfenstern ohne außenliegenden Sonnenschutz wird untersucht wie man den sommerlichen Wärmeeintrag mit Maßnahmen innerhalb des Fensterkastens verringern kann. Die Wirksamkeit verschiedener Kombinationen von Lichtschutzmaterialien und das Infrarot-Rückhaltevermögen unterschiedlicher Gläser und Lichtschutzfolien werden beschrieben. Der Wärmeabfluß im Fensterkasten während der Nacht und die Wirksamkeit der Zwangsbelüftung des Fensterkastens werden dargestellt. Ergänzend werden kleinere Anschlußleistungen für Kunstlicht diskutiert, die eine Minimierung mechanisch unerstützter Lüftung erlauben. Die Untersuchung bezieht zweischalige historische Lichtdächer mit ein.

Summary

The Ancient Musical Instruments Collection (SAM) of the Kunsthistorisches (Art History) Museum in Vienna was closed in 1988 due to unsatisfactory climate conditions. Relative room air humidity under 20% in winter and room air temperature up to 30°C in summer, combined with minimal internal protection from sunlight, had led to severe damages. Nearly all of the objects made of organic materials (wood, ivory, tortoise shell, etc.) had suffered irreversible shrinkage due to the extreme dryness. The artificial lighting was limited to ceiling lights, which were switched off during periods of strong sunlight.

The SAM was reopened in 1993 after thorough renovation, however neither installation of externally shaded and heat reflecting windows nor a ventilating system were possible. The “Kastenfenster” (windows with two independent single-glazed casements separated by a space of 10 cm or more) were repaired, with all inner casements receiving a seal, half also received a second glass pane held in place by frames which are sealed against the casement. Protection against direct sunlight and too high daylight levels was mounted between the two sets of casements. Against the wishes of the staff, the new artificial lighting system was sized to provide the current standard level of illumination (ca. 40 W/m²). The alternative room ventilation system suggested by the staff was also not realized. This would have involved using a slight overpressure to cause air from the cellar to flow through historic shafts into the rooms (air fountains) and then flow out through gaps in the window casements and sills. In the end one circulating fan was mounted in each of two widely separated window niches to act as exhaust fans**,** whereby nearly one air exchange per hour (1 ACH)is possible.

In midsummer 1994, the SAM area room temperatures rose up to 32°C — higher than before the closure. This was a true shock for the staff. In particular, the renovation of the windows, in combination with protection against light and heat, was implemented only after extensive experiments and measurements. These, through a combination of various light protection devices, had enabled reduction of the temperature of the inner glass pane from over 40°C to a maximum of 31.5°C in direct sunlight. Thus, how it still came to such an extreme rise of room temperature in summer was unexplainable at the time.

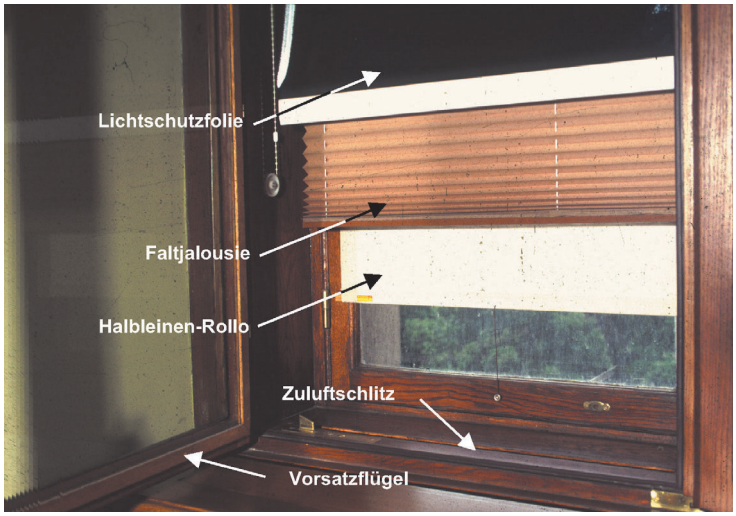
The initial goal of the partial project PREVENT/SAM was clarification of the energy flows in the window and wall areas, in order to uncover the mechanisms suspected of causing heat accumulation, and development of methods for reducing the maximum room temperatures in summer. For windows without external shading, the following goals for optimization for museum usage in summer were defined:

- Minimize heating of the room air due to the inner glass pane functioning as a heat exchanger (i.e. lowest possible surface temperature of the inner pane)
- Minimize the total radiation into the room during the period of direct solar irradiation.

This meant installation of the most effective shading within the Kastenfenster, as well as taking measures for minimizing heat flow from the window cases to the inside, improving heat removal to the outside and improving these even further in the cool hours of the night. In detail, the following questions presented themselves:

- Description of the heat flow in the historical Kastenfenster during direct solar irradiation
- Study of the effectiveness of solar protection measures in the Kastenfenster
- Evaluation of internal solar protection methods
- Description of the effectiveness of light protection combinations
- Study of the infrared transmission of various glasses and light protection foils
- Measurement of heat flows at night
- Study of the effectiveness of forced ventilation of the Kastenfenster at night
- Determination of the heat balance in the Kastenfenster and in the exhibition areas (which heats more: the sun or artificial lighting?).

In order to more precisely determine the heat flows, the measurements were made using the method of cross section measurement developed by Karl



Kastenfenster window with light protection measures. From: A. Huber, The optimal Museum window.
Lichtschutzfolie – light protection foil
Faltjalousie – folding jalousie
Halbleinen-Rollo – half-linen roll shade
Zuluftschlitz – ventilation slit
Vorsatzflügel – front window casement

Prodinger. Thus, the densest possible temperature profile was measured in the area where the heat flows occur. In order to document these over the wall as well as in the window areas, heat flow sensors were used as well as temperature sensors. The basic data measured were the outside air temperature and the room air temperature, both measured 1 m from the window, and the temperatures within the window case, near the inner and outer glass panes as well as between the individual protection foils.

First various shades (traditional linen roll shades, aluminum-coated textile folding blinds, and silver-coated plastic foils) were investigated individually for their temperature-lowering effectiveness. Through the combination of, at first, two and then three layers, the interaction between reflecting and nonreflecting layers was then studied. This confirmed the hypothesis of the "hierarchy of light protection," whereby, with combinations of reflecting and nonreflecting materials, the reflecting layer in a window case must be mounted next to the inside glazing rather than closer to the radiation source (the sun) while the nonreflecting material shows the best performance directly behind the outside glass pane.

Two measures demonstrated themselves as especially efficient: ventilation of the Kastenfenster as well as installation of an additional glazing at the backside of the inner casement. This latter converts simple windows into combination windows, with a similar effect as when the inner glazing is replaced with insulating glass. Both measures cause a reduction of heat transfer from the Kastenfenster into the room of around 30%. Here a frequently controversially discussed corollary of the light protection hierarchy also proved itself — that insulating glass (or a second glazing) must be mounted at the inner casement of the Kastenfenster, so that the transport to the inside of the heat generated by radiation absorption within the window case is reduced. Note: The still clean space between the panes shows that a well sealed second glazing requires no indepen-dently openable frame.

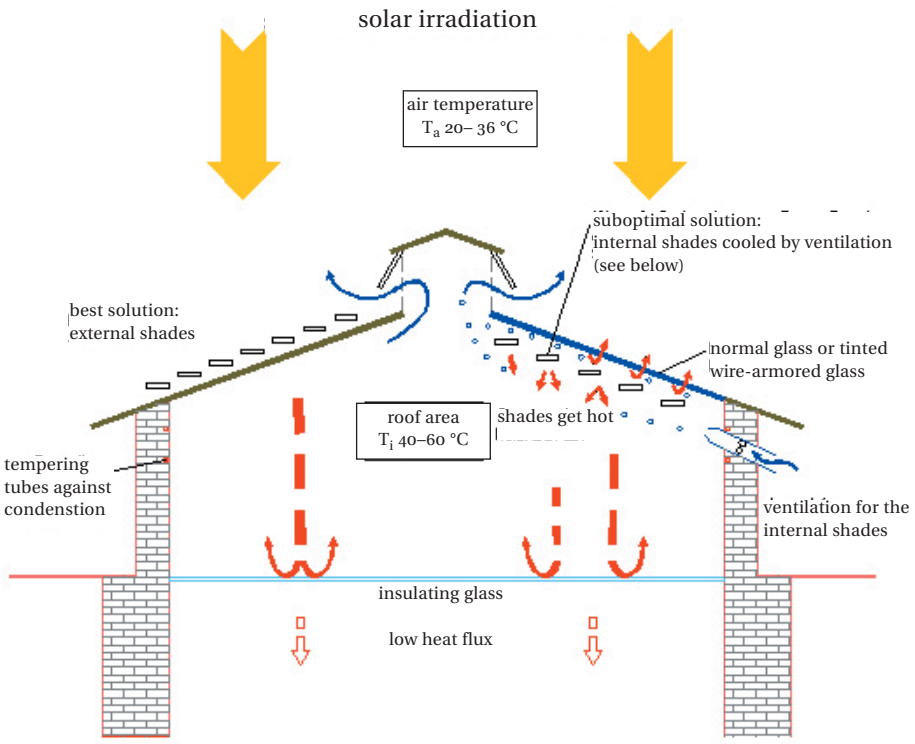
The investigations were expanded to include the renovation of two-layer glass roofs. These demonstrated that an external insulating glazing achieves its goal only with an external shade. Surprisingly, an externally mounted insulating glazing led to higher temperatures in the building compared to older single layer glazings, which were frequently lightly tinted and armored with wire net, giving them a better filtering capability.

The question posed at the beginning can be answered very simply — with mostly darkened windows, operation of electrical room and display lighting in midsummer leads to an increase in room temperature because the additional electrical energy required for the lighting fixtures creates more heat than that entering through walls and windows with interior shades. This is especially true for the high levels of artificial lighting that are commonly designed into museums and exhibitions, whose undesired heating effect can only be kept within acceptable boundaries by ventilating systems with large cooling capacities.

The measurement results can be summarized for the case of midsummer by the following core statements:

1. To minimize the heating from direct solar irradiation in buildings with heavy shells and Kastenfensters without external shading, light protection devices between the window casements are necessary, whose order is relevant (heavy cloth near the outer glazing, reflective material near the inner glazing). The mass of the material is more important than the reflectivity.
2. If the window case can be mechanically ventilated, insulating glass is of secondary importance. If insulating glass is used it should be mounted in the inner casement. In the ideal case, the effects of ventilation of the casement and double glazing for the inner casement are additive.
3. Darkening of the windows and installation of artificial lighting leads to increased heat dissipation in midsummer. Even for installed lighting

Optimized glass roof renovation



optimized glass roof renovation

capacities as low as 10 W/m² of exhibition space, room temperatures of over 26°C occur at times.

4. In order to compensate for the increased heat dissipation from artificial lighting, installation of a ventilating system is necessary. For reduced illumination (max. 150 Lux on the displayed object), the lighting power can be limited to 10 W/m², even in high-ceilinged rooms. For heavy-walled buildings with such reduced illumination, a low performance exhaust system (ca. 1 ACH) is satisfactory. With intelligent control and night ventilation, the maximum temperature (26°C) will rarely be exceeded, for a moderate number of visitors.
5. Two-layer glass roofs with insulating glass on the outer side, without external shading, cause greater temperature rise in roof areas than with the older simple wire-armored glass.

In the 56-page "short-version" of the German-language project report, also on this CD, results are presented in much greater detail. The 130-page complete study can be found on the website of the Kunsthistorisches Museum. (http://khm.at, Sammlungen/Sammlung alter Musikinstrumente/Forschung).

Alfons Huber

Das optimale Museumsfenster

Vorbemerkungen

In den letzten 15 Jahren wurden die meisten Österreichischen Bundesmuseen sowie mehrere Landes- und Regionalmuseen mit einem Mitteleinsatz von rund 2 Milliarden Schilling generalsaniert. Die Erwartungen in diese lange und dringend geforderten Maßnahmen lagen sehr hoch. Der Sanierungsphase war eine intensive und teilweise kontroversiell geführte Diskussion über Möglichkeiten und Sinnhaftigkeit der Klimatisierung in Museen entweder durch bauliche oder durch technisch gestützte Maßnahmen vorausgegangen. Gerade im historischen Altbau waren die Möglichkeiten einer Vollklimatisierung sehr beschränkt; darüber hinaus mehrten sich kritische Stimmen aus dem Kollegenkreis ausländischer Museen, die vor einem allzu euphorischen Einbau von zentralen HKL-Anlagen warnten. Es sei nicht Aufgabe der Haustechnik, Symptome von Baumängeln oder falschem Nutzerverhalten zu bekämpfen, die aus dem Blickwinkel der „Präventiven Konservierung" in einem Museum gar nicht entstehen dürften. Darüber hinaus zeigte sich, daß einerseits mit den großen haustechnischen Anlagen enorme finanzielle und personelle Resourcen für Betrieb und Wartung abgezogen werden, und daß andererseits die seitens der Planer zugesagten optimalen Konditionen in vielen Fällen nicht eingehalten werden und häufige Klimapannen zu einem zermürbenden Dauerthema des Alltagsbetriebes werden können.

Grundsätzlich sollte in jedem Museum und museal genutztem Gebäude das Prinzip der „Präventiven Konservierung" gelten, d. h. die Objekte und Ausstattungsstücke sollten jene optimierten Aufbewahrungsbedingungen vorfinden, die restauratorische Eingriffe gar nicht erst notwendig machten bzw. durch gezielte Pflegemaßnahmen die Restaurierzyklen in möglichst großen zeitlichen Abständen erfolgen lassen. Die dazu notwendigen Voraussetzungen lassen sich in einem Ziel zusammenfassen: Höchstmögliche Konstanz des Raumklimas innerhalb der konservatorisch zuträglichen Grenzwerte.

Im Laufe der Zeit zeigte sich, daß das äußerst komplexe Thema „Klima im Museum" von den meisten Architekten und Planern in seiner konservatorischen Tragweite völlig unterschätzt und die Verantwortung dafür gewöhnlich „der Haustechnik" zugeschoben wird. Sehr oft beschränkte sich der Schwerpunkt der Planung auf eine Verbesserung der Infrastruktur sowie gestalterische Eingriffe in der Präsentation der Sammlungen. Die bauphysikalische Eigendynamik der großen Baukörper, das Nutzerverhalten u. ä. wurden dabei oftmals nicht genügend evaluiert bzw. wahrgenommen. Dabei wird bis heute übersehen, daß viele bauliche Maßnahmen und (Fehl-) Entscheidungen (zu großer Lichteintrag, fehlende Speichermasse, fehlender oder ungeeigneter Sonnenschutz, fehlende Klimaabschnitte und Pufferzonen, u. ä.) überhaupt erst jene Probleme verursachen, deren Beseitigung dann unreflektiert einer HKL-Anlage überantwortet werden, die dazu entweder gar nicht in der Lage oder in manchen Fällen (wie etwa im Technischen Musem Wien) nicht einmal geplant wird. Nicht zuletzt ist zu betonen, daß eine Klimaanlage keineswegs als Allheilmittel sondern mehr oder weniger als konservatorische Krücke anzusehen ist, die nicht nur in Anschaffung, Betrieb und Wartung beträchtliche Mittel bindet, sondern daneben auch neue konservatorische Probleme schafft (wie etwa Staubumwälzung, Ionisation von Staubteilchen, Staubfahnen, Kapillarkondensation an kalten Bauteilen, Bilden von Wasserdampfclustern, Kurzzeitregelschwankungen etc.).

Sowohl aus konservatorischer als auch aus wirtschaftlicher Sicht ist der jüngste Trend zu lichtdurchfluteten Glashäusern ohne Speichermasse als Fehlentwicklung anzusehen. Die Zukunft der Haustechnik in Museen wird auf lange Sicht in kleinen intelligenten heizungs- und lüftungstechnischen Einheiten zu suchen sein, die den thermostabilen Massespeicher des Baukörpers unterstützen und nutzungsbedingte Irregularitäten kompensieren.

Während in den Wintermonaten die Frage nach dem konservatorisch unbedenklichsten Heizsystem im Vordergrund steht spielt im Sommer ein effektiver Licht- und- Sonnenschutz eine zentrale Bedeutung. Im Zuge der diversen Museumssanierungen im In- und Ausland zeigte sich völlig unerwartet, daß zwischen den von Wirtschaft und Planern angebotenen Lösungen zum Licht- und Wärmeschutz einerseits und den nach der Sanierung gemessenen Raumklimawerten andererseits fast jedes Mal große Diskrepanzen beobachtet wurden. Auch in der Sammlung alter Musikinstrumente (SAM) des Kunsthistorischen Museums in Wien, die zwischen 1988 und 1993 einer Generalsanierung unterzogen wurde, stiegen trotz Installierung eines hochwirksamen Lichtschutzes die Raumtemperaturen im Sommer nach der Wiedereröffnung auf Werte, die höher lagen als je zuvor dokumentiert.

Dieses Phänomen galt es aus der Sicht des für die klimatischen Aufbewahrungsbedingungen zuständigen Restaurators in der Realität des praktischen Museumsbetriebes zu untersuchen. Durch das Projekt sollten die im Fenster montierten Licht- und Wärmeschutzmaßnahmen exakt definiert, ihr Verhalten bei direkter Sonnenbestrahlung erfaßt und die Wärmeflüsse im Kastenfenster dokumentiert werden. Nicht zuletzt galt es, jene Wirkungsmechanismen nachzuvollziehen, die zu dieser zunächst unerklärlichen Wärmeakkumulation geführt hatten. Im Zuge der Messungen rückte dabei die Bedeutung des Einflusses von anderen haustechnischen Installationen wie Raum- und Objektbeleuchtung, Luftbefeuchter etc. zunehmend in den Vordergrund. Nicht zuletzt konnten auch einige interessante Details zum Themenkreis „Lichtdächer“ gewonnen werden, die in der musealen Praxis bisher wenig Beachtung gefunden haben dürften. Der vorliegende Beitrag ist die aktualisierte Zusammenfassung des 130 Seiten umfassenden Endberichts „Das optimale Museumsfenster“, der auf der *homepage* des Kunsthistorischen Museums www.khm.at unter den Links „Sammlungen / Sammlung alter Musikinstrumente / Forschung“ eingesehen und abgerufen werden kann.

Mein Dank gilt all jenen Personen, die am Zustandekommen dieses Projektes mitgewirkt haben. Dr. Karl Prodinger hat mit seinem profunden Wissen die ambivalenten Fragenkomplexe des Restaurators in eine methodisch anwendbare Form umgesetzt. Diese wiederum wurde von Dr. Jochen Käferhaus und seinem engagierten Team meßtechnisch realisiert. Was mir der Koordinator des Projekts Stud.Ass. Florian Wicke an Zeit und Know-how zur Verfügung gestellt hat, um dem Bericht mit seinen zahlreichen Grafiken eine ansprechende Form zu geben, hat den Rahmen üblicher kollegialer Kooperationsbereitschaft bei weitem überschritten; für diesen Freundschaftsdienst schulde ich ihm besonderen Dank. Zuletzt hat Henning Großeschmidt dankenswerter Weise der Zusammenfassung durch beharrliches Nachfragen zu besserem Verständnis und präziserer Aussage verholfen.

Univ.-Doz. Mag. Alfons Huber
Restaurator der Sammlung alter Musikinstrumente
Kunsthistorisches Museum Wien

Inhalt

1 Abkürzungen und Definitionen
2 Einführung
2.1 Lage der Sammlungsräume und Beschreibung der Fenster
2.1.1 Infrarot-Retentionsverhalten verschiedener Fenstergläser
2.2 Meßmethodik und Meßaufbau
2.2.1 Querschnittsmessung
2.2.2 Anordnung der Fühler
2.2.3 Darstellung der Meßkurven
2.3 Wärmeschutzmaßnahmen
2.3.1 Belüftung des Fensterkastens
2.3.2 Vorsatzflügel („3. Scheibe“, „Isolierverglasung“)
2.3.3 U-Werte des Kastenfensters mit verschiedenen Folien
3 Effizienz der Licht- und Wärmeschutzmaßnahmen – Meßergebnisse
3.1 Verhalten einfacher und kombinierter Lichtschutzmaßnahmen
3.1.1 Rollo Jalousie
3.2 Wirksamkeit der Fensterkastenbelüftung („Oberlicht auf“)
3.2.1 Rollo und Folie Jalousie und Folie
3.2.2 Hierarchie des Lichtschutzes
3.2.3 Dreifacher Lichtschutz
3.3 Vorsatzflügel („3. Scheibe“) zur Simulation von innenliegender Isolierverglasung
3.3.1 Auswirkung des Vorsatzflügels auf nichtreflektierenden Lichtschutz
3.3.2 Auswirkung des Vorsatzflügels auf zweilagigen Lichtschutz
3.4 Das optimale Museumsfenster
4 Überlegungen zur Isolierverglasung von zweischaligen Lichtdächern
4.1 Vorbemerkungen
4.1.1 Wirkungsmechanismen
4.2 Versuche mit außen- bzw. innenliegender Isolierverglasung
4.2.1 Isolierverglastes Kastenfenster bzw. Lichtdach ohne Lichtschutz
4.2.2 Isolierverglastes Kastenfenster mit traditionellem Lichtschutz im Fensterzwischenraum
4.2.3 Gegenüberstellung
4.3 Reflektierende bzw. getönte „Sonnenschutzgläser“
4.3.1 „Sonnenschutzgläser“ ohne Lichtschutz
4.3.2 „Sonnenschutzgläser“ mit Rollo im Fensterzwischenraum
4.4 Optimierungsvarianten
4.4.1 „Altes Dach“ „Konventionelle Sanierung mit außenliegender Isolierverglasung“
4.4.2 Situationsvergleich „Worst Case“ „Best Case“
4.5 Nachrüsten bauphysikalisch ungünstiger Sanierungskonzepte
5 INNERE LASTEN – Tageserwärmung – Kühlung
5.1 Vorbemerkungen
5.2 Innere Lasten im Ausstellungsbereich
5.3 Energieeintrag durch Sonne und Beleuchtung
5.4 Wirksamkeit technisch gestützter Lüftung während der Nachtstunden
6 Zusammenfassung der Meßergebnisse
6.1 Beschattungsmaßnahmen
6.2 Wärmeschutzmaßnahmen
6.3 Kühlung und Lüftung
6.4 Raum- und Objektbeleuchtung
6.5 Lichtdächer
7 Literaturauswahl

1 Abkürzungen und Definitionen

SAM Sammlung alter Musikinstrumente
F Folie
G Glas
KOG Kunstforum Ostdeutsche Galerie
nm Nanometer
OL Oberlichte
Rth Wärmewiderstand
U-Wert Wärmedurchgangskoeffizient

Bezeichnung	Formelzeichen	Wert	Einheit
Wärmeübergangswert außen	Alpha-a	8,30	W/m^2K
Wärmeübergangswert innen	Alpha-i	7,46	W/m^2K
Wärmeübergangswert der Zwischenfolie	Alpha-z	7,04	W/m^2K
Luftgeschwindigkeit außen	vw-a	0,5	m/s
Luftgeschwindigkeit innen	vw-i	0,3	m/s
Luftgeschwindigkeit Zwischenfolie	vw-z	0,2	m/s
Außentemperatur	Ta	–10	°C
Innentemperatur	Ti	20	°C
Temperaturdifferenz	DeltaT	30	K
Wärmeleitwert Glas	λ	0,73	W/mK
Wärmeleitwert Folie	λ	0,139	W/mK
Wärmewiderstand Glas	Rth-Glas	182,5	W/m^2K
Wärmewiderstand Folie	Rth-Folie	695	W/m^2K
Gesamter Wärmewiderstand	Rth-gesamt	siehe Tab. 3	W/m^2K
u-Wert gesamt (früher k-Wert gesamt)	k-Wert gesamt	siehe Tab. 3	m^2K/W
Wärmedurchgang bei 30 K Temp. Differenz	W/m^2 bei 30 K	siehe Tab. 3	W/m^2

2 Einführung

Die Sammlung alter Musikinstrumente (SAM) des Kunsthistorischen Museums in Wien wurde 1988 wegen unzuträglicher klimatischer Bedingungen geschlossen. Werte der relativen Luftfeuchte unter 20% im Winter und Raumtemperaturen bis zu 30 °C im Sommer bei minimalem innenliegenden Lichtschutz hatten zu schweren Licht- und Klimaschäden geführt. Durch die extreme Trockenheit haben nahezu alle aus organischen Materialien (Holz, Elfenbein, Schildpatt, etc.) gefertigten Objekte irreversible Schwundschäden erlitten. Das Kunstlicht beschränkte sich auf historische Raumluster, die lediglich Abends, bei Dämmerlicht oder während der Wintermonate eingeschaltet wurden.

Im November 1993 wurde die Sammlung nach einer umfassenden Sanierung wieder eröffnet, bei der allerdings weder Außenbeschattung und Wärmeschutzverglasung der Fenster noch der Einbau einer Lüftungsanlage erfolgte. Die Fenster wurden instandgesetzt, und wie weiter unten im Detail beschrieben mit mehreren Licht- und Wärmeschutzeinrichtungen ausgestattet. Die bisher unbeleuchteten Vitrinen wurden elektrifiziert, über Stromschienen gespeiste Deckenstrahler dienten als akzentuierende Objektbeleuchtung. Darüber hinaus wurde die neue Kunstlichtanlage (gegen Empfehlung des Nutzers) auf eine heute übliche Leistung (ca. 40 W/m^2) ausgelegt. Auch die seitens der Sammlung vorgeschlagene Reaktivierung der ursprünglich vorhandenen alternativen Raumbelüftung wurde nicht realisiert. Sie hätte Luft aus dem zweiten Kellergeschoß mit leichtem Überdruck über historische Schächte in die Räume gefördert (Luftbrunnen), die dann über Fugen in den Fensterbänken über die Fensterkästen abgeströmt wäre.

Im Hochsommer 1994 stiegen die Raumtemperaturen im Sammlungsbereich auf bis zu 32°C an – also höher als vor der Schließung! Dies bedeutete für die Nutzer einen regelrechten Schock. Gerade die Sanierung der Fenster in Verbindung mit Licht- und Wärmeschutzmaßnahmen war erst nach umfangreichen

Versuchen und Messungen umgesetzt worden. So war es z. B. gelungen, durch gezielte Kombination verschiedener Lichtschutzeinrichtungen die Oberflächentemperatur der Innenscheiben bei direkter Sonnenbestrahlung von über 40 °C auf max. 31,5 °C abzusenken. Wie es dennoch im Sommer zu diesem extremen Anstieg der Raumtemperatur kam, blieb zunächst unerklärlich.

Das Ziel des Teilprojekts „Prevent/SAM“ war anfangs daher die Klärung der Energieflüsse im Fenster- und Wandbereich, um den hier vermuteten zur Wärmeakkumulation führenden Wirkungsmechanismus aufzudecken und Maßnahmen zu Senkung der Obergrenze der sommerlichen Raumtemperaturen ableiten zu können. Bei einem Fenster ohne Außenbeschattung wurden für die Optimierung im Sommerfall folgende Ziele definiert:

- Minimierung der Aufheizung der Raumluft durch die als Wärmetauscherfläche wirksamen Innenscheibe (d. h. geringstmögliche Oberflächentemperatur der Innenscheibe)
- Minimierung des Gesamt*strahlungs*eintrags in den Raum in der Zeit direkter Sonneneinstrahlung.

Dies bedeutet, zunächst eine möglichst wirksame Beschattung *im* Kastenfenster zu installieren, ferner Maßnahmen zur Minimierung des Wärmeflusses aus dem Fensterkasten nach innen sowie zur Verbesserung der Wärmeabfuhr nach außen zu ergreifen und diese in den kühlen Nachtstunden noch weiter zu steigern. Im Detail ergaben sich folgende Themen- und Fragestellungen:

- Beschreibung der Wärmeflüsse im historischen Kastenfenster bei direkter Sonnenbestrahlung
- Untersuchung der Wirksamkeit von Sonnenschutzmaßnahmen im Fensterkasten
- Beschreibung der Wirksamkeit von Lichtschutzkombinationen
- Untersuchung des Infrarot-Rückhaltevermögens unterschiedlicher Gläser und Lichtschutzfolien
- Erfassung des Wärmeabflusses während der Nacht
- Untersuchung der Wirksamkeit von Zwangsbelüftung nachts
- Erstellen einer Wärmebilanz am Kastenfenster und im Ausstellungsbereich (was heizt mehr: Sonne oder künstliche Beleuchtung?)

2.1 Lage der Sammlungsräume und Beschreibung der Fenster

Die Sammlung alter Musikinstrumente ist im 2. Obergeschoß der Neuen Hofburg untergebracht. Die nach Südosten auf den Burggarten orientierten Fenster sind von Sonnenaufgang bis etwa 12 : 30 Uhr (Sonnenzeit) direkter Sonneneinstrahlung ausgesetzt. Die Fassade ist von 22 Fenster- bzw. Fenstertüröffnungen unterbrochen. Im Saal IX befinden sich zusätzlich zwei nach Südwesten orientierte Fenster, die am Nachmittag der Sonnenbestrahlung ausgesetzt sind.

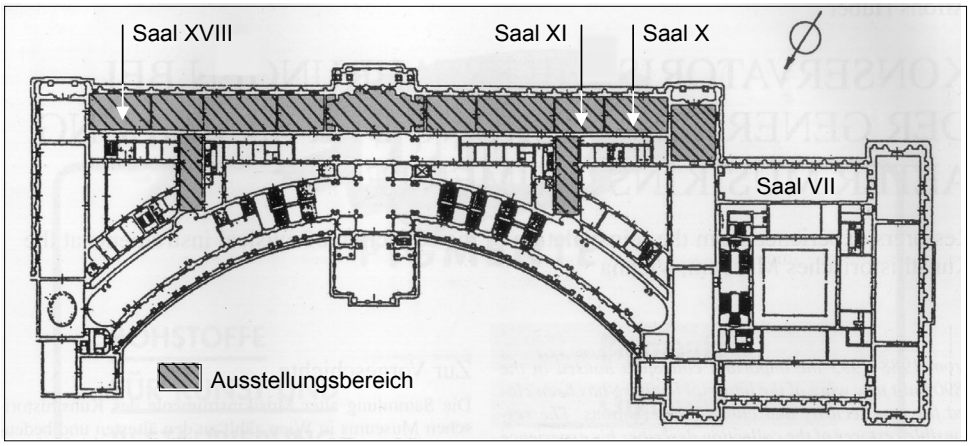


Abb. 1:
Die Ausstellungsräume der Sammlung alter Musikinstrumente im zweiten Obergeschoß der Neuen Hofburg in Wien

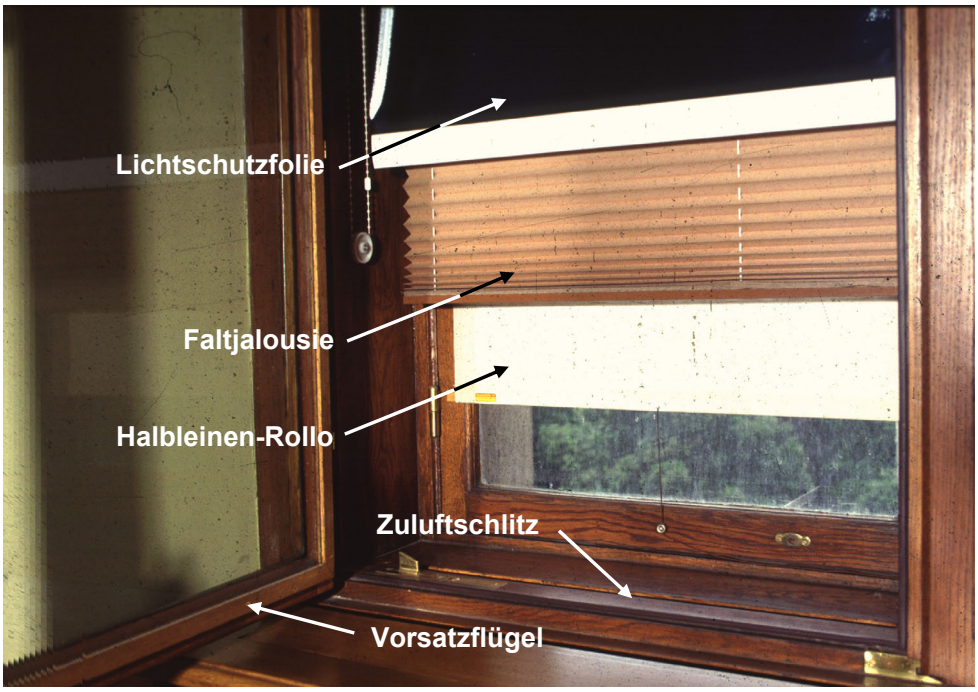


Abb. 2:
Gesamtansicht der Fenster mit Lichtschutzeinrichtungen, darunter Heizkörpernische

Die Thermostabilität bzw. Trägheit des Gebäudes ist prinzipiell bemerkenswert. Ohne störende Fremdeinwirkung bzw. Innere Lasten wird die Amplitude der sommerlichen Außentemperaturen von bis zu 20 K auf max. 1,5 K Tagesspreizung der Innentemperatur gedämpft.

In Gebäudeteilen ohne haustechnische Eingriffe, wie etwa der Studiensammlung, verläuft der Temperaturverlauf so konstant, daß auf den Thermohygrographen nicht selten die Temperaturkurven von mehreren Wochen nahezu deckungsgleich übereinandergeschrieben werden.

Die aus Eiche gefertigten Fenster- und Fenstertüren sind als dreiteilige bzw. sechsflügelige Oberlicht-Kastenfenster konstruiert. Alle Fügel gehen nach innen auf. Die Scheiben weisen an den Außenflügeln eine Glasfläche von 3,74 m^2 auf, an den Innenflügeln eine Scheibenfläche von 4,1 m^2. Die Oberlichten wurden bis 1991 konventionell mit innenliegendem Handhebel und Z-Scheren parallel gesteuert. Die innere Oberlichtklappe ist am unteren Rahmen mit Bändern scharniert, die Außenklappe mit Bändern am oberen Rahmen.

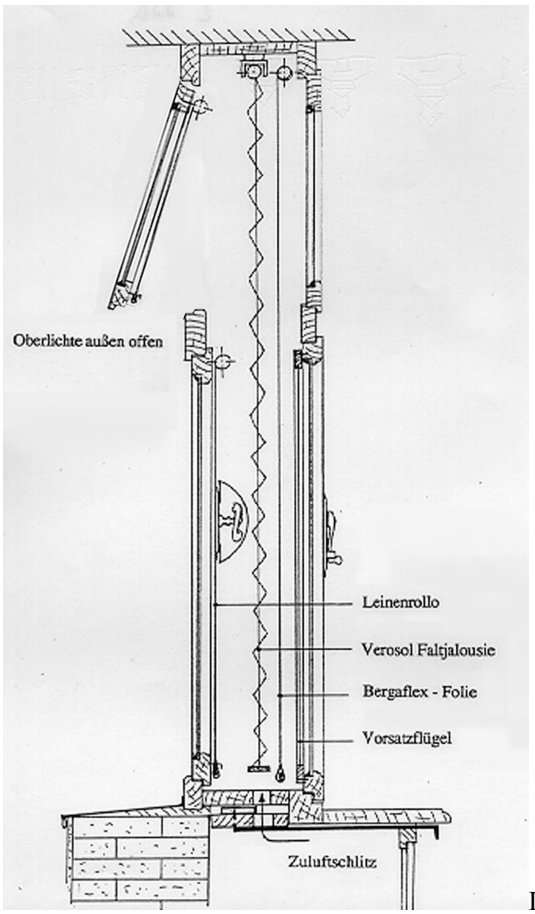
Direkt unterhalb der Fensterbretter befinden sich Heizkörpernischen. Diese sind an der Vorderseite durch gitterförmig durchbrochene Steckfüllungen verschlossen (siehe Abb. 2, 3 und 8).

Bei der Generalsanierung der Ausstellungsräume wurden an den Fenstern folgende Maßnahmen ergriffen:

1. Alle Fenster wurden tischlerisch instandgesetzt und an den Innenflügeln mit einer silikonverklebten Hohlprofildichtung abgedichtet.
2. Die Oberlichtscheren wurden getrennt, so daß bei innen geschlossener Oberlichte der äußere Oberlichtflügel geöffnet und der Fensterkasten konvektiv belüftet werden kann[1].
3. Im Fensterbrett wurden Zuluftschlitze eingefräst, die mittels eines Schiebers während der Wintermonate verschlossen werden. Bei den Fenstertüren ist der untere Türstaffel mit Fitschenbändern scharniert und kann im Sommer zurückgeklappt werden. Damit kann der Fensterkasten in der heißen Jahreszeit belüftet werden.

[1] Es zeigte sich, daß die Lage des Schalthebels für die Außenoberlichte im Fensterkasten für eine störungsfreie Bedienung von großer Bedeutung ist. Bei Windstaudruck auf die Fassade und geöffneter Außenoberlichte werden beim Öffnen des Innenflügels die herabgelassenen Lichtschutzfolien wie Segel aufgebläht und in den Raum gedrückt. Es ist wichtig, den Oberlichthebel auf jener Seite zu befestigen, deren Innenfensterflügel zuerst geöffnet wird. Man kann sodann mit dem anderen Flügel die aufgeblähten Lichtschutzfolien in den Fensterkasten drücken und gleichzeitig die Außenoberlichte schließen, worauf die Lichtschutzfolien wieder frei entspannt herunterhängen.

Abb. 3:
Schematischer Querschnitt durch ein Kastenfenster (nach der Sanierung)



4. Der eigentliche Lichtschutz besteht aus drei Schichten:
   a) An der Innenseite der Außenflügel wurden Federzug-Rollos mit einem Behang aus Halbleinengradl befestigt.
   b) Die zweite Schicht wird von einer motorgesteuerten Faltjalousie gebildet („Verosol 312“, Fa. Adler-Solux, Wien) mit einem Reflexionsgrad von 55%.[2]
   c) Die dritte Schicht besteht aus einer aluminiumbedampften Folie aus Polyester mit einem Reflexionsgrad von 85%.
5. Am Innenflügel ist fensterkastenseitig ein sog. Vorsatzflügel befestigt, der den U-Wert des Fensters um etwa 28% senkt.

[2] Um ein Einhängen bzw. Aufsetzen der Unterleiste beim automatischen Betrieb zu verhindern, wurden über den Fenstergriffen Leitbügel aus Edelstahl angebracht (s. Abb. 3).

2.1.1 Infrarot-Retentionsverhalten verschiedener Fenstergläser

Zunächst wurden von allen Gläsern Transmissionsspektren – auch für den IR-Bereich – erstellt. Der Einfluß der verschiedenen Fenstergläser auf die Erwärmung des Fensterkastens läßt sich in einem einfachen Versuch simulieren. Dazu wurden vier Holzkästen aus beschichteter Spanplatte mit einem Boden aus 4 mm Sperrholz angefertigt (40 × 40 × 15 cm) und diese mit vier verschiedenen Glasvarianten bestückt. Die Gläser wurden mit Silikon auf die Kästen aufgeklebt. Eine Entlüftungsbohrung im Boden sorgte für den Druckausgleich (siehe Abb. 4).

Kasten 1: Fensterglas 9 mm
Kasten 2: Fensterglas 7,5 mm
Kasten 3: Fensterglas 4 mm (Floatglas)
Kasten 4: Verbundscheibe aus 2 Platten 4 mm Floatglas (mit 10 mm Zwischenraum)

Abb. 4:
Meßanordnung zur Untersuchung des Infrarot-Retentionsverhaltens

Am 2. Juli 1997 wurden bei direkter Sonnenbestrahlung mit dem Infrarotthermometer *ILMtherm 100* (*Fa. Neher*/Nürnberg) die maximalen Oberflächentemperaturen am Boden der Holzkästen gemessen (siehe Abb. 4):

Tab. 1: Infrarot-Retentionverhalten unterschiedlicher Fenstergläser

Glasstärken	1. Messung 10.30 h	2. Messung 12.00 h
4 mm	51,2 °C	42,5 °C
7 mm	54,2 °C	43,1 °C
9 mm	55,6 °C	42,8 °C
2 × 4 mm	55,8 °C	45,0 °C

Wie aus der Tabelle ersichtlich, weist die zur Simulierung einer Isolierverglasung bzw. Mehrscheibenverglasung verwendete Verbundscheibe die größte Infrarot-Retention auf. Der mit dem 4 mm Floatglas abgedeckte Kasten zeigte die geringste Erwärmung.

– **Die Erwärmung im Fensterkasten ist umso höher, je niedriger der U-Wert der der Sonne zugewandten Fensterscheibe ist. Daher ist es nicht sinnvoll, die Isolierverglasung an der (unbeschatteten) Außenscheibe anzubringen.**

2.2 Meßmethodik und Meßaufbau

2.2.1 Querschnittsmessung

Um die Wärmeflüsse möglichst genau nachvollziehen zu können, wurden die Messungen nach der von Karl Prodinger entwickelten Methode der Querschnittsmessung durchgeführt. Dabei wird ein möglichst dichtes Temperaturprofil innerhalb jener Bereiche gelegt, in denen die Wärmeflüsse stattfinden (Abb. 5).

Neben traditionellen Temperaturfühlern wurden dabei auch Wärmeflußsensoren eingesetzt, um den Temperaturfluß sowohl im Fensterbereich als auch über die Wand dokumentieren zu können. Als jeweilige Eckdaten wurden die Außenlufttemperatur sowie die Raumtemperatur in jeweils etwa 1 m Entfernung vom Fenster gemessen, dazwischenliegend wurden die Temperaturen an den

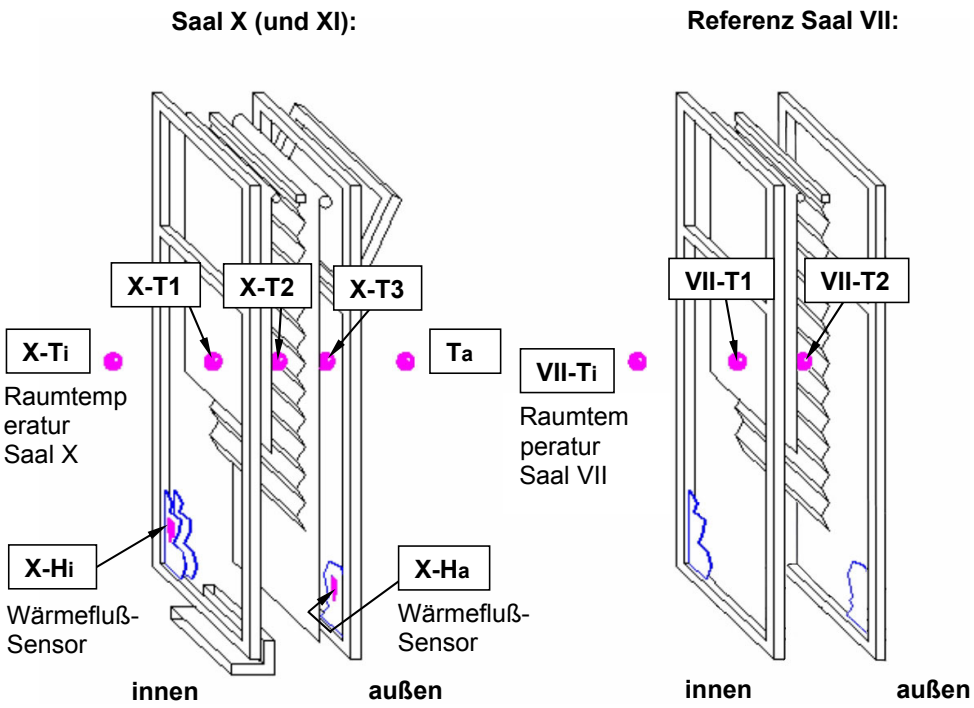


Abb. 5:
Lage der Meßpunkte im Fenster und Bezeichnung der Fühler (zur Bedeutung der Kürzel siehe Tab. 2, S. 476)

Außen- und Innenfensterscheiben sowie im Fensterkasten zwischen den jeweiligen Sonnenschutzfolien gemessen. Ab August 1997 wurden auch die raumseitige Oberflächentemperatur der aus 1 m starkem Ziegelwerk bestehenden Außenmauer sowie der Wärmefluß durch diese Mauer gemessen.

Einschränkend ist zu bemerken, daß die Oberflächentemperatur innenliegender Glasscheiben nur bedingt als Kenngröße für die thermische Belastung eines Raumes herangezogen werden kann. Diese Einschränkung gilt allerdings vorwiegend für das unbeschattete Fenster. Da in unserem Fall Lichtschutzmaßnahmen verglichen wurden, also im Regelfall die Innenscheiben beschattet waren, erschien das Erfassen der Oberflächentemperatur der Innenscheiben, die als Wärmetauscherflächen fungieren, zweckmäßig. Darüberhinaus zeigte sich, daß die Unterschiede zwischen Oberflächentemperatur und Strahlungstemperatur immer geringer werden, je wirksamer ein Sonnenschutz ist (siehe Kap. 4.4). Nicht zuletzt wurde durch Messung des ganzen Temperaturprofils auch der die Raumtemperatur beeinflussende Strahlungsanteil miterfaßt. In der Schlußphase des Projektes wurde der Strahlungseinfluß zusätzlich durch Punktmessungen mit dem Infrarotthermometer dokumentiert (vgl. Kap. 4.4, Abb. 23 – 24).

Bei der zweiten Meßserie (Sommer 1997) wurde im Normalfall der Meßstatus am späten Nachmittag des Vortages geändert, so daß sich die Temperaturprofile ab den frühen Morgenstunden ungestört aufbauen konnten. Der Meßzeitraum eines Tages erstreckt sich deshalb in der Regel von 18 : 00 Uhr des Vortages bis 18 : 00 Uhr des eigentlichen Meßtages. Das Nachtverhalten einer Lichtschutzvariante ist deshalb in den meisten Fällen (aber nicht allen!) antizipativ zu interpretieren. (Zu diesem Zeitpunkt schneiden einander auch für gewöhnlich im Sommer alle Temperaturkurven.)

2.2.2 Anordnung der Fühler

Der verwendete Datenlogger war mit 16 Kanälen ausgestattet. Die genaue Anordnung der Fühler, die Art des verwendeten Sensors sowie die Farbe des jeweiligen Kanals in den Diagrammen sind in der folgenden Tabelle 2 dargestellt.[3]

[3] Aus Gründen der Anschaulichkeit wird hier nur die endgültige Fühleranordnung ab dem 22. Mai 1997 angeführt. Die dargestellten Kurven nehmen bis auf wenige Ausnahmefälle auf diese Fühleranordnung Bezug. Bei denjenigen Beispielen, wo auf ältere Aufzeichnungen mit veränderter Fühleranordnung zurückgegriffen werden mußte, wird dies ausdrücklich vermerkt (s. Abb. 6).

Tab. 2: Kürzel und Farben der Meßkurven, Anordnung der Meßfühler

Kanal	Kürzel	Farbe	Fühler	Montierung	Anmerkungen
1	X-T1	braun	Pt-100	1 cm vor Innenseite der **Innenscheibe Saal X**	
2	X-T2		Pt-100	Fensterkasten Saal X zwischen Bergaflex-Folie und Innenscheibe	gegen direkte Strahlung in einem Tischtennis-Ball montiert
3	X-T3	Rot	Pt-100	1 cm vor Innenseite der **Außenscheibe Saal X**	mit 16 cm^2 Alu-Folie gegen direkte Sonnenbestrahlung abgeschirmt
4	X-Ti	schwarz	Pt-100	in ca. 2,5 m Höhe seitlich vor dem Fenster (**Raumtemperatur Saal X**)	auf einer Vitrine; keine direkte Sonneneinstrahlung
5	X-Tw	karmin-rot	Pt-100	ca. 2 m neben dem Fenster hinter einem Bild (Wandtemperatur)	In der Heizperiode Einfluß durch daneben liegenden Heizstrang
6	Ta	hellgrün	Pt-100	auf dem Balkon vor dem Fenster (**Außentemperatur**)	Fühler im Schatten; im Sommer nachts Strahlungseinfluß durch Bauteilwärme
7	X-Hi		Huxeflux	Innenscheibe Saal X	mit Selbstklebefolie innenseitig direkt auf die Scheibe geklebt
8	X-Hw		Huxeflux	Wand zwischen Fenster und Bild (Kanal 5)	mit Selbstklebefolie innenseitig direkt auf die Mauer geklebt
9	XI-T1	magenta-rot	Pt-100	1 cm vor Innenseite der **Innenscheibe Saal XI**	
10	XI-T2		Pt-100	Fensterkasten Saal XI zwischen Bergaflex-Folie und Innenscheibe	gegen direkte Strahlung in einem Tischtennis-Ball montiert
11	XI-T3	cyan-blau	Pt-100	1 cm vor Innenseite der **Außenscheibe Saal XI**	mit 16 cm^2 Alu-Folie gegen direkte Sonnenbestrahlung abgeschirmt
12	VII-T1	dunkel-grün	Pt-100	1 cm vor Innenseite der Innenscheibe Saal VII	
13	VII-T2		Pt-100	**Fensterkasten Saal VII** zwischen Faltjalousie und Bergaflex-Folie	gegen direkte Strahlung in einem Tischtennis-Ball montiert
14	VII-Ti	dunkel-blau	Pt-100	in ca. 2,5 m Höhe seitlich vor dem Fenster (Raumtemperatur Saal VII)	
15	XI-Hi		Huxeflux	Innenscheibe Saal XI	mit Selbstklebefolie direkt auf die Scheibe geklebt
16	XI-Ha		Huxeflux	Außenscheibe Saal XI	mit Selbstklebefolie direkt auf die Scheibe geklebt

2.2.3 Darstellung der Messkurven

Die in den Meßintervallen gewonnenen Daten wurden in einen Personal Computer übertragen und anschließend mit *EXCEL* ausgewertet. Als Beispiel sei hier ein charakteristischer Tagesgang aus der 1. Meßserie vom 8. und 9. August 1996 dargestellt (siehe Abb. 6)

Das Diagramm zeigt zwei typische charakteristische Temperaturprofile an je einem bewölkten bzw. sonnigen Tag. Grenzwerte der direkten Wärmeflüsse sind Luftaußen- bzw. -innentemperatur. Die Gegenüberstellung von Außentemperatur ($\mathbf{T_{a,}}$ grüne Kurve) und Innentemperatur ($\mathbf{T_{i,}}$ schwarze Kurve) zeigt, wie der stark im Tagesgang oszillierende Verlauf der Außentemperatur durch die Gebäudehülle gepuffert wird: Die Innenraumtemperatur verläuft nahezu als gerader Strich.

Im dazwischenliegenden Fensterkasten kommt es zwischen den einzelnen Schichten zu einer charakteristischen Staffelung der Temperaturen, die tendenziell immer gleich ausfällt: Bei direkter Sonneneinstrahlung ist der höchste Temperturanstieg immer zwischen der Außenscheibe und dem ersten dahinterliegenden Lichtschutz zu verzeichnen. Die Temperaturen zwischen den darauffolgenden Beschattungseinrichtungen nehmen kontinuierlich ab, der niedrigste Wert ergibt sich an der Innenscheibe. Im dargestellten Beispiel wird die Maxi-

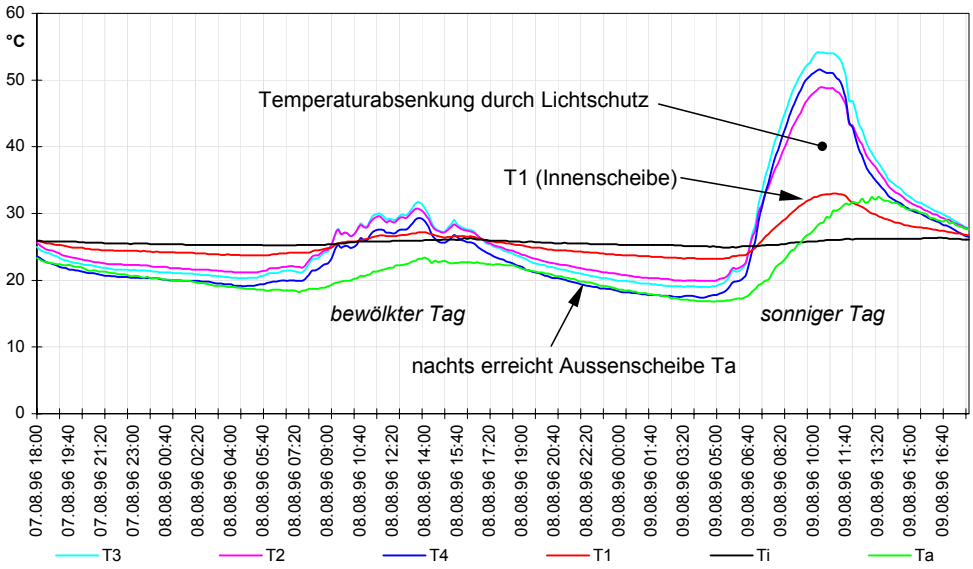


Abb. 6:
Temperaturprofil zweier charakteristischer Tagesgänge im Sommer Fenster Saal X (Anm.: 1. Meßserie, noch vier Fühler montiert, T3 zeigt bei Sonneneinstrahlung höhere Werte als T4, da Rollo hochgefahren.)

maltemperatur von dem im Tischtennisball zwischen Rollo und Jalousie montierten Fühler **X-T3** erreicht. Da das Rollo hochgezogen ist, treffen die Sonnenstrahlen direkt auf die Zelluloidhülle des Balles und erwärmen diese stärker als den an der Außenscheibe befestigten Temperaturfühler **X-T4.**

In der Nacht dreht sich das Temperaturprofil gewöhnlich um: während die Temperatur an der Außenscheibe häufig mit der Außentemperatur koinzidiert, bleibt die Innenscheibentemperatur bei normaler Fensteranordnung in der Nähe bzw. knapp unterhalb der Innenraumtemperatur.

Nachdem sich der Temperaturverlauf zwischen den einzelnen Lichtschutz-Schichten als mehr oder weniger uniform herausgestellt hat, wurde in der zweiten Meßsaison die Anzahl der frei im Fensterkasten aufgehängten *Pt-100*-Temperaturfühler von zwei auf einen reduziert. Über die beiden freiwerdenden Kanäle wurden ab Mai 1997 die Wandtemperatur in Saal X sowie die Raumtemperatur in Saal VII erfaßt.

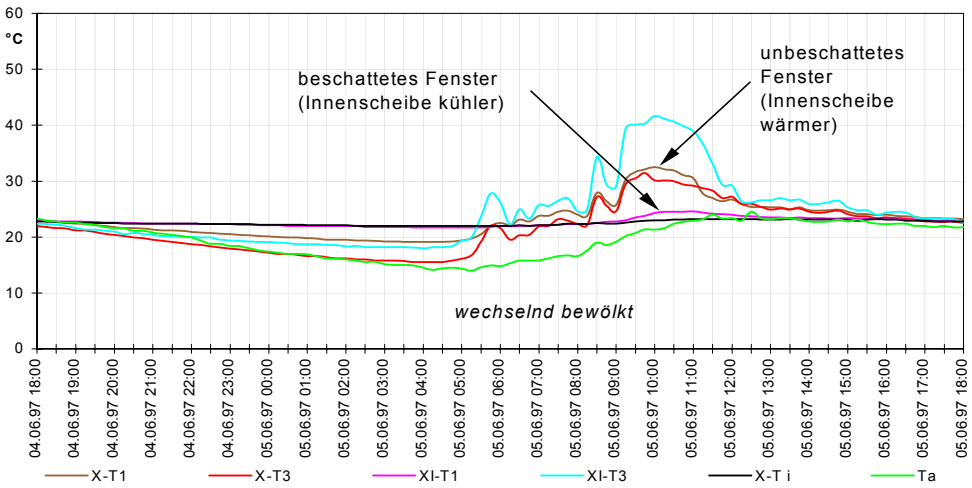
In den Meßbeispielen sind in der Regel die in den benachbarten Ausstellungsräumen Saal X und Saal XI situierten Fenster einander gegenübergestellt. Dabei wird untersucht, welche der beiden jeweils verglichenen Licht- und Wärmeschutzmaßnahmen zu einem geringeren Temperaturanstieg an der Innenscheibe führt. Um die Lesbarkeit der Diagramme zu erhöhen, wurden im Normalfall neben den Luftinnen- und Außentemperaturen ($\mathbf{T_i}$, $\mathbf{T_a}$) nur die Temperatur hinter der Außenscheibe, die fast immer die Maximaltemperatur im Fensterkasten ergibt (**X-T3; XI-T3**) sowie die Oberflächentemperatur der Innenscheiben (**X-T1; XI-T1**) dargestellt.

Der Wirkungsmechanismus einer im Fensterkasten montierten Lichtschutzmaßnahme ist aus Abb. 7 ersichtlich. Darin sind das Temperaturprofil eines unbeschatteten Fensters (Saal X) und eines beschatteten Fensters (Saal XI) einander gegenübergestellt:

Im unbeschatteten Fenster in Saal X findet nur ein relativ geringer Temperaturanstieg statt. Die von der Sonne eintreffende Strahlung passiert nahezu ungehindert den Fensterkasten. Typisch für das unbeschattete Fenster im Sommer ist es, daß die Innenscheibe normalerweise eine höhere Oberflächentemperatur aufweist als die Außenscheibe (Fühler **X-T1**/braun und **X-T3**/rot). Die Erwärmung findet allerdings im Raum statt, sobald die Strahlung auf Bauteile oder Inventar auftrifft.

Jede im Fensterkasten montierte Beschattungseinrichtung absorbiert einen bestimmten Teil der von der Sonne eintreffenden Strahlung („Sonnenkollektor").

Abb. 7:
Temperaturverteilung im beschatteten und unbeschatteten Fensterkasten (zur Bedeutung der Kürzel siehe Tab. 2, S. 476)



Dies führt einerseits zu einem beträchtlichen Temperaturanstieg[4] im Fensterkasten selbst (Fühler **XI-T3**/cyanblau), andererseits zu einem Absenken der Oberflächentemperatur an der Innenscheibe (Fühler **XI-T1**/magentarot).

Ein mit Lichtschutzeinrichtung versehenes Kastenfenster weist einen niedrigeren Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert) auf als ein unbeschattetes Fenster. Je besser der Lichtschutz, desto niedriger bleibt die Oberflächentemperatur an der Innenscheibe bei direkter Sonneneinstrahlung und desto weniger Wärme wird daher dem Raum zugeführt. In der Nacht verkehrt sich dieser Vorteil allerdings ins Gegenteil: Die Innenscheibentemperatur des beschatteten Fensters bleibt höher als beim unbeschatteten Fenster. Es findet ein geringerer Wärmeabfluß nach außen statt, wodurch sich die Räume im Sommer in der Nacht nicht so stark abkühlen.

- **Ziel eines für museale Zwecke optimierten Lichtschutzes ist es daher, den Wärmedurchgang des Fensters in der Zeit direkter Sonneneinstrahlung so weit wie möglich gering zu halten. Dies bedeutet, einen möglichst wirksamen Lichtschutz sowie Maßnahmen zur Wärmeabfuhr im Kastenfenster zu installieren.**
- **In den kühlen Nachtstunden sollten hingegen alle jene Maßnahmen ergriffen werden, die den Wärmefluß nach außen so weit wie möglich erhöhen.**

4 Der Temperaturanstieg ist höher, wenn der Fensterkasten eine dunkle Farbe aufweist bzw. aus dunklem Holz gefertigt ist, da dunkle Oberflächen weniger Licht reflektieren und die absorbierte Strahlung in Wärmestrahlung umgewandelt wird. Die höheren Temperaturen führen auch zu einer rascheren Alterung des Fensters. Ein heller Anstrich der Fenster ist deshalb vorzuziehen.

2.3 Wärmeschutzmaßnahmen

2.3.1 Belüftung des Fensterkastens

Wie bereits in Kapitel 2.1 erwähnt, sind die Fenster der SAM mit einer Fensterkastenbelüftung ausgestattet. Durch Trennung der Oberlichtscheren und eigenem Hebelmechanismus können die Außenoberlichten ausgestellt werden, wobei gleichzeitig die inneren Oberlichten geschlossen bleiben. Dies führt zu einer konvektiven Belüftung des Fensterkastens und zu einem Abbau des Wärmestaues. Damit läßt sich auch die Innenscheibentemperatur um bis zu 30% absenken.

Allerdings führt die Fensterkastenbelüftung zu einer verstärkten Verstaubung von Fensterkästen und Sammlungsbereich, die allerdings durch eine mit leichtem Überdruck arbeitende Belüftung hintangehalten werden könnte.

2.3.2 Vorsatzflügel („3. Scheibe“, „Isolierverglasung“)

Im Zuge der Generalsanierung wurden in den Sälen IX bis XIII der Sammlung alle Fenster- bzw. Fenstertüren mit sogenannten Vorsatzflügeln ausgestattet. Dazu wurden an den Innenflügeln fensterkastenseitig schmale, mit Dichtungen versehene Eichenholzrahmen befestigt, worin eine 3 mm Floatglasscheibe mit Silikon eingeklebt ist. Die Vorsatzflügel sind an einer Seite mit fünf Bändern am

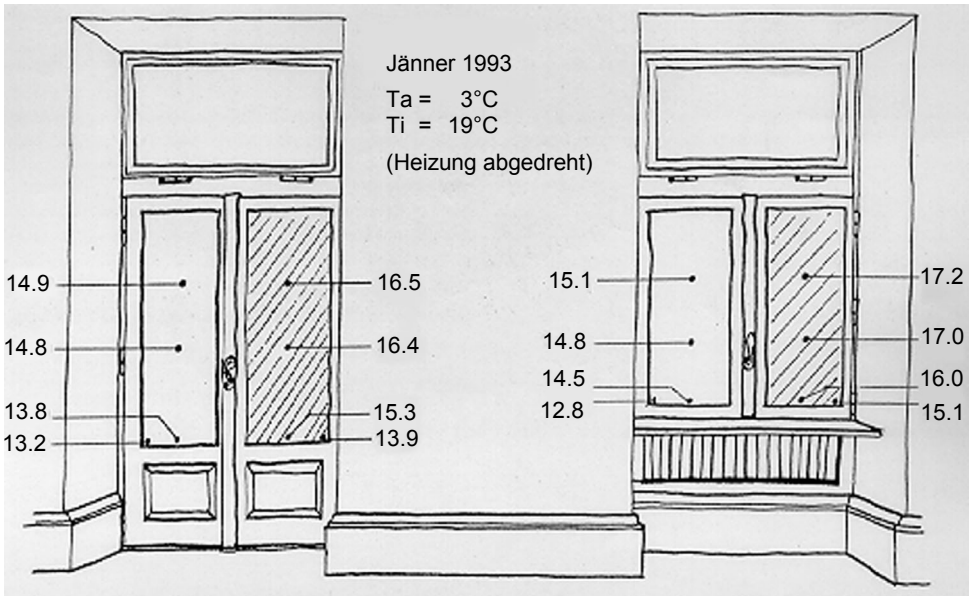


Abb. 8:
Temperaturverteilung an den Innenscheiben im Winter die schraffierten Fensterflügel sind mit Vorsatzflügeln ausgestattet

Rahmen scharniert, (um sie beim Putzen wegschwenken zu können) und werden mit Schrauben gegen die Rahmen jedes Flügels gedrückt. Durch diese einfachen Maßnahmen werden die Innenflügel in Verbundscheiben umgewandelt. Der zwischen den Glasscheiben gebildete Luftpolster führt zu einer signifikanten Verringerung des Wärmedurchganges. In einem Gutachten wurde von der Technischen Überprüfungs- und Forschungsanstalt Seibersdorf eine Verringerung des U-Wertes um 28% errechnet.[5]

Dies bewirkt bei direkter Sonnenbestrahlung eine signifikante Absenkung der Oberflächentemperatur der Innenscheiben. Im Winter führt diese Maßnahme zu einer Anhebung der Scheibentemperatur (vgl. Abb. 8). Dies hat neben einer Verringerung der Heizkosten den Vorteil, daß es infolge der notwendigen künstlichen Luftbefeuchtung erst bei tiefen Außentemperaturen unter etwa – 10 °C zu einem Beschlagen der Innenscheiben kommt.

In der folgenden Abbildung ist die Wärmeverteilung an den Fenstern der SAM mit und ohne Vorsatzflügel dargestellt.[6] Die Auswirkungen der Vorsatzflügel bzw. Isolierverglasung werden in Kap. 3.3 ausführlicher behandelt.

5 Vgl.: Magistrat der Stadt Wien MA39, Gutachten über die Wärmedämmung eines zweiteiligen Holzkastenfensters ohne und mit „Nuschei"-Vorsatzfenstern an den Innenflügeln. (Zl. MA39-F197,198/83 vom 4. 8. 1983)

6 Die Oberflächentemperatur wurde mit dem Infrarotthermometer *„Pyrothron"* von *Rotronic* ermittelt.

2.3.3 U-Werte des Kastenfensters mit verschiedenen Folien

Die Berechnung der U-Werte erfolgte anhand der üblichen Formeln für den Wärmedurchgang. Als Rechengröße für die Luftbewegungen wurde im Fenster ein Wert von 0,2 m/s angenommen, außen entsprechend höhere Werte. Die Berechnungen berücksichtigen nicht die unterschiedlichen Licht- und Infrarot-Reflexionswerte der verschiedenen Folien, da zur Abklärung dieser Fragen ein eigenes, mehrfach verschachteltes und iterativ rechnendes Modell erforderlich ist.

Aufgrund der für den U-Wert üblichen Formeln ergeben sich für unterschiedliche Schichtenfolgen die folgenden Wärmedurchgangswerte:

Definitionen:

Alpha-a (W/m^2K)	**Alpha-i** (W/m^2K)	**Alpha-z** (W/m^2K)	**vw-a** (m/s)	**vw-i** (m/s)	**vw-z** (m/s)
8,3	7,46	7,04	0,5	0,3	0,2

Ta (°C)	**Ti** (°C)	**ΔT** (K)
–10	20	30

Definitionen:

Glas 4 mm λ (W/mK)	**Folie 0.2mm** λ (W/mK)
0.73	0,139
Rth-Glas (W/m^2K)	Rth-Folie (W/m^2K)
182,5	695

Ergebnisse:

Schichten	**Folge**	**Rth gesamt** (W/m2K)	**U-Wert gesamt** (m2K/W)	**Wärme-durchgang** (W/m2 bei 30K)	**relat. Vergleich** (%)
1	Glas	0,260	3,846	115,380	211,37
2	Glas-Glas	0,550	1,820	54,587	100,00
3	G-Folie-G	0,835	1,197	35,923	65,81
4	G-F-F-G	1,121	0,892	26,770	49,04
5	G-F-F-F-G	1,406	0,711	21,335	39,08
6	G-F-F-F-G-G	1,692	0,591	17,734	32,49

Tabelle 3: Definitionen und bauphysikalische Rechenergebnisse

Alpha-a	Wärmeübergangswert außen
Alpha-i	Wärmeübergangswert innen
Alpha-z	Wärmeübergangswert Zwischenraum
vw	Luftgeschwindigkeit
λ	Wärmeleitwert
Rth	Wärmewiderstand
ΔT	Temperaturdifferenz

Die Tabelle zeigt in den Ergebnissen, daß im Vergleich zu einem Zweischeibenkastenfenster das Einscheibenfenster mehr als doppelt so viel Wärme durchläßt, während eine dritte Scheibe eine Reduktion um 1/3 mit sich bringt. Weitere Schichten oder Scheiben bringen nur mehr geringe Verbesserungen bezüglich des Wärmeverlustes. Das Ergebnis macht auch deutlich, daß eine nächtliche Kühlung der Innenräume im Hochsommer durch direkten Wärmeabfluß über geschlossene Aussenscheiben nur geringe Effekte haben kann.

– **Bei einer Temperaturdifferenz von 6 K zwischen einem überhitzten Innenraum und einer sommerlich-kühlen Nacht können max. 23 W/m^2 (!) pro Fensterscheibe nach außen übertragen werden.**

3 Effizienz der Licht- und Wärmeschutzmassnahmen – Messergebnisse

3.1 Verhalten einfacher und kombinierter Lichtschutzmaßnahmen

In der Folge wurden alle zur Verfügung stehenden Lichtschutzmaßnahmen einzeln und in allen möglichen Kombinationen verglichen und dahingehend untersucht, welche davon zu einer größtmöglichen Temperaturabsenkung an der Innenscheibe führen. Die Kombination von Lichtschutzmaßnahmen führt zu einer Addition ihrer Wirkungen Die Reihenfolge der einzelnen Schichten hat dabei einen wesentlichen Einfluß auf die Wirksamkeit als Wärmeschutz (zur „Hierarchie des Lichtschutzes“ siehe Kap. 3.2.2).

Es wurden hier nur die jeweils plakativsten Beispiele herausgegriffen.

3.1.1 Rollo (Saal X) ↔ (Saal XI) Jalousie

Das hinter dem Außenflügel befestigte Rollo bewirkt sowohl eine geringere Erwärmung im Fensterkasten als auch der Innenscheibe. Es erweist sich somit deutlich wirksamer als die mit Aluminium beschichtete, reflektierende Jalousie als auch die metallbedampfte Folie (siehe Abb. 9).

– **Bei einfachem Lichtschutz weist das dichtgewebte textile Beschattungsmaterial (Rollo) die größte Effizienz auf. Die reflektierenden Materialien Faltjalousie und Folie zeigen ein etwas schlechteres Verhalten. Trotz**

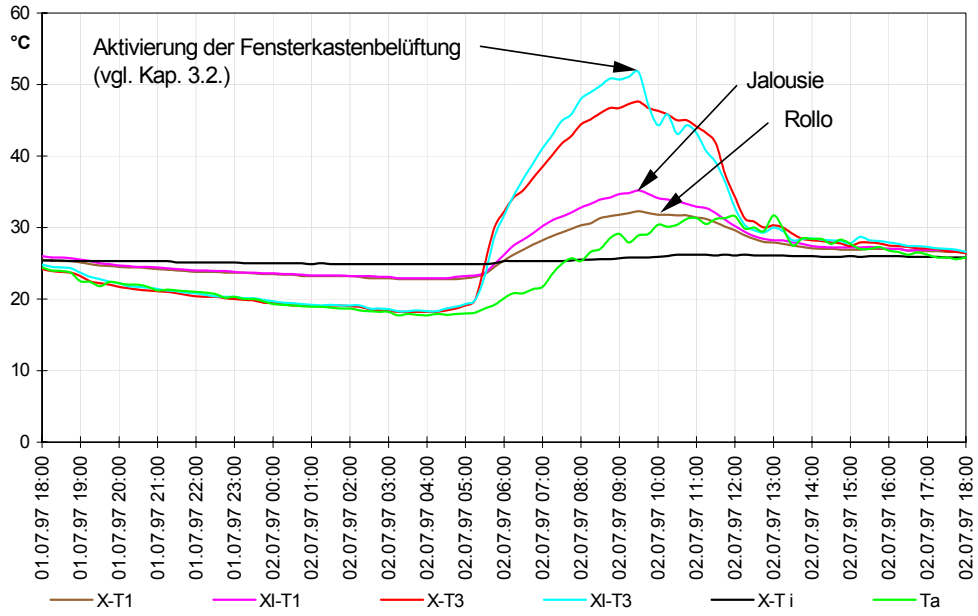


Abb. 9:
Das Rollo bewirkt eine geringere Erwärmung als die Faltjalousie Rollo (Saal X) ↔ (Saal XI) Jalousie (zur Bedeutung der Kürzel siehe Tab. 2, S. 476)

unterschiedlichem Transmissions- und Reflexionsgrad ist ihre temperaturabsenkende Wirkung an der Innenscheibe annähernd gleich.

3.2 Wirksamkeit der Fensterkastenbelüftung („Oberlicht auf")

Die Effizienz der Fensterkastenbelüftung („OL auf") in Zusammenhang mit einem einlagigen, heute vom Handel vielfach angebotenen, reflektierenden Lichtschutz (Faltjalousie) ist auf Abb. 10 deutlich zu sehen.

Die Temperaturabsenkung im Fensterkasten von bis zu 8 °C führt zu einer Reduktion der Oberflächentemperatur an der Innenscheibe bis zu 3 °C.

Auch nach der direkten Sonnenbestrahlung (wobei die sommerliche Außentemperatur auch nachmittags noch ansteigt), führt die Fensterkastenbelüftung zu einem deutlich rascheren Abkühlen des Fensterkastens in der Beschattungsphase. Auch nachts liegt die Temperatur der Innenscheibe des belüfteten Fensters um etwa 1 K unter dem nicht belüfteten Fenster.

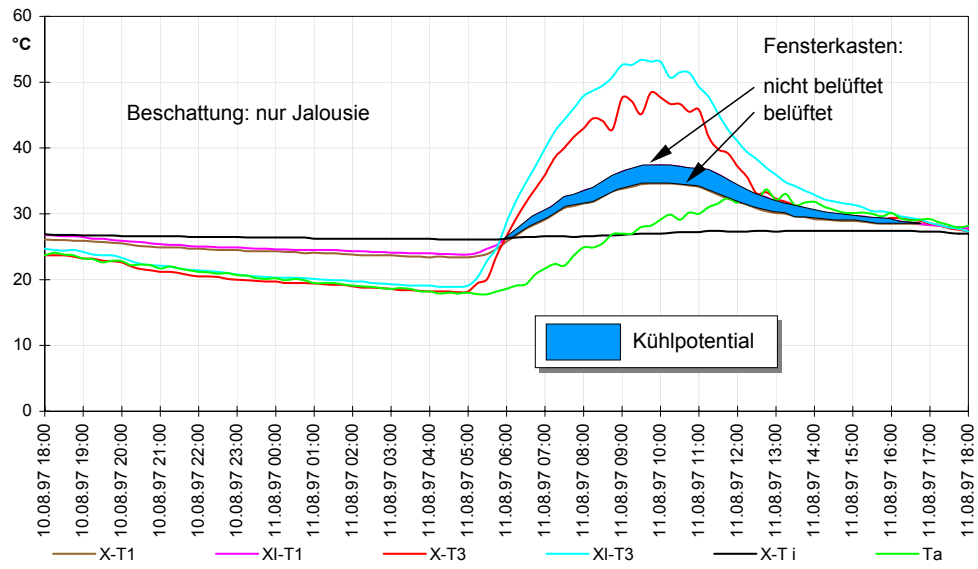


Abb. 10:
Die Belüftung des Fensterkastens führt zu einer signifikanten Temperaturabsenkung an der Innenscheibe Jalousie, OL auf (Saal X) ↔ (Saal XI) Jalousie, OL zu

– **Aus der Differenz der von den beiden Kurven überstrichenen Flächen läßt sich abschätzen, daß die Fensterkastenbelüftung eine Verringerung der thermischen Belastung an der Innenscheibe von ca. 30% erbringt.**
– **Allerdings kommt es zu einem verstärkten Staubeintrag im Fensterkasten.**

3.2.1 Rollo und Folie (Saal X) ↔ (Saal XI) Jalousie und Folie

Im Gegenversuch mit der Lichtschutzfolie bestätigte sich, daß die Kombination von nur beschattendem, nicht reflektierendem Rollo und stark reflektierendem Lichtschutz deutlich bessere Ergebnisse liefert als die Kombination zweier reflektierender Lichtschutzmaterialien. Sowohl die Maximaltemperaturen im Fensterkasten als auch die Innenscheibentemperaturen von Saal XI sind um bis zu 3 K niedriger als in Saal X.

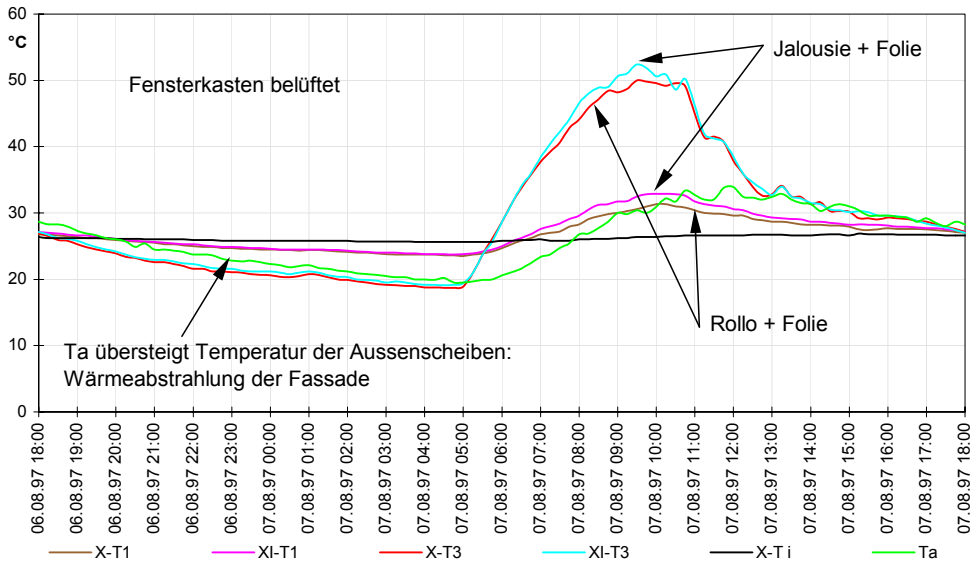


Abb. 11:
Auch im kombinierten Lichtschutz zeigt sich die Folie der Jalousie überlegen Rollo + Folie, OL auf (Saal X) ↔ (Saal XI) Jalousie + Folie, OL auf (zur Bedeutung der Kürzel siehe Tab. 2, S. 476)

Dieses Meßergebnis bestätigte nochmals die bessere Wirkung der Folie gegenüber der Jalousie.

3.2.2 Hierarchie des Lichtschutzes

Durch das *Eurocare* Projekt „Prevent/SAM“ sollte auch eine These überprüft werden, die anläßlich der Voruntersuchungen zur Generalsanierung der SAM aufgestellt worden war. Sie besagt, daß bei Kombination unterschiedlicher Lichtschutzmaßnahmen das stärker reflektierende Material näher zum Innenraum befestigt werden muß; dagegen ist nur beschattendes bzw. schwach reflektierendes Material unmittelbar hinter der Außenscheibe zu befestigen.

Diese Arbeitshypothese stand zunächst in Widerspruch zu den Vorgaben der Lichtschutzhersteller bzw. Klimaplaner. Diese gingen davon aus, daß durch das stark reflektierende Material die einfallende Strahlung soweit wie möglich umittelbar hinter der Außenscheibe abgehalten bzw. reflektiert werden sollte. Dieser Ansatz führt tatsächlich zu einem signifikanten Temperaturabfall im Fensterkasten selbst, paradoxerweise aber nicht zu einer Absenkung der Innenscheibentemperatur und damit Wärmebelastung des Raumes. Bei Kombination von nichtreflektierendem und reflektierendem Material kommt es auch zu einem subjektiven Empfinden geringerer Erwärmung hinter der stark reflektierenden Lichtschutzfolie. In Abb. 12 ist Saal X (außenliegende Folie, raumseitiges Rollo) dem Saal XI (außenseitiges Rollo, raumseitige Folie) gegenübergestellt.

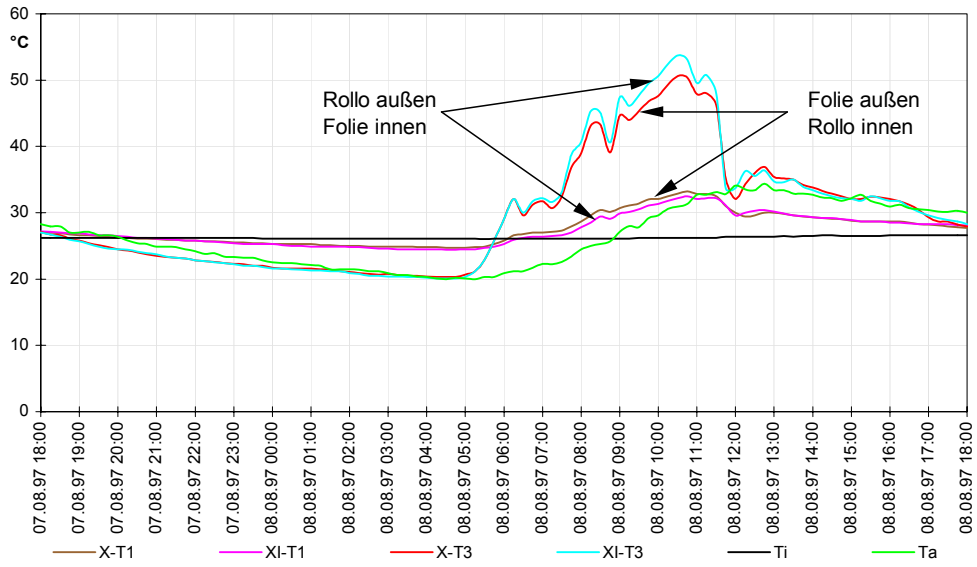


Abb. 12:
Die Hierarchie des Lichtschutzes: stärker reflektierende Materialien müssen im Fensterkasten näher zur Innenscheibe befestigt sein
Folie + Rollo, OL zu (Saal X) ↔ (Saal XI) Rollo + Folie, OL zu

Es zeigt sich deutlich, daß bei innenliegender Folie zwar die Maximaltemperatur im Fensterkasten etwas höher liegt, die Gesamterwärmung der Innenscheibe jedoch um mehr als 1 K unter dem Vergleichsfenster liegt. Erstellt man – zur Quantifizierung dieses „Ping-Pong-Effektes" – eine Bilanz der Energieflüsse im Fenster, bestätigt sich das auf den ersten Blick paradox erscheinende Ergebnis: Die raumseitig montierte Folie reflektiert einen signifikanten Anteil der sekundär im Fensterkasten erzeugten Wärmestrahlung nach außen. Im Vergleichsfenster dagegen führt die außen montierte Folie einen größeren Teil der sekundär generierten Infrarotstrahlung dem Raum zu.[7]

Bei Kombination mehrerer reflektierender Lichtschutzmaßnahmen muß im Fensterkasten das stärker reflektierende Material *raumseitig* montiert sein.

7 Vgl. Klimagutachten zur Generalsanierung der SAM, Büro Obadalek 1991

3.2.3 Dreifacher Lichtschutz

Es entstand die Frage, ob sich durch weitere Addition von Lichtschutzmaßnahmen die Scheibentemperatur am Innenflügel noch weiter signifikant absenken läßt. Es zeigte sich, daß durch das Vorschalten eines nichtreflektiernden dichten

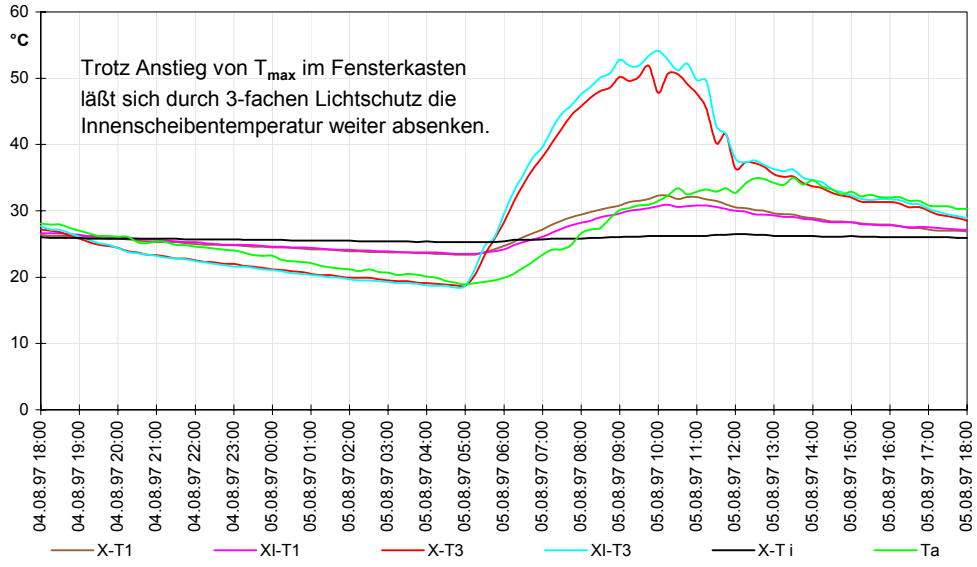


Abb. 13:
Addition von Lichtschutzmaterialien
dreilagiger Lichtschutz ist effizienter als zweilagiger Lichtschutz Jalousie + Folie, OL auf (Saal X) ↔ (Saal XI) Rollo + Jalousie + Folie, OL auf
(zur Bedeutung der Kürzel siehe Tab. 2, S. 476)

Leinenrollos vor zwei reflektierende Lichtschutzmaßnahmen in der richtigen Reihenfolge die Scheibentemperatur weiter abgesenkt werden kann, obwohl sich die Temperatur im Fensterkasten nochmals erhöht hatte.

Obwohl die Maximaltemperatur im Fensterkasten in Saal XI um mehr als 2 K über dem Vergleichsfenster liegt, bleibt die Innenscheibentemperatur um 1,5 K darunter. Es erscheint jedoch fraglich, ob der Einsatz von nicht unbeträchtlichen Investitionsmitteln zur Montage eines dritten Lichtschutzes das Resultat, nämlich das Absenken der Scheibentemperatur um durchschnittlich 1 K rechtfertigt.

3.3 Vorsatzflügel („3. Scheibe") zur Simulation von Kastenfenstern mit innenliegender Isolierverglasung

Bei der Generalsanierung historischer Bauten werden heute historische Kastenfenster häufig durch moderne einflügelige Drehkippfenster mit Isolierverglasung ersetzt. Dies ist nicht selten mit bauphysikalischen Nachteilen (wie etwa Wärmebrückenbildung und Taupunktunterschreitung im gedünnten Fensterstockbereich) verbunden, die den Planern meist gar nicht bewußt sind. Auch hinsichtlich des Sonnenschutzes ergeben sich daraus Probleme, da dieser bei einflügeligen Fenstern fast immer im Raum angebracht wird. Dies führt zu einer hohen thermischen Belastung des Innenraumklimas.[8]

Die Wärmeschutzwirkung historischer Fenster läßt sich ohne die genannten Nachteile bedeutend verbessern, indem man die inneren Fensterflügel mit Isolierverglasung bestückt. Es sollte heute in der Klimaplanung wohl außer Streit stehen, daß eine Isolierverglasung an den Innenflügeln und nicht an den Außenflügeln eines Kastenfensters zu installieren sei.[9] Die Diskussion darüber entzündet sich meist an der Tatsache, daß ein mit Isolierverglasung ausgestattetes Fenster zum „Sonnenkollektor" („Infrarotfalle") wird. Bei außenliegender Isolierverglasung findet zwar generell ein geringerer Wärme*fluß* in den Fensterkasten statt. Die durch Absorption an den Lichtschutzmaterialien im Fensterkasten sekundär generierte Infrarot*strahlung* kann jedoch den Fensterkasten nach außen nicht mehr verlassen und wird zum Großteil dem Innenraum zugeführt.

Eine innenliegende Isolierverglasung führt zwar in Kombination mit im Fenster montiertem Lichtschutz zu einer höheren Erwärmung im Fensterkasten selbst; der Wärmestau wird aber über die dünneren Außenscheiben abgeführt. Die als Wärmetauscherfläche wirksame Innenscheibe bleibt bei gleicher thermischer Belastung generell kühler als im zuvor beschriebenen Fall. Wenn im folgenden allgemein von „Isolierverglasung" gesprochen wird, so ist bei unseren Versuchen immer ein mit Vorsatzflügel ausgestattetes Fenster gemeint. Die beschriebenen Effekte würden sich bei einer echten Isolierverglasung erwartungsgemäß verstärken[10].

3.3.1 Auswirkung des Vorsatzflügels („3. Scheibe", Isolierverglasung) auf nichtreflektierenden Lichtschutz:

Rollo, (Saal X) ↔ (Saal XI) Rollo + 3. Scheibe

Wie aus Abb. 14 ersichtlich, bildet die Kombination von innenliegender Isolierverglasung mit nichtreflektierendem Lichtschutz (Rollo) einen sehr effektiven Lichtschutz.

Im nächtlichen Wärmedurchgang zeigen sich keine signifikanten Unterschiede.

3.3.2 Auswirkung des Vorsatzflügels („3. Scheibe", Isolierverglasung) auf zweilagigen Lichtschutz:

Rollo + Jalousie (Saal X) ↔ (Saal XI) Rollo + Jalousie + 3. Scheibe

Die Kombination von reflektierendem und nichtreflektierendem Lichtschutz erweist sich als sehr wirkungsvoll, wobei sich die Isolierverglasung zusätzlich dämpfend auf den Kurvenverlauf auswirkt.

8 Es ist rechnerisch erwiesen, daß ein historisches Kastenfenster mit mittig angebrachtem Sonnenschutz dem einflügeligen Rahmenfenster mit Wärmeschutzglas und innenliegendem Sonnenschutz weitaus überlegen ist. Im ersteren Fall werden 12% der von außen auftreffenden Sonnen*strahlung* als Heizleistung wirksam, im Fall der Innenjalousie mit 27% mehr als doppelt soviel. Dies nicht zuletzt deshalb, weil die vom Sonnenschutz reflektierte Strahlung zu einem Gutteil von der Innenscheibe wieder reflektiert bzw. absorbiert und damit dem Raumklima zugeführt wird. Siehe dazu: Klaus KREC, Erich PANZHAUSER, *Fenster – Außenwände – Lüftung*. In: Neue Wege der Klimatisierung im Altbau. (Hsg. Linzer Planungsinstitut, Stadtmuseum Nordico), Linzer Werkstattgespräche Bd. 3, 3. Auflage, Linz 1992, 54 – 75.

9 Dies gilt nicht für Sonnenschutzverglasungen ! (Siehe dazu auch Kap. 4)

10 Zur Verdeutlichung der Werte blieben die Oberlichten geschlossen.

Abb. 14:
Isolierverglasung mit Rollo bildet eine effektive Lichtschutzkombination Rollo, OL zu (Saal X) ↔ (Saal XI) Rollo + 3. Scheibe, OL zu 25. 6. 97

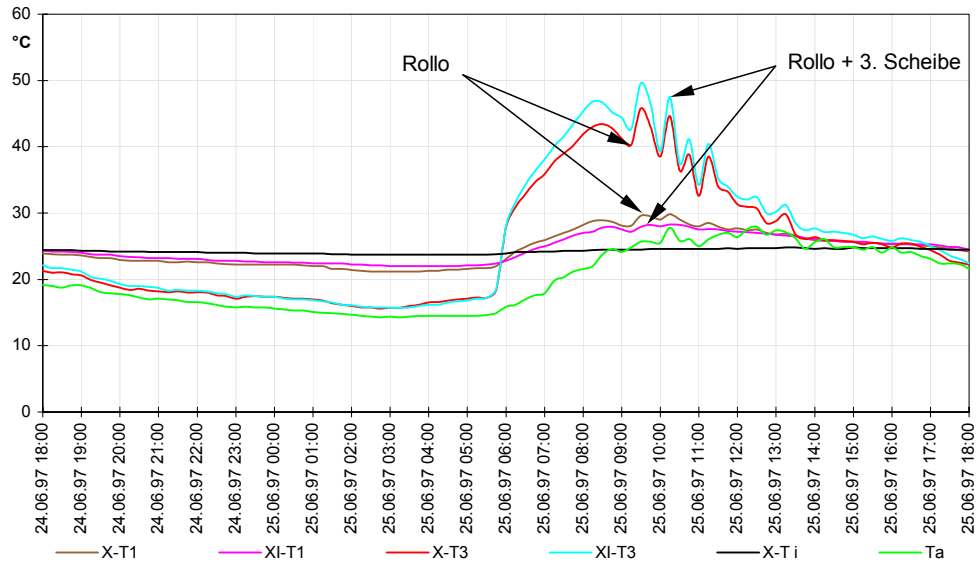
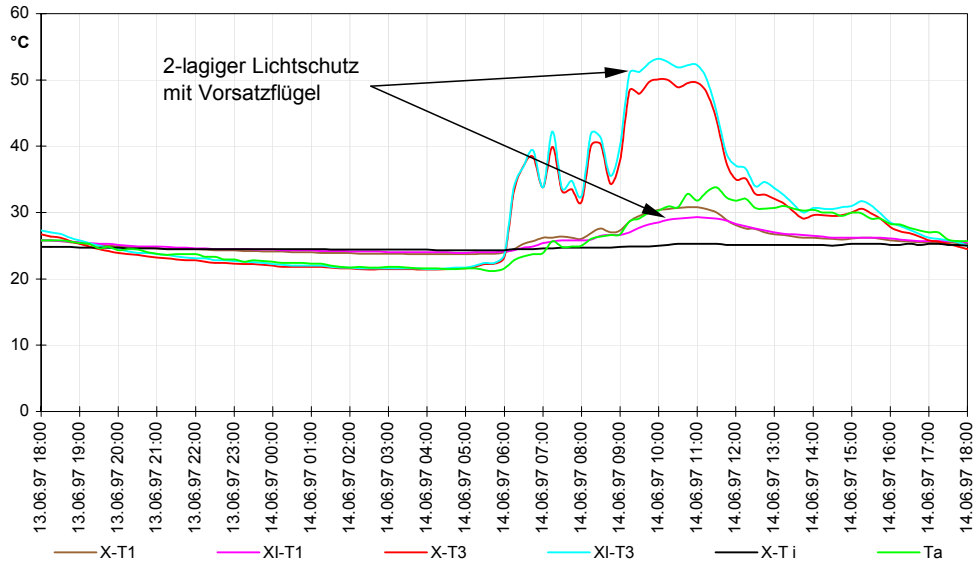


Abb. 15:
Rollo + Jalousie (Saal X) ↔ (Saal XI) Rollo + Jalousie + 3. Scheibe 14. 6. 1997 (zur Bedeutung der Kürzel siehe Tab. 2, S. 476)



Wie Abb. 15 zeigt, liegt die Innenscheibentemperatur nur um etwa 1,5 K über dem vorigen Beispiel, obwohl. die max. Temperatur im Fensterkasten bzw die Außentemperatur um 5 – 10 K darüberliegen.

– **Dieses Lichtschutzsystem aus Rollo, Jalousie und 3. Scheibe kann insgesamt als zweckmäßig und empfehlenswert bezeichnet werden.**

3.4 „Das optimale Museumsfenster“
Gegenüberstellung von bester und schlechtester Lichtschutzeinrichtung

Die Effizienz bzw. das Potential der bisher diskutierten Lichtschutzmaßnahmen läßt sich verdeutlichen, indem im folgenden Beispiel die Wirksamkeit eines konventionellen Lichtschutzes der Wirksamkeit der besten Lichtschutzvariante gegenübergestellt ist.

Bei Maximaltemperaturen von 53 °C bzw. 55° C im Fensterkasten liegt die Oberflächentemperatur der mit Maximalvariante ausgestatteten Scheibe mit knapp über 30° C um etwa 7 K unter dem Vergleichsfenster. Die 30 °C wurden nur für etwa eineinhalb Stunden knapp überschritten, während im Vergleichsfenster dieser Wert für etwa 8 Stunden überschritten wurde.

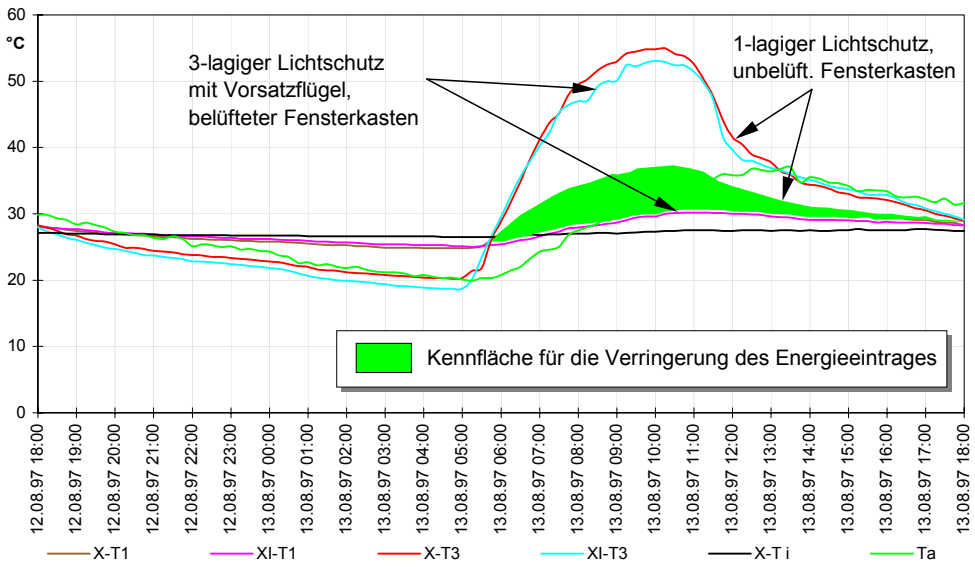


Abb. 16:
Das „optimale Museumsfenster“ bei direkter Sonneneinstrahlung Jalousie, Oberlicht zu (X) ↔ (XI) Rollo + Jalousie + Folie + Vorsatzflügel, Oberlicht auf

Interessanterweise sind außerhalb der direkten Sonneneinwirkung keine allzugroßen Unterschiede zu beobachten. Die Oberflächentemperatur auf dem mit Vorsatzflügel ausgestatteten Fenster liegt nur knapp unterhalb der Raumtemperatur. Damit findet während der Nachtstunden kaum ein Wärmeabfluß über die Fenster statt.

Diese Kriterien werden beispielsweise von einem im Zentraldepot des Tschechischen Nationalmuseums in Teresín 1996 eingebauten Fenstertyp erfüllt: Die einflügeligen, aufschraubbaren Verbundfenster mit innen liegendem Thermoglas und außen liegender Einfachverglasung haben eine Jalousie im Fensterzwischenraum montiert, der belüftet ist.

4 Überlegungen zur Isolierverglasung von zweischaligen Lichtdächern

4.1 Vorbemerkungen

In den letzten Jahren wurden im Zuge von Sanierungsmaßnahmen im Museumsbereich in mehreren Bundesmuseen auch die Oberlichtdächer instandgesetzt und großteils neu verglast. Dabei lassen sich immer wieder kontroversielle Standpunkte bezüglich der Anbringung von Isolierverglasungen feststellen.[11] Die Mehrzahl der Planer geht offensichtlich davon aus, daß die stärker isolierende Schicht näher zur Strahlungsquelle Sonne, d. h. an der äußeren Gebäudehülle befestigt sein müsse, um ein Aufheizen der darunterbefindlichen Dachräume bzw. Ausstellungssäle, Stiegenhäuser etc. bestmöglich zu minimieren. Für die innere Glashaut des Lichtdaches werden entweder die alte historische Verglasung beibehalten oder gewöhnliche Float- oder Milchgläser eingesetzt. Auf diese Weise wurden die Lichtdächer im Kunsthistorischen Museum, im Museum für angewandte Kunst, im Technischen Museum sowie die Lichtdächer der Neuen Hofburg saniert. Die darunterbefindlichen Dachräume werden entweder selbsttätig konvektiv oder technisch unterstützt mit Ventilatoren be- und entlüftet.

Die im Zuge des Forschungsprojektes „Prevent“ durchgeführten Messungen an den Kastenfenstern der SAM einerseits sowie Rückmeldungen nach Lichtdachsanierungen in den oben erwähnten Museen sowie aus anderen Museen in Wien (Museum des Schottenstiftes[12]), München (Alte Pinakothek[13]) und Regensburg (Kunstforum Ostdeutsche Galerie[14]) andererseits deuten jedoch darauf hin, daß die obengenannten Prämissen bezüglich der Anordnung und Lage von Isolierverglasungen differenzierter gesehen werden müssen.

[11] Für die kritische Durchsicht dieses Kapitels sowie für konstruktive Hinweise und Ergänzungen bin ich Dr. Karl Prodinger (Wien / Gföhl) sowie Dipl.-Ing. Wilhelm Hofbauer (Hausleiten) zu Dank verpflichtet.

[12] Persönliche Mitteilung von Herrn Kirkovic, Fa. Grundmann – Fenstertechnik; jene Firma hat zwei Jahre nach Eröffnung des Museums im Schottenstift das Lichtdach nachträglich mit einer Beschattungseinrichtung ausgestattet.

[13] Persönliche Mitteilung von Dr. Andreas Burmester, Bayerische Staatsgemäldesammlungen München.

[14] Persönliche Mitteilung von Michael Kotterer, M. A., Kunstforum Ostdeutsche Galerie Regensburg. Im Kunstforum Ostdeutsche Galerie hat die außen angebrachte Isolierverglasung zu einem Anstieg der sommerlichen Raumtemperaturen geführt. Hier wurden die Lichtdächer nach längerem Widerstand von Architekten und Baubehörde im Herbst 1997 nach einem Planungsvorschlag von Dr. Karl Prodinger (Wien / Gföhl) mit außen angebrachten Lochblechen als Teilbeschattung nachgerüstet.

4.1.1 Wirkungsmechanismen

Um die erörterte Problematik von Isolierverglasungen besser verstehen zu können, seien die prinzipiellen Wirkungsmechanismen vereinfacht und in Kürze dargestellt: Von der Sonne wird ein breites Spektrum elektromagnetischer Strahlung emittiert, die jedoch nicht zur Gänze für das Innenraumklima thermisch wirksam wird. Der kurzwellige UV-Bereich unterhalb von 325 nm wird durch die Fenstergläser praktisch zur Gänze ausgefiltert. Der primär thermisch wirksame Infrarotbereich des Sonnenlichtes erstreckt sich von 780 bis etwa 2000 nm. Aber auch der sichtbare Anteil des Sonnenspektrums ist letztlich Strahlungsenergie, die durch bestimmte Wirkungs-mechanismen in Wärmestrahlung konvertiert werden kann.

Während der kurzwellige, energiereiche UV-Bereich vorwiegend Lichtschäden nach sich zieht, führt der langwellige IR-Bereich zu einer thermischen Belastung der Sammlungsräume und damit meist zu Schwund- und Trocknungsschäden. Von der bleichenden Wirkung der UV-Strahlung sind vorwiegend die im Fensternahbereich befindlichen bzw. direkt bestrahlten Objekte betroffen; dagegen wirkt sich die Übererwärmung der Räume infolge beschleunigter Alterung und Dehydrierung aller organischer Materialien meist katastrophal auf das gesamte Sammlungsgut aus.

Die Transmission von langwelliger Strahlung nimmt bei gewöhnlichem Fensterglas oberhalb von 650 nm mit zunehmender Wellenlänge geringfügig ab. Für den langwelligen Infrarotbereich (oberhalb von etwa 3600 nm) wird das Glas jedoch wieder durchlässiger. Dieses Faktum ist möglicherweise für sekundär im Fensterkasten generierte Wärmestrahlung von Bedeutung, worauf noch gesondert eingegangen wird.

Beim Passieren einer Fensterscheibe wird (abhängig vom Einfallswinkel) ein Teil der Strahlung reflektiert; ein Teil wird von der Scheibe absorbiert und konvektiv an die umgebende Luft bzw. in Form von Wärmestrahlung wieder abgegeben. Das weitere Verhalten der transmittierten Strahlung ist davon abhängig, was sich hinter der Fensterscheibe befindet. Der Typ des Fensters (Kastenfenster, einscheibenverglastes Fenster, Verbundfenster) sowie die Art des Sonnenschutzes (reflektierend, nicht reflektierend, vor der Scheibe, im Fensterkasten, im Raum) sind für das thermische Verhalten des Fensters bzw. für den Wärmeeintrag in den Raum von grundlegender Bedeutung.

Bei der Herstellung von Isolierverglasungen werden nun unterschiedliche „Strategien“ entwickelt. Vorrangiges Ziel der konventionellen Bauphysik ist es, den Wärmedurchgang der Scheiben zu verringern, d. h. den U-Wert soweit als möglich abzusenken, um mit einem einfachen Fensterflügel den gleichen bzw. einen geringeren Wärmedurchgang zu erreichen wie bei einem herkömmlichen Kastenfenster. Dies wird einerseits dadurch erreicht, daß zwei oder mehrere Glasplatten mit geringem Abstand voneinander zu einem Laminat verbunden werden, wobei der Zwischenraum entweder evakuiert wird oder mit einem Inertgas gefüllt sein kann. Allein dadurch wird der direkte Wärmefluß von einer Scheibe zur anderen erheblich reduziert. Diese Gläser sind vorwiegend zur Verringerung von Wärmeverlusten und Senkung der Heizkosten im Winter konzipiert (Thermoschutzgläser, Isoliergläser).

Auf der anderen Seite wird versucht, durch die Entwicklung geeigneter Glassorten einen Teil des Infrarotspektrums herauszufiltern. Auch können die Gläser beschichtet oder getönt, beziehungsweise Folien in das Laminat integriert oder auf die Gläser aufgebracht sein, die bestimmte Wellenlängenbereiche herausfiltern bzw. reflektieren, mit dem gleichen Ziel, die Scheiben für infrarote (Wärme-) Strahlung weitgehend unpassierbar zu machen, während sie für einen Großteil des sichtbaren Lichts ungehindert durchlässig sein sollten. Diese Glastypen sind vorwiegend als Schutz vor zu großem Wärmeeintrag für Glasfassaden, Lichtdächer, Glashäuser etc. gedacht (Sonnenschutzgläser). Einen Mischtyp stellen getönte bzw. Milchglasscheiben dar, durch welche das Licht einerseits gestreut, andererseits die Transmission der Strahlung über einen möglichst weiten Bereich des Spektrums reduziert wird.

In den bisherigen Überlegungen wurden immer nur die Luft- bzw. Oberflächentemperaturen im Fensterkasten und vor den Scheiben betrachtet. Dabei gerät der für die Wärmeakkumulation der Innenräume nicht minder relevante *Strahlungs*einfluß allzu leicht aus dem Blickfeld. Dieser spielt gerade bei der Sanierung von Altbauten mit zweischaligen Lichtdächern eine übergeordnete Rolle. Wird die Strahlungsenergie nicht bereits an der äußeren Gebäudehülle abgefangen, so wird sie in dem meist massiven Ziegelmauerwerk der Dachgeschoßzone gespeichert. Die absorbierte Strahlungsenergie transmittiert über die massiven Bauteile in die darunterliegende Obergeschoßzone und führt bei längeren Schönwetterperioden im Sommer zu einer fortschreitenden Wärmeakkumulation. Meist wird übersehen, daß die in den Dachraum eindringende Strahlungsenergie nur bedingt konvektiv abgeführt werden kann. Um ein Eindringen der Strahlung in die massiven Bauteile zu verhindern, muß im Dachraum entweder ständig oder fakultativ bei direktem Sonnenschein eine Beschattungszone geschaffen werden.

Die vom Sonnenschutzmaterial (Gitter, Lochblech, Jalousie, Leinenrollo, Vinylflies etc.) absorbierte Wärmeenergie kann im Dachraum bzw. Fensterzwischenraum relativ leicht konvektiv weggekühlt werden – die durch Strahlung in die massiven Bauteile gelangte Wärme meist nur mehr mit großem technischen Aufwand!

Vergleicht man die Untersuchungsergebnisse aus dem Forschungsprojekt „Prevent“ sowie Messungen und langjährige Beobachtungen vor Ort mit den konventionellen Planungsgrundlagen zum Themenkreis „Fenster – Lichtschutz – Lichtdächer“ so fällt auf, daß offensichtlich vorwiegend vom U-Wert der Raumschale – in diesem Fall der äußeren Glashaut – ausgegangen wird. Der direkte Wärmefluß an der Scheibe ist zwar im Winter in Hinblick auf Heizenergieverluste von grundlegender Bedeutung – im Sommerfall spielt er jedoch bezüglich der thermischen Belastung eines Baues durch die Sonne eine mehr oder weniger untergeordnete Rolle, da der Wärmeeintrag in den Bau nicht durch direkten Wärmefluß, sondern primär durch Strahlung erfolgt.

Ein zweischaliges Lichtdachsystem, dessen äußere Glashaut einen möglichst niedrigen U-Wert aufweist, wird somit zur „Infrarotfalle“ und erzielt damit das genaue Gegenteil der ursprünglichen Sanierungsintentionen. Durch das „Prevent“ Projekt konnte die 1991 erstmals formulierte „Hierarchie des Lichtschutzes“ bestätigt werden (vgl. Kap. 3.2.2). Damit wird ausgesagt, daß bei Kombination unterschiedlicher Lichtschutzeinrichtungen im Kastenfenster das jeweils stärker reflektierende Material im Fensterkasten raumseitig montiert werden muß, während überwiegend beschattend wirkende Maßnahmen im Fensterkasten näher zur Außenscheibe angebracht sein müssen. Die praktischen Versuche haben gezeigt, daß dieses Prinzip unter bestimmten Voraussetzungen auch für Isolierverglasungen Gültigkeit besitzt – allerdings nicht uneingeschränkt.

4.2 Versuche mit außen- bzw. innenliegender Isolierverglasung

Um das prinzipielle Verhalten eines zweischaligen Lichtdaches bei außenliegender bzw. innenliegender Isolierverglasung sowie den Einfluß verschiedener Beschattungssysteme auf das jeweilige Fenstersystem zu simulieren und zu untersuchen, wurden die Vorsatzflügel in Saal X am Außenflügel und in Saal XI am Innenflügel montiert und die Temperaturprofile erfaßt. Es wurde davon ausgegangen, daß sich ein Kastenfenster und ein zweischaliges Lichtdach ähnlich verhalten, beziehungsweise beim Lichtdach negative Tendenzen durch Absorption von Strahlung im Dachraum verstärkt auftreten.

4.2.1 Isolierverglastes Kastenfenster bzw. Lichtdach ohne Lichtschutz

Beim Fehlen jeglichen Lichtschutzes verhält sich das Kastenfenster so, wie man beim Einsatz von Isoliergläsern gemeinhin erwarten würde: Das Fenstersystem mit der stärker isolierenden Außenscheibe zeigt eine etwas geringere Erwärmung

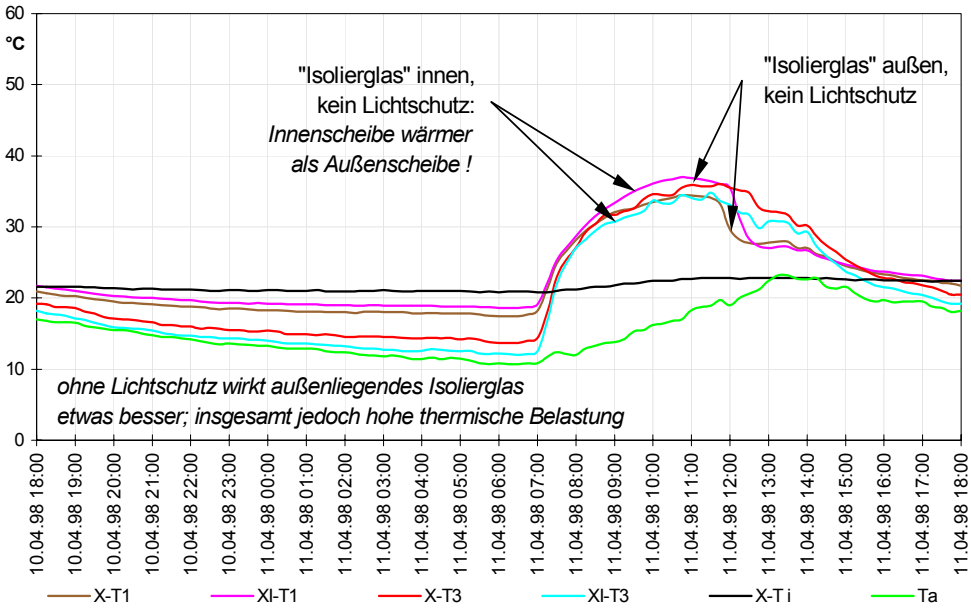


Abb. 17:
Das unbeschattete Fenster mit der stärker isolierenden Außenscheibe zeigt geringere Erwärmung. Die thermische Gesamtbelastung ist jedoch relativ hoch. Vorsatzflügel außen (Saal X) ↔ (Saal XI) Vorsatzflügel innen (zur Bedeutung der Kürzel siehe Tab. 2, S. 476)

an der Innenscheibe. *Allerdings ist die absolute Erwärmung des ganzen Systems(35 °C an der Innenscheibe) und damit die thermische Belastung der Innenräume signifikant höher als bei allen anderen gemessenen Lichtschutzvarianten!*

Bei den sanierten Lichtdächern der Neuen Burg wurden mit dem Strahlungsthermometer bei direkter Sonneneinstrahlung 42 °C an der inneren Glashaut gemessen.

Aus den Temperaturkurven nicht ersichtlich ist die Belastung der Innenräume durch Wärmestrahlung. Diese kommt erst zur Wirkung, sobald die Strahlungsteilchen auf einen festen Körper auftreffen und abgebremst, d. h. absorbiert und in eine langwelligere Strahlungsform umgewandelt werden. Man kann ihre Wirkung erfassen, indem man auf die Innenscheibe des untersuchten Fensters ein schwarzes Papier klebt und dessen Oberflächentemperatur mit einem Infrarot-Thermometer mißt (siehe auch Kap. 4.4).

- **Die Entlüftung des Zwischenraumes eines zweischaligen Lichtdaches ist zur Minimierung des Strahlungswärmeeintrages weniger effizient als zunächst erwartet, da die Strahlung den konvektiven Luftstrom nahezu ungehindert passiert und erst durch Absorption am Bauteil bzw. im darunterliegenden Raum wirksam wird.**
- **Erst durch das Einschalten eines „Strahlungsfilters“ in Form einer Lichtschutzmaßnahme (im Dachraum oder besser vor der Außenscheibe) wird die Strahlung bereits vorher absorbiert; die dabei entstehende Wärme kann konvektiv leichter abgeführt werden.**

4.2.2 Isolierverglastes Kastenfenster mit traditionellem Lichschutz im Fensterzwischenraum

Die Erfahrung zeigt, daß Tageslichtbeleuchtung durch Oberlichtdächer ohne regelbare Beschattung im Museumsbereich äußerst problematisch und daher inakzeptabel ist. Sie wird aber von Architekten, die mit den speziellen konservatorischen Sachzwängen eines Museumsbaues zu wenig vertraut sind, immer wieder geplant. So wurde beispielsweise unter dem neu sanierten Lichtdach im Technischen Museum Wien im Sommer 1997 eine Beleuchtungsstärke von 15 000 Lux im Ausstellungsbereich gemessen.[15]

Im Walraff-Richartz-Museum Köln werden die Gemälde immer noch mit bis zu 1500 Lux bestrahlt – dies entspricht etwa der sechsfachen Menge des Sollwer-

[15] Mitteilung des ehemaligen interimistischen Direktors des Technischen Museums Wien HR Mag. Peter Donhauser

tes, mit Tageslicht beleuchtete Ausstellungsräume brauchen somit unbedingt eine regelbare Beschattung.

Im meist denkmalgeschützten Museumsaltbau werden Lichtschutzblenden, Jalousien, etc. normalerweise im Fensterkasten bzw. bei zweischaligen Lichtdächern im Dachraum angebracht. Dabei dreht sich der zuvor beschriebene Effekt um: Durch im Fensterzwischenraum angebrachte Lichtschutzmaßnahmen (Innenjalousien, Sonnenblenden etc.) wird die außenliegende Isolierverglasung für die durch Absorption sekundär generierte Wärmestrahlung zur „Infrarotfalle“ (Sonnenkollektor-Effekt) und führt zu einem Anstieg der Oberflächentemperatur an der Innenscheibe.

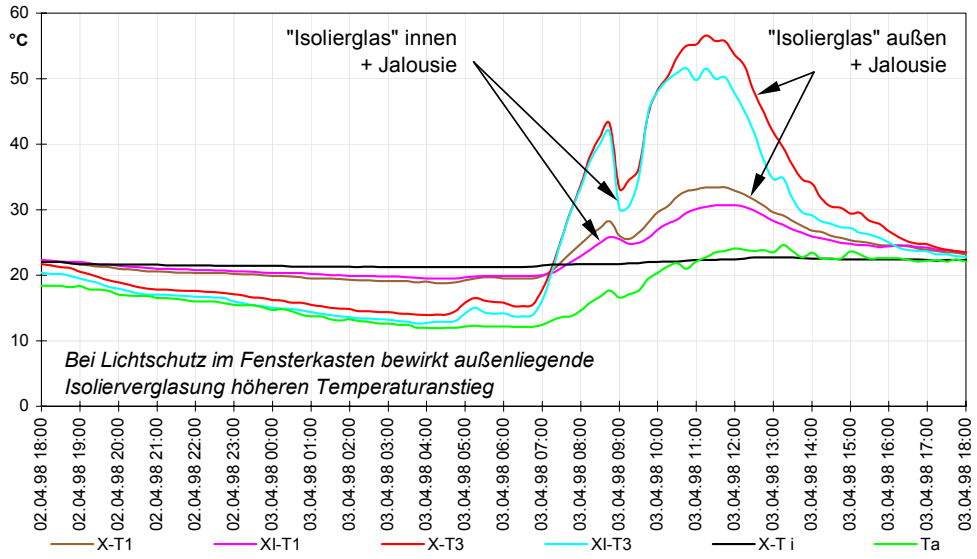


Abb. 18:
Durch die Jalousie im Fensterzwischenraum kommt es bei außenliegender Isolierverglasung zu einem Anstieg der Innenscheibentemperatur Vorsatzflügel außen, Jalousie, OL zu (Saal X) ↔ Vorsatzflügel innen, Jalousie, OL zu (Saal XI)

Bei Verwendung eines nichtreflektierenden dichtgewebten Leinenrollos ist der Temperaturgradient zwischen Maximaltemperatur im Fensterkasten und Oberflächentemperatur der Innenscheibe größer. Die im Vergleich zur Jalousie größere Masse des Leinenrollos absorbiert mehr Strahlung unmittelbar hinter der äußeren Glashaut, von wo sie konvektiv abgeführt werden kann.

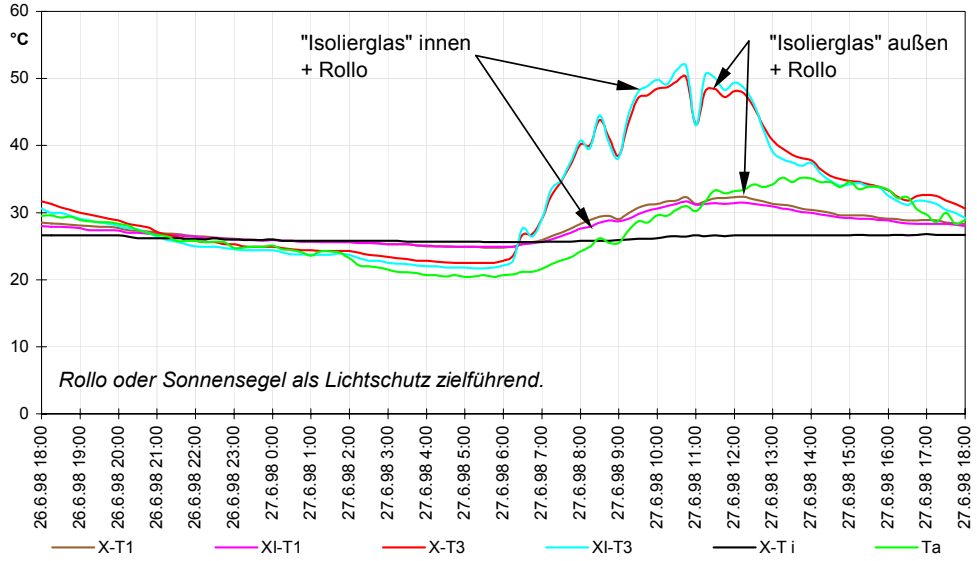


Abb. 19:
Durch das Rollo im Fensterzwischenraum kommt es bei außenliegender Isolierverglasung zu einem Anstieg der Innenscheibentemperatur Vorsatzflügel außen, Leinenrollo, OL zu (Saal X) ↔ Vorsatzflügel innen, Leinenrollo, OL zu (Saal XI) (zur Bedeutung der Kürzel siehe Tab. 2, S. 476)

4.2.3 Gegenüberstellung

Zur Verdeutlichung der unterschiedlichen Wirkungsweise von gleichen aber unterschiedlich angeordneten Licht- und Wärmeschutzmaßnahmen sind in den folgenden Beispielen nochmals drei Varianten von außen- bzw. innenliegender Isolierverglasung und jeweils vor- oder nachgeschalteter Beschattung einander gegenübergestellt.

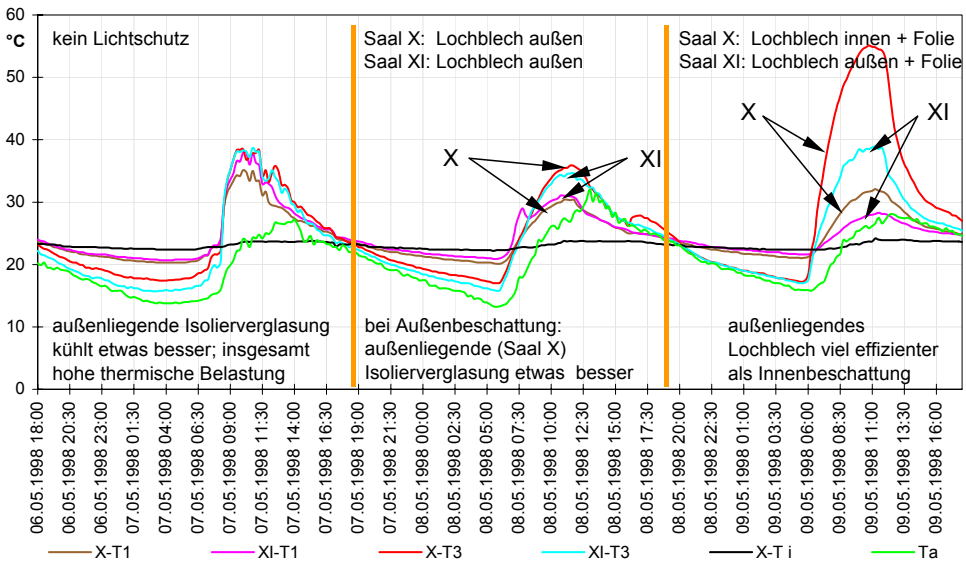


Abb. 20: Beschattungsvarianten: Isolierverglasung alleine bewirkt noch keinen hohen Wärmeschutz, erst in Kombination mit richtig angeordneten Beschattungsmaßnahmen. Vorsatzflügel außen, (Saal X) – Vorsatzflügel innen, (Saal XI)

Obwohl in Beispiel 1 die Tageserwärmung nicht über 27 °C anstieg beträgt beim Fenster ohne Lichtschutz die Maximaltemperatur an der Innenscheibe 38 °C; mit Isolierverglasung nur 2 K darunter. Eine Außenbeschattung mittels Lochblech (50% Strahlungsreduktion) in Beispiel 2 bewirkt eine signifikante Verbesserung: Trotz Tageserwärmung auf 32 °C bleibt die Innenscheibentemperatur bei 31 °C, mit außenliegender Isolierverglasung noch um 1 K darunter. In Beispiel 3 bewirkt bei außenliegender Isolierverglasung der Lichtschutz im Fensterkasten einen enormen Temperaturanstieg. Die günstigste Variante für Südlage ist somit außenliegende Vorbeschattung, Lichtschutz im Fensterkasten und innenliegende Isolierverglasung. Außerhalb direkter Sonneneinstrahlung könnte der Lichtschutz im Fensterkasten hochgezogen werden.

Man sieht, daß bei Kombination von Isolierverglasung und Beschattung die richtige Reihenfolge genau beachtet werden muß !

4.3 Reflektierende bzw. getönte „Sonnenschutzgläser“

Zur Simulierung getönter bzw. teilreflektierender Sonnenschutzgläser wurden zwischen Fensterscheibe und Vorsatzflügel gelochte und aluminiumbedampfte Polyesterfolien montiert.[16] Es ist klar, daß mit dieser einfachen Versuchsanordnung nur prinzipielle Tendenzen dieses Fenstersystems dargestellt werden können.

[16] Lichtschutzfolie „Trapex-Fol“, Fa. Fenstertechnik 1180 Wien (Lichttransmission 12%, Reflexion gemittelt 85%). Aufgrund der Vielfalt der angebotenen Produkte sind im Detail beträchtliche Abweichungen zu erwarten.

4.3.1 „Sonnenschutzgläser“ ohne Lichtschutz

Außenliegende getönte „Sonnenschutzverglasung“ führt auch ohne weitere Lichtschutzmaßnahmen zu einer Temperaturabsenkung an der Innenscheibe, die umso effektiver ist, je stärker das Glas getönt ist. Meiner Meinung nach ist hier wieder die Reduktion der Gesamtstrahlung wichtiger als eine selektive Filterung der langwelligen Infrarotstrahlung.

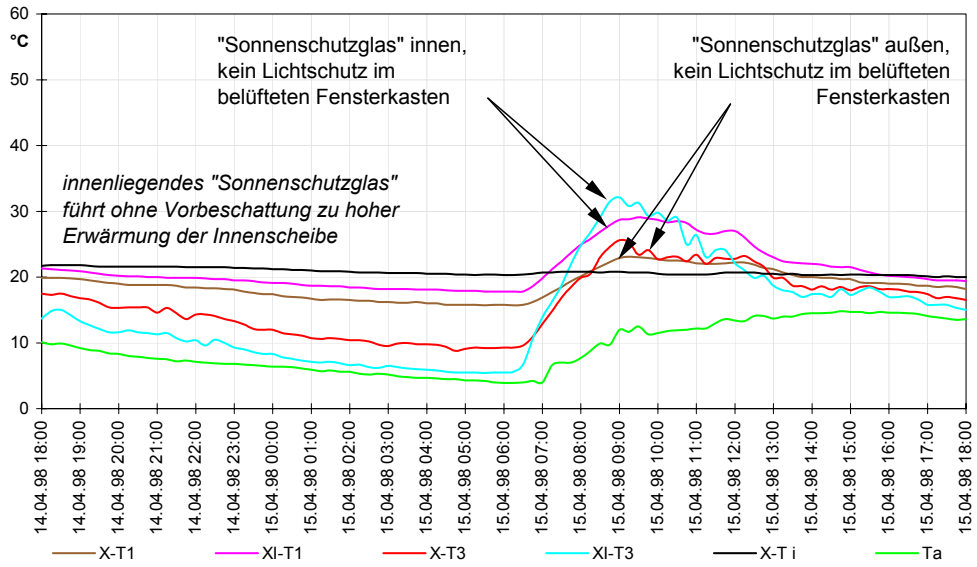


Abb. 21:
Vorsatzflügel mit Folie außen, OL auf (Saal X) ↔ Vorsatzflügel mit Folie innen, OL auf (Saal XI) kein Lichtschutz im Fensterzwischenraum

Diese günstige, teilbeschattende Wirkung wird üblicherweise auch von traditionellem geripptem Drahtglas erzielt, wie es in Lichtdächern des 19. und frühen 20. Jhdts. verwendet wurde. Das eingeschmolzene Drahtgitter sowie die grünliche Eigenfarbe sind offensichtlich als günstiger Strahlungsfilter wirksam.

Der größere Temperaturanstieg bei der innenliegenden „Sonnenschutzverglasung“ erklärt sich daraus, daß die Absorption der eingestrahlten Energie direkt an der Innenscheibe erfolgt.

4.3.2 „Sonnenschutzgläser“ mit Rollo im Fensterzwischenraum

Eine Beschattung im Fensterzwischenraum führt zwar bei außenliegender getönter „Sonnenschutzverglasung“ zu einer signifikanten Temperaturabsenkung im Fensterkasten selbst, die Oberflächentemperatur an der Innenscheibe war jedoch bei innenliegendem Vorsatzflügel insgesamt etwas geringer. Aufgrund der Vielfalt der angebotenen Produkte könnten im konkreten Einzelfall nur Versuche mit „authentischen“ Materialien Klärung schaffen.

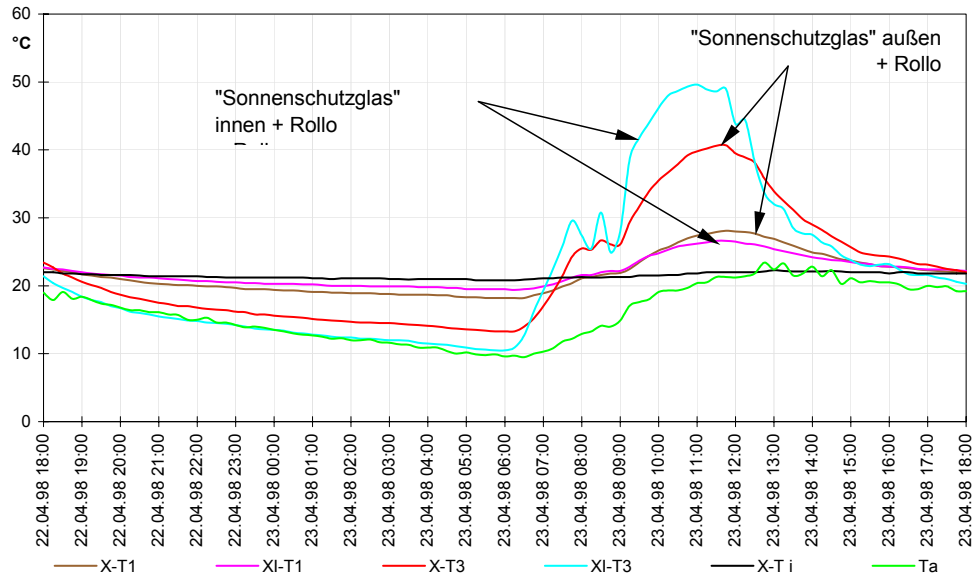


Abb. 22:
Vorsatzflügel mit Folie außen, OL zu (Saal X) ↔ Vorsatzflügel mit Folie innen, OL zu (Saal XI) Rollo im Fensterzwischenraum

4.4 *Optimierungsvarianten*

In der folgenden Testreihe wurde versucht, ausgehend von der Simulation eines alten verschmutzten und korrodierten Glasdaches[17], eine mögliche schrittweise Optimierung an zweischaligen Lichtdächern aufzuzeigen.

[17] Es wurde davon ausgegangen, daß durch Eigenfarbe des Glases sowie Verschmutzung und Korrosion an der äußeren Glashaut des alten Daches etwa 50% der Strahlung zurückgehalten werden. Dies wurde mit einem außen angebrachten Lochblech simuliert.

4.4.1 „Altes Dach“ ↔ „Konventionelle Sanierung mit aussenliegender Isolierverglasung“

Zunächst überraschend erscheint die Tatsache, daß hinsichtlich des Strahlungs- und Wärmeeintrages die meisten gängigen Sanierungskonzepte mit außenliegender Isolierverglasung offensichtlich eine deutliche bauphysikalische Verschlechterung gegenüber dem unsanierten Vorzustand bedeuten.

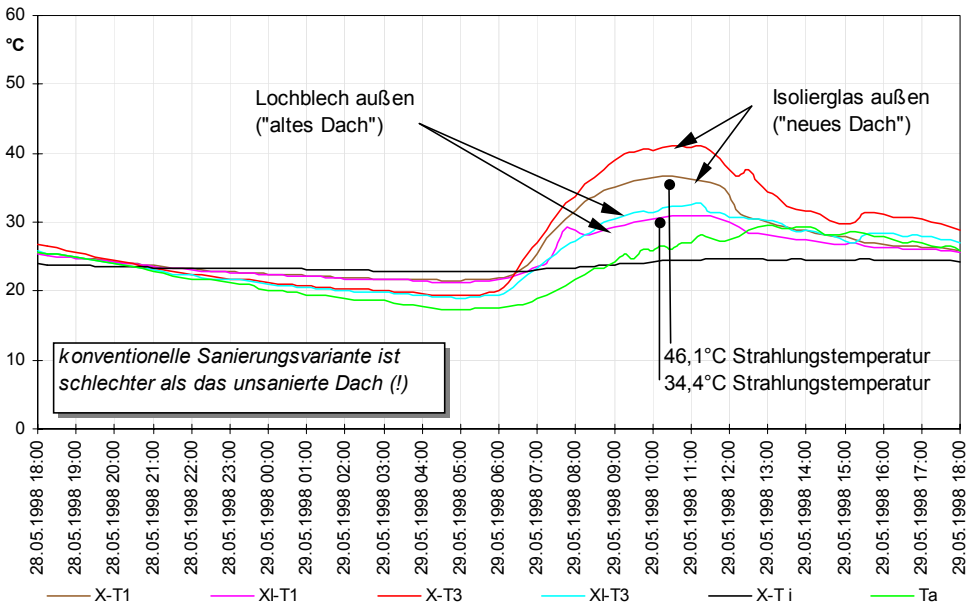


Abb. 23: Gegenüberstellung von altem, verschmutztem mit konventionell saniertem Lichtdach Isolierverglasung außen, kein Lichtschutz, OL zu (Saal X) ↔ „neues Dach“ Lochblech außen, kein Lichtschutz, OL zu (Saal XI) – „altes Dach“ (zur Bedeutung der Kürzel siehe Tab. 2, S. 476)

Das Unterschätzen des Strahlungseintrages bei Dachsanierungen wird vor allem daraus ersichtlich, daß im untersuchten Fall hinter der Innenscheibe eine bis zu 10 K höhere Strahlungstemperatur als an der Oberfläche der Scheibe gemessen wurde.

4.4.2 Situationsvergleich „Worst Case“ ↔ „Best Case“

Zur Verdeutlichung der Wirksamkeit der beiden gegensätzlichen Strategien (außenliegende Isolierverglasung ohne Lichtschutz – Außenbeschattung mit innenliegender Isolierverglasung sowie Rollo) ist im folgenden Beispiel das konventiell sanierte Glasdach der optimierten Lösung gegenübergestellt. Es sei darauf hingewiesen, daß neben der Oberflächentemperatur von 33,3 °C eine Strahlungstemperatur von 42,5 °C beim konventionell sanierten Dach gemessen wurde, während die innere Oberflächentemperatur des optimierten Daches um 9 K kühler (24,3 °C) mit einer Strahlungstempertur von 25,1 °C war. Die Strahlungstemperatur der inneren Oberfläche des konventionell sanierten Daches liegt somit um mehr als 13 °C (!) höher als bei der optimierten Lösung.

In beiden Fällen ist der Fensterzwischenraum nicht belüftet; dies entspricht einem Ausfall der Dachraumbelüftung. Bei Lichtdächern würde bei zenitalem Sonnenstand im Juni und Juli die Erwärmung noch extremer ausfallen.

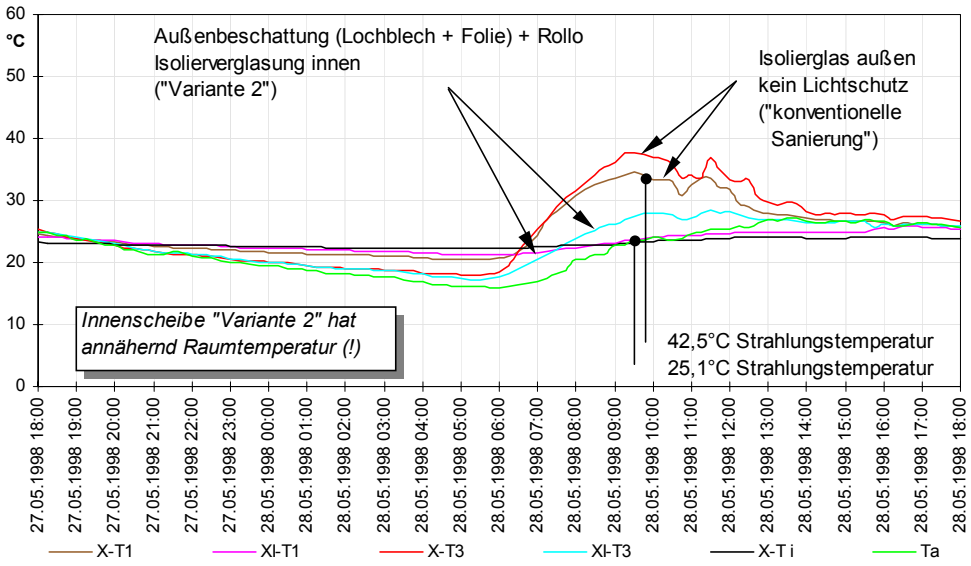


Abb. 24: Außenbeschattung (Lochblech + Folie), Rollo, Isolierverglasung innen (Saal XI) ↔ („Konventionelle Sanierung“, Saal X) Isolierverglasung außen, kein Lichtschutz

4.5 Nachrüsten bauphysikalisch ungünstiger Sanierungskonzepte

Es erhebt sich die Frage, inwieweit abgeschlossene Bauvorhaben von Glasdächern mit den hier nachgewiesenen bauphysikalisch ungünstigen Eigenschaften durch gezielte Eingriffe entschärft und verbessert werden können.

Nach den oben beschriebenen Wirkungsmechanismen muß verhindert werden, daß die die äußere Glashaut durchdringende Strahlung vom Bauteil absorbiert wird. Oberstes Ziel muß es deshalb sein, die gesamte Strahlungsmenge möglichst zu reduzieren. Da mechanisch gesteuerte außenliegende Lamellenjalousien im denkmalgeschützten Altbau und wegen der zu erwarteten Schwierigkeiten hinsichtlich Wartung, Vereisung, Schneelast etc. meist nicht in Erwägung gezogen werden, kann als einfachste Lösung die Montage von Lochblechen, Streckmetallblechen bzw. eines feinmaschigen Drahtgitters an der Außenseite des Glasdaches empfohlen werden.

Wo dies unannehmbar erscheint, ist zumindestens durch das Aufbringen einer Folie mit aufgedrucktem feinem Raster eine Reduktion der durchstrahlten Fensterflächen möglich.[18]

Von einer Montage der Beschattungsmaßnahmen in Materialkontakt an der Innenseite einer (außenliegenden) Isolierverglasung ist abzuraten, da dies unweigerlich zu einer starken Erwärmung durch Absorption führt. Die mitunter extreme Erwärmung der Scheiben kann bei direkter intensiver Sonnenbestrahlung zu Spannungsrissen führen.

Im Fensterzwischenraum angebrachte Sonnenschutzblenden (Lochblech, Streckmetallblech, Sonnensegel, etc.) sind ebenso zu empfehlen, vor allem, wenn sie mit einem gewissen Konvektionsabstand unmittelbar hinter der Außenscheibe montiert sind. Die dabei entstehende Absorptionswärme sollte allerdings mechanisch abgeführt werden.

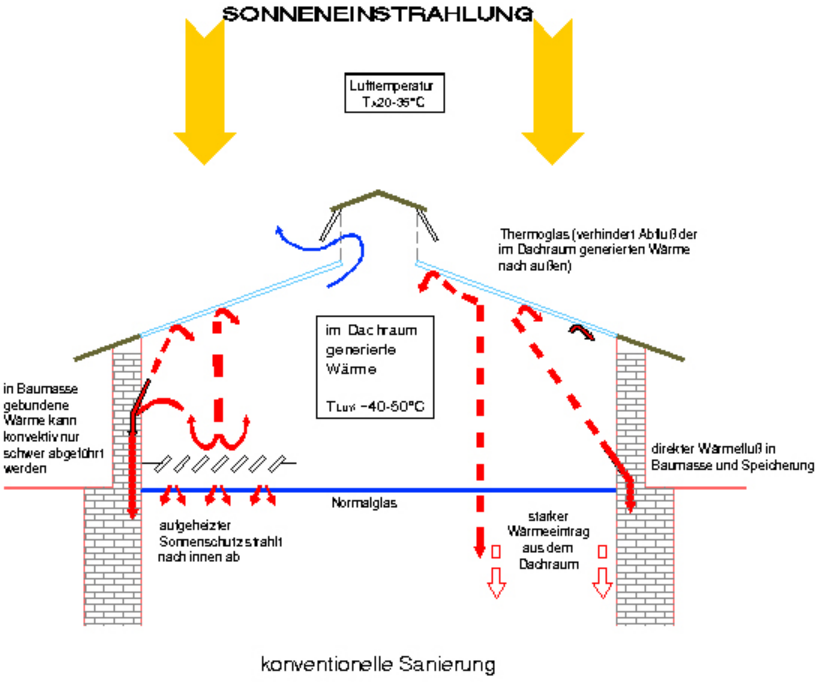
In jedem Fall erweist sich eine konvektive Kühlung des Dachraumes als notwendig; vor allem während der Nachtstunden kann durch „free cooling“ ein Teil der tagsüber akkumulierten Wärme weggelüftet werden.[19]

In den folgenden beiden Grafiken sind die konventionelle Sanierungsvariante und die optimierte Sanierungsvariante nochmals schematisch einander gegenübergestellt.

[18] Um eine punktuelle Erwärmung hintanzuhalten ist die aufgedruckte Rasterung keinesfalls schwarz sondern in weißer oder silberreflektierender Farbe vorzunehmen.

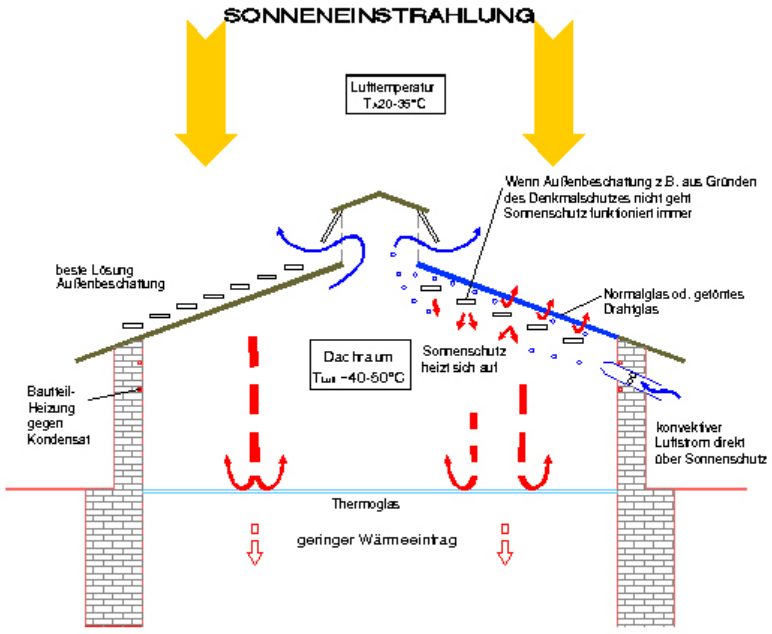
[19] Die thermische Belastung der Obergeschoße in der Neuen Hofburg in Wien konnte durch Hinterlüftung des Dachraumes entscheidend gesenkt werden.

Abb. 25:
Konventionell saniertes Lichtdach. Bei innenliegender Beschattung führt die außenliegende Isolierverglasung zu einer höheren Erwärmung des Dachraumes



konventionelle Sanierung

Abb. 26:
Optimiertes Lichtdach. Bei innenliegender Beschattung bewirkt die innenliegende Isolierverglasung eine geringere thermische Belastung des Baukörpers



optimierte Sanierung

5 Innere Lasten – Tageserwärmung – Kühlung

5.1 Vorbemerkungen

Die Erfahrungen bei den Generalsanierungen verschiedener Museen in den letzten Jahren haben gezeigt, daß klimarelevante Entscheidungen auf den haustechnischen Gebieten „Heizung-Klima-Lüftung“, „Beleuchtung“ und „Lichtschutz“ meist auf völlig getrennten Ebenen stattfinden, die nicht oder nur sehr selten aufeinander abgestimmt werden.

So wird das Gebiet „Heizung-Klima-Lüftung“ meist vom Haustechnikplaner nach den Vorgaben der Nutzer und anhand geltender technischer und gesetzlicher Normen geplant, (wobei die Anlagen fast immer zu groß ausgelegt werden).

Der „Lichtschutz“ der Fenster wird meist nur unter dem Aspekt der Reduktion der Beleuchtungsstärke bzw. unter gestalterischen-architektonischen Gesichtspunkten gesehen. Die aus einer falschen Montage oder falschen Materialwahl möglicherweise resultierende thermische Belastung des Raumes wird häufig erst im Nachhinein erkannt.[20]

Das Teilgebiet „Raum- und Objektbeleuchtung“ wird vorrangig als gestalterisch-ästhetisches Problem im Verantwortungsbereich von Architekt, Lichtplaner und Kuratoren gesehen. Die klimarelevanten Einflüsse werden zunächst fast immer ausgeblendet. Meist erst im Nachhinein, wenn nach erfolgter Installation neue, bisher unbekannte Klimaprobleme (Übererwärmung, Temperatur- und/oder Feuchteschwankungen) auftauchen, rückt die Tatsache ins Bewußtsein der Nutzer, daß jedes kW installierte Leistung letztendlich eine thermische Belastung des Raumklimas bedeutet.[21] Im Konflikt zwischen konservatorischen und gestalterischen Sachzwängen wird häufig den ästhetischen Gesichtspunkten der Vorzug gegeben.

Auch nach der Generalsanierung der Sammlung alter Musikinstrumente gab es wie bereits erwähnt diese unliebsamen Überraschungen. Die nicht gelungene Temperaturabsenkung war umso schmerzlicher, als bei der Planung zur Generalsanierung von Anfang an bewußt auf eine komplexe Zusammenschau aller dieser klimatisch relevanten Parameter geachtet wurde. Dennoch ließen sich bestimmte planerische Vorgaben und „Sachzwänge“ nicht verhindern. So erforderte eben die Abschattung der Fenster eine Vitrinen- und akzentuierende Objektbeleuchtung, die zuvor nicht notwendig war. Die physikalisch sinnvollere Lösung (Außenbeschattung) war aus denkmalpflegerischen Gründen abgelehnt worden. Zur akzentuierenden Objektbeleuchtung wurden Halogenspots in 6 Meter Höhe an der Decke befestigt. Dies geschah gegen den Wunsch der Nutzer, die eine tiefer liegende Lichtschiene bevorzugt hätten, womit bei gleicher Beleuchtungsstärke für die Spots ca. 50% – 60% weniger Leistung erforderlich gewesen wäre.

5.2 Innere Lasten im Ausstellungsbereich

Die elektrische Anschlußleistung für Raum- und Objektbeleuchtung sowie für Luftbefeuchter, CD-Player und sonstige technische Einrichtungen war bei der Sanierung der SAM von 10 kW auf 44 kW angehoben worden. Allerdings wird im Ausstellungsbetrieb nur ein Teil der Leuchtmittel eingesetzt; so werden beispielsweise die in die Decke integrierten Halogenstrahler de facto nie in Betrieb genommen.

Der Gesamtenergieeintrag über elektrische Geräte beträgt (in kWh):

Tabelle 4: Wärmeeintrag durch Elektrogeräte

	Planung	Ist	Normalbetrieb
Grundbeleuchtung	13	0	0
Objektbeleuchtung	12	9,5	9,5
Luster	17	13	1 – 4
Luftbefeuchter etc.	2	2	1,5
Summe	44	24,5	12 – 15

Da die Luster im Sommer in der Regel nur im Marmorsaal und in den Seitengalerien eingeschaltet sind, wird den Sammlungsräumen über elektrische Geräte und Leuchtmittel im normalen Ausstellungsbetrieb bei einer durchschnittlichen Beleuchtungsstärke von 100 Lux am Objekt ein Energieeintrag von 7,5 – 9,4 W/m^2 zugeführt. Deckenstrahler und Luster werden nur bei Sonderveranstaltungen zugeschaltet.[22]

[20] So wurde etwa bei der Generalsanierung des Museums für angewandte Kunst im Mittelbau als Lichtschutzrollo ein nachtblauer Baumwollstoff gewählt. Dieser bewirkte infolge erhöhter Absorption der auftreffenden Strahlung einen extremen Anstieg der Raumtemperaturen.
Bei der Ausstellung „Die Klangwelt Mozarts“ 1991 in der Neuen Burg wurden die Scheiben der inneren Fensterflügel mit schwarzem Naturpapier abgeklebt. An den als „Sonnenkollektoren“ wirkenden Fenstern wurden Oberflächentemperaturen bis zu 50 °C gemessen.

[21] Als Beispiel dafür sei etwa die Hoftafel- und Silberkammer in der Wiener Hofburg erwähnt, wo 37 kW installierte Lichtleistung konservatorisch untragbare Temperaturschwankungen von bis zu 15 °C täglich in den Vitrinen sowie einen extremen Anstieg der Raumtemperaturen vor allem im Sommer bewirken. Die Hoftafel wurde mit 11.000 Lux angestrahlt. Die installierte Leistung entspricht einem Energieeintrag von ca. 28 W/m^2.
Ebenso haben sich die sogenannten „Kaltlichtvitrinen“ der Firma Svarowski als äußerst problematisch herausgestellt. Die über Lichtleiterkabel geführte Objektbeleuchtung strahlt zwar in den Schaukästen tatsächlich nur „kaltes“ Licht auf die ausgestellten Objekte, die in den Untervitrinen montierten Projektoren geben allerdings je nach Vitrinengröße über Kühlventilatoren zwischen 150 und 450 Watt pro Vitrine (!) an die Raumluft ab. Im Vergleich dazu: Die mit ca. 2,5 m^3 größte Vitrine der SAM wird mit zwei Leuchtstoffröhren à 40 W ausreichend beleuchtet.

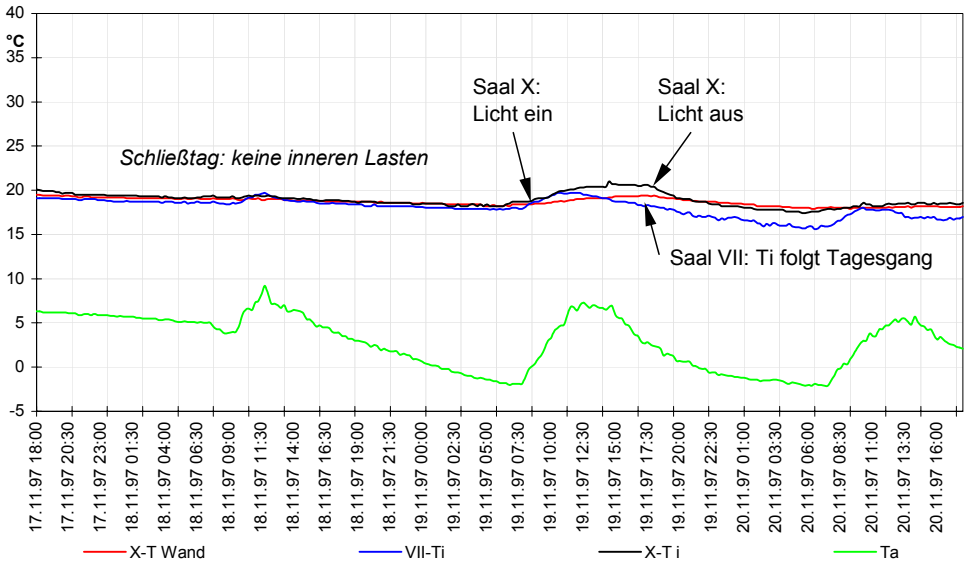
[22] Je nachdem, ob man die Eingangsgalerie hinzuzählt (die zwar nicht zur Ausstellungsfläche der SAM gehört, deren Luster aber in die Energiebilanz eingehen), ergibt sich ein etwas höherer oder tieferer Wert. Aus der Grundfläche des Kernbereiches der SAM mit 1.600 m^2 ergibt sich bei einer angenommenen Anschlußleistung von 12 kW eine Wärmebelastung von 7,5 W/m^2. Bei 15 kW Anschlußleistung errechnet sich der Energieeintrag mit 9,38 W/m^2. Rechnet man die Fläche der Eingangsgalerie hinzu, reduziert sich der Wert auf 8,1 W/m^2. Dies definiert in Folge die maximal zulässige Anschlußleistung.

Ergänzend ist in Erinnerung zu rufen, daß die Entfernung einer Lichtquelle zum Objekt bei der Frage nach dem notwendigen Energieeinsatz eine ganz wesentliche Rolle spielt. Da die Beleuchtungsstärke mit dem Quadrat der Entfernung abnimmt, muß bei verdoppeltem Objektabstand das Vierfache an elektrischer Energie eingesetzt werden, um gleiche Helligkeit wie vorhin zu empfinden. So werden beispielsweise in der Ostdeutschen Galerie in Regensburg bei einer Helligkeit von 250 Lux auf Gemälden 11,5 W/m^2 Lichtleistung eingesetzt. Da der Abstand der Leuchtmittel zum Objekt geringer ist, kann mit der eingesetzten Energie eine größere Helligkeit (als in der SAM) erzielt werden.

Um den Einfluß der inneren Lasten auf die Raumtemperatur darzustellen, wurden im November 1997 am Schließtag der Sammlung alle Leuchtkörper ausgeschaltet sowie am darauffolgenden Tag alle Leuchtmittel eingeschaltet. Der Versuch erfolgte in der kalten Jahreszeit, um Fremdeinflüsse durch externe Tageserwärmung möglichst auszuschließen.

In Abb. 27 sind die Raumtemperaturen von Saal VII sowie die Wand- und Raumtemperatur von Saal X einander gegenübergestellt.

Abb. 27:
Die Beleuchtung führt zu einer Anhebung der Raumtemperatur
Saal VII: an beiden Tagen unbeleuchtet Saal X:
17. 11. 97 alle Lichter ab;
18. 11. 97 alle Lichter an
17. 11. 1997-20. 11. 1997



Ein unmittelbarer Einfluß durch die Beleuchtung ist somit deutlich nachweisbar. Obwohl die durchschnittliche Außentemperatur im Versuchszeitraum signifikant absank (was sich auch in der Temperaturkurve von Saal VII (VII-Ti/dunkelblau) wiederspiegelt), stieg die Raumtemperatur in Saal X um ca. 4 K.

Der Einfluß der Beleuchtung ist auch daran ersichtlich, daß im nicht für den Ausstellungsbetrieb geöffneten Saal VII die Raumtemperatur sofort absinkt, sobald die Sonne um ca. 11 : 30 Uhr die Fenster nicht mehr bescheint. Im Saal X hingegen endet der Temperatureintrag erst um 18 : 00 Uhr mit dem Schließen der Sammlung.

Im Saal VII oszilliert die Raumtemperatur im Tagesgang stärker, da alle Lichtschutzeinrichtungen hochgezogen waren und dies zu einem unmittelbaren Einfluß durch die Sonne führte. Ein Teil des Energieeintrages in Saal VII stammt möglicherweise auch von der über den Fußboden einwirkenden Raumbeleuchtung des darunterliegenden Museums für Völkerkunde.

Die Tatsache, daß im Saal X die Raumtemperatur die Wandtemperatur während der Nachtstunden unterschreitet zeigt, daß ein Teil der eingebrachten Wärme durch Zwangsbelüftung weggekühlt werden kann, bevor er im Mauer-

werk gespeichert ist. Hinzu kommt, daß sich in der Mauer in Fühlernähe ein Steigstrang der Heizung befindet und damit die Wand wärmeversorgt ist.

Im musealen Normalbetrieb wird nur in Ausnahmefällen die volle Leistung aller Leuchtmittel eingebracht, der Versuch zeigt dennoch die prinzipielle Tendenz.

5.3 Energieeintrag durch Sonne und Beleuchtung

Hierbei wurden die folgenden Fragenkomplexe[23] behandelt:

A. Wieviel Sonnenenergie würde ohne Lichtschutz über die ca. 80 m² Fensterflächen tagsüber eingestrahlt werden?
Durch ein senkrecht stehendes Kastenfenster mit Zweischeibenverglasung werden bei guten Einstrahlungsbedingungen ca. 440 W/m² Fensterfläche in den Raum eingetragen. Details dazu sind im Pkt. 2.3.2 enthalten. Zu berücksichtigen ist die Dauer des vollen Sonneneintrages mit 4 Stunden für die südostseitig orientierten Säle und bis zu 6 Stunden für südseitige Fenster. Rechnet man am Vormittag 4 Stunden mit der vollen Sonnenleistung und 8 Stunden mit dem Wert der optimal abgeschatteten Fenster (35 W/m²; siehe Pkt. 2), so werden den Ausstellungsräumen während der 10-stündigen Betriebszeit 16,3 kW/h zugeführt. Dies entspricht einem Wärmeeintrag von etwa 10 W/m2 Grundfläche in der Stunde.

B. Wieviel Wärme wird über die beschatteten Fenster eingetragen?
Bei einer Ablüftung der Überschußwärme und einem bezüglich des Sonnenschutzes optimal ausgelegten Kastenfenster erreichen die Innenscheiben eine Übertemperatur von maximal 5° K gegenüber der Raumluft. Damit ergibt sich ein Wärmeeintrag von 35 W/m².
Wird das Kastenfenster nicht abgelüftet und ist der Wärmeschutz nicht optimal, dann erreicht die Innenscheibe Temperaturwerte bis zu 9K über der Raumlufttemperatur. Dabei werden 63 W/m² an Wärme nach innen übertragen.

C. In welchen Verhältnis stehen Außenlicht und künstliche Beleuchtung?
Aufgrund der Abschwächung des Außenlichtes um mehr als 99% ergeben sich bei 85 000 lx (maximale Sonneneinstrahlung außen) Helligkeitswerte beim Fenster in der Größe von 50 lx, die bis zur gegenüberliegenden Wand auf unter 20 lx abfallen.
Dieser Wert ist zu wenig für eine ausreichende Beleuchtung der Museumsobjekte, weshalb künstliches Licht mit rund 100 lx/m² Bodenfläche (Mittelwert für die gesamte Sammlung) zur Verfügung stehen muß. Für Grund- und akzentuierende Objektbeleuchtung sind in der SAM etwa 10 kW an elektrischer Energie in Betrieb.
Dies bedeutet einen Energieeintrag von ca. 8 W/m² gegenüber einem natürlichen Eintrag an Sonnenlicht von 10 W/m². Damit scheint auf den ersten Blick die elektrische Beleuchtung günstiger zu sein als die Sonne als natürliche Lichtquelle.
Dieses Gedankenbeispiel übersieht aber die einfache Tatsache, daß die Sonne trotz der elektrischen Beleuchtung tagsüber scheint und beide Einflußgrößen daher zusammen die Innenraumtemperatur beträchtlich in die Höhe treiben.
Rechnet man den Energieeintrag über die abgeschatteten Fenster hinzu, erhöht sich die Gesamtbelastung je nach Sonnenschutzsystem um 3 – 5 kW (die über die Mauern aufgenommene Sonnenenergie ist dabei noch nicht mitgerechnet!). Günstiger ist es daher, auf einen Teil des Lichtschutzes beim Fenster zu verzichten.
Zukünftige Ausstellungskonzepte müssen entweder wieder vermehrt auf Tageslichtbeleuchtung (UV-gefiltert) zurückgreifen, oder in jedem Fall eine Lüftung vorsehen.

Bei Verzicht auf Tageslicht zur Beleuchtung von Museumsräumen muß ein Mehrfaches des natürlichen Energieeintrages nun an elektrischer Energie installiert werden, um gleichwertige Beleuchtungsverhältnisse zu erhalten.

Um die Raumtemperatur abzusenken, muß der durch obiges Prinzip entstehende Wärmeüberschuß technisch gestützt abgeführt werden.

5.4 Wirksamkeit technisch gestützter Lüftung während der Nachtstunden

Um während der Nachtstunden die Sammlungsräume entlüften zu können, wurden im Zuge des Projektes nachträglich im Parapetbereich zweier diametral gelegener Fenster im Saal IX sowie im Saal XVIII je zwei Querstromlüfter montiert (siehe Grundrißplan Abb. 1), die über die im Fensterbrett angebrachten Schlitze die Luft durch den Fensterkasten und die geöffneten Außenoberlichten ins Freie blasen.

Mit einer Leistung von insgesamt ca. 2400 m^3/Std. bewirken sie einen etwa 0,3-fachen Luftwechsel.[24] Die Nachströmung erfolgte über die Schlitze in den Fensterbrettern. Dadurch sollte erstens die Nachströmung im Sinne einer Quell-Lüftung erfolgen und zweitens der Staubeintrag möglichst hintangehalten werden. Alternativ dazu erfolgte im Sommer 1996 die Nachströmung über zwei in Saal XIII und Saal XIV geöffnete Oberlichten.

[23] Bauphysikalische Bewertungen durch TB Dr. Karl Prodinger, Gföhl.

[24] Jeder der vier Querstromlüfter hat eine Fördermenge vom max. 780 m^3/h; Die Lüfter laufen auf Stufe 8, wobei eine Förderleistung von ca. 600 m^3/h angenommen wird. Die zehn burggartenseitigen Säle der Sammlung haben eine Grundfläche von 1383 m^2. Bei sechs Metern Raumhöhe ergibt sich eine Kubatur von 8300 m^3.

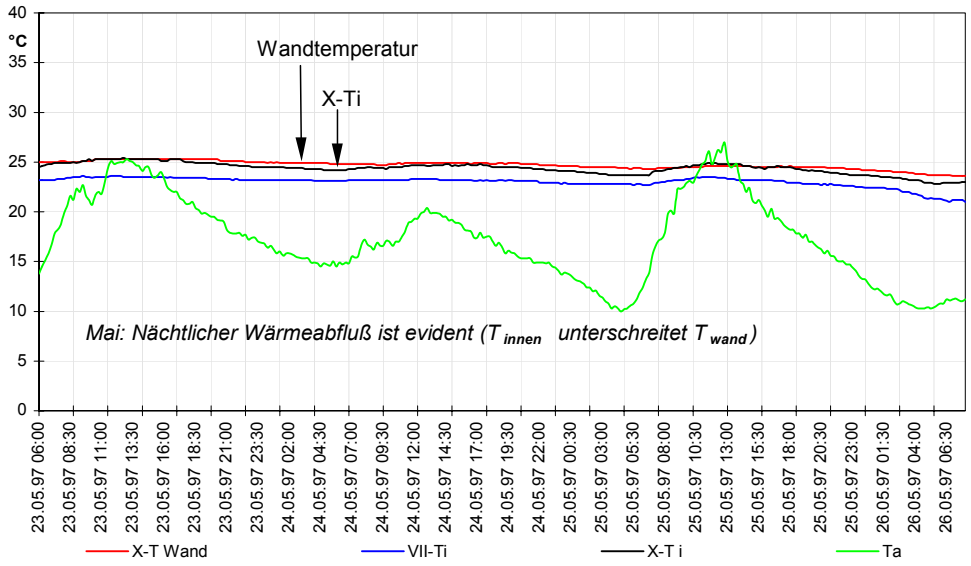


Abb. 28:
Absenken der Raumtemperatur durch Zwangsbelüftung Saal X: Absaugen der erwärmten Raumluft zwischen 19 Uhr und 6 Uhr Saal VII: nicht belüftet
23.5. – 26. 5. 1997

Um die Wirksamkeit der Nachtkühlung in den Sommermonaten zu untersuchen, sind in den folgenden Abbildungen an je drei charakteristischen Tagen der Monate Mai, Juni, Juli und August 1997 die Raum- und Wandtemperatur in Saal X sowie die Raumtemperatur von Saal VII der Außentemperatur gegenübergestellt. Dabei zeigt Saal VII, in dem noch keine inneren Lasten durch Raum- und Objektbeleuchtung mit der damit verbundenen Wärmeakkumulation auftreten, die jeweils niedrigeren Temperaturen.

Wie die Kurve in Abb. 28 zeigt, überschreitet die Raumtemperatur die Wandtemperatur im Frühjahr nicht. Es findet noch keine Akkumulation der Sonnenwärme statt. Während der Nachtstunden wird ein Teil der eingestrahlten Energie wieder über die Zwangsbelüftung abgeführt.

Zur Zeit des Sonnenhöchststandes im Juni kommt es zu einem verstärkten Energieeintrag durch die Sonne. Durch die nächtliche Lüftung kann die Wärmeakkumulation verlangsamt aber nicht verhindert werden (Abb. 29).

Abb. 29:
Wärmeakkumulation durch Sonneneinstrahlung im Juni; nur gering wirksames Absenken der Raumtemperatur durch Zwangsbelüftung
Saal X: Absaugen der erwärmten Raumluft zwischen 19 Uhr und 6 Uhr Saal VII: nicht belüftet
9.6. – 12. 6. 1997

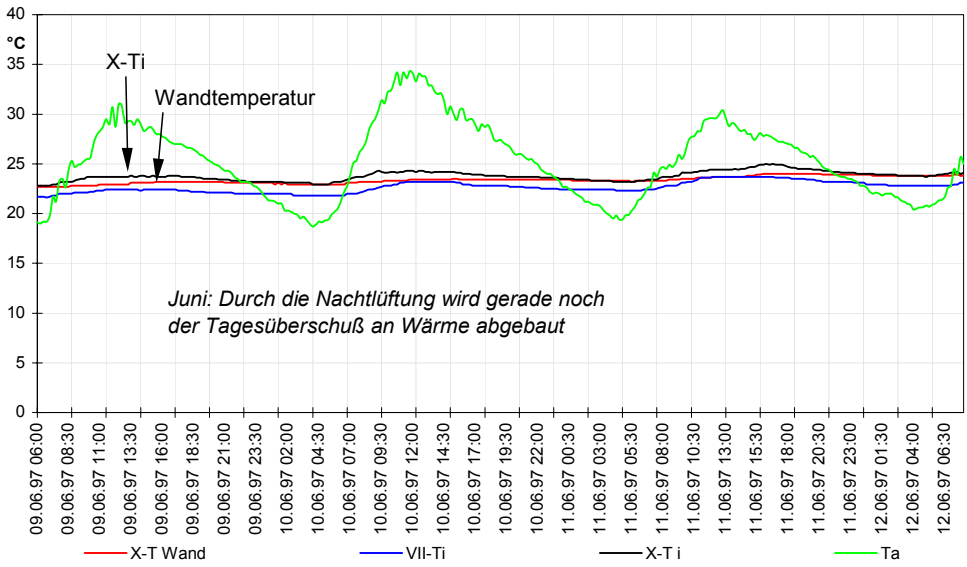
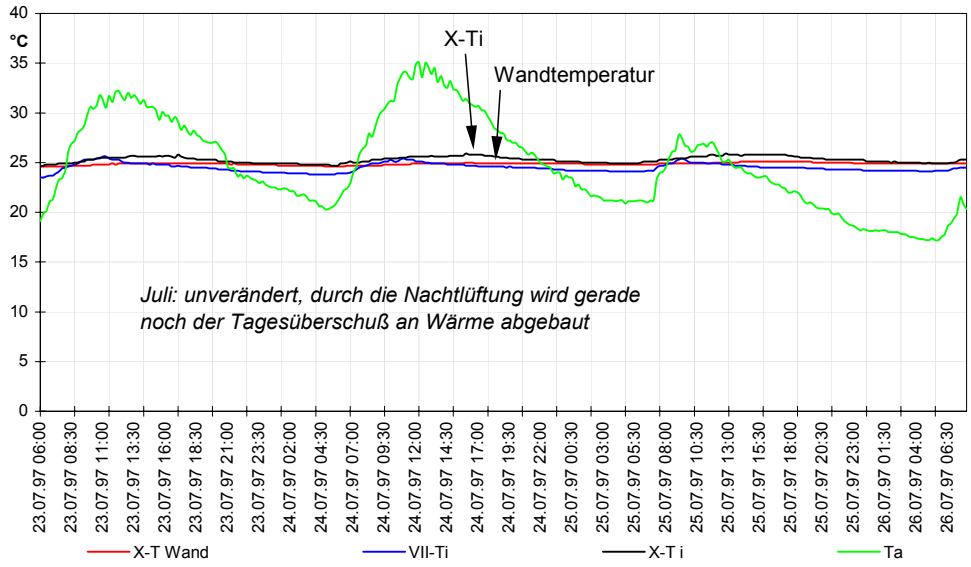


Abb. 30:
Wärmeakkumulation durch Sonneneinstrahlung, nur bedingt wirksames Absenken der Raumtemperatur durch Zwangsbelüftung Saal X: Absaugen der erwärmten Raumluft zwischen 19 Uhr und 6 Uhr
Saal VII: nicht belüftet
23.7. – 26. 7. 1997



Der Juli 1997 war von ausgiebigen Regenfällen und plötzlich wechselnden Kälteperioden mit dazwischenliegenden Sonnenscheintagen und plötzlicher Tageserwärmung geprägt. Mit der Belüftung der Sammlungsräume während der Nachtstunden konnte die Raumtemperatur höchstens auf die Oberflächentemperatur der Außenwand abgesenkt werden. Die untertags akkumulierte Wärme ist im Mauerwerk der Außen- und Zwischenwände gespeichert und kann über Nacht nicht mehr nachhaltig abgebaut werden. Die Raumtemperatur von Saal VII, der einen ineffizienteren Sonnenschutz aufweist, erreicht an manchen Tagen (Mittagszeit) die Innentemperatur von Saal X.

Obwohl die größte Tageserwärmung des Sommers 1997 im August stattfand, war in diesem Monat aufgrund der flacheren Sonneneinstrahlung wieder eine Kühlwirkung der Nachtlüftung feststellbar: In den frühen Morgenstunden unterschritt die Innenraumtemperatur von Saal X die Oberflächentemperatur der Außenwände.

Die Temperaturabsenkung in Saal VII ist sehr wahrscheinlich auf einen Wärmeabfluß über die Mauer zu den an den beiden Saalenden befindlichen

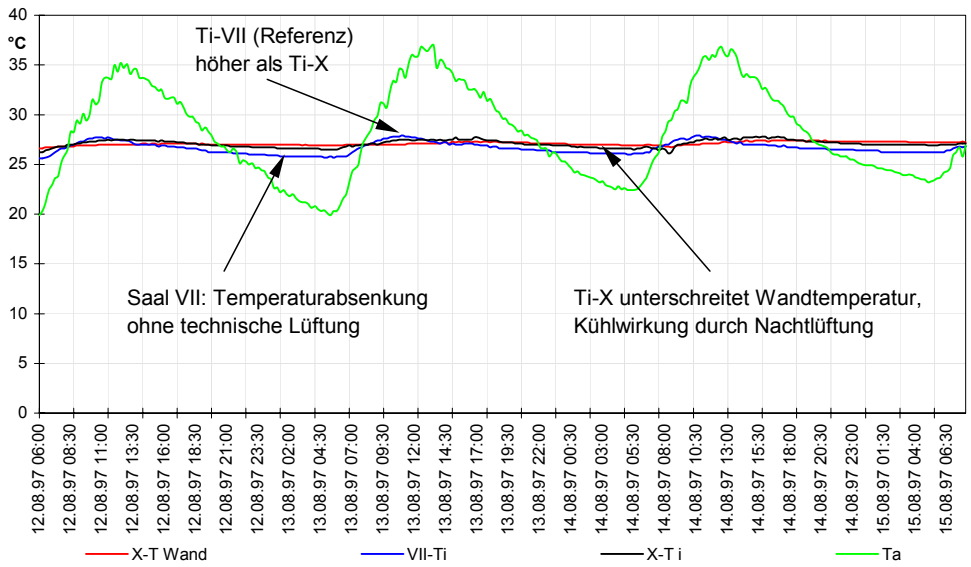


Abb. 31:
Wärmeakkumulation durch Sonneneinstrahlung. Nur bedingt wirksames Absenken der Raumtemperatur durch Zwangsbelüftung Saal X: Absaugen der erwärmten Raumluft zwischen 19 Uhr und 6 Uhr
Saal VII: nicht belüftet
12.8. – 15. 8. 1997

gemauerten Lüftungsschächte zurückzuführen, die ständig mit kühler Luft aus dem zweiten Kellergeschoß („Luftbrunnen“) durchströmt sind.

Betrachtet man den Verlauf der Raumtemperaturen von Saal X und Saal VII in den beiden Monaten Juli und August im Überblick (vgl. Abb. 32 und 33), so sind mehrere prinzipielle Tendenzen feststellbar.

Einerseits zeigt sich die stärker dämpfende Wirkung des Sonnenschutzes in Saal X sowie das Einsetzen der Nachtlüftung, andererseits ist der vergleichsweise stärkere Wärmeanstieg durch die inneren Lasten des Ausstellungsbetriebes nachweisbar.

Dies wird in der Kälteperiode vom 5.7. – 9. 7. 1997 besonders deutlich sichtbar.

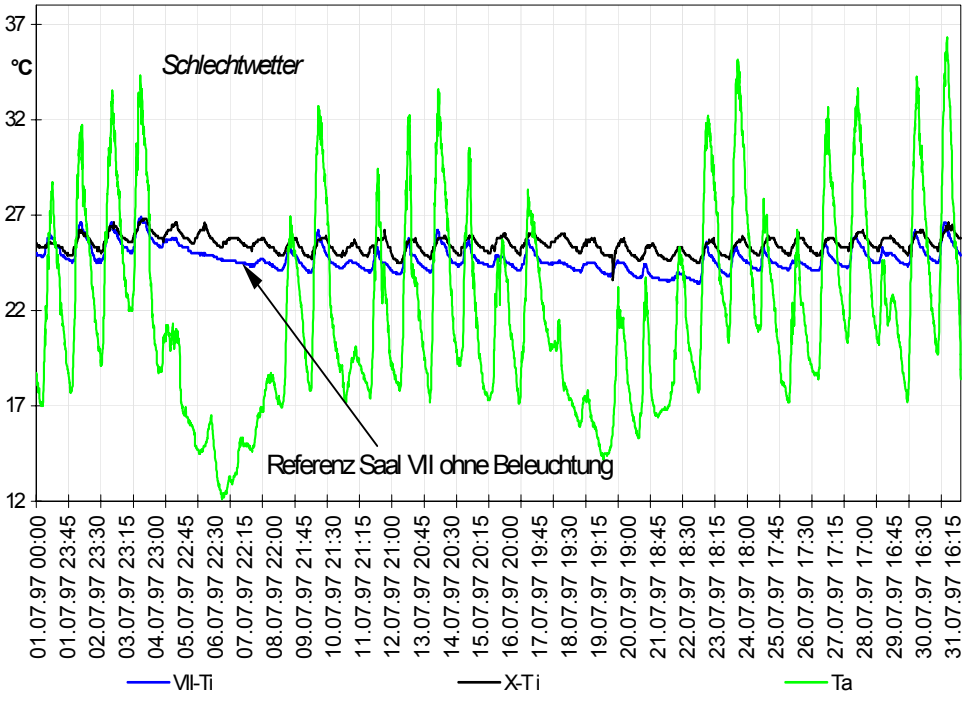
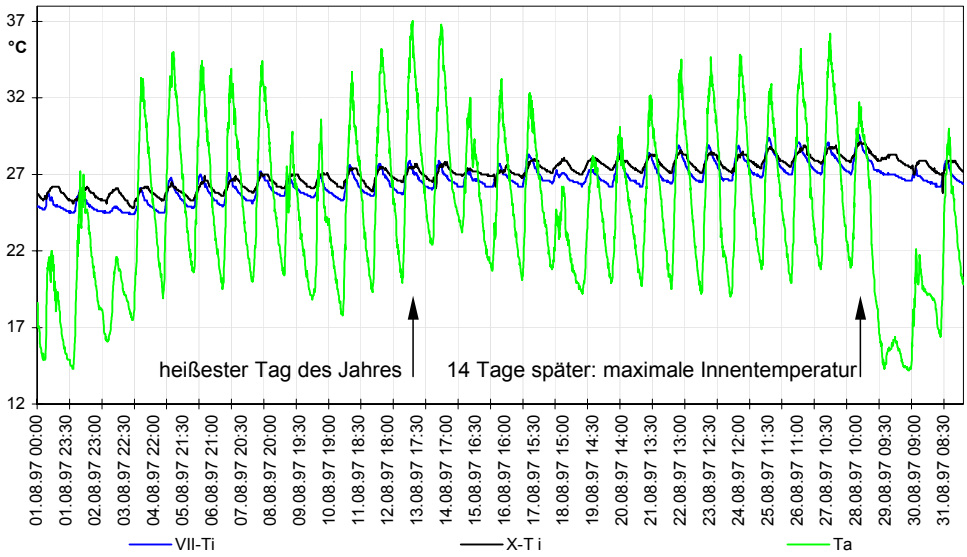


Abb. 32:
Gesamt-Temperaturverlauf im Saal X und Saal VII Juli 1997

Abb. 33:
Gesamt-Temperaturverlauf im Saal X und Saal VII August 1997



Das Verhalten der Raumtemperaturen in Saal VII erscheint auf den ersten Blick paradox und erfordert eine tiefergehende Interpretation. Wir haben bereits festgestellt, daß die Rauminnentemperaturen in Saal VII im Durchschnitt kühler sind als in Saal X. Als Gründe dafür wurde einerseits das Fehlen der aus dem Ausstellungsbetrieb resultierenden inneren Lasten genannt, andererseits die Tatsache, daß die Fassade sowohl morgens als auch am Nachmittag viel länger im Schatten der vorspringenden angrenzenden Gebäudeteile liegt (vgl. Abb. 1). Trotzdem übersteigen an extrem heißen Tagen die Temperaturkurven im Saal VII jene von Saal X und oszillieren auch viel stärker. Der größere Temperaturanstieg ist wohl darauf zurückzuführen, daß der in Saal VII installierte herkömmliche Sonnenschutz (ohne Isolierverglasung und Fensterkastenbelüftung) mehr Sonnenenergie dem Raum zuführt.

Auffallend ist jedoch, daß diese Energie nicht so stark gespeichert wird wie im Bereich der SAM. Obwohl Saal VII über Nacht nicht belüftet wird (im Temperaturverlauf von Saal X ist um ca. 20 Uhr die Wirkung der Zwangsbelüftung nachweisbar), kühlen die Räume im Bereich des *Corps de Logis* über Nacht sowie an Tagen mit kühlerer Außentemperatur wieder sehr schnell ab. Dafür kommen mehrere Gründe in Betracht, die jedoch meßtechnisch noch nicht abgeklärt sind und deshalb Vermutungen darstellen:

- Saal VII (der etwa dreimal so groß ist wie Saal X), besitzt aufgrund fehlender Zwischenwände eine geringere Wärmespeicherkapazität.
- Die stärkere Abkühlung während der Nacht scheint darauf hinzudeuten, daß im Corps de Logis über die in den Stirnwänden geführten Entlüftungsschächte ständig und nachhaltig Wärme abgebaut wird.

Wenn es gelingt, die im Bereich des Corps de Logis wirksamen Wärmeabflüsse auf den Mittelbau der Neuen Burg zu übertragen (z. B. durch Reaktivierung der ursprünglich vorhandenen Schächte), müßte insgesamt eine deutliche Verbesserung der klimatischen Situation zu erreichen sein.

6 Zusammenfassung der Messergebnisse

Das Forschungsprojekt PREVENT hat zu einem besseren Verständnis der klimatischen Wirkungsmechanismen im Ausstellungsbereich der Sammlung alter Musikinstrumente und zu einer ersten Verbesserung der Situation geführt. Durch das Ausrüsten der Fensterkästen mit zwei- bis dreifachem Lichtschutz, Fensterkastenbelüftung, Montage von Vorsatzflügeln an den Innenscheiben sowie technisch gestützter Lüftung während der Nachtstunden ist es gelungen, die Raum-

temperaturen der Sammlung alter Musikinstrumente von max. 32 °C im Sommer 1994 auf max. 29 °C im Sommer 1997 zu senken. Die Spitzenwerte wurden lediglich für die Summendauer von 5 Stunden überschritten. In 80% der Fälle blieb die Raumtemperatur unter 28 °C.

Durch die umfangreichen Messungen wurden viele Detailfragen angeschnitten wie z. B. die Frage nach der Bedeutung der Glasstärken der Fensterscheiben für den Wärmefluß oder die Gegenüberstellung der nächtlichen Wärmeabflüsse über Wand und Fenster bzw. durch konvektive mechanische Belüftung.

Es kam aber auch zu unerwarteten Antworten wie z. B. die Tatsache, daß bei hochgezogenem Sonnenschutz und Einscheibenverglasung über Nacht von 20 Uhr bis 6 Uhr Früh etwa die gleiche Wärmemenge über die Fenster abfließt wie nach Sonnenaufgang von 6 Uhr bis 8 Uhr dem Raum wieder zugeführt wird. Auch die Tatsache, daß sich selbst im Winter beim Hochfahren der reflektierenden Jalousien kein signifikant verstärkter Wärmeabfluß über die Fenster feststellen ließ, war überraschend.

Die Meßergebnisse lassen sich in folgenden Kernaussagen zusammenfassen:

1. **Der effizienteste Sonnenschutz, der den Strahlungsanteil am wirksamsten verringert, ist eine *Außenbeschattung.* Um in Bauten mit Kastenfenstern ohne Außenbeschattung den Wärmeeintrag durch direkte Sonneneinstrahlung zu minimieren, sind Lichtschutzeinrichtungen *im* Fensterkasten erforderlich, deren Reihenfolge relevant ist (schwerer Stoff zum Außenflügel hin, reflektierendes Material zum Innenflügel hin). Der Masse des Materials kommt mehr Bedeutung zu als dem Reflexionsvermögen.**
2. **Wenn der Fensterkasten mechanisch belüftet werden kann, ist eine Isolierverglasung eher zweitrangig; gegebenenfalls ist sie am *Innen*flügel zu montieren. Im Idealfall addieren sich die Wirkungen von Kastenbelüftung und Zweitverglasung des Innenflügels.**
3. **Das Abdunkeln der Fenster und die Installation einer Kunstlichtanlage führen im Hochsommer zu einem erhöhten Wärmeeintrag. Ab einer installierten Lichtleistung von ca. 10 W/m^2 Ausstellungsfläche treten in solchen Gebäuden zeitweise Raumtemperaturen von über 26 °C ein.**
4. **Um den erhöhten Wärmeeintrag des Kunstlichts zu kompensieren, ist die Installation einer Lüftungsanlage erforderlich. Bei reduzierten Luxmengen (z. B. max. 150 Lux am Objekt) kann die Lichtleistung auch in höheren Räumen auf bis zu 10 W/m^2 beschränkt werden. In schwerer Bausubstanz genügt bei derart reduzierten Anschlussleistungen eine Abluftanlage geringer Leistung (ca. 1 V/h). Durch intelligente Steuerung und Nachtlüftung wird die Temperaturobergrenze bei mäßigem Besucheraufkommen kaum noch überschritten.**
5. **Zweischalige Lichtdächer mit außenliegenden Wärmeschutzgläsern ohne Außenbeschattung bewirken einen höheren Temperaturanstieg im Dachraum als altes einfaches, getöntes Drahtglas.**

In der Folge sind die wichtigsten Erkenntnisse des Projektes thematisch gewichtet aber in loser Reihenfolge im Detail aufgelistet.

6.1 Beschattungsmaßnahmen

- Außenbeschattung ist allen anderen Beschattungsvarianten überlegen.
- Textile, dicht gewebte Rollos aus Baumwolle oder Leinen sind als sehr effizienter Lichtschutz anzusehen. Dabei sind die Dichte der Webe und die Masse des Fadens wichtiger als das Reflexionsvermögen bzw. die Beschichtung eines Materials.

– Metallbedampfte transparente Lichtschutzfolien erweisen sich im Kastenfenster als nicht so wirksam wie textile Rollos, haben aber den Vorteil der Durchsichtigkeit.
– Die Kombination von nichtreflektierendem Rollo und im Fensterkasten raumseitig montiertem reflektierenden Lichtschutz führt zu einer geringeren Erwärmung der Innenscheibe als die Kombination zweier reflektierender Materialien.
– Dreilagiger Lichtschutz mit Fensterkastenbelüftung erweist sich als sehr effektiv; dieses Ergebnis ist durch innenliegende Isolierverglasung noch zu steigern.
– Lochbleche, Streckmetallbleche oder feinmaschige Drahtnetze sind eine günstige Beschattungsvariante vor dem Fenster bzw. im Fensterzwischenraum.
– Auf die äußere Glashaut aufgebrachte Punktraster sind eine effektive Vorbeschattung für Lichtdächer.
– Aluminum- bzw. silberbedampfte Polyesterfolien bewirken im Raum einen düsteren, psychisch eher unangenehmen Eindruck.

***6.2** Wärmeschutzmaßnahmen*

– Isolierverglasungen sollten immer an den Innenscheiben eines Kastenfensters angebracht werden. Bei innenliegender Isolierverglasung kann in Verbindung mit Sonnenschutzmaßnahmen die durch direkte Sonneneinstrahlung verursachte Maximaltemperatur im Fensterkasten höher sein als bei außen angebrachten Isoliergläsern; die Innenscheibentemperatur ist aber immer tiefer als ohne Isolierverglasung. Die Außenscheibe soll einen möglichst hohen Wärmedurchgang, bzw. einen möglichst niedrigen U-Wert aufweisen.
– Am Innenflügel angebrachte Vorsatzflügel („3. Scheibe“) senken den U-Wert des Kastenfensters um etwa 28%.
– Die Belüftung des Fensterkastens führt zu einer ähnlichen Absenkung der Innenscheiben-Temperatur wie eine innenliegende Isolierverglasung. Noch günstiger ist es, beide Maßnahmen zu kombinieren.
– Metallbedampfte Polyesterfolien führen zu einer ähnlichen Absenkung der Innenscheiben-Temperatur wie eine innenliegende Isolierverglasung.
– Bei sonnenexponierten Fenstern sind stark getönte Sonnenschutzgläser günstiger am Außenflügel zu befestigen.

6.3 Kühlung und Lüftung

– Das Hochfahren von Lichtschutzeinrichtungen während der Nachtstunden ist zur Erhöhung des Wärmeabflusses nur dann zielführend, wenn keine Isolierverglasung vorliegt und der Fensterkasten belüftet ist.
– Die nächtliche Wärmeabstrahlung über die Fenster ist nur bedingt möglich. Eine effektive Kühlung ist nur über Zwangsbelüftung sinnvoll.
– Ein Öffnen der Innenflügel zur nächtlichen Wärmeabfuhr ist nur dann sinnvoll, wenn die zugehörigen Fenster in diesem Zeitraum nicht direkter Sonnenbestrahlung ausgesetzt sind und alle Beschattungsmaßnahmen hochgezogen sind.
– Im Mauerwerk gespeicherte Wärme kann durch luftdurchströmte Schächte weggekühlt werden kann. Die Schächte müssen gemauert und im Mauerwerk des Bauwerks integriert sein (keine Blechkanäle).

6.4 Raum- und Objektbeleuchtung

– Bei direkt sonnenbeschienenen, im Obergeschoß gelegenen Ausstellungsräumen bewirkt der Verzicht auf Tageslicht und dessen Kompensation durch künstliche Beleuchtung bei den im heutigen Ausstellungswesen üblichen Beleuchtungsstärken eine höhere thermische Belastung

durch elektrische Energie, als durch Sonnenschutzeinrichtungen von den Ausstellungsräumen ferngehalten werden kann.
- Das völlige Abdunkeln der Fenster und der Einsatz von Raum- und Objektbeleuchtung führt im Regelfall zu einem Anstieg der Raumtemperatur, was zur Kompensation den Einsatz von technisch gestützter Lüftung erfordert.
- Klimatisch relevant ist bei Raum- und Objektbeleuchtung neben der Beleuchtungsstärke vor allem die von den Leuchtmitteln beanspruchte Leistungsaufnahme. Diese wird unmittelbar als Wärmelast dem Raumklima zugeführt.
- Wärmeemittierende Leuchtmittel und Transformatoren für Niedervoltleuchten sollen nicht an Massivbauteilen befestigt, sondern nach Möglichkeit frei abgehängt werden. Die im Bauteil gespeicherte Wärme kann nur mehr aufwendig konvektiv weggekühlt werden.
- Wird eine installierte Leistung von ca. 9 Watt/m^2 Ausstellungsfläche überschritten, ist mit einem signifikanten Anstieg der Raumtemperaturen zu rechnen.

6.5 Lichtdächer

- Bei Verzicht auf jeglichen Lichtschutz (was bei normal genutzten, sonnenexponierten Räumen im Sommer wohl unmöglich ist), erwärmt sich die *Innenscheibe* eines Lichtdaches mit außenliegender Isolierverglasung etwas weniger. Der *Gesamtstrahlungseintrag* und damit die Wärmebelastung der Räume ist jedoch insgesamt höher.[25]
- Bei Außenbeschattung und Verzicht auf weiteren Lichtschutz im Dachraum bleibt das Fenster bei außenliegender Isolierverglasung etwas kühler als bei innenliegender Isolierverglasung.
- Bei ausschließlich im Dachraum montierten Lichtschutzmaßnahmen muß die Isolierverglasung an der inneren Dachhaut montiert werden, um den Wärmeeintrag in den Raum möglichst gering zu halten.
- Bei Außenbeschattung und temporärer Zusatzbeschattung im Dachraum muß die Isolierverglasung an der Innenscheibe montiert werden, um den Wärmeeintrag in den Raum möglichst gering zu halten.
- In der vorliegenden Testreihe zur Simulation von Glasdächern wurden mit vor dem Fenster angebrachten Lochblechen, im Fensterkasten/Dachraum montiertem Rollo sowie innenliegender Isolierverglasung sehr gute Ergebnisse erzielt.
- Bei Verzicht auf weiteren Lichtschutz erwärmt sich ein Fenster mit außenliegender, stark getönter Sonnenschutzverglasung etwas weniger als mit innenliegender Sonnenschutzverglasung.
- Außenliegende Sonnenschutzverglasung mit Nachbeschattung im Fensterkasten/Dachraum führt zu einer signifikanten Absenkung der Temperatur im Fensterzwischenraum/Dachraum.
- Auf die äußere Glashaut aufgebrachte Raster zur Verringerung der Einstrahlungsfläche sind ebenfalls eine zielführende Beschattungsvariante. Die Gesamtstrahlung sollte bei direkter Sonneneinstrahlung um mindestens 50% reduziert werden.
- Sonnenschutzgläser allein erfordern im Museumsbereich eine möglichst nahe hinter der Außenhaut angebrachte Nachbeschattung sowie konvektive Kühlung im Fensterzwischenraum/Dachraum. Diese ist aber nicht so effektiv wie eine Außenbeschattung.
- Außenliegende Isolierverglasung ist nur dann zielführend, wenn gleichzeitig eine Außenbeschattung montiert wird.
- Bei der Verwendung von im Dachraum angebrachten Beschattungseinrichtungen ohne konvektive Lüftung, führen an der Außenhaut angebrachte Isoliergläser zu einem Anstieg der Strahlungstemperatur im Dachraum und an den Innenscheiben.

25 In einem Kastenfenster mit mittig angebrachtem Sonnenschutz werden 12% der von außen auftreffenden Sonnenstrahlung als Heizleistung wirksam; bei einem einflügeligen Rahmenfenster mit innenliegendem Sonnenschutz mit 27% mehr als doppelt soviel. Dies nicht zuletzt deshalb, weil die vom Sonnenschutz reflektierte Strahlung zu einem Gutteil von der Innenscheibe wieder reflektiert bzw. absorbiert und damit dem Raumklima zugeführt wird. Siehe dazu: Klaus KREC, Erich PANZHAUSER, *Fenster – Außenwände – Lüftung.* In: Neue Wege der Klimatisierung im Altbau. (Hsg. Linzer Planungsinstitut, Stadtmuseum Nordico), Linzer Werkstattgespräche Bd. 3, 3. Auflage, Linz 1992, 54 – 75.

– *Zur Schadensminimierung* bereits verlegter außenliegender Isolierverglasungen ist die Nachrüstung einer Außenbeschattung, etwa in Form von engmaschigen Drahtnetzen, Streckmetall- oder Lochblech o. ä. zielführend. Auch kann eine semitransparente Beschichtung an der Außenseite der Gläser (dies entspricht dem früheren Kalken der Glashäuser) oder das Aufbringen einer Folie mit opakem Rasteraufdruck empfohlen werden.
– Eine in Konvektionsabstand hinter der Außenhaut angebrachte Nachbeschattung führt zu einer weiteren Temperaturabsenkung im Dachraum, vor allem, wenn dieser gleichzeitig konvektiv belüftet wird und der Luftstrom diese Nachbeschattung überstreicht.
– Durch das Aufkleben einer infrarotsperrenden Folie an der zweiten, raumseitig gelegenen Glashaut, kann der Temperatureintrag aus dem Dachraum in die darunterbefindlichen Räume abgesenkt werden.

Literaturauswahl

BURMESTER Andreas, Der moderne Museumsbau: Konzept des Überlebens oder überlebtes Konzept. In: museum heute 13 (1997), S. 19 – 29.

BURMESTER Andreas, *„Da derselbe Saal bey nur 200 schön erleuchtet ist“*. Zur Lichtsituation in der Alten Pinakothek. In: Jahresbericht der Bayerischen Staatsgemäldesammlungen, München 1989/90, S. 64 – 69.

CASSAR May / CLARKE William O., A Pragmatic Approach to Enviromental Improvements in the Courtould Galleries in Somerset House. In: ICOM (ed.), Paris 1993, S. 595 ff.

EIPPER Paul Bernhard, UV-Schutz für Fenstergläser und Beleuchtungskörper. In: Arbeitsblätter für Restauratoren 1/98 (hrsgg. Von der Arbeitsgemeinschaft für Restauratoren), Mainz 1998, Gruppe 21, S. 55 – 63.

FERLMANN Dirk, Lichtschutz in Ausstellungen. Diplomarbeit an der FH Köln 1996.

HILBERT Günter S., Sammlungsgut in Sicherheit. (Teil 2 Lichtschutz und Klimatisierung), Berlin 1987, 2. Auflage Berlin 1996.

HILBERT Günter S., Zur Beleuchtung musealer Objekte. In: Restauro (5/1991), München 1995, S. 313 – 321

HUBER Alfons, Konservatorische Erfahrungen bei der Generalsanierung der Sammlung alter Musikinstrumente. In: Restauratorenblätter Bd. 15, Schutz und Pflege von Kunst- und Baudenkmälern, (hsgg. von der Österr. Sektion des IIC). Wien 1995, S. 97 – 116.

KOLLER Manfred. Museumsbaustelle Wien. In: Restauro (3/1995), München 1995, S. 164 – 169.

KREC Klaus, PANZHAUSER Erich, Fenster – Außenwände – Lüftung. In: Neue Wege der Klimatisierung im Altbau. Linzer Werkstadtgespräche Bd. 5 (Hg. Stadtmuseum Nordico, Linzer Planungswerkstatt), Linz 1992, S. 54 – 75.

KÜHN Hermann, Optimale Umweltbedingungen zur Erhaltung von Kulturgut. In: Konservieren – Restaurieren, Mitteilungen des Österreichischen Restauratorenverbandes, Wien 1988, S. 19 – 31.

OGNIBENI Günter, Ausstellungen in Museum und anderswo. München 1988.

SAUNDERS David, The Environment and Lighting in the Sainsbury Wing of the National Gallery. In: ICOM (Ed.), Paris 1993, S. 630 ff.

THOMSON Garry, The Museum Environment. 2. Aufl. London 1994.

TRUMMER Manfred, Generalsanierung des Österreichischen Museums für angewandte Kunst: Die Klimaregulierung. In: Restauratorenblätter Bd. 15, Schutz und Pflege von Kunst- und Baudenkmälern, (hsgg. von der Österr. Sektion des IIC). Wien 1995, S. 117 – 122.