Fraunhofer
IBP

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR BAUPHYSIK IBP

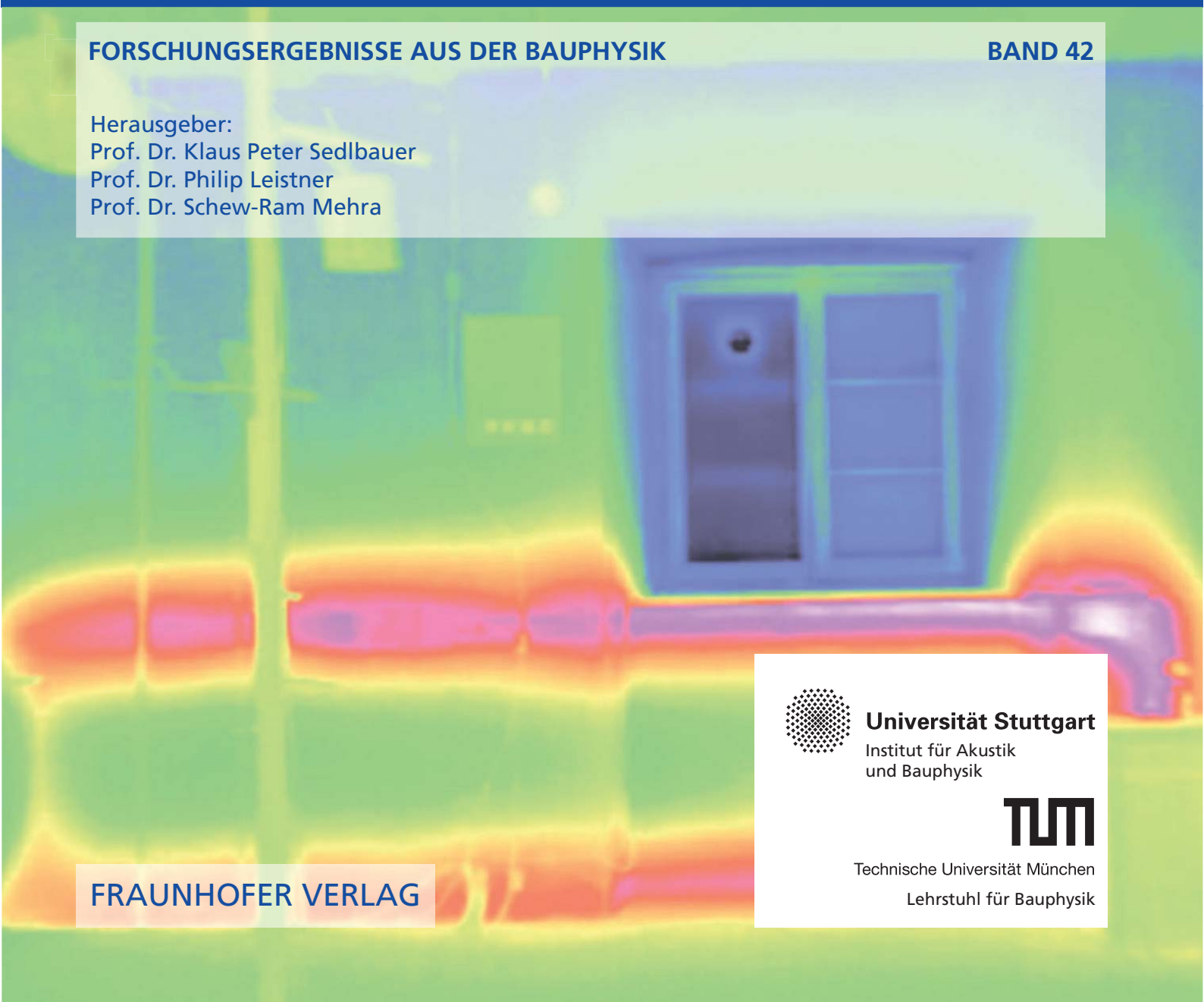
Stefan Bichlmair

Die Temperierung und die Erhaltung von Gebäuden in traditioneller Bauweise – Wirkung auf Raumklima und Baukonstruktion

Entwicklung eines Modells zur Beschreibung der Wärmeabgabe der Temperierung im realen Betrieb und Ableitung einer vereinfachten Bemessungsmethode

FORSCHUNGSERGEBNISSE AUS DER BAUPHYSIK BAND 42

Herausgeber:
Prof. Dr. Klaus Peter Sedlbauer
Prof. Dr. Philip Leistner
Prof. Dr. Schew-Ram Mehra



Universität Stuttgart
Institut für Akustik
und Bauphysik

Technische Universität München
Lehrstuhl für Bauphysik

FRAUNHOFER VERLAG

Fraunhofer IBP

Universität Stuttgart
Institut für Akustik und Bauphysik

Technische Universität München

FORSCHUNGSERGEBNISSE AUS DER BAUPHYSIK BAND 42

Herausgeber: Prof. Dr. Klaus Peter Sedlbauer
Prof. Dr. Philip Leistner
Prof. Dr. Schew-Ram Mehra

Stefan Bichlmair

Die Temperierung und die Erhaltung von Gebäuden in traditioneller Bauweise – Wirkung auf Raumklima und Baukonstruktion

Entwicklung eines Modells zur Beschreibung der Wärmeabgabe der Temperierung im realen Betrieb und Ableitung einer vereinfachten Bemessungsmethode

FRAUNHOFER VERLAG

Kontaktadresse:
Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP
Nobelstraße 12
70569 Stuttgart
Telefon 0711 970-00
E-Mail info@ibp.fraunhofer.de
URL www.ibp.fraunhofer.de

Titelbild: © Stefan Bichlmair

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.de abrufbar.

ISSN: 1869-5124
ISBN: 978-3-8396-1668-0

D 91

Zugl.: München, TU, Diss., 2020

Druck und Weiterverarbeitung:
Fraunhofer Verlag, Mediendienstleistungen

Für den Druck des Buches wurde chlor- und säurefreies Papier verwendet.

© Fraunhofer Verlag, 2021
Nobelstraße 12
70569 Stuttgart
verlag@fraunhofer.de
www.verlag.fraunhofer.de

als rechtlich nicht selbständige Einheit der

Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung
der angewandten Forschung e.V.
Hansastraße 27 c
80686 München
www.fraunhofer.de

Alle Rechte vorbehalten

Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen.
Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürften.
Soweit in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z.B. DIN, VDI) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden ist, kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen.

Technische Universität München
Ingenieurfakultät Bau Geo Umwelt
Lehrstuhl für Bauphysik

Die Temperierung und die Erhaltung von Gebäuden in traditioneller Bauweise – Wirkung auf Raumklima und Baukonstruktion

Entwicklung eines Modells zur Beschreibung der Wärmeabgabe der Temperierung im realen Betrieb und Ableitung einer vereinfachten Bemessungsmethode

Dipl.-Ing. (FH) Stefan Bichlmair, M.Eng.

Vollständiger Abdruck der von der Ingenieurfakultät Bau Geo Umwelt der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender:	Prof. Dr.sc. Andreas W. Putz
Prüfer der Dissertation:	1. Prof. Dr.-Ing. Klaus Peter Sedlbauer
	2. Prof. Dr.-Ing. Harald Garrecht
	3. Hon.-Prof. Dr.-Ing. Martin Krus

Die Dissertation wurde am 12.02.2020 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Ingenieurfakultät Bau Geo Umwelt am 15.04.2020 angenommen.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand überwiegend während meiner Tätigkeit am Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP in Holzkirchen. Danken möchte ich Professor Klaus Sedlbauer, der die Arbeit betreute und Professor Martin Krus, der mich als Mentor unterstütze sowie Professor Harald Garrecht für die Übernahme des Koreferats. Ich danke allen Mitarbeitern und Kollegen für Ihre Diskussionsbereitschaft und Hilfe.

Diese Dissertation begann mit dem von Dr. Ralf Kilian initiierten und von der VW-Stiftung geförderten interdisziplinären Forschungsprojekt „Sammlungen Erhalten: Die Temperierung als Mittel der Präventiven Konservierung in Museen“ in enger Kooperation mit dem Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP Holzkirchen, der Technischen Universität München mit dem Lehrstuhl für Restaurierung, dem Bayerischen Landesamt für Denkmalpflege mit der Landesstelle für die nichtstaatlichen Museen in Bayern, und der Universität Stuttgart. Die intensive Zusammenarbeit während des Projektes mit allen Beteiligten und auch mit ehemaligen Mitarbeitern der Landesstelle für die nichtstaatlichen Museen in Bayern ermöglichte mir ein tiefes Verständnis zur Temperierung und ihrer Bedeutung für den Erhalt von historischen Gebäuden und Kulturgut.

Die internationale Auftaktveranstaltung „Temperierung - Zum aktuellen Forschungsstand“ in Benediktbeuern November 2012 führte den aktuellen Forschungsstand zusammen. Die Untersuchungen zu den einzelnen Fallstudien in dem Forschungsprojekt wurden in einzelnen Unterberichten zusammengefasst und sind, soweit für diese Arbeit erforderlich, angepasst in Teilen wiedergegeben. Die Abschlussveranstaltung „Die Temperierung. Ergebnisse des Forschungsprojektes“ im November 2015 war ein großer Meilenstein, aber dennoch erst ein Zwischenschritt.

Es folgte eine intensive Zeit der Aufarbeitung der gesammelten Daten und weitere Forschungsarbeit im Labor und in weiteren Feldstudien in Liegenschaften der Bayerischen Schlösserverwaltung (BSV), in Kirchen und Klöstern. Allen Beteiligten danke ich für Ihre Bereitschaft, diese Arbeit zu unterstützen. Danken möchte ich hier allen Studenten sowie den Gastwissenschaftlern aus Taiwan und Tschechien, die mir bei Experimenten zur PIV-Messung, Datenauswertung, Mitarbeit bei den Feldstudien und rechnerischen Untersuchungen eine Hilfe waren.

Meiner Ehefrau und meiner Familie danke ich besonders.

Inhalt

Abkürzungen und Nomenklatur **IV**

Kurzfassung **VII**

Abstract **VIII**

1 Einleitung **1**

1.1 Einführung 1

1.2 Ziel der Arbeit 2

2 Stand des Wissens **3**

2.1 Grundlagen zur Temperierung 3

2.1.1 Entwicklung der Temperierung 3

2.1.2 Begriffe Heizung und Temperierung 4

2.1.3 Zugesprochene Wirkungen der Bauteiltemperierung und abgeleitete Fragestellungen 5

2.1.4 Raumklima durch Bauteiltemperierung 6

2.1.5 Wärmeabgabe der Heizleitung über das Bauteil 8

2.1.6 Wirkung der Auftriebsströmung 10

2.1.7 Bestehende Regelungsempfehlungen 13

2.2 Bisherige Feldstudien und Messungen zur Temperierung 14

2.2.1 Feldstudien mit vergleichenden Messungen zum Energieverbrauch 14

2.2.2 Hygrothermische Untersuchungen 16

2.2.3 Feldstudien zu Raumklima und konservatorischer Wirkung 18

2.3 Bisherige Bemessung von Temperieranlagen 19

2.3.1 Bisherige Bemessung der unter Putz verlegten Temperierung (Bauteiltemperierung) 19

2.3.2 Wärmeleistung eines luftumspülten Heizrohres 22

3 Methodische Vorgehensweise und Ablauf der Untersuchungen **26**

3.1 Methodische Vorgehensweise 26

3.2 Ablauf der Untersuchungen 27

4 Durchführung der Untersuchungen und Darstellung der Ergebnisse **30**

4.1 Gebäude mit Temperiersystemen und Messaufbauten 31

4.1.1 Auswahl der Gebäude 31
4.1.2 Typologie der vorgefundenen Temperieranlagen 32
4.1.3 Vorüberlegungen mit Simulationsrechnung und Folgerung für das Messkonzept 37
4.1.4 Messkonzept Feldstudien 38
4.1.5 Einsatz von Sensorik und Messdatenerfassung für Messung in Gebäuden traditioneller Bauweise 44
4.2 Messung der Wärmeabgabe der Temperierung in situ 46
4.2.1 Aus Messdaten berechnete Werte 47
4.2.2 Feldstudien mit globaler Abschätzung der Wärmeabgabe 49
4.2.3 Feldstudien mit Messung der Wärmeabgabe einzelner Leitungsabschnitte (Heizschleifen) 50
4.2.4 Messung der Wärmeabgabe in der Alten Schäfflerei in Benediktbeuern - Einzelmessungen 51
4.3 Messung der Energieeffizienz (Vergleichsmessung) der Bauteiltemperierung 60
4.3.1 Nachweis erhöhter Wärmeabgabe über Oberflächentemperaturen außen 60
4.3.2 Vergleichsmessung im Fraunhofer-Zentrum in der Alten Schäfflerei 65
4.4 Wärmeübergang und konvektive Wirkung – wandnahe Strömungsmessung 66
4.4.1 Particle Image Velocimetry (PIV) 67
4.4.2 Temperaturfeldberechnung 71
4.4.3 Berechnung der konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten 73
4.4.4 Wärmeübergangskoeffizient der Bauteiltemperierung für die rechnerische Bauteiluntersuchung 75
4.4.5 Fazit zur wandnahen Strömungsmessung 77
4.5 Thermische und hygrothermische Berechnung der Wärmeabgabe bei unter Putz verlegter Heizleitungen (Bauteiltemperierung) 77
4.5.1 Verwendete Software und Algorithmen 77
4.5.2 Stationäre Wärmestromanalyse mit 2D Simulation 78
4.5.3 Parameterstudie mit 2D Simulation 83
4.5.4 Vergleich der Berechnung der Wärmeabgabe mit WUFI® 2D und Berechnung nach Elgeti 112
4.6 Instationärer Betrieb und Regelverhalten der Bauteiltemperierung 114
4.7 Modellentwicklung und Anpassung der Berechnung der unter Putz verlegten Temperierung (Bauteiltemperierung) 120
4.7.1 Vergleich der Wärmeabgabe aus der Messung mit den Ergebnissen der Parameterstudie 121
4.7.2 Wärmeübertragung der Bauteiltemperierung: Vom Heizwasser an die Wand 123

4.7.3 Vergleich der Wärmeabgabe der Messung und Berechnung der Außenwand im Messraum mit angepassten Parametern 129

4.7.4 Nachweis eines niedrigen Kontaktkoeffizienten anhand der Temperaturdifferenz zwischen Heizrohr und Innenoberfläche 136

4.7.5 Überprüfung der Simulation an weiteren Temperieranlagen 140

4.7.6 Rechnerische und messtechnische Ermittlung der Energieeffizienz der Bauteiltemperierung im Messraum 142

4.8 Energieeffizienz unterschiedlicher Temperieranlagen und Optimierungspotential 147

4.9 Messung und Berechnung der auf Putz verlegten Temperierung - Fallbeispiele 149

4.9.1 Temperierung ohne Kontakt zur Wand (luftumspültes Heizrohr) 149

4.9.2 Heizrohr mit Kontakt zur Wand 150

4.10 Raumklima mit Temperierung 152

4.10.1 Raumklima bei Gebäuden mit Temperierung 152

4.10.2 Auswirkungen der Temperierung auf das lokale Mikroklima 152

5 Verfahren zur Planung und Auslegung einer Temperier-Anlage 160

5.1 Bemessung der Temperierung 160

5.1.1 Simulationsrechnung mit 2D Software 160

5.1.2 Berechnung mit Formeln nach Elgeti 160

5.2 Entwicklung einer neuen Methode zur vereinfachten Berechnung der Wärmeabgabe der Bauteiltemperierung 161

5.2.1 Vereinfachte Berechnung der Gesamtwärmeabgabe 162

5.2.2 Vereinfachte Berechnung der Wärmeabgabe nach innen und des Wärmeabgabeverhältnisses f_{WH} 166

6 Bewertung der Ergebnisse 170

7 Zusammenfassung 181

8 Ausblick 183

Literaturverzeichnis 185

Anhang A Feldstudien mit Messung der Wärmeabgabe der Temperierung 194

Anhang B Raumklima mit Temperierung 208

Lebenslauf 215

Abkürzungen und Nomenklatur

BSV	Bayerische Verwaltung der staatlichen Schlösser, Gärten und Seen
HL	Heizleitung (Heizrohr, Temperierung)
HL1	Sockelschleife (Temperierung)
HL2	Brüstungsschleife (Temperierung)
HL3	große Schleife (Temperierung)
HK	Heizkörper
IR	Infrarot (Thermographie)
MSR	Mess-, Steuer- und Regel(-Technik)
PIV	Particle Image Velocimetry
rF	relative Feuchte
Sim	Simulation
WS	Wärmestrom
WUFI®	Wärme Und Feuchte Instationär, hygrothermische Simulationssoftware, Fraunhofer-Institut für Bauphysik
1d gl MW	gleitender Tagesmittelwert
30d gl MW	gleitender 30-Tage Mittelwert

Lateinische Zeichen

a	[m]	Abstand
a	[m²/s]	Temperaturleitfähigkeit
A	[m²]	Fläche, Flächenelement
B	[-]	Hilfsgröße für Berechnung nach Elgeti
C	[-]	Hilfsgröße für Berechnung nach Elgeti
c	[J/(kg*K)]	Wärmekapazität
d	[m]	Durchmesser
E	[W/m²]	Bestrahlungsstärke aus Strahlungsfluss
f_{WH}	[%]	Wärmeabgabeverhältnis Temperierung
$1 + f_{WH}$	[%]	Wärmeabgabefaktor Temperierung
f_{Wand}	[%]	Wärmeverlustverhältnis
h_i	[W/m²K]	Wärmeübergangskoeffizient Wand innen
h_e	[W/m²K]	Wärmeübergangskoeffizient Wand außen
h_c	[W/m²K]	konvektiver Wärmeübergangskoeffizient Wand
h_r	[W/m²K]	Strahlungs-Wärmeübergangskoeffizient Wand

K	[-]	Hilfsgröße für Berechnung nach Elgeti
l	[m]	Leitungslänge Temperierschleife
l^*	[m]	Stelle in der Temperierschleife
n	[-]	Exponent der mittleren Heizmittelübertemperatur; Anzahl
m	[kg]	Masse Bauteil (Außenwand)
q_{WH}	[W/mK]	Spezifische Leistung der Temperierung
q_W	[W/m²]	Wärmestromdichte Wand
$\dot{Q}$	[W]	Wärmestrom
$\dot{Q}_{WH,l}$	[W]	Gesamtwärmestrom Temperierschleife mit Leitungslänge l
$\dot{Q}_{WH}$	[W/m]	Wärmestrom pro Meter Heizleitung
$\dot{Q}^*_{WH}$	[W/m]	Wärmestrom pro Meter Heizleitung, aus Simulation direkt am Rohr ermittelt
$\dot{Q}_{se,Wand}$	[W/m]	Wärmestrom Außenoberfläche Wand ohne Temperierung
$\dot{Q}_{si,Wand}$	[W/m]	Wärmestrom Innenoberfläche Wand ohne Temperierung
$\dot{Q}_{se,WH}$	[W/m]	Wärmestrom Außenoberfläche Wand mit Temperierung
$\dot{Q}_{si,WH}$	[W/m]	Wärmestrom Innenoberfläche Wand mit Temperierung
$\dot{Q}_{si,WH,i\rightarrow W}$	[W/m]	negativer Wärmestrom-Anteil Innenoberfläche Wand mit Temperierung
$\dot{Q}_{si,WH,W\rightarrow i}$	[W/m]	positiver Wärmestrom-Anteil Innenoberfläche Wand mit Temperierung
$\dot{Q}_{i,WH,W}$	[W/m]	Wärmestrom-Anteil der Temperierung nach innen
$\dot{Q}_{e,WH}$	[W/m]	Wärmestrom der Temperierung nach außen
$\dot{Q}_{i,WH}$	[W/m]	Wärmestrom der Temperierung nach innen
R	[m²K/W]	Wärmedurchlasswiderstand
s	[m]	Dicke Bauteil, Schichtdicke, Putzüberdeckung
T_e	[°C]	Temperatur außen (Außenluft)
T_i	[°C]	Temperatur innen (Raumluft in Raummitte)
T_m	[°C]	Temperatur Heizmittel (Heizwasser)
T_S	[°C]	Temperatur Oberfläche
T_R	[°C]	Temperatur Rücklauf Heizmittel
T_V	[°C]	Temperatur Vorlauf Heizmittel
T_∞	[°C]	Temperatur Fluid
U	[W/m²K]	Wärmedurchgangskoeffizient
$\dot{v}$	[l/min]	Volumenstrom (Durchfluss) Heizmittel
v	[m/s]	Geschwindigkeit

Griechische Zeichen

α	[W/m²K]	Wärmeübergangskoeffizient allgemein
α_{HL}	[W/m²K]	Gesamter Wärmeübergangskoeffizient Heizmittel - Mauerwerk
α_i	[W/m²K]	Wärmeübergangskoeffizient Heizmittel - Heizrohr
α_K	[W/m²K]	Kontaktkoeffizient zwischen Heizrohr und Mauerwerk
ρ	[kg/m³]	Dichte
ε	[-]	Emissionskoeffizient
ΔT_E	[K]	Wirksame Temperaturdifferenz für Berechnung nach Elgeti
ΔT	[K]	arithmetische mittlere Heizmittelübertemperatur
$\Delta\bar{\theta}$	[K]	Differenz der mittleren Bauteiltemperatur
$\Delta\theta$	[K]	Differenz Innenraumtemperatur zu Außenlufttemperatur
φ	[%]	Relative Luftfeuchte
λ	[W/mK]	Wärmeleitfähigkeit
σ	[K]	Temperaturdifferenz bzw. Spreizung Heizleitung
Θ	[K]	Temperaturdifferenz zwischen Wand und Fluid

Indizes:

app.	approximiere Funktion
c	konvektiv
e	außen (exterior)
i	innen
i-> w	vom Raum zur Wand
Mess.	Messung
r	radiativ
R	Rücklauf (Heizleitung)
S	Oberfläche
V	Vorlauf (Heizleitung)
W	Wand
Wand	Wand ohne Temperierung
WH	Wand mit Temperierung (Wandheizung)
w -> i	von der Wand zum Raum
∞	Fluid

Kurzfassung

Die vorliegende interdisziplinäre Untersuchung orientiert sich an historischen, meist denkmalgeschützten Gebäuden, die in traditioneller Bauweise erstellt wurden, da die Temperierung hauptsächlich in alten Gebäuden zur Anwendung kommt. Als Einbau von einfachen Heizrohren unter Putz oder auf Wandoberfläche ist die Temperierung eine technisch einfache Heiztechnik. Die Wirkungen, die von der Temperierung ausgehen sind komplex. Da in der Hautpanwendung als unter Putz verlegte Bauteiltemperierung immer die Außenwand mit betrachtet werden muss, sind die in der Wand ablaufenden bauphysikalischen Effekte zu berücksichtigen. Häufig wird die Temperierung in museal genutzten Gebäuden eingebaut. Dies macht eine Auseinandersetzung mit den konservatorischen Anforderungen des Museumsbetriebes erforderlich.

Trotz zahlreicher Untersuchungen sind die Wirkungen der Temperierung nur teilweise geklärt. Ziel der Arbeit ist daher die wissenschaftlich nachvollziehbare Erforschung der Wirkungen der Temperierung. Der Schwerpunkt der Untersuchungen liegt dabei auf der Klärung der Wärmeabgabe der Bauteiltemperierung und der Entwicklung einer vereinfachten Berechnungsmethode. Hierfür werden umfangreiche Feldstudien sowie Labormessungen durchgeführt. In den Feldstudien wird neben den Leistungsmessungen hauptsächlich die globale Wirkung der Temperierung auf das resultierende Raumklima beobachtet.

Um die rechnerische Wärmeabgabe bisheriger Berechnungsmodelle zu überprüfen, werden unter laborähnlichen Bedingungen Leistungsmessungen für Vergleichszwecke durchgeführt. Weitere Messungen sind erforderlich, die die Wärmeübertragung von der Wand in den Raum klären. Hierfür kommen klassische sowie neuere Methoden, wie PIV-Messung, IR-Thermographie, Wärmestrom- und Temperaturmessung, zum Einsatz. Zu der Klärung des Wärmeübergangs von der Wand an die Raumluft und der wandnahen Auftriebsströmung, die von der Temperierung ausgeht, ergeben sich Erkenntnisse zur Raumklimaverteilung und Temperaturschichtung. Die Temperierung, auf Putz oder unter Putz verlegt, bewirkt eine geringe vertikale Temperaturschichtung, die aus konservatorischer Sicht und für die thermische Behaglichkeit Vorteile hat.

Die Bauteiltemperierung wird in den umfangreichen rechnerischen Untersuchungen einer Parameterstudie systematisch analysiert. Hierfür ist die Erarbeitung einer Auswertemethode erforderlich. Die rechnerische Wärmestromanalyse führt zur Entwicklung einer neuen Methode zur Bewertung der Wärmeabgabe und der Energieeffizienz. Aus dem Vergleich der messtechnisch und rechnerisch ermittelten Wärmeabgabe wurde ein bisher nicht berücksichtigter Parameter, der thermische Widerstand zwischen Heizrohr und Mauerwerk, identifiziert. Dadurch ist es möglich, rechnerisch die Wärmeabgabe realitätsnah zu ermitteln und daraus eine vereinfachte empirische Berechnungsmethode zu entwickeln.

Abstract

The interdisciplinary studies in this thesis are based on historical, mostly listed buildings, since the Temperierung heating system is mainly used in old buildings. With the installation of simple heating pipes under plaster or on the wall surface, Temperierung is a technically simple heating technology. The effects caused by Temperierung are complex. Since within the main application of Temperierung with heat pipes under plaster always the outside wall has to be considered, the physical effects of the wall must be taken into account. Frequently the Temperierung heating is installed in buildings used as museums. This makes it necessary to consider the conservational requirements of the museum environment.

Despite numerous studies, the physical effects of Temperierung are only partially understood. The aim of this work is the scientifically comprehensible investigation of the effects of Temperierung heating. The main focus of the investigations lies on the clarification of the heat emission of Temperierung and the development of a simplified calculation method. For this purpose, extensive field studies as well as laboratory measurements are carried out. In the field studies, besides the heating performance measurements, the global effect of Temperierung heating on the resulting indoor climate is mainly observed.

In order to check the calculated heat emission of existing calculation models, performance measurements are carried out under laboratory conditions for comparison purposes. Further measurements are required to clarify the heat transfer from the wall into the room. For this purpose, classical and newer methods such as PIV measurement, IR thermography, heat flux and temperature measurement are used. For the clarification of the heat transfer from the wall to the room air and the wall plumes deriving from Temperierung, findings on the room climate distribution and temperature stratification are obtained. The Temperierung causes a low vertical temperature stratification which has advantages from a conservation point of view and for thermal comfort.

The effects caused by the Temperierung are systematically analyzed in intense computational investigations of a parameter study. This requires the development of an evaluation method. The computational heat flow analysis leads to the development of a new method for the evaluation of the heat output and energy efficiency. With the comparison of the measured and calculated heat emission, a previously not considered parameter, the thermal resistance between heating pipe and masonry, was identified. This makes it possible to calculate the heat emission realistically and to develop a simplified empirical calculation method.

1 Einleitung

1.1 Einführung

Die Erhaltung von alten, meist historischen und zum Teil denkmalgeschützten Gebäuden, die mit den damaligen Bauweisen erstellt wurden, ist eine anspruchsvolle Aufgabe. Alte Gebäude entsprechen in der Regel nicht den heute gestellten bautechnischen und gesellschaftlichen Anforderungen für die Nutzung der Gebäude. Die geltenden Bauvorschriften spiegeln die bautechnischen Erfahrungen, aktuelle Materialien und heutigen Nutzungsansprüche wider. Zum Teil sind alte Konstruktionen und Materialien nicht dauerhaft genug und bedürfen weiterer Maßnahmen, um den Erhalt sicherzustellen. Zusätzlich zu der reinen Erhaltung der Gebäude werden vor allem bei Umnutzung höhere Anforderungen an das Raumklima gestellt, die wiederum eine höhere Belastung der Bausubstanz zur Folge haben können. Aus bauphysikalischer Sicht ergibt sich eine Diskrepanz zwischen heutigen Anforderungen und der Erhaltung alter Gebäude in ihrer ursprünglichen Konstruktion. Die Lösungsansätze und Konzepte hierzu sind vielfältig und reichen von einfachen Instandsetzungen bis hin zu umfänglichen Sanierungskonzepten mit entsprechend intensiven Eingriffen in die Gebäudekonstruktion sowie Einbau von umfangreicher Gebäudetechnik.

Die Temperierung wurde 1982 von der Landesstelle für die nichtstaatlichen Museen in Bayern beim Bayerischen Landesamt für Denkmalpflege in Zusammenarbeit mit Baubehörden erstmalig eingesetzt und in den folgenden Jahrzenten in öffentlichen Bauvorhaben weiterentwickelt und angewendet. Nach einer Etablierungsphase und Verbreitung bei Fachplanern und Handwerkern wird die Temperierung auch im nichtmusealen Bereich in überwiegend historischen, traditionell gebauten Gebäuden eingesetzt. Die als Temperierung bezeichnete Methode der Wärmebereitstellung ist ein einfacher heizungstechnischer Lösungsansatz zur Erhaltung von Gebäuden in traditioneller Bauweise. Der Eingriff in die Bausubstanz beschränkt sich in der Regel auf kleine Bereiche des Gebäudes. Die Temperierung wirkt dabei thermisch auf das Raumklima und je nach Einbauweise mehr oder weniger intensiv auch direkt auf die Baukonstruktion ein. Die Erwärmung des Gebäudes und der Bauteile wirkt sich über die physikalischen Gesetzmäßigkeiten auf die Raumluftfeuchte und Bauteilfeuchte aus.

Aus bauphysikalischer Sicht ist die Kontrolle der Bauteil- und Raumluftfeuchte für die Erhaltung des Gebäudes entscheidend. Wandmalereien, wertvolle Ausstattungen oder museale Nutzung des Gebäudes können zusätzliche konservatorische Anforderungen an das Raumklima stellen, die über eine reine Erhaltung des Gebäudes hinausgehen. Oftmals werden in diesen Gebäuden keine üblichen Temperaturen für Wohn- oder Arbeitszwecke angestrebt, sondern zur Energieeinsparung oder Klimastabilisierung geringere Temperaturen. Die Wirkung der Temperierungs-Heiztechnik auf die Baukonstruktion und das Raumklima tritt immer gekoppelt auf. Dabei geht es in der Regel um eine kombinierte Nutzung der Effekte der Temperierung mit unterschiedlichen Schwerpunkten in der Anwendung.

Weshalb gibt es diese als Temperierung bezeichnete Heiztechnik und warum wurde eine Einführung dieser Heiztechnik überhaupt erforderlich? Offensichtlich konnten und können mit den bestehenden Lösungen für Beheizung und Klimatisierung die gestellten Anforderungen nicht in dem gewünschten Maß erfüllt werden. Dies ist zum Teil damit begründet, dass im Vergleich zu den üblichen Fragestellungen im Neubau für historische Gebäude zusätzliche Randbedingungen und Fragestellungen hinzukommen:

- historische Gebäude mit ungünstigen bauphysikalischen Rahmenbedingungen
- denkmalgeschützte Gebäude mit Erhalt und Schonung der bestehenden Bausubstanz
- Feuchte- und Salzschäden
- Durchfeuchtung ohne wesentliche Versalzung (mangelhafte Abdichtung, Sommerkondensation)
- konservatorische Randbedingungen für Erhaltung der Bausubstanz (Taupunktunterschreitung, Sommerkondensation, Temperaturniveau)

Typische Fragestellungen für Museen, die auch im Neubau wichtige Kriterien sind, jedoch im Altbau anders beantwortet werden müssen:

- thermische Behaglichkeit der Besucher und Mitarbeiter
- konservatorische Randbedingungen für Sammlungen (geeignetes oder gewähltes Raumklima und Mikroklima)

Die zunehmende Etablierung der Methode der Temperierung als neue Heiztechnik führte zu ersten bauphysikalischen Untersuchungen und Bewertungen. Erhebliche Schwierigkeiten bereiten hier die mangelnde Vergleichbarkeit von pro und contra, von den Gebäuden untereinander und den jeweiligen gesetzten Randbedingungen der Vergleiche. Es fehlen vor allem fundierte wissenschaftliche Untersuchungen zur Wärmeübertragung und Wärmeabgabe der Temperierung. Ein uneinheitlicher Sprachgebrauch, unterschiedliche Bezeichnungen und uneinheitliche Gewichtung von Merkmalen erschweren den Dialog bei diesem interdisziplinären Thema zwischen den an der Temperierung Interessierten: Von museumsschaffenden Kunsthistoriker, Volkskundler oder Historiker zu laiengeführten Museen über Bedienstete der Städte und Gemeinden als Träger oder Geldgeber, bauschaffenden Handwerkern und Ingenieuren sowie Sachverständigen, Bauphysikern und Wissenschaftlern.

1.2 Ziel der Arbeit

Ziel der Arbeit ist die Erforschung der Wirkungsweise der als Temperierung bezeichneten Bauteil- und Raumheiztechnik auf die Baukonstruktion und das Raumklima. Aufbauend auf den Stand des Wissens soll die vorliegende Arbeit dafür fundierte Nachweise der Wirkungsweise der Temperierung zum hygrothermischen Bauteilverhalten, zur Wärmeabgabe und Energieeffizienz und Wirkung auf das Raumklima sowie eine Beschreibung und Kategorisierung der Temperierung liefern. Die Vielzahl der Parameter und Abhängigkeiten erfordert zum einen eine Fokussierung, zum anderen wurden hygrothermische Untersuchungen während dieser Arbeit veröffentlicht, die hier bei den Betrachtungen mit einbezogen werden. Der Schwerpunkt liegt dabei auf die korrekte rechnerische Abbildung und Bewertung der messtechnisch ermittelten Wärmeabgabe und Effizienz der Temperierung. Hierfür ist die Entwicklung von neuen Modellen bzw. Erweiterung bestehender Modelle zur Wärmeübertragung sowie die Entwicklung einer Methode zur Beurteilung der Wärmeabgabe und Effizienz erforderlich. Anhand der nachgewiesenen und quantifizierten Wirkungen soll eine vereinfachte Planungsmethode entwickelt werden, mit der die zu erwartende Wärmeabgabe für Heizlastberechnungen bestimmt werden kann und eine qualifizierte Einschätzung zur Auswirkungen der Temperierung auf Energiebedarf, Baukonstruktion und Raumklima möglich ist.

2 Stand des Wissens

2.1 Grundlagen zur Temperierung

Es werden die Angaben zu Wirkungen, Vor- und Nachteile aufgearbeitet und, soweit für diese Arbeit relevant, dargestellt. Teile der nachfolgenden Darstellung wurden bereits in [Bichlmair 2014, Bichlmair et al 2015] veröffentlicht.

2.1.1 Entwicklung der Temperierung

Der Ausgangspunkt für die Entwicklung der Technik der Temperierung in den 1980iger Jahren ergab sich aus den Beobachtungen und praktischen Erfahrungen in der Museumsberatung [Großeschmidt 1992]. Die typische Beheizung mit Heizkörpern oder Klimaanlagen führte in historischen Gebäuden zu konservatorischen ungenügenden Zuständen der Raumluft mit zum Beispiel zu trockener Raumluft oder Verschmutzung an Wänden und Kulturgut durch zu starke Luftzirkulation. Häufig traten auch denkmalpflegerisch Probleme hinsichtlich der Erhaltung der Bausubstanz bei Denkmalgeschützten Gebäuden auf, z.B. bei der Bereitstellung des Raumbedarfs für Einbau umfangreicher Klimatisierungstechnik oder Erstellen von Durchbrüchen für z.B. Lüftungsrohre.

Das als Hüllflächentemperierung oder Wand-Temperierschale bezeichnete System ist eine Wandschalen-Konstruktion. Die frühen Formen der Temperierung mit Wandschalen sind in [Assmann et al 1988] und auch in [Großeschmidt 1992] beschrieben. Die Wärmebereitstellung und -verteilung erfolgte zwischen den Außen- und Bodenflächen und einer zusätzlich eingebauten Wand- bzw. Bodenschale. Die von den Römern entwickelte Hypokaustenheizung mit Bodenbeheizung (Hypokausten) und Wandbeheizung (Tubuli) über Rauchgase [Schiebold 2010] wurde als Vorbild zu dieser Wandschalenkonstruktion angegeben und dient auch als Mitbegründung für die Sinnhaftigkeit dieser Beheizungsmethode [Großeschmidt 1992].

Denkmalpflegerisch und auch museumspädagogisch wird die Wandschalenkonstruktion jedoch nachteilig empfunden, da die originale Wandoberfläche darunter verschwindet. Die aufwändige Installation von Wand- und Bodenschale führte zudem zu hohen Einbaukosten. Daher wurde nach einer Vereinfachung des Systems gesucht. Dabei sollte das Prinzip der Wandschalen als Beheizung der Hüllflächen aufrechterhalten bleiben. Laut [Großeschmidt 1992] sind Temperieranlagen mit unter Putz verlegten Heizrohren der „Endpunkt der Entwicklung“ und damit die „Ideallösung für Massivbauten“, wenn ein Einbau unter Putz aus denkmalpflegerischer Sicht möglich ist.

Die Wirkung der Temperierung auf Raumklima und Baukonstruktion wird auch gezielt zur Erhaltung denkmalgeschützter Gebäude eingesetzt. Hierfür bezeichnet der Begriff Bauteiltemperierung am präzisesten diese Anwendungen [Künzel 2009].

Frühe Heizungslösung die dem heutigen Ansatz der Temperierung ähneln

Die Probleme der Erhaltung von Kulturgut im Zusammenhang mit der Beheizung werden bereits im frühen 20 Jahrhundert angeführt, z.B. bei [Stegemann 1914], der die Vor- und Nachteile einer Vorsatzwand vor einem Heizkörper mit Zu- und Abluftöffnungen am Boden bzw. Deckenbereich (als „Berliner System“ bezeichnet) diskutiert. Diese Vorsatzschalen-Konstruktion

könnte durchaus auch als Wandschalentemperierung bezeichnet werden. In der Zeitschrift „Zentralblatt der Bauverwaltung“ [Uber 1915] wird unter anderem die Heizungsanlage des Neubaus der Prüfanstalt für Heiz- und Lüftungsanlagen an der Technischen Hochschule in Berlin-Charlottenburg vorgestellt. Hier wurden neben der Verwendung von Dampfheizkörpern Heizleitungen unter Putz im direkten Mauerwerkskontakt verbaut [Uber 1915]: „Die Heizrohre wurden unmittelbar am Mauerwerk verlegt und mit Kacheln verkleidet. Die Anlage stellt also einen Kachelofen dar, der durch Dampfröhren geheizt wird. Wirtschaftlich wird eine solche Anlage allerdings kaum sein, da ein großer Teil der Dampfwärme durch die Mauer nach außen abgegeben wird, aber als Lehrmittel ist sie doch bemerkenswert zur Veranschaulichung einer Anlage, bei der es darauf ankommt, unschöne Dampfheizkörper zu verkleiden und eine milde Oberflächentemperatur bei nur senkrechten Heizflächen, die der Verstaubung nicht ausgesetzt sind, zu erzielen.“ Diese Anwendung entspricht der heutzutage bezeichneten Bauteiltemperierung.

Warum wurde diese Technik kontrovers diskutiert und nicht einfach als weitere Heiztechnik zu den etablierten Heiztechniken mit aufgenommen?

Die als positiv dargestellten Wirkungen, zum Beispiel als energieeffiziente Lösung [Großeschmidt 2004], werden in der Literatur oftmals kritisiert [Arendt & Hausladen 1992, Gronau 1996, Künzel et al 2007, Krus & Kilian 2012]. Ein Nachweis der Brauchbarkeit der Temperierung wird durch die Befürworter neben theoretischen Herleitungen durch positive persönliche Eindrücke als Beweis für die Temperierung angesehen. Zusätzlich werden Beispiele von Gebäuden dargestellt, bei denen konventionelle Techniken in der konservatorischen Wirkung und Energieeffizienz versagt haben. Die vereinfachten Begründungen von Vor- oder Nachteilen wurden in der Regel aus allgemeinen Prinzipien abgeleitet. Ein detaillierter Nachweis blieb bis jetzt aus.

2.1.2 Begriffe Heizung und Temperierung

Umgangssprachlich wird der Begriff *temperieren* oder *temperierte Räume/ Gebäude* verwendet, um Räume/ Gebäude, die auf ein niedrigeres Temperaturniveau beheizt sind als bei üblicher Wohn- oder Büronutzung, zu bezeichnen. Laut [Duden 2015] hat das Wort „temperieren“ unter anderem folgende Bedeutung: „auf eine mäßig warme, auf den Bedarf gut abgestimmte Temperatur bringen“, von lat. „temperare = sich mäßigen; in das gehörige Maß setzen, in das richtige (Mischungs-) Verhältnis bringen“. Der Begriff „temperieren“ findet auch in andern Bereichen wie Musik, Gusstechnik, Metallbearbeitung und Kunststofftechnik Verwendung.

Eine Temperieranlage ist eine wärmeabgebende Heizeinrichtung, die für unterschiedliche Betriebsweisen und Einsatzzwecke angewendet werden kann. In der Heiztechnik wird üblicherweise bei allen Systemen, die zur Wärmeabgabe vorgesehen sind, von Heizung, Heizsystemen oder Heizanlagen gesprochen, auch wenn andere Auslegungstemperaturen für Räume als die für die thermische Behaglichkeit üblichen Temperaturen (wie beispielweise Büronutzung) vorgesehen sind. Der Begriff Heizung, Heizanlage, Heizflächen oder Raumheizung wird hier auch für Temperieranlagen verwendet. Temperieranlagen werden für unterschiedliche Temperaturniveaus eingesetzt. In der Praxis findet man Temperieranlagen zur Frostfreihaltung von Gebäuden bis zu Temperaturen für thermische Behaglichkeit, auch bei musealer Nutzung, mit allen Abstufungen dazwischen. Bei [Löther et al 2007] werden die Begriffe zur thermischen Behaglichkeit in einer Tabelle mit „Heizen“ und Ziele des Bautenschutzes als „Temperieren“ unterschieden.

2.1.3 Zugesprochene Wirkungen der Bauteiltemperierung und abgeleitete Fragestellungen

Die maßgebliche Beschreibung der Temperierung findet sich in [Großeschmidt 1992, 1996, 2000, 2004], wobei die Inhalte dieser Publikationen immer den jeweiligen Stand darstellen. In diesen Veröffentlichungen erfolgt eine umfassende Beschreibung zur Weiterentwicklung und Verbreitung der „Temperierung nach Großeschmidt". Dort werden für die Temperierung „Effekte" und „sekundäre Effekte" genannt, welche die Wirkungen und Vorteile der Temperierung beschreiben, teilweise mit Vergleichen zu anderen Maßnahmen oder Heizsystemen. Die Anwendung vom Einbau bis zur Regelung und positive Wirkungen und Effekte in unterschiedlichen Zusammenhängen werden erläutert [Großeschmidt 2004]. Mögliche nachteilige Wirkungen oder Effekte und kritische Literatur werden nicht diskutiert. Nachfolgend werden die wesentlichen Wirkungen und Effekte nach [Großeschmidt 2004] genannt, hier in die drei Gruppen Gebäude, Raumklima, Einbau und Betrieb untergliedert. Folgend beschriebene Eigenschaften werden von [Großeschmidt 2004] der Temperierung zugeschrieben. Im Folgenden werden aus den postulierten Wirkungen auch Fragestellungen abgeleitet.

Wirkungen auf das Raumklima:

- Die Temperierung wirke „Kurzzeitstabil". Es entsteht ein günstiges Raumklima im Sinne der präventiven Konservierung von Sammlungen mit geringen Feuchte- und Temperaturschwankungen.
- Es entstünden „Homogene" gleichmäßig räumlich verteilte Raumluftzustände. Ungünstige Mikroklimata würden dadurch vermieden.
- Die Temperierung wäre auch anwendbar in Großräumen (hohe Räume) und bewirke dort ein positives Raumklima im Sinne der präventiven Konservierung.
- Als „optimale Raumbeheizung" würde eine Staubverschmutzung durch geringe Konvektionswirkung der Temperierung reduziert.
- Die Temperierung bewirke einen „Schutz [...]der Ausstattung [...] vor Kondensat". Es entstünden keine ungünstigen Mikroklimata.

Gebäude/Bauteil:

- Die Temperierung wirke als „thermische Feuchtesanierung", die feuchtes Mauerwerk trockenlegt.
- Insbesondere wirke die unter Putz verlegte Temperierung als „thermische Feuchtesperre". Aufsteigende Feuchtigkeit werde „ausgeschaltet".
- Es würde durch „Inaktivierung von Schadsalzen" das Mauerwerk geschont.
- Außenwände blieben trocken durch „Schutz der Hüllfläche... vor Kondensat". Taupunktunterschreitungen mit Feuchtekondensation an den mit Temperierung versehenen Wänden träten nicht mehr auf.
- Durch die Verwendung der Temperierung verringere sich der Energieverbrauch gegenüber anderen Heiz- und Klimatisierungssystemen.

Einbau und Betrieb:

- Die Temperierung wäre ein robustes und fehlertolerantes Heizsystem. Bei Fehlfunktion oder Ausfall entstünden keine kurzfristigen Klimaschäden.

- Die verwendeten Regelstrategien unterstützten die klimastabilisierende und energieeinsparende Wirkung der Temperierung.
- Die Temperierung wäre im Vergleich zu anderen Systemen kostengünstiger im Einbau.
- Der Einbau der Temperierung erfolge mit geringerem baulichem Eingriff im Vergleich zu anderen Systemen.

Aus der Vielzahl von Eigenschaften und Wirkungen werden nachfolgend einige der in [Großeschmidt 2004] postulierten Eigenschaften, Wirkungen und Fragestellungen herausgestellt, die untersucht werden sollen.

- Wie und in welchem Umfang erfolgt die Wärmeabgabe der Heizleitung über das Bauteil?
- Wie hoch ist der Energieverbrauch im Kontext der erreichten Raumklimata?
- Welche Auswirkungen hat die Regelung auf das Raumklima und den Energieverbrauch?
- Wie wird das Raumklima durch Bauteiltemperierung beeinflusst?
- Wie ist der Energieverbrauch im Vergleich zu einem konventionellen Heizsystem zu bewerten?

2.1.4 Raumklima durch Bauteiltemperierung

Die Beheizung mit einer Temperierung führt zu einer Erhöhung der Bauteiltemperaturen und der Raumtemperatur. Die Temperaturanhebung ist aus konservatorischen Aspekten und gründen der thermischen Behaglichkeit gewünscht. Mit Anhebung der Raumtemperatur wird auch der konservatorisch wichtige Parameter relative Luftfeuchte beeinflusst. Für die Eingrenzung der Klimawirkung einer Temperieranlage sind Einflussgrößen wie Außenklima, Qualität der Gebäudehülle, weitere Gebäudetechnik und Besucher in ihrer Auswirkung abzuschätzen.

Außenklima und Qualität der Gebäudehülle:

Über die Eigenschaften der Gebäudehülle bestimmt das Außenklima das Raumklima mit. Zum einen wirkt das Außenklima über Luftinfiltration und Luftwechsel direkt auf das Raumklima ein, mit Auswirkungen auf den Energieverbrauch und Schwankungen in Temperatur und relativer Feuchte. Zum anderen wirken einzelne Bauteile, wie Wände, Decken, Böden, Türen und Fenster, über ihren jeweiligen Wärmedurchlasswiderstand auf das Raumklima. Bei Fenstern bzw. transparenten Bauteilen kommt je nach Ausführung von zusätzlichen Maßnahmen für Licht- und Hitzeschutz der Energieeintrag durch Sonneneinstrahlung mit entsprechender lokaler Wirkung hinzu.

Die thermische Qualität der Bauteile und Dichtheit gegenüber Infiltration wirken insbesondere bei Schwachstellen ungünstig auf lokale Raumluftzustände ein. Diese lokalen Auswirkungen können sein:

- Schäden durch zu geringe Oberflächentemperaturen an Bauteilen, die lokal höhere relative Raumluftfeuchten bis zu Tauwasserausfall an Oberflächen verursachen können.
- Schäden durch abweichende lokale Raumlufttemperaturen und Strahlungseinflüsse und damit Raumluftfeuchten in der Nähe von Exponaten.

- Lokale Unbehaglichkeit durch geringe Oberflächentemperaturen, zu geringe oder zu hohe lokale Raumtemperatur und Zugerscheinungen durch Undichtheiten oder infolge zu kalter Oberflächentemperaturen.

Auswirkungen durch Besucher, Museumspersonal und Nutzer

Zentrale Aufgaben der Museen sind „Sammeln – Bewahren – Vermitteln". Für die Besucher und Mitarbeiter sind ausreichend Frischluftmengen und je nach Ausstellungskonzept oder konservatorischem Konzept ein bestimmtes Temperaturniveau erforderlich. Die Besucher sind eine Emmissionsquelle für Feuchtigkeit, Wärme, Kohlendioxid und Staub. Je nach Umfang der Besucherzahlen entstehen hier zusätzliche Fragestellungen, die sich meist in einer veränderten Haustechnik, zusätzlichen baulichen Maßnahmen oder im Ausstellungskonzept widerspiegeln [Bichlmair et al 2012].

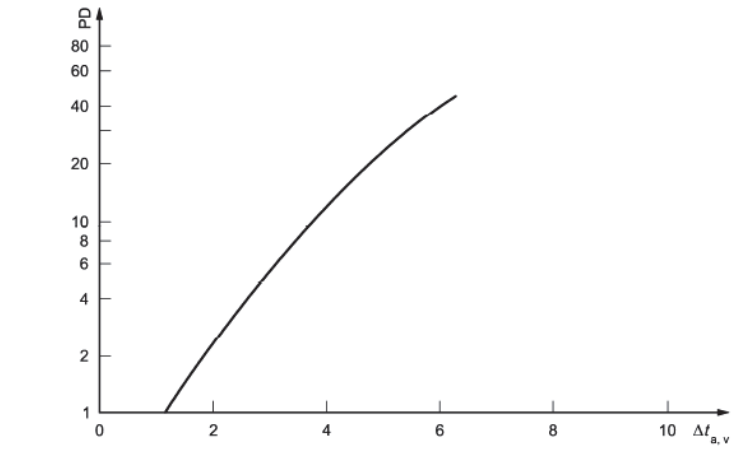
Weitere Gebäudetechnik

Nicht selten werden neben der reinen Temperieranlage zusätzliche technische Anlagen eingesetzt. Möglich sind zusätzliche Heizeinrichtungen für temporäre Nutzungszeiten mit höherem Temperaturanspruch. Für die Bereitstellung von ausreichend Frischluft sowie zusätzlichen klimastabilisierenden Maßnahmen kommen hauptsächlich raumlufttechnische Anlagen zum Einsatz. Mögliche zusätzliche technische Anlagen sind zum Beispiel:

- Zusätzliche Heizeinrichtung (z.B. Heizkörper)
- Luftbefeuchter dezentral in mobilen Geräten zur Klimastabilisierung
- Luftentfeuchter dezentral in mobilen Geräten zur Klimastabilisierung
- Abluftgeräte zur Frischluftversorgung über Nachströmung
- Zuluftgeräte zur Frischluftversorgung
- Kombinierte Zu- und Abluftgeräte mit oder ohne Wärmerückgewinnung
- Zentrale Raumlufttechnische Anlagen mit Klimaregelung (Be- und Entfeuchtung, Kühlung, Lufterwärmung)

Konservatorische Anforderungen und lokale thermische Behaglichkeit

Die lokale Verteilung des Raumklimas kann anhand Temperaturverteilung im Raum eingeschätzt werden. Da sich die relative Feuchte bei gleichbleibender absoluter Feuchte der Raumluft mit der Temperatur verändert, kann aus der Raumklimamessung (Temperatur und relative Feuchte) und der lokalen Temperaturverteilung vereinfachend auf die Verteilung der relativen Feuchte geschlossen werden. Um lokal zu hohe oder zu niedrige relative Feuchten zu vermeiden, wird aus konservatorischen Gründen eine möglichst gleichmäßig verteilte Raumtemperatur angestrebt. Ein weiterer Aspekt ist die Auswirkung der vertikalen Temperaturverteilung auf die lokale thermische Behaglichkeit. In der hierfür maßgeblichen Norm [DIN EN ISO 7730] „Ergonomie der thermischen Umgebung –Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit" werden Angaben zur Ermittlung des Prozentsatzes der Unzufriedenen anhand der vertikalen Temperaturschichtung gemacht. Mit höherem vertikalem Temperaturgradienten ist gemäß [DIN EN ISO 7730] eine größere Anzahl unzufriedener Personen zu erwarten, siehe Bild 1. Ein geringer vertikaler Temperaturgradient erhöht damit die Behaglichkeit in Räumen.



Legende
PD Prozentsatz an Unzufriedenen, %
Δt_{av} Lufttemperaturunterschied zwischen Kopf und Füßen, °C

Bild 1: Diagramm aus DIN EN ISO 7730 zur Auswirkung der vertikalen Temperaturschichtung zwischen Kopf und Fußgelenkshöhe auf die zusätzlich zu erwartende Anzahl unzufriedener Personen

In Gebäuden mit traditioneller Bauweise sind durch die Bauart bedingt die Bauteil-U-Werte gering im Vergleich zu heutigen Anforderungen. Dadurch stellen sich in den Räumen mit konventioneller Heizkörperheizung ausgeprägte vertikale Temperaturschichtungen ein, siehe Bild 2 [Künzel 2006].

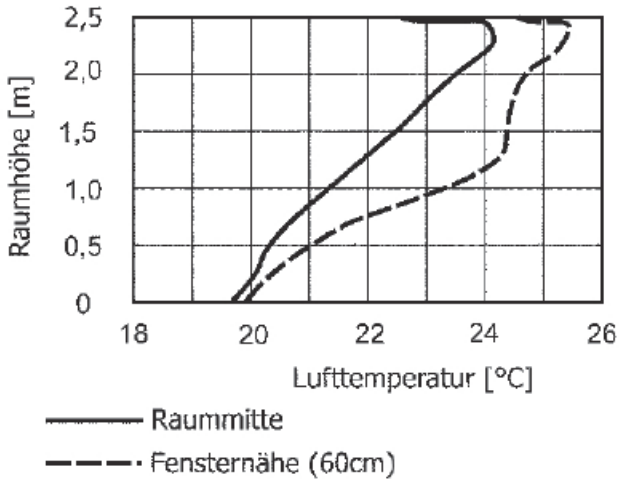


Bild 2: Höhenprofil der Lufttemperatur in Räumen in alter Bauart mit Beheizung durch einen Radiator nach [Frank 1964], entnommen aus [Künzel 2006]

2.1.5 Wärmeabgabe der Heizleitung über das Bauteil

Die Wärmeleitungsgleichung beschreibt allgemein das Temperaturfeld eines Bauteils [Herwig 2000]. In (Gl. 1) ist die Wärmeleitungsgleichung nach dem Ansatz nach Fourier als partielle inhomogene Differentialgleichung 2. Ordnung für die zweidimensionale kartesische Beschreibung des instationären Temperaturfeldes einer Wand mit Wärmequelle abgebildet [Fischer et al 2008].

(Gl. 1)
$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{c\rho} * \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right] + \frac{W}{c\rho}$$

T	[K]	Temperatur
t	[s]	Zeit
λ	[W/mK]	Wärmeleitfähigkeit

ρ	[kg/m³]	Dichte
c	[J/(kg*K)]	Wärmekapazität
W	[W]	Wärmequelle

Man erhält das gesuchte Temperaturfeld durch Lösen der Wärmeleitungsgleichung. Bei [Elgeti 1971] wird zur Lösung des Temperaturfeldes die Laplacesche Differentialgleichung für stationäre Wärmeleitung in einem zweidimensionalen Feld ohne Wärmquelle verwendet (Gl. 2).

(Gl. 2) $$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = \mathbf{0}$$

T	[K]	Temperatur

Gemäß der Funktionentheorie kann durch komplexe Variablen die Laplacesche Differentialgleichung gelöst werden. Elgeti ordnet bei seiner Lösung dem Realteil der komplexen Variable das Temperaturfeld zu, und dem Imaginärteil das Feld der Wärmestromlinien. Durch die komplexe Variable kann in der weiteren Herleitung das Heizrohr als Wärmequelle in einer ebenen Wand bzw. dessen Wärmeverlust berechnet werden [Elgeti 1971]. Für das Rechenergebnis gibt [Elgeti 1971] für die Näherungsgleichung einen Fehler von maximal 15 % für eine Oberfläche berührende Heizleitung an, da die Randbedingungen für die Näherungsberechnung nicht ausreichend erfüllt werden. Dieses Verfahren wurde in erster Linie für gedämmte Heizrohre in der Wand entwickelt und eignet sich vor allem für Systeme mit größerer Heizrohrüberdeckung, in denen die Randbedingungen eingehalten werden. Die Gleichungen nach Elgeti werden detailliert in Kapitel 2.3.1 „Bisherige Bemessung der unter Putz verlegten Temperierung (Bauteiltemperierung)“ dargelegt und beschrieben.

Die Wärmeabgabe einer eingeputzten Heizleitung auf das Bauteil wird bei [Großeschmidt 2004] mit einem Diagramm angegeben, das durch [Engelbrecht 1995] bestimmt wurde. In [Engelbrecht 1995] wurde eine Parameterstudie anhand der Formeln nach [Elgeti 1971] durchgeführt und auch die auftretenden Wärmeverluste in Abhängigkeit der untersuchten Parameter mit angegeben. Nach [Großeschmidt 1992, 1996, 2004] wird eine höhere Wärmeabgabe aufgrund von Trocknungseffekten verneint. Verschiedene Autoren wie z.B. [Arendt & Hausladen 1992], [Gronau 1996], [Künzel 1998, 2000, 2009], [Krus & Kilian 2012] kommen hier zu einer anderen Einschätzung. Für die theoretische Herleitung der Wärmeabgabe wird bei [Holmberg 2004] nach der analytisch abgeleiteten Formel von Elgeti die Wärmeabgabe des Heizrohres bzw. der Anteil der Wärmeabgabe auf der Außen- und Innenseite der Außenwand im Kontext der Untersuchungen in Salsta Palace abgeschätzt. Durch Umstellen der Formeln nach Elgeti kommt Holmberg dabei zu dem Schluss, dass die berechneten zusätzlichen Wärmeverluste nach Elgeti in der Gesamtbetrachtung vernachlässigbar wären.

Die Lösung der Wärmeleitungsgleichung kann computergestützt über numerische Lösungsmethoden erfolgen, die als Software von verschiedenen Anbietern kommerziell erhältlich sind. Mit computergestützten Rechenmethoden ist je nach Software die Berechnung von temperaturabhängigen Stoffwerten und instationären Randbedingungen möglich. Mit der Software WUFI® 2D ist auch die instationäre Berechnung mit feuchte- und temperaturabhängigen Stoffwerten des thermischen und hygrischen Feldes einer aufwändigen Bauteilgeometrie möglich [Künzel 1994], [Künzel et al 2006]. Die Software erfüllt die Bedingungen für hygrothermische Simulation nach [DIN 15026] und [WTA-Merkblatt 6-1 2002; WTA-Merkblatt 6-2 2014]. WUFI® 2D erfüllt auch die Kriterien des Benchmark-Tests nach [DIN EN ISO 10211] zur Validierung von Wärmebrückenprogrammen. Validierungsbeispiele für computergestützte Berechnung der Bauteiltemperierung mit Vergleich zu Messungen sind derzeit nicht bekannt.

2.1.6 Wirkung der Auftriebsströmung

Die bisherigen Nachweise der wandnahen Auftriebsströmung erfolgen in situ durch die tatsächlich vorhandene Strömung an der Wandoberfläche im Bereich der Temperierleitungen. Diese Strömungen können teilweise mit künstlich erzeugtem Rauchgas sichtbar gemacht werden. Schwierigkeiten bei diesen In-situ-Messungen ergeben sich in der Feststellung der Randbedingungen und der Interpretation des visuellen Eindrucks sowie dem Einfluss des Rauchgases auf die Luftströmung. Dennoch gelingt es zum Teil, einen wandnahen Auftrieb zu beobachten, wie z.B. in der Untersuchung bei [Hoffmann 1999] angegeben. Hierbei wurde die Höhe der Auftriebsströmung über der Temperierleitung bei drei Exponat-Gebäuden zwischen 60 cm und 80 cm bestimmt. Danach löste sich die wandnahe konvektive Auftriebsströmung auf.

Untersuchungen zur wandnahen Auftriebsströmung und Leistungsabgabe von Heizeinrichtungen

In [Kriegel 1974] wurde die wandnahe Auftriebsströmung qualitativ beobachtet und die dazugehörige Wärmeabgabe des hierfür verwendeten Heizkörpers gemessen. Der Versuchsaufbau mit dem Beobachtungsergebnis ist schematisch in Bild 3 abgebildet. Vor einer ca. 5 m hohen Wand, die in einer Halle aufgebaut wurde, ist ein Heizkörper angeordnet. Die Temperatur der Wandoberfläche wurde dabei auf eine Temperaturdifferenz von 10 K bzw. 15 K zur Raumlufttemperatur von 22 °C eingestellt. Bei dem Versuch wurde die Wärmeabgabe des Heizkörpers in Stufen angepasst und das Strömungsbild visuell durch Zugabe von Rauch beurteilt. Der Wärmestrom des Heizkörpers wird dabei dem rechnerischen Wärmeverlust der Wand gegenübergestellt. Unterschieden werden vier Fälle (a-d). Bei einer Wärmeabgabe des Heizkörpers, die um $\Delta\dot{Q}$ größer ist als der rechnerische Wärmeverlust durch die Wand, setzt sich die konvektive Aufwärtsströmung gegenüber der Fallluftströmung durch. Dabei stellen sich je nach Niveau der zusätzlichen Wärmeabgabe unterschiedliche Strömungsbilder ein (Bild 3 Fall a-c). Bei einer Wärmeabgabe des Heizkörpers, die dem Wärmeverlust der Wand entspricht, setzt sich die Fallluftströmung durch, eine konvektive Auftriebsströmung wurde nicht mehr beobachtet (Bild 3 Fall d).

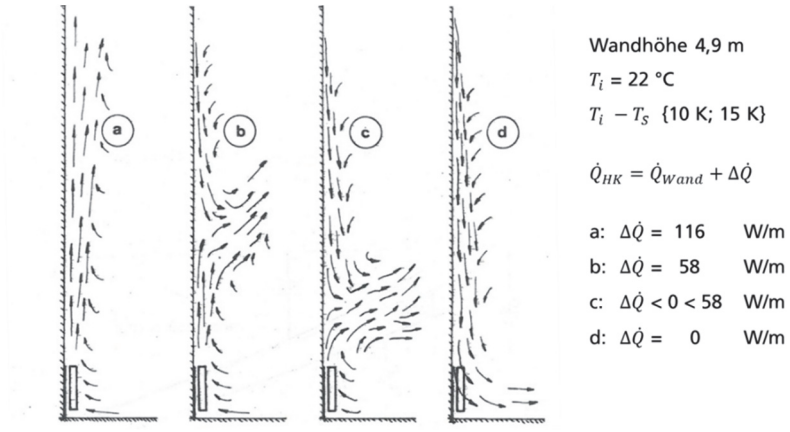


Bild 3: Strömungsbilder vor vertikaler Versuchswand, mit Rauch qualitativ ermittelt [Kriegel 1974]

T_i	[°C]	Temperatur Raumluft (Fluid)
T_S	[°C]	Temperatur Oberfläche Wand innen
$\dot{Q}_{HK}$	[W/m]	Wärmestrom pro m Heizkörper
$\dot{Q}_{Wand}$	[W/m]	Wärmestrom pro m durch die Wand
$\Delta\dot{Q}$	[W/m]	Wärmestromdifferenz pro m

Durch Fallluftströmungen können Zugerscheinungen auftreten, die durch geeignete Maßnahmen, hier Beheizung, abgemildert werden sollen. Hierfür ist jedoch gemäß dem Versuchsaufbau in Bild 3 ein erheblicher Energieeinsatz erforderlich, um durch den Warmluftauftrieb den herabströmenden Luftmassen wirkungsvoll zu begegnen. Eine Temperaturdifferenz zwischen Wandoberfläche und Raumtemperatur in der Größenordnung von 10 K bis 15 K tritt allerdings nur bei äußerst geringem Wärmedurchlasswiderstand und bei entsprechender Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Außenklima auf, wie z.B. bei einfach verglasten Fenstern in beheizten Räumen. Der bei [Großeschmidt 1992] angeführte Effekt der wandnahen Auftriebsströmung kann aus dem Versuchsaufbau in [Kriegel 1974] nicht geklärt werden.

Thermodynamische Untersuchungen am beheizten Zylinder im Wasser

In einer früheren Studie [Schetz et al 1964] wurde in einer Laboruntersuchung das Verhalten einer wandnahen Auftriebsströmung untersucht. Hierzu wurde in einem Wasserbad ein Zylinder bis auf die untere halbe Höhe über die Fluidtemperatur (T_∞) des umgebenden Fluids (Wasser) beheizt (T_1), siehe Temperaturschema rechts in Bild 4. Die obere Hälfte des Zylinders wurde dabei auf ein niedrigeres Niveau wie die untere Zylinderhälfte bzw. niedriger als die Fluidtemperatur beheizt (T_2). Es wird dadurch ein Temperatursprung zwischen den beiden Zylinderabschnitten erreicht (diskontinuierliche Wandtemperaturen). Anhand der Fluidtemperatur T_∞ als Bezugstemperatur wird zur jeweiligen Zylindertemperatur T_1 bzw. T_2 die Differenz Θ_1 bzw. Θ_2 berechnet. Aus dem Verhältnis Θ_1 zu Θ_2 erhält man eine dimensionslose Temperatur. Je nach Temperaturverhältnis Θ_1/Θ_2 stellen sich unterschiedliche wandnahe Strömungsprofile ein. Ein negatives Temperaturverhältnis ergibt sich wenn z.B. die untere Zylindertemperatur größer und die obere Zylindertemperatur niedriger als die Fluidtemperatur ist. Dabei ergibt ein Temperaturverhältnis von -2 ein früheres Ablösen der wandnahen Auftriebsströmung von der Wand (wenige Zentimeter), die sich mit dem Umgebungsfluid stark verwirbeln und weiter aufsteigen (Bild 4 links). In Bildmitte sind die Temperaturunterschiede mit einem Temperaturverhältnis Θ_1/Θ_2 von -4 größer ausgeprägt, die Lauflänge des unmittelbar an der Wand aufwärts strömenden Fluids ist deutlich länger und löst sich erst nach ca. 10 Zentimetern ab und wird dann von der Wand abgelenkt. Das Temperaturverhältnis von -4 entspricht dabei z.B. bei einer Fluidtemperatur T_∞ von 24 °C, einer Temperatur der oberen Zylinderhälfte T_2 von 20 °C und einer Temperatur der unteren Zylinderhälfte T_1 von 40 °C.

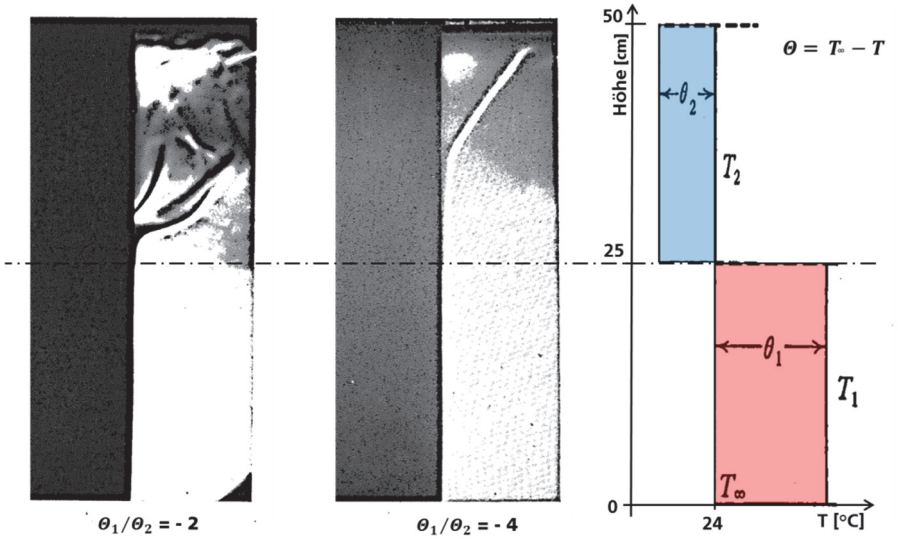


Bild 4: Wandnahe Auftriebsströmung durch natürliche Konvektion an einer Wand. Die Bilder links und Mitte zeigen Schlieren-Aufnahmen der Auftriebsströmung. Rechts im Bild sind die Temperaturverhältnisse der Wand schematisch abgebildet. Die untere Wandhälfte ist dabei beheizt [Schetz et al 1964].

Θ_1/Θ_2	[-]	Verhältnis der Temperaturdifferenzen
Θ	[K]	Temperaturdifferenz zwischen Zylinderabschnitt und Fluid
T	[°C]	Temperatur Zylinderabschnitt
T_∞	[°C]	Temperatur Fluid

Die Labormessungen [Schetz et al 1964] wurden bei [Kelleher 1971] zur Überprüfung der hergeleiteten mathematischen Beschreibung der Temperatur- und Geschwindigkeitsprofile genutzt. In [Gebhart et al 1988] wird eine Übersicht mit mathematischer Beschreibungen und experimentellen Untersuchungen thermischer Auftriebsströmungen an Wänden unter verschiedenen Randbedingungen, unter anderem auch die der oben angeführten Autoren, beschrieben. Nach [Kelleher 1971] und [Gebhart et al 1988] sind Ähnlichkeitsbeziehungen für die wandnahe Auftriebsströmung mit natürlicher Konvektion mit Temperatursprung nicht anwendbar. In [Sparrow et al 1978] wird die Auftriebsströmung an einer isothermen Wand über einer beheizten Wandfläche analysiert, ebenso bei [Kishinami et al 1983] mit experimentellen Untersuchungen und mathematischen Analysen. Weitere mathematische Beziehungen wandnaher Auftriebsströmungen an Wänden beschreibt z.B. [Afzal 1980] für eine linienförmige Heizquelle an einer adiabaten oder mit konstanter Temperatur angenommen Wand. Bei [Koleshko et al 2010] wird für die wandnahe Auftriebsströmung ein mathematisches Modell erstellt und anhand eigener Messungen überprüft. Dabei wird eine 5 m hohe Aluminiumwand mit 4 mm Dicke im unteren Wandbereich bis auf einer Höhe von 2,4 m beheizt. Wegen der hohen Wärmeleitfähigkeit der Metallwand erfolgt ein Wärmestrom in den nicht beheizten Wandbereich durch Wärmeleitung sowie eine konvektive Wärmeübertragung durch die Auftriebsströmung.

Die hier vorgestellten Untersuchungen kommen dem System der Bauteiltemperierung nahe. Es zeigen sich aber deutliche Unterschiede in den angenommenen Randbedingungen im Vergleich zur Bauteiltemperierung. Durch die Anordnung der Temperierung im Mauerwerk erfolgt ein Wärmetransport durch Wärmeleitung, die nur bei [Koleshko et al 2010], jedoch an einer Metallwand, untersucht wurde. Bei den Untersuchungen von [Schetz et al 1964] und [Kelleher 1971] wurde auch der Fall eines zur Raumluft kühleren Wandbereiches untersucht, jedoch bei einem Temperatursprung von dem beheiztem zum unbeheizten Wandbereich, anstatt eines kontinuierlichen Temperaturverlaufs wie bei der Temperierung. Die visualisierte Auftriebsströmung [Schetz et al 1964] vermittelt einen Eindruck über die mögliche Entwicklung der Auftriebsströmung an einer temperierten Außenwand, die erheblich von den bisherigen Vorstellungen zur wandnahen Auftriebsströmung der Temperierung [Großeschmidt 1992] abweicht.

Experimentelle Bestimmung der Auftriebsströmung und des konvektiven Wärmeübergangs mit Particle Image Velocimetry PIV

PIV ist ein laseroptisches Strömungsmessverfahren mit dem die Luftbewegungen quantifizierbar sind. Für die Messung und Visualisierung natürlicher Auftriebsströmung wird in [Mitterhofer et al 2013] eine PIV-Messung an einer Messpuppe für Behaglichkeitsuntersuchungen verwendet. Es wurde dazu ein Rechenverfahren entwickelt, bei dem aus dem gemessenen Vektorfeld der Luftgeschwindigkeiten v das Temperaturfeld ermittelt wird. Über die Boussinesq-Approximation [Schlichting et al 2006] kann die Energiegleichung aus dem Navier-Stokes Gleichungssystem der Strömungsmechanik vereinfacht werden, siehe (Gl. 3) [Mitterhofer et al 2013].

(Gl. 3) $$\frac{\partial T}{\partial t} + v_i \frac{\partial T}{\partial x_i} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x_i^2}$$

T	[K]	Temperatur
t	[s]	Zeit

v	[m/s]	Geschwindigkeit
a	[m²/s]	Temperaturleitfähigkeit

Die Lösung der Differentialgleichung (Gl. 3) erfolgt über eine Approximation mit der Finite Differenzen Methode, in der das gemessene Vektorfeld aus der PIV-Messung und die gemessenen Randbedingungen der Oberflächentemperaturen und der Raumlufttemperaturen eingehen. Das damit berechnete Temperaturfeld wird zur Bestimmung der lokalen Wärmeübergangskoeffizienten verwendet [Mitterhofer et al 2013].

Das Fouriersche Wärmeleitungsgesetz (Gl. 4) ist eine konstitutive Gleichung in der Wärmeleitungsgleichung, die die Wärmeleitfähigkeit eines Materials mit Wärmestromdichte q und Temperaturfeld verknüpft [Herwig 2000].

(Gl. 4) $$\boldsymbol{q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x}}$$

T	[K]	Temperatur
λ	[W/mK]	Wärmeleitfähigkeit

Mit der Annahme, dass sich die Wärmestromdichte q proportional zur Temperaturdifferenz ΔT verhält, wird der Proportionalitätsfaktor allgemein als Wärmeübergangskoeffizient α bezeichnet, siehe (Gl. 5) nach [Herwig 2000].

(Gl. 5) $$\boldsymbol{q = \alpha\,(T_S - T_\infty)}$$

α	[W/m²K]	Wärmeübergangskoeffizient
T_S	[°C]	Temperatur Oberfläche
T_∞	[°C]	Temperatur Fluid

Nachdem der konvektive Wärmeübergangskoeffizient proportional zum Temperaturgradienten angenommen wird, kann der Wärmeübergangskoeffizient aus dem Temperaturfeld berechnet werden. Voraussetzung hierfür ist, dass die Wärmeleitfähigkeit des Fluids (Luft) sowie die Oberflächentemperatur und Lufttemperatur bekannt sind. Der Temperaturgradient kann aus Interpolation der senkrecht zur Oberfläche bestimmten Temperaturen (Normalenvektor) des berechneten Temperaturfeldes berechnet werden [Mitterhofer et al 2013].

Die PIV Messung ist geeignet, reale Strömungsabläufe zu visualisieren. Mit dem Rechenverfahren nach [Mitterhofer et al 2013] kann das Temperaturfeld sowie eine Abschätzung der Wärmeübergangskoeffizienten an ausgewählten Positionen ermittelt werden, siehe hierzu Kapitel 4.4 „Wärmeübergang und konvektive Wirkung – wandnahe Strömungsmessung".

2.1.7 Bestehende Regelungsempfehlungen

Für die Betriebsweise der Temperierung wird, falls nicht konstante Raumtemperaturen zwingend gefordert werden, eine gleitende Raumtemperatur angestrebt [Großeschmidt 1994]. Hierfür wird zur Regelung der Vorlauftemperatur die übliche witterungsgeführte Regelung der Heizanlage verwendet. Angestrebt wird eine auf das Außenklima stark gedämpft reagierende Vorlauftemperatur der Heizung. Dazu wurde bei einigen Objekten der Temperaturfühler der Heizanlage an der Außenwand unter Putz gelegt, um die Trägheit des Mauerwerks als Dämpfung zu Nutzen. Als zusätzliche Regelung kann eine raum- oder zonenweise Regelung Anwendung finden. Möglich sind hier mehrere Regelungsarten. Für den Anwendungsfall der Bauteiltemperierung zur Vermeidung von Taupunktunterschreitungen, z.B. für den Fall der sommerlichen Bauteiltemperierung, wird häufig eine Rücklauftemperaturregelung eingesetzt, um ein

Absenken der Heizmedientemperatur unter ein bestimmtes Temperaturniveau zu vermeiden. Eine weitere mögliche Regelung ist die direkte Regelung über die Raumluftfeuchte. Dabei dient die gemessene Raumluftfeuchtigkeit als direkte Regelgröße. Zur Erfassung des tatsächlichen Regelverhaltens innerhalb einer Zone oder eines Raumes wird die Vorlauftemperatur direkt am Heizrohr gemessen.

2.2 Bisherige Feldstudien und Messungen zur Temperierung

Die Temperierung war und ist Gegenstand zahlreicher messtechnischer Untersuchungen. Einen gewissen Überblick zu bestehenden Temperieranlagen und teilweise auch Untersuchungen dazu findet sich in [Zmeck 1998], [Löther 2005] (Neuauflage 2014), [Kotterer et al (Hrsg.) 2004] sowie [BLfD 2014]. Nachfolgend werden die hier relevanten Arbeiten mit den daraus folgenden Erkenntnissen dargestellt.

2.2.1 Feldstudien mit vergleichenden Messungen zum Energieverbrauch

Durch [Leipoldt 2004], [Holmberg 2004], [Käferhaus 2004] und [Huber 2014] wurden Messungen zum Energieverbrauch von Temperieranlagen im direkten Vergleich zu anderen Beheizungsarten durchgeführt. Alle Untersuchungen erfolgten in historischen Gebäuden in situ. Neben den energetischen Untersuchungen wurden weitere Messungen an der Außenwand durchgeführt und zum Teil die Raumluftfeuchte hinsichtlich konservatorischen Ansprüchen mit untersucht, die hier im weiteren jedoch nicht betrachtet werden.

Schule Hattingen

In [Leipoldt 2004] wird in einem renovierten Schulgebäude aus dem späten 19. Jhdt. in Hattingen (Deutschland) eine vergleichende Untersuchung zwischen zwei Schulräumen mit Temperierung (Bauteiltemperierung, unter Putz verlegt) und mit konventionellen Heizkörpern durchgeführt. Es wird zwar eine Energieeinsparung bei Betrieb mit Temperierung gegenüber Vorjahren von >20 % angegeben, jedoch nicht im direkten Vergleich während des gleichen Messzeitraums. Im Weiteren werden leider keine Angaben zu Heizgradtagen oder Raumtemperaturen zu den ausgewerteten Zeiträumen angegeben. Die Angaben können dadurch nicht nachvollzogen werden.

Kunsthistorisches Museum Wien

Die durchgeführten Untersuchungen bei [Huber 2014] vergleichen ebenfalls eine Temperierung (Sockelheizleiste vor der Wand) mit konventionellen Heizkörpern zwischen zwei übereinanderliegenden Räumen gleicher Größe in den Restaurierungswerkstätten der neuen Burg in Wien (Österreich). Es werden detaillierte Angaben zum Raumklima und Außenklima gemacht. Der Vergleich der Wärmeabgabe beider Heizeinrichtungen erfolgte für zwei Wochen. Dabei wird ein um 40 % niedrigerer Energieverbrauch in dem Raum mit Temperierung gegenüber dem Raum mit konventionellem Heizkörper über die Wärmemengenzähler festgestellt. Trotz detaillierter Darstellung der Klimamessungen in Diagrammen und Tabellen können die Raumtemperaturangaben durch unterschiedliche vertikale Temperaturschichtungen der beiden Heizsysteme nur bedingt nachvollzogen werden. Außerdem erfolgen keine Angaben zu den Raumtemperaturen der angrenzenden Räume. Da die Untersuchungen im laufenden Betrieb der

Werkstätten durchgeführt wurden, ergeben sich weitere Unsicherheiten hinsichtlich der Lüftung der Räume durch Fensterlüftung sowie durch Luftaustausch mit anderen Innenräumen durch Öffnen der Raumtüren. Es werden bei [Huber 2014] die unterschiedlichen Energieverbräuche im Wesentlichen auf unterschiedliches Lüftungsverhalten zurückgeführt.

Salsta Palace

Holmberg untersuchte in Schweden die Temperierung (Bauteiltemperierung, unter Putz verlegt) im Vergleich zu konventionellen Heizkörpern [Holmberg 2004] in Salsta Slott (Salsta Palace) in zwei neben einander stehenden Pavillons. Es werden auch hier detaillierte Angaben zum Energieverbrauch und Raumtemperatur gemacht. Zusätzlich wurde die Luftwechselrate gemessen und angegeben. Die Raumtemperaturen weichen in den zwei Gebäuden voneinander etwas ab. Nach rechnerischer Korrektur des Energieverbrauchs um die Differenz der Raumtemperatur und Luftwechselrate (ohne Angabe des Verfahrens) wird im Ergebnis eine um 18 % geringerer Wärmeabgabe in dem Pavillon mit Temperierung festgestellt. Die geringere Wärmeabgabe wird auf eine geringere Wärmeleitfähigkeit des Ziegelmauerwerks durch Austrocknung in Folge der Bauteilbeheizung zurückgeführt. Obwohl in Größe, Bauweise, Orientierung und Bauzeit weitestgehend gleich, weisen die Pavillons unterschiedlich große Fenster im Obergeschoss auf, die in den Betrachtungen nicht mit angeführt wurden.

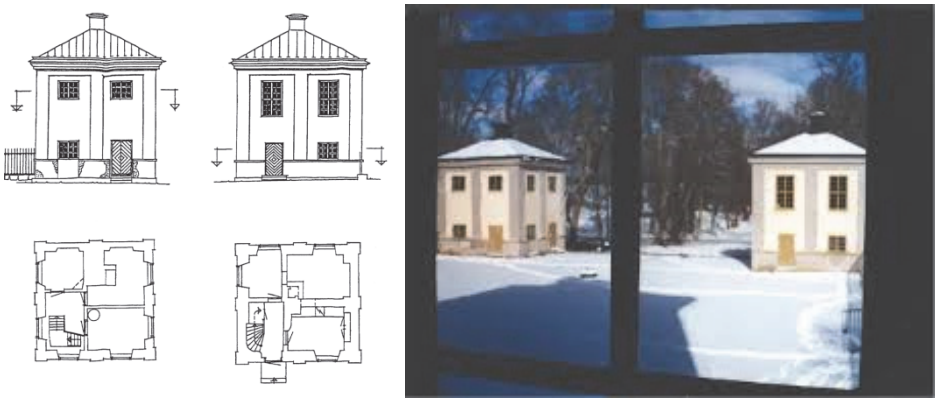


Bild 5: Pavillons in Salsta Palace. Im linken Bild sind die beiden Pavillons mit Grundriss und Ansicht abgebildet. Das rechte Bild zeigt die beiden Pavillons vom Schloss aus. Quelle [Holmberg 2004].

Kartause Mauerbach

Für die Sanierung der Mönchszellen in der Kartause Mauerbach wurden sechs verschiedene Heizsysteme eingebaut und untersucht, [Käferhaus 2004]. Hierbei wurden drei unterschiedliche Temperiersysteme im Vergleich zu einem Kachelofen, konventionellem Heizkörper und einer Luftheizung installiert. Die Temperiersysteme wurden als Bauteiltemperierung (Heizrohr unter Putz), Heizleiste (Kleinkonvektoren hinter einer Blende) und Wandschale (Kleinkonvektoren hinter einer Wandschale) eingebaut. Bild 6 zeigt den Grundriss mit Anordnung der unterschiedlichen Heizeinrichtungen sowie eine Außenaufnahme der Mönchszellen. Zwei unterschiedliche Heizsysteme wurden dabei jeweils in einer Mönchszelle installiert. Über einen Verbindungsgang sind die Mönchszellen auf einer Seite verbunden. Alle Heizeinrichtungen wurden für eine Wärmeabgabe von 3 kW ausgelegt, für die Temperierung wurden jedoch bis auf den Rohrdurchmesser und Anordnung der Leitungen keine Angaben gemacht. Im Verlauf der Untersuchungen wurde jedoch noch ein zusätzliches elektrisches Heizkabel im Sockelbereich mit einer Heizleistung von 2 kW installiert. Die Messungen für den Energieverbrauch sind nach [Käferhaus 2004] nur bedingt belastbar. Für die Heizleiste (Temperierung vor der Wand mit Minikonvektoren) und Radiator erscheinen die Angaben plausibel und weichen nur geringfügig um rund 3 % voneinander ab. Für die Bauteiltemperierung (unter Putz verlegte Heizleitung) werden

stark einschränkende Angaben gemacht (abweichende Raumtemperaturen), sodass das Ergebnis für die Bauteiltemperierung nicht belastbar erscheint.



Bild 6: Mönchszellen der Kartause Mauerbach. Im linken Bild ist ausschnittsweise der Grundriss des Klostergevierts mit einem Teil der untersuchten Gebäude abgebildet. Das rechte Bild zeigt die Außenansicht der noch unsanierten Gebäudeteile. Quelle [Käferhaus 2004].

2.2.2 Hygrothermische Untersuchungen

Labormessung an nachgestellten Wandabschnitten

Für eine experimentelle Untersuchung im Labor wurden bei den Untersuchungen 3 Wandabschnitte mit unterschiedlichem Mauerwerk (Ziegel, Römertuff und Grauwacke) mit Trass-Kalk-Mörtel nach historischer Rezeptur hergestellt [Dominik et al 2008]. Nach der Herstellung der Wände wurden die Wände mit einer Abmessung von ca. 0,5 m x 1,0 m x 1,0 m trocken im Raum gelagert. Nach knapp 5 Jahren konnte eine Austrocknung des Mauerwerks festgestellt werden. Die warmwassergeführte Temperierung wurde auf einer Seite auf das Mauerwerk mit Vor- und Rücklaufleitung mit einem Abstand von ca. 5 cm mit Putzmörtel auf das Mauerwerk aufgeputzt. Der Wandputz ist als schmaler Streifen ausgeführt und bedeckt nur die Temperierleitungen vollständig. Eine kurzfristige Beheizung von ca. 2 Monaten mit der Temperierung führte zu keiner weiteren nennenswerten Masseabnahme und damit weiteren Trocknung des Mauerwerks, die gravimetrisch überprüft wurde. Es wurde jedoch eine geringe Feuchteumlagerung über die Widerstandsmessung festgestellt.

Nach dem Versuch der Beheizung ohne Wasserbeaufschlagung wurden die Mauerwerksabschnitte mit Wasser an der Wandsohle, zunächst ohne Beheizung, beaufschlagt. Die Wände nahmen dadurch Feuchte kapillar auf. Die visuell erkennbare Steighöhe wurde dabei markiert. Visuell wurden Salzausblühungen festgestellt. Die Raumtemperatur beträgt bei Beginn der Wasserbeaufschlagung ca. 13 °C und die Luftfeuchte ca. 60 % rF. Nach ca. 66 Tagen wurde die Temperierung aktiviert und zunächst mit 35 °C und 19 Tage später mit 53 °C Vorlauftemperatur betrieben. Bei Aktivierung der Temperierung stieg die Raumtemperatur auf ca. 20 °C und schwankte im weiteren Versuchsverlauf zwischen ca. 19 °C und 24 °C. Die visuell erkennbare Feuchtefront an der Wandoberfläche stieg mit Beheizung nur noch geringfügig an. Die visuell erkennbaren Salzausblühungen nahmen deutlich zu.

Der Verlauf der Feuchte wurde an drei vertikal angeordneten Messachsen mit einer horizontalen Unterteilung in sechs Messabschnitten quer zur Wand mit einer Widerstandsmessung dokumentiert. Die Sensoren sind im Mauermörtel eingebettet. Zunächst wird bei Beheizung im unteren Bereich eine Feuchtezunahme und im oberen Bereich eine leichte Feuchteabnahme festgestellt. Es findet eine Feuchteumverteilung statt. Es wird abschließend festgestellt, dass mit Beaufschlagung der Mauerwerkssohle mit Wasser bei Bauteilbeheizung die Verdunstung über

das Mauerwerk erhöht wird. Zur Wärmeabgabe der Temperierung werden keine Angaben gemacht.

Rechnerische Untersuchung und Labormessung an nachgestellten Wandabschnitten

In [Dreyer 2006] wird die Auswirkung der Bauteiltemperierung auf den Feuchtehaushalt der verschiedenen Mauerwerksbaustoffe Ziegel und Kalksandstein theoretisch und experimentell untersucht. Bei den theoretischen Untersuchungen werden vereinfachende Annahmen getroffen, um aus analytischen Herleitungen die Auswirkungen auf den Feuchtegehalt zu berechnen. Im Ergebnis wird festgestellt, dass bei Materialien mit niedriger kapillarer Leitfähigkeit, wie z.B. Kalksandstein, ein deutlicher Trocknungseffekt möglich ist und bei Materialen, wie Ziegel, mit höherer kapillarer Leitfähigkeit die Austrocknung sich im Vergleich zu Kalksandstein verringert. Dies wird dadurch begründet, dass bei einer höheren kapillaren Leitfähigkeit mehr Feuchte aus dem Untergrund nachtransportiert werden kann. Die Trocknungseffekte sind stark abhängig von der Verdunstung an der Mauerwerksoberfläche. Bei niedriger Verdunstungsrate, z.B. infolge diffusionshemmender Anstriche oder durch Salzbelastung (Salzblockade), kann sich der Feuchtegehalt nach [Dreyer 2006], vor allem in Wandbereichen oberhalb der Heizleitung, durch die Temperierung sogar erhöhen. Die Verdunstungsmöglichkeit an der Oberfläche sowie die Stärke der Feuchtzufuhr haben einen entscheidenden Einfluss auf den Feuchtehaushalt.

Für die experimentellen Untersuchungen wurden Mauerwerksabschnitte mit unterschiedlichen Mauersteinen im Labor erstellt und in eine Wanne mit Wasser eingetaucht, sodass eine Feuchtebelastung aus kapillar aufsteigender Feuchte vorliegt. Die Untersuchung wurde vergleichend mit und ohne Temperierung durchgeführt. Die zwei elektrisch betriebenen Heizleitungen sind jeweils beidseitig der Wandoberfläche in ca. 6 cm Tiefe (Bohrloch) angeordnet und wurden bei 50 °C betrieben. Die theoretischen Ergebnisse werden durch die experimentellen Untersuchungen laut Dreyer bestätigt. Die Wand aus Kalksandstein mit niedriger kapillarer Leitfähigkeit hat durch die Temperierung einen deutlich niedrigeren Wassergehalt im Vergleich zur nicht temperierten Wand. Bei der Ziegelwand mit hoher kapillarer Leitfähigkeit hingegen fällt die Trocknungswirkung jedoch geringer aus.

Rechnerische Untersuchungen mit hygrothermischem Simulationsmodell

In [Krus & Kilian 2012] wird eine hygrothermische rechnerische Untersuchung mit der Software WUFI® 2D anhand der umgesetzten Sanierung mit Bauteiltemperierung und horizontaler Mauerwerkssperre an der Renatuskapelle in Lustheim vorgenommen. Das Gebäude wurde über mehrere Jahre eingehend hinsichtlich des Raumklimas und konservatorischer Auswirkungen auf das Gebäude und Kulturgut untersucht [Kilian 2004] und auch danach weitere Untersuchungen durchgeführt [Kilian et al 2016], [Holl 2016]. In den rechnerischen Untersuchungen wird die tatsächliche Situation mit Bauteiltemperierung nachgestellt und die Auswirkungen auf den Feuchtehaushalt des Ziegelmauerwerks vergleichend untersucht. Im Ziegelmauerwerk befindet sich oberhalb der Temperierung eine horizontale Feuchtigkeitssperre aus Metallblech. Es werden die gemessenen Klimadaten innen und außen verwendet. Unterhalb des Wandfundamentes im Erdreich wird eine Feuchtquelle angesetzt. Es wurden die hygrothermischen Kennwerte von gemessenen historischen Materialien aus der WUFI® Datenbank verwendet. Dem Vergleichsmodell liegen die gleichen Randbedingungen zugrunde nur ohne Bauteiltemperierung. Im Ergebnis wird festgestellt, dass durch die Temperierung die Feuchtediffusion nach innen und außen erhöht wird. Der Kapillarfluss bzw. die Kapillarflussdichte im Mauerwerk wird durch die Temperierung im Vergleich zur nicht temperierten Wand ebenfalls erhöht. Außerdem zeigt eine Wärmestromanalyse durch die Beheizung mit Temperierung einen erhöhten Wärmestrom nach außen. Bei der Modellierung der Temperierung wurde eine konstante ganzjährige Rohrtemperatur von 60 °C angenommen. Genauere Angaben zur Dimensionierung der

Temperierung oder Wärmeabgabe pro Meter Rohr wurden dabei nicht angegeben oder näher untersucht.

Bei den o.g. technischen Untersuchungen [Dominik et al 2008] und [Dreyer 2006] an einem Mauerwerksabschnitt zeigen sich die Schwierigkeiten der komplexen Messaufgabe und die Einschränkungen durch das Versuchsdesign sowie die langen Zeiträume infolge der langsam ablaufenden feuchtetechnischen Transportvorgänge. Bei den theoretischen Untersuchungen [Dreyer 2006] werden vereinfachende Annahmen zur Berechnung verwendet und eine wesentliche Abhängigkeit von der Baustoffeigenschafft kapillarer Leitfähigkeit und Trocknungsmöglichkeit der Wandoberfläche herausgearbeitet. Die dazu durchgeführten Messungen sieht Dreyer als Bestätigung seiner Untersuchungen. Die rechnerischen Untersuchungen [Krus & Kilian 2012] mit dynamischer Simulation und Verwendung hygrothermischer Kennwerte bestätigen ebenfalls eine Erhöhung des Feuchtetransportes durch die Temperierung, wenn Feuchtigkeit in ausreichender Menge am Mauerwerk anliegt.

Feldstudie mit Messung des Feuchtegehaltes

Die Barockkirche „Maria am Wasser" in Dresden-Hosterwitz-Pillnitz wurde bei einem Hochwasser ca. 2 m hoch überschwemmt. Zur Unterstützung der Austrocknung wurde eine Bauteiltemperierung sowie eine Wandheizung eingebaut und messtechnisch über mehrere Jahre untersucht [Trogisch et al 2006]. Es wurde ein Abtrocknen des Mauerwerks festgestellt. Jedoch konnte bei den durchgeführten Messungen kein eindeutiger Nachweis erbracht werden, dass die Temperierung signifikant auf die Mauerwerksfeuchte einwirkt.

Fazit

Mit Temperierung sinkt zwar der Feuchtegehalt im Mauerwerk, aber die angeführte These, dass die aufsteigende Feuchte unterbunden wird [Großeschmidt 2004], kann damit als begründet widerlegt angesehen werden [Dreyer 2006], [Dominik et al 2008], [Krus & Kilian 2012].

2.2.3 Feldstudien zu Raumklima und konservatorischer Wirkung

In der Kapelle St. Leonhard wurden vergleichende Untersuchungen mit einer Bauteiltemperierung (elektrisches Heizkabel) und einer Konvektorleiste vor der Wand durchgeführt [Künzel 2000], [Künzel 1998]. Untersucht wurde die lokale Temperaturanhebung der nordseitigen Außenwand zur Vermeidung von Tauwasserausfall an kalten Oberflächen. Hier zeigt die Bauteiltemperierung eine deutlich günstigere Wirkung im Vergleich zur Konvektorleiste. Bei der Untersuchung in der Salinenkapelle St. Rupert [Künzel et al 2007] [Künzel et al 2008] wurde die positive Wirkung der Bauteiltemperierung bestätigt, insbesondere zur Vermeidung von Tauwasserausfall durch die gezielte Beheizung von Bauteilen im Sockelbereich. Neben der ganzjährig betriebenen Bauteiltemperierung wurden eine Fußbodenheizung und wenige Heizkörper für den winterlichen Heizbetrieb installiert. Die Temperierung bzw. Fußbodenheizung verbessert das Raumklima durch Temperaturanhebung der Raumluft. Dies führt zu einem Sinken des Feuchteniveaus der relativen Feuchte in einen konservatorisch günstigen Feuchtebereich gegenüber dem Vorzustand. Hierfür werden als günstige Werte „zwischen etwa 8 °C / 70 % rF und 15 °C / 50 % rF" [Künzel et al 2007] angegeben. Hier zeigte sich auch ein Nachteil der installierten Heizkörper in Form von Verschmutzungen an den Wänden im unmittelbaren Bereich der Heizkörper durch die konvektive Wirkung.

Der Palast Pallavicino in Cremona und die Kirche Santo Stefano in Lentate sul Seveso werden mit einer Bauteiltemperierung beheizt [Manfredi et al 2014] und [Del Curto et al 2014]. Im Palast Pallavicino wurde zusätzlich ein Raum mit einer Konvektorheizung vergleichend untersucht.

Es werden bei einem detaillierten Raumklima-Mapping die Auswirkungen der unterschiedlichen Heiztechniken auf das Raumklima zu einem Zeitpunkt dokumentiert. Das Raumklima im Raum mit Temperierung ist dabei wesentlich homogener in der Raumklimaverteilung [Del Curto et al 2014]. Zusätzlich erfolgte ein umfangreiches Monitoring der Außenwände mit Bauteiltemperierung. Die Temperaturmessungen ergaben, im Gegensatz zu der Aussage in [Großeschmidt, 2004], ca. 1 m über der Temperierung Oberflächentemperaturen der Außenwand unterhalb der Raulufttemperatur.

Bei den rechnerischen und messtechnischen Untersuchungen zu den Feldstudien Castle Brezice in Slowenien und Salsta Palace in [Sijanec-Zavrl et al 2004] wurden Bauteilsimulationen und Gebäudesimulationen mit In-situ-Messungen verglichen. Mit Hilfe der Bauteilsimulation (Finite Elemente Software NISA) erfolgten Berechnungen zur Anordnung der Bauteiltemperierung mit Hinblick auf die Temperaturverteilung an der Wandoberfläche für einen ausgewählten Raum. Ziel der Berechnung war die Ermittlung der sich einstellenden Oberflächentemperaturen bis zu einer Wandhöhe von 1,8 m. Anhand der Vorüberlegung wurde die Bauteiltemperierung baulich umgesetzt und messtechnisch begleitet. Weiter wurden zweidimensionale und dreidimensionale (Teil-)Gebäudesimulationen (Physibel) des gewählten Raumes bzw. Gebäudeteils durchgeführt, mit dem Ziel, die sich einstellenden Raumtemperaturen zu berechnen und mit den gemessenen Raumtemperaturen zu vergleichen. Aussagen zur Wärmeabgabe der Temperierung erfolgten dabei nicht.

2.3 Bisherige Bemessung von Temperieranlagen

Die Wärmeabgabe einer Temperierung ist abhängig von der Einbauweise entsprechend den in den vorherigen Kapiteln gemachten Unterscheidungen der Temperiersysteme:

- auf Putz ohne Wandkontakt
- auf Putz mit Wandkontakt
- unter Putz
- Heizleitungen und Minikonvektoren in Wandschalen

Für die auf Putz verlegten Temperiersysteme mit und ohne Kontakt zur Wand werden als Bemessungswerte, mangels besserer Kenntnis, häufig die Werte für die Wärmeabgabe der unter Putz verlegten Temperierung (Bauteiltemperierung) verwendet. Für luftumspülte Heizleitungen existieren jedoch seit langem Werte für die Wärmeabgabe z.B. [VDI 2006], [Schramek 2011]. Bei Heizleitungen auf Putz mit Wandkontakt und Wandschalensysteme sind keine verlässlichen Literaturwerte bekannt. Nachfolgend werden die bekannten Bemessungsvorschläge für Heizleitungen aufgeführt.

2.3.1 Bisherige Bemessung der unter Putz verlegten Temperierung (Bauteiltemperierung)

Bemessungspraxis

Die Bemessung von Temperieranlagen erfolgt bisher anhand von Erfahrungswerten oder Schätzungen und ab [Großeschmidt 2004] mit dem Ergebnis einer Diplomarbeit, die in Form eines Diagramms veröffentlicht wurde. Das darin abgebildete Diagramm wurde in [Engelbrecht 1995] anhand der Formeln nach [Elgeti 1971] berechnet. Hier wurde der Einfluss des Materials der Rohrleitung untersucht und hierfür unterschiedliche lineare Kurven für die Leistungsabgabe

angegeben. Für das präferierte Kupferrohr wurde eine Wärmeabgabe nach innen von ca. 56 W/m bei einem Durchmesser von 18 mm (DN 18) rechnerisch bestimmt, bei einer mittleren Heizmitteltemperatur T_m von 60 °C bei 20 °C Raumtemperatur und -16 °C Außenlufttemperatur, bei einem Ziegelmauerwerk mit einer Wandstärke von 36,5 cm. Ein Vergleich der berechneten Wärmeabgabe mit Messungen erfolgte dabei nicht.

In der Praxis werden häufig Faustwerte aus Erfahrungswerten für die Leistungsabgabe für die unter Putz Temperierung verwendet, die i.d.R. nicht veröffentlicht als internes Firmenwissen angewendet werden. Aus (unveröffentlichten) Planunterlagen lassen sich für eine Raumtemperatur von 20 °C und einer Vorlauftemperatur von 60 °C eine planerische angenommene Leistung von 40 W/m ableiten und bei einer Raumtemperatur von 15 °C eine angenommene Leistung von 50 W/m. In [Zmeck 1998, S. 45] werden anhand der Literaturrecherche und Befragung eines Fachplaners Werte von „50 W/m während der Austrocknungszeit und 30 W/m danach“ angegeben.

Berechnung nach Elgeti

Obwohl die Berechnung nach Elgeti seit langem bekannt ist, haben sie sich für die bisherige Bemessungspraxis nicht durchgesetzt. Nachfolgend werden die Formeln (Gl. 6) bis (Gl. 10) [Elgeti 1971, VDI 2006] dargestellt sowie eine nicht maßstäbliche Skizze (Bild 7) zur Zuordnung der verwendeten Größen. Die VDI Richtlinie 2055 „Wärme- und Kälteschutz von betriebstechnischen Anlagen in der Industrie und in der Technischen Gebäudeausrüstung“ [VDI 2008] geht auch auf die Berechnung von Rohrleitungen in Mauerwerk ein, die ebenfalls auf die modifizierte Formel nach [Elgeti 1971] fußt.

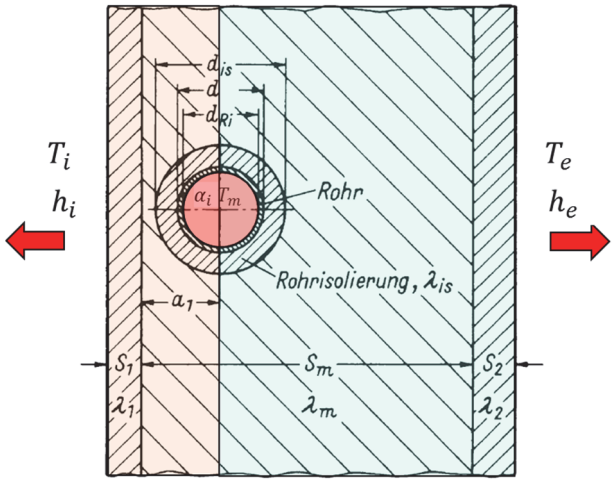


Bild 7: Schema zu den Bezeichnungen für die Berechnung des Wärmeverlustes eines wandverlegten Rohres nach [Elgeti 1971] bzw. [VDI 2006] mit ergänzenden Eintragungen

(Gl. 6) $$\dot{Q} = \frac{2\pi * \Delta T_E * \lambda_m}{\ln(K + \sqrt{K^2 - 1})}$$ [W/m]

(Gl. 7) $$\Delta T_E = T_m - T_i + B(T_i - T_e)$$ [K]

(Gl. 8) $$K = \frac{1}{\pi} e^C \left(1 + \frac{\pi^2}{4} * e^{-2C}\right) \sin \pi B$$ [-]

(Gl. 9) $$C = \frac{2\lambda_m}{\alpha_i * d_{Ri}} + \ln\left[\frac{2\lambda_m}{d} * \left(\frac{1}{h_i} + \frac{s_1}{\lambda_1} + \frac{s_m}{\lambda_m} + \frac{s_2}{\lambda_2} + \frac{1}{h_e}\right)\right]$$ [-]

(Gl. 10) $$B = \frac{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{s_1}{\lambda_1} + \frac{h_i}{\lambda_m}}{\frac{1}{h_i} + \frac{s_1}{\lambda_1} + \frac{s_m}{\lambda_m} + \frac{s_2}{\lambda_2} + \frac{1}{h_e}}$$ [-]

a_1 [m] Abstand Rohrachse zum Putz

h_i	[W/m²K]	Wärmeübergangskoeffizient innen
h_e	[W/m²K]	Wärmeübergangskoeffizient außen
α_i	[W/m²K]	Wärmeübergangskoeffizient Heizmittel zur Rohrinnenwand
T_i	[°C]	Temperatur innen
T_e	[°C]	Temperatur außen
T_m	[°C]	Temperatur Heizmittel
s_1	[m]	Dicke Putz innen
s_2	[m]	Dicke Putz außen
s_m	[m]	Dicke Mauerwerk
λ_1	[W/mK]	Wärmeleitfähigkeit Putz innen
λ_2	[W/mK]	Wärmeleitfähigkeit Putz außen
λ_m	[W/mK]	Wärmeleitfähigkeit Mauerwerk
λ_{is}	[W/mK]	Wärmeleitfähigkeit Rohrdämmung
a_1	[m]	Abstand Rohrachse zur Mauerwerkskante innen
d_{is}	[m]	Durchmesser Rohrdämmung
d	[m]	Durchmesser Rohr außen
d_{Ri}	[m]	Durchmesser Rohr innen
$\dot{Q}$	[W/m]	Wärmestrom
ΔT_E	[K]	Hilfsgröße wirksame Temperaturdifferenz
K	[-]	Hilfsgröße
B	[-]	Hilfsgröße, Verhältnis Wärmewiderstand innen zu Gesamtwiderstand
C	[-]	Hilfsgröße Temperaturfeldberechnung

Die Formel kann für Innenwände mit gleichen Randbedingungen auf beiden Seiten der Wand sowie für Außenwände mit unterschiedlichen Randbedingungen verwendet werden. Hier wird der Fall mit unterschiedlichen Randbedingungen (Raumluft und Außenluft) betrachtet. Der ursprüngliche Anwendungsfall ist die Berechnung des Wärmeverlustes eines in der Wand verlegten Heizungsrohres mit Wärmedämmung, mit dem Ziel, den Wärmeverlust des Heizrohres zu berechnen, unabhängig von den Randbedingungen innen und außen. Für die Anwendung als Temperierung ist jedoch die Wärmeabgabe des Heizrohres ohne Dämmung von Bedeutung. Hierfür wird der Term zur Berechnung des Wärmewiderstandes der Wärmedämmung und die damit einhergehende Reduzierung des Wärmestromes in der Hilfsgröße C eliminiert und anstatt des Außendurchmessers der Dämmung d_{is} der Außendurchmesser des Rohres d_{Ra} eingesetzt. Bei detaillierteren Betrachtungen unterschiedlicher Rohrmaterialien können mit dem Term der Dämmung jedoch auch Verbundrohre untersucht werden.

Nach Elgeti kann der Term für den inneren Wärmeübergang des Heizmittels zur Rohrinnenwand sowie der Wärmewiderstand des Rohres vernachlässigt werden. Nach VDI-Wärmeatlas wird der Rohrwiderstand vernachlässigt, jedoch nicht der innere Wärmeübergang. In der Hilfsgröße C wird mit dem ersten Term die Auswirkung der Wärmewiderstand des inneren Wärmeübergangs berechnet. Bei Elgeti wird für den Wärmeübergangswiderstand an der

Wandoberfläche innen 8 W/m²K angegeben. Dies entspricht dem vereinfachten Ansatz zur Bemessung von Wandheizungen nach [DIN EN 1264] bzw. [DIN EN 15377]. An der Wandoberfläche außen wird 25 W/m²K angegeben. Aus der Formel nach Elgeti ergeben sich die Größen, von denen der vom Rohr abgegebene Wärmestrom abhängt:

- Temperatur Heizmittel
- Raumtemperatur und Wärmeübergangswiderstand innen
- Außentemperatur und Wärmeübergangswiderstand außen
- Innerer Wärmeübergangswiderstand vom Heizmittel zur Rohrwand
- Lage des Rohres (Abstand zur Innenoberfläche)
- Dicke des Mauerwerks
- Wärmeleitfähigkeit des Mauerwerks und Putzes
- Rohrdurchmesser
- Rohrmaterial
- Wärmedämmung Rohr

Mit der Hilfsgröße B wird das Verhältnis des Wärmewiderstandes ab der Rohrachse nach innen zum gesamten Wärmewiderstand berechnet. Mit dieser Hilfsgröße ist es möglich, die Anteile des Wärmestromes nach innen und nach außen zu bestimmen. Damit kann der Wärmestrom bestimmt werden, der für die Raumerwärmung genutzt wird, sowie der Wärmestrom, der durch die Heizwirkung des Rohres nach außen abfließt. Aus der Hilfsgröße B folgt die Abhängigkeit des zusätzlichen Wärmestromes nach Außen aus der Position a_1 des Heizrohres und der Dicke s_1 des Putzes sowie der Wärmeleitfähigkeit λ_1 des Putzes.

Bei der Parameterstudie [Engelbrecht 1995] wurden einzelne Parameter variiert, um deren Auswirkungen auf die Wärmeabgabe festzustellen. Bei dem inneren Wärmeübergang α_i wurden unterschiedliche Fließgeschwindigkeiten untersucht. Dabei wird keine nennenswerten Änderungen der Wärmeabgabe bei Fließgeschwindigkeiten zwischen 0,3 m/s und 1,5 m/s festgestellt. Das Mauerwerk wurde mit 36,5 cm Dicke festgelegt, die Randbedingungen mit 20 °C Raumtemperatur und -16 °C Außentemperatur. Zu den Wärmeübergangswiderständen erfolgten keine Angaben. Variiert wurden alle in der Formel nach Elgeti möglichen Parameter bis auf den Wärmeübergangswiderstand an der Wandoberfläche und der Wärmedämmung am Rohr. Die umfangreiche Parameterstudie berücksichtigt die meisten Parameter. Die Ergebnisse wurden nicht diskutiert. Da keine Publikationen zu der Studie erfolgten, wurde der Inhalt nicht verbreitet und fand keinen Eingang oder Diskussion in der Fachliteratur. Lediglich ein Diagramm zur Wärmeabgabe der Temperierung nach innen in Abhängigkeit der Heizmedientemperatur und verschiedener Rohrmaterialien wurde in [Großeschmidt 2004] veröffentlicht und damit einem breiteren Publikum zugänglich gemacht.

2.3.2 Wärmeleistung eines luftumspülten Heizrohres

Tabellen und Diagramme

Für Heizleitungen auf Putz ohne Kontakt zur Wand sind Werte in der Literatur bekannt. Die Verwendung dieser Werte ist in der Baupraxis jedoch wenig verbreitet, da die Anwendung von Rohrheizköpern, wie die übliche Bezeichnung für diesen Heizflächentyp ist, nicht mehr gebräuchlich ist. In den Standardwerken der Heiztechnik, wie z.B. [Schramek 2011], sind meist keine Werte mehr für die bei der Temperierung üblichen Rohrdurchmesser veröffentlicht, siehe Tabelle 1. Zur Erhöhung der Wärmeleistung werden auch heute noch Rippenrohrheizkörper eigesetzt. Die Rippen erhöhen die Wärmeleistung um ein Vielfaches. Für Temperieranwendungen werden Rippenrohrheizkörper i.d.R. nicht verwendet.

Tabelle 1: Auszug aus Recknagel / Sprenger Tafel 2.2.8-8 [Schramek 2011] Wärmeleistung für glatte Rohre an Luft (Rohrheizkörper). Es wurden die dort angegebenen kleinsten Rohrdurchmesser und niedrigsten Übertemperaturen herausgezogen.

Mittlere Übertemperatur ΔT [K]	Rohrdurchmesser außen [mm]	Rohrdurchmesser außen [mm]
	21,3	26,9
	Wärmeleistung [W/m]	Wärmeleistung [W/m]
40	33	38
50	44	53
60	58	68

Je nach Betrachtung wird in der Heiztechnik von Wärmeleistung oder Wärmeverlusten gesprochen. Bei einem gewünschten Heizeffekt erfolgt die Bezeichnung als Wärmeleistung, bei unerwünschter Wärmeabgabe als Wärmeverlust. In Bild 8 wird die Wärmeabgabe als Wärmeverlust bezeichnet. Abgebildet ist die Wärmeabgabe in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz von der Temperatur des Heizmittels zur Raumluft mit unterschiedlicher Ausführung des Kunststoffmantels. Genauere Angaben zur Art des Kunststoffmantels wurden nicht gemacht. Für die Verlegung dieser Rohre unter Putz wird darauf hingewiesen, dass mit 20 % - 50 % höheren Wärmeabgaben gerechnet werden muss [Schramek 2011]. In [Glück 1990] wurden umfangreiche Untersuchungen zur Wandheizungen durchgeführt. Hier sind auch Werte für einzelne Rohrleitungen in Luft angegeben. Bild 8 rechts zeigt ein Diagramm mit der Wärmeabgabe von waagrechten Stahlrohren in Abhängigkeit der mittleren Übertemperatur. Die Werte wurden mit Berücksichtigung des inneren Wärmeübergangs, der Wärmeleitfähigkeit des Rohres, dem äußeren konvektiven Wärme- und Strahlungsübergang berechnet.

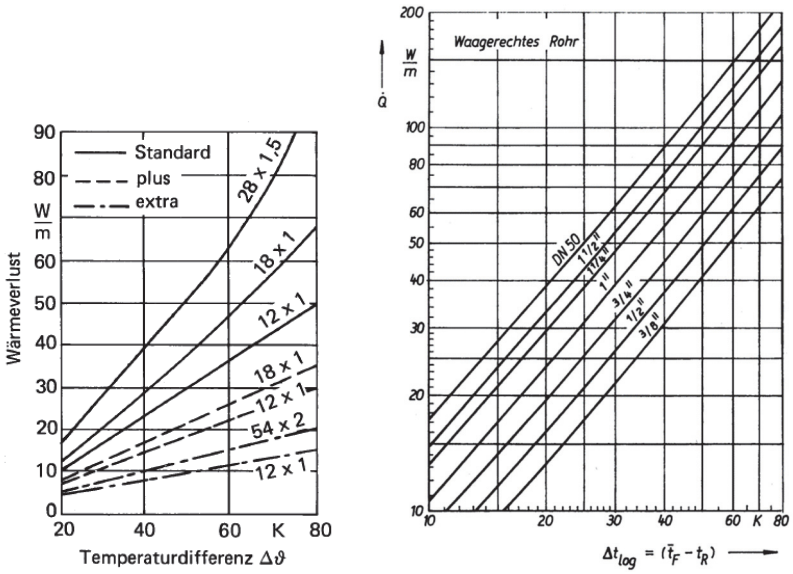


Bild 8: Linkes Diagramm mit Wärmeleistung von Kunststoffummantelten Kupferrohren (Wicu) mit unterschiedlich ausgeführten Mänteln (Wärmedämmung) bei luftumspülten Rohren in Abhängigkeit der Heizmittelübertemperatur, Recknagel / Sprenger Bild 2.3.10-3 [Schramek 2011]. Angegeben ist der Rohraußendurchmesser mit Wanddicke ohne Mantel.
Rechtes Diagramm: Wärmeströme von ungedämmten Stahlrohrleitungen an die Umgebung in Abhängigkeit der logarithmischen Heizmittelübertemperatur, [Glück 1990]. Die Nenndurchmesser sind in Zoll angegeben, 3/8" entspricht einem Außendurchmesser von 17,1 mm und 1/2" von 21,3 mm.

Berechnung der Wärmeleistung eines luftumspülten Heizrohres

Die VDI Richtlinie 2055 [VDI 2008] geht sehr detailliert auf die Berechnung von Rohrleitungen und deren Verluste bzw. Rohrdämmung zur Reduzierung der Verluste ein. Anhand der theoretischen Grundlagen können jedoch mit vereinfachten Formeln die Wärmeabgaben berechnet

werden. In dem Standardwerk Recknagel / Sprenger [Schramek 2011] sind die Ergebnisse von [Glück 1990] gekürzt dargestellt. Die Berechnungsformeln sind ebenfalls als vereinfachte Formeln zur Berechnung der Leistungsabgabe bzw. Wärmeübergänge beschrieben. Im VDI-Wärmeatlas [VDI 2006] sind die erforderlichen thermodynamischen Formeln zur Berechnung der Wärmeabgabe von ungedämmten Rohren ungekürzt beschrieben. Außerdem sind die erforderlichen temperaturabhängigen Stoffgrößen darin publiziert. Dadurch lassen sich die Wärmeabgaben am präzisesten berechnen. Bei den Wärmübergangsberechnungen wird unter anderem auf [Glück 1990] verwiesen.

Innerer Wärmeübergang α_i

Die Wärmeabgabe des Rohres hängt von der Oberflächentemperatur des Rohres ab. Die Oberflächentemperatur wiederum hängt von der Wärmeleitfähigkeit und der Dicke des Rohres sowie von der Temperatur des Heizmittels und dem Wärmeübergang α_i vom Heizmittel auf die Rohrwand ab. Da in der Regel die Rohrwand dünn ist und die Wärmeleitfähigkeit hoch, stellt sich nur ein sehr geringer Temperaturabfall ein, der deshalb häufig in der Betrachtung vernachlässigt wird. Der innere Wärmeübergang α_i vom Heizmittel an die Rohrwand ist vereinfacht betrachtet abhängig von der Rauheit der Rohroberfläche, Fließgeschwindigkeit des Heizmittels und den temperaturabhängigen Stoffwerten des Heizmittels. In der Regel wird der innere Wärmeübergang vernachlässigt, da üblicherweise die Planungsgrundsätze von ausreichend hohen Fließgeschwindigkeiten ausgehen, bei der sich eine turbulente Rohrströmung einstellt und damit ausreichend hohe Wärmeübergänge vorliegen. Die Berechnungsvorschriften sind z.B. in [Glück 1990] oder [VDI 2006] angegeben.

Wärmeleistungsanteil von luftumspülten Rohren durch Konvektion und Strahlung

Der konvektive Anteil ist von der Oberflächentemperatur, dem Wärmeübergangskoeffizienten und den temperaturabhängigen Stoffwerten der Umgebungsluft abhängig [VDI 2006]. Bei übereinanderliegenden Rohren ist nach [Glück 1990] mit einer Reduzierung der Wärmeabgabe auf ca. 85 % (Anhaltwert) der Wärmeabgabe eines Einzelrohres zu rechnen. Der Strahlungsanteil des Heizrohres ist von der Oberflächentemperatur, dem Emissionskoeffizienten und dem Sichtfaktor abhängig. Eine umfangreiche Beschreibung dieser Faktoren und die Berechnungsvorschriften finden sich z.B. in [Glück 1990] oder [VDI 2006].

Berechnungsbeispiel variierter Emissionskoeffizient und wärmegedämmtes Rohr

Anhand der bekannten Berechnungsalgorithmen und veröffentlichen Stoffwerte für Luft [Glück 1990], [Schramek 2011], [VDI 2006] wird die Wärmeabgaben für den bei der Temperierung häufig verwendeten Rohrdurchmesser von 15 mm (DN 15) bei einer Raumtemperatur von 20 °C berechnet. In Bild 9 ist die gesamte Wärmeabgabe mit hohem Emissionskoeffizienten (lackierte Oberfläche, $\varepsilon = 0{,}96$) und niedrigem Emissionskoeffizienten (z.B. Kupferrohr blank, $\varepsilon = 0{,}04$) des nicht wärmegedämmten Heizrohres aus eigenen Berechnungen nach [VDI 2006] abgebildet. Im Vergleich dazu ist die Wärmeabgabe eines gedämmten Heizrohrs in Abhängigkeit von der Übertemperatur dargestellt. Eine Heizrohrdämmung mit 20 mm Dicke und einer Wärmeleitfähigkeit von 0,035 W/mK reduziert die Wärmeabgabe im Vergleich zum blanken Kupferrohr noch einmal, um etwas mehr als die Hälfte.

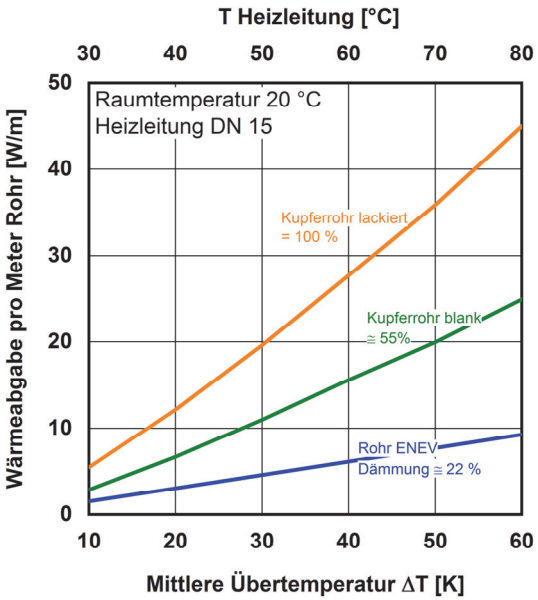


Bild 9: Wärmeabgabe des gedämmten sowie metallisch blanken luftumspülten Rohres im Vergleich zum lackierten Rohr, berechnet nach [VDI 2006]. Eine Heizrohrdämmung mit 20 mm Dicke und einer Wärmeleitfähigkeit von 0,035 W/mK reduziert die Wärmeabgabe im Vergleich zum blanken Kupferrohr nochmal um etwas mehr als die Hälfte.

3 Methodische Vorgehensweise und Ablauf der Untersuchungen

Neben der Schaffung einer Bemessungsgrundlage für die Bauteiltemperierung als Kern der in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen sollen auch die in der Fachwelt kursierenden besonderen Eigenschaften und Vorteile (siehe Kapitel 2.1.3 „Zugesprochene Wirkungen der Bauteiltemperierung und abgeleitete
Fragestellungen“) entweder bestätigt oder wissenschaftlich begründet widerlegt werden. Dies führt innerhalb dieser Arbeit zu umfangreichen auf die Fragestellungen ausgerichteten Messungen sowie zahlreiche rechnerische Untersuchungen, die für ein tieferes Verständnis der Wirkungsweise der Temperierung erforderlich sind. Damit werden die Grundlagen geschaffen, auf der die neu entwickelte vereinfachte Bemessungsmethode basiert.

3.1 Methodische Vorgehensweise

Anhand der Literaturauswertung (Kapitel 2 „Stand des Wissens“) und eigener Erfahrungen zur Temperierung werden merkmalsbasierte Kriterien zur Auswahl der Feldstudien entwickelt. Die in den Feldstudien durchgeführten Erhebungen zum gewünschten konservatorischen Raumklima sowie Ist-Situationen der baulichen Ausführung der Temperieranlagen und deren Betriebsweise werden nach Anlagentypen und Einsatzbereiche kategorisiert. Die Einteilung und Gruppierung der Betriebsweisen bzw. Einsatzbereiche werden mit den durchzuführenden Raumklimamessungen abgeglichen. Siehe hierzu in Bild 10 oben die gelb markierte Felder im graphisch dargestellten Methodenplan.

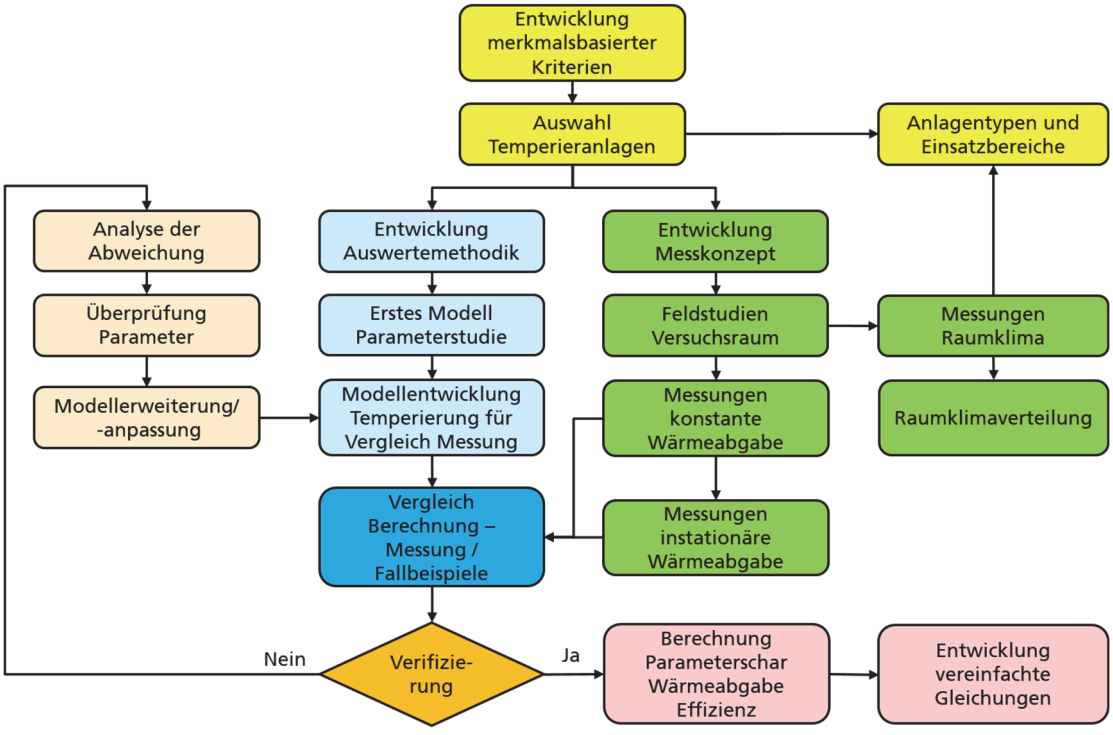


Bild 10: Methodenplan zur Erforschung der Temperierung. Gelbe Felder: Auswahl der Feldstudien. Beige Felder: Methode zur Überprüfung und Verifizierung von Parametern. Blaue Felder: Modellentwicklung zur Auswertung der rechnerischen Untersuchung und Berechnungen. Grüne Felder: Messungen in Feldstudien und Versuchsräumen. Rosa Felder: Entwicklung einer vereinfachten Berechnungsmethode

Aus theoretischen Vorüberlegungen und rechnerischen Voruntersuchungen (Kapitel 4.1.3 "Vorüberlegungen mit Simulationsrechnung und Folgerung für das Messkonzept") werden Messaufbauten und Versuchsanordnungen entwickelt. Die Feldstudien und Labormessungen dienen zur Feststellung von tatsächlich vorhandenen Zuständen temperierter Gebäude und Bauteile, Raumklimata und vor allem der Beurteilung der Temperieranlagen hinsichtlich der Wärmeabgabe. Ausgehend vom globalen Ansatz des Wärmeverbrauchs der Gebäude mit Bezug auf die Gesamtleitungslänge der Temperierung werden auch Messungen an einzelnen Leitungsabschnitten durchgeführt. Damit wird die Erfassung aller Effekte bei realer Nutzung (instationären Randbedingungen) sichergestellt. Zusätzlich erfolgen Messungen in einem Versuchsraum bei überwiegend stationären Randbedingungen, um die Wirkung unterschiedlicher Einflussgrößen genauer abgrenzen zu können, siehe Bild 10 grüne Felder.

Die Vielzahl der einflussnehmenden Parameter werden im Hinblick auf die Wärmeabgabe systematisch mit numerischen und analytischen Berechnungsmethoden bewertet. Zusätzlich werden die Einflüsse der Modellierung des Heizrohrs im numerischen Rechenmodell untersucht. Für die detaillierten rechnerischen Untersuchungen werden neue Ansätze zur Auswertung und Methoden zur Bewertung erarbeitet. Es folgt ein Vergleich der berechneten Wärmeabgabe mit der gemessenen Wärmeabgabe, siehe Bild 10 blaue Felder.

Es werden systematisch die Parameter herausgearbeitet und überprüft, deren Größe noch nicht hinreichend genau bestimmt wurde. Für den als relevant identifizierten Parameter wird ein Erklärungsmodell bzw. eine Modellerweiterung der bestehenden Berechnungsmethoden entwickelt. Der neue Parameter wird bei erneuten rechnerischen Untersuchungen solange variiert, bis eine Übereinstimmung mit den Messungen im konstantem Betrieb im Versuchsraum vorliegt. Der ermittelte Wert des Parameters wird messtechnisch überprüft, siehe beige Felder links in Bild 10. Es erfolgen weitere rechnerische Untersuchungen und Vergleich mit Messung mit instationären und gemessenen Randbedingungen (dunkelblaues Feld in Bild 10).

Anhand der neu entwickelten Bewertungsmethode werden unterschiedliche Anordnungen der Temperierung hinsichtlich der Wärmeabgabe bzw. Energieeffizienz bewertet. Mit den erweiterten Berechnungsmodellen erfolgen neue Berechnungen zur Ermittlung der Parameterschar der Wärmeabgabe und Effizienz. Anhand der Berechnungsergebnisse werden vereinfachte Berechnungsmodelle mit für baupraktische Zwecke ausreichender Genauigkeit abgeleitet, siehe rosa Felder rechts unten in Bild 10.

3.2 Ablauf der Untersuchungen

Die Auswahl der Gebäude für die Feldstudie wurde überwiegend in Zusammenarbeit mit der Landesstelle für nicht staatliche Museen, an der die Temperierung im Wesentlichen entwickelt und in deren Beratungstätigkeit in vielen Museen zum Einsatz gebracht wurde, durchgeführt. Hierzu werden neben Gebäudemerkmalen typologische Merkmale der Temperierung identifiziert und die Gebäude durch merkmalsbasierte Selektion ausgewählt. Ein Großteil der in den Gebäuden (17 Stück) realisierten Temperieranlagen wird von der Landesstelle als gelungene Beispiele bezeichnet. Zusätzlich werden weitere geeignete Gebäude mit Temperierung (9 Stück) in die Untersuchungen aufgenommen (Kapitel 4.1.1 „Auswahl der Gebäude"). Die in den Gebäuden verbauten Beispiele von Temperieranlagen werden systematisiert und deren Merkmale beschrieben, zum einen hinsichtlich der Typologie (Ausführung und Anordnung) der Temperierung und der wärmeabgebenden Heizflächen, zum anderen hinsichtlich der spezifischen Anwendung und Klimatisierungsstrategie.

Aus der vorliegenden Kenntnis der unterschiedlichen Systeme und Anwendungen, theoretischen Vorüberlegungen und rechnerischen Voruntersuchungen werden geeignete Messkonzepte abgeleitet (Kapitel 4.1 „Gebäude mit Temperiersystemen und Messaufbauten"). Hierbei wird für jedes Gebäude bzw. jede Temperieranlage das Messkonzept auf einzelne geeignete Fragestellungen abgestimmt. Die Messkonzepte umfassen folgende Versuchsaufbauten: Raumklima, Nahfeldklima im Bereich der temperierten Außenwand, Oberflächentemperaturen an der Außenwand und Wärmeabgabe der Temperierung in einzelnen Heizschleifen mit Erfassung der Volumenströme (Durchflussmenge) sowie der Vor- und Rücklauftemperaturen. Es erfolgt die Auswahl, Kalibrierung und Installation der Sensoren sowie der für die Datenaufzeichnung erforderlichen Datenlogger. Zusätzlich werden Infrarot-Thermographien innen und außen erstellt.

Eine Sonderstellung nimmt das Gebäude der Alte Schäfflerei am Kloster Benediktbeuern ein, in der das Fraunhofer-Zentrum für energetische Altbausanierung und Denkmalpflege untergebracht ist. In dem denkmalgeschützten Gebäude sind Messräume eingerichtet, in denen umfangreiche Messungen zum Temperaturverhalten der Außenwand, zur Raumklimaverteilung und Wärmeabgabe der Temperierung sowie energetische Vergleiche zu anderen Heizsystemen durchgeführt werden. Hier können die Versuchsanordnung und Betriebsweise der Temperierung an die Fragestellungen angepasst werden, siehe Kapitel 4.1 „Gebäude mit Temperiersystemen und Messaufbauten".

Die Feldstudien und Labormessungen dienen zur Feststellung von tatsächlich vorhandenen Zuständen temperierter Gebäude und Bauteile, Raumklimata und vor allem der Beurteilung der Temperieranlagen hinsichtlich der Wärmeabgabe. Ausgehend vom globalen Ansatz des Wärmeverbrauchs der Gebäude mit Bezug auf die Gesamtleitungslänge der Temperierung werden auch Messungen an einzelnen Leitungsabschnitten durchgeführt. Damit wird die Erfassung aller Effekte bei realer Nutzung (instationären Randbedingungen) sichergestellt. Zusätzlich erfolgen Messungen in einem Versuchsraum bei überwiegend stationären Randbedingungen, um die Wirkung unterschiedlicher Einflussgrößen genauer abgrenzen zu können, siehe 4.2 „Messung der Wärmeabgabe der Temperierung in situ".

Eine zentrale Fragestellung für eine Bemessungsgrundlage ist die Klärung der Energieeffizienz der Temperierung. Entsprechend den rechnerischen Vorüberlegungen zum Messkonzept erfolgen hierzu an mehreren Temperieranlagen Messung der Oberflächentemperaturen, mit der erhöhte Wärmeströme qualitativ begründet werden können. Der quantitative messtechnische Nachweis wird über eine Vergleichsmessung durchgeführt, siehe Kapitel 4.3 „Messung der Energieeffizienz (Vergleichsmessung) der Bauteiltemperierung".

Die bisherige Deutung der konvektiven Wärmeabgabe nach innen ist nicht konsistent (Kapitel 2.1.6 „Wirkung der Auftriebsströmung"). Die von der Temperierung ausgehende wandnahe Auftriebsströmung wird zum einen zur Feststellung des tatsächlichen Strömungsverlaufs und zum anderen zur Abschätzung der konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten eingehend mit experimentellen Methoden der Strömungsmechanik untersucht. Anhand der gemessenen Strömungsfelder (PIV-Messung) werden die Temperaturfelder berechnet und daraus an ausgewählten Positionen der zeitliche Verlauf der Wärmeübergangskoeffizienten abgeschätzt und mit Literaturwerten zu Wandheizungen verglichen, siehe Kapitel 4.4 „Wärmeübergang und konvektive Wirkung –
wandnahe Strömungsmessung".

Parallel zu den In-situ- und Labormessungen erfolgen rechnerische Untersuchungen. Es werden anhand einer Modellwand die Auswirkungen der einflussnehmenden Parameter auf die Wärmeabgabe der Temperierung in einer Parameterstudie mit zunächst konstanten Randbedingungen und konstantem Betrieb der Temperierung analysiert. Zusätzlich werden weitere Parameter

der Rohrmodellierung, Einfluss zweier Rohre untereinander und die Auswirkung einer Dämmung hinter der Heizleitung untersucht. Für die detaillierten rechnerischen Untersuchungen werden neue Ansätze zur Auswertung und Methoden zur Bewertung erarbeitet, siehe Kapitel 4.5 „Thermische und hygrothermische Berechnung der Wärmeabgabe bei unter Putz verlegter Heizleitungen (Bauteiltemperierung)".

Die Wärmeabgabe der Temperierung bei instationärem Betrieb und konstanten Randbedingungen wird in Kapitel 4.6 „Instationärer Betrieb und Regelverhalten der Bauteiltemperierung" rechnerisch untersucht und mit den neu entwickelten Methoden bewertet.

Die zu erwartende Diskrepanz zwischen Messung und Berechnungsergebnis der Wärmeabgabe wird auf Ihre Ursache hin untersucht. Hierzu werden die fraglichen Parameter analysiert und messtechnisch überprüft, bis der gesuchte Parameter identifiziert ist. Anhand des identifizierten Parameters wird ein Modell zur Berücksichtigung des Einflusses auf die Wärmeabgabe entwickelt. Das neue Modell wird in die bestehenden Berechnungsmodelle implementiert. Der Wert des Parameters wird rechnerisch iterativ ermittelt, bis eine Übereinstimmung der Berechnung mit den Messungen der Wärmeabgabe vorliegt. Zur Verifizierung erfolgt eine unabhängige messtechnische Überprüfung, basierend auf dem physikalischen Zusammenhang zwischen Wärmeabgabe und Oberflächentemperatur. Hierzu werden für das Messkonzept der Feldstudien und Messungen im Versuchsraum geeignete Messpositionen für Temperatursensoren berücksichtigt. Es folgt ein Abgleich der rechnerisch ermittelten Wärmeabgabe mit erweitertem Modell bei instationärem Betrieb mit gemessenen Randbedingungen mit der Vergleichsmessung. Abschließend erfolgt eine weitere Verifizierung an einem unabhängigen Fallbeispiel, siehe Kapitel 4.7 „Modellentwicklung und Anpassung der Berechnung der unter Putz verlegten Temperierung (Bauteiltemperierung)". Anhand der neu entwickelten Bewertungsmethode ergibt sich die Möglichkeit, unterschiedliche Anordnungen der Temperierung hinsichtlich der Energieeffizienz zu bewerten, siehe Kapitel 4.8 „Energieeffizienz unterschiedlicher Temperieranlagen und Optimierungspotential". Neben der Bauteiltemperierung kommen auch andere bauliche Varianten der Temperierung zur Anwendung, wie z.B. die auf Putz verlegte Temperierung mit Wandkontakt. Es erfolgt eine rechnerische Einschätzung der Wärmeübertragung mit 2D Simulation an einer Fallstudie, siehe Kapitel 4.9 „Messung und Berechnung der auf Putz verlegten Temperierung - Fallbeispiele".

Der Einbau einer Temperierung erfolgt überwiegend zum Zweck der Klimatisierung von Gebäuden bzw. Räumen. Bei den messtechnischen Untersuchungen wird entsprechend dem Messkonzept in den Feldstudien das jeweilige Raumklima aufgezeichnet. Das Raumklima hat hinsichtlich des erreichten Luftfeuchtkorridors vor allem bei musealer Nutzung zentrale Bedeutung. Entsprechend den Nutzervorgaben der Zielwerte werden mit der Anwendung der Temperierung unterschiedliche Klimakorridore erreicht, siehe Anhang B „Raumklima mit Temperierung". Zu der Wirkung der Temperierung auf das Raumklima erfolgen auch Untersuchungen zur Raumklimaverteilung und Temperaturschichtung im Raum, siehe Kapitel 4.10 „Raumklima mit Temperierung".

Mit der verifizierten Modellerweiterung wird die Wärmeabgabe der Bauteiltemperierung für die baupraktisch relevanten Wertebereiche der wichtigsten Parameter berechnet. Aus den berechneten Parameterscharen werden vereinfachte Näherungsfunktionen abgeleitet, die für die baupraktischen Belange eine ausreichende Genauigkeit für die Ermittlung der Wärmeabgabe aufweisen. Aus weiteren Parameterscharen für die Bewertung der Energieeffizienz werden zusätzliche Näherungsfunktionen entwickelt, mit denen eine vereinfachte Berechnung möglich ist, siehe Kapitel 5 „Verfahren zur Planung und Auslegung einer Temperier-Anlage". Die in dieser Arbeit untersuchten Wirkungen der Temperierung auf Bauteil, Raumklima und Gebäude werden dargestellt und basierend auf den im Rahmen dieser Arbeit gewonnenen neuen Erkenntnissen diskutiert, siehe Kapitel 6 „Bewertung der Ergebnisse".

4 Durchführung der Untersuchungen und Darstellung der Ergebnisse

Es werden die für die In-situ-Untersuchungen ausgewählten Gebäude und Temperieranlagen beschrieben sowie die aus den Fragestellungen abgeleiteten Messkonzepte und Sensorik für die In-situ-Messungen erläutert. Das zweite Unterkapitel beschreibt die Messergebenisse zur festgestellten Wärmeabgabe der Temperierung und verwendeten Berechnungsmethoden der berechneten Größen.

Aus den von den Gebäudebetreibern vorgelegten Daten zu Energieverbräuchen können bereits Angaben zur Wärmeabgabe der Temperierung abgeleitet und mit Literaturwerten verglichen werden. Die globale Einschätzung der Wärmeabgabe von Temperieranlagen beinhaltet auch Einflüsse wie z.B. Kesselverluste, Verteilverluste und unterschiedliche Einbausituationen sowie Leitungsarmaturen mit unterschiedlichen Wärmeabgaben. Es folgen detailliertere Messungen an einzelnen Heizschleifen, bei denen die Wärmeabgabe und Wandtemperaturen genauer mit der tatsächlichen Einbausituation erfasst werden können.

Neben der Höhe der Wärmeabgabe ist die Energieeffizienz der Temperierung von hoher Bedeutung. Ein indirekter Nachweis für zusätzliche Transmissionswärmeverluste durch die Bauteiltemperierung wird an den Feldstudien dargestellt. Den direkten Nachweis für einen höheren Energieverbrauch liefert die Vergleichsmessung der Bauteiltemperierung zu einem elektrischen Heizkörper in dem Gebäude der Alten Schäfflerei. Die Ergebnisse zur Wärmeabgabe und Energieeffizienz sind Messungen an Einzelfallstudien, die für eine allgemeine Übertragbarkeit mit rechnerischen Methoden überprüft werden. Die verwendeten Rechenmodelle basieren auf vereinfachten Annahmen der Wärmeübertragung. Zur Überprüfung der Wärmeübertragung der durch die Bauteiltemperierung erwärmten Wand auf die Raumluft werden daher messtechnische Untersuchungen mit Particle Image Velocimetry (PIV) durchgeführt. Damit kann der tatsächliche Wärmeübertragungsmechanismus genauer beschrieben werden. Zusätzlich ist eine Abschätzung eines realitätsnahen Wärmeübergangskoeffizienten für die vereinfachte rechnerische Modellierung möglich.

Die detaillierte computergestützte rechnerische Untersuchung ermöglicht die Berechnung des zweidimensionalen thermischen Feldes und dessen Wärmeströme. Über neu entwickelte Berechnungsvorschriften können die Wärmeströme in verschiedene Wärmestromanteile unterschieden werden. Dadurch ist es möglich, explizit die Wärmestromanteile der Wärmeabgabe der Bauteiltemperierung und der durch die Temperierung zusätzlich verursachte Wärmestrom nach außen zu ermitteln. Weiter ist es möglich, über die Bildung eines Wärmestromverhältnisses die Effizienz der Temperierung hinsichtlich der Wärmeabgabe zu beschreiben. Über eine Parameterstudie mit stationärem (konstantem) Klima und Heiztemperaturen werden so unterschiedliche geometrische Anordnungen der Temperierung, Bauteilaufbauten und variierte Temperaturen analysiert. Bei der anschließenden Untersuchung mit instationärem Betrieb mit wechselnden Heiztemperaturen der Temperierung werden die Einflüsse aus der thermischen Speicherwirkung der Wand untersucht. Es folgt die rechnerische Modellierung der messtechnisch untersuchten Temperieranlage und des Mauerwerks (Wärmeleitfähigkeit) in der Alten Schäfflerei in Benediktbeuern.

4.1 Gebäude mit Temperiersystemen und Messaufbauten

Für die angestrebten Untersuchungen werden geeignete Gebäude mit Temperieranlagen ausgewählt. Dabei gilt es, auch einen Querschnitt über die verschiedenen existierenden Temperieranlagen abzubilden. Dies führt zwangsweise zu einer größeren Anzahl an zu untersuchenden Gebäuden und Temperieranlagen. Die verschiedenen Temperieranlagen werden auf gemeinsame bzw. unterscheidende Merkmale klassifiziert, beschrieben und unterteilt. Ebenso erfolgt die Beschreibung des Einsatzzweckes der Temperierung und der Anforderungen an das gewünschte Raumklima. Entsprechend den Untersuchungszielen werden auch unterschiedliche Messkonzepte je nach Gebäude und Temperieranlage vereinfacht bis umfangreich erstellt. Der Fokus der Messungen liegt dabei auf dem Kern der Untersuchungen für die Ermittlung der Wärmeabgabe der Bauteiltemperierung.

4.1.1 Auswahl der Gebäude

Die Auswahl der Gebäude bzw. Temperieranlagen erfolgt über eine merkmalbasierte Selektion. Über die Merkmale werden die unterschiedlichen Temperiersysteme, Bauarten und raumklimatische Betriebsweise beschrieben. In Tabelle 2 sind die untersuchten Gebäude aufgelistet.

Tabelle 2: Übersicht der untersuchten Gebäude bzw. Gebäudeteile mit Temperieranlagen sowie zwei nicht beheizte Gebäude zu Vergleichszwecken

Nr	Gebäude	Bauzeit	Anmerkung
1	Museum im Adlhoch-Haus; Bauernhof, Altdorf	16. Jhdt.	in situ
2	Städtisches Heimatmuseum Bad Reichenhall	16. Jhdt.	in situ
3	Fraunhofer-Glashütte Benediktbeuern	19. Jhdt.	in situ
4	Geburtshaus Levi Strauss Museum	17. Jhdt.	in situ
5	Stadtmuseum Erlangen	18. Jhdt.	in situ
6	Fränkisches Museum Feuchtwangen,	16. Jhdt.	in situ
7	Jüdisches Museum Franken in Fürth	18. Jhdt.	in situ
8	Freilichtmuseum Glentleiten Fischerweber Hof	18. Jhdt.	transloziert
9	Freilichtmuseum Glentleiten Bachl Hof	teilw.18. Jhdt.	transloziert
10	Schwäb. Bauernhofmuseum Illerbeuren St. Ulrich Sölde	17. Jhdt.	in situ
11	Schwäb. Bauernhofmuseum Illerbeuren Zehentstadel	18. Jhdt.	transl.,unbeh.
12	Alf-Lechner Museum Ingolstadt, Industriebau	20. Jhdt.	in situ
13	Geigenbaumuseum Mittenwald	18. Jhdt.	in situ
14	Schloßmuseum Murnau	16. Jhdt.	in situ
15	Felix-Müller-Museum Neunkirchen a.B.; Zehentspeicher	16. Jhdt.	in situ
16	Oberammergau Museum	20. Jhdt.	in situ
17	Jexhof Bauernhofmuseum Schöngeising; Wohnhaus	18. Jhdt.	in situ
18	Depot für techn. Kulturgut der Kunsthalle Schweinfurt	Neubau	
19	Porzellanikon Selb Massemühle	19. Jhdt.	in situ
20	Orgelmuseum Altes Schloß Valley Zollingerhalle	20. Jhdt.	transloziert
21	Depot Orgelmuseum Altes Schloß Valley; Bundwerkstadel	18. Jhdt.	transl.,unbeh
22	Fraunhofer-Zentrum Benediktbeuern; Alte Schäfflerei	18. Jhdt.	in situ
23	Kapelle St. Renatus Lustheim	16. Jhdt.	in situ
24	Kloster Aldersbach	18. Jhdt.	in situ
25	Kirche Roggersdorf	18. Jhdt.	in situ

Die Auswahl eines Großteils der Gebäude erfolgte in Zusammenarbeit mit Fachleuten zur Temperierung unter anderem mit der Landesstelle für nichtstaatliche Museen in Bayern, an der die Temperierung maßgeblich entwickelt und zum Einsatz gebracht wurde. Dadurch wird sichergestellt, dass relevante Gebäude und Temperieranlagen erfasst werden. Der Schwerpunkt der Untersuchungen liegt dabei auf öffentlich zugängliche denkmalgeschützte Gebäude, die überwiegend museal genutzt werden oder historisch hohe Bedeutung haben.

4.1.2 Typologie der vorgefundenen Temperieranlagen

Temperiersysteme

Die Anordnung der Heizleitungen einer Temperierung erfolgt prinzipiell in der Grundausführung an der Außenwand im Sockelbereich. Die verschiedenen Temperiersysteme werden anhand der unterschiedlichen Ausbildung vorgestellt. Die in den Feldstudien vorgefundenen Temperiersysteme werden in drei Haupt- und drei Untergruppen eingeteilt. In Bild 11 und Bild 12 sind die drei Hauptvarianten sowie die nicht mehr gebräuchliche Wandschale schematisch dargestellt. Die verschiedenen Wirkungen der Wärmeübertragung der Heizleitungen werden schematisch gezeigt. Die Wärmeübertragung ist als Wärmeleitung über das Bauteil, konvektive Wärmeabgabe an die Umgebungsluft und Strahlungsaustausch der Heizflächen an die Umgebung dargestellt. Die Schemata in Bild 11 und Bild 12 sind gegenüber der physikalischen Realität sehr stark vereinfacht und sollen hier die Grundzüge der unterschiedlichen Wirkungsweisen veranschaulichen.

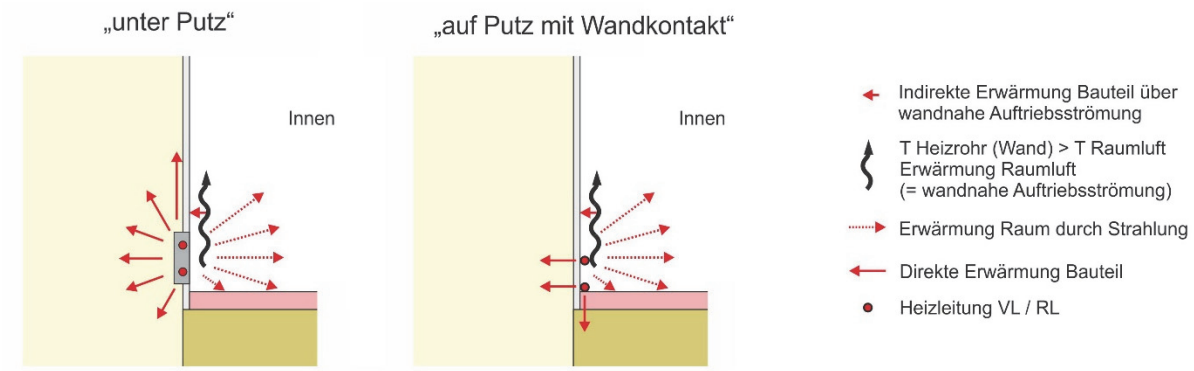


Bild 11: Unterschiedliche Einbausituationen von Temperieranlagen: Unter Putz und auf Putz vor der Wand mit Wandkontakt. Stark vereinfacht sind einige prinzipielle Wirkungen dargestellt, die von dem jeweiligen Temperiersystem ausgehen [Bichlmair 2014].

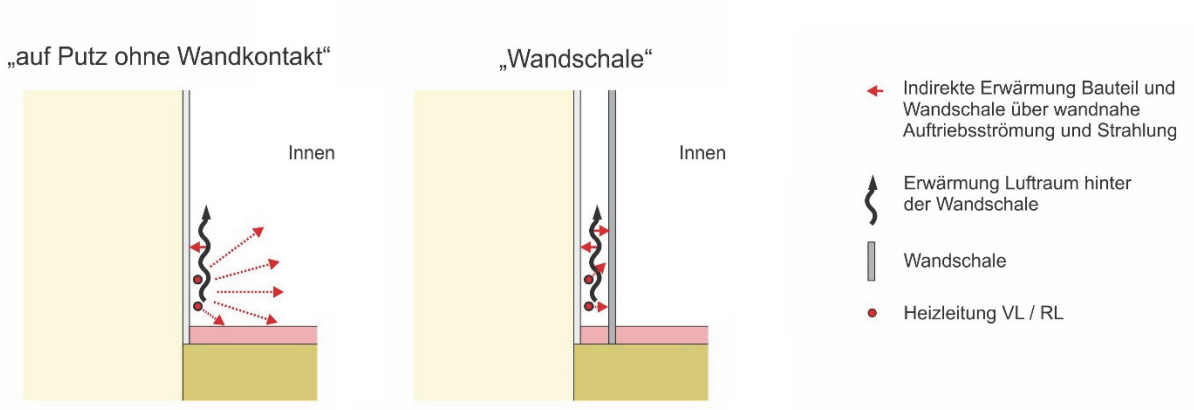


Bild 12: Unterschiedliche Einbausituationen von Temperieranlagen: Auf Putz vor der Wand ohne Wandkontakt und hinter einer Wandschale. Stark vereinfacht sind einige prinzipielle Wirkungen dargestellt, die von dem jeweiligen Temperiersystem ausgehen [Bichlmair 2014].

In den Anfängen der Temperierung wurden Wandschalen teilweise mit Bodenschale ausgeführt. Wandschale bedeutet hier eine zusätzliche innere Raumschale, die vor die originale Wandoberfläche mit einem Luftraum dazwischen montiert ist. In dem Zwischenraum befindet sich die Heizeinrichtung. Diese Art der Temperierung wird aktuell kaum noch ausgeführt.

In Tabelle 3 sind die verschiedenen Systeme in Haupt- und Untergruppen zusammengefasst. Es existieren weitere Temperieranlagen, die diesen Grundtypen ähneln. Eine Variante, die in dieser Systematik nicht explizit dargestellt ist, sind sogenannte Sockelheizleisten. Diese Variante entspricht einer auf Putz montierten Heizleitung, die je nach Herstellerausführung mit oder ohne Wandkontakt ausgeführt ist und eine herstellerspezifische Abdeckung besitzt. Ein weiteres Kriterium, das hier nicht betrachtet wird, ist das Heizmittel. Am häufigsten werden Warmwasser führende Leitungen eingesetzt; es werden aber auch elektrische Heizkabel verwendet. Teilweise kommen auch elektrische beheizte Warmwasseranlagen zum Einsatz.

Einige Beispiele unterschiedlicher Temperieranlagen sind in Bild 13 mit teilweise thermografischen überlagerter Aufnahme abgebildet. Die Beispiele „unter Putz", „auf Putz" mit Wandkontakt und ohne Wandkontakt sind die am weitesten verbreiteten Systeme, die auch heute noch häufig zur Anwendung kommen. Bei [Großeschmidt 1992] wird die unter Putz-Lösung bereits als „Endpunkt der Entwicklung" und als „Ideallösung für Massivbauten" dargestellt. Bei der Wandschale wird in offenes und geschlossenes System unterschieden, je nachdem ob die Heizleitung direkten Kontakt zur Raumluft hat. Dieser Ansatz kann auf frei liegende Heizleitungen und unter Putz liegende Heizleitungen angewendet werden. Die Heizleitungen mit geringem Kontakt zur Wand nehmen dabei eine Zwischenstellung ein.

Tabelle 3: Unterteilung der Merkmale der im Projekt vorhandenen Temperiersysteme in drei Hauptgruppen und insgesamt neun Untergruppen [Bichlmair 2014].

Hauptgruppe		Untergruppen	
Heizleitung unter Putz	1	Eingeputzt in Mauerwerk	1.1
		Eingebaut in Trockenbau	1.2
		Anordnung im Bodenaufbau	1.3
Heizleitung auf Putz	2	Fester Kontakt zur Wand, Rohr angemörtelt	2.1
		Geringer Kontakt zur Wand, Rohr befestigt	2.2
		Mit Abstand zur Wand montiert	2.3
		Mit Abstand zur Wand hinter Blende „aufgelöste Wandschale"	2.4
Heizleitung in Wandschale	3	Geschlossene Wand-/ Bodenschale	3.1
		Offene Wand-/ Bodenschale	3.2

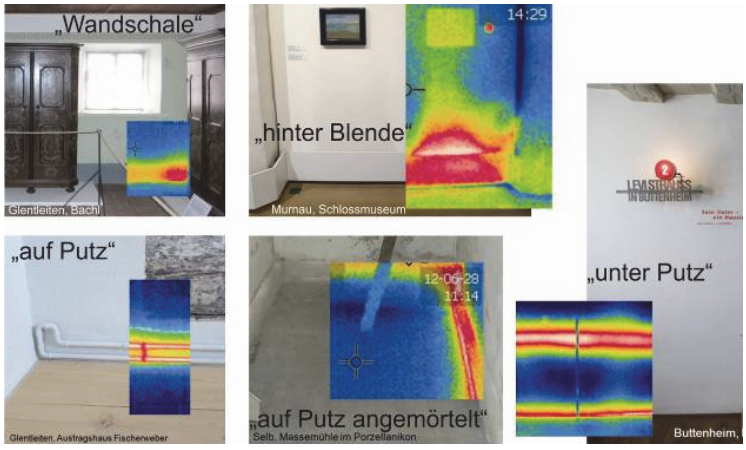


Bild 13: Beispiele von Temperieranlagen mit überlagerter Infrarotaufnahme der jeweiligen Wand bzw. des Temperiersystems [Bichlmair 2014].

Heizflächen der Temperiersysteme

Für die einzelnen Temperiersysteme kommen unterschiedliche wärmeabgebende Heizflächen zum Einsatz. Die am häufigsten eingesetzte Heizfläche bei Temperieranlagen ist das Heizrohr bzw. die Heizleitung. Als Heizfläche dient die Oberfläche des Rohres. Die Wärmeübertragung erfolgt bei eingeputzten Rohren über direkte Wärmeleitung an das Mauerwerk. Bei Temperiersystemen „auf Putz" und „Wandschale" erfolgt die Wärmeabgabe konvektiv an die Raumluft und radiativ an die Umgebung. Bei teilweisem Kontakt der Heizleitung mit Bauteilen erfolgt die Wärmeabgabe über Wärmeleitung an das Bauteil, konvektiv an die Raumluft und über Strahlung.

Für eine Erhöhung der konvektiven Wärmeabgabe werden bei einfachen Bauarten an den Heizrohren weitere Wärmeleiteinrichtungen wie Wärmeleitbleche, Blechstreifen oder Rippen zusätzlich montiert. Mit der Vergrößerung der Heizfläche erhöht sich auch die mögliche Wärmeabgabe. Rohrheizkörper sind Heizrohre mit größerem Durchmesser. Die Oberfläche des Heizrohres erhöht sich mit dem Durchmesser des Rohres, damit die Heizfläche und in Folge die Wärmeabgabe. Bei Wandschalen werden zur Erhöhung der konvektiven Wärmeabgabe im Schalenzwischenraum teilweise auch sogenannte Minikonvektoren eingesetzt. Tabelle 4 gibt einen Überblick der Heizflächen und ordnet diese den Temperiersystemen zu, bei denen diese Anwendung finden. Bild 14 zeigt Beispiele der genannten Heizflächen.

Tabelle 4: Die vor Ort aufgefundenen Heizflächen sind zu den Hauptgruppen der Temperiersysteme zugeordnet. In den Feldern sind die einzelnen Untergruppen aus Tabelle 3 benannt [Bichlmair 2014].

Heizflächen	Temperiersysteme		
	Heizleitung unter Putz	Heizleitung auf Putz	Heizleitung in Wandschale
Heizrohr / Wandfläche	1.1 / 1.3	2.1 / 2.2 / 2.3 / 2.4	3.1 / 3.2
Heizrohre mit Blechstreifen Rippen, Wärmeleitlamellen	1.2	2.3 / 2.4	3.1 / 3.2
Rohrheizkörper		2.3 / 2.4	
Minikonvektoren / Sockelheizleiste		2.3 / 2.4	3.1 / 3.2



Bild 14: Beispiele von Heizflächen von Temperiersystemen [Bichlmair 2014]

Beispiele von Einsatzzwecken und Zieltemperaturen

Temperieranlagen werden für verschiedenste Gebäudetypen und Einsatzarten verwendet. Der Einsatzzweck in den am Projekt beteiligten Museen reicht von Frostfreihaltung bis zu thermischer Behaglichkeit und Bauteiltrocknung. Bei feuchter Bausubstanz werden Temperieranlagen häufig zur Trockenlegung oder Trockenhaltung bzw. zur Verhinderung von Taupunktunterschreitung angewendet. Hier spielen Raumtemperaturen zunächst eine untergeordnete Rolle.

Eine weitere Hautpanwendung ist die Erhaltung von Exponat-Gebäuden in Freilichtmuseen [Assmann et al 1988]. Hier sind konservatorische Ziele zur Erhaltung der Bausubstanz und Einrichtung maßgebend; häufig wird eine Mindesttemperatur oder ausreichende Temperaturerhöhung zur Feuchtestabilisierung angestrebt. Bei musealer Nutzung von Gebäuden mit Ausstellung sensibler Exponate ist meist ein höherer, konstanterer Temperaturbereich aus konservatorischen Gründen und für den Besucherkomfort erforderlich. Hier können je nach Vorgaben des Museums unterschiedliche Temperaturen gefordert werden, die bis zu üblichen Temperaturen für thermische Behaglichkeit des Menschen bei über 20 °C reichen. Weiter wird unterschieden in geforderte konstante Raumtemperaturen oder das Zulassen von geringeren Temperaturen in besonders kalten Perioden, die als gleitende Raumtemperaturen bezeichnet werden. Die Wahl der Zieltemperatur und das Zulassen von gleitenden Temperaturen sind entscheidende Größen für die Dimensionierung von Temperieranlagen. Für eine Einteilung und Unterscheidung der Einsatzarten und Anwendungen dient nachfolgende Übersicht in Tabelle 5.

Bei der Übersichtstabelle von [Löther et al 2007] fehlen weitere konservatorische Ziele bei musealer Nutzung wie in Tabelle 5 mit aufgenommen. Häufig werden Temperieranlagen für mehrere Einsatzarten konzipiert und baulich umgesetzt. So kann eine Temperieranlage abschnittsweise als Bauteiltemperierung und / oder als Wärmebrückenheizung ausgeführt werden, mit dem zusätzlichen Ziel der Feuchtestabilisierung des Raumklimas. Bei falscher Kombination oder Auslegung ohne Unterscheidung der verschiedenen Einsatzbereiche können sich im Betrieb ein hoher Energieverbrauch und ein konservatorisch ungünstiges Raumklima einstellen.

Tabelle 5: Beispiele von verschiedenen Einsatzarten und Anwendungsfällen von Temperieranlagen mit unterschiedlichen angestrebten Raumtemperaturen [Bichlmair 2014]

Raumtemperatur [°C]	Einsatzart	Anwendungszweck	Anwendungsbeispiel
≥ 20	Raumbeheizung konstant	Behaglichkeit	Ausstellungen mit längerem Besucheraufenthalt
< 20	Raumbeheizung Gleitender Jahresgang	Klimastabilisierung Relative Luftfeuchte	Ausstellung mit zügigerem Besucherdurchgang
> 4	Feuchtestabilisierung, Mindesttemperatur	Vermeidung von Schimmelpilzwachstum / Frostschäden	Freilichtmuseum Exponat-Gebäude
-	Wärmebrückenheizung	Vermeidung Tauwasserausfall	Massives Mauerwerk erdberührter Bauteile
-	Bauteiltemperierung	Trocknung von Bauteilen	Erdberührte Bauteile

Abgrenzung der Temperierung zu anderen Heizungssysteme

Die Unterscheidung und Abgrenzung zu anderen Heizsystemen verschwimmen zum Teil bei Auslegung und Anwendung der Temperierung, die bestehenden Heizsystemen ähneln. Bei Anordnung mehrerer Heizrohre neben- oder übereinander (bei unter Putz Ausführung) beispielsweise ähnelt die Temperierung einer Flächenheizung. Hauptmerkmal der Temperierung ist

nicht die flächige, sondern die längenorientierte Anwendung, wie bei [Großeschmidt 1992] beschrieben. Mit dem Begriff der Hüllflächentemperierung lässt sich die längenorientierte Temperierung gegenüber den flächigen Systemen nicht sinnvoll abgrenzen. Bei der Verwendung von Kleinkonvektoren, Rohrheizkörpern oder mehreren Rohren neben- oder übereinander (bei auf Putz Montage) ähnelt die Temperierung unter Umständen der Heizkörperheizung. Häufig werden Heizkörper zudem mit ähnlich hohen oder höheren Vorlauftemperaturen betrieben wie Temperieranlagen. Eine deutliche Abgrenzung der Heizkörperheizung ist jedoch die konzentrierte und häufig konvektiv optimierte Wärmeabgabe. Bei der Temperierung wird bei richtiger Auslegung auf eine gewisse Beschränkung der konvektiven Wärmeabgabe Wert gelegt, um konservatorische und energetische Nachteile, die aus zu starker konvektiver Wirkung entstehen können, zu vermeiden. Ein weiteres Merkmal der Temperierung ist die in der Regel nicht vorhandene Verteilleitung, wie bei anderen Heizsystemen üblich und (nach heutigen Maßstäben) erforderlich. Die Verteilleitung entspricht bei der Temperierung größtenteils der Heizfläche. Bei älteren Bauweisen der Heizkörperheizung wurde zum Teil die Verteilleitung ebenfalls ungedämmt ausgeführt und war damit, entsprechend dem Prinzip der Temperierung, auch Teil der Heizfläche. Unter Berücksichtigung dieser prinzipiellen verschiedenen Ansätze ist die Technik der Temperierung klar abgegrenzt zu den vorhandenen Heizsystemen und kann als eigenes Heizsystem definiert werden. In Tabelle 6 wird eine Übersicht zu den unterschiedlichen Ausprägungen der Merkmale der Flächenheizung und Heizkörperheizung zur Temperierung gegeben.

Tabelle 6: Übersicht zu den Merkmalen der Flächenheizung, Heizkörperheizung und Temperierung im Vergleich [Bichlmair 2014]

Heizsystem	Heizfläche	Wärmeabgabe [W/m²], [W/m]	Verteilung	Auslegungs-temperatur [°C]
Flächen-heizung	Wand (Boden, Decke)	Gering / m² bei großer Fläche	Verteilleitung (gedämmt)	Niedrige Vorlauftemperatur ca. 30 - 50
Temperierung	Wand oder Heizrohr	Gering / m bei großen Längen	Verteilleitung = Heizfläche	Niedrige bis hohe Vorlauftemperatur ca. 30... 50 - 70
Heizkörper-heizung	Heizkörper	Hoch / m² bei kleiner Fläche	Verteilleitung (gedämmt)	Hohe Vorlauftemperatur ca. 50 - 90

Nomenklatur zur Temperierung

Für die Technik der Temperierung, unterschiedlichen Temperieranlagen, verschiedenen möglichen Heizflächen und unterschiedlichen Einsatzarten und Anwendungszwecke finden sich in der Literatur unterschiedliche Begriffe: Temperierung, Mauerkronenheizung, Temperiermethode, Temperiersystem, Temperieranlage, Sockelheizung, Sockeltemperierung, Sockelheizleiste, Temperierband, offene und geschlossene Temperierformen, Bodentemperierung, Temperier-Bodenschale, Temperierschale, Temperier-Wandschale, Wand-Boden-Temperierung, Wandtemperierung, Fundamentheizung, vertikales Temperiersystem, Bauteiltemperierung, Heizrohr-Temperieranlage, Museumstemperierung, Hüllflächentemperierung, Hüllflächenheizung. Als Hauptbegriffe sind „Temperierung“ für die Technik der Temperierung und „Bauteiltemperierung“ für unter Putz Systeme bzw. Systeme mit Wandkontakt geeignet.

4.1.3 Vorüberlegungen mit Simulationsrechnung und Folgerung für das Messkonzept

Zur Einschätzung der Auswirkung der Temperierung auf das Bauteil und zur Ermittlung der Anordnung von Temperatursensoren zur messtechnischen Erfassung des realen Temperaturverhaltens in situ wird eine erste hygrothermische zweidimensionale Simulationsrechnung erstellt. Das Rechenmodell wird mit konstanten Randbedingungen der anliegenden Temperaturen für innen mit 20 °C und außen mit -5 °C sowie konstanten Wärmeübergangsbedingungen innen mit 8 W/m²K und außen mit 17 W/m²K erstellt. Die Temperierung wird als anliegende Temperatur mit einem frei gewählten Wärmeübergangskoeffizienten von 1000 W/m² implementiert.

Ausgehend vom Heizrohr erhöht sich je nach Material, Einbausituation und Heiztemperatur die Oberflächentemperatur der inneren Wandoberfläche. Die Außenwandwandoberfläche erwärmt sich auf der Höhe der Heizleitung im Vergleich zur Innenoberfläche nur marginal. Das Diagramm in Bild 15 zeigt die Oberflächentemperaturen einer beispielhaften massiven Außenwand. Links im Bild sind im Wandschnitt die berechneten Isothermen, beginnend bei 20 °C (Raumtemperatur), sowie das hygrische Feld dargestellt. Der schnelle Temperaturabfall im Bereich der Heizleitung erklärt sich aus der typischen quadratischen Abnahme bei radialsymmetrischer Geometrien, in der die Fläche mathematisch mit einer quadratischen Funktion ansteigt, die Entfernung jedoch linear abnimmt. Der Isothermenverlauf zeigt, dass der Einfluss der Wärmeleitung im Bauteil bei ca. 0,5 m noch gut zu erkennen ist und nach ca. 1,0 m praktisch nicht mehr vorhanden. Damit ist der Mindestabstand für eine praktisch unbeeinflusste Messung der Oberflächentemperatur der Außenwand vorgegeben. Entsprechend dem Temperaturverlauf im Bauteil stellt sich vor allem im Bereich der Temperierung eine geringere Bauteilfeuchte ein.

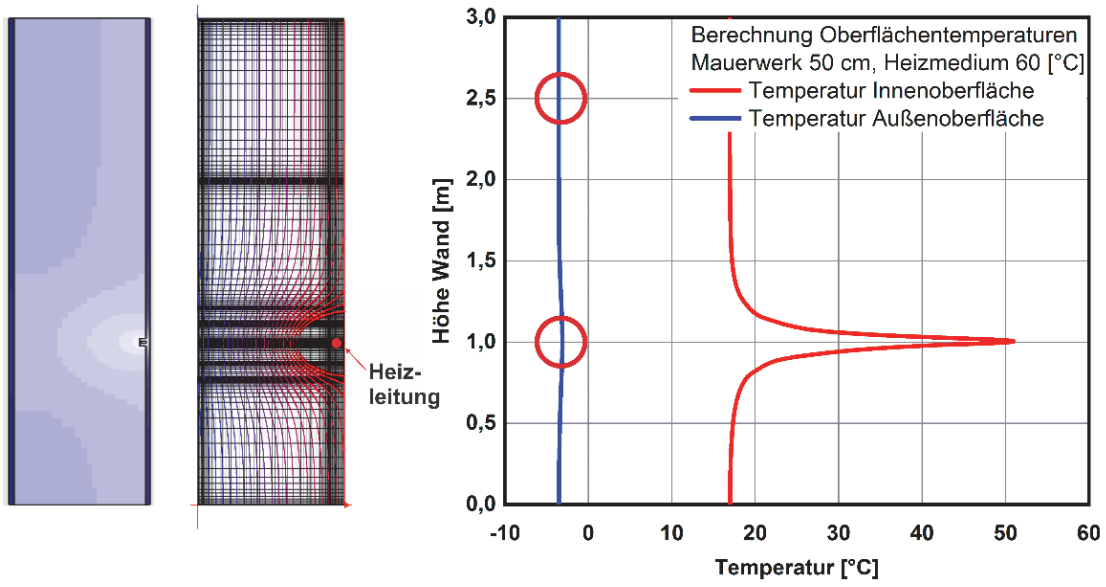


Bild 15: Oberflächentemperaturen innen und außen (Außenwand aus Vollziegel, mit konstanten Randbedingungen) mit einer Heizleitung unter Putz über die Wandhöhe. Links: Hygrisches Feld der Außenwand. Mittig: Temperaturfeld der Außenwand. Wandgröße: ca. 3 m Wandhöhe und ca. 0,5 m Wanddicke. Rechts: Zugehöriger Temperaturverlauf an der Außen- und Innenoberfläche der Wand [Bichlmair 2014]

Die Simulation vereinfacht die tatsächlichen Verhältnisse stark. Insbesondere sind die Randbedingungen, vor allem im Bereich der hohen Wandtemperaturen, als konstant angenommen. An der Wandoberfläche, die wärmer ist als die Umgebungsluft (hier 20 °C), kommt es zur Erwärmung der Raumluft. In Bild 15 ist dies der Bereich, in der die berechnete Oberflächentemperatur über der 20 °C-Linie liegt. Die erwärmte Raumluft steigt durch die geringere Dichte gegenüber der nicht erwärmten Raumluft nach oben (natürliche Konvektion) und beeinflusst wie-

derum die Oberflächentemperatur der Wand. Diese physikalisch tatsächlich vorhandenen Effekte sind in dem Simulationsergebnis nicht berücksichtigt. Daraus folgt, dass Abweichungen zu den berechneten Oberflächentemperaturen, den Effekten aus anderen Wärmeübergangskoeffizienten und wandnaher Auftriebsströmungen zugeordnet werden können. Die tatsächliche Temperaturverteilung an der Oberfläche kann durch eine Infrarot-Thermographie erfasst und zur Einschätzung konvektiver Effekte mit der Temperaturverteilung aus der zweidimensionalen Berechnung verglichen werden.

Berechnete Oberflächentemperatur außen unterschiedlicher Wandaufbauten mit realem Außenklima

Mit der ersten Simulationsrechnung wurde eine geringe Temperaturerhöhung an der Außenoberfläche bei konstanter Außentemperatur auf Höhe der Heizleitung festgestellt. Vergleicht man die Oberflächentemperaturen an der Außenoberfläche auf Höhe der Temperierleitung und in einem größeren Abstand dazu (ca. 1 m, siehe rote Kreise in Bild 15), ergibt sich eine Temperaturdifferenz. Für eine erste Einschätzung der zu erwartenden Temperaturverläufe in situ werden die Auswirkungen von zwei Heizleitungen mit einem Abstand von 10 cm in einer dünnen Wand sowie von einer Heizleitung in einer dickeren Wand (erstes Modell) bei konstanter Heizleitungstemperatur von 60 °C berechnet, siehe Bild 16. Abweichend zu den Randbedingungen des ersten Modells erfolgen die Berechnungen instationär über einen Jahresgang mit Holzkirchner Außenklima. Die Temperaturdifferenz beträgt bei der dünnen Wand aus Sandstein mit zwei Heizleitungen gemäß Berechnung im Mittel ca. 2,7 K, bei der dickeren Wand aus Ziegelmauerwerk mit einer Heizleitung ca. 1,3 K. Daraus folgt, dass die zu erwartende Temperaturdifferenz bei einer In-situ-Messung mit einer Genauigkeit der Temperaturmessungen von ±0,2 K (oder besser) nachgewiesen werden kann.

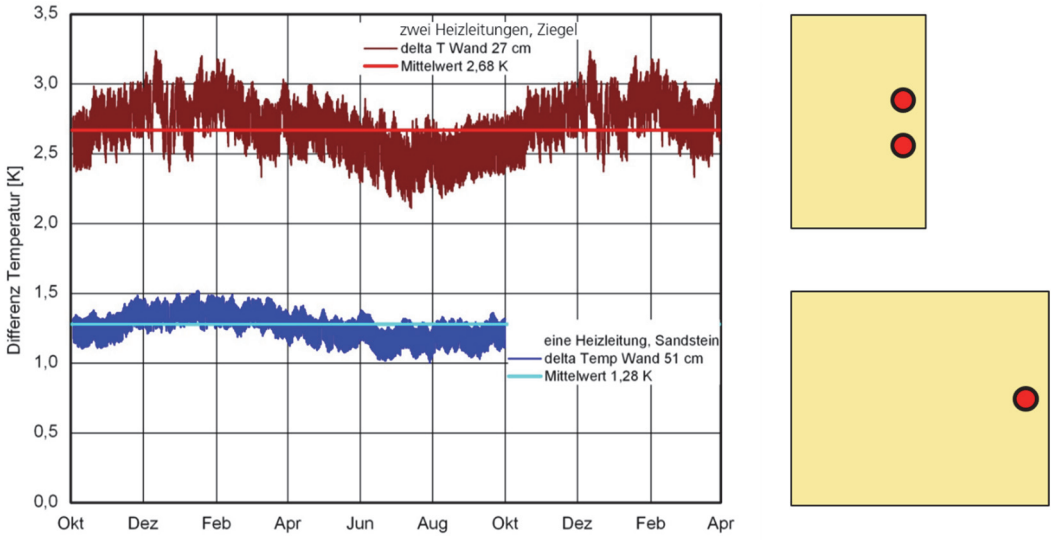


Bild 16: Differenztemperaturverlauf außen, Klima Holzkirchen, Temperatur Heizrohr 60 °C, Wanddicken 51 cm und 27 cm, 1 bzw. 2 Heizleitungen, historischer Ziegel bzw. Sandstein

4.1.4 Messkonzept Feldstudien

Messkonzept temperierte Außenwand und Raumklima

Das für die In-situ-Messungen erstellte Grundmesskonzept (Bild 17) berücksichtigt die aus den Vorüberlegungen abgeleiteten Fragestellungen. Mit der Messung direkt an der Heizleitung (Temperierung) wird die maximale Oberflächentemperatur der Wand erfasst (Pos. 2a in Bild 17). Zur Beurteilung der sich einstellenden Oberflächentemperatur an der Außenwand innen

ohne Einfluss der Temperierung erfolgt die Messung in ca. 1 m Abstand zur Heizleitung (Pos. 2b in Bild 17). An der Position 4a erfolgt die Messung der Oberflächentemperatur der Außenwand an der Außenseite auf Höhe der Heizleitung. Zusätzlich wir die Oberflächentemperatur in ca. 1 m Abstand im von der Heizleitung praktisch unbeeinflussten Wandbereich gemessen (Pos. 4b). Aus der Temperaturdifferenz zwischen den Messpositionen 4a und 4b ergibt sich der Nachweis der thermischen Auswirkung der Heizleitung auf das Mauerwerk.

Die Raumlufttemperatur und Feuchte wird im Nahbereich der Außenwand mit ca. 10 cm Abstand zur Außenwand und ca. 1 m über der Temperierleitung erfasst und mit dem Raumklima in etwa in Raummitte verglichen (Pos. 2c und Pos. 3 in Bild 17). Daraus ergeben sich Aussagen zur Raumklimaverteilung.

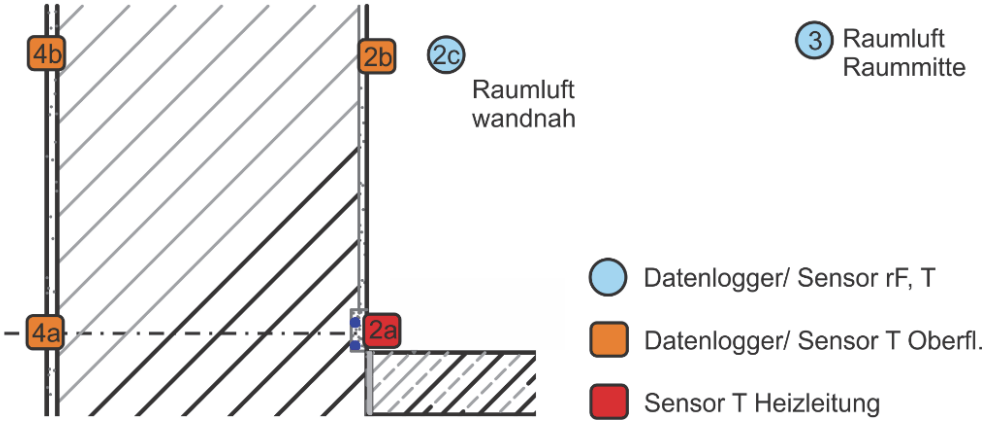


Bild 17: Standard-Messaufbau für die Erfassung und Bewertung der Auswirkungen einer Wand- und Raumbeheizung mit einer Temperierung

Das Messkonzept wird in den Gebäuden der Feldstudien aufgebaut und für einzelne Fragestellungen oder bauliche Besonderheiten angepasst. In allen untersuchten Gebäuden wird mindestens eine Raumklimamessung durchgeführt. Die Messung des Raumklimas mit der Erfassung der relativen Feuchte und der Temperatur dient als grundlegende Aussage zu Raumklimata, beeinflusst durch Beheizung mit Temperierung.

Zusätzlich erfolgen Messungen und Untersuchungen mit einer Infrarotkamera zur Erfassung des Gesamteindruckes der Oberflächentemperaturen und gezielten Messung der Oberflächentemperaturen für spezielle Bereiche. Die Messdaten sind erforderlich zur Bestimmung von Randbedingungen für die geplanten computergestützten Simulationen und Feststellung der Wirkung der Temperierung auf die Oberflächentemperaturen der Wand.

In Tabelle 7 sind die untersuchten Gebäude mit den durchgeführten Detailmesskonzepten aufgelistet. Bild 18 zeigt den realisierter Messaufbau mit Messbaum am Beispiel des Bauernhofmuseums Jexhof in Schöngeising. Der Temperatursensor für die Erfassung der Heiztätigkeit wurde bei diesem Beispiel auf die wärmste Stelle über der Heizleitung (Zuordnung mit Hilfe einer Infrarotkamera) geklebt. In der im Bild überlagerten IR-Aufnahme (1) ist der Temperatursensor gut erkennbar. An dem Messbaum ist für Museumsbesucher ein Informationsschild (2) zur der Messung angebracht. Direkt unter dem Schild ist der Datenlogger montiert (3), an dem zugleich die Messung des lokalen Raumklimas in ca. 10 cm Abstand zur Außenwand erfolgt. Knapp darunter ist das Messkabel und der Temperatursensor für die Temperaturmessung an der Oberfläche in ca. 1 m Abstand über der Temperierleitung sichtbar (4). Die Messdaten werden in einem 10-Minunten-Intervall auf dem Datenlogger abgespeichert.

Tabelle 7: Übersicht der Gebäude und Messziele der Messkonzepte „wandnahes Mikroklima“ und „Temperatur Außenwand“

Gebäude	Wandnahes Mikroklima	Temperatur Außenwand	
		Wand innen	Wand außen
Fischerweber Hof, Glentleiten	x	x[1)]	x
Stadtmuseum, Bad Reichenhall	x	x[1)]	x
Alte Schäfflerei, Benediktbeuern	x	x[1)]	x
Jexhof, Schöngeising		x[1)]	x
Heimatmuseum, Oberammergau	x	x[2)]	
Fränkisches Museum Feuchtwangen	x	x[2)]	
Kapelle St. Renatus, Lustheim	x	x[2)]	x

1) Messung für Temperaturabfall zwischen Heizleitung und Putzoberfläche
2) Messung für Auswirkung auf Kulturgut

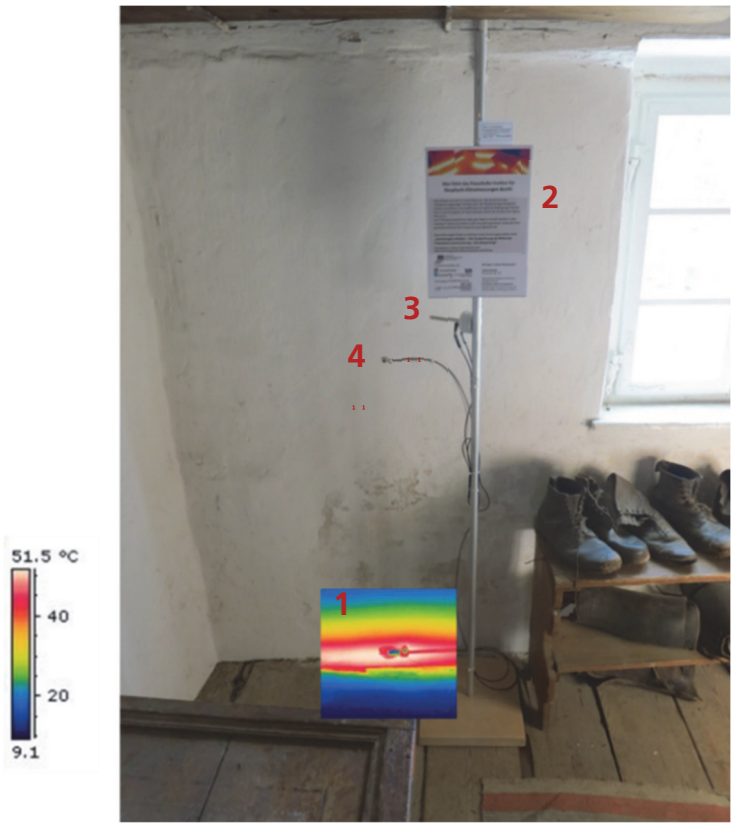


Bild 18: Realisierter Messaufbau mit Messbaum am Beispiel des Bauernhofmuseums Jexhof in Schöngeising mit Messanordnung und überlagerter IR-Aufnahme auf der Ostseite der Außenwand des ehemaligen Wohnhauses

Messkonzept Leistungsmessung Temperierung

Für die Erfassung der von der Temperierung abgegebenen Wärmeleistung werden Durchflussmesser und Temperatursensoren im Vor- und Rücklauf in die zu untersuchende Heizschleifen eingebaut. Hierfür werden die Messdaten in einem 1-Minuten-Intervall erfasst und abgespeichert. In Tabelle 8 sind die Gebäude, in denen Leistungsmessungen vorgenommen wurden, mit den untersuchten Temperiersystemen und der Anzahl der vermessenen Temperierschleifen aufgelistet. Bild 19 zeigt exemplarisch den Messaufbau der Leistungsmessung von zwei Temperierleitungen in einem Gebäude und die Einbindung in das bestehende hydraulische System der Heizungsanlage.

Tabelle 8: Übersicht der Gebäude mit der jeweiligen Anzahl der einzelnen in situ vermessenen Heizschleifen und Zuordnung der unterschiedlichen Einbausituationen der Temperiersysteme

Gebäude	Unter Putz	Auf Putz mit Wandkontakt	Auf Putz ohne Wandkontakt	Offene Wandschale
Alte Schäfflerei, Benediktbeuern	3			
Stadtmuseum, Bad Reichenhall	3			
Freilichtmuseum, Glentleiten	2	2		
Depot, Schweinfurth			2	
Stadtmuseum, Erlangen				2
Kloster Aldersbach	2			

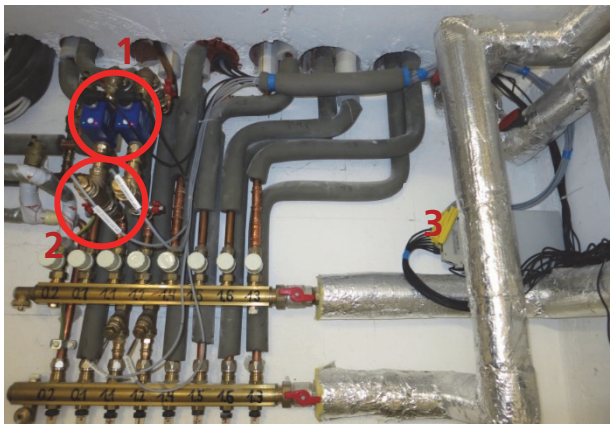


Bild 19: Heizungsverteiler für einzelne Temperierschleifen eines Teilbereiches des Gebäudes. In zwei Temperierschleifen wurde jeweils ein Durchflussmesser (roter Kreis 1) sowie eine Temperaturmessung in der Vor- und Rücklaufleitung installiert (roter Kreis 2). Rechts im Bild ist halb verdeckt der Datenlogger für die Aufzeichnung der Messdaten platziert (3).

Messkonzept Raumklimaverteilung durch Temperierung

Für die Erfassung der Raumklimaverteilung mit relativer Feuchte und Temperatur werden in den Feldstudien neben der wandnahen Messung und Erfassung des Klimas in Raummitte Messungen über die Raumhöhe zur Erfassung der vertikalen Klimaverteilung platziert. In Tabelle 9 sind die Gebäude mit den untersuchten Detailmesskonzepten aufgelistet. In Bild 20 ist exemplarisch die Innenansicht der Zollingerhalle des Orgelmuseums abgebildet, in der die Messung des vertikalen Raumklimaprofils mit roten Kreisen eingezeichnet ist. Die meisten untersuchten Gebäude haben mehrere Räume, die über mehrere Geschosse verteilt sind. In der Regel werden die Untersuchungen auf wenige Räume begrenzt. Bei einigen Gebäuden werden umfangreichere Messungen zu der Raumklimaverteilung größerer Gebäudebereiche durchgeführt.

Tabelle 9: Übersicht der Gebäude und Messziele der Messkonzepte „wandnahes Mikroklima“ und „Raumklimaverteilung“ durch Temperierung

Gebäude	wandnahes Mikroklima	Raumklimaverteilung	
		vertikal	horizontal
Fischerweber Hof, Glentleiten	x		x
Stadtmuseum, Bad Reichenhall	x		x
Orgelmuseum, Valley		x	x
Alte Schäfflerei, Benediktbeuern	x	x	x
Depot, Schweinfurt	x	x	x
Stadtmuseum, Erlangen	x		



Bild 20: Zollingerhalle; die Orgel aus dem Schröderstift füllt fast die komplette Raumhöhe (8,25 m) aus. Die Positionen der Sensoren für die vertikale Raumklimaverteilung sind rot eingekreist.

Messkonzept und Anordnung der Temperierleitungen im Messraum 3 des bauphysikalischen Labors in der Alten Schäfflerei in Benediktbeuern

Die Messungen in der Alten Schäfflerei werden um zusätzliche Temperatur- und Wärmestrom-Messungen gegenüber den Messkonzepten der Feldstudien erweitert. Es sind zwei Wärmestromsensoren montiert. Ein Wärmestromsensor ist in ca. Wandmitte oberhalb der Temperierung angeordnet. Der zweite Wärmestromsensor ist direkt auf der Temperierung mittig auf der Vor- und Rücklaufleitung montiert. Zur Homogenisierung der Wärmeströme ist zwischen Wärmeflussscheibe und Putzoberfläche ein ca. 1 mm dickes Kupferblech aufgeklebt, siehe Bild 21. Die Temperierleitung ist rot gestrichelt bzw. gepunktet eingezeichnet. Die einzelnen Abschnitte der Heizleitungen werden als Sockelschleife (HL1) und Brüstungsschleife (HL2) bezeichnet (Bild 21). Zur Vermeidung von Verwechslungen wird die Sockel-Brüstungsschleife als große Schleife (HL3) bezeichnet (Bild 22). Die einzelnen Leitungsabschnitte können unabhängig voneinander betrieben werden. Ein kombinierter Betrieb ist nur mit Sockelschleife (HL1) und Brüstungsschleife (HL2) möglich. Die Temperatursensoren sind im vertikalen Schnitt im Regelquerschnitt der Außenwand eingezeichnet (Bild 23). Die wandnahe Messung der Lufttemperatur im Abstand von 10 cm zur Außenwand erfolgt in drei Höhen: 10 cm, 170 cm und 255 cm.

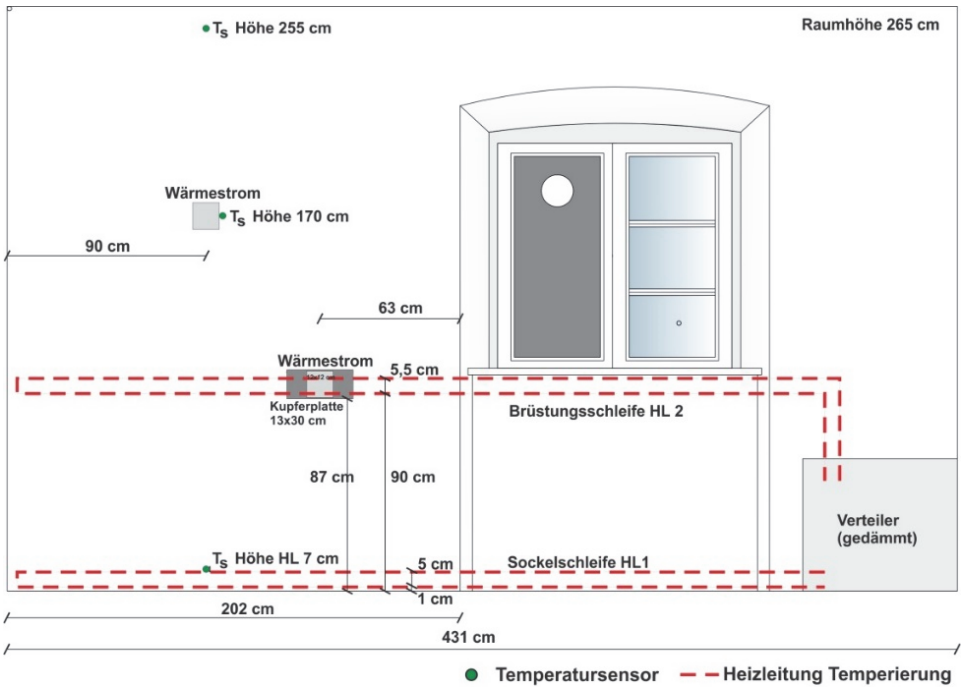


Bild 21: Wandansicht der Außenwand im Messraum 3 der Alten Schäfflerei von innen. Die rot gestrichelten Linien zeigen den Verlauf der unter Putz verlegten Temperierung mit unterer Sockelschleife (HL1) und oberer Brüstungsschleife (HL2), die auch einzeln betrieben werden können.

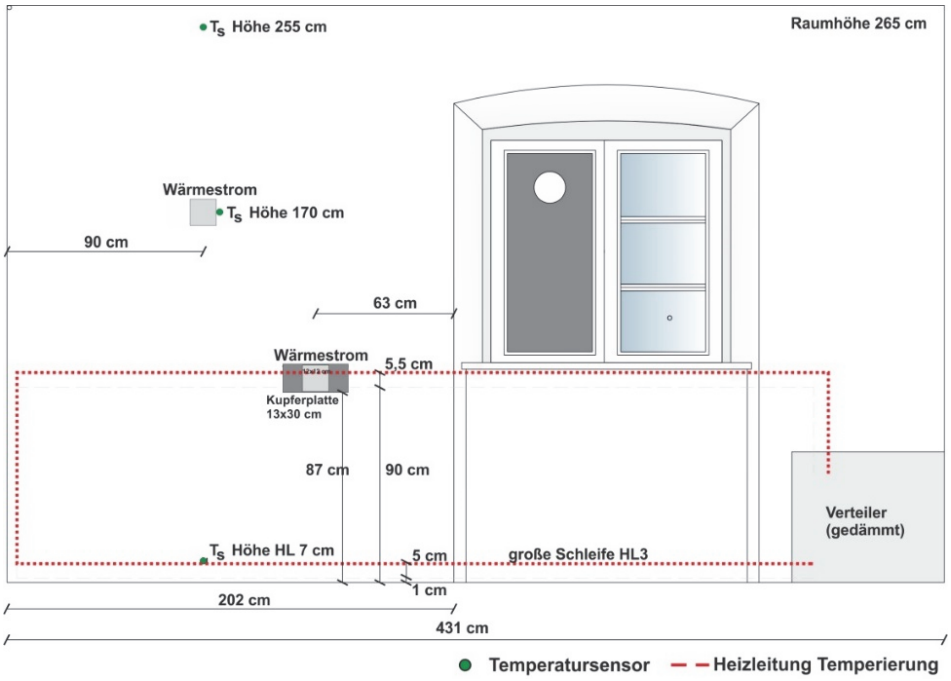


Bild 22: Wandansicht der Außenwand im Messraum 3 der Alten Schäfflerei von innen mit Anordnung der Temperierung (gepunktete rote Linie) als große Schleife (HL 2)

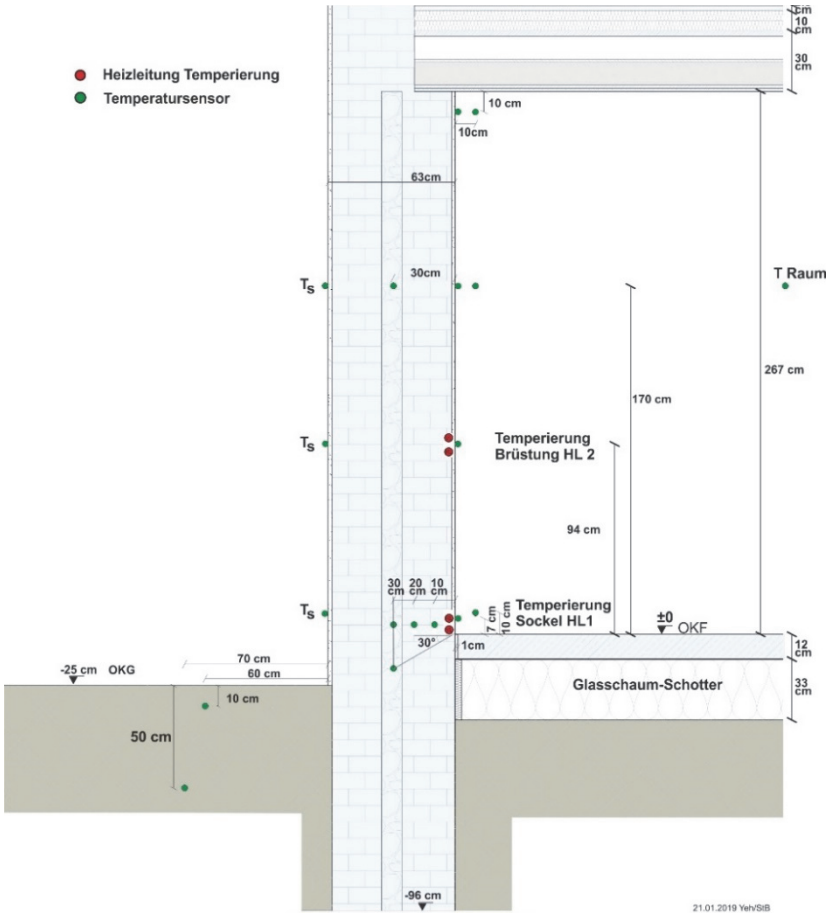


Bild 23: Vertikaler Schnitt der Außenwand im Messraum 3 der Alten Schäfflerei. Die roten Punkte zeigen die Lage der unter Putz verlegten Temperierung am Sockel (HL1) und an der Brüstung (HL2).

Im Mauerwerk sind weitere Temperatursensoren platziert. Zwischen den Heizleitungen der Sockelschleife sind ausgehend von der Wandoberfläche drei Temperatursensoren horizontal montiert, bei 10 cm, 20 cm und 30 cm. Auf der Höhe der Heizleitungen sowie in 170 cm Höhe sind jeweils auf der Innen- und Außenoberfläche Temperatursensoren angeordnet. Darüber hinaus

sind weitere Temperatursensoren zur Erfassung der Temperaturschichtung in Raummitte auf Höhe 10 cm, 60 cm, 110 cm und 170 cm sowie an den Innenwandoberflächen und Boden- und Deckenoberflächen montiert.

4.1.5 Einsatz von Sensorik und Messdatenerfassung für Messung in Gebäuden traditioneller Bauweise

Zur Beurteilung der Wirkungsweise werden auch Bauteiltemperaturen und Temperaturen der Heizflächen der Temperieranlagen erfasst. Messungen in historischen Gebäuden für bauphysikalische Konzepte mit Erfassung der Raumklimaverteilung und Temperaturen an Innenwandoberflächen werden z.B. bei [Garrecht 2005] oder [Garrecht et al 2015] dargestellt. Die Befestigung der Sensoren in den denkmalgeschützten Gebäuden stellt dabei hohe Anforderungen an die schadensfreie Montage. Insbesondere ist die Anbringung von Sensoren auf wertvollen Oberflächen eine Herausforderung. Hierfür wurden bestehende Sensormontagen mit den Methoden aus der Restaurierung weiterentwickelt [Raffler et al 2015; Raffler et al 2019].

Reversible Sensormontage

Durch die Montage von Sensoren auf Oberflächen können diese beschädigt werden. Bei normalen Gebäuden wird die in der Regel geringe Oberflächenbeeinträchtigung toleriert. Bei denkmalgeschützten Gebäuden bzw. wertvollen Oberflächen sind mögliche Schädigungen auszuschließen oder auf ein tolerierbares Maß zu reduzieren. Für die Messungen auf Oberflächen von denkmalgeschützten Gebäuden und Kulturgut wurden deshalb umfangreiche Voruntersuchungen und Testmessungen durchgeführt. Bei der Montage von Sensoren zur Erfassung der Oberflächentemperatur muss während der gesamten Messperiode ein zuverlässiger Kontakt zwischen Sensor und zu messender Oberfläche sichergestellt sein. Es wurden für verschiedene Messaufgaben und -situationen zwei unterschiedliche Methoden angewendet. Neben der Montage auf Japanpapier erfolgten weitere Montagen mit Cyclododecan. Die Montagemethode, Messgenauigkeit und das Langzeitverhalten der reversibel montierten Sensoren wurden untersucht und für die angestrebte Messgenauigkeit als ausreichend genau bewertet [Raffler et al 2015; und Raffler et al 2019].

Verwendete Sensoren und Messgenauigkeit

Die Messung der relativen Feuchte und Raumlufttemperatur erfolgt mit Kombisensoren, die mit einem kapazitiven Messprinzip die relative Feuchte über die Feuchteaufnahme einer sorptionsfähigen Schicht und die damit verbundene Änderung der Dielektrizitätskonstante erfassen. Die verwendeten Kombisensoren haben eine durch den Hersteller angegebene Genauigkeit zur Messung der relativen Feuchte (rF) und Temperatur von ±2 % rF in dem Messbereich von 10 % rF bis 90 % rF und ±0,3 °K in dem Messbereich von 0 °C bis 60 °C.

Die verwendeten PT100 Temperatursensoren wurden mit einer Genauigkeit von ±0,1 K über den Messbereich kalibriert. Die Durchflussmesser wurden kalibriert und liegen für den Typ A innerhalb von ±2,5 % in dem überprüften Messbereich zwischen 25 l/h - 350 l/h, für den Typ B ±5 % des Messwertes im Hauptmessbereich zwischen 100 l/h und 500 l/h und für Typ C ±3,5 % des Messwertes im Hauptmessbereich zwischen 30 l/h und 500 l/h. In dem Messbereich zwischen 120 l/h und 240 l/h liegt die Abweichung zur Kalibriermessung bei ±1,5 % für den Typ C. Die verwendeten Wärmeflussscheiben haben laut Hersteller eine Genauigkeit von ±5 % des Messwertes.

Fehlerbetrachtung und Genauigkeit der berechneten Leistung aus den Messungen

Die Genauigkeit der Leistungsmessung des Messaufbaus resultiert aus der Genauigkeit der Temperaturmessung, der Durchflussmessung und die Abweichung der gewählten Materialkennwerte zu den tatsächlichen Materialkennwerten. Die Kennwerte werden für den Mittelwert der zu erwartenden Materialtemperatur gewählt. Der durch die abweichende Temperatur entstehende Fehler ist kleiner 1 % und hat damit nur eine untergeordnete Bedeutung. In die Temperaturmessung geht der absolute Fehler des Messwertes ein, sowie der relative Fehler bei der Messung der Differenztemperatur zwischen der Vorlauf- und Rücklauftemperatur. Dadurch erhöht sich der relative Fehler je kleiner die Temperaturdifferenz der Spreizung ist. Der absolute Fehler der Volumenstrommessung geht als relativer Fehler mit der Berechnung des absoluten Fehlers zum tatsächlichen Messwert ein. Der relative Fehler der Volumenstrommessung wird dadurch größer je kleiner der Volumenstrom (Durchflussmenge) ist. Bei niedriger Spreizung und geringem Durchfluss ist die Leistung klein. Bei einem möglichen größeren relativen Gesamtfehler bleibt dadurch die absolute Abweichung ebenfalls klein. Die hierfür durchgeführte Fehlerrechnung ist in Teilen dem IBP-Bericht zu den vergleichenden Untersuchungen von Heizungssystemen [Kilian et al 2015] entnommen, die durch den Autor erstellt wurde.

(Gl. 11) $$\pm F_T = \sqrt[2]{F_{T.V}{}^2 + F_{T.R}{}^2} \quad [K]$$

F_T	[K]	Fehler Messung Vor- und Rücklauftemperatur
$F_{T,V}$	[K]	Messfehler Temperaturmessung Vorlauf
$F_{T.R}$	[K]	Messfehler Temperaturmessung Rücklauf

(Gl. 12) $$\pm F_\sigma = \frac{F_T}{\sigma} \quad [\%]$$

F_σ	[%]	Fehler Messung Spreizung
σ	[K]	Spreizung
F_T	[K]	Fehler Messung Vor- und Rücklauftemperatur

(Gl. 13) $$\pm F_{\dot{Q}} = \sqrt[2]{F_{\dot{v}}{}^2 + F_\sigma{}^2} \quad [\%]$$

$F_{\dot{Q}}$	[%]	Fehler Leistungsberechnung
$F_{\dot{v}}$	[%]	Fehler Messung Volumenstrom
F_σ	[%]	Fehler Messung Spreizung

Beispielhafte Fehlerbetrachtung für ausgewählte Messergebnisse

Eine Durchflussmenge von 0,5 l/min (bei Durchflussmesser Typ C) und eine Spreizung von 1,4 K ergibt bei der Leistungsmessung in der Alten Schäfflerei für die Brüstungsschleife (HL2) eine Wärmeabgabe von 5,6 W/m. Es ergibt sich daraus ein relativer Fehler $F_{\dot{Q}}$ von ±10,7 % und ein absoluter Fehler von ±0,6 W/m. Bei einer Durchflussmenge von 1,6 l/min und einer Spreizung von 2,8 K wird eine Wärmemenge von 33,3 W/m abgegeben. Der relative Fehler $F_{\dot{Q}}$ beträgt hier ±6,1 % und der absoluter Fehler ±2,0 W/m. Die Durchflussmenge von 2,5 l/min und einer Spreizung von 3,0 K ergibt bei der großen Schleife (HL3) eine Wärmeabgabe von 54,8 W/m. Der relative Fehler $F_{\dot{Q}}$ beträgt, bei einer Genauigkeit der Durchflussmessung von ±1,5 %, rund ±4,9 % und ergibt damit einen absoluten Fehler von maximal ±2,7 W/m.

4.2 Messung der Wärmeabgabe der Temperierung in situ

Die Messung der Wärmeabgabe und Darstellung erfolgt abgestuft mit unterschiedlichen Methoden. Ein wesentliches Merkmal ist die Erfassung im realen Betrieb des Gebäudes. Zusätzlich zur Messung in museal genutzten Gebäuden werden zur Reduzierung der Parameter, die die Wärmeabgabe beeinflussen, Messungen in einem bauphysikalischen Labor in dem denkmalgeschützten Gebäude der Alten Schäfflerei in situ durchgeführt.

Die einfachste Art der Erfassung der Wärmeabgabe ist die globale Erfassung von Energieverbräuchen, wie z.B. verbrauchte Menge des Energieträgers über eine bestimmte Periode, z.B. mit Ablesung des Strom- oder Gaszähler oder Auswertung von Wärmemengenzählern der Heizanlage. Die verbrauchte Menge Energie wird dann auf die gesamte Leitungslänge der Temperieranlage pro Stunde umgerechnet. Im Ergebnis ergibt sich eine gemittelte Wärmeabgabe pro laufenden Meter Heizrohr. Diese Methode beinhaltet Bereitstellungsverluste und Ungenauigkeiten in der Erfassung der verlegten Länge der Temperierleitungen. Zudem werden häufig unterschiedliche Varianten der Leitungsverlegung innerhalb eines Gebäudes ausgeführt und die Leitungen in unterschiedliche Bauteilanordnungen und Verleganordnungen verbaut. Dies führt zu einer Mittelung der Wärmeabgabe über alle Bauteile, Verlegeanordnung, Temperier-Varianten und Bereitstellungsverluste. Der Vorteil dieser Methode liegt in den in der Regel einfach zu ermittelnden Energieverbräuchen. Je nachdem, welche Parameter zusätzlich erfasst wurden, kann die Wärmeabgabe auf die Raumtemperatur oder Vorlauftemperatur bezogen werden. Erfahrene Planer nutzen in der Regel diese Methode, um für zukünftige Planungen Faustwerte für die Wärmeabgabe zu erhalten. Im ersten Unterkapitel werden die mit dieser Methode erfassten Anlagen vorgestellt und die ermittelten Wärmeabgaben dargestellt.

Eine wesentlich aufwändigere Methode ist die Erfassung der Wärmeabgabe einzelner Leitungsabschnitte. Der Vorteil dieser Methode besteht in der Erfassung der tatsächlichen Wärmeabgabe einzelner Leitungsabschnitte ohne Bereitstellungsverluste. Die Variabilität der Bauteilgeometrie und Leitungsanordnung im Bauteil sinkt bei geeigneter Auswahl erheblich. Mit der zusätzlichen Erfassung der Einzelparameter der Wärmemengenbestimmung, wie Durchflussmenge, Vor- und Rücklauftemperatur, kann der Einfluss der Parameter auf die Wärmeabgabe untersucht werden. Die zusätzliche Erfassung der Klimarandbedingungen innen und außen ermöglicht eine präzise Beschreibung der Temperaturverhältnisse, bei der die entsprechende Wärmemenge abgeben wird. Die Messungen werden an unterschiedlich verlegten Temperiersystemen durchgeführt. Die Messung der Wärmeabgabe mit Nutzung dient hier zur Feststellung der Energieverbräuche und Wärmeabgaben der Temperierung bei realem instationären Betrieb im Jahresgang bei instationären Klimarandbedingungen.

Für die Erfassung der Auswirkung von einzelnen Parametern werden in dem bauphysikalischen Labor des historischen Gebäudes der Alten Schäfflerei sogenannte Einzelmessung zur Wärmeabgabe durchgeführt. Untersucht werden verschiedene Anordnungen der unter Putz verlegten Temperierung (Bauteiltemperierung). Hier werden die Wärmeabgaben der Temperierung im stationären Betrieb in Phasen von annähernd stationären Klimarandbedingungen durchgeführt. Umfangreiche zusätzliche Messungen ermöglichen die Erfassung weiterer Parameter, die die Wärmeabgabe der Temperierung beeinflussen oder deren Wirkung dokumentieren. Die hierfür entwickelten Messkonzepte werden in den entsprechenden Kapiteln im Detail dargestellt. Die ermittelten Wärmeabgaben bilden die Grundlage zur Überprüfung und Validierung der rechnerisch ermittelten Wärmeabgabe von Temperieranlagen und Abhängigkeiten von einzelnen Parametern. Die Messungen von verschiedenen Temperieranlagen in unterschiedlichen Gebäuden sind erforderlich zur Klärung des Einflusses der auf die Wärmeabgabe einwirkenden Parameter in der realen Anwendung.

4.2.1 Aus Messdaten berechnete Werte

Aus den Messdaten werden neben der Berechnung der abgegebenen Wärme weitere Größen berechnet, die nachfolgend dargestellt werden. Die Wärmeabgabe von Heizflächen ist generell abhängig von der Temperaturdifferenz der Heizflächen-Temperatur und der Raumtemperatur. Diese Differenz wird auch Übertemperatur genannt. Die Beschreibung der Wärmeabgabe der Temperierung erfolgt pro Meter Heizrohr. Die ermittelte Wärmeabgabe der Temperierschleife wird dazu durch die Gesamtlänge der Rohrleitung dividiert. Zur Bestimmung der Übertemperatur wird die mittlere Heizmitteltemperatur, d.h. der Mittelwert zwischen Vorlauf- und Rücklauftemperatur, verwendet und die Differenz zur Raumtemperatur berechnet.

Spreizung σ

Die Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf gibt die Entwärmung des Heizmittels an und wird auch als Spreizung bezeichnet.

(Gl. 14) $$\boldsymbol{\sigma = T_V - T_R} \quad [K]$$

T_V	[°C]	Temperatur Vorlauf
T_R	[°C]	Temperatur Rücklauf

Gesamt-Wärmeabgabe, Leistung $\dot{Q}_{WH,l}$

Mit der gemessenen Durchflussmenge (Volumenstrom) und Temperaturspreizung sowie den Stoffeigenschaften Dichte und Wärmekapazität des Heizwassers wird die Wärmeabgabe (Leistung) der untersuchten Temperierschleife berechnet.

(Gl. 15) $$\boldsymbol{\dot{Q}_{WH,l} = \sigma * c * \rho * \dot{v}} \quad [W]$$

σ	[K]	Spreizung
c	[J/(kg*K)]	Wärmekapazität Heizmittel
ρ	[kg/m³]	Dichte
$\dot{v}$	[m³/s]	Volumenstrom (Durchfluss) Heizmittel

Wärmeabgabe pro Meter Heizrohr $\dot{Q}_{WH}$

Aus der gemessenen Wärmeabgabe des erfassten Leitungsabschnittes wird die Wärmeabgabe pro Meter Heizrohr anhand der Heizrohrlänge des Leitungsabschnittes berechnet.

(Gl. 16) $$\boldsymbol{\dot{Q}_{WH} = \dot{Q}_{WH,l} * \frac{1}{l}} \quad [W/m]$$

l	[m]	Leitungslänge Temperierschleife
$\dot{Q}_{WH,l}$	[W]	Gesamt-Wärmeabgabe, Leistung

Temperatur des Heizmittels an einer Position T_{m,l^*}

Für die Berechnung der Temperatur des Heizmittels an einer beliebigen Stelle zwischen der Vor- und Rücklauftemperatur wird der Abstand l^* zur betreffenden Stelle ab der Vorlauftemperaturmessung benötigt. Liegt die Position an der Stelle der Rücklauftemperaturmessung, entspricht der Abstand l^* der Leitungslänge l. Entspricht l^* der ½ Heizleitungslänge l erhält man aus der Vor- und Rücklauftemperatur das arithmetische Mittel der Heizmitteltemperatur. Voraussetzung hierfür ist eine gleichmäßige Wärmeabgabe über die Leitungslänge bzw. die vereinfachte Annahme einer linearen Abhängigkeit.

(Gl. 17) $$\boldsymbol{T_{m,l^*} = T_V - \sigma * \frac{l^*}{l}}$$ [°C]

l^*	[m]	Teillänge der Temperierschleife
T_V	[°C]	Temperatur Vorlauf
T_R	[°C]	Temperatur Rücklauf

Mittlere Übertemperatur des Heizmittels ΔT

Die mittlere Übertemperatur berechnet sich aus dem Mittelwert zwischen Vorlauf- und Rücklauftemperatur (arithmetische Mittel). Von dieser mittleren Heizmitteltemperatur wird die Raumtemperatur subtrahiert und ergibt damit das arithmetische Mittel der mittleren Übertemperatur des Heizmittels zur Raumlufttemperatur. Die logarithmische Heizmittelübertemperatur wird hier vereinfachend nicht berücksichtigt, da in der Regel bei der Temperierung, wegen der geringen Spreizung, die Bedingung für die Anwendung der arithmetischen Heizmittelübertemperatur eingehalten wird [Schramek 2011].

(Gl. 18) $$\boldsymbol{\Delta T = (T_V + T_R) * \frac{1}{2} - T_i}$$ [K]

T_i	[°C]	Temperatur innen (Raumluft)
T_V	[°C]	Temperatur Vorlauf
T_R	[°C]	Temperatur Rücklauf

Spezifische Leistung der Temperierung q_{WH}

Aus der Wärmeabgabe des erfassten Leitungsabschnittes wird die Wärmeabgabe pro Meter Heizrohr $\dot{Q}_{WH}$ auf eine mittlere Übertemperatur des Heizmittels ΔT bezogen.

(Gl. 19) $$\boldsymbol{q_{WH} = \dot{Q}_{WH} * \frac{1}{\Delta T}}$$ [W/mK]

ΔT	[K]	Mittlere Übertemperatur des Heizmittels
$\dot{Q}_{WH}$	[W/m]	Wärmeabgabe pro Meter Heizrohr

Approximierte Funktion der Wärmeabgabe der Heizleitung $\dot{Q}_{WH,app.}$

Die aus der gemessenen Wärmeabgabe pro Meter Heizrohr ermittelten und auf die mittlere Übertemperatur des Heizwassers bezogen Messpunkte werden mit einer Näherungsfunktion abgebildet. Die approximierte Funktion beinhaltet eine typische Potenz-Abhängigkeit der Wärmeabgabe zur mittleren Übertemperatur der Heizfläche durch einen ansteigenden Wärmeübergangskoeffizienten h_i bei ansteigenden Übertemperaturen. Bei [Schramek 2011] sind Näherungsgleichungen angegeben, mit der ein variabler Wärmeübergangskoeffizient in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur der Wandoberfläche für Wandheizungen berücksichtigt werden kann. Nach [DIN EN 15377] wird hingegen näherungsweise n=1 verwendet, d.h. h_i wird für Wandheizflächen als konstant angenommen. Daraus ergibt sich eine proportionale Abhängigkeit der Wärmeabgabe zur Übertemperatur des Heizmittels. Für Luftumspülte Heizflächen (Rohre) ergibt sich eine überproportionale Abhängigkeit mit $n < 1$ (siehe Kapitel 2.3.2). Für die Abbildung der Messdaten wird für die unter Putz verlegte Bauteiltemperierung eine linear approximierte Funktion verwendet und für die Messdaten der auf Putz verlegten Heizleitungen (mit und ohne Kontakt zur Wand) eine nichtlinear approximierte Funktion, d.h. mit $n < 1$.

Bei kalten Außentemperaturen ist die Innenoberfläche bzw. der Innenputz der Außenwand im Heizfall kühler wie die Raumtemperatur. Wird die Temperierung genau mit Raumtemperatur

betrieben (ΔT = 0 K), wird deshalb im geringen Maß Wärme abgegeben, da sich zwischen der unter Putz verlegten Temperierung und dem umgebenden Putz eine Temperaturdifferenz einstellt. Bei auf Putz verlegter Temperierung mit Kontakt zur Wand verringert sich der Einfluss. Wegen der oft langen Messperioden bis in die warme Jahreszeit hinein steigt die mittlere Außentemperatur. Der Temperaturunterschied der Außenwand zur Raumtemperatur verringert sich und damit auch die Wärmeabgabe der Heizleitung bei ΔT = 0 K.

(Gl. 20) $$\dot{Q}_{WH,app.} = q_{WH} * \Delta T^{n} + \dot{Q}_{WH(\Delta T=0)} \quad \text{[W/m]}$$

$\dot{Q}_{WH(\Delta T=0)}$	[W/m]	Wärmeabgabe pro Meter Heizrohr bei $\Delta T = 0$
q_{WH}	[W/mK]	spezifische Leistung der Temperierung
ΔT	[K]	Mittlere Übertemperatur des Heizmittels
n	[-]	Exponent der mittleren Heizmittelübertemperatur

4.2.2 Feldstudien mit globaler Abschätzung der Wärmeabgabe

Eine Abschätzung der Wärmeabgabe der Temperierung pro Meter Heizrohr kann über den gemessenen Energieverbrauch des Gebäudes bzw. Gebäudeteils (soweit bekannt) oder Heizleistung und der Leitungslänge der eingebauten Temperieranlage vorgenommen werden. Im Ergebnis erhält man die Wärmeabgabe pro Meter Rohr (W/m). Für die Fallstudien, bei denen die Heizmedientemperatur bzw. Heizleitungstemperatur und Raumtemperatur aufgezeichnet wurde, kann aus diesen Daten die mittlere spezifische Leistung pro Kelvin Heizmittelübertemperatur (W/mK) ermittelt werden. Diese globale Methode beinhaltet zahlreiche Unsicherheiten z.B. bezüglich der abgeschätzten Leitungslänge, unklare Einbausituationen der Heizleitung und Verteilnetze, variierende Wärmeabgabe, wechselnde Randbedingungen, Mittelung über einen größeren Zeitraum usw. Es ermöglicht aber auch einen Einblick in die Bandbreite der Wärmeabgabe von Temperieranlagen mit einfachen Mitteln. In Tabelle 10 sind die aus den Feldstudien ermittelten spezifischen Wärmeabgaben aufgelistet. Der Rohrdurchmesser ist bei allen Temperieranlagen 15 mm, bis auf Feldstudie Ingolstadt mit 18 mm und 22 mm.

Die Untersuchung der oben aufgeführten Feldstudien zeigt ein uneinheitliches Bild zur Wärmeabgabe der Temperierung. Die mit vereinfachten Mitteln festgestellte Wärmeabgabe der Temperierung pro Meter Heizrohr und pro Kelvin mittlerer Übertemperatur variiert erheblich und erreicht spezifische Leistungen zwischen 0,9 W/mK und 1,5 W/mK bei den betrachteten globalen Messungen.

Tabelle 10: Energieverbrauch, spezifische Wärmeabgabe pro Meter Heizleitung, mittlere Heiztemperatur, mittlere Raumtemperatur und mittlere Heizmittelübertemperatur verschiedener unter Putz verlegter Temperieranlagen

Fallstudie	Heizleistung	Leitungslänge	$\dot{Q}_{WH}$	$\overline{T_m}$ Heizmittel	$\overline{T_i}$ Raumluft	$\overline{\Delta T}$	q_{WH}
	[kW]	[m]	[W/m]	[°C]	[°C]	[K]	[W/mK]
Altdorf[1)]	6	200	30	37	15	22	1,4
Ingolstadt[2)]	49,9	1124	44,4	49,2	19,4	29,8	1,5
Buttenheim[3)]	9,3	300	25	45	17	28	0,9
Schöngeising[4)]	6	176	34				

[1)] maximale Leistung der elektrischen Heizeinrichtung, Temperierung teilweise auf Putz mit Wandkontakt [Bichlmair et al 2016a]
[2)] Durchschnittswerte aus mehreren Wintermonaten, monatliche Ablesung Wärmemengenzähler, Daten teilweise bereitgestellt durch die Stadt Ingolstadt. Durchmesser Heizrohr 18 mm und 22 mm [Bichlmair et al 2016g]
[3)] Ablesung Gaszähler durch Museumsmitarbeiter; [Bichlmair et al 2016c]
[4)] Planungsdaten aus Heizungsplanung, bereitgestellt vom Museum Jexhof; siehe auch [Bichlmair et al 2016h]

4.2.3 Feldstudien mit Messung der Wärmeabgabe einzelner Leitungsabschnitte (Heizschleifen)

Eine detaillierte Messung der Wärmeabgabe erfolgte an insgesamt 16 einzelnen Leitungsabschnitten in sechs überwiegend museal genutzte historische Gebäude (siehe Tabelle 8, S. 41). In Bild 24 sind die aus den Messungen ermittelten Näherungsfunktionen beispielhaft von fünf Temperieranlagen aus drei Feldstudien zur Übersicht in ein Diagramm eingetragen. Für die Kurzbeschreibung der Gebäude, Temperieranlagen und Leistungsmessungen siehe Anhang A. Exemplarisch sind für die Temperieranlage im Museum in Bad Reichenhall die Messwerte sowie die Messungenauigkeit mit angegeben. Die Wärmeabgabe schwankt deutlich um den Mittelwert bzw. der linearen Regression. Die Messungen in situ werden bei unterschiedlichen (instationären) Randbedingungen durchgeführt. Zum Beispiel beeinflussen die Außentemperatur und die Durchflussgeschwindigkeit die Wärmeabgabe, die bei In-situ-Messungen in der Regel variieren. Dadurch können einzelne Messwerte oder Messwerte einer Periode mit abweichenden Randbedingungen zu den im Mittel vorliegenden Randbedingungen über die Messungenauigkeit hinaus von der Regressionskurve abweichen. Zusätzlich treten auch Wärmespeichereffekte auf, die die Wärmeabgabe der Heizleitung infolge eines instationären Betriebs beeinflusst.

Bei der unter Putz verlegten Temperierung wurden erhebliche spezifische Leistungsunterschiede von 0,65 W/mK bis 1,7 W/mK festgestellt. Eine Wärmedämmung mit ca. 2 cm Dicke hinter der Heizleitung senkt die spezifische Wärmeabgabe (Fallstudie Aldersbach) um rund 0,05 W/mK. Bei den auf Putz verlegten Heizleitungen mit Wandkontakt ist die spezifische Wärmeabgabe mit 0,55 W/mK bei 20 K mittlerer Übertemperatur deutlich geringer als bei der unter Putz verlegten Temperierung. Der Faustwert der Wärmeabgabe für unter Putz verlegte Heizleitungen (siehe Kapitel 2.3) von ca. 40 W pro Meter Heizrohr bei einer Vorlauftemperatur von 60 °C und Raumtemperatur von 20 °C ergibt eine spezifische Wärmeabgabe von ca. 1,0 W/mK und liegt im mittleren Bereich der untersuchten unter Putz und auf Putz verlegten Heizleitungen mit Wandkontakt. Die Abweichungen der Faustwerte der Wärmeabgabe zu den gemessenen Werten sind jedoch nach unten und nach oben mit ca. ±50 % enorm.

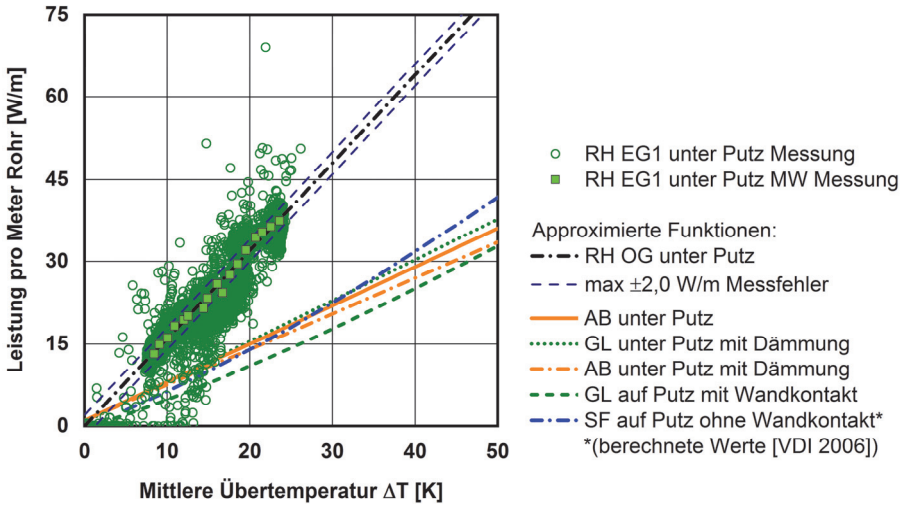


Bild 24: Aus den Messwerten der Feldstudien (Bad Reichenhall (RH), Aldersbach (AB), Glentleiten (GL) und Schweinfurt (SF)) ermittelte Näherungsfunktionen der Wärmeabgabe einzelner Leitungsabschnitte. Die Wärmeabgaben der untersuchten Minikonvektoren sind nicht mit abgebildet. Exemplarisch sind die Messwerte und Mittelwerte für eine Heizschleife angegeben.

Fazit

Bei einer linear zur Übertemperatur abhängigen Wärmeabgabe gibt die spezifische Wärmeabgabe die Steigung der approximierten Funktionen an und gilt für den gesamten Temperaturbereich. Liegt jedoch eine nicht lineare von der Übertemperatur abhängige Wärmeabgabe vor, gilt der Wert nur für die angegebene mittlere Übertemperatur. Die approximierten Funktionen der Wärmeabgabe wurden anhand der Dauermessungen über einen großen, zum Teil mehrjährigen, Zeitraum ermittelt. Die Messwerte beinhalten dadurch das instationäre hygrothermische Verhalten des Mauerwerks mit Einfluss des Raum- und Außenklimas und Wärmespeichereffekte sowie Effekte aus variierendem Wärmeübergang vom Heizmittel an die Rohrwand, variierender Heizmitteltemperatur und variierendem Durchfluss.

Räumlich nahe gelegene parallel verlaufende Temperierleitungen beeinflussen sich gegenseitig in der Wärmeabgabe. Eine Wärmedämmung zwischen dem Heizrohr und dem Mauerwerk reduziert ebenfalls die Wärmeabgabe. Eine Energieeinsparung mit Wärmedämmung hinter dem Heizrohr durch Reduzierung der direkten Wärmeabgabe nach außen scheint ebenfalls gegeben zu sein. Die Abweichungen der spezifischen Wärmeabgabe der unterschiedlichen Temperieranlagen in der festgestellten Größenordnung können durch die gegenseitige Beeinflussung der Heizrohre oder Durchflussmenge jedoch nicht erklärt werden. Bei der Heizleitung ohne Wandkontakt wurde für das Heizregister eine mittlere spezifische Wärmeabgabe von ca. 0,7 W/mK und für die unteren beiden Heizrohre des Registers eine mittlere spezifische Wärmeabgabe von ca. 0,9 W/mK bei 15 K mittlerer Übertemperatur festgestellt. Die Messwerte entsprechen in etwa den berechneten Werten für luftumspülte Rohre, siehe Kapitel 2.3.2 „Wärmeleistung eines luftumspülten Heizrohres“.

4.2.4 Messung der Wärmeabgabe in der Alten Schäfflerei in Benediktbeuern - Einzelmessungen

Am Fraunhofer-Zentrum für Denkmalpflege und energetische Sanierung von Altbauten in Benediktbeuern werden zusätzlichen Messungen zur unter Putz verlegten Temperierung (Bauteiltemperierung) in einem speziell dafür eingerichtetem Versuchsraum durchgeführt. Die messtechnischen Untersuchungen in dem Versuchsraum ermöglichen gezielte Einzeluntersuchung mit überwiegend stationären Randbedingungen mit z.B. verschiedener konstanter Heizmitteltemperatur, Durchflussmenge und Raumtemperatur. Da die weiteren Randbedingungen des Einbaus gut dokumentiert sind eignet sich der Versuchsaufbau auch für Vergleichsrechnungen mit thermischer und hygrothermischer Simulation.

Die Außenwände des denkmalgeschützten Gebäudes aus dem 18. Jahrhundert sind mit Mischmauerwerk erstellt. Die Mauerdicke beträgt ca. 63 cm. Die Außenwand ist nach Westen orientiert. Der Bodenaufbau wurde im Zuge der Sanierung erneuert und mit einer Betonsohle und Wärmedämmung aus Glasschaumschotter ausgeführt.

Im ersten Versuchsaufbau wurde lediglich eine Sockeltemperierung installiert. Erst im darauffolgenden Jahr erfolgt eine Erweiterung der Temperierung mit einer Brüstungsschleife, die durch eine andere Baufirma eingebaut wurde. Dadurch liegen zwei unabhängig voneinander erstellte Temperieranlagen vor. Die erweiterte Temperieranlage kann in unterschiedliche Heizkreise aufgeteilt und betrieben werden: Sockelschleife, Brüstungsschleife, beide Heizschleifen (Sockel und Brüstung) sowie eine große Schleife mit Vorlauf in der Brüstung und Rücklaufleitung im Sockel. Die Anordnungen der Temperierung mit den unterschiedlichen möglichen Betriebsweisen sind in der Wandansicht in Bild 21 und Bild 22 dargestellt. In Bild 25 ist die Einbausituation

der Heizrohre im Sockelbereich (linkes Bild) und für die Brüstungsschleife (rechtes Bild) kurz vor dem Verputzen abgebildet. Die Kupferrohre haben einen Durchmesser von 15 mm.



Bild 25: Heizschleife der Wandtemperierung im Sockelbereich (links) und Brüstungsbereich (rechts) mit Vor- und Rücklauf. Die Überdeckung der Kupferheizrohre mit Putz aus Kalkmörtel beträgt im Sockelbereich zwischen 10 bis 20 mm und im Brüstungsbereich 5 mm.

Randbedingungen der Messungen

Die ausgewerteten Messwerte werden über einen längeren Zeitraum von mehreren Stunden bis Tage gemittelt, in der die Wärmeabgabe möglichst konstant ist. Dabei wurde darauf geachtet, dass ein möglichst eingeschwungener Zustand des Temperaturniveaus im Mauerwerk herrscht, sowie nur geringe Schwankungen der Außentemperatur für die jeweilige Messung vorliegen. Zur Sicherstellung von ca. 20 °C Raumtemperatur wurde bei Bedarf mit einem zusätzlichen elektrischen Heizkörper beheizt. Um den bei der Messung möglichen Fehler gering zu halten, wird zum Teil bei den Messreihen der Volumenstrom mit der Vorlauftemperatur angepasst, damit die Spreizung (Temperaturdifferenz) nicht zu klein wird, siehe Kapitel 4.1.5. Die Leitungslängen der Temperierschleifen wurde anhand eines Aufmaßes vor Ort je Schleifenkonfiguration ermittelt, siehe Tabelle 11.

Tabelle 11: Leitungslängen der unterschiedlichen Temperierschleifen. Zusätzlich ist die jeweilige Leitungslänge für den Bereich der Fensternische sowie den Regelquerschnitt der Außenwand angegeben.

Temperierschleife	Rohrleitungslänge			
	Gesamt	Fensternische, Anteil		Regelquerschnitt
	[m]	[m]	[%]	[m]
Sockelschleife (HL1)	8,3	2,6	28,6	5,7
Brüstungsschleife (HL2)	9,1	2,6	31,3	6,5
Große Schleife (HL3)	9,6	2,6	27,1	7
Sockel-Brüstungsschleife (HL1+HL2)	17,4	5,2	29,9	12,2

Messungen der Wärmeabgabe „Sockelschleife HL1“

Die Messung der Wärmeabgabe der Sockelschleife (HL1) erfolgte im Februar 2015 bei unterschiedlichen Vorlauftemperaturen. Zur Anpassung der Wärmeabgabe wurden die Vorlauftemperatur von 70 °C auf 25 °C sowie die Durchflussmenge von ca. 2,1 l/min auf ca. 0,5 l/min schrittweise verändert. Daraus resultieren unterschiedliche Spreizungen von ca. 0,4 K bis 3 K, Bild 26 links. Die Raumtemperatur beträgt während der Messungen 20,2 °C ±0,2 K und die Tagesmitteltemperatur der Außenluft zwischen -0,7 °C und -5,9 °C, Bild 26 rechts.

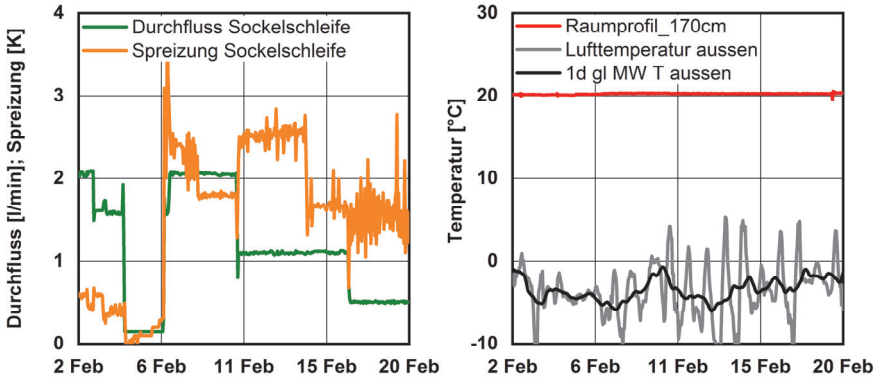


Bild 26: Durchfluss und Spreizung der Sockelschleife (HL1) während der Leistungsmessung (links). Der Messraum wurde für eine konstante Raumtemperatur von 20,2 °C ±0,2 K zusätzlich mit einem elektrischen Radiator beheizt.

Aus den Messwerten werden geeignete Zeitabschnitte ausgewählt und Mittelwerte gebildet. Im Diagramm in Bild 27 ist die Wärmeabgabe in Abhängigkeit der mittleren Übertemperatur der gemittelten Messwerte pro Meter Heizrohr eingetragen. Für die eingezeichnete Näherungsfunktion wird ein linearer Verlauf angenommen. Bei den vorliegenden Außentemperaturen wird durch die Temperierung bei 0 K Übertemperatur Wärme abgegeben. Der Schnittpunkt mit der Ordinate wird für das vorliegende Mauerwerk und Einbausituation mit 1,5 W/m geschätzt. Dadurch liegen die Messpunkte mit geringer Wärmeabgabe bei niedriger Durchflussgeschwindigkeit unter der Regressionsgeraden. Die Abweichung der ermittelten optimierten Funktion wird mit dem Bestimmtheitsmaß R^2 des empirischen Korrelationskoeffizienten angegeben. Das Bestimmtheitsmaß liegt bei 0,99 für die in Bild 27 eingezeichnete Regressionsgerade. Der Messwert bei ca. 48 K mittlerer Übertemperatur liegt etwas über der Näherungskurve. Die Temperatur im Mauerwerk ist noch nicht auf das hohe Temperaturniveau eingeschwungen, dadurch wird etwas mehr Wärme abgegeben. Der Rohrabstand zwischen Vor- und Rücklauf beträgt ca. 4 cm. Die Rohre beeinflussen sich dadurch gegenseitig in der Wärmeabgabe. Es wird eine spezifische Leistung von rund 0,78 W/mK je Meter Rohr abgegeben. Der maximale Messfehler beträgt rund ±2,5 W/m.

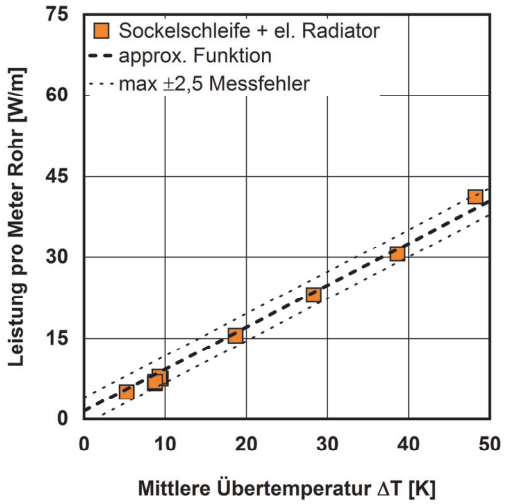


Bild 27: Messung der Wärmeabgabe der Temperierung als Sockelschleife. Der Messraum wurde für eine konstante Raumtemperatur von 20,2 °C ±0,2 °C zusätzlich mit einem elektrischen Radiator beheizt.

Messungen der Wärmeabgabe „Brüstungsschleife HL2“

Die Messungen erfolgten in zwei Perioden. In der ersten Periode wurden drei Einzelmessungen mit hohem Durchfluss von 4 l/min bzw. 2 l/min mit bis zu 73 °C Vorlauftemperatur durchgeführt. Die Raumtemperatur von ca. 20 °C konnte bei Außentemperaturen von knapp unter

0 °C ohne Zusatzheizung erreicht werden. In der zweiten Messperiode wurde zur Anpassung der Wärmeabgabe die Vorlauftemperatur von 30 °C auf 65 °C sowie die Durchflussmenge von 0,5 l/min auf 1,6 l/min schrittweise angehoben. Die Spreizung variiert von ca. 1,5 K bis 3 K, Bild 28 linkes Diagramm. Die Raumtemperatur beträgt mit Zusatzbeheizung durch einen elektrischen Radiator während der Messungen 20,3 °C ±0,3 K und die Tagesmitteltemperatur der Außenluft zwischen -2,6 °C und 4,3 °C, Bild 28 rechtes Diagramm.

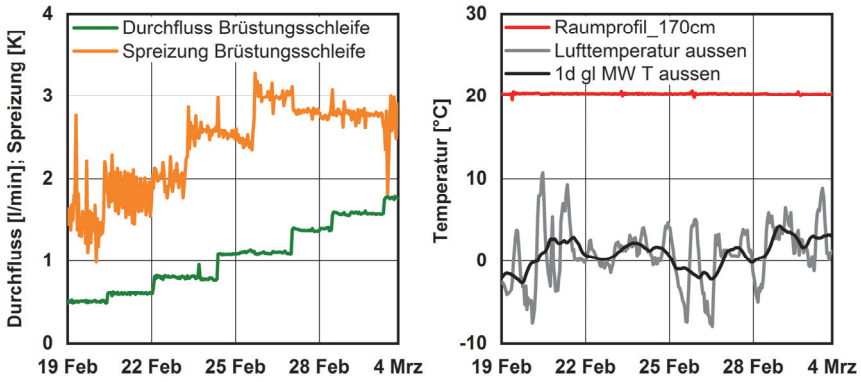


Bild 28: Durchfluss und Spreizung der Brüstungsschleife (HL2) während der Leistungsmessung (links). Der Raum wurde für eine konstante Temperatur von 20,3 °C ±0,3 K zusätzlich mit einem el. Radiator beheizt (rechts).

Aus den Messwerten wurden geeignete Zeitabschnitte ausgewählt und Mittelwerte gebildet. Im Diagramm in Bild 29 ist die Wärmeabgabe in Abhängigkeit der mittleren Übertemperatur der gemittelten Messwerte pro Meter Heizrohr eingetragen. Der Schnittpunkt mit der Ordinate wird bei der vorliegenden Einbausituation für die lineare Regression bei 1 W/m vorgegeben. Es werden zwei Regressionsgeraden ermittelt. Zum einen für die Messungen mit hohem Durchfluss (2,1 l/min und 4,2 l/min) und zum anderen für die Messungen mit niedrigem Durchfluss (0,5 l/min bis 1,6 l/min). Aus beiden Regressionsgeraden wurde wiederum eine gemittelte Näherungsfunktion gebildet. Das Bestimmtheitsmaß R^2 erreicht rund 1 (hoher Durchfluss) und 0,99 (niedriger Durchfluss). Die maximale Messungenauigkeit beträgt bei einer Spreizung von 3 K ±5,2 % vom Messwert. Dies entspricht bei einer Wärmeabgabe von 47 W/m rund ±2,4 W/m. Die Vor- und Rücklaufrohre der Brüstungsschleife haben einen Achsabstand von ca. 5,5 cm zueinander. Die Rohre beeinflussen sich auch hier gegenseitig in der Wärmeabgabe. Es wird eine spezifische Leistung von ca. 0,9 W/mK (hoher Durchfluss) bzw. 0,7 W/mK (niedriger Durchfluss) je Meter Rohr abgegeben.

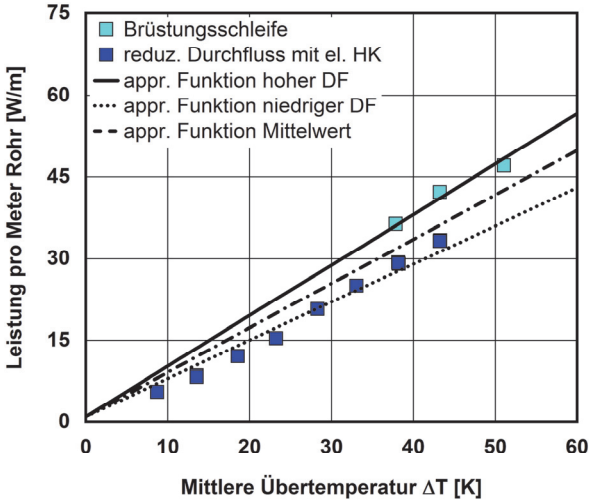


Bild 29: Wärmeabgabe der Brüstungsschleife (HL2) in Abhängigkeit von der mittleren Heizmittelübertemperatur. Die Wärmeabgabe je Messpunkt wurde über längere Zeiträume mit möglichst stationären Randbedingungen gemittelt. Die Messpunkte wurden bei hohem und niedrigen Durchfluss (DF) ermittelt.

Messungen der Wärmeabgabe „große Schleife HL3“

Der Vor- und Rücklaufstrang der großen Schleife haben einen Achsabstand von ca. 90 cm zueinander. Die Beeinflussung der Rohre untereinander in der Wärmeabgabe wird hier als vernachlässigbar eingestuft. Im ersten Messabschnitt vom 11.12.2014 bis 7.1.2015 wurde der Raum nur mit der Temperierung beheizt, mit eingeschränkter Regelung bei unterschiedlichen Vorgaben für die Heizparameter. Dadurch schwankt die Raumtemperatur etwas stärker und beträgt in diesem Zeitraum während der Messungen 19,8 °C ±0,9 K. Es stellte sich zusätzlich eine kurzfristige Erwärmung bis 23,6 °C mit anschließender Abkühlung auf 18,3 °C ein. Die Außentemperatur reicht im Tagesmittel von maximal 5,8 °C bis minimal -7,8 °C. Der Zeitraum vom 18. - 21.12.2014 ist wegen eines Messausfalls nicht mit abgebildet, siehe Bild 30.

Die Vorlauftemperatur variiert zwischen rund 48 °C und 70 °C (Bild 30 links unten) und die Durchflussmenge zwischen 0,6 l/min und 4,1 l/min. Zur Klärung der Auswirkungen unterschiedlicher Durchflussmengen wird zudem bei einer konstanten Vorlauftemperatur von 60 °C die Durchflussmenge schrittweise von 0,6 l/min auf 2,1 l/min erhöht. Daraus resultieren unterschiedliche Spreizungen von rund 7,0 K bis 3,2 K, Bild 30 links oben. In Bild 30 ist im Diagramm rechts unten die Wärmeabgabe für die große Schleife angegeben. In dem Zeitabschnitt mit konstanter Vorlauftemperatur bei 60 °C und kontinuierlicher stufenweiser Anhebung der Durchflussmenge erhöht sich auch die Wärmeabgabe der Temperierung von 285 W bei einem Durchfluss von 0,6 l/min auf 420 W bei einem Durchfluss von 2,5 l/min.

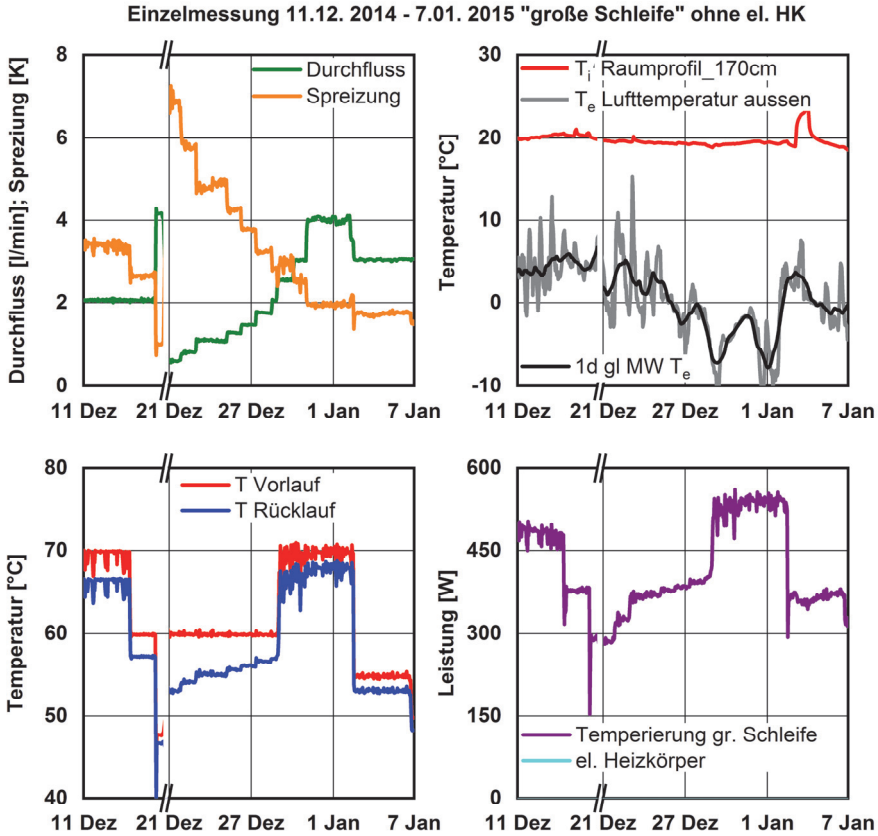


Bild 30: Übersicht der Messwerte zur Leistungsmessung der großen Schleife (HL3) vom 11.12. 2014 bis 7.1. 2015 mit Durchfluss und Spreizung (oben links), Vor- und Rücklauftemperatur (unten links) und Wärmeabgabe (unten rechts). Der Messraum wurde nur über die Temperierung für eine konstante Raumtemperatur von 20,1 °C ±0,4 K beheizt bei Außentemperaturen von rund +6 °C bis -7 °C im Tagesmittel (oben rechts). Der Zeitraum vom 18. - 21.12. ist nicht mit abgebildet.

Ab dem 7.1. bis 21.1.2015 wurde der Raum zusätzlich mit einem elektrischen Heizkörper beheizt. Die Raumtemperatur beträgt in diesem Zeitraum 20,3 °C ±0,3 K und die Tagesmitteltemperatur der Außenluft variiert zwischen 14,3 °C und -4,1 °C, Bild 31 rechtes oberes Diagramm.

Die Durchflussmenge wurde in dem Zeitraum überwiegend bei 3,0 l/min konstant gehalten und die Vorlauftemperatur geändert, um die Auswirkungen auf die Spreizung zu dokumentieren, Bild 31 links oben und links unten.

In Bild 31 ist im rechten unteren Diagramm die Wärmeabgabe der großen Schleife sowie des zusätzlichen elektrischen Heizkörpers abgebildet. In dem Zeitraum vom 7. - 10.11. steigt die Tagesmitteltemperatur der Außenluft von 0 °C auf 14,3 °C an. Die Vorlauftemperatur sowie Durchflussmenge sind in dem Zeitraum konstant. Trotzdem sinkt die abgegebene Leistung von anfänglich rund 320 W auf rund 305 W ab, um dann etwas zeitverzögert mit fallender Außentemperatur wieder geringfügig anzusteigen. Die zeitgleiche Beheizung des Raumes mit einem elektrischen Heizkörper reagiert in diesem Zeitraum mit einer stark sinkenden Leistung bei ansteigender Außentemperatur, um dann bei fallender Außentemperatur wieder etwas anzusteigen. Im weiteren zeitlichen Verlauf ist die Vorlauftemperatur bei 40 °C konstant mit konstantem Durchfluss. Die Außenlufttemperatur schwankt etwas um in etwa 5 °C. Die Wärmeabgabe bei der Temperierung und bei dem elektrischen Heizkörper bleiben mit geringen Schwankungen auf einem gleichbleibenden Niveau.

Aus den Messwerten wurden geeignete Zeitabschnitte ausgewählt und Mittelwerte gebildet. Im Diagramm ist die Wärmeabgabe in Abhängigkeit der mittleren Übertemperatur der gemittelten Messwerte pro Meter Heizrohr eingetragen. Die eingezeichnete Näherungsfunktion hat einen annähernd linearen Verlauf und schneidet die Ordinate bei 3,5 W/m, siehe Bild 32. Die Messwerte mit und ohne elektrische Zusatzbeheizung sind in dem Diagramm farblich unterschieden. Zusätzlich ist die Messreihe mit konstanter Vorlauftemperatur bei stufenweise angehobener Durchflussmenge blau markiert.

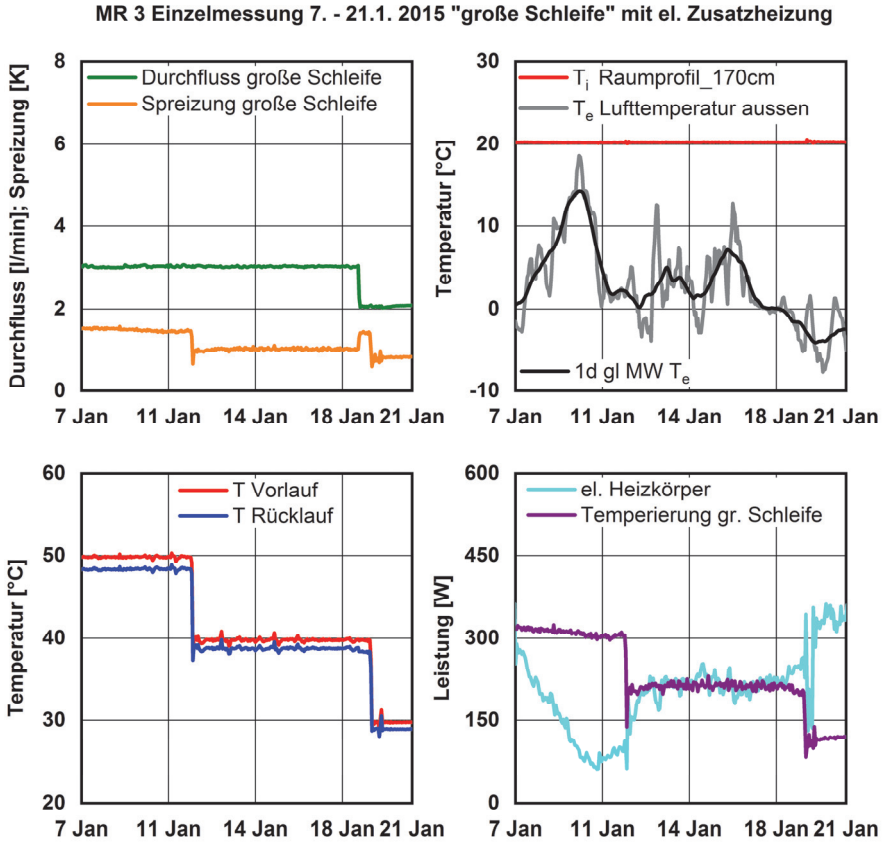


Bild 31: Messwerte zur Leistungsmessung der großen Schleife (HL3) vom 7. - 21.1. 2015 mit Durchfluss und Spreizung (oben links), Vor- und Rücklauftemperatur (unten links) und Wärmeabgabe (unten rechts). Der Messraum wurde für eine konstante Raumtemperatur von 20,3 °C ±0,3 K zusätzlich mit einem el. Radiator beheizt bei Außentemperaturen von rund +14 °C bis -4 °C im Tagesmittel (oben rechts).

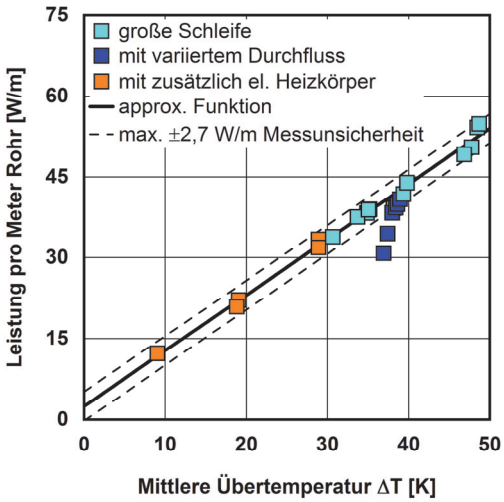


Bild 32: Wärmeabgabe der Temperierung mit „großer Schleife HL3" in Abhängigkeit von der mittleren Heizmittelübertemperatur. Der Abstand der Rohrleitung zueinander beträgt ca. 90 cm.

Die Durchflussmenge zeigt vor allem bei sehr niedrigen Durchflüssen einen erheblichen Einfluss auf die Wärmeabgabe der Temperierung und reicht von 31 W/m bei 0,6 l/min bis 44 W/m bei 2,5 l/min. Bei höheren Durchflüssen nimmt der Einfluss etwas ab. Bei den Messpunkten bei knapp 50 K mittlerer Übertemperatur variiert die Durchflussmenge zwischen 2,1 l/min bis 4,0 l/min. Die Wärmeabgabe erhöht sich entsprechend von 49 W/m 56 W/m bei zeitgleicher Erhöhung der mittleren Übertemperatur. Eine niedrigere Durchflussmenge hat eine höhere Spreizung zur Folge. Die mittlere Heizwassertemperatur bzw. mittlere Übertemperatur verringert sich entsprechend. Die lineare Regression wurde nur für Messpunkte mit Durchflüssen zwischen 2,1 l/min und 3,0 l/min durchgeführt. Der Schnittpunkte der Ordinate liegt bei 2,5 W/m. Das Bestimmtheitsmaß R^2 beträgt 1,00 und die spezifische Leistung rund 1,0 W/mK.

Die Abhängigkeit der Wärmeabgabe der Temperierung von der Außenluft kann bei unabhängiger konstanter Raumbeheizung messtechnisch nachvollzogen werden. Die Durchflussmenge beeinflusst die Wärmeabgabe vor allem bei niedrigen Durchflussmengen erheblich.

Messungen der Wärmeabgabe „Sockel- und Brüstungsschleife HL1+HL2"

Durch den Einsatz beider Heizschleifen ist es möglich, den Messraum auf eine konstante Raumtemperatur von 20,1 °C ±0,4 K zu beheizen, bei einer Tagesmitteltemperatur der Außenluft zwischen 10,1 °C und 1,2 °C. Hierzu wurde zunächst die Beheizung mit den ursprünglichen Einstellungen der SPS-Regelung betrieben. Dies führte zu stark schwankende Durchflussmengen und in der Folge zu stark schwankenden Spreizungen zwischen Vor- und Rücklauftemperatur, siehe Bild 33 Diagramm links. Im weiteren Verlauf sind die Regelungseinstellungen verändert worden, sodass der Durchfluss weniger stark beeinflusst wird. Dadurch ergeben sich sehr hohe Durchflussmengen und eine relativ niedrige Spreizung über einen längeren Zeitraum. Zwischen 19. und 21.11. 2014 ereignete sich ein Heizungsausfall, der Raum kühlte auf 16,4 °C ab. Mit Wiederinbetriebnahme der Heizung erwärmt sich der Raum bis zum 28.11. 2014 wieder auf die Solltemperatur. Danach stellten sich sehr stabile Bedingungen, ein bei denen die Temperierung mit einer Durchflussmenge von 6,5 l/min und ca. 2,0 l/min über einen längeren Zeitraum betrieben wurde. Die Vorlauftemperatur variierte anfangs zwischen 31 °C und 61 °C, danach nur noch zwischen 42 °C und 56 °C. Die Spreizung schwankt entsprechend bei niedrigen Durchflüssen zwischen maximal 18 K und 0,7 K im stündlichen Mittelwert.

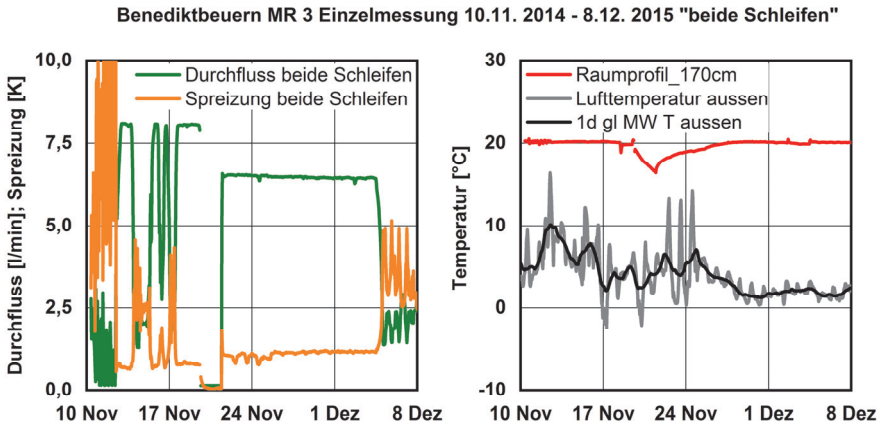


Bild 33: Durchfluss und Spreizung der Sockel- und Brüstungsschleife (HL1+HL2) während der Leistungsmessung (links). Der Messraum wurde nur über die Temperierung für eine Raumtemperatur von 20,1 °C ±0,4 K beheizt (rechts).

Aus den Messwerten wurden geeignete Zeitabschnitte ausgewählt und Mittelwerte gebildet. Im Diagramm in Bild 34 ist die Wärmeabgabe in Abhängigkeit der mittleren Übertemperatur der gemittelten Messwerte pro Meter Heizrohr eingetragen. Die eingezeichneten Näherungsfunktionen haben einen linearen Verlauf mit unterschiedlicher Steigung, die vom Niveau der Durchflussmenge abhängt, Bild 34. Die Näherungsfunktionen schneiden die Ordinate bei 2,5 W/m. Die angegebene Durchflussmenge ist die gesamte Durchflussmenge beider Heizschleifen. In den einzelnen Heizschleifen teilt sich die gesamte Durchflussmenge in etwa zur Hälfte auf. Bei einer Gesamtdurchflussmenge von 2,0 l/min stellt sich in jeder Schleife somit in etwa 1,0 l/min ein. Die Durchflussmenge beeinflusst die Wärmeabgabe in einem offensichtlich nicht zu vernachlässigenden Niveau. Die Steigung der Näherungsfunktion und damit die spezifische Leistung beträgt bei hoher Durchflussmenge rund 0,8 W/mK und bei niedriger Durchflussmenge rund 0,7 W/mK je Meter Heizrohr.

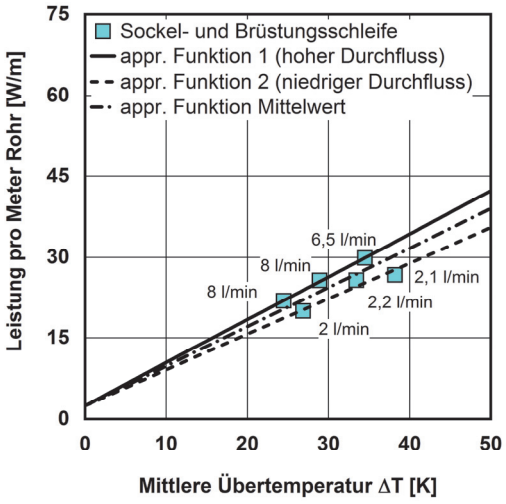


Bild 34: Wärmeabgabe der Temperierung Sockel- und Brüstungsschleife (HL1+HL2) pro Meter Rohrleitung in Abhängig von der mittleren Übertemperatur. Die Wärmeabgabe je Messpunkt wurde über längere Zeiträume mit möglichst stationären Randbedingungen gemittelt.

Fazit zur Messung der Wärmeabgabe einzelner Leitungsabschnitte in der Alten Schäfflerei

Die gegenseitige Beeinflussung von nahe zueinander parallel verlegten Heizrohren vermindert die Wärmeabgabe. Die Sockel- und Brüstungsschleife geben in etwa gleich viel Wärme je Me-

ter Rohr ab. Obwohl die Sockelschleife etwas enger zueinander verlegt ist und durch die Einbausituation ein etwas geringerer Wärmeübergang vermutet wurde, wird eine eher geringfügig höhere Wärmeabgabe festgestellt. Die Putzüberdeckung bei der Sockelschleife ist mit 1 cm - 2 cm jedoch deutlich dicker im Vergleich zur Brüstungsschleife mit 0,5 cm. Bei der Brüstungsschleife (HL2) sowie bei gleichzeitigen Betrieb der Sockel- und Brüstungsschleife (HL1+HL2) zeigt sich eine deutliche Abhängigkeit von der Durchflussmenge. In weiteren Messungen mit der Anordnung der Temperierung als große Heizschleife treten erhebliche Leistungsunterschiede bei konstanter Vorlauftemperatur und variierenden Durchflüsse auf. Bei der großen Schleife wird die Wärmeabgabe ohne gegenseitige Beeinflussung von Vor- und Rücklauf festgestellt. Die Differenz in der Wärmeabgabe von der großen Schleife zur Sockel- oder Brüstungsschleife beziffert die gegenseitige Beeinflussung für die untersuchte Anordnung. Bei der Messung der großen Schleife konnten mit einer zusätzlichen Raumbeheizung die Auswirkungen der Außenlufttemperatur auf die Wärmeabgabe der Temperierung nachvollzogen werden. Durch eine zusätzliche unabhängige Raumbeheizung kann bei gleicher Raumtemperatur keine Veränderung in der spezifischen Wärmeabgabe der Temperierung festgestellt werden. In Bild 35 sind die aus den Messwerten ermittelten Näherungsfunktionen eingetragen. Die Wärmeabgabe der großen Schleife liegt deutlich über der Wärmeabgabe der Sockel- bzw. Brüstungsanordnung der Heizrohre.

Die Wärmeabgabe unterliegt, wie gezeigt, dem Einfluss des Außenklimas. Bei der Messung mit niedrigen Vorlauftemperaturen, und in der Folge damit niedrigen Übertemperaturen, werden zur Aufrechterhaltung einer ausreichenden Temperaturspreizung die Durchflussmengen reduziert. Die Veränderung der Durchflussmenge hat eine Änderung der Wärmeabgabe zur Folge. Beide Mechanismen können ein überproportionales Verhalten suggerieren. Die Näherungsfunktionen können auch rein linear angenähert werden. Die Übertemperatur ist die Differenz zwischen mittleren Heizmedientemperatur und der Raumluft. Der Schnittpunkt mit der Ordinate liegt bei luftumspülten Rohren (Heizleitung ohne Wandkontakt) deshalb bei null. Bei unter Putz verlegten Rohren ist die Rohrtemperatur ohne Beheizung unter der Raumlufttemperatur. Dadurch wird bei einer Heiztemperatur gleich der Raumtemperatur bereits Wärme abgeben. Der Schnittpunkt mit der Ordinate ist demnach größer Null. Der genaue Wert kann anhand der Messwerte nur bedingt ermittelt werden, da keine Messung für diesen Fall durchgeführt wurde. Mit den Näherungsfunktionen wurden Werte zwischen 0 W/m und 3 W/m aus den Messwerten ermittelt.

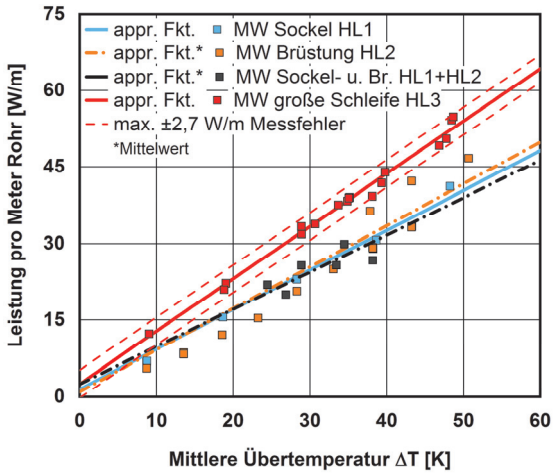


Bild 35: Wärmeabgabe der Temperierung mit unterschiedlicher Anordnung (Sockel, Brüstung, große Schleife, beide Schleifen) pro Meter Rohrleitung, abhängig von der mittleren Übertemperatur anhand der ermittelten Näherungsfunktionen.

4.3 Messung der Energieeffizienz (Vergleichsmessung) der Bauteiltemperierung

Die stark umstrittene Frage der Energieeffizienz der Temperierung, insbesondere der unter Putz verlegten Bauteiltemperierung wird hier in zwei Fragestellungen aufgegliedert. Zum einen wird argumentiert, dass durch die Trocknungswirkung der Bauteiltemperierung die feuchteabhängige Wärmeleitfähigkeit der Bauteile mögliche zusätzliche Verluste durch direkte Wärmeleitung kompensiert. Zum anderen werden neben dem Trocknungseffekt auch Effekte aus Wärmestrahlung und wandnaher Auftriebsströmung auf der Rauminnenseite angeführt, die zu einer Energieeinsparung gegenüber konventioneller Beheizung (Heizkörper) bei der Beheizung von Räumen führen soll.

Würden die angeführten Effekte in der Wirkung groß genug sein, sollte an der Wandaußenseite auf Höhe der Heizleitung keine Temperaturerhöhung gegenüber dem von der Temperierung unbeeinflussten Wandbereich feststellbar sein. Gemäß rechnerischer Voruntersuchung für das Messkonzept mit hygrothermischer Simulation stellt sich mit Berücksichtigung der feuchte- und temperaturabhängiger Wärmeleitfähigkeiten eine höhere Oberflächentemperatur ein. Es wird überprüft inwieweit sich messtechnisch eine Temperaturdifferenz in situ nachweisen lässt.

Mit der Messung und Bilanzierung der Wärmeabgabe der Temperierung in einem einzelnen Raum in einem historischen Gebäude in situ werden alle Effekte der Temperierung berücksichtigt. Der gleiche Raum wird in einer Vergleichsperiode mit einem konventionellen Heizkörper beheizt und die Wärmeabgabe ebenfalls bilanziert. Der Vergleich der bilanzierten Wärmeabgaben beider Heiztechniken ermöglicht Aussagen zur Energieeffizienz der Temperierung.

4.3.1 Nachweis erhöhter Wärmeabgabe über Oberflächentemperaturen außen

Die Messungen der Außenoberflächentemperatur auf Höhe der Heizleitung sowie in einem Abstand von ca. 1 m (ohne Einfluss der Heizleitung) werden an drei Gebäuden der Feldstudie dargestellt. Der Messaufbau entspricht dem Messkonzept in Kapitel „4.1.4“, das aus den rechnerischen Vorüberlegungen in Kapitel „4.1.3“ entwickelt wurde. Die hygrothermische Simulation der Voruntersuchung zeigt eine eindeutige Temperaturerhöhung auf Höhe der Heizleitung. Da die simulierte Wand in dem Berechnungsbeispiel keiner Feuchtequelle wie z.B. aufsteigende Feuchte ausgesetzt wurde, ist die Materialfeuchte insgesamt gering. Die berechnete Bauteilfeuchte ist gemäß Simulation im Bereich der Heizleitung noch etwas niedriger als im unbeeinflussten Wandbereich. Die Mauerwerksfeuchte wurde in den Feldstudien nicht messtechnisch untersucht. Augenscheinlich konnte bei keinem Gebäude Anzeichen erhöhter Bauteilfeuchte im Bereich der Messungen festgestellt werden. Da alle Gebäude intakte Fassaden aufweisen wird von trockenen Wänden mit geringer Bauteilfeuchte ausgegangen. Bei zwei Fallstudien erfolgte die Messung jeweils im Obergeschoss. Das Gebäude der Alten Schäfflerei wurde einige Jahre zuvor im Sockelbereich mit einer Abdichtung ertüchtigt. Der Fußboden innen liegt ca. 25 cm über dem Niveau des Außengeländes.

Feldstudie Bauernhofmuseum Jexhof Schöngeising [Bichlmair et al 2016h]

Ausgeführt wurden die Temperierleitungen im Erdgeschoss in 15 mm Kupferrohr als Zweirohrleitung und im Obergeschoss in 18 mm Kupferrohr als Einrohrleitung (Ringleitung). Die Außenwand ist im Flur mit ca. 24 cm Wanddicke dünner ausgeführt, gegenüber den Wänden im Wohnhaus mit ca. 40 cm Wanddicke. In Bild 36 ist die Südwest Ansicht mit IR-Aufnahme abgebildet.



Bild 36: Winterliche Ansicht der Süd-West Fassade des Jexhofes (linkes Bild) mit Stallung und Wohnbereich. Das rechte Bild zeigt die Infrarot Aufnahme der Ansicht. Über der Tür (Bildmitte) ist die Hauptmessachse angeordnet. Aufnahme am 15.01.2014 um 8.43 Uhr.

Bild 37 zeigt die Detailansicht der montierten Sensoren an der Außenwand im Obergeschoss mit Infrarotaufnahme für diesen Bereich. Rechts im Diagramm ist das Höhenprofil der Oberflächentemperatur des IR-Bildes entlang der senkrechten blauen Linie abgebildet. Mit eingetragen sind die Positionen der Sensoren. Die Bildauflösung beträgt über die Messhöhe 480 Messpixel / 160 cm. Das entspricht einer Auflösung von 3 Pixel / cm. Im Bereich der äußerst dünnen Wand von nur ca. 24 cm in diesem Bereich zeichnet sich die Temperierung außen deutlich ab. Der Temperaturunterschied beträgt nach Auswertung des IR-Bildes mit einem Umfang von 10 x 10 Pixel direkt neben den Sensorpositionen gemäß Bild 37 rund 4,3 K. Die mit der Dauermessung erfassten Oberflächentemperaturen ergeben bei einer Oberflächentemperatur von 1,4 °C bzw. 4,4 °C einen Temperaturunterschied von 3,0 K zum Zeitpunkt der IR-Messung.

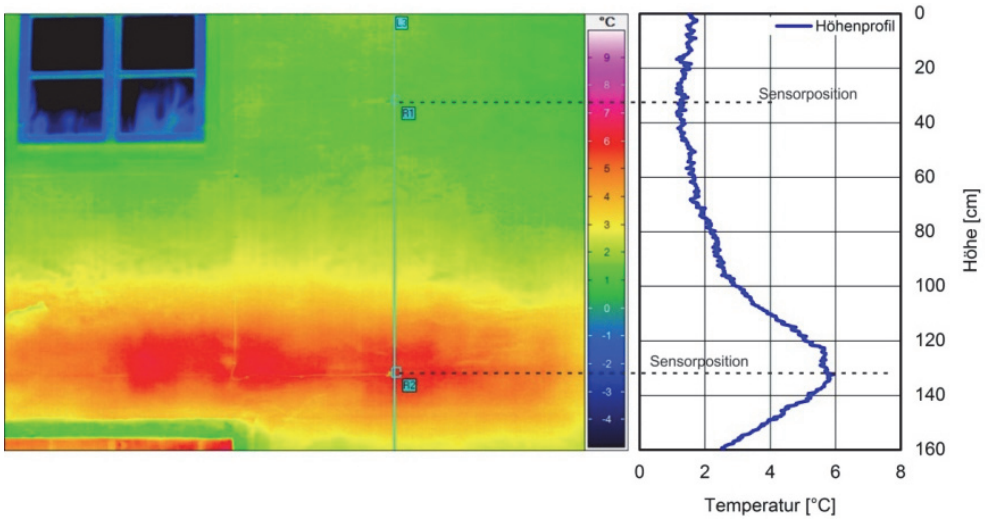


Bild 37: IR-Aufnahme der Süd-Westfassade mit den Sensoren am 15.1.2014 zur Messung der Oberflächentemperatur auf Höhe der Heizleitung und 98 cm darüber. Im Diagramm ist das Höhenprofil der Oberflächentemperatur des IR-Bildes entlang der senkrechten blauen Linie abgebildet.

Bild 38 zeigt den Verlauf der Raum- und Oberflächentemperaturen der Außenwand sowie die Differenz der Außenoberflächentemperaturen vom 6. - 20. Oktober und 4. - 18. November 2013. Die Heiztätigkeit ruht bis zum 15. Oktober, erkennbar an der Oberflächentemperatur innen direkt über der Heizleitung (T_S HL innen), die in etwa der Raumtemperatur folgt. Die Außenoberflächentemperatur ist nahezu konstant, mit nur geringem Einfluss durch solare Strahlung bzw. tageszeitlicher Erwärmung. Die Differenz der Außenoberflächentemperatur (Diff. T_S außen) liegt ohne Heiztätigkeit bei null. Ab 15. Oktober beginnt die Heiztätigkeit mit Nachtabsenkung. Es stellt sich eine dauerhafte etwas schwankende Temperaturdifferenz zwischen den Außenoberflächentemperaturen auf Höhe der Heizleitung und in etwa 1 m darüber von ca. 1 K bis 3 K ein. Ab dem 9. November wird auf gleichbleibendem Temperaturniveau geheizt mit ei-

ner Oberflächentemperatur direkt über der Heizleitung von ca. 48 °C. Die Außenoberflächentemperaturen verlaufen mit nur geringen Schwankungen mit kaum erkennbarer tageszeitlicher Erwärmung oder solarem Strahlungseinfluss. Der Temperaturunterschied zwischen den Temperatursensoren auf der Außenoberfläche beträgt ab 9. November 2013 maximal 4,0 K.

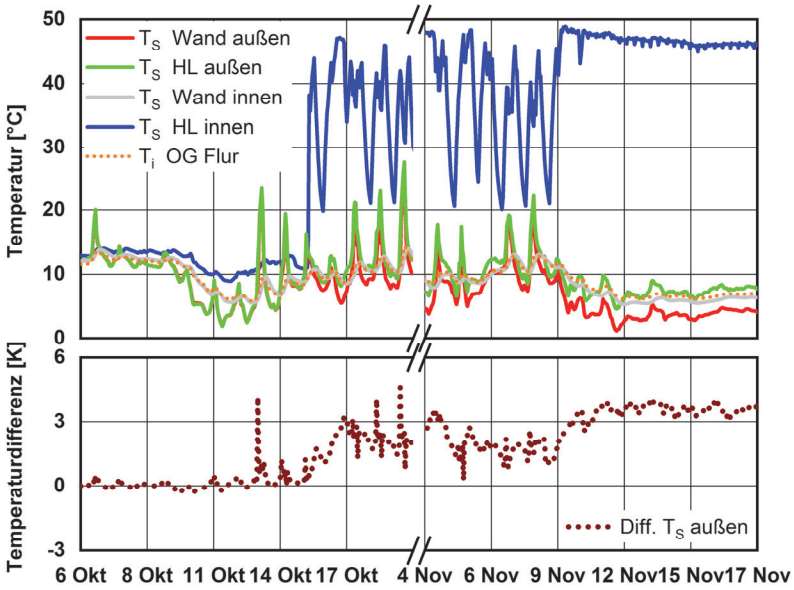


Bild 38: Verlauf der Temperaturen mit stündlichen Mittelwerten der Messwerte zwischen 6.10. und 17.11.2013. Mit zunehmender Heiztätigkeit erhöht sich die Temperaturdifferenz zwischen der Außenoberflächentemperatur auf Höhe der Heizleitung und 1 m darüber (Diff. T_S außen) auf maximal 4,0 K.

Feldstudie Stadtmuseum Bad Reichenhall [Bichlmair et al 2016b]

Mit der Messung auf der Heizleitung werden die Heiztätigkeit sowie der Temperaturabfall zwischen Heizleitung und Oberfläche erfasst. Mit der Messung auf der Außenseite wird die direkte Erwärmung auf Höhe der Heizleitung im Vergleich zum Unbeeinflussten Wandabschnitt dokumentiert. In Bild 39 ist im linken Bild das Detailmesskonzept für die Messung der Oberflächentemperaturen und des Nahfeldklimas an der Außenwand im Bereich der Temperierleitung im Stadtmuseum Bad Reichenhall dargestellt. Das rechte Bild zeigt die Anordnung der Sensoren von innen. Die Wanddicke beträgt ca. 80 cm und die Wand besteht aus Bruchsteinmauerwerk. Die Temperierleitung aus Kupferrohr hat einen Durchmesser von 15 mm.

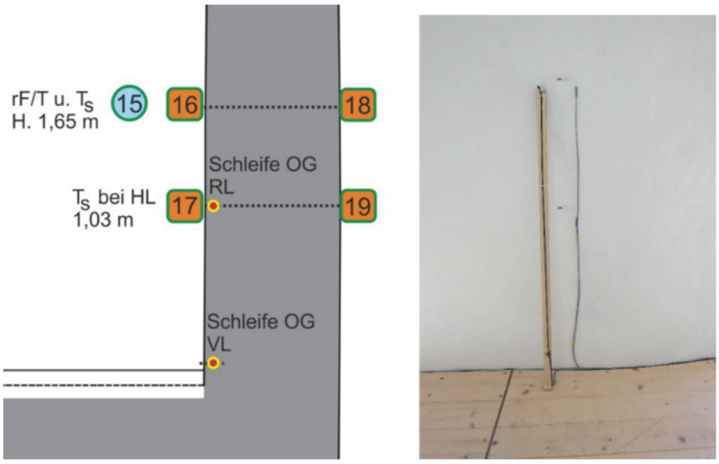


Bild 39: Links das Detail-Messkonzept für die Messung der Oberflächentemperaturen im Bereich der Temperierleitungen im Obergeschoss im Stadtmuseum Bad Reichenhall. Gemessen wird direkt über der Temperierung, exakt in gleicher Höhe auf der Außenoberfläche sowie zusätzlich in einem Abstand von 62 cm oberhalb der Temperierung.

Die Messungen der Außenoberflächentemperaturen mit der Rücklauftemperatur der Heizleitung sind in Bild 40 für den gesamten Messezeitraum ab dem 20.12.2013 bis 20.6.2015 abgebildet. Im ersten Jahr stellen sich bei abgeschalteter Temperierung an den Außenoberflächen keine wesentlichen Temperaturunterschiede ein.

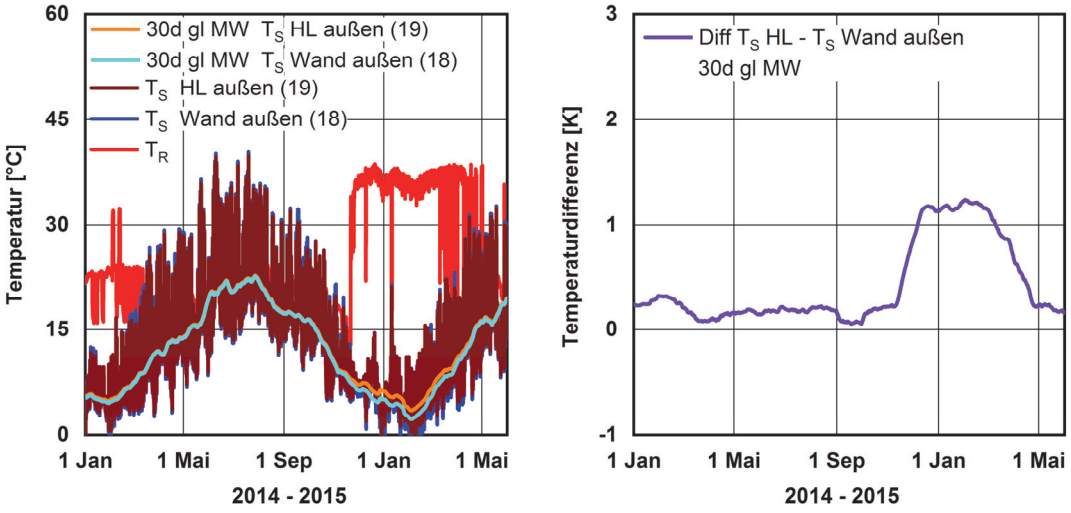


Bild 40: Außenoberflächentemperaturen im Obergeschoss auf Höhe der Heizleitung sowie in 0,62 m Abstand darüber mit stündlichen Werten und gleitenden Monatsmittelwerten, sowie Rücklauftemperatur der Temperierung (links). Rechts: Differenz der Oberflächentemperaturen mit gleitenden Monatsmittel auf Höhe der Heizleitung (HL) und 0,62 m darüber an der Außenseite der Wand. Bei einer Rücklauftemperatur von ca. 38 °C stellt sich eine Temperaturdifferenz im Mittel von ca. 1,2 K ein.

Die Heiztätigkeit ist mit der in der Rohrleitung gemessenen Rücklauftemperatur T_R angegeben. Die gleitenden Monatsmittelwerte der Oberflächen-Temperaturen an der Außenoberfläche (Pos. 18 Höhe 1,03 m und Pos. 19 Höhe 1,65 m) unterscheiden sich nur geringfügig, bedingt durch Inhomogenität im Mauerwerk und mögliche Messungenauigkeit, um ca. 0,2 K im Jahresverlauf. Mit Inbetriebnahme der Heizleitung ab Anfang November 2014 ist eine signifikante Temperaturdifferenz zwischen den Außenoberflächentemperaturen festzustellen. Der Temperaturunterschied beträgt im Mittel ca. 1,2 K. Mit Abschalten der Temperierung gleichen sich die Temperaturen wieder an.

Feldstudie Fraunhofer-Zentrum Benediktbeuern in der Alten Schäfflerei

Bei den Einzelmessungen zur Wärmeabgabe der Temperierung wurden auch Oberflächentemperaturen außen auf Höhe der Heizleitungen sowie im größeren Abstand dazu gemessen. In Bild 41 sind die Temperaturverläufe an der Oberfläche außen sowie im Wandquerschnitt in verschiedenen Schichttiefen mit Vorlauftemperatur der Temperierung während des Heizbetriebes der Sockelschleife abgebildet. Der Raum ist in diesem Zeitraum konstant auf 20,2 °C mit Hilfe eines zusätzlichen elektrischen Radiators beheizt, da die Heizleistung nur mit der Sockelschleife nicht ausgereicht hätte. Bis zum 6. Februar ist die Sockelschleife abgeschaltet (Vorlauftemperatur bei ca. 17 °C), die Temperatur an der Außenoberfläche auf Höhe der Heizleitung (Höhe 7 cm) entspricht dann in etwa der Temperatur im Abstand von 87 cm (Höhe 94 cm).

Mit einsetzendem Heizbetrieb der Sockeltemperierung ab dem 6. Februar erhöht sich die Temperatur außen auf Höhe der Heizleitung gegenüber der Oberflächentemperatur außerhalb des Einflussbereichs der Temperierung. Die Temperaturdifferenz an der Außenoberfläche verringert sich mit abnehmender Vorlauftemperatur. Die Schichttemperaturen steigen mit einsetzendem Heizbetrieb entsprechend dem Abstand zur Heizleitung ebenfalls an. Nach der Aufheizphase stellen sich bei 60 °C Vorlauftemperatur in ca. 7 cm Abstand zur Heizleitung (10 cm Tiefe zur Innenoberfläche) in der Wand um 30 °C ein, bei einer Oberflächentemperatur außen von ca.

0 °C. In den tieferen Wandschichten (20 cm und 30 cm zur Innenoberfläche) sind die Temperaturen entsprechend niedriger. Mit Verringern der Vorlauftemperatur sinken in den Schichten die Temperaturen entsprechend ab. Als direkter Vergleich der Schichttemperaturen ohne Temperierung dient der Zeitraum vor dem 6. Februar.

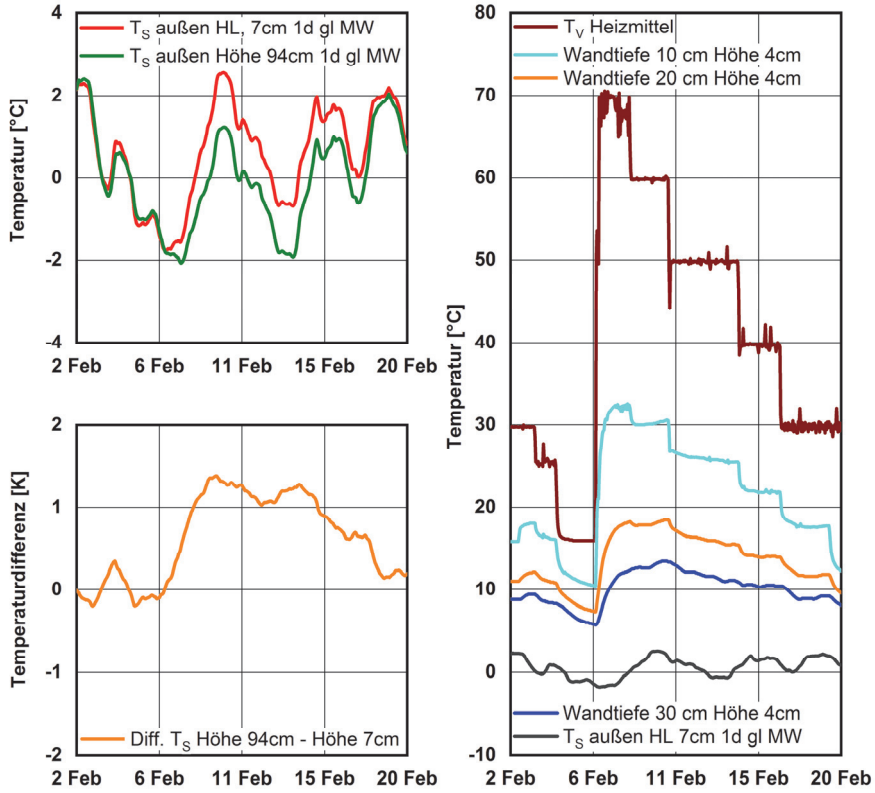


Bild 41: Messungen der Temperaturen an der Außenoberfläche und Wandschichtung im Messraum am Fraunhofer-Zentrum. Das Diagramm links oben zeigt die Außenoberflächentemperaturen als Tagesmittelwerte (1d MW) auf Höhe der Sockeltemperierung und ca. 90 cm darüber. Das Diagramm darunter zeigt den Differenzgraphen der Oberflächentemperaturen. Im Diagramm rechts sind die Vorlauftemperaturen als stündliche Mittelwerte der minütlich erfassten Messwerte abgebildet sowie die Wandtemperatur in verschiedenen Schichttiefen auf Höhe der Sockeltemperierung.

Fazit zum indirekten Nachweis erhöhter Oberflächentemperaturen außen

Der Vergleich der Messung der Oberflächentemperaturen außen, auf Höhe der Heizleitung sowie in einem Abstand von 1 m, zeigt bei jeder der drei Feldstudien eine höhere Oberflächentemperatur infolge der Beheizung durch die Bauteiltemperierung. Wie in der rechnerischen Vorüberlegung prognostiziert, stellen sich je nach Wanddicke und Heizmitteltemperatur unterschiedlich hohe Temperaturdifferenzen ein, die bei der Feldstudie Jexhof bis zu 4 K erreichen. Mit IR-Thermographien wird ebenfalls eine zum Teil deutliche Temperaturerhöhung im Bereich der Heizleitung erkennbar. Der Vorteil der Dauermessung liegt in der kontinuierlichen Aufzeichnung, da bei Einzelmessungen mit IR-Thermographie nicht immer geeignete Betriebszustände der Temperierung, gepaart mit geeigneten Klimazuständen, herrschen. Die Verringerung des Wärmestroms infolge einer geringeren Wärmeleitfähigkeit durch trockenere Wandbereiche oder Effekte aus der Wärmeübertragung der Temperierung auf der Wandinnenseite kann die Temperaturerhöhung in Teilbereichen der Außenwand nicht kompensieren. Die erhöhte Temperatur an der Außenoberfläche infolge der Beheizung der Wand lässt bei Wänden mit geringem Feuchtegehalt auf eine direkte zusätzliche Wärmeabgabe des Heizsystems im Vergleich zu einer nicht beheizten Wand schließen.

4.3.2 Vergleichsmessung im Fraunhofer-Zentrum in der Alten Schäfflerei

Am Fraunhofer-Zentrum in der Alten Schäfflerei befinden sich insgesamt vier Messräume, die in einem Abschnitt im Erdgeschoss eingerichtet wurden. Im Messraum 3 ist die bereits angeführte Temperierung verbaut. Im Messraum 1 wurde ein spezieller warmwassergeführter Heizkörper mit optimierter Strahlungswärmeabgabe (Strahlungsheizkörper) eingesetzt und in den Messräumen 2 und 4 unterschiedliche Wandheizungen, siehe Bild 42 (Auszug des Grundrisses). Es wurde in allen Messräumen eine neue Bodenplatte auf einer Dämmschüttung eingebaut und die Decken zu dem damals unbeheizten Obergeschoss von oben wärmegedämmt. Die Fenster sind in allen Räumen baugleich und wurden mit Sonnenschutzfolie verkleidet. Für den Zeitraum der Messungen wurde die Fassade zusätzlich mit einer Schutzbahn in ca. 1 m Abstand vor der Wand verhängt und so vor solarer Einstrahlung geschützt. Zur Vermeidung ungleicher Lüftungswärmeverlust wurde die Räume mit einer Tracergasmessung auf Dichtigkeit überprüft und abgedichtet sowie eine mechanische Belüftung eingebaut und mit gleichem Volumenstrom im Überdruck betrieben. Zur Abführung der eingebrachten Luft wurde in den zweiflügligen Fenstern in einem Fensterflügel die Scheibe gegen eine Holzplatte mit Abluftöffnung getauscht um Nebenströmungswege zu vermeiden. Eine detaillierte Beschreibung der Messräume, Heizsysteme und Ergebnisse sind in dem Forschungsbericht [Kilian et al 2015] und kompakter zusammengefasst in [Krus et al 2015] dargestellt.

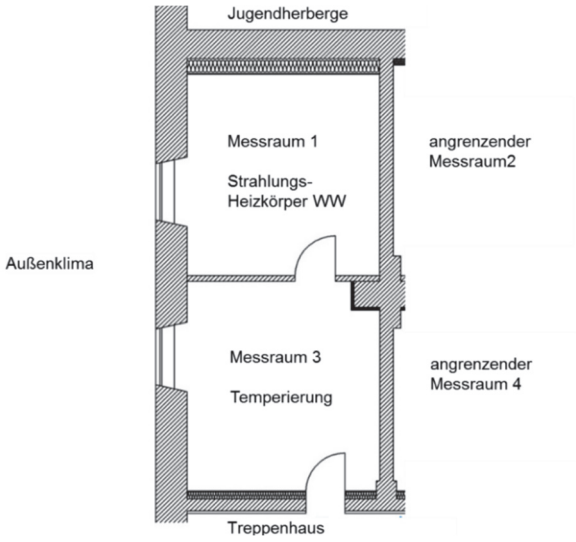


Bild 42: Teildarstellung des Grundrisses der Messräume in der Alten Schäfflerei [Kilian et al 2015] mit ergänzenden Eintragungen

Zur Überprüfung der Vergleichbarkeit werden Nullmessungen in jedem der Räume mit baugleichen elektrischen Heizkörpern für eine längere Periode bei winterlichem Außenklima und einer Raumtemperatur von 20 °C durchgeführt. Da nach Auswertung der Nullmessung aufgrund deutlicher Unterschiede zwischen den Räumen kein direkter Vergleich der Messräume untereinander zur Bewertung der Energieeffizienz möglich ist, wird die Nullmessung als raumweise Referenzmessung für einen Leistungsvergleich verwendet. Im nächsten Schritt erfolgt die Messung der Wärmeabgabe der warmwassergeführten Heizsysteme (Bauteiltemperierung und Strahlungsheizkörper) bei ähnlichem winterlichen Außenklima über eine längere Periode und einer Raumtemperatur von 20 °C. Die Wärmeabgabe des warmwassergeführten Systems wird mit der Wärmeabgabe des elektrischen Heizkörpers (Referenzmessung), unter Berücksichtigung des Außenklimas in den jeweiligen Messzeiträumen, verglichen. Im Ergebnis erhält man die Energieeffizienz des jeweiligen Heizsystems bezogen auf die Wärmeabgabe des elektrischen Heizkörpers im gleichen Raum. Für die unter Putz verlegte Temperierung (Bauteiltemperierung)

ergab die Bewertung der durchgeführten Messung 166 % der eingesetzten Energie der Referenz mit elektrischem Heizkörper (100 %), bei normierten vergleichbaren Bedingungen, siehe Bild 43 [Kilian et al 2015].

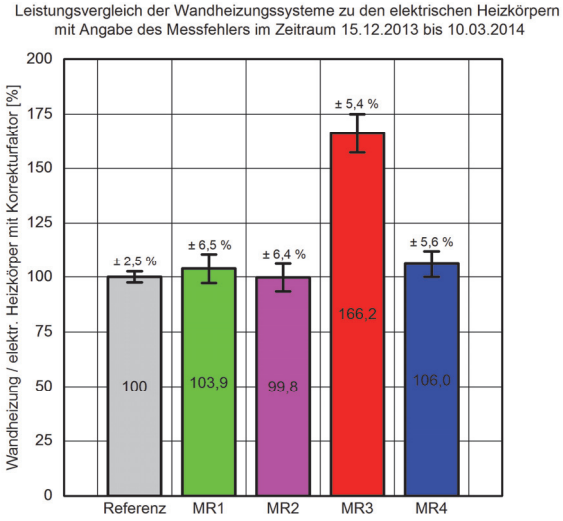


Bild 43: Verhältnis der berechneten Heizleistung der Heizungssysteme zur jeweiligen elektrischen Leistung (Referenz) in Prozent. Die elektr. Leistung wurde in Bezug auf die Dämmwirkung der Wandheizungssysteme (MR2 und MR4) angepasst. Quelle [Kilian et al 2015]. Das Ergebnis für die Bauteiltemperierung (MR3) erscheint zu hoch und wird daher in Kapitel 4.7 eingehend untersucht und neu bewertet.

Das Messergebnis für die Effizienz der Bauteiltemperierung wird in dem Kapitel 4.7 „Modellentwicklung und Anpassung der Berechnung der unter Putz verlegten Temperierung (Bauteiltemperierung)“ überprüft. Es erfolgt eine Neubewertung der Messung zur Bauteiltemperierung und Abgleich mit den rechnerischen Untersuchungen, die im Ergebnis eine günstigere Energieeffizienz, aber immer noch deutlich erhöhte Wärmeabgabe im Vergleich zur Referenz für die Temperieranlage in der Alten Schäfflerei ergeben.

4.4 Wärmeübergang und konvektive Wirkung – wandnahe Strömungsmessung

Im Kapitel „2.1.6 Wirkung der Auftriebsströmung“ ist der Stand des Wissens zur wandnahen Auftriebsströmung im Kontext der Temperierung dargestellt. Daraus ergibt sich ein uneinheitliches Bild zur Auftriebsströmung. Es wird angenommen, dass die im Bereich der Temperierung erwärmte Luft aufgrund von Auftriebseffekten an der Wand nach oben strömt. Mit Hilfe eines Luftströmungs-Teströhrchens [Dräger 2018] können Luftströmungen visualisiert werden. Die in dem Teströhrchen vorhanden Schwefelsäure reagiert an der Luft und es entsteht ein sichtbarer Rauch. Eigene Voruntersuchungen mit dieser Methode ergaben widersprüchliche Beobachtungen. Es konnten nur zum Teil wandnahe Strömungen mit Strömungsprüfröhrchen beobachtet werden. Mehrere Tests in verschiedenen Gebäuden mit Temperierung (St. Ulrich Sölde, Illerbeuren [Bichlmair et al 2016f]; Felix-Müller Museum, Neunkirchen [Bichlmair 2016i]; Heimatmuseum Oberammergau [Bichlmair 2016j]) haben unterschiedliche Ergebnisse gezeigt. Bild 44 zeigt eine Visualisierung von Luftströmen in der St. Ulrich Sölde im Freilichtmuseum Illerbeuren, die von der beheizten Wand am Boden des Bauernhauses nach oben steigen. Der Rauch strömt hier an der Wand bis zum Fensterbrett und löst sich dann in Verwirbelungen auf. Manchmal bewegten sich die Strömungen in verschiedenen Luftschichten gleichzeitig nach oben und unten. Bei einigen Versuchen löste sich die mit Rauch visualisierte Strömung unmittelbar über dem Heizrohr auf.

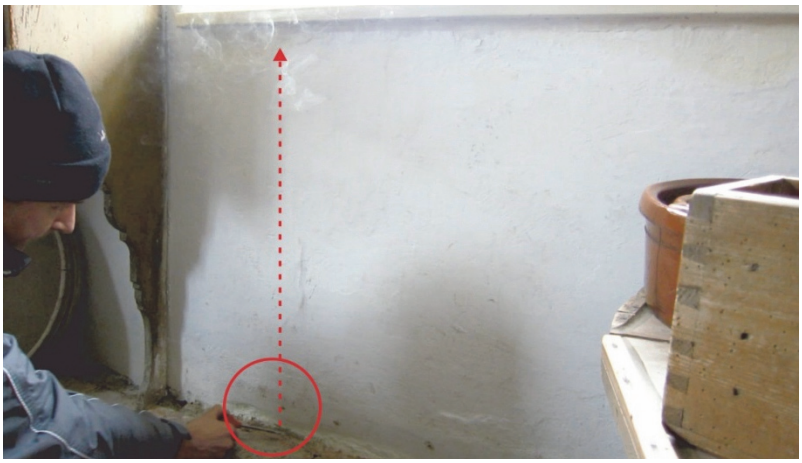


Bild 44: Visualisierung der Auftriebsströmung mit Rauch aus einem Test-Röhrchen in dem historischen Bauernhof St. Ulrich Sölde im Freilichtmuseum Illerbeuren. Im Sockel ist eine Bauteiltemperierung verbaut.

Im Weiteren werden die Labormessungen mit Particle Image Velocimetry (PIV) dargestellt und bewertet. Die durch das Heizsystem erzeugte Luftbewegung kann durch eine PIV-Messung erfasst und visualisiert werden. In einem Versuchsraum werden mit PIV-Messungen die aus der Temperierung bewirkten wandnahen Raumluftströmungen visualisiert, vermessen und berechnet. Mit dieser Methode wird zunächst das Strömungsvektorfeld messtechnisch erfasst. Anhand der Messung der Temperatur-Randbedingungen kann mit einem postprocessing-Modul aus dem Geschwindigkeitsfeld das thermische Feld berechnet werden [Mitterhofer et al 2013]. Mit dem Temperaturfeld und den Oberflächentemperaturen sind die konvektiven Übergangskoeffizienten bestimmbar. Anhand der mit klassischen Methoden berechneten Wärmeübergangskoeffizienten der wärmeabgebenden Heizfläche des Versuchsaufbaus erfolgt abschließend eine Betrachtung zur Umsetzung in der Berechnungssoftware für zweidimensionale rechnerische Bauteiluntersuchungen.

4.4.1 Particle Image Velocimetry (PIV)

PIV ist ein laseroptisches Strömungsmessverfahren, das ohne intrusiven Sensor Luftbewegungen flächenhaft quantifizieren kann. Hierfür wird ein auftriebsneutraler Tracer in die Strömung eingebracht. Als Tracer werden Ölpartikel mit einem Durchmesser von 0,5 - 1,5 µm verwendet [Raffel et al 2007]. Der Tracer wird von einem doppelt gepulsten Laser im Mikrosekundenbereich zwei Mal beleuchtet. Die dabei auftretende Mie-Streuung wird von einer zeitlich synchronisierten Charge-coupled Device (CCD) Kamera aufgenommen. Die Mie-Streuung tritt an kugelförmigen Teilchen auf, deren Radius sich in der gleichen Größenordnung befindet wie die Wellenlänge der auftreffenden Strahlung. Die Tracerpartikel und das verwendete Laserlicht mit einer Wellenlänge von 532 nm entsprechen diesem Prinzip. Aus dem bekannten zeitlichen Abstand der Kamera-Bilder und dem Versatz der Partikel kann die Geschwindigkeit berechnet werden, siehe [Raffel et al 2007]. Für die Auswertung wurde die Software DaVis 8.0 verwendet. Eine detaillierte Beschreibung des verwendeten PIV-System ist in [Weingärtner 2012] dargestellt.

Messkonzept zur PIV-Messung

Um möglichst realistische Rahmenbedingungen zu erhalten, wurde ein Messraum mit Ziegelmauerwerk mit mäßigem U-Wert von 0,78 W/m²K und einer Gesamtwanddicke von ca. 41 cm gewählt. Die zu untersuchende Temperierung wird mit einer elektrischen Widerstandsheizung mit einer Breite von 12 cm realisiert. Die Heizleistung beträgt 30 W/m. Die Heizfolie ist dazu

auf das Mauerwerk in einer Höhe von 78 cm über Fußbodenhöhe an der Wand aufgeklebt. Darauf ist ein Metallblech mit ca. 12,5 cm Breite und ca. 1 mm Dicke montiert. In Bild 45 ist der Grundriss und ein vertikaler Schnitt durch den Versuchsraum abgebildet. Die Anordnung der Temperierung, Sensoren und der Raum-in-Raum Abtrennung sind schematisch mit eingezeichnet.

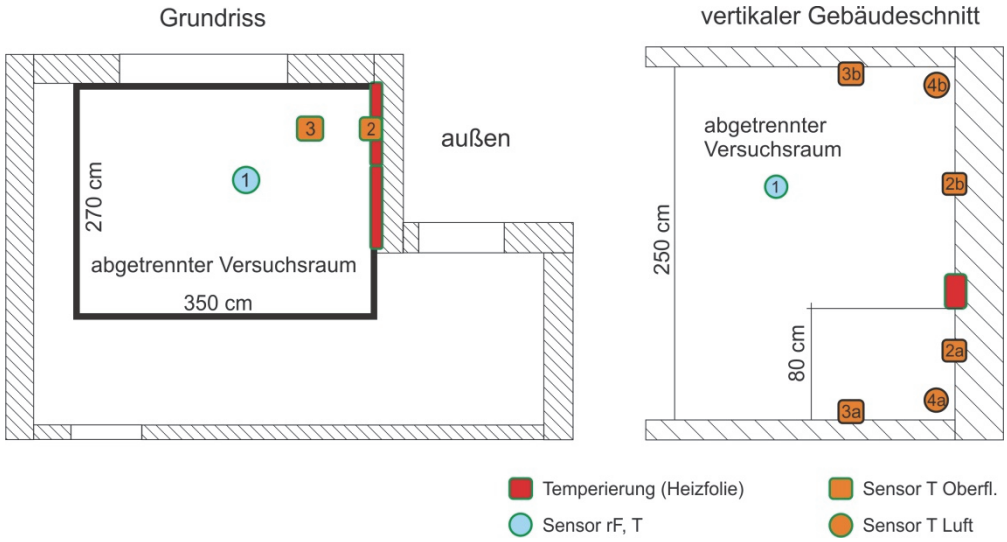


Bild 45: Grundriss und Gebäudeschnitt des Testraums mit Raum-in-Raum Abtrennung. Mit eingetragen sind die Positionen der verwendeten Sensoren und der Temperierung.

Um die Aufnahme der Lichtstreuung an den Tracerpartikel zu verbessern, ist es notwendig den Raum zu verdunkeln. Aus diesem Grunde wurde ein Raum-in-Raum System mit Stoffbahnen konstruiert. Die Trennung erfolgte dabei durch hochabsorptive Stoffbahnen, um den Lichteinfall auf ein Minimum zu reduzieren. Zusätzlich installierte Temperatur- und Feuchtesensoren ermöglichen zudem eine Bestimmung der Randbedingungen während der Messung. Diese beinhalten zwei Sensoren zur Messung der Wandoberflächentemperatur, zwei Sensoren für die Fußboden- und Deckentemperatur, zwei Sensoren in Wandnähe, sowie ein Sensor zur Messung der Raumtemperatur und der Luftfeuchte.

Messaufbau und Justierung des Aufbaus zur Verringerung von Reflektionen an der Wandoberfläche

Bei der Messung an einer Wand treten immer Reflektionen des Laserlichtes an der Wand auf. Bei einem optimalen schwarzen Strahler mit einer Strahlungsabsorption von 1 würde keine Strahlung reflektiert. Dieser idealisierte Zustand kann in einem Messaufbau jedoch nicht realisiert werden. In [Sattari 2015] wird von einer Messung an der Wand über einem Heizkörper berichtet. Bei dem Versuchsaufbau wurde die Problematik der Reflektion und Streuung mit dem Aufbringen eines schwarzen Stoffes umgangen und gute Ergebnisse erzielt. Bei dem vorgesehenen Messaufbau wird eine Stoffschicht jedoch als störend angesehen. Da das Ziel der Messung die Beobachtung der Wechselwirkung zwischen Wandoberflächentemperatur und Raumlufttemperatur ist, verzehrt eine zusätzliche Schicht die tatsächlichen Verhältnisse durch die dämmende Wirkung des Stoffes. Um ein starkes Streuen des auf die Wand auftreffenden Laserlichtes zu reduzieren, wurden einige Versuche vorgenommen, bis schließlich zufriedenstellende Ergebnisse erreicht wurden. In Bild 46 ist der Laser in Betrieb und die Lichtschnittebene erkennbar (linkes Bild). Im rechten Bild ist der gleiche Bildausschnitt im Thermogramm abgebildet. Die Heizfläche zeichnet sich durch höhere Temperaturen deutlich von der kühleren Wandoberfläche ab. Die eingezeichnete senkrechte Linie markiert ein Messlineal direkt neben der Laserebene, an der die Temperaturinformation ausgelesen wurde und in Bild 47 als Liniendiagramm abgebildet ist.

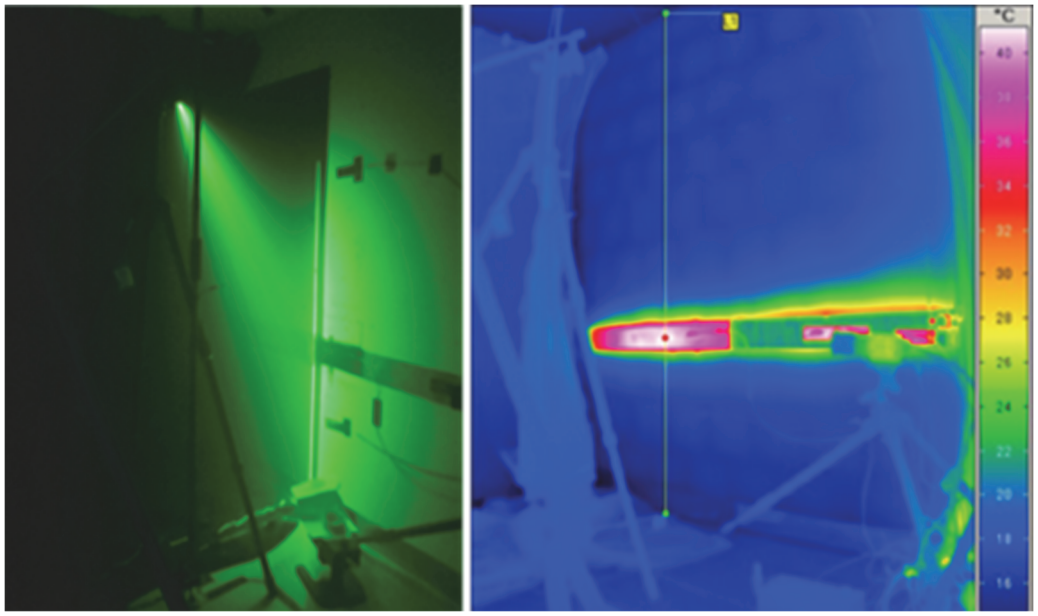


Bild 46: Messaufbau mit aktivem Laser während der PIV-Messung. Im rechten Bild ist eine IR-Aufnahme der Außenwand mit aktivem Heizstreifen abgebildet. Die unterschiedlichen Farbtemperaturen entstehen durch unterschiedliche Emissionskoeffizienten des gestrichenen bzw. nicht gestrichenen Blechstreifens. Der Temperaturverlauf der senkrechten Linie im IR-Bild wird im nachfolgenden Diagramm abgebildet.

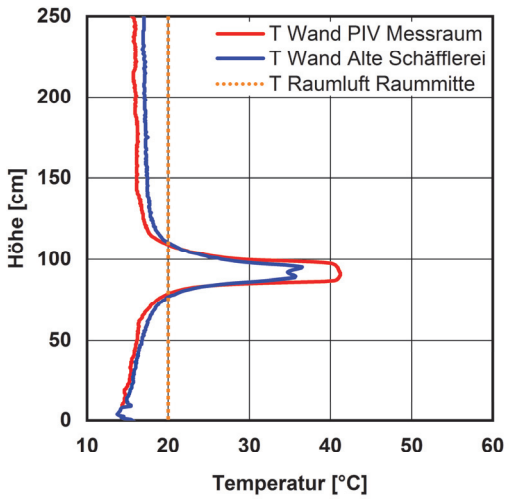


Bild 47: Der Graph zeigt den vertikalen Temperaturverlauf an der Innenoberfläche der Außenwand aus dem Thermogramm in Bild 46. Im Bereich des Heizstreifens stellt sich eine Temperaturerhöhung ein, die deutlich über der Raumlufttemperatur liegt. Der Temperaturverlauf entspricht einer typischen Wandtemperierung im Brüstungsbereich wie z.B. der Temperierung in der Alten Schäfflerei (blaue Linie).

Überprüfung Strömungsverhalten der Raumluft mit Anemometer

Um eine Bewertung der zu Grunde liegenden Luftbewegung im Testraum abgeben und Zugluft ausschließen zu können, wurden bei laufender Heizung zudem Messungen mit Anemometern durchgeführt. Dafür wurden drei Raumpositionen ausgewählt, an denen jeweils in einer Höhe von 10 cm, 60 cm, 110 cm und 240 cm gemessen wurde. Position 1 befindet sich in etwa in Raummitte, Position 2 in Raummitte mit geringem Abstand zur Raum-in-Raum Abhängung und Position 3 wandnah vor der Außenwand mit Heizstreifen.

Im Ergebnis liegen im Raum im Mittel sehr geringe Geschwindigkeiten von kleiner 0,04 m/s vor. Lediglich am Messpunkt 3, in der Nähe der Heizung, treten leicht erhöhte Geschwindigkeiten auf. Vor allem der oberste Sensor verzeichnete mit im Durchschnitt 0,08 m/s wesentlich hö-

here Geschwindigkeiten. Zusammenfassend kann davon ausgegangen werden, dass keine Störung durch von außen einströmende Zugluft stattfindet. Die Anemometer-Messungen zeigen eine sehr geringe grundlegende Raumströmung sowie erhöhte Luftbewegung im Bereich der Temperierung. Der Testraum genügt demnach den Ansprüchen und ermöglicht eine störungsfreie PIV Messung der Strömung in Heizungsnähe.

Messergebnisse PIV

Bei der Messung wurde darauf geachtet, dass der Wärmestrom durch die Wand bereits vollständig (stationär) ausgeprägt war. Die Heizung wurde aus diesem Grund bereits zwei Tage zuvor in Betrieb genommen und hatte zum Zeitpunkt der Messung eine Oberflächentemperatur von 36,4 °C. Zeitgleich zur Messung des Geschwindigkeitsfeldes wurde der Zustand des Raumklimas erfasst.

Der Mittelwert für den Auswertezeitraum von ca. 20 Minuten ergibt für die Raumlufttemperatur 18,4 °C und entspricht der wandnahen Lufttemperatur im oberen Raumbereich mit ebenfalls 18,4 °C. Gemäß dem natürlichen Temperaturgradienten stellt sich in Bodennähe eine Temperatur von rund 16,2 °C ein. Die Oberflächentemperatur des Fußbodens ist im Mittel bei 14,3 °C und an der Decke bei 15,0 °C. Circa 80 cm über der Heizung stellt sich eine Wandoberflächentemperatur von 14,4 °C ein und 30 cm unter dem Heizstreifen eine mittlere Wandoberflächentemperatur von 13,3 °C. Die relative Luftfeuchte beträgt rund 46 % rF.

Die Messung der Geschwindigkeitsfelder erfolgt über 30 s mit einer Frequenz von 15 Hz und ergibt damit 450 Bilder des Geschwindigkeitsfeldes. Bild 48 zeigt das Vektorfeld der Strömungsgeschwindigkeit zum Zeitschritt 82 nach 5,46 Sekunden. Die Position der Wand ist dabei bei x=0 mm (rechts im Diagramm). Die Heizleiste beginnt bei ca. y=310 mm. Die Farbenskala zeigt die y-Komponente der Geschwindigkeitsvektoren (vertikale Geschwindigkeit) an. Die abgebildeten Vektoren entsprechen in ihrer Länge der Gesamtgeschwindigkeit und geben zudem die Richtung der Strömung an. Gut zu erkennen sind auch die durch die entgegengesetzte Strömung entstehenden Wirbel. Der Bereich unter der Heizung ist von starken Unregelmäßigkeiten gekennzeichnet. Es bildet sich ein Staupunkt zwischen der Fallluftströmung der aufwärts strömenden Warmluft aus. Der Staupunkt liegt zu diesem Zeitpunkt bei ca. y = 650 mm und damit ca. 18 cm über dem oberen Rand des Heizstreifens. Im zeitlichen Verlauf der beobachteten 30 Sekunden verschiebt sich der Staupunkt hauptsächlich zwischen ca. 11 cm und 15 cm, erreicht aber auch Werte zwischen ca. 8 und cm 26 cm. Die Fallluftströmung der kalten Wand und der konvektive Auftrieb durch die Heizung setzen sich in ihrer Wirkung abwechselnd durch.

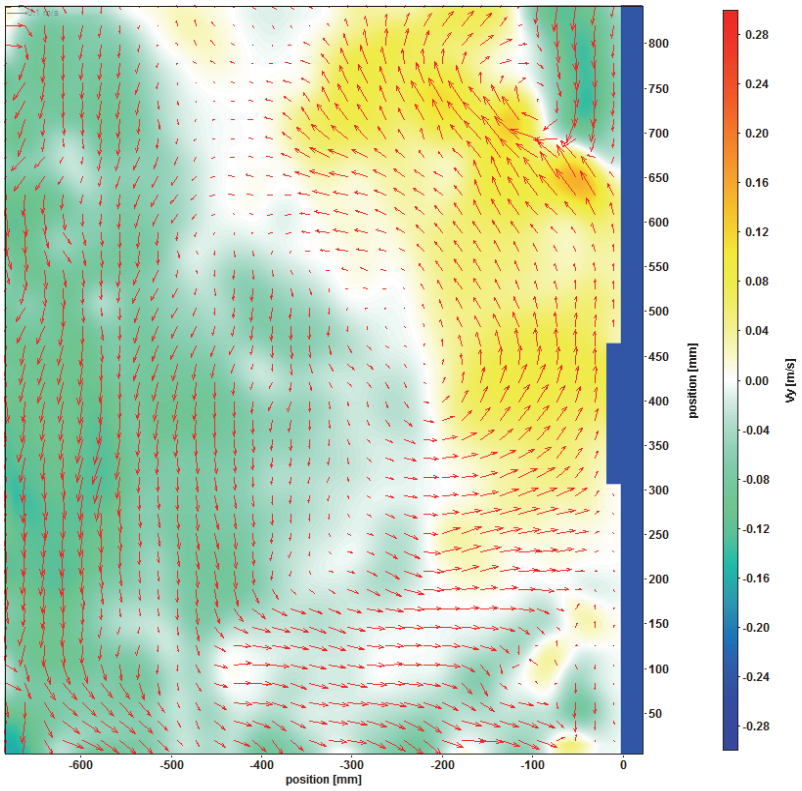


Bild 48: Gemessenes Strömungsfeld an der Außenwand auf Höhe des Heizstreifens (blaues Rechteck am rechten Bildrand). Der Bildausschnitt beträgt ca. 68 cm x 84 cm (BxH). Zeitschritt 82/450 bei 5,46 Sekunden, [Mitterhofer 2013]. Von dem Heizstreifen geht eine Auftriebsströmung aus, die nach ca. 18 cm von der Wand ab abgelenkt wird.

4.4.2 Temperaturfeldberechnung

Die PIV Ergebnisse werden als Grundlage für eine numerische Lösung der Energiegleichung aus dem Navier-Stokes Gleichungssystem genutzt. Der von [Mitterhofer et al 2013] entwickelten numerische Lösung liegt die Boussinesq-Approximation zugrunde, welche für gravitationsabhängige Strömungen, die nur kleine Temperaturunterschiede aufweisen, angewendet werden kann. Stoffeigenschaften, wie Dichte, spezifische Wärmekapazität usw. werden demnach als konstant, unabhängig von der Temperatur, angenommen. Des Weiteren kann viskose Dissipation vernachlässigt werden.

Entsprechend der Methodik, wie sie in [Mitterhofer et al 2013] angewandt wird, kann die Temperaturverteilung des Messbereichs bestimmt werden. Dazu werden für jeden gemessenen Zeitschritt die Geschwindigkeitsvektoren als Eingangsgrößen für die Gleichung benutzt und nach der Temperatur gelöst. Die räumliche und zeitliche Auflösung der PIV Messung bildet dabei die Basis für die Diskretisierung des Rechengebiets. Die Lösung der diskretisierten Gleichung wurde in MATLAB durchgeführt [Mitterhofer 2013]. Zusätzlich werden zur Lösung der Gleichung die Randbedingungen benötigt. Die Temperatur der Heizung wird konstant über die gesamte Breite zu den gemessenen 36,4 °C gesetzt. Der Temperaturverlauf an der Wandoberfläche wird anhand einer Infrarotaufnahme nachvollzogen. Aufgrund der unterschiedlichen Diskretisierung des gemessenen Vektorfeldes und der Auflösung der IR-Kamera wird mit dieser nur auf die Temperaturverläufe geschlossen und diese mit einer quadratischen Funktion angenähert. Über dem Heizstreifen wird die Temperatur auf den ersten 10 cm mit einer quadratischen Funktion angenähert, bis sie die gemessene Wandoberflächentemperatur erreicht. Für den Bereich unterhalb der Heizung geschieht dies innerhalb von 5 cm. Der Temperaturanstieg

von der Wand in Richtung Raum wurde ebenfalls mit einer quadratischen Funktion auf den ersten 5 cm angenähert angenommen. Bild 49 zeigt das berechnete Temperaturfeld zu dem gemessenen Vektorfeld in Bild 48 für den Zeitschritt 82 von 450 Zeitschritten bei Sekunde 5,86. Die Temperaturen sind farbcodiert abgebildet.

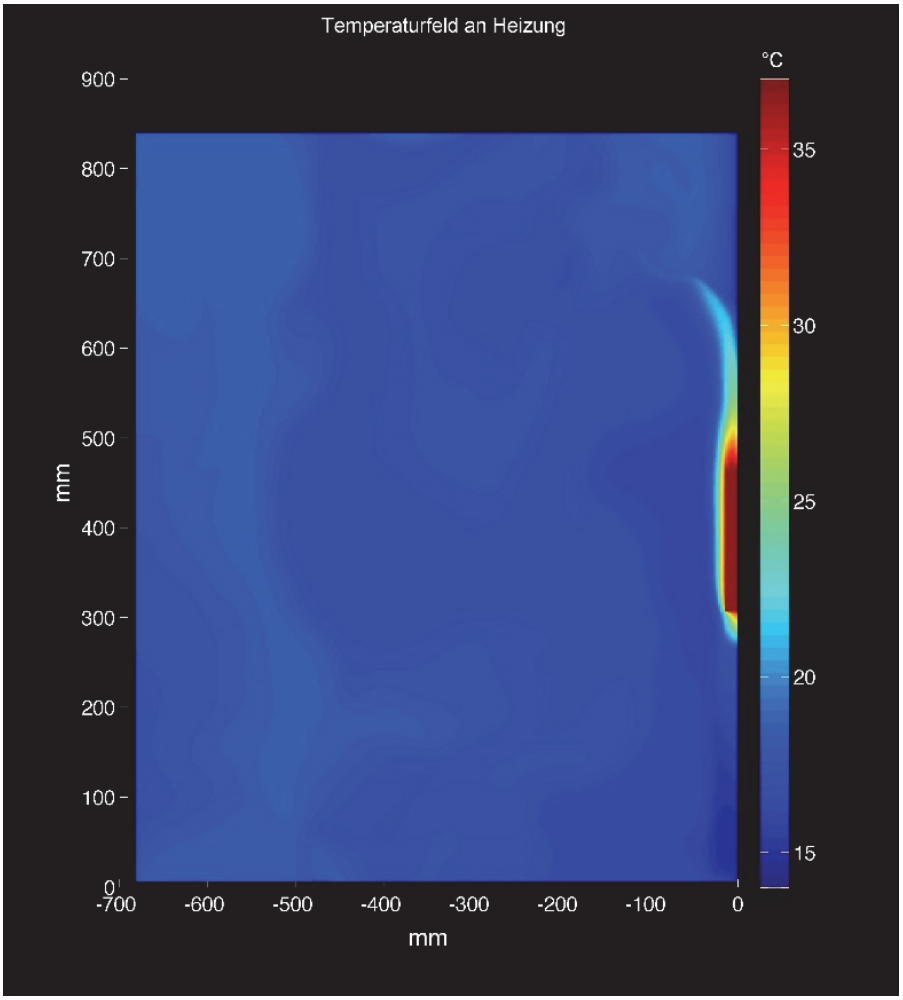


Bild 49: Temperaturfeld der Raumluft beeinflusst durch den Heizstreifen bei Zeitschritt 82/450 bei 5,46 Sekunden. Die Auftriebsströmung wird nach ca. 18 cm ab Oberkante Heizstreifen von der Wand abgelenkt, [Mitterhofer 2013].

Bild 50 zeigt das instationäre Verhalten der Temperaturverteilung und die Korrelation mit dem Geschwindigkeitsfeld. Die Fallluftströmung über der Heizung bringt kühle Luft und verdrängt die aufsteigende Warmluft in Richtung Raummitte. Gut zu erkennen ist auch, dass die im unteren Bildbereich einströmende Luft zunächst mit niedrigen Temperaturen an die Heizung gelangt. Der Auftrieb wird also durch das Druckgefälle, das die von der Heizung aufsteigende Luft erzeugt, verursacht. An der Heizung erfolgt eine Erwärmung und dadurch die konvektiv bedingte Auftriebsströmung.

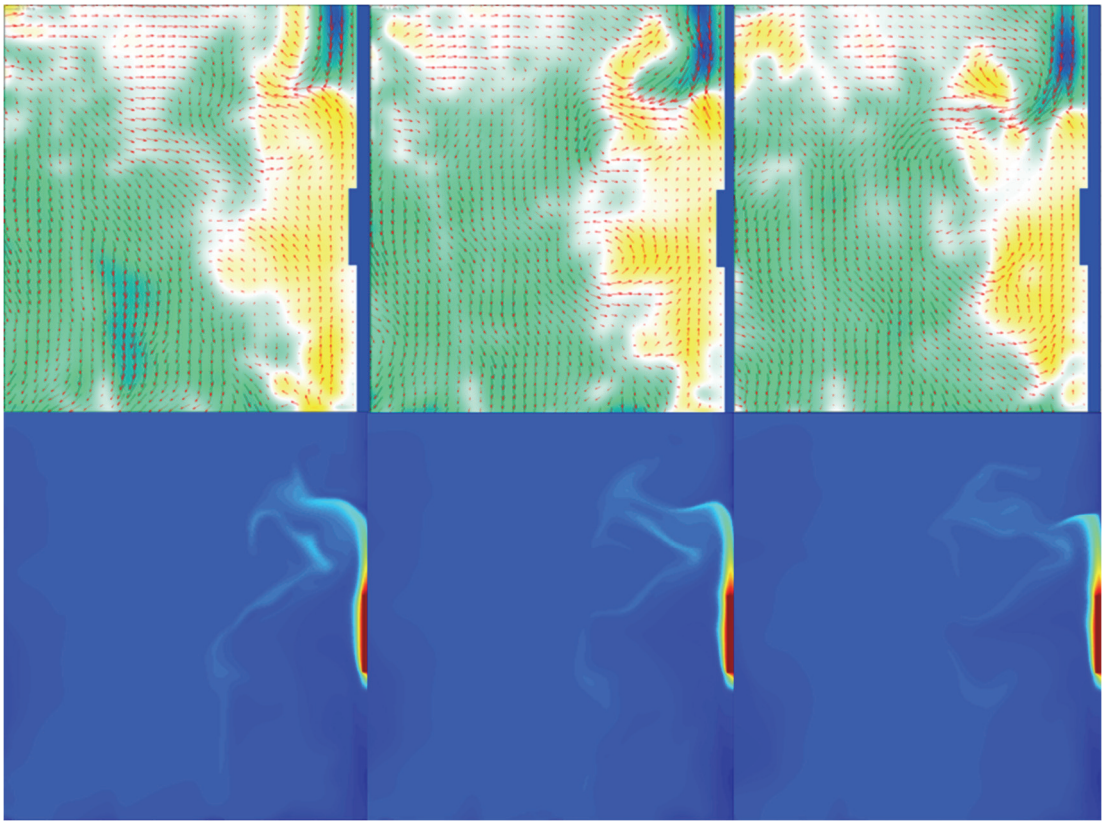


Bild 50: Vergleich zwischen Geschwindigkeits- und Temperaturfeld bei verschiedenen Zeitschritten, [Mitterhofer 2013]

4.4.3 Berechnung der konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten

Da der konvektive Wärmeübergangskoeffizient proportional zum Temperaturgradienten ist, siehe Gleichung (Gl. 21) [Mitterhofer et al 2013] sowie (Gl. 4) und (Gl. 5) (siehe ab S.12), kann aus dem Temperaturfeld der konvektive Wärmeübergangskoeffizient an der Wandoberfläche berechnet werden. Dies ermöglicht eine Einschätzung der Intensität des Wärmeübergangs und dessen zeitlicher Variabilität. Benötigt werden hierfür die Wärmeleitfähigkeit des Fluids sowie die Randbedingungen. Für die Luft wird eine mittlere Wärmeleitfähigkeit von 0,026 W/m angenommen [VDI 2006] und für die Oberflächen- und Raumtemperaturen die Messwerte.

(Gl. 21) $$h_c \sim \frac{\partial T}{\partial n}$$

h_c	[W/m²K]	konvektiver Wärmeübergangskoeffizient
T	[°C]	Temperatur
n	[-]	örtlicher Diskretisierungsschritt normal zur Oberfläche

Zur Bestimmung des Temperaturgradienten senkrecht zur Wand wird der Temperaturverlauf durch ein Polynom vierter Ordnung angenähert. Die Wahl der Stützstellen fällt auf wandnahe Orte, da lediglich die Steigung des Funktionsverlaufs an der Wand für den weiteren Rechengang von Bedeutung ist. Dies ermöglicht eine sehr exakte Annäherung der Temperaturen im relevanten Bereich, wie Bild 51 zeigt. Durch die Bestimmung des Gradienten der Polynomfunktionen an der Wand ist (Gl. 21) lösbar. Das Vorgehen wird exemplarisch für fünf Punkte an der Wand für den Messzeitraum durchgeführt. Bild 52 links zeigt die ausgewählten Positionen A bis E mit Pfeilen. Die Position A befindet sich unter und die Positionen B bis E oberhalb des Heizstreifens. In Bild 52 rechts ist die Auswertung für die Positionen A - E (Strähnen) über den gesamten Messzeitraum abgebildet.

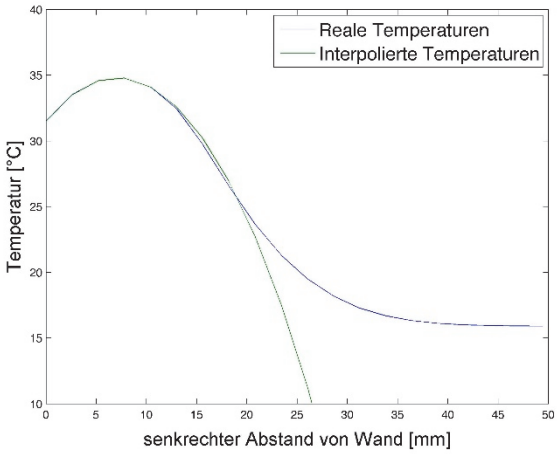


Bild 51: Vergleich des realen Temperaturverlaufs und des approximierenden Polynoms an Position B bei Sekunde 5,46 (siehe Bild 49), [Mitterhofer 2013]

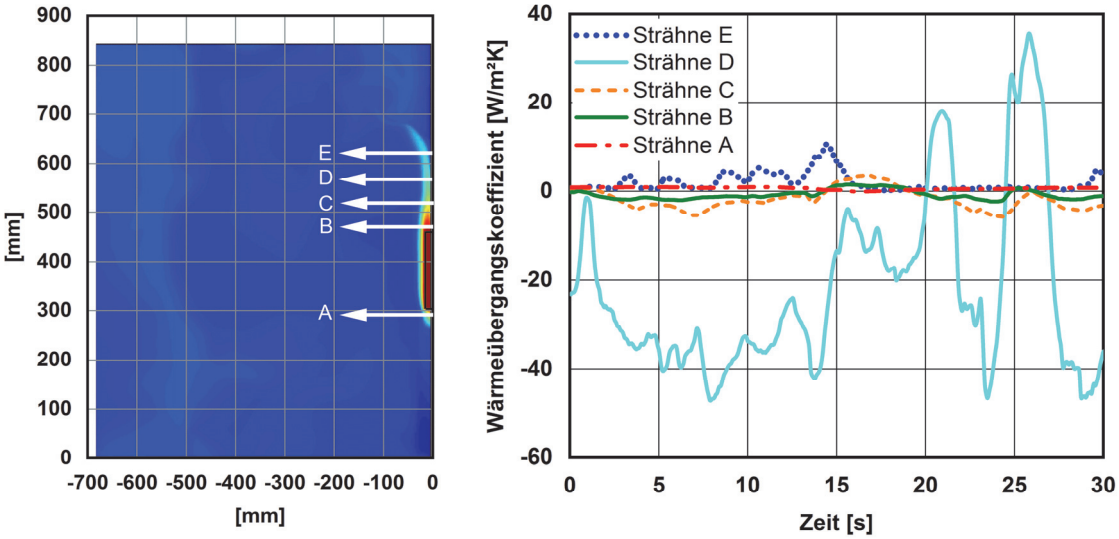


Bild 52: Links: Exemplarisch ausgewertete Positionen A bis E. A befindet sich knapp unter dem Heizstreifen, B, C, D und E jeweils oberhalb. Rechts Darstellung der konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten an den Positionen A - E (Strähnen) über den Messzeitraum

Die konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten nahe der Heizung an den Positionen A und B variieren nur wenig mit der Zeit. Die geringen Standardabweichungen bestätigen dies, siehe Tabelle 12. Unterhalb der Heizung an Position A ist dies noch ausgeprägter, da hier die Luftströmung und somit der konvektive Wärmetransport sehr gleichmäßig verläuft. Bei Position A wird von dem über Wärmeleitung erwärmten Wandbereich kontinuierlich Wärme konvektiv an die Raumluft abgegeben. Bei Position B und C gibt die durch den Heizstreifen stark erwärmte Luft Wärme konvektiv an die Wand ab und erwärmt diesen Wandbereich zusätzlich zur Wärmeleitung ausgehend vom Heizstreifen. Diese Richtungsänderung wird im folgendem durch ein negatives Vorzeichen gekennzeichnet. Über der Heizung trifft die abfallende Kaltluftströmung auf die an der Heizung aufgewärmte Luft. Diese Gegenströmungen bilden einen Staupunkt, der sich wechselseitig nach oben und unten bewegt. In diesem Bereich knapp über der Heizung befinden sich also abwechselnd kalte und warme Luftmassen. Das Wechselspiel wird am Punkt D sehr deutlich. Die Wärmeübergangskoeffizienten an der Wand verändern sich bei jedem Wechsel und erreichen betragsmäßig sehr hohe Werte, da sich unmittelbar vor der gegenseitigen Abbremsung die höchsten Strömungsgeschwindigkeiten einstellen und entsprechend warme aufsteigende oder kalte abwärts fließende Luft den Wandbereich überströmt. Die sich mit der gewählten Auswertemethode ergebenden extreme Werte der Wärmeübergangskoeffi-

zienten liegen außerhalb einer realistischen Größenordnung. Auf eine Auswertung mit Mittelwertbildung wird deshalb für Position D in Tabelle 12 verzichtet. An Position E klingt dieser Effekt wieder ab. Der Staupunkt wandert nur sehr selten darüber. Die Warmluftströmung kann sich nicht so weit nach oben durchsetzen. Lediglich wenige Male, wie kurz vor Sekunde 15, gelangt etwas warme Luft nach oben.

Tabelle 12: Statistische Auswertung der konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten über den Messzeitraum von 30 Sekunden

Position	A	B	C	D	E
Mittelwert h_c [W/m²K]	0,6	-0,8	-1,8	-	1,9
Standardabweichung [W/m²K]	0,3	1,1	2,4	-	2,0

Mit der PIV-Messung über 30 Sekunden werden die erheblichen Fluktuationen der Auftriebsströmung über einem Heizstreifen an einer Außenwand über den zeitlichen Verlauf erstmals aufgezeigt. Mit der Messmethode kann der auf- und abwandernde Staupunkt mit Ablösung der Auftriebsströmung nachvollzogen werden. Durch den variierenden Staupunkt ergeben sich in diesem Bereich im Vergleich zur Wandtemperatur kältere oder wärmere Luftschichten (kalte Abwärtsströmung oder warme Auftriebsströmung), die eine Richtungsänderungen des Wärmestromes bewirken. Dadurch ergeben sich mit der gewählten Auswertemethode insbesondere an Punkt D bei den wechselnden Temperaturverhältnissen extrem schwankende und unrealistisch hohe Wärmeübergangskoeffizienten mit wechselndem Vorzeichen. Für eine belastbare statistische Auswertung der Wärmeübergangskoeffizienten und Bilanzierung über die Wandhöhe sind deshalb tiefergehende Untersuchungen mit längeren Beobachtungszeitraum, ggf. mit anderen Messmethoden, wie z.B. mit dem Convective Heattransfer Meter (CHM) [Mayer et al 2018], erforderlich.

4.4.4 Wärmeübergangskoeffizient der Bauteiltemperierung für die rechnerische Bauteiluntersuchung

Es werden die Oberflächentemperaturen der Außenwand im Versuchsraum im Bereich der Temperierung mit einer Bauteilsimulation berechnet und mit den gemessenen Oberflächentemperaturen einer IR-Aufnahme verglichen. In der Bauteilberechnung wird über die Wandhöhe ein konstanter Wärmeübergangskoeffizient mit 8 W/m²K verwendet. Der Berechnung liegen die tatsächlichen Abmessungen und Wandaufbauten sowie das über 36 Stunden gemittelte Temperaturniveau innen und außen zugrunde. Die Temperierung wurde als Heizstreifen entsprechend dem Messaufbau in die Simulation implementiert. Die Oberflächentemperaturen bilden sich in der Simulation im Gegensatz zum realen Verhalten symmetrisch zur Heizleitung aus. Die Differenz der Messwerte zu den berechneten Temperaturen resultiert aus dem tatsächlichem Verhalten im Vergleich zum idealisierten, siehe Bild 53. Die Temperaturerhöhung über dem Heizstreifen in der IR-Thermographie gegenüber der Simulation resultiert aus der konvektiven Wärmeabgabe der an der Wand anliegenden Auftriebsströmung zurück an die Wandoberfläche.

Anhand der Oberflächentemperaturen kann der radiative Wärmeübergangskoeffizienten h_r der Wand berechnet werden. Nach [Glück 1990, VDI 2006] ergibt sich bei den vorhandenen Randbedingungen und einer mittleren Oberflächentemperatur von rund 25 °C im Bereich oberhalb des Heizstreifens ein typischer Wärmübergangskoeffizient des Strahlungsanteils h_r von 5,1 W/m²K. Die Oberflächentemperatur der Wand liegt bis ca. 20 cm über dem Heizstreifen über der Raumlufttemperatur von 22 °C. In dem Wandbereich zwischen Heizstreifen bis Position C wird Wärme gemäß Tabelle 12 konvektiv von der wandnahen Luft mit einem Wärme-

übergangskoeffizienten von ca. 0,8 bis 1,8 W/m²K an die Wand abgegeben. Da die Oberflächentemperatur in diesem Bereich über der Raumtemperatur liegt, wird über diesen Flächenanteil jedoch Wärme über Strahlung mit einem h_r von 5,1 W/m²K an den Raum abgegeben. In diesem Bereich verringert sich in der Summe die mit Strahlung übertragene Wärme um den konvektiv von der Auftriebsströmung an die Wand abgegebene Wärme. Die Wärmeübergangskoeffizienten sind für diesen Flächenanteil deshalb auf ca. 3,3 W/m²K bis 4,3 W/m²K reduziert, gegenüber einem mittleren Wärmeübergangskoeffizienten von 8 W/m²K.

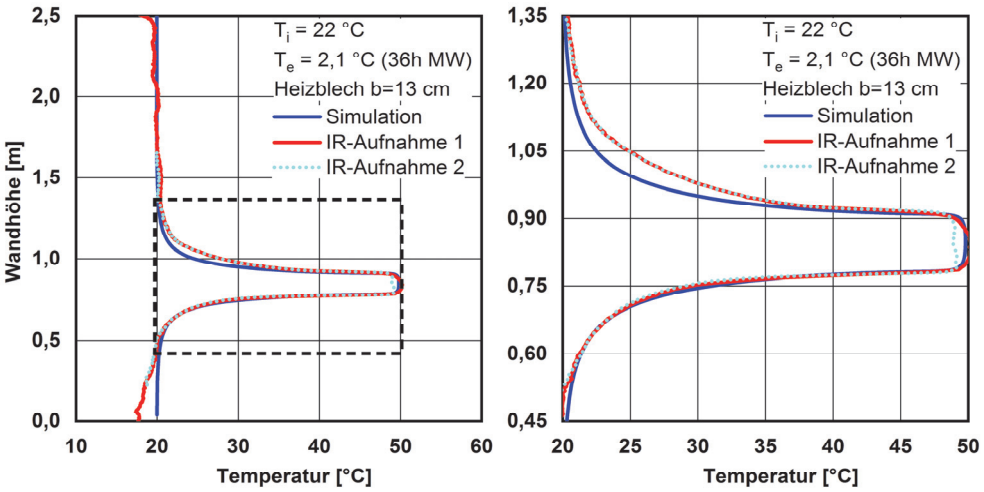


Bild 53: Oberflächentemperatur der Außenwand innen im PIV-Messraum mit IR-Aufnahme erfasst und mit Bauteilsimulation berechnet. Der Bereich im gestrichelten Rechteck ist im rechten Diagramm vergrößert dargestellt.

Mit der im Wärmeatlas [VDI 2006] angegebenen Methodik kann der konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten h_c am Heizstreifen für den Versuchsaufbau der PIV-Messung ermittelt werden. Für die Randbedingungen mit 36,4 °C und einer Heizstreifenbreite von 12,5 cm (hydraulische Länge) ergibt sich ein h_c von ca. 4,8 W/m²K. Mit einem nach [VDI 2006] bestimmten h_r von rund 5,5 W/m²K bei 36,4 °C Heizoberflächentemperatur resultiert mit $h_c + h_r$ ein Gesamtwärmeübergangskoeffizient h von ca. 10,3 W/m²K für den Heizstreifen. Gegenüber der Annahme eines über die Wandhöhe konstanten Wärmeübergangskoeffizienten in der rechnerischen Untersuchung von 8 W/m²K wird der Wärmetransport unterschätzt. In diesem Bereich erfolgt real ein höherer Wärmestrom in den Raum im Vergleich zur Simulation. Dem gegenüber ist gemäß Auswertung der PIV-Messung oberhalb des Heizstreifens bis in etwa bis Position C ein der Wärmestrom in den Raum mit einem Gesamtwärmeübergang von ca. 4 W/m²K gegenüber der in der Simulation angenommenen 8 W/m²K geringer.

Die erhöhte Wärmeabgabe im Bereich des Heizstreifens wird durch die Wärmeabgabe der Auftriebsströmung an die Wand relativiert. Eine genaue Bilanzierung der Wärmeströme in diesem Wandbereich ist aus den angestellten Untersuchungen nicht zuverlässig ableitbar. Näherungsweise wird die erhöhte Wärmeabgabe im Bereich des Heizstreifens durch die konvektive Wärmeabgabe der Auftriebsströmung oberhalb des Heizstreifens aber wieder kompensiert, sodass gegenüber dem mittleren Wärmeübergangskoeffizienten von 8 W/m²K für horizontale Wärmeströme [DIN EN ISO 6946] bzw. für Wandheizungen [DIN EN 1264] und [DIN EN 15377] allenfalls nur geringe Abweichungen erwartet werden.

Die nachfolgenden rechnerischen Untersuchungen der Wärmeabgabe der Temperierung werden deshalb mit einem mittleren Wärmeübergangskoeffizienten h von 8 W/m²K über die gesamte Wandhöhe angenommen. Die Auswirkungen anderer Wärmeübergangskoeffizienten auf die Wärmeabgabe wird bei der Parameterstudie (Kapitel 4.5.3 Parameterstudie mit 2D Simulation) mit untersucht.

4.4.5 Fazit zur wandnahen Strömungsmessung

Mit PIV ist es möglich, das Geschwindigkeitsfeld in der Nähe der Temperierung an einer Außenwand zu messen. Die Berechnung des thermischen Feldes anhand des Geschwindigkeitsfeldes liefert zusätzliche Informationen über die Temperaturverteilung der Raumluft. Durch die Beschaffenheit des Systems Raumluft, Außenwand und Temperierung bestehen drei verschiedene Temperaturniveaus: die Temperatur des Fluids (Raumluft), die etwas kältere Oberfläche der Außenwand und das höhere Temperaturniveau der Temperierung. Die Ergebnisse der PIV-Messung sind vergleichbar mit den Versuchen von [Schetz et al 1964] mit einem beheizten Metallzylinder in Wasser als Fluid. Nach den Ähnlichkeitsbeziehungen der Thermodynamik konnte dies erwartet werden, jedoch unterscheidet sich die Temperaturverteilung an einer Außenwand mit Temperierung deutlich von der exakten Temperaturstufe der Experimente von Schetz. Außerdem wurde von einigen Experten aufgrund ihrer Experimente mit einem Rauchrohr ein anderes Verhalten abgeleitet. Eine Visualisierung der strömenden Luft mit Hilfe von Rauch zeigt nicht das ganze Bild einer Raumluftströmung an einer Außenwand mit Temperierung. Darüber hinaus sind die Randbedingungen oft unbekannt und eine ausreichende Durchmischung von Rauch mit Raumluft nicht gegeben.

Mit den aus der PIV-Messung bestimmten konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten kann nur eine Abschätzung des mittleren Gesamtwärmeübergangskoeffizienten vorgenommen werden. Insbesondere an dem ausgewerteten Punkt im Bereich des wandernden Staupunktes ergeben sich unrealistisch hohe Werte die zur Klärung tiefergehende Untersuchungen erfordern. Die konvektive, von dem Heizstreifen abgegebene Wärme wird im Bereich unmittelbar über der Heizung wieder zum Teil an die Außenwand abgeben. Die von der Heizung an die Raumluft abgegebene gesamte konvektive Wärme reduziert sich dadurch. Für die weiteren rechnerischen Betrachtungen wird deshalb vereinfachend und gemäß [DIN EN 1264] und [DIN EN 15377] ein einheitlicher mittlerer Wärmeübergangskoeffizient, d.h. auch für den beheizten Wandbereich, von 8 W/m²K verwendet.

4.5 Thermische und hygrothermische Berechnung der Wärmeabgabe bei unter Putz verlegter Heizleitungen (Bauteiltemperierung)

Anhand der Bauteilsimulationen können die thermischen und hygrischen Einflüsse der Temperierung untersucht werden. Weitere zweidimensionale Bauteilsimulationen werden für Feststellung von Auswirkungen unterschiedlicher Anordnungen von Heizleitungen am Bauteil in Parameterstudien durchgeführt. Anhand der messtechnischen Untersuchungen sowie mit computergestützten Simulationen erfolgt eine Eingrenzung der Wirkungsweise zur Wärmeübertragung mit Quantifizierung des Anteils der Wärmeübertragung in den Raum und in das Bauteil. Die unterschiedliche Effizienz der Wärmeübertragung wird dargestellt.

4.5.1 Verwendete Software und Algorithmen

Formel nach Elgeti (thermische Berechnung)

Die Berechnung nach Elgeti wurde bereits in Kapitel 2 beschrieben. Für die hier durchgeführten rechnerischen Untersuchungen wurden die Formeln geringfügig erweitert, um die Wärmeübergänge vom Heizmittel an das Mauerwerk genauer untersuchen zu können. Für einfache Untersuchungen mit stationären Randbedingungen und einfacher Bauteilgeometrie können mit dem

Algorithmus schnell und einfach Berechnungen durchgeführt werden. Nach [Elgeti 1973] können der Wärmestrom, der von der Heizleitung ausgeht, sowie die Wärmestromanteile, die nach innen bzw. nach außen fließen, ermittelt werden. Das Verfahren ist jedoch nur auf ein Rohr in einer sehr großen Wand (im mathematischen Sinn unendlich) anwendbar. Es kann zudem nicht in weitere Anteile des Wärmestroms unterschieden werden.

Software WUFI® 2D

Für die Berechnung von unterschiedlichen Einbausituationen und zur genaueren Analyse der Wärmeströme, Temperaturen, Wassergehalte und Diffusionsströme eignet sich die Software WUFI® 1D bzw. WUFI® 2D. Die Berechnungen der Software berücksichtigen die Wärmetransportvorgänge, Feuchtediffusion und Kapillarleitung sowie Speichereffekte. Im Gegensatz zu den stationären Betrachtungen mit gleichbleibenden Randbedingungen ist es mit der WUFI® möglich, mit instationären Randbedingungen zu und damit ein reales Verhalten von Bauteilen abzubilden. Für die hier dargestellten numerischen Berechnungen wurde WUFI® 2D verwendet.

4.5.2 Stationäre Wärmestromanalyse mit 2D Simulation

Der hier betrachtete Wärmestrom ist die Wärmemenge, die durch das Bauteil im Heizfall im stationären Zustand aus dem Raum nach außen strömt. Die Höhe des Wärmestroms wird dabei durch das Temperaturgefälle, die Wärmeübergangsbedingungen und die Wärmeleitfähigkeit der Baustoffe bestimmt [DIN EN ISO 6946]. Ohne Wärmequellen und ohne Wärmebrücken entspricht der Wärmestrom an der Innenoberfläche dem der Außenoberfläche.

Wird die Außenwand mit einer unter Putz verlegten Temperierung beheizt, ändern sich die Wärmeströme. Durch das Hinzufügen einer Wärmequelle (Temperierung) fließt von der Heizleitung ein zusätzlicher Wärmestrom. Der Wärmestrom an der Innenoberfläche entspricht nicht mehr dem Wärmestrom an der Außenoberfläche, siehe Bild 54. Eine Analyse der Wärmeströme ist mit der Software WUFI® 2D möglich. Hierzu werden die berechneten Wärmeströme und Temperaturen an der Bauteiloberfläche innen und außen je Gitterelement ausgelesen. Mit den so erhaltenen Wärmeströmen und Temperaturen je Element kann der Verlauf der Wärmeströme und Temperaturen über die Wandhöhe dargestellt werden.

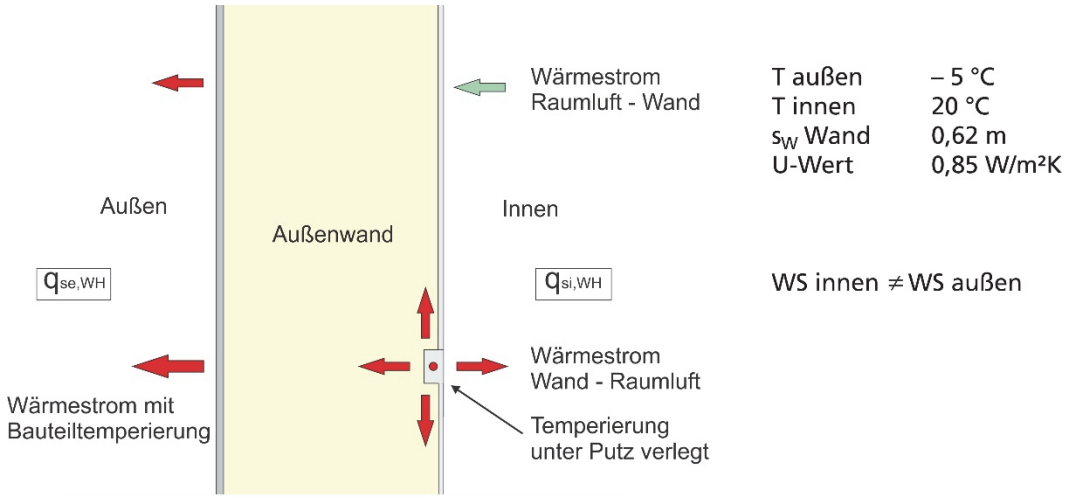


Bild 54: Prinzipskizze der Wärmeströme in einer Außenwand mit Wärmequelle. Der Wärmestrom an der Innenoberfläche entspricht nicht dem Wärmestrom an der Außenoberfläche.

Bauteilgeometrie und Randbedingungen

Neben der Festlegung der Wandgeometrie und Materialien für die Ausgangsvariante müssen auch die Randbedingungen festgelegt werden. Die Berechnungen erfolgen für die Parameterstudie mit stationären Randbedingungen. Für das Raumklima wurde eine typische Raumtemperatur von 20 °C und für die Außentemperatur in Anlehnung an [DIN EN ISO 10211] von -5 °C festgelegt. Die Wärmeübergangsbedingungen wurden für die Raumseite mit 8 W/m²K [DIN EN ISO 6946, DIN EN 1264], auch im Bereich der Temperierung, für die Parameterstudie angenommen, entsprechend der vereinfachten Annahme einer Wandheizung [DIN EN 15377]. Auf der Außenseite werden 17 W/m²K [Schaube, et al. 1988] angesetzt. Die relative Luftfeuchte beträgt im Falle hygrothermischer Berechnungen außen 80 % rF und innen 50 % rF.

Die Heizrohrtemperatur entspricht bei genauerer Betrachtung nicht der Heizmedientemperatur. Für die Untersuchung der Auswirkung der Temperatur der Heizleitung wird ein frei gewählter Wärmeübergangskoeffizient α_{HL}, in der Software WUFI auch als Kontaktkoeffizient bezeichnet, von 1000 W/m²K angenommen. Die Rohrtemperatur nimmt dabei annähernd die Heizmedientemperatur ein. Der Rohrdurchmesser wurde für die Ausgangssimulation mit 15 mm festgelegt und entspricht einem typischen Kupferrohr. Bedingt durch die Gitterstruktur zur Modellierung der Bauteile in der Software wird das Rohr vereinfacht mit quadratischem Querschnitt mit einer Seitenlänge von 15 mm angesetzt. In Tabelle 13 und Tabelle 14 sind die Bauteilabmessungen, verwendeten Baustoffe und Randbedingungen für die Berechnung aufgelistet.

Tabelle 13: Wandaufbau, Abmessungen und Materialkennwerte (WUFI® Datenbank) der als Standard verwendeten Außenwand für die Parameterstudie

Nr.	Bezeichnung	Maße [m]	Material	Dichte ρ [kg/m³]	Wärmeleitfähigkeit λ_{tr} [W/mK]
1	Wandhöhe	2; 5			
2	Wanddicke s_W	0,62			
3	Putz außen s_2	0,02	Kalkputz	1600	0,7
4	Mauerwerk s_m	0,59	Vollziegel	1800	0,6
5	Putz innen s_1	0,01	Kalkputz	1600	0,7

Tabelle 14: Randbedingungen und Abmessungen der Standardaußenwand und Temperierleitung

Nr.	Bezeichnung	Wert	Einheit
1	Temperatur Heizrohr T_m	60	[°C]
2	Raumtemperatur T_i	20	[°C]
3	Außentemperatur T_e	-5	[°C]
4	Lage des Rohres unter Putz s (Putzüberdeckung)	0,005	[m]
5	Wärmeübergangskoeffizient Außenoberfläche h_e	17	[W/m²K]
6	Wärmeübergangskoeffizient Innenoberfläche h_i	8	[W/m²K]
7	Relative Luftfeuchte außen φ_e	80	[%]
8	Relative Luftfeuchte innen φ_i	50	[%]
9	Wärmeübergangskoeffizient Heizmittel - Mauerwerk α_{HL}	1.000	[W/m²K]
10	Durchmesser Heizrohr außen d	0,015	[m]

Aus der Simulation ermittelte Wärmestromanteile

Im Ergebnis erhält man aus der Simulation des Bauteils unter anderem das thermische Feld und somit die Oberflächentemperaturen der Wand im eingeschwungenen stationären Zustand, gemäß den gewählten Randbedingungen. Zunächst werden die Wärmeströme bzw. Wärme-

stromdichten aus der berechneten Temperaturdifferenz zwischen Oberflächentemperaturen des Temperaturfeldes und Lufttemperatur mit den festgelegten Wärmeübergangsbedingungen auf der Außen- bzw. Innenseite der Wand mit und ohne Temperierung gemäß (Gl. 5, Seite 13) ermittelt. Mit Integration der Wärmestromdichten der jeweiligen Gitterelemente mit der Höhe des jeweiligen Gitterelements über die Wandhöhe (Gl. 22) erhält man den Gesamt-Wärmestrom an der Wandoberfläche.

(Gl. 22) $\dot{Q} = \int_0^h q_A \, dy$ [W/m]

$\dot{Q}$	[W/m]	Wärmestrom
q	[W/m²]	Wärmestromdichte
A	[m²]	Flächenelement
h	[m]	Integrationsgrenze über die Wandhöhe

Über die Integration des positiven Wärmestroms (q > 0) an der Innenoberfläche erhält man den Wärmestromanteil, der von den erwärmten Wandbereichen an den Raum abgegeben wird. Ebenso kann über die Integration des negative Wärmstroms (q < 0) an der Innenoberfläche der Wärmestromanteil ermittelt werden. Dies ist der Wärmestrom, der vom Raum an die Wand abgegeben wird. Die Wärmeströme und Wärmestromanteile, die aus der Ergebnisdatei des Temperaturfeldes ermittelt werden, sind mit den Integrationsgrenzen in Tabelle 15 aufgelistet. Aus den aus den Simulationen ermittelten Wärmeströmen mit und ohne Temperierung können nun die Wärmeströme bzw. die Wärmestromanteile des Heizrohres berechnet werden. In Tabelle 16 sind die berechneten Wärmeströme und Wärmestromanteile aufgelistet, die aus den in Tabelle 15 aufgelisteten Wärmeströmen ermittelt werden.

Tabelle 15: Bezeichnung und Integrationsgrenzen der ermittelten Wärmeströme (WS)

Nr.	Bezeichnung	Integrationsgrenzen (s. Bild 55)	Aus Wärmestromdichten integriert
1	WS Wand außen ohne Temperierung	a - d	$\dot{Q}_{se,Wand}$
2	WS Wand innen ohne Temperierung	a - d	$\dot{Q}_{si,Wand}$
3	WS Wand außen mit Temperierung	a - d	$\dot{Q}_{se,WH}$
4	WS Wand innen mit Temperierung	a - d	$\dot{Q}_{si,WH}$
5	WS-Anteil von der Wand in den Raum bei Wand mit Temperierung	b - c	$\dot{Q}_{si,WH,W\rightarrow i}$

Tabelle 16: Bezeichnung und verwendete Gleichungen für weitere Wärmeströme (WS)

Nr.	Bezeichnung	siehe Gleichung	Berechnete Wärmeströme
1	WS-Anteil der Temperierung nach innen	(Gl. 23); (Gl. 25)	$\dot{Q}_{i,WH}$
2	WS-Anteil mit Temperierung der in der Wand wirksam ist	(Gl. 24)	$\dot{Q}_{i,WH,W}$
3	WS-Anteil der Temperierung nach außen	(Gl. 26)	$\dot{Q}_{e,WH}$
4	Gesamter Wärmestrom der Temperierung	(Gl. 27); (Gl. 28)	$\dot{Q}_{WH}$
5	WS-Anteil vom Raum an die Wand	(Gl. 29)	$\dot{Q}_{si,WH,i\rightarrow W}$

Der nach innen gerichtete Wärmestrom-Anteil der Temperierung $\dot{Q}_{i,WH}$ kann durch Subtraktion des Wärmestromes an der Innenoberfläche der Wand mit Temperierung mit dem Wärmestrom an der Innenoberfläche der Wand ohne Temperierung ermittelt werden (Gl. 23).

(Gl. 23) $$\dot{Q}_{i,WH} = \dot{Q}_{si,WH} - \dot{Q}_{si,Wand} \quad [W/m]$$

$\dot{Q}_{si,WH}$ [W/m] Wärmestrom Wand innen mit Temperierung

$\dot{Q}_{si,Wand}$ [W/m] Wärmestrom Wand innen ohne Temperierung

Der von der Temperierung ausgehende Wärmestrom $\dot{Q}_{i,WH}$ nach innen kann weiter unterteilt werden in den Wärmestrom-Anteil $\dot{Q}_{i,WH,W}$ der in der Wand wirksam wird und dem Wärmestrom-Anteil $\dot{Q}_{si,WH,W\rightarrow i}$ von der Wand in den Raum, siehe (Gl. 24).

(Gl. 24) $$\dot{Q}_{i,WH,W} = \dot{Q}_{si,WH} - \dot{Q}_{si,Wand} - \dot{Q}_{si,WH,W\rightarrow i} \quad [W/m]$$

$\dot{Q}_{si,WH}$ [W/m] Wärmestrom Wand innen mit Temperierung

$\dot{Q}_{si,Wand}$ [W/m] Wärmestrom Wand innen ohne Temperierung

$\dot{Q}_{si,WH,W\rightarrow i}$ [W/m] WS-Anteil von der Wand in den Raum bei Wand mit Temperierung

Die beiden Wärmestromanteile $Q_{i,WH,W}$ und $Q_{si,WH,W\rightarrow i}$ ergeben wiederum den von der Temperierung nach innen abgegebenen Wärmestrom $\dot{Q}_{i,WH}$, siehe (Gl. 25).

(Gl. 25) $$\dot{Q}_{i,WH} = \dot{Q}_{i,WH,W} + \dot{Q}_{si,WH,W\rightarrow i} \quad [W/m]$$

$\dot{Q}_{i,WH,W}$ [W/m] Wärmestrom- Anteil mit Temperierung der in der Wand wirksam ist

$\dot{Q}_{si,WH,W\rightarrow i}$ [W/m] WS-Anteil von der Wand in den Raum bei Wand mit Temperierung

Den von der Temperierung zusätzlich nach außen abgegebenen Wärmestrom $\dot{Q}_{e,WH}$ erhält man durch Subtraktion des von der Wand ohne Temperierung abgegebenen Wärmestromes vom Wärmestrom an der Außenoberfläche der Wand mit Temperierung, (Gl. 26).

(Gl. 26) $$\dot{Q}_{e,WH} = \dot{Q}_{se,WH} - \dot{Q}_{se,Wand} \quad [W/m]$$

$\dot{Q}_{se,WH}$ [W/m] Wärmestrom Wand außen mit Temperierung

$\dot{Q}_{se,Wand}$ [W/m] Wärmestrom Wand außen ohne Temperierung

Der von der Temperierung abgegebene Wärmestrom $\dot{Q}_{WH}$ setzt sich betragsmäßig aus den nach innen bzw. außen abgegebenen Wärmestrom-Anteilen zusammen, (Gl. 27). Alternativ kann der Gesamt-Wärmestrom auch direkt aus den Wärmeströmen an der Innen- und Außenoberfläche der Wand mit Temperierung ermittelt werden, wenn (Gl. 23) und (Gl. 26) vorzeichenrichtig in (Gl. 27) eingesetzt werden und wenn $\dot{Q}_{si,Wand}$ gleich $\dot{Q}_{se,Wand}$ ist, siehe (Gl. 28).

(Gl. 27) $$\dot{Q}_{WH} = \dot{Q}_{i,WH} + \dot{Q}_{e,WH} \quad [W/m]$$

$\dot{Q}_{i,WH}$ [W/m] Wärmestrom-Anteil der Temperierung nach innen

$\dot{Q}_{e,WH}$ [W/m] Wärmestrom-Anteil der Temperierung nach außen

(Gl. 28) $\dot{Q}_{WH} = \dot{Q}_{si,WH} - \dot{Q}_{se,WH}$ [W/m]

$\dot{Q}_{si,WH}$ [W/m] Wärmestrom Wand innen mit Temperierung

$\dot{Q}_{se,WH}$ [W/m] Wärmestrom Wand außen mit Temperierung

Der aus dem Raum an die Wand mit Temperierung abgegebene Wärmestrom $\dot{Q}_{si,WH,i\rightarrow W}$ wird gemäß (Gl. 29) ermittelt.

(Gl. 29) $\dot{Q}_{si,WH,i\rightarrow W} = \dot{Q}_{si,WH} - \dot{Q}_{si,WH,W\rightarrow i}$ [W/m]

$\dot{Q}_{si,WH}$ [W/m] Wärmestrom Wand innen mit Temperierung

$\dot{Q}_{si,WH,W\rightarrow i}$ [W/m] WS-Anteil von der Wand in den Raum bei Wand mit Temperierung

In Bild 55 sind die berechneten Wärmestromanteile an der Innen- und Außenoberfläche für die Außenwand aus Bild 54 dargestellt. Die unterschiedlichen Wärmestromanteile wurden farbig markiert und bezeichnet. Auf der Außenoberfläche liegt ein zusätzlicher Wärmestrom $\dot{Q}_{e,WH}$ durch die Beheizung der Wand vor. An der Raumseite können drei Wärmestromanteile unterschieden werden. Der Wärmestromanteil $\dot{Q}_{si,WH,W\rightarrow i}$, der in den Raum abgeben wird, ist rot markiert. Der durch die Beheizung der Wand geringer werdende Wärmestrom aus dem Raum an die Wand $\dot{Q}_{si,WH,i\rightarrow W}$ hat durch den symmetrischen Aufbau zwei Anteile, schwarz markiert. Der von der Temperierung ebenfalls nach innen gerichtete Wärmestromanteil $\dot{Q}_{i,WH,W}$, grün markiert, verringert den Wärmestrom aus der Raumluft an die Wand.

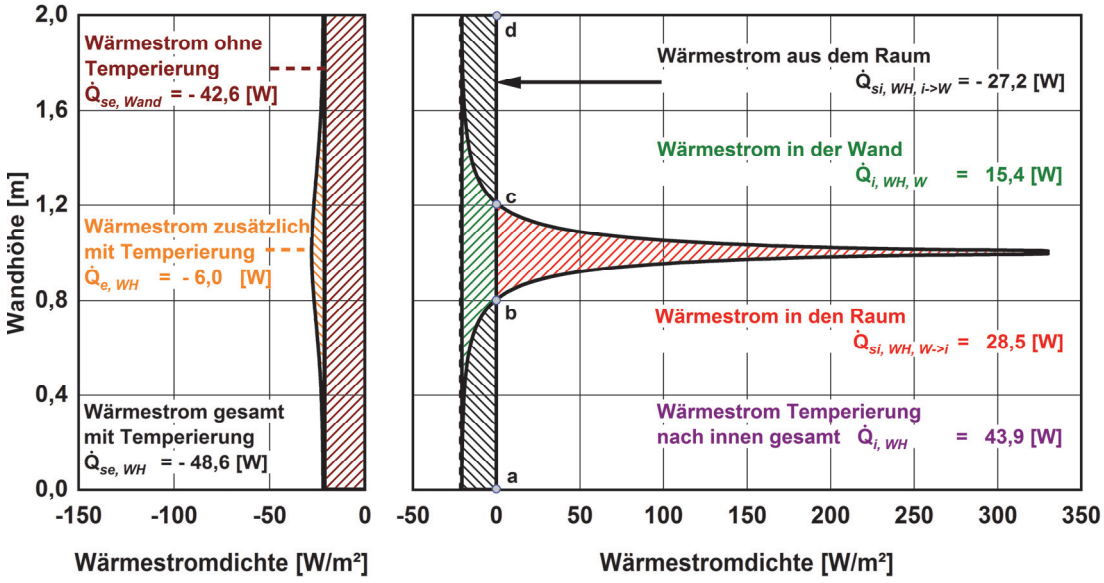


Bild 55: Abgebildet sind die Wärmestromdichten und Wärmeströme ausgehend vom Wärmestrom des Heizrohrs unter Putz (DN 15) der Standardwand mit stationären Randbedingungen (siehe Tabelle 13 und Tabelle 14). Die Integrale der schraffierten Teilflächen der Wärmestromdichten ergeben den jeweiligen Teilwärmestrom. Im linken Diagramm sind die Wärmeströme und Wärmestromdichten auf der Außenseite und im rechten Diagramm auf der Innenseite der Außenwand abgebildet.

Wärmestromverhältnisse ausgewählter Wärmeströme

Die unterschiedlichen Wärmeströme bzw. Wärmestrom-Anteile können zueinander in Beziehung gesetzte werden. Zur weiteren Beurteilung der Energieeffizienz und den Auswirkungen von Parameteränderungen werden zwei Wärmestromverhältnisse definiert. Das als Wärmeabgabeverhältnis bezeichnete Wärmestromverhältnis f_{WH} ist das Verhältnis der Wärmestromanteile der Temperierung nach außen $\dot{Q}_{e,WH}$ und nach innen $\dot{Q}_{i,WH}$ (Gl. 30). Hier fließen die

Wandeigenschaften mit ein, jedoch ohne Bezug zur Wandhöhe. Das als Wärmeverlustverhältnis bezeichnete Wärmestromverhältnis f_{Wand} ist das Verhältnis des direkt nach außen zusätzlich abgegebenen Wärmestromanteils $\dot{Q}_{e,WH}$ der Temperierung und des Wärmeverlustes der Außenwand ohne Temperierung $\dot{Q}_{se,Wand}$. Damit werden die direkten zusätzlichen Wärmestromverluste der Temperierung zur tatsächlichen Wandhöhe der untersuchten Wand in Beziehung gesetzt (Gl. 31).

(Gl. 30) $$f_{WH} = \frac{\dot{Q}_{e,WH}}{\dot{Q}_{i,WH}} \quad [\%]$$

(Gl. 31) $$f_{Wand} = \frac{\dot{Q}_{e,WH}}{\dot{Q}_{se,Wand}} \quad [\%]$$

f_{WH}	[%]	Wärmeabgabeverhältnis Temperierung
f_{Wand}	[%]	Wärmeverlustverhältnis
$\dot{Q}_{e,WH}$	[W/m]	Wärmestromanteil der Temperierung nach außen
$\dot{Q}_{i,WH}$	[W/m]	Wärmestromanteil der Temperierung nach innen
$\dot{Q}_{se,Wand}$	[W/m]	Wärmestrom Wand außen ohne Temperierung

Berechnungsbeispiel

Der Wärmestrom ohne Temperierung $\dot{Q}_{se,Wand}$ beträgt für die gewählte Standardwand mit 2 m Wandhöhe -42,6 W/m und der zusätzliche Wärmestromanteil $\dot{Q}_{e,WH}$ der Temperierung nach außen -6,0 W/m (Bild 55). Es ergibt sich ein Wärmeverlustverhältnis f_{Wand} von 14 %. Berechnet man die Wärmeströme an einer identisch ausgeführten Wand entsprechend der Standardwand jedoch mit 5 m Wandhöhe bei gleichen Randbedingungen (gleiche Raumtemperatur) erhält man einen Wärmestrom an der Außenoberfläche ohne Temperierung $\dot{Q}_{se,Wand}$ von -106,4 W/m. Der zusätzliche Wärmestromanteil $\dot{Q}_{e,WH}$ der Temperierung nach außen ist mit -6,0 W/m gleich hoch. Das Wärmeverlustverhältnis f_{Wand} beträgt nun 5,6 %. Da sich durch die Wandhöhe die Wärmeabgabe der Temperierung nur marginal ändert bleiben die Wärmestromanteile $\dot{Q}_{e,WH}$ und $\dot{Q}_{i,WH}$ und damit auch die Gesamtwärmeabgabe der Temperierung $\dot{Q}_{WH}$ gleich. Das Wärmeabgabeverhältnis f_{WH} bleibt damit ebenfalls gleich.

4.5.3 Parameterstudie mit 2D Simulation

Für die Parameterstudie wird die im vorigen Kapitel vorgestellte Außenwand mit den angeführten Randbedingungen als Ausgangsvariante festgelegt. Ausgehend von dieser Standardsituation werden die Parameter variiert und deren Einfluss auf die zu untersuchende Parametergröße dargestellt, siehe Tabelle 17.

Zu den Untersuchungen der Parameter der Standardwand und Randbedingungen erfolgen weitere Untersuchungen an ausgewählten zusätzlichen Parametern. So werden die Auswirkung der vereinfachten Abbildung des Heizrohres in Quadratform im Vergleich zu einer angenäherten Kreisform untersucht sowie die Beeinflussung durch die Anordnung eines zweiten Heizrohrs in Abhängigkeit vom Abstand der Heizrohre zueinander. Weitere Untersuchungen erfolgen an einem veränderten Bauteilaufbau mit Wärmedämmung hinter dem Heizrohr, siehe Tabelle 18.

Tabelle 17: Untersuchte Parameter zu der beschriebenen Außenwand und den Randbedingungen der Ausgangssituation. Die für die Standardsimulation verwendeten Parameter sind fett gedruckt.

Nr.	Parameter	Werte	Einheit	Höhe Wand	Anz.	Berechnung
1	Temperatur Heizmittel T_m	20, 30, 40, 50, **60**, 70	[°C]	2 m	6	hygroth.
2	Raumtemperatur T_i	5, 10, 15, **20**	[°C]	2 m	4	hygroth.
3	Außentemperatur T_e	-20, -15, -10, **-5**, 0, 5, 10, 15, 20	[°C]	2 m	9	hygroth.
4	Lage des Rohres s (Putzüberdeckung)	**5**, 10, 15, 20, 30, 50	[mm]	2 m, 5 m	6	therm. / hygroth.
5	Dicke der Wand s_W	24, 32, 48, **62**, 64, 72, 96	[cm]	2 m	6	hygroth.
6	Wärmeübergangsk. h Raumluft - Wand (Bereich Heizleitung)	3, 5, **8**, 10, 12	[W/m²K]	2 m	5	hygroth.
7	Wärmeübergangskoeffizient α_{HL} Heizmittel - Mauerwerk	50, 100, 200, 500, **1.000**	[W/m²K]	2 m	5	thermisch
8	Wärmeleitfähigkeit Mauer λ_{tr} (mit α_{HL} = 100 W/m²K)	0,13; **0,6;** 1,0; 1,8; 2,3;	[W/mK]	2 m, 5 m	5	thermisch
9	Durchmesser Heizrohr d (mit α_{HL} = 100 W/m²K)	12, **15**, 18, 21	[mm]	2 m, 5 m	4	thermisch

Tabelle 18: Zusätzliche untersuchte Parameter zu der beschriebenen Außenwand und den Randbedingungen der Ausgangssituation.

Nr.	Parameter	Werte	Einheit	Höhe Wand	Anz.	Berechnung
A	Modellierung Heizleitung	quadratisch - rund		2 m, 5 m	4	therm. / hygroth.
B	Abstand zwischen zwei Heizleitungen	5, 10, 15, 20, 30, 50, 100	[cm]	5 m	7	therm. / hygroth.
C	Wärmedämmung hinter dem Heizrohr	20 x 45	[mm²]	2 m	8	thermisch

Die Berücksichtigung der Bauteilfeuchte ist für die Anwendung der Temperierung zur Bauteiltrocknung erforderlich. Die rechnerischen Untersuchungen erfolgen deshalb meist hygrothermisch, um den Einfluss der Bauteilfeuchte über die feuchteabhängige Wärmeleitfähigkeit mit zu berücksichtigen, sowie den Latentwärmetransport durch Feuchtebewegung im Bauteil. Dabei wird für die Parameterstudie die Wärmeabgabe für eine überwiegend trockene Wand berechnet, d.h. die Bauteilfeuchte ergibt sich aus den Randbedingungen des Innen- und Außenklimas mit einer Anfangsfeuchte des Bauteils bei 20 °C und 80 % rF (u_{80} Wert). Mögliche Feuchtequellen, wie z.B. aufsteigende Feuchte oder Feuchteaufnahme durch Schlagregen, werden für die Parameterstudie nicht berücksichtigt. Zur Vereinfachung des rechnerischen Aufwandes sowie zur Einschätzung des hygrischen Einflusses auf das Berechnungsergebnis werden auch rein thermische Berechnungen durchgeführt. Die Ergebnisse werden in Diagrammen dargestellt. Abgebildet werden die berechneten Oberflächentemperaturen innen und außen sowie der Gesamtwärmestrom und die Wärmestromanteile der Temperierung. Teilweise wird zusätzlich die Differenztemperatur zwischen Heizmittel und maximaler Oberflächentemperatur innen graphisch mit abgebildet. Zusätzlich erfolgt die Berechnung und graphische Darstellung der Verläufe der Wärmestromverhältnisse.

Gitterstruktur und Genauigkeit der Berechnungen

Die Berechnungszeit und Ergebnisdatei wird bei der hygrothermischen Berechnung im wesentlichen durch die Gitterstruktur und den gewählten Berechnungszeitraum bzw. die Anzahl der Zeitschritte bestimmt. Bei stationären Randbedingungen konvergiert das Berechnungsergebnis bei einer hygrothermischen Berechnung durch die Feuchtumlagerung erst nach vielen Zeitschritten. Die zu untersuchenden Wärmeströme hängen von den wiederum feuchtabhängigen Wärmeleitfähigkeiten ab. Zur Eingrenzung des Berechnungsaufwandes und des Umfangs der Ergebnisdatei wurde deshalb eine möglichst einfache Gitterstruktur gewählt und der Berechnungszeitraum begrenzt.

Die Standardwand wird nach Voruntersuchungen auf 2 m Höhe mit adiabaten Grenzen festgelegt. Für die allermeisten Varianten reicht diese Höhe zur Auswertung des Einflusses der Temperierung auf das thermische und hygrische Feld aus. Baupraktisch wird die Temperierung nicht nur in Eckbereichen sondern auch in Wandflächen verlegt, die jedoch häufig einen nicht mehr als 1 m - 2 m ungestörten Wandbereich zur Temperierleitung aufweisen. Der durch die 2 m hohe Wand entstehende Fehler wurde mit einer 5 m hohen Wand untersucht. Es stellen sich in den meisten Fällen nur sehr geringe Abweichungen ein, wie im Folgenden anhand der Parameterstudie dargestellt wird. Bei manchen Parametern (z.B. zwei Heizrohre) wirkt sich die Wandhöhe in relevanter Höhe auf das Ergebnis aus. Diese Fälle wurden mit der 5 m hohen Wand nochmal berechnet und verglichen. Bei größeren Abweichungen wird dann das Ergebnis der 5 m hohen Wand verwendet. Die Abweichungen für die dargestellten Ergebnisse sind in der Regel kleiner als 1 % [DIN EN ISO 10211] vom genaueren Rechenergebnis. Als genaueres Rechenergebnis gilt die Simulationsrechnung, die mit einer höheren Genauigkeit berechnet wurde. Hier wurde in Anlehnung an [DIN EN 15026, DIN EN ISO 10211] vorgegangen. Die Gitterstruktur wurde wegen der Rechenzeit und Größe der Berechnungsdatei für die meisten Fälle der hygrothermischen Berechnung mit 134 x 312 (teilweise mit 94 x 224) Elementen durchgeführt. Dies ergibt 41808 Gitterelemente (21.056 Elemente). Eine Verdoppelung (82.698 Elemente) brachte nur in wenigen Fällen eine Verbesserung zum Ergebnis mit weniger Gitterelementen (Abweichung kleiner 1 %). Einzelne Berechnungen (z.B. bei Wandhöhen mit 5 m Höhe) wurden zur Überprüfung mit bis zu 180.000 Gitterelementen thermisch berechnet.

Ähnlich wurde für den Berechnungszeitraum vorgegangen. Bei einer rein thermischen Simulation (ohne Berücksichtigung der Feuchte) konvergiert die Berechnung zum Endergebnis wesentlich schneller. In der Regel wird der eingeschwungene Zustand bereits nach ca. 600 Stundenschritten erreicht (ca. 3 Wochen). Durchgeführt werden für die thermische Berechnungen 5000 Stundenschritte (entspricht ca. 7 Monate). Für die durchgeführten hygrothermischen Berechnungen wird die Wand für einen Zeitraum von 6 Jahren berechnet, dies entspricht 26.280 Berechnungsschritten im Zeitraster von 2 Stunden. Das damit erhaltene Berechnungsergebnis ist für die relevante Größenordnung und dem Vergleich untereinander ausreichend genau.

Parameter 1: Temperatur Heizmittel (Heizwasser)

Das Berechnungsergebnis zeigt in Bild 56 die Auswirkung unterschiedlicher Temperaturen der Heizleitung auf die Oberflächentemperatur der Außenwand an der Außen- und Innenoberfläche. Bei einer Heizwassertemperatur von 20 °C erreicht die Oberflächentemperatur direkt über dem Heizrohr annähernd 20 °C. Auf der Außenoberfläche wird nur eine marginale Temperaturerhöhung festgestellt. Mit ansteigender Heizwassertemperatur stellen sich höhere Oberflächentemperaturen an der Innenoberfläche ein. An der Oberfläche direkt über dem Heizrohr werden jedoch nicht mehr die Rohrtemperaturen erreicht. Mit ansteigender Temperatur erhöht sich der Abstand zu der Heizwassertemperatur an der Oberfläche. Bei 60 °C Heizwassertemperatur werden an der Oberfläche knapp 57 °C erreicht.

Die Differenz der Wassertemperatur zur Innenoberflächentemperatur sowie die Differenz der maximalen und minimalen Oberflächentemperatur außen ist in Bild 57 graphisch abgebildet. Mit steigender Heizwassertemperatur kommt es auf der Höhe der Heizleitung zu einer Temperaturerhöhung an der Außenoberfläche im Vergleich zur Oberflächentemperatur außerhalb der Auswirkungsbereichs.

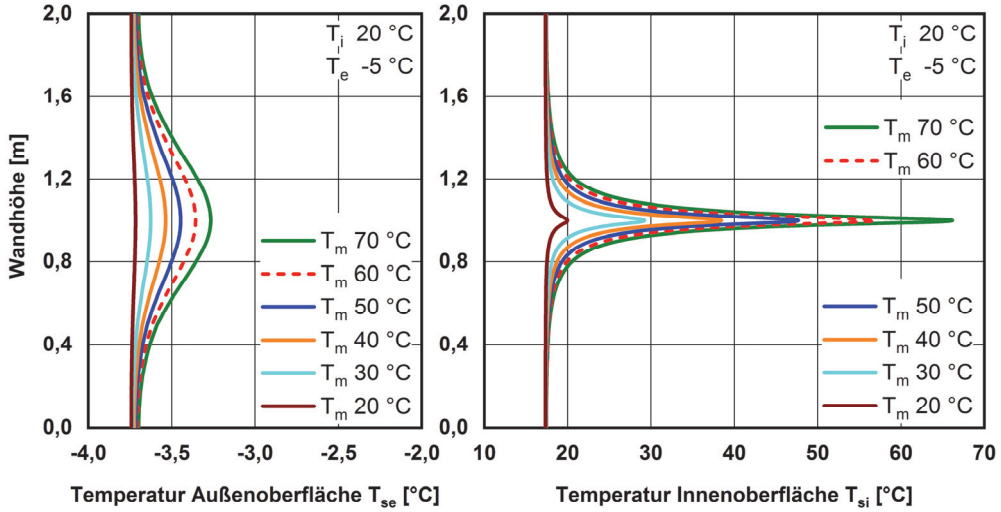


Bild 56: Oberflächentemperatur innen und außen über die Wandhöhe bei unterschiedlichen Heizwassertemperaturen. Die Oberflächentemperaturen sind stark abhängig von der Heiztemperatur. Die gestrichelte Linie ist die Grundvariante.

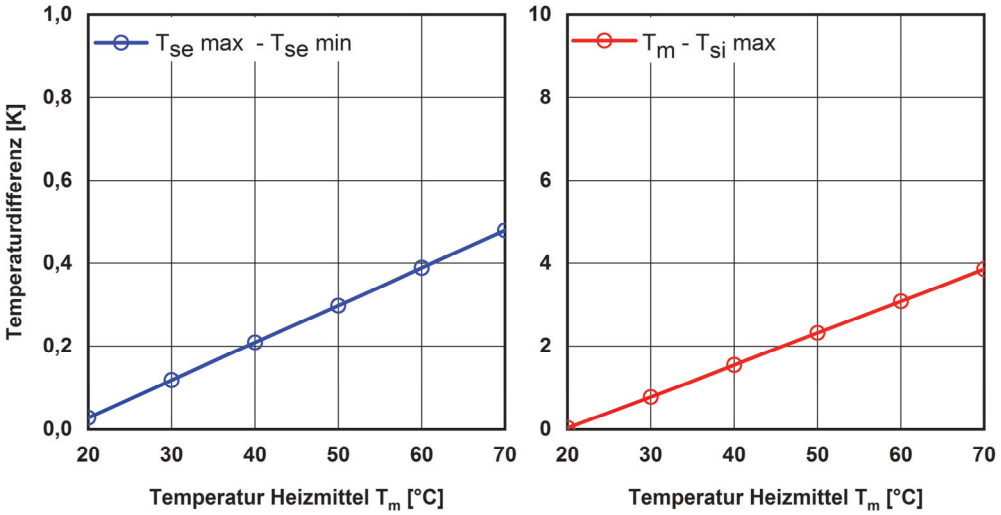


Bild 57: Differenz zwischen maximaler und minimaler Oberflächentemperatur außen (links) und Heizwassertemperatur und maximaler Oberflächentemperatur innen (rechts). Die Temperaturdifferenz steigt mit der Heizmedientemperatur linear an.

Die Auswirkungen auf den Wärmestrom werden ebenfalls an der Außen- und Innenoberfläche betrachtet, siehe Bild 58. Der Gesamtwärmestrom der Temperierung $\dot{Q}_{WH}$ kann in die Wärmestromanteile nach innen $\dot{Q}_{i,WH}$ und nach außen $\dot{Q}_{e,WH}$ unterschieden werden. Der Verlauf der Graphen ist annähernd linear. Sehr geringe Abweichungen von der Linearität ergeben sich aus minimalen Abweichungen des Wärmedurchlasswiderstandes des Mauerwerks bei den verschiedenen Temperaturen der Heizleitung. Durch die hygrothermische Berechnung stellen sich minimal unterschiedliche Mauerwerksfeuchten ein, die aus der feuchteabhängigen Wärmeleitfähigkeit des Mauerwerks bei unterschiedliche Heiztemperaturen resultieren. Der Wärmestrom nach innen $\dot{Q}_{i,WH}$ kann in den Wärmestromanteil in den Raum $\dot{Q}_{si,WH,W\rightarrow i}$ und den Wärmestromanteil in der Wand $\dot{Q}_{i,WH,W}$ aufgeteilt werden. Die Graphen der Wärmestromanteile sind in

dem betrachteten Temperaturbereich allerdings nicht linear. Die Graphen $\dot{Q}_{i,WH}$ und $\dot{Q}_{i,WH,W}$ schneiden die 20° C Abszisse bei ca. 3,1 W/m. $\dot{Q}_{WH}$ schneidet bei 3,6 W/m und $\dot{Q}_{e,WH}$ bei 0,5 W/m. Ohne Temperierung ist die Temperatur in der Schichttiefe der eingeputzten Temperierleitung durch den inneren Wärmübergangswiderstand und das Temperaturgefälle in der Wand niedriger gegenüber der Raumtemperatur von 20 °C. In der Folge gibt das Heizwasser bei einer Temperatur von 20 °C Wärme ab. Da die Oberflächentemperatur in diesem Fall über dem eingeputzten Heizrohr nicht über 20 °C steigen kann, wird keine Wärme an den Raum abgegeben, der Wärmestromanteil nach innen $\dot{Q}_{si,WH,W\rightarrow i}$ ist dadurch null.

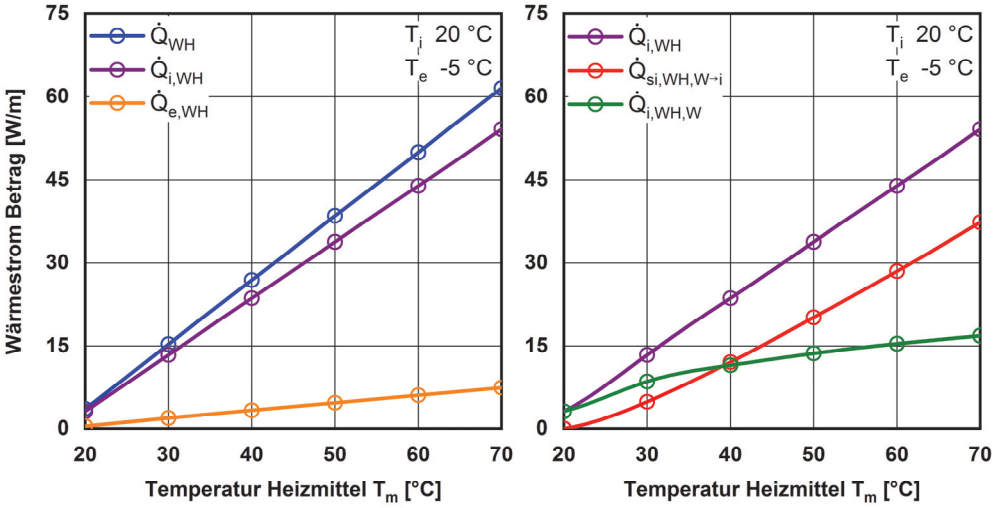


Bild 58: Wärmeströme der Temperierung in Abhängigkeit der Heizmedientemperatur. Bei steigenden Heiztemperaturen erhöhen sich nahezu linear die Wärmeabgabe $\dot{Q}_{WH}$ der Temperierung und in Folge auch der Wärmeverlust $\dot{Q}_{e,WH}$ sowie die Wärmeabgabe $\dot{Q}_{i,WH}$ nach innen. Die WS-Anteile $\dot{Q}_{si,WH,W\rightarrow i}$ und $\dot{Q}_{i,WH,W}$ verändern sich hingegen nicht linear (rechtes Diagramm).

Das Wärmeabgabeverhältnis f_{WH} der Wärmeströme nach außen zu den Wärmeströmen nach innen sinkt durch die bei höheren Rohrtemperaturen niedrigere Mauerwerksfeuchte geringfügig um knapp 0,5 % in dem angegebenen Temperaturbereich, siehe Bild 59. Bei einer rein thermischen Berechnung bleibt das Wärmeabgabeverhältnis konstant.

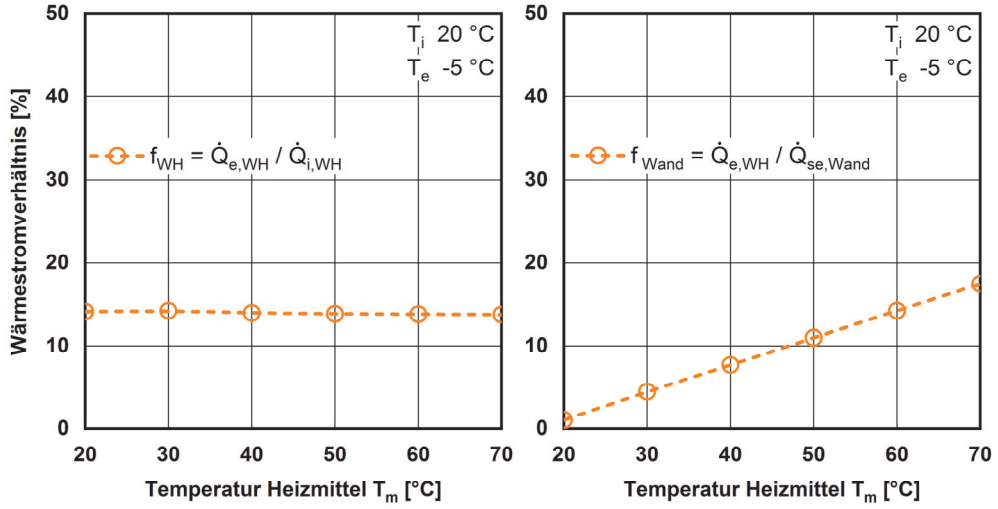


Bild 59: Wärmestromverhältnisse in Abhängigkeit der Heizmedientemperatur. Das Wärmeabgabeverhältnis der Temperierung f_{WH} (linkes Diagramm) bleibt nahezu gleich. Das Wärmeverlustverhältnis f_{Wand} (rechtes Diagramm) steigt mit höheren Heiztemperaturen stark an, da der Wärmeverlust $\dot{Q}_{e,WH}$ ansteigt, wogegen der Wärmestrom der Außenwand ohne Temperierung $\dot{Q}_{se,Wand}$ gleich bleibt.

Bild 60 zeigt, exemplarisch für den Parameter Heiztemperatur, weitere Wärmestromverhältnisse in Abhängigkeit der Heizmedientemperatur auf den Gesamtwärmestrom bezogen. Das WS-Verhältnis $\dot{Q}_{e,WH}$ / $\dot{Q}_{WH}$ (linkes Diagramm) bleibt nahezu gleich und entspricht im Verlauf dem Wärmeabgabeverhältnis f_{WH} jedoch mit einem niedrigerem Wert. Das WS-Verhältnis mit dem WS-Anteil $\dot{Q}_{i,WH,W}$ zum Gesamtwärmestrom $\dot{Q}_{WH}$ nimmt mit steigender Heiztemperatur stark ab. Das WS-Verhältnis $\dot{Q}_{si,WH,W\rightarrow i}$ / $\dot{Q}_{WH}$ (rechtes Diagramm) steigt mit höheren Heiztemperaturen stark an. Zusätzlich ist die Unterteilung in konvektiv und radiativ abgegebenem Wärmestromanteil abgebildet. Der konvektive Anteil der Wärmeabgabe bezogen auf die Gesamtwärmeabgabe der Temperierung beträgt bei einer Heiztemperatur von 60 °C rund 18 % und der Strahlungswärmeanteil rund 39 %. Der in der Wand wirksame Wärmestromanteil nach innen beträgt ca. 31 % und der WS-Verlustanteil nach außen ca. 12 %. Auf den nach innen abgegebenen Wärmestrom $\dot{Q}_{i,WH}$ bezogen, wird von der Temperierung bei einer Heizmitteltemperatur von 60 °C rund 20 % des Wärmestroms in den Raum konvektiv abgegeben, Bild 61.

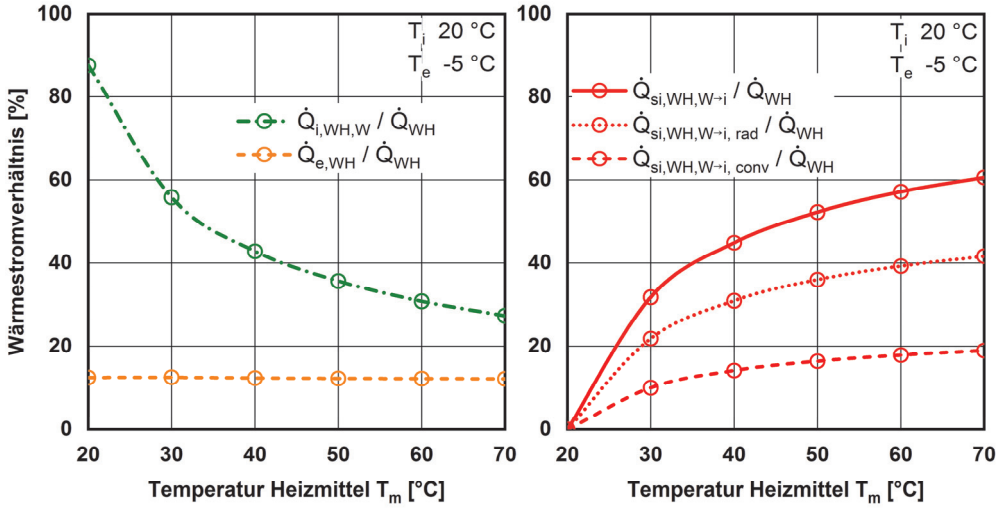


Bild 60: Wärmestromverhältnisse in Abhängigkeit der Heizmedientemperatur auf den Gesamtwärmestrom bezogen. Das Wärmestromverhältnis $\dot{Q}_{i,WH,W}$ / $\dot{Q}_{WH}$ (linkes Diagramm) bleibt nahezu gleich und das WS-Verhältnis $\dot{Q}_{e,WH}$ / $\dot{Q}_{WH}$ nimmt mit steigender Heiztemperatur stark ab. Das WS-Verhältnis $\dot{Q}_{si,WH,w\rightarrow i}$ / $\dot{Q}_{WH}$ (rechtes Diagramm) steigt mit höheren Heiztemperaturen stark an. Zusätzlich ist die Unterteilung in konvektiv und radiativ abgegebenem Wärmestromanteil abgebildet.

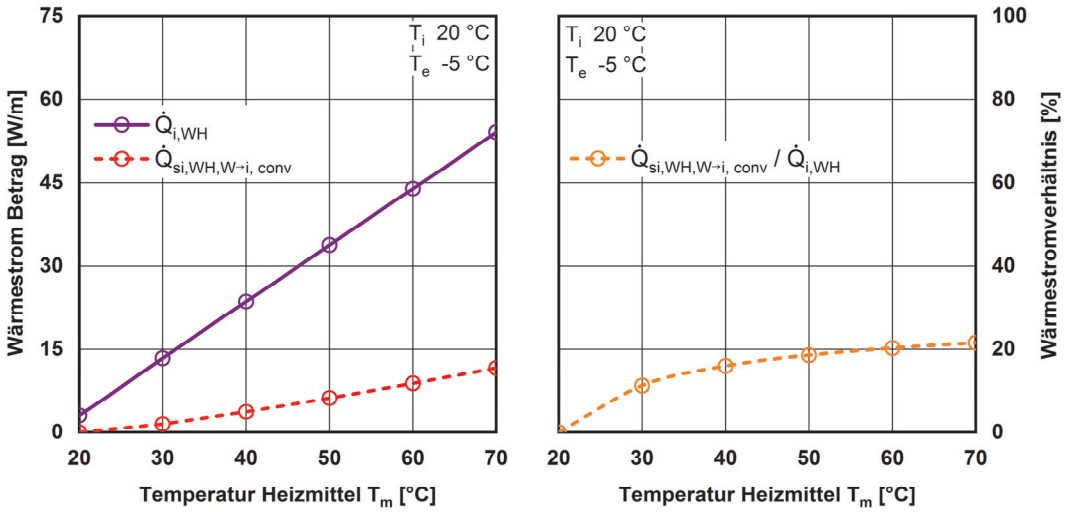


Bild 61: Im linken Diagramm ist der nach innen abgegebene Wärmestrom und der konvektiv abgegebene Wärmestromanteil abgebildet. Im rechten Diagramm ist das Wärmestromverhältnis des konvektiven Wärmestroms zum gesamten Wärmestrom nach innen $\dot{Q}_{i,WH}$ in Abhängigkeit der Heizmedientemperatur abgebildet.

Parameter 2: Außentemperaturen

Die Auswirkungen der Außentemperaturen auf die Oberflächentemperaturen sind in Bild 62 dargestellt. Mit abnehmender Außentemperatur sinkt allgemein die Temperatur an der Außenoberfläche sowie an der Innenoberfläche. Die Temperaturdifferenz an der Außenoberfläche auf Höhe der Heizleitung zum von der Temperierung unbeeinflussten Wandbereich liegt bei ca. 0,35 K und ändert sich bei niedrigeren Außentemperaturen um nur wenige hundertstel Kelvin kaum. Die maximale Temperatur an der Innenoberfläche direkt über der Heizleitung bleibt ebenfalls praktisch gleich.

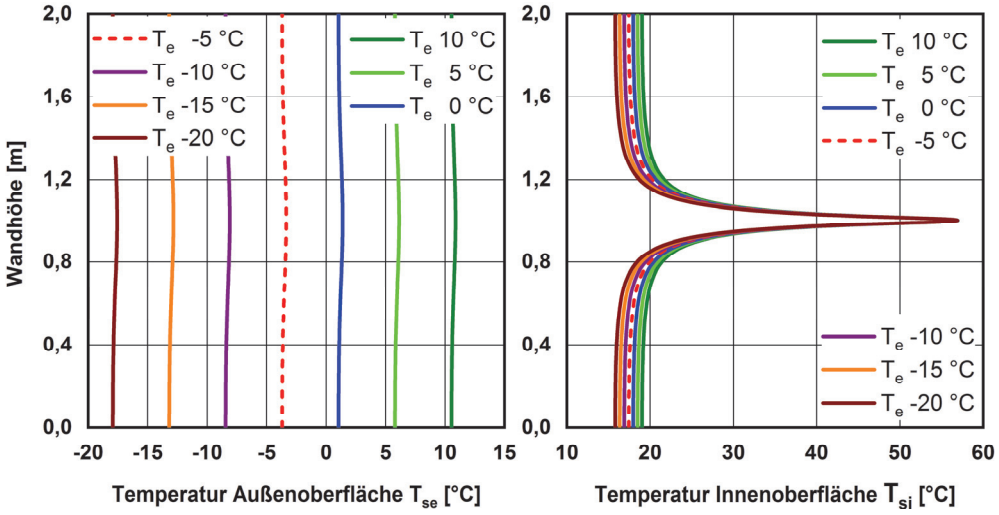


Bild 62: Oberflächentemperaturen über die Wandhöhe außen (linkes Diagramm) und innen (rechtes Diagramm) bei unterschiedlichen Außentemperaturen. Die gestrichelte Linie ist die Grundvariante.

Bild 63 zeigt die Wärmeströme ausgehend von der Heizleitung. Die Gesamtwärmeabgabe $\dot{Q}_{WH}$ verringert sich erwartungsgemäß mit dem Anstieg der Außentemperatur. Dementsprechend sinkt auch der nach innen abgegebene Wärmestrom $\dot{Q}_{i,WH}$. Mit höheren Außentemperaturen sinkt der zusätzliche Wärmestrom $\dot{Q}_{e,WH}$ nach außen aber nur geringfügig. Die Wärmestromanteile von $\dot{Q}_{i,WH}$ verändern sich mit ansteigenden Temperaturen. Der in den Raum abgegebene Wärmestrom $\dot{Q}_{si,WH,W\rightarrow i}$ steigt stark an. Gleichzeitig sinkt der ebenfalls nach innen gerichtete Wärmestromanteil $\dot{Q}_{i,WH,W}$ auf ca. 1,7 W/m bei 20 °C deutlich ab.

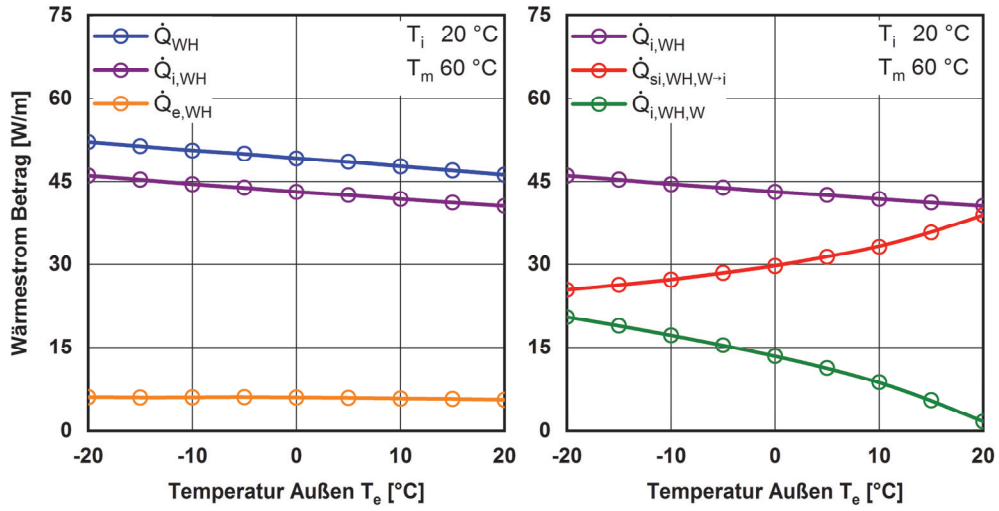


Bild 63: Wärmeströme der Temperierung in Abhängigkeit der Außentemperatur. Der Wärmestrom der Temperierung $\dot{Q}_{WH}$ teilt sich auf in den Anteil nach innen $\dot{Q}_{i,WH}$ und nach außen $\dot{Q}_{e,WH}$ (links). Im rechten Diagramm ist der Wärmestrom nach innen $\dot{Q}_{i,WH}$ aufgeteilt in den Anteil $\dot{Q}_{si,WH,W\rightarrow i}$ der in den Raum abgegeben wird und $\dot{Q}_{i,WH,W}$, der in der Wand dem nach außen fließenden Wärmestrom entgegen wirkt.

Das Wärmeabgabeverhältnis f_{WH} bleibt nahezu konstant und steigt von -20 °C bis 5 °C etwas an und sinkt dann bis 20 °C geringfügig ab, siehe linkes Diagramm in Bild 64. Durch die hygrothermische Berechnung mit feuchteabhängigen Materialkennwerten verändern sich die Wärmeleitfähigkeiten und wirken sich dadurch geringfügig auf das Ergebnis aus. Das Wärmeverlustverhältnis f_{Wand} konvergiert gegen unendlich, da der Wärmestrom $\dot{Q}_{se,Wand}$ bei 20 °C Außentemperatur null wird, jedoch durch die Temperierung einen Wärmestrom $\dot{Q}_{e,WH}$ nach außen erfolgt (rechtes Diagramm).

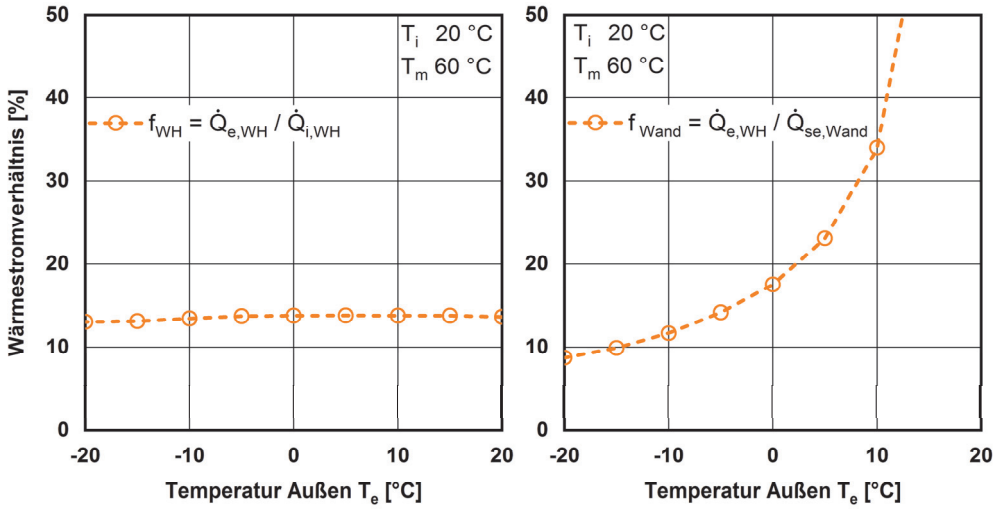


Bild 64: Wärmestromverhältnisse in Abhängigkeit der Außentemperatur. Das Wärmeabgabeverhältnis der Temperierung f_{WH} (linkes Diagramm) bleibt nahezu gleich, mit geringem Anstieg. Das Wärmeverlustverhältnis f_{Wand} (rechtes Diagramm) konvergiert gegen unendlich, da die Wärmeverluste $\dot{Q}_{e,WH}$ sich nur gering ändern, jedoch der Wärmestrom der Außenwand $\dot{Q}_{se,Wand}$ bei 20 °C null wird.

Parameter 3: Raumtemperaturen

Die Auswirkungen unterschiedlicher Raumtemperaturen auf die Oberflächentemperatur der Wand sind in Bild 65 dargestellt. Mit abnehmender Raumtemperatur sinkt allgemein die Temperatur an der Innenoberfläche sowie an der Außenoberfläche. Die Temperaturdifferenz an der Außenoberfläche auf Höhe der Heizleitung erhöht sich geringfügig mit abnehmender Raumtemperatur um ca. 0,1 K. Die maximale Temperatur an der Innenoberfläche direkt über der Heizleitung bleibt mit einer Veränderung von max. 0,14 K praktisch gleich.

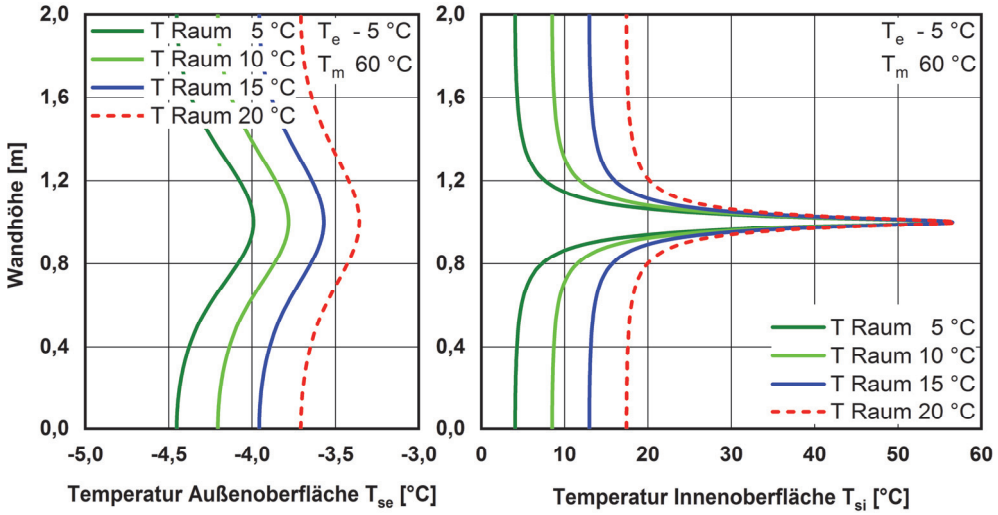


Bild 65: Oberflächentemperaturen über die Wandhöhe außen (linkes Diagramm) und innen (rechtes Diagramm) bei unterschiedlichen Raumtemperaturen. Die gestrichelte Linie zeigt die Grundvariante.

Bild 66 zeigt die Wärmeströme mit den Wärmestromanteilen in Abhängigkeit der Raumtemperatur. Die Gesamtwärmeabgabe $\dot{Q}_{WH}$ erhöht sich deutlich bei absinkender Raumtemperatur. Der Wärmstromanteil $\dot{Q}_{i,WH}$ erhöht sich ebenfalls, jedoch etwas geringer. Dementsprechend steigen die Wärmeverluste $\dot{Q}_{e,WH}$nach außen leicht an. Die Wärmestromanteile von $\dot{Q}_{i,WH}$ verändern sich ebenfalls mit sinkender Raumtemperatur. Der in den Raum abgegebene Wärmestrom $\dot{Q}_{si,WH,W\rightarrow i}$ steigt überproportional an. Gleichzeitig sinkt der Wärmestromanteil $\dot{Q}_{i,WH.W}$ ab.

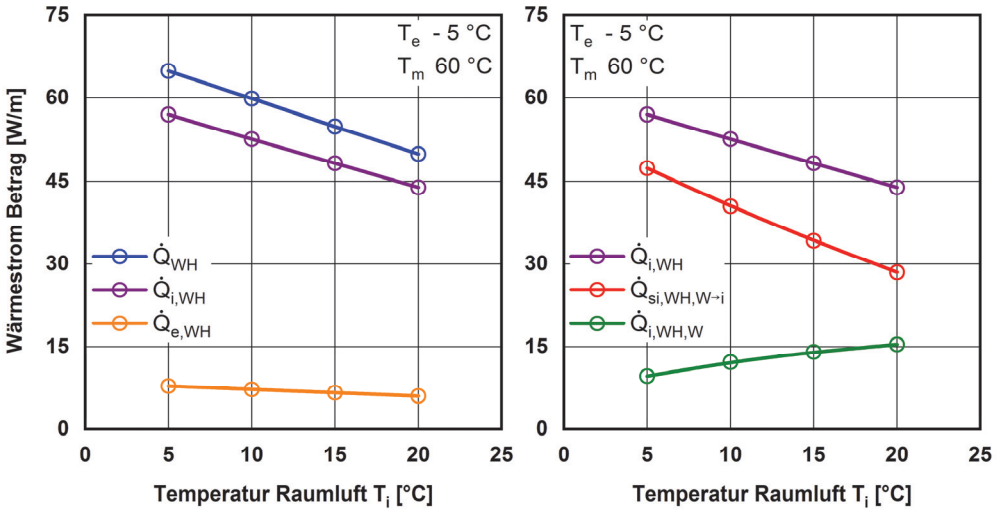


Bild 66: Wärmeströme der Temperierung in Abhängigkeit von der Raumtemperatur. Die Wärmeabgabe der Temperierung steigt mit fallender Raumtemperatur deutlich an.

Das Wärmeabgabeverhältnis f_{WH} der Temperierung bleibt praktisch konstant. Das Wärmeverlustverhältnis f_{Wand} konvergiert gegen unendlich, da der Wärmestrom der Wand ohne Temperierung $\dot{Q}_{se,Wand}$ bei -5 °C Raumtemperatur null wird, siehe Bild 67.

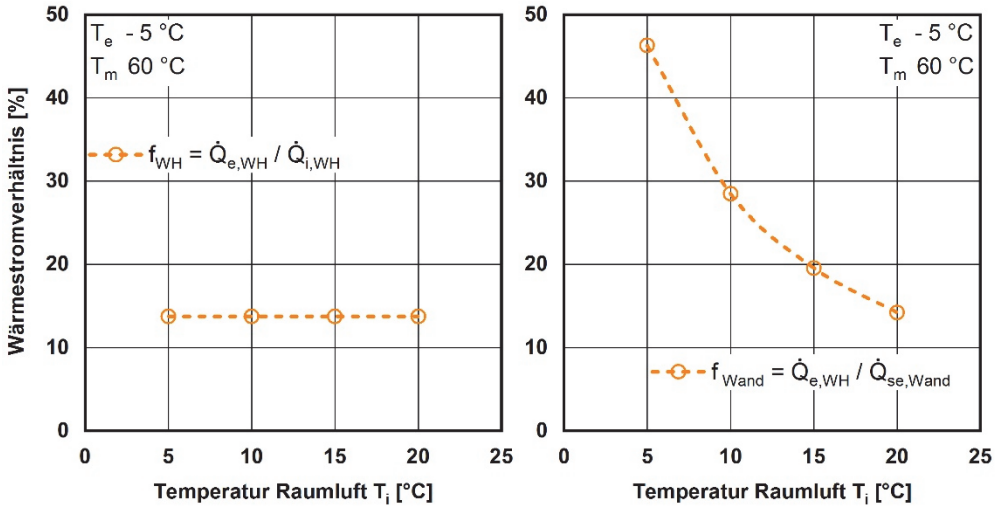


Bild 67: Wärmestromverhältnisse in Abhängigkeit der Raumtemperatur. Das Wärmeabgabeverhältnis der Temperierung f_{WH} (linkes Diagramm) bleibt praktisch gleich. Das Wärmeverlustverhältnis f_{Wand} (rechtes Diagramm) konvergiert gegen unendlich, da die Wärmeverluste $\dot{Q}_{e,WH}$ sich nur gering ändern, jedoch der Wärmestrom der Außenwand $\dot{Q}_{se,Wand}$ bei -5 °C Raumtemperatur null wird.

Parameter 4: Abstand s der Temperierung zur Innenoberfläche (Putzüberdeckung)

Die Berechnung erfolgt hygrothermisch mit der Standardwand. Die Auswirkungen der Putzüberdeckung s auf die Innen- und Außentemperatur sind in Bild 68 abgebildet. Mit zunehmender Putzüberdeckung erhöht sich die Temperaturdifferenz an der Außenoberfläche auf Höhe

der Heizleitung um bis zu 0,2 K deutlich auf eine maximale Differenz von 0,55 K zum unbeeinflussten Wandbereich bei einer Putzüberdeckung von 50 mm. Gleichzeitig sinkt die maximale Temperatur an der Innenoberfläche deutlich ab. Bei einer Überdeckung des Heizrohres mit 50 mm Putz sinkt die Oberflächentemperatur erheblich bis auf ca. 35 °C bei gleicher Heiztemperatur. Die Differenztemperatur zwischen minimaler und maximaler Oberflächentemperatur außen und Heiztemperatur und maximaler Oberflächentemperatur innen ist in Abhängigkeit zur Putzüberdeckung in Bild 69 dargestellt.

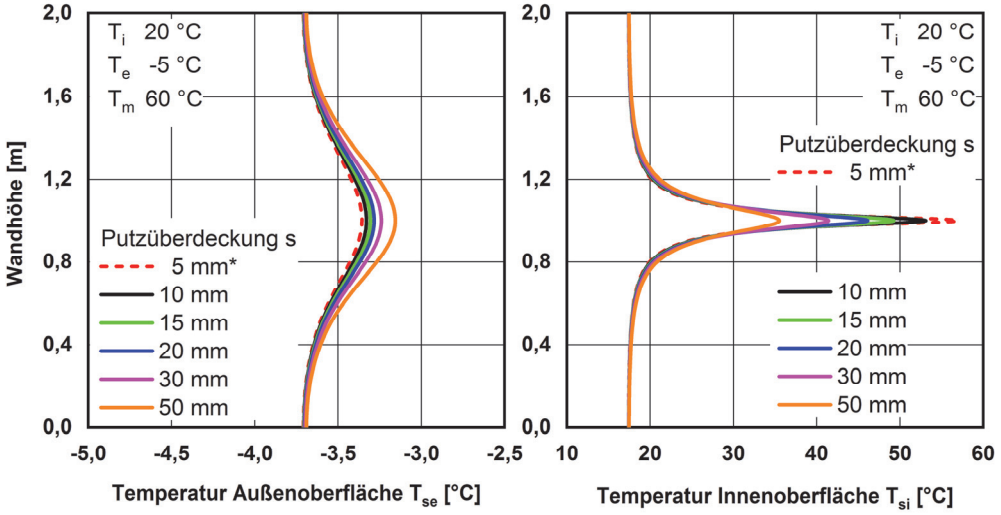


Bild 68: Oberflächentemperaturen außen und innen über die Wandhöhe bei unterschiedlich dicker Putzüberdeckung. Die gestrichelte Linie ist die Grundvariante.

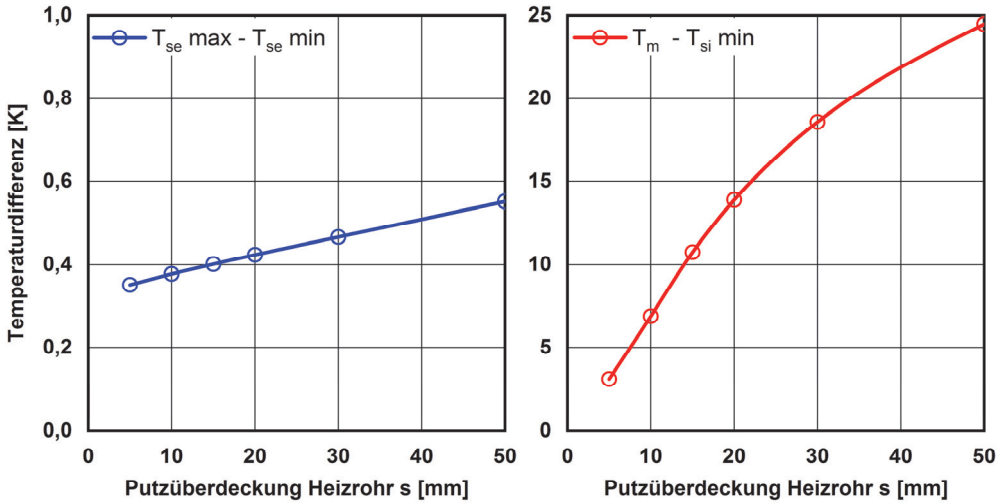


Bild 69: Differenz der maximalen und minimalen Oberflächentemperatur an der Außenoberfläche (links) sowie maximale Temperaturdifferenz innen zur Heiztemperatur in Abhängigkeit des Abstandes des Rohres zur Wandoberfläche innen (Putzüberdeckung).

Bild 70 zeigt die Wärmeströme mit den Wärmestromanteilen ausgehend von der Heizleitung. Die Gesamtwärmeabgabe $\dot{Q}_{WH}$ verändert sich geringfügig. Ausgehend von der baupraktisch minimal möglichen Einbautiefe von 5 mm steigt $\dot{Q}_{WH}$und $\dot{Q}_{i,WH}$ zunächst geringfügig an, um dann mit zunehmender Einbautiefe etwas abzusinken. Dabei erhöht sich der Wärmestrom $\dot{Q}_{e,WH}$ nach außen näherungsweise linear. Die Wärmestromanteile von $\dot{Q}_{i,WH}$ verändern sich ebenfalls mit der Einbautiefe. Der in den Raum abgegebene Wärmestrom $\dot{Q}_{si,WH,W\rightarrow i}$ bleibt bis 10 mm Einbautiefe nahezu gleich und sinkt dann ab. Gleichzeitig erhöht sich der Wärmestromanteil ausgehend von der Heizleitung in der Wand $\dot{Q}_{i,WH,W}$ (grüne Linie) ebenfalls annähernd linear geringfügig. Das nichtlineare Verhalten der Gesamtwärmeabgabe in Abhängigkeit der

Putzüberdeckung wird bei der Untersuchung der Modellierung der Rohrgeometrie noch eingehender betrachtet werden.

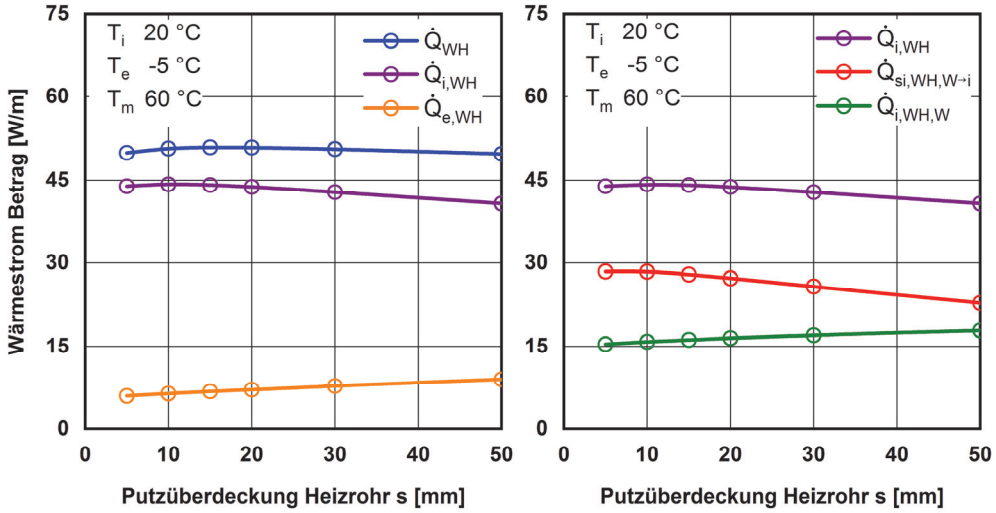


Bild 70: Wärmeströme der Temperierung in Abhängigkeit von der Putzüberdeckung. Der Gesamtwärmestrom der Temperierung $\dot{Q}_{WH}$ steigt mit zunehmender Putzüberdeckung an und sinkt danach etwas ab. Die Wärmeverluste $\dot{Q}_{e,WH}$ steigen dabei an.

Das Wärmeabgabe- und Wärmeverlustverhältnis f_{WH} bzw. f_{Wand} steigen mit zunehmender Putzüberdeckung deutlich an, siehe Bild 71.

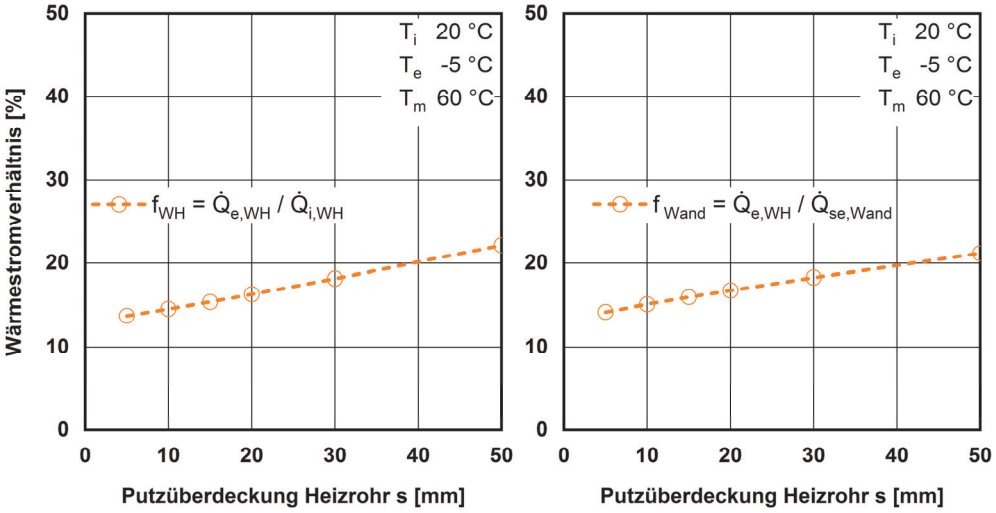


Bild 71: Wärmestromverhältnisse in Abhängigkeit der Putzüberdeckung. Das Wärmeabgabe- und Wärmeverlustverhältnis der Temperierung f_{WH} (linkes Diagramm) und f_{Wand} (rechtes Diagramm) steigen mit zunehmender Putzüberdeckung deutlich an.

Parameter 5: Dicke s_w der Wand (bei gleicher Wärmeleitfähigkeit)

Die unterschiedlichen Wanddicken entstehen durch Variation der Dicke des Mauerwerks s_m bei gleichbleibenden Putzdicken innen und außen. Die Auswirkungen unterschiedlicher Wanddicken s_w auf die Innen- und Außentemperatur sind in Bild 72 dargestellt. Der Wärmedurchlasswiderstand der Außenwand ist näherungsweise proportional zur Dicke der Wand. Mit zunehmender Wanddicke verringert sich deshalb insgesamt die Temperatur an der Außenoberfläche und an der Innenoberfläche. Der Temperaturunterschied sinkt auf der Außenoberfläche auf Höhe der Heizleitung zur Temperatur außerhalb des Einflusses der Heizleitung mit zunehmender Wanddicke.

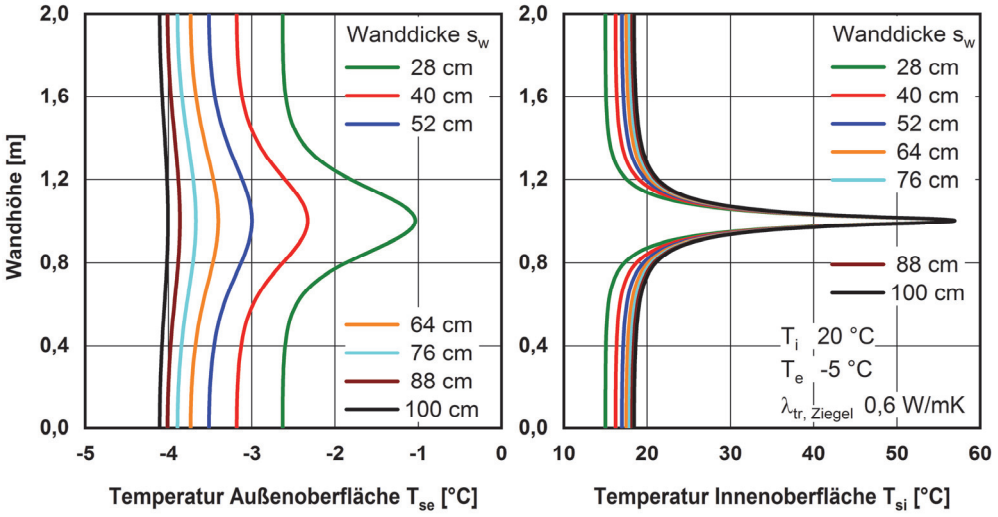


Bild 72: Oberflächentemperatur über die Wandhöhe bei unterschiedlichen Wanddicken. Die maximale Innenoberflächentemperatur verändert sich nicht. Die maximale Außenoberflächentemperatur steigt mit dünner werdendem Mauerwerk stark an.

Bild 73 zeigt die Wärmeströme mit den Wärmestromanteilen ausgehend von der Heizleitung in Abhängigkeit der Wanddicke. Die Gesamtwärmeabgabe $\dot{Q}_{WH}$ wird mit zunehmender Mauerdicke und damit einhergehendem höheren Wärmedurchlasswiderstand geringer. Der Wärmestromanteil nach innen $\dot{Q}_{i,WH}$ steigt dabei stärker an, da der zusätzliche Wärmestromverlust $\dot{Q}_{e,WH}$ nach außen mit größerem Wärmedurchlasswiderstand deutlich geringer wird. Die Wärmestromanteile von $\dot{Q}_{i,WH}$ verändern sich ebenfalls mit der Mauerdicke. Der in den Raum abgegebene Wärmestrom $\dot{Q}_{si,WH,W\rightarrow i}$ steigt deutlich an. Gleichzeitig sinkt der Wärmestromanteil ausgehend von der Heizleitung in der Wand $\dot{Q}_{i,WH,W}$ ab.

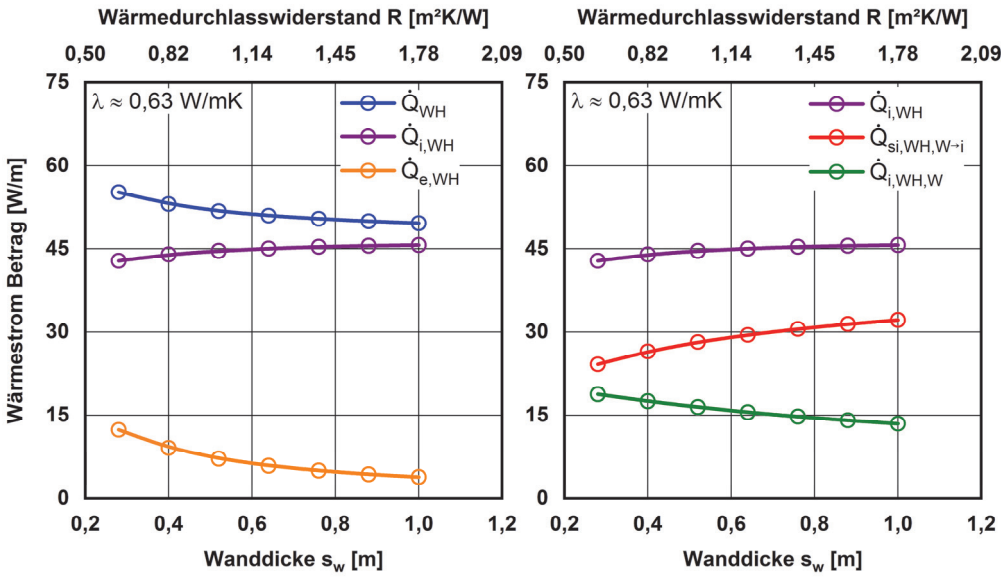


Bild 73: Wärmeströme der Temperierung in Abhängigkeit der Mauerdicke mit den dazu korrespondierenden Wärmedurchlasswiderständen R. Mit größerer Wanddicke (größerem R) sinkt die Gesamtwärmeabgabe $\dot{Q}_{WH}$ etwas ab und gleichzeitig steigt die Wärmeabgabe nach innen $\dot{Q}_{i,WH}$ leicht an, bei deutlich niedrigeren Wärmeverlusten $\dot{Q}_{e,WH}$.

Das Wärmeabgabeverhältnis f_{WH} wird mit zunehmender Dicke wesentlich günstiger bzw. steigt bei dünner werdenden Wänden stark an, Bild 74. Da beide Wärmeströme $\dot{Q}_{e,WH}$ und $\dot{Q}_{se,Wand}$ mit dünner werdender Wand ansteigen, verändert sich das Wärmeverlustverhältnis f_{Wand} nur geringfügig.

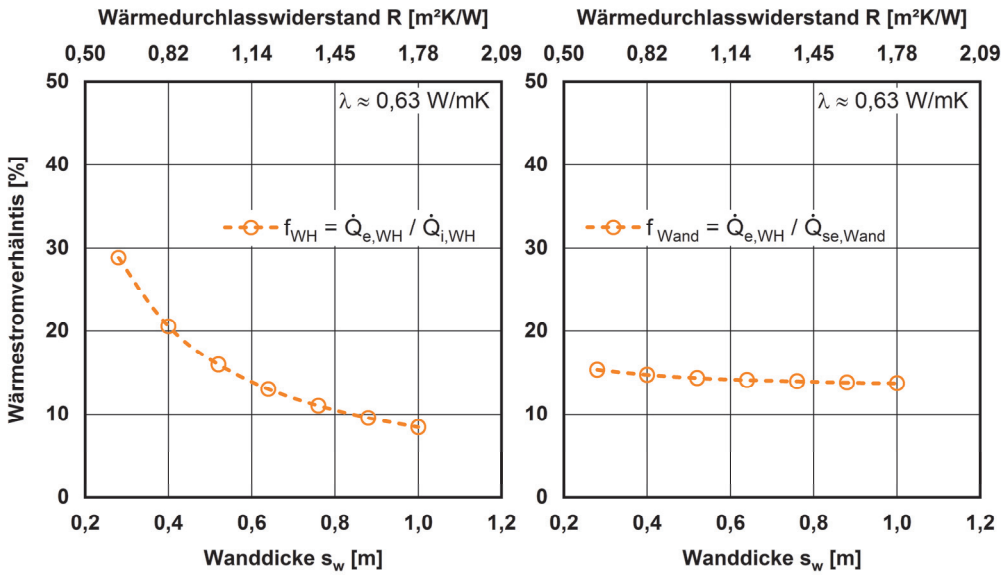


Bild 74: Wärmestromverhältnisse in Abhängigkeit der Wanddicke. Das Wärmeabgabeverhältnis f_{WH} (linkes Diagramm) wird mit zunehmender Dicke des Mauerwerks und damit höherem Wärmedurchlasswiderstand R deutlich günstiger. Das Wärmeverlustverhältnis f_{Wand} (rechtes Diagramm) senkt sich nur geringfügig, da mit zunehmender Wanddicke auch der Wärmestrom $\dot{Q}_{se,Wand}$ abnimmt.

Parameter 6: Wärmeübergangskoeffizient h Wandoberfläche innen

Ausgehend vom Standardwert von 8 W/m²K wurde ein niedrigerer Wärmeübergang durch eine Beschichtung der Wandoberfläche mit einer blanken Metallfolie angenommen. Da bei einem typischen Wärmeübergang von 8 W/m²K der Strahlungsanteil h_r ca. 5,1 W/m²K beträgt und der konvektiver Anteil h_c rund 2,9 W/m²K, wird durch einen sehr niedrigen Emissionskoeffizienten die Wärmeabgabe stark reduziert. Durch den niedrigeren Strahlungsemissionskoeffizienten von blanken Metallen im Vergleich zu normalen Wandoberflächen wird der dadurch reduzierte Wärmeübergangskoeffizient h mit einem Wert von etwa 3 W/m²K abgeschätzt. Zusätzlich werden auch größere Werte für h angenommen, um diesen Einfluss mit zu untersuchen. Wie anhand der PIV-Messung ermittelt (siehe Kapitel 4.4.4 „Wärmeübergangskoeffizient der Bauteiltemperierung für die rechnerische Bauteiluntersuchung"), treten im unmittelbaren Bereich der Heizleitung höhere Wärmeübergangskoeffizienten h auf. Bei der rechnerischen Untersuchung wird der veränderte Wärmeübergangskoeffizient allerdings konstant über einen größeren Wandbereich angenommen und deckt sich daher nicht mit den Ergebnissen der PIV-Messung. Der Wärmeübergangskoeffizient h wird im Bereich der erwärmten Innenoberfläche im Einflussbereich der Temperierung variiert, d.h. im Bereich von Wandoberflächentemperaturen, die größer als die Raumtemperatur (20 °C) sind.

Die Änderung des Wärmeübergangskoeffizienten h wirkt sich etwas auf die Innen- und Außentemperatur der Wand aus, siehe Bild 75. Auf der Innenseite erhöht sich die maximale Oberflächentemperatur um ca. 2 K mit einem sehr niedrigem h. Eine Erhöhung des Wärmeübergangskoeffizienten h wirkt sich temperatursenkend auf die maximale Oberflächentemperatur innen aus. Auf der Außenseite (Bild 75, linkes Diagramm) erhöht ein niedriger Wert auf der Raumseite die Oberflächentemperatur auf der Außenseite. In Bild 76 ist die Temperaturdifferenz zwischen der Temperatur des Heizmittels und der maximalen Temperatur an der Innenoberfläche abgebildet. Die Temperaturdifferenz steigt mit größeren h an. Ausgehend von einem h von 8 W/m²K erhöht sich die Temperaturdifferenz bei einem h von 12 W/m²K um rund 1,2 K.

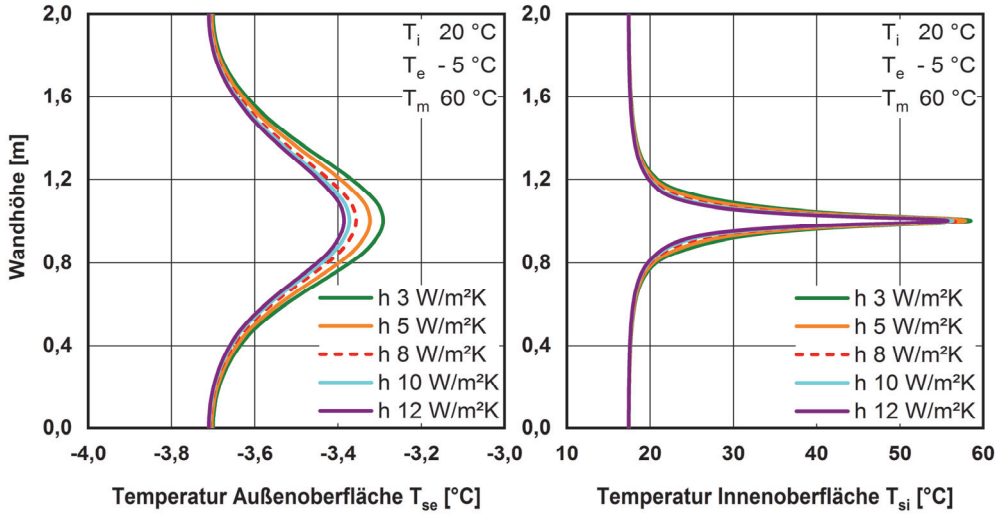


Bild 75: Oberflächentemperatur über die Wandhöhe mit unterschiedlichen Wärmeübergangskoeffizienten h. Niedrige h erhöhen die maximale Innen- und Außenoberflächentemperatur, große Werte für h zeigen einen umgekehrten Effekt.

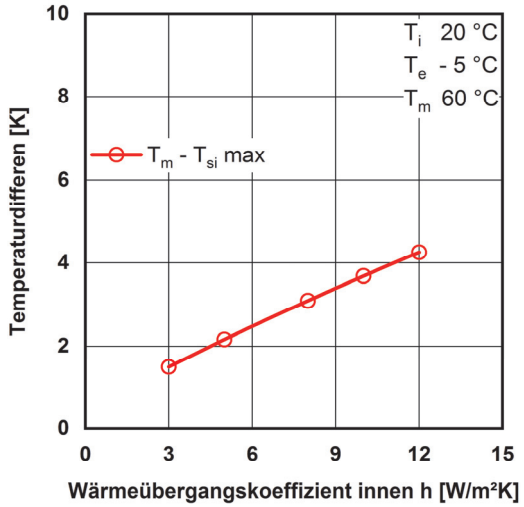


Bild 76: Differenz der maximalen Innenoberflächentemperatur zur Heizmedientemperatur in Abhängigkeit des Wärmeübergangskoeffizienten h. Die Temperaturdifferenz steigt mit größeren Wärmeübergangskoeffizienten h an.

Bild 77 zeigt die Wärmeströme mit den Wärmestromanteilen ausgehend von der Heizleitung in Abhängigkeit des Wärmeübergangskoeffizienten h. Die Gesamtwärmeabgabe $\dot{Q}_{WH}$ der Temperierung sowie der Wärmestromanteil der Temperierung nach innen $\dot{Q}_{i,WH}$ erhöht sich deutlich mit größerem Wärmeübergangskoeffizienten h. Zusätzlichen verringert sich der Wärmestromverlust $\dot{Q}_{e,WH}$ nach außen geringfügig. Die Wärmestromanteile von $\dot{Q}_{i,WH}$ verändern sich ebenfalls deutlich. Der in den Raum abgegebene Wärmestrom $\dot{Q}_{si,WH\rightarrow i}$ steigt insgesamt deutlich mit höherem Wärmeübergangskoeffizienten h an. Gleichzeitig sinkt der Wärmestromanteil ausgehend von der Heizleitung in der Wand $\dot{Q}_{i,WH}$ etwas ab.

Das Wärmeabgabeverhältnis f_{WH} wird mit abnehmenden Wärmeübergangskoeffizienten h deutlich ungünstiger, siehe Bild 78 links. Das Wärmeverlustverhältnis f_{WH} erhöht sich ebenfalls etwas mit geringerem Wärmeübergangskoeffizienten h (Bild 78 rechts).

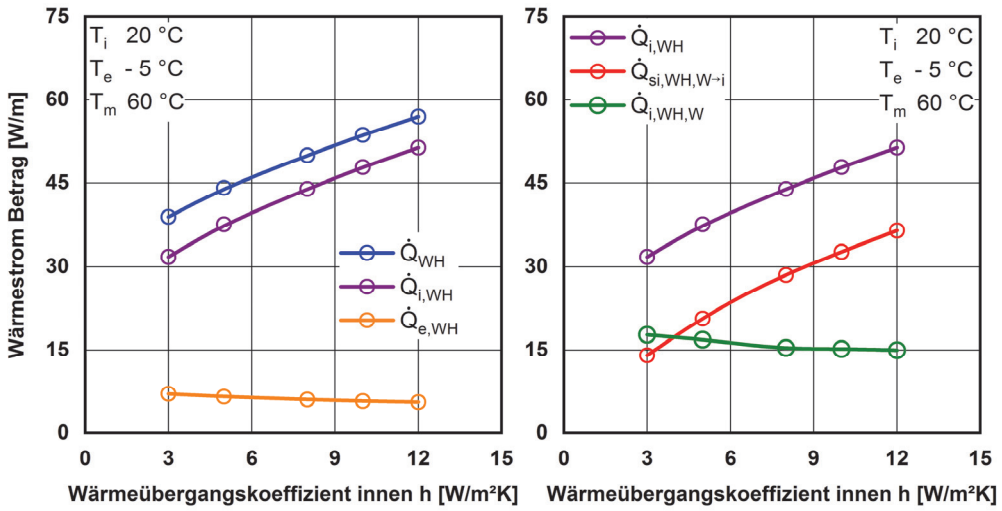


Bild 77: Wärmeströme in Abhängigkeit des Wärmeübergangskoeffizienten h. Durch eine technisch mögliche Verringerung des Wärmeübergangskoeffizienten h an der Innenoberfläche kann die Wärmeabgabe der Temperierung nach innen reduziert werden.

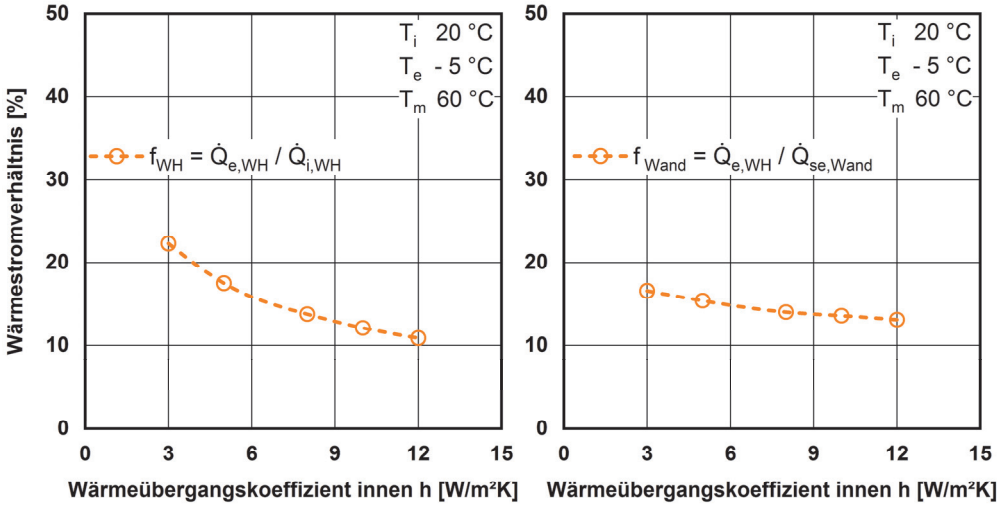


Bild 78: Wärmestromverhältnisse in Abhängigkeit des Wärmeübergangskoeffizienten h. Die beiden Wärmestromverhältnisse der Temperierung f_{WH} (linkes Diagramm) und f_{Wand} (rechtes Diagramm) werden deutlich ungünstiger mit abnehmenden Wärmeübergangskoeffizienten h und günstiger mit zunehmenden h im Vergleich zum Standardwert von 8 W/m²K.

Parameter 7: Wärmeübergangskoeffizient α_{HL} Heizmittel - Wand

Die Berechnungen erfolgen für diesen Parameter rein thermisch. Die Auswirkungen des Wärmübergangskoeffizienten α_{HL} auf die Innen- und Außentemperatur sind in Bild 79 abgebildet. Der Wärmewiderstand des Rohrmaterials wird hier nicht gesondert berücksichtigt. Mit niedrigeren Wärmeübergangskoeffizienten sinkt die maximale Temperatur an der Außenoberfläche auf Höhe der Heizleitung etwas ab. Gleichzeitig sinkt die maximale Temperatur an der Innenoberfläche deutlicher ab. Bei sehr niedrigen Wärmeübergangskoeffizienten α_{HL} von 50 W/m²K sinkt die maximale Oberflächentemperatur bis auf ca. 47 °C ab, bei 60 °C Heiztemperatur. In Bild 80 ist die Differenztemperatur zwischen Heiztemperatur und maximaler Oberflächentemperatur innen in Abhängigkeit des Wärmeübergangskoeffizienten α_{HL} dargestellt. Ein niedrigerer Wärmeübergangskoeffizient α_{HL} wirkt sich dabei wie eine Verringerung der Heiztemperatur aus.

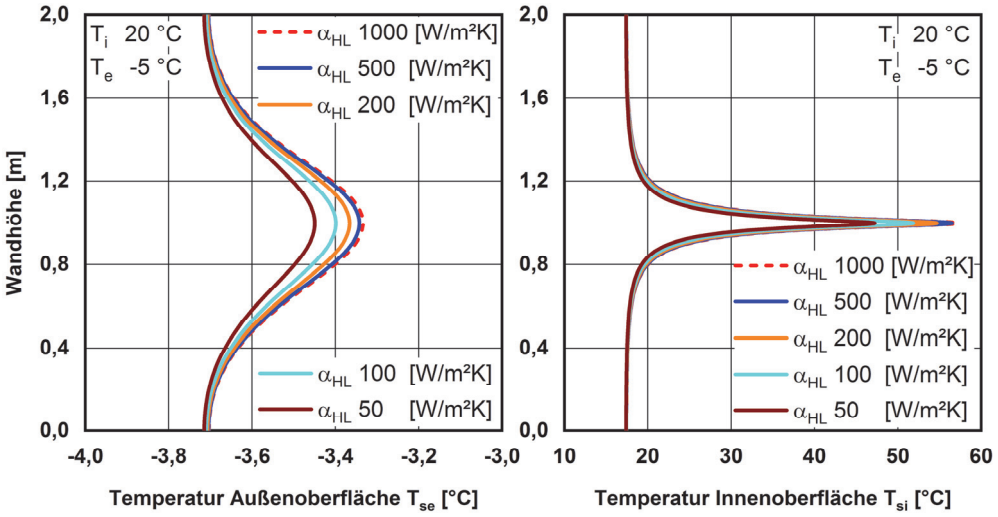


Bild 79: Oberflächentemperaturen über die Wandhöhe mit unterschiedlichen Wärmeübergangskoeffizienten α_{HL} zwischen Heizmittel und Rohrwand. Die gestrichelte Linie zeigt die Grundvariante.

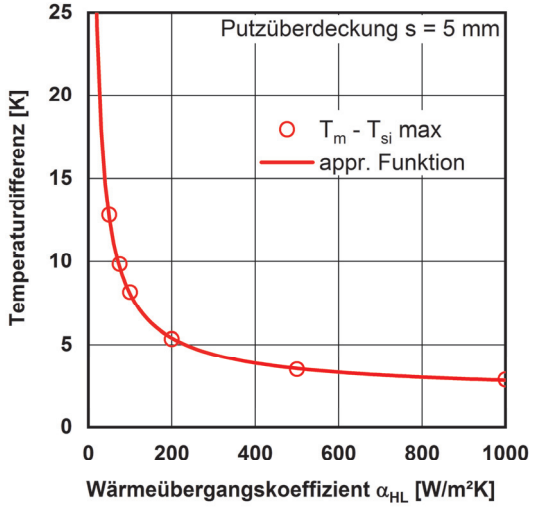


Bild 80: Differenz der maximalen Innenoberflächentemperatur zur Heizmedientemperatur in Abhängigkeit des Wärmeübergangskoeffizienten α_{HL}

Bild 81 zeigt die Wärmeströme mit den Wärmestromanteilen ausgehend von der Heizleitung in Abhängigkeit des Wärmeübergangskoeffizienten α_{HL} vom Heizmittel zur Rohrinnenwand.

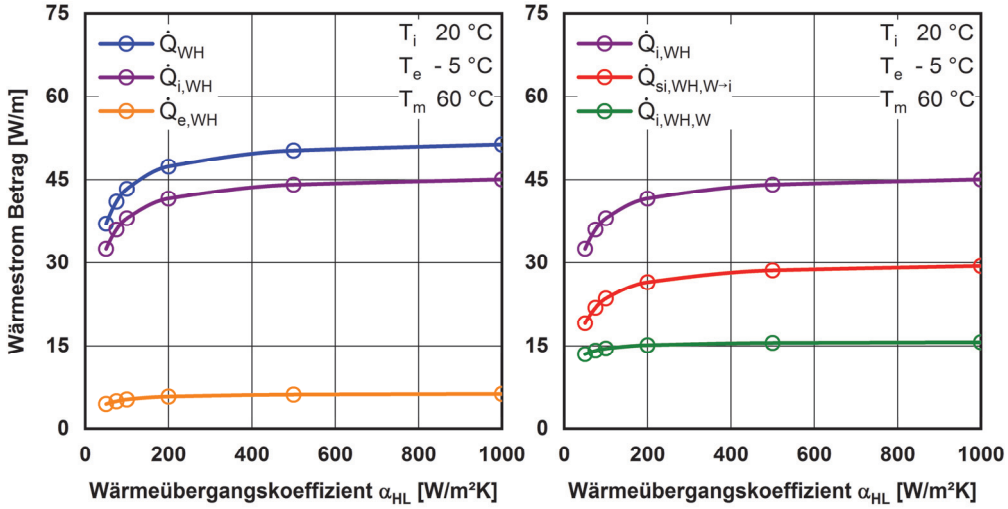


Bild 81: Wärmeströme der Temperierung in Abhängigkeit des Wärmeübergangskoeffizienten α_{HL} vom Heizmittel zur Wand

Die Gesamtwärmeabgabe $\dot{Q}_{WH}$ sowie der Wärmestromanteil nach innen $\dot{Q}_{i,WH}$ sinken bei sehr niedrigen α_{HL} drastisch ab. Dabei wird auch der Wärmestrom $\dot{Q}_{e,WH}$ nach außen etwas geringer. Der in den Raum abgegebene Wärmestrom $\dot{Q}_{si,WH\rightarrow i}$ sinkt insgesamt deutlich ab. Gleichzeitig vermindert sich der Wärmestromanteil $\dot{Q}_{i,WH,W}$ geringfügig. Das Wärmeabgabeverhältnis f_{WH} bleibt nahezu konstant (Bild 82). Das Wärmeverlustverhältnis f_{Wand} sinkt bei niedrigen α_{HL} etwas ab.

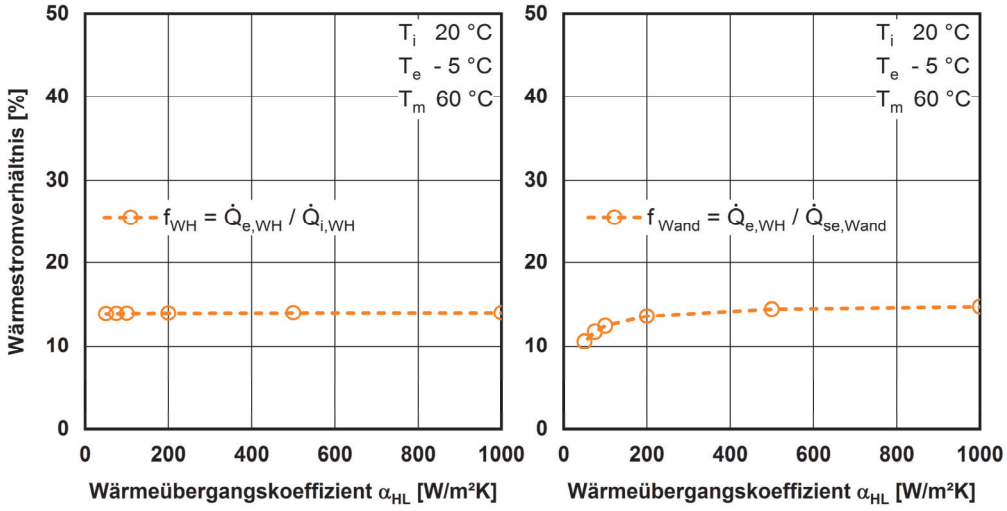


Bild 82: Wärmestromverhältnisse in Abhängigkeit des Wärmeübergangskoeffizienten vom α_{HL} Heizmittel zur Wand. Das Wärmeabgabeverhältnis f_{WH} (linkes Diagramm) bleibt praktisch konstant. Das Wärmeverlustverhältnis f_{Wand} (rechtes Diagramm) sinkt deutlich ab bei niedrigen Werten für α_{HL}.

Parameter 8: Wärmeleitfähigkeit λ Mauerwerk

Es wurde für diese Parameterstudie eine rein thermische Berechnung an einer 5 m hohen Wand durchgeführt. Zusätzlich wurde der Wärmeübergangskoeffizient α_{HL} von 1000 W/m²K auf 100 W/m²K herabgesetzt. Der Einfluss von α_{HL} auf die Wärmeabgabe wurde bereits vorhergehend untersucht, siehe Parameter 7. Die Angaben der Wärmeleitfähigkeit beziehen sich auf den trockenen Baustoff mit λ_{tr}. Die Auswirkungen der Wärmeleitfähigkeit λ auf die Innen- und Außentemperatur, bei gleichbleibender Heizmedientemperatur, ist in Bild 83 abgebildet. Mit höherer Wärmeleitfähigkeit sinkt die maximale Temperatur an der Innenoberfläche um ca. 2 K ab. Gleichzeitig erhöht sich die maximale Temperatur an der Außenoberfläche, es stellt sich eine Differenztemperatur zwischen maximaler und minimaler Oberflächentemperatur außen von bis zu 1,3 K ein. Mit sehr geringer Wärmeleitfähigkeit des Mauerwerks beträgt die Temperaturdifferenz auf der Außenseite lediglich ca. 0,07 K. Die gestrichelte rote Linie entspricht dabei dem untersuchten Fall mit α_{HL} 100 W/m²K in Bild 79.

Bild 84 zeigt die Wärmeströme mit den Wärmestromanteilen in Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit des Mauerwerks. Dabei sind für die einzelnen Wärmeleitfähigkeiten λ typische Wandbaumaterialien angenommen worden. Die Gesamtwärmeabgabe $\dot{Q}_{WH}$ sowie der Wärmestromanteil $\dot{Q}_{i,WH}$ nach innen steigen mit zunehmender Wärmeleitfähigkeit drastisch an. Gegenüber der Standard-Variante mit Vollziegel wird mit dem Oberkirchner Sandstein fast eine Verdoppelung der Wärmeabgabe der Temperierung bei ansonsten gleichen Randbedingungen erreicht. Der Wärmestromanteil $\dot{Q}_{e,WH}$ nach außen steigt ebenfalls stark an. Der direkt in den Raum abgegebene Wärmestrom $\dot{Q}_{si,WH\rightarrow i}$ fällt bei hohen Wärmeleitfähigkeiten leicht ab. Gleichzeitig erhöht sich der Wärmestromanteil $\dot{Q}_{i,WH,W}$ deutlich. Das Wärmeabgabeverhältnis f_{WH} erhöht sich ebenfalls drastisch und erreicht rund 40 %. Auch das Wärmeverlustverhältnis f_{Wand} steigt an. Das Wärmeverlustverhältnis f_{Wand} (rechtes Diagramm) wurde mit einer 5 m hohen Wand berechnet aber zur besseren Vergleichbarkeit auf eine 2 m hohe Wand bezogen.

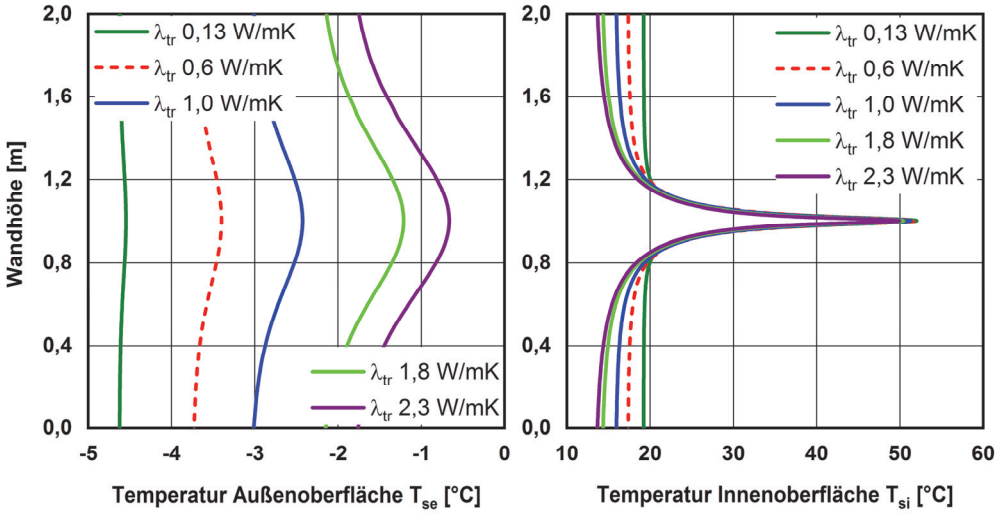


Bild 83: Oberflächentemperatur der Außenwand über die Wandhöhe bei verschiedenen Wärmeleitfähigkeiten mit einem α_{HL} mit 100 W/m²K. Die gestrichelte Linie zeigt die Grundvariante (mit α_{HL} 100 W/m²K).

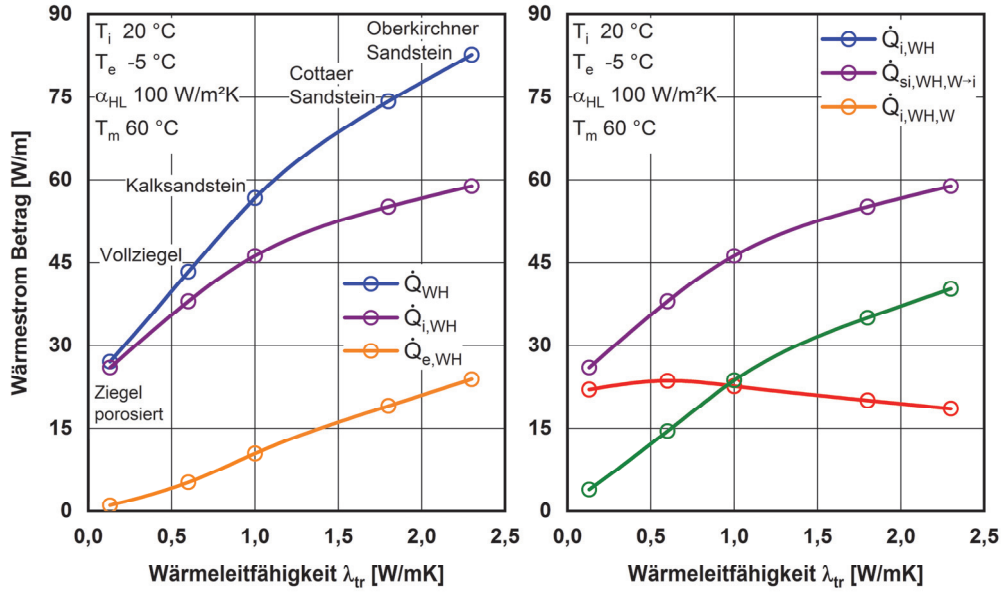


Bild 84: Wärmeströme der Temperierung in Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit. Die Wärmeströme steigen mit größerer Wärmeleitfähigkeit stark an.

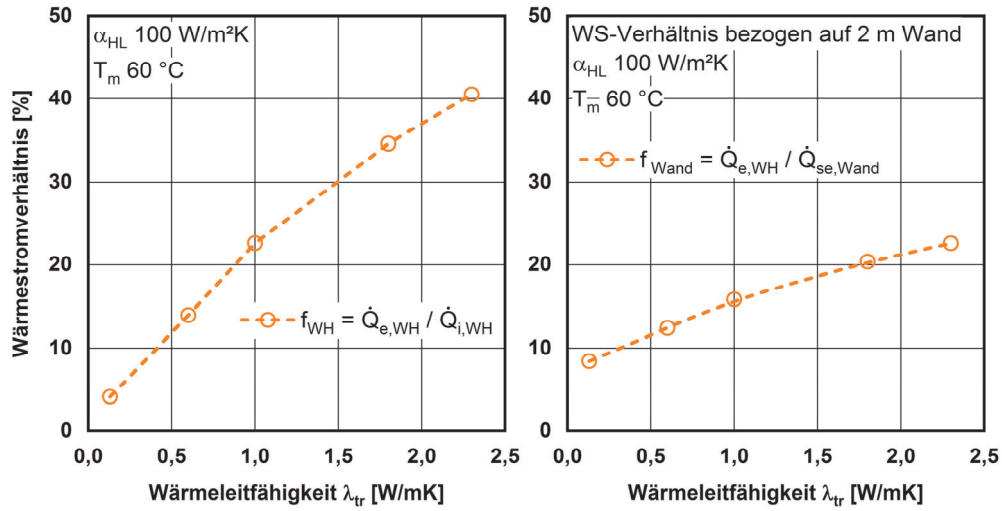


Bild 85: Wärmestromverhältnisse in Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit. Das Wärmeabgabeverhältnis f_{WH} (links) steigt stark an. Das Wärmeverlustverhältnis f_{Wand} (rechts) erhöht sich ebenfalls deutlich mit zunehmender Wärmeleitfähigkeit.

Parameter 9: Durchmesser Heizrohr

Auch für diese Parameterstudie wird eine rein thermische Berechnung an einer 5 m hohen Wand durchgeführt. Zusätzlich wird auch hier der Wärmeübergangskoeffizient α_{HL} von 1000 W/m²K auf 100 W/m²K herabgesetzt. Das Heizrohr wurde jeweils mit einem Abstand von 5 mm zur Putzoberfläche im 2D-Modell implementiert. Der unterschiedliche Durchmesser der Heizrohre verändert auch den Abstand des Heizrohres zur Außenoberfläche geringfügig. Der Rohrdurchmesser wirkt sich auf die Oberflächentemperatur aus. Die Differenz der maximalen Außenoberflächentemperatur zwischen einem 12 mm Rohr zu einem 21 mm Rohr beträgt 0,1 K und die Differenz der maximalen Innenoberflächentemperatur unterscheidet sich um maximal 2,9 K (Bild 86).

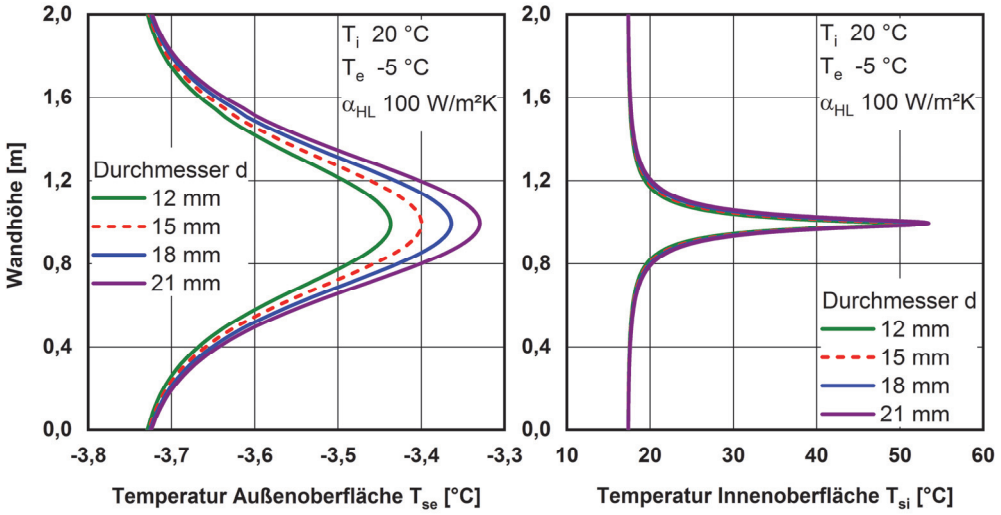


Bild 86: Oberflächentemperaturen der Außenwand über die Wandhöhe bei unterschiedlichen Heizrohrdurchmessern

Bild 87 zeigt die Wärmeströme in Abhängigkeit des Heizrohrdurchmessers. Die Gesamtwärmeabgabe $\dot{Q}_{WH}$ sowie der Wärmestromanteil nach innen $\dot{Q}_{i,WH}$ und außen $\dot{Q}_{e,WH}$ steigen in der rein thermischen Berechnung mit größerem Durchmesser linear an.

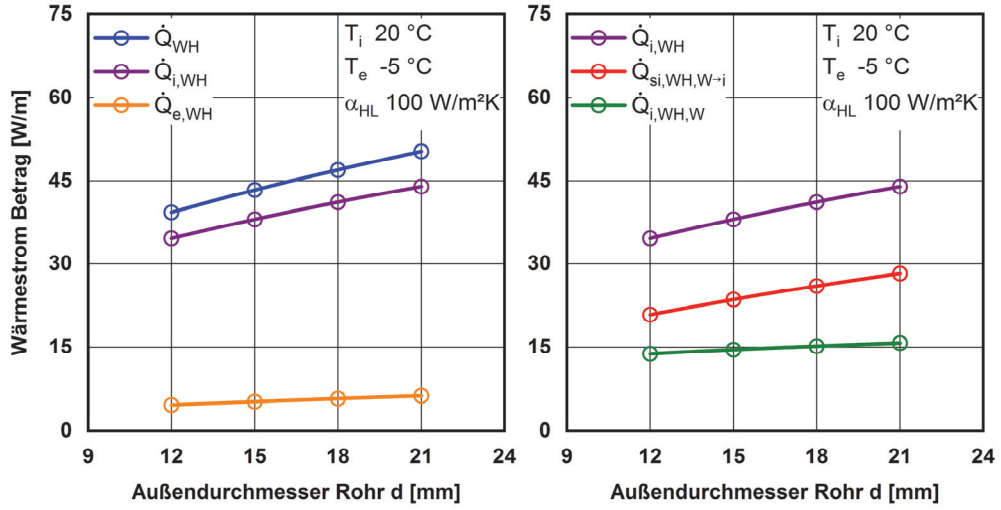


Bild 87: Wärmeströme in Abhängigkeit des Heizrohrdurchmessers d. Die Wärmeströme steigen mit größerem Rohrdurchmesser nahezu linear an.

Das Wärmeabgabeverhältnis f_{WH} erhöht sich leicht mit zunehmendem Heizrohrdurchmesser. Das Wärmeverlustverhältnis f_{Wand} steigt deutlicher mit größerem Rohrdurchmesser an, Bild 88. Das Wärmeverlustverhältnis f_{Wand} (rechtes Diagramm) wurde mit einer 5 m hohen Wand berechnet aber zur besseren Vergleichbarkeit auf eine 2 m hohe Wand bezogen.

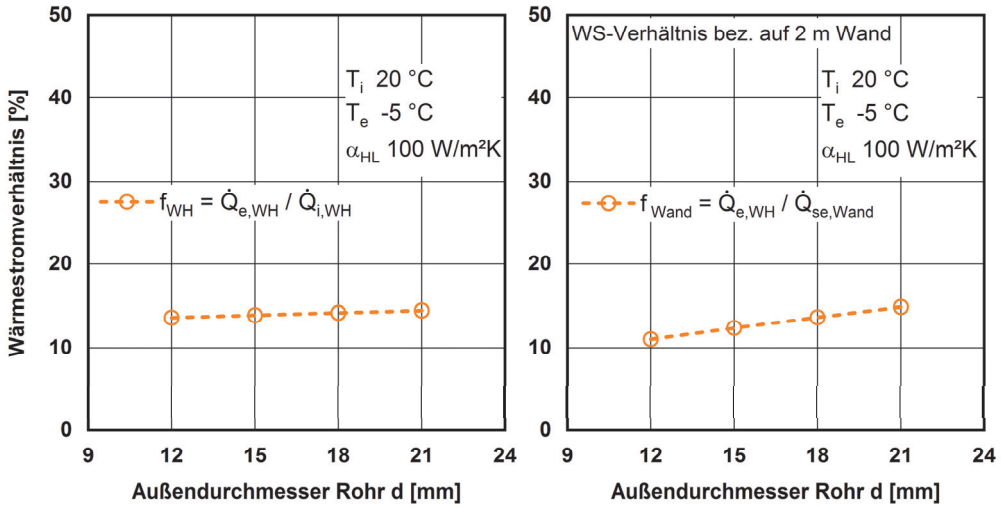


Bild 88: Wärmestromverhältnisse in Abhängigkeit des Heizrohrdurchmessers. Das Wärmeabgabeverhältnis f_{WH} (linken Diagramm) steigt etwas an. Das Wärmeverlustverhältnis f_{Wand} (rechtes Diagramm) berechnet mit einer 5 m hohen Wand aber bezogen auf eine 2 m hohe Wand, erhöht sich deutlicher mit zunehmender Heizrohrdurchmesser.

Abstand zwischen zwei Heizrohren (Temperierschleife)

Es wird die Auswirkung bei Anordnung von zwei Heizrohren in der Außenwand untersucht. Dies entspricht einer typischen Verwendung der Temperierung mit Vor- und Rücklaufleitung, z.B. als Brüstungsschleife (kleiner Rohrabstand) oder großer Schleife mit z.B. Vorlauf im Sockel und Rücklauf in der Brüstung (großer Rohrabstand). Die Untersuchung wurde in der als Standard definierten Außenwand ohne Einfluss von Wärmebrücken durchgeführt. Die Wandhöhe wurde mit 5 m Höhe modelliert. Die Berechnung erfolgt rein thermisch ohne Berücksichtigung des Wassergehaltes des Mauerwerks. Bild 89 zeigt die Wärmestromanalyse für zwei Heizleitungen mit einem Abstand von 100 cm zueinander, mit den gewählten Standardrandbedingungen der Standardaußenwand.

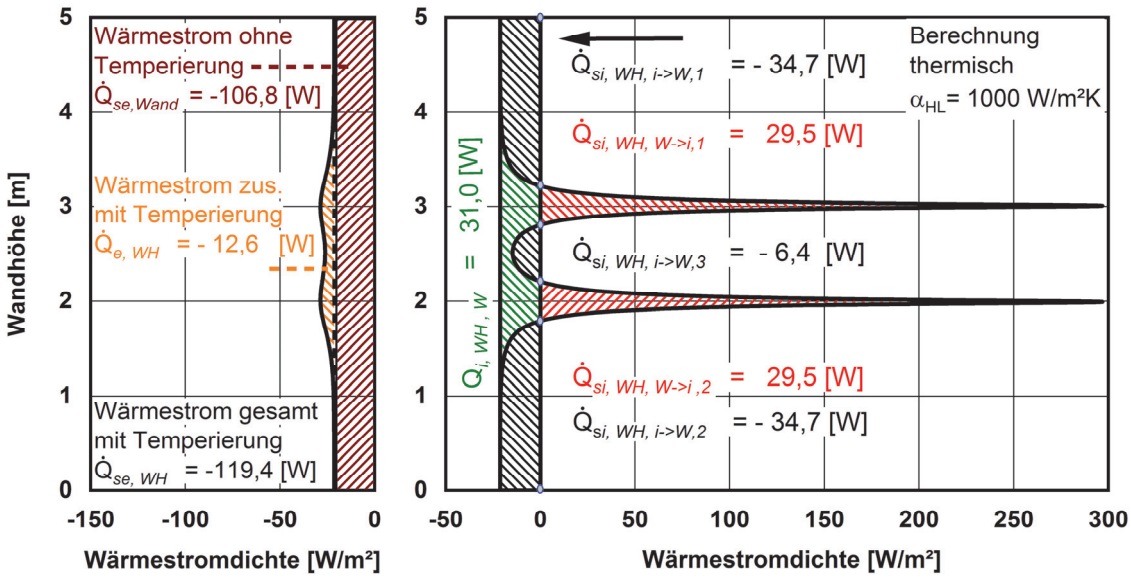


Bild 89: Wärmestromanalyse von zwei Heizrohren (Temperierschleife). Im linken Diagramm sind die Wärmeströme auf der Außenseite und im rechten auf der Innenseite dargestellt. Die Integrale der schraffierten Teilflächen der Wärmestromdichten ergeben den jeweiligen Wärmestromanteil.

Die von den Heizleitungen ausgehenden Wärmeströme überlagern sich in der Wand. Die Heizleitungen beeinflussen sich hier noch in geringem Maß, erkennbar an der noch zusammenhängenden grünen Fläche der Wärmestromanteile $\dot{Q}_{i,WH,W}$ und zusammenhängenden orangen Fläche der Wärmestromanteile $\dot{Q}_{e,WH}$ der zwei Heizrohre. An der Außenoberfläche bilden sich zwei Maxima über den Heizleitungen aus. An der Innenoberfläche stellt sich zwischen den Heizleitungen ein Wärmestrom $\dot{Q}_{si,WH\rightarrow i}$ von der Raumluft nach außen ein.

In Bild 90 sind die Temperaturverläufe in Abhängigkeit des Abstandes zwischen zwei Heizrohren an der Innen- und Außenoberfläche abgebildet. Bis zu einem Abstand von 50 cm wird an der Außenoberfläche ein Temperaturminimum in der Mitte des Abstandes ausgebildet. Bei einem Abstand von 100 cm zwischen den Heizrohren bilden sich zwei Temperaturmaxima an der Außenoberfläche aus. Bei den Innentemperaturen ist bis zu dem Abstand von 50 cm das lokale Temperaturminimum in der Mitte zwischen den Heizleitungen über 20 °C. Bei einem Abstand von 100 cm sinkt das lokale Minimum unter 20 °C an der Wandoberfläche und liegt noch rund 0,8 K über der Temperatur der nicht beheizten Wand. Die maximale Oberflächentemperatur innen wird geringfügig beeinflusst und ist, bei einem Abstand der Heizleitungen von 5 cm im Vergleich zu einem Abstand von 100 cm, um 0,2 K höher.

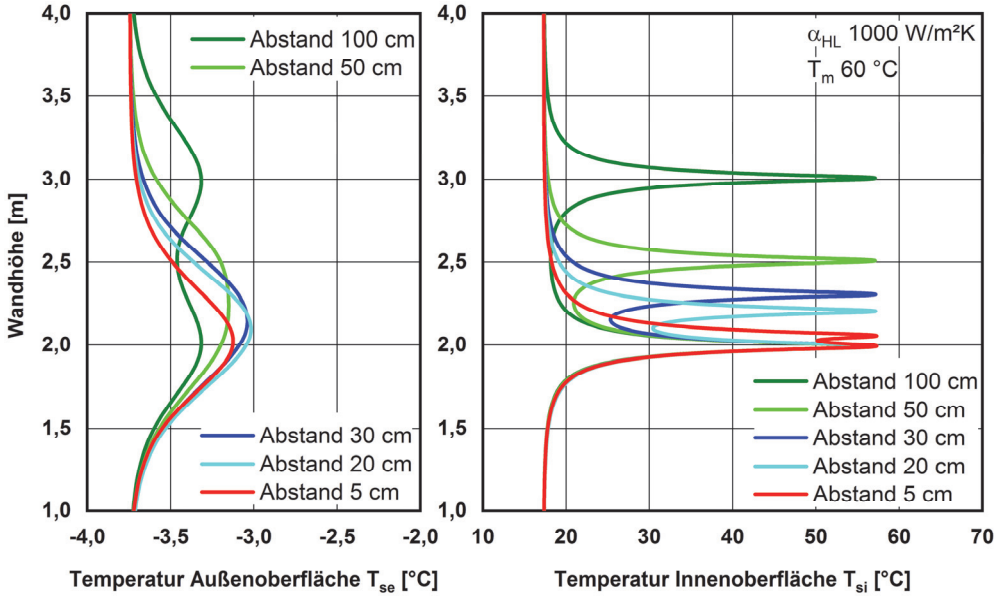


Bild 90: Wandoberflächentemperaturen über die Wandhöhe bei unterschiedlichen Abständen zwischen den Heizleitungen

Bild 91 zeigt die Wärmeströme mit den Wärmestromanteilen ausgehend von zwei Heizleitungen in Abhängigkeit des Abstandes zwischen den Rohren. Der Abstand „0“ bezeichnet die Wärmeabgabe von einem Heizrohr und entspricht der Grundvariante mit einem Heizrohr. Bei einem Abstand von 100 cm zwischen den Rohren entspricht die Gesamtwärmeabgabe rund zweimal der Wärmeabgabe eines einzelnen Heizrohres. Die Gesamtwärmeabgabe von zwei Heizrohren $\dot{Q}_{WH}$ sinkt mit geringer werdendem Abstand zwischen den Heizleitungen. Bei einem Abstand der Heizrohre von 10 cm sinkt die Wärmeabgabe auf rund 86 % der maximale möglichen, und bei einem Abstand von 5 cm sinkt die Wärmeabgabe auf rund 76 % der maximal möglichen Wärmeabgabe von 2 Heizleitungen. Der in den Raum abgegebene Wärmestrom $\dot{Q}_{si,WH\rightarrow i}$ steigt mit größerem Abstand an und sinkt ab einem Abstand von 30 cm geringfügig ab, da das Integral von $\dot{Q}_{si,WH\rightarrow i}$ entsprechend dem Temperaturverlauf in Bild 90 minimal wird und dadurch sich das Integral der positiven Werte verkleinert. Der nach innen gerichtete Wärmestromanteil in der Wand $\dot{Q}_{i,WH,W}$ steigt kontinuierlich an, anfangs etwas deutlicher. Danach flacht die Kurve mit zunehmendem Abstand zwischen den Heizleitungen ab.

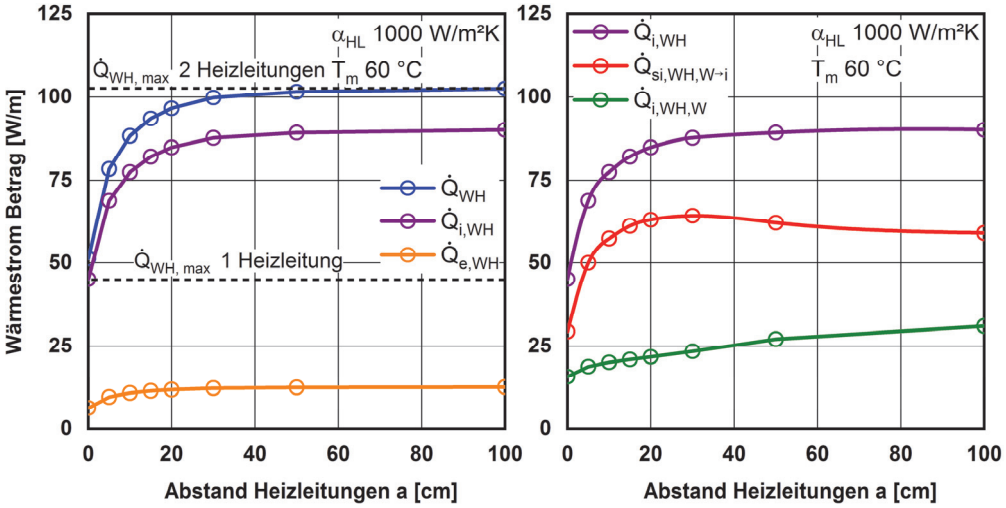


Bild 91: Wärmeströme in Abhängigkeit des Abstandes von zwei Heizrohren in der Standard-Außenwand mit 5 m Höhe. Im linken Diagramm ist die Gesamtwärmeabgabe $\dot{Q}_{WH}$ mit dem Wärmestromanteil zum Raum $\dot{Q}_{i,WH}$ und nach außen $\dot{Q}_{e,WH}$ dargestellt. Im rechten Diagramm ist die Wärmeabgabe nach innen $\dot{Q}_{i,WH}$ mit dem Wärmestromanteil in den Raum $\dot{Q}_{si,WH\rightarrow i}$ und dem nach innen gerichteten Wärmestromanteil $\dot{Q}_{i,WH,W}$ in der Wand abgebildet.

Das Wärmeabgabeverhältnis f_{WH} ist nahezu konstant für alle Abstände, unabhängig von der Anzahl der Heizleitungen (ein oder zwei Heizleitungen), siehe Bild 92. Das Wärmestromverlustverhältnis f_{Wand} verläuft analog zu der Gesamtwärmeabgabe. Bei einem Abstand von 100 cm zwischen den Rohren entspricht das Wärmeverlustverhältnis rund zweimal dem f_{Wand} von einer Heizleitung. Das Wärmeverlustverhältnis f_{Wand} (rechtes Diagramm) wurde mit einer 5 m hohen Wand berechnet, aber zur besseren Vergleichbarkeit auf eine 2 m hohe Wand bezogen.

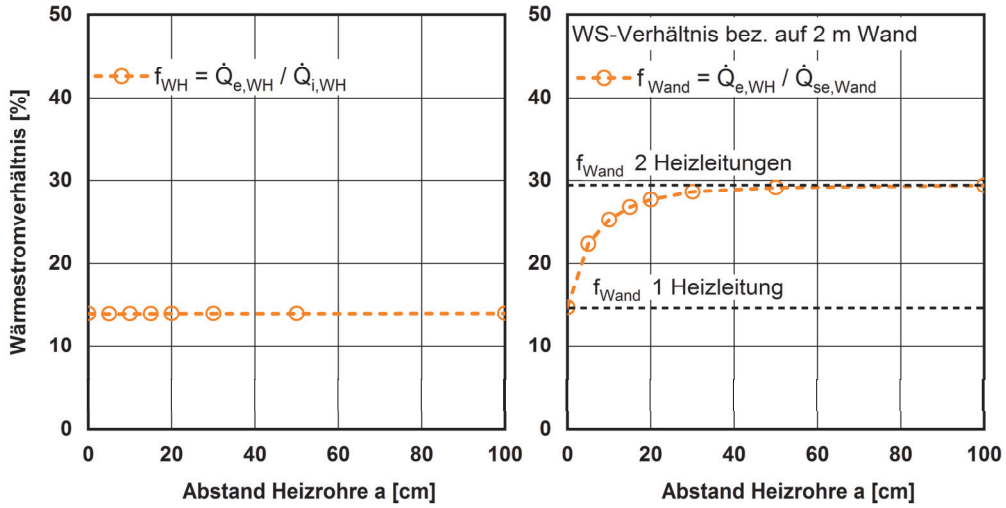


Bild 92: Wärmestromverhältnisse bei zwei Heizrohren in Abhängigkeit des Abstandes zwischen den Heizrohren. Das Wärmeabgabeverhältnis f_{WH} (linkes Diagramm) bleibt nahezu gleich. Das Wärmeverlustverhältnis f_{Wand} (rechtes Diagramm), bezogen auf eine 2 m hohe Wand, steigt mit zunehmenden Abstand an.

Die Wärmeabgabe von zwei Heizrohren wird durch den Abstand zueinander beeinflusst. Der Einfluss wurde anhand der Standardwand untersucht und dargestellt. Bei anderen Parametern, wie Heiztemperatur T_m, Wärmübergang α_{HL}, Rohrdurchmesser d, Wärmeleitfähigkeit λ, Wanddicke s_W, Putzüberdeckung s, oder anderer Raum- und Außentemperaturen wird eine andere, spezifische Heizleistung erreicht. Die gegenseitige Beeinflussung von zwei Heizrohren verändert sich dadurch. Bei sinkender Wärmeabgabe je Heizrohr verringert sich auch die gegenseitige Beeinflussung untereinander und umgekehrt steigt die gegenseitige Beeinflussung mit zunehmender Wärmeabgabe.

Rohrgeometrie quadratisch – angenäherte Kreisform, thermisch und hygrothermisch berechnet am Parameter 4 Putzüberdeckung

Die am einfachsten mögliche Modellierung eines Rohres in der Gitterstruktur in WUFI 2D ist eine quadratische Abbildung, siehe Bild 93 links. Dadurch ist es möglich, die erforderliche Gitteranzahl gering zu halten. An der Grenze wird die entsprechende Randbedingung mit Temperatur und Wärmeübergangskoeffizient angelegt. Durch die quadratische Form ergibt sich ein größerer Umfang im Vergleich zur Kreisform. Die Modellierung des Rohres ist über kleinere Rechteckstruktur als angenäherte Kreisform möglich, siehe Bild 93 rechts. Die Anzahl der erforderlichen Gitterelemente wird dadurch wesentlich erhöht und damit auch die Rechenzeit, die Simulation ist aber realitätsnäher.

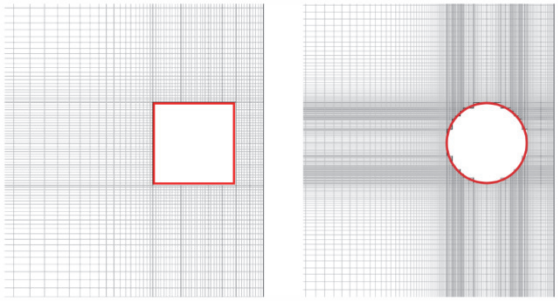


Bild 93: Detail der Rohrmodellierung mit der Gitterstruktur in WUFI® 2D. Links im Bild ist das Heizrohr quadratisch modelliert, rechts im Bild mit angenäherter Kreisform.

Die Berechnungen können rein thermisch oder mit Berücksichtigung der Bauteilfeuchte hygrothermisch durchgeführt werden. Durch Berücksichtigung der Bauteilfeuchte mit feuchte- und temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeiten ergeben sich über das Bauteil unterschiedliche Wärmeleitfähigkeiten, die sich von der rein thermischen Berechnung unterscheiden. Außerdem wird bei der hygrothermischen Berechnung der Latentwärmetransport mit berücksichtigt.

Die Auswirkungen der unterschiedlichen Rohrmodellierungen sowie die unterschiedlichen Berechnungsmöglichkeiten (thermisch – hygrothermisch) werden anhand des Parameters Putzüberdeckung untersucht und verglichen. In Bild 94 sind die Wärmeströme in Abhängigkeit der Putzüberdeckung abgebildet, sowie in der Tabelle 19 für die Standardwand mit einer Putzüberdeckung von 5 mm aufgelistet. Der Gesamtwärmestrom der Temperierung $\dot{Q}_{WH}$ ist bei der thermischen Berechnung höher im Vergleich zur hygrothermischen Berechnung. Die Differenz von der thermisch zur hygrothermischen Berechnung mit quadratischer Rohrmodellierung beträgt 1,4 W/m, die sich im weiteren Verlauf, bei einer Putzüberdeckung von 30 mm, auf ca. 1,8 W/m erhöht. Der Unterschied zwischen der thermischen Berechnung mit quadratischer Modellierung zur angenäherter runden Modellierung beträgt 2,15 W/m (rund 4,3 %) und bleibt im weiteren Verlauf in etwa gleich, mit einer etwas geringere Differenz bei einer Putzüberdeckung von 30 mm von ca. 2,05 W/m.

Der Vergleich zwischen thermischer und hygrothermischer Berechnung mit jeweils angenäherter runder Modellierung ergibt eine Differenz von ca. 1,6 W/m. Für die Wärmeabgabe der hygrothermischen Berechnung, mit runder Rohrmodellierung in Abhängigkeit der Putzüberdeckung, ergibt sich eine ähnliche Kurvenform wie bei der thermischen Berechnung und runder Rohrmodellierung. Der Unterschied zwischen der thermischen Berechnung mit quadratischer Modellierung zur realitätsnäheren hygrothermischen Berechnung mit angenäherter runder Modellierung beträgt ca. 3,7 W/m (rund 7,8 %) für die ansonsten gleichgebliebenen Randbedingungen der Standardwand. Die betragsmäßige Höhe des nach außen abgegebenen Wärmestromes $\dot{Q}_{e,WH}$ staffelt sich entsprechend der Gesamtwärmeabgabe je nach Wahl der Modellierung des Rohres. Es ergibt sich ein nahezu gleiches Wärmeabgabeverhältnis f_{WH} für alle Varianten mit ansteigenden Werten mit zunehmender Putzüberdeckung, siehe Bild 94 unten

rechts. Die Wahl der Rohrmodellierung wirkt sich demnach nicht auf das Wärmeabgabeverhältnis aus. Die Auswirkungen der unterschiedlichen Rohrmodellierung auf das Berechnungsergebnis werden im Kapitel 4.6 eingehender dargestellt. Für die maximale Innenoberflächentemperatur ergibt sich ein ähnliches Bild. Die geringste Temperaturdifferenz zwischen Innenoberfläche und Heizmittel wird für die Standardwand mit 5 mm Putzüberdeckung bei der thermischen Berechnung mit quadratischer Modellierung mit 2,9 K festgestellt. Die Differenz bei der hygrothermischen Berechnung mit angenäherter runder Modellierung beträgt 4,0 K. Die Werte sind in der Tabelle 19 mit den Werten der Wärmeströme aufgelistet.

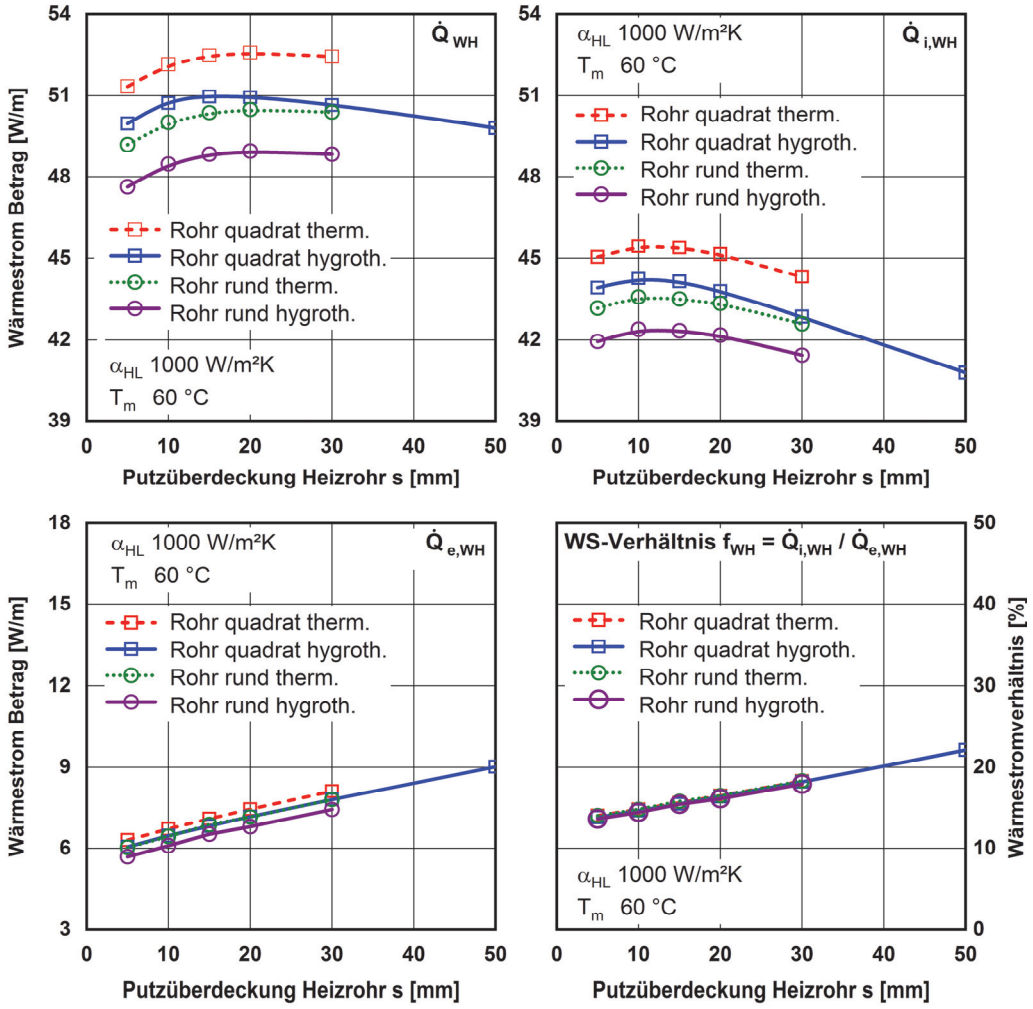


Bild 94: Wärmeströme und Wärmeabgabeverhältnisse bei variierender Putzüberdeckung und Berechnungsmodelle. Die thermische Berechnung mit quadratischer Modellierung des Rohrs zeigt eine höhere Wärmeabgabe im Vergleich zur hygrothermischen Berechnung mit angenäherter runder Modellierung bei gleichen Wärmeabgabeverhältnissen.

Tabelle 19: Wärmestrom der Temperierung und maximale Oberflächentemperatur T_S bei unterschiedlicher Berechnung und Modellierung. Die Werte sind für die Standardwand mit einer Putzüberdeckung von 5 mm angegeben. Zusätzlich sind die max. Differenztemperaturen zwischen Heizmittel T_m (60 °C) und Oberflächentemperatur T_S mit angegeben.

Berechnung	Modell	$\dot{Q}_{WH}$	Max. T_{si}	Differenz $T_m - T_{si}$
		[W/m]	[°C]	[K]
Thermisch	Quadrat	51,3	57,1	2,9
Hygrotherm.	Quadrat	50,0	56,0	4,0
Thermisch	Rund	49,2	56,2	3,8
Hygrotherm.	Rund	47,6	56,0	4,0

Wärmedämmung hinter dem Heizrohr

Es werden die Auswirkungen einer Wärmedämmung untersucht, die direkt hinter der unter Putz verlegten Heizleitung angeordnet ist. Eine Ausführung mit Wärmedämmung hinter der Heizleitung zur Senkung der direkten Wärmeverluste wird auch in der Praxis beobachtet (siehe z.B. Feldstudie Glentleiten und Aldersbach). Die Berechnungen wurden für die Feldstudie Aldersbach für einen optimierten Einbau durchgeführt. Die Messergebnisse dazu sind in Anhang A „Feldstudien mit Messung der Wärmeabgabe der Temperierung" dargestellt.

Die Bauteilgeometrie und mögliche Ausführung der Dämmung sind durch bauliche Gegebenheiten, handwerkliche Durchführbarkeit und ggf. denkmalpflegerische Vorgaben bestimmt. Dadurch beschränkt sich die Dicke und Breite des Dämmstoffes sowie die Wärmeleitfähigkeit (Materialwahl). Die fünf möglichen Parameter der Anordnung und Abmessung der Dämmschicht sowie der Heizleitung unter Putz sind in Bild 95 dargestellt.

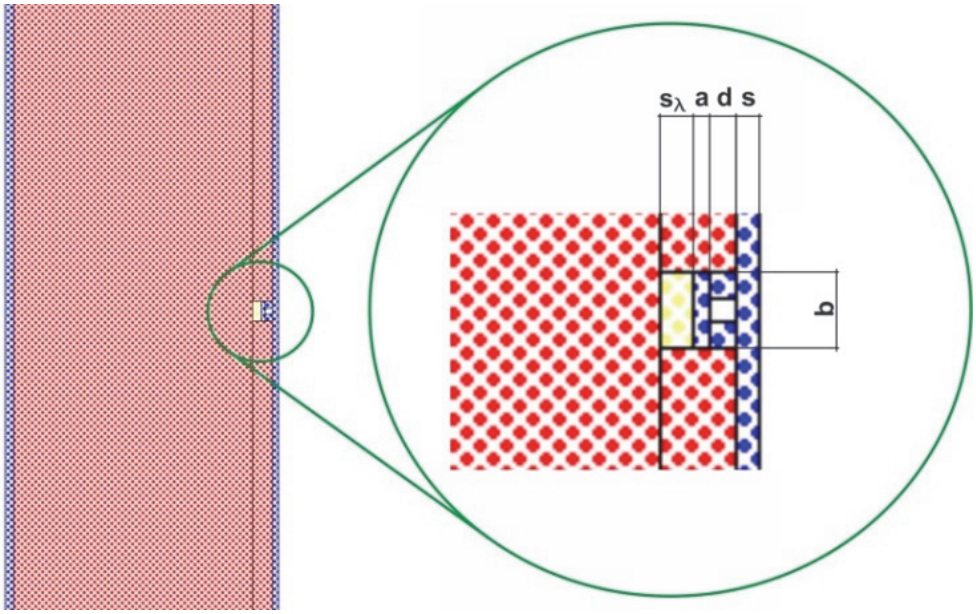


Bild 95: WUFI® 2D Simulationsmodell der Außenwand im Regelquerschnitt im vertikalen Schnitt mit Temperierung und zusätzlicher Dämmung. Die genaue Einbausituation der Temperierung und Dämmung ist im Detailausschnitt bezeichnet und vergrößert dargestellt.

s_λ	[m]	Dicke des Dämmstoffs
a	[m]	Abstand zwischen Wärmedämmung und Heizleitung
d	[m]	Durchmesser Heizrohr
s	[m]	Abstand Heizrohr zur Innenoberfläche (Putzüberdeckung)
b	[m]	Breite des Dämmstoffs bzw. des Mauerschlitzes

Die Auswirkung einer Wärmedämmung hinter dem Heizrohr auf das thermische Feld ist in Bild 96 beispielhaft abgebildet. Die Wärmedämmung verringert insgesamt das Temperaturniveau im unmittelbaren Bereich hinter dem Heizrohr. Dadurch wird die Wärmeabgabe des Heizrohres im Vergleich zur Standardausführung (Referenz) der Temperierung ohne Wärmedämmung verringert. Bei einer geringeren Gesamtwärmeabgabe sinkt durch die Wärmedämmung der nach außen abgegebene Wärmestrom $\dot{Q}_{e,WH}$ sowie auch der nach innen abgegebene Wärmestrom $\dot{Q}_{i,WH}$ wie nachfolgend dargestellt wird.

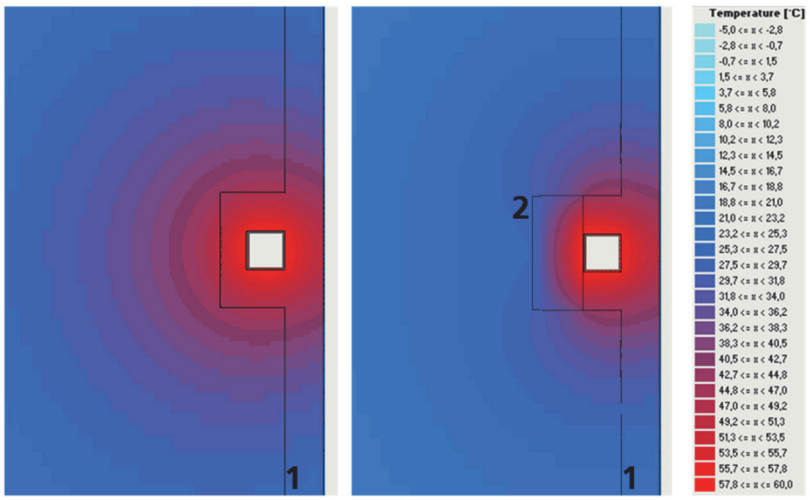


Bild 96: Detaildarstellung der berechneten thermischen Felder im vertikalen Wandschnitt im unmittelbaren Bereich der Temperierung ohne Dämmung (linkes Bild) und mit Dämmstreifen ohne Abstand zum Heizrohr (rechtes Bild). Die Linie „1" markiert die Bauteilgrenze zwischen Putz und Mauerwerk. Das Rechteck bei „2" zeigt die Anordnung der Wärmedämmung unmittelbar hinter dem Heizrohr. Die Temperierung ist als weißes Quadrat abgebildet.

Um den gleichen Wärmestromanteil nach innen zu erhalten wie die Referenz, wird aufgrund der verringerten Wärmeabgabe eine längere Heizleitung (oder alternativ eine Erhöhung der Vorlauftemperatur) erforderlich. Der Faktor f_{Qi}, um den die Heizleitung länger werden muss, berechnet sich aus dem Verhältnis des Wärmestroms nach innen der wärmegedämmten Variante zur Referenz, siehe (Gl. 32).

Bewertet werden die direkten Wärmeströme $\dot{Q}_{e,WH}$ der Temperierung nach außen. Eine Verringerung des direkten Wärmestroms nach außen bedeutet bei einer rein thermischen Betrachtung einen effizienteren Betrieb. Mit einer längeren Heizleitung erhöht sich wiederum der nach außen abgegebene Wärmestrom, da der direkte Wärmestrom nach außen proportional zur Leitungslänge ist. Der dadurch größere Wärmestrom der gedämmten Variante $\dot{Q}^*_{e,WH}$ nach außen kann über den Faktor f_{Qi} berechnet werden, wie in (Gl. 33) angegeben.

Der Wärmestrom $\dot{Q}^*_{e,WH}$. der wärmegedämmten Varianten wird auf den Wärmestrom $\dot{Q}_{e,WH,Referenz}$ der Referenz bezogen. Mit dem berechneten Verhältnis f_{Qe} (Gl. 34) können die unterschiedlichen Varianten in Bezug zum Wärmeverlust der Referenz bei gleicher Wärmeabgabe nach innen verglichen werden.

Zusätzlich wird das Wärmeverlustverhältnis f^*_{Wand} berechnet. Hierfür wird der um den Faktor f_{Qi} größere Wärmestrom nach außen $\dot{Q}^*_{e,WH}$ auf den Wärmestrom der Außenwand $\dot{Q}_{se,Wand}$ ohne Temperierung bezogen (Gl. 35).

(Gl. 32)	$f_{Qi} = \frac{\dot{Q}_{i,WH,Referenz}}{\dot{Q}_{i,WH}}$	[-]	Verlängerungsfaktor
(Gl. 33)	$\dot{Q}^*_{e,WH} = f_{Qi} * \dot{Q}_{e,WH}$	[W/m]	
(Gl. 34)	$f_{Qe} = \frac{\dot{Q}^*_{e,WH}}{\dot{Q}_{e,WH.Referenz}}$	[%]	Dämmeinfluss Verluste außen
(Gl. 35)	$f^*_{Wand} = \frac{\dot{Q}^*_{e,WH}}{\dot{Q}_{se,Wand}}$	[%]	Wärmestromverhältnis

Abstand a der Heizleitung zur Wärmedämmung

In Bild 97 sind die Wärmestromanteile der Temperierung mit Dämmung mit unterschiedlichen Abständen a zwischen Heizleitung und Dämmung abgebildet. Für die Wärmedämmung wird dabei eine sehr niedrige Wärmeleitfähigkeit von 0,009 W/mK angesetzt. Zusätzlich ist die Wärmeabgabe der Referenz, also Temperierung ohne Dämmung, mit eingetragen. Die Gesamtwärmeabgabe sowie die Wärmestromanteile sind ohne Abstand zwischen Heizleitung und Dämmung erheblich geringer im Vergleich zur Referenz und steigen mit zunehmendem Abstand deutlich an. In Bild 98 ist der Verlauf des Faktors f_{Qi} in Abhängigkeit des Abstandes des Heizrohres zur Wärmedämmung abgebildet (linkes Diagramm). Dabei entspricht f_{Qi} der Referenz dem Wert 1.

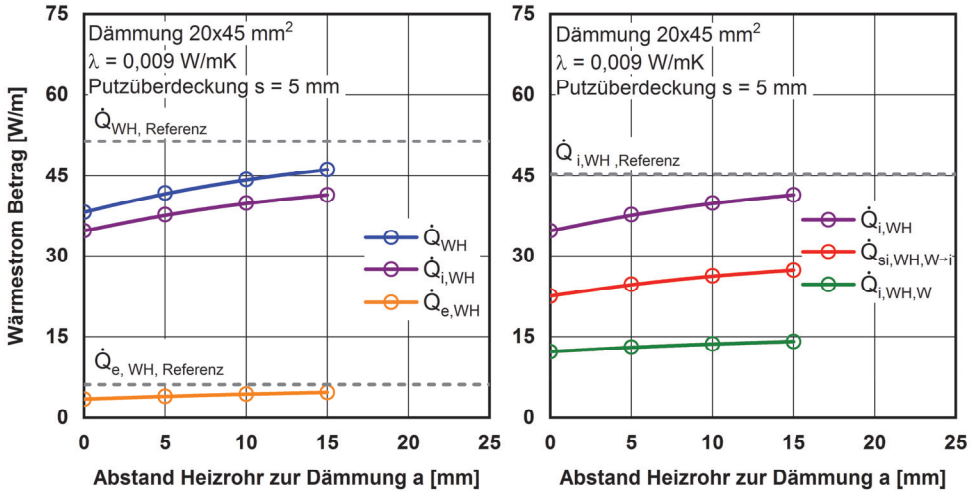


Bild 97: Gesamtwärmestrom und Wärmestromanteile in Abhängigkeit des Abstandes zwischen Heizrohr und Wärmedämmung. Zusätzlich sind die Wärmeströme der Referenz (Temperierung ohne Wärmedämmung) mit eingetragen. Die Wärmedämmung verringert die Wärmeströme der Temperierung im Vergleich zur Referenz.

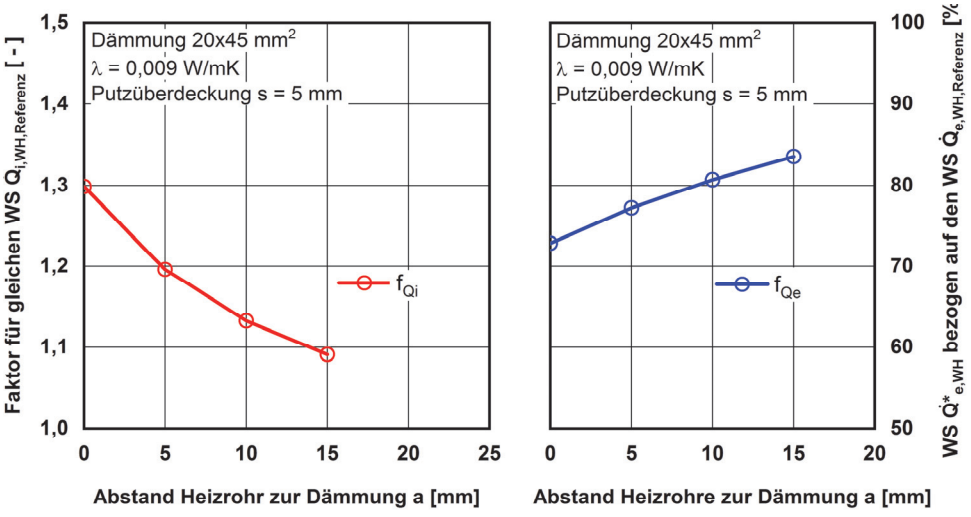


Bild 98: Verlauf des Faktors f_{Qi} für eine zur Referenz gleich hohen Wärmeabgabe nach innen in Abhängigkeit des Abstandes a des Heizrohres zur Wandoberfläche (links). Rechts: Verlauf des mit f_{Qe} bezeichneten Verhältnisses der Wärmeströme $\dot{Q}^*_{e,WH}$ nach außen der Varianten zur Referenz bei gleich hohem Wärmestrom nach innen eingetragen. Das WS-Verlustverhältnis f_{Qe} der Referenz entspricht 100 %.

Ohne Abstand zur Wärmedämmung ist die Heizleitung um rund 30 % länger auszuführen, um den gleichen Wärmestrom nach innen, und damit gleiche Heizwirkung, zu erhalten. Wird die Heizleitung entsprechend verlängert, erhöhen sich auch die Wärmeverluste nach außen. Trotz

der Erhöhung der Wärmeverluste nach außen, bei einer längeren Heizschleife, sind die Wärmeverlust deutlich geringer im Vergleich zur Referenz ohne Wärmedämmung. Im rechten Diagramm ist das Verhältnis der Wärmeverluste f_{Qe} im Vergleich zur Referenz eingetragen. Die Referenz entspricht dabei 100 %. Die Variante ohne Abstand des Heizrohres zur Dämmung hat trotz einer um rund 30 % längeren Heizleitung einen geringeren Wärmeverlust von nur rund 73 % im Vergleich zur Temperierung ohne Wärmedämmung. Bild 99 zeigt den Verlauf des Wärmeabgabeverhältnisses f_{WH} und das Wärmeverlustverhältnis f^*_{Wand}. Die Werte der gedämmten Varianten sind deutlich günstiger im Vergleich zur Referenz ohne Wärmedämmung.

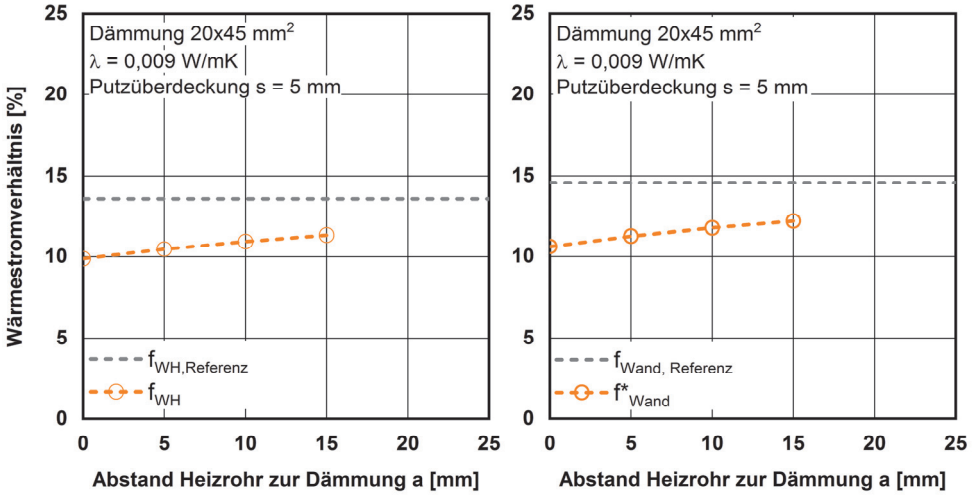


Bild 99: Verlauf des Wärmeabgabeverhältnis f_{WH} (linkes Diagramm) und bezogenen Wärmestromverhältnis f^*_{Wand} (rechtes Diagramm). Die Wärmestromverhältnisse der gedämmten Varianten sind mit geringeren Werten deutlich günstiger im Vergleich zur Referenz.

Wärmeleitfähigkeit λ der Wärmedämmung

Die Auswirkung der Wärmeleitfähigkeit des Dämmstoffes wurde an dem Einbaubeispiel mit einer Putzüberdeckung s von 10 mm und einem Abstand a zwischen Dämmung und Heizleitung von 10 mm untersucht. Die Dicke und Breite des Dämmstoffes blieben unverändert. In Bild 100 sind die Wärmeströme der Temperierung in Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit der Dämmung dargestellt. Die Gesamtwärmeabgabe pro Meter Rohr erhöht sich um ca. 1 W/m bei einer Änderung der Wärmeleitfähigkeit von 0,009 W/mK auf 0,04 W/mK. Die Wärmestromanteile verändern sich dementsprechend nur geringfügig.

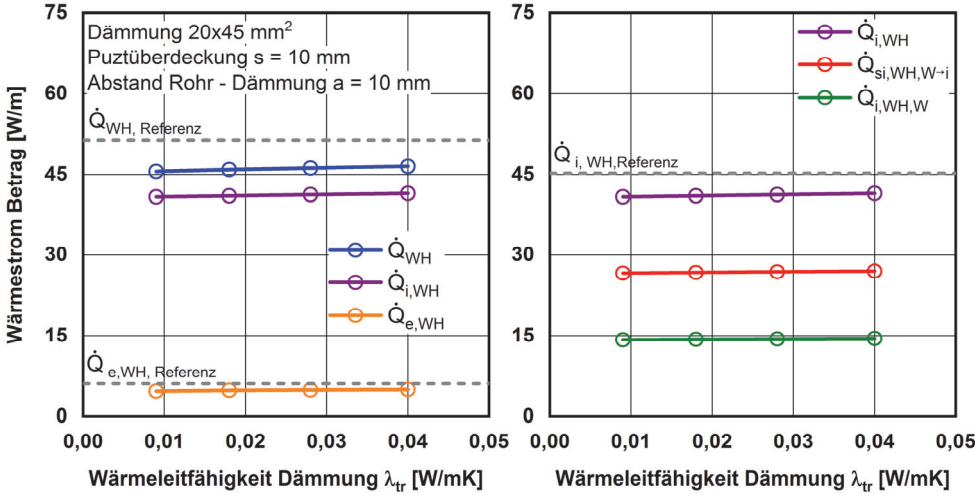


Bild 100: Gesamtwärmestrom und Wärmestromanteile in Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung. Die Wärmeströme nehmen geringfügig zu mit höher werdender Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung hinter dem Heizrohr.

In Bild 101 ist der Verlauf des Faktors f_{Qi} in Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung abgebildet (linkes Diagramm). Dabei entspricht f_{Qi} der Referenz gleich 1. Der Faktor f_{Qi} verändert sich mit der Wärmeleitfähigkeit nur geringfügig bei diesen Ausführungsvarianten bei Werten um 1,12. Im rechten Diagramm in Bild 101 ist das Verhältnis der Wärmeverluste f_{Qe} im Vergleich zur Referenz eingetragen. Die Referenz entspricht dabei 100 %. Der Einfluss der Wärmedämmung ist auch hier gering und reicht mit der niedrigsten Wärmeleitfähigkeit mit 0,009 W/mK von 81 % bis zu 85 % bei einer Wärmeleitfähigkeit von 0,040 W/mK.

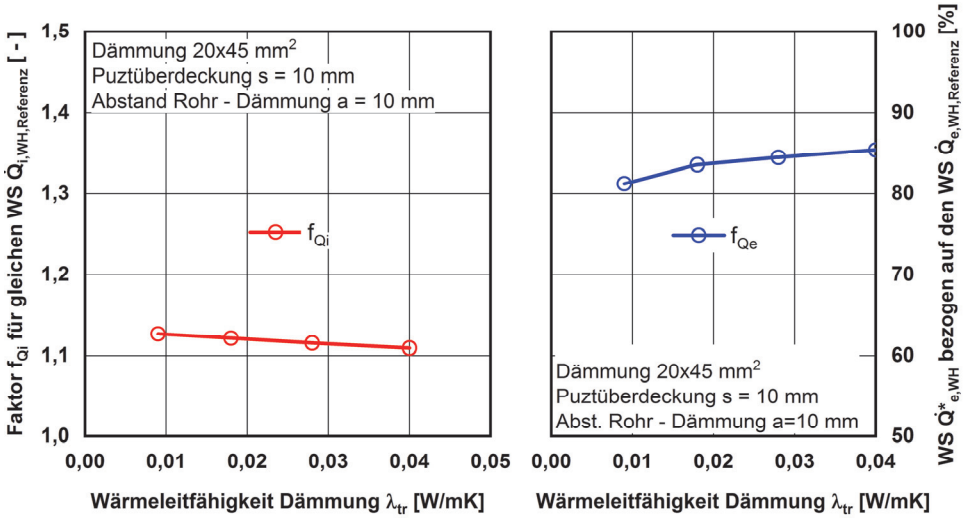


Bild 101: Verlauf des Faktors f_{Qi} für eine zur Referenz gleich hohen Wärmeabgabe nach innen in Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung (links). Im rechten Diagramm ist der Verlauf des mit f_{Qe} bezeichneten Verhältnisses der Wärmeströme nach außen $\dot{Q}^*_{e,WH}$ der Varianten zur Referenz bei gleich hohem Wärmestrom nach innen eingetragen. Das WS-Verhältnis f_{Qe} der Referenz entspricht 100 %.

In Bild 102 ist der Verlauf des Wärmeabgabeverhältnisses f_{WH} und des Wärmeverlustverhältnisses f^*_{Wand} dargestellt. Die Werte der gedämmten Varianten sind günstiger im Vergleich zur Referenz ohne Wärmedämmung. Der Einfluss der Wärmeleitfähigkeit ist auch hier eher gering.

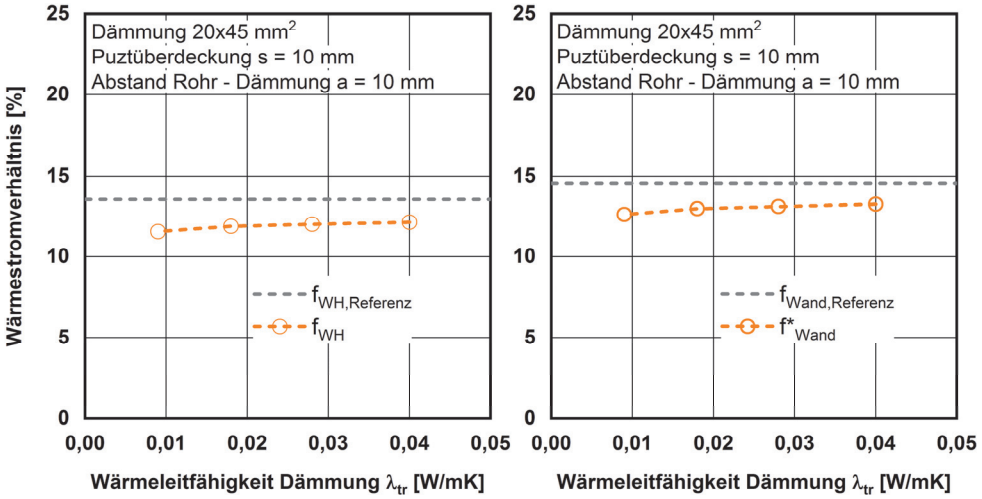


Bild 102: Verlauf des Wärmeabgabeverhältnis f_{WH} (linkes Diagramm) und bezogenen Wärmestromverhältnis f^*_{Wand} (rechtes Diagramm) in Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung. Die Wärmestromverhältnisse der gedämmten Varianten sind mit geringeren Werten günstiger im Vergleich zur Referenz.

Die Anordnung eines Dämmstoffstreifens hinter der Heizleitung wirkt sich senkend auf die Wärmeabgabe aus. Dabei wird zur gleichen Wärmeabgabe wie ohne Dämmung eine längere Heizleitung erforderlich. Insgesamt senkt eine Wärmedämmung den direkten Wärmeverlust

nach außen, auch bei längerer Heizleitung mit gleicher Wärmeabgabe nach innen wie die Temperierung ohne Wärmedämmung. Die zusätzlichen Leitungslängen müssen jedoch auch realisiert werden können. Zudem erhöht sich der Aufwand beim Einbau einer Wärmedämmung. Die Wärmeleitfähigkeit des Dämmstoffs hat dabei eine geringere Auswirkung als die bauliche Anordnung des Dämmstoffs bzw. Heizrohrs. Die Einbausituation in der Feldstudie Aldersbach entspricht in etwa der Anordnung der Wärmedämmung und Heizrohr der Parameteruntersuchung der Wärmeleitfähigkeit mit einem λ von ca. 0,04 W/mK.

4.5.4 Vergleich der Berechnung der Wärmeabgabe mit WUFI® 2D und Berechnung nach Elgeti

Bei der Berechnung der Wärmeabgabe in Abhängigkeit der Rohrtemperatur sind die Gesamtwärmeströme $\dot{Q}_{WH}$ bei der Berechnung nach Elgeti im Vergleich zu WUFI® mit hygrothermischer Berechnung und quadratischer Rohrmodellierung bei einer Übertemperatur von 40 K um ca. 1,9 W/m höher, siehe Bild 103.

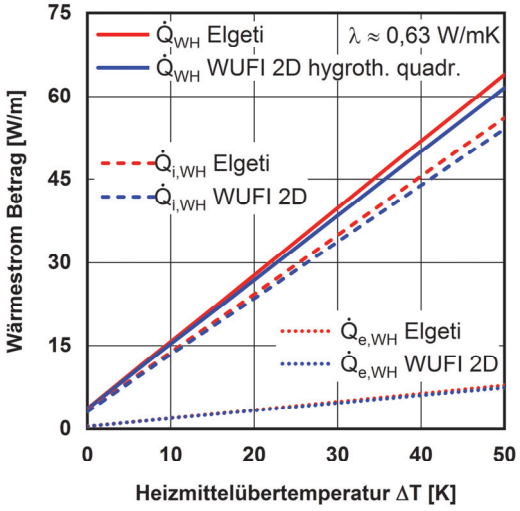


Bild 103:
Mit WUFI® 2D und nach Elgeti berechnete Wärmeabgabe der unter Putz verlegten Temperierung in Abhängigkeit der Übertemperatur des Heizrohrs. Die Berechnung nach Elgeti ergibt geringfügig höhere Werte bei annähernd gleichen Randbedingungen.

In Bild 104 links sind die berechneten Wärmeströme in Abhängigkeit der Mauerwerksdicke und damit einhergehend unterschiedlicher U-Werte (Wärmedurchgangskoeffizient) bei einer Übertemperatur von 40 K abgebildet. Die mit WUFI® und Elgeti berechneten Wärmeabgaben verlaufen gleichförmig mit nahezu gleichem Abstand zueinander.

In Bild 104 rechts sind die Wärmeströme in Abhängigkeit des Abstandes des Heizrohrs zur Wandoberfläche abgebildet. Die Berechnung nach Elgeti ergibt eine lineare Abhängigkeit zum Abstand, während WUFI® eine nicht lineare Abhängigkeit berechnet. Die Wärmeströme unterscheiden sich entsprechend um bis zu ca. 1,9 W/m, je nach Abstand des Rohres zur Wandoberfläche. Wie aus dem Diagramm ersichtlich, ist bei den gewählten Standardbedingungen mit 5 mm Abstand zur Wandoberfläche die Wärmeabgabe nach Elgeti größer. Bei einem Abstand von 10 mm bis 15 mm sind die Wärmeabgaben in etwa gleich groß. Ab einem Abstand des Rohres von ca. 20 mm werden die berechneten Wärmeströme nach Elgeti kleiner gegenüber den berechneten Werten mit WUFI®.

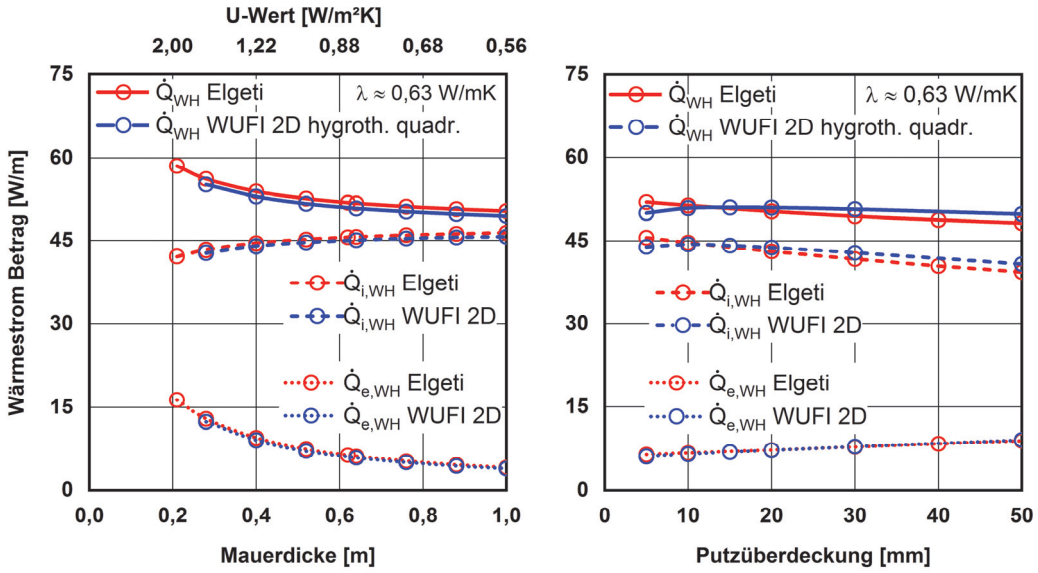


Bild 104: Links: Mit WUFI® 2D und nach Elgeti berechnete Wärmeabgabe der Temperierung in Abhängigkeit der Wanddicke. Beide Methoden liefern annähernd gleiche Ergebnisse für die Wärmestromanteil $Q_{i,WH}$ und $Q_{a,WH}$ für die unter Putz verlegte Temperierung.
Rechts: Vergleich berechnete Wärmeabgabe mit WUFI® 2D und nach Elgeti in Abhängigkeit Putzüberdeckung. Die Berechnung nach Elgeti verläuft im Gegensatz zur Berechnung mit WUFI linear und ergibt bei geringer Putzüberdeckung etwas höhere Werte und bei größerer Putzüberdeckung niedrigere Werte bei annähernd gleichen Randbedingungen.

Bei der rein thermischen Simulation mit quadratischer Rohrmodellierung wird bei der Standardwand ein um ca. 0,8 W/m höheres Ergebnis gegenüber der Berechnung nach Elgeti, bei ansonsten gleichen Randbedingungen (α_{HL} 1000 W/m²K), erreicht. Bild 105 zeigt die berechneten Wärmeströme in Abhängigkeit des Kontakt- bzw. Wärmeübergangskoeffizienten α_{HL}. Bei niedrigeren Wärmeübergangskoeffizienten stellen sich größere Unterschiede um rund 3 W/m ein.

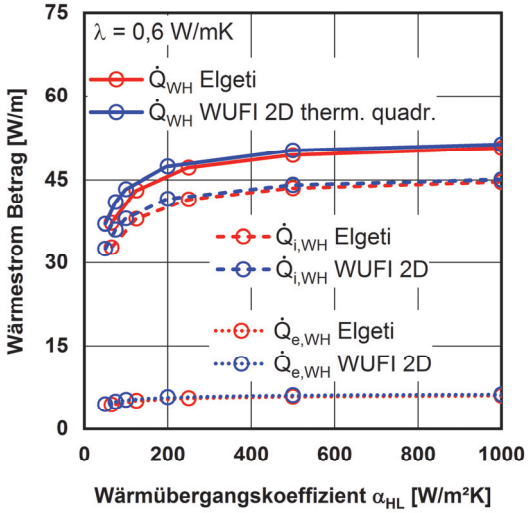


Bild 105: Mit WUFI® 2D und nach Elgeti berechnete Wärmeabgabe der unter Putz verlegten Temperierung in Abhängigkeit des Kontaktkoeffizienten. Die Wärmeabgabe nach Elgeti ist etwas niedriger im Vergleich zur in diesem Fall rein thermisch berechneten Wärmeabgabe mit WUFI.

Die Berechnungsergebnisse zwischen WUFI® und Elgeti ergeben geringe Unterschiede zueinander. Bei gleicher Putzüberdeckung und Anpassung des Wärmeübergangskoeffizienten α_{HL} können je nach Rohrmodellierung in WUFI® gleichwertige Ergebnisse mit nur marginalen Abweichungen zueinander hinsichtlich der Heizmittelübertemperatur und Mauerdicke (U-Werte) erwartet werden.

4.6 Instationärer Betrieb und Regelverhalten der Bauteiltemperierung

Der Fokus der Untersuchungen liegt bisher hauptsächlich auf dem eingeschwungenen stationären Verhalten der Temperierung. Bei einigen der untersuchten Temperieranlagen wurde aber ein intensives Regelverhalten festgestellt. Das bei Großeschmidt [Großeschmidt 1992] vorgesehene Heizverhalten sollte möglichst träge mit geringen Schwankungen der Heizleistung erfolgen. Hierzu reicht eine einfache Regelungstechnik aus, wie z.B. in der Fallstudie Ingolstadt dargestellt. Neue Heizungsanlagen, wie z.B. in der Fallstudie Bad Reichenhall oder im Messraum in Benediktbeuern eingesetzt, nutzen aktuelle Mess,- Steuer- und Regelungstechnik (MSR) zur Regelung der Heizungsanlage, die bei diesen Beispielen ein ausgeprägtes Regelverhalten aufweisen. Durch den Einbau der Heizleitung in das Mauerwerk wird bei der Bauteiltemperierung die Wand mitbeheizt. Damit stellt sich folgende Frage: Wie wirkt sich die Masse der Wand durch den instationären Betrieb bei starkem Regeleingriff auf die Wärmeabgabe in den Raum aus?

Oberflächentemperaturen beeinflusst durch das Regelverhalten der Bauteiltemperierung im Messraum Benediktbeuern

Die Raumluft im Messraum in Benediktbeuern wurde für die Vergleichsmessung durch eine moderne MSR-Regelung auf 20 °C ±0,1 K geregelt. Die Regelung wurde durch einen MSR-Techniker eingestellt. Die Auswirkungen des Regelverhaltens auf die Oberflächentemperaturen, und damit auf die Wärmeabgabe in den Raum, wurde mit einer IR-Kamera in einer Thermographie-Sequenz aufgezeichnet. Bild 106 zeigt die Auswertung der Thermographie-Sequenz in einer 3-D Darstellung über einen Zeitraum von 24 Stunden zwischen 17. - 18. Januar 2018. Die Sequenz wurde im 5-Minuten Intervall aufgenommen. Aus jedem Thermogramm wurde an der gleichen Position die vertikale Temperaturinformation ausgewertet und im zeitlichen Verlauf als Falschfarben-Diagramm abgebildet. Die Wandhöhe reicht in der Darstellung vom Fußbodenniveau auf ca. 2,05 m Höhe. Die Temperierung wird mit der Sockelschleife und Brüstungsschleife betrieben.

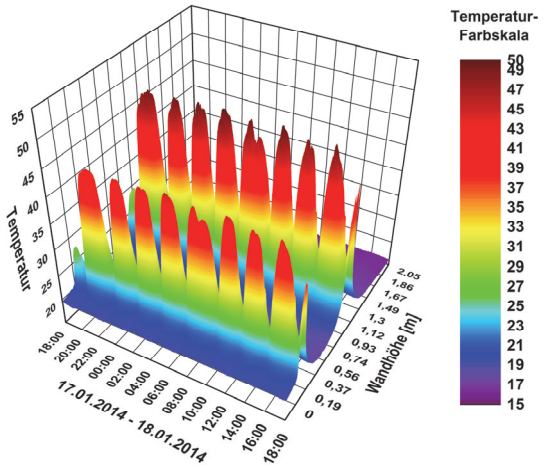


Bild 106: Auswertung der Thermographie-Serienaufnahme der Außenwand im Messraum mit Temperierung als 3-D Darstellung. Abgebildet ist die Temperaturinformation an einem geeigneten Vertikalschnitt im 5-Minuten Intervall. Die Heizleistung wird zur Regelung der Raumtemperatur jeweils nach ca. 2 - 3 Stunden runtergeregelt und nach ca. 0,5 - 1 Stunde wieder hochgeregelt. Die Temperaturen verlaufen auf Höhe der Heizleitung zwischen rund 29 °C und 47 °C.

Das Absenken der Heizleistung wirkt sich am stärksten auf das Temperaturniveau im unmittelbaren Bereich der Heizleitung aus. Die Heizleistung wird durch die Heizungsregelung jeweils nach ca. 2 - 3 Stunden runtergeregelt und nach ca. 0,5 - 1 Stunde wieder hochgeregelt. Dabei

reagiert die Oberflächentemperatur im unmittelbaren Bereich der Heizleitung sehr schnell. Bereits wenige Zentimeter ober- und unterhalb der Heizleitung stellen sich jedoch nur noch geringe Temperaturänderungen ein. Trotz diesem ungünstigen extremen Regelverhalten kann die Raumtemperatur auf den Zielwert genau gehalten werden.

Messung der Heizleistung der Temperierung im instationären Betrieb

Im stationären Zustand bestimmen u. a. die Randbedingungen, wie Raum- und Außentemperatur und die Wärmeübergangsbedingungen an der Bauteiloberfläche sowie die Wärmeleitfähigkeiten, den Wärmestrom. Die Wärmespeicherfähigkeit des Bauteils wirkt sich im stationären Zustand nicht auf die Wärmeabgabe der Heizleitung aus. Im instationären Betrieb der Temperierung erhöht sich die Wärmeabgabe kurzfristig erheblich, da das Mauerwerk mit aufgeheizt wird und zusätzlich zum Wärmestrom an die Umgebung Wärme aufnimmt. Für die messtechnische Feststellung der erhöhten Wärmeabgabe der Heizleitung in situ, infolge der Aufheizung des Mauerwerks bis zum eingeschwungenen Zustandes, werden die zum Teil mehrjährigen Messreihen der Fallstudien auf geeignete Zeitabschnitte ausgewertet. Geeignet sind Perioden bei denen die Heizleistung abgeschaltet und nach längerer Zeit (einige Tage) wieder in Betrieb genommen wird. Das kurzzeitige stark schwingende Anfangsverhalten infolge der Trägheit der Heizungsanlage wird dabei nicht näher betrachtet. Die Auswertung der im 1-Minuten-Intervall erfassten Messwerte erfolgt als stündlicher Mittelwert.

Im Messraum in Benediktbeuern konnte ein Zeitabschnitt mit Ausfall der Heizungsanlage festgestellt werden. Bild 107 zeigt die Wärmeabgabe der Temperierung im Messraum in Benediktbeuern nach einem Heizungsausfall von 44 Stunden am 19. November 2014. Die Wiederinbetriebnahme nach einem längeren Heizungsausfall stellt einen geeigneten Zeitraum für die Untersuchung der Wärmeabgabe der Temperierung im Aufheizfall dar. Die Raumtemperatur sank dabei von rund 20 °C auf knapp unter 17 °C. Nach Wiederinbetriebnahme der Heizung am 21.11.2014 beträgt die von der Temperierung abgegebene Spitzenleistung rund 40 W/m für einen Stundenmittelwert. Nach 22 Stunden Beheizung bei einer nahezu konstanten mittleren Übertemperatur der Heizleitung von rund 30 K stellt sich eine quasi stationäre Wärmeabgabe von knapp 27 W/m ein und entspricht damit der festgestellten stationären Wärmeabgabe (siehe Kapitel 4.2.4 „Messung der Wärmeabgabe in der Alten Schäfflerei in Benediktbeuern - Einzelmessungen“). Die Raumtemperatur stieg dabei wieder langsam an und erreichte nach rund 6 Tagen wieder rund 20 °C.

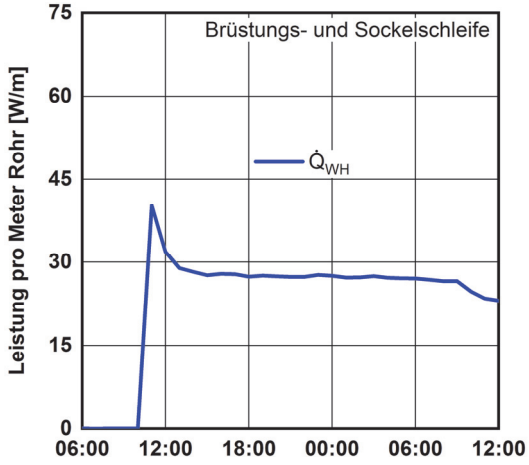


Bild 107: Wärmeabgabe der Temperierung im Messraum in Benediktbeuern nach einem Heizungsausfall von 44 Stunden. Die Raumtemperatur sank dabei von rund 20 °C auf knapp unter 17 °C. Nach erneuter Inbetriebnahme erreicht die Spitzenleistung rund 40 W/m im Stundenmittelwert. Nach 22 Stunden Beheizung bei einer nahezu konstanten mittleren Übertemperatur der Heizleitung von rund 30 K stellt sich eine quasi stationäre Wärmeabgabe von knapp 27 W/m ein.

Bei der Fallstudie Bad Reichenhall liegen im Frühjahr 2015 mehrere Zeitabschnitte vor, bei denen die untersuchte Heizschleife durch die Regelung mehrfach abgeschaltet und nach einiger Zeit wieder mit der ursprünglichen Vorlauftemperatur und Durchflussmenge angestellt wird. In Bild 108 ist der Verlauf der Heizleistung im Obergeschoss abgebildet. Die Heizleitung ist als „große Schleife“ verlegt. Zusätzlich ist die mittlere Übertemperatur des Heizwassers und der Durchfluss mit eingetragen. Die Regelung der Wärmeabgabe erfolgt in dem abgebildeten Zeitabschnitt über die Durchflussmenge. Trotz neu installierter Regelungstechnik wird die Temperierung augenscheinlich mit Zwei-Punkt Regelung (An / Aus) betrieben. Durch das An- und Abschalten des Durchflusses kann die kurzfristige Spitzenwärmeabgabe beobachtet werden. Die Heizmitteltemperatur bleibt über den Zeitraum in etwa gleich hoch. Die von der Temperierung abgebgeben Spitzenleistung beträgt nach einer Regelungsunterbrechung von rund einem Tag oder länger zwischen 58 W/m und 64 W/m für einen Stundenmittelwert. Bei einer kürzeren Regelungsunterbrechung von 5 Stunden bzw. 13 Stunden zwischen 8. und 10. April fällt die maximale Wärmeabgabe geringer aus. Die Spitzenleistung wird auch bei dieser Anlage nur für 1 Stunde abgegeben, um danach deutlich abzusinken. Die Wärmeabgabe des Heizrohrs im eingeschwungenen Zustand wird nach ca. einem Tag erreicht (siehe auch Anhang A „Feldstudien mit Messung der Wärmeabgabe der Temperierung“).

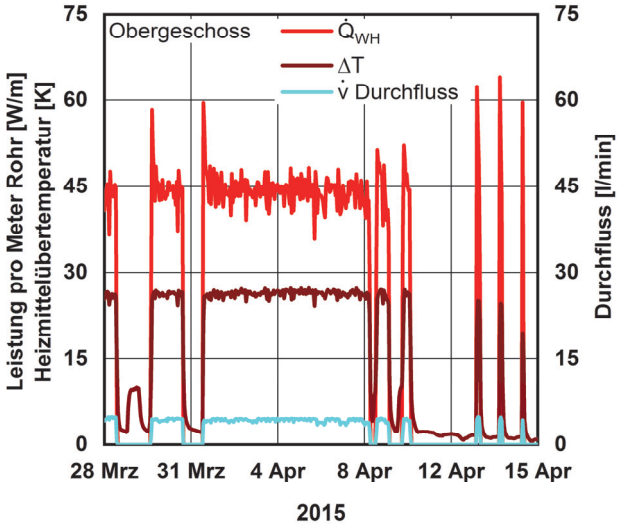


Bild 108: Wärmeabgabe der Temperierung im Stadtmuseum mit zeitweiser Beheizung. Durch die Regelung wird der Durchfluss abgestellt und wieder in Betrieb genommen, bei in etwa gleicher Durchflussmenge und Temperatur des Heizmittels. Die von der Temperierung abgegebene Spitzenleistung beträgt zwischen 58 W/m und 64 W/m Rohr für einen Stundenmittelwert. Der eingeschwungene Zustand wird nach ca. 24 h erreicht.

Simulation der Heizleistung der Temperierung im instationären Betrieb

In der Simulation kann der Einfluss einer Regelungsunterbrechung genauer, frei von schwankenden Randbedingungen, untersucht werden. Verwendet wird die Standardwand der Parameterstudie mit den dort gewählten Standardrandbedingungen mit Berechnung in Stundenschritten. Lediglich der Wärmeübergang α_{HL} vom Heizmittel an die Wand wird mit 75 W/m²K für eine rein thermische Berechnung mit quadratisch modelliertem Heizrohr gewählt. Nach dem Einschwingen der Wand für 1000 Stunden ohne Temperierung wird für ebenfalls 1000 Stunden das Heizrohr mit 60 °C beheizt. Es erfolgen danach Heizunterbrechungen mit unterschiedlicher Dauer: 24 h, 12 h, 6 h, 4 h, und mehrfach 2 h. Die Heizunterbrechung erfolgt softwarebedingt mit einer Vorgabe der anliegenden Heiztemperatur von 20 °C.

Zu der bisherigen Auswertung der Wärmeströme an den Wandoberflächen werden die Wärmeströme der Gesamtwärmeabgabe zusätzlich aus der Simulation direkt am Rohr ermittelt und

mit $\dot{Q}^*_{WH}$ bezeichnet. $\dot{Q}_{WH}$ und die Wärmestromanteile hingegen werden entsprechend der Wärmestromanalyse (Kapitel 4.5.2 „Stationäre Wärmestromanalyse mit 2D Simulation“) über die Auswertung der Wärmeströme an der Bauteiloberfläche ausgewertet. Beide Gesamtwärmeströme sind im eingeschwungenen Zustand gleich groß. Im instationären Regelbetrieb unterscheiden sie sich jedoch deutlich durch die Wirkung der Wärmespeicherfähigkeit der Wand.

In Bild 109 sind zwei Gesamtleistungen $\dot{Q}^*_{WH}$ (am Rohr ermittelt) und $\dot{Q}_{WH}$ (an den Bauteiloberflächen ermittelt) sowie die Wärmestromanteile $\dot{Q}_{i,WH}$ und $\dot{Q}_{e,WH}$ abgebildet. Die maximale Wärmeabgabe $\dot{Q}^*_{WH}$ beträgt bei der erstmaligen Beheizung der Wand knapp 57 W/m im Vergleich zu rund 41 W/m im eingeschwungenen Zustand. Bei einer Heizunterbrechung von 24 Stunden ist die stündliche Spitzenleistung mit 56,3 W/m um 0,7 W/m niedriger. Nach 12 Stunden Heizunterbrechung beträgt die Differenz 1,1 W/m zur Maximalleistung. Bei einer Heizunterbrechung von 2 Stunden werden als Spitzenleistung für eine Stunde rund 53 W/m erreicht. Zum Erreichen des praktisch eingeschwungenen Zustandes wird die Dauer ermittelt, bis die Abweichung zum stationären Zustand kleiner 1 % beträgt. Der Übergang von der kurzfristigen maximalen Heizleistung des Heizrohres bis zum praktisch eingeschwungenen Zustand dauert für das gewählte Beispiel ca. 31 h. Die Wärmeabgabe ist gemäß Simulation zu diesem Zeitpunkt nur noch um 0,41 W/m (< 1 %) höher im Vergleich zum eingeschwungenen Zustand. Weiter wird aus der Simulation ersichtlich, dass nach dem Abschalten der Heizung bzw. durch den Temperatursprung der Heiztemperatur auf 20 °C kurzfristig von der Heizleitung Wärme aufgenommen wird (negative Werte des Wärmestroms $\dot{Q}^*_{WH}$). Im eingeschwungenen Zustand (bei Zeitschritt 2000) wird bei einer Heiztemperatur von 20 °C ein Wärmestrom $\dot{Q}_{WH}$ von rund 2,9 W/m abgegeben.

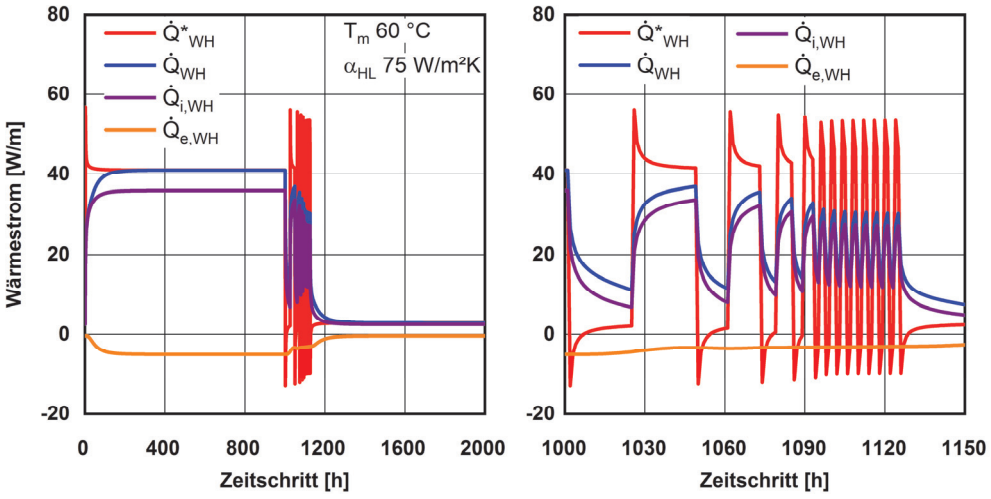


Bild 109: Berechneter Verlauf der Wärmeströme anhand der in der Parameterstudie verwendeten Standardwand. Die Wärmeabgabe $\dot{Q}^*_{WH}$ wird in der Simulation direkt am modellierten Heizrohr ermittelt. $\dot{Q}_{WH}$ hingegen wird über die Wärmeströme an den Bauteiloberflächen berechnet. Im eingeschwungenen Zustand sind beide Wärmeströme gleich groß. Im rechten Diagramm ist der Zeitbereich mit kurzem Regelintervall zeitlich höher aufgelöst abgebildet.

Die Auswertung der Wärmeströme an der Bauteiloberfläche ergibt ein deutlich verzögertes Verhalten in der Wärmeabgabe des Bauteils. Der Einschwingvorgang dauert erheblich länger an. Die Wärmespeicherfähigkeit der Wand verzögert die Wärmeabgabe über die Bauteiloberfläche. Nach 160 Stunden werden gemäß Simulation 99 % der stationären Wärmeabgabe an den Wandoberflächen nach dem ersten Beheizen mit Temperierung erreicht. Nach dem Einschwingen in den stationären Zustand beginnen die Heizunterbrechungen. Nach 24 Stunden Heizunterbrechung und Wiederbeheizung für 24 Stunden beträgt die maximale Wärmeabgabe über die Bauteiloberflächen rund 37 W/m und ist damit um 4 W/m niedriger im Vergleich zur

stationären Wärmeabgabe im eingeschwungenen Zustand. Mit kürzer werdendem Regelintervall sinkt die maximale Wärmeabgabe an den Oberflächen. Gleichzeitig geben die Bauteiloberflächen nach Abschalten der Heizung noch erheblich Wärme ab. Die mittlere Heizleistung über die Bauteiloberflächen $\dot{Q}_{WH}$ entspricht dabei in etwa der am Heizrohr ermittelten Heizleistung $\dot{Q}^*_{WH}$. Bei einem zweistündigen Regelungsintervall wird die Heizzeit im Vergleich zum durchgängigen Heizbetrieb halbiert. Die mittlere Heizleistung liegt dabei mit rund 22,6 W/m etwas über der halben Heizleistung von rund 41 W/m im stationären Dauerbetrieb.

Entsprechend den Messungen der Heizschleifen im realen Betrieb ergeben sich im Vergleich zur Wärmeabgabe im stationären Betrieb kurzfristige, um ca. 33 % bis 45 % deutlich höhere Wärmeabgaben als stündlicher Spitzenwert. Im Vergleich dazu ist die kurzfristige Spitzenwärmeabgabe gemäß Simulation um rund 39 % höher zur stationären Wärmeabgabe, siehe Tabelle 20. Da die kurzfristige Spitzenwärmeabgabe die Wand erwärmt, wird die Wärmeenergie durch das höhere Temperaturniveau in der Wand gespeichert. Nach Abschalten oder Verringern der Heizleistung wird die gespeicherte Energie wieder an die Umgebung und zum Teil auch an das Heizmittel abgegeben. Nachfolgend werden daher die Auswirkungen eines Intervallbetriebes der Temperierung und der Wärmespeichervorgänge auf das Wärmeabgabeverhältnis eingehender untersucht.

Tabelle 20: Messwerte und berechnete Werte der maximalen Wärmeabgabe sowie nach längerer Einschwingphase im stündlichen Mittel. Die Differenz der maximalen Wärmeabgabe zur stationären Wärmeabgabe in Prozent ist auf die stationäre Wärmeabgabe bezogen.

Fallstudie	Heizschleife	Maximale Leistung [W/m Rohr]	stationäre Leistung [W/m Rohr]	Differenz Max - stat. [%]	ΔT eingeschwungen [K]
Benediktbeuern	Brüstungs- und Sockelschleife	40	27	48	30
Bad Reichenhall	Große Schleife	(58)…64	44	45	26
Simulation	1 Heizrohr	57	41	39	40

Wärmespeichervermögen des Bauteils und Wärmeabgabeverhältnis f_{WH} im instationären Betrieb der Temperierung

Da die Wärmeenergie ausgehend vom Heizrohr über die Wand abgegeben wird, beeinflusst das Wärmespeichervermögen der Wand im instationären Betrieb der Temperierung auch das Wärmeabgabeverhältnis f_{WH}. Die Inbetriebnahme der Temperierung führt zunächst zu einer Anhebung des Temperaturniveaus des beheizten Bauteils bei gleichen Innen- und Außentemperaturen. Nach dem Abschalten der Temperierung sinkt die mittlere Bauteiltemperatur wieder ab. Die in das Bauteil eingespeicherte und wieder abgegeben Wärmeenergie kann über die mittlere Bauteiltemperatur berechnet werden. Aus der mittleren Temperaturdifferenz des Bauteils mit Beheizung durch die Temperierung und ohne Temperierung wird die Differenz der gespeicherten Wärmeenergie im Bauteil ermittelt. Das Wärmespeichervermögen bzw. die Differenz des Wärmeenergieinhalts der Außenwand kann über die Temperaturdifferenz des Bauteils nach [Herwig 2000] berechnet werden (Gl. 36).

(Gl. 36) $$\Delta \boldsymbol{Q} = \boldsymbol{m} * \boldsymbol{c} * \Delta \bar{\boldsymbol{\theta}} \quad [\mathrm{J}]$$

ΔQ	[J]	Differenz Energieinhalt
m	[kg]	Masse Bauteil (Außenwand)
c	[J/(kg*K)]	spezifische Wärmekapazität
$\Delta\bar{\theta}$	[K]	Differenz der mittleren Bauteiltemperatur

In Bild 110 ist die Differenz des Energieinhalts der betrachteten Standardwand (jedoch mit 5 m Wandhöhe) ausgehend vom quasi unbeheizten Zustand mit 20 °C Heiztemperatur anhand des Regelungsbeispiels abgebildet. Das Wärmeabgabeverhältnis des Regelungsbeispiels ist in Bild 111 dargestellt. Nach Inbetriebnahme der Temperierung wird über die Temperaturanhebung Wärmeenergie durch die Wand aufgenommen, bis der eingeschwungene Zustand erreicht ist. In dieser Phase sinkt das Wärmeabgabeverhältnis zunächst ab, steigt dann an und schwingt auf einen konstanten Wert von rund 14 % ein. Erfolgt über die Regelung eine Abschaltung der Heizung bzw. sprunghafte Reduzierung der Heiztemperatur auf 20 °C, steigt das Wärmestromverhältnis der Wärmeabgabe f_{WH} stark an und sinkt mit erneuter Heiztätigkeit mit einer Heiztemperatur von 60 °C wieder ab. Im weiteren Betrieb der Temperierung mit 20 °C (Raumtemperatur) stellt sich im eingeschwungenen Zustand wieder das ursprüngliche Energieniveau mit einem geringen konstanten Wärmestrom mit konstantem Wärmeabgabeverhältnis ein.

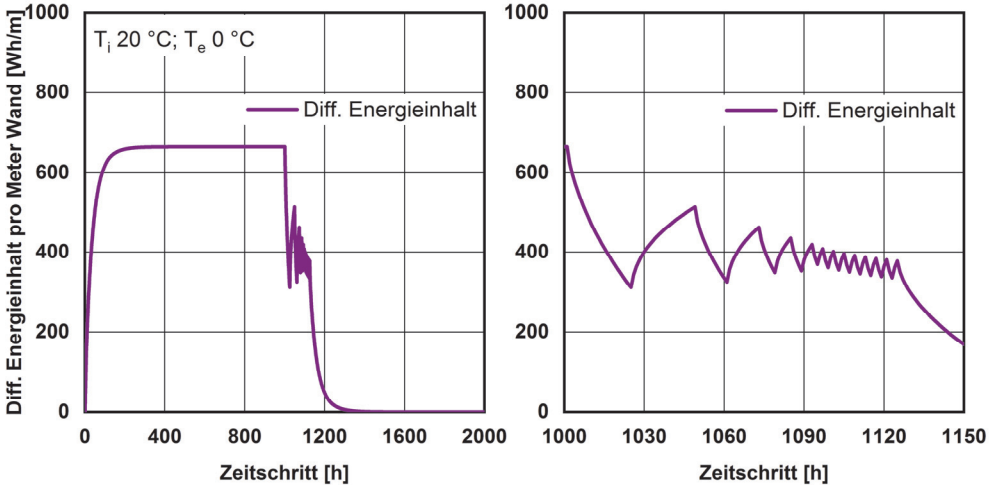


Bild 110: Differenz des Energieinhaltes der Außenwand mit Beheizung durch die Temperierung zur Wand ohne Temperierung. Durch die Beheizung mit der Temperierung erhöht sich die Durchschnittstemperatur in der Wand und damit die gespeicherte Wärmeenergie. Im rechten Diagramm ist der Zeitbereich mit kurzem Regelintervall zeitlich höher aufgelöst abgebildet.

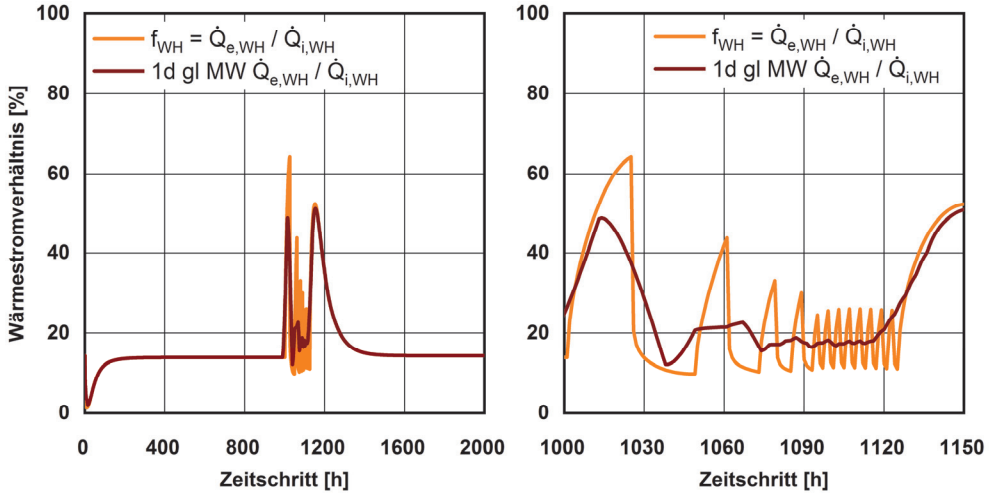


Bild 111: Berechneter Verlauf des Wärmeabgabeverhältnisses f_{WH}. Das Wärmeabgabeverhältnis variiert mit den Regelzyklen. Im rechten Diagramm ist der Zeitbereich mit kurzem Regelintervall zeitlich höher aufgelöst abgebildet.

Erfolgt ein regelungsbedingtes Heizen in Intervallen (ab Zeitschritt 1000) sinkt die mittlere Bauteiltemperatur. Es wird ein Teil der eingespeicherten Wärmeenergie vom Bauteil abgegeben. Dadurch stellen sich etwas höhere Wärmeabgabeverhältnisse ein. Zwischen den Zeitschritten 1090 und 1120 stellt sich ein mittleres Wärmeabgabeverhältnis von rund 17,5 % ein. Werden die stündlich berechneten Wärmeabgabeverhältnisse über den gesamten Zeitraum gemittelt

ergibt sich ein mittleres Wärmeabgabeverhältnis von rund 16 %. Bilanziert man die Wärmeströme an den Bauteiloberflächen über den kompletten Zeitraum vom Zeitschritt 0 bis 2000, erhält man die Summen der Wärmestromanteile $\dot{Q}_{e,WH}$ und $\dot{Q}_{i,WH}$. Bildet man nun das Wärmestromverhältnis aus den kumulierten Wärmestromanteilen, ergibt sich wieder der Wert des Wärmestromverhältnisses im eingeschwungenen Zustand (Bild 112), da die Wärmeenergie im Bauteil während des gesamten Zeitraums eingespeichert und wieder komplett abgegeben wurde. Die eingespeicherte Wärme wirkt sich bei der rein thermischen Betrachtung mit linearen Abhängigkeiten letztendlich nicht auf das Wärmeabgabeverhältnis aus. Die in Bild 111 (rechtes Diagramm) beobachtete Erhöhung des Wärmeabgabeverhältnisses ist somit letztlich in einem geringfügig höherem Temperatur- / Energieniveau in diesem Betrachtungszeitraum gegenüber dem Anfang begründet.

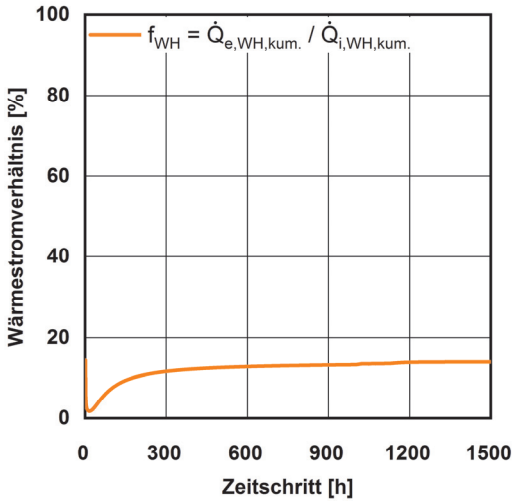


Bild 112: Wärmeabgabeverhältnis f_{WH}, berechnet aus den kumulierten Wärmeströmen $\dot{Q}_{e,WH,kum.}$ und $\dot{Q}_{i,WH,kum.}$. Am Ende des Betrachtungszeitraumes stellt sich bei gleichem Temperatur- / Energieniveau wie am Anfang das im eingeschwungenen Zustand ermittelte Wärmeabgabeverhältnis von rund 14 % ein.

4.7 Modellentwicklung und Anpassung der Berechnung der unter Putz verlegten Temperierung (Bauteiltemperierung)

Der Vergleich der gemessenen Wärmeabgabe mit der aus der Bauteilsimulation ermittelten Wärmeabgabe pro Meter Heizrohr ergibt zunächst einen zu hohen berechneten Wärmestrom, trotz einer realitätsnahen Abbildung der Randbedingungen. Die Parameter mit dem größten Einfluss auf die Wärmeabgabe sind neben der Heizmitteltemperatur die Wärmeleitfähigkeit bzw. Wärmedurchlasswiderstand der Außenwand und der Wärmeübergang vom Heizmittel an das Mauerwerk. Der Wärmedurchlasswiderstand wurde messtechnisch erfasst und entsprechend realitätsnah in der Berechnung abgebildet. Es folgt die Überprüfung des Wärmeübergangswiderstandes vom Heizmittel an das Mauerwerk. Die Wärmeübertragung wird in Wärmeübergang vom Heizmittel an die Rohrwand (Wärmeübergangskoeffizient) und in Wärmeübergang vom Heizrohr an das Mauerwerk (Kontaktkoeffizient) unterschieden. Es werden die realitätsnahen hydraulischen und bautechnischen Gegebenheiten der Feldstudien auf mögliche Größenordnungen des Einflusses auf die Wärmeübertragung sowie der Einfluss der Rohrmodellierung in der Bauteilsimulation untersucht.

Durch iterative Anpassung kann die Größe des Kontaktkoeffizienten bzw. Gesamt-Wärmeübergangskoeffizienten ermittelt werden, bei dem die berechnete Wärmeabgabe der der gemessene Wärmeabgabe entspricht. Es wird hierzu die komplette Außenwand im Messraum der Alten Schäfflerei mit Temperierung modelliert, die Wärmeabgabe berechnet und mit den Messwerten verglichen. Dabei werden vier unterschiedliche Heizschleifenanordnungen untersucht. Aus dem so verringertem Wärmestrom vom Heizmittel an die Wand folgt eine Verringerung der maximalen Oberflächentemperatur an der Wandoberfläche. Es liegt damit eine höhere Temperaturdifferenz zwischen maximaler Oberflächentemperatur und Heizmedientemperatur vor, die messtechnisch erfasst werden kann. Die berechneten Temperaturdifferenzen der Bauteilsimulation werden mit den messtechnisch erfassten Temperaturdifferenzen der Feldstudien verglichen. Damit sollte der Ansatz eines niedrigen Kontaktkoeffizienten und damit niedrigen Gesamtwärmeübergangskoeffizienten bestätigt werden können.

Es folgt eine Überprüfung des gewählten Ansatzes mit Berechnung der Bauteiltemperierung und Vergleich mit Messungen in zwei weiteren Feldstudien. Abschließend erfolgt die rechnerische Überprüfung des Ansatzes mit der Modellierung der Außenwand mit Temperierung im Messraum der Alten Schäfflerei. Hierzu werden anhand der gemessene instationären Klimarandbedingungen und Heizmitteltemperaturen die instationäre Wärmeabgabe berechnet und mit der im weitestgehend eingeschwungenen Zustand gemessenen Wärmeabgabe verglichen. Es werden die neu entwickelten Methoden zur Wärmestromanalyse und Ermittlung der Energieeffizienz unter Berücksichtigung der Wärmespeichereffekte des Mauerwerks berechnet. Die im Kapitel 4.3 „Messung der Energieeffizienz (Vergleichsmessung) der Bauteiltemperierung“ vorgestellte messtechnisch ermittelte Energieeffizienz der Temperierung im Messraum der Alten Schäfflerei wird neu bewertet.

4.7.1 Vergleich der Wärmeabgabe aus der Messung mit den Ergebnissen der Parameterstudie

Die abgebildete Wand in der Bauteilsimulation der Parameterstudie entspricht in etwa dem Regelquerschnitt der Wand im Messraum der Alten Schäfflerei. Die berechnete Wärmeabgabe zeigt im Vergleich zu den gemessenen Werten jedoch ein deutlich höheres Ergebnis. Es wird untersucht, welche Einflussgrößen als Ursache in Frage kommen.

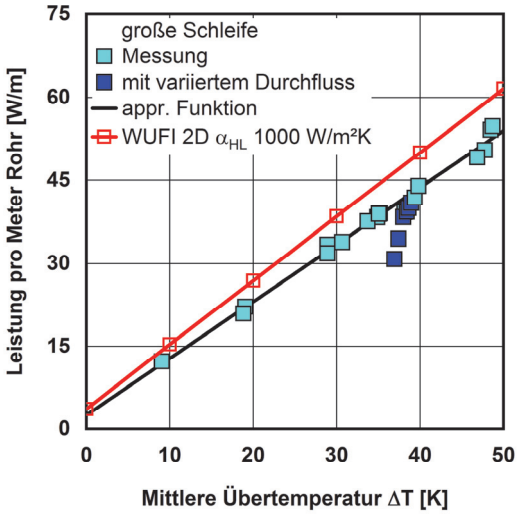


Bild 113: Vergleich der Messung der „große Schleife“ in der Alten Schäfflerei (HL3) mit der thermischer Simulation der Wand mit quadratischer Modellierung des Heizrohres bei in etwa gleichen Klimarandbedingungen. Die Berechnung überschätzt die gemessene Wärmeabgabe deutlich um ca. 14 %.

Bild 113 zeigt die Einzelmesswerte an der Temperierung in der Alten Schäfflerei im Betrieb der großen Schleife, siehe Kapitel „4.2.4 Messung der Wärmeabgabe in der Alten Schäfflerei in Benediktbeuern - Einzelmessungen“. Zusätzlich ist die berechnete Wärmeabgabe der Temperierung aus der Parameterstudie mit eingezeichnet. Die Berechnung wurde thermisch mit quadratischer Rohrmodellierung und einem Wärmeübergangskoeffizienten von 1000 W/m²K durchgeführt. Die berechnete Leistung der Temperierung wird bei einer Übertemperatur von 40 K mit rund 50,0 W/m im Vergleich zu den gemessenen 43,9 W/m deutlich, um 6,1 W/m, überschätzt.

Bedingt durch die bauliche Situation im Messraum ist im Bereich des Fensters eine Wandverjüngung von ca. 63 cm Wanddicke (Regelquerschnitt) auf ca. 43 cm Wanddicke (Fensternische) vorhanden. Entsprechend der Parameterstudie steigt die Gesamtwärmeabgabe des Heizrohrs um ca. 2,4 W/m pro Meter bei einer dünneren Wanddicke von ca. 43 cm an. Bei einem Anteil der Gesamtleitungslänge von ca. 3/10 in der Nische ist von einer um ca. 1 W/m höheren mittleren Wärmeabgabe der gesamten Heizleitung gegenüber der Heizleitung im Regelquerschnitt auszugehen. Der Wärmedurchlasswiderstand R beträgt auf Höhe 170 cm gemäß Messung 1,04 m²K/W und auf Höhe der Heizleitung 0,95 m²K/W, siehe Bild 114. Die Messungenauigkeit der Wärmeflussscheibe wird vom Hersteller mit ±5 % vom Messwert angegeben. Der aus der Simulation ermittelte Wärmedurchlasswiderstand R der Parameterstudie beträgt gemäß eingeschwungenem Zustand rund 0,99 m²K/W und ist damit geringfügig höher als die Messwerte auf Höhe der Heizleitung. Die Wärmeleitfähigkeit der Mauernische ist gemäß Messung [Bichlmair et al 2016n] sogar deutlich höher. Es wird daher von einer tendenziell etwas höheren Wärmeabgabe der Heizleitung im Messraum im Vergleich zur Standardwand ausgegangen. Die deutlich niedrigere gemessene Wärmeabgabe kann dadurch nicht erklärt werden.

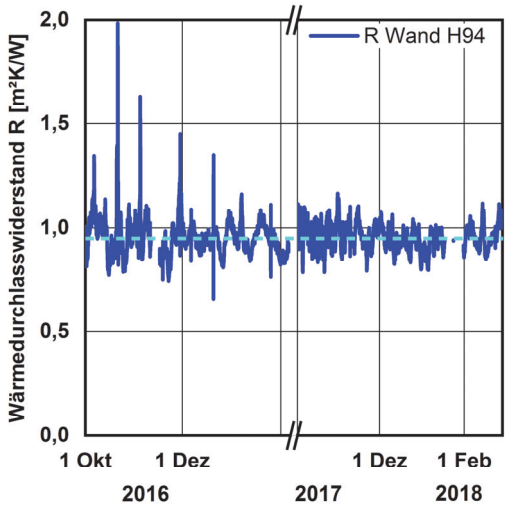


Bild 114: Messung des Wärmedurchlasswiderstandes an der Außenwand im Messraum in Benediktbeuern. Abgebildet sind die ausgewerteten Perioden vom 1.10.2016 bis 7.2.2017 und 1.10. 2017 bis 1.3.2018. Zusätzlich ist der ermittelte Mittelwert von 0,95 m²K/W als gestrichelte hellblaue Linie eingetragen.

Von den möglichen Parametern wurden mit hinreichender Genauigkeit die Temperatur Heizmittel, Raumtemperatur, Außentemperatur, Mauerdicke, Wärmedurchlasswiderstand (Messung), Putzüberdeckung und Rohrdurchmesser bestimmt und in der Simulation berücksichtigt. Ein Wärmeübergangskoeffizient zur Raumluft kleiner 8 W/m²K kann ausgeschlossen werden. Ein größerer Wärmeübergang würde die Wärmeabgabe der Temperierung weiter erhöhen. Somit verbleibt als möglicher Parameter zur Reduzierung der Wärmeabgabe der Wärmeübergangswiderstand vom Heizmittel zur Rohrwand bzw. Mauerwerk.

In der Parameterstudie wurde mit dem Parameter 7 der Wärmeübergangskoeffizient α_{HL} vom Heizmittel zur Wand variiert. Mit einem Wärmeübergangskoeffizient α_{HL} von 75 W/m²K entspricht die berechnete Wärmeabgabe des einzelnen Rohres der untersuchten Standardwand mit 43,1 W/m plus der abgeschätzten höheren Wärmeabgabe des Leitungsabschnittes in der Mauernische mit ca. 1 W/m in etwa der gemessenen Wärmeabgabe von 43,9 W/m bei einer Übertemperatur von 40 K. Die Berücksichtigung eines stark reduzierten Wärmeübergangskoeffizienten am Heizrohr ergibt damit eine gute Übereinstimmung mit der gemessenen Wärmeabgabe. Vor der detaillierten Modellierung der realen Bauteilgeometrie im Messraum mit angrenzendem Bodenbereich und Mauernische erfolgt eine genauere Betrachtung, inwieweit diese niedrigen Wärmeübergangskoeffizienten vom Heizmittel zum Mauerwerk begründbar sind.

4.7.2 Wärmeübertragung der Bauteiltemperierung: Vom Heizwasser an die Wand

Die Wärmeübertragung des Heizwassers erfolgt über das Heizrohr an die Wand. Dabei sind zwei Wärmeübergänge beschreibbar. Zum einen der Wärmeübergang vom Heizmittel (Fluid) an die Rohrinnenwand mit dem Wärmeübergangskoeffizienten (α_i), zum anderen von der Rohraußenwand an das Mauerwerk (Putz) mit dem Kontaktkoeffizienten (α_K). Der Wärmeübergang vom Fluid an das Rohr hängt bei den hier durchgeführten Untersuchungen vereinfacht betrachtet von der Durchflussgeschwindigkeit ab. Der Wärmeübergang vom Rohr an die Wand hängt von den Wärmeübergangsbedingungen zwischen den beiden unterschiedlichen Materialien ab. Beide Wärmeübergänge beeinflussen die Wärmeübertragung vom Fluid an die Wand.

Wärmeübergang des Heizwassers an die Rohrinnenwand (innere Wärmeübergang α_i)

Der innere Wärmeübergangskoeffizient α_i vom Heizmittel an die Rohrwand ist bei der hier angestellten vereinfachten Betrachtung abhängig von der Fließgeschwindigkeit des Heizmittels und von den temperaturabhängigen Stoffwerten des Heizmittels. Der Wärmeübergangswiderstand des Heizwassers wird in der Regel für Verteilleitungen nicht mit berücksichtigt. In [DIN EN 1264] wird zwischen turbulenter und laminarer Rohrströmung unterschieden, da sich zwischen diesen beiden Strömungsarten der Wärmübergang erheblich unterscheidet. Es wird vereinfachend für turbulente Rohrströmung ein Wert für α_i von 2.200 W/m²K angegeben und für laminarer Rohrströmung ein Wärmeübergangskoeffizient α_i von 200 W/m²K empfohlen, siehe [DIN EN 1264]. Für turbulente Rohrströmung werden zusätzliche Werte in Abhängigkeit vom Massedurchfluss zum Rohrinnendurchmesser angegeben. Für einen Rohrinnendurchmesser von 13 mm ergibt sich daraus ab 0,86 l/min eine turbulente Rohrströmung.

Bei den Berechnungen nach [Elgeti 1971] kann der innere Wärmeübergangswiderstand mit einbezogen werden. Meist wird dieser jedoch vernachlässigt wie z.B. in [VDI 2006] angeführt. Die Untersuchungen verschiedener Temperieranlagen in den Feldstudien ergaben für die Durchflussmengen der Temperierleitungen sehr unterschiedliche Werte. Die aus der Durchflussmenge und dem Rohrdurchmesser berechneten Durchflussgeschwindigkeiten reichen von 0,05 m/s bis 0,5 m/s (rund 0,4 - 4 l/min bei einem Rohrinnendurchmesser von 13 mm) im Regelbetrieb. Ob laminare oder turbulente Rohrströmung vorliegt, kann über die Berechnungen der Reynoldszahl Re festgestellt werden. Für den ermittelten Strömungsbereich ergibt sich für die unteren Durchflussmengen bzw. –geschwindigkeiten eine laminare Strömung, die dann ab der kritischen Reynoldszahl Re_{krit} (Re = 2300 [VDI 2006]) in turbulente Strömung übergeht. Für das Beispiel des Messraumes in der Alten Schäfflerei in Benediktbeuern werden für die dort festgestellten Durchflussmengen und den vorhandenen Durchmesser DN 15 der Heizleitung die möglichen Wärmeübergangszahlen α_i für zwei Fluid-Temperaturen (Heizmedientemperaturen) nach [VDI 2006, Schramek 2011] ermittelt, siehe Bild 115.

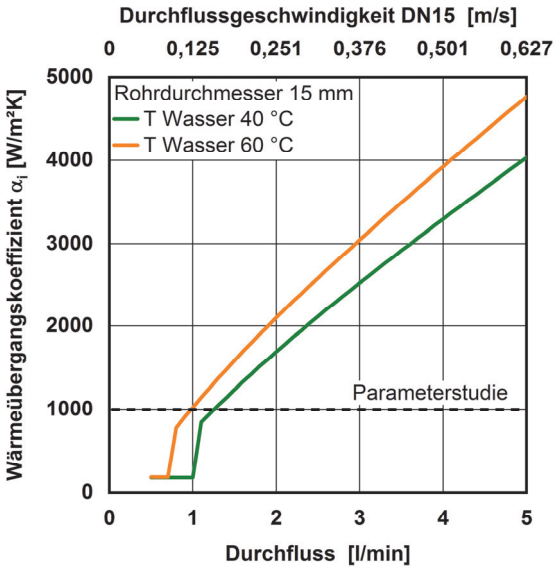


Bild 115: Wärmeübergangskoeffizienten des Heizwassers an die Rohrinnenwand in Abhängigkeit der Durchflussgeschwindigkeit bzw. der Durchflussmenge bei einem Innendurchmesser von 13 mm (DN 15).

Je nach Temperatur des Fluids (Heizmittel) stellen sich wegen der temperaturabhängigen Stoffkennwerte unterschiedliche Wärmeübergangskoeffizienten ein. Bis zu einer Durchflussmenge von ca. 1 l/min (entspricht ca. 0,12 m/s) und Fluidtemperaturen von unter 40 °C ergeben sich unterkritische Reynoldszahlen. Damit können sich laminare Strömungen im Heizrohr ausbilden und in Folge sehr geringe Wärmeübergangskoeffizienten von ca. 180 W/m²K auftreten. Bei den Einzelmessungen der Wärmeabgabe wurden bei einer Übertemperatur von ca. 40 K in der Regel Durchflussmengen von ca. 2,5 l/min festgestellt. Daraus errechnet sich ein Wärmeübergangskoeffizient α_i von ca. 2500 W/m²K, siehe Bild 115.

Die hier dargelegte vereinfachte Ermittlung der Wärmeübergangskoeffizienten dient der Einschätzung der Auswirkungen unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeiten auf die Wärmeübertragung. In realen Rohren ist der Übergang von laminarer Strömung zu turbulenter Strömung in i.d.R. nicht sprunghaft, sondern erfolgt in einem Übergangsbereich. Zudem können z.B. Rohrbögen, Rohrstöße oder Armaturen in den Rohrleitungen lokal unterschiedliche Strömungsgeschwindigkeiten bzw. Verwirbelungen verursachen, die wiederum zu lokal unterschiedlichen Wärmeübergangskoeffizienten α_i führen. Bei einer Heizungsregelung der Temperierung mit stark variierenden Durchflussmengen stellen sich entsprechend unterschiedliche Wärmeübergangskoeffizienten von laminar bis turbulent ein.

Der in der Parameterstudie gewählte Wärmeübergangskoeffizient für die betrachtete Standardwand liegt mit 1000 W/m²K im unteren Bereich der turbulenten Rohrströmung. Der Vergleich der Simulation mit den Messwerten lässt deshalb auf einen wesentlich niedrigeren Gesamtwärmeübergangskoeffizienten α_{HL} schließen als allein anhand der möglichen inneren Wärmeübergangskoeffizienten α_i durch unterschiedliche Rohrströmung erklärbar ist.

Wärmeübergang von der Rohraußenwand an das Mauerwerk (Kontaktkoeffizient α_K)

Die Wärmeübertragung erfolgt von der Heizrohrwand im Kontakt mit der Außenwand, da das Heizrohr mit Putzmörtel mit der Wand fest verbunden ist. Bei idealem Kontakt wird die Wärme durch Festkörperkontakt ohne Verringerung des Wärmestromes übertragen. Bei realem Kontakt reduziert sich der Wärmestrom jedoch, z.B. durch Oberflächenrauheiten (im Mikrometerbereich) und der Luft die zwischen den Kontaktflächen eingeschlossen ist [Herwig 2000]. Der Einfluss des Kontaktes des Rohres mit dem Putz kann auch mit dem Kehrwert des Kontaktwi-

derstandes, dem Kontaktkoeffizienten α_K beschrieben werden. In [Herwig 2000] werden verschiedene Werte für Kontaktwiderstände R_K genannt, die messtechnisch ermittelt wurden. Werte für den Kontakt von Metall mit Putzmörtel sind nicht mit angeführt. Ein sehr guter Kontakt hat einen entsprechend hohen Kontaktkoeffizienten α_K von z.B. >10.000 W/m²K, der thermische Kontaktwiderstand wird entsprechend klein. Ist zwischen den Kontaktflächen Luft eingeschlossen, kann sich durch die geringe Wärmeleitfähigkeit der Luft ein hoher Kontaktwiderstand R_K bzw. niedriger Kontaktkoeffizient α_K ausbilden. Der Kontaktwiderstand ist auch abhängig vom Anpressdruck. Bei hohem Anpressdruck verringert sich dieser.

Für das im Mauerwerk eingeputzte Heizrohr wird zusätzlich zu der im Mikrometerbereich unebenen Kontaktoberfläche des Putzes ein minimaler Luftspalt angenommen. Zum einem ergibt sich ein Luftspalt durch die thermische Dehnung des Rohres in radialer Richtung und zum anderen durch das Schwinden des Putzmörtels (im Bereich von hundertstel Millimeter). Die Ausdehnung des Rohres durch den Aufheizvorgang bewirkt eine geringe Vergrößerung des Rohrdurchmessers in radialer Richtung. Allerdings würden hohe Heiztemperaturen den Luftspalt durch die Rohrausdehnung wieder verkleinern. Die tatsächliche Kontaktfläche des Rohres mit dem Putz sowie die Fläche ohne direkten Kontakt und die mögliche Spaltbreite sind unbekannt. Bei thermischer Ausdehnung des Heizrohres in axialer Richtung entsteht eine Gleitbewegung zwischen Rohraußenwand und dem Putz. Es wird hier vermutet, dass dadurch der Kontakt verschlechtert wird und sich der thermische Kontaktwiderstand tendenziell erhöht. In der Skizze in Bild 116 sind die möglichen Ausdehnungen anhand der Temperieranlage am Fraunhofer-Zentrum in Benediktbeuern im horizontalen Schnitt durch die Außenwand veranschaulicht (schwarze Pfeile).

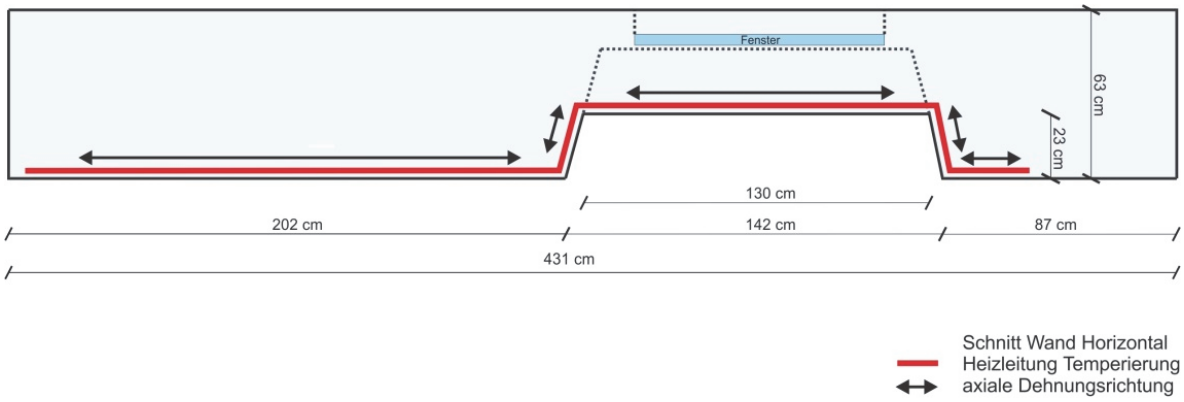


Bild 116: Skizze des horizontalen Mauerwerkschnittes mit möglicher axialen Dehnung des Heizrohres

Durch häufige Bögen in der Rohrleitung, z.B. bei einem Versatz wie in einer Fensternische, kann sich die axiale Rohrausdehnung auch auf die Spaltbreite im Putz, zumindest partiell, auswirken. Die Längenausdehnung von Kupfer beträgt ca. 1 mm pro Meter bei einer Temperaturdifferenz von ca. 60 K. Durch den Versatz des Heizrohrs in der Fensternische, z.B. um 0,2 m wird sich in diesem Abschnitt beim Aufheizen die Rohrlänge im Putz um ca. 0,2 mm vergrößern. Würde sich das ausdehnende Kupferrohr nur in eine Richtung in den Putz drücken, würde damit ein Luftspalt von ca. 0,2 mm entstehen. Bei einer Nischenbreite von 1,3 m dehnt sich das Rohr bei gleichen Randbedingungen axial um ca. 1,3 mm. Drückt sich das Rohr beidseitig gleichmäßig in den Putz entsteht beidseitig ein Spalt von etwa 0,6 mm. Da die erstmalige Aufheizung noch mit frischem nicht ausgehärtetem Putzmörtel erfolgt, ist eine Ausdehnung des Rohres ohne größeren Widerstand durch den Putz möglich. Die Ausdehnung des Rohres in den frischen Putzmörtel ist auch gewollt, um den erforderlich Ausdehnungsraum für das Heizrohr zu schaffen. Dieses Vorgehen beim Einbau soll spätere Putzschäden durch Rohrdehnungen vermeiden (z.B. [Großeschmidt 1992]). Bild 117 zeigt eine Detailskizze im vertikalen

Schnitt über den Rohrquerschnitt mit den möglichen Auswirkungen auf den sich ausbildenden Luftspalt bzw. Kontaktkoeffizienten.

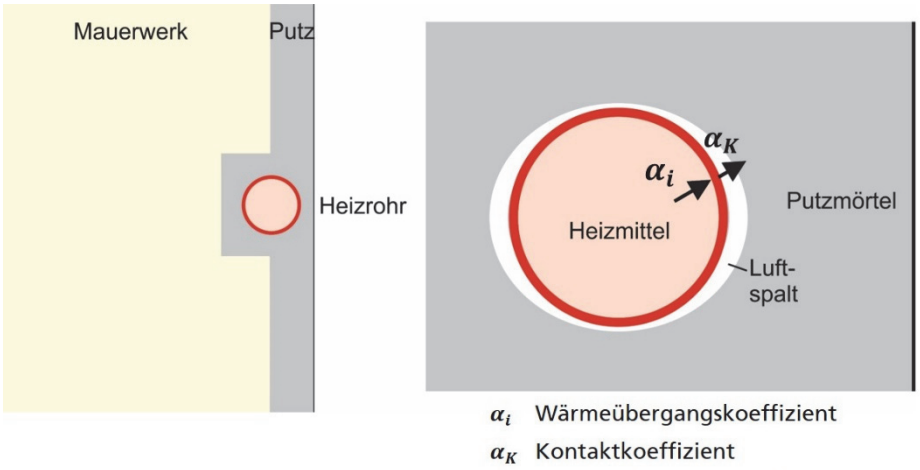


Bild 117: Detailskizze des unter Putz verlegten Heizrohrs im vertikalen Mauerwerkschnitt mit möglicher Luftspaltausbildung durch Rohrausdehnung und axiale Verschiebung in Folge eines Rohrversatzes. Wegen der baulichen Anordnung mit unterschiedlichen axialen Dehnungslängen und Richtungen der Rohre wird eine ungleichmäßige Spaltausbildung angenommen, die hier schematisch oval dargestellt ist.

Der sich einstellende Kontaktwiderstand oder Kontaktkoeffizient kann nicht direkt berechnet werden, da die Ausbildungen der Kontaktfläche und des möglichen Luftspaltes unbekannt sind. Die Auswirkung eines möglichen Kontaktwiderstandes kann jedoch über die Berechnung der Wärmeabgabe unter Variation des möglichen Kontaktkoeffizienten iterativ ermittelt werden, siehe Kapitel 4.5.3 „Parameterstudie mit 2D Simulation“.

Wärmeübergangskoeffizienten und Kontaktkoeffizienten in der rechnerischen Untersuchung

Die Auswirkungen des Kontaktkoeffizienten auf die Wärmeübertragung von einem eingeputzten Rohr auf die Außenwand werden rechnerisch untersucht. Die nachfolgende Formel erläutert die Ergänzung um einen Wärmwiderstand zwischen Rohraußenwand und Mauerwerk bzw. Putz in der Hilfsgröße C nach der Formel nach Elgeti [VDI 2006]. Der erste Term beschreibt den Wärmeübergangswiderstand zwischen Heizmittel und Rohrinnenwand, der zweite Term den Wärmeübergangswiderstand zwischen Rohr und Mauerwerk (Kontaktwiderstand), der dritte Term den Wärmewiderstand des Rohrs, der 4. Term beschreibt den Einfluss des Wandaufbaus, siehe (Gl. 37).

(Gl. 37)
$$C = \frac{2\lambda_m}{\alpha_i * d_{Ri}} + \frac{2\lambda_m}{\alpha_K * d} + \frac{\lambda_m}{\lambda_R} * \ln\left[\frac{d}{d_{Ri}}\right] + \ln\left[\frac{2\,\lambda_m}{d} * \left(\frac{1}{h_i} + \frac{s_1}{\lambda_1} + \frac{s_m}{\lambda_m} + \frac{s_2}{\lambda_2} + \frac{1}{h_e}\right)\right]$$

h_i	[W/m²K]	Wärmeübergangskoeffizient innen
h_e	[W/m²K]	Wärmeübergangskoeffizient außen
α_i	[W/m²K]	Wärmeübergangskoeffizient Heizmittel zur Rohrinnenwand
α_K	[W/m²K]	Kontaktkoeffizient zwischen Heizrohr und Mauerwerk
s_1	[m]	Dicke Putz innen
s_2	[m]	Dicke Putz außen
s_m	[m]	Dicke Mauerwerk
λ_1	[W/mK]	Wärmeleitfähigkeit Putz innen
λ_2	[W/mK]	Wärmeleitfähigkeit Putz außen

λ_m	[W/mK]	Wärmeleitfähigkeit Mauerwerk
λ_R	[W/mK]	Wärmeleitfähigkeit Mauerwerk
a_1	[m]	Abstand Rohrachse zur Mauerwerkskante innen
d_{is}	[m]	Durchmesser Rohrdämmung
d	[m]	Durchmesser Rohr außen
d_{Ri}	[m]	Durchmesser Rohr innen

Zum Vergleich werden mit WUFI® 2D ebenfalls die Auswirkungen des Kontaktkoeffizienten auf die Wärmeabgabe des Heizrohres untersucht bzw. die in der Parameterstudie berechneten Werte zum Vergleich verwendet. In der Software WUFI® 2D kann jedoch nicht in Wärmeübergangskoeffizient und Kontaktkoeffizient unterschieden werden. Deshalb wird die rechnerische Untersuchung mit einem Gesamt-Wärmeübergangskoeffizienten α_{HL} durchgeführt, indem der innere Wärmeübergangskoeffizient α_i und Kontaktkoeffizient α_K berücksichtigt werden. Der Wärmewiderstand des Heizrohres bzw. die radialsymmetrische Geometrie des Rohres werden hierbei vernachlässigt. Die Berechnung erfolgt vereinfacht, entsprechend der Addition von thermischen Widerständen, bzw. der Kehrwerte der Wärmeübergangskoeffizienten siehe (Gl. 38).

(Gl. 38) $$\frac{1}{\alpha_{HL}} = \frac{1}{\alpha_i} + \frac{1}{\alpha_K}$$

α_{HL}	[W/m²K]	Gesamter Wärmeübergangskoeffizient Heizmittel - Mauerwerk
α_i	[W/m²K]	Wärmeübergangskoeffizient Heizmittel - Heizrohr
α_K	[W/m²K]	Kontaktkoeffizient zwischen Heizrohr und Mauerwerk

In Bild 118 ist der gesamte von der Heizleitung abgegebene Wärmestrom in Abhängigkeit vom Wärmeübergangskoeffizienten dargestellt. Es sind berechnete Wärmeabgaben mit den Formeln nach Elgeti und mit WUFI® 2D der in der Parameterstudie verwendeten Standardwand abgebildet.

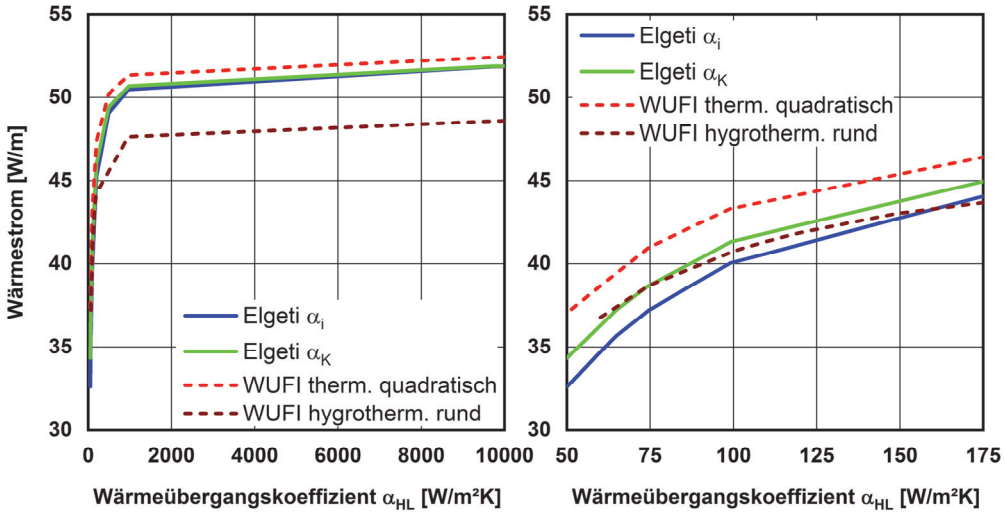


Bild 118: Wärmestrom des Heizrohrs mit einem Rohraußendurchmesser von 15 mm (DN 15) in Abhängigkeit des Wärmeübergangskoeffizienten bzw. des Kontaktkoeffizienten

Bei den Berechnungen nach Elgeti werden der Wärmeübergang vom Heizwasser auf die Rohrwand α_i variiert, bei sehr hohem konstanten Kontaktkoeffizienten α_K (10^6), sowie der Kontaktkoeffizienten α_K variiert, bei sehr hohem konstantem inneren Wärmeübergangskoeffizienten α_i (10^6). Es stellen sich zwischen beiden Vorgehensweisen geringfügige Unterschiede im Gesamtwärmestrom ein, die durch die unterschiedlichen Durchmesser im Rohr innen und außen und damit unterschiedlich hohe Wärmestromdichten begründet sind.

Die Wärmeabgabe mit WUFI® 2D ist bei der rein thermischen Berechnung mit quadratischer Modellierung des Rohres etwas höher im Vergleich zu den Berechnungen nach Elgeti. Die Wärmeabgabe bei hygrothermischer Berechnung mit runder Modellierung des Rohres ist dagegen bei niedrigen α_{HL} etwas geringer bzw. liegt zwischen den Berechnungen nach Elgeti. Bei hohen α_{HL} ist die Wärmeabgabe bei hygrothermischer Berechnung deutlich niedriger. Aus Kapitel 4.5.3 „Parameterstudie mit 2D Simulation" geht hervor, dass im Vergleich zur realitätsnäheren angenäherten runden Rohrmodellierung mit hygrothermischer Berechnung bei einer rein thermischen Berechnung mit quadratischer Modellierung des Heizrohres und einem Wärmeübergangskoeffizient von 1000 W/m²K die Wärmeabgabe um ca. 3,7 W/m überschätzt wird. Bei der Standardwand ergeben sich für die thermische Berechnung mit quadratischer Modellierung des Rohres mit einem α_{HL} von 75 W/m²K und bei der hygrothermischer Berechnung mit runder Rohrmodellierung mit einem α_{HL} von 105 W/m²K in etwa gleich hohe Wärmeströme der Temperierung, siehe Tabelle 21.

Zusätzlich ist der Wärmeübergangskoeffizient für die Berechnung nach Elgeti angegeben. Bei einem α_{HL} von beispielsweise 75 W/m²K reduziert sich die Wärmeabgabe gegenüber einem sehr hohen α_{HL} von 10.000 W/m²K bei der thermischen Simulation mit quadratischer Modellierung des Heizrohres um ca.11,4 W/m. Dies entspricht einer Minderung des Wärmestroms von ca. 22 % gegenüber einer idealen Wärmeübertragung.

Tabelle 21: Ermittelte Wärmeübergangskoeffizienten α_{HL} je nach Modellierung der Heizrohre und Berechnungsart für die validierte in etwa gleichhohe Wärmeabgabe anhand der untersuchten Standardwand der Parameterstudie mit WUFI®. Zusätzlich ist der angepasste Wert für Elgeti eingetragen.

Berechnung	Modell	α_{HL}	$\dot{Q}_{WH}$	Max. T_S
		[W/m²K]	[W/m]	[°C]
Thermisch	Quadrat	10.000	52,4	57,1
Thermisch	Quadrat	75	41,0	50,2
Hygrohterm.	Quadrat	85	41,1	51,0
Thermisch	Rund	90	41,1	50,3
Hygrotherm.	Rund	105	41,1	51,1
Elgeti		90	41,3	

Es wird davon ausgegangen, dass in realen Temperier-Anwendungen im Mittel sehr niedrige Wärmeübergangskoeffizienten α_{HL} auftreten. Zum einen bildet sich durch die Materialdehnung und durch die Putzrauigkeit ein Luftspalt aus. Das handwerkliche Einputzen der Temperierleitung kann zusätzliche Lufteinschlüsse verursachen. Zum anderen werden bei In-situ-Messungen niedrige Durchflussgeschwindigkeiten beobachtet, die teilweise laminare Rohrströmungen ermöglichen und damit geringe Wärmeübergangskoeffizienten α_i zur Folge haben können.

Der Kontaktkoeffizient α_K kann über den Wärmeübergangskoeffizienten α_i und den aus den rechnerischen Untersuchung abgeleiteten Gesamtwärmeübergangskoeffizient α_{HL} abgeschätzt werden. Die hygrothermische Berechnung mit rund angenäherter Rohrmodellierung kommt den realen Verhältnissen am nächsten. Die rechnerische Untersuchung bezieht sich dabei auf eine Messung der Wärmeabgabe bei einer Durchflussmenge von ca. 2,1 l/min, einem Rohrdurchmesser von 15 mm und einer Heizmitteltemperatur von rund 60 °C. Daraus folgt ein α_i

von 2300 W/m²K. Aus Gleichung (Gl. 38) ergibt sich bei einem α_{HL} von ca. 105 W/m²K (aus Simulation) und α_i von 2300 W/m²K (aus Messung) ein Kontaktkoeffizient von 110 W/m²K. In Bild 119 ist der in Abhängigkeit von α_i resultierende Gesamtwärmeübergangskoeffizient α_{HL}, bei als konstant angenommene Kontaktkoeffizienten α_K von 110 W/m²K, abgebildet. Für den inneren Wärmeübergangskoeffizient α_i wurden die Werte gemäß dem Diagramm in Bild 115 für eine Heizmitteltemperatur von 60 °C und Rohrdurchmesser von 15 mm verwendet.

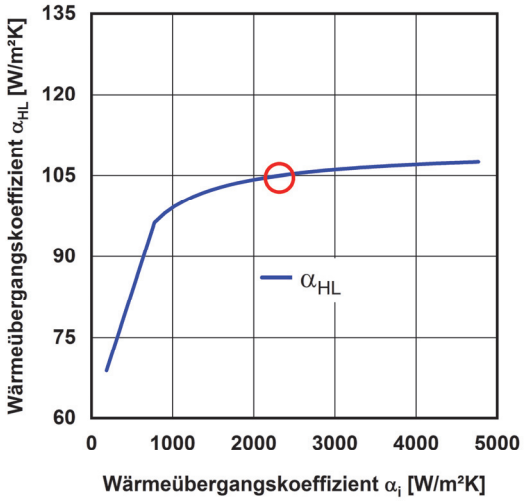


Bild 119: Gesamtwärmeübergangskoeffizient α_{HL} zwischen Heizmittel und Mauerwerk in Abhängigkeit des inneren Wärmeübergangskoeffizienten α_i zwischen Heizmittel und Rohrwand. Bei einem α_i von 2300 W/m²K (~2,1 l/min) und einem α_K von 110 W/m²K ergibt sich ein α_{HL} von 105 W/m²K.

4.7.3 Vergleich der Wärmeabgabe der Messung und Berechnung der Außenwand im Messraum mit angepassten Parametern

Berechnung der Wärmeabgabe der Temperierung im Regelquerschnitt der Außenwand im Messraum

Es wird nun der reale Wandaufbau einschließlich Sockel und angrenzendem Erdreich (Bild 120) entsprechend dem Messraum sowie Außentemperatur von 0 °C (entspricht in etwa dem Temperaturniveau während der Messungen) durchgeführt. Dabei, wie in Kapitel 4.7.2 "Wärmeübertragung der Bauteiltemperierung: Vom Heizwasser an die Wand" begründet, wird der Gesamt-Wärmeübergangskoeffizient α_{HL} vom Heizmittel zur Mauer von 75 W/m²K gewählt, um die berechnete Wärmeabgabe an die Messwerte anzunähern.

Bild 120 zeigt das berechnete thermische Feld der Außenwand mit angrenzendem Bodenaufbau mit Temperierung und ohne Temperierung. Zusätzlich sind die stationären Klimarandbedingungen sowie die für diese Betrachtung verwendeten Bilanzierungsgrenzen der Wärmeströme (orange Linien, gelbe Rechtecke) mit eingezeichnet. Die Wärmeübergangsbedingungen werden außen mit 17 W/m²K und innen mit 8 W/m²K an Wand und Boden angesetzt. Der Wandaufbau und die Lage der Heizrohre werden entsprechend der Skizze in Bild 23 in Kapitel „4.1.4 Messkonzept Feldstudien" in der Simulation implementiert. Das angrenzende Erdreich bzw. der Bodenaufbau werden jeweils 2 m breit und gesamt 3 m tief modelliert. Die als große Heizschleife (Variante HL3) bezeichnete Einbauvariante läuft über die Brüstung zum Sockel mit einem Rohrabstand zwischen den Heizleitungen von ca. 90 cm. Entsprechend der Parameterstudie beeinflussen sich zwei Heizrohre mit einem Abstand von 1 m gegenseitig nur noch marginal. Das Heizrohr in Brüstungshöhe entspricht dabei der Einbausituation der Parameterstudie. Das Heizrohr im Sockel hingegen ist durch den Bodenaufbau und das angrenzende Erdreich beeinflusst. Zudem liegt im Sockel, im Vergleich zur Standardwand der Parameterstudie, das

obere Sockelrohr ca. 10-15 mm und das untere Sockelrohr ca. 15-20 mm unter Putz. Es wird die Wärmeabgabe der einzelnen Heizschleifen und Heizrohre unter den realitätsnahen Randbedingungen und Bauteilabmessungen ähnlich den der Messungen ermittelt. Anhand der Wärmeströme an den Bilanzgrenzen werden gemäß den Gleichungen (Gl. 23), (Gl. 26) und (Gl. 28) die Wärmestromanteile sowie der Gesamtwärmestrom der Temperierung berechnet. Zum Vergleich wird zusätzlich der Gesamtwärmestrom der Temperierung direkt am Heizrohr (gelbe Rechtecke in Bild 120) erfasst. Mit der Methode zur Erfassung der Wärmeströme an den Oberflächen kann die Wärmeabgabe in die Wärmestromanteile nach innen und außen unterschieden werden. Mit der Erfassung der Wärmeströme direkt am Rohr werden die Wärmeströme unabhängig der Bauteilmasse erfasst. Außerdem können bei Anordnung von mehreren Heizrohren im Bauteil die Wärmeabgabe der einzelnen Rohre ermittelt werden. Die Bezeichnung und Anordnung der Heizrohre ist in Bild 121 abgebildet.

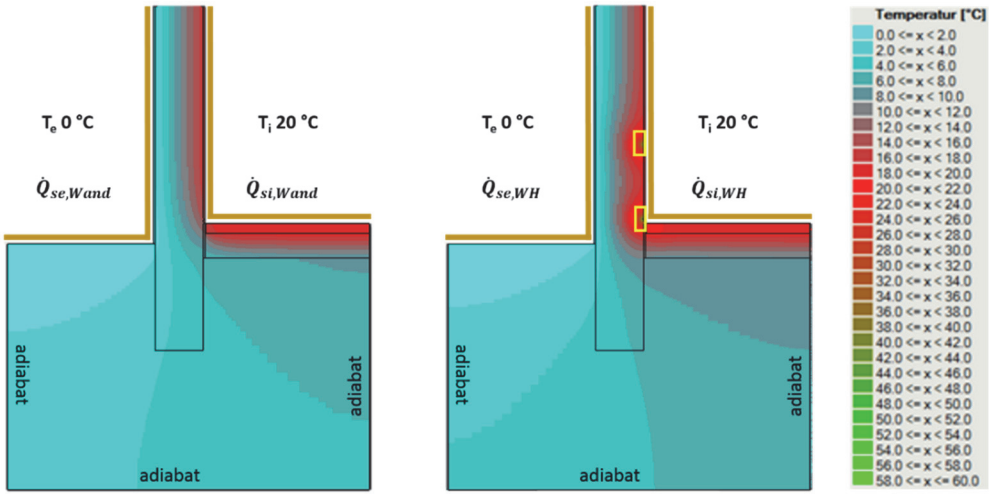


Bild 120: Berechnetes thermische Feld der Gesamtkonstruktion mit Bauteiltemperierung (große Schleife, HL3) in der Alten Schäfflerei. Abgebildet ist das thermische Feld im eingeschwungenen Zustand mit stationären Randbedingungen (linkes Bild ohne Temperierung, Bild Mitte mit Temperierung). Zusätzlich sind die Bilanzgrenzen (orange Linien, gelbe Rechtecke) der Wärmeströme schematisch eingezeichnet. Rechts sind die Temperaturen der Farbskala zugeordnet.

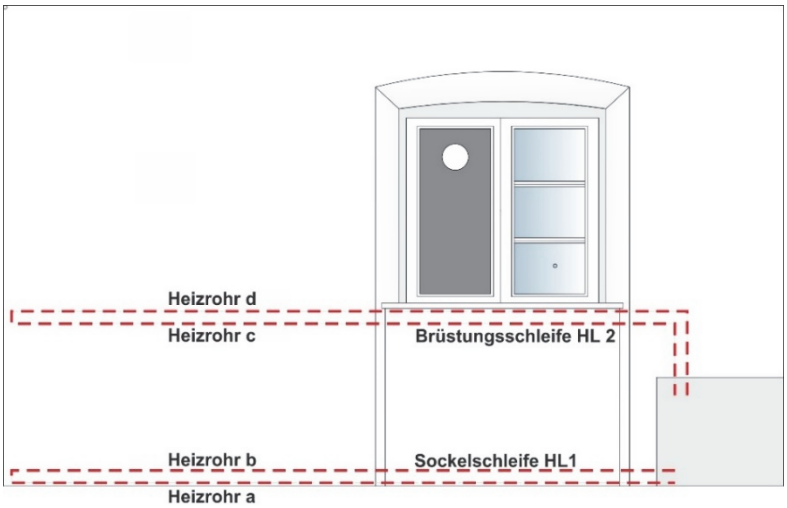


Bild 121: Bezeichnung der Heizrohre und Anordnung der Heizschleifen (siehe auch Bild 21 und Bild 22)

In Tabelle 22 sind die Ergebnisse der Wärmestromanalyse für die Anordnung der Temperierung als große Schleife HL3 mit Sockel- und Brüstungsrohr, sowie als einzeln betriebenes Sockel- bzw. Brüstungsrohr angegeben. Eine Überprüfung der Wärmeabgabe im Bereich des Sockels ergibt bei den gewählten Randbedingungen eine in etwa gleich hohe Wärmeabgabe im Vergleich zur Heizleistung im Brüstungsbereich. Die Wärmeabgabe beträgt gemäß Simulation für

die große Schleife als gemittelter Wert zwischen Sockel- und Brüstungsrohr 43,1 W/m. Die Wärmeabgabe am Heizrohr b (Sockel) ist dabei im Vergleich zum Heizrohr d in Brüstungshöhe um ca. 1,1 W/m, höher bei gleichzeitigem Betrieb als große Schleife. Bei einer gesonderten einzelnen Ermittlung der Wärmeabgabe am Heizrohr b im Sockel sowie am Brüstungsrohr d ohne gegenseitige Beeinflussung ergibt sich jeweils nur eine geringfügig höhere Wärmeabgabe um rund 0,1 W/m. Die Wärmeabgabe wird bei dem Abstand der Heizrohre untereinander von rund 90 cm unwesentlich beeinflusst. Für die große Schleife ergibt sich ein Wärmeabgabeverhältnis von 20,8 %. Die einzeln untersuchten Heizleitungen im Sockel (Rohr b) und Brüstung (Rohr d) ergeben jeweils ein Wärmeabgabeverhältnis von 27,3 % für Rohr b und 14,9 % für Rohr d.

Tabelle 22: Wärmeabgabe der großen Schleife HL3 und der getrennt berechneten Einzelrohre in Brüstung und Sockel im Regelquerschnitt der Außenwand. Die Berechnung erfolgte rein thermisch mit quadratischer Modellierung der Heizrohre mit einem α_{HL} von 75 W/m²K (R Wand 0,91 m²K/W).

Bez.	Anordnung Heizrohr	Wärmestrom pro Meter Rohr Außenwand (R 0,91 m²K/W)				Wärmeabgabe-Verhältnis
		$\dot{Q}_{e,WH}$ (Gl. 26)	$\dot{Q}_{i,WH}$ (Gl. 23)	$\dot{Q}_{WH}$ (Gl. 28)	$\dot{Q}^{*}_{WH}$ (am Rohr)	$f_{WH} = \frac{\dot{Q}_{e,WH}}{\dot{Q}_{i,WH}}$
		[W/m]	[W/m]	[W/m]	[W/m]	[%]
HL 3	Große Schleife	7,5	35,7	43,2	43,1	21,0
HL 3 Rohr b	Große Schleife: Sockelrohr				43,7	
HL 3 Rohr d	Große Schleife: Brüstungsrohr				42,6	
Rohr a	Sockel unteres Rohr	10,7	31,5	42,2	42,1	34,0
Rohr b	Sockel oberes Rohr	9,4	34,3	43,7	43,7	27,3
Rohr d	Brüstung oberes Rohr	5,6	37,2	42,7	42,7	14,9

In Tabelle 23 sind die Wärmeströme und Wärmeabgabeverhältnisse für verschiedene Anordnungen bzw. Betrieb der Heizschleifen angegeben. Die Brüstungsschleife (HL 2) gibt etwas mehr Wärme ab im Vergleich zur Sockelschleife (in Tabelle blau hinterlegt). Die gegenseitige Beeinflussung der Sockel- und Brüstungsschleife im gleichzeitigen Betrieb ist mit ca. 0,1 W/m marginal.

Tabelle 23: Berechnete Wärmeabgabe der Varianten der Temperierung im Regelquerschnitt der Außenwand. Berechnung thermisch, quadratische Modellierung der Heizrohre, α_{HL} 75 W/m²K und R 0,91 m²K/W

Bez. / Rohr	Anordnung Heizrohr (Regelquerschnitt Außenwand)	Wärmestrom pro Meter Rohr Außenwand (R 0,91 m²K/W)				Wärmeabgabe-Verhältnis
		$\dot{Q}_{e,WH}$ (Gl. 26)	$\dot{Q}_{i,WH}$ (Gl. 23)	$\dot{Q}_{WH}$ (Gl. 28)	$\dot{Q}^{*}_{WH}$ (am Rohr)	$f_{WH} = \frac{\dot{Q}_{e,WH}}{\dot{Q}_{i,WH}}$
		[W/m]	[W/m]	[W/m]	[W/m]	[%]
HL 3	Große Schleife	7,5	35,7	43,2	43,1	21,0
HL 1	Sockelschleife	7,1	23,4	30,5	30,5	30,5
HL 2	Brüstungsschleife	4,2	28,0	32,2	32,1	14,9
HL1+HL2	Sockel-Brüstung	5,6	25,6	31,3	31,2	22,0
HL 1	Sockel-Brüstung: Sockelschleife				30,4	
HL 2	Sockel-Brüstung: Brüstungsschleife				32,0	

Berechnung der Wärmeabgabe der Temperierung in der Mauernische

Bild 122 zeigt das berechnete thermische Feld der Mauernische mit geringerer Wanddicke im Vergleich zum Regelquerschnitt der Außenwand mit und ohne Temperierung. Zusätzlich sind die Bilanzgrenzen der Wärmestrombilanzierung mit eingetragen. Die Wärmeleitfähigkeit in der Mauernische wurde in dem angrenzenden Messraum gemessen [Bichlmair et al 2016n]. Hierbei zeigte sich, dass mit dem gemessenen Wärmedurchlasswiderstand R mit rund 0,44 m²K/W eine deutlich niedrigere Wärmeleitfähigkeit vorliegt im Vergleich zur Außenwand im Regelquerschnitt. Da die Mauernische im Messraum der Temperierung nicht messtechnisch erfasst wurde, wird die ermittelte Wärmeleitfähigkeit der Nische im Nachbarraum herangezogen. In der Simulation wird eine Wärmeleitfähigkeit des Ziegelmauerwerks in der Nische von $\lambda_{trocken}$ 0,9 W/mK angesetzt. Daraus ergibt sich für die Nische und aus den Randbedingungen in der Simulation ein Wärmedurchlasswiderstand mit 0,44 m²K/W.

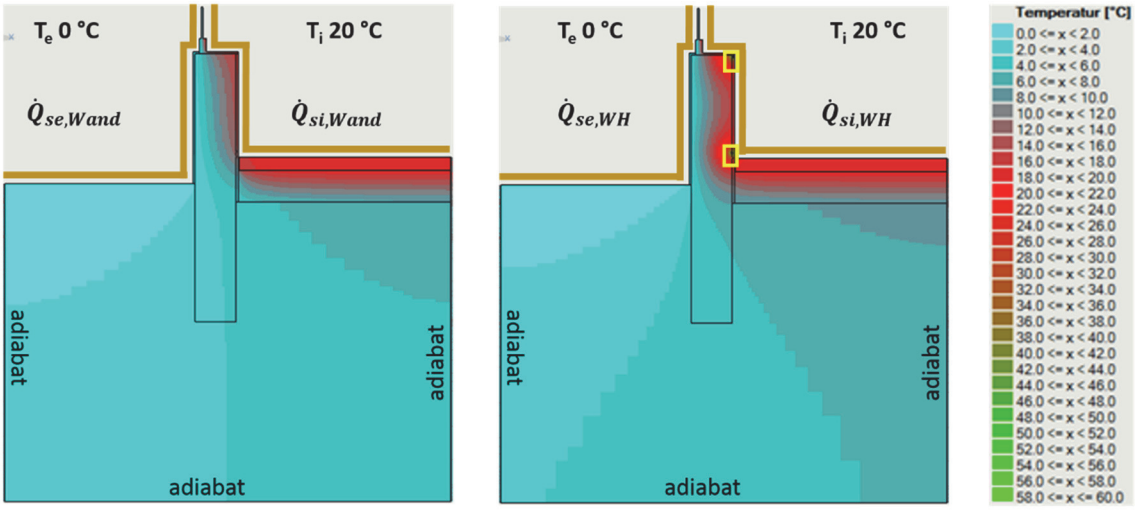


Bild 122: Thermisches Feld im eingeschwungenen Zustand in der Mauernische unterhalb des Fensters mit Bauteiltemperierung in der Alten Schäfflerei (R Nische 0,44 m²K/W). Links im Bild ohne Temperierung, Bild Mitte mit Temperierung mit großer Schleife (HL3). Rechts im Bild ist die Temperaturskala abgebildet. Die orange Linie und gelben Rechtecke zeigen schematisch die Bilanzgrenzen.

In Tabelle 24 sind die berechneten Wärmestromanteile der untersuchten Varianten der Temperierung aufgelistet. Erwartungsgemäß ist die Wärmeabgabe durch den geringeren Wärmedurchlasswiderstand der Mauernische deutlich höher im Vergleich zum Regelquerschnitt der Außenwand. Am unteren Sockelrohr (Rohr a) wurde dabei die höchste Wärmeabgabe pro Meter Rohr erreicht. Das Wärmeabgabeverhältnis ist mit rund 60 % ebenfalls am höchsten. In der Folge treten hier die größten direkten Wärmeverluste $\dot{Q}_{e,WH}$ auf. Die Anordnung der Temperierung auf Brüstungshöhe unterhalb des Fensterbrettes führt in diesem Bereich zu einer Verringerung der Wärmeabgabe. Im Gegensatz zum Regelquerschnitt ist nun die Wärmeabgabe in der Nische an der Brüstungsschleife niedriger im Vergleich zur Sockelschleife. Auch in der Nische ist im gleichzeitigen Betrieb der Sockel- und Brüstungsschleife die gegenseitige Beeinflussung auf die Wärmeabgabe gering. Die Gesamtwärmeabgabe der Sockel- und Brüstungsschleife in der Nische (HL1+HL2) ist mit rund 35,4 W/m im Vergleich zur Wärmeabgabe im Regelquerschnitt mit 31,2 W/m um rund 4,2 W/m höher (siehe blau hinterlegte Zeilen in Tabelle 24). Das Wärmeabgabeverhältnis der Sockel- und Brüstungsschleife beträgt 34,8 %.

Tabelle 24: Berechnete Wärmeabgabe der unterschiedlichen Varianten der Temperierung sowie getrennt berechneten Einzelrohre in Brüstung und Sockel in der Nische. Die Berechnung erfolgte rein thermisch mit quadratischer Modellierung der Heizrohre mit einem α_{HL} von 75 W/m²K und einem Wärmedurchlasswiderstand der Nische von 0,44 m²K/W.

Bez. / Rohr	Anordnung Heizrohr (Mauernische)	Wärmestrom pro Meter Rohr Nische (R 0,44 m²K/W)				Wärmeabgabe-Verhältnis
		$\dot{Q}_{e,WH}$ (Gl. 26)	$\dot{Q}_{i,WH}$ (Gl. 23)	$\dot{Q}_{WH}$ (Gl. 28)	$\dot{Q}^{*}_{WH}$ (am Rohr)	$f_{WH} = \frac{\dot{Q}_{e,WH}}{\dot{Q}_{i,WH}}$
		[W/m]	[W/m]	[W/m]	[W/m]	[%]
Rohr a	Sockel, unteres Rohr	19,7	32,9	52,6	52,6	59,7
HL 3	Große Schleife	11,8	35,8	47,6	47,6	32,9
HL 3 Rohr b	Große Schleife: Sockelrohr				53,9	
HL 3 Rohr d	Große Schleife: Brüstungsrohr				41,2	
HL 1	Sockelschleife	13,4	24,7	38,1	38,1	54,2
HL 2	Brüstungsschleife	4,9	27,9	32,8	32,8	17,6
HL1+HL2	Sockel-Brüstung	9,1	26,2	35,4	35,4	34,8
HL 1	Sockel-Brüstung: Sockelschleife				38,0	
HL 2	Sockel-Brüstung: Brüstungsschleife				32,7	

Berechnungsergebnis Regelquerschnitt mit anteiliger Mauernische

Für einen genaueren Vergleich der Messwerte mit den berechneten Werten wird der jeweilige Längenanteil der Temperierung je Mauerabschnitt berücksichtigt. In Tabelle 11 (Seite 52) sind die jeweiligen Längen der unterschiedlichen Schleifenanordnung für den Wandabschnitt im Regelquerschnitt und in der Mauernische angegeben. Aus den berechneten Werten für den Regelquerschnitt und die Nische wird über den jeweiligen Längenanteil die Gesamtwärmeabgabe berechnet und wieder auf einen Meter Heizrohr bezogen, siehe Tabelle 25. Das Wärmeabgabeverhältnis wird entsprechend berechnet. Durch das unterschiedliche Wärmeabgabeverhalten der Brüstungsschleife im Regelquerschnitt und Nische ergeben sich nahezu gleich hohe Wärmeabgaben für die Sockel- und Brüstungsschleife.

Tabelle 25: Wärmeabgabe im Regelquerschnitt der Außenwand mit anteiliger Mauernische. Die Berechnung erfolgte thermisch mit quadratischer Modellierung der Heizrohre mit einem α_{HL} von 75 W/m²K.

Bez. / Rohr	Anordnung Heizrohr (Regelquerschnitt Wand + Nische)	Wärmestrom pro Meter Rohr Regelquerschnitt Wand + Nische			Wärmeabgabe-Verhältnis
		$\dot{Q}_{e,WH}$	$\dot{Q}_{i,WH}$	$\dot{Q}_{WH}$	$f_{WH} = \frac{\dot{Q}_{e,WH}}{\dot{Q}_{i,WH}}$
		[W/m]	[W/m]	[W/m]	[%]
HL 3	Große Schleife	8,7	35,7	44,4	24,2
HL 1	Sockelschleife	9,1	23,8	32,9	38,2
HL 2	Brüstungsschleife	4,4	28,0	32,4	15,9
HL1+HL2	Sockel-Brüstung	6,7	25,8	32,5	25,9

Vergleich Berechnungsergebnis mit Messung

In Bild 123 sind die Messergebnisse für die große Schleife (HL3) mit der approximierten Funktion der gemessenen Wärmeabgabe sowie die beidseitigen Grenzen der Messgenauigkeit ab-

gebildet. Bei einer mittleren Übertemperatur von 40 °C wird gemäß appr. Funktion eine Leistung von 43,9 W abgegeben. Da sich der Wärmedurchlasswiderstand R auf das Ergebnis auswirkt wird die Sensitivität mit der Messunsicherheit der Wärmeflussmessung von rund ±5 % vom Messwert untersucht. Das Berechnungsergebnis aus Tabelle 25, berechnet mit einem Wärmedurchlasswiderstand R von 0,91 m²K/W , liegt mit 44,4 W etwas über dem Messwert. Mit einem Wärmedurchlasswiderstand der Außenwand entsprechend der Messung von R 0,95 m²K/W ergibt sich mit Berücksichtigung der Mauernische eine mittlere Wärmeabgabe der großen Schleife von 43,8 W/m und diese liegt damit sehr nahe am Messwert. Mit einem Wärmedurchlasswiderstand von R 1,00 m²K/W verringert sich die Wärmeabgabe der großen Schleife auf knapp 43,3 W/m und entspricht der Wärmeabgabe der großen Schleife im Regelquerschnitt (ohne Nische) mit einem Wärmedurchlasswiderstand R 0,91 m²K/W. Die Werte liegen alle eng an der approximierten Funktion, die anhand der Messwerte ermittelt wurde und liegen innerhalb der Messgenauigkeit der Leistungsmessung (Bild 123 rechts).

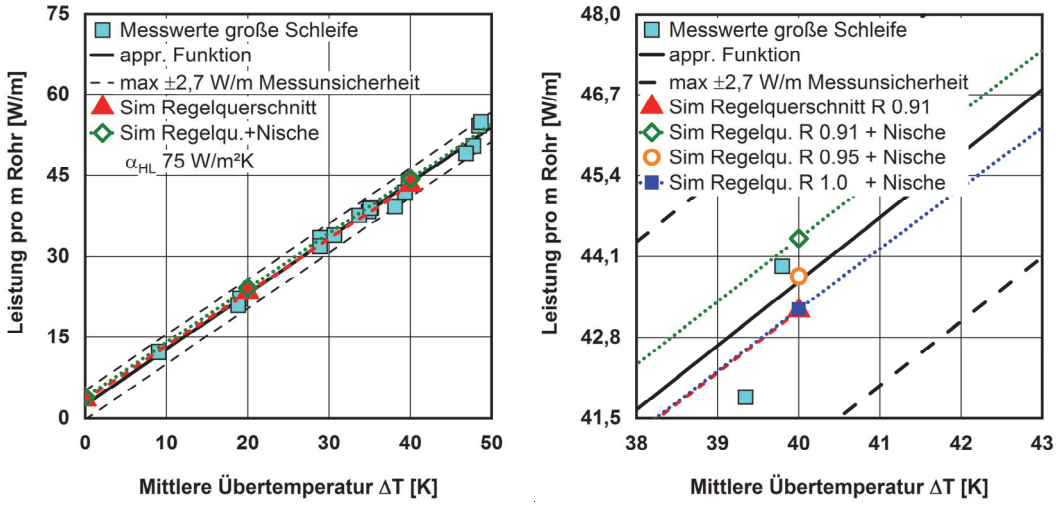


Bild 123: Gemessene Wärmeabgabe der großen Heizschleife (HL3) in Abhängigkeit der mittleren Übertemperatur pro Meter Rohr. Mit eingetragen ist das Ergebnis der thermischen Simulation mit quadratischer Rohrmodellierung und einem Wärmeübergangskoeffizienten α_{HL} von 75 W/m²K. Im rechten Diagramm sind zusätzliche Simulationsergebnisse mit variiertem Wärmedurchlasswiderstand R eingetragen.

Zusätzlich wurde für die unterschiedlichen Temperierschleifen die Wärmeabgabe bei 0 K Heizmittelübertemperatur und vereinzelt auch für eine Heizmittelübertemperatur von 20 K berechnet. In Bild 124 bis Bild 126 ist für die unterschiedliche Anordnung der Temperierschleifen die jeweilige Wärmeabgabe aus der Berechnung mit einem R von 0,91 m²K/W im Regelquerschnitt mit und ohne Berücksichtigung der Nische zusammen mit den jeweiligen Messwerten und der daraus ermittelten approximierten Funktion angegeben (Bild 124). Der maximale Messfehler beträgt für die Sockelschleife ±2,5 W/m. Bei den Messungen der Brüstungsschleife sowie der Sockel- und Brüstungsschleife wurde die Wärmeabgabe bei niedrigen und hohen Durchflüssen ermittelt. Bei den niedrigen Durchflüssen sind laminare Strömungen und dementsprechend niedrige innere Wärmeübergangskoeffizienten α_i möglich. Dadurch ist im Vergleich zur Simulation ein niedrigerer Gesamt-Wärmeübergangskoeffizienten α_{HL} möglich und damit in der Folge auch eine geringere Wärmeabgabe. Die Messungen mit hohem Durchfluss wurden zum Teil bei erheblich höheren Durchflüssen durchgeführt, die eine etwas höhere Wärmeabgabe im Vergleich zur Simulation zur Folge haben. Für die Wärmeabgabe bei niedrigen und hohen Durchflüssen wurde jeweils eine approximierte Funktion ermittelt und in die Diagramme eingetragen (Bild 125 und Bild 126). Für die Sockel- und Brüstungsschleife (HL1+HL2) wurde zusätzlich die Wärmeabgabe mit einem R von 0,95 m²K/W berechnet und im Diagramm in Bild 126 eingezeichnet. Durch den geringfügig höheren Wärmedurchlasswiderstand verringert sich auch das Wärmeabgabeverhältnis von f_{WH} 25,9 % (R 0,91 m²K/W) auf f_{WH} 25,1 % (R 0,95 m²K/W).

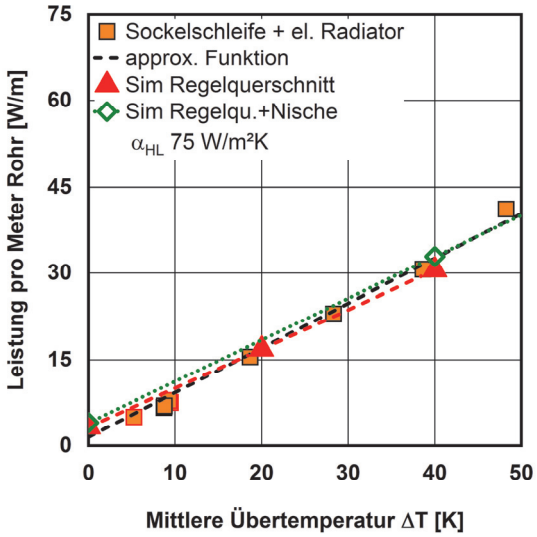


Bild 124: Gemessene Wärmeabgabe der Sockelschleife (HL1). Mit eingetragen ist das Ergebnis der thermischen Simulation mit quadratischer Rohrmodellierung und einem α_{HL} von 75 W/m²K.

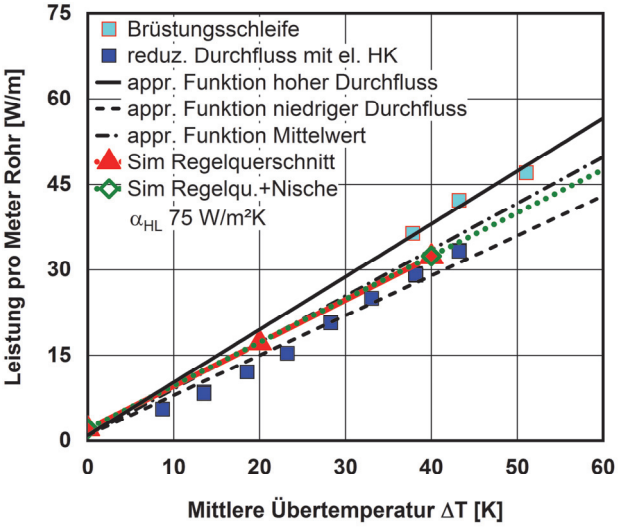


Bild 125: Gemessene Wärmeabgabe der Brüstungsschleife (HL2). Mit eingetragen ist das Ergebnis der thermischen Simulation mit quadratischer Rohrmodellierung und einem α_{HL} von 75 W/m²K.

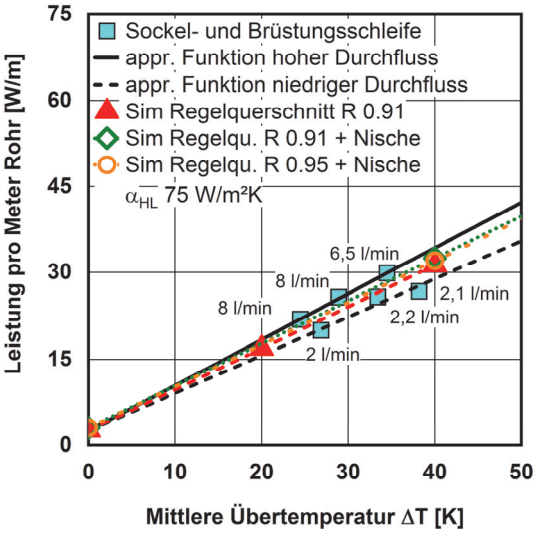


Bild 126: Gemessene Wärmeabgabe der Sockel- und Brüstungsschleife (HL1+HL2). Mit eingetragen ist das Ergebnis der thermischen Simulation mit quadratischer Rohrmodellierung und einem α_{HL} von 75 W/m²K. Mit angegeben sind die Durchflussraten der Leistungsmessung (blaue Quadrate).

4.7.4 Nachweis eines niedrigen Kontaktkoeffizienten anhand der Temperaturdifferenz zwischen Heizrohr und Innenoberfläche

Die Wärmeabgabe und damit auch Bauteiltemperatur wird maßgeblich durch den Gesamtwärmeübergang vom Heizmittel zum Mauerwerk beeinflusst. Falls, wie in 4.7.2 erläutert, ein deutlich niedrigerer Gesamtwärmeübergang vorliegt, muss eine entsprechend hohe Temperaturdifferenz zwischen Heizmittel und der Oberflächentemperatur am Bauteil vorliegen.

Vergleich der Temperaturdifferenz aus Messung und Simulation

Große Schleife (HL3) im Messraum in der Alten Schäfflerei

Untersucht werden die Temperaturunterschiede an der großen Schleife (HL3). Der Raum wurde während des Messzeitraums vom 11. Dezember 2014 bis 6. Januar 2015 ausschließlich über die Temperierung beheizt und ab dem 7. bis 23. Januar zusätzlich mit einem elektrischen Heizkörper. Die Durchflussgeschwindigkeit beträgt für den ausgewerteten Zeitraum zwischen 4,0 l/min und 2,1 Liter (siehe Bild 30 und Bild 31 in Kapitel 4.2.4 „Messung der Wärmeabgabe in der Alten Schäfflerei in Benediktbeuern - Einzelmessungen“). Die Temperaturmessung (H07) an der Wandoberfläche befindet sich bei ca. 3/4 der Rohrleitungslänge auf Höhe 0,07 m über Boden. Es wird die berechnete Heizmitteltemperatur an der Position des Sensors l^* verwendet. Die Heizleitung liegt am Sensor ca. 13 mm tief unter der Oberfläche. In Bild 127 links sind die Temperaturen des Heizmittels, die Oberflächentemperatur auf Höhe der Heizleitung und die Differenz der Temperaturen für den Zeitraum vom 11.12.2014 bis 21.1.2015 abgebildet.

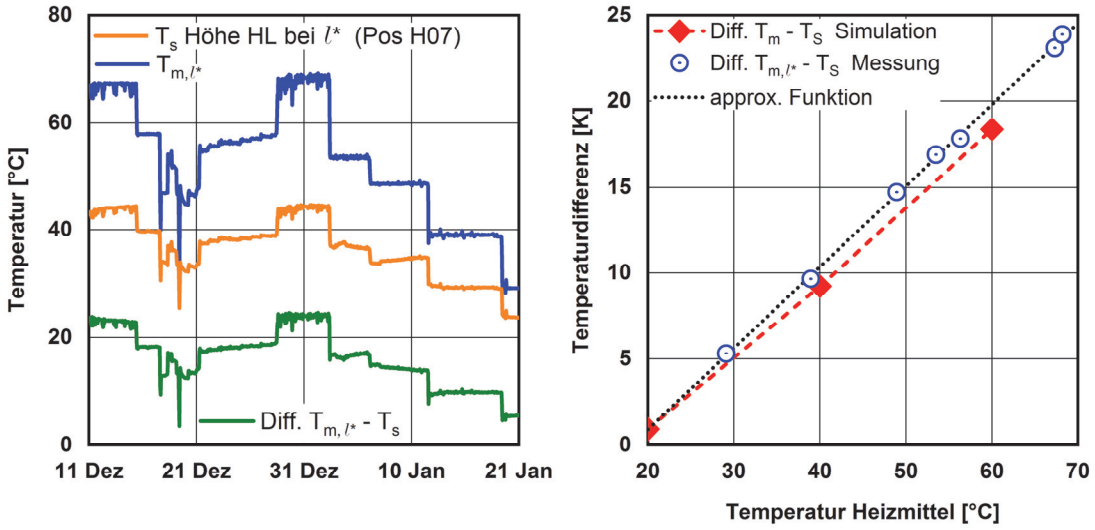


Bild 127: Links: Oberflächentemperatur T_S auf Höhe der Heizleitung am Sockel und Temperatur des Heizmittels $T_{m,1*}$ an der Messstelle mit Differenzgraph der beiden Temperaturen. Messung an der großen Heizschleife (HL3) im Zeitraum vom 11.12.2014 bis 21.1.2015. Rechts: Ausgewählte Einzelwerte der gemessenen Temperaturdifferenz im Vergleich zu den Werten aus der Simulation

Der vor Ort angebrachte Temperatursensor hat einen Versatz um ca. 1 cm oberhalb des Rohrscheitelpunktes. Dies führt nach Auswertung der Simulation des Bauteilaufbaus zu einer um ca. 1,0 K geringeren Oberflächentemperaturen gegenüber der maximalen Temperatur über dem Scheitelpunkt des Heizrohres (siehe Kapitel 4.5.3 „Parameterstudie mit 2D Simulation“). Aus der Messung ergibt sich eine Temperaturdifferenz zwischen Heizmittel und Wandoberfläche über dem Heizrohr von rund 19,8 K bei einer Heizmitteltemperatur von 60 °C. Die aus der Simulation ermittelte Differenztemperatur beträgt rund 18,4 K bei gleicher Heizmitteltemperatur und liegt damit etwas unterhalb der Messwerte, siehe Bild 127 rechts. Bei 0 K Heizmittelüber-

temperatur (entspricht 20 °C Heizmitteltemperatur) stellt sich gemäß Simulation eine Temperaturdifferenz von etwa 0,9 K ein. Aus den Werten der Simulation im Diagramm ist ein nichtlinearer Anstieg der Temperaturdifferenz bei niedrigen Heizmittelübertemperaturen erkennbar. Die Näherungsfunktion der Messwerte ist als Gerade eingetragen.

Sockelschleife (HL1) im Messraum in der Alten Schäfflerei

Untersucht werden die Temperaturunterschiede an der Sockeltemperierung (HL1). Der Raum wird während des Messzeitraums vom 6. - 20. Februar 2015 zusätzlich mit einem elektrischen Radiator beheizt, um eine Raumtemperatur von 20 °C sicherzustellen. Die Außenlufttemperatur beträgt während des Messzeitraums im Mittel ca. -3,3 °C. Die Heizleitung im Rücklauf liegt am Temperatursensor ca. 13 mm tief unter der Oberfläche. In Bild 128 links sind die Mitteltemperaturen des Heizmittels, die Oberflächentemperatur auf Höhe der Heizleitung und die Differenz der Temperaturen abgebildet. Die Temperaturspreizung beträgt für den Messzeitraum 1,5 K bis 2,5 K bei jeweils angepasster Durchflussgeschwindigkeit von rund 2,1 l/min für hohe Heiztemperaturen und 0,5 l/min bei der niedrigsten Heiztemperatur (siehe Bild 26 „4.2.4 Messung der Wärmeabgabe in der Alten Schäfflerei in Benediktbeuern - Einzelmessungen“). Die Temperaturmessung an der Wandoberfläche befindet sich ca. bei 2/3 der Rohrleitungslänge. Es wird die Heizmitteltemperatur l^* am Ort der Oberflächentemperaturmessung verwendet. Bei einer Heizmitteltemperatur bei l^* von 68,3 °C stellt sich eine Temperaturdifferenz von ca. 22,6 K zur Oberflächentemperatur ein. Bei einer niedrigeren Heizmitteltemperatur von 38,7 °C stellt sich eine Temperaturdifferenz von 9,2 K ein. In Bild 128 rechts sind die über einen geeigneten Zeitraum vom mehreren Stunden gemittelte Messwerte der Temperaturdifferenz zwischen Heizrohr und Putzoberfläche abgebildet. Die beiden nahe beieinander liegenden Heizrohre beeinflussen sich in der Wärmeabgabe gegenseitig und erreichen insgesamt eine höhere Oberflächentemperatur. Dadurch fällt die Temperaturdifferenz zwischen Heizmittel und Oberflächentemperatur etwas geringer aus im Vergleich zu einem Heizrohr bei der großen Schleife. Aus der Messung ergibt sich gemäß approximierter Funktion (Gerade) eine Temperaturdifferenz zwischen Heizmittel und Sensorposition von rund 18,5 K bei einer Heizmitteltemperatur von 60 °C. Demgegenüber wird aus der Simulation eine Temperaturdifferenz von rund 16,5 K festgestellt und diese ist damit im Vergleich zur Messung um rund 2 K niedriger.

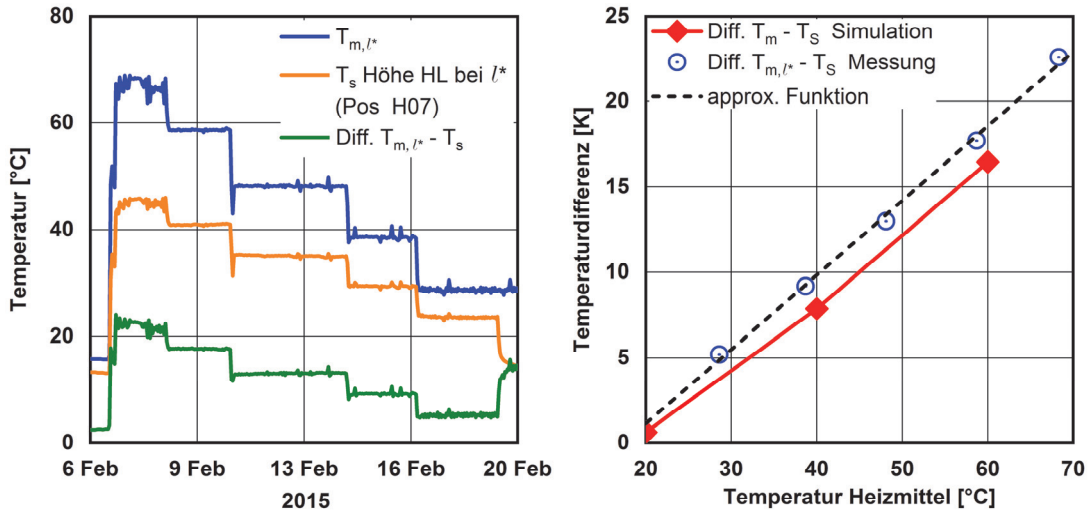


Bild 128: Links: Oberflächentemperatur auf Höhe der Heizleitung und mittlere Temperatur des Heizmittels mit Differenzgraph der beiden Temperaturen an der Sockeltemperierung im Messraum, vom 6. bis 20. Februar 2015. Rechts: Messwerte der Temperaturdifferenz Heizmittel zu Oberflächentemperatur der Sockelschleife mit Näherungsfunktionen (Gerade)

Berechnung der Temperaturdifferenz an der Standardwand

Die Berechnung der Temperaturdifferenz zwischen Wandoberfläche und Heizmittel erfolgt anhand der zum Messraum in etwa vergleichbaren Standardwand der Parameterstudie in Abhängigkeit der Putzüberdeckung. Die hygrothermische Berechnung wird mit einer angenäherten runden Rohrmodellierung und dem als realitätsnah ermittelten inneren Wärmeübergangskoeffizienten α_{HL} von 105 W/m²K durchgeführt. Bei einer Putzüberdeckung von 13 mm und einer Heizmedientemperatur von 60 °C stellt sich eine Temperaturdifferenz von ca. 15 K, siehe Bild 129. Die rechnerische Untersuchung ergibt mit ca. 15 K zwar eine etwas geringere Temperaturdifferenz zwischen Wandoberfläche und Heizmedientemperatur liegt aber im Vergleich zu den Messwerten mit ca. 18 K Differenz bei 60 °C Heizmitteltemperatur relativ nahe an den Messwerten.

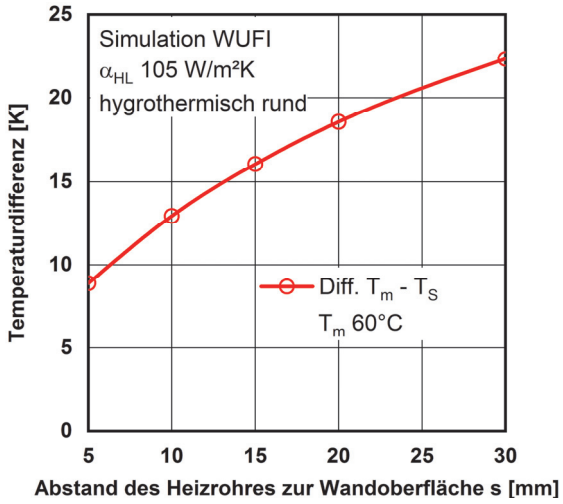


Bild 129: Mit WUFI berechnete Differenz der Oberflächentemperatur zur Heizmedientemperatur in Abhängigkeit des Abstandes des Heizrohres zur Wandoberfläche (Putzüberdeckung)

Temperaturdifferenz zwischen Heizmittel und Wandoberfläche in Feldstudien

Feldstudie Freilichtmuseum Glentleiten [Bichlmair 2016e]

In Bild 130 sind die Temperaturverläufe der gemessenen mittleren Heizleitungstemperatur der Temperierleitung 1.1 im Erdgeschoss Südseite, die Oberflächentemperatur und die Temperaturdifferenz zwischen Oberflächentemperatur und mittlerer Heizmitteltemperatur abgebildet. Hinter dem Heizrohr ist eine ca. 2 cm dicke Wärmedämmung angeordnet. Die Heizrohre (Vorlauf- und Rücklaufleitung) sind in einem Abstand von ca. 5 cm zueinander verlegt. Ende März wurde für einen Versuch die Vorlauftemperatur für zwei Tage angehoben. Dies resultiert in einem größeren Temperaturabfall der Temperierleitung in der Rücklaufleitung (die Spreizung vergrößert sich). Die Temperaturdifferenz zwischen Wandoberfläche und Heizmittel steigt mit der Heizmitteltemperatur an. Die Temperaturdifferenz zwischen der mittleren Heizmitteltemperatur von 38,5 °C zur Wandoberflächentemperatur beträgt 9,5 K und bei 23,6 °C Heizmitteltemperatur beträgt die Differenz 5,5 K. Auch an dieser Bauteiltemperierung stellt sich eine hohe Temperaturdifferenz zwischen Heizmittel und maximaler Oberflächentemperatur ein und bestätigt damit die Annahme eines niedrigen Gesamt-Wärmeübergangskoeffizienten α_{HL}.

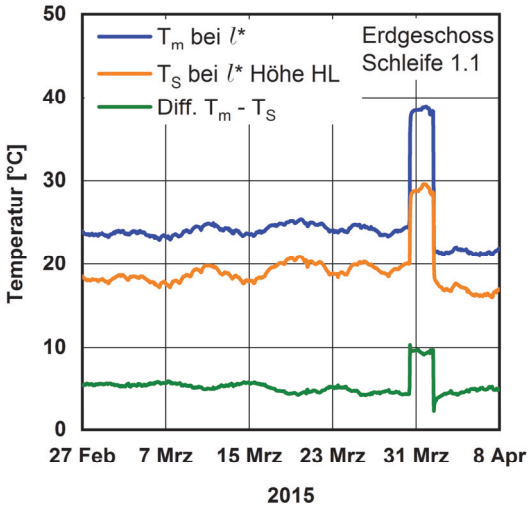


Bild 130: Temperaturverläufe der Heizmitteltemperatur $T_{m,1*}$ an der Stelle der Oberflächentemperaturmessung, Wandoberflächentemperatur T_S auf Höhe der Heizleitung und deren Differenztemperatur im Erdgeschoss Südseite, Raum Stube, Temperierschleife 1.1. Messzeitraum 27.2. - 8.4. 2015

Feldstudie Stadtmuseum Bad Reichenhall [Bichlmair 2016b]

Während des untersuchten Zeitraums 2. - 12.2.2015 heizt die Temperierung im Obergeschoss nahezu durchgängig auf gleichem Niveau. Die berechnete Heizrohrtemperatur beträgt in diesem Zeitraum ca. 36,5 °C an der Stelle der Temperaturmessung an der Wandoberfläche. Die Oberflächentemperatur an der Heizleitung pendelt um ca. 29,2 °C. Der Temperaturabfall in der Putzüberdeckung zwischen Heizleitung und Wandoberfläche beträgt ca. 7,3 K.

Bei der unter Putz verlegten Temperierung im Erdgeschoss wird bei einer Heizwassertemperatur von ca. 35,5 °C eine Temperaturdifferenz zwischen Heizwasser und Putzoberfläche von ca. 8,7 K festgestellt, Messzeitraum 2. - 12.2.2015. Bei beiden Temperierungen stellen sich hohe Temperaturdifferenzen ein, die durch einen niedrigen Gesamt-Wärmeübergangskoeffizienten α_{HL} erklärt werden können.

Fazit

Die in den untersuchten Feldstudien messtechnisch festgestellte Temperaturdifferenz zwischen Heizmedientemperatur und Oberflächentemperatur bestätigen die Annahme eines niedrigen Gesamt-Wärmeübergangskoeffizienten und damit eines niedrigen Kontaktkoeffizienten zwischen Heizrohr und Mauerwerk. In den Simulationen der Parameterstudie und der Alten Schäfflerei kann die Temperaturdifferenz mit den unterschiedlichen Modellierungs- und Berechnungsansätzen gut abgebildet werden. Der Abstand zwischen Heizrohr und Putzoberfläche (Putzüberdeckung) hat dabei einen hohen Einfluss auf die Temperaturdifferenz. Die Messung der Dicke der Putzüberdeckung bzw. der Lage des Sensors zum Scheitelpunkt des Heizrohres wird an den gezeigten Beispielen mit einer Genauigkeit von jeweils 1 mm abgeschätzt. Aus der Parameterstudie mit variierendem Wärmeübergangskoeffizienten h an der Wandoberfläche geht hervor, dass bei einem höheren h die Oberflächentemperatur niedriger wird. Die Oberflächentemperatur sinkt dabei bei einem h von 12 W/m²K um rund 1,2 K (siehe 4.5.3 „Parameterstudie mit 2D Simulation“). Gemäß der PIV-Messung (siehe 4.4.3 Berechnung der konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten) ergeben sich im Bereich des Heizrohres höhere konvektive h_c, die hier zusammen mit den Einflüssen des realen Bauteilaufbaus als eine Ursache für die etwas höhere gemessene Temperaturdifferenz im Vergleich zur mit Simulation ermittelten Temperaturdifferenz angesehen werden kann.

4.7.5 Überprüfung der Simulation an weiteren Temperieranlagen

Die an den Heizschleifen im Messraum der Alten Schäfflerei durchgeführten Untersuchungen ergeben einen sehr niedrigen Wärmeübergangskoeffizienten α_{HL} vom Heizmittel an das Mauerwerk. Die Sockelschleife (HL1) und die Brüstungsschleife (HL2) wurden dabei unabhängig voneinander von unterschiedlichen Handwerkern eingebaut. Für beide Heizschleifen liegt mit einem Wärmeübergangskoeffizienten α_{HL} von 75 W/m²K bei quadratischer Modellierung des Heizrohres und rein thermischer Berechnung die berechnete Wärmeabgabe sehr nahe an der messtechnisch ermittelten Wärmeabgabe. Die hohe Temperaturdifferenz zwischen Heizmitteltemperatur und maximaler Oberflächentemperatur wird auch bei anderen Temperieranlagen festgestellt. Die aus der Simulation berechneten Temperaturdifferenzen ergeben ebenfalls eine hohe Übereinstimmung zu den Messwerten. Nachfolgend erfolgt nun die Überprüfung der Wärmeabgabe an den sehr unterschiedlichen Temperieranlagen und Außenwandaufbauten der Fallstudien Fischerweber Hof in der Glentleiten und dem Stadtmuseum Bad Reichenhall.

Feldstudie Freilichtmuseum Glentleiten [Bichlmair 2016e]

Die gemessene Wärmeabgabe der Temperierschleife im Fischerweber Hof ist vergleichsweise gering. Wie in der Parameterstudie dargestellt, wird durch den Einsatz einer Wärmedämmung die Wärmeabgabe reduziert. Der Wandaufbau ist gut dokumentiert und kann dadurch realitätsnah in der Simulation abgebildet werden. Berechnet wird der Regelquerschnitt der Außenwand, der nahezu auf die gesamte Einbaulänge zutrifft. Es wurde eine Wärmestrommessung an der Außenwand durchgeführt. Der gemessene Wärmedurchlasswiderstand R entspricht innerhalb der Messgenauigkeit dem aus den Materialspezifikationen des Mauerwerksziegels berechneten Wärmedurchlasswiderstands und wird mit R 0,48 m²K/W in der Simulation implementiert. Dies entspricht einem λ des Mauerwerks von rund 0,83 W/mK. Die Heizschleife wird entsprechend dem Einbau mit einem Abstand zwischen den Rohren von 50 mm und einem Rohrdurchmesser von 15 mm (DN 15) abgebildet. Die Wärmedämmung aus Mineralwolle ist 8 cm hoch und 2 cm dick und liegt direkt hinter den Heizrohren. Die Putzüberdeckung beträgt 1 cm. Die Randbedingungen werden mit T_e 0 °C und T_i 15 °C bei einer Heizmitteltemperatur von T_m 40 °C angesetzt. Es wird ein Wärmeübergangskoeffizient α_{HL} vom Heizmittel zum Mauerwerk von 75 W/m²K verwendet. In Bild 131 ist das berechnete Ergebnis den Mittelwerten der Messwerte bzw. der approximierten Funktion der Messwerte gegenübergestellt (siehe auch Anhang A). Mit dem Wärmeübergangskoeffizient α_{HL} von 75 W/m²K liegt die berechnete Wärmeabgabe sehr nahe an den gemessenen Werten.

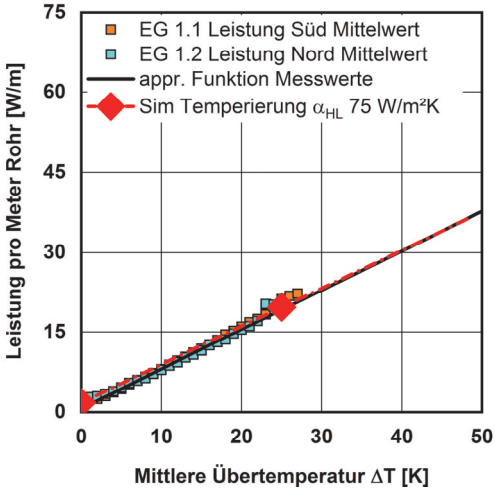


Bild 131: Simulation der unter Putz verlegten Bauteiltemperierung mit Wärmedämmung im Regelquerschnitt der Außenwand im Fischerweber Hof. Die berechnete Wärmeabgabe liegt nahe an der approximierten Funktion der Messwerte.

Feldstudie Stadtmuseum Bad Reichenhall [Bichlmair 2016b]

Die Leistungsmessungen der Temperierschleifen in Bad Reichenhall zeigen im Vergleich zu der Temperierschleife im Fischerweber Hof eine äußerst hohe Wärmeabgabe. Zum einen liegen die Heizrohre im Fischerweber Hof in engem Abstand zueinander und sind mit Wärmedämmung hinterlegt. Zum anderen wird eine deutlich höhere Wärmeleitfähigkeit vermutet. Wie in der Parameterstudie festgestellt, wird die Wärmeabgabe, neben der geometrischen Anordnung im engen Abstand, am deutlichsten durch die Wärmeleitfähigkeit bzw. den Wärmedurchlasswiderstand des Mauerwerks beeinflusst. Messdaten zum Wärmedurchlasswiderstand liegen nicht vor. Die Temperierschleife wird entsprechend der Einbaudokumentation in der Simulation angeordnet mit einer Putzüberdeckung von 10 mm und einem Rohrdurchmesser von 15 mm (DN 15). Um eine Wärmeabgabe entsprechend der gemessenen Wärmeabgabe (siehe Anhang A) aus der Simulation zu erhalten, wird der Wärmedurchlasswiderstand der Außenwand angepasst. Die Randbedingungen werden ebenfalls mit T_e 0 °C und T_i 15 °C bei einer Heizmitteltemperatur von T_m 40 °C angesetzt. Es wird ein Wärmeübergangskoeffizient α_{HL} vom Heizmittel zum Mauerwerk von 75 W/m²K verwendet. Die Berechnung erfolgte lediglich im Regelquerschnitt der Außenwand ohne Berücksichtigung anderer Einbausituationen der Temperierschleife. Im Obergeschoss wurde nur die Situation an der Brüstung betrachtet. Die mögliche Abweichung mit Berücksichtigung der anderen Einbausituationen im Fensterbereich bzw. entlang von Innenwänden wird anhand der Untersuchungen zum Einfluss der Mauernische auf die Gesamtwärmeabgabe im Messraum der Alten Schäfflerei auf wenige W/m geschätzt und wird für diese Betrachtung als untergeordnet angesehen. In Bild 132 sind die berechneten Ergebnisse für die Brüstung im Obergeschoss sowie für das Sockelrohr im Erdgeschoss den Näherungsfunktionen aus den Messwerten gegenübergestellt. Die berechneten Werte liegen trotz der unterschiedlichen Einbausituation (Sockel bzw. Brüstung) nahe beieinander. Aus der Berechnung ergibt sich für das Erdgeschoss ein Wärmedurchlasswiderstand R von 0,53 m²K/W und für das Obergeschoss ein R von 0,45 m²K/W. Dies entspricht einer Wärmeleitfähigkeit λ des Mauerwerks im Erdgeschoss und Obergeschoss von rund 1,8 W/mK.

Da bei diesem Beispiel zwei Unbekannte (R und α_{HL}) vorliegen, die angepasst wurden, liegt hier keine eindeutige Bestätigung der Annahme eines α_{HL} von 75 W/m²K vor. Jedoch ergibt sich eine realistische Wärmeleitfähigkeit für das Mauerwerk, was als Hinweis für ein richtiges α_{HL} gedeutet werden kann.

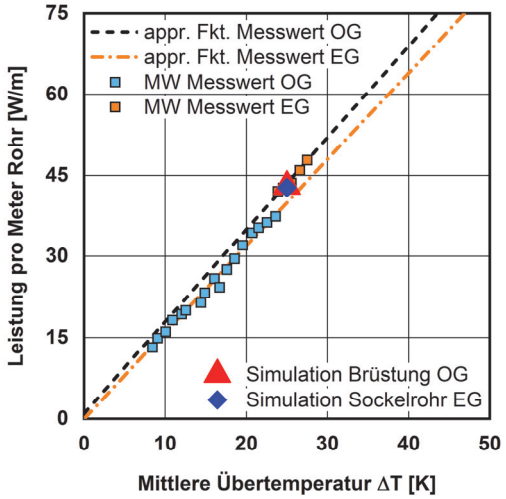


Bild 132: Simulation der unter Putz verlegten Bauteiltemperierung im Regelquerschnitt der Außenwand im Stadtmuseum Bad Reichenhall. Die berechnete Wärmeabgabe liegt nahe an der approximierten Funktion der Messwerte.

Fazit

Die rechnerische Implementierung der unterschiedlichen Mauerwerksaufbauten und angeordneten Temperierschleifen liefert mit dem gewählten Ansatz der Modellierung überzeugende Ergebnisse an beiden Fallstudien. Ein Wärmeübergangskoeffizient α_{HL} von 75 W/m²K bei quadratischer Modellierung des Heizrohres und rein thermischer Berechnung ergibt eine zuverlässige Berechnung der Wärmeabgabe.

4.7.6 Rechnerische und messtechnische Ermittlung der Energieeffizienz der Bauteiltemperierung im Messraum

In dem Kapitel 4.3.2 „Vergleichsmessung im Fraunhofer-Zentrum in der Alten Schäfflerei" (ab Seite 65) wurde die unter Putz verlegte Temperierung (Bauteiltemperierung) vergleichend hinsichtlich der Energieeffizienz untersucht. Der Messraum wurde mit Temperierung und im Vergleich dazu mit elektrischem Heizkörper (ohne Temperierung) betrieben und dabei ein sehr hoher zusätzlicher Heizenergiebedarf festgestellt. Im Ergebnis wird für die Beheizung des Raumes auf 20 °C durch die Temperierung rund 66 % mehr erforderliche Wärmeenergie festgestellt [Kilian et al 2015].

Es wird hier angenommen, dass der unterschiedliche Heizenergiebedarf bei der Vergleichsmessung ausschließlich durch den zusätzlichen Wärmestrom $\dot{Q}_{e,WH}$ der Temperierung nach außen verursacht wird. Hierzu wurde in der rechnerischen Untersuchung der Parameterstudie das Wärmestromverhältnis der Wärmeabgabe gebildet. Das Wärmeabgabeverhältnis f_{WH} bezieht den von der Temperierung direkt nach außen abfließenden Wärmestrom $\dot{Q}_{e,WH}$ auf den Wärmestrom $\dot{Q}_{i,WH}$ der nach innen wirksam wird. Die von der Temperierung nach innen abgegebenen Wärmemenge $Q_{i,WH}$ entspricht gemäß der Systematik bei [Kilian et al 2015] dabei der abgegebenen Wärmemenge einer Raumbeheizung ohne Kontakt zur Wand, entsprechend der Beheizung mit einer Referenzheizung z.B. einem elektrischen Heizkörper. Aus (Gl. 28) und (Gl. 30) (Seiten 82f) lassen sich folgende Beziehungen ableiten:

(Gl. 39) $$\dot{Q}_{i,WH} = \frac{\dot{Q}_{WH}}{1 + f_{WH}} \quad [\text{W/m}]$$

(Gl. 40) $$\dot{Q}_{e,WH} = \frac{\dot{Q}_{WH}}{1 + f_{WH}} * f_{WH} \quad [\text{W/m}]$$

(Gl. 41) $$1 + f_{WH} = \frac{\dot{Q}_{WH}}{\dot{Q}_{i,WH}} \quad [\%]$$

f_{WH}	[%]	Wärmeabgabeverhältnis
$1 + f_{WH}$	[%]	Wärmeabgabefaktor (Leistungsvergleich)
$\dot{Q}_{e,WH}$	[W/m]	Wärmestromanteil der Temperierung nach außen
$\dot{Q}_{i,WH}$	[W/m]	Wärmestromanteil der Temperierung nach innen
$\dot{Q}_{WH}$	[W/m]	Gesamter Wärmestrom der Temperierung

Die im stationären, d.h. weitestgehend eingeschwungenen Zustand, abgegebene Wärme kann durch das Simulationsmodell mit angepassten Wärmeübergangskoeffizienten α_{HL} zuverlässig mit hoher Genauigkeit berechnet werden. Die daraus ermittelten Wärmeabgabeverhältnisse f_{WH} unterscheiden sich je nach baulicher Situation erheblich.

Neubewertung der Vergleichsmessung im Messraum 3 in Benediktbeuern

Eine nachträglich durchgeführte und umfangreiche Überprüfung der ursprünglichen Messdaten lies eine unzulässige Mittelwertbildung in der Datenaufzeichnung der Volumenstrommessung (Durchfluss) erkennen. In der ursprünglichen Auswertung führte dies zu einer überhöht bewerteten Wärmeabgabe (Kapitel 4.3.2 „Vergleichsmessung im Fraunhofer-Zentrum in der Alten Schäfflerei"). Die unzulässige Mittelwertbildung wurde zwar vor den neuen Einzelmessungen behoben (Kapitel 4.2.4 „Messung der Wärmeabgabe in der Alten Schäfflerei in Benediktbeuern - Einzelmessungen"), die Konsequenzen für die Auswertung der ursprünglichen Vergleichsmessung [Kilian et al 2015] blieben damals aber leider unentdeckt.

Bei der Vergleichsmessung wurde in dem Teilstrang der Brüstungsschleife eine zusätzliche Leistungsmessung durchgeführt. Der Durchflussmesser entspricht dem Typ B mit einer Genauigkeit von ±5 % vom Messwert im Messbereich zwischen 1,6 l/min und 8 l/min. Hieraus kann nur die Wärmeabgabe in der Brüstungsschleife und nicht die Gesamtwärmeabgabe der Temperierung ermittelt werden. Die Leistungsmessung in der Brüstungsschleife wird nun zum Vergleich mit den rechnerischen Untersuchungen der Brüstungsschleife für die Periode der Vergleichsmessung herangezogen. Zusätzlich zum Vergleich der Gesamtwärmeabgabe werden gemäß (Gl. 41) der Gesamtwärmestrom $\dot{Q}_{WH}$ und der Wärmestromanteil nach innen $\dot{Q}_{i,WH}$ aus der Simulation auf die bei der Vergleichsmessung ermittelte Wärmeabgabe der Referenzmessung (elektrischer Heizkörper) bezogen.

Vergleich Messung und instationäre Simulation mit den Randbedingungen der Vergleichsmessung

Der Wandaufbau des Messraumes wird nun mit den Randbedingungen während der Vergleichsmessung thermisch simuliert. Für den Regelquerschnitt der Außenwand wird ein Wärmedurchlasswiderstand R von 0,95 m²K/W verwendet. Das Heizrohr wird quadratisch mit einem Wärmeübergangskoeffizienten α_{HL} von 75 W/m²K modelliert. Die Berechnung erfolgt ausgehend vom eingeschwungenen Zustand des simulierten Bauteilaufbaus. Dazu wird der Bauteilaufbau für ein Jahr mit Stundenzeitschritten mit konstanter Heizmitteltemperatur und den gemessenen Außenklimabedingungen vor der Periode der Vergleichsmessung bei einer gewählten konstanten Raumtemperatur von 20 °C simuliert. Anschließend werden die Messwerte der Außenlufttemperaturen sowie der Vorlauf- und Rücklauftemperaturen der Temperierung während der Vergleichsmessung angesetzt. Für die Raumtemperatur werden für die ersten Tage der Simulation die Messwerte verwendet, da durch einen kurzfristigen Heizungsausfall die Raumtemperatur auf rund 18 °C absank, und im weiteren Verlauf ein konstanter Wert von 20 °C entsprechend dem Mittelwert der Messungen. Die Wärmeströme der Simulation werden für den Regelquerschnitt der Außenwand sowie für die Nische berechnet und gemäß dem Längenverhältnis der Heizleitung ermittelt. Bild 133 zeigt die Ergebnisse der Messung und Simulation für die Brüstungsschleife (HL2). Die berechneten Werte stimmen mit den Messwerten gut überein. Die minütlichen Messwerte sind als stündliche Mittelwerte abgebildet. Die Dynamik der Regelung kann durch die Simulation mit dem gewählten Ansatz jedoch nicht voll nachgebildet werden, da in der Simulation lediglich die Vor- bzw. Rücklauftemperaturen angesetzt werden können und nicht die Auswirkungen eines stark variierenden Durchflusses.

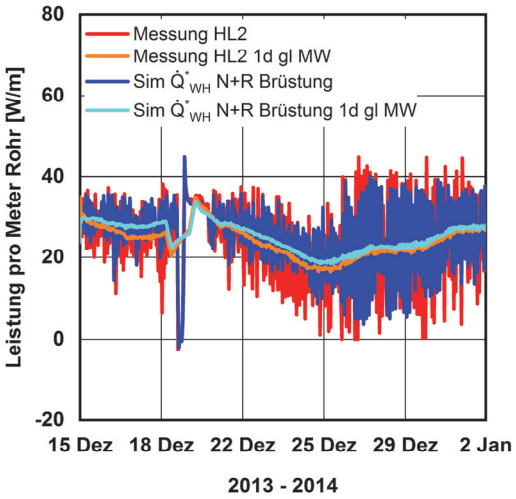


Bild 133: Vergleich der gemessenen Wärmeabgabe der Brüstungsschleife im Messraum mit den aus der Simulation berechneten Wärmeströmen im zeitlichen Verlauf vom 15.12.2013 bis 2.1.2014

Der Vergleich der berechneten Wärmeabgabe mit der Wärmeabgabe der Einzelmessungen unter weitgehend stationären Bedingungen zeigt eine hohe Übereinstimmung bei allen untersuchten Konfigurationen der Temperierung, siehe Kapitel 4.7.3 „Vergleich der Wärmeabgabe der Messung und Berechnung der Außenwand im Messraum mit angepassten Parametern". Zusätzlich wurde gezeigt, dass die Wärmeabgabe an einer anderen Temperieranlage in einem anderen Gebäude ebenfalls zuverlässig berechnet wird, siehe Kapitel 4.7.5 „Überprüfung der Simulation an weiteren Temperieranlagen". Die Wärmeabgabe der unterschiedlichen Anordnungen der Temperierung kann damit verlässlich berechnet werden. Es wird nun die Gesamtwärmeabgabe mit der Anordnung der Temperierung entsprechend der Vergleichsmessung mit Brüstungsschleife und Sockelschleife (HL1+HL2) berechnet. Der Vergleich der berechneten Gesamtwärmeabgabe zu der fehlerbehafteten Messdatenauswertung zeigt die erhebliche Überschätzung der ursprünglich ermittelten Wärmeabgabe, die zu einer Überbewertung des damaligen Leistungsvergleichs [Kilian et al 2015] führte, Bild 134.

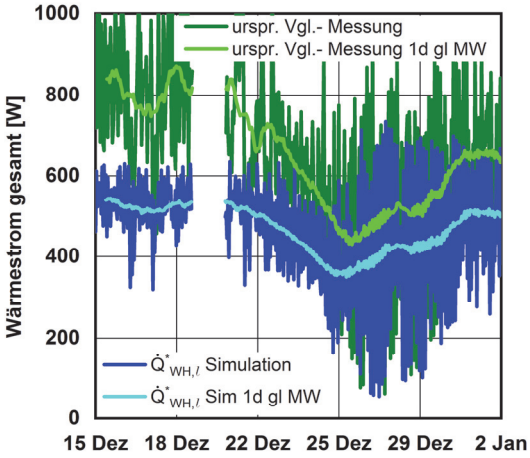


Bild 134: Vergleich der ursprünglich fehlerbehaften Messung der Gesamtwärmeabgabe der Sockel- und Brüstungsschleife im Messraum mit den aus der Simulation berechneten Wärmeströmen mit anteiliger Nische $\dot{Q}^*_{WH,l}$ im zeitlichen Verlauf vom 15.12.2013 bis 2.1.2014

Bewertung der berechneten Wärmeabgabe mit instationären Randbedingungen

Für die Bewertung der instationären Wärmeabgabe beider Heizschleifen (HL1+HL2) und Wärmespeichervorgänge des Bauteilaufbaus wird die berechnete Wärmeabgabe direkt am Rohr

$\dot{Q}^*_{WH}$ ermittelt. $\dot{Q}_{WH}$ und die Wärmestromanteile hingegen werden entsprechend der Systematik der Wärmestromanalyse über die Auswertung der Wärmeströme an der Bauteiloberfläche ausgewertet, siehe Kapitel 4.5.2 „Stationäre Wärmestromanalyse mit 2D Simulation“. Die Dynamik der ermittelten Wärmeabgabe am Rohr entspricht dabei näherungsweise der der Messung. Wie in Kapitel 4.6 „Instationärer Betrieb und Regelverhalten der Bauteiltemperierung“ dargelegt, wirkt sich das Wärmespeichervermögen auf die Wärmeabgabe in den Raum aus und in der Folge auch auf das Wärmeabgabeverhältnis. Das unterschiedliche Verhalten in der Wärmeabgabe am Heizrohr und an der Bauteiloberfläche ist in Bild 135 im zeitlichen Verlauf dargestellt. Die Wärmespeicherfähigkeit des Bauteils führt zu einer deutlich gedämpften Wärmeabgabe an der Oberfläche. Außerdem ist im zeitlichen Verlauf bei abnehmender Wärmeabgabe ein Unterschied in der Höhe der Wärmeabgabe im gleitenden Tagesmittelwert erkennbar.

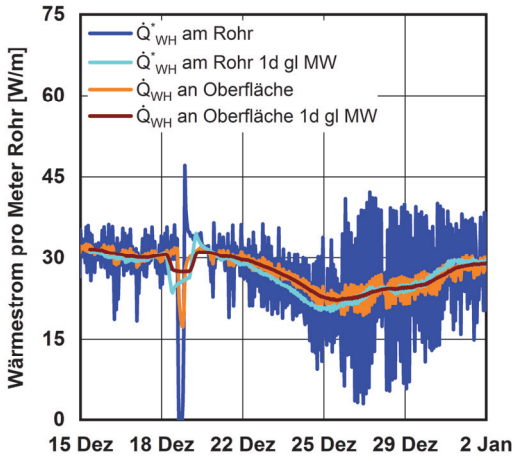


Bild 135: Direkt am Rohr ermittelte Wärmeabgabe $\dot{Q}^*_{WH}$ und aus den Wärmeströmen der Bauteiloberflächen ermittelte Wärmeabgabe $\dot{Q}_{WH}$ aus der Simulation der Brüstungsschleife (Regelquerschnitt + Nische) im zeitlichen Verlauf vom 15.12.2013 bis 2.1.2014

Die Abweichung der Wärmeabgabe, ermittelt am Rohr und an den Oberflächen, erklärt sich aus der Veränderung der gespeicherten Wärmeenergie im Bauteil, wie im Kapitel 4.6 bereits dargelegt. In Bild 136 (linkes Diagramm) ist die Temperaturdifferenz der mittleren Bauteiltemperatur für das gesamte Bauteil ohne Temperierung und mit betrachteter Temperierung für den Zeitraum der Vergleichsmessung vom 15.12.2013 bis 2.1.2014 abgebildet. In dem Zeitraum verringert sich das Niveau der Wärmeabgabe der Temperierung. In der Folge verringert sich in dem Zeitraum die mittlere Temperaturdifferenz des gesamten Bauteils um ca. 0,1 K, es wird vom Bauteil gespeicherte Wärmeenergie entsprechend der Temperaturdifferenz abgegeben (rechtes Diagramm in Bild 136). Die festgestellte Wärmeabgabe an den Bauteiloberflächen ist in diesem Zeitraum dadurch etwas höher als die direkt am Rohr ermittelte Wärmeabgabe. Die Differenz der Wärmeströme entspricht der Wärmeabgabe aus der gespeicherten Wärmeenergie im Bauteil nach innen durch die Absenkung der mittleren Bauteiltemperatur während der Vergleichsmessung.

Bedingt durch die Wärmespeicherung reagieren die Oberflächentemperaturen an der Wandaußenseite deutlich zeitverzögert im Vergleich zu den Oberflächentemperaturen an der Innenoberfläche. Zudem hat sich im betrachteten Zeitraum das Temperaturniveau im Bauteil verringert. Die aus dem Bauteil abgegebene Wärmeenergie beeinflusst das Wärmeabgabeverhältnis und führt hier zu einem etwas ungünstigerem Wärmeabgabeverhältnis. Daraus ergibt sich ein etwas höheres mittleres Wärmeabgabeverhältnis aus den Wärmeströmen an den Bauteiloberflächen $f_{WH,instationär}$ von 26,7 % im Vergleich zu dem Wärmeabgabeverhältnis im eingeschwungenen Zustand (Regelquerschnitt + Nische) f_{WH} von 25,1 %, siehe Bild 137.

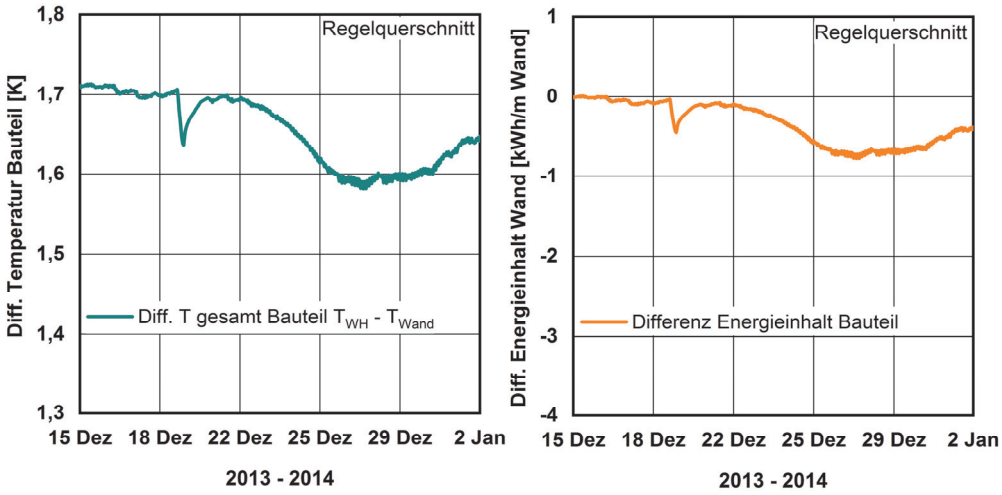


Bild 136: Temperaturdifferenz der mittleren Gesamttemperatur des Regelquerschnittes mit und ohne Temperierung (linkes Diagramm). Aus der Temperaturdifferenz ergibt sich eine Differenz der im Bauteil gespeicherten Wärmeenergie (rechtes Diagramm) für den angegebenen Zeitraum.

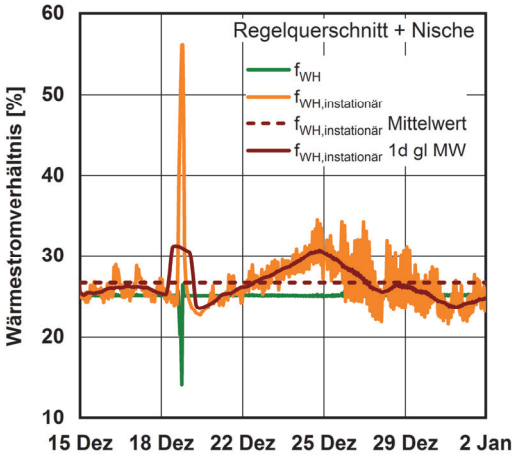


Bild 137: Verlauf der Wärmeabgabeverhältnisse aus der Simulation für die gesamte Sockel- und Brüstungsschleife (HL1+HL2) mit anteiliger Wandnische. Das Wärmeabgabeverhältnis $f_{WH,instationär}$ ist für den betrachteten Zeitraum, ermittelt aus den Wärmeströmen an den Bauteiloberflächen, mit 26,7 % höher im Vergleich zum Wärmeabgabeverhältnis f_{WH} im eingeschwungenen Zustand mit 25,1 %.

Vergleich der Simulation zur Referenzmessung

Gemäß der Systematik der Vergleichsmessung und (Gl. 39) bis (Gl. 41) entspricht der Wärmestrom der Temperierung nach innen $\dot{Q}_{i,WH}$ dem Wärmestrom der Referenz. Zur Überprüfung werden dazu die aus der Simulation nach innen abgegebenen Wärmeströme der Temperierung $\dot{Q}_{i,WH}$ für den Vergleichszeitraum 15.12.2013 bis 2.1.2014 gemäß [Kilian et al 2013] bilanziert und mit der Referenzmessung verglichen. Bezogen auf die Referenzmessung (el. Heizkörper 100 %) ergibt sich für die Wärmeabgabe aus der Simulation nach innen $\dot{Q}_{i,WH}$ rund 102,9 % für die ausgewertete Periode und damit eine gute Übereinstimmung zur Referenz. Wertet man den von der Temperierung abgegebenen Wärmestrom aus der Simulation in gleicher Weise aus, ergibt sich aus dem Leistungsvergleich zur Referenz 128,8 % und damit ebenfalls eine gute Übereinstimmung zum stationär bzw. instationär ermittelten Wärmeabgabefaktor.

Fazit

Die vorangegangenen Untersuchungen und Vergleiche der Simulation mit den Einzelmessungen unter weitestgehend stationären Randbedingungen ergaben für alle Anordnungen der Temperierung jeweils eine gute Übereinstimmung. Ebenso konnte die Wärmeabgabe einer

Temperieranlage in einem anderen Gebäude im Vergleich zu den Messergebnissen mit guter Genauigkeit bestätigt werden. Die instationäre Simulation der Wärmeabgabe der Brüstungsschleife mit den gemessenen Randbedingungen ergibt im Vergleich zur parallel zur ursprünglichen Vergleichsmessung durchgeführten Leistungsmessung der Brüstungsschleife ebenfalls eine gute Übereinstimmung. Die instationäre Betriebsweise wirkt sich nicht auf die Wärmeabgabe der Temperierung am Heizrohr aus. Durch das Wärmespeicherverhalten der Wand kommt es jedoch zu einer verzögerten und stark gedämpften Wärmeabgabe an der Bauteiloberfläche. Der instationäre Betrieb (Regelung) der Temperierung wirkt sich für die untersuchten Fälle auf das Wärmeabgabeverhältnis bzw. den Wärmeabgabefaktor aus. Wird das Temperaturniveau der Heizleitung gesenkt ändert sich auch das Temperaturniveau im Bauteil. Dadurch wird eingespeicherte Wärmeenergie zusätzlich abgegeben. Erfolgt eine Bilanzierung bei unterschiedlichem Temperaturniveau des Bauteils zwischen Anfangs- und Endzustand ergibt sich durch die Differenz der Energieänderung ein verzerrtes Bild.

Die instationäre Simulation der nach innen abgegebenen Wärmeströme der Temperierung mit der Betriebsweise während der Vergleichsmessung ergibt im Vergleich zur Referenzmessung mit elektrischem Heizkörper nach der Bilanzierungsmethode gemäß [Kilian et al 2015] eine gute Übereinstimmung. Damit entspricht das in dieser Arbeit definierte Wärmeabgabeverhältnis bzw. der Wärmeabgabefaktor der in [Kilian et al 2015] beschriebenen Energieeffizienz.

4.8 Energieeffizienz unterschiedlicher Temperieranlagen und Optimierungspotential

Wie im vorhergehenden Kapitel dargelegt, entspricht die Energieeffizienz einer Temperieranlage im Vergleich zu einer Referenzbeheizung dem Wärmeabgabeverhältnis f_{WH} bzw. Wärmeabgabefaktor. Die für die Bauteiltemperierung in der Alten Schäfflerei durchgeführte Vergleichsmessung bzw. Referenzmessung sowie exemplarisch ausgewählte Berechnungen der Wärmeabgabeverhältnisse der unterschiedlich angeordneten Heizleitungen im eingeschwungenen Zustand sind in Bild 138 als Balkendiagramm abgebildet.

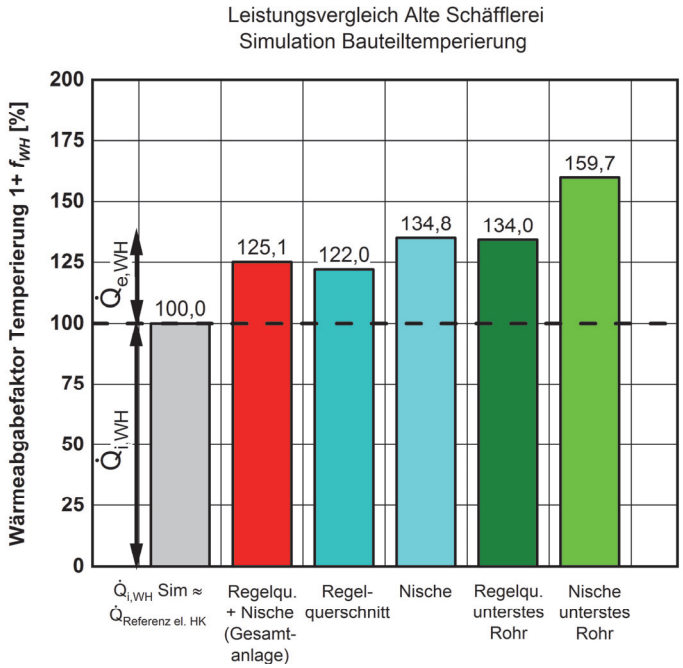


Bild 138: Wärmeabgabefaktor (Energieeffizienz) der unterschiedlich angeordneten Temperierleitungen in der Alten Schäfflerei im Vergleich zur Referenzmessung bzw. einer idealisierten Raumbeheizung

Die berechneten Werte sind aus Tabelle 22 bis Tabelle 25 (Seiten 131 bis 133) entnommen. Der Wert für die Bauteiltemperierung bezieht sich auf die Temperieranlage mit Sockel- und Brüstungsschleife entsprechend der Betriebsweise der Vergleichsmessung, berechnet mit einem Wärmedurchlasswiderstand von R 0,95 m²K/W im Regelquerschnitt und unter Berücksichtigung der anteiligen Mauernische. Zusätzlich sind die Wärmeabgabeverhältnisse für den Regelquerschnitt mit R 0,91 m²K/W und der Wandnische R 0,44 m²K/W dargestellt sowie die Wärmeabgabeverhältnisse für das untere Sockelrohr für den Regelquerschnitt und Nische.

Der durch die Temperierung nach innen abgegebene Wärmestromanteil $\dot{Q}_{i,WH}$ entspricht dabei der Wärmeabgabe einer idealen Heizung im Raum. Der durch die Temperierung direkt nach außen abgegebene Wärmestromanteil $\dot{Q}_{e,WH}$ wird zusätzlich abgegeben und bestimmt damit die Effizienz zu einer idealen Heizung im Raum. In [König 1980] wurde der Wärmeverlust von Warmwasserheizkörpern in Mauernischen untersucht. Es wurden typische Einbausituationen in Mauernischen mit den für die damalige Bauweise typischen U-Werten herangezogen, die in etwa vergleichbar sind mit historischen Gebäuden. Dabei wird eine zusätzliche Wärmeabgabe der Heizkörper infolge des Strahlungsaustausches mit dem Mauerwerk in der Nische von rund 7 % festgestellt. In dem Diagramm in Bild 139 ist zum Vergleich die ermittelte Energieeffizienz von Heizkörpern in typischer Altbausituation mit eingetragen. Zu der Effizienz der Temperierung der Alten Schäfflerei sind die rechnerisch ermittelten Werte für die Fallstudien Koster Aldersbach, Fischerweber Hof und Stadtmuseum Bad Reichenhall abgebildet.

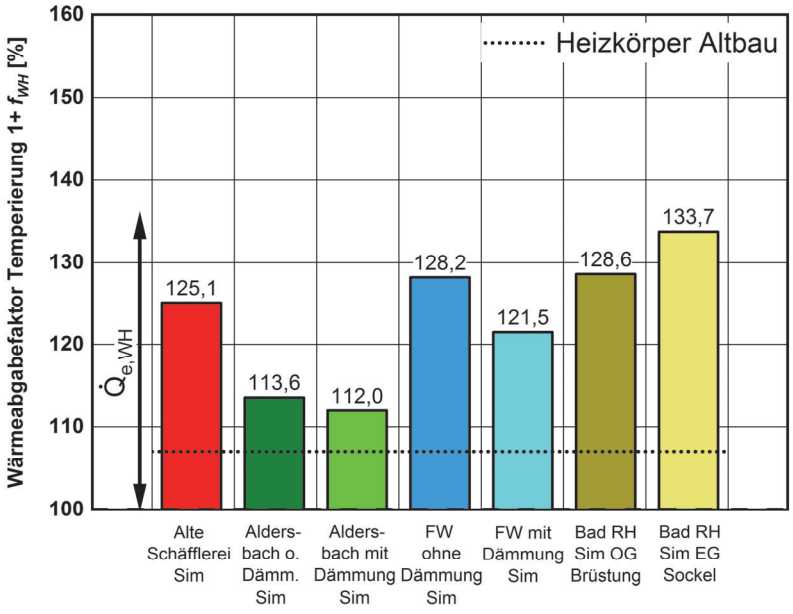


Bild 139: Berechnete Energieeffizienz (Wärmeabgabeverhältnis) der Temperieranlagen in der Alten Schäfflerei, Kloster Aldersbach, Fischerweber Hof Glentleiten (FW) und Stadtmuseum Bad Reichenhall

Bei der Fallstudie Aldersbach wurde in einer vergleichenden Untersuchung die Wirkung einer Wärmedämmung messtechnisch erfasst und rechnerisch ermittelt. Da das Mauerwerk bereits einen für traditionelle Gebäude günstigen Wärmewiderstand aufweist, verbessert die realisierte Wärmedämmung hinter dem Heizrohr, mit einer Breite von 4,5 cm und einer Dicke von 2 cm, das Wärmeabgabeverhältnis nur um rund 12 % und damit den Wärmeabgabefaktor lediglich um 1,4 %.

Die neben der Alten Schäfflerei am besten untersuchte Fallstudie ist der Fischerweber Hof in der Glentleiten. Die rechnerisch ermittelte Wärmeabgabe deckt sich mit der messtechnisch festgestellten Wärmeabgabe bei vor Ort erfassten Randbedingungen und Wärmedurchlasswiderstand. In der rechnerischen Untersuchung wurde auch eine Variante ohne Wärmedämmung zum Vergleich berechnet. Der Wärmedurchlasswidertand R der Wand beträgt 0,48 m²W/K

bzw. der Wärmedurchgangskoeffizienten U 1,54 W/m²K und ist damit deutlich ungünstiger im Vergleich zur Fallstudie Aldersbach. Die im Fischerweber Hof eingebrachte Wärmedämmung ist dabei durchgehend hinter der Schleife angeordnet und hat eine Abmessung von rund 8 x 2 cm². Die so angeordnete Wärmedämmung, zusammen mit dem niedrigeren Wärmedurchlasswiderstand der Außenwand, führt zu einer Verbesserung des Wärmeabgabeverhältnisses um rund 24 %.

In der Fallstudie Bad Reichenhall wurden zwei unterschiedlich angeordnete Heizrohre rechnerisch untersucht. Ein im Brüstungsbereich angeordnetes Heizrohr im Obergeschoss und ein Heizrohr im Sockelbereich im Erdgeschoss. Der Wärmedurchlasswiderstand R ist mit 0,53 m²K/W im Erdgeschoss und 0,45 m²K/W im Obergeschoss trotz der Wanddicken von 95 cm bzw. 80 cm eher niedrig. Dementsprechend ergeben sich im Vergleich zu den anderen Temperieranlagen höhere Werte für den Wärmeabgabefaktor. Dabei entspricht das Wärmeabgabeverhältnis im Obergeschoss in etwa dem Wärmeabgabeverhältnis im Fischerweber Hof ohne Wärmedämmung, da hier nahezu gleiche Wärmedurchlasswiderstände vorliegen.

Optimierungspotential der Bauteiltemperierung

Vergleicht man die Wärmeabgabeverhältnisse bzw. Energieeffizienz der unterschiedlichen Temperieranlagen bzw. Einzelschleifen fällt auf, dass die im Sockelbereich angeordnete Heizleitung ein deutlich ungünstigeres Wärmeabgabeverhältnis hat. Die direkt in der Wand-Boden-Ecke angebrachte Heizleitung erreicht bei den untersuchten Fällen Werte von knapp 160 %. Bei Anordnung der Heizleitung oberhalb des unmittelbaren Eckbereichs verringert sich der Wert deutlich, die zusätzlichen Verluste sinken damit. Liegen keine feuchtetechnischen Probleme oder andere konservatorische Gründe vor, ist eine Anordnung oberhalb des unmittelbaren Wand-Eckbereichs aus Effizienzgründen vorzuziehen. Eine zusätzliche Wärmedämmung kann, je nach Wärmeleitfähigkeit bzw. Wärmedurchlasswiderstand der Außenwand, zu einer deutlichen Verringerung der direkten Wärmeverluste $\dot{Q}_{e,WH}$ führen. Dabei können Leitungsführungen in thermische ungünstigen bauliche Strukturen, wie Mauerwerksnischen oder Fensterlaibungen, je nach Längenanteil die Effizienz verschlechtern. Insbesondere an diesen thermischen Schwachstellen sollte, soweit dies aus denkmalpflegerischen, feuchtetechnischen oder konservatorischen Gründen möglich ist, eine zusätzliche, in der Dimensionierung sinnvoll mögliche, Wärmedämmung hinter dem Heizrohr in Erwägung gezogen werden.

4.9 Messung und Berechnung der auf Putz verlegten Temperierung - Fallbeispiele

Die Wärmeabgabe der Heizleitung ohne Kontakt zur Wand entspricht dem bekannten luftumspülten Heizrohr. Nachfolgend werden die Messungen und Berechnungen zur auf Putz verlegten Temperierung mit Wandkontakt dargestellt, die ergänzend zu den Hauptuntersuchungen zur Bauteiltemperierung durchgeführt werden.

4.9.1 Temperierung ohne Kontakt zur Wand (luftumspültes Heizrohr)

Heizleitungen, die auf Putz ohne Kontakt zur Wand verlegt werden, entsprechen dem luftumspülten Heizrohr. Für luftumspülte Rohre existieren Berechnungsmöglichkeiten, die in einschlägiger Literatur veröffentlicht sind, siehe hierzu 2.3.2 „Wärmeleistung eines luftumspülten Heizrohres“. Die Messungen der Wärmeabgabe in der Feldstudie Depot Schweinfurt mit auf

Putz montierter Heizleitung ohne Wandkontakt entsprechen in guter Näherung den berechneten Werten, siehe Kapitel 4.2.2 „Feldstudien mit globaler Abschätzung der Wärmeabgabe".

4.9.2 Heizrohr mit Kontakt zur Wand

Rechnerische Untersuchung am Beispiel Fränkisches Museum Feuchtwangen [Bichlmair et al 2016d]

Das Fränkische Museum in Feuchtwangen wurde bereits 1926 eröffnet. Die Untersuchungen werden in dem spätmittelalterlichen Gebäudeteil im 1. Obergeschoss durchgeführt. Die Temperierung wurde im Jahr 2008 im Obergeschoss auf Putz auf der Sockelleiste mit Kontakt zur Wand eingebaut. Die thermische Wirkung der auf Putz montierten Heizleitung wird in einer zweidimensionalen Bauteilsimulation rechnerisch nachvollzogen. Zur Bestimmung der lokalen Wärmeübergangskoeffizienten h von der Temperierung an die Raumluft und von der Temperierung an die Außenwand α_{HL} werden die beiden Parameter angepasst, bis die Oberflächentemperatur an der Wand mit den gemessenen Oberflächentemperaturen (IR-Messung) übereinstimmt. In Bild 140 ist das Simulationsmodell als vertikaler Bauteilschnitt abgebildet. Zusätzlich sind die Randbedingungen für die Umgebungstemperatur und Heizleitungstemperatur während der IR-Messung sowie die Wärmeströme an der Außenwandoberfläche mit und ohne Temperierung eingetragen. Der rote Punkt zeigt schematisch die Position der Temperierung. Die Heizleitung wurde in der Simulation als Randbedingung, d.h. als Wandabschnitt mit einer Höhe des Rohrdurchmessers implementiert, um vor allem den Einfluss auf die Wand zu untersuchen. Die Wärmeabgabe an die Raumluft entspricht dadurch nicht den tatsächlichen Verhältnissen eines Heizrohres und kann deshalb nur eingeschränkt bewertet werden. Die Wärmeabgabe durch Wärmeleitung an das Bauteil ist hingegen realitätsnah modelliert.

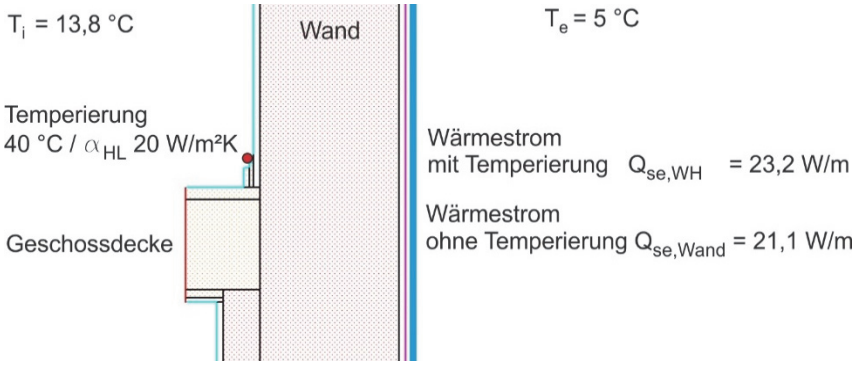


Bild 140: Simulationsmodell der Außenwand auf Höhe der Geschossdecke am Beispiel Fränkisches Museum. Mit eingezeichnet und angegeben sind die gemessenen Randbedingungen und das Berechnungsergebnis zum Wärmestrom nach außen ohne Temperierung $\dot{Q}_{se,Wand}$ und mit Temperierung $\dot{Q}_{se,WH}$.

Die rechnerisch ermittelte Oberflächentemperatur an der Raumseite der Außenwand ist in Bild 141 (linkes Diagramm) abgebildet. Bei einem Kontaktkoeffizienten (α_{HL}) von 20 W/m²K entspricht die berechnete Oberflächentemperatur in etwa der mit IR-Thermographie gemessenen Oberflächentemperatur. Die gemessenen Oberflächentemperaturen sind dabei bis ca. 10 cm über der Heizleitung etwas höher als die berechneten Oberflächentemperaturen. Es wird angenommen, dass auch hier sich die Temperaturerhöhung aus der konvektiven Wirkung der Heizleitung einstellt. Der verwendete Kontaktkoeffizient (α_{HL}) kann als realitätsnah angenommen werden. Mit einem α_{HL} von 15 W/m²K sind die berechneten Oberflächentemperaturen hingegen deutlich niedriger. Durch die Temperierung erhöht sich bei einem α_{HL} von 20 W/m²K der Wärmestrom über die betrachtete Wandhöhe von 21,1 W (ohne Temperierung) auf 23,2 W. In Bild 141 (rechtes Diagramm) sind die berechneten Wärmeströme an der Außenoberfläche der Wand abgebildet.

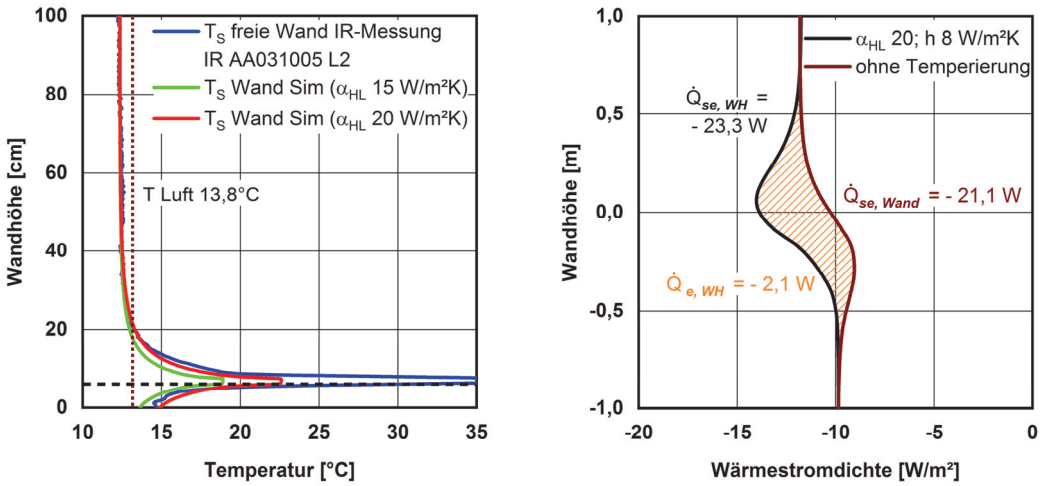


Bild 141: Links: Berechnete Oberflächentemperaturen der 2D Simulation mit unterschiedlichen Parametern im Vergleich zu der mit Thermographie gemessenen Oberflächentemperatur. Rechts: Wärmestrom an der Außenoberfläche aus der Simulation. Der Wärmestroma $\dot{Q}_{e,WH}$ (orange) ist der durch die Temperierung zusätzlich verursachte Wärmestrom zu $\dot{Q}_{se,Wand}$ ohne Temperierung.

Vergleich Messung und Rechnung am Beispiel Fischerweber Hof am Freilichtmuseum Glentleiten

Die Wärmeabgabe eines horizontalen Zylinders (Heizrohr) in einer adiabaten Wand-Bodenecke wurde in [Sparrow 1984] untersucht. Bei sehr geringem Abstand von 1/12 des Zylinderdurchmessers, bei einem Rohr DN 15 beträgt der Abstand damit 1,25 mm, verringert sich die Wärmeabgabe um rund 40 % gegenüber der Wärmeabgabe des freien luftumspülten Zylinders. Bei der auf Putz verlegten Temperierung mit Wandkontakt wird jedoch das Heizrohr (Zylinder) mit mehr oder weniger engem Kontakt in der Wandecke befestigt. Die Wand bzw. der Boden ist dabei nicht adiabat, sondern leitet Wärme ab. Durch den höheren Strahlungswärmeübergangskoeffizienten bei sehr engen Abständen und durch die direkte Wärmeleitung bei Kontakt mit der Wand erhöht sich offensichtlich wieder die Wärmeabgabe. In Bild 142 ist die gemessene Wärmeabgabe des mit auf Putz mit Wandkontakt montierten Heizrohres abgebildet. Für die Darstellung der Messwerte siehe Anhang A. Im Vergleich dazu ist die berechnete Wärmeabgabe eines luftumspülten Heizrohres mit im Diagramm eingetragen. Im unteren Temperaturbereich liegen die Werte nahe beieinander.

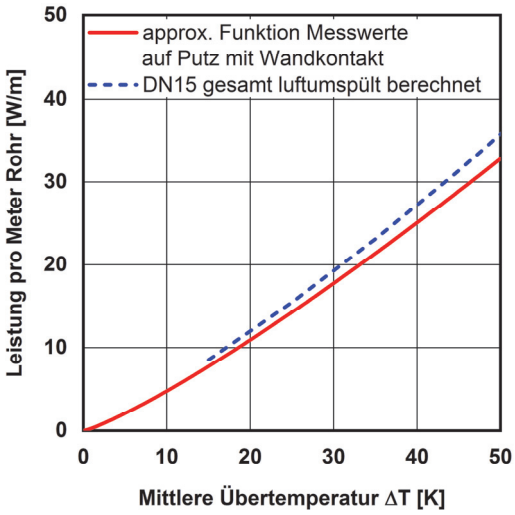


Bild 142: Approximierte Funktion der Wärmeabgabe der auf Putz mit Wandkontakt verlegten Temperierschleife im Obergeschoss des Fischerweber Hofs. Zusätzlich eingetragen ist die berechnete Gesamtwärmeabgabe der Heizleitung als luftumspültes Rohr mit Durchmesser 15 mm (DN 15).

Da die auf Putz montierte Heizleitung im Kontakt mit der Außenwand ist, wird die Wärmeabgabe analog wie die unter Putz verlegte Heizleitung von dieser beeinflusst. Es wird angenommen, dass der Einfluss jedoch geringer ausfällt. Die Außenwand der untersuchten Fallstudie Fränkische Museum besteht aus einer verputzten überwiegend massiven Holzkonstruktion mit einer Dicke von ca. 20 cm und einem relativ niedrigem U-Wert von ca. 0,5 W/m²K. Bei massivem Mauerwerk mit höherem U-Wert würde sich durch den Wandkontakt an der Heizleitung tendenziell eine etwas höhere Wärmeabgabe einstellen.

4.10 Raumklima mit Temperierung

Die in den Feldstudien festgestellten Raumklimata werden in Streudiagrammen dargestellt und bewertet. Die Auswirkungen der Temperierung auf die Klimaverteilung innerhalb eines Raumes werden untersucht und mit den Auswirkungen einer Beheizung mit einem elektrischen Radiator auf das Raumklima verglichen. Aus konservatorischen Gründen ist eine möglichst gleichförmige Klimaverteilung wünschenswert, um ungünstige lokale Mikroklimata zu vermeiden. Auch für die thermische Behaglichkeit ergeben sich Vorteile, wenn ungünstige Temperaturschichtungen vermieden werden können. Bei kombinierter Beheizung mit Temperierung und Radiator werden je nach Anteil der Wärmeabgabe unterschiedliche Klimaverteilungen festgestellt.

4.10.1 Raumklima bei Gebäuden mit Temperierung

In Kapitel 4.1.2 „Typologie der vorgefundenen Temperieranlagen“ sind die unterschiedlichen Temperieranlagen in Tabelle 5 (Seite 35) nach Einsatzarten und Anwendungsfälle beschrieben. Ein wesentliches Merkmal ist dabei die Einteilung nach der Zieltemperatur im Heizfall. Aus den in den Fallstudien festgestellten Raumklimata wurde das aufgestellte Schema in Tabelle 5 abgeleitet. Die Raumklimata sind dementsprechend gemäß Tabelle 5 nach dem Niveau der Beheizung unterteilt. Die Klimadaten werden jeweils für ein komplettes Jahr in einem Streudiagramm dargestellt. Im Anhang B „Raumklima mit Temperierung“ erfolgt eine Beschreibung der Raumklimata mit einer vereinfachten konservatorischen Bewertung der gemessenen relativen Feuchte.

Bei den Gebäuden mit Temperierung werden hinsichtlich der relativen Feuchte im wesentlichen konservatorisch angemessene Raumklimazustände erreicht. Das Raumklima ist nicht nur von der Temperierung sowie ggf. zusätzlich eingesetzte Klimatechnik bestimmt, sondern auch durch weitere Faktoren [Raffler 2015]. Anhand der Fallstudien kann geschlossen werden, dass mit der Temperierung in der Regel ein konservatorisch günstiges Raumklima herstellbar ist. Für eine genauere Analyse der gemessenen Raumklimata hinsichtlich konservatorischer Anforderungen sind jedoch weiterführende Untersuchungen bzw. Bewertungen erforderlich, die hier nicht Gegenstand der Untersuchung sind.

4.10.2 Auswirkungen der Temperierung auf das lokale Mikroklima

Vertikale Temperaturschichtung in der Zollingerhalle Valley [Bichlmair et al 2016l]

In dem Orgelmuseum in Valley ist eine unter Putz verlegte Temperierung verbaut. Zusätzlich wurden in dem unterkellerten Gebäude einzelne Heizrohre in die Betonzwischendecke eingebracht. Für die Stabilisierung der Raumluftfeuchte wird ein Luftbefeuchter eingesetzt. Der Hauptraum der Zollingerhalle umfasst ca. 10,5 m x 19 m und hat eine Höhe von ca. 8,2 m im Giebel des Spitztonnendaches. Die Sensoren wurden vor der Hauptorgel, die sich giebelseitig

vor der Außenwand befindet, in drei Höhen montiert. Zusätzlich erfolgten Raumklimamessung auf der gegenüberliegenden Raumseite. Die vertikale Temperaturschichtung wurde kontinuierlich in einem 10-Minuten Intervall gemessen und für ein Jahr ausgewertet. Es stellt sich über die Raumhöhe zwischen 1,5 m und 6,8 m eine sehr geringe Temperaturdifferenz, im Monatsmittelwert von unter 0,7 K, während der Heizperiode ein. Im Sommer erhöht sich die mittlere Temperaturdifferenz auf 1,1 K, siehe Bild 143. Bei intensiver Nutzung (Orgelkonzert, Bestuhlung für ca. 200 Besucher) treten Spitzen in der stündlichen Temperaturdifferenz, im Winter von bis zu 1,5 K auf. Mit verstärkter Lufterwärmung außen und höherer solarer Einstrahlung erhöht sich die stündliche Temperaturdifferenz im Tagesgang auf bis zu 2,5 K und bei intensiver Nutzung in der Regel auf nicht mehr als 3,2 K.

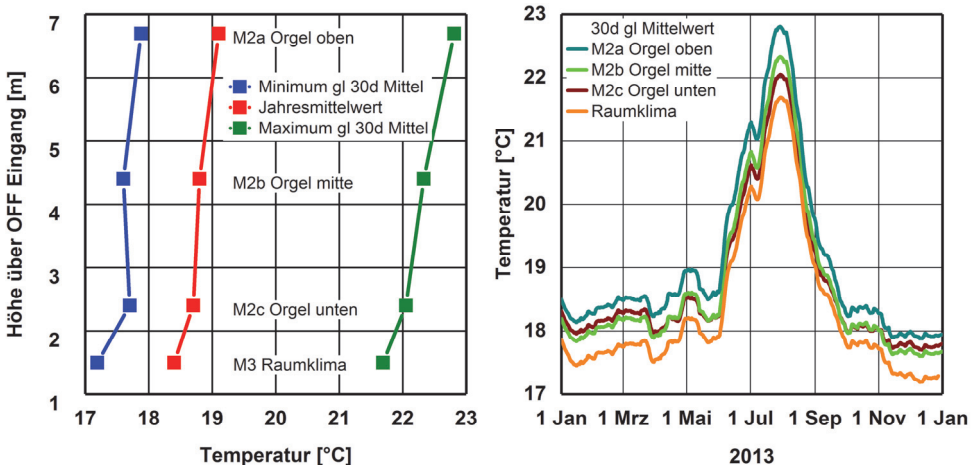


Bild 143: Vertikale Temperaturverteilung in der Zollingerhalle (Orgelmuseum). Die Messwerte wurden entlang der Hauptorgel und auf der gegenüberliegenden Raumseite erfasst. Abgebildet sind der Jahresmittelwert sowie die Extremwerte des gleitenden Monatsmittelwertes der Messwerte (links). Rechts sind die gleitenden Monatsmittelwerte der Temperaturen vom 1.1.2013 bis 1.1.2014 abgebildet.

Temperaturverteilung im Messraum in Benediktbeuern

Für die Vergleichsmessung der Energieeffizienz wurde in den Messräumen auch die Temperaturverteilung erfasst und ausgewertet, siehe [Kilian et al 2015] und kompakter zusammengefasst [Krus et al 2015]. Nachfolgend ist daraus die vertikale Temperaturverteilung in Raummitte mit Beheizung mit Temperierung und Beheizung mit elektrischem Heizkörper abgebildet (Bild 144). Bei der Beheizung mit elektrischem Heizkörper stellt sich ein deutlich größerer vertikaler Temperaturgradient ein im Vergleich zur Beheizung mit Temperierung. Die Temperierung wurde bei diesen Messungen mit Sockelschleife (HL1) und Brüstungsschleife (HL2) betrieben.

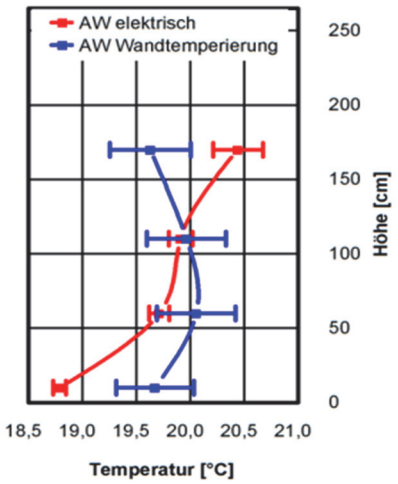


Bild 144: Vertikale Temperaturverteilung in Raummitte im Messraum bei Beheizung mit Temperierung und bei Beheizung mit elektrischem Heizkörper [Kilian et al 2015].

Temperaturverteilung bei gleichzeitigem Betrieb der Temperierung und Radiator im Messraum in Benediktbeuern

Bei den Untersuchungen in Kapitel 4.2.4 zur Wärmeabgabe der Temperierung erfolgte zur Sicherstellung einer Raumtemperatur von 20 °C teilweise eine zusätzliche gleichzeitige Beheizung mit dem elektrischen Heizkörper. Die elektrische Leistung des Heizkörpers wurde ebenfalls erfasst. Die für die Beheizung des Raumes erforderliche Gesamtleistung ergibt sich aus der Wärmeabgabe der Temperierung und des Heizkörpers. Der Radiator ist während der Untersuchungen in der Nähe der seitlichen Innenwand, ca. 2,5 m von der Außenwand entfernt, angeordnet und nicht wie bei der Vergleichsmessung in der Fensternische. Durch die unterschiedlichen Wärmeanteile der Temperierung und des elektrischen Heizkörpers stellen sich unterschiedliche Temperaturverteilungen ein. Betrachtet werden zwei vertikale Messachsen, eine in Raummitte und eine Messachse in Wandnähe mit ca. 0,1 m Abstand zur Außenwand. Um den Strahlungseinfluss weitestgehend zu reduzieren, sind die Sensoren bei der Messung vor der Außenwand mit einer blanken Metallfolie überzogen.

Temperierung mit Sockelschleife (HL1) und elektrischem Heizkörper

In Bild 145 links ist die Wärmeabgabe der beiden Heizeinrichtungen über den Messzeitraum vom 2. - 20.2.2015 abgebildet. Im rechten Diagramm ist die Wärmeabgabe der Temperierung auf einen Meter Heizrohr bezogen. Die Wärmeabgabe der Temperierung wird stufenweise herabgesetzt. Ab dem 4. Februar wird für zwei Tage nur der Radiator zur Beheizung verwendet. Danach erfolgt die Beheizung mit der Sockeltemperierung. Da die in den Raum abgegebene Wärme durch die Sockeltemperierung, zur Aufrechterhaltung von 20 °C Raumtemperatur, nicht ausreicht, heizt der elektrische Heizkörper hinzu. Beide Heizeinrichtungen geben vor der Leistungsreduzierung der Temperierung in etwa eine gleich hohe Wärmeleistung ab. Nach jeweils 2-3 Tagen wird die Wärmeleistung der Sockeltemperierung schrittweise reduziert. Der Radiator erhöht entsprechend dem Wärmebedarf des Raumes die Heizleistung. Über den Messzeitraum variiert außen die Tagesmitteltemperatur zwischen -0,8 °C und -6,0 °C.

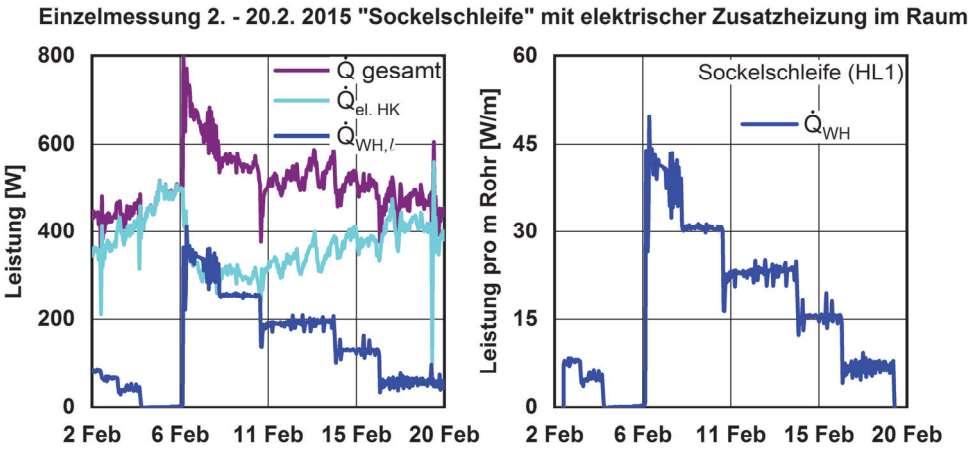


Bild 145: Messung der Wärmeabgabe der Temperierung als Sockelschleife (HL1). Der Messraum wurde für eine konstante Raumtemperatur von 20,2 °C ±0,2 K zusätzlich mit einem elektrischen Radiator beheizt.

In Bild 146 sind die Temperaturverläufe für verschiedene Raumhöhen für den Messzeitraum abgebildet. Links sind die Temperaturverläufe der Messachse vor der Außenwand und rechts die Temperaturverläufe der Messachse in Raummitte abgebildet. Mit ausschließlicher Beheizung mit dem Radiator (ca. 4. - 6 Februar) stellt sich eine vertikale Temperaturdifferenz, zwischen den Sensoren in Höhe von 0,1 m über dem Boden im Vergleich zu 1,7 m, von ca. 2,1 K ein, die vor der Außenwand mit 2,4 K noch etwas größer ist. Mit zusätzlicher Sockeltemperierung mit Wärmeabgabe von rund 50 % der Gesamtwärmeabgabe sinkt die Temperaturdifferenz nach einer Einschwingphase von ca. einem Tag erheblich ab, in Raummitte auf ca. 0,9 K und vor der

Außenwand auf ca. 0,2 K. Mit Verschiebung des Heizleistungsanteils der Temperierung auf nur noch ca. 12 % der Gesamtwärmeabgabe stellt sich immer noch eine deutlich geringere Temperaturdifferenz in der Höhenschichtung ein, siehe Tabelle 26.

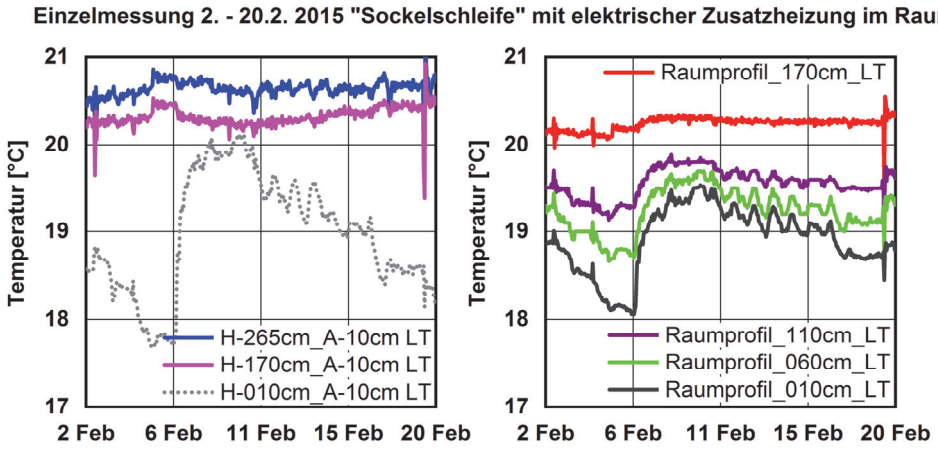


Bild 146: Messung der Temperaturverteilung bei unterschiedlicher Wärmeabgabe der Sockeltemperierung HL1 und des el. Heizkörpers. Der Messraum wird auf eine Raumtemperatur von 20,2 °C ±0,2 K beheizt.

Tabelle 26: Wärmeanteile der Sockeltemperierung und des Heizkörpers mit den dazu ermittelten Differenzen der Temperaturschichtung zwischen 0,1 m und 1,7 m Höhe.

Wärmeabgabe					T Diff. 1,7 m - 0,1 m Höhe	
Gesamt	Temperierung		Radiator		Raummitte	Wandnah
[W]	[W]	[%]	[W]	[%]	[K]	[K]
490	0	0	490	100	2,1	2,4
480	57	12	423	88	1,6	1,7
510	130	25	380	75	1,3	1,3
550	195	35	355	65	1,1	0,9
550	255	46	295	54	0,8	0,3
610	315	52	295	48	0,7	0,3

Temperierung mit Brüstungsschleife (HL2) und elektrischem Heizkörper

Bild 147 zeigt die Wärmeabgabe der beiden Heizeinrichtungen über den Messzeitraum vom 16.2. - 4.3.2015 sowie die Wärmeabgabe der Temperierung auf einen Meter Heizrohr bezogen. Die Wärmeabgabe der Temperierung wird stufenweise heraufgesetzt. Gleichzeitig wird am Heizkörper die Wärmeabgabe über die Raumtemperaturregelung so reduziert bzw. angepasst, dass die Zieltemperatur in Raummitte von 20 °C eingehalten wird. Über den Messzeitraum variiert außen die Tagesmitteltemperatur zwischen -2,6 °C und 4,3°C.

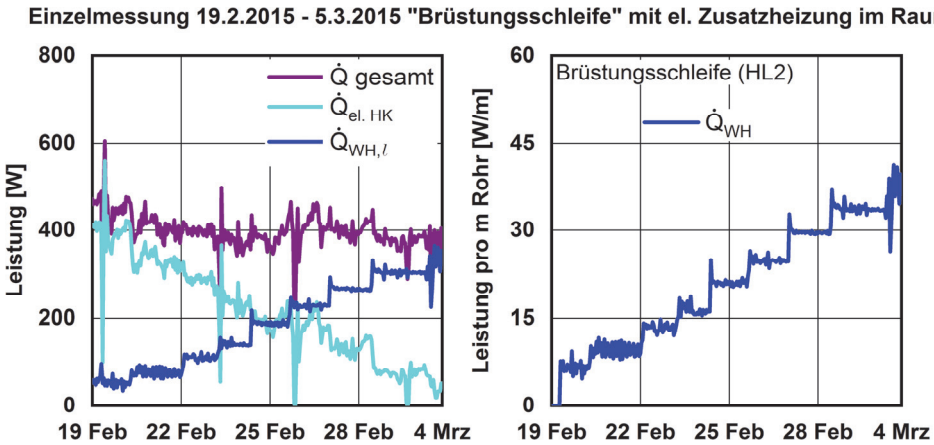


Bild 147: Messung der Wärmeabgabe der Temperierung als Brüstungsschleife (HL2). Der Messraum wurde für eine konstante Lufttemperatur von 20,2 °C ±0,2 K zusätzlich mit einem elektrischen Radiator beheizt.

In Bild 148 sind die Temperaturverläufe für verschiedene Raumhöhen für den Messzeitraum abgebildet. Links sind die Temperaturverläufe der Messachse vor der Außenwand und rechts die Temperaturverläufe der Messachse in Raummitte dargestellt. Bei einem geringen Heizleistungsanteil der Brüstungsschleife tritt bereits eine Verringerung in der Temperaturdifferenz ein, siehe Tabelle 27. Mit zunehmender Wärmeabgabe der Brüstungsschleife sinkt auch hier die Temperaturdifferenz erheblich ab. Bei einem Leistungsanteil von rund ¾ der Gesamtleistung beträgt die Temperaturdifferenz in Raummitte ca. 0,8 K und vor der Außenwand 1,4 K. Zusätzlich sinkt die wandnahe Temperatur im Deckenbereich unter die Raumtemperatur in 1,7 m Höhe.

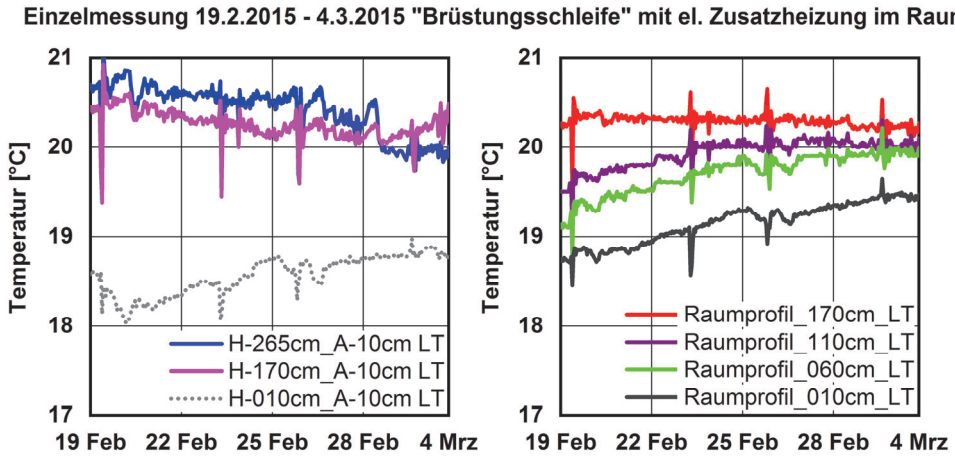


Bild 148: Messung der Temperaturverteilung bei unterschiedlicher Wärmeabgabe der beiden Heizeinrichtungen (Brüstungsschleife HL2 und el. Heizkörper) bei konstanter Raumtemperatur in Raummitte. Der Messraum wurde für eine konstante Raumtemperatur von 20,2 °C ±0,2 K zusätzlich mit einem elektrischen Radiator beheizt.

Tabelle 27: Wärmeanteile der Brüstungsschleife und des Heizkörpers mit den dazu ermittelten Differenzen der Temperaturschichtung zwischen 0,1 m und 1,7 m Höhe.

Wärmeabgabe					T Diff. 1,7 m - 0,1 m Höhe	
Gesamt	Temperierung		Radiator		Raummitte	Wandnah
[W]	[W]	[%]	[W]	[%]	[K]	[K]
470	50	10,6	420	89,4	1,6	2,3
400	80	20,0	320	80,0	1,5	2,0
400	110	27,5	290	72,5	1,3	1,9
370	140	37,8	230	62,2	1,1	1,8
380	190	50,0	190	50,0	1	1,6
395	265	67,1	130	32,9	0,9	1,5
380	300	78,9	80	21,1	0,8	1,4
375	340	90,7	35	9,3	0,8	1,4

Temperierung mit großer Schleife (HL3) und elektrischem Heizkörper

Bild 149 zeigt die Wärmeabgabe der beiden Heizeinrichtungen über den Messzeitraum vom 11. - 16.12.2014 und 11. - 21.1.2015 sowie die Wärmeabgabe der Temperierung auf einen Meter Heizrohr bezogen. Die Wärmeabgabe der Temperierung wird stufenweise herabgesetzt. In dem ersten Zeitabschnitt vom 11. -16. Dezember wird nur die große Heizschleife betrieben. Ab dem 11. Januar wird gleichzeitig mit dem elektrischen Heizkörper hinzugeheizt und die Raumtemperatur auf 20 °C geregelt. Über den Messzeitraum vom 10. - 16.12. und 11. - 17.1. variiert die Tagesmitteltemperatur zwischen 0 °C und 7,1 °C und im Zeitraum vom 17. - 20.1. zwischen 0 °C und -4,1 °C. In Bild 150 sind die Temperaturverläufe für verschiedene Raumhöhen für den Messzeitraum abgebildet. Links sind die Temperaturverläufe der Messachse vor der Außenwand und rechts die Temperaturverläufe der Messachse in Raummitte dargestellt.

Bei der Beheizung nur mit der Temperierung mit großer Schleife (HL3) stellt sich eine sehr geringe vertikale Temperaturschichtung ein. Bei der wandnahen Messung mit 0,1 m Abstand zur Wand auf Höhe von 0,1 m über dem Boden werden sogar gleich hohe bzw. geringfügig höhere Temperaturen im Vergleich zur Raummitte in 1,7 m Höhe festgestellt. Die bodennahe Temperatur in Raummitte ist dabei nur um ca. 0,3 K niedriger, auch mit einem geringen Heizungsanteil des Radiators mit rund ¼ der Gesamtleistung. Im wandnahen Deckenbereich stellen sich dabei in etwa Temperaturen wie in 1,7 m Höhe ein. Erst mit zusätzlicher Beheizung mit dem Radiator erhöht sich die Temperatur an der Messposition 0,1 m unter der Deckenhöhe. Mit einem höheren Heizanteil des Radiators von rund ¾ der Gesamtleistung erhöht sich die Differenz auf 1,2 K in Raummitte und 1,5 K in Wandnähe (0,1 m zur Wand), siehe Tabelle 28.

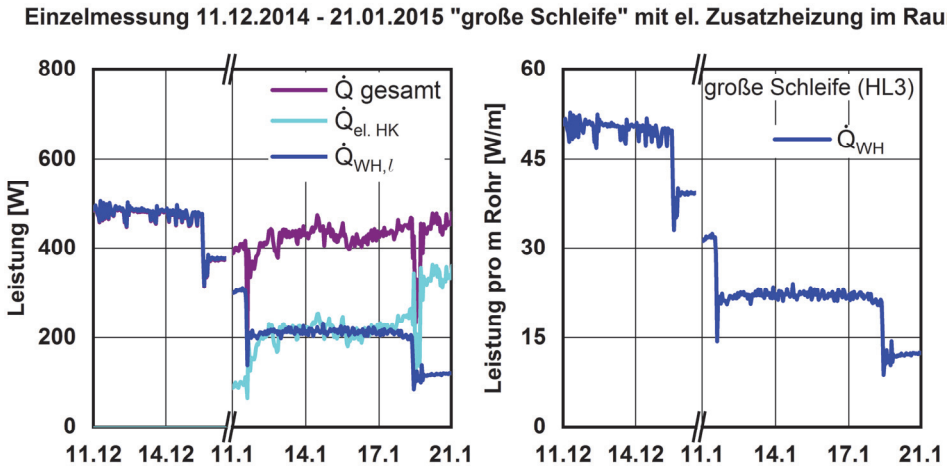


Bild 149: Messung der Wärmeabgabe der Temperierung als große Heizschleife (HL3). Der Messraum wurde für eine konstante Lufttemperatur von 20,2 °C ±0,2 K zusätzlich mit einem el. Radiator beheizt.

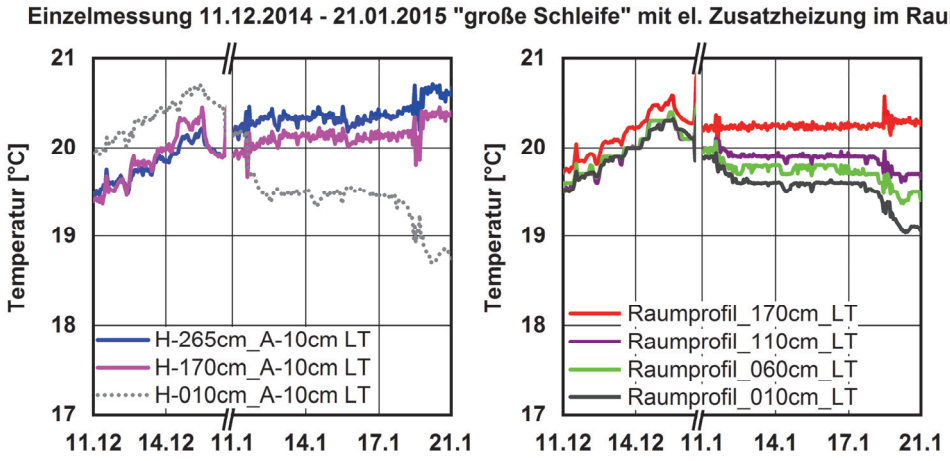


Bild 150: Messung der Temperaturverteilung bei unterschiedlicher Wärmeabgabe der beiden Heizeinrichtungen (große Schleife HL3 und el. Heizkörper) bei konstanter Raumtemperatur in Raummitte. Der Messraum wurde für eine konstante Lufttemperatur von 20,2 ±0,2 K zusätzlich mit einem el. Radiator beheizt.

Tabelle 28: Wärmeanteile der großen Schleife (HL3) und des Heizkörpers mit den dazu ermittelten Differenzen der Temperaturschichtung zwischen 0,1 m und 1,7 m Höhe.

Wärmeabgabe					T Diff. 1,7 m - 0,1 m Höhe	
Gesamt	Temperierung		Radiator		Raummitte	Wandnah
[W]	[W]	[%]	[W]	[%]	[K]	[K]
485	485	100,0	0	0,0	0,3	0
380	380	100,0	0	0,0	0,2	-0,1
400	305	76,3	95	23,8	0,3	0
430	215	50,0	215	50,0	0,6	0,7
450	120	26,7	330	73,3	1,2	1,5

Temperierung und Radiator – Oberflächentemperatur der Außenwand und Einfluss auf die lokale Lufttemperatur

Die gemessenen Lufttemperaturen werden durch die Oberflächentemperatur der Außenwand und der Art der Beheizung beeinflusst. In Bild 151 ist die Innenoberflächentemperatur der Außenwand in einer IR-Thermographie abgebildet. Bei der Raumbeheizung mit einem Radiator in etwa in Raummitte stellen sich im unteren Wandbereich der Außenwand kühlere Oberflächentemperaturen ein (links in Bild 151). In der rechten IR-Aufnahme sind die Oberflächentemperaturen bei Beheizung mit Sockeltemperierung und Radiator abgebildet. Da über die Sockeltemperierung zum einen die Außenwand erwärmt wird und zum anderen konvektiv Wärme abgegeben wird, stellen sich andere lokale Lufttemperaturen im Vergleich zur reinen Beheizung mit einem Radiator ein. Zum direkten Vergleich sind die Temperaturmesswerte der IR-Aufnahme entlang eines Messlineals in dem Diagramm in Bild 152 dargestellt. Zusätzlich ist der Temperaturverlauf für den Betrieb der Temperierung mit großer Schleife (HL3) eingezeichnet. Die Raumtemperatur beträgt bei allen IR-Aufnahmen ca. 20 °C.

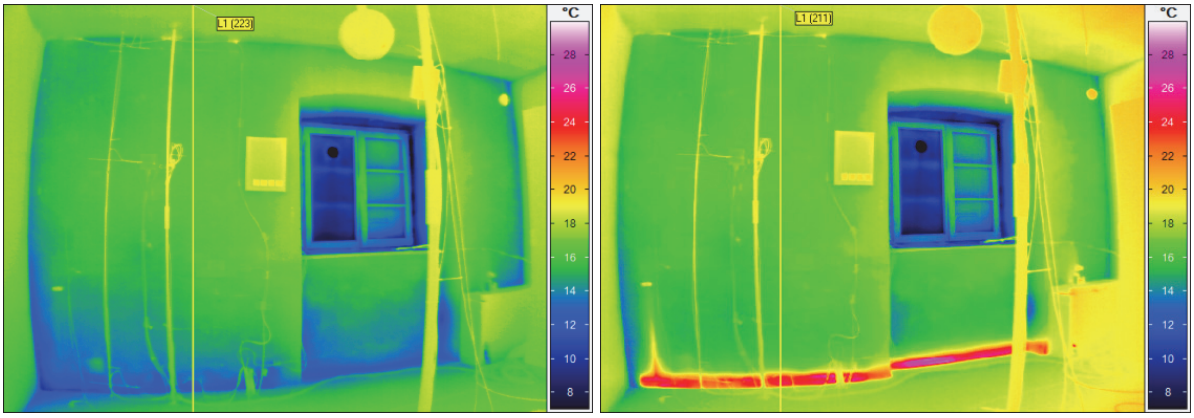


Bild 151: IR-Aufnahme der Innenoberfläche der Außenwand bei Beheizung mit elektr. Heizkörper (links) sowie bei gleichzeitiger Beheizung mit Sockeltemperierung (T_V 30 °C) und elektrischem Heizkörper (rechts).

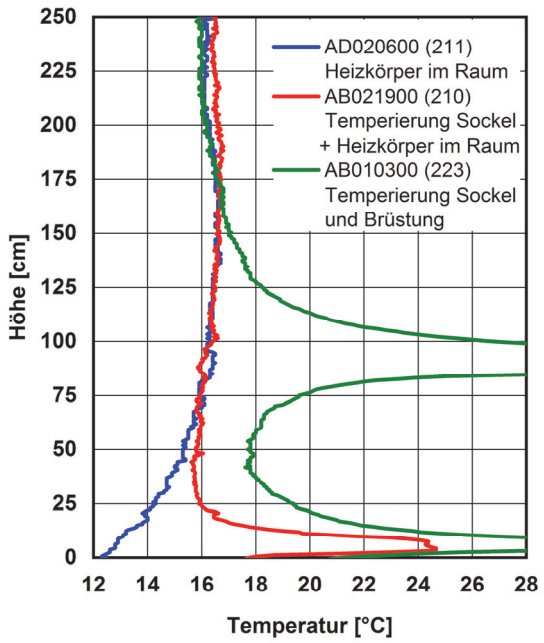


Bild 152: Vertikaler Temperaturverlauf an der Innenoberfläche der Außenwand bei Beheizung mit elektrischem Heizkörper, gleichzeitiger Beheizung mit Sockeltemperierung (HL1, T_V 30 °C) und elektrischem Heizkörper und nur mit Temperierung mit großer Schleife (HL3, T_V 55°C). Der Temperaturverlauf wurde aus IR-Aufnahmen ausgewertet.

Fazit zum lokalen Mikroklima mit Temperierung

Bei Beheizung von Räumen stellt sich eine vertikale Temperaturschichtung über die Raumhöhe ein, die vereinfacht betrachtet vom Wärmedurchlasswiderstand der Bauteile, der Außentemperatur und der Art der Heizflächen abhängt. Die lokale Temperaturschichtung ist im Sockelbereich der Außenwand nochmal stärker ausgeprägt. Bei der Beheizung mit der Bauteiltemperierung stellt sich am Beispiel des Orgelmuseums während der Heizperiode über die betrachtete Raumhöhe zwischen 1,5 m und 6,8 m eine sehr geringe Temperaturdifferenz ein, die im Mittel bei 0,7 K liegt und selbst bei hohen Besucherzahlen nur auf 1,5 K ansteigt.

Bei der kombinierten Beheizung des Messraumes in der Alten Schäfflerei mit Temperierung und Radiator auf 20 °C stellen sich je nach Beheizungsanteile nachvollziehbare unterschiedliche Temperaturschichtungen ein. In Raummitte variiert die Temperaturdifferenz zwischen 1,7 m Höhe und 1,1 m Höhe zwischen ca. 2,4 K mit ausschließlich Heizkörperbeheizung und 0,3 K bei Beheizung mit Bauteiltemperierung (Sockel- und Brüstungsschleife). Im Sockelbereich der Außenwandecke sind die Unterschiede noch deutlicher. So stellt sich eine Temperaturdifferenz mit Heizkörperbeheizung von 2,7 K ein und mit Temperierung eine negative Differenz von -0,3 K, d.h. geringfügig höhere Temperaturen im Vergleich zur Raummitte in 1,7 m Höhe. Durch die Anordnung der Temperierung an der Außenwand und dem typischen Temperaturverlauf an der Innenoberfläche der Außenwand bei Beheizung mit einem Radiator sind die Ergebnisse plausibel. Die untersuchten Temperieranlagen bewirken eine homogenere vertikale Temperaturverteilung im Raum. Mit einer kombinierten Beheizung mit Temperierung und einem zusätzlichen Heizsystem, wie z.B. einem Radiator, stellt sich die Größe der Effekte in Abhängigkeit der Heizungsanteile ein. In Bild 153 sind die ermittelten Werte aus Tabelle 26 bis Tabelle 28 graphisch dargestellt.

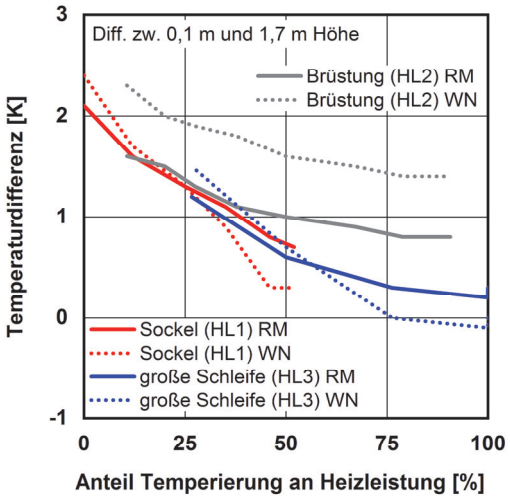


Bild 153: Temperaturdifferenz der vertikalen Temperaturschichtung in Abhängigkeit des Heizungsanteils der Temperierung für die Raummitte (RM) und wandnah (WN). Der Raum wird bei Bedarf zusätzlich mit einem Radiator auf 20 °C beheizt. Mit zunehmendem Heizungsanteil der Temperierung wird die vertikale Temperaturschichtung geringer.

5 Verfahren zur Planung und Auslegung einer Temperier-Anlage

Die Anwendung der vorhandenen analytischen Lösung (Elgeti) oder geeigneter computergestützter Software erfordert entsprechenden Aufwand und Erfahrung. Zudem überschätzen bisherige Modelle die Wärmeabgabe. Für die praktische Anwendung fehlt bislang eine vereinfachte Methode zur verlässlichen Bestimmung der Wärmeabgabe und Energieeffizienz. Aus den vorangegangenen Untersuchungen und der Modellerweiterung werden angepasste Parameterfelder zur Wärmeabgabe und Energieeffizienz der Bauteiltemperierung berechnet. Aus einem allgemeinen mathematischen Ansatz werden Näherungsfunktionen entwickelt und deren Parameter mit Hilfe der Methode der kleinsten Quadrate ermittelt. Im Ergebnis erhält man vereinfachte Gleichungen zur Wärmeabgabe und Energieeffizienz der Bauteiltemperierung für den ungestörten Wandbereich mit hinreichender Genauigkeit für die baupraktische Anwendung.

5.1 Bemessung der Temperierung

Für die Ermittlung der Wärmeabgabe der Bauteiltemperierung sind zwei Berechnungsmethoden bekannt, das Verfahren nach Elgeti oder nummerische Berechnung. Nachfolgend wird aus den durchgeführten Untersuchungen eine neue Methode entwickelt, die auf diesen Ergebnissen aufbaut.

5.1.1 Simulationsrechnung mit 2D Software

Mit aktueller Software für die thermische oder hygrothermische Berechnung von zweidimensionalen Bauteilstrukturen liefert bei richtiger Wahl der Gitterstruktur, Rohrmodellierung und Wärmeübergangskoeffizienten die Berechnung genaue Ergebnisse. Zudem ist die Modellierung von z.B. mehreren Heizrohren in einer Wand möglich. Ferner kann eine von der ebenen Wand abweichende zweidimensionale Bauteilgeometrie, z.B. Sockelsituation, erfasst und berechnet werden. Zusätzlich können, je nach Software, die Auswirkungen auf den Feuchtehaushalt im Bauteil berechnet werden. Der Aufwand hierfür ist allerdings nicht zu unterschätzen. Das Verfahren ist dementsprechend dem geübten und erfahrenen Anwender vorbehalten.

5.1.2 Berechnung mit Formeln nach Elgeti

Für die realitätsnahe Berechnung der Wärmeabgabe der Temperierung nach Elgeti ist ein angepasster Wärmeübergangswiderstand im Kontaktbereich Rohr- Wand erforderlich. Dazu ist die Erweiterung der bestehenden Formeln notwendig. Die Zusammenfassung des Kontaktwiderstandes mit dem inneren Wärmeübergangswiderstand ist zur Vereinfachung möglich und ergibt nur marginale Abweichungen zum genaueren Ergebnis. Die Berechnung ist nur rein thermisch für ein Heizrohr im ungestörten Wandbereich möglich. Bei einer Putzüberdeckung des Heizrohres von 1 cm ergibt sich eine gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen aus der 2D-Simulation. Die Eingabe der Formeln in Computerprogrammen (z.B. Tabellenkalkulation) und die Überprüfung der eingegebenen Formeln sind für den weniger geübten Anwender allerdings aufwändig und fehleranfällig.

5.2 Entwicklung einer neuen Methode zur vereinfachten Berechnung der Wärmeabgabe der Bauteiltemperierung

Das neu entwickelte vereinfachte Berechnungsverfahren wird aus der Ergebnismenge (Parameterschaar), berechnet mit den erweiterten Formeln nach Elgeti, durch approximierte Funktionen in vereinfachte Gleichungen überführt. Dazu werden in einem ersten Schritt zur Berechnung der Wärmeabgabe $\dot{Q}_{WH}$ nur die Parameter Wanddicke und Wärmeleitfähigkeit der Wand als variabel berücksichtigt und alle anderen Parameter mit einem konstanten Wert belegt. In den weiteren Schritten erfolgen die Berücksichtigung der Parameter der Temperaturdifferenz innen zu außen, die Übertemperatur des Heizmittels sowie der Durchmesser des Heizrohrs. Für die Berechnung des Wärmestromanteils nach innen $\dot{Q}_{i,WH}$ wird ebenfalls eine vereinfachte Gleichung mit den Variablen Wanddicke und Wärmeleitfähigkeit angegeben. Die Berechnung des Wärmestromanteils der Temperierung nach innen kann auch über das Wärmeabgabeverhältnis bzw. den Wärmeabgabefaktor erfolgen. Für die Ermittlung des Wärmeabgabeverhältnisses wird ebenfalls eine vereinfachte Gleichung angegeben, die bei den festgelegten Randbedingungen nur vom Wärmedurchlasswiderstand der Wand abhängig ist.

Den größten Einfluss auf die Wärmeabgabe haben gemäß der vorangestellten Parameterstudie die Mauerwerksdicke, die Wärmeleitfähigkeit des Mauerwerks sowie die Heiztemperatur. Der Einfluss der Putzüberdeckung s auf die Gesamtwärmeabgabe ist in dem angegebenen Anwendungsbereich sehr gering und wird daher vernachlässigt. Der Wärmeübergangskoeffizient α_{HL} wird als konstant angenommen und gemäß den vorangegangenen Untersuchungen mit 90 W/m²K für die rein thermische Berechnung (Elgeti) verwendet (siehe Tabelle 21, Seite 128). Den Berechnungen liegt der Wandaufbau der Standardwand zugrunde, mit Mauerwerk und beidseitig aufgebrachtem Putz. Für die Raumbeheizung auf 20 °C wird eine Bemessungstemperatur von 60 °C vorgeschlagen. Dies ergibt eine Übertemperatur von 40 K. Es können auch niedrigere mittlere Heiztemperaturen bei niedrigeren Mindestraumtemperaturen verwendet werden. Der Wertebereich für die Übertemperatur wird zwischen 35 K und 45 K festgelegt. Die berücksichtigte Mauerwerksdicke liegt zwischen 0,21 m und 1 m. Die Wärmeleitfähigkeit reicht von 0,13 W/mK und 2,3 W/mK. In Tabelle 29 sind die Werte für die festgelegten Randbedingungen und die Grenzen der variablen Parameter aufgelistet.

Tabelle 29: Randbedingungen und Anwendungsbereiche für die Berechnung der Wärmeströme der Temperierung mit vereinfachter Berechnungsmethode. Die Randbedingungen werden für die Basisgleichung verwendet.

Variable	Bezeichnung	Randbedingungen Basisgleichung	Anwendungs-bereich	Einfluss
λ	Wärmeleitfähigkeit	variabel	0,13 - 2,3 W/mK	groß, nicht linear
s_w	Wanddicke	variabel	0,21 - 1,0 m	groß, nicht linear
$\Delta\theta$	Temperaturdifferenz innen - außen	25 K	0 - 40 K	gering, annähernd linear
ΔT	Übertemperatur	40 K	35 - 45 K	groß, annähernd linear
d	Durchmesser Heizrohr	15 mm	12-15-18-21 mm	groß, annähernd linear
s	Putzüberdeckung Heizrohr	5 mm	5 - 20 mm	gering, nicht linear
α_{HL}	Wärmeübergangskoeffizient gesamt	90 W/m²K	90 W/m²K	groß, nicht linear

Die vereinfachte Beschreibung der Wärmeabgabe einer Temperierung im Regelquerschnitt der Außenwand mit den festgelegten Randbedingungen erfolgt mit der Grundgleichung (Gl. 42):

(Gl. 42) $\dot{Q}_{WH} = f(\lambda, s_W, \Delta\theta, \Delta T, d)$ [W/m]

Die Funktion in (Gl. 42) wird in (Gl. 43) in einzelne Faktoren und Terme zerlegt. Die Wärmeleitfähigkeit des Mauerwerks wird hier vereinfachend über die gesamte Wanddicke für den gesamten Wandaufbau (inklusive Putz) gleich angenommen. Der Einfluss des Durchmessers des Heizrohres wird als Faktor berücksichtigt. Die Wärmeabgabe bei einer anderen Temperaturdifferenz $\Delta\theta$ zwischen Raum- und Außenluft wird mit einer zusätzlichen Näherungsfunktion berücksichtigt, die zu dem ersten Term addiert wird. Bei einem anderen Rohrdurchmesser oder einer anderen Heizmittelübertemperatur muss dieser Term ebenfalls mit den entsprechenden Faktoren multipliziert werden.

(Gl. 43) $\dot{Q}_{WH} = [\, f(\lambda, s_W) + f(\Delta\theta)] * f(\Delta T) * k_d$ [W/m]

$\dot{Q}_{WH}$	[W/m]	Wärmestrom (WS) der Temperierung
λ	[W/mK]	Wärmeleitfähigkeit Wand
s_W	[m]	Dicke der Wand
ΔT	[K]	Heizmittelübertemperatur
$\Delta\theta$	[K]	Differenz Innenraumtemperatur zu Außenlufttemperatur
$f(\lambda, s_W)$	[W/m]	Wärmeabgabe in Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit des Mauerwerks und der Wanddicke, mit ΔT = 40 K; $\Delta\theta$ = 25 K, d = 15 mm
$f(\Delta\theta)$	[W/m]	Anpassung der Wärmeabgabe bei anderen Temperaturdifferenzen zwischen Raum-und Außenluft, $\Delta\theta$ = {0…40} [K]
$f(\Delta T)$	[-]	Anpassung der Wärmeabgabe bei anderer Heizmittelübertemperatur allg. ΔT = {35…45}, bei $\Delta\theta$ = 0: ΔT = {0…20} [K]
k_d	[-]	Faktor für den Durchmesser (DN) Heizrohr d = {12; 15; 18; 21} [mm]

Für die einzelnen Funktionsglieder werden aus dem Berechnungsergebnis nach Elgeti bzw. WUFI geeignete, vereinfachte Näherungsfunktionen ermittelt. Dabei wird für die nichtlineare Abhängigkeit eine Potenzfunktion mit folgendem Ansatz verwendet.

(Gl. 44) $f(p_1, p_2)$: $\left(a{p_1}^b + c{p_1}^d + e\right) * \left(g{p_2}^h + i{p_2}^j + k\right) * (l - m)$

Die zugehörigen Werte {a, b…m} ergeben sich aus der iterativen Anpassung der Näherungsfunktion, bis eine bestmögliche Übereinstimmung mit den berechneten Werten erreicht wird. Die Anpassung der Näherungsfunktion erfolgt durch Auswertung der kleinsten quadratischen Abweichung an Stützpunkten. Die Abweichung der ermittelten optimierten Funktion wird mit dem empirischen Korrelationskoeffizienten r bzw. Bestimmtheitsmaß R^2 und der maximalen absoluten Abweichung in W/m zur genaueren Berechnung angegeben.

5.2.1 Vereinfachte Berechnung der Gesamtwärmeabgabe

Basisfunktion $f(\lambda, s_W)$ für die Wärmeabgabe $\dot{Q}_{WH}$

Für die Wärmeabgabe der Heizleitung werden gemäß dem gewählten Ansatz (Gl. 44) die Werte {a…m} für $f(\lambda, s_W)$ bestimmt. Bei den festgelegten Randbedingungen ΔT = 40 K; $\Delta\theta$ = 25 K und einem Rohrdurchmesser d = 15 mm kann nun die Wärmeabgabe der Temperierung in Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit λ und der Wanddicke s_w mit (Gl. 45) vereinfacht ermittelt werden.

(Gl. 45) $$\dot{Q}_{WH\,(\Delta T_{40};\Delta\theta_{25};DN15)} = \left(60\,\lambda^{0,54} - 5\right) * 0,95\,s_W^{-0,11} \quad \text{[W/m]}$$

λ	[W/mK]	Wärmeleitfähigkeit Wand
s_W	[m]	Dicke der Wand

In Bild 154 ist die Parameterschar mit dem Ergebnis nach Elgeti mit den beschriebenen Anpassungen sowie der ermittelten Näherungsfunktion (Gl. 45) für die Wärmeabgabe der Temperierung in Abhängigkeit der Bauteildicke s_w und Wärmeleitfähigkeit λ abgebildet.

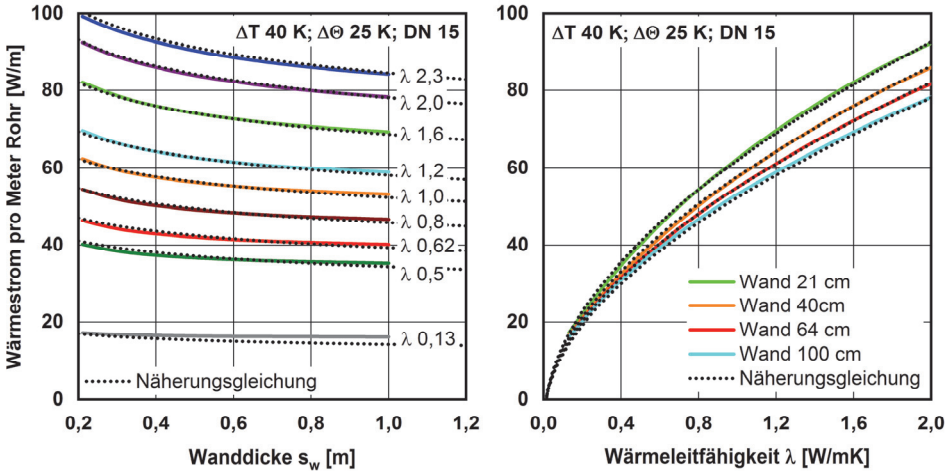


Bild 154: Parameterschar der Wärmeabgabe $\dot{Q}_{WH}$ der Temperierung berechnet nach Elgeti mit den beschriebenen Anpassungen. Links: Wärmeleitfähigkeit parametrisiert in Abhängigkeit der Wanddicke. Rechts: Wanddicke parametrisiert in Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit. Mit eingetragen sind die Kurven der Näherungsfunktion (Gl. 45).

In Bild 155 ist das Parameterfeld der Wärmeabgabe in einem 3D-Graphen als Fläche abgebildet. Mit eingetragen ist der validierte Messpunkt für die Bauteiltemperierung. Die Genauigkeit der Näherungsfunktion zur genaueren Berechnung liegt im Kernfeld (λ {0,5…1,8 W/mK}; s_w {0,4…1,0 m}) bei ±0,9 W/m, im Randbereich bei sehr kleiner Wärmeleitfähigkeit (0,1 W/mK) und Wanddicke (0,16 m) sowie großer Wanddicke (1,12 m) bei maximal 2,3 W/m und minimal -1,6 W/m. Über den gesamten Wertebereich ergibt sich ein empirischer Korrelationskoeffizient zur genaueren Berechnung von r= 0,994 und ein Bestimmtheitsmaß R^2 = 0,989.

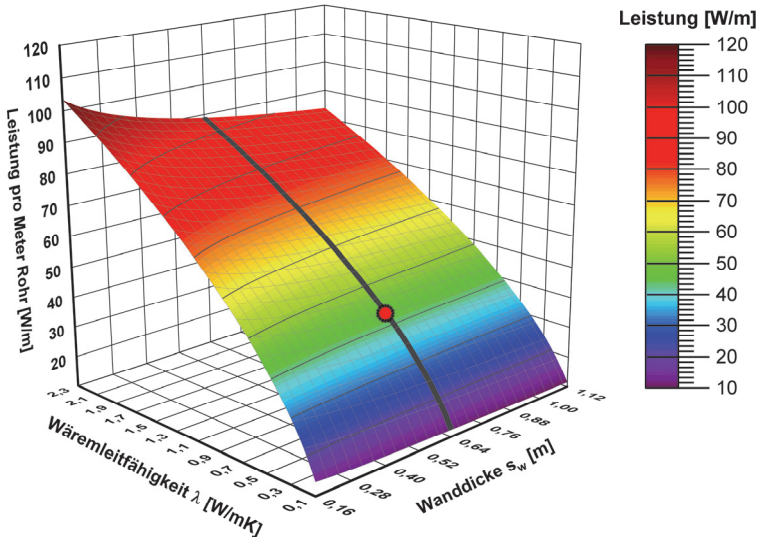


Bild 155: Aus den Näherungsfunktionen berechnetes Parameterfeld der Wärmeabgabe $\dot{Q}_{WH}$ der Temperierung bei ΔT = 40 K, $\Delta\theta$ = 25 K und DN 15. Der rote Punkt markiert die anhand der Messungen validierte Wärmeabgabe der Temperierung. Die schwarze Linie gibt den Einfluss der Wärmeleitfähigkeit auf die Wärmeabgabe bei 0,63 m Wanddicke an.

Näherungsfunktion $f(\Delta\theta)$ der Temperaturdifferenz $\Delta\theta$ {0...40}

Die Wärmeabgabe der Temperierung, bei einer anderen Temperaturdifferenz zwischen Raum- und Außenluft, wird mit der Näherungsfunktion $f(\Delta\theta)$ als zusätzlicher Term berücksichtigt. Die Näherungsfunktion wird entsprechend (Gl. 44) aus der Differenz den Parameterscharen $\Delta\theta$ {0...40} zur Parameterschar bei $\Delta\theta$ = 25 K in Abhängigkeit von λ und s_W ermittelt. Ausgehend von (Gl. 45) zur Ermittlung der Wärmeabgabe der Temperierung bei einer Temperaturdifferenz $\Delta\theta$ = 25 K kann die Wärmeabgabe mit dem zusätzlichen Term $f(\Delta\theta)$ für andere Temperaturdifferenzen korrigiert werden. Bei $\Delta\theta$ = 25 K wird **(Gl. 46**) Null, bei $\Delta\theta$ < 25 K wird das Vorzeichen negativ.

(Gl. 46) $$\boldsymbol{f(\Delta\theta) = (0,205 * \lambda + 0,02) * (s_W^{-0,4} - 0,15) * (\Delta\theta - 25)}$$ [W/m]

λ	[W/mK]	Wärmeleitfähigkeit Wand
s_W	[m]	Dicke der Wand
$\Delta\theta$	[K]	Differenz Innenraumtemperatur zu Außenlufttemperatur

In Tabelle 30 sind das Bestimmtheitsmaß sowie die maximale und minimale Abweichung des Berechnungsergebnisses der Näherungsgleichung zur genaueren Berechnung für beispielhaft variierte Temperaturdifferenzen $\Delta\theta$ aufgelistet.

Tabelle 30: Bestimmtheitsmaß und absolute Abweichung der Näherungsgleichung $f(\Delta\theta)$ zur genaueren Berechnung für variierende $\Delta\theta$.

Randbedingung			Maximale Abweichung Gesamter Bereich		Maximale Abweichung Kernbereich		R^2
ΔT	$\Delta\theta$	d	nach unten	nach oben	nach unten	nach oben	
[K]	[K]	[mm]	[W/m]	[W/m]	[W/m]	[W/m]	[-]
40	0	15	-2,8	2,1	-2,1	1,8	0,98
40	25	15	-2,1	1,2	-0,9	0,9	0,99
40	40	15	-1,8	1,2	-1,2	1,2	0,99

Näherungsfunktion $f(\Delta T)$ der Heizmittelübertemperatur ΔT

Die in der Basisfunktion berechnete Wärmeabgabe bezieht sich auf eine Heizmittelübertemperatur von 40 K. Die Berechnung der Wärmeabgabe bei einer anderen Übertemperatur kann nur in engen Grenzen von 35…45 K näherungsweise vereinfachend proportional gemäß **(Gl. 47**) bei beliebigen Temperaturdifferenzen zwischen Raum- und Außenluft $\Delta\theta$ berechnet werden.

(Gl. 47) $$f(\Delta T) = \frac{1}{40} * \Delta T$$ [-]

ΔT	[K]	Heizmittelübertemperatur

In Tabelle 31 sind das Bestimmtheitsmaß sowie die maximale und minimale Abweichung des Berechnungsergebnisse der Näherungsgleichung zur genaueren Berechnung für beispielhaft variierte Temperaturdifferenzen ΔT aufgelistet. Die Abweichung zum genaueren Ergebnis steigt dabei bereits deutlich.

Tabelle 31: Bestimmtheitsmaß und absolute Abweichung der Näherungsgleichung $f(\Delta T)$ zur genaueren Berechnung für variierende ΔT.

Randbedingung			Maximale Abweichung Gesamter Bereich		Maximale Abweichung Kernbereich		R^2
ΔT	$\Delta\theta$	d	nach unten	nach oben	nach unten	nach oben	
[K]	[K]	[mm]	[W/m]	[W/m]	[W/m]	[W/m]	[-]
35	25	15	-3,0	0,4	-1,6	0,2	0,99
40	25	15	-2,4	1,6	-0,9	0,7	0,99
45	25	15	-2,6	4,8	-0,8	1,8	0,99

Die schnell ansteigenden Abweichungen ergeben sich aus der vereinfachten Näherungsgleichung, da diese bei 0 K Übertemperatur keine Wärmeabgabe ergibt. In der realen Anwendung wird jedoch, je nach der Differenz der Raumlufttemperatur zur Außentemperatur $\Delta\theta$ wegen der Kopplung des Heizrohrs mit der Außenwand, bei 0 K Übertemperatur eine Wärmeabgabe festgestellt. Dadurch kann die vereinfachte Näherungsgleichung nur in engen Grenzen für andere Heizmittelübertemperaturen verwendet werden, vor allem bei sehr niedrigen Außentemperaturen, dünnen Wänden und hohen Wärmeleitfähigkeiten. In Bild 156 ist in dem 3D-Graphen die nach Elgeti berechnete Wärmeabgabe für variierende Wärmeleitfähigkeiten und Wanddicken für eine Außenlufttemperatur von -5 °C bei einer Heizmittelübertemperatur von ΔT = 0 K abgebildet. Bei niedrigeren Außenlufttemperaturen bzw. größeren $\Delta\theta$ erhöht sich die Wärmeabgabe entsprechend.

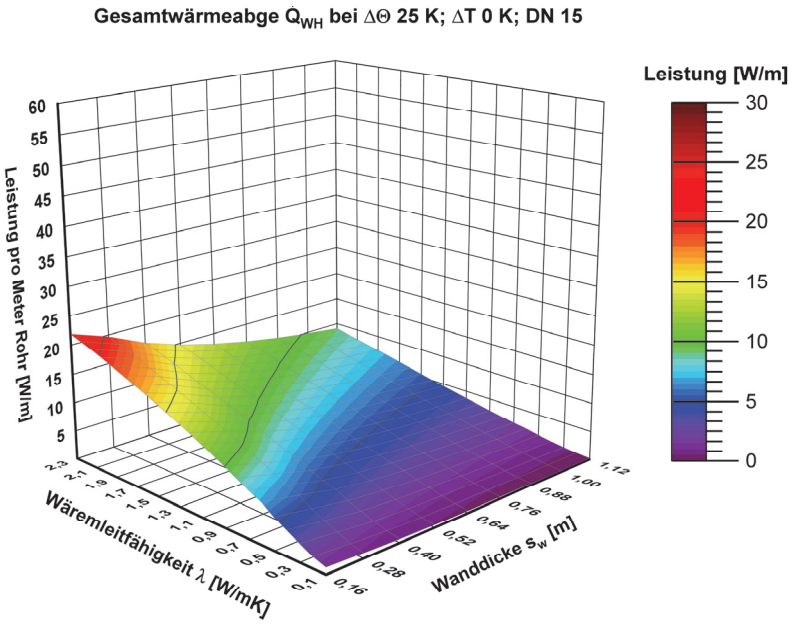


Bild 156: Berechnetes Parameterfeld (Elgeti) der Gesamtwärmeabgabe $\dot{Q}_{WH}$ der Temperierung bei ΔT = 0 K bei einer Außentemperatur von -5 °C und Raumtemperatur von 20 °C.

Die Wärmeabgabe bei einer Heizmittelübertemperatur von ΔT = 0 K könnte mit einer eigenen Näherungsfunktion beschrieben werden. Die Berücksichtigung anderer Übertemperaturen als die berücksichtigten Werte ΔT {35…45} K bei $\Delta\theta$ > 0 K ist i.d.R. in der Praxisanwendung jedoch nicht erforderlich. Die in der Praxis relevante Berechnung der Wärmeabgabe bei einer niedrigen Heizmittelübertemperatur und einer Temperaturdifferenz zwischen der Raum- und Außenluft $\Delta\theta$ = 0 K wird nur für die Betrachtung einer „Sommertemperierung“ erforderlich. Mit „Sommertemperierung“ wird die Beheizung während der Sommermonate bezeichnet, um hohe relative Feuchten bzw. Tauwasserausfall infolge kalter Bauteiltemperaturen zu vermeiden

oder bei aufsteigender Feuchte Bauteiloberflächen trocken zu halten. Dadurch liegt eine zeitlich und über das Bauteil variierende Wärmeleitfähigkeit vor. Die zeitlich und örtlich unterschiedliche feuchteabhängige Wärmeleitfähigkeit hat einen starken Einfluss auf die Wärmeabgabe. Mit den angegebenen Gleichungen kann lediglich die Wärmeabgabe bei der gewählten, als zeitlich und örtlich konstant angenommenen, Wärmeleitfähigkeit bestimmt werden und würde deshalb für diesen Fall nicht zu einem zutreffenden Ergebnis führen. Für die Berechnung einer realitätsnahen Wärmeabgabe ist eine korrekte Berechnung der Feuchteverteilung und Berücksichtigung der feuchteabhängigen Wärmeleitfähigkeit erforderlich. Dies ist nur mit geeigneter Software, wie z.B. WUFI®, möglich.

Faktoren k_d für den Rohrdurchmesser

Für die Berechnung der Wärmeabgabe bei anderen Rohrdurchmessern wird gemäß (Gl. 46) wegen der proportionalen Abhängigkeit ein Faktor berücksichtigt. In Tabelle 32 sind die ermittelten Faktoren angegeben. In Tabelle 33 sind das Bestimmtheitsmaß sowie die maximale und minimale Abweichung des Berechnungsergebnis der Näherungsgleichung zur genaueren Berechnung für beispielhaft variierte Temperaturdifferenzen ΔT aufgelistet.

Tabelle 32: Faktoren zur Anpassung der berechneten Wärmeabgabe gemäß (Gl. 46) für einen Rohrdurchmesser von 15 mm (DN 15) auf andere Rohrdurchmesser.

Rohrdurchmesser	DN 12	DN 15	DN 18	DN 21
Faktor f(d) [-]	0,89	1,0	1,10	1,19

Tabelle 33: Bestimmtheitsmaß und absolute Abweichung der Näherungsgleichung zur genaueren Berechnung für variierende Durchmesser d.

Randbedingung			Maximale Abweichung Gesamter Bereich		Maximale Abweichung Kernbereich		R^2
ΔT	$\Delta\theta$	d	nach unten	nach oben	nach unten	nach oben	
[K]	[K]	[mm]	[W/m]	[W/m]	[W/m]	[W/m]	[-]
40	25	12	-2,1	2,8	-1,3	0,8	0,99
40	25	15	-2,1	1,2	-0,9	0,9	0,99
40	25	18	-2,1	1,4	-0,7	1,4	0,99
40	25	21	-2,1	1,8	-1,2	1,8	0,99

5.2.2 Vereinfachte Berechnung der Wärmeabgabe nach innen und des Wärmeabgabeverhältnisses f_{WH}

Wärmeabgabe nach innen $\dot{Q}_{i,WH}$

Für die Raumbeheizung bzw. Deckung des Heizwärmebedarfs kann nur der nach innen gerichtete Wärmestromanteil der Temperierung $\dot{Q}_{i,WH}$ angesetzt werden, siehe Kapitel 4.7.6 „Rechnerische und messtechnische Ermittlung der Energieeffizienz der Bauteiltemperierung im Messraum“ und Kapitel 4.8 „Energieeffizienz unterschiedlicher Temperieranlagen und Optimierungspotential“. Für die Bemessung der Wärmebereitstellung der Heizungsanlage wird jedoch der Gesamtwärmestrom der Temperierung $\dot{Q}_{WH}$ benötigt. Im Gegensatz zu konventionellen Heizflächen ist deshalb die Berücksichtigung des Wärmeabgabeverhältnisses erforderlich.

Die Näherungsgleichung für die Wärmeabgabe nach innen wird entsprechend dem Vorgehen für die Gesamtwärmeabgabe ermittelt. Es gelten hierfür ebenfalls die festgelegten Randbedingungen in Tabelle 29. Im Ergebnis erhält man die Näherungsfunktion für die Wärmeabgabe bei

einer Übertemperatur von 40 K. Falls nur die Wärmeabgabe bei einem ΔT von 40 K benötigt wird, kann das Ergebnis aus $\dot{Q}_{i,WH}(\Delta T_{40})$ direkt verwendet werden.

(Gl. 48) $$\dot{Q}_{i,WH\,(\Delta T_{40};\Delta\theta_{25};DN15)} = 51,6\,\lambda^{0,45} * \left(0,98\,s_W^{0,15} - 0,08\,s_W^{1,7}\right) \quad \text{[W/m]}$$

$\dot{Q}_{i,WH}$	[W/m]	Wärmestromanteil der Temperierung nach innen
λ	[W/mK]	Wärmeleitfähigkeit Wand
s_W	[m]	Dicke der Wand

Die maximale Abweichung zur genaueren Berechnung beträgt im Kernbereich ±1,0 W/m und für den gesamten Wertebereich zwischen -1,5 und +3,2 W/m. Das Bestimmtheitsmaß beträgt für den Kernbereich R² = 0,946 und den gesamten Wertebereich R² = 0,952. Die Wärmeabgabe nach innen $\dot{Q}_{i,WH}$ kann auch anhand der Gesamtwärmeabgabe $\dot{Q}_{WH}$ bei bekanntem Wärmeabgabeverhältnis f_{WH} bzw. Wärmeabgabefaktor $1 + f_{WH}$ bestimmt werden.

Wärmeabgabeverhältnis f_{WH} und Wärmeabgabefaktor $1 + f_{WH}$

Da gemäß Parameterstudie das Wärmeabgabeverhältnis von den thermischen Eigenschaften der Wand und der Lage des Heizrohrs im Mauerwerk abhängt, wirken sich die Außentemperatur bzw. die Raumtemperatur und die Heizmitteltemperatur nicht aus. Das Wärmeabgabeverhältnis ist damit unabhängig von $\Delta\theta$ und ΔT. Der Rohrdurchmesser wirkt sich bei dieser Betrachtung geringfügig auf das Ergebnis aus. Da sich mit dem Rohrdurchmesser, bei gleichbleibender Putzüberdeckung, die Lage der Achse des Rohres etwas verschiebt, verändert sich das Wärmeabgabeverhältnis geringfügig in einem hier vernachlässigbaren Bereich. Das vereinfachte berechnete Wärmeabgabeverhältnis bzw. der Wärmeabgabefaktor kann damit für die in (Tabelle 29) angegebenen Rohrdurchmesser bei einer Putzüberdeckung von 5 mm verwendet werden.

Im Gegensatz zur Gesamtwärmeabgabe ist das Wärmeabgabeverhältnis direkt aus dem Wärmedurchlasswiderstand R bei den festgelegten Randbedingungen (Tabelle 29) bestimmbar. In Bild 157 sind die mit Elgeti berechneten Wärmeabgabeverhältnisse in den beiden Diagrammen eingetragen. Es wurden Extremwerte der Randbedingungen nicht berücksichtigt, da hier bei der analytischen Lösung nach Elgeti größere Abweichungen auftreten. Die Näherungsfunktion wird als Potenzfunktion aus dem logarithmischen skalierten Diagramm (rechtes Diagramm) ermittelt. Das linke Diagramm ist linear skaliert.

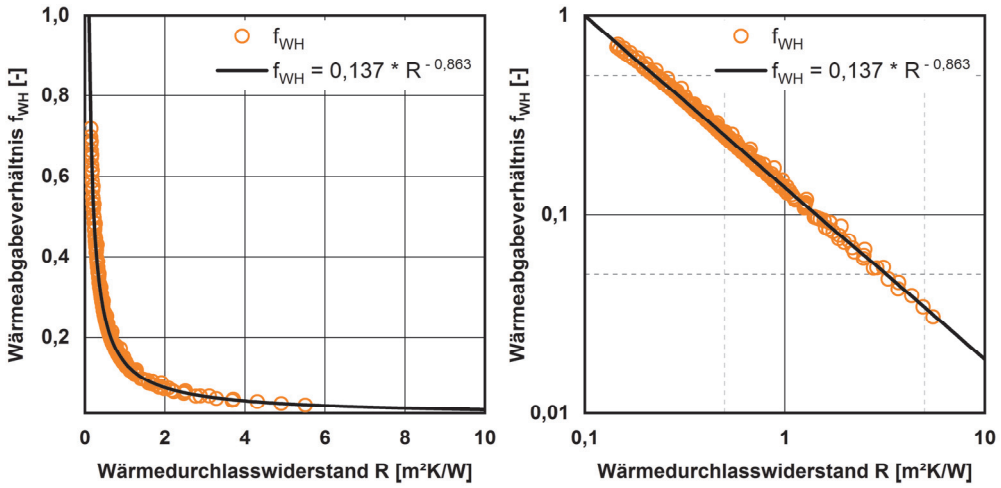


Bild 157: Wärmeabgabeverhältnis f_{WH} der Temperierung in Abhängigkeit des Wärmedurchlasswiderstandes mit linearer Skalierung (linkes Diagramm) und doppelt logarithmischer Skalierung (rechtes Diagramm) bei einer Putzüberdeckung von 5 mm. Die ermittelte Näherungsfunktion ist in beiden Diagrammen mit eingetragen.

Anhand der Diagramme in Bild 157 wurde die Näherungsfunktion (Gl. 49) für das Wärmeabgabeverhältnis f_{WH} für eine Putzüberdeckung von 5 mm bestimmt. Für andere Putzüberdeckungen wurde entsprechend vorgegangen. Die zu den Putzüberdeckungen ermittelten Faktoren a und Exponenten b sind in Tabelle 34 angegeben.

(Gl. 49) $$f_{WH} = a * R^{b} \quad [-]$$

f_{WH}	[-]	Wärmeabgabeverhältnis der Temperierung
R	[m²K/W]	Wärmedurchlasswiderstand
a	[-]	Faktor
b	[-]	Exponent

Tabelle 34: Faktoren und Exponenten zur Berechnung des Wärmeabgabeverhältnisses nach (Gl. 49) für unterschiedlich dicke Putzüberdeckungen.

Putzüberdeckung d	5 [mm]	10 [mm]	15 [mm]	20 [mm]
Faktor a	0,137	0,143	0,149	0,157
Exponent b	-0,863	-0,865	-0,868	-0,880

In Bild 158 sind die mit Elgeti berechneten Wärmeabgabefaktoren $1 + f_{WH}$ über den gesamten Wertebereich abgebildet. Sie gelten für die angegebenen Putzüberdeckungen in Tabelle 34 und alle Rohrdurchmesser in Tabelle 29. Das Rechteck markiert den Kernbereich. Rechts von der gestrichelten Linie beträgt die Abweichung der Näherungsgleichung zum genaueren Ergebnis ≤ ±0,01 (gerundet). Bei einer Wanddicke von 0,28 m beträgt die Abweichung bei einer Wärmeleitfähigkeit von bis zu 1,5 W/mK zum genaueren Ergebnis ±0,05. Für dünnere Wanddicken bzw. höhere Wärmeleitfähigkeiten werden die Abweichungen noch größer. Das Bestimmtheitsmaß R² beträgt für den Kernbereich mindestens 0,994 über den gesamten Wertebereich für Putzüberdeckung und Rohrdurchmesser. Bei bekanntem Wärmeabgabeverhältnis bzw. Wärmeabgabefaktor können die Wärmestromanteile $\dot{Q}_{i,WH}$ und $\dot{Q}_{e,WH}$ aus der Gesamtwärmeabgabe $\dot{Q}_{WH}$ mit (Gl. 39) bis (Gl. 41) berechnet werden.

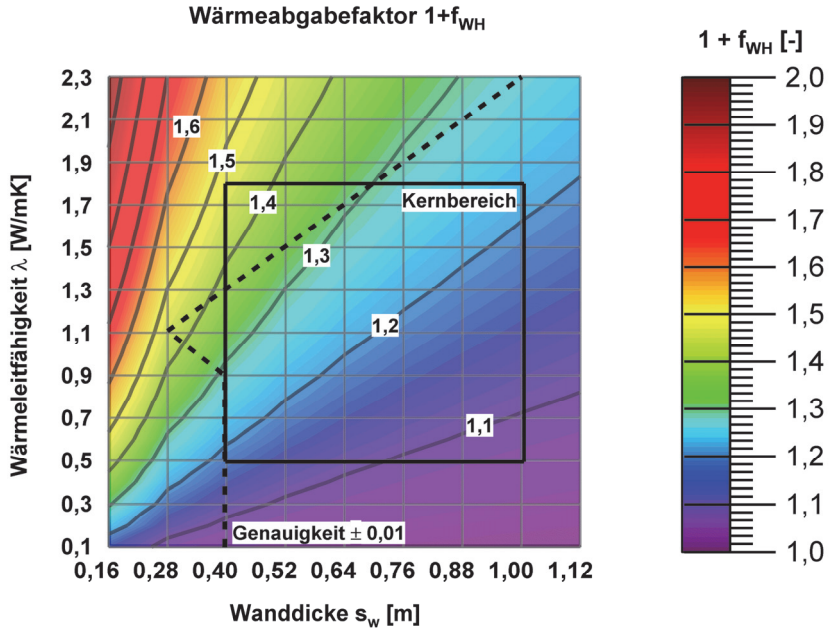


Bild 158: Mit Elgeti berechnete Wärmeabgabefaktoren $1 + f_{WH}$ bei einer Putzüberdeckung von 5 mm und einem Rohrdurchmesser von 15 mm. Das Rechteck markiert den Kernbereich. Die gestrichelte Linie gibt die Grenze für den gesamten Wertebereich an (siehe Tabelle 29), bei der die Abweichung der Näherungsgleichung zum genaueren Ergebnis ca. ±0,01 (gerundet) beträgt (rechts von der gestrichelten Linie Genauigkeit ≤ ±0,01).

Berechnungsbeispiel und Vergleich mit genauer Berechnung mit WUFI® 2D

Beispiel Temperierung im Messraum in Benediktbeuern

Die Temperierung im Messraum in Benediktbeuern wird mit der neu entwickelten vereinfachten Methode berechnet und mit der genaueren Berechnung mit WUFI® (siehe Kapitel 4.7.3) verglichen. Die Randbedingungen werden entsprechend der gemessenen Wanddicke s_W und dem aus dem Messwert des Wärmedurchlasswiderstandes berechneten λ angesetzt, mit s_W= 0,63 m und λ = 0,69 W/mK. Die weiteren Randbedingung sind: Rohrdurchmesser d 15 mm, Temperaturdifferenz Raumluft zu Außenluft $\Delta\theta$ = 20 K, Heizmittelübertemperatur ΔT = 40 K. Die Werte werden gemäß Gleichungen (Gl. 43) und (Gl. 45) bis (Gl. 46) berechnet bzw. aus Tabelle 32 ermittelt:

$$\dot{Q}_{WH} = \left[\overbrace{f(\lambda, s_W)}^{1} + \overbrace{f(\Delta\theta)}^{2}\right] * \overbrace{f(\Delta T)}^{3} * \overbrace{k_d}^{4} \qquad \text{[W/m]}$$

1) $f\left(\lambda_{0,69}, s_{W;0,63}\right) = (60 * 0{,}69^{0{,}54} - 5) * 0{,}95 * 0{,}63^{-0{,}11} = 44{,}1$ [W/m]

2) $f(\Delta\theta_{20}) = (0{,}205 * 0{,}69 + 0{,}02) * (0{,}63^{-0{,}4} - 0{,}15) * (20 - 25) = -0{,}9$ [W/m]

3) $f(\Delta T_{40}) = \frac{1}{40} * 40 = 1$ [-]

4) k_d nach Tabelle 32 für Rohrdurchmesser d=15 mm: $k_d = 1$ [-]

Die Ergebnisse der Teile 1, 2, 3 und 4 werden in die Gleichung (Gl. 43) eingesetzt:

$\dot{Q}_{WH} = [41{,}7 + (-0{,}9)] * 1 * 1 = 43{,}2$ [W/m]

Das mit WUFI® ermittelte Ergebnis beträgt für das Brüstungsrohr (Rohr d) gemäß Ergebnistabelle 42,7 W/m (siehe Tabelle 22 auf Seite 131). Das mit den vereinfachten Näherungsgleichungen ermittelte Ergebnis ist mit 43,2 W/m nahe am genaueren Ergebnis und liegt innerhalb der angegebenen Genauigkeit von ±0,9 W/m der vereinfachten Berechnungsmethode für die Berechnung der Gesamtwärmeabgabe.

Es folgt die vereinfachte Berechnung des Wärmeabgabeverhältnisses gemäß (Gl. 49).

$f_{WH} = 0{,}137 * 0{,}91^{-0{,}863} = 0{,}149$ [-] bzw. 14,9 [%]

Das mit WUFI® ermittelte Ergebnis beträgt 14,9 % gemäß Tabelle 22.

Die Wärmeabgabe nach innen wird anhand des berechneten Wärmeabgabeverhältnisses und der bereits ermittelten Gesamtwärmeabgabe in (Gl. 39) eingesetzt und berechnet:

$Q_{i,WH} = \frac{\dot{Q}_{WH}}{1 + f_{WH}} = \frac{43{,}2}{1+0{,}149} = 37{,}6$ [W/m]

Das Ergebnis nach WUFI® 2D beträgt 37,2 W/m. Die geringe Abweichung zum genaueren Ergebnis ergibt sich aus der Abweichung der berechneten Gesamtwärmeabgabe der vereinfachten Berechnungsmethode und liegt innerhalb der angegebenen Genauigkeit von ±1,0 W/m.

6 Bewertung der Ergebnisse

Einbausituationen der Temperierung

Die vorgefundenen Einbausituationen der Temperierung wurden in der Bestandsaufnahme der Feldstudien dokumentiert und in Gruppen eingeteilt. Die am häufigsten beobachtete Einbaulösung ist die unter Putz Verlegung sowie der Einbau auf Putz, mit und ohne Wandkontakt. Aus der Montageart ergeben sich wesentliche Unterschiede für Wärmeabgabe und Energieeffizienz sowie denkmalpflegerische und bei Museen museumspädagogische Gesichtspunkte. In Bezug auf die Energieeffizienz ergeben sich Vorteile für die Verlegung vor der Wand. Ohne direkte Einbindung in das Mauerwerk ergeben sich keine nennenswerten zusätzlichen Wärmeverluste. Diese Version ist daher vergleichbar mit konventionellen Heizflächen. Denkmalpflegerisch und museumspädagogisch können jedoch sichtbare Heizrohre ungünstig sein. Je nach Ausführung sind aber auch hier ästhetisch anspruchsvolle Lösungen möglich, siehe z.B. Feldstudie Feuchtwangen [Bichlmair et al 2015e] und Oberammergau [Bichlmair et al 2015j] oder Glentleiten [Bichlmair et al 2015g].

Der Einbau unter Putz bewirkt eine wesentlich höhere Wärmeabgabe pro Meter Rohr. Die Verlegung der Temperierung an den Innenwänden verbessert die Energieeffizienz, da hier im Wesentlichen keine zusätzlichen Wärmeverluste nach außen erfolgen. Die von [Großeschmidt 1994] vorgeschlagene Verlegung der Temperierung umlaufend im Raum, also auch an den Innenwänden entlang, ist daher für einen energiesparenden Betrieb weiterhin zu empfehlen. Eine reine Verlegung an den Innenwänden würde jedoch die positiven Effekte auf die Außenwand ausschließen. Da die konservatorischen Probleme an der Außenwand überwiegen, ist die Verlegung der Temperierung an der Außenwand häufig unumgänglich und entspricht dem eigentlichen Sinn. Der zusätzliche Wärmestrom nach außen führt in der Regel zu einer Verringerung des Feuchtegehaltes und damit aus konservatorischer Sicht zu einer Verbesserung am Bauteil und Gebäude.

Die Verlegung der Temperierung unter Putz wird gelegentlich kontrovers diskutiert. Hierfür gibt es keine klaren denkmalpflegerischen Vorgaben, da aus denkmalpflegerischer Sicht für jedes Objekt eine Abwägung erfolgt. Je nach Planung bzw. Ausführung des Eingriffs in die Bausubstanz kann ein geringer oder größerer Substanzverlust die Folge sein. In Bild 159 ist ein alltäglicher Montagezustand abgebildet. Die Temperierleitungen sind handwerklich ordentlich eingebaut, mit nur geringem Substanzverlust am originalen Mauerwerk des Klosters Aldersbach. Etwas umfangreicher im Substanzverlust ist die unter Putz verlegte Heizkreisverteilung mit Zuleitungen. Der Einbau zusätzlicher Verkabelung für weitere Haustechnik (z.B. Elektro, EDV, Brandmeldeanlage, Einbruchmeldeanlage, usw.) führt zu weiteren Substanzverlusten, die umfangreicher sein können als die Substanzverluste für die Temperierung.

Ein besonders gelungenes Beispiel der Verlegung der Temperierung unter Putz findet sich im Fränkischen Museum in Feuchtwangen, Bild 160, siehe auch [Bichlmair et al 2015]. Hier wurde wegen Feuchteschäden an der Außenwand die originale Tapete aus dem frühen 20. Jhdt. stark zerstört. Erst durch Einbau der Temperierung kann der Sockelbereich der Wand trocken gehalten werden. Zum Einbau der Temperierung wurde die Tapete zunächst im Sockelbereich abgelöst und hochgehängt. Nach Einbau der Heizleitung und Wiederherstellung des Wandputzes erfolgte die fachgerechte Restaurierung der Tapete [Vogt 2006]. Die IR-Aufnahme zeigt den gleichen Bildausschnitt. Die Heizrohre können gut an den roten bis weißen Farbbereichen erkannt werden. Zugleich können auch die unterschiedlichen Wandoberflächentemperaturen der Außenwand (linker Wandteil) und der Innenwand (rechter Wandteil) beobachtet werden.

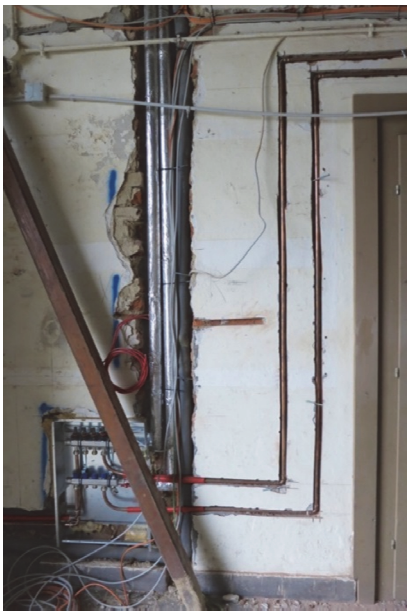


Bild 159: Typische Einbausituation für haustechnische Leitungen, Heizverteilungskasten, Zuleitung für die Wärmeversorgung (gedämmte Rohrleitungen), Temperierleitungen und elektrotechnische Leitungen. Die Heizleitungen der Bauteiltemperierung sind dabei noch am ordentlichsten verlegt.

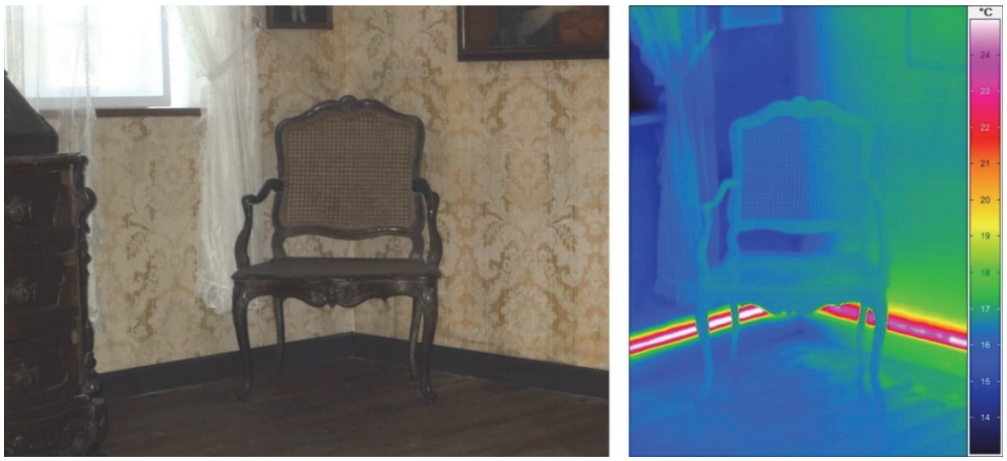


Bild 160: Visuelles Bild und IR Aufnahme der Außenwand und angrenzenden Innenwand im Erdgeschoss eines Museums im Raum „Rokokozimmer" mit Stuhl. Die unter der Tapete im Sockelbereich unter Putz verlegte Temperierung zeichnet sich als hellrote bzw. weiße Linie ab.

Messung der Wärmeabgabe der Temperierung in situ

Mit den in den Feldstudien durchgeführten Messungen zur Wärmeabgabe der Temperierung wurden Temperieranlagen im realen Betrieb untersucht. Die Ergebnisse sind erforderlich für die Einsortierung der genaueren Labormessungen und bilden eine breite Basis zur Bestätigung der Berechnungsmethoden. Die In-situ-Messungen zur Wärmeabgabe erfolgten an einzelnen Heizschleifen ab Verteilung. Die Heizleitungen sind bei den untersuchten Objekten entsprechend den realen Gegebenheiten verlegt. Dadurch sind auch lokal andere Einbausituationen, wie z.B. Fensterlaibungen, in der Leistungserfassung mit inkludiert. Zum einen erhält man so reale Leistungswerte für typische Einbausituationen, zum anderen entspricht die Wärmeabgabe nur bedingt der idealisierten rechnerischen Abbildung der Temperierung. Die Messungen unterliegen typischen Messunsicherheiten hinsichtlich der Genauigkeit der Sensoren. Die Messabweichung ist durch eine Fehleranalyse bekannt und für die jeweilige Messung angegeben. Die Abweichung der Wärmeabgabe des realen Einbaus zum idealisierten Einbau kann hingegen nur geschätzt werden. Aus diesem Grund erfolgt die Validierung der Berechnung mit den laborähnli-

chen Messungen des Messraumes in Benediktbeuern. Hier liegt zwar auch eine typische Einbausituation vor, die aber gut dokumentiert ist. Dadurch kann die Auswirkung der Einbausituation genauer eingeschätzt werden. Dies ermöglicht eine Berücksichtigung im Vergleich Messung und Rechnung. Die Leitungsverlegung von der ebenen Wand über die Fensterlaibung in die Fensternische oder Richtungsänderungen des Heizrohres in der Wandebene können mit einer zweidimensionalen Berechnung nicht erfasst werden. Bei Richtungsänderungen in der Wandebene wird die Wärmeabgabe als in etwa gleichwertig eingeschätzt. Bei Richtungsänderungen aus der Wandebene hinaus (z.B. bei Fensterlaibungen) liegen derzeit nur die Messungen der Fallstudie Aldersbach vor, bei der die Laibungsschleife gesondert untersucht wurde. Im Messraum in Benediktbeuern wird der Einfluss der Mauernische durch einen einfachen Ansatz berücksichtigt. Die Heizleitungslänge beträgt in diesem Bereich ca. 30 % der Gesamtlänge und beeinflusst das Ergebnis nur gering.

In den Feldstudien wird eine hohe Variabilität der abgegebenen Wärmemenge der unterschiedlichen Temperiersysteme festgestellt. Die auf Putz verlegten Temperiersysteme erreichen dabei untereinander ein vergleichbares Niveau der Wärmeabgabe. Die Wärmeabgabe der unter Putz verlegten Temperiersysteme variieren jedoch zum Teil extrem. Es werden Leistungsunterschiede mit einem Faktor von zum Teil größer Zwei festgestellt. Diese Feststellung erklärt zum Teil die Unzufriedenheit mancher Nutzer und bestätigt den dringenden Handlungsbedarf zur Entwicklung einer vereinfachten Bemessungsmethode.

Wärmeübergang und konvektive Wirkung der Temperierung – wandnahe Strömungsmessung

Es wurde bei dem gewählten Untersuchungsansatz davon ausgegangen, dass der in der Literatur kontrovers betrachtete Warmluftauftrieb nicht nur für die lokale Raumklimaverteilung von Bedeutung ist, sondern auch die Wärmeübertragung vom Bauteil in den Raum beeinflusst. Der bei der Berechnung benutzte vereinfachte Ansatz eines über die Wandhöhe gleichförmigen Wärmeübergangskoeffizienten von 8 W/m²K wurde deshalb eingehender überprüft. Mit einer Particle Image Velocimetry (PIV) erfolgten in einem Laborraum Messungen, mit der die durch die Bauteiltemperierung verursachte Auftriebsströmung quantitativ erfasst wurde. Anhand der gemessenen Luftgeschwindigkeit in einer ausgewählten, zur Außenwand senkrechten Raumebene, über einen Zeitraum von 30 Sekunden (vektorielle Geschwindigkeitsfeld), kann das thermische Feld berechnet werden. Mit den nun bekannten Temperaturen der wandnahen Luftschicht ist es weiter möglich, die lokalen Wärmeübergangskoeffizienten im zeitlichen Verlauf näherungsweise zu bestimmen. Die über dem Heizstreifen nach oben strömende erwärmte Luft schmiegt sich zunächst an der Wand an und gibt dabei Wärme konvektiv an die Wand ab. Die Auftriebsströmung löst sich überwiegend nach ca. 11 cm bis 15 cm an dem mehr oder weniger deutlich ausgeprägten, auf- und abwandernden Staupunkt von der Wand ab. Durch den wandernden Staupunkt variiert der Wärmeübergangskoeffizient auf der beobachteten Höhe von ca. 12 cm über dem Heizstreifen sehr stark von rund -40 W/m²K (konvektive Wärmeabgabe an die Wand) bei hohem Staupunkt und mit niedrig liegendem Staupunkt auf rund +30 W/m²K (konvektive Wärmeabgabe in den Raum). Die Ungenauigkeit der Methode im Grenzbereich der Wärmeübertragung von der Wand zum Fluid ergibt dabei unrealistisch niedrige bzw. hohe Werte. Die Werte können in dem Übergangsbereich des auf- und abwandernden Staupunktes dadurch nur zur qualitativen Einschätzung des Übertragungsmechanismus verwendet werden. Durch die Auftriebsströmung erwärmt sich die Innenoberfläche der Außenwand über der Heizleitung über das Niveau, das aus der reinen Wärmeleitung möglich ist. In den Wandbereichen unterhalb und oberhalb der Temperierung stellt sich eine asymmetrisch verteilte Oberflächentemperatur (im Vergleich zur berechneten Oberflächentemperatur mit konstantem Wärmeübergangskoeffizient) über die Wandhöhe ein. Es erfolgt ausschließlich im direkten Bereich

der Heizleitung eine erhöhte konvektive Wärmeabgabe an die Raumluft. In dem Bereich über der Heizleitung, in dem die Auftriebsströmung an die Außenwand anliegt, wird Wärme konvektiv vom Fluid an die Wand abgegeben. Da in diesem Wandbereich durch Wärmeleitung und konvektive Wärmeaufnahme die Oberflächentemperatur über der Raumtemperatur liegt, wird zeitgleich durch Strahlung Wärme in den Raum abgegeben. Der Bereich mit erhöhter konvektiver Wärmeabgabe (Heizstreifen) deckt sich in der Ausdehnung in etwa mit dem Bereich verringerter Wärmeabgabe (Bereich der anliegenden Auftriebsströmung). Die Gesamtwärmeabgabe in den Raum kann deshalb mit guter Näherung mit einem mittleren Wärmeübergangskoeffizienten h_i von ca. 8 W/m²K entsprechend den Vorgaben für Wandheizungen nach [DIN EN 1264] bzw. [DIN EN 15377] berechnet werden.

Hygrothermische und thermische Berechnung der Wärmeabgabe bei unter Putz verlegter Heizleitungen (Bauteiltemperierung)

Für die unterschiedlichen Temperiersysteme wurden bestehende Berechnungsmethoden recherchiert und deren Anwendbarkeit untersucht. Hier zeigte sich ein ambivalenter Kenntnisstand. In der Literatur existieren grundlegende Berechnungsmethoden zur Bauteiltemperierung, mit denen eine Ermittlung der Wärmeleistung möglich ist. Bei den Anwendern und Fachplanern, aber auch bei den bisherigen wissenschaftlichen Arbeiten, wurden diese Berechnungsgrundlagen weitestgehend nicht verwendet. Erst [Engelbrecht 1995] untersuchte mit der bereits 1971 veröffentlichten maßgeblichen analytischen Berechnungsmethode [Elgeti 1971] bzw. [VDI 2006] die Bauteiltemperierung. Leider wurden diese Untersuchung nicht konsequent weiterverfolgt und damit keine tiefere Einsicht in die Wirkungsweise der Bauteiltemperierung ermöglicht. Lediglich ein Diagramm wurde aus dieser Untersuchung verwendet und unzulässig verallgemeinert [Großeschmidt 2004]. Holmberg [Holmberg 2004] untersuchte im Rahmen einer vergleichenden Studie die Berechnungsmethode nach [Elgeti 1971] und kam nach seiner theoretischen Analyse fälschlicherweise zu dem Schluss, dass die damit berechneten Wärmeverluste zu vernachlässigen wären.

Die Analyse der Wärmeströme zeigt jedoch einen zusätzlichen Wärmestrom nach außen, der nicht zur Raumbeheizung zur Verfügung steht. Die detaillierte Wärmestromanalyse mit WUFI® 2D ermöglicht zudem eine weitere Unterscheidung der direkt für die Raumbeheizung zur Verfügung stehenden Wärmestromanteile in den Raum und der Wärmestromanteile, die in der Wand wirksam werden und damit den Wärmeabfluss aus den Raum reduzieren. Aus der Wärmestromanalyse wurde eine Methode zur Auswertung und Bewertung der Wärmestromanteile entwickelt. In der Parameterstudie wurden zu den Wärmestromanteilen das Wärmeabgabeverhältnis sowie der Wärmeabgabefaktor als neuer Bewertungsmaßstab entwickelt.

Die in der Parameterstudie durchgeführten Berechnungen sind aufgrund der hohen Parametervielfalt nicht durchgängig mit den gleichen Randbedingungen berechnet worden. Zum Teil wurden einzelne Parameter hygrothermisch oder rein thermisch berechnet oder der innere Gesamtwärmeübergang mit 1000 W/mK oder 100 W/mK berechnet. Dadurch sind nicht alle Parameterergebnisse untereinander direkt vergleichbar. Die grundsätzlich abgeleiteten Gesetzmäßigkeiten sind dadurch aber nicht beeinflusst.

Vergleich der Wärmeabgabe der Messungen mit den Ergebnissen der Parameterstudie

Für einen Vergleich der berechneten Wärmeabgabe der Bauteiltemperierung werden Messungen zur Wärmeabgabe realer Temperieranlagen in situ und in Laborumgebung durchgeführt. Der methodische Abgleich von Berechnung und Messergebnis soll die Richtigkeit der Berechnung bestätigen bzw. zur Klärung bisher nicht berücksichtigter Effekte bzw. Parameter beitragen. Während in den Feldstudien die Wärmeabgabe der spezifischen Anlage im realen Betrieb

(instationäre Randbedingungen) ermittelt wird, können in dem In-situ-Messraum mit laborähnlicher Umgebung detaillierte Einzelmessungen an der Bauteiltemperierung bei definierten Randbedingungen mit erhöhter Genauigkeit durchgeführt werden.

Die Berechnungsmethoden nach [Elgeti 1971] und WUFI® 2D zur Ermittlung der Wärmeabgabe der Bauteiltemperierung zeigen, für den einfachen Anwendungsfall mit einem Heizrohr im Mauerwerk, eine gute Übereinstimmung. Bei der detaillierten Betrachtung der Ergebnisse fallen jedoch Unterschiede auf. Zum einen unterscheiden sich die Ergebnisse zwischen WUFI® 2D und Elgeti bei dem Parameter der Putzüberdeckung gering aber auffällig. Dies wird bei Elgeti durch Grenzen der analytischen Methode und damit größerer Ungenauigkeit bei geringer Putzüberdeckung erklärt.

Zum anderen ergeben sich Unterschiede bei der Berechnung mit WUFI® 2D je nach hygrothermischer oder nur thermischer Berechnungsart und Modellierung des Heizrohres mit vereinfacht quadratischer Modellierung des Heizrohres oder angenähert runder Modellierung. Der Unterschied in der Wärmeabgabe und der dadurch resultierenden Oberflächentemperaturen zwischen thermischer und hygrothermischer Berechnung erklärt sich in der feuchteabhängigen Wärmeleitfähigkeit der Materialien. In der untersuchten Wand stellen sich über den Wandquerschnitt unterschiedliche Feuchtegehalte ein und in dessen Folge geringfügig unterschiedliche Wärmeleitfähigkeiten. In der rein thermischen Berechnung ist die Wärmeleitfähigkeit über den Querschnitt der Materialien jedoch konstant. Die Unterschiede in der Rohrmodellierung ergeben sich aus der oberflächennahen Anordnung des Rohres. Da das Heizrohr knapp unter der Wandoberfläche implementiert ist, bewirkt die quadratische Modellierung zur Oberfläche hin anstatt eines Scheitelpunktes eine dem Durchmesser entsprechende breite Linie mit konstantem Abstand. Trotz sehr hoch aufgelöster Gitterstruktur ergeben sich andere Oberflächentemperaturen an der Wandinnenoberfläche. Die angenäherte runde Rohrmodellierung ist realitätsnäher und damit genauer, verursacht aber einen erheblich höheren Modellierungs- und Berechnungsaufwand. Bei allen untersuchten Varianten der Modellierung des Rohres, der Berechnungsart oder Berechnungsmethode ergibt sich eine deutliche Überschätzung der Wärmeabgabe im Vergleich zur messtechnisch festgestellten Wärmeabgabe der Bauteiltemperierung. Die genaueste Modellierung mit angenähertem rund modelliertem Heizrohr und hygrothermischer Berechnung kommt dem Messergebnis am nächsten. Die berechnete Wärmeabgabe ist aber auch hier deutlich höher als die gemessene.

Die überhöhte berechnete Wärmeabgabe im Vergleich zur gemessenen Wärmeabgabe kann mit einem falsch gewählten Wärmeübergangskoeffizienten h_i ebenfalls nicht erklärt werden. Für eine Annäherung des Berechnungsergebnisses der Wärmeabgabe an die Messwerte müsste der Wärmeübergangskoeffizient auf ca. 4 W/m²K abgesenkt werden, was physikalisch nicht sinnvoll erscheint.

Wärmeübertragung der Bauteiltemperierung: Vom Heizwasser an die Wand

Bei der konsequenten Analyse der einzelnen Parameter kristallisierte sich ein bisher (auch in der Literatur) vernachlässigter, entscheidender Parameter heraus, der innere Wärmeübergang vom Heizmittel zum Mauerwerk. Bei [Elgeti 1971] und auch [VDI 2006] wird der innere Wärmewiderstand vom Heizmittel an die Rohrinnenwand als vernachlässigbar angesehen. Die Bestimmung des inneren Wärmeübergangskoeffizienten α_i anhand der gemessenen Fließgeschwindigkeit des Heizwassers ergibt einen stark variierenden Wärmeübergangskoeffizienten. Die real vorkommenden Fließgeschwindigkeiten lassen dabei unterkritische Reynold-Zahlen zu, d.h. es können laminare Strömungen auftreten mit entsprechend sehr niedrigen inneren Wärmeübergangskoeffizienten von rund 180 W/m²K. Mit höheren Fließgeschwindigkeiten steigt der Wärmeübergang α_i mit überkritischen Reynold-Zahlen sprunghaft an und erreicht bei den beobachteten Fließgeschwindigkeiten von rund 0,12 m/s bis 0,5 m/s (rund 0,4 - 4 l/min bei einem

Rohrinnendurchmesser von 13 mm) Werte von α_i zwischen 1000 W/m²K und 4000 W/m²K. Der in der Parameterstudie vorab frei gewählte und standardmäßig verwendete innere Wärmeübergangskoeffizient α_i wurde in WUFI bereits realitätsnah und eher niedrig mit 1000 W/m²K angenommen und mit Elgeti der Einfluss von α_i zunächst vernachlässigt (idealer Wärmeübergang). Der innere Wärmeübergangskoeffizient wurde in die Parameterstudie mit aufgenommen und eingehender untersucht. Die berechneten Wärmeabgaben nach Elgeti und WUFI liegen bei gleichen inneren Wärmeübergangskoeffizienten und gleichen Wärmeleitfähigkeit nun sehr nahe beieinander. Die deutlich niedrigere gemessene Wärmeabgabe im Vergleich zur berechneten kann mit realitätsnahen Wärmeübergangskoeffizienten α_i jedoch nicht erklärt werden.

Die Betrachtung der Wärmeübertragung an die Wand wird deshalb weiter vertieft. Zu dem inneren Wärmeübergang α_i vom Heizmittel an die Rohrinnenwand wird zusätzlich auch ein Wärmeübergangswiderstand von der Rohraußenwand an das Mauerwerk untersucht. Dieser thermische Widerstand wird auch als Kontaktwiderstand bzw. Kontaktkoeffizient α_K bezeichnet. Zwischen zwei Stoffen kann eine Zwischenschicht mit wesentlich niedrigerer Wärmeleitfähigkeit als die angrenzenden Materialien einen erheblichen thermischen Widerstand (Kontaktwiderstand) bewirken. Ist ein dünner Luftspalt zwischen den Materialien möglich, liegt ein erheblicher thermischer Widerstand vor. Bei starker Erwärmung des Kupferrohrs dehnt und verschiebt sich das Rohr im Putzmörtel infolge der thermischen Ausdehnung. Damit die Rohrdehnungen ohne Schäden am Putz (z.B. Risse) aufgenommen werden können, wird die Heizleitung bei noch feuchtem, nicht ausgehärtetem Putzmörtel aufgeheizt. Dadurch drückt sich die Rohrleitung, vor allem bei Rohrbögen, in den noch nachgiebigen Putz. Es wird im Putz ein Hohlraum geschaffen, der die Rohrdehnung aufnehmen kann, ohne zu Schäden am Putz zu führen. Der durch die Bewegungen des Rohres entstandene Spalt führt zu einem hohen thermischen Widerstand, der den Wärmeübergang vom Heizrohr an das Mauerwerk erheblich senkt. Der innere Wärmeübergangskoeffizient α_i und der Kontaktkoeffizient α_K werden im weiteren zusammengefasst als Gesamtwärmeübergangskoeffizient α_{HL}.

Zur Ermittlung des angepassten Gesamtwärmeübergangskoeffizienten α_{HL} wird dieser in der Berechnung iterativ angepasst, bis die rechnerische Wärmeabgabe der Heizleitung der gemessenen Wärmeabgabe bei ansonsten gleichen Randbedingungen entspricht. Die Berechnungen beziehen sich auf die Messung der Wärmeabgabe mit einer Genauigkeit von rund ±2,5 W/m bei einer Wärmeabgabe der Temperierung von rund 43 W/m. Dabei ergeben sich für die unterschiedlichen Berechnungsarten (thermisch oder hygrothermisch sowie die Modellierung des Heizrohres mit quadratischer Form oder angenäherter Kreisform) verschiedene α_{HL}. Mit der realitätsnahen hygrothermischen Berechnung mit Modellierung mit angenäherter Kreisform wird ein Wärmeübergangskoeffizient α_{HL} von 105 W/m²K und bei quadratischer Rohrmodellierung und rein thermischer Berechnung ein α_{HL} von 75 W/m²K ermittelt. Die so ermittelten Wärmeübergangskoeffizienten α_{HL} beziehen sich auf einen inneren Wärmeübergangskoeffizienten α_i von rund 2300 W/m²K, d. h. einer Durchflussmenge von rund 2,1 l/min bei einem Rohrdurchmesser von 15 mm. Eine höhere Durchflussmenge führt zu einer etwas höheren Wärmeabgabe, bei einer niedrigeren Durchflussmenge sinkt die Wärmeabgabe ab.

Die Überprüfung der Richtigkeit der Annahme erfolgt anhand der sich direkt auf Höhe der Heizleitung einstellenden Oberflächentemperatur an der Putzoberfläche. Ein niedriger Kontaktkoeffizient bewirkt eine deutliche Verringerung der Wärmeübergabe und infolge eine Herabsenkung der Oberflächentemperatur im Vergleich zum idealen Kontakt. Bei einem niedrigen Kontaktkoeffizienten muss sich eine entsprechend große Temperaturdifferenz zwischen Heizmittel und Oberflächentemperatur einstellen. Wäre ein hoher Kontaktkoeffizient vorhanden, würde sich eine geringe Temperaturdifferenz einstellen. Durch mehrere Messungen in den Feldstudien sowie in der laborähnlichen Messung im Messraum wird ein entsprechend hoher

Temperaturabfall, wie ihn ein niedriger Kontaktkoeffizient verursacht, nachgewiesen. Die Temperaturdifferenz wird geringfügig auch durch die Größe des Wärmeübergangskoeffizienten h_i von der Wandoberfläche zum Raum beeinflusst. Wie in der Parameterstudie mit unterschiedlichen Wärmeübergangskoeffizienten h_i an der Wandoberfläche ermittelt, stellt sich bei einem Wärmeübergangskoeffizienten h_i von 12 W/m²K eine geringfügige um ca. 1 K größere Temperaturdifferenz ein, die aber bei weitem nicht ausreicht, um die beobachtete Temperaturdifferenz zu erklären. Erst mit einem niedrigen Kontaktkoeffizienten wird in etwa die durch die Messung festgestellte Temperaturdifferenz erreicht. Die Annahme eines niedrigen Kontaktkoeffizienten als Ursache für die wesentlich geringere Wärmeabgabe wird damit bestätigt.

Die berechnete Wärmeabgabe der unterschiedlichen Anordnung der Heizschleifen ergibt mit dem ermittelten Wärmeübergangskoeffizienten α_{HL} jeweils eine sehr gute Übereinstimmung zu den Messwerten. Die Überprüfung der Berechnung an einer weiteren Temperieranlage am Fischerweber Hof (Glentleiten) zeigt ebenfalls eine sehr gute Übereinstimmung mit den Messwerten.

Energieeffizienz und Wärmeabgabefaktor der Bauteiltemperierung

Der Einbau der Heizleitung unter Putz (Bauteiltemperierung) bewirkt eine direkte Wärmeleitung nach außen. Dadurch stellen sich im Vergleich zu einer anderen Raumbeheizung ohne Kontakt zur Wand zusätzliche Wärmeverluste ein. Der zusätzliche Wärmeverlust führt zu einer lokalen Erhöhung der Oberflächentemperatur an der Außenwandoberfläche, die messtechnisch mehrfach zweifelsfrei nachgewiesen und rechnerisch eindeutig belegt ist. Mit der Berechnungsmethode nach Elgeti oder mit einer Software wie z.B. WUFI® 2D können diese Wärmeverluste berechnet werden. Dadurch ist der Wärmestromanteil bekannt, der nicht für die Raumbeheizung zur Verfügung steht. Das Verhältnis des nach außen abgegebene Wärmestroms zu dem nach innen abgegebenen Wärmestroms der Temperierung wird als Wärmeabgabeverhältnis definiert. Die Gesamtwärmeabgabe im Verhältnis zu dem nach innen abgegebenen Wärmestrom wird als Wärmeabgabefaktor bezeichnet.

Die ursprüngliche Vergleichsmessung mit Vergleich der gemessenen Wärmeabgabe der Temperierung zu einem elektrischen Heizkörper [Kilian et al 2015] enthielt eine unzulässige Mittelwertbildung die zu einem zu hohen Leistungsvergleichswert führte. Mit einer parallel und unabhängig dazu durchgeführten Messung der Brüstungsschleife kann nur ein Teil der Wärmeabgabe der Vergleichsmessung nachträglich verlässlich bestimmt werden. Die instationäre Simulation der Wärmeabgabe der Brüstungsschleife mit den gemessenen Randbedingungen (Vor-und Rücklauftemperatur, Innen- und Außenklima) in der Periode der Vergleichsmessung ergibt eine gute Übereinstimmung mit den Messwerten. Daraus folgt, dass die Wärmeabgabe stationär wie instationär zuverlässig berechnet werden kann.

Aus der Simulation der Temperierung mit Anordnung der Heizleitungen wie bei der Vergleichsmessung im Messraums in Benediktbeuern ergibt sich ein Wärmeabgabefaktor im stationären eingeschwungenen Zustand von 125,1 %. D.h. es wird für diesen spezifischen Wandaufbau 25,1 % mehr Energie benötigt. Die berechnete Wärmeabgabe aus der Simulation wird mit der gemessenen Wärmeabgabe des elektrischen Radiators in der Vergleichsperiode verglichen. Die mit den gemessenen Randbedingungen für die Vergleichsperiode instationär berechnete Wärmeabgabe der Temperierung nach innen ergibt zum gemessenen Energieverbrauch des elektrischen Radiators im Leistungsvergleich 102,9 %. Führt man den Leistungsvergleich für die berechnete Gesamtwärmeabgabe der Temperierung in der Vergleichsperiode zum Energieverbrauch des elektrischen Radiators durch, ergibt sich ein Leistungsverhältnis von 128,8 %. Beide Ergebnisse bestätigen in guter Übereinstimmung innerhalb der Genauigkeit der Modellierung bzw. Messung die Qualität der Berechnung.

In dem Vergleich der Energieeffizienz (gemessene und berechnete) liegt der Bezug auf einer gleichen Raumlufttemperatur von 20 °C. Bei der messtechnischen Ermittlung der Energieeffizienz wird die Lufttemperaturmessung in einer Höhe von 1,7 m mit einer Strahlungsabschirmung gemessen und ist damit frei vom Einfluss der Wärmestrahlung. Die Temperaturschichtung oder Strahlungswirkung der Heizeinrichtungen (Temperierung oder Radiator) geht in diese Betrachtung nicht ein. Beide Methoden (Messung und Berechnung) beziehen sich damit auf das energetisch gleiche Raumtemperaturniveau. Mögliche unterschiedliche Behaglichkeitswirkungen auf den Menschen oder Raumklimaverteilung der beiden Heiztechniken Temperierung oder Radiator werden dabei jedoch nicht berücksichtigt.

Der rechnerisch ermittelte Wärmeabgabefaktor bzw. das Wärmeabgabeverhältnis entspricht daher dem tatsächlichen Mehrverbrauch im realen Betrieb einer Temperieranlage im Vergleich zu einem elektrischen Radiator. Der so definierte Wärmeabgabefaktor kann deshalb als geeigneter Beurteilungsmaßstab für die Energieeffizienz einer Temperierung verwendet werden.

Das Wärmeabgabeverhältnis wird im wesentlichen durch den Wärmedurchlasswiderstand des Mauerwerks und die Lage des Heizrohres in der Wand bestimmt. Der Wärmeübergangskoeffizient α_{HL}, die Anzahl der Heizleitungen (eine oder zwei Heizleitungen), Art der Rohrmodellierung, die Heizmitteltemperatur sowie die Außen- und Raumtemperatur haben hingegen gemäß Parameterstudie nahezu keine Auswirkung auf das Wärmeabgabeverhältnis. Dadurch reduzieren sich die Einflüsse auf das Berechnungsergebnis erheblich. Durch die Wärmestrommessung konnte der tatsächliche Wärmedurchlasswiderstand des Mauerwerks genau bestimmt werden. Ebenso sind die Bauteilabmessung und Lage der Rohre gut dokumentiert.

Eine mögliche Abweichung des Messergebnisses der Wärmestrommessung zum tatsächlichen Wert besteht in dem inhomogenen Wandaufbau des historischen Mischmauerwerks aus dem 18. Jahrhundert. Da anhand der Wärmestrommessung die Wärmeleitfähigkeit für die rechnerische Untersuchung ermittelt wurde, ist das Messergebnis korrekt in Bezug zur Simulation. Inwieweit der Messwert dem Mittelwert der gesamten Außenwand im Messraum entspricht, kann über die Thermogramme nur abgeschätzt werden. Im Messraum sind an der Innenoberfläche, im Gegensatz zur Außenoberfläche, keine auffälligen größeren Abweichungen infolge Materialinhomogenität feststellbar. Es wird deshalb davon ausgegangen, dass die ermittelte Wärmeleitfähigkeit am Messpunkt im Wesentlichen die Wärmeleitfähigkeit der gesamten Wand repräsentiert.

Verallgemeinert man den Ansatz, folgt daraus, dass das Wärmeabgabeverhältnis bzw. der Wärmeabgabefaktor der Energieeffizienz von Heizflächen entsprechen, die mit der Außenwand bzw. Bauteilen mit Transmissionswärmeverlust verbunden sind. Neben der Bauteiltemperierung lässt sich damit auch die Energieeffizienz von z.B. Wandflächenheizungen ermitteln.

Weiter folgt aus diesem Ansatz, dass sich im Falle einer anderen Anordnung der Heizleitungen die Energieeffizienz verbessern kann. Würde z.B. ein Teil der erforderlichen Heizleistung durch an den Innenwänden verlegte Heizleitungen erfolgen oder über einen zusätzlichen Radiator, sinkt der Anteil der Gesamtwärmeverluste zur Gesamtwärmeabgabe entsprechend ab. In der Folge verbessert sich die Energieeffizienz bzw. das Wärmeabgabeverhältnis zur Gesamtenergieaufwendung, da nur entsprechend dem Anteil der Temperierung in Außenwänden zusätzliche Wärmeverluste durch direkte Wärmeleitung verursacht werden.

Messung und Berechnung der Wärmeabgabe der unter Putz verlegten Temperierung der Feldstudien

Im Obergeschoss der Fallstudie Bad Reichenhall wird mit der Anordnung der Temperierung als große Schleife eine enorm hohe spezifische Wärmeabgabe von ca. 1,7 W/mK festgestellt. Im

Vergleich dazu erreicht die spezifische Leistung der großen Schleife im Messraum in Benediktbeuern lediglich rund 1 W/mK. Die deutliche höhere Wärmeabgabe wird auf die höhere Wärmeleitfähigkeit des Bruchsteinmauerwerks zurückgeführt. Messungen zur Wärmeleitfähigkeit liegen für die Fallstudie Bad Reichenhall leider nicht vor. Zur Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit wird diese in der Berechnung nach Elgeti zur Wärmeabgabe der Temperierung schrittweise erhöht, bis sich die gemessene Wärmeabgabe ergibt. Mit dieser Vorgehensweise wird für das Bruchsteinmauerwerk eine Wärmeleitfähigkeit von ca. 1,8 W/mK bestimmt.

Die unter Putz verlegte Temperierung der Fallstudie Fischerweber Hof wurde mit einem Dämmstreifen hinterlegt, sodass die Heizleitung dabei direkt auf der Dämmung liegt. Die Vor- und Rücklaufleitung wurden in einem engen Achsabstand von ca. 6 cm verlegt. Dadurch ergibt sich eine geringe Wärmeabgabe mit einer spezifischen Leistung von ca. 0,7 W/mK trotz eines niedrigen Wärmdurchlasswiderstandes im Regelquerschnitt der Außenwand mit 0,48 m²K/W.

Die Wärmeabgabe der Temperierung in der Fallstudie Aldersbach wurde mit und ohne Wärmedämmung hinter der Heizleitung der Temperierung untersucht. Die beiden Leitungsabschnitte sind ansonsten in etwa gleich verlegt. Auch die Raumtemperaturen in den beheizten Räumen sind während des Messzeitraums in etwa gleich hoch. Es ergibt sich ein Unterschied in der Wärmeabgabe der Temperierung mit Dämmung gemäß Messung von rund 10 % zur Temperierung ohne Wärmedämmung. Der direkte Vergleich zeigt die Wirksamkeit der Wärmedämmung auf. Die Wärmeabgabe wird durch die Anordnung einer Dämmung reduziert. Gemäß rechnerischer Untersuchung der Effizienz der Fallstudie reduziert sich die Wärmeabgabe durch die Anordnung der Wärmedämmung im Vergleich zur Berechnung ohne Wärmedämmung um 12 % und bestätigt damit die messtechnisch festgestellte Reduzierung der Wärmeabgabe.

Messung und Berechnung der Wärmeabgabe der auf Putz verlegten Temperierung der Feldstudien

Für die Berechnung der Wärmeabgabe von auf Putz verlegten Heizrohren ist für Heizleitungen ohne Kontakt zur Wand der Wärmeübertragungsmechanismus hinlänglich bekannt [VDI 2006] und auch in einschlägiger Fachliteratur veröffentlicht, z.B. Recknagel / Sprenger [Schramek 2011]. Das Heizrohr als wärmeabgebende Heizfläche wurde in früheren Zeiten mit größeren Rohrdurchmessern verwendet. Hierfür liegen auch Tabellenwerte vor [Schramek 2011]. Die für die Temperierung verwendeten Rohrdurchmesser werden dabei kaum berücksichtigt oder sind in Diagrammen, wegen der geringen Wärmeabgabe, nicht geeignet ablesbar. Bei der Literaturrecherche fällt auf, dass die dort angegebenen Diagramme und Näherungsgleichungen unterschiedliche Wärmeleistungen ergeben. Die eigenen Berechnungen hierzu, erstellt mit Formeln aus [VDI 2006], werden deshalb exemplarisch für einen Rohrdurchmesser von 15 mm in einem Diagramm dargestellt und für eine Bewertung der In-situ-Messungen herangezogen.

Es erfolgte eine Überprüfung der Wärmeabgabe eines Registers mit vier übereinander angeordneten Heizrohren in der Feldstudie Schweinfurt. Die Messung ergab im Mittel in etwa die berechnete Wärmeabgabe.

Die Auswirkungen der Wärmeübertragung auf angrenzende Bauteile durch Wandkontakt wurden in der Feldstudie Feuchtwangen rechnerisch untersucht. Die Intensität der Wärmeübertragung wurde dabei mit einem Kontaktkoeffizienten zwischen Heizleitung und Außenwand variiert. Die daraus resultierende Wärmeabgabe auf das Bauteil wurde anhand der mit IR-Thermographie gemessenen Oberflächentemperaturen der Außenwand abgeglichen. Mit dieser Methode wird für die Feldstudie Feuchtwangen ein Kontaktkoeffizient von 20 W/m²K bestimmt. Dies entspricht einem längenbezogenen Wärmestrom von 0,3 W/K in die Außenwand. Durch den Kontakt erfolgt eine direkte Wärmeleitung nach außen und damit auch ein Wärmeverlust durch Wärmeleitung. Berücksichtigt man den Wärmefluss durch Strahlung von Heizrohren, die

mit Abstand vor der Wand verlegten sind, ergibt sich ebenfalls eine erhöhte Wärmeabgabe an die Außenwand. Eine genauere Untersuchung der Effizienz von vor der Wand verlegten Heizrohren mit und ohne Kontakt zur Wand steht jedoch noch aus.

Aus der Leistungsmessung der auf Putz verlegten Temperierung der Feldstudie Glentleiten wird eine spezifische Wärmeabgabe von 0,57 W/mK festgestellt. Dies entspricht fast der spezifischen Wärmeabgabe von Heizrohren ohne Wandkontakt mit rund 0,62 W/mK bei gleicher Übertemperatur. Für die Ermittlung der Wärmeabgabe einer Temperierung mit Wandkontakt kann daher näherungsweise die Wärmeabgabe von luftumspülten Rohren verwendet werden.

Raumklima durch Temperierung

Bei Anwendung der Temperierung für konservatorische Zwecke ist das durch die Temperierung entstehende Raumklima von zentraler Bedeutung. Die in situ durchgeführten Messungen des Raumklimas ergeben entsprechend dem gewählten Zieltemperaturbereich unterschiedliche Klimakorridore. In der musealen Anwendung in historischen Gebäuden werden je nach Nutzung und Anforderung verschiedene Mindesttemperaturbereiche angestrebt. In Freilichtmuseen, selten genutzten Kapellen oder Kirchen werden bei den untersuchten Gebäuden die geringsten Temperaturanforderungen gestellt, die zum Teil auch unter 0 °C reichen. Die energiesparende Begrenzung zu hoher relativer Feuchte steht im Vordergrund. Dies gelingt bei den untersuchten Objekten mitunter sehr gut. Bei Museen mit längeren Schließzeiten in der kalten Jahreszeit wird das Temperaturniveau bei einigen Museen auf Werte um 10 °C bis 12 °C herabgesetzt. Die relative Feuchte kann ohne Einsatz von Befeuchtern meistens auf konservatorisch günstigem Niveau gehalten werden. Bei durchgängigem Museumsbetrieb werden Mindesttemperaturen um 15 °C beobachtet. Ohne Einsatz von Befeuchtern stellen sich teilweise, bei ungünstigen außenklimatischen Verhältnissen, zu geringe relative Feuchten ein. Bei gewissenhaftem Einsatz von Be- und Entfeuchtern kann auch mit einer hohen Anzahl von Besuchern ein konservatorisch günstiger enger Klimakorridor erreicht werden. Mit zunehmender Beheizung auf Werte um 18 °C bis 20 °C Mindesttemperatur können aber bei den untersuchten Gebäuden, trotz Einsatz von Befeuchtern, konservatorisch ungünstige, niedrige relative Feuchten nicht vermieden werden.

Die Beurteilung eines Heizsystems anhand von Raumklimamessungen in situ im laufenden Betrieb unterliegt vielen Unsicherheiten. Neben dem Heizsystem ist die thermische Qualität der Gebäudehülle, Dichtigkeit des Gebäudes, Anzahl der Besucher, Einsatz von zusätzlicher Klimatechnik sowie allgemeine Betreuung des Gebäudes und der Technik durch das zuständige Personal für das Raumklima von hoher Bedeutung [Raffler 2014]. Der Rückschluss des gemessenen Raumklimas auf die Wirkungsweise der Temperierung beinhaltet zu den Messungen deshalb zum Teil auch eine qualitative Beurteilung aus den mehrjährigen Untersuchungen der Gebäude, in der die o.g. Faktoren mit einfließen.

Die durch die Temperierung bewirkte günstige Temperaturschichtung im Raum und damit einhergehend gleichmäßigere Luftfeuchteverteilung führt zu einer Verbesserung des lokalen Raumklimas für das Kulturgut sowie eine Erhöhung der Behaglichkeit. Die Untersuchung der vertikalen Temperatur- und Feuchteverteilung in situ ergibt für die Temperierung insgesamt sehr niedrige Gradienten und damit eine sehr homogene Verteilung. Bei den Untersuchungen zur vertikalen Temperaturverteilung der Raumluft im Messraum in Benediktbeuern stellten sich je nach verwendeter Anordnung der Heizschleifen unterschiedlich ausgeprägte Temperaturschichtungen ein. Bei einigen Messungen wurde zur Sicherstellung einer Raumtemperatur von 20 °C zusätzlich zur Temperierung mit einem elektrischen Radiator hinzugeheizt. Mit zunehmenden Anteil der Wärmeabgabe durch die Temperierung stellt sich eine weniger ausgeprägte und damit günstigere Temperaturschichtung ein.

Vereinfachte neue Berechnungsmethode zur Wärmeabgabe der Temperierung

Die neu entwickelte Methode wurde anhand der Messungen im Messraum Benediktbeuern kalibriert und an weiteren Fallbeispielen validiert. Aus den berechneten Parameterkurven wurde eine Näherungsfunktion entwickelt, die nur zwei Variablen nutzt. Diese Variablen, Wärmeleitfähigkeit und Dicke der Wand, haben den größten Einfluss auf die Wärmeabgabe der unter Putz verlegten Temperierung. Dadurch wird die Gleichung entsprechend vereinfacht und die Anwendung erleichtert. Zusätzlich wurden weitere Gleichungen entwickelt, mit denen die Heizmittelübertemperatur, Außenlufttemperaturdifferenz zur Raumlufttemperatur und der Rohrdurchmesser berücksichtigt werden können.

Ein Vergleich der Ergebnisse der Näherungsfunktionen mit den Ergebnissen nach Elgeti bzw. WUFI® 2D zeigen eine gute Übereinstimmung mit einer Abweichung von maximal ±1,0 W/m im Kernbereich des Parameterfeldes für alle Parameter. Bei extremen Werten der Variablen (z.B. sehr dünnen Wänden, sehr hohe oder niedrige Wärmeleitfähigkeiten), ergeben sich zum Teil größere Abweichungen von bis zu ±3,5 W/m auf das Berechnungsergebnis bei einer Heizmittelübertemperatur von 40 K. Die Berechnung der Wärmeabgabe bei anderen Heizmittelübertemperaturen ist ebenfalls im praxisrelevanten Bereich vereinfacht möglich. Mit der neu entwickelten vereinfachten Berechnungsmethode werden die meisten praxisrelevanten Fälle damit abgedeckt. Für die Untersuchung von Wärmebrücken muss jedoch auf eine geeignete 2D-Software zurückgegriffen werden.

7 Zusammenfassung

Die Ermittlung der Wärmeabgabe und Klärung der Effekte der Temperierung stehen im Zentrum der Untersuchungen. Voraussetzung für die Einordnung der Wärmeleistung sind die Randbedingungen wie Einbausituation und Raumklima (Anwendungssituation). Mit dem Entwurf der Feldstudie und damit verbundenen Sichtung bestehender Temperieranlagen sowie den in der Literatur beschriebenen Anlagen und Anwendungen erfolgte eine typologische Beschreibung der Temperierung. Die Temperiersysteme werden in Gruppen nach wärmeübertragendem Mechanismus unterteilt: Heizleitung unter Putz verlegt (Bauteiltemperierung), Heizleitung auf Putz verlegt, mit und ohne Kontakt zur Wand, sowie Wandschalenkonstruktion. Die Untersuchungen konzentrieren sich dabei auf die gebräuchlichste Form der Temperierung in der unter Putz verlegten Variante als Bauteiltemperierung. In der Literatur konnten zu den hygrothermischen Auswirkungen der Bauteiltemperierung auf den Feuchtetransport mehrere Studien ausfindig gemacht werden. Die drei unabhängig voneinander durchgeführten Studien kommen zu dem Schluss, dass der Feuchtetransport bei durchnässtem Sockelmauerwerk mit aufsteigender Feuchte durch die Temperierung nicht zum Erliegen kommt, sondern im Gegenteil verstärkt wird. Trotzdem führt die Bauteiltemperierung zu einem geringeren Wassergehalt im Bauteil.

Die Messung der Energieeffizienz der Bauteiltemperierung im Vergleich zu anderen Heiztechniken wurde ebenfalls in mehreren Studien thematisiert. Der energetische Vergleich in den In-situ-Messungen in historischen Gebäuden stellt dabei große Anforderungen an die Vergleichbarkeit der Messräume. Erst mit der am Fraunhofer-Zentrum in Benediktbeuern durchgeführten Vergleichsmessung zusammen mit in dieser Arbeit erneuten Bewertung der Messung und Abgleich mit den rechnerischen Untersuchungen konnte ein belastbares Ergebnis erarbeitet werden. In den Feldstudien wurden Messungen der Wärmeabgabe von einzelnen Temperierschleifen durchgeführt. Abweichend zu den in der Literatur spärlich vorhandenen Faustwerten zeigten sich erheblich unterschiedliche Wärmeabgaben, die um über ±50 % vom Faustwert abweichen. Die Hauptfragestellung in dieser Arbeit ist daher die Klärung der Wärmeübertragung vom Heizrohr über die Wand an die Umgebung. Wie hoch ist die tatsächliche Wärmeabgabe nach innen und nach außen und kann die Wärmeabgabe mit den vorhandenen Berechnungsmodellen richtig ermittelt werden? In einer rechnerischen Parameterstudie, durchgeführt mit moderner Software zur Berechnung von zweidimensionalen hygrothermischen Feldern, wird der Einfluss der bekannten Parameter auf die Wärmeabgabe untersucht. Zum Vergleich wurde auch eine bereits länger existierende analytische Rechenmethode verwendet, mit der es möglich ist, die Wärmeabgabe eines wandverlegten Rohres zu ermitteln. Beide Rechenmethoden liefern für die Bauteiltemperierung bei gleichen Randbedingungen gleichwertige Ergebnisse. Zu den Parametern der Geometrie, Anordnung des Heizrohrs und Stoffwerte der Wand, wurde auch der Einfluss des Wärmeübergangskoeffizienten h von der Wand zur Raumluft auf die Wärmeabgabe und Effizienz untersucht.

Zur Klärung der Wärmeübertragung von der Wand an die Raumluft wird in einem Messraum an einer nachgestellten Temperierung mit einer Particle Image Velocimetry (PIV) die von der Temperierung ausgehende wandnahe Raumluftströmung vermessen. Die von der Temperierung erwärmte Luft schmiegt sich dabei in den ersten 11 cm bis 15 cm an der Wand eng an und mischt sich dann mit der von den kühleren Wandbereichen herabsinkenden Luft bzw. der wandnahen Raumluft. In dem Wandbereich, an dem die Auftriebsströmung an die Wand anliegt, wird konvektive Wärme an die Wand abgegeben. Dadurch wird die etwas erhöhte Wärmeabgabe des warmen Wandbereichs der Temperierung wieder kompensiert. Im Mittel ergibt sich in etwa der für Wandheizungen übliche Wärmeübergangskoeffizient von 8 W/m².

In dem Messraum in dem denkmalgeschützten Gebäude der Alten Schäfflerei in Benediktbeuern, der bereits für die Vergleichsmessung zur Energieeffizienz verwendet wurde, konnten unter laborähnlichen Bedingungen Einzelmessungen zur Wärmeabgabe durchgeführt werden. Dieses Vorgehen ermöglichte die Messung der Wärmeabgabe unter konstanten Randbedingungen. Lediglich die Außenlufttemperatur variierte. Es zeigte sich, dass die berechnete Wärmeabgabe zunächst deutlich überhöht war im Vergleich zu der gemessenen Wärmeabgabe der Temperierung. Bei der genaueren Analyse des Wärmeübergangs vom Heizmittel zum Mauerwerk kristallisierte sich ein bisher nicht berücksichtigter entscheidender Parameter heraus, der die Wärmeabgabe stark beeinflusst: Der Wärmewiderstand vom Heizrohr zum Mauerwerk (Kontaktkoeffizient). Die Richtigkeit der Annahme eines vorhandenen thermischen Widerstandes wird über die Messung der Temperaturdifferenz zwischen Heizmittel und maximaler Oberflächentemperatur an der Wandinnenseite bestätigt.

Beide Berechnungsmethoden liefern mit dem erweiterten Berechnungsmodell und angepassten Kontaktkoeffizienten nun eine gute Übereinstimmung mit den Messwerten. Anhand der rechnerischen Wärmestromanalyse können die unterschiedlichen Wärmestromanteile der Bauteiltemperierung ermittelt werden. Zur Bewertung der Wärmestromanteile wurde eine neue Methode entwickelt, die es ermöglicht die Energieeffizienz der Bauteiltemperierung zu beurteilen. Hierfür werden das Wärmeabgabeverhältnis bzw. der Wärmeabgabefaktor gebildet. Im Ergebnis kann für den Messraum in Benediktbeuern die Energieeffizienz anhand der Wärmestromverhältnisse mit hoher Übereinstimmung zur Referenzmessung der Vergleichsmessung bestimmt werden. Die Bauteiltemperierung benötigt demnach für den gewählten Vergleichsaufbau rund 26 % mehr Energie zur Beheizung des Messraums.

Ein wesentlicher Aspekt des Raumklimas ist die Raumklimaverteilung, insbesondere an den häufig kritischen Sockelbereichen der Außenwände. Die Temperierung zeigt bei genauerer Untersuchung einen hohen Einfluss auf die vertikale Lufttemperaturschichtung im Raum und vor allem im Nahbereich der temperierten Außenwand. Die Temperaturverteilung und in deren Folge die Verteilung der relativen Luftfeuchte ist sehr gleichmäßig mit nur geringen vertikalen Gradienten. Ein geringer Gradient in der Temperaturschichtung wirkt sich zudem auf die thermische Behaglichkeit günstig aus. Die in den Feldstudien vorgefundenen unterschiedlichen Anwendungen der Temperierung und festgestellten Raumklimata können für die Erhaltung als positiv angesehen werden.

Gemäß Parameterstudie wird die Wärmeabgabe der Temperierung maßgeblich von der Wärmeleitfähigkeit sowie der Wanddicke des Mauerwerks bestimmt. Für eine für den Anwender einfachere Berechnung der Wärmeabgabe der Bauteiltemperierung wird anhand von Parameterkurven eine Näherungsfunktion entwickelt. Die Näherungsfunktion wird mit einer Potenzfunktion beschrieben, mit der bei einer typischen Heizmittelübertemperatur von 40 K in Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit und Wanddicke die Wärmeabgabe berechnet werden kann. Weitere Parameter, wie Rohrdurchmesser, Temperaturdifferenz zwischen Außenluft und Raumluft sowie Heizmittelübertemperatur, können über weitere Faktoren bzw. Terme berücksichtigt werden. Es ergibt sich eine gute Übereinstimmung mit den erweiterten Rechenmodellen der genaueren Berechnungsmethoden. Bei komplexeren Wandaufbauten (Wärmebrücken, partielle Wärmedämmung), Feuchteeinfluss oder mehreren Heizrohren ist die Berechnung der Wärmeabgabe derzeit nur über 2D-Software möglich. Für die Dimensionierung der Temperierung aus der Heizlastberechnung ist die Berechnung des nach innen abgegebenen Wärmestromanteils erforderlich. Die nach innen abgegebene Wärme kann über das Wärmeabgabeverhältnis zusammen mit der Gesamtwärmeabgabe ermittelt werden. Für das Wärmeabgabeverhältnis bzw. den Wärmeabgabefaktor wird ebenfalls eine Näherungsgleichung angegeben, die nur über den Wärmedurchlasswiderstand und der Putzüberdeckung ermittelt wird.

8 Ausblick

Die Temperierung ist eine eigenständige Heiztechnik mit vielen Ausprägungen und unterschiedlichen Anwendungen. Die vereinfachte Berechenbarkeit von Wärmeabgabe und Effizienz ist eine wichtige Voraussetzung für den richtigen und gezielten Einsatz der Temperierung.

Die Anwendung zur Beheizung für die thermische Behaglichkeit ohne konservatorische Anforderung sollte bei fehlender thermischer Qualität der Gebäudehülle nur in Kombination mit einer zusätzlichen Heizeinrichtung erfolgen. Die positiven Eigenschaften für ein günstiges konservatorisches Raumklima bzw. eine höhere thermische Behaglichkeit können auch mit zusätzlicher Heizeinrichtung erreicht werden. Für den energieeffizienten Betrieb ist auch die Anordnung der Temperierleitung von hoher Bedeutung. Hier sind die Aspekte des Feuchteschutzes, Energieeinsparung, Behaglichkeitsanforderungen sowie konservatorische und museumspädagogische Anforderungen miteinander abzuwägen. In [Wurm et al 2012] wird in einer Simulationsstudie der Energieeinsatz einer lokalen thermischen Beheizung von thermischen Schwachstellen (im Altbau) rechnerisch einem erhöhten Lüftungsbedarf zur Vermeidung von Schimmelpilzbildung gegenübergestellt. Im Ergebnis ist die lokale thermische Beheizung unter bestimmten Voraussetzungen energetisch günstiger im Vergleich zum verstärkten Lüften. Die lokale Beheizung thermischer Schwachstellen entspricht vom Prinzip her der Anwendung einer Temperierung. Die Temperierung beeinflusst das Raumklima bei richtiger Anwendung positiv und trägt zur Erhaltung des Gebäudes, dessen Ausstattung und bei musealer Nutzung der der Ausstellungsstücke bei. Die rein energetische Betrachtung kann dabei von anderen, z.B. konservatorischen Zielen, ablenken. Generell sollte passiven Maßnahmen der Vorrang gegeben werden, soweit diese anderen Ziele nicht widersprechen und vertretbar umgesetzt werden können.

Die Berechnung nach DIN 18599 erlaubt für die Betrachtung von Museen, die als Klimakonzept eine gleitende Raumlufttemperatur bzw. eine temperaturgesteuerte Feuchteregelung haben, die Berücksichtigung eines gleitenden Raumklimas. Hierfür ist weiterer Forschungsbedarf erforderlich, um für die jeweilige spezifische Anforderung passende gleitende Raumtemperaturkorridore bzw. Nutzerprofile zu ermitteln [Reuther et al 2015], [Bichlmair et al 2016]. Darüber hinaus ist eine neu zu entwickelnde Bewertung erforderlich, wie eine zulässige Abweichung vom Sollwert, z.B. bei extremen Klimaereignissen, berücksichtigt werden kann.

Die Bauteiltemperierung senkt den Gradienten der vertikalen Temperaturschichtung und damit potentiell den Anteil der unzufriedenen Personen. Die genaue Höhe des Absenkpotentials der Raumtemperatur gegenüber Räumen mit ausgeprägter Schichtung sollte in zukünftigen Arbeiten quantifiziert werden. Weitere Untersuchungen zu möglichen geringeren Zuglufterscheinungen bei Räumen mit Temperierung infolge des geringen konvektiven Wärmeeintrages gegenüber Räumen ohne Temperierung sollten durchgeführt werden. Die Temperaturschichtung bzw. Klimaverteilung im Raum könnte durch Simulation der Raumluftverteilung bei Beheizung mit Temperierung bzw. zusätzlichen Heizeinrichtung mit CFD (Computational Fluid Dynamics) oder weniger aufwändig mit deutlich geringerem Rechenaufwand mit einem zonalen Modell wie z.B. VEPZO (Velocity Propagating Zonal Model) vorhergesagt werden.

Mit der PIV-Messung (Particle Image Velocimetry) wurden erste Untersuchungen der Strömungsverhältnisse an einer Temperierung durchgeführt. Weitere experimentellen und theoretische strömungsmechanische Untersuchungen sind zur Ermittlung einer geeigneten Wandfunktion zur Beschreibung des variierenden Wärmeübergangs über die Wandhöhe erforderlich.

Für die vereinfachte Berechnung der Bauteiltemperierung wurde eine neue Berechnungsmethode entwickelt. Mit dieser Methodik können auch Parameter zur Bestimmung der Wärmeabgabe von zwei parallel verlaufenden Heizrohren in Wänden bestimmt werden.

Die Findung eines zutreffenden Kontaktkoeffizienten sollte auch für den Rohrmaterialtyp Verbundrohr durchgeführt werden. Aus der Literatur konnten keine Kontaktkoeffizienten für den Einbau von Heizrohren ermittelt werden. Dies mag daran liegen, dass die spezielle Einbausituation und Materialkombination anderweitig wenig gebräuchlich ist. Die Kombination von Metallrohr im direkten Materialverbund mit Kalkputz wird zum Teil auch für Wandheizungssysteme verwendet. Häufiger jedoch werden Heizrohre aus Kunststoff bzw. Verbundwerkstoff verwendet, die im Vergleich zum Metallrohr geringere Spannungen aufbauen. Der größere E-Modul von Kupferrohr im Vergleich zum Verbundrohr verursacht höhere Spannungen, die durch den Putz ggf. aufgenommen werden müssen bzw. es wird durch die spezielle Einbauweise die thermische Dehnung aufgenommen, ohne große Spannungen zu verursachen.

Die neu entwickelte Methodik zur Bestimmung des Wärmeabgabeverhältnisses und Wärmeabgabefaktors bzw. Energieeffizienz kann auch auf andere mit der Außenwand fest verbundene Heizsysteme, wie z.B. Wandheizung übertragen werden. Hierfür sind weitere Untersuchungen erforderlich, die die neu entwickelte Methodik für die Bauteiltemperierung auf die Wandheizung übertragen und rechnerisch sowie messtechnisch nachweisen.

Die feuchtetechnische Wirkung der Bauteiltemperierung wurde bereits in mehreren Studien untersucht. Eine Bemessungsmöglichkeit, in der die feuchtetechnische Wirkung quantifiziert und damit eine Auslegung ermöglicht wird, fehlt jedoch bislang. Ausgehend von den in dieser Arbeit entwickelten Bemessungsgrundlagen und festgestellten Wirkungen sollten weitere Untersuchungen zur feuchtetechnischen Bemessung der Temperierung mit geeigneten Softwarelösungen wie z.B. WUFI® erfolgen. Für die Quantifizierung der Auswirkung der Temperierung auf die Mauerwerksfeuchte bei aufsteigender Feuchte im Anwendungsfall ist eine genaue Kenntnis der Feuchteverteilung und Feuchtequellen erforderlich. Da bei Sanierungen i.d.R. flankierende Feuchteschutzmaßnahmen durchgeführt werden, ist deren Auswirkung von den Auswirkungen der Temperierung auf die Feuchteverteilung zu trennen. Eng verbunden mit den feuchtetechnischen Aspekten ist die Auswirkung der Temperierung auf die Salzmigration salzbeladener Bauteile. Die Änderungen des Feuchtegehaltes und der Feuchteströme im Bauteil durch die Temperierung wirken sich auch auf den Salztransport aus. Entsprechendes gilt für Bauteilfeuchte, die durch Sommerkondensation verursacht wird. Für die Modellbildung und Entwicklung bemessungstauglicher Randbedingungen zur feuchtetechnischen Bemessung der Temperierung bei Sommerkondensation, aufsteigender Feuchte sowie salzbeladenen Bauteilen ist weitere Forschung erforderlich.

Für die weitere Etablierung der Temperierung als eigenständige Heiztechnik sollten die vorliegenden Erkenntnisse in einer Norm der breiten Fachöffentlichkeit zugänglich gemacht werden. Die Verbindlichkeit einer Norm könnte die fachlich richtige und energiesparende Anwendung der Temperierung sicherstellen. Dies würde vor allem mehr Sicherheit in der fachlichen Planung bringen, von der letztendlich Nutzer und Gebäude bzw. Museumsgut profitieren.

Literaturverzeichnis

Afzal, N. (1980): Convective wall plume: Higher order analysis. International Journal of Heat and Mass Transfer. Vol. 23, pp. 505–513. Pergamon Press Ltd.

Arendt, C., Hausladen G. (1992): Thermische Bausanierung? In: Haustechnische Rundschau HR, 2, S. 12–20.

ASHRAE (2011): Museums, Galleries, Archives and Libraries. 2011 HVAC Applications, Chapter 23. American Society of heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. USA.

Assmann, K. Großeschmidt, H. (1988): Thermische Bausanierung und Klimastabilisierung im Museumsbau. In: Freundeskreis Freilichtmuseum Südbayern e.V. (Hrsg.): Raumklima im Freilichtmuseum. Schriftenreihe Heft 7, Großweil.

Bichlmair, S.; Kilian, R.; Krus, M. (2012): Gebäudesimulation des Paradeschlafzimmers in Schloss Linderhof unter Berücksichtigung der Besucher. In: IPBSA Germany (Hrsg.): BauSIM. Gebäudesimulation auf den Größenskalen Bauteil, Raum, Gebäude, Stadtquartier, Paper ID 173, S. 407–415.

Bichlmair, S.; Holl, K.; Kilian, R. (2013): The moving fluctuation range – a new analytical method for evaluation of climate fluctuations in historic buildings. In: Ashley-Smith, J. et al. (ed.): Climate for collections. Standards and uncertainties, pp. 439–449. London.

Bichlmair, S. (2014): „Bauphysikalische Untersuchungen zur Bauteiltemperierung im Forschungsprojekt. In: BLfD (Hrsg.) Die Temperierung – Beiträge zum aktuellen Forschungsstand. Schriftenreihe des BLfD Nr. 8. Volk Verlag, S. 30–38, München.

Bichlmair, S.; Raffler, S.; Kilian, R. (2015): The Temperierung heating systems as a retrofitting tool for the preventive conservation of historic museums buildings and exhibits. In: Energy and Buildings (95), pp. 80–85.

Bichlmair, S.; Krus, M. (2016). Zuschrift zu: Reuther, M., Steffens, O.: Evaluation der Bauteiltemperierung für den Herzogskasten Abensberg. Bauphysik 37 (2015), H. 2, S. 96–99. In: Bauphysik 38 (2016), H. 3. S. 179–180.

Bichlmair, S.; Raffler, S. (2016a): Museum Adlhochhaus in Altdorf. In: Forschungsbericht „Sammlungen erhalten – Die Temperierung als Mittel der Präventiven Konservierung – eine Bewertung", Anhang Surveys. VW-Stiftung Aktenzeichen 85873.

Bichlmair, S.; Raffler, S. (2016b): Stadtmuseum Bad Reichenhall. In: Forschungsbericht „Sammlungen erhalten – Die Temperierung als Mittel der Präventiven Konservierung – eine Bewertung", Anhang Surveys. VW-Stiftung Aktenzeichen 85873.

Bichlmair, S.; Raffler, S. (2016c): Levi Strauss Museum in Buttenheim. In: Forschungsbericht „Sammlungen erhalten – Die Temperierung als Mittel der Präventiven Konservierung – eine Bewertung", Anhang Surveys. VW-Stiftung Aktenzeichen 85873.

Bichlmair, S.; Raffler, S. (2016d): Fränkisches Museum Feuchtwangen. In: Forschungsbericht „Sammlungen erhalten – Die Temperierung als Mittel der Präventiven Konservierung – eine Bewertung“, Anhang Surveys. VW-Stiftung Aktenzeichen 85873.

Bichlmair, S.; Raffler, S. (2016e): Freilichtmuseum Glentleiten. In: Forschungsbericht „Sammlungen erhalten – Die Temperierung als Mittel der Präventiven Konservierung – eine Bewertung“, Anhang Surveys. VW-Stiftung Aktenzeichen 85873.

Bichlmair, S.; Raffler, S. (2016f): Schwäbisches Bauernhofmuseum Illerbeuren. In: Forschungsbericht „Sammlungen erhalten – Die Temperierung als Mittel der Präventiven Konservierung – eine Bewertung“, Anhang Surveys. VW-Stiftung Aktenzeichen 85873.

Bichlmair, S.; Raffler, S. (2016g): Lechner Museum in Ingolstadt. In: Forschungsbericht „Sammlungen erhalten – Die Temperierung als Mittel der Präventiven Konservierung – eine Bewertung“, Anhang Surveys. VW-Stiftung Aktenzeichen 85873.

Bichlmair, S.; Raffler, S. (2016h): Bauerhofmuseum Jexhof in Schöngeising. In: Forschungsbericht „Sammlungen erhalten – Die Temperierung als Mittel der Präventiven Konservierung – eine Bewertung“, Anhang Surveys. VW-Stiftung Aktenzeichen 85873.

Bichlmair, S.; Raffler, S. (2016i): Felix-Müller-Museum in Neunkirchen a. Br. In: Forschungsbericht „Sammlungen erhalten – Die Temperierung als Mittel der Präventiven Konservierung – eine Bewertung“, Anhang Surveys. VW-Stiftung Aktenzeichen 85873.

Bichlmair, S.; Raffler, S. (2016j): Oberammergau Museum. In: Forschungsbericht „Sammlungen erhalten – Die Temperierung als Mittel der Präventiven Konservierung – eine Bewertung“, Anhang Surveys. VW-Stiftung Aktenzeichen 85873.

Bichlmair, S.; Raffler, S. (2016k): Depot für Handwerks- und Industriekultur der Stadt Schweinfurt. In: Forschungsbericht „Sammlungen erhalten – Die Temperierung als Mittel der Präventiven Konservierung – eine Bewertung“, Anhang Surveys. VW-Stiftung Aktenzeichen 85873.

Bichlmair, S.; Raffler, S. (2016l): Orgelmuseum Valley. In: Forschungsbericht „Sammlungen erhalten – Die Temperierung als Mittel der Präventiven Konservierung – eine Bewertung“, Anhang Surveys. VW-Stiftung Aktenzeichen 85873.

Bichlmair, S.; Raffler, S. (2016m): Stadtmuseum Erlangen. In: Forschungsbericht „Sammlungen erhalten – Die Temperierung als Mittel der Präventiven Konservierung – eine Bewertung“, Anhang Surveys. VW-Stiftung Aktenzeichen 85873.

Bichlmair, S.; Krus, M.; Kilian, R. (2016n): Messtechnische Untersuchung am Strahlungsoptimierten Heizkörper (System Güttinger). IBP-Bericht HTB 030/2016.

Bichlmair, S.; Krus, M.; Kilian, R. (2018): Kirche St. Margareth in Roggersdorf – Auswertung der Klimamessungen vor und nach Einbau der Temperierung. IBP-Bericht HTB 037/2018. Staatliches Bauamt Rosenheim.

Blades, N.; Rice, K. (2010): Conservation heating and energy efficiency at the National Trust: Theory and Practice. In: Kilian, R.; Vyhlidal, Th.; Broström, T. (ed.) (2010): Developments in climate control of historic buildings, pp. 13–20, Fraunhofer IRB Verlag.

BLfD (Hrsg.) (2014): Die Temperierung – Beiträge zum aktuellen Forschungsstand. Schriftenreihe des bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege Nr. 8. Volk Verlag, München.

Brandl, H. (2014): Climate for Culture. Anwendung der Hygrothermischen Gebäudesimulation in der Präventiven Konservierung am Beispiel der Kirche St. Margaretha. Masterarbeit. Hochschule Augsburg, 2014.

Del Curto, D.; Luciani, A.; Manfredi, C.; Valisi, L. (2014): Is Temperierung energy efficient? The application of an old-new heating system to heritage buildings. In: energy efficiency in historic buildings. International Conference, pp. 366–379, Madrid 2014.

DIN 4710 (2003): Statistiken meteorologischer Daten zur Berechnung des Energiebedarfs von heiz- und raumlufttechnischen Anlagen in Deutschland. Beuth Verlag.

DIN EN 1264 (2013): Raumflächenintegrierte Heiz- und Kühlsysteme mit Wasserdurchströmung - Teil 2: Fußbodenheizung: Prüfverfahren für die Bestimmung der Wärmeleistung unter Benutzung von Berechnungsmethoden und experimentellen Methoden. Beuth Verlag.

DIN EN 15026 (2007): Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen - Bewertung der Feuchteübertragung durch numerische Simulation. 2007. Beuth Verlag.

DIN EN 15377 (2009): Heizungsanlagen in Gebäuden – Planung von eingebetteten Flächenheiz- und Kühlsystemen mit Wasser als Arbeitsmedium – Teil 1: Bestimmung der Auslegungs-Heiz- bzw. Kühlleistung. Beuth Verlag.

DIN EN 15757 (2010): Erhaltung des kulturellen Erbes – Festlegungen für Temperatur und relative Luftfeuchte zur Begrenzung klimabedingter mechanischer Beschädigungen an organischen hygroskopischen Materialien. Beuth Verlag.

DIN EN ISO 6946 (2008): Bauteile – Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchlasskoeffizient– Berechnungsverfahren. Beuth Verlag.

DIN EN ISO 7730 (2006): Ergonomie der thermischen Umgebung – Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit. Beuth Verlag.

DIN EN ISO 10211 (2008): Wärmebrücken im Hochbau – Wärmeströme und Oberflächentemperaturen – Detaillierte Berechnungen. Beuth Verlag.

Dreyer, J. (2006): Verringerung der Feuchtigkeitsbelastung geschädigter Bauteiledurch Temperierung. Bauphysik 28, Heft 2, S. 111–119. Ernst & Sohn Verlag, Berlin.

Dominik, A.; Koch, S. (2008): Die Wirkung eines Heizsystems („Temperier- bzw. Konditioniersystem“) auf feuchte- und salzbelastetes Mauerwerk in einem temporär genutzten Gebäude. Forschungsbericht F 1006/F-0E, DBU Az 20941, Osnabrück.

Dräger MSI GmbH (2018): Dräger Röhrchen. Detektion von Gasen und Dämpfen. Produktdatenblatt. www.draeger-msi.de.

Duden (Hrsg.): Duden – Die deutsche Rechtschreibung. Onlineabfrage 2015. www.duden.de.

Elgeti, K. (1971): Der Wärmeverlust eines in der Wand verlegten Rohres. In: HLH 22 (3), S. 109–113.

Engelbrecht, M. (1995): Die Temperierung ein alternatives Heizsystem. Diplomarbeit, FH München.

Erhardt, D.; Antretter, F.; Kilian, R. (2013): Measured and modeled influence of the moisture buffer effect in a historic stone church and its influence on possible HVAC measures. Conference Proceedings. Clima 2013, pp. 4388–4397, Prague.

Fischer, H.M.; Jenisch, R.; Stohrer, M.; Homann, M.; Freymuth, H.; Richter, J.; Häupl, P. (2008): Lehrbuch der Bauphysik. 6. Auflage 2008. Vieweg+Teubner, Wiesbaden.

Frank, W. (1964): Das Raumklima in radiator- und deckenbeheizten Räumen. Ges.-Ing. 85 (1964), H. 9, S. 270–274.

Garrecht, H. (2005): Raumklimatische Untersuchungen und bauphysikalische Konzepte. In: Exner, M.; Jakobs, D. (Hg.): Klimastabilisierung und Bauphysikalische Konzepte. Wege zur Nachhaltigkeit bei der Pflege des Weltkulturerbes. ICOMOS, H. 42, S. 9–18.

Garrecht, H.; Dörthe, J.; Reeb, S. (2015): DBU-Forschungsprojekt – Raumklimastabilität zum Erhalt der Wandmalereien in der Kirche St. Georg auf der Klosterinsel Reichenau. Bausubstanz, H. 3, S. 46–52, Fraunhofer IRB Verlag.

Gebhart, B.; Jaluria, Y.; Mahajan, R.L.; Sammakia, B. (1988): Buoyancy-induced flows and transport. Reference Edition. Hemisphere publishing corporation. Springer-Verlag.

Glück, B. (1990): Wärmeübertragung. Wärmeabgabe von Raumheizflächen und Rohren. 2. Aufl. Berlin: Verlag für Bauwesen.

Griebel, M.; Dornseifer, T.; Neunhoeffer, T. (1998): Numerical simulation in fluid dynamics – A practical introduction. Philadelphia. SIAM Publications.

Gronau, J. (1996): Möglichkeiten und Grenzen eines Temperiersystems. Arbeitskreis Energieberatung des Freistaats Thüringen. In: Energieförderung in Thüringen. Energieeinsparpotentiale im Bestand. Thermische Bausanierung, Wandheizung, H. 1, S. 63–83.

Großeschmidt, H. (1992): Die Temperierung. Verfahren zur thermischen Bausanierung, Raumtemperierung und Klimastabilisierung in Museen und anderen Gebäuden. Landesstelle für nichtstaatliche Museen in Bayern (Hrsg.), München.

Großeschmidt, H. (1996): Das temperierte Haus: Sanierte Architektur und „Großvitrine". In: Landesstelle für nichtstaatliche Museen in Bayern (Hrsg.). Aspekte der Museumsarbeit in Bayern. Museums Bausteine, Bd. 5, S. 325–381.

Großeschmidt, H. (2000): Raumklima in Museen und anderen Gebäuden – oder: Das temperierte Haus, sanierte Architektur und Großvitrine. In: Fachinstitut Gebäude-Klima e.V. (Hrsg.): Raumklima in Museen und historischen Gebäuden, Kongressband, Bietigheim-Bissingen, S. 89–112.

Großeschmidt, H. (2004): The Tempered Building: Renovated Architecture – Comfortable Rooms - A "Giant Display Case". In: Kotterer, M. et al (Hrsg.): Klima in Museen und historischen Gebäuden: Die Temperierung, Wiss. Reihe Schönbrunn, 9, S.14–49.

Herwig, H. (2000): Wärmeübertragung A-Z. Systeme und ausführliche Erläuterungen wichtiger Größen und Konzepte. VDI-Buch. Springer-Verlag.

Holl, K. (2016): Der Einfluss von Klimaschwankungen auf Kunstwerke im historischen Kontext. Untersuchung des Schadensrisikos anhand von restauratorischer Zustandsbewertung, Laborversuchen und Simulation. Dissertation, TU München.

Hoffmann, J. (1999): Meßtechnische Analyse integrierter Heizflächen zur Klimatisierung in einem Freilichtmuseum. Diplomarbeit. FH München Versorgungstechnik.

Holmberg, Jan (2004): Comparison of Tempering and conventional Convection Heating. In: Kotterer M., Großeschmidt H., Boody F., Kippes W (Hrsg.): Klima in Museen und historischen Gebäuden: Die Temperierung. Wissenschaftliche Reihe Schönbrunn, 9. 2004; S. 99–106.

Huber, A. (2014): „Warme Wände oder warme Luft? Das Raumklimaverhalten bei unterschiedlichen Heizsystemen in Abhängigkeit vom Nutzerverhalten – ein Praxisvergleich. In: BLfD (Hrsg.) Die Temperierung – Beiträge zum aktuellen Forschungsstand. Schriftenreihe des BLfD Nr. 8. Volk Verlag, S. 30–38, München.

Käferhaus, J. (2004): Kartause Mauerbach. Auf der Suche nach der schadenspräventiven Heizung für historische Gebäude. Vergleich von sechs unterschiedlichen Wärmeverteilsystemen und deren Auswirkungen auf die Räume. In: Kotterer M., Großeschmidt H., Boody F., Kippes W (Hrsg.): Klima in Museen und historischen Gebäuden: Die Temperierung. Wissenschaftliche Reihe Schönbrunn, 9. S. 99–106.

Kelleher, M. (1971): Free convection from a vertical plate with discontinuous wall temperature. Journal of heat transfer. Vol. 93/4, pp. 349 - 356.

Kilian, R. (2004): Die Wandtemperierung in der Renatuskapelle in Lustheim. Auswirkungen auf das Raumklima. Diplomarbeit. München, Siegl Verlag.

Kilian, R.; Bichlmair, S.; Wehle, B.; Holm, A. (2011): Passive sampling as a method for air exchange measurements for whole building simulation of historic buildings. 9th Nordic Symposium on Building Physics, NSB 2011, Proceedings V3, pp. 1135–1142, Tampere University of Technology, Tampere, Finland.

Kilian, R. (2013): Klimastabilität historischer Gebäude – Bewertung hygrothermischer Simulationen im Kontext der Präventiven Konservierung. Dissertation, Universität Stuttgart. Fraunhofer IRB Verlag.

Kilian, R.; Krus, M.; Milch, C.; Bichlmair, S. et. al. (2015): ENOB – Innovative Wandheizungssysteme. IBP-Bericht RK 013/2014/294. Fraunhofer IBP Holzkirchen.

Kilian, R.; Bichlmair, S.; Holl, K.; Raffler, S.; Krah, R.; Krus, M.; Sedlbauer, K. (2016): Nachhaltigkeit in der Kulturerbeforschung - Langzeiterfahrungen mit der Untersuchung

historischer Gebäude. 12 Jahre konservierungswissenschaftliche Forschung in der Kapelle St. Renatus in Lustheim. In: Leimer, H.-P. (Hrsg.): Bauinstandsetzen und Bauphysik. Gestern – heute – morgen. 32. WTA-Kolloquium. S. 203–217. Fraunhofer IRB Verlag.

Kishinami, K.; Seki, N. (1983): Natural convective heat transfer on an unheated vertical plate attached to an upstream isothermal plate. High temperature. Vol. 105, p. 759–766. Pergamon Press Ltd. 1984.

Koleshko, S.B.; Chumakov, Y.S. (2010): Turbulent natural-convection heat transfer on a vertical surface under stepwise heating with inversion of heat flux. Journal of Heat Transfer. High temperature. Vol. 48, p. 397–401. Pleiades publishing Ltd.

König, N. (1980): Der Einfluss von wärmereflektierenden Folien in Heizkörpernischen auf den Heizenergieverbrauch eines Hauses. IPB Mitteilung 58, Fraunhofer IBP.

Kotterer, M.; Großeschmidt, H.; Boody, F.; Kippes, W. (Hrsg.) (2004): Klima in Museen und historischen Gebäuden: Die Temperierung. Wiss. Reihe Schönbrunn, 9.

Kriegel, B. (1974): Fallströmungen vor Abkühlungsflächen in Gebäuden und mögliche Schutzmaßnahmen. Dissertation. TU Berlin.

Krus, M.; Kilian, R. (2012): Rechnerische Untersuchungen zur Wandtemperierung – Feuchtetechnische und Wärmetechnische Aspekte. In: IPBSA Germany (Hg.): BauSIM. Gebäudesimulation auf den Größenskalen Bauteil, Raum, Gebäude, Stadtquartier, S. 46–52, Berlin 2012.

Krus, M.; Wurm, S. (2012a): Lokale Beheizung von thermischen Schwachstellen. Bauphysik 34, Heft 5, S. 217–222. Ernst & Sohn Verlag.

Krus, M.; Kilian, R. (2014): Die Bauteiltemperierung – Untersuchung des Feuchtetransports und Energieverbrauchs durch hygrothermische Simulation am Beispiel der Renatuskapelle. In: BLfD (Hrsg.) Die Temperierung – Beiträge zum aktuellen Forschungsstand. Schriftenreihe des bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege Nr. 8. Volk Verlag, S. 30–38, München.

Krus, M.; Kilian, R.; Bichlmair, S. (2015): Vergleichende Untersuchungen zu Wandheizungssystemen im historischen Bestand. In: DIN (Hg.): EnEV aktuell, Jg. 9, Nr. 4: Beuth, S. 12–15.

Künzel, H.; Holz, D. (1991): Bauphysikalische Untersuchungen in unbeheizten Gebäuden alter Bauart. Band T 2396, Fraunhofer IRB Verlag.

Künzel, H. (1998): Feuchteschutz durch Wandtemperierung. IBP-Mitteilung. Nr. 339. Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP.

Künzel, H. (2000): Feuchteschutz durch Wandtemperierung. In: Fachinstitut Gebäude-Klima e.V. (Hrsg.): Raumklima in Museen und historischen Gebäuden, Kongressband, Bietigheim-Bissingen, S. 71–88.

Künzel, H. (2006): Bauphysik und Raumklima – Entwicklungen in der Vergangenheit. Zeitschrift für Wärmeschutz, Kälteschutz, Schallschutz, Brandschutz. Wksb 57, S. 3–8.

Künzel, H.; Künzel, H. M.; Großkinky, T. (2007): Gelungene Sanierung durch Bauteiltemperierung am Beispiel der Salinenkapelle St. Rupert in Bad Reichenhall. In: Gänssmantel, J; Hecht, C. (Hrsg.): Bauinstandsetzen und Bauphysik. Restauration and building-physics. WTA-Almanach 2007, S. 349–368. München.

Künzel, H.; Künzel, H. M. (2008): Bauteiltemperierung oder Wandheizung – Grundsätze zum Beheizen von Gebäuden alter Bauart. In: Venzmer, H. (Hrsg.): Europäischer Sanierungskalender 2008: Holzschutz, Bautenschutz, Bauwerkserhaltung, Bauwerksinstandsetzung, Restaurierung und Denkmalpflege. S. 115–131. Beuth-Verlag.

Künzel H. (2009): Bauphysik und Denkmalpflege. Stuttgart, Fraunhofer IRB Verlag.

Künzel, H.M. (1994): Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten. Dissertation, Universität Stuttgart.

Künzel, H.M.; Sedlbauer, K.; Holm, A.; Krus, M. (2006): Entwicklung der hygrothermischen Simulation im Bauwesen am Beispiel der Softwarefamilie WUFI. Zeitschrift für Wärmeschutz-Kälteschutz-Schallschutz-Brandschutz. Wksb 55, S.7–15.

Leipoldt, D. (2004): Kurzbericht über Heizkostenreduzierung, Energieeinsparungen und Investitionseinsparungen im Anlagenbau durch den Einsatz der Temperierung: vergleichende Untersuchung im Gymnasium Waldstraße, Hattingen. In: Kotterer M., Großeschmidt H., Boody F., Kippes W (Hrsg.): Klima in Museen und historischen Gebäuden: Die Temperierung. Wiss. Reihe Schönbrunn, 9. 2004, S. 209–213.

Löther, T. (2005): Untersuchungen zur Temperierung in historischen Gebäuden. Diplomarbeit Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig, Norderstedt 2005.

Löther, T.; Freytag, O. 2007: Temperierung historischer Gebäude – Eine kritische Analyse. In: Brandenburgisches Landesamt für Denkmalpflege, u.a. (Hrsg.): Klimagestaltung im Spannungsfeld zwischen Kulturgutschutz und Nutzerwünschen, Tagungsband, 1. Konservierungswissenschaftliches Kolloquium in Berlin / Brandenburg, S. 38–44, Potsdam 2007.

Manfredi, C.; Luciani, A.; Del Curto, D.; Valisi, L. (2014): The case of Italy: Energy efficiency and preservation – two challenges for Temperierung. In: BLfD (Hrsg.) Die Temperierung – Beiträge zum aktuellen Forschungsstand. Schriftenreihe des bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege Nr. 8. Volk Verlag, S. 82–92, München.

Mayer, E.; Zegowitz, A.; Kersken, M. (2018): Messung des konvektiven Wärmeübergangs – Entwicklung eines neuen Sensors und bauphysikalische Anwendungen. Bauphysik 40, Heft 5, S. 336–343. Ernst & Sohn Verlag.

Martens, M. (2012): Climate risk assessment in museums. Degradation risks determined from temperature and relative humidity data, Dissertation TU Eindhoven 2012.

Mitterhofer, M. (2013): Untersuchung des Heizungssystems nach Großeschmidt für Museen und Eingliederung in eine energetische Gebäudebewertung nach EnEV 2009. Semesterarbeit, Lehrstuhl für energieeffizientes und nachhaltiges Bauen. TU München.

Mitterhofer, M.; van Treeck, C. (2013): Temperaturfeldberechnung aus einer Particle Image Velocimetry (PIV)-Messung einer natürlichen Auftriebsströmung. In: Bauphysik (2013) Volume 35, Heft 2, S. 77–85.

Raffel, M.; Kompenhans, J.; Wereley, S.; et al. (2007): Particle Image Velocimetry – A practical Guide. Second Edition. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.

Raffler, S. (2014): Die Auswirkungen von Klimaeinflüssen auf Sammlungen – Restauratorische Untersuchungen im Forschungsprojekt am Beispiel des Oberammergau Museums. In: BLfD (Hrsg.) Die Temperierung – Beiträge zum aktuellen Forschungsstand. Schriftenreihe des BLfD Nr. 8. Volk Verlag, S. 30–38, München.

Raffler, S.; Bichlmair, S.; Kilian, R. (2015): Mounting of sensors on surfaces in historic buildings. In: Energy and Buildings (95), S. 92–97.

Raffler, S.; Bichlmair, S.; Kilian, R. (2019): Cyclododecane for mounting of surface sensors for monitoring of historic buildings. In: Rozeik, Ch. (ed.): Subliming Surfaces: Volatile Binding Media in Heritage Conservation. Conference, Cambridge 2015, Postprints 2019, pp. 127–136.

Reuther, M., Steffens, O. (2015): Evaluation der Bauteiltemperierung für den Herzogskasten Abensberg. Bauphysik 37 (2015), H. 2, S. 96–99.

Sattari, A. (2015): Investigations of Flow Patterns in Ventilated Rooms Using Particle Image Velocimetry. Applications in a Scaled Room with Rapidly Varying Inflow and over a Wall-Mounted Radiator. PhD Thesis. Royal Insitute of Technology KTH – School of Architecture and the Buildt Environment, Stockholm.

Schaube, H; Werner, H (1988): Wärmeübergangskoeffizient unter natürlichen Klimarandbedingungen. IBP-Mitteilung 109, Fraunhofer IBP, Holzkirchen 1988.

Schetz J.A., Eichhorn R. (1964): Natural convection with discontinuous wall-temperature variations. Journal of Fluid Mechanics, Vol.18, part 2, pp. 167–179.

Schiebold, H. (2010): Heizung und Wassererwärmung in römischen Thermen. Historische Entwicklung – Nachfolgesysteme – Neuzeitliche Betrachtungen und Untersuchungen. Schriften der Deutschen Wasserhistorischen Gesellschaft DWhG e.V., Sonderband 3; 2. Auflage. Siegburg 2010.

Schlichting, H.; Gersten, K. (2006): Grenzschicht-Theorie. 10. Aufl., Springer Verlag.

Schramek (Hrsg.) (2011): Recknagel, Sprenger, Schramek: Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik. einschließlich Warmwasser- und Kältetechnik. 75. Aufl. München. Oldenbourg Verlag.

Sijanec-Zavrl, M.; Zarnic, R. (2004): Thermal Response of Wall-Tempered Heritage Buildings - Monitoring and Simulation In: Kotterer M., Großeschmidt H., Boody F., Kippes W (Hrsg.): Klima in Museen und historischen Gebäuden: Die Temperierung. Wiss. Reihe Schönbrunn, 9, S. 107–127.

Sparrow, E.M.; Ansari, M.A. (1984): All-modes heat transfer from a horizontal cylinder situated adjacent to adiabatic, partially enclosing walls. International Journal of Heat and Mass Transfer. Vol. 27, Not. 10, pp. 1855–1864. Pergamon Press Ltd. 1984.

Sparrow, E.M.; Patankar, S.V.; Abdel-Wahed, R.M. (1978): Development of wall and free plumes above a heated vertical plate. Journal of Heat Transfer. Vol. 100, pp. 184–190. Pergamon Press Ltd. 1984.

Stegemann, R. (1914): Die Lösung der Heizfrage bei Gemäldegalerien und ähnlichen Sammlungsgebäuden. In: Museumskunde Nr. 10, S. 133–145.

Trogisch, A.; Wiedmer, S. (2006): Bauteiltemperierung als Feuchteschutz? Fortsetzung der Messauswertung in der „Maria am Wasser". TGA Fachplaner, 5-2006, S. 58–61.

Uber (1915): Die Prüfanstalt für Heiz- und Lüftungsanlagen an der Technischen Hochschule in Berlin-Charlottenburg. In: Zentralblatt der Bauverwaltung. Jg.35, Nr. 62, S. 405–406, Verlag Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin.

VDI 2055 (2008): Wärme- und Kälteschutz von betriebstechnischen Anlagen in der Industrie und in der Technischen Gebäudeausrüstung – Berechnungsgrundlagen. Verein Deutscher Ingenieure e.V., Düsseldorf.

VDI (2006): VDI-Wärmeatlas. 10. bearbeitete und erweiterte Auflage. Springer Verlag.

Vogt, C. (2006): Restaurierung der Tapete in drei Räumen des Erdgeschosses. In: Dokumentation der Maßnahmen. Interner Bericht 2006, unveröffentlicht, München.

Weingärtner, Björn (2012): Ausschreibung, Inbetriebnahme und Test eines laserbasierten Messsystems zur stereoskopischen Erfassung des Geschwindigkeitsfeldes von auftriebsgetriebenen Raumluftströmungen. Masterarbeit. Studiengang Bauingenieurwesen, Lehrstuhl für Bauphysik, TU München.

WTA-Merkblatt 6-1-01/D (2002): Leitfaden für hygrothermische Simulationsberechnungen. Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V. WTA.

WTA-Merkblatt 6-2 (2014): Simulation wärme- und feuchte- technischer Prozesse. Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V. Vertrieb: WTA Publications. Fraunhofer IRB Verlag.

Zitzmann, T.; Pfrommer, P.; Cook, M. (2006): Simulation dynamisch-thermischen Langzeitverhaltens in Gebäuden mittels CFD. In: Bauphysik (2006) Vol. 28, H. 2, S. 96–102.

Zmeck, M. (1998): Temperierung. Literaturrecherche und Praxiserfahrungen zu Methoden der Temperierung an historischen Gebäuden. Deutsches Zentrum für Handwerk und Denkmalpflege Propstei Johannesberg, Fulda.

Anhang A Feldstudien mit Messung der Wärmeabgabe der Temperierung

Stadtmuseum Bad Reichenhall: Bauteiltemperierung [Bichlmair et al 2016b]

Das Gebäude wurde im 16. Jahrhundert als Getreidekasten mit massivem Mauerwerk aus Bruchstein errichtet. Die Mauerwerksdicke beträgt im Erdgeschoss ca. 95 cm und im Obergeschoss ca. 80 cm. Seit 1967 ist in dem Gebäude das Heimat- und Stadtmuseum Bad Reichenhall eingerichtet. Zwischen 2008 und 2012 wurde das Gebäude grundlegend saniert und mit einer Bauteiltemperierung zur erstmaligen Beheizung des gesamten Gebäudes installiert. Während der Messungen 2013 bis 2015 wurde das Gebäude noch nicht im regulären Museumsbetrieb genutzt. Im Erdgeschoss sind je Raumabschnitt zwei Temperierleitungen verlegt, die unabhängig voneinander betrieben werden können. Eine Heizschleife befindet sich nur im Sockelbereich auf in etwa Fußbodenhöhe als Ringleitung (Sockeltemperierung) und verläuft an den Außenwänden und Innenwänden entlang. Die zweite zusätzlich verlegte Heizschleife verläuft nur an den Außenwänden entlang, im Vorlaufstrang wenige Zentimeter über der Sockeltemperierung und im Rücklaufstrang in Brüstungshöhe mit zusätzlichen Schleifen in der jeweiligen Fenstersohlbank, siehe Bild 161 links.

Im Obergeschoss wurde die Temperierung analog zum Erdgeschoss jedoch ohne Nullleitung verlegt, siehe Bild 161 rechts. Die Vorlauftemperatur wird über eine Regelung nach Heizkurve, Raumtemperatur und unter Berücksichtigung der Wandtemperatur geregelt. Die detaillierte Messung der Wärmeabgabe erfolgt an drei Heizschleifen, jeweils ab dem Heizkreisverteiler. Im Erdgeschoss wurden im Mehrzweckraum zwei Heizschleifen mit Nullleitung und große Schleife untersucht und im darüber liegenden Ausstellungsraum im Obergeschoss die als große Schleife ausgeführte Bauteiltemperierung. Die Temperierleitungen aus Kupferrohr haben einen Durchmesser von 15 mm.

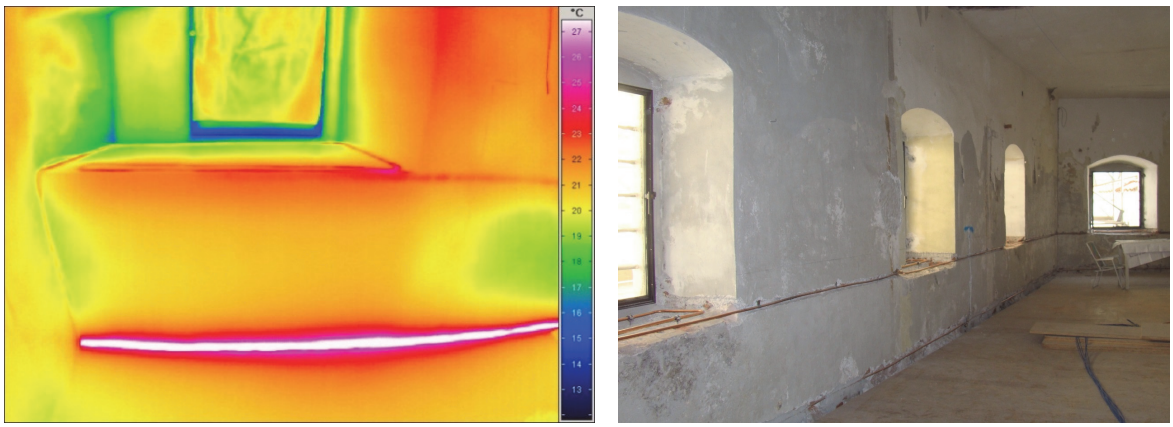


Bild 161: Links: IR-Bild der westseitigen Außenwand im Erdgeschoss Mehrzweckraum mit beheizter Sockeltemperierung und gerade anheizender zweiten Temperierschleife. Rechtes Bild: Obergeschoss, während der Sanierung, Verlegung der Temperierung unter Putz als Sockel- und Brüstungsschleife (Foto: Robert Kern, Stadt Bad Reichenhall).

Im Erdgeschoss wird die im Sockel verlegte Temperierleitung 1 kontinuierlich, mit nur gering variierendem Durchfluss bei ca. 2 l/min, ganzjährig betrieben. Die Spreizung erreicht dabei im Zeitraum vom 20.12.2013 bis 20.10.2014 Werte bis ca. 12 K im Winter bei ca. 16 °C Raumtemperatur und ca. 5 K im Sommer bei ca. 22 °C Raumtemperatur. In dieser Zeit wurde die

zweite Temperierschleife nicht betrieben. Die Vorlauftemperatur variiert von 45 °C im Winter bis rund 34 °C im Sommer. Die Gesamtleistung der Temperierschleife variiert entsprechend von rund 2600 W bis 1000 W. Aus den stündlichen Mittelwerten der Messdaten werden die mittlere Übertemperatur und die Heizleistung pro Meter Heizrohr berechnet und in einem Diagramm dargestellt, siehe Bild 162. Mit eingetragen sind die Mittelwerte der Wärmeabgabe, die pro K mittlerer Übertemperatur gebildet werden. Zusätzlich ist die approximierte Funktion aus der linearen Regressionsanalyse abgebildet. Der Korrelationskoeffizient R beträgt für die lineare Regression rund 0,98. Die approximierte Funktion L1 führt durch den Nullpunkt, da über die Messperiode die Außentemperaturen in etwa auf dem Niveau der Raumtemperaturen angestiegen sind. Die spezifische Leistung beträgt 1,6 W/mK. Die maximale Messungenauigkeit beträgt rund ±5,2 % vom Messwert im oberen Leistungsbereich. Dies entspricht bei einer Wärmeabgabe von 38 W/m rund ±2,0 W/m.

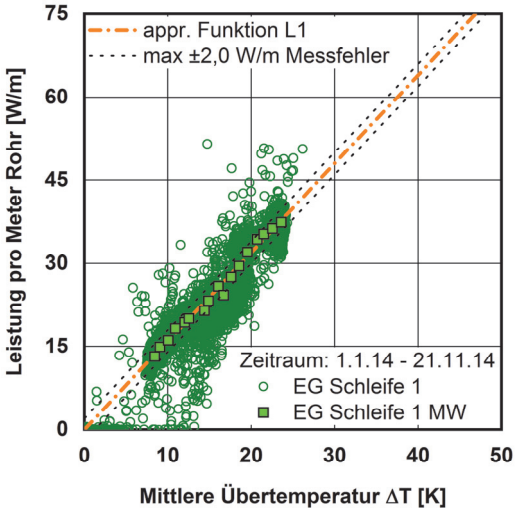


Bild 162: Stündliche Mittelwerte der Wärmeabgabe pro Meter Temperierung bezogen auf die mittlere Übertemperatur der unter Putz verlegten Temperierung im Erdgeschoss für den Messzeitraum vom 1.1.2014 bis 21.11.2014. Mit eingezeichnet sind die Mittelwerte sowie die aus den Messwerten approximierte Funktion der Wärmeabgabe (L1).

In dem Zeitraum vom 21.11.2014 bis 1.06.2016 sind beide Temperierschleifen im Erdgeschoss in Betrieb. Die Temperierschleife 1 im Sockel wird dabei wieder durchgängig betrieben, jedoch mit geringeren Durchflussmengen gegenüber dem Vorjahr. Die Werte von Durchfluss, Spreizung, Übertemperatur und der berechneten Wärmeabgabe schwanken von Ende November bis Ende März nur gering. Die Temperierschleife 2 im Erdgeschoss wird dagegen zeitlich begrenzt, meist täglich, nur für einige Stunden und selten über mehrere Tage betrieben. In Bild 163 sind die stündlichen Wärmeabgaben zur mittleren Übertemperatur als Diagramm für die Temperierleitungen Schleife 1 und Schleife 2 im Erdgeschoss pro Meter Rohr für den Messzeitraum vom 21.11.14 bis 1.6.15 abgebildet. Zusätzlich ist die approximierte Funktion L2‘ eingetragen sowie die Näherungsfunktion L1‘, die der Leistung von Schleife 1 im gleichzeitigen Betrieb mit Schleife 2 entspricht. Die Schleife 1 gibt im überwiegend gleichzeitigen Betrieb mit Schleife 2 weniger Wärme ab als im Einzelbetrieb. Die beiden Temperierschleifen liegen auf einer Strecke von ca. 1/3 der Länge dicht nebeneinander. Die Schleife 1 (Ringleitung nur im Sockel) verläuft auf 2/3 an Innenwänden entlang, die ebenfalls aus bauzeitlichem massivem Mauerwerk bestehen. Die Schleife 2 (Brüstungsschleife) verläuft auf ca. 2/3 in Höhe der Brüstung entlang sowie bei jedem Fenster in der Sohlbank.

Die Temperierschleife 2 hat mit ca. 50 °C eine etwas höhere Vorlauftemperatur als die Temperierleitung 1 mit ca. 43 °C. Dadurch wird bei der nur mit geringem Abstand zueinander verlegten Temperierleitung 1 und 2 im Sockelbereich Wärme von der Temperierleitung 2 auf die Temperierleitung 1 übertragen. Die Wärmeabgabe der Schleife 1 ist in Folge etwas geringer als bei Schleife 2. Die Näherungsfunktion L1 aus Bild 162 entspricht dabei der Näherungsfunktion L2' der Leistung der Temperierschleife 2 im gleichzeitigem Betrieb mit Schleife 1.

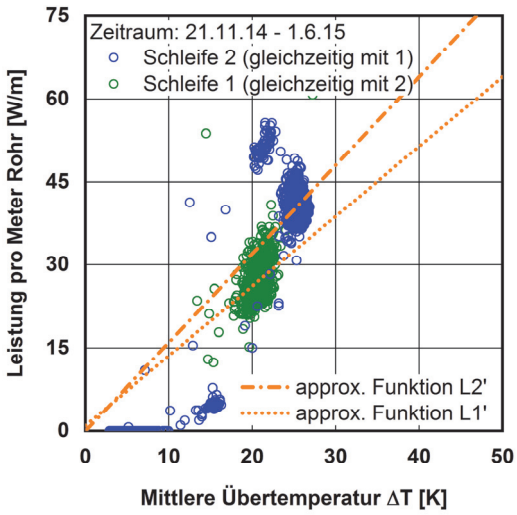


Bild 163: Stündliche Mittelwerte der Wärmeabgabe pro Meter Temperierung bezogen auf die mittlere Übertemperatur der unter Putz verlegten Temperierung im Erdgeschoss für die Zeiträume des gleichzeitigen Betriebes beider Temperierleitungen.

Die Temperierung im Obergeschoss ist unbeeinflusst von anderen Heizleitungen und ist nur an den Außenwänden analog zur Schleife 2 im Erdgeschoss verlegt. In Bild 164 ist die Wärmeabgabe zur mittleren Übertemperatur der Heizleitung sowie die Mittelwerte der Wärmeabgabe je Kelvin Übertemperatur in dem Diagramm abgebildet Zusätzlich ist die approximierte Funktion L3 aus der linearen Regressionsanalyse abgebildet. Der Korrelationskoeffizient R beträgt für die lineare Regression rund 1,0. Die approximierte Funktion L3 schneidet die Ordinate bei 1 W/m, da bei der Außentemperatur während der Messungen auch Wärme bei 0 K abgegeben würde. Die Heizleitung im OG wird von Ende November bis Anfang April nahezu durchgängig auf gleichem Niveau betrieben. Die Vorlauftemperatur entspricht dabei der Vorlauftemperatur der Schleife 2 im Erdgeschoss. Die Spreizung beträgt ca. 13 K und der Durchfluss ca. 4,2 l/min in diesem Zeitraum. Die maximale Messungenauigkeit beträgt rund ±5,2 % vom Messwert. Dies entspricht bei einer Wärmeabgabe von 48 W/m rund ±2,5 W/m.

In Bild 165 sind die Mittelwerte und Näherungsfunktionen der Schleife 1 und Schleife 3 eingetragen. Die Näherungsfunktion der unbeeinflussten Temperierung im Obergeschoss (Schleife 3) ist etwas steiler gegenüber den Temperierschleifen im Erdgeschoss. Die beiden Temperierschleifen im Erdgeschoss beeinflussen sich im Bereich des Sockels bei räumlich naher Verlegung von wenigen Zentimeter gegenseitig in der Wärmeabgabe. Für die Brüstungsschleife 2 im Erdgeschoss kann ohne Beeinflussung durch die Sockelschleife 1 eine etwas höhere Wärmeabgabe angenommen werden. Mit der geringen Beeinflussung durch Schleife 1 sinkt die Wärmeabgabe nur geringfügig, da das Temperaturniveau in Schleife 2 höher ist. Die Sockelschleife 1 wird dadurch stärker beeinflusst und die Wärmeabgabe sinkt entsprechend deutlicher. Die etwas geringere Wärmeabgabe der unbeeinflussten Sockelschleife 1 gegenüber der unbeeinflussten Brüstungsschleife im Obergeschoss deutet auf mögliche Einflüsse der Einbausituation und der etwas dickeren Wand im Erdgeschoss hin. Bei allen Temperierschleifen ist eine hohe

spezifische Wärmeabgabe festzustellen. Die spezifische Leistung der Temperierschleife im Obergeschoss erreicht 1,7 W/mK.

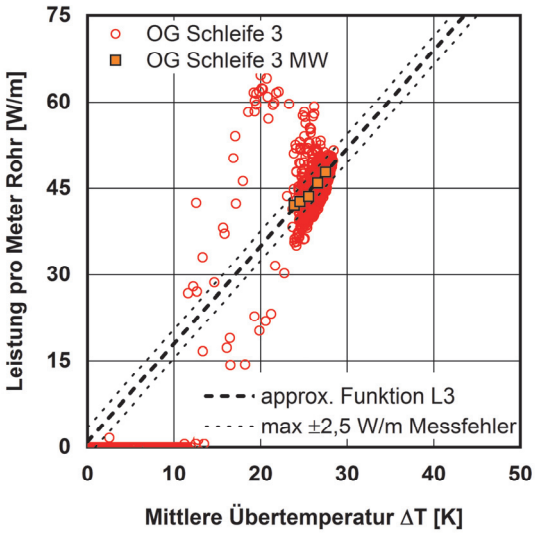


Bild 164: Stündliche Mittelwerte der Wärmeabgabe pro Meter Temperierung bezogen auf die mittlere Übertemperatur der unter Putz verlegten Temperierung im Obergeschoss für den gesamten Messzeitraum vom 21.11.2013 bis 1.6.2015. Mit eingezeichnet sind die Mittelwerte sowie die aus den Messwerten approximierte Funktion der Wärmeabgabe (L3).

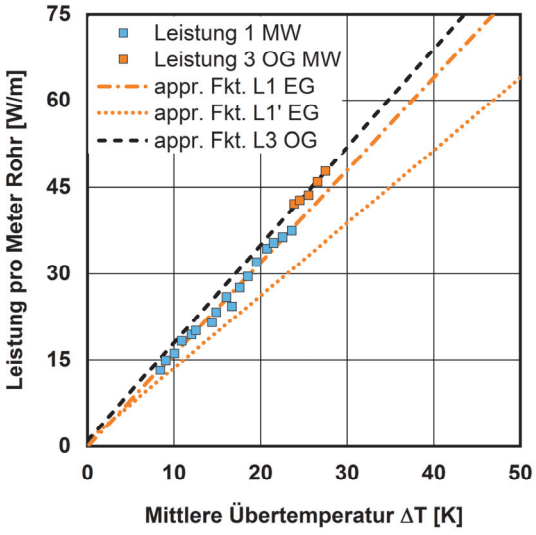


Bild 165: Mittelwerte der Wärmeabgabe bezogen auf die mittlere Übertemperatur der unter Putz verlegten Temperierschleifen 1 (EG) und 3 (OG) für den Messzeitraum vom 1.1.2014 bis 1.6.2015 (Schleife 1) bzw. vom 21.11.2014 bis 1.6.2015 (Schleife 3). Mit eingezeichnet sind die approximierten Funktionen der Wärmeabgabe (L1, L1' und L3).

Freilichtmuseum Glentleiten: Bauteiltemperierung mit Dämmung hinter dem Rohr; auf Putz verlegtes Heizrohr mit Wandkontakt [Bichlmair et al 2016e]

Die Untersuchungen im Freilichtmuseum Glentleiten wurden im Fischerweber Hof durchgeführt. Das Gebäude stammt aus Rottach-Egern, Landkreis Miesbach, und wurde im 18. Jahrhundert erbaut. Das Gebäude wurde von Rottach-Egern in das Freilichtmuseum transloziert und aufgebaut. Dazu wurden die Wände im Erdgeschoss jedoch neu erstellt sowie ein Kellergeschoss gebaut. Mit dem Wiederaufbau des Gebäudes erfolgte der Einbau der Temperierung. Der Hof konnte 2001 im Freilichtmuseum eröffnet werden.

Temperierung unter Putz mit Dämmstreifen im Erdgeschoss

Das Mauerwerk im Erdgeschoss besteht aus neuen gelochten Vollziegeln. Anhand der durchgeführten Wärmestrommessung mit Erfassung der Oberflächentemperaturen wird eine Wärmeleitfähigkeit von ca. 0,8 W/mK ermittelt. Nach DIN EN 12524 wird für Mauerwerksziegel nach DIN 105 mit einer Rohdichte von 1,8 kg/dm³ ein Wert von 0,81 W/mK angegeben. Dies entspricht in etwa dem gemessenen Wert. Die Mauerdicke beträgt ca. 40 cm. Die Temperierung im Erdgeschoss ist für den Wohnhausbereich in zwei Temperierschleifen, mit Schleife 1.1 für die Südseite und Schleife 1.2 für die Nordseite, aufgeteilt. Die Verlegung erfolgte in etwa 25 cm Höhe über dem Fußboden mit parallelem Einbau im Achsabstand von ca. 6-7 cm bei einer Putzüberdeckung von ca. 1-2 cm. Der Rohrdurchmesser der Kupferrohre beträgt 15 mm. Zusätzlich wurde eine 2 cm dicke Mineralwolle direkt hinter die Temperierleitungen zwischen Rohr und Mauerwerk eingebaut. Bild 166 zeigt die Innenansicht im Raum Stüberl mit Anordnung der Sensoren mit visuellem Bild und Infrarotaufnahme, in der die Lage der Temperierung anhand der erwärmten Wandbereiche erkannt werden kann.

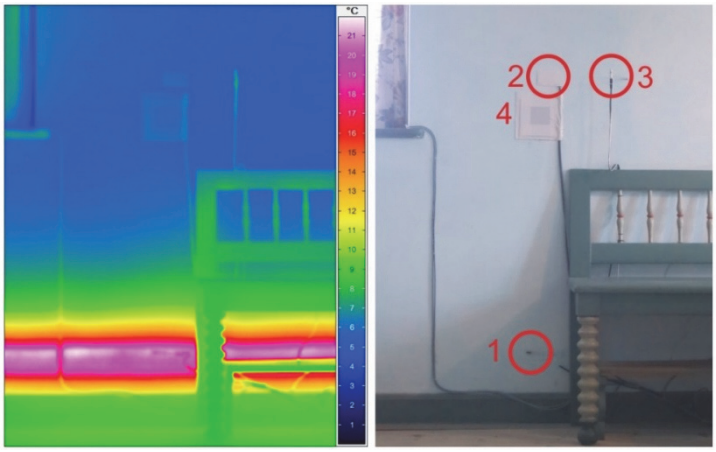


Bild 166: IR-Bild der ostseitigen Außenwand im Erdgeschoss auf der Rauminnenseite im Raum Stüberl im Bereich der Messanordnung. Die roten Kreise zeigen die Positionen der Oberflächen-Temperatursensoren an. Nummer 1 befindet sich auf der oberen Heizleitung, Nr. 2 ca. 1 m über der Heizleitung, Nr. 3 bezeichnet die Position der wandnahen Raumluftmessung in ca. 10 cm Abstand zur Wand und bei Nr. 4 ist die Wärmeflussmessung angeordnet.

Im Erdgeschoss werden die Temperierleitungen kontinuierlich mit nur gering variierendem Durchfluss betrieben. Die beiden Leitungsstränge unterscheiden sich etwas in der Durchflussmenge mit ca. 0,9 l/min bis ca. 1,3 l/min bei der Schleife 1.1 Süd und mit ca. 0,7 l/min bis 1,0 l/min bei der Schleife 1.2 Nord. Im zweijährigen Mittel wird eine mittlere Durchflussmenge von 1,1 l/min (1.1 Süd) bzw. 0,9 l/min (1.2 Nord) festgestellt. Der geringere Durchfluss der Leitung 1.2 Nord resultiert in einer größeren Spreizung zwischen Vor- und Rücklauftemperatur. Im zweijährigen Mittel beträgt die Spreizung bei der Leitung 1.1 Süd 6,0 K und bei der Leitung 1.2 Nord 8,0 K.

Die Vorlauftemperaturen sind bei beiden Heizschleifen gleich und erreichen maximale Werte um 38 °C und minimale Werte um 24 °C. Die Raumtemperatur sinkt im Winter im Erdgeschoss im Mittel auf ca. 8 °C ab und im Sommer steigt die Raumtemperatur auf im Mittel auf ca. 23 °C an. Entsprechend niedrig sind die mittleren Übertemperaturen. Die durchschnittliche Leistungsabgabe pro Meter Temperierleitung beträgt für den gesamten Zeitraum für die Leitung 1.1. Süd 9,8 W/m und für die Leitung 1.2 Nord 8,8 W/m.

Die mittlere Übertemperatur wird in Klassen mit einer Klassenbreite von 1 K eingeteilt und daraus die Mittelwerte der abgegebenen Wärme je Klasse bestimmt. In Bild 167 sind die stündlichen Wärmeabgaben zur mittleren Übertemperatur als Diagramm für die beiden Temperierleitungen 1.1 und 1.2 im Erdgeschoss pro Meter Rohrleitung für den kompletten Messzeitraum vom 8.5.2013 bis 9.6.2015 angegeben. Die eingetragene approximierte Funktion wurde anhand einer Regressionsanalyse bestimmt. Für die Schleife 1.1 ergibt sich für die gewählte Funktion ein Korrelationskoeffizient R von 0,98 und für Schleife 1.2 ein R von 0,95. Die spezifische Leistung der Temperierschleife im Erdgeschoss erreicht ca. 0,7 W/mK. Die maximale Messungenauigkeit beträgt bei hoher Wärmeabgabe rund ±2,9 % vom Messwert. Dies entspricht bei einer Wärmeabgabe von 20 W/m rund ±0,6 W/m.

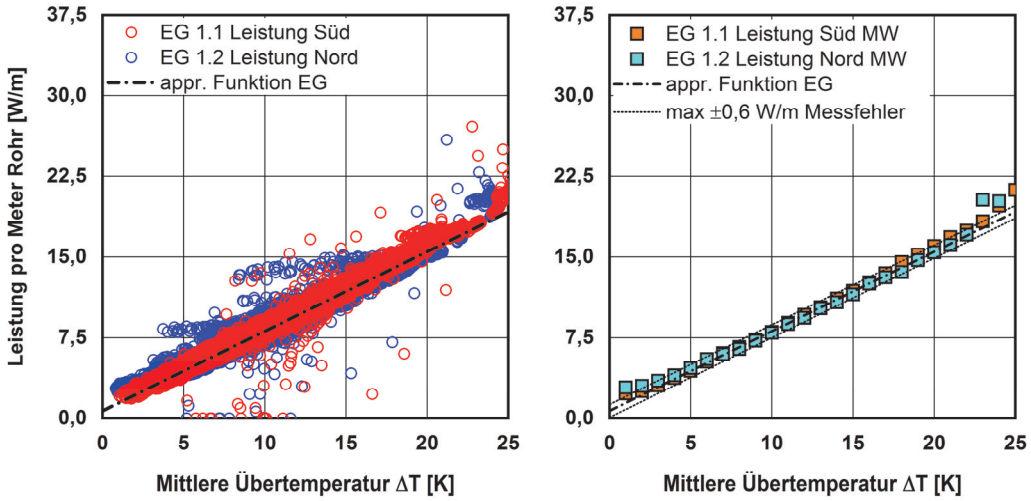


Bild 167: Vergleich der zwei unter Putz montierten und mit Dämmung hinterlegten Temperierschleifen im Erdgeschoss mit stündlichen Messwerten und approximierter Funktion (linkes Diagramm) sowie Mittelwerten und approximierter Funktion (rechtes Diagramm) für den gesamten Messzeitraum vom 8.5.2013 bis 9.6.2015.

Temperierung auf Putz mit Wandkontakt im Obergeschoss

Im Obergeschoss sind ebenfalls zwei Temperierschleifen Süd und Nord eingebaut, jedoch auf Putz auf die Sockelleiste verlegt. Zur besseren Wärmeübertragung und für eine dezentere Optik sind die Heizrohre im jeweiligen Farbton der Sockelleiste gestrichen, siehe Bild 168.

Die Temperierleitungen im Obergeschoss werden während der Sommermonate häufig in der Durchflussmenge gedrosselt und auch teilweise komplett abgeschaltet. Die mittlere Durchflussgeschwindigkeit ist sehr gering und beträgt im Mittel 0,54 l/min (Leitung Süd 2.1) bzw. 0,55 l/min (Leitung Nord 2.2).

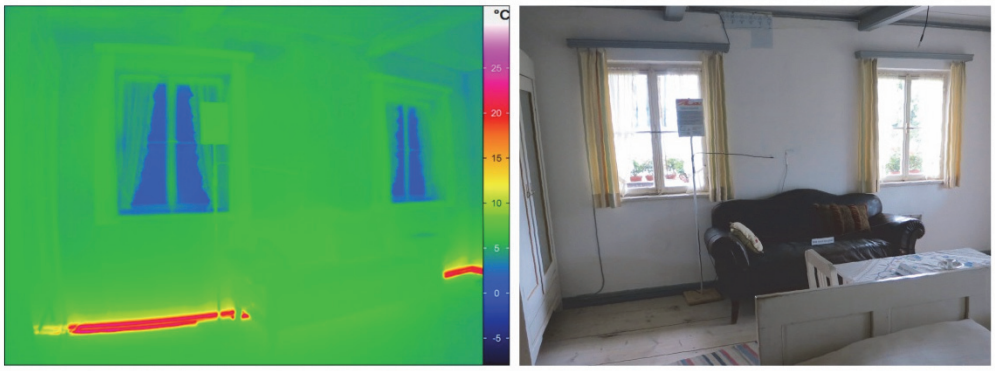


Bild 168: IR-Bild (links) und visuelles Bild (rechts) der ostseitigen Außenwand im Obergeschoss der Rauminnenseite im Raum Fremdenzimmer im Bereich der Messanordnung.

Die Spreizungen beider Schleifen unterscheiden sich nur wenig voneinander. Der geringe Durchfluss bedingt auch hier eine große Spreizung. Diese variiert über den Jahresgang erheblich und erreicht einen Temperaturunterschied bis 12 K. Die Vorlauftemperaturen sind bei beiden Heizschleifen annähernd gleich und erreichen maximal Werte um 33 °C und minimale Werte um 20 °C im Regelbetrieb. Die Raumtemperatur sinkt im Winter im Obergeschoss im Mittel auf ca. 7 °C ab und im Sommer steigt die Raumtemperatur im Mittel auf ca. 23 °C an. Entsprechend niedrig sind die mittleren Übertemperaturen. Die Wärmeabgaben der beiden Temperierschleifen im Obergeschoss unterscheiden sich geringfügig voneinander, im Mittel wird von der Leitung Süd 2.1 ca. 4,1 W/m abgegeben und von der Leitung Nord 2.2 ca. 4,6 W/m. Die spezifische Leistung der Temperierschleifen im Obergeschoss erreicht bei einer Übertemperatur von 20 K ca. 0,55 W/mK

Die mittlere Übertemperatur wird auch hier in Klassen mit einer Klassenbreite von 1 K eingeteilt und daraus die Mittelwerte der abgegebenen Wärme je Klasse bestimmt. In Bild 169 sind die stündlichen Wärmeabgaben zur mittleren Übertemperatur als Diagramm für die beiden Temperierleitungen 2.1 und 2.2 im Obergeschoss pro Meter Rohrleitung für den kompletten Messzeitraum vom 8.5.2013 bis 9.6.2015 angegeben. Für die eingetragene approximierte Potenz-Funktion wurde ein typisches Verhalten von wärmeabgebenden Flächen zu Grunde gelegt und anhand der Mittelwerte bestimmt. Die Schleife 2.1 Süd wird mit der Näherungsfunktion dabei etwas überschätzt und die Schleife 2.2 Nord etwas unterschätzt.

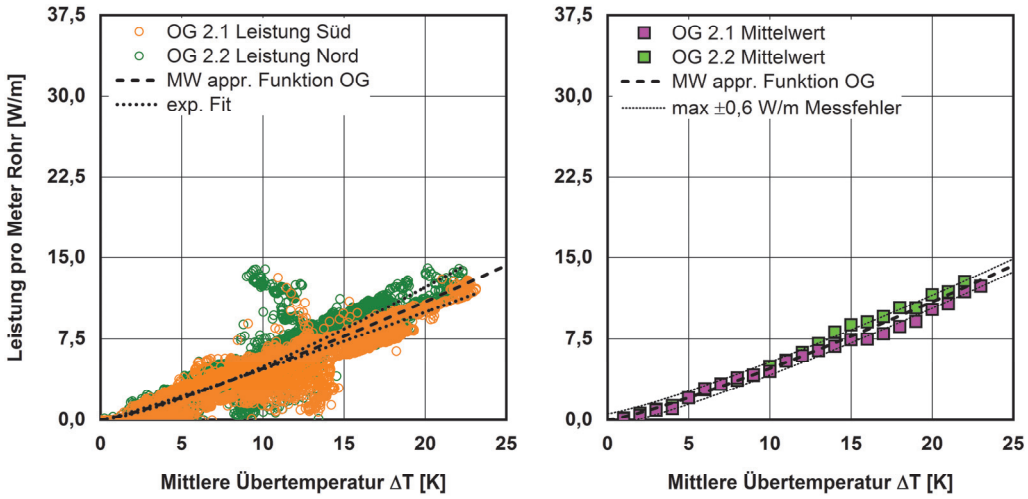


Bild 169: Vergleich der zwei auf Putz mit Wandkontakt verlegten Temperierschleifen im Obergeschoss mit stündlichen Messwerten und approximierter Funktion (linkes Diagramm) sowie Mittelwerten und approximierter Funktion (rechtes Diagramm) für den gesamten Messzeitraum vom 8.5.2013 bis 9.6.2015.

Kloster Aldersbach: Bauteiltemperierung mit und ohne Dämmung hinter dem Heizrohr

Ein Teilbereich des ehemaligen Klosters Aldersbach wurde bei der Sanierung 2015 mit einer Bauteiltemperierung ausgestattet. Für die Nutzung als Gästezimmer sind dazu in den einzelnen Mönchszellen für eine Erwärmung der Raumluft zusätzliche elektrische Heizkörper installiert worden. Im Rahmen einer Begleitforschung sind in jeweils drei nebeneinanderliegende Mönchszellen eine unter Putz verlegten Temperierung (Bauteiltemperierung) montiert worden und im Vergleich dazu ebenfalls in drei nebeneinanderliegenden Mönchszellen eine baugleiche Bauteiltemperierung, jedoch mit zusätzlicher Wärmedämmung zwischen dem Heizrohr und Außenwand. Die Dämmung wurde mit einer Dicke von 20 mm und einer Breite von 45 mm ausgeführt. In einem Raum wurde dabei eine XPS-Wärmedämmung mit λ 0,040 W/mK und in zwei Räumen ein Aerogel-Wärmedämmputz mit λ 0,028 W/mK verwendet. Die Kupferrohre haben einen Durchmesser von 18 mm. Die am Sockel montierten Heizleitungen (Vor- und Rücklaufrohr) haben einen Achsabstand von ca. 16 cm. Das Mauerwerk besteht aus historischen Vollziegeln und ist ca. ca. 61 cm dick. Die Messung der Wärmeabgabe erfolgt bei dieser Fallstudie mit einem Wärmemengenzähler je Heizschleife, Typ Integral-V UltraLite Fabrikat Allmess, mit einer Messgenauigkeit von rund ±5 % vom Messwert.

Es wird die Wärmeabgabe von zwei Heizschleifen mit Wärmemengenzählern erfasst. Jede der zwei Heizschleifen ist in etwa gleich lang und erstreckt sich über jeweils drei einzelne Räume mit und ohne Wärmedämmung hinter dem Heizrohr. Die Temperierung in der Fensterlaibung wird jeweils über ein gesondert montiertes Thermostat hinzugeschaltet. Im Grundbetrieb werden die Räume nur mit der Sockeltemperierung auf ein niedriges Temperaturniveau beheizt. Soll die Raumtemperatur für die Nutzung durch Übernachtungsgäste angehoben werden, kann über das Thermostat die Laibungsschleife aktiviert werden. Zusätzlich wurde ein elektrischer Heizkörper in jedem Raum installiert, der eine adäquate Raumtemperatur oder sehr schnelle Aufheizung sicherstellen soll, siehe Bild 170.

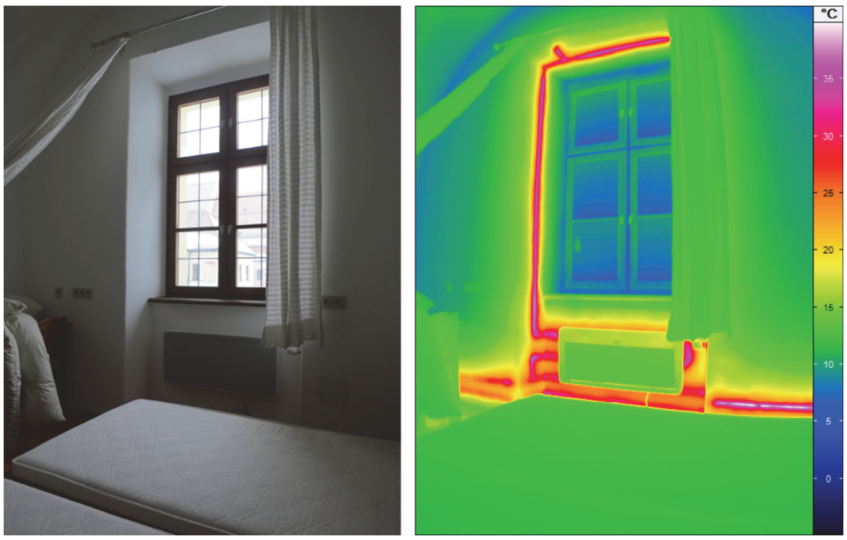


Bild 170: Links Innenansicht der Außenwand im Raum 2.28 angrenzend zum Raum 2.29. Rechts ist die IR-Aufnahme der Außenwand im gleichen Bildausschnitt dargestellt. Im Sockel- und Laibungsbereich zeigen sich deutlich erhöhte Temperaturen durch die in der Wand verlegte Temperierung, die hier mit Wärmedämmung hinterlegt ist.

Für den Vergleich der Wärmeabgabe der beiden Heizschleifen ist eine Messperiode erforderlich, in der die zusätzlich aktivierbaren Laibungsschleifen zu einem gleichen Zeitpunkt abgeschaltet bzw. eingeschaltet sind. Am 18.1.2017 werden bei allen Räumen die Laibungsschleifen aktiviert, die Wärmeabgabe steigt sprunghaft an. Für den Vergleich der Wärmeabgabe der Sockelschleife wird der Zeitraum vom 14.12.2016 bis zum 18.1.2017 herangezogen. Für den Vergleich der Wärmeabgabe der Sockelschleife mit Laibungsschleife wird der Zeitraum vom

18.1. bis zum 10.2.2017 verwendet. In Bild 171 sind die Leistung, Spreizung, Durchflussmenge und mittlere Übertemperatur für den Zeitraum vom 14.12.2016 bis 12.2.2017 dargestellt. Zum Zeitpunkt der Aktivierung der Laibungsschleifen steigt die Wärmeabgabe auf in etwa den doppelten Wert an. Bei der konventionell eingebauten Temperierung ohne Wärmedämmung ist die Wärmeabgabe geringfügig höher als bei der Temperierung mit Wärmedämmung.

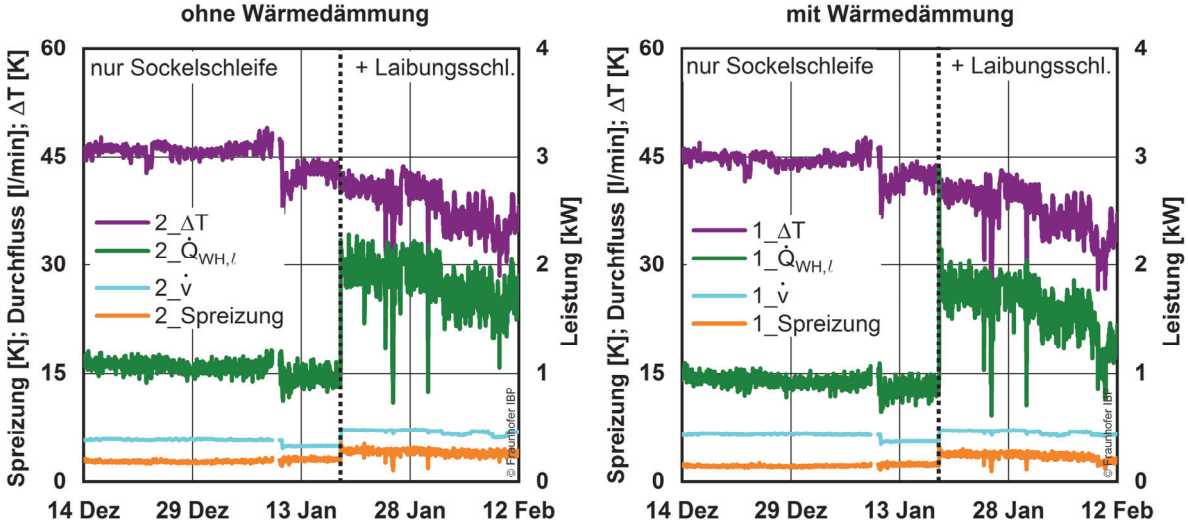


Bild 171: Leistung, Durchfluss, Spreizung sowie die mittlere Übertemperatur der Temperierschleife ohne Wärmedämmung (linkes Diagramm, Schleife 2) und mit Wärmedämmung (rechtes Diagramm, Schleife 1) im Zeitraum vom 14.12.2016 bis 12.2.2017.

Werden die stündlichen Mittelwerte der Wärmeabgabe aufsummiert, ergibt sich der kumulierte Verlauf, siehe Bild 172. Nach dem Aktivieren der Laibungsschleifen stellt sich ein steilerer Verlauf der beiden Graphen ein. Die Temperierschleife ohne Wärmedämmung gibt dabei mehr Wärme ab als die wärmegedämmte Temperierschleife. Die Differenz der Wärmeabgabe zwischen den beiden Temperierschleifen bleibt über den zeitlichen Verlauf nahezu gleich hoch. Die Wärmeabgabe der mit Wärmedämmung eingebauten Temperierung verringert sich im Verhältnis zur Wärmeabgabe der konventionell eingebauten Temperierung (ohne Wärmedämmung) im Betrieb mit der Sockelschleife um ca. 12 % bis 15 % (7-Tage Mittelwert) und im Betrieb mit der Sockel- und Laibungsschleife um ca. 10 % bis 13 % (7-Tage Mittelwert).

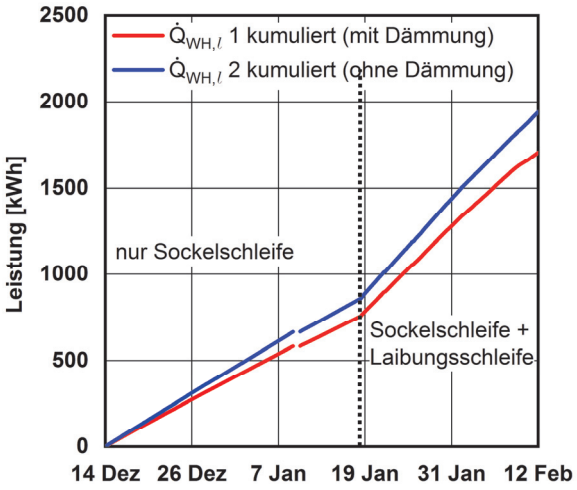


Bild 172: Kumulierte Leistung (Wärmemenge) der Temperierung mit Wärmedämmung (Leistung 1) und Temperierung ohne Wärmedämmung (Leistung 2) für den Zeitraum vom 14.12.2016 bis 12.2.2017.

Bild 173 zeigt das Diagramm der Wärmeabgabe der Temperierschleife pro Meter Rohr in Abhängigkeit der Übertemperatur mit Wärmedämmung (linkes Diagramm) und ohne Wärmedäm-

mung (rechtes Diagramm) für den Zeitraum vom 14.12.2016 bis 18.1.2017 (nur Sockeltemperierung ohne Laibungsschleifen) und vom 18.1. bis 10.2.2017 (gesamte Temperierung mit Laibungsschleifen). In der ersten Periode wird nur die Sockelschleife betrieben; es wird nur die Länge der Sockelschleife angesetzt. In der zweiten Periode wird die Gesamtlänge inklusive der Laibungsschleifen als Heizrohrlänge verwendet.

Es ergibt sich jeweils für die Sockeltemperierung eine geringere Wärmeabgabe bei gleicher mittlerer Übertemperatur. Dieser Effekt ist in der Verlegung der Heizleitung begründet. Während die Sockelschleife mit Vor- und Rücklaufleitung parallel in einem Abstand von ca. 16 cm verlegt sind, ist die Laibungsschleife überwiegend als Einrohrschleife (ohne Beeinflussung einer zweiten Heizleitung) verlegt. Die parallele Verlegung im Sockel führt zu einer gegenseitigen Beeinflussung der Wärmeströme. Zudem ist durch die Verlegung in der Laibung der Wärmedurchlasswiderstand nach außen etwas geringer. Im Ergebnis wird von der parallel verlegten Heizleitung bei beiden Varianten (mit und ohne Wärmedämmung) weniger Wärme pro Meter Heizrohr im Vergleich zur Einrohrleitung abgeben.

Bei einer mittleren Übertemperatur von 40 K ergibt sich gemäß approximierter Funktion bei der Referenzmessung der Temperierung (ohne Dämmung) inklusive Laibungsschleife eine Wärmeabgabe von 33 W/m. Die Wärmeabgabe kann für die unterschiedliche Anordnung im Sockel und Laibung unterschieden werden. Für die Sockelschleife ergeben sich 30 W/m und für die Laibungsschleife ca. 36 W/m. Mit Wärmedämmung ergibt sich eine Gesamtwärmeabgabe von 30 W/m für die Sockelschleife 27,1 W/m und für die Laibungsschleife ca. 33 W/m. Die Wärmeabgabe wird mit Dämmung um etwa 3 W/m Heizleitung reduziert. Die spezifische Leistung der Temperierschleifen erreichen damit Werte zwischen rund 0,65 W/mK und 0,77 W/mK. Die maximale Messungenauigkeit beträgt bei hoher Wärmeabgabe ±5 % vom Messwert. Dies entspricht bei einer Wärmeabgabe von 35 W/m rund ±1,8 W/m.

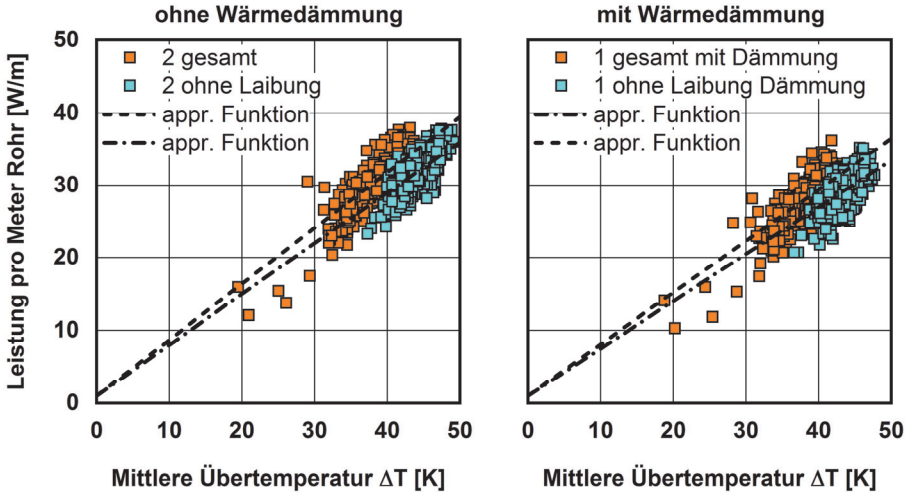


Bild 173: Linkes Diagramm: Wärmeabgabe der Temperierung ohne Wärmedämmung je Meter Heizleitung vom 14.12.2016 bis 18.1.2017 (nur Sockel) und 18.1. bis 10.2.2017 (gesamte Temperierung) in Abhängigkeit der mittleren Übertemperatur. Im rechten Diagramm sind die Werte und Zeiträume für die Temperierung mit Wärmedämmung entsprechend abgebildet.

Feldstudie Depot Schweinfurt: auf Putz verlegtes Heizrohr ohne Wandkontakt [Bichlmair et al 2016k]

Das Depot wurde 2009 neu erstellt, mit einer kostengünstigen und einfachen, modernen Bauweise mit einer thermischen Hülle aus wärmegedämmten Stahlblech (Sandwich-) Paneelen. Für die Klimatisierung wurde eine auf Putz verlegte Temperierung ohne Wandkontakt gewählt.

Bild 174 (links) zeigt im visuellen Bild die Anordnung der Temperierung vor der Außenwand. Im rechten Bild ist eine IR-Aufnahme abgebildet, die den gleichen Bildausschnitt zeigt. Es wurden vier Heizrohre in zwei Heizschleifen übereinander angeordnet. Die unteren beiden Rohre sowie die oberen beiden Rohre bilden je eine Heizschleife. Die Kupferrohre haben einen Durchmesser von 18 mm und wurden zur Erhöhung des Strahlungswärmeübergangs gegenüber blankem Kupfer mit Klarlack lackiert.

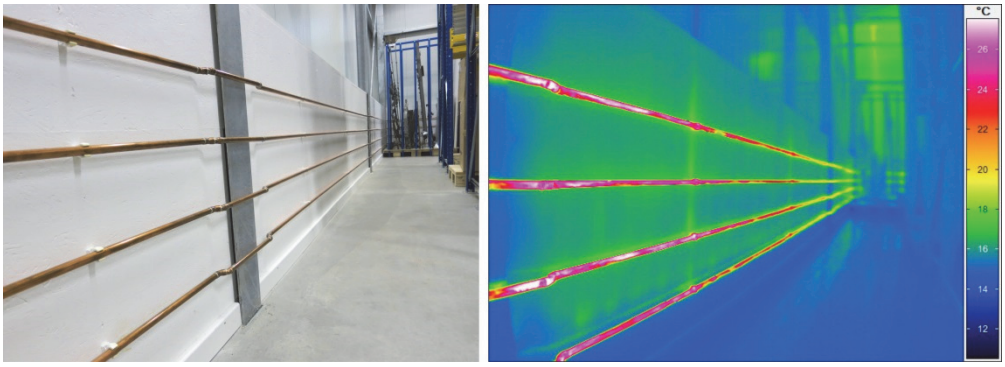


Bild 174: Verlegung der Temperierung in zwei Heizschleifen als Register angeordnet, entlang der Außenwand über die Höhe des gedämmten Betonsockels, Bild links. Das Bild rechts zeigt den gleichen Bildausschnitt mit einer Infrarot-Aufnahme.

Die Vorlauftemperatur ist für beide Heizschleifen gleich und wird nach Angaben des Betreibers witterungsgeführt durch die Heizungsanlage vorgeben. Als weitere Eingangsgröße wird die zu erreichende Raum-Mindesttemperatur berücksichtigt. Die Vorlauftemperatur wird mit einer Mindesttemperatur von ca. 25° - 27 °C ganzjährig betrieben. Während der kalten Jahreszeit erfolgt außentemperaturabhängig eine Erhöhung der Vorlauftemperatur auf bis zu 33 °C im beobachteten Messzeitraum. Die Durchflussmenge ist bei beiden Heizschleifen nahezu konstant. Die untere Schleife 1 hat mit 3,4 l/min eine geringere Durchflussmenge als die obere Schleife 2 mit 4,3 l/min. Bei der unteren Schleife 1 stellt sich eine deutliche größere Spreizung und Wärmeabgabe als bei der Schleife 2 ein (Bild 175).

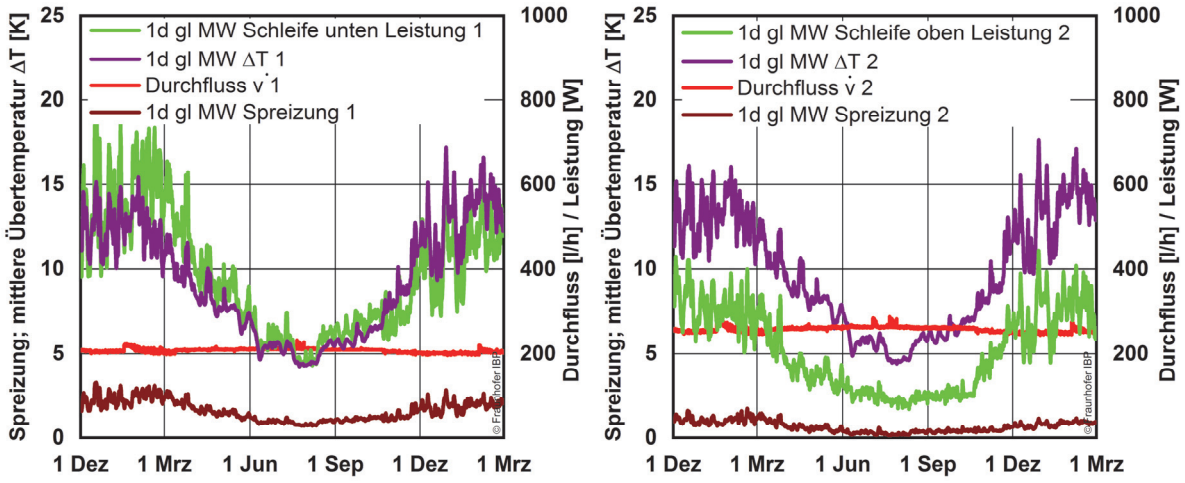


Bild 175: Übersicht mit Tagesmittelwerten der Leistungsabgabe, Spreizung, mittlere Übertemperatur und Durchfluss der unteren Schleife 1 (linkes Diagramm) und der oberen Heizschleife 2 (rechtes Diagramm) im Zeitraum vom 1.12.2013 bis 1.3.2015.

Die durch die untere Schleife vorerwärmte Luft steigt auf. Bei der oberen Heizschleife hat die Raumluft etwas höhere Temperaturen im Vergleich zur Raumluft bei der unteren Schleife. Bei gleicher Vorlauftemperatur wird an die etwas wärmere Raumluft durch die geringere Übertemperatur weniger Wärme übertragen.

Bild 176 und Bild 177 zeigen in einem Diagramm die jeweiligen Leistungsabgaben der unteren und oberen Temperierschleife sowie dem gesamten Register pro Meter Heizrohr in Abhängigkeit der mittleren Übertemperatur. In Bild 177 ist zusätzlich die thermodynamisch berechnete Wärmeabgabe eines horizontalen Heizrohres im Vergleich zur mittleren Gesamtwärmeabgabe pro Meter Heizrohr eingezeichnet. Die Messwerte decken sich sehr gut mit den theoretisch berechneten Werten der Wärmeabgabe.

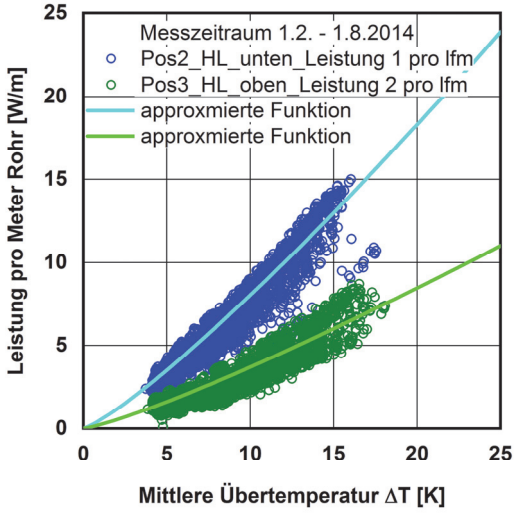


Bild 176: Wärmeabgabe der unteren und oberen Temperierschleife in Abhängigkeit von der mittleren Übertemperatur vom 1.2.2014 bis 1.8.2014 pro Meter Heizrohr. Ein Meter Temperierschleife besteht aus zwei Meter Heizrohr.

Die maximale Messungenauigkeit beträgt bei hoher Wärmeabgabe rund ±20 % vom Messwert. Dies entspricht bei einer Wärmeabgabe von 10 W/m rund ±2 W/m.

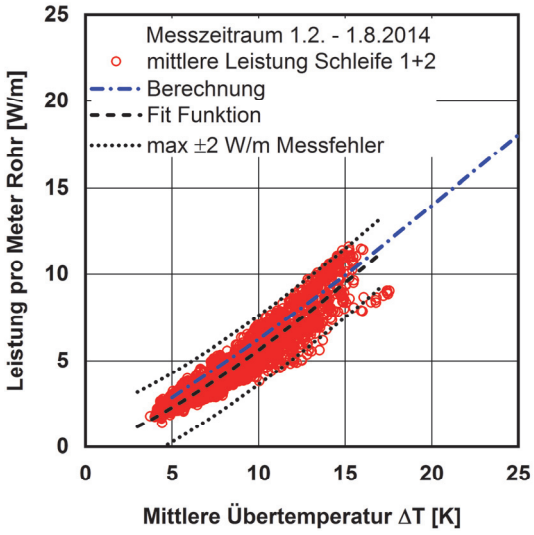


Bild 177: Gemittelte Gesamtwärmeabgabe pro Meter Heizleitung der unteren und oberen Temperierschleife, zusammengefasst in Abhängigkeit von der mittleren Übertemperatur vom 1.2.2014 bis 1.8.2014. Mit eingetragen ist die berechnete Wärmeabgabe [VDI 2006] sowie die Fit-Funktion der Messwerte.

Stadtmuseum Erlangen: Temperierung hinter offener Wandschale [Bichlmair et al 2016m]

Das Stadtmuseum Erlangen wurde 1993 grundlegend saniert und um das benachbarte Bürgerhaus aus dem 18. Jahrhundert erweitert. In dem Bürgerhaus wurden im Obergeschoss die Messungen zur Erfassung der Wärmeabgabe der Temperierung an zwei Leitungsabschnitten durchgeführt. Bild 178 zeigt die Innenansicht der westseitigen Außenwand im Raum Süd (Ausstellung 9) im Obergeschoss. Im IR-Bild ist der Fachwerkaufbau mit den Ausmauerungen erkennbar. Die Lage der Holzbalken ist durch den geringeren Wärmeleitwert von Holz gegenüber der Gefachausmauerung als wärmerer Bereich sichtbar. Im Sockelbereich ist eine schmale Blende ausgeführt, die die Minikonvektoren verdecken. Die ursprüngliche Form einer geschlossenen Wandschale ist hier zu einer reinen Sichtblende reduziert.

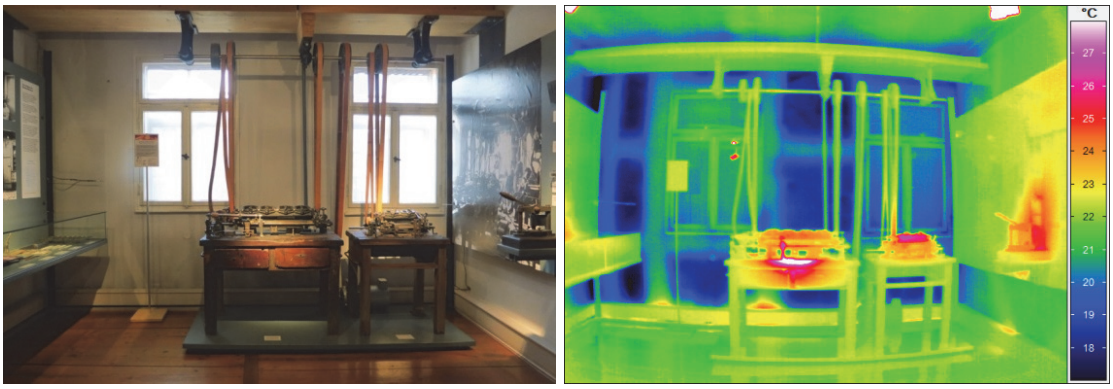


Bild 178: Ansicht der westseitigen Außenwand im Raum Süd im Obergeschoss (Ausstellung 9). Im IR-Bild (rechts) zeichnet sich das Fachwerk ab.

Die Temperierung im Raum Nord ist mit den Minikonvektoren und Heizleitungen baugleich zur Temperierung im Raum Süd ausgeführt. Im Raum Nord ist die Temperierung jedoch hinter einer Lamperie eingebaut. Die Holzvertäfelung entspricht dabei einer Ausführung wie eine offene Wandschale. In Bild 179 ist die Lamperie mit der davor stehend Ausstellungsarchitektur im linken Bild dargestellt. Im rechten Bild ist der gleiche Bildausschnitt mit einer IR-Thermographie abgebildet. Die roten Farbbereiche im Thermogramm zeigen die hohen Temperaturen der Minikonvektoren hinter den offenen unteren Schlitzen an. Der Luftraum hinter der Holzverkleidung des Lambris (Wandschale) erwärmt sich durch die Temperierung deutlich über die Raumtemperatur. In dessen Folge erwärmt sich die Holzverkleidung des Lambris auch auf der raumseitigen Oberfläche über die Raumtemperatur und erwärmt damit zusätzlich den Raum. Ein Teil der durch die Temperierung erwärmten Luft steigt direkt aus dem unteren Luftschlitz auf, wie mit künstlichem Rauch festgestellt wurde. Eine Zirkulation der Luft durch den unteren Schlitz mit Austritt über die Schlitze des Abdeckbrettes der Lambris in Brüstungshöhe scheint nur zum Teil gegeben zu sein. Die Wärmeabgabe wird über die Änderung der Vorlauftemperatur gesteuert. Durch die zusätzliche Nachtabsenkung der Vorlauftemperatur ergibt sich ein sehr dynamisches Verhalten der Heizwassertemperatur. Die Wärmeversorgung erfolgt mit gering variierendem Durchfluss im ersten Winter zwischen ca. 1,7 l/min und 2,2 l/min, im zweiten Winter zwischen ca. 2,2 l/min und 3,2 l/min. Die Wärmeabgabe erhöht sich dadurch entsprechend. Bild 180 stellt die Leistungsabgaben im Diagramm beider Temperierschleifen gegenüber. Die Temperierung hinter der Lambris zeigt dabei eine deutlich reduzierte Wärmeabgabe bei gleicher mittlerer Übertemperatur. Bei sehr geringen Übertemperaturen ist eine etwas höhere Wärmeabgabe hinter der Lambris festzustellen. Ohne Heiztätigkeit wirkt die Holzvertäfelung wie

eine Dämmschicht, die Luft hinter der Holzvertäfelung ist in der kalten Jahreszeit dadurch etwas kühler gegenüber der Raumluft, auf die die Übertemperatur bezogen ist. An die gegenüber der Raumluft etwas kühlere Luft hinter der Vertäfelung wird dementsprechend bereits bei negativen Übertemperaturen Wärme abgegeben. Die approximierte Funktion für die Heizschleife 2 Nord zeigt bei 0 K mittlerer Übertemperatur bereits 3 W/m Wärmeabgabe an. Die für beide Näherungsfunktionen verwendete Potenzfunktion hat jeweils einen Exponenten von über 1,4.

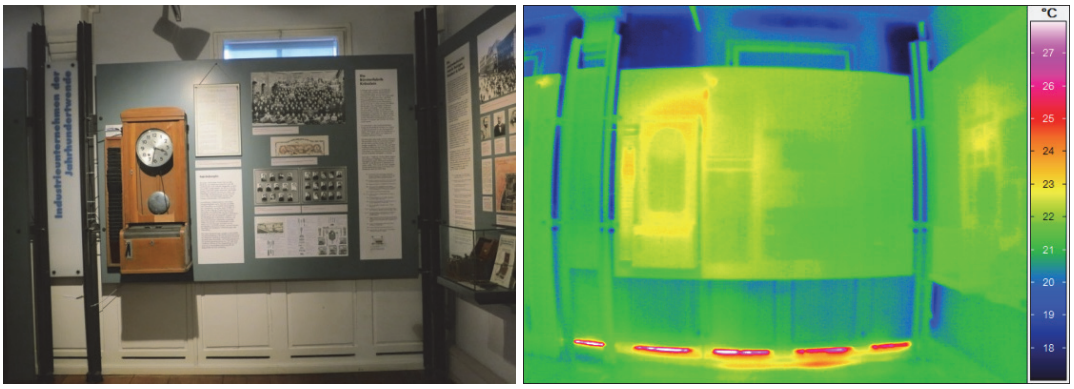


Bild 179: Raum Nord mit nordseitiger Außenwand. Vor der Außenwand steht eine Ausstellungswand. Im unteren Bereich ist die brüstungshohe Lambris montiert. Dahinter befindet sich die Temperierung, in etwa auf der Höhe der Schlitze. Rechts: IR-Bild des gleichen Bildausschnittes der nordseitigen Außenwand im Raum Nord im Obergeschoss.

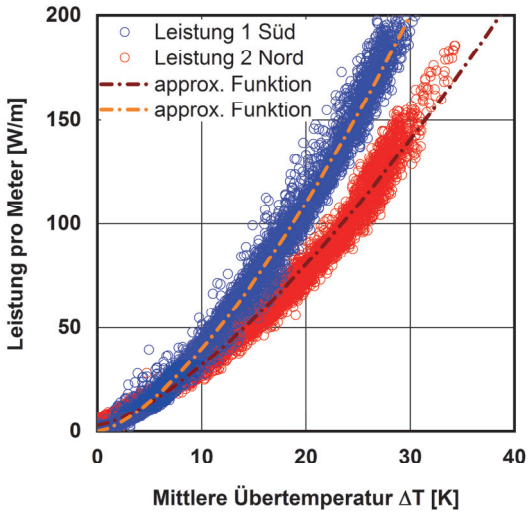


Bild 180: Stündliche Mittelwerte der Wärmeabgabe pro laufenden Meter Temperierung bezogen auf die mittlere Übertemperatur im Raum Süd (linkes Diagramm) und Raum Nord (rechtes Diagramm) für den gesamten Messzeitraum vom 18.12.2013 bis 10.3.2015. Mit eingezeichnet ist die aus den Messwerten abgeschätzte Funktion der Wärmeabgabe.

Die Wärmeabgabe je Meter Heizleitung bei 30 K mittlerer Übertemperatur liegt bei der Temperierung im Raum Süd bei ca. 200 W/m und bei der Temperierung im Raum Nord hinter dem Lambris bei ca. 140 W/m. Dies entspricht bei 30 K mittlerer Heizmittelübertemperatur einer Minderung der Wärmeabgabe um ca. 30 %. Die Lambris wirkt leistungsmindernd auf die Wärmeabgabe der Temperierung.

Anhang B Raumklima mit Temperierung

Konservatorische Zielvorgaben, Bewertung und Beschreibung des Raumklimas

Die Erhaltung der Gebäude, und im Falle der musealen Nutzung, zusätzlich die Erhaltung der Exponate, ist unter anderem vom Raumklima abhängig. Eine Übersicht zu den Einflüssen auf die Erhaltung von Kulturgut ist in [Raffler 2014] dargestellt. Aus konservatorischer Sicht wird in der Regel eine Stabilisierung des Raumklimas angestrebt, d.h. die Werte der relativen Raumluftfeuchte und Raumtemperatur sollen sich innerhalb eines vorgegebenen konservatorisch günstigen Klimakorridors bewegen. Die Vorgaben und auch die Bewertung des Klimakorridors können nach unterschiedlichen Kriterien erfolgen. In [ASHRAE 2011] sind zum Beispiel je nach konservatorischen Anforderungen unterschiedliche Klimakorridore beschrieben. Die Bewertung des Raumklimas anhand von Klimaaufzeichnungen (historisches Raumklima) und die daraus abgeleitete Ermittlung eines Zielkorridors sind in [DIN 15757] dargestellt. In jüngerer Zeit wurden auch komplexere Auswertungsalgorithmen entwickelt, die vor allem die Dynamik von kurzfristigen und saisonalen Klimaschwankungen bewerten z.B. [Martens 2012]. Ein umfangreicher Diskurs zu Auswirkungen von Klimaschwankungen auf Kunstwerke im historischen Kontext ist bei [Holl 2016] zu finden.

In der Regel erfolgen Angaben für mögliche Zielwerte (Jahresmittelwert) der relativen Feuchte und Temperatur sowie eine Beschreibung der zulässigen Abweichungen mit oberer und unterer Grenze für die relative Feuchte und Temperatur. Die unterschiedlichen Klimavorgaben orientieren sich nach konservatorischen Anforderungen für das Sammlungsgut in dem jeweiligen Raum bzw. für das Gebäude selbst. Für besonders empfindliches Sammlungsgut werden höhere Anforderungen an das Raumklima gestellt, d.h. es werden engere Grenzen für die Schwankungen (Dynamik) des Raumklimas vom vorgegebenen Mittelwert gesetzt.

Bei den höchsten Anforderungen wird ein konstanter Jahresmittelwert mit engen Grenzen an die kurzfristigen Schwankungen (Tagesschwankungen) der relativen Feuchte und Temperatur vorgegeben. Dies erfordert in der Regel neben der Beheizung des Raumes den Einsatz von zusätzlicher Klimatisierungstechnik wie z.B. Befeuchtung, Entfeuchtung und Kühlung des Raumes. Zur Vermeidung von Schäden am Gebäude stellt dies aus bauphysikalischer Sicht auch hohe bauliche Anforderungen an das Gebäude selber, die in der Regel bei Gebäuden in traditioneller Bauweise nicht vorliegen. Außerdem kann der Einsatz zusätzlicher Klimatisierungstechnik zu einem erheblichen Raumbedarf für die Aufstellung der Klimatechnik und Rohrleitungen führen. In historischen Gebäuden kann, häufig auch aus denkmalpflegerischen Gründen, der Platzbedarf nicht oder nur eingeschränkt zur Verfügung gestellt werden.

Bei weniger empfindlichen Materialien kann aus konservatorischer Sicht der Klimakorridor auch aufgeweitet werden. Hierfür werden in der Regel neben einem größeren Korridor zusätzliche Angaben und Grenzen für ein saisonales Gleiten der Mittelwerte gemacht. Die gleitenden Mittelwerte werden dabei als Monats oder Quartalsmittelwerte verstanden, häufig auch ohne Angaben des Mittelwertzeitraums. Hierbei werden gesonderte Werte für die saisonale Temperatur- und relative Feuchtemittelwerte vorgegeben, siehe [ASHRAE 2011]. Je nach Klimavorgaben kann dann der Einsatz von zusätzlicher Klimatisierungstechnik reduziert oder vermieden werden.

Für Gebäude in traditioneller Bauweise ist ein aufgeweiteter Zielkorridor, insbesondere der Raumtemperatur, geeignet, da durch einen geringeren Befeuchtungsbedarf die historische Bausubstanz hygrisch geringer belastet wird. Können sehr niedrige Raumtemperaturen zugelassen werden, kann eine Regelung der relativen Feuchte über die Raumtemperatur für eine

Kontrolle der relativen Feuchte ausreichen. Die als conservation heating bezeichnete Methode ist mit Fallstudien z.B. in [Blades et al 2010] beschrieben. Der gezielte Einsatz der Temperierung an baulichen Schwachstellen kann der hygrischen Beanspruchung der Bauteile bei Sommerkondensation (Taupunkttemperaturunterschreitung) oder bei einer zusätzlichen Befeuchtung durch die Erwärmung entgegenwirken. Die gezielte Beheizung von thermischen Schwachstellen zur Vermeidung von Schimmelpilzwachstum kann im Altbau mit Wohnnutzung energieeffizienter sein als die Erhöhung der Luftwechselrate [Krus & Kilian 2012]. Zudem sinkt der Energieverbrauch des Gebäudes bei niedrigeren Raumtemperaturen, insbesondere bei Gebäuden alter Bauart mit hohem Wärmebedarf. Zusätzlich ist bei hohen Anforderungen an das Raumklima in der Regel ein größerer Einsatz an Klimatechnik erforderlich.

Raumklima bei Gebäuden mit Temperierung

Um die Wirkung der untersuchten Temperieranlagen auf das Raumklima zu dokumentieren, werden nachfolgend die Klimadaten an einer Auswahl der untersuchten Fallstudien in Streudiagrammen [Kilian 2004] dargestellt. In den Streudiagrammen werden die relativen Feuchte und Temperatur im Kontext von Bewertungskriterien der präventiven Konservierung für gemischte Sammlungen abgebildet. Es werden dazu aus den Messwerten, die im 10-Minuten-Intervall bzw. 1-Minuten-Intervall gemessen wurden, stündliche Mittelwerte gebildet.

Raumklima normal beheizt, behagliche Raumtemperaturen

Mit einer normalen Beheizung auf Raumtemperaturen um 20 °C werden behagliche Raumtemperaturen bzw. sehr hohe museale Anforderung an die Raumtemperatur erreicht. In der Regel kommt zusätzliche Klimatechnik zur Stabilisierung der relativen Feuchte zum Einsatz.

Fallstudie Museum, Gemischte Sammlung

Das Raumklima wurde im Erdgeschosshalle im Empfangsbereich (mit Ausstellung) aufgezeichnet. Die Temperierung ist hinter einer Wandschale verlegt. Das Niveau der Raumtemperatur ist für Behaglichkeitsanforderungen ausgelegt. Der Temperaturbereich ist eng eingegrenzt und bleibt bis auf einige Stunden in der Heizperiode im wesentliche über 20 °C. Trotz Einsatz mobiler Befeuchter sinkt die relative Feuchte während der Heizperiode ab (Bild 181).

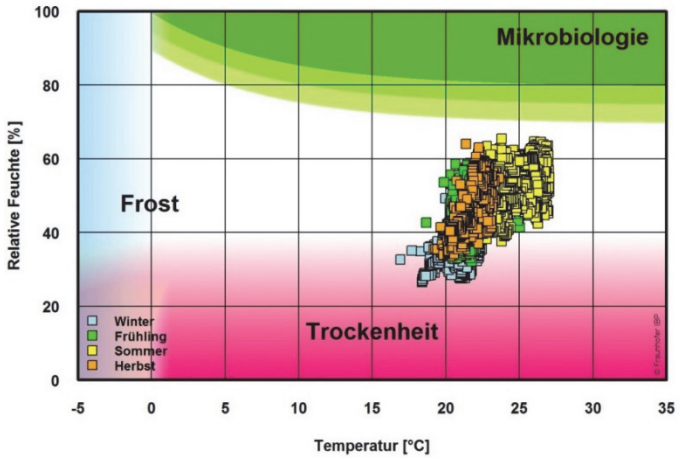


Bild 181: Streudiagramm Raumklima im Erdgeschoss des Museums. Abgebildet sind die stündlichen Mittelwerte der Messwerte der rel. Feuchte und der Temperatur im Zeitraum vom 1.1.2014 bis 1.1.2015. Die Temperierung ist hinter einer Wandschale verlegt.

Raumklima moderat beheizt, geringer Jahresgang

Mit einer moderaten Beheizung auf Raumtemperaturen um 15 °C wird der thermische Komfort zugunsten des Befeuchtungsaufwandes und der Energieeinsparung eingeschränkt. Je nach Anforderung an das Raumklima (relative Feuchte) kommt zusätzliche Klimatechnik zum Einsatz.

Fallstudie Museum, Heimatmuseum

Das Raumklima wurde im Obergeschoss im geplanten Ausstellungsbereich aufgezeichnet. Die Temperierung ist unter Putz mit Vorlaufleitung im Sockel und Rücklaufleitung auf Brüstungshöhe verlegt. Zum Zeitpunkt der Klimaaufzeichnung war das Museum noch nicht im Betrieb. Das Niveau der Raumtemperatur ist für mäßige Behaglichkeitsanforderungen ausgelegt. Der Temperaturbereich ist etwas aufgeweitet. Es wird die angestrebte Mindesttemperatur von 15 °C eingehalten. Durch die massive historische Bausubstanz werden auch im Sommer nur rund 24 °C erreicht. Die relative Feuchte bewegt sich ohne Besucher in einem engen Band (Bild 182).

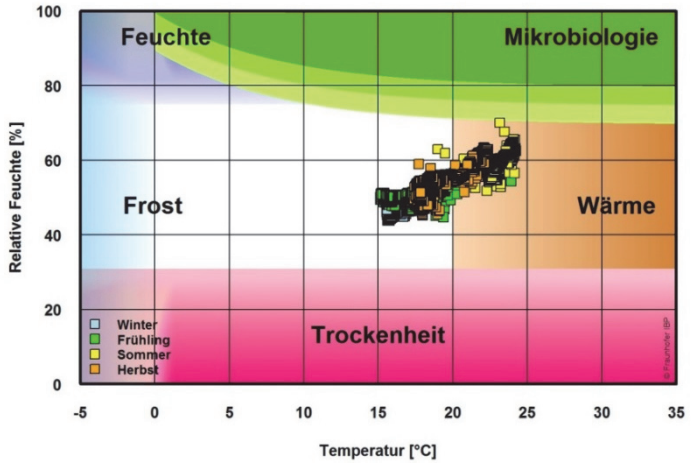


Bild 182: Streudiagramm Raumklima im Obergeschoss eines Heimatmuseums. Abgebildet sind die stündlichen Mittelwerte der Messwerte der relativen Feuchte und der Temperatur für den Zeitraum vom 1.1.2014 bis 1.1.2015. Die Temperierung ist unter Putz verlegt.

Fallstudie Museum, Heimatmuseum

Das Raumklima wurde im Erdgeschoss in einem Heimatmuseum aufgezeichnet (Bild 183).

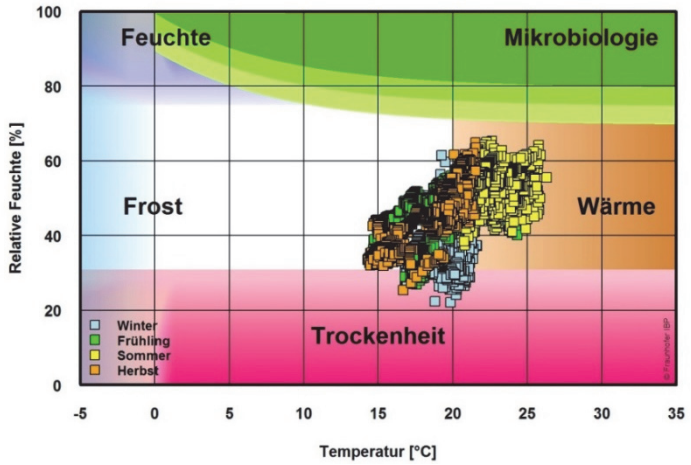


Bild 183: Streudiagramm Raumklima im Obergeschoss eines Heimatmuseums mit stündlichen Mittelwerten der Messwerte, Zeitraum vom 1.4.2013 bis 1.4.2014. Die Temperierung ist unter Putz verlegt.

Die Temperierung ist unter Putz mit Vor- und Rücklaufleitung verlegt. Das Niveau der Raumtemperatur ist auch hier für mäßige Behaglichkeitsanforderungen ausgelegt. Es wird eine untere Temperatur von etwa 14 °C eingehalten. Trotz der massiven historischen Bausubstanz steigen die Raumtemperaturen im Sommer auf rund 26 °C an. Teilweise liegen die Raumtemperaturen im Winter etwas höher, dadurch sinkt die relative Feuchte auf niedrige Werte (Bild 183).

Fallstudie Museum, Gemäldemuseum

Das Raumklima wurde im Obergeschoss eines Gemäldemuseums aufgezeichnet. Die Temperierung ist umlaufend im Raum mit Vor- und Rücklaufleitung im Sockelbereich hinter einer Blende verlegt. Zusätzlich sind dünne Blechstreifen zwischen Vor- und Rücklauf als Wärmeleitbleche montiert. Das Niveau der Raumtemperatur ist auch hier für mäßige Behaglichkeitsanforderungen ausgelegt. Es wird eine untere Temperatur von etwa 15 °C eingehalten. Trotz der massiven historischen Bausubstanz steigen die Raumtemperaturen im Sommer auf etwa 28 °C an. Die relative Feuchte liegt in einem sehr engen Bereich (Bild 184). Der Ausstellungsraum wird mechanisch belüftet und es kommen Be- und Entfeuchter zum Einsatz.

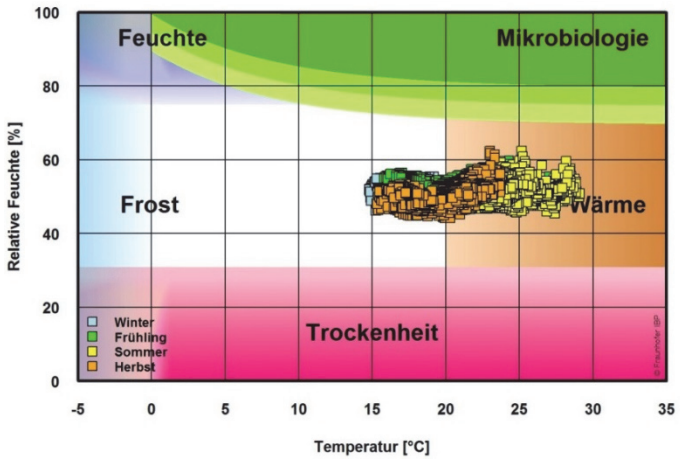


Bild 184: Streudiagramm Raumklima im Obergeschoss eines Gemäldemuseums. Abgebildet sind die stündlichen Mittelwerte der Messwerte der relativen Feuchte und der Temperatur für den Zeitraum vom 1.2.2013 bis 1.2.2014. Die Temperierung ist auf Putz ohne Wandkontakt hinter einer offenen Blende verlegt.

Mäßige Beheizung, gleitender Jahresgang

Eine mäßige Beheizung mit Temperaturen bis 10 °C wurde in Museen mit längeren Schließzeiten während der Winterperiode festgestellt. Während der Öffnungstage werden in der Regel höhere Anforderungen an die Behaglichkeit bzw. Raumtemperaturen gestellt. Teilweise kommt im geringen Umfang zusätzlich Klimatechnik zum Einsatz.

Fallstudie Museum, Heimatmuseum

Das Raumklima wurde im Obergeschoss in einem Heimatmuseum aufgezeichnet. Die Temperierung ist auf Putz ohne Wandkontakt entlang der Außenwände mit Vor- und Rücklaufleitung verlegt. Das Niveau der Raumtemperatur ist für mäßige Behaglichkeitsanforderungen ausgelegt. Das Museum ist im Winter für einen längeren Zeitraum geschlossen. Die Raumtemperatur sinkt dabei auf etwa 12 °C. Die Raumtemperaturen steigen im Sommer auf knapp 28 °C an. Es werden zu trockene oder feuchte Zustände der Raumluft vermieden (Bild 185).

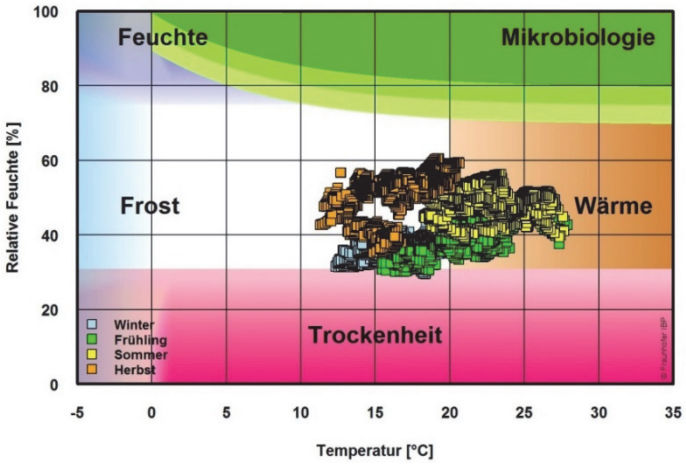


Bild 185: Streudiagramm Raumklima im Obergeschoss eines Heimatmuseums. Abgebildet sind die stündlichen Mittelwerte der Messwerte der relativen Feuchte und der Temperatur für den Zeitraum vom 1.2.2013 bis 1.2.2014. Die Temperierung ist auf Putz ohne Wandkontakt verlegt.

Fallstudie Museum, Heimatmuseum

Das Raumklima wurde im Obergeschoss in einem Heimatmuseum aufgezeichnet. Die Temperierung ist auf Putz mit Wandkontakt am Sockel als Ringleitung verlegt (nur ein Rohr umlaufend). Das Niveau der Raumtemperatur ist hier für geringe bis mäßige Behaglichkeitsanforderungen in der kalten Jahreszeit ausgelegt. Das Museum ist im Winter zwei Monate geschlossen. Die Raumtemperatur sinkt dabei auf etwa 10 °C. Die Raumtemperaturen steigen im Sommer auf knapp 26 °C an. Die relative Feuchte bewegt sich in einem engen Bereich (Bild 186).

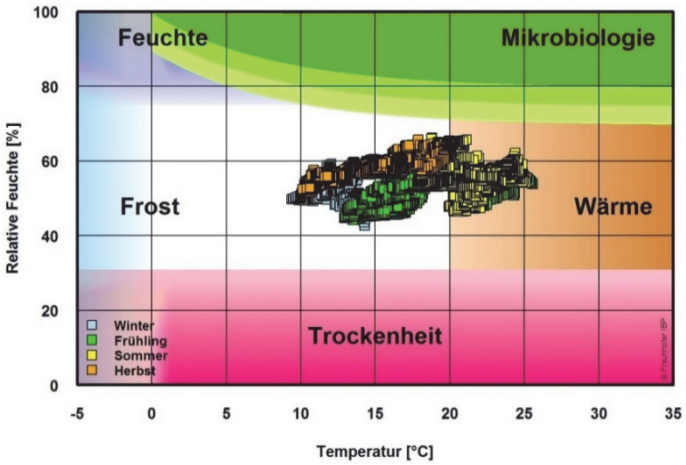


Bild 186: Streudiagramm Raumklima i im Obergeschoss eines Heimatmuseums. Abgebildet sind die stündlichen Mittelwerte der Messwerte der relativen Feuchte und der Temperatur für den Zeitraum vom 1.12.2013 bis 1.12.2014. Die Temperierung ist auf Putz mit Wandkontakt verlegt.

Geringe Beheizung, Feuchtestabilisierung

Es werden keine oder nur geringe Anforderungen an eine Mindesttemperatur der Raumluft gestellt. Die Beheizung zur Stabilisierung der relativen Feuchte steht im Vordergrund. Auf weitere Klimatechnik wird in der Regel verzichtet.

Fallstudie Freilichtmuseum

Das Raumklima wurde im Erdgeschoss in einer Wohnstube in einem Bauernhof eines Freilichtmuseums aufgezeichnet. Die Temperierung ist unter Putz mit Vor- und Rücklauf ca. 30 cm über dem Fußboden mit einer Wärmedämmung direkt hinter den Heizleitungen montiert. Das

Museum bzw. Freilichtgelände sind im Winter geschlossen. Die Raumtemperatur sinkt dabei in dem abgebildeten Jahr auf etwa 6 °C. Die Raumtemperaturen steigen im Sommer auf ca. 28 °C an. Die relative Feuchte bewegt sich in einem günstigen Bereich und erreicht im Niveau der relativen Feuchte museale Anforderungen (Bild 187).

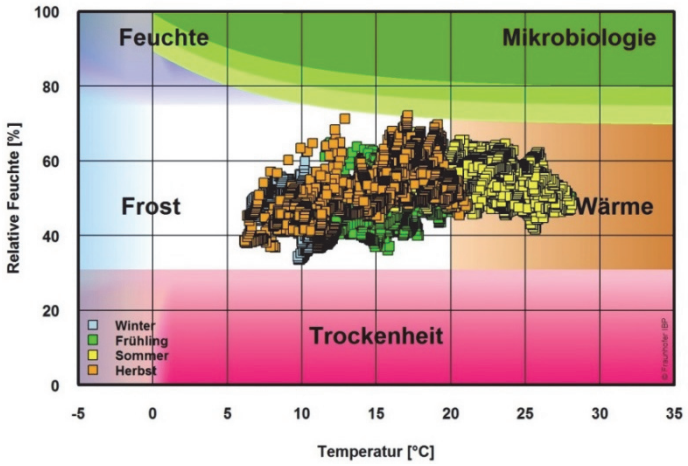


Bild 187: Streudiagramm Raumklima in der Wohnstube eines Bauernhofes eines Freilichtmuseums. Abgebildet sind die stündlichen Mittelwerte der Messwerte der relativen Feuchte und der Temperatur für den Zeitraum vom 10.5.2013 bis 10.5.2014. Die Temperierung ist unter Putz, mit Wärmedämmung hinterfüttert, verlegt.

Fallstudie Kapelle

Das Raumklima wurde vor dem rechten seitlichen Altar aufgezeichnet (Bild 188).

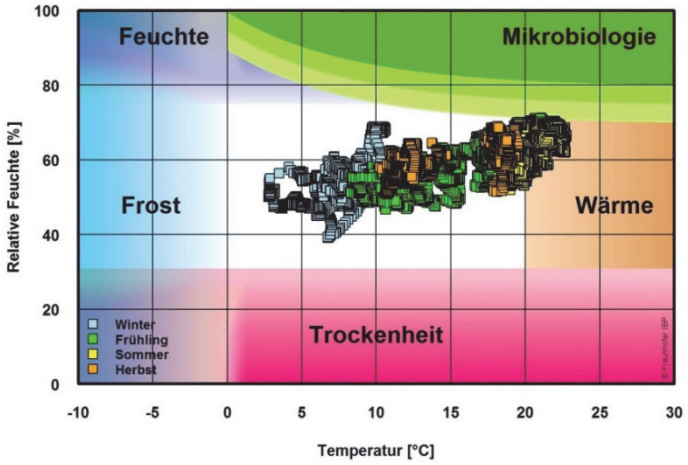


Bild 188: Streudiagramm Raumklima in der Renatuskapelle. Abgebildet sind die stündlichen Mittelwerte der Messwerte der relativen Feuchte und der Temperatur für den Zeitraum vom 25.6.2014 bis 25.6.2015 [Kilian et al 2016]. Die Temperierung ist unter Putz verlegt.

Die Temperierung ist unter Putz mit Vor- und Rücklauf im Sockel- und Brüstungsbereich unter Putz montiert. Die Renatuskapelle ist für Besucher zugänglich. Die Beheizung erfolgt zur Stabilisierung der relativen Feuchte feuchtegesteuert. Dabei sinkt die Raumtemperatur am seitlichen Altar in dem abgebildeten Jahr auf etwa 3 °C. Die Raumtemperaturen steigen bedingt durch die massiven Ziegelwände im Sommer nur auf ca. 23 °C an. Die relative Feuchte bewegt sich in einem engen Korridor und gleitet saisonal im Mittelwert zwischen ca. 50 % rF und 60 % rF mit nur geringen Schwankungen.

Fallstudie Kirche St. Margaretha

Das Raumklima in der bis vor wenigen Jahren unbeheizten Kirche war geprägt durch starke kurzzeitige Schwankungen und einem sehr hohen Niveau der relativen Feuchte. Das Streudiagramm in Bild 189 zeigt das Raumklima über zwei Winterperioden im Zeitraum vom 10.12.2011 bis 1.6.2013 ohne Beheizung (Bild 189) [Bichlmair et al 2018].

Zur Feststellung und zur Erarbeitung von Verbesserungen der Situation wurden mehrere Untersuchungen durchgeführt [Bichlmair et al 2013], [Erhard et al 2013], [Brandl 2014], [Holl 2016], [Bichlmair et al 2018]. Realisiert wurde eine elektrisch beheizte Temperierung, ca. 30 cm über dem Fußboden mit zwei Heizleitungen, unter Putz verlegt. Die Beheizung erfolgt zur Stabilisierung der relativen Feuchte. Dabei sinkt die Raumtemperatur in dem abgebildeten Jahr auf etwa -2 °C (Bild 190). Die Raumtemperaturen steigen bedingt durch die massiven Tuffsteinwände im Sommer nur auf ca. 23 °C an. Die relative Feuchte bewegt sich in einem engen Korridor auf einem etwas niedrigeren, aber immer noch hohen Niveau von 76 % rF im Mittel, mit deutlich geringeren Schwankungen. Insbesondere werden ganzjährig sehr hohe relative Feuchten vermieden (Bild 190).

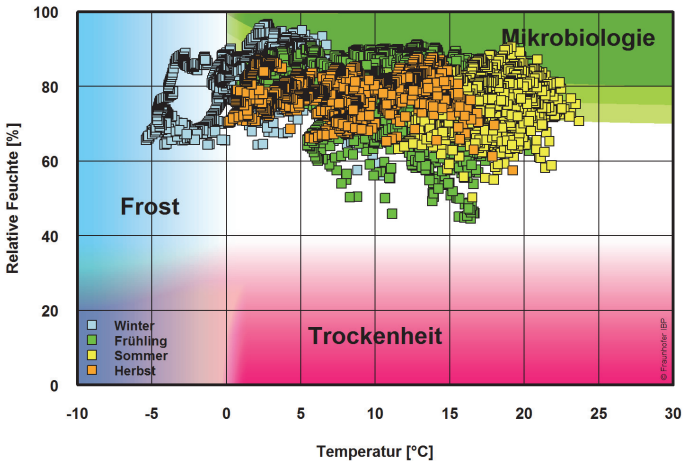


Bild 189: Streudiagramm Raumklima in der Kirche St. Margaretha, ohne Temperierung. Abgebildet sind die stündlichen Mittelwerte der Messwerte der relativen Feuchte und der Temperatur für den Zeitraum vom 10.12.2011 bis 1.6.2013.

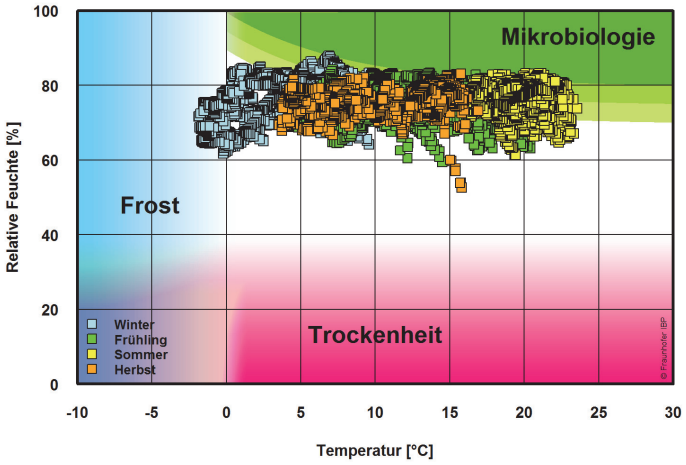


Bild 190: Streudiagramm Raumklima in der Kirche St. Margaretha, mit Temperierung. Abgebildet sind die stündlichen Mittelwerte der Messwerte der relativen Feuchte und der Temperatur für den Zeitraum vom 10.12.2016 bis 1.6.2018. Die Temperierung ist unter Putz verlegt.

Lebenslauf

Stefan Bichlmair wurde 1973 in Bad Tölz geboren. Nach einer Schreinerlehre und Absolvierung der Wehrpflicht studierte er von 1993 bis 1999 Holztechnik an der Fachhochschule Rosenheim. Es folgte eine Tätigkeit bei einem Holzfertigbau-Unternehmen bis 2010. Bereits während seiner beruflichen Tätigkeit studierte er im konsekutiven Masterstudiengang Holztechnik an der Hochschule Rosenheim. Seine Masterarbeit mit dem Thema „Simulation und Analyse des Raumklimas in ausgewählten Räumen im Schloss Linderhof" führte er bereits am Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP durch. Seit 2011 ist Stefan Bichlmair wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer IBP in Holzkirchen und arbeitet überwiegend an hygrothermischen Fragestellungen und Energieeffizienz in Gebäuden alter Bauart sowie Raumklima und Klimatisierung in historischen Gebäuden. Er leistet aktive Mitarbeit bei der WTA in den Referaten „Präventive Konservierung" und „Bauphysik".

FORSCHUNGSERGEBNISSE AUS DER BAUPHYSIK BAND 42

Als Einbau von einfachen Heizrohren unter Putz oder auf Wandoberflächen ist die Temperierung eine einfache Heiztechnik, die ursprünglich für die Erhaltung museal genutzter historischer Gebäude entwickelt wurde. Die Erhaltung und Nutzung historischer Gebäude in traditioneller Bauweise ist eine interdisziplinäre Herausforderung mit häufig widersprüchlichen Anforderungen. Die Temperierung ist ein Hilfsmittel, das den vielen Anforderungen der Erhaltung der Gebäude und Nutzung gerecht wird. Voraussetzung hierfür ist eine zielgerichtete Anwendung mit Kenntnis der zu erwarteten Energieeffizienz und Heizleistung der Temperierung.

Die vorliegende Untersuchung füllt die bisherigen Wissenslücken zur Wärmeabgabe und Raumklimawirkung der Temperierung. Der Schwerpunkt der Untersuchungen liegt dabei auf der Klärung der Wärmeabgabe und Effizienz der Bauteiltemperierung und der Entwicklung einer vereinfachten Berechnungsmethode für Planer. Die Berechnungsmethode stützt sich dabei auf Messungen im Fraunhofer-Zentrum für energetische Altbausanierung und Denkmalpflege Benediktbeuern, auf Laboruntersuchungen sowie zahlreiche Feldstudien in historischen, überwiegend museal genutzten Gebäuden.

ISBN 978-3-8396-1668-0

9 783839 616680