

Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP
Forschung, Entwicklung,
Demonstration und Beratung auf
den Gebieten der Bauphysik
Zulassung neuer Baustoffe,
Bauteile und Bauarten
Bauaufsichtlich anerkannte Stelle für
Prüfung, Überwachung und Zertifizierung
Institutsleiter
Prof. Dr. Klaus Peter Sedlbauer

IBP-Bericht RK 013/2014/294

EnOB – Innovative Wandheizungen

Durchgeführt im Auftrag des
Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie
(BMWi)

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Förderkennzeichen 0329663J

Der Bericht umfasst
246 Seiten Text
50 Tabellen
200 Abbildungen

Institutsleiter



Univ.-Prof. Dr.-Ing.
Klaus Peter Sedlbauer

Abteilungsleiter



Prof. Dr.-Ing.
Gunnar Grün

Bearbeiter



Dr.-Ing.
Ralf Kilian

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Projektteam:

Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP
Fraunhoferstr. 10
83626 Valley

Ansprechpartner:
Herr Dr.Ing Ralf Kilian
Herr Dr.-Ing. Martin Krus
Frau Dipl.-Ing. (FH) Christine Milch,
Herr M.Eng. Stefan Bichlmair
Herr André Thiel
Frau Dipl.-Phys. Doris Rösler
Herr Maximilian Benter
Herr Max Trambauer

Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP)
Gottschalkstr. 28 a
34127 Kassel

Ansprechpartner:
Frau M.Sc. Marlen Schurig
Herr Young Jae Yu

Holzkirchen, 28. Januar 2015

Inhalt

1	Kurzdarstellung der Aufgabenstellung	6
2	Kurzdarstellung der Voraussetzungen des Vorhabens	7
3	Kurzdarstellung von Planung und Ablauf des Vorhabens	7
4	Kurzdarstellung des wissenschaftlich-technischen Standes	11
4.1	Forschungsstand – Energetische Bewertung der Bauteiltemperierung	11
4.2	Eigene Untersuchungen	12
4.3	Energieeinsparung durch Wandtemperiersysteme	15
5	Vorhabensziele, Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse	18
5.1	Hintergrund und Umsetzung der Versuche	19
5.1.1	Definition und Beschreibung der verwendeten Systeme	19
5.1.2	Begründung der getroffenen Planungsentscheidungen	24
5.2	Vorversuche an der Freilandversuchsstelle des Fraunhofer IBP in Holzkirchen	31
5.3	Einbau der Heizsysteme / Installation der Messtechnik in der Alten Schäfflerei in Benediktbeuern	46
5.3.1	Beschreibung der Messräume	46
5.3.2	Beschreibung der Wärmeübergabesysteme	52
5.3.3	Regelung	65
5.3.4	Sensorik	66
5.3.5	Messkonzept	73
5.3.6	Visualisierung	79
5.3.7	Chronologie der Untersuchungen	80
5.4	Anpassung der Simulationssoftware und Evaluierung	92
5.4.1	Kopplung zwischen zweidimensionaler Simulationsrechnung und Raummodell	92
5.4.2	Zweidimensionale Berechnungen zur Bauteiltemperierung	108
5.4.3	Berechnungen zum Einfluss einer Dämmung zwischen Mauerwerk und Wandheizung	118
5.4.4	Berechnungen zum Einfluss von feuchtepuffernden Materialien und von intermittierender Nutzung auf das Raumklima mit dem Raummodell WUFI®-Plus	130
5.4.5	Ergebnisse der Untersuchungen und Diskussion	134

5.5	Energetische Bilanzierung der Messräume	146
5.5.1	Ansatz zur Beurteilung der Leistungsmessung	147
5.5.2	Ergebnisse der Leistungsmessung	152
5.5.3	Zusammenfassung zur energetischen Bilanzierung	160
5.6	Exergetische Untersuchungen	162
5.6.1	Simulationsmodell	162
5.6.2	Gebäudemodell	163
5.6.3	Modell Strahlungsheizung (Messraum 1)	164
5.6.4	Modell Wandheizung (Messraum 2, Messraum 3, Messraum 4)	165
5.6.5	Klimadaten	167
5.6.6	Strahlungsmodell	167
5.6.7	Wärmeübergangskoeffizienten	168
5.6.8	Validierung der Simulation	170
5.6.9	Validierung der Ergebnisse	171
5.6.10	Validierung von Messraum 1 (Strahlungsheizkörper)	172
5.6.11	Messraum 2 (Wandheizung 1)	173
5.6.12	Messraum 3 (Wandtemperierung)	176
5.6.13	Messraum 4 (Wandheizung 2)	179
5.6.14	Zusammenfassung der exergetischen Simulation	181
5.6.15	Exergetische Bewertung	182
5.6.16	Zusammenfassung exergetische Untersuchungen	184
5.7	Untersuchung der thermischen Behaglichkeit	185
5.7.1	Entwicklung des Messkonzeptes	185
5.7.2	Spezifische Sensorik für die Messungen zur thermischen Behaglichkeit	194
5.7.3	Ergebnisse	197
5.7.4	Analyse der Ergebnisse	220
5.7.5	Diskussion der Ergebnisse	223
5.7.6	Zusammenfassung zur Behaglichkeitsuntersuchung	225
5.8	Umbau / Optimierung des experimentellen Aufbaus	226
5.9	Zusammenfassung der wissenschaftlich technischen Ergebnisse des Forschungsprojekts	227
5.9.1	Exergetische Betrachtung	227
5.9.2	Energetische Betrachtung	227
5.9.3	Komfort	229
5.9.4	Schadensvermeidung	230
5.9.5	Vorschläge zur Optimierung der Systeme	232
5.9.6	Methodik der vergleichenden Untersuchung	233
6	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	234
7	Voraussichtlicher Nutzen und Verwertung des Ergebnisses	234

8	Fortschritt Dritter während der Projektlaufzeit	234
9	Erfolgte / geplante Veröffentlichungen der Projektergebnisse	235

1 Kurzdarstellung der Aufgabenstellung

Die Einsparung von Energie in den unterschiedlichen Wirtschaftszweigen und Privathaushalten ist erklärtes Ziel der Bundesregierung und ist im öffentlichen und privaten Bausektor ein richtungweisendes Thema. Energieeffiziente Sanierungsmethoden und Entwicklungen in der Anlagentechnik sind gerade auch im Gebäudebestand essentielle Fragestellungen. Während im Neubaubereich bereits eine Vielzahl an innovativen Ansätzen verfolgt wird, wurden Lösungen und Untersuchungen von Materialien für schützenswerte bzw. denkmalgeschützte Gebäude bisher eher vernachlässigt. Die Art der Wärmeverteilung im Gebäude hat hier zum einen Einfluss auf die Erhaltung der historischen Bausubstanz. Zum anderen aber auch auf die Energieeffizienz der Systeme und den Komfort der Nutzer oder Bewohner. Hier setzt das vorliegende Vorhaben an, mit dem Ziel Niedertemperaturflächenheizungen und Strahlungsheizungen mit hoher Vorlauftemperatur energetisch, exergetisch und in Hinblick auf Komfort und Vermeidung von Bauschäden hin zu vergleichen.

Das von 2008 bis 2014 vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestags geförderte Forschungs- und Entwicklungsprojekt „EnOB - Energetische Untersuchungen und Optimierung innovativer Wandheizungssysteme“ hat den Vergleich unterschiedlicher Flächenheizungssysteme und Strahlungsheizungen mit konventioneller Heizung zum Inhalt. Im Vordergrund steht der energetische und exergetische Vergleich der Heizungssysteme für die energetische Altbausanierung unter den besonderen Auflagen des Denkmalschutzes. Hierbei werden verschiedene, auch innovative Heizungssysteme zeitgleich unter vergleichbaren Randbedingungen parallel untersucht und damit die Unterschiede in Bezug auf Energieeffizienz, Schadensrisiko und Behaglichkeit gegenübergestellt. Als Referenzsystem dient konventionelle Heizung mit Radiatoren/Konvektoren. Damit verglichen werden eine modulare Wandheizung auf Lehmbauplatten, eine neuartige Wandheizung mit Entkopplungsmatte, ein strahlungsoptimierter Heizkörper sowie ein System zur Bauteilaktivierung, die sog. „Wandtemperierung“.

Die energiesparende Wirkung der Kombination und die Funktionsweise von Dämmmaßnahmen mit Wandheizungssystemen wird in 1- und 2-dimensionalen hygrothermischen Berechnungen mit der Software WUFI® sowie mit dem Raummodell WUFI® Plus simuliert und in Freilandversuchen am Fraunhofer-Institut für Bauphysik in Holzkirchen vorab messtechnisch überprüft. Parallel dazu werden exergetische Betrachtungen zur Wahl der Energieträger und der Wärmeübergabe durchgeführt. Durch diese Untersuchungen und die parallel laufende Weiterentwicklung der hygrothermischen Berechnungsmodelle werden weitere Grundlagen für eine praxisnahe, fachlich begründete Bemessung von Wandheizsystemen geschaffen.

2 Kurzdarstellung der Voraussetzungen des Vorhabens

Um sich der Herausforderung zu stellen, für diesen speziellen und nicht minder wichtigen Bereich des Gebäudebestandes innovative Technologien und Materialien zu erforschen und zu entwickeln, plante das Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP seit 2006 ein Zentrum für Denkmalpflege und energetische Altbausanierung zu etablieren. Dieses Zentrum wurde im Jahr 2010 in Benediktbeuern erfolgreich gestartet und im Gebäude der Alten Schäferei des Klosters, datiert auf 1760, eingerichtet. Ziel ist es zum einen, die interessierte Öffentlichkeit über Themen der Energieeffizienz und Denkmalpflege zu informieren und durch fundierte Informationen für die energetische Altbausanierung zu mobilisieren. Zum anderen verfolgt das Fraunhofer IBP das Ziel bauphysikalische Untersuchungen im Bereich der Energieeffizienz und Denkmalpflege durchzuführen und Industriepartner zu gewinnen, die ihre erprobten Produkte dort zeigen bzw. neue Entwicklungen für den schützenswerten Altbaubestand an einem realen historischen Gebäude testen und weiter entwickeln.

In diesem Kontext wurde auch die Idee für das vom BMWi seit 2008 auf einen Beschluss des Bundestags geförderte Projekt „Innovative Wandheizungssysteme“ entwickelt, das es zum Ziel hat, Niedertemperatursysteme zur Flächenheizung mit Hochtemperatursystemen mit erhöhtem Strahlungsanteil mit konventioneller Raumbeheizung durch Konvektoren-Heizkörper zu vergleichen. Dadurch sollen Planer und Bauherren bei der Gebäudesanierung eine fundierte Grundlage für die Entscheidung für energiesparende Systeme und eine höhere Planungssicherheit erhalten.

3 Kurzdarstellung von Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Laufzeit des Projekts Innovative Wandheizungen war von 1. Juli 2008 bis 30. Juni 2014. Im Folgenden ist der Ablauf des Vorhabens in tabellarischer Form dargestellt.

Tabelle 1:
Übersicht über den Projektverlauf.

Jahr	Beschreibung
2008	<p>Geplante Umsetzung des Forschungsvorhabens in Weyarn</p> <p>Für die Umsetzung des Forschungsvorhabens und zur Etablierung eines Zentrums für Bauphysik und Denkmalpflege suchte das Fraunhofer IBP ein unsaniertes und denkmalgeschütztes Gebäude, um dieses unter energetischen und denkmalpflegerischen Gesichtspunkten modellhaft instand zu setzen. Die baulichen Maßnahmen sollten mit unterschiedlichen Forschungsfragen verknüpft werden. In der benachbarten Gemeinde Weyarn, die bei der Erhaltung von schützenswerter Bausubstanz sehr engagiert ist, bot sich die Möglichkeit, in einem unsanierten Gebäude der Klosteranlage die Idee des Zentrums umzusetzen. Das Fraunhofer IBP trat mit der Gemeinde in Verhandlungen und stellte sein Konzept zum Aufbau des Demonstrations- und Forschungszentrums sowie die mit dem hier berichteten Forschungsvorhaben verbundenen baulichen Maßnahmen zur Einrichtung von Messräumen für die Untersuchung von vier Wandheizungssystemen vor.</p> <p>Dieses Forschungsvorhaben hat zum Ziel, eine möglichst optimale Energieeffizienz bei der Sanierung von Bestandsgebäuden mittels Wandheizungssystemen zu erlangen. Das Pilotprojekt hinsichtlich der wissenschaftlichen Untersuchung und bauphysikalischen Messung unterschiedlicher Heizungssysteme im Erdgeschoss des Gebäudes ist eingebettet in die Errichtung eines Zentrums, das sich mit Aspekten zur Erhaltung des baukulturellen Erbes und der historischen Bausubstanz in Verbindung mit innovativen Materialien und Technologien zur Energieeinsparung auseinandersetzt. Denkmalpflege und Bauphysik mit einander zu verbinden, ist ebenso Schwerpunkt der Zentrumsarbeit, wie auch die Thematisierung von Energieeffizienz, Nachhaltigkeit, Ökonomie, Ökologie sowie erneuerbaren Energien. Das Verständnis für bauphysikalische Abläufe und Zusammenhänge werden genauso vermittelt, wie Normen und Vorschriften und ein Grundverständnis für denkmalpflegerische Belange. Dies bildet die Grundlage für die Anwendung auf eine Vielzahl anderer zu sanierende Altbauten, vor allem auch außerhalb des denkmalgeschützten Bestandes.</p> <p>Die Einrichtung des Zentrums für Bauherren, Fachplaner, Handwerker, Denkmalpfleger, Studenten, Kommunen, Entscheidungsträger und die interessierte Öffentlichkeit war im ehemaligen Wirtschaftsgebäude der Brauerei des Klosters Weyarn geplant. Im 18./19. Jahrhundert wurde es als Ökonomie des Klosters, später als landwirtschaftliches Betriebsgebäude genutzt. Nachdem die Besitzer die Landwirtschaft aufgegeben hatten, erwarb die Gemeinde Weyarn 1992 das denkmalgeschützte Gebäude und den Anbau. Seither war das Gebäude ohne spezielle Nutzung und wurde über die Jahre immer sanierungsbedürftiger. Das Fraunhofer IBP plante daher die Etablierung unterschiedlicher Forschungsprojekte in Bezug auf energetische und denkmalpflegerische Sanierung in Verbindung mit den dazugehörigen baulichen Maßnahmen direkt am Gebäude.</p> <p>Die Gemeinde Weyarn beauftragte in inhaltlicher Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer IBP eine Voruntersuchung des Gebäudes durch einen Architekten. Spezielle Fragestellungen des Instituts zu vorhandenen Putzen und aufgetretenen Salzausblühungen wurden vor Ort mit einem erfahrenen Restaurator diskutiert. Diese Erkenntnisse sollten später in die Forschungsarbeit der Wissenschaftlicher mit einfließen. Im November 2008 wurde ein Antrag auf Erteilung der denkmalrechtlichen Erlaubnis an das Landratsamt Miesbach gestellt, der im selben Jahr noch bewilligt wurde und die Durchführung einiger vorbereitender Maßnahmen am Gebäude freigab. Erste Leistungsverzeichnisse zum Rückbau störender Einbauten im Erdgeschoss des Gebäudes sowie zur Behandlung bzw. Entfernung zerstörter Putzpartien im Innenbereich des Erdgeschosses wurden ausgeschrieben und entsprechende Angebote eingeholt. Parallel liefen regelmäßige Gespräche mit der Gemeinde Weyarn zur Detailierung eines Nutzungsvertrags über die ehemalige Ökonomie. Auch suchte die Gemeinde selbst stetig nach möglichen Nutzungen für das Obergeschoss des Gebäudes und die angrenzenden Anbauten.</p>

2009	<p>Bis Mitte des Jahres 2009 war das Fraunhofer IBP weiter beschäftigt mit der detaillierten Ausarbeitung der grundlegenden Heizungsversorgung des Gebäudes, des Messkonzepts der vier Messräume im Erdgeschoss und mit der Raumaufteilung sowie der Konzeptionierung des gesamten Zentrumsaufbaus. Außerdem stellte das Fraunhofer IBP auf diversen Messen und Veranstaltungen ihr Vorhaben und das vom BMWi geförderten Forschungsprojekt „Wandheizungssysteme“ vor. Mitte des Jahres ergaben sich dann allerdings innerpolitische und planerische Veränderungen in der Gemeinde Weyarn. Die Gemeinde zog einen privaten Investor für die Instandsetzung der ehemaligen Ökonomie hinzu, der ein starkes Interesse an der Umsetzung der Sanierung und die Zuführung unterschiedlicher Nutzungsbereiche innerhalb des Gebäudekomplexes zeigte. Durch dessen Einstieg jedoch wäre es den Wissenschaftlern des Fraunhofer IBP nicht im geringsten möglich gewesen, ihre Forschungstätigkeit direkt an diesem Baudenkmal in Verbindung mit unterschiedlichen Herangehensweisen und unter Verwendung verschiedener Materialien im Rahmen von bauphysikalischen Untersuchungen durchzuführen. Im August 2009 lag dann ein Gemeinderatsbeschluss vor, der den Zuspruch des einseitigen unwiderruflichen Ankaufsrechts für den Investor zum Thema hatte. Durch diese neue Situation bedingt wurden Alternativen für die Durchführung des Forschungsprojektes „Wandheizungssysteme“ und die Errichtung des Kompetenzzentrums geprüft. Es hatten sich jedoch in kürzester Zeit bereits geeignete Optionen sowohl in anderen Gemeinden, als auch auf dem Freigelände des Fraunhofer IBP Holzkirchen ergeben. Da für das Fraunhofer IBP die wissenschaftlichen Fragestellungen im Vordergrund standen, war das Vorhaben nicht an das Gebäude in Weyarn gebunden und deshalb konnte das bis dahin detailliert erarbeitete Konzept für die Umsetzung des Forschungsprojektes und des Zentrumsbetriebs mit der Etablierung von Ausstellungsflächen, Demonstration von Materialien und Technologien am Gebäude, seinem Beratungsangebot sowie Fort- und Weiterbildungsprogrammen sehr schnell auf andere Gebäude appliziert und übertragen werden. So fanden im Herbst 2009 erste Gespräche mit dem Kloster Benediktbeuern statt, das ein historisches, unsaniertes Gebäude, die Alte Schäfllerei, hatte und auf der Suche nach einer neuen Nutzung war.</p>
2010	<p>Neustart in Benediktbeuern</p> <p>Eine der Alternativen war ein denkmalgeschütztes Gebäude, die „Alte Schäfllerei“ des Klosters Benediktbeuern. Auch hier war das Gebäude in einem stark sanierungsbedürftigen Zustand und es bestand die Möglichkeit, dieses energetisch zu sanieren und denkmalgerecht instand zu setzen. Das Fraunhofer IBP stellte dem Orden der Salesianer Don Boscos, die das Kloster Benediktbeuern führen und Eigentümer der Anlage sind, das bis dahin erarbeitete Konzept zum Vorhaben vor und stieß auf starkes Interesse. Es kam wiederum zu Verhandlungen und einem gemeinsamen Erarbeiten eines Nutzungsvertrags für die Alte Schäfllerei, welcher schließlich im Juli 2010 vom Vorstand der Fraunhofer-Gesellschaft und dem Direktor der Salesianer Don Boscos feierlich unterzeichnet werden konnte. Das Fraunhofer IBP hat seither die Möglichkeit zur Nutzung für den Zeitraum von 10 Jahren mit einer Option auf Verlängerung von drei mal fünf zusätzlichen Jahren.</p> <p>Mit dem durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie geförderten Projekt „Innovative Wandheizungssysteme“ wird ein Pilotprojekt des Fraunhofer-Zentrums für energetische Altbausanierung und Denkmalpflege in der Alten Schäfllerei etabliert, in dem vier unterschiedliche Heizungssysteme auf ihre Energieeffizienz hin untersucht und ihre unterschiedliche Wirkungsweisen verglichen werden.</p> <p>In vier vergleichbar großen und ausgestatteten Messräumen wurden ab Winter 2010 die vier verschiedenen Heizungssysteme installiert und deren unterschiedliche Vor- und Nachteile auch hinsichtlich des jeweiligen Energiesparpotenzials über Messungen laufend erfasst und dargestellt. Der erste Schritt war dabei die Überprüfung der Vergleichbarkeit der Messräume durch sogenannte Nullmessungen, bei denen vier Räume im Erdgeschoß des Nordbaus der Alten Schäfllerei mit identischen Heizkörpern beheizt wurden, deren Energieverbrauch erfasst wurde.</p>

	<p>Voruntersuchungen am Freilandversuchsgelände des Fraunhofer IBP Holzkirchen</p> <p>Bevor die Messräume in Benediktbeuern eingerichtet wurden, hatte sich, vor allem aufgrund der sich aus dem Ortswechsel ergebenden zeitlichen Verzögerungen, das Fraunhofer IBP zusammen mit den Industriepartnern dazu entschlossen, Vorversuche bezüglich Wärmedurchgang, Oberflächentemperaturen, etc. an sechs verschiedenen Wandelementen in einem Versuchsaufbau auf dem Freigelände des Fraunhofer IBP Holzkirchen zu betreiben, auch im Vorgriff auf eine, im Projekt vorgesehene, spätere Optimierung des Systems. In einem Versuchsgebäude auf dem Freigelände, dem sogenannten Multifunktionsprüfstand (MUFUPS), wurden sechs unterschiedliche Wandaufbauten auf gleich großen Wandfeldern angebracht und mit entsprechender Messtechnik versehen. Zwei zusätzliche Felder dienten als Referenz und wurden nicht mit dem Heizungssystem ausgestattet.</p> <p>Somit waren dies ausschließlich Untersuchungen, die Unterschiede bezüglich Oberflächentemperatur und Wärmedurchgang bei verschiedenen Varianten des innovativen Wandheizungssystems darlegen sollten. Die Gegenüberstellung mit den anderen drei Wandheizungssystemen wurde ab den Wintermonaten 2011/2012 vor Ort in Benediktbeuern unter realen Bedingungen im historischen Bestand realisiert.</p>
2011	<p>Im Jahr 2011 wurden die unterschiedlichen Heizungssysteme in 4 Räumen im Erdgeschoß der Alten Schäferei in Benediktbeuern eingebaut. Parallel wurden verschiedene Maßnahmen getroffen, um die Vergleichbarkeit der Messräume untereinander zu verbessern. Dazu gehören die Dämmung angrenzender Wände zur Jugendherberge und zum Treppenhaus. Die Dämmung des Fußbodens mit Glasschaumschotter, die Dämmung der Geschoßdecke, um Wärmeverluste durch diese Bauteile zu reduzieren. Das Gebäude der Alten Schäferei wurde an die Nahwärmeversorgung des Klosters angeschlossen und ein umfangreicher Heizungsverteiler mit entsprechender Messtechnik sowie entsprechender Gebäudeleittechnik wurde für das Projekt installiert. Im Sommer 2011 wurde eine Bauteiltemperierung nach Großschmidt, ein Wandflächenheizungssystem mit Lehmbauplatten und das innovative System mit Entkopplungsmatte und parallel durchströmter Wandheizung in 3 Messräumen eingebaut. Die Heizungen wurden im Herbst 2011 in Betrieb genommen. Der vierte Raum sollte mit einem strahlungsoptimierten Heizkörper ausgestattet werden, dessen Lieferung sich aber bis in das folgende Jahr verzögerte.</p>
2012	<p>Aufgrund des Umzugs von Weyarn nach Benediktbeuern haben sich auch die Einbaumaßnahmen verzögert. So konnte das letzte Heizungssystem erst Mitte Februar 2012 eingebaut werden. Aus diesen Gründen konnte die Messperiode Winter 2011/12 nur zur Einstellung der Regelungsparameter genutzt werden, nutzbare längere Messphasen mit konstanten Bedingungen und kalten Außentemperaturen konnten nicht ermittelt werden.</p> <p>Zusätzlich wurden auf Grundlage der ersten Messungen Anpassungen des Messkonzeptes vorgenommen. Die Bauteiltemperierung erreichte in diesem Winter nicht die Zieltemperatur 20 °C, da im Sockelbereich nur eine Rohrschleife mit Vor- und Rücklauf eingebaut war. Hier wurde eine Veränderung des Systems in Form einer Erweiterung mit einer zweiten Schleife auf Brüstungshöhe notwendig.</p> <p>Nach den ersten Erfahrungen im Winter 2011 / 2012 wurden umfangreiche Verbesserungen an dem experimentellen Aufbau in den vier Räumen durchgeführt. Dies umfasste:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Reversibler Einbau dichter Türen zum Treppenhaus - Beheizung der Wand zum Treppenhaus von außen mit einem Flächenheizungssystem - Einbau der geregelten Lüftung für alle vier Räume - Verschattung der Außenwände durch ein Baugerüst mit Plane <p>Zudem wurde die Entscheidung getroffen, dass die Räume nicht untereinander verglichen werden können, sondern, dass jeder Raum mit sich selbst verglichen wird durch den Einsatz eines einheitlichen Referenzsystems, hier elektrische Heizkörper mit Erfassung der Endenergie.</p>

2013	<p>In der zweiten Messperiode Winter 2012/13 konnte mit Hilfe der zusätzlichen Sensoren sowie der neu eingestellten Regelung der Heizsysteme eine konstante Regelung aller Messräume auf 20°C mit den eingebauten Heizungen erreicht werden. Zusätzlich dazu wurden ab Ende Januar Behaglichkeitsmessungen durchgeführt. Dabei wurden vor allem der PMV nach ISO 7730, also die vorausgesagte mittlere Bewertung des Raumes und verschiedene lokale Behaglichkeitskriterien untersucht. Im Februar 2013 wurden dann die Messräume auf den elektrischen Heizbetrieb umgestellt. Auch hier wurde parallel zu den energetischen Messungen Behaglichkeitsmessungen als Vergleichswerte durchgeführt.</p> <p>Bei der Auswertung der elektrischen Leistungsmessung fiel eine Unregelmäßigkeit bei den Messdaten auf. Eine Fehleranalyse ergab ein Schnittstellenproblem zwischen IMEDAS und der Erfassung der elektrischen Leistung. Aufgrund der Komplexität des Problems war eine nachträgliche Wiederherstellung der Daten nicht mehr möglich. Auch eine schnelle, kostengünstige Lösung zur Behebung des Problems konnte nicht gefunden werden. Aus diesem Grund wurde beschlossen, die elektrische Leistungsmessung nun an die Gebäudeautomation anzuschließen. Dazu wurden Thyristorsteller installiert, die über die Gebäudeautomation gesteuert werden und in jedem Messraum je einen elektrischen Heizkörper regeln. An den Thyristorstellern wurde eine Stromstärkemessung installiert, aus der man die elektrische Leistung mittels Kalibrierkurven errechnen kann. Diese Maßnahmen konnten erst im Februar 2013 durchgeführt werden. Deshalb war eine energetische Bilanzierung der unterschiedlichen Heizsysteme zu diesem Zeitpunkt nicht möglich.</p>
2014	<p>In der Messperiode Winter 2013/14 funktionierte die Regelung der Messräume gut. Bei der Aufzeichnung der Messdaten kam es zu Messausfällen einzelner Sensoren sowie zu einem Ausfall eines kompletten Datenloggers aufgrund eines Hersteller-Updates. Dieser Ausfall trat Anfang Januar 2014 auf, konnte aber noch im selben Monat behoben werden</p> <p>Die Aufzeichnung der elektrischen Vergleichsmessung funktionierte nach Optimierung der Einstellungen zuverlässig und wurde durch eine Redundanzmessung mittels eines kalibrierten Leistungsmessgerätes kontrolliert.</p> <p>Nach Abschluss der Messungen wurden die Messdaten umfangreich überprüft und vergleichbare Zeiträume konnten erstmals ausgewertet.</p>

4 Kurzdarstellung des wissenschaftlich-technischen Standes

Im Folgenden wird kurz der wissenschaftlich-technische Stand zusammengefasst. Dabei wird insbesondere das im Denkmalbereich häufig eingesetzte System der Bauteiltemperierung beleuchtet.

4.1 Forschungsstand – Energetische Bewertung der Bauteiltemperierung

Die in der Denkmalpflege eingesetzte Variante der Bauteiltemperierung besteht meist aus sehr einfachen Systemen mit nachträglich in oder vor die Innenseiten der Außenwände gesetzten Kupferrohren, die an der Sockelzone direkt das Bauteil und damit in einem gewissen Maß die Raumschale beheizen.

Vehementer Vertreter der Bauteiltemperierung ist Henning Großschmidt, der durch seinen unermüdlichen Einsatz in weit über 100 Gebäuden den Einbau der Bauteiltemperierung erwirkt hat. Dabei zeichnet sich das „System Großschmidt“ dadurch aus, das kontinuierlich auch außerhalb der Heizperiode mit hoher Vorlauftemperatur von 50-60 °C gefahren wird. Trotzdem handelt es sich laut Großschmidt um eine äußerst Energie sparende Art der Gebäudehei-

zung, wobei als Begründung die mit der Trocknung der Wand einhergehende Senkung der Wärmeleitfähigkeit angeführt wird. Ein weiterer Vorteil dieser Art der Bauteiltemperierung ist laut Großes Schmidt der „Coanda-Effekt“, der zu einer äußerst gleichmäßigen Temperaturverteilung an den Wandoberflächen führt.

Eine ausführliche Beschreibung dieses Systems und der Wirkungsweise findet sich bei [1]. Üblicherweise wird auf eine Kombination mit Wärmedämmung verzichtet, da diese als überflüssig betrachtet wird. Energetische Vergleiche mit konventionellen Heizungssystemen fallen sehr unterschiedlich aus.

Ein Vergleich zwischen Räumen mit Temperierung und konventioneller Heizung wurde in Schweden durch den Ingenieur Jan Holmberg im Rahmen des Projektes EUREKA 1383 PREVENT durchgeführt. Dabei wurden in zwei ähnlichen Pavillons von Schloss Solsta in Schweden unterschiedliche Heizungssysteme eingebaut und messtechnisch untersucht. Die Vergleichbarkeit der Ergebnisse ist allerdings erschwert, da bei diesem Fall die unterschiedlichen nach Westen ausgerichteten Fensterflächen, die im Fall des Gebäudes mit Bauteiltemperierung doppelt so groß sind wie im Vergleichsgebäude mit konventioneller Beheizung, in den Berechnungen der Verbräuche nicht berücksichtigt wurden. "The conclusion was that the tempering system [Bauteiltemperierung] was functioning as well as the conventional heating system [Heizkörper]. The tempering system had an energy use of 20 % less than the conventional heating system. [2]

In der Kartause Mauerbach wurden durch das österreichische Bundesdenkmalamt schon einmal Untersuchungen zu Auswirkungen unterschiedlicher Heizungssysteme in historischer Gebäudesubstanz [3]. Allerdings gestaltete sich auch hier dieser Vergleich schwierig „auf Grund der vielen durch Bauarbeiten und Komponentenausfall verursachten Messprobleme und Betriebsunterbrechungen“ (S. 269) „Der Gesamtenergieverbrauch der Temperierzelle nach knapp 5 Monaten systemgemäßen Betrieb, der sich bei fortschreitender Hüllflächentemperierung erfahrungsgemäß verringert hätte, entsprach dem der Zellen mit gleicher Raumtemperatur (Kachelofen, Heizkörper, Fancoil)“ (S. 314). Untersucht wurden in Mauerbach vor allem konservatorische Aspekte, wie das Verhalten eines Holztafelbildes vor einer Wand in den jeweils unterschiedlich beheizten Räumen. Aspekte des Komforts blieben weitestgehend unberücksichtigt. So bezieht sich die Vergleichbarkeit auch allein auf die Lufttemperatur in den Räumen und nicht auf die Strahlungstemperatur.

4.2 Eigene Untersuchungen

In den Jahren 1986-1991 wurden mit Unterstützung des Forschungsministeriums Untersuchungen in rund 100 Kirchen durch das Fraunhofer-Institut für Bauphysik durchgeführt [4] Künzel, Helmut; Holz, Dieter: Bauphysikalische Untersuchungen in unbeheizten Gebäuden alter Bauart, IRB Nr. T 2396, Holzkirchen 1991[4]. In der Folge wurden immer wieder Heizungssysteme in historischen Gebäuden und Kirchen untersucht.

Die St. Rupertus Kapelle in Bad Reichenhall ist hinsichtlich der Geschichte, des Baustils und der Wandmalereien ein bedeutendes Bauwerk. Im Rahmen der baulichen Sanierung wurden eine Fußbodenheizung und eine Bauteiltemperierung installiert. Letztere verläuft in der Form eines durchgehenden Warmwasser-Heizrohres im Eckbereich Fußboden/Außenwand und um die tragenden Stützen im Innern der Kapelle zur Temperierung dieser als Wärmebrücken wirkenden Bereiche. Wandtemperierung und Fußbodenheizung sind getrennte Heizkreisläufe, wobei erstere konstant und ganzjährig betrieben wird und letztere nur im Winter. An einigen Stellen wurden Konvektor-Heizkörper angebracht, die mit der Fußbodenheizung gekoppelt sind.

Die Auswirkungen der Beheizung der Kapelle, die mehr als eine gezielte Raumtemperierung zu bezeichnen ist, kann man am besten durch einen Vergleich der raumklimatischen Verhältnisse vor und nach der Renovierung bzw. dem Einbau der Heizung beurteilen. Vor der Sanierung ist die Raumlufttemperatur nur geringfügig höher als die Außenlufttemperatur, wegen der zeitweiligen Besonnung im Mittel um 0,7 K. Dementsprechend ist die relative Raumluftfeuchte um etwa 5 Prozentpunkte niedriger als die relative Außenluftfeuchte. Durch die Beheizung nach der Sanierung ist die Raumlufttemperatur im Mittel um etwa 8 K höher als die Außenlufttemperatur und die relative Luftfeuchte innen um 30 Prozentpunkte niedriger als außen. Diese dosierte Energiezufuhr verbessert das Raumklima und vermeidet Schädigungen an gefährdeten Bauteilbereichen infolge immer wiederkehrender Befeuchtung durch Tauwasserbildung und Trocknung. Durch die relativ gleichmäßige Luftfeuchte über das Jahr hinweg im Bereich zwischen etwa 70 % und 50 %, in dem Quell- und Schwindunterschiede der meisten Stoffe gering sind, werden hygrysch bedingte Schäden vermieden. Die Beheizung trägt daher wesentlich zur Erhaltung des Bauwerks bei (die Untersuchungen wurden u. a. veröffentlicht in [5]).

In der Renatuskapelle in Lustheim wurde wegen langer Frostperioden im Winter und Kondensatproblemen durch die hohe Feuchte im Inneren mit der Gesamtanierung Ende 2002 eine Bauteiltemperierung eingebaut. Die Ziele, die damit verfolgt wurden, waren das Anheben der Temperatur im Winter, um Frost zu vermeiden, und die Reduzierung der relativen Luftfeuchte während der warmen Jahreszeit, um die Kondensation von Feuchte an kalten Wandoberflächen zu verhindern. Beides wurde durch kontinuierliches Beheizen des Wandsockels mit zwei unter Putz liegenden Heizrohren erreicht. Die Temperierung in der Renatuskapelle dient dabei weniger dem Beheizen des Raumes für den Komfort von Besuchern, sondern ist vielmehr als konservatorische Maßnahme zum Erhalt der Bausubstanz und der Kunstwerke zu verstehen. Insgesamt wurde durch die Sanierung und die Wandtemperierung in der Renatuskapelle eine erhebliche Verbesserung des Raumklimas erreicht. Allerdings war ein Monitoring zur Verbesserung der Heizungsregelung notwendig, um das Klima einzustellen und Schäden an den Kunstwerken durch zu geringe relative Luftfeuchte in Zukunft zu vermeiden [6].

Die unterschiedlichen Effekte, die mit dem System der „Bauteiltemperierung nach Großesmidt“ in Verbindung gebracht werden, wie auch Erfahrungen

aus Baupraxis und Betrieb, beleuchtet Künzel [7] in Bezugnahme auf eine Diplomarbeit an der Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig aus dem Jahr 2005 von Thomas Löther [8], derzeit Mitarbeiter am IDK in Dresden, über „Untersuchungen zur Temperierung historischer Gebäude“:

„In seiner Diplomarbeit hat Thomas Löther zahlreiche Beispiele von Temperierungen zusammengetragen und bewertet, die aus rein konservatorischen Gründen, aber zum Teil auch unter dem Gesichtspunkt der Beheizung, ausgeführt worden sind. Es handelt sich vorwiegend um Kirchen, aber auch um Schlösser und Museen und in einigen Fällen um Wohnhäuser [...]. Zur Raumtemperierung in Kirchen, Schlössern und Museen auf niedrigere Temperaturen als bei wohnbauähnlicher Nutzung wurden meist mehrere Rohrschleifen an den Außenwänden bzw. zusätzliche Heizrohre zwischen den Fenstern verlegt. Damit wird eine Erwärmung erreicht, welche nach den Ermittlungen den jeweiligen Ansprüchen an das Raumklima im Allgemeinen gerecht wird. Hinsichtlich des Heizenergieverbrauchs liegen in den überprüften Fällen keine gesicherten Werte vor, da es sich meist um den Ersteinbau einer Heizanlage handelt und damit Vergleichsmöglichkeiten fehlen, oder Vergleiche mit anderen Gebäuden wegen der Einzigartigkeit des einzelnen Bauobjektes keine zulässigen Aussagen ermöglichen. Gleichwohl werden vielfach die Heizkosten als hoch bezeichnet. In zwei Fällen wurde die Temperierung deshalb wieder abgeschaltet; in anderen Fällen wird über den Einsatz von Solarenergie nachgedacht.“

Weiterhin heißt es zu Raumheizung und Heizenergieverbrauch: „Am besten sind kompetente Aussagen über Raumklima und Energieverbrauch aus den Erfahrungen in Wohnungen zu gewinnen. Löther berichtet über den Umbau eines Teils einer historischen Mühlenanlage in Allstedt (Sachsen-Anhalt) zu Wohnzwecken, wobei auf Anraten des zuständigen Landesdenkmalamtes eine Temperieranlage eingebaut worden ist. Rohrschleifen zur Temperierung sind im Sockelbereich, im Fußboden und neben jedem Fenster installiert worden. Der Bauherr klagt über hohe Heizverbrauchswerte (184 kWh/m²a), er kann nicht bestätigen, dass sich diese mit der Wandtrocknung reduziert.“

Künzel fasst die Ergebnisse wie folgt zusammen: „Handelt es sich überwiegend um eine Bauteiltemperierung zur Vermeidung von Tauwasser, Algenbildung und Modergeruch, ist dies positiv zu bewerten und dürfte der Hauptgrund zur Verbreitung dieses Systems sein. Eine Erweiterung der Temperierung zur Wandheizung ohne zusätzliche Außendämmung ist aber wegen erhöhter Transmissionswärmeverluste eindeutig abzulehnen. Der Einsatz der Temperierung wird vor allem begrenzt durch die thermische Speicherfähigkeit eines Gebäudes und die Größe eines lokalen Schadbildes.“

Die Literaturrezeption von Löther [8] hat gezeigt, dass die einschlägige Meinung in Kreisen der Befürworter von Temperierung, eine intensive Weiterforschung zu diesem Thema sei im Grunde genommen überflüssig, nicht bestätigt werden kann. Denn besonders die Literaturrecherche verdeutlichte die gegenwärtige Situation, für die ein Forschungsdefizit charakteristisch ist. Das Spektrum für weitere Untersuchungen muss so gestaltet sein, dass für die Temperie-

zung eine verbindliche Richtlinie in naher Zukunft geschaffen werden kann. Forschungsfragen für die Zukunft müssen u.a. zum Ziel haben, eine Datenbank für installierte Temperieranlagen anzulegen, die einen Vergleich untereinander in Hinblick auf Langzeiterfahrungen, Schadensfreiheit und vor allem auch Energieverbrauch ermöglicht. Dem sind außerdem noch spezielle Untersuchungen zum Einsatz der Temperierung in Wohngebäuden hinzuzufügen.

4.3 Energieeinsparung durch Wandtemperiersysteme

Ein weiterer wichtiger Sekundäreffekt der Temperierung stellt laut den Befürwortern des Systems neben der Bauteiltrocknung die erhebliche Energieeinsparung und Heizkostensenkung dar. So soll sich der Wärmebedarf in der Heizperiode verringern, da durch eine Temperierung auch in den Sommermonaten eine nachhaltige „U-Wertverbesserung“ erreicht wird, so dass der Gesamtverbrauch in der Regel unter dem von konventionellen und nur in der Heizperiode beheizten Massivbauten liegt [Vgl. 8, S. 328]. Als Beweis für die U – Wertverbesserung gibt Großschmidt folgende Werte für eine temperierte Wand an: So soll eine 1 % geringere Materialfeuchte die Wärmeleitfähigkeit um ca. 10 % verringern. [Vgl. 6, S. 11] Als Beleg für die positive Auswirkung der Temperierung auf den U – Wert einer Außenwand verweist das BLfD auf Thermografie Aufnahmen.

Eicke – Henning äußert sich kritisch zur Aussage des BLfD, das bei einer Verringerung der Wandfeuchte um 1 % eine Reduktion der Wärmeleistung um 10 % [Vgl. 6, S. 11] erreicht werden kann. Er führt an, dass solche grundsätzlichen Aussagen nur stoffspezifisch getroffen werden und somit die vorgegebenen 10 % nicht für alle Baustoffe übernommen werden können [Vgl. 4, S. 96].

Allein durch die Temperierung der Gebäudehülle und Abdichtung der Alt – Doppelfenster soll es zu einer Verringerung des Jahresheizwärmebedarfes von Wohnbauten in Massivbauweise kommen. [Vgl. 8, S. 328] Um diesen Effekt zu erzielen, sollte in der ersten Heizperiode der Energieaufwand der Temperierung gesteigert werden, um die Trocknung der gesamten Gebäudehülle zu erreichen. Je nach Masse und Feuchtegrad der Bausubstanz dauert diese erste Heizphase ein oder wenige Jahre. Danach wird trotz Sommertemperierung der Heizenergiebedarf geringer gegenüber herkömmlicher Beheizung während der Heizperiode. [Vgl. 8, S. 326, 336] Den niedrigen Wärmebedarf nach Trocknung des Mauerwerks und die damit verbundene Optimierung des Speichervermögens der Außenwände begründet das BLfD ebenso mit der geringen Raumlufttemperatur. Diese entspricht im Gegensatz zur konventionellen Heizung der Temperatur der Wandoberfläche. Dadurch kann es bei diesen geringen Raumlufttemperaturen kaum zum Entweichen von warmer Luft durch die Zimmerdecke oder in das Treppenhaus kommen. Die durch Undichtigkeiten in der Gebäudehülle entweichenden warmen Luftmengen sind klein und ein „Durchzug“ beim Lüften bleibt aus. [Vgl. 8, S. 336].

Kalmer [9] hat theoretische und praktische Vergleiche zwischen Temperieranlagen und konventionellen Heizanlagen gezogen. Bei den theoretischen Untersu-

chungen stellte Kalmer fest, dass eine Temperierung in der Regel keine wirtschaftlichen Vorteile bringt, sondern je nach Ausführungsart unterschiedlich hohe Mehrkosten verursacht. Eine Ausnahme sieht er aber bei historischen Gebäuden, die mit einem einfachen Temperiersystem ausgestattet wurden. Bei Gebäuden mit einem hohen Wärmespeichervermögen des Mauerwerks stellte sich bei entsprechender Mauerstärke ein niedriger Wärmedurchgangswert ein und damit verbunden ein niedriger Wärmeverlust. Dies bestätigen Versuche in einem Tiefkeller im Schloss Trebsen [10].

Bei seiner Untersuchung verglich Kalmer 10 Temperieranlagen mit 12 konventionellen Wärmeerzeugern, indem er Fragebögen an die Nutzer der Temperieranlagen verschickte und auf die Datenbank der Energieverbrauchskontrolle des Landesbauamtes München zurückgriff. Kalmer stellte fest, dass die Temperieranlage bezüglich der Investitionskosten mit den konventionellen Heizsystemen mithalten konnte, ohne jedoch einen entscheidenden Kostenvorteil zu erzielen. Die Betriebskosten der Temperierung sind in der Regel höher als bei konventionellen Systemen. Abschließend führt Kalmer an, dass bei der Temperierung – von Ausnahmen abgesehen – höhere Kosten entstehen [Vgl. 9, S. 30]. Interessant wird dieses Ergebnis im Zusammenhang mit einer Aussage des BLfD von 1992, in der es eine Energieeinsparung in Museen von bis zu 60 % bezogen auf die Gesamtenergieleistung anführt [Vgl. 6, S. 25]. Dieses Einsparpotenzial konnte Kalmer, trotz Berücksichtigung vieler Faktoren, in seiner Arbeit nicht bestätigen [Vgl. 9, S. 30]. Der Umstand, dass die Arbeit von Kalmer nur Museen und historische Bauwerke, aber keine Wohngebäude berücksichtigt, sollte beachtet werden.

Über Wohnhäuser können im Allgemeinen kaum Aussagen getroffen werden, da es wenige Veröffentlichungen über eingebaute Temperieranlagen in Wohngebäuden gibt. In einer Veröffentlichung von 1996 [Vgl. 7, S. 20] vergleicht das BLfD den ihrer Meinung nach eintretenden Jahresheizwärmebedarf im Wohnfall mit Werten der damals gültigen Wärmeschutzverordnung. Man gelangte zu der Feststellung, dass die Temperierung trotz ganzjähriger Teilbeheizung und Beheizung des Gesamtvolumens im Winter Werte von 40 – 80 kWh/m²a erreicht, im Gegensatz zu den Angaben der damals gültigen Wärmeschutzverordnung, die Werte von 54 – 100 kWh/m² im Wohnfall angibt. Angaben zu der Art des Gebäudes, ob es sich um freistehende Häuser oder Reihenhäuser handelt, fehlen in ihrer Darlegung. Ebenso unklar bleibt, wie das BLfD zu seinen Aussagen gelangt ist und ob es sich um Messwerte an einem bestimmten Gebäude handelt oder um theoretische Rechenwerte.

Einige Veröffentlichungen zur Energieeinsparung durch eine Temperierung beschäftigen sich mit konkreten Gebäuden, so wird u.a. ein Versuch in der Kartause Mauerbach beschrieben, bei dem sechs unterschiedliche Heizsysteme miteinander verglichen worden. Dazu baute man diese Systeme in sechs baugleiche Mönchszellen ein und führte anschließend Messungen über einen Zeitraum von drei Jahren durch. Erst durch den Einbau eines zusätzlichen Heizkabels am Sockel konnte im Raum mit der Temperierung die geforderte Raumtemperatur erreicht und gehalten werden. Die von der BLfD propagierten 20 % Energieeinsparung der Temperieranlage gegenüber anderen Heizsystemen konnte in diesem Versuch ebenfalls nicht bewiesen werden.

Die von vielen Kritikern angeführten Transmissionswärmeverluste durch Heizrohre in der Wand kann man nicht auf die gesamte Wandfläche übertragen. Sie ist nur in dem von dem Rohr erwärmten Bereich messbar, bei einer Messung von Seele etwa bis 1 m Wandhöhe. Somit muss man zur Berechnung der Transmissionswärmeverluste einer Temperieranlage nur diesen ca. einen Meter breiten Wandstreifen heranziehen [Vgl. 21, S. 19].

Auch im Gymnasium Hattingen verglich man eine Temperierung sowie eine herkömmliche Konvektor Heizung miteinander. In diesem Fall kam es zu einer Einsparung der Temperierung von 20 % gegenüber der Konvektor Heizung [Vgl. 19, S. 209 ff]. Seitdem gilt jenes Projekt als Paradebeispiel. Zu beachten bleibt jedoch, dass hier weit mehr Heizrohre in die Wand verlegt worden, als vom BLfD als Minimalvariante vorgeschlagen. Die Ausführung im Gymnasium Hattingen nähert sich sehr stark einer herkömmlichen Wandheizung an.

Im „Regensburger Salzstadel“ untersuchte Eicke – Hennig die Angaben des BLfD bezüglich der Energieausgaben. Er gelangte zu anderen Resultaten, da er das Gesamtenergieangebot des Stadels nach mehrjähriger Laufzeit prüfte. Zu den Wärmequellen gehören neben den Temperierleisten (ca. 500 – 600 m) noch die sich im Gebäude befindenden zwei Großküchen, die Heizbeträge der Lüftungsanlage und ca. 400 Halogenstrahler. Auch dieses oft als positives Beispiel genannte Objekt zeigt bei genauer Betrachtung viele Schwächen in der Planung und Auslegung des Gesamtkonzeptes der Haustechnik [Vgl. 4, S. 89].

Thermografie Aufnahmen an Bauwerken mit Wandtemperiersystemen, die durch das IDK in den letzten Jahren bearbeitet worden, zeigen oft einen hohen Wärmeverlust im Bereich der Temperierung an den Wandaußenseiten. Hier sind die Untersuchungen an den Objekten Schloss Oranienbaum und Schloss Freital-Burgk als auch Thermografieaufnahmen an einem Wohnhaus in Allstedt zu nennen.

5 Vorhabensziele, Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

Das Projekt „Innovative Wandheizungssysteme“ hat das Ziel, Niedertemperatursysteme zur Flächenheizung mit Hochtemperatursystemen mit erhöhtem Strahlungsanteil mit konventioneller Raumbeheizung durch Konvektoren-Heizkörper zu vergleichen. Dadurch sollen Planer und Bauherren bei der Gebäudesanierung eine fundiertere Grundlage für die Entscheidung für energiesparende Systeme und eine höhere Planungssicherheit erhalten.

Hier setzt das vorliegende Vorhaben an, indem Niedertemperaturflächenheizungen und Strahlungsheizungen mit hoher Vorlauftemperatur energetisch, exergetisch und in Hinblick auf Komfort und Vermeidung von Bauschäden hin verglichen werden

Die Umsetzung des Vorhabens erfolgte im Fraunhofer-Zentrum für energetische Altbausanierung und Denkmalpflege Benediktbeuern in der Alten Schäfllerei (Bild 1). Das auf das Jahr 1760 datierte Gebäude verfügt im sog. Nordbau über vier Räume von ähnlicher Größe im Erdgeschoß. Diese Räume wurden für die Experimente ausgewählt, entsprechend hergerichtet und ausgestattet.



Bild 1:

Ansichten der Alten Schäfllerei in Benediktbeuern. Das Bild oben links zeigt den Kopfbau und das Bild oben rechts die Ostseite der Messräume. Ansicht der Messräume von Westen im Bild unten, mittlerer Gebäudeteil.

5.1 Hintergrund und Umsetzung der Versuche

In diesem Kapitel werden die Hintergründe für die Auswahl der verwendeten Systeme beschrieben, die Planungsentscheidungen und die Vorversuche in der Freilandversuchsstelle Holzkirchen, die wegen Verzögerungen in der Umsetzung des Projektes notwendig waren.

5.1.1 Definition und Beschreibung der verwendeten Systeme

Im Folgenden werden die grundlegenden Konzepte sowie die untersuchten Systeme dargestellt.

Heizungssysteme nach dem „LowEx“-Konzept

Energie ist eine quantitative Größe, welche beschreibt, wie viel Arbeit zu verrichten bzw. Wärme bereitgestellt werden muss, um beispielsweise ein Haushaltsgerät zu betreiben oder ein Gebäude zu beheizen. Die Exergie ist hingegen eine qualitative Größe, welche das Niveau der aufzuwendenden Energie beschreibt und kann somit als Qualitätsmaßstab verstanden werden.

Grundsätzlich lässt sich Energie in (physikalische) Arbeit und Wärme klassifizieren. Physikalische Arbeit (wie beispielsweise elektrische oder mechanische Arbeit) ist dabei die qualitativ hochwertigste Energieform, da sie vollständig in andere Energieformen umwandelbar ist. Wärme, welche ebenfalls eine Energieform darstellt, kann hingegen unterschiedliche Qualitätsniveaus in Anhängigkeit von der Temperatur erreichen. Jedoch kann Wärme nicht unbegrenzt in andere Energieformen umgewandelt werden, ist daher niederqualitativ. Somit kann Exergie als die maximale theoretische Arbeit definiert werden.

Das Phänomen unterschiedlich auftretender exergetischer Qualitätsniveaus ist besonders im Gebäudebereich sehr ausgeprägt. Im Fall eines hocheffizienten Heizungskessels, der für die Niedrigtemperaturversorgung in Gebäuden (20 °C) genutzt wird, geht das gesamte Potential des Brennstoffs, Arbeit zu verrichten (Exergie), nahezu vollständig im Verbrennungsprozess verloren. Dieser physikalische Effekt ist dadurch zu erklären, dass in einem Brennstoffkessel Temperaturen erreicht werden, welche auch im Rahmen hochexergetischer Anwendungen benötigt werden. Diese „Hochtemperaturanwendungen“, wie beispielsweise ein Kraftwerksprozess, dienen der Herstellung hochexergetischer Energieformen wie elektrischer Energie.

Auf dieser Überlegung basiert das LowExergie (= Niedrigexergie) bzw. „LowEx“-Konzept. Das „LowEx“-Konzept (Niedrigexergiekonzept) hat das Ziel, das Quantitäts- und Qualitätsniveau an das Angebot und die Nachfrage anzupassen. Eine gute Anpassung im Bereich der Quantität führt zu Energieeinsparungen, im Bereich der Qualität zusätzlich zu einer sensibleren Nutzung von exergetisch passenden Energiequellen, z.B. thermischen Solaranlagen, Abwärme aus Industrieprozessen und die Nutzung von Umweltwärme. [11].

Definition „LowEx“-Systeme

Als „LowEx“-Systeme (Niedrigexergiesysteme) werden Heiz- und Kühlsysteme definiert, die die Nutzung von niedrigqualitativer Energie als Energiequelle ermöglichen. Dabei liegt der Fokus vorrangig auf Raumheizungsanwendungen. „LowEx“-Systeme für hocheffiziente Gebäude sind (Heiz- und Kühl-) Systeme, die in der Lage sind, ein Höchstmaß an thermischem Komfort bei minimalem Einsatz von Exergie zu bieten sowie eine vermehrte Nutzung der Energie aus natürlichen Quellen zu schaffen und somit die beste Anpassung des Qualitätsniveaus der Energieversorgung an den Energiebedarf darzustellen.

Hauptziel der Nutzung dieser Systeme ist es, einen bestmöglichen Einsatz von lokalen regenerativen Quellen (z.B. Solarwärme, Erdwärme) und Abfallenergien (z.B. Abwärme aus Industrieprozessen) zu ermöglichen, bevor auf fossile Energiequellen zurückgegriffen wird. In der Praxis bedeutet dies, dass Systeme optimaler Weise Heiz- oder Kühlenergie mit einer Temperatur nahe der Raumtemperatur bereitstellen.

Im Rahmen des Projektes sollen die Möglichkeiten, niedrigexergetische Technologien im Gebäudebestand einzusetzen, mit Hilfe von dynamischen Simulationen untersucht werden. Hierfür werden die Auswirkungen der schon vorhandenen Versorgungssysteme, die vorrangig erneuerbare Energien nutzen, auf den Exergiebedarf des Gebäudes berechnet und ggf. Optimierungsstrategien mit sogenannten "LowEx"-Systemen entwickelt. Die Frage, welche Raumtemperaturen mit den eingesetzten Systemen erreicht werden, ist für die exergetische Betrachtung zentral.

Energieversorgung

Die Energiezentrale im Kloster Benediktbeuern (Haus 10 im Lageplan, Bild 2) wurde im August 2001 vom Trägerbund des Zentrums für Umwelt und Kultur e.V. erbaut. Für die Wärmeversorgung des Klosters sind hohe Vorlauftemperaturen von 80-90% °C erforderlich, da die bestehenden Heizkreisläufe in den verschiedenen Bereichen des Klosters darauf ausgerichtet sind. Ebenso ist eine Versorgung mit Brauchwarmwasser zu gewährleisten. Um den Bedarf an hohen Vorlauftemperaturen mit erneuerbaren Energien decken zu können, fiel hierbei die Wahl auf die Biomasseverbrennung in Form eines Hackschnitzel-Kessels, der den Wärmegrundlastbedarf deckt. Zusätzlich sind zwei Heizöl-Kessel installiert, die als Reserve dienen. Die Bereitstellung des Brauchwarmwassers erfolgt mit Hilfe von Solarenergie (Sonnenkollektoren) sowie Wärmepumpen. Da das Kloster Benediktbeuern in einer relativ sonnenreichen Region liegt, ermöglicht dies auch einen sinnvollen Einsatz einer Photovoltaik-Anlage auf einem schwer einsehbaren Klosterdach. Die ursprünglich bereits im Untergeschoss des Aktionszentrums installierte Wasserkraftanlage wurde aus schallschutztechnischen Gründen in die Energiezentrale verlegt und dient zur Stromerzeugung.

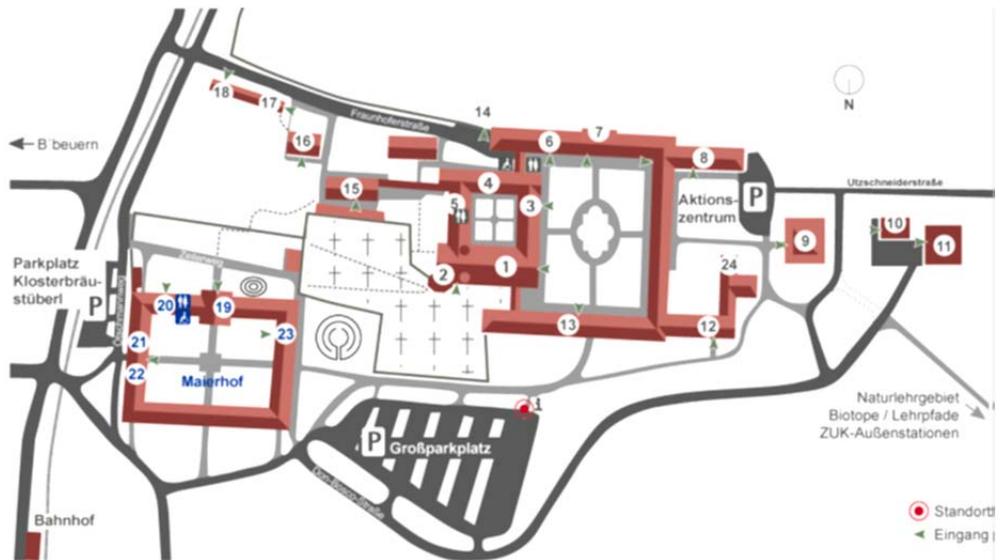


Bild 2:
Lageplan des Klosters Benediktbeuern [12]

Seitdem versorgt die Energiezentrale den Klosterkomplex und Meierhof mit Wärme und Strom aus regenerativen Quellen. Der jährliche Strom- und Wärmebedarf ist Tabelle 2 zu entnehmen:

Tabelle 2:
Energieverbräuche des Klosters und deren Bereitstellung durch die erneuerbaren Energieträger. Zuordnung der einzelnen Anlagen an der Energiebereitstellung.

Verbräuche	Bereitstellung
Gesamter Wärmebedarf = ca. 4.330 MWh/a	Gesamte Wärmeabgabe der Wärmeerzeugung = ca. 4.510 MWh/a Hackschnitzel-Kesselanlage = 92 % Pflanzenöl-BHKW = 7 % Solare Brauchwasser-Anlage und Wärmepumpen = 1 %
Stromverbrauch = ca. 850 MWh/a	Gesamt-Strom aus regenerativen Energiequellen = ca. 603 MWh/a Wasserkraft-Anlage = 74 % Pflanzenöl-BHKW = 25 % Photovoltaik-Anlage = 1 %

Der Strom und die Wärme werden aus einem Energiemix von verschiedenen erneuerbaren Energieträgern (Biomasse, Wasserkraft, Sonne, Umgebungswärme) erzeugt, die 80 % des Gesamt-Energiebedarfs (90 % der benötigten Wärme und 40 % des Stroms) im Kloster decken (siehe Tabelle 2 bis Tabelle 4). Der zusätzliche Stromverbrauch wird mit Hilfe des lokalen Stromnetzes bereitgestellt.

Tabelle 3:

Wärme- und Stromversorgungsanlagen, Nennwärmeleistungen, Wirkungsgrade und Anwendungen.

Anlage	Nennwärmeleistung	Wirkungsgrad	Anwendung
Wärme			
Holzhackschnitzel-Kesselanlage	900 kW	ca. 80 %	Grundlastdeckung Wärme
Solare Brauchwasseranlage (Solarthermie) – 60 m ²		ca. 64 %	Brauchwassererwärmung
2 Kompakt-Luft/Wasser-Wärmepumpen im Klosterdach	8 kW	3,2	Brauchwassererwärmung, Klimatisierung
2 Spitzen- und Reserve-Heizölkessel	1.120 kW / 575 kW		Deckung von Spitzenlasten und Überbrückung Stillstand der anderen Anlagen

Tabelle 4:

Stromversorgungsanlagen, Stromleistungen, Wirkungsgrade und Anwendungen.

Anlage	Stromleistung	Wirkungsgrad	Anwendung
Strom			
Zwei Wasserkraft-Anlagen	57 kW / 31 kW	ca. 90 %	Stromerzeugung
Photovoltaik-Anlage – 100 m ²	9 kW	ca. 10 %	Stromerzeugung

Um die einzelnen erneuerbaren Energieträger im Energiemix möglichst optimal nutzen zu können, wurde ein intelligentes Lastmanagement zur Steuerung der Versorgung mit Wärme und Strom integriert (Bild 3). Das Ziel des Lastmanagements ist es, sowohl speicherbare (z.B. Holzhackschnitzel) als auch nichtspeicherbare (z.B. Wasserkraft) Energieformen zu nutzen und damit die einzelnen erneuerbaren Energieträger optimal zu kombinieren.

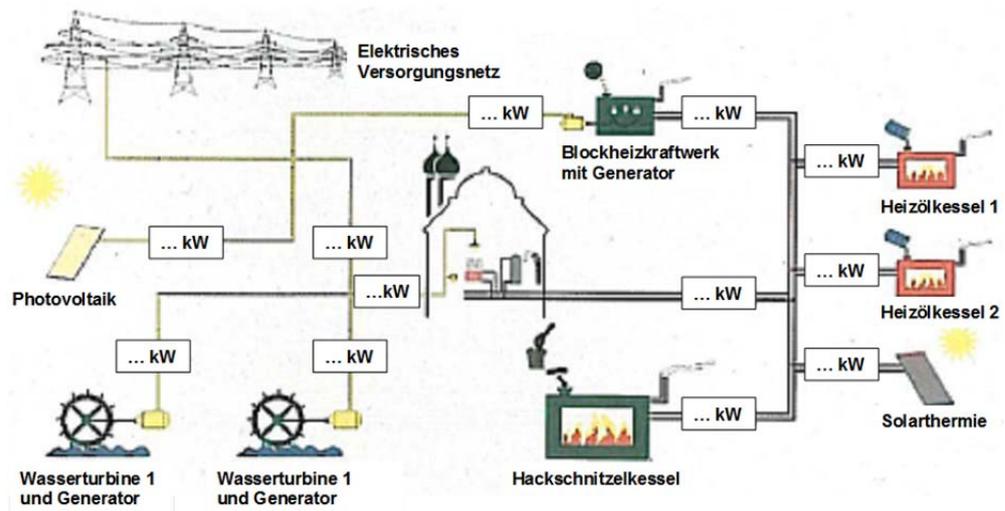


Bild 3:
Schaltplan Energiezentrale [12]

Die Energiezentrale dient als Modellanlage einer zukunftsorientierten Energieversorgung und ist in die Umweltbildungsarbeit des Zentrums für Umwelt und Kultur eingebunden. Besucher aus verschiedensten Zielgruppen (z.B. Schulklassen und Entscheidungsträger aus Politik und Wirtschaft) haben die Möglichkeit, die Energiezentrale zu besichtigen. Dabei können sie den aktuellen Energieverbrauch im Kloster vor Ort verfolgen und den Anteil, den die einzelnen Energieträger an Wärme bzw. Strom liefern. Ebenso können sie erfahren, wie die einzelnen Systeme funktionieren und miteinander interagieren.

Die Auswertung der Wärmeenergieverbräuche der letzten Jahre ergibt, dass das Einsparziel von 5 % Heizenergie (witterungsbereinigter Wärmeverbrauch pro Quadratmeter) im Jahr 2009 gegenüber dem Bezugswert des Heizenergieverbrauchs aus dem Jahr 2006 um 0,5 % übertroffen wurde. Das Rapsöl-BHKW erzeugte 2009 hingegen keine weitere Wärme. Dies ist darauf zurückzuführen, dass nach einer langen Betriebszeit von ca. 40.000 h der Motor aufgrund eines Defektes abgeschaltet wurde. Eine Neuanschaffung ist aufgrund der ungünstigen Ökobilanz nicht geplant.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Wärme- und Stromversorgung der Energiezentrale mit erneuerbaren Energien energetisch eine sehr innovative und energieeffiziente Lösung darstellt. Die Verbrennung von Hackschnitzel ist jedoch aus exergetischer Sicht für die Raumheizung ungünstig, da für die bestehenden Heizkreisläufe Temperaturen von bis zu 90 °C bereitgestellt werden müssen, um einen Raum auf 22 °C zu temperieren. Aus diesem Grund wird in dem Abschnitt „Begründung der getroffenen Planungsentscheidungen“ diskutiert, welche Systeme die Effektivität der Anlage erhöhen bzw. die Hackschnitzelkessel in Zukunft ersetzen können. Im Fokus stehen Wärmepumpensysteme, die die Umgebungswärme nutzen und Temperaturen für die Beheizung der Räume von 25 - 35 °C bereitstellen. Hierfür ist zu untersuchen, ob der Einsatz von Wandheizsystemen die alten Heizkreisläufe mit deren Hochtemperaturradiatoren ersetzen kann.

Wandheizsysteme

In den vier Messräumen des Denkmalpflegezentrums Benediktbeuern wird in einem der Räume eine Sockel-Bauteiltemperierung, die in der Denkmalpflege inzwischen weit verbreitet ist, installiert. Ein weiteres System mit einer Strahlungsheizung als ein konventionelles Heizungssystem, befindet sich in einem zweiten Raum. Ein neues Wandheizungssystem mit einer Entkopplungsmatte und einem Luftspalt, der durch ein Wirrgelege gebildet wird, bildet das dritte zu untersuchende System. Es kann reversibel vor die Wand installiert werden. Als viertes System wird eine Wandheizung eingesetzt, die in einem Klimaelement aus Lehm integriert ist. Diese Systeme können so erstmals unter vergleichbaren Randbedingungen in Hinsicht auf Energieverbrauch, Raumklima und Behaglichkeit und gegebenenfalls auftretende Schäden (Risse / Salzausfall) mit jeweils einem konventionellen Radiator verglichen werden. Die Anordnung der Messräume sind in Bild 26 zu finden. Die vier Messräume wurden auf ihre Vergleichbarkeit hin in einer sogenannten Nullmessung untersucht. Eine Beschreibung zu der Nullmessung und deren Aufbau ist in Kapitel 5.2 nachzulesen.

5.1.2 Begründung der getroffenen Planungsentscheidungen

In diesem Abschnitt werden zu Beginn die unterschiedlichen zu untersuchenden Szenarien beschrieben und anschließend ein Ausblick gegeben, welche Anlagen für die Wärmeversorgung mit Blick auf den Einsatz von Wandheizsystemen für die Zukunft in Frage kommen und ggf. den Hackschnitzel-Kessel ersetzen können.

Vergleichsszenarien

Die Gesamt-Exergieeffizienz des Gebäudes ist stark von dem Wärmeerzeugungssystem abhängig. Hierbei ist eine bestmögliche Anpassung der Wärmeversorgung an den Bedarf des Gebäudes anzustreben. In diesem Abschnitt werden exemplarisch drei Wärmeversorgungssysteme untersucht und miteinander verglichen. Einer konventionellen Energiebereitstellung (Gas-Brennwertkessel) wird zum einen die bestehende Energiezentrale (Hackschnitzel BHWK) und zum anderen ein exergetisch optimiertes Vergleichskonzept ((Sole/Wasser-Wärmepumpe) gegenüber gestellt.

Der Gas-Brennwertkessel stellt das Referenzszenario dar. Für die Berechnung werden folgende Annahmen getroffen:

- Wirkungsgrad = 98 %
- Exergiefaktor = 0,94 [13]
- Primärenergiefaktor = 1,1 [14]

- Damit soll der Vergleich zur konventionellen Energiebereitstellung ermöglicht werden.

Die Wärmeversorgung im Kloster Benediktbeuern basiert auf einem Hochtemperatur Hackschnitzel-Kessel:

- Wirkungsgrad = 80 % (vgl. Tabelle 3)
- Exergiefaktor Hackschnitzel = 1 [13]
- Primärenergiefaktor = 1,2 [14]

Es ist zu untersuchen, inwiefern sich dieser mit den zu untersuchenden Wandheizungssystemen kombinieren lässt und welche möglichen Optimierungspotentiale sich daraus ergeben.

Dem gegenübergestellt wird ein exergetisch optimiertes Vergleichskonzept. Dieses soll auf erneuerbaren Energien basieren, das Versorgungstemperaturen nahe den Raumlufttemperaturen bereitstellt. Als Versorgungssystem eignet sich hierfür insbesondere die Sole-Wärmepumpe:

- COP = 4,5 [15]
- Exergiefaktor Strom = 1, Erdwärme = 0,02 [13]
- Primärenergiefaktor Strom = 2,4 [16]
- Die Vor- und Nachteile der einzelnen Systeme werden anschließend zu den Ergebnissen beschrieben.

Für den Vergleich der einzelnen Wärmeversorgungssysteme wird exemplarisch der Messraum 2 (Messzeitraum: 27.12.2013 - 10.1.2014) untersucht, da in ihm eine Niedertemperatur Wandheizung mit sehr geringen Vorlauftemperaturen von rund 30 °C - 35 °C eingebaut ist. Der Vergleich der drei Wärmeversorgungssysteme zeigt endenergetisch (s. Bild 4) nur geringe Unterschiede, die auf die unterschiedlichen Wirkungsgrade der einzelnen Wärmeversorgungssysteme zurückzuführen ist. Zusätzlich erfolgt eine Aufteilung des jeweiligen Anteils an genutzter fossiler bzw. erneuerbarer Energie. Weiterhin ist zu beobachten, dass bedeutend mehr Energie von allen drei Systemen aufgebracht werden muss, als für die Versorgung des Raumes erforderlich ist (rote gestrichelte Linie).

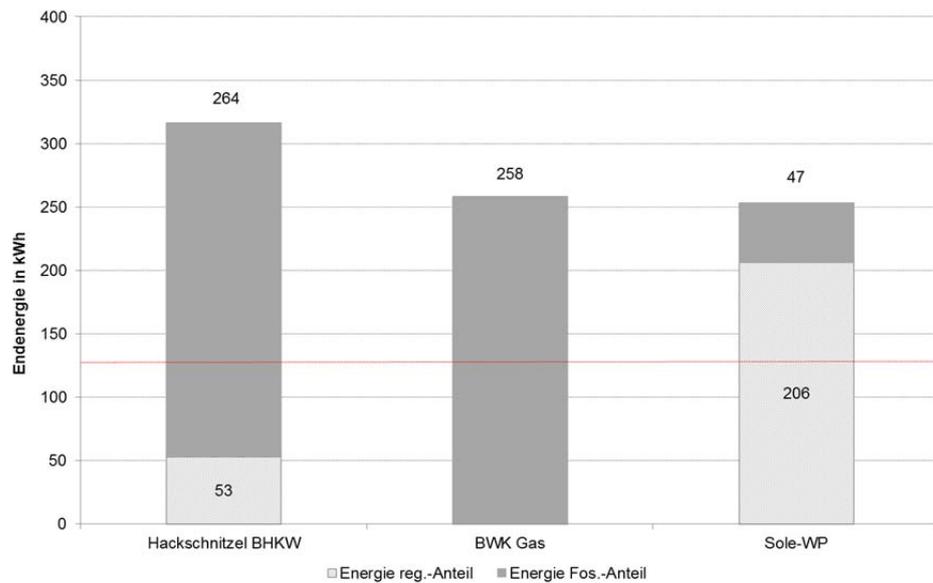


Bild 4:
Endenergiebedarf der Wärmeversorgungssysteme am Beispiel des Messraums 2 für den Zeitraum 27.12.2013 - 10.1.2014.

Primärenergetisch ist eine leicht veränderte Verteilung Bild 5 zu erkennen. Hierbei schneidet der Gas-BWK sehr günstig im Vergleich zu den beiden anderen Systemen ab, da Gas im Vergleich zu Strom (für den Betrieb der WP) und Hackschnitzel einen geringen Primärenergiefaktor besitzt. Jedoch wird die erforderliche Wärme zu 100 % aus fossilen Energieträgern bereitgestellt.

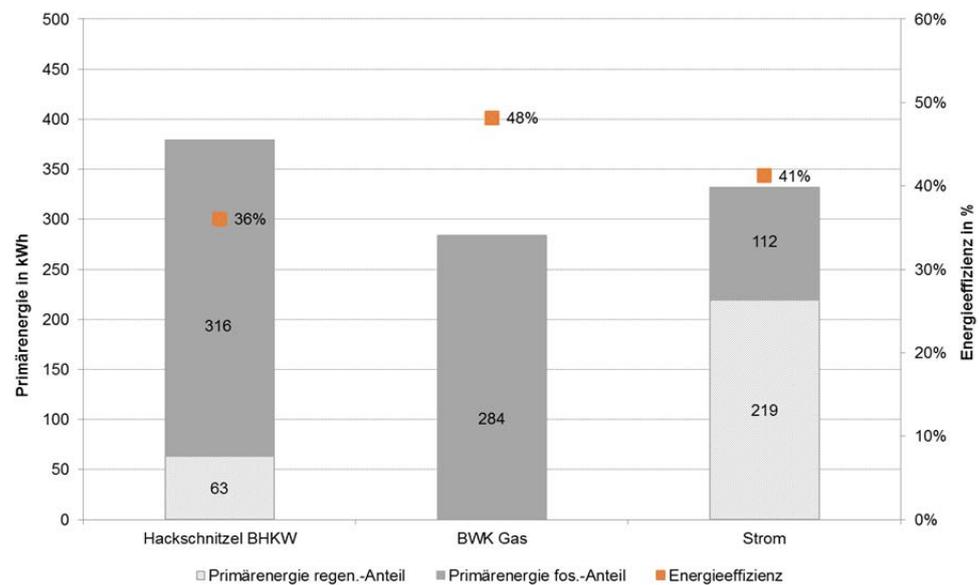


Bild 5:
Primärenergiebedarf und Energieeffizienz der Wärmeversorgungssysteme am Beispiel des Messraums 2 für den Zeitraum 27.12.2013 - 10.1.2014.

Als bessere Alternative ist die Sole-Wärmepumpe zu nennen, da sie die Wärme zu einem großen Teil aus der Umwelt nutzt und nur für ihren Betrieb Strom benötigt. Damit kann sie eine Gesamtenergieeffizienz von rund 41 % erzielen.

Wird der gleiche Vergleich exergetisch (Bild 6 und Bild 7) durchgeführt, so sinkt der Exergiebedarf des Raumes um ein Vielfaches im Vergleich zur Energie. Dies beruht auf den geringen Exergiegehalt der Raumluft von 20 °C. In diesem Fall schneiden die beiden Hochtemperaturwärmeversorgungssysteme (Hackschnitzel und Gas-BWK) bedeutend schlechter ab als die Sole-WP. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Wärmepumpe bei Temperaturen nahe der Vorlauftemperatur der Wandheizung arbeitet. Dadurch sind sehr geringe Verluste in der Erzeugung zu erwarten. Weiterhin nutzt die Sole-WP Umweltwärme auf niedrigem Temperaturniveau von rund 10 °C, was ebenfalls exergetisch als sehr positiv bewertet wird. Damit kann für die Sole-Wärmepumpe eine Gesamtexergieeffizienz von rund 7 % erzielt werden. Im Vergleich dazu geht bei dem Hackschnitzel BHKW ein Großteil der Wärme in der Erzeugung verloren, womit nur eine Gesamtexergieeffizienz von knapp 2 % erzielt wird. Ursache dafür ist das hohe Temperaturniveau von rund 80 - 90 °C auf dem das Hackschnitzel BHKW arbeitet, um 20 °C Raumwärme bereitzustellen.

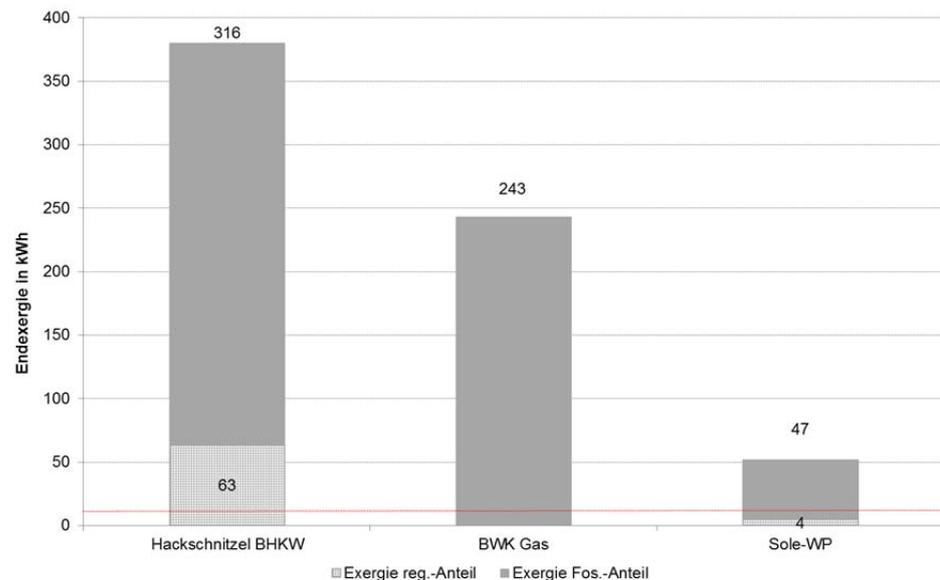


Bild 6:
Endexergiebedarf der Wärmeversorgungssysteme am Beispiel des Messraums 2 für den Zeitraum 27.12.2013 - 10.1.2014.

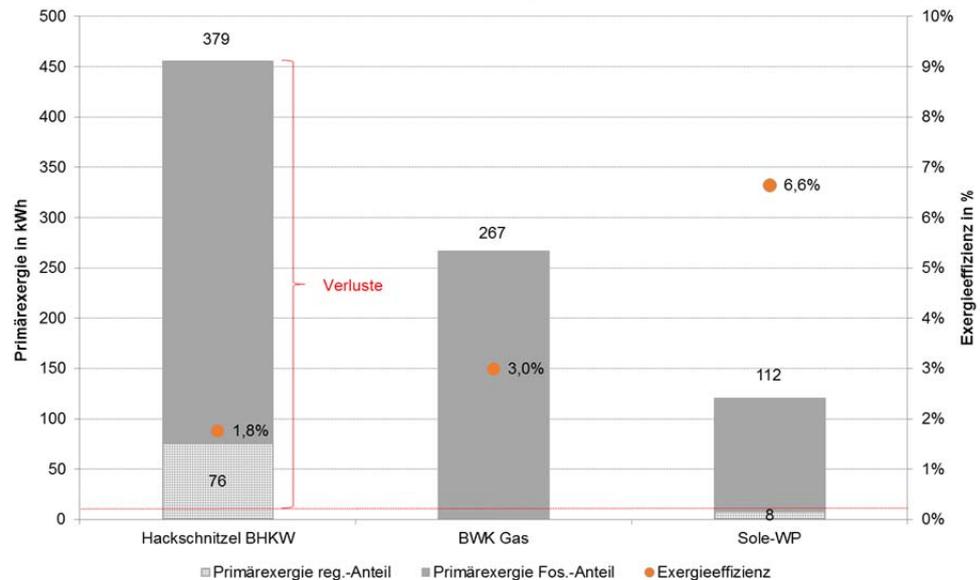


Bild 7:
Primärenergiebedarf und Energieeffizienz der Wärmeversorgungssysteme am Beispiel des Messraums 2 für den Zeitraum 27.12.2013 - 10.1.2014.

Möglichkeiten der Nutzung von Energiequellen für die zukünftige Planung

Da die Wandheizsysteme mit Vorlauftemperaturen nahe der Raumlufttemperatur arbeiten, werden in diesem Abschnitt verschiedene Wärmepumpensysteme beschrieben und hinsichtlich ihrer möglichen Anwendung für das Denkmalpflegezentrum und das Kloster Benediktbeuern diskutiert. Die Wärmepumpen haben den Vorteil, dass sie die Umgebungswärme (aus Luft, Grundwasser, Erdreich) nutzen, um Gebäude zu temperieren. Aus exergetischer Sicht ist dies sehr sinnvoll, da die Vorlauftemperaturen der Wärmepumpen nahe denen der Raumlufttemperatur sind, wodurch sie mit hohen Leistungszahlen arbeiten können und dafür nur ein geringer Anteil an Exergie bereitgestellt werden muss, um die Räume zu beheizen bzw. zu kühlen. Dadurch können unnötige Wärmeverluste in den Leitungen vermieden und somit Energie und auch Exergie eingespart werden.

Oberflächennahe Geothermie im Klosterhof:

Die oberflächennahe Geothermie macht sich, wie auch die Tiefengeothermie, die Wärme des Erdreichs zu Nutze.

Somit können die folgenden Vorteile der Nutzung der Erdwärme genannt werden [12]:

- Dauerhafte Nutzung der Erdwärme als Energiequelle, unbegrenzt verfügbar
- Gute CO₂-Bilanz, da kein Verbrennungsprozess

- Vielseitige Verwendungsmöglichkeiten, wie Wärmegewinnung und Klimatisierung von Gebäuden in den Sommermonaten

Als Nachteile der Erdwärmenutzung sind aufzuführen:

- Teilweise aufwendige Vorarbeiten notwendig und damit geringe Wirtschaftlichkeit
- Nicht überall realisierbar; hoher Platzaufwand für die Flachkollektoren
- Energiezufuhr für Wärmepumpen notwendig, jedoch ist die Gesamtbilanz von eingesetzter Energie zu gewonnener Wärmeenergie positiv.

Im Zuge der Innenhofumgestaltung des Klosters, der insgesamt eine Fläche von rund 1000 m² umfasst, kam die Frage auf, ob es möglich ist, einen Erdwärmekollektor oder vertikale Erdwärmesonden (max. 5 m Tiefe) einzubringen, um die Erdwärme sowie auch die eintreffende Sonnenstrahlung für die Heizung und Klimatisierung des Denkmalpflegezentrums und des Klosters nutzen zu können.

Aus energetischer und exergetischer Sicht würde dies viele Vorteile mit sich bringen, wie die Nutzung von frei verfügbarer Erdwärme, geringere Wärmeverluste in den Leitungen, eine optimalere Anpassung an die Wandheizsysteme sowie auch die Möglichkeit der Speicherung von Wärme im Erdreich. Weiterhin wird der Betrieb der Energiezentrale positiv unterstützt und der Einsatz der Hackschnitzel reduziert, wodurch viel Geld eingespart werden könnte. Der Strom für den Betrieb der Pumpen kann mit der Wasserkraft-Anlage und der PV-Anlage bereitgestellt werden.

Erdwärmesonden und Tiefengeothermie:

Erdwärmesonden und Tiefengeothermie nutzen im Vergleich zur oberflächennahen Geothermie die Erdwärme in Tiefen zwischen 100 m und 5.000 m. Dabei besteht die Möglichkeit, Erdwärme direkt für die Heizung der Gebäude zu nutzen und bei der Tiefengeothermie Strom aus Erdwärme zu erzeugen.[13].

Da sich jedoch das Kloster Benediktbeuern auf keinem geeigneten geologisch beschaffenen Grund befindet und auch schon in geringen Tiefen Grundwasser ansteht, wurde die Tiefengeothermie als mögliche Energiequelle nicht weiter berücksichtigt.

Grundwasserbrunnen:

Da Erdsondenbohrungen aufgrund der schlechten Grundwasserverhältnisse nicht möglich sind, könnten stattdessen zwei Brunnen als Wärmebrunnenanlage gebohrt werden. Dafür wird aus dem Förderbrunnen Wasser herausgepumpt und zur Wärmepumpe geleitet. Das Grundwasser ist dabei nur geringen Temperaturschwankungen (mindestens 7 - 12 °C) ausgesetzt und eignet sich daher besonders für einen monovalenten Wärmepumpenbetrieb [14].

Der große Nachteil der Wasser-Wasser-Wärmepumpe besteht darin, dass sie eines großen Erschließungs- und Wartungsaufwands gegenüber Sole- und Luftwärmepumpen bedarf. Auch die Anforderungen an die Wasserqualität sind sehr hoch. Ist beispielsweise zu viel Eisen und Mangan im Grundwasser enthalten, so kann eine Verockerung der Wärmequellanlage auftreten, die zu einem Totalausfall der Heizung führen kann. Ebenso können Feststoffe im Grundwasser zu einem erhöhten Pumpenverschleiß führen [15].

Für die Anwendung dieser Anlage im Kloster Benediktbeuern ist daher vorab ein umfassendes Boden- und Grundwassergutachten zu erstellen. Anschließend ist zu beurteilen, ob das Grundwasser für eine Wasser-Wasser-Wärmepumpe geeignet ist. Sollte dies der Fall sein, dann ist zum Schluss zu klären, wie viel Wärme mit dieser Anlage bereitgestellt werden kann und ob sich der Aufwand und der Nutzen als wirtschaftlich erweisen.

Absorberdächer:

Neben der Nutzung von Erdwärme und des Grundwassers wurde auch die Anwendung von sogenannten Energie- oder Absorberdächern diskutiert. Im Vergleich zu den Luft/Wasser-Wärmepumpen im Dachgeschoss des Maierhofes entziehen diese Wärmepumpen dem Absorberdach Wärme und kühlen diese unter die Temperatur der Außenluft ab. Dadurch kann das Absorberdach Wärme aus der Außenluft absorbieren. Diese Wärme wird dann von einer frostsicheren Sole über ein Rohrleitungssystem der Wärmepumpe zugeführt, wo sie auf das Temperaturniveau der Heizung angehoben wird. Eine Erhöhung der Wärmeleistung kann dabei durch Sonneneinstrahlung, Wind und Regen erzielt werden. Eine Anordnung solcher Absorberdächer an südausgerichteten Dachflächen oder Wetterseiten ist daher von Vorteil. Ein weiterer Vorteil ist ebenso der geringe Materialaufwand und die Möglichkeit der nachträglichen Anbringung am Unterdach. Am besten eignen sich dafür Ziegeldächer.

Für das Denkmalpflegezentrum und das Kloster Benediktbeuern stellt dies eine interessante Variante der Nutzung der großen Dachflächen dar, da aus Denkmalschutzgründen keine Solaranlagen auf den Dächern angebracht werden dürfen. Die gewonnene Wärme kann dabei zur Unterstützung der Trinkwasserbereitung und der Heizung genutzt werden.

Jedoch ist zu beachten, dass eine Wärmepumpe nur einen begrenzten Arbeitsbereich besitzt und daher ein System zum Einsatz kommen muss, das mit großen quellenseitigen Temperaturschwankungen auskommt. Denn im Gegensatz zur Erdwärme ist die Quelle sehr ungleich belastet. Damit sinkt der Wirkungsgrad der Anlage stark ab und es ist zu überprüfen, ob der Aufwand zum tatsächlichen Nutzen wirtschaftlich ist [16], [17].

Fazit:

Die Sole-Wärmepumpe stellt eine effiziente Alternative zum Hackschnitzel BHKW dar. Sie besitzt den Vorteil der Nutzung frei verfügbarer Umweltenergie, in Form von Erdwärme. Die Wärmepumpe erreicht mögliche Leistungszahlen zwischen 4 und 5 [Fraunhofer ISE, 2011] in Abhängigkeit von den geforderten Temperaturniveaus. Umso geringer die Vorlauftemperatur, desto höher ist die Leistungszahl der Anlage. Insbesondere Flächenheizsysteme, wie z.B. Wandheizungen sind ideale Wärmeübergabesysteme, da sie mit Vorlauftemperaturen von rund 35 °C arbeiten. Damit kann eine optimale Anpassung von Angebot und Nachfrage erzielt werden. Für den Betrieb einer Wärmepumpenanlage ist Strom erforderlich, dessen Bewertung der aktuelle Strommix von Deutschland zu Grunde liegt. Damit ergibt sich für den Strom ein Primärenergiefaktor von 2,4 [16] Aufgrund der Entwicklung des Ausbaus erneuerbarer Energien im Strombereich ist künftig eine Verbesserung der Bewertung der Primärenergie zu erwarten. Weiterhin besteht die Möglichkeit die Wärmepumpe im Lastmanagement zu nutzen und Stromüberschüsse in Folge von Erneuerbaren Energien in der Gebäudemasse zu speichern. Auch exergetisch ist die Wärmepumpe als sehr positiv zu bewerten, da der eingesetzte Energieträger Umweltwärme auf einem Temperaturniveau von rund 10°C nur einen sehr geringen Exergetiefaktor von 0,01 im Vergleich zu Gas und Hackschnitzel = 1 [13] besitzt.

5.2 Vorversuche an der Freilandversuchsstelle des Fraunhofer IBP in Holzkirchen

Wegen der zeitlichen Verzögerung bei der Umsetzung der Messräume durch den Umzug des Projektes von Weyarn nach Benediktbeuern um insgesamt 2 Jahre, wurden ergänzend unabhängige Vorversuche zur Funktionsweise zweier ausgewählter Wandheizsysteme auf dem Freilandversuchsgelände des Fraunhofer IBP in Holzkirchen in einem Versuchsgebäude, dem sog. Multifunktionsprüfstand (MUFUPS), durchgeführt.

Die Wandbereiche (Bild 8) im Multifunktionsprüfstand (MUFUPS) sind je 100 cm breit und 175 cm hoch auf einer 36 cm dicken Ziegelmauer. Vier Elemente sind je-weils in zwei Reihen übereinander an der Innenseite einer Südfassade angebracht. Die Temperatur des Wärmepuffers beträgt konstant 30 °C. Die Durchflussmenge und damit die Heizenergie jedes Feldes wird so geregelt, dass sich zwischen Vor- und Rücklauftemperatur immer eine Spreizung von 2 K ergibt. Für die Beheizung des Raumes kommen Elektroradiatoren zum Einsatz, welche den Raum auf 20 °C beheizen. Da nicht nur Messwerte erfasst werden, sondern auch die Wandheizungselemente und der Raum auf entsprechende Temperaturen geregelt werden müssen, kommt ein automatisierte Mess- und Regelungssystem zum Einsatz.

Die in folgender Tabelle aufgelisteten Varianten von Wandaufbauten wurden ab Dezember 2009 im MUFUPS verglichen.

Tabelle 5:
Übersicht der eingesetzten Varianten.

Bezeichnung	Abkürzung	Systemaufbau
Aufbau 1	WT	Wandtemperierung direkt auf der Bestandswand
Aufbau 2	1 WG	Wandtemperierung mit 1 x Wirrgelegematte
Aufbau 3	2 WG	Wandtemperierung mit 2 x Wirrgelegematte
Aufbau 4	1 WG + AD	Wandtemperierung mit 1 x Wirrgelegematte und Außendämmung
Aufbau 5	1 WG + 1 ID	Wandtemperierung mit 1 x Wirrgelegematte und Innendämmung (Aerogel)
Aufbau 6	1 WG + 2 ID	Wandtemperierung mit 1x Wirrgelegematte und 2 x Innendämmung (Aerogel)
Aufbau 7	Bestand	Bestandswand ohne Änderung
Aufbau 8	Bestand + AD	Bestandswand mit Außendämmung

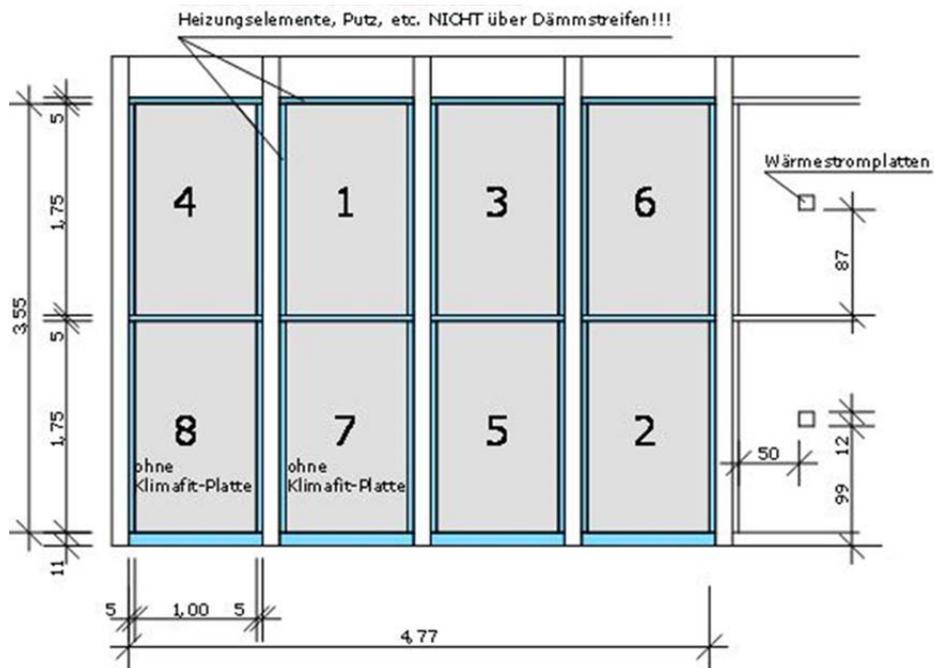


Bild 8:
Wandelemente der Versuchsanordnung im Multifunktionsstand an der Freilandversuchsstelle des Fraunhofer IBP Holzkirchen, raumseitig betrachtet.

Wandaufbau der Südfassade

Im November 2009 wurde die Fassade für die Versuchsanordnung vorbereitet. Auf Teile der Bestandsziegelwand (Feld 4 und Feld 8) wurde mit einem geeigneten Kleber eine EPS-WDV-Dämmplatte (Wärmeleitfähigkeit 0,035 W/(mK), 140 mm Dicke) angebracht. Anschließend wurde 10 mm Kalk-Zement-Leichtputz (Unterputz) und 2 mm Scheibenputz (Oberputz) aufgetragen (Bild

9). Geplant war die thermische Trennung der einzelnen Elemente auf der Fassade durch eine Kunststoffschiene mit Dehnfuge zu erreichen, jedoch wurde dies nicht in dieser Weise durch die beteiligten Firmen umgesetzt. Hier wurden statt dessen normale Putzschiene aus Metall verwendet.



Bild 9:
Ansicht Südfassade, Felder rechts mit WDV-S.

Raumseitiger Wandaufbau der 6 Elemente

Im Dezember 2009 wurden die einzelnen Wandflächen im Inneren des Versuchshauses angefertigt.

Tabelle 6:
Liste der verwendeten Materialien.

Materialien:
Feinporiger Hygrothermverbundkleber, Auftrag 4 mm mit Zahnspachtel zum Fixieren des Wirrgeleges
Wirrgelege mit beidseitiger Vlieskaschierung der Firma Klemoflex (10 mm)
Innendämmung Stadur "Spaceloft" aerogels (einseitig mit Alufolie, gitternetzverstärkt, Wärmeleitfähigkeit bei 10 °C = 0,013 W/(mK), 10 mm Dicke)
Heizrohrelemente aus Polypropylen, Firma Egger (10 bzw. 15 mm Rohrdicke)
Haftputz, Auftrag 15-20 mm (Heizrohre wurden dabei nur leicht überputzt)
Nochmaliges Überputzen (3-5 mm, je nach Bedarf), da die Oberfläche nicht ebenmäßig war
EPS-WDV-Dämmplatte (Wärmeleitfähigkeit 0,035 W/(mK), 140 mm Dicke)

Für die einzelnen Versuchsfelder ergeben sich unterschiedliche Aufbauten, welche in den folgenden Tabellen aufgezeigt werden. Die folgenden Bilder stellen verschiedene Details bei der Installation dar.

Tabelle 7:
 Aufbau des Versuchsfeldes 1 - Wandheizung auf Bestandswand.

Feld 1:
Bestandswand
Wandheizungselement direkt auf der Bestandswand
Horizontale Befestigungsschienen
Punktueller Verdübelung der Befestigungsschiene mit Nageldübel
Oberputz Rigips
Oberputz Rotband (zweite Schicht)



Bild 10:
 Heizrohrelement direkt auf Bestandswand mit Wärmeflusscheibe.

Tabelle 8:
 Aufbau des Versuchsfeldes 2 - 1 Wirrgelege.

Feld 2:
Bestandswand
Verbundkleber, 4 mm direkt auf Altputz (Untergrundverbund Mauerwerk zum Vliesverbund Wirrgelege)
Wirrgelege, 10 mm
Verbundkleber, 4 mm (Verbund zw. Oberer Vlieslage zum Wirrgelege und Haftgrund für Putz)
Heizrohrelement mit Nageldübel
Oberputz Rigips
Oberputz 2. Schicht



Bild 11:
Heizrohrelement auf Wurrgelegematte mit Verbundkleberauftrag.

Tabelle 9:
Aufbau des Versuchsfeldes 3 - 2 Wurrgelege.

Feld 3:
Bestandswand
Verbundkleber, 4 mm direkt auf Altputz
Wurrgelege, 10 mm
Verbundkleber, 4 mm
Wurrgelege, 10 mm
Heizrohrelement
Oberputz
Oberputz 2. Schicht

Tabelle 10:
Aufbau des Versuchsfeldes 4 - Außendämmung und 1 Wurrgelege.

Feld 4:
Außendämmung EPS
Bestandswand
Verbundkleber, 4 mm direkt auf Altputz
Wurrgelege, 10 mm
Verbundkleber, 4 mm
Heizrohrelement
Oberputz
Oberputz 2. Schicht

Tabelle 11:
Aufbau des Versuchsfeldes 5 - 1 Wirrgelege und 1 Innendämmung.

Feld 5:
Verbundkleber, 2 mm
Spaceloft, 10 mm, Alukaschierung raumseitig
Wirrgelege, 10 mm
Verbundkleber, 2 mm
Heizrohrelement
Oberputz
Oberputz 2. Schicht



Bild 12:
Innendämmung Spaceloft mit einseitiger Alukaschierung.

Tabelle 12:
Aufbau des Versuchsfeldes 6 - 2-mal Innendämmung.

Feld 6:
Verbundkleber, 2 mm direkt auf Altputz
Spaceloft, 10 mm, Alufolie raumseitig
Spaceloft, 10 mm, Alufolie raumseitig
Wirrgelegematte, 10 mm
Spaceloft und Wirrgelege an der Oberkante befestigt
Verbundkleber, 2 mm
Heizrohrelemente
Oberputz
Oberputz 2. Schicht

Tabelle 13:
Aufbau des Versuchsfeldes 7.

Feld 7:
Bestandswand

Tabelle 14:
Aufbau des Versuchsfeldes 8.

Feld 8:
Außendämmung EPS
Bestandswand

Hydraulischer Aufbau zur Messung und Messtechnik

Für den hydraulischen Aufbau zur Messung der sechs Felder wurden sechs Pumpkreise installiert. Die Registerfelder werden mittels eines Pufferspeichers mit Einschraubheizkörper versorgt. Eine zusätzliche Umwälzpumpe pumpt das Heizungswasser im Pufferkreislauf, um eine Schichtung im Speicher zu vermeiden und konstante Bedingungen zu schaffen. Direkt vor den Registern befinden sich Messstellen für die Messung der Vor- und Rücklauftemperatur. Gekühlt wird der Raum durch ein Lüftungssystem, das die Durchströmung des Raumes bewirkt. Die Raumtemperatur wird mittels Beimischung von Frischluft geregelt.



Bild 13:
Hydraulischer Aufbau mit sechs einzelnen Pumpkreisläufen.

Die Raumtemperatur wird mittels vier Temperaturfühlern, jeweils zwei auf einer Höhe von 90 und 270 cm über Oberkante Fertigfußboden im Bereich der Wandelemente, erfasst. Die Wärmeflusscheiben sind jeweils mittig auf den einzelnen Elementen befestigt. Die optimalen Stellen für die Anbringung der Sensoren für die Oberflächentemperaturen wurden mit Hilfe einer IR-Kamera ermittelt und festgelegt. Jeweils drei Sensoren pro Feld wurden angebracht, außer auf den Bestandsflächen. Ein Sensor misst dabei die Rücklauftemperatur direkt

auf dem Rohr, ein weiterer die Vorlauftemperatur direkt auf dem Rohr und der dritte Sensor ist etwa in Feldmitte zwischen den Rohren befestigt. Auf den Wandflächen mit WDVS sind zusätzlich Oberflächensensoren auf der Außenseite unter und auf dem WDVS angebracht.

Die Startparameter für die Steuerung, Regelung und Messwerterfassung waren Ende Dezember 2009:

- Lüftungsanlage kühlt nur bei Bedarf
- Vorlauftemperatur 30 °C
- Raumtemperatur 20 °C
- Spreizung der Vor- und Rücklauftemperaturen 2K

Die ersten Auswertungen der gemessenen Energie- und Wärmeströme ergaben allerdings keine plausiblen Ergebnisse. Daraufhin wurden alle Sensoren, die Durchflussmesser sowie die Programmierung der Messwerterfassung und der Durchflusssteuerung komplett überprüft. Dabei konnten aber keine Fehler gefunden werden. Schlussendlich wurde vermutet, dass sich die Prüfflächen über den gemeinsamen Raum zu stark gegenseitig beeinflussen.

Ablauf und Optimierung der Versuche

Die Verzögerungen durch den Umzug des Projektes von Weyarn nach Benediktbeuern haben dazu geführt, dass die Vor-Ort-Untersuchungen nicht zum geplanten Zeitpunkt begonnen werden konnten. Deshalb wurde beschlossen, Vorversuche auf dem institutseigenen Freigelände durchzuführen, um die zeitlichen Verzögerungen zu reduzieren. Anhand der Ergebnisse dieser Vorversuche soll dann für die eigentliche Untersuchung der Wandheizsysteme im Kloster Benediktbeuern die Variante mit Wirrgelege und der Wandtemperierung ausgewählt werden. Nach vorbereitenden Maßnahmen im Innenbereich und am Außenputz des Versuchsgebäudes auf dem Freigelände des IBP wurden die zu vergleichenden Varianten im Messraum eingebaut. Es wurde die erforderliche Messsensorik eingebracht, sodass verschiedene Größen wie Temperatur, Wärmestrom und andere relevante Größen für die Beheizung aufgezeichnet werden konnten. Wie sich jedoch zeigte, traten Probleme hinsichtlich der Messergebnisse und Beeinflussung durch die Regelung auf. Somit standen nach der ersten Winterphase 2010 / 2011 keine plausiblen Ergebnisse zur Verfügung. Deshalb wurde nach eingehender Fehlersuche der Versuch so angepasst, dass jeder einzelne Aufbau mit Hilfe von Boxen einen eigenen "Raum" und eine eigene Regelung bekam, über die die "Raumlufttemperatur" auf 20 °C geregelt wurde. Damit wurde eine gegenseitige Beeinflussung der Heizungssysteme weitestgehend ausgeschlossen.

Zum Winterende 2010 / 2011 wurde der Versuchsstand schließlich so umgebaut, dass alle Untersuchungsflächen einen eigenen Raum als solchen zur Verfügung hatten. Dies geschah, indem eine Box aus 6 cm dicken extrudierten Po-

lystyrolplatten als Wärmedämmung mit einem Luftraum von ca. 8 cm aufgebracht wurde. Geregelt wurde nun die jeweilige Raumlufttemperatur in der Box, wobei hier, wie auch beim MUFUPS-Raum, eine Solltemperatur von 20 °C gewählt wurde. Zusätzlich wurde die maximale Spreizung zwischen Vorlauf- und Rücklaufemperatur mit 2 K festgelegt. Somit wird die Temperatur in dem erzeugten Raum vor der Wandfläche ausschließlich durch die Wandheizung erzeugt.

Die relevanten meteorologischen Größen werden an der Wetterstation des Fraunhofer IBP erfasst.

Ergebnisse

Bei der Auswertung der Messperiode werden bestimmte Zeiträume ausgewählt, entsprechend ausgewertet und interpretiert.

Das Bild 14 zeigt eine IR-Aufnahme von außen, wobei hier die unterschiedlichen Versuchsflächen mit den Wandheizungssystemen gut wahrnehmbar sind. Der im Bild erkennbare blaue Streifen zeigt die beiden Varianten mit Außendämmung. Im Vergleich hierzu sind die beiden roten Felder die ungedämmten Varianten mit der Wandheizung direkt auf der Wand und die Variante mit einer Wirtgelegematte.

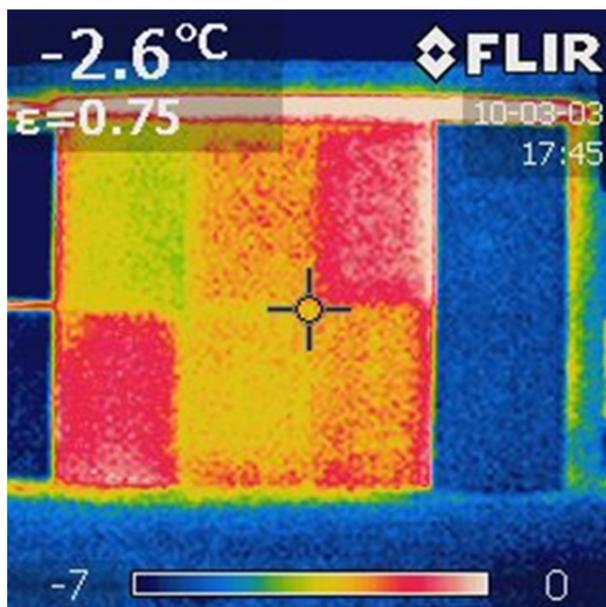


Bild 14:
IR-Aufnahme von außen.

Das Bild 15 zeigt als Beispiel die Wandheizungssysteme von innen. Hier ist das Wandheizungselement selbst sehr gut erkennbar.

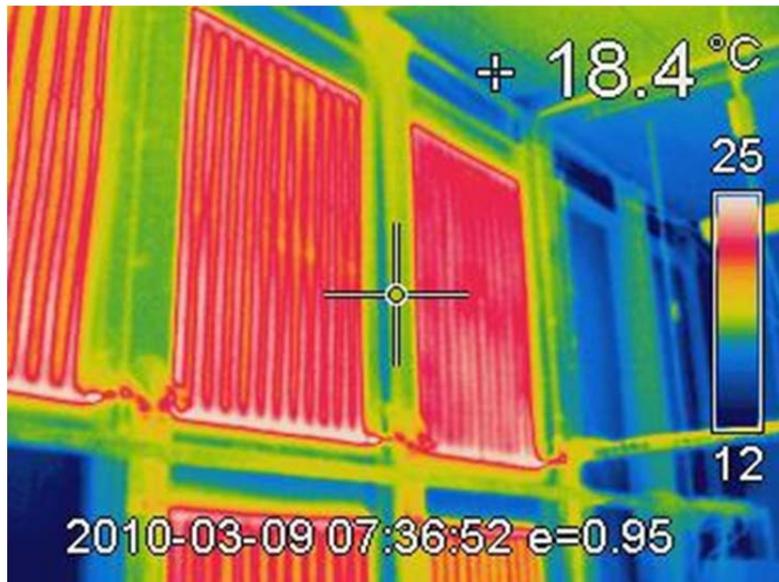


Bild 15:
IR-Aufnahme im Innenraum.

Das folgende Bild zeigt für den ausgewerteten Zeitraum das Außenklima in Holzkirchen, welches mit der Fraunhofer-IBP-eigenen Wetterstation aufgezeichnet wird.

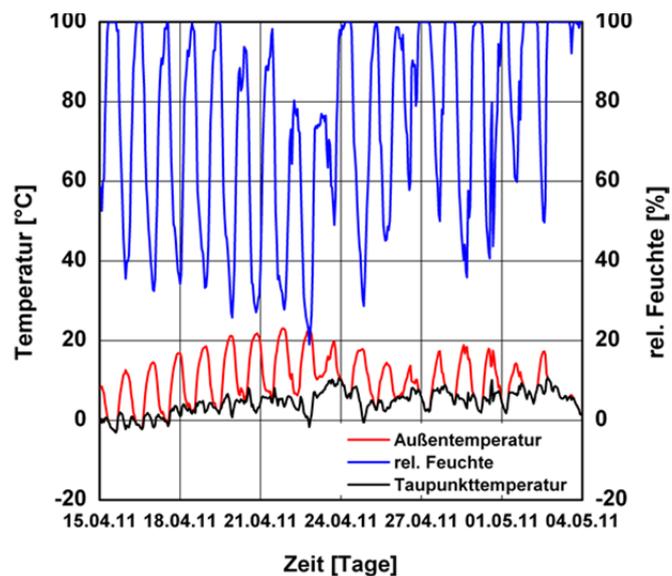


Bild 16:
Zeitlicher Verlauf des Außenklimas am Standort Holzkirchen.

Während der Versuchsphase wurde neben der Regelung für die Wandheizung auch die Raumtemperatur separat geregelt. Die eingestellte Regelgröße beträgt 20 °C und wurde mit Hilfe des Messsystems umgesetzt.

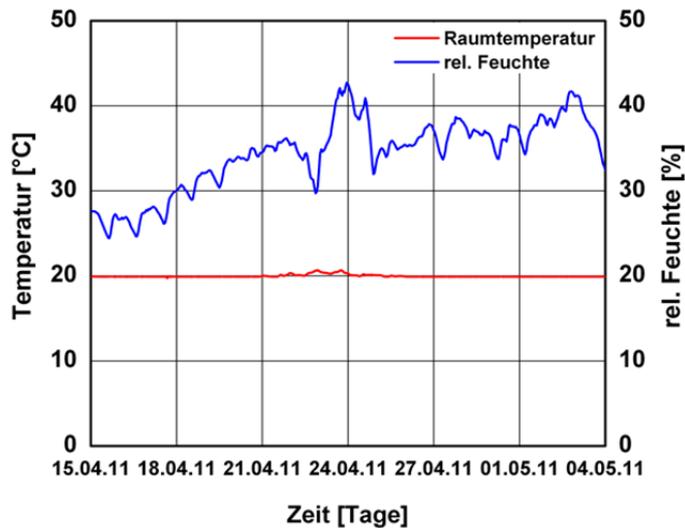


Bild 17:
Verlauf des Innenklimas im Messraum (Multifunktionsprüfstand).

Bild 17 zeigt das Innenklima für den ausgewerteten Zeitraum mit Wandheizungsbetrieb. Wie in Bild 17 zu sehen ist, treten kaum Schwankungen der Temperatur auf.

Beim Anbringen des Außenputzes wurden für die Erfassung der Oberflächen-temperatur ebenfalls Temperaturfühler der Baureihe PT100 oberflächennah eingebracht. Somit kann für die einzelnen Varianten verglichen werden, inwieweit die Wandheizung auf die Außenoberflächentemperatur Einfluss nimmt. Die Darstellung ist im Bild 18 zu sehen. Dabei ist deutlich zu erkennen, dass die Systeme mit der Außendämmung in der Nacht am meisten auskühlen.

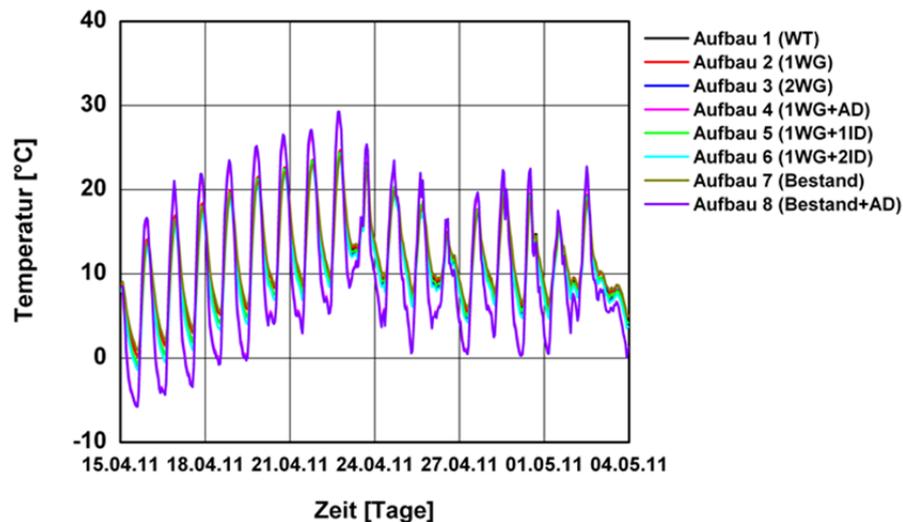


Bild 18:
Verlauf der Außenoberflächentemperatur der unterschiedlichen Felder.

Für die energetische Betrachtung, aber auch zum Vergleich der Systeme untereinander, wurden auf der Innenoberfläche ebenfalls PT-100 Fühler angebracht.

Diese wurden mit Hilfe einer Infrarot-Kamera zwischen den Heizrohren mittig platziert. In Bild 19 ist der Verlauf der Innenoberflächentemperaturen für den ausgewerteten Zeitraum zu sehen. Hierbei ist erkennbar, dass die Bestandswand (Aufbau 7) am kältesten ist und deren mittlere Temperatur bei ca. 18 °C liegt. Etwas wärmer ist die Wand mit dem Wärmedämmverbundsystem (WDVS), aber ohne Einfluss einer Wandheizung. Bei beiden Kurven ist ein Anstieg der Temperatur zu erkennen, was darin begründet ist, dass die Außenlufttemperatur gestiegen ist.

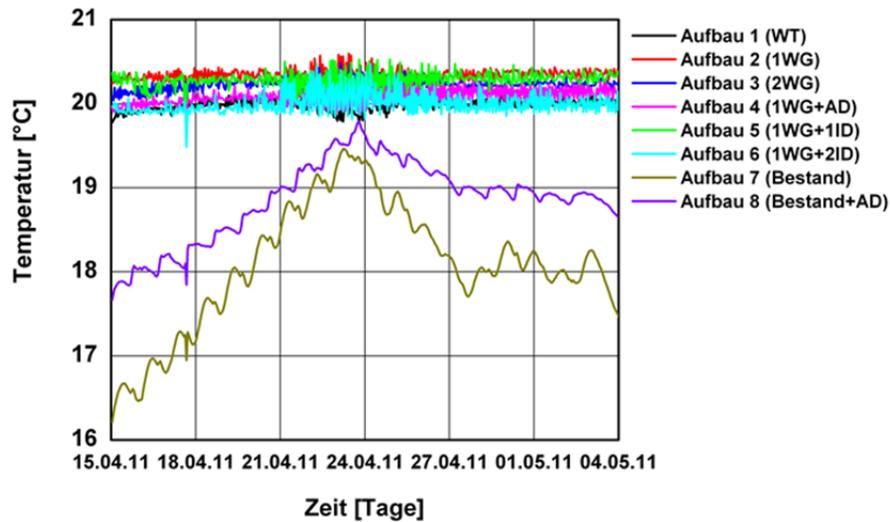


Bild 19:
Verlauf der Temperatur auf der Innenoberfläche.

Für den Vor- und Rücklauf des jeweiligen Wandheizelementes in den verschiedenen Aufbauten werden die Temperaturen ebenfalls erfasst. Diese sind für die Energiebilanzierung von Bedeutung. Im Bild 20 sind die Vorlauf- und im Bild 21 die Rücklauftemperaturen dargestellt.

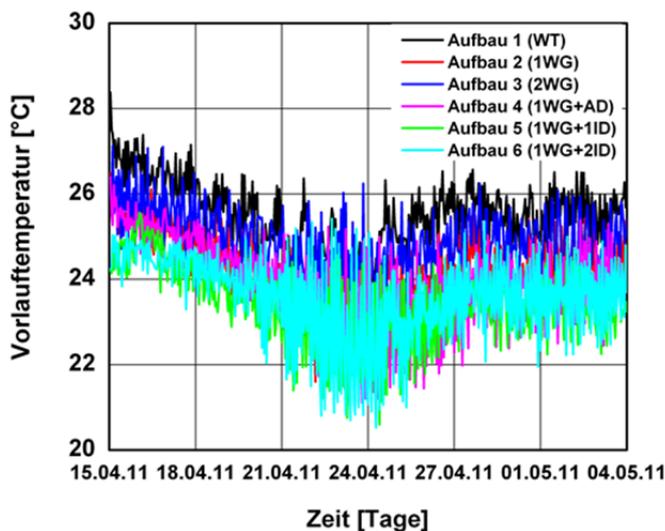


Bild 20:
Darstellung der Vorlauftemperaturen über den Messzeitraum.

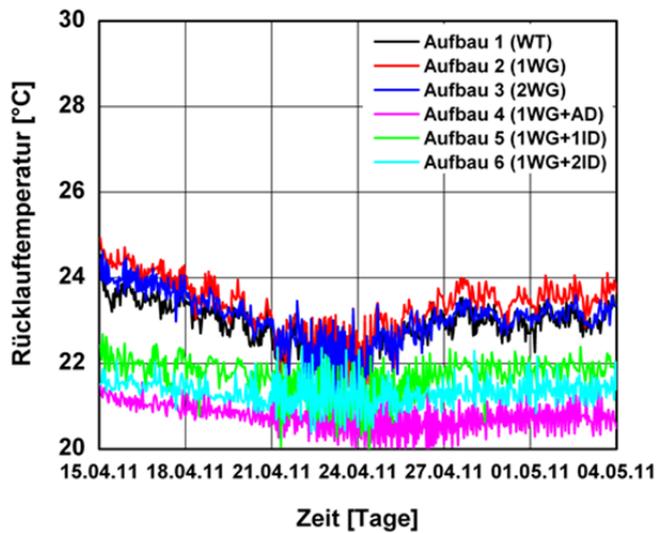


Bild 21:
Darstellung der Rücklaufemperaturen über den Messzeitraum.

Die Wärmeströme werden auf der Oberfläche der Bestandswand erfasst, um Wärmeverluste quantifizieren zu können. Im Bild 22 sind die Wärmeströme über die Bestandswandinnenoberfläche dargestellt.

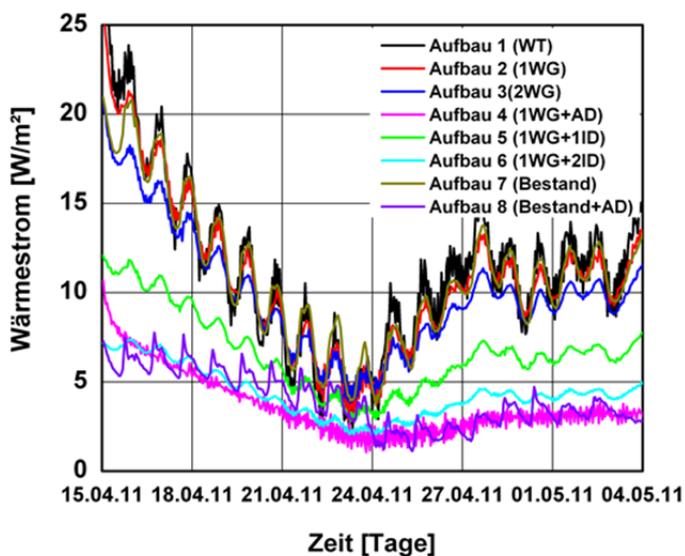


Bild 22:
Darstellung der Wärmeströme über den Messzeitraum.

Ebenfalls für die energetische Bilanzierung ist der Volumenstrom von Bedeutung, welcher für die thermische Leistung mit der Wärmekapazität der Flüssigkeit und der Differenz aus Vor- und Rücklauf multipliziert wird. Das folgende Bild zeigt den Volumenstrom der einzelnen Aufbauten.

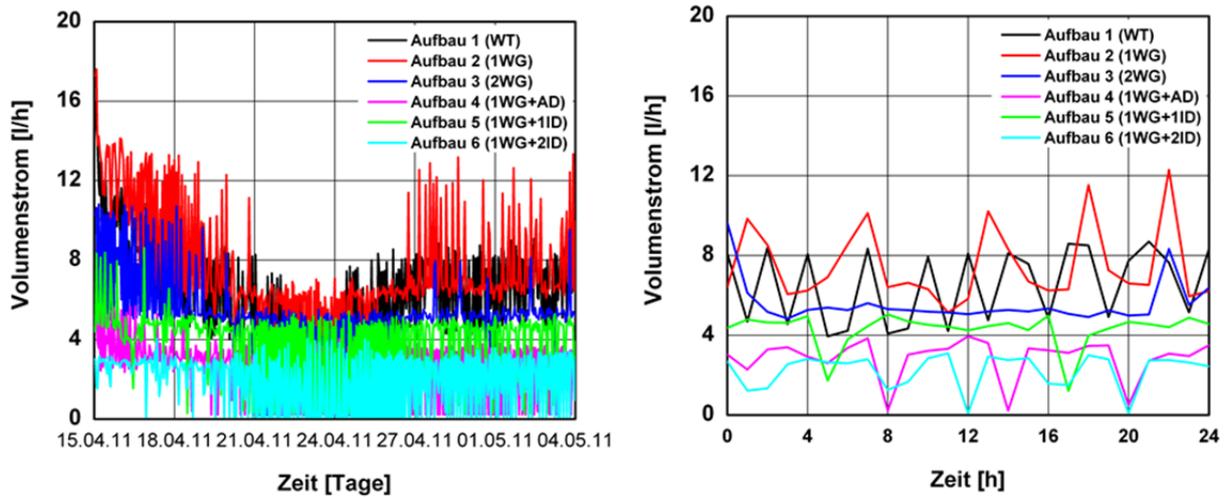


Bild 23:
Verlauf des Volumenstrom über den Messzeitraum (links) und Tagesverlauf (rechts) im Bild.

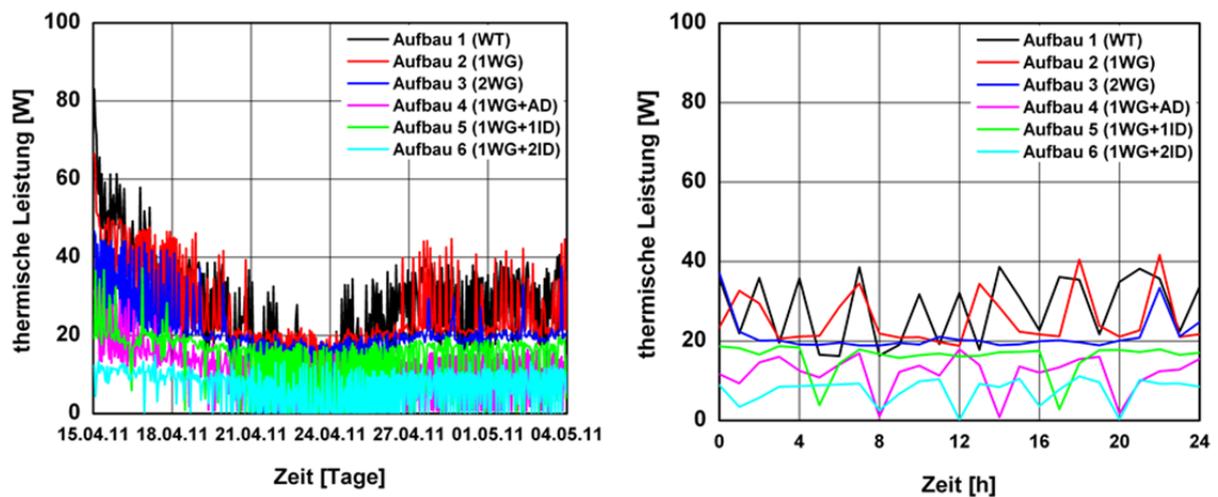


Bild 24:
Zeitlicher Verlauf der thermischen Leistung über den Messzeitraum (links) und der Tagesverlauf (rechts) im Bild.

Das Bild 24 zeigt die thermisch ermittelte Leistung pro System über den ausgewerteten Zeitraum. Für eine übersichtlichere Darstellung der Messergebnisse ist in Bild 25 der integrale Verlauf über die Zeit dargestellt.

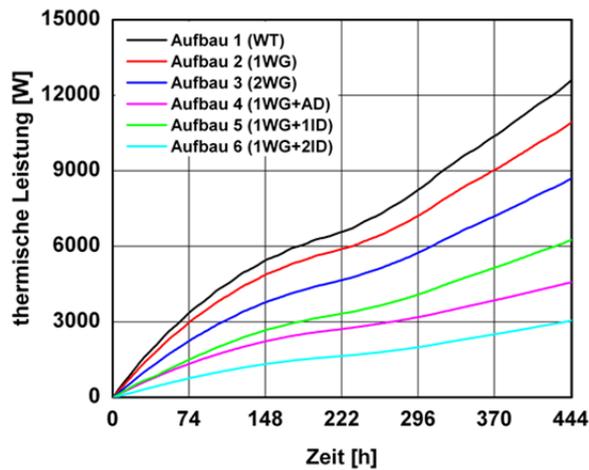


Bild 25:
integraler Verlauf der thermischen Leistung über den Messzeitraum.

Anhand Bild 25 ist zu erkennen, dass erwartungsgemäß der Aufbau mit der Wandheizung direkt auf der Wand (ohne dämmende Zwischenschicht) den höchsten Energieverbrauch aufweist. Interessanterweise verbessert bereits der Einfluss eines Wirrgeleges die Heizleistung leicht um etwa 10 %. Das zweite Wirrgelege bringt, zunächst überraschend, einen größeren zusätzlichen Einspareffekt als das erste. Dies dürfte darin begründet sein, dass ein Teil des dämmenden Luftraums des Wirrgeleges mit dem Klebemörtel aufgefüllt wird. Das zweite Wirrgelege erbringt dagegen die komplette Dämmwirkung entsprechend seiner Dicke. Beim Wandaufbau mit der 1 cm dicken Aerogel-Innendämmung wird der Energieverbrauch etwa halbiert. Eine zweite Aerogel-Dämmschicht reduziert den Energieverbrauch nochmals um die Hälfte. Die Variante mit Außendämmung liegt vom Ergebnis zwischen den beiden Innendämmvarianten.

Zusammenfassung der Freilandversuche in Holzkirchen

Um eine Vergleichbarkeit der Wandfelder zu erreichen, der Versuch so angepasst, dass jeder einzelne Aufbau mit Hilfe von Boxen einen eigenen "Raum" und eine eigene Regelung bekam, über die die "Raumlufthtemperatur" auf 20 °C geregelt wurde. Damit wurde eine gegenseitige Beeinflussung der Heizungssysteme weitestgehend ausgeschlossen.

Die daraufhin erzielten Messergebnisse ergaben in Bezug auf ihren Energieverbrauch der einzelnen Systeme plausible Ergebnisse. So sind der Aufbau mit Wirrgelege und Außendämmung und der Aufbau mit Wirrgelege und 2-facher Innendämmung am besten und verzeichnen den geringsten Wärmeverlust nach außen. Der Aufbau mit der Wandheizung direkt auf der Wand (ohne dämmende Zwischenschicht) weist den höchsten Energieverbrauch auf. Interessanterweise verbessert bereits der Einfluss eines Wirrgeleges die Heizleistung leicht um etwa 10 %. Das zweite Wirrgelege bringt einen größeren zusätzlichen Einspareffekt als das erste. Beim Wandaufbau mit einer 1 cm dicken Aerogel-

Innendämmung wird der Energieverbrauch im Vergleich zur komplett ungedämmten Variante etwa halbiert.

5.3 Einbau der Heizsysteme / Installation der Messtechnik in der Alten Schäferei in Benediktbeuern

In diesem Kapitel werden die vier Wandheizungssysteme und die Messtechnik beschrieben, die im Nordbau der Alten Schäferei in Benediktbeuern ab Herbst 2010 eingebaut und vermessen wurden.

Im November 2010 starteten in enger Absprache mit dem Bayerischen Landesamt für Denkmalpflege und der zuständigen Unteren Denkmalschutzbehörde die vorbereitenden baulichen Maßnahmen zur Einrichtung der Messräume in der Alten Schäferei des Klosters Benediktbeuern.

Im Winter 2010 / 2011 wurden in der Alten Schäferei erste Nullmessungen zur Vergleichbarkeit der Messräume im Vorzustand durchgeführt. Im Winter 2011 / 2012 erfolgte dann die Realisierung der Messräume in Benediktbeuern, die in den folgenden Wintern kontinuierlich optimiert wurden, um eine Vergleichbarkeit der Systeme zu schaffen und diese methodisch zu beschreiben.

5.3.1 Beschreibung der Messräume

Im Erdgeschoss des Nordbaus des denkmalgeschützten Gebäudes bestehen bereits vier nahezu identisch große Räume, in die jeweils eines der Heizsysteme installiert werden soll (Bild 26). Die Räume mussten für den eigentlichen Versuchsaufbau zum Teil umgebaut werden.

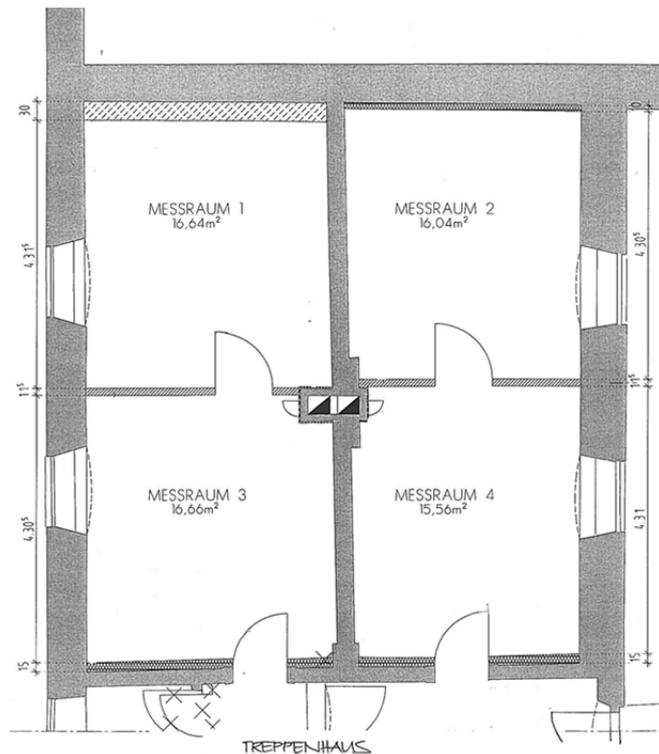


Bild 26:
Grundriss Erdgeschoss des Nordbaus der Alten Schafflerei.

Ziel der Messungen und vergleichenden Untersuchungen ist es, den Wärmedurchgang der einzelnen Heizungssysteme durch die Außenwand miteinander zu vergleichen. Daher wurde angestrebt, dass die Randbedingungen an den anderen Umschließungsflächen möglichst adiabatisch sind. Die Räume werden mit identischer Raumlufttemperatur betrieben, sodass hier an den Zwischenwänden von nahezu adiabatischen Zuständen ausgegangen werden kann. Gegen das Treppenhaus im Süden, die Jugendherberge im Norden sowie Boden und Decke wurden mit verschiedenen Dämmstoffen versehen, um die Wärmeverluste in diese Richtungen möglichst gering zu halten.

Dämmung des Bodens der Messräume

Um einen definierten, durchgängigen Bodenaufbau zu erreichen, plante das Fraunhofer IBP den Abriss des bestehenden inhomogenen Betonbodens mit seinem unterschiedlich ausgeführten Aufbau. Zusammen mit einem Kooperationspartner des Kompetenzzentrums wurde ein Bodenaufbau konzipiert, der 25 cm verdichtetes Glasschaumgranulat unter einer Betonplatte vorsah. Bei Schürf- und Grabarbeiten trat in 35 cm Tiefe unter der bestehenden Fußbodenoberkante ein historischer Ziegelboden zu Tage, der größtenteils in allen vier Messräumen verlegt war (Bild 27 links). Zusammen mit dem Bayerischen Landesamt für Denkmalpflege wurde die Bergung und Sicherung der aus der Mitte des 19. Jahrhunderts stammenden Ziegel beschlossen. Somit konnte, wie vorgesehen, der Boden im Bereich der Messräume und im angrenzenden Treppenhaus ca. 60 cm ausgehoben werden (Bild 27 rechts). Anschließend wurden Leerrohre für die Messtechnik und Anschlussleitungen aus dem Technikraum

hin zu den Messräumen verlegt. Mit einem Vlies wurden die Messräume im Bodenbereich und an den aufsteigenden Wänden ausgekleidet. Somit diente das Material als unterste Trennschicht des neuen Bodenaufbaus, worauf das Glasschaumgranulat eingebracht wurde. Die für die geplante Untersuchung erforderlichen Sensoren wurden vom Fraunhofer IBP im und auf dem Erdboden sowie in der Dämmschicht positioniert. In zwei Schichten wurde das Granulat mit einer dafür vorgesehenen leichten Rüttelmaschine auf ca. 25 cm verdichtet, bevor es mit dem Vlies abgedeckt und die neue Betonplatte mit der Zwischenwand verankert wurde, allerdings von der Außenwand entkoppelt.



Bild 27:
Der offengelegte Ziegelboden, 30 cm unter der Fußbodenoberkante im Bild links. Das Bild rechts zeigt den Aushub bei ca. 60 cm Tiefe.



Bild 28:
Im Bild links ist das Glasschaumgranulat und eine zur Verdichtung benötigte Rüttelplatte zu sehen, im Bild rechts die neue Bodenplatte mit Leerrohren.

Dämmung zum Obergeschoß

Der Boden im unbeheiztem Obergeschoß über den Messräumen wurde temporär und reversibel für die Zeit der Messungen mit 10 cm dicker PU-Dämmung belegt, damit die Räume auch nach oben hin thermisch möglichst gut gedämmt sind, dass Unterschiede im Deckenaufbau der vier Messräume die Messungen möglichst wenig beeinflussen.

Dämmung der Süd- und Nordwände

Um die Räume von dem südlich gelegenen Treppenhaus und der im Norden angrenzenden Jugendherberge thermisch entkoppeln zu können, wurden die Bestandswände raumseitig mit Dämmung belegt. Im Messraum 1 dämmt eine vorgesetzte Wand aus 30 cm dickem Porenbeton die Mauer zur Jugendherberge, was gleichzeitig auch die Verringerung der Raumfläche bewirkt, um möglichst einheitliche Messräume zu erhalten. Für die Versuche wurde mittels einer Lattenkonstruktion Polystyrolämmung (10 cm Dicke) im Bereich der nördlichen Wand befestigt und mit Gipskarton beplankt. In den Messräumen 3 und 4 kam ebenfalls Polystyrol zum Einsatz, allerdings mit 15 cm Dicke. Der Kaminschacht inmitten der vier Räume musste zusätzlich abgedämmt werden.

Sonnenschutz

Die Scheiben der abgedichteten Bestandsfenster wurden mit einer getönten Sonnenschutzfolie beklebt. Nach der ersten Trocknungsphase wurden die Fenster komplett geschlossen. Somit konnten die Differenzen, hervorgerufen durch die unterschiedliche Ausrichtung (Ost / West) der Räume und daraus resultierende Sonneneinstrahlung minimiert werden. Zusätzlich zeichnen außen über allen vier Fenstern angebrachte Solarimeter die Sonneneinstrahlung für jeden Raum auf.

Die Räume für den Einbau der unterschiedlichen Heizungssysteme wurden wie folgt festgelegt:

- Messraum 1: Strahlungsheizkörper (SHK)
- Messraum 2: Wandheizung 1 (WH1)
- Messraum 3: Wandtemperierung (WT)
- Messraum 4: Wandheizung 2 (WH2)

Voraussetzung für die Messdatenauswertung ist eine genaue Beschreibung der Messräume mit einer Vermessung der Räume, der Zeichnung eines Grundrisses und der Darstellung der Wandaufbauten der raumumschließenden Flächen sowie eine Berechnung der dazugehörigen U-Werte.

Tabelle 15:
 Kenngrößen der Messräume inklusive der Fensternischen.

Messraum:	Grundfläche:	Mittlere Höhe:	Raumvolumen inkl. Volumen über dem Fensterbrett:
1	16,71 m ²	2,64 m	44,5 m ³
2	15,96 m ²	2,57 m	41,8 m ³
3	16,88 m ²	2,64 m	45,4 m ³
4	15,39 m ²	2,63 m	41,2 m ³

Die Fenster der Messräume sind identisch. Die in den 1990er Jahren eingesetzten Fenster sind mit Zweischeibenisolierverglasung und einem Abstandshalter aus Kunststoff versehen. Die Sprossen auf der rechten Seite des Fensters wurden nur aufgeklebt, die linke Fensterscheibe wurde aufgrund der für die Untersuchung eingebauten mechanischen Lüftung durch eine 16 mm starke OSB Platte mit integrierter Lüftungsklappe ausgetauscht.

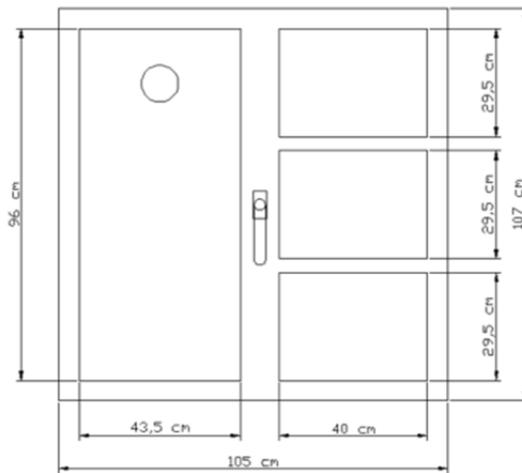


Bild 29:
 Aufbau und Bemaßung der Fenster.

$$U_W = \frac{U_f * A_f + U_g * A_g + U_{OSB} * A_{OSB} + l_g * \psi_g + l_{OSB} * \psi_{OSB}}{A_f + A_g + A_{OSB}}$$

U_W : U-Wert des gesamten Fensters

U_f : U-Wert des Fensterrahmens: $U_f=2,6 \text{ [W/(m}^2\text{K)]}$ (Herstellerangabe vergleichbares Fenster)

A_f : Fläche des Fensterrahmens: $A_f=0,221 \text{ [m}^2\text{]}$

U_g : U-Wert der Fensterscheibe: $U_g=1,3 \text{ [W/(m}^2\text{K)]}$ (Herstellerangabe vergleichbare Fensterscheibe)

A_g : Fläche der Fensterscheibe: **$A_g=0,354 \text{ [m}^2\text{]}$**

U_{OSB} : U-Wert der OSB Platte: **$U_{OSB}=3,41 \text{ [W/(m}^2\text{K)]}$** ($\lambda= 0,13$) [19]

A_{OSB} : Fläche der OSB Platte: **$A_{OSB}=0,413 \text{ [m}^2\text{]}$**

l_g : sichtbare Umfangslänge der Glasscheibe: **$l_g=2,72 \text{ [m]}$**

ψ_g : längenbezogener Wärmedurchgangskoeffizient der Verglasung: **$\psi_g=0,081 \text{ [W/(mK)]}$** (Herstellerangabe vergleichbares Fenster)

l_{OSB} : sichtbare Umfangsfläche der OSB-Platte: **$l_{OSB}=2,78 \text{ [m]}$**

ψ_{OSB} : längenbezogener Wärmedurchgangskoeffizient der OSB-Platte: U-Wert der OSB-Platte ist sehr hoch, wodurch die Höhe des längenbezogenen Wärmedurchgangskoeffizienten minimiert wird, da dieser die Differenz der Wärmedurchgangskoeffizienten an der linienförmigen Wärmebrücke zum anliegenden Material darstellt => Annahme: **$\psi_{OSB} \rightarrow 0$**

Für die U-Werte der gedämmten Zwischentüren zu den Messräumen 1 und 2 wurde zur Vereinfachung nur die Dämmwirkung der aufgetragenen Dämmung angenommen. Es handelt sich dabei um 40 mm Polystyrol-Dämmung mit einer Wärmeleitfähigkeit von 0,035 W/(mK). Für die U-Werte der Eingangstüren zu den Messräumen 3 und 4 wurden die Herstellerangaben zugrunde gelegt.

Die U-Werte der anderen Bauteile wurden anhand von Standardmaterialkennwerten der verwendeten Baustoffe näherungsweise berechnet. Zusammenfassend ergeben sich die folgenden U-Werte für die einzelnen Bauteile:

Tabelle 16:
U-Werte der Bauteile.

Bauteil:	Bezeichnung:	U-Wert [W/(m ² K)]:
Nordwand Messraum 1	U _{MR1,Nordwand}	0,21
Nordwand Messraum 2	U _{MR2,Nordwand}	0,28
Außenwand West	U _{AW,West}	1,09
Außenwand Ost	U _{AW,Ost}	1,00
Außenwand unter Fenster	U _{AW,Fenster}	1,59
Südwand	U _{Südwand}	0,20
Zwischenwand Messraum 1 und 3 bzw. 2 und 4	U _{ZW,1_3} , U _{ZW,2_4}	1,95
Zwischenwand Messraum 1 und 2 bzw. 3 und 4	U _{ZW,1_2} , U _{ZW,3_4}	1,72
Boden	U _{Boden}	0,21
Decke	U _{Decke}	0,25
Fenster	U _w	2,65
Eingangstüren Messräume 3 & 4 (Herstelleran- gabe)	U _{MR3,Tür} , U _{MR4,Tür}	2,00
Gedämmte Türen zwischen Messräumen	U _{MR1,Tür} , U _{MR2,Tür}	0,71

5.3.2 Beschreibung der Wärmeübergabesysteme

Messraum 1: Strahlungsheizkörper

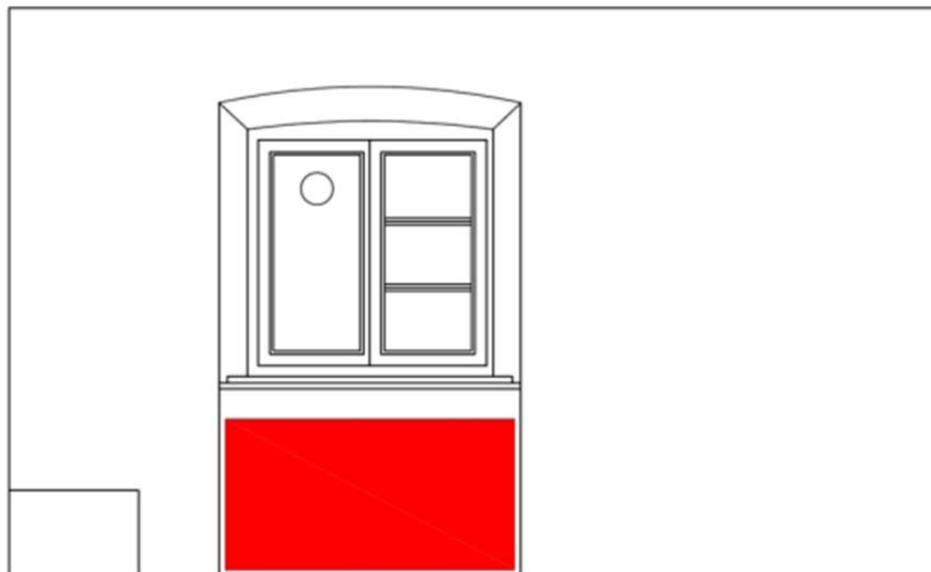


Bild 30:
Strahlungsheizkörper (rot) in Messraum 1. Innenansicht der Außenwand.

Der Strahlungsheizkörper weist aufgrund seiner Konstruktion einen besonders hohen Strahlungsanteil auf. Der Einbau erfolgte in der Fensternische unter dem Fenster, wie es auch bei herkömmlichen Heizkörpern üblich ist.



Bild 31:
Strahlungsheizung, die Frontplatte ist mit PT100 Fühler zur Oberflächentemperaturbestimmung versehen.

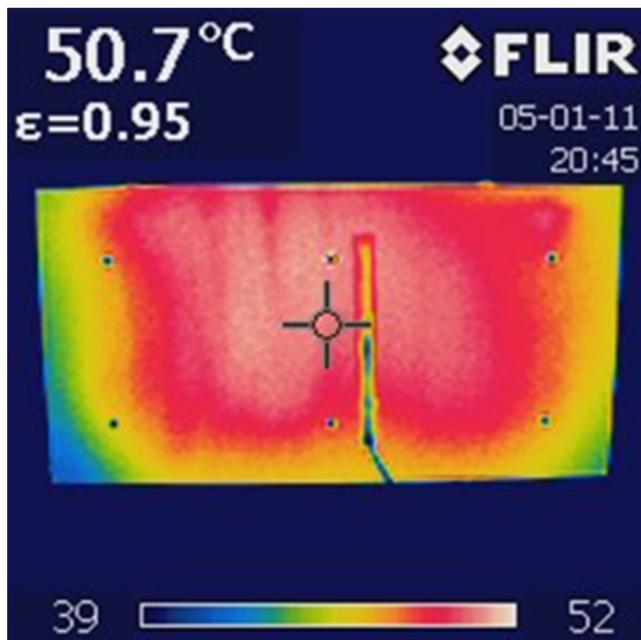


Bild 32:
Thermographie des Strahlungsheizkörpers während des Betriebs.

Der Heizkörper der Strahlungsheizung setzt sich aus drei Bauteilen zusammen, wie in Bild 34 zu sehen ist:

Der in der Mitte liegende wassergefüllte Stahlwärmekörper ist in zwei hydraulisch miteinander verbundene Heitzaschen gegliedert, die seriell durchströmt werden. Zunächst wird die vordere Heitzasche, dann die hintere durchströmt. Dadurch erfolgt der Großteil der Wärmeabgabe an die vordere Frontplatte und die Abstrahlungsverluste in Richtung Außenwand werden reduziert.

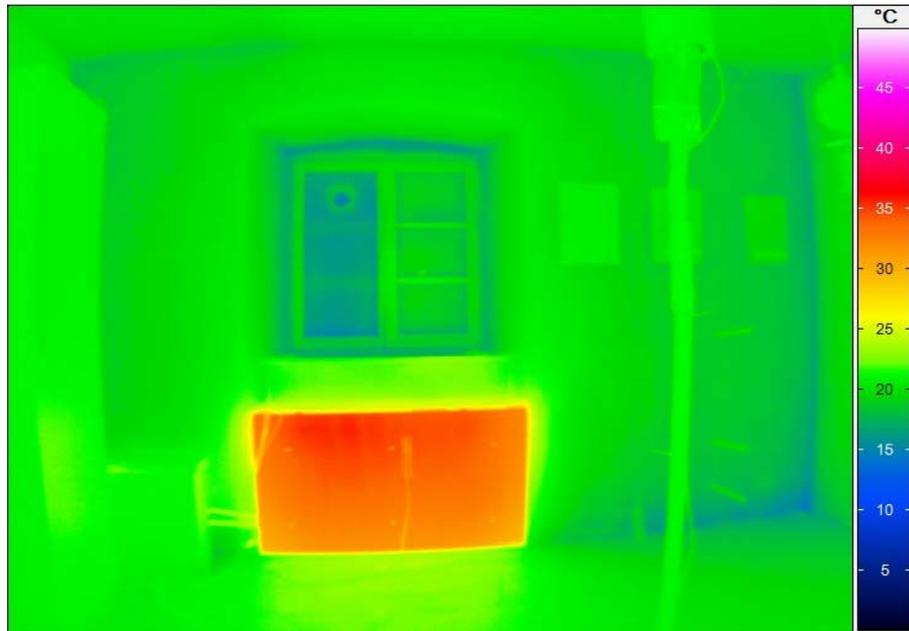


Bild 33:
Thermographie Messraum 1 mit strahlungsoptimierten Heizkörper.

Auf dem wassergefüllten Stahlwärmekörper ist eine Frontplatte aus 10 mm starkem lackiertem Aluminium angebracht. Diese ist mittels Gewindebolzen befestigt. Da die gesamte Wärme mittels Wärmeleitung an die Frontplatte weitergegeben wird, wurde der Wärmeübergangsbereich mit einer Wärmeleitpaste eingestrichen. Um die Fläche der Frontplatte zu maximieren, ist diese auf die Fensternische mit einer Größe von 135 x 75 cm maßgeschneidert. An der Rückseite des wassergefüllten Stahlwärmekörpers wurde zur Reduzierung der rückseitigen Wärmeabgabe eine 5 cm dicke Polystyrol-Dämmung mit der Wärmeleitfähigkeit $\lambda=0,035 \text{ W/(mK)}$ angebracht. Durch diesen Heizungsaufbau hat der Strahlungsheizkörper laut Herstellerangaben einen Strahlungsanteil von bis zu 48 % [20].

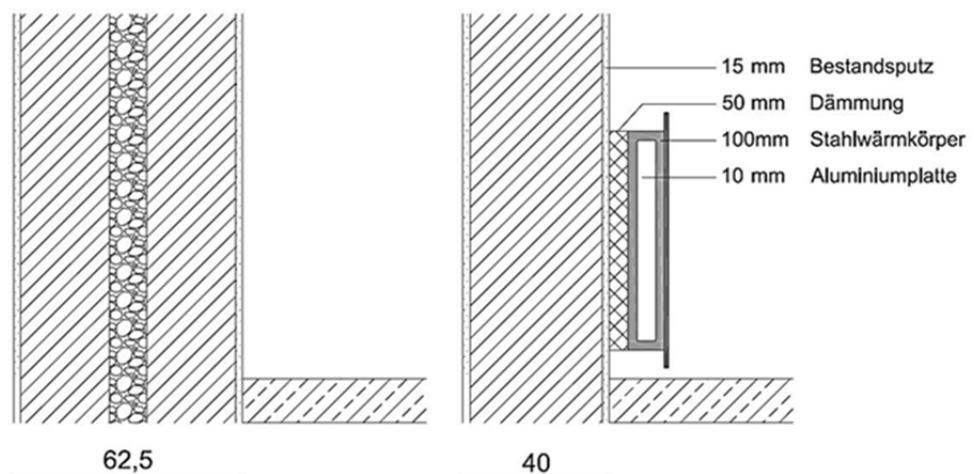


Bild 34:
Schematischer Aufbau des Strahlungsheizkörpers. Links der Aufbau der Außenwand, rechts der Aufbau in der Fensternische (der Außenwand).



Bild 35:
Strahlungsheizkörper in eingebautem Zustand.

Im Zuge der Messversuche in Benediktbeuern wurde die Strahlungsheizung mit flexiblen Vor- und Rücklaufschläuchen versehen und der Heizkörper, anders als üblich, mittels Muttern an ein Gewinde befestigt, so dass ein schneller Ausbau möglich ist. Diese Maßnahmen waren aufgrund der Vergleichsmessung notwendig, da die dazu benutzten elektrischen Heizkörper in die Fensternische gestellt werden.

Messraum 2: Wandheizung 1

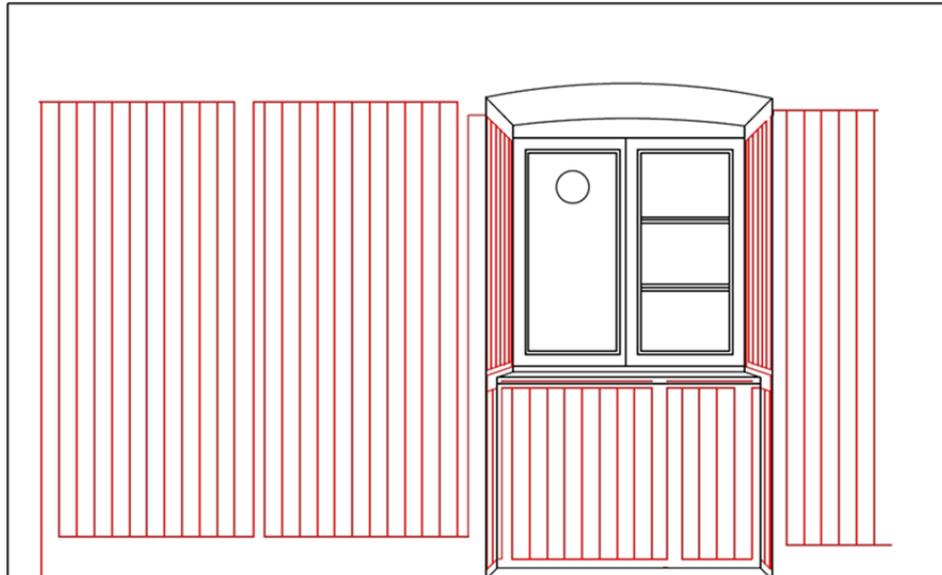


Bild 36:
Wandheizung 1 (rot) in Messraum 2. Innenansicht der Außenwand.

Das Wandheizungssystem zielt auf eine großflächige Temperierung der Außenwand. Der auf das Bestandsmauerwerk aufgebrachte Aufbau des Wandheizungssystems besteht aus mehreren Schichten (Bild 37).

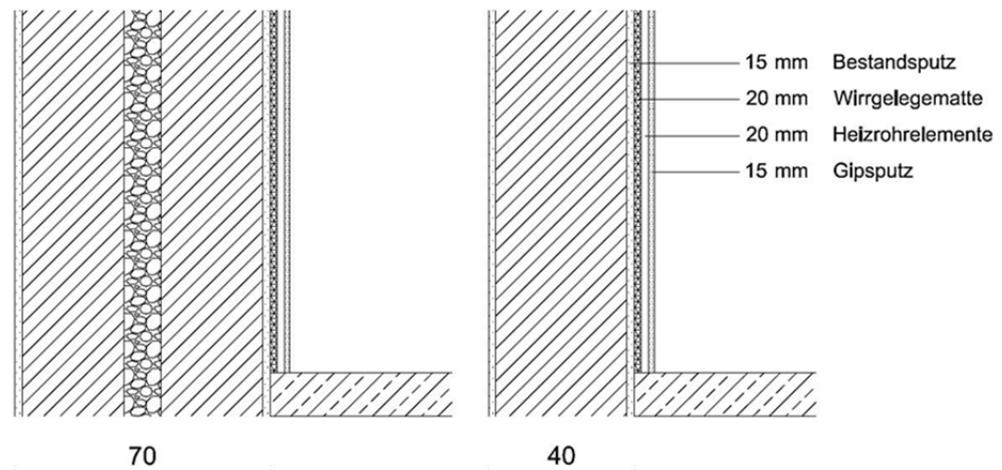


Bild 37:
Schematischer Aufbau der Wandheizung 1. Links der Aufbau auf der Außenwand, rechts der Wandaufbau in der Fensternische (der Außenwand).

Zunächst wurde eine Wirtgelegematte, wie sie aus der Geotechnik bekannt ist, mit Hilfe von Thermodübeln auf dem Bestandsmauerwerk befestigt. Diese zusätzliche, 2 cm dicke Konstruktionsschicht dient zum einen dem Ausgleich von Unebenheiten an der Bestandsoberfläche, zum anderen hat sie eine geringe wärmedämmende Wirkung, so dass sich der Anteil der Heizenergie, die in den Raum geleitet wird, leicht vergrößert.

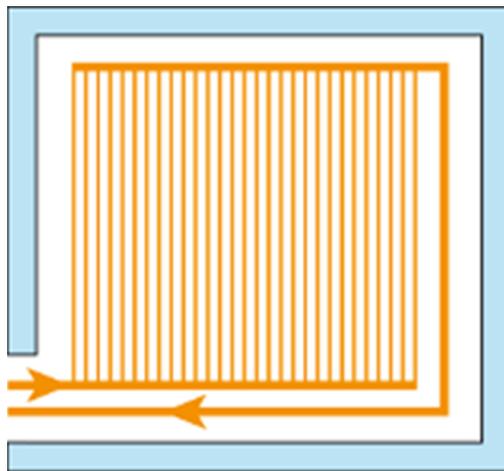


Bild 38:
Darstellung des Parallel-Prinzips nach Tichelmann [21].

Darauf befestigt ist ein parallel angeordnetes Netz an Kunststoffrohren, welches aus hintereinander geschalteten Fertigteilen, die miteinander verklebt sind, besteht. Die parallele Anordnung der Heizrohre, das sogenannte Tichelmannprinzip (siehe Bild 38), hat mehrere Vorteile. Besonders die gleichmäßige Verteilung der Oberflächentemperatur und die geringe Reaktionszeit des Systems sind hier zu nennen [21]. Die größeren Verbindungsrohre haben einen Durchmesser von 16 mm, die parallel angeordneten Heizrohre 10 mm Durchmesser. Der Abstand der Heizungsrohre beträgt 80 mm. Die Befestigung der Rohre er-

folgte mit Hilfe von Kunststoffklammern und Bändern. Der Abstand der Verbindungsrohre vom Boden beträgt ca. 20 cm, der von der Decke ca. 45 cm. Die Fensterlaibungen wurden auch mit Heizrohren versehen. Verputzt sind die Rohre mit einem HASIT 605 Armierungsmörtel, der bündig mit den Verbindungsrohren mit einer Dicke von 16 mm zweilagig aufgetragen und abgezogen wurde. Die oberste Lage des Wandflächenheizungsaufbaus besteht aus einem Oberflächenputz, der eine maximale Dicke von 5 mm haben soll.

Die großflächige Temperierung der Außenwandoberfläche hat den Vorteil, dass eine geringere Oberflächentemperatur genügt, um die gewünschte Temperatur im Raum herzustellen. Dadurch sollen sich auch die Luftströme aufgrund von Temperaturdifferenzen und die damit verbundene Menge an umherfliegenden Staubpartikeln verringern.



Bild 39:
Thermographie Messraum 2. Die parallel durchströmten Wandheizungselemente weisen eine homogene Verteilung der Temperatur über die Wandfläche auf.

Messraum 3: Wandtemperierung

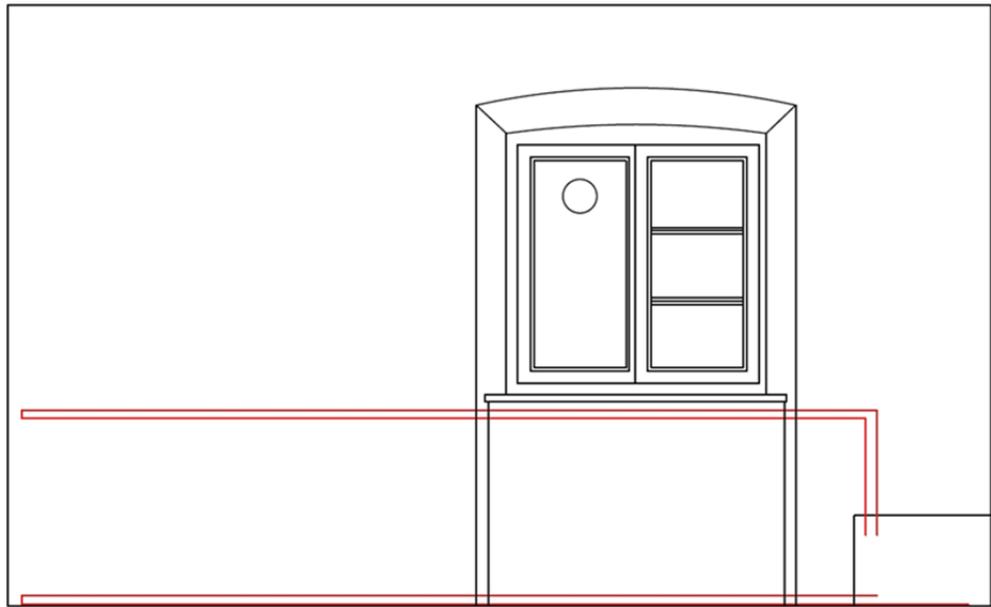


Bild 40:
Wandtemperierung (rot) in Messraum 3. Innenansicht der Außenwand.

Die Wandtemperierung wurde 1982 für die kontinuierliche Beheizung der Gebäudehülle zur Schadensvermeidung entwickelt. Seitdem wurde das System in einer großen Anzahl von Gebäuden eingebaut, vor allem im Bereich von Baudenkmälern. Die Meinungen der Fachleute gehen hinsichtlich des Systems der Bauteiltemperierung auseinander. Dies spiegelt sich auch in den Veröffentlichungen wider, die sich meist auf Messungen in Bestandsgebäuden, die mit einem solchen System ausgestattet sind, beziehen. Henning Großschmidt betont die positiven Effekte der Bauteiltemperierung [22], während unter anderem Dr.-Ing. Helmut Künzel diese Bauteiltemperierung in seinem Artikel [7] eher kritisch betrachtet. Langfristige praxisnahe, wissenschaftlich verwertbare Messungen an diesem System wurden jedoch noch nicht durchgeführt, sodass eine Bestätigung oder Widerlegung der positiven Effekte der Bauteiltemperierung nach Großschmidt auf einer ausreichenden Messdatengrundlage noch nicht erfolgen konnte.

Die Bauteiltemperierung nach Großschmidt beheizt den Messraum mithilfe einer Heizschleife im Sockelbereich (siehe Bild 41) und ggf. mit einer zusätzlichen Brüstungsschleife (Bild 42). Diese wurde in geringem Abstand über dem Boden bzw. unter der Fensterbrüstung in die Außenwand eingebaut. Die Überdeckung der Kupferheizrohre mit Putz beträgt zwischen 10 und 20 mm im Sockelbereich und 5 mm im Brüstungsbereich. Dazu wurde Kalkmörtel verwendet. Der Durchmesser der Kupferrohre wurde mit 15 mm gewählt.



Bild 41:
Heizschleife der Wandtemperierung im Sockelbereich mit Vor- und Rücklauf. Die Überdeckung der Kupferheizrohre mit Putz aus Kalkmörtel beträgt zwischen 10 und 20 mm im Sockelbereich und 5 mm im Brüstungsbereich.



Bild 42:
Nachträglicher Einbau einer 2. Heizschleife der Wandtemperierung mit Sperrventilen im Brüstungsbereich im Oktober 2012.

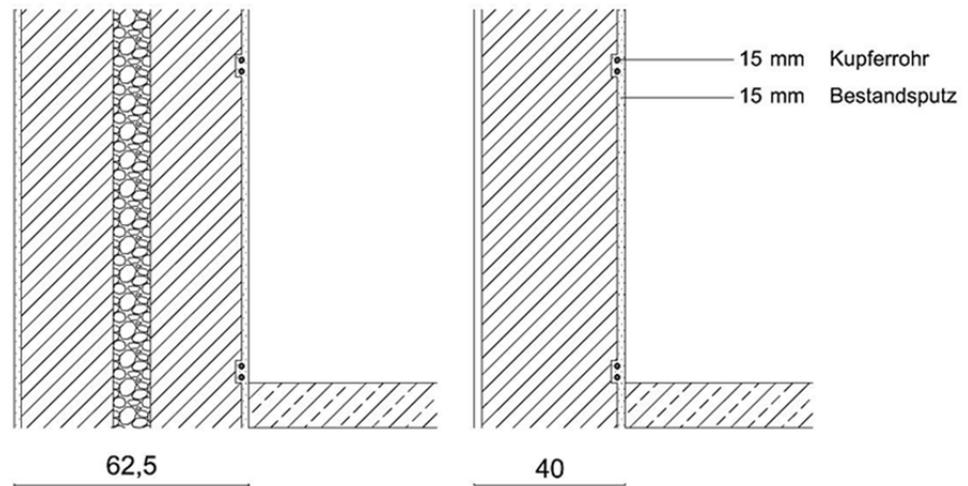


Bild 43:
Schematischer Aufbau der Bauteiltemperierung nach Großes Schmid. Links der Aufbau der Außenwand, rechts der Wandaufbau in der Fensternische (der Außenwand).

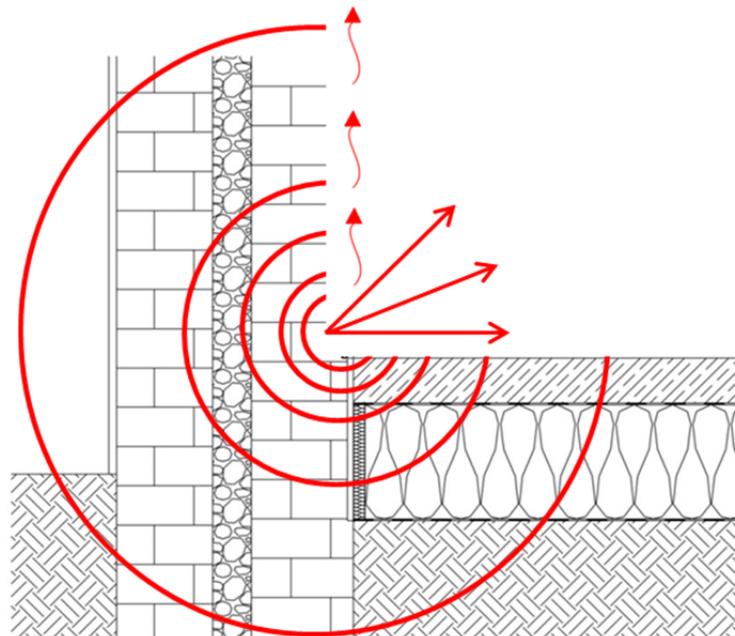


Bild 44:
Aufbau der Wandtemperierung im Kloster Benediktbeuern und primäres schematisches Wirkungsprinzip nach Großes Schmid.

In Bild 44 ist die Wirkung der Temperierung schematisch stark vereinfacht dargestellt. Schematisch angedeutet sind die Wärmeabgabe der Heizleitung mit direkter Wärmeleitung über das Bauteil, konvektiver Wärmeabgabe an die Raumluft sowie Strahlungswirkung der beheizten Wandoberfläche in den Raum. Die hohe Vorlauftemperatur von bis zu 65 °C führt zu einem etwa 10 cm bis 20 cm breiten Streifen mit einer hohen Oberflächentemperatur von ca. 40 °C im Be-

reich der Temperierung. Daraus resultiert zum einen eine Wärmestrahlung (siehe Bild 44, gerade Pfeile) in Raumrichtung, zum anderen ein konvektiver Wärmeluftstrom entlang der Innenoberfläche der Außenwand (siehe Bild 44, gewellte Pfeile). Zudem bewirkt die Beheizung, vor allem bei einem durchfeuchteten Sockelbereich, eine Austrocknung des Mauerwerks im anliegenden Bereich. Der Betrieb der Wandtemperierung läuft in zwei Phasen ab. In der ersten Phase

Der Einbau der Wandtemperierung in Messraum 3 wurde mit Henning Grobeschmidt, Restaurator von der Landesstelle für die Nichtstaatlichen Museen in Bayern a.D., bei einem Ortstermin im Jahr 2012 in Benediktbeuern besprochen und nach seinen Angaben modifiziert.

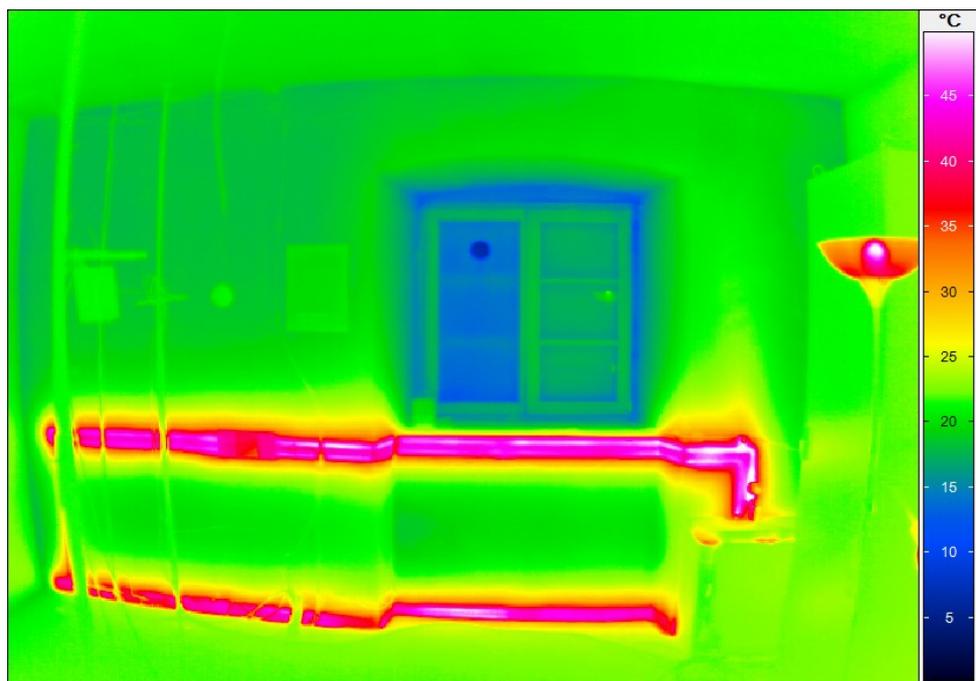


Bild 45:
Thermographie Messraum 3. Die Bauteiltemperierung wird mit einer Sockel- und einer Brüstungsschleife mit je 2 Rohren betrieben, um im Winter ausreichend Wärme bereitzustellen.

Messraum 4: Wandheizung 2

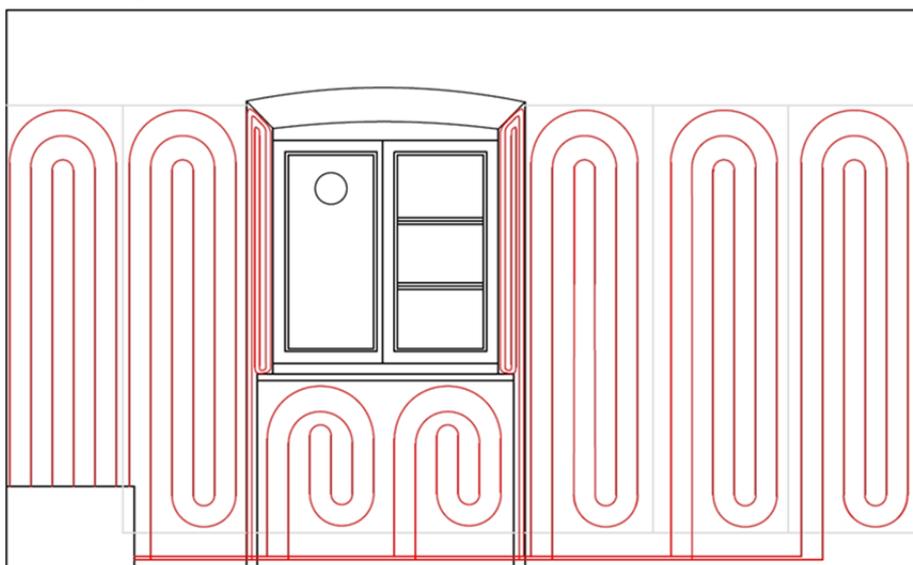


Bild 46:
Heizsystem mit Lehm- bauplatten (rot) in Messraum 4. Innenansicht der Außenwand.

Das zweite Wandheizungssystem besteht aus verschiedenen zusammenfügbaren Elementen aus Lehm- mörtel, der mit Stroh und anderen natürlichen Zusatzstoffen aufbereitet wurde. Des Weiteren befinden sich in den Platten zwei Lagen Glasfaser- Armierungsgewebe, um die Stabilität zu erhöhen.

Tabelle 17:
Materialeigenschaften der Wandheizung 2, [24] .

	Unterputz	Lehmplatte	Oberputz
Dicke	0,5 cm	2,5 cm	0,8 cm
λ	0,7 [W/(m ² K)]	0,44 [W/(m ² K)]	0,7 [W/(m ² K)]
ρ	1600 [kg/m ³]	1440 [kg/m ³]	1700 [kg/m ³]
Schwindmaß	$\leq 2,5$ %		$\leq 2,0$ %
Druckfestigkeit	$\geq 1,5$ [N/mm ²]	$> 2,5$ [N/mm ²]	$\geq 1,5$ [N/mm ²]

Zu unterscheiden sind beheizte Klimatelemente und unbeheizte Lehmplatten. Die beheizten Klimatelemente enthalten zusätzlich jeweils 16 mm starke Mehrschicht- Verbundrohre zur Beheizung, die nach dem Einbau in Reihe geschaltet werden. [25] .

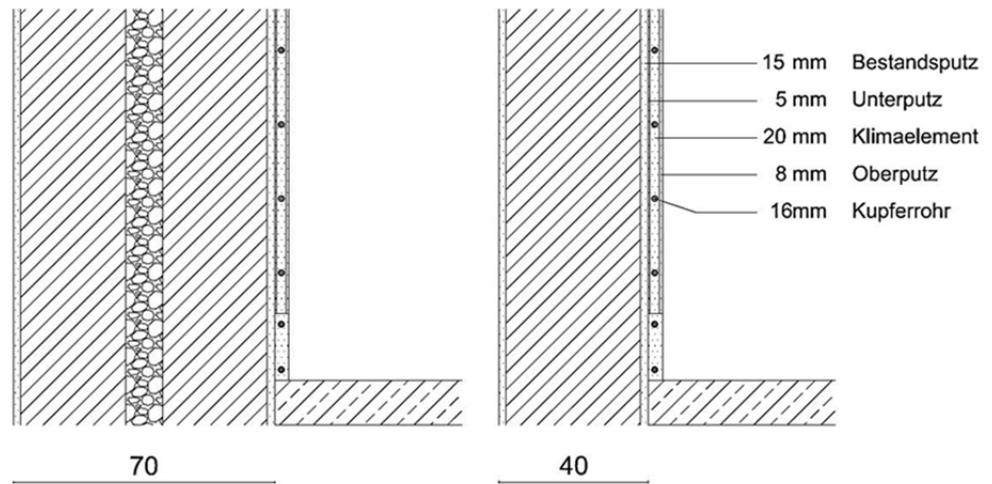


Bild 47:
Schematischer Aufbau der Wandflächenheizung mit Lehmbauplatten. Links der Aufbau der Außenwand, rechts der Wandaufbau in der Fensternische (der Außenwand).



Bild 48:
Einbau des Wandheizungssystems mit vorgefertigten Lehmbauplatten.

Beim Einbau der Flächenheizung wurde auf den Bestandputz zunächst ein Unterputz aufgetragen. Darauf wurden die Klimaelemente mithilfe von Haltetellern, unter Freilassung eines 18 cm breiten Streifens unter den Elementen für Vor- und Rücklauf, befestigt (siehe Bild 48). Zur Füllung der Fläche über den Klimaelementen wurden Lehmbauplatten eingesetzt. Das Zusammenfügen der Verbundrohre der einzelnen Klimaelemente erfolgte in Reihenschaltung unter Aufteilung der Wärmeflüsse in zwei verschiedene Heizkreise. Ferner wurde ein wärmebeständiges Putzgewebe zusammen mit dem Oberputz mit einer Dicke von 8 mm aufgebracht. Nach der Montage aller Leitungen für Vor- und Rücklauf, erfolgte das Verputzen der unteren 18 cm mitsamt den Leitungen.

Dieses Wärmeübergabesystem besitzt im Gegensatz zu den anderen untersuchten Heizungssystemen eine eigene Regelung und wird nicht zentral geregelt.

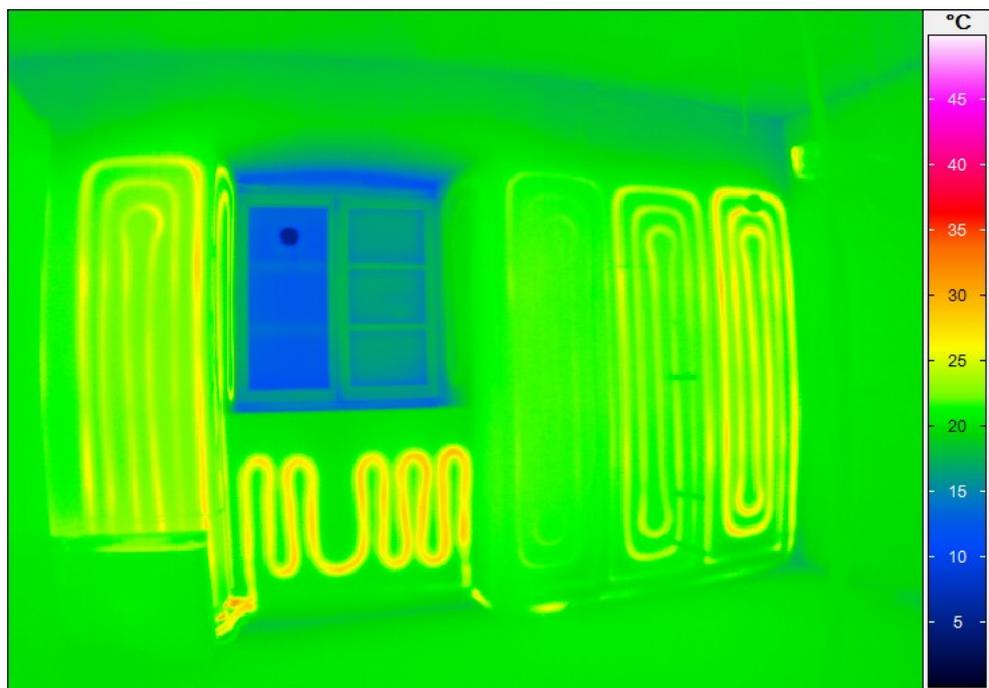


Bild 49:
Thermographie Messraum 3. Bei dieser Wandheizung sind die Heizleitungen mit Ausnahme der Fläche unter dem Fenster in vorgefertigten Lehmbau-elementen eingelegt.

Elektrische Heizung für Vergleichsmessungen

Bei den Heizungen für die Vergleichsmessungen handelt es sich um elektrische Heizkörper mit einer maximalen Heizleistung zwischen 1700 und 2200 W. Dabei wird in allen vier Messräumen dasselbe Modell benutzt, damit die Messungen vergleichbar sind. Ein zentrales Regelungssystem versorgt die Heizungen mit Strom, sodass eine konstante Raumtemperatur von 20 °C gehalten wird. Die entsprechenden Energieverbräuche werden gemessen und aufgezeichnet.



Bild 50:
Radiatorheizung für die Vergleichsmessung.

5.3.3 Regelung

Die Wandheizungssysteme werden aus einem Fernwärmeanschluss gespeist und über das Gebäudeautomationssystem des Zentrums geregelt. Für jedes Heizsystem wurden Heizkurven festgelegt und implementiert.

Mit den Heizkurven wird vorgegeben, welche Vorlauftemperatur bei bestimmten Außentemperaturen gefahren werden sollen. Die Software regelt in Bezug auf die gewünschte Innenlufttemperatur die Öffnung der Ventile und passt somit den Durchfluss im Heizkreislauf an.

Die Regelung der Messräume ist über eine Remotedesktopverbindung steuerbar und sowohl die gewünschte Innentemperatur als auch die Heizkurven können dadurch jederzeit angepasst werden.

Während den Messungen bei 20 °C Raumlufttemperatur waren für die Heizkurven folgende Parameter eingestellt:

Tabelle 18:
 Kenndaten für die Heizkurven der einzelnen Heizsysteme in °C.

Heizsystem	Außen-temp. 1	Vorlauf-temp. 1	Außen-temp. 2	Vorlauf-temp. 2
Strahlungsheizkörper	-16	70	10	35-45
Wandheizung 1	-15	40	10	30
Wandtemperierung	-15	70	10	60
Wandheizung 2	-15	50	10	30

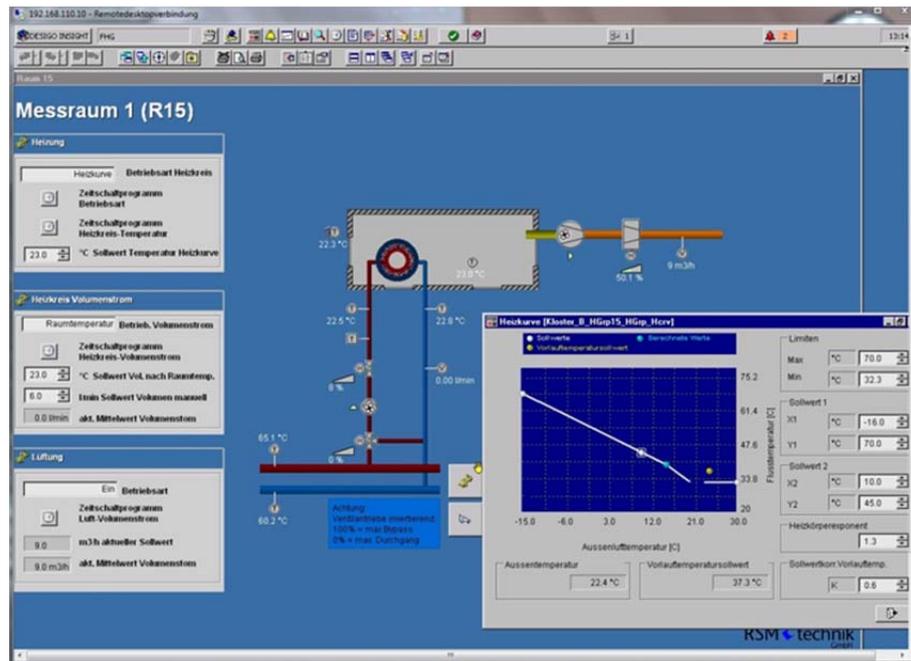


Bild 51:
 Benutzeroberfläche der Gebäudeautomation.

Die Zuluftrohre der Lüftungsanlage wurden durch den Kamin vom Dach, an dem die Frischluft angesaugt wird, zu den Messräumen geleitet und von dort aus durch Rohre in die Messräume geblasen. Dabei wird das Zuluftvolumen durch die Gebäudeautomation in allen Messräumen auf 9 m³/h geregelt, was einer Luftwechselrate von $n=0,2 \text{ h}^{-1}$ entspricht.

5.3.4 Sensorik

Platin-Widerstands-Temperatursensor PT100

Der PT100 Sensor besitzt einen Platin-Messwiderstand mit bekannten, von der Temperatur abhängigen elektrischen Eigenschaften. Bei einer Temperatur von 0 °C beträgt dieser Widerstand 100 Ohm. Mit Hilfe einer Kalibrierkurve lässt sich anhand des Messwiderstands die Temperatur bestimmen [26]

Zur Beseitigung des Einflusses des Kabelwiderstands werden die PT100 Wärmesensoren mithilfe einer Vierleitertechnik an den Messschrank angeschlossen. Dies gewährleistet eine möglichst genaue Messung. Der PT100 kann sowohl zur Messung von Lufttemperaturen, als auch zur Messung von Oberflächentemperaturen verwendet werden.

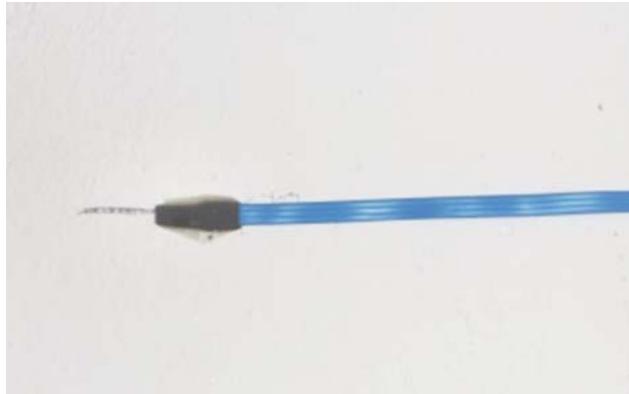


Bild 52:
PT100 Sensor zur Oberflächentemperaturmessung.

Beim Aufbringen eines PT100 Sensors auf eine Oberfläche ist darauf zu achten, dass sich keine Luftblasen zwischen Sensor und Oberfläche bilden, da die Messungen hierdurch verfälscht werden. Zudem sollen die Sensoren möglichst parallel zu den Isothermen angebracht werden, sodass über die gesamte Sensorlänge und einen Teil der Vierleiter dieselbe Temperatur herrscht.

Die Sensoren, die hier verwendet wurden am Fraunhofer IBP auf 1/3 der nach DIN EN 60751 für die Klasse B geforderte Grenzabweichung kalibriert.

Messgenauigkeit:

$$\pm(0,1^{\circ}\text{C} + 0,0017|t|) \text{ Grenzabweichung}$$

t Temperatur

Feuchtesensor

Der verwendete Feuchtesensor ist ein Kombi-Sensor, der sowohl relative Feuchte, als auch Temperatur misst. Die Temperaturmessung erfolgt mittels eines PT100 Sensors. Bei der Feuchtemessung handelt es sich um eine kapazitive Feuchtemessung. Dabei wird die relative Feuchte der Umgebungsluft mittels eines Kondensators gemessen, dessen Elektroden ein wasseraufnehmendes Polymer umschließen. Das Polymer befindet sich in einem Gleichgewichtszustand mit der Umgebungsluft. Aus der Kapazität des Kondensators lässt sich die relative Feuchte des Polymers und damit auch der Umgebungsluft berechnen.



Bild 53:
Kombinierter Wärme- und Feuchtesensor am Messbaum.

Messgenauigkeit (laut Herstellerangabe) [Ahlborn-1]:

$\pm 1,3$ % relative Feuchte bei 23 °C

$\pm 0,2$ K bei 23 °C

Globe – Thermometer

Das Globe-Thermometer oder Kugel-Thermometer dient der Bestimmung der mittleren Strahlungstemperatur, welche für die Behaglichkeitsbetrachtung in Form der operativen Temperatur benötigt wird. Es besteht aus einer geschwärzten Kugel mit einem Emissionsgrad $\epsilon = 0,95$, in dessen Mitte ein PT100 Sensor zur Temperaturmessung angebracht ist. Der Durchmesser der in den Messräumen verwendeten Standardkugel beträgt 15 cm, dieser ist jedoch physikalisch unbedeutend. Die Messung der mittleren Strahlungstemperatur erfolgt nach DIN EN ISO 7726.



Bild 54:
Globe-Thermometer.

Das Globe-Thermometer wird in den zu messenden Raum aufgehängt. Nun entsteht im Inneren der Kugel ein thermisches Gleichgewicht zwischen der durch Konvektion und Wärmeleitung aufgenommenen Raumlufttemperatur und der Strahlungstemperatur, infolge des hohen Emissionsgrads der schwarzen Farbe. Die Strahlungstemperatur ist abhängig von dem langwelligen Strahlungsaustausch zwischen den raumumschließenden Flächen und der geschwärzten Kugel [27].

Das Globe-Thermometer wird hier zur Bestimmung der mittleren Strahlungstemperatur nach den Vorgaben der DIN EN ISO 7726 verwendet. Dazu benötigt man außerdem die Geschwindigkeit und die Temperatur der Luft, die das Globe-Thermometer umströmt.

$$\bar{t}_r = [(t_g + 273)^4 + 2,5 \times 10^8 \times v_a^{0,6} \times (t_g - t_a)]^{1/4} - 273$$

\bar{t}_r mittlere Strahlungstemperatur in °C

t_g Globe-Temperatur in Kelvin

v_a Luftgeschwindigkeit in m/s

t_a Temperatur der Umgebungsluft in Kelvin

Mit der mittleren Strahlungstemperatur und der Temperatur der Raumluft lässt sich außerdem die Operativtemperatur errechnen.

Messgenauigkeit (laut Herstellerangabe) [28] :

Klasse B, DIN EN 60751

$\pm(0,3^\circ\text{C} + 0,005|t|)$ *Grenzabweichung*

t Temperatur

Anemometer

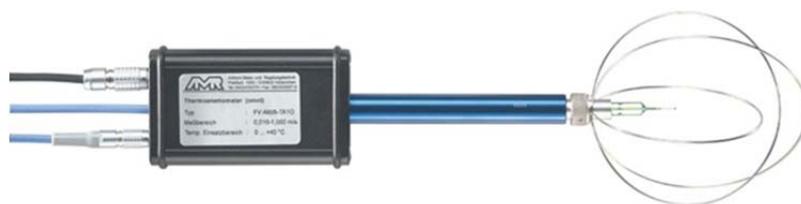


Bild 55:
Thermoelektrischer Strömungssensor bzw. Anemometer.

Das verwendete Anemometer ist ein Thermoelektrischer Strömungssensor, der aus einem Sondenrohr mit beheiztem Miniaturthermistor und einem Präzisions-NTC-Widerstand zur automatischen Kompensation aufgebaut ist.

Der Sensor ist als richtungsunabhängige Kugelspitze ausgeführt und von einem Schutzkorb umgeben. Zur belastbaren Bestimmung des Turbulenzgrades sollte ein Messtakt von 1s nicht überschritten werden.

Auflösung: 0,001 m/s

Messgenauigkeit (laut Herstellerangabe) [28] :

$\pm 1,0$ % vom Endwert und $\pm 1,5$ % vom Messwert, bei 22 °C

Wärmeflussplatten

Mit Hilfe der Wärmeflussplatte wird die Wärmestromdichte gemessen. Dazu wird die Platte am gewünschten Bauteil mithilfe von Wärmeleitpaste befestigt. Durch eine Kette von Thermoelementen kann durch die bekannten wärmetechnischen Eigenschaften der Wärmeflussplatte auf die Wärmestromdichte des anliegenden Bauteils geschlossen werden. Die Messung der Wärmestromdichte der Bauteile erfolgt an dem Punkt, an dem die Platte angebracht ist. Bei inhomogenem Mauerwerk, wie man es an den Außenwänden der Alten Schöfflerei findet, sind diese Messwerte deshalb unter Umständen nicht repräsentativ für das gesamte Mauerwerk. Aufgrund der unterschiedlichen Eigenschaften jeder Wärmeflussplatte sind die in mV ausgegebenen Werte mit einem Kalibrierwert zu multiplizieren (siehe Tabelle 19).



Bild 56:
Wärmeflussplatte.

Messgenauigkeit (laut Herstellerangabe):
Genauigkeit des Kalibrierwertes: 5 % bei Nenntemperatur

Tabelle 19:
Kalibrierfaktoren Wärmeflussplatten.

Außenwand Messraum:	Kalibrierfaktoren:
1	9,08 [W/mV]
2	9,23 [W/mV]
3	9,21 [W/mV]
4	9,31 [W/mV]

Pyranometer

Das Pyranometer dient der sensorischen Erfassung der globalen Sonneneinstrahlung. Dazu wird die einfallende Strahlung, die über ein Sichtfeld von 180° gemessen wird, durch die schwarze Oberflächenbeschichtung absorbiert und in Wärmeenergie umgewandelt. Diese Energie wird mittels eines passiven Thermofühlers, der sogenannten Thermosäule, gemessen und in eine Ausgangsspannung umgewandelt, die sich linear zur absorbierten Solarstrahlung verhält. Das Pyranometer misst dabei die Solarstrahlung mit einer Wellenlänge zwischen 310 nm und 2800 nm und deckt somit den ultravioletten, den sichtbaren und den ferninfraroten Bereich ab. Da sich die physikalischen Eigenschaften jeder Thermosäule unterscheiden, müssen die Ausgangsspannungen noch mit individuellen Kalibrierfaktoren multipliziert werden (siehe Tabelle 20) [29].



Bild 57:
Pyranometer zur Messung der Solarstrahlung.

Messgenauigkeit (laut Herstellerangabe):

95 % der Datenpunkte liegen innerhalb eines vorgegebenen Unsicherheitsrahmens

Tabelle 20:
Kalibrierfaktoren Pyranometer.

Außenwand Messraum:	Kalibrierfaktoren:
1	187,9 [W/m ² /mV]
2	121,6 [W/m ² /mV]
3	136,5 [W/m ² /mV]
4	130,8 [W/m ² /mV]

Durchflussmesser

Der Durchfluss der Heizung wird mit Hilfe von Ultraschallsignalen gemessen. Dazu sind zwei Sensoren (T1, T2), die als Sender und Empfänger von Ultraschallsignalen dienen, in einem Abstand L voneinander angeordnet (siehe Bild 58). Die Laufzeit zwischen den beiden Sensoren ist bei einem nicht vorhandenen Durchfluss in beide Richtungen identisch. Bei einer Durchströmung des Rohres ist die Laufzeit des Signals gegen die Strömung länger als mit der Strömung. Diese zum Durchfluss proportionale Differenz wird in die Durchflussmenge umgerechnet. [30].

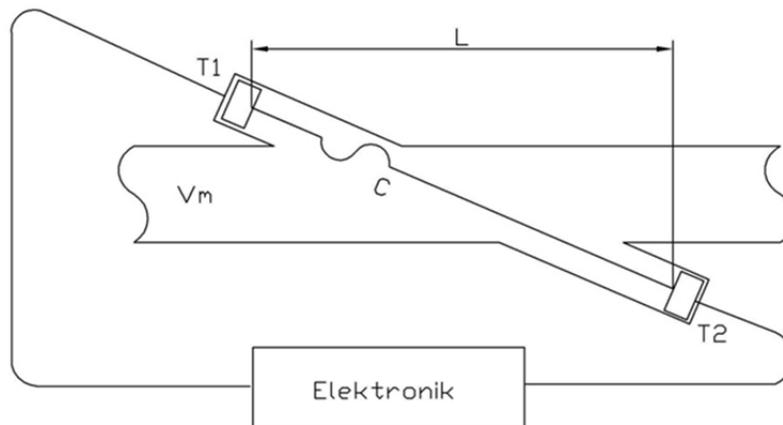


Bild 58:
Funktionsprinzip des Durchflussmessers.

Messgenauigkeit (laut Herstellerangabe):
Grenzabweichung 0,7 % vom Messwert + 0,7 % vom Endwert

Strömungsmesser

Der Lüftungszufluss wird mittels eines Strömungsmessers gemessen. Dieser basiert auf dem Messprinzip des thermischen Anemometers, das die Strömungsgeschwindigkeit anhand „der Messung der Wärmeübertragung zwischen einem erhitzten Feststoff und der Umgebungstemperatur“ [27] (S.53), erfasst. Dazu wird die Spitze des Anemometers in der Mitte des Zuluftrohres der Lüftungsanlage für die Messräume angebracht (siehe Bild 59). Um richtige Messergebnisse zu erhalten, muss der Sensor an eine Stelle mit laminaren Strömungen eingebaut werden. Dazu werden vom Hersteller Angaben zur Mindestlänge des geraden Rohres vor und nach dem Messpunkt gemacht.

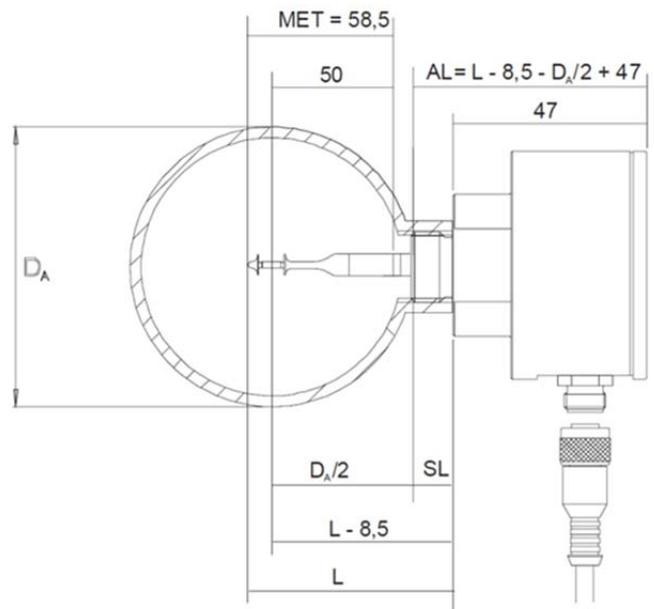


Bild 59:
Einbau Strömungsmesser [31] .

Messgenauigkeit (laut Herstellerangabe):
Grenzabweichung 3 % vom Messwert + 0,4 % vom Endwert

5.3.5 Messkonzept

Die Sensorik wurde in einem vorher festgelegten Messkonzept in den Messräumen installiert (siehe Bild 60). Die Positionen der Messfühler variieren aufgrund der unterschiedlichen Querschnitte der Messräume leicht, vom Prinzip her ist die Anordnung in den verschiedenen Messräumen jedoch gleich. In manchen Messräumen wurden wegen besonderer Umstände zusätzliche Messfühler angebracht.

Zur Messung im Raumprofil wurde ein Messbaum mit einer Reihe von Sensoren in jedem Raum (siehe Bild 61) mit ausreichendem Abstand zu allen Wänden positioniert, um einen überproportionalen Einfluss der Wände auf die Sensorik zu vermeiden (siehe Bild 62).

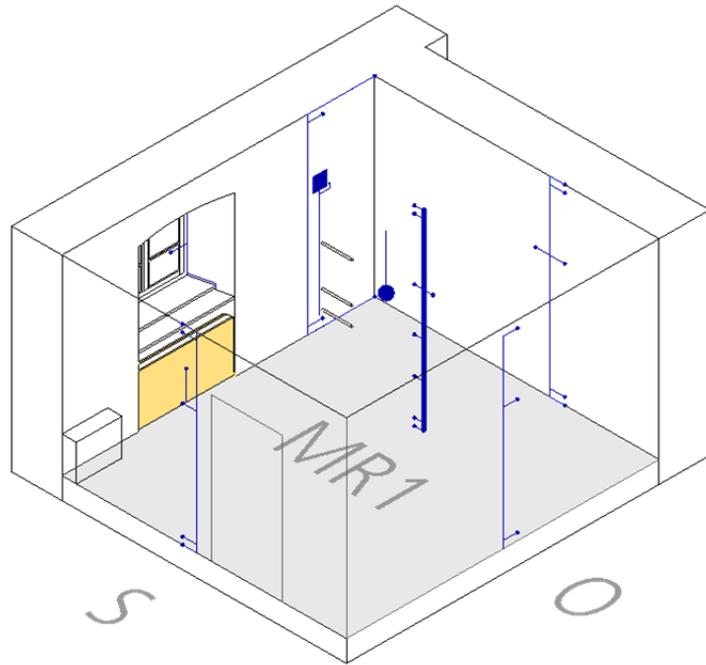


Bild 60:
Verlegeschema der Messtechnik am Beispiel von Messraum 1.

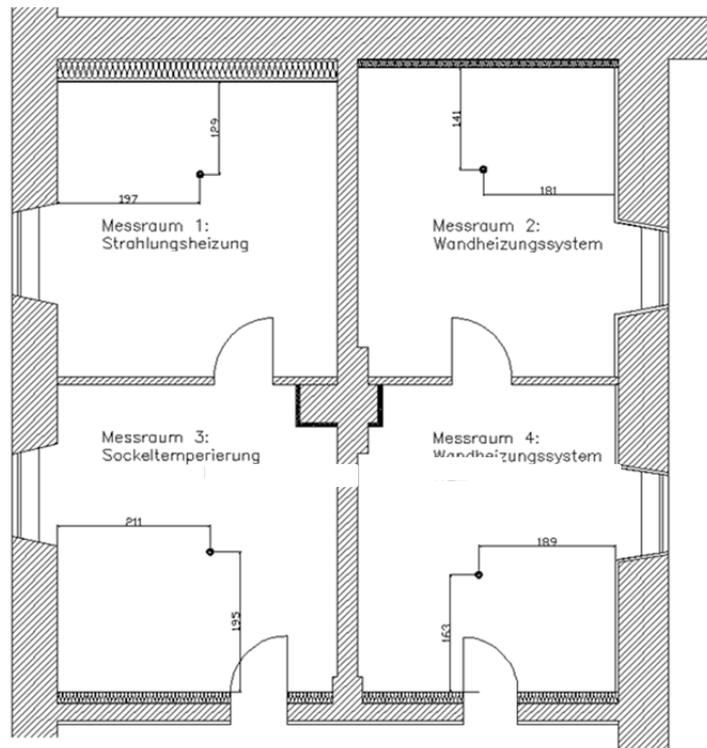


Bild 61:
Position der Messbäume.

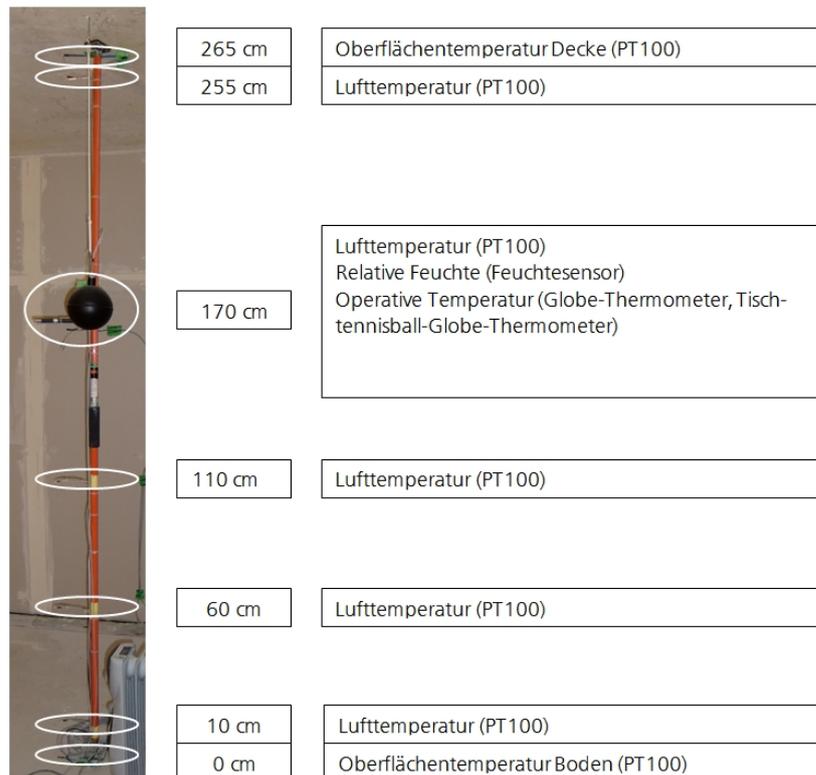


Bild 62:
Messbaum mit angebrachten Sensoren.

Die Messhöhen von 10 cm, 60 cm, 110 cm und 170 cm sind nach den empfohlenen Messhöhen aus EN ISO 7726:2001 Tabelle 40 gewählt worden. Dabei werden die Temperaturen in Knöchelhöhe (10 cm), die Temperaturen in Unterleibshöhe (sitzend: 60 cm; stehend 110 cm) und die Temperaturen in Kopfhöhe (sitzend 110 cm; stehend 170 cm) gemessen.

An den verschiedenen raumumschließenden Wandflächen werden die Oberflächentemperaturen in unterschiedlichen Höhen gemessen. An den Außenwänden befindet sich zusätzlich jeweils eine Wärmeflussplatte zur Bestimmung des Wärmestroms und PT100 Sensoren an den geometrischen Wärmebrücken zwischen Wänden und Decke bzw. Boden (Bild 63).



Bild 63:
Messpositionen Außenwand.

Zusätzlich werden die äußeren Oberflächentemperaturen an jedem Messraum mithilfe von PT100 Sensoren und die einfallende Solarstrahlung mittels Pyranometer gemessen. An den Innenoberflächen der Fensterscheiben befindet sich jeweils ein PT100 Sensor zur Bestimmung der Oberflächentemperatur. Im Rahmen der Anlagentechnik werden Vorlauftemperatur, Rücklauftemperatur und die Durchflussmengen von Heizmedium und Frischluft der Lüftung ermittelt. In den Perioden der Vergleichsmessung mit den elektrischen Heizkörpern finden Messungen der Leistung der Heizkörper statt. Die Temperatur des Lüftungszuflusses wird kurz nach Eintritt in den Raum in der Mitte des Rohres bestimmt (Bild 64).



Bild 64:
Temperaturmessung im Bereich der Zuluftleitung.

Im Messraum 1 mit der Strahlungsheizung wurden zusätzlich drei Temperatursensoren und eine Wärmeflussplatte angebracht. Die PT100 Sensoren zur Temperaturmessung sind auf der Oberfläche der Strahlungsheizung, auf der Wandoberfläche hinter der Strahlungsheizung und auf der äußeren Außenwandoberfläche auf Höhe des Heizkörpers befestigt. Die Wärmeflussplatte befindet sich an der Außenwand hinter der Heizung.

Das Wandheizungssystem in Messraum 2 wird in Form eines zusätzlichen Wandaufbaus an der Innenseite der Außenwand eingebaut. Zur genaueren Vermessung der Wärmeabgabe dieses Systems wurden zusätzliche Temperatursensoren auf dem überbauten Bestandputz in einer Höhe von 10 cm, 170 cm und 255 cm angebracht. Ein weiterer PT100 Sensor wurde auf der Wirrgelege in 170 cm Höhe befestigt (siehe auch Bild 65). Zusätzlich werden in Messraum 2 die Temperaturen des Bodenaufbaus in verschiedenen Tiefen gemessen. Dazu wurden auf Höhe des Messbaums und nahe der Außenwand PT100 Sensoren an den Schichtgrenzen und in 1 m Tiefe angebracht.

Zur Bestimmung der Temperaturverteilung in der Wand auf Höhe der Heizschleife wurden in Messraum 3 zusätzliche PT100 Sensoren mit einem Abstand von 10 cm, 20 cm und 30 cm von der Innenwandoberfläche in der Wand installiert. Ferner wurde an der Nahtstelle zwischen Boden und Mauerwerk ein Temperatursensor schräg eingeführt (siehe Bild 65, rot markiert) sowie ein weiterer Sensor auf einer Höhe von 170 cm in einem Abstand von 30 cm von der Wandoberfläche im Mauerwerk eingesetzt.

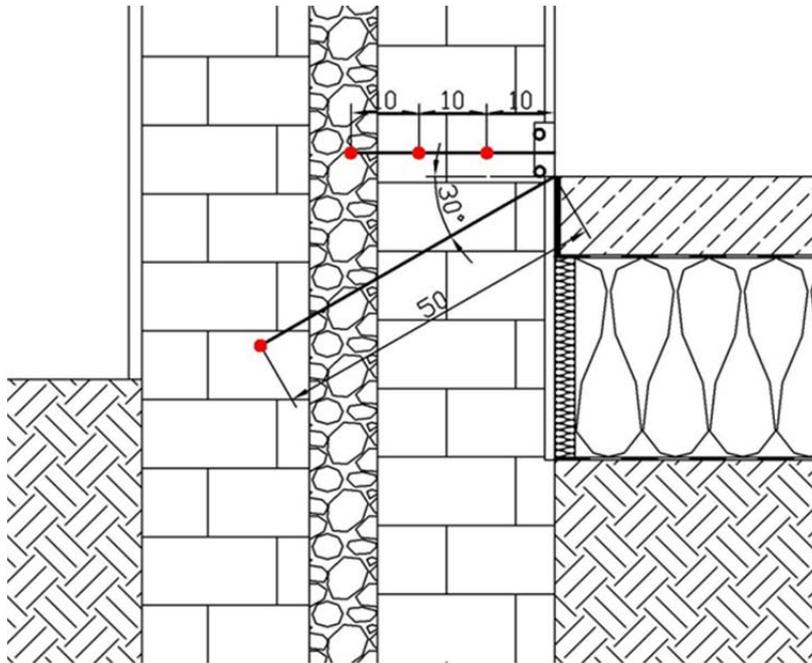


Bild 65:
Messstellen Messraum 3.

Im Messraum 4 wurden, wie im Messraum 2, zusätzliche Temperatursensoren in einer Höhe von 10 cm, 170 cm und 255 cm auf dem Bestandsputz angebracht.

Während der Messungen wurden noch zusätzliche Sensoren hinzugefügt. Dabei ging es vor allem um eine genauere Erfassung der Randbedingungen. Zum einen wurden die Lufttemperaturen im ersten Obergeschoss ab der Messperiode Winter 2012 / 2013 erfasst, zusätzlich die Temperatur im Treppenhaus und die Außentemperaturen innerhalb der Verschattung an beiden Seiten. Auch die Wärmeströme durch die Nordwände von Messraum 1 und 2 zur Jugendherberge wurden durch Wärmeflussplatten erfasst. Zusätzlich wurden mit dem Einbau der zweiten Heizschleife in Messraum 3 zusätzliche Sensorik zur Erfassung der entsprechenden Kenngrößen eingebaut. Hierbei handelte es sich um die Erfassung von Vorlauf- und Rücklauftemperatur, des Durchflusses und der Oberflächentemperatur auf 1m Höhe, was der Höhe der zweiten Heizschleife entspricht.

5.3.6 Visualisierung

Für die Messräume wurde ein Visualisierung programmiert (Bild 66), die eine Wandweise Darstellung der Sensoren (Bild 67) ermöglicht. Diese Form der Visualisierung erfolgte in Ergänzung zu den üblichen Möglichkeiten der internen Anzeige von Messdaten über die Software IMEDAS für die Präsentation der Ergebnisse gegenüber Dritten und Projektpartnern.

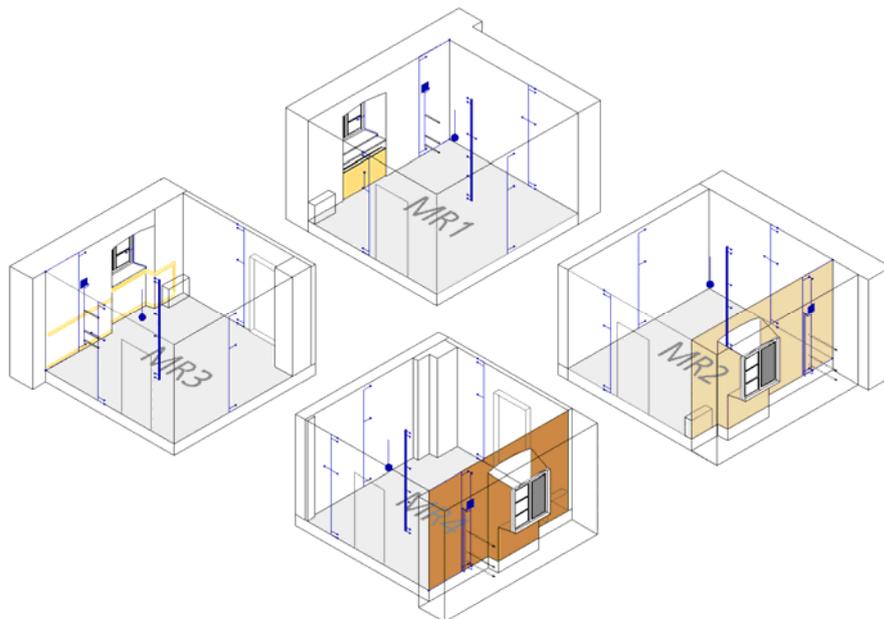


Bild 66:
Isometrie aller Messräume mit Sensorpositionen.

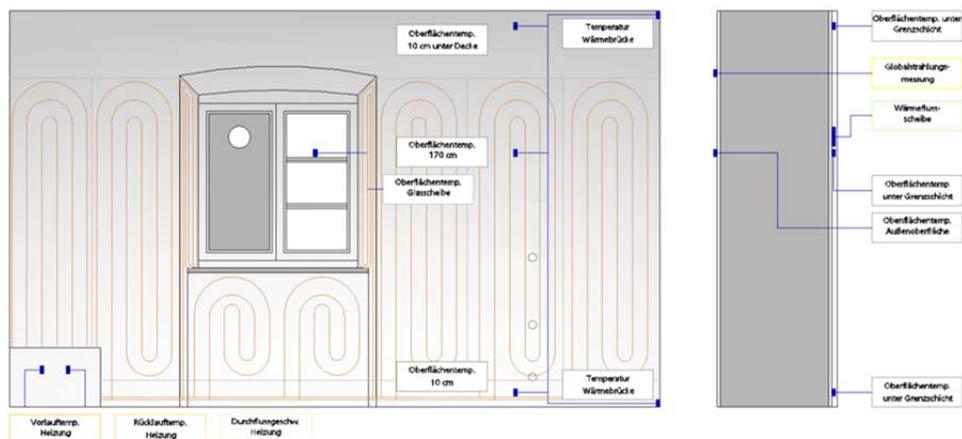


Bild 67:
Beispiel für die Visualisierung der Sensorpositionen an einer Außenwand mit Flächenheizungssystem.

5.3.7 Chronologie der Untersuchungen

1. Winter 2010 / 2011 - Nullmessung

Um zu beurteilen, inwieweit die einzelnen Messräume in Benediktbeuern sich voneinander unterscheiden, wurde im ersten Winter (2010 / 2011) eine Nullmessung durchgeführt.

Im Februar 2011 aktivierte das Fraunhofer IBP die elektrischen Heizkörper für die Nullmessung und beheizte die vier Messräume jeweils auf 20 °C. Im Zeitraum Mitte Februar bis Ende März 2011 lief die Nullmessung, um den Ist-Zustand der einzelnen Räume definieren zu können und auf etwaige Undichtigkeiten bzw. Wärmebrücken hinsichtlich der Versuche mit eingebauten Heizungssystemen reagieren und die Bedingungen optimieren zu können. Für die Nullmessung wurden Oberflächentemperaturen innen und außen, der Wärmestrom an der jeweiligen Außenwand innenseitig sowie die Raumlufttemperatur gemessen und aufgezeichnet.

Für die Betrachtung des Klimas kann auf die Wetterstation aus dem Meteome-dia-Messnetz zugegriffen werden. Die folgende Abbildung zeigt die Außenlufttemperatur und die relative Feuchte am Standort Benediktbeuern.

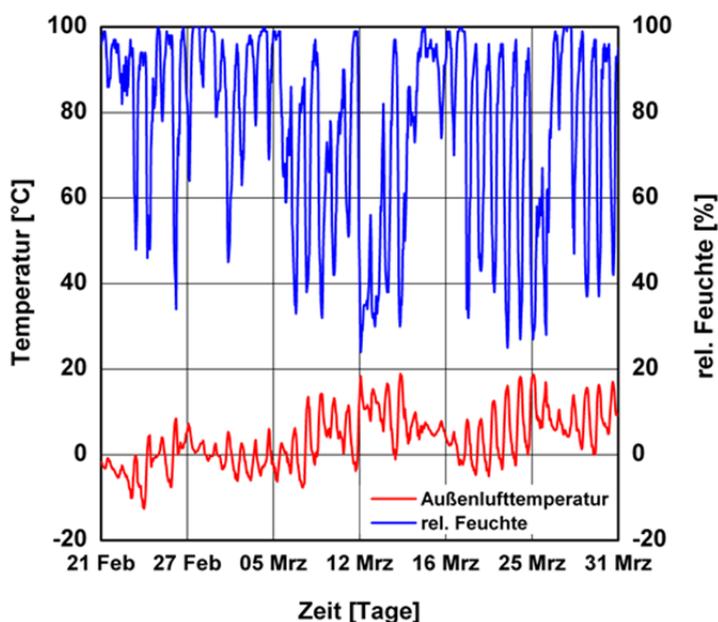


Bild 68:
Zeitlicher Verlauf des Klimas am Standort Benediktbeuern.

In den einzelnen Messräumen wurden Temperaturen an verschiedenen Stellen und die relative Luftfeuchte im Raum aufgezeichnet. Die folgenden Bilder zeigen die einzelnen aufgezeichneten Messgrößen je Messraum.

Hierbei kann festgestellt werden, dass die relative Feuchte im Messraum 1 am höchsten ist. Das ist teils darin begründet, dass in diesem Raum zum Ausgleich eine zusätzliche Wand eingebracht wurde und somit auch Baufeuchte.

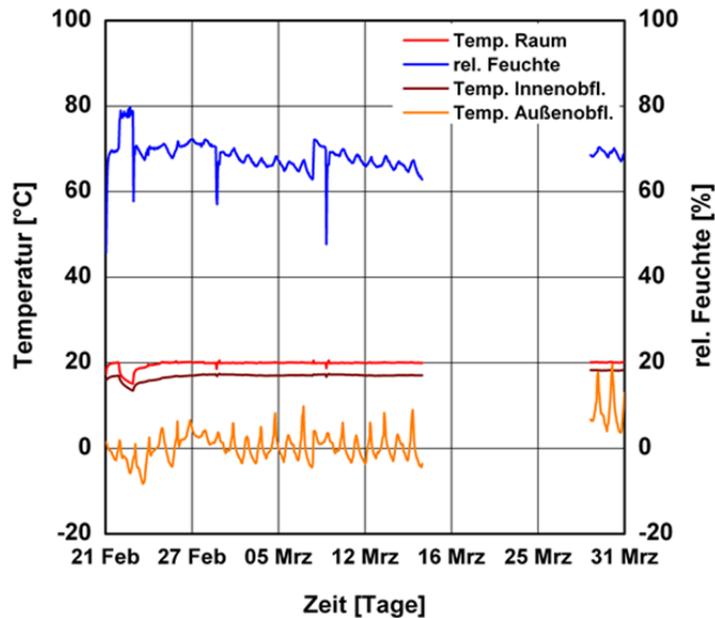


Bild 69: Darstellung der aufgezeichneten Messwerte über den Zeitraum der Nullmessung für Raum 1.

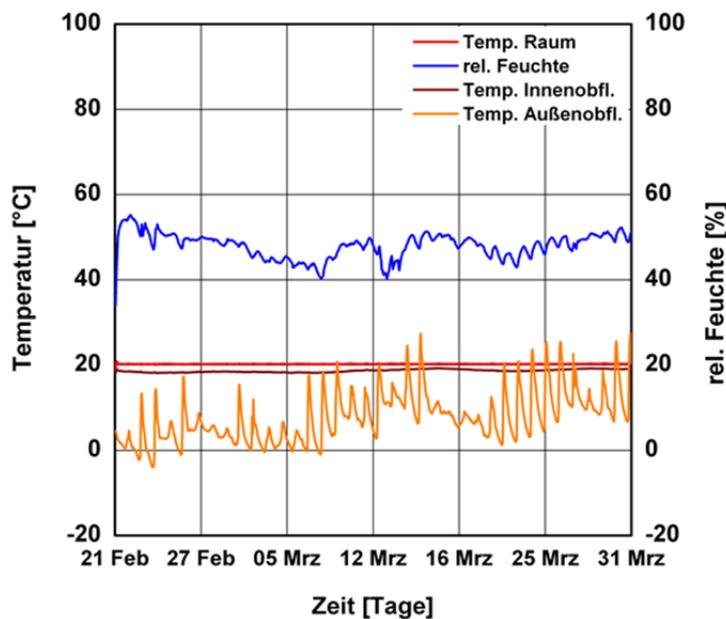


Bild 70: Darstellung der aufgezeichneten Messwerte über den Zeitraum der Nullmessung für Raum 2.

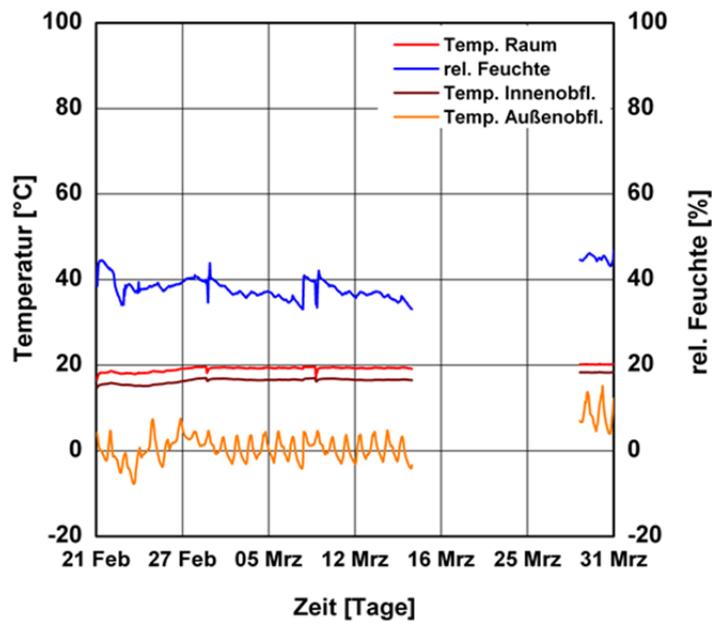


Bild 71:
Darstellung der aufgezeichneten Messwerte über den Zeitraum der Nullmes-
sung für Raum 3.

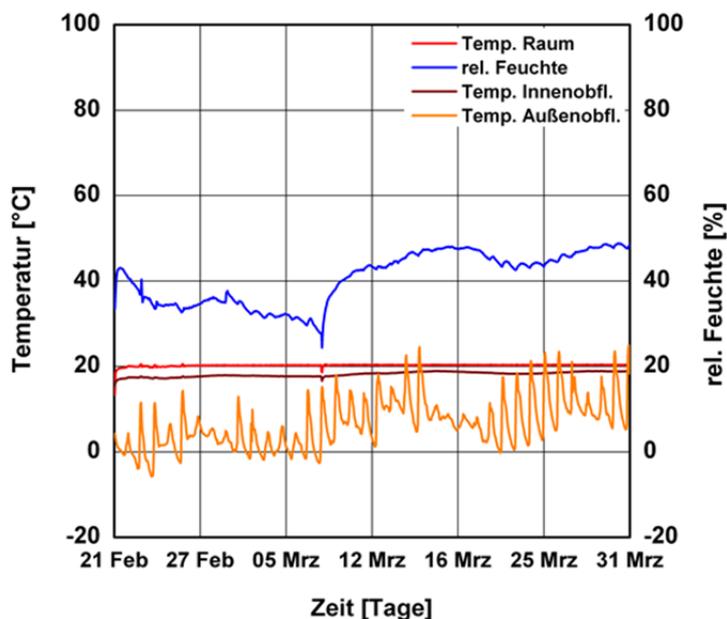


Bild 72:
Darstellung der aufgezeichneten Messwerte über den Zeitraum der Nullmes-
sung für Raum 4.

Die Temperatur in den Messräumen wurde mit Elektroradiatoren erzeugt und auf 20 °C geregelt. Gleichzeitig wurde der Stromverbrauch erfasst und zu Zeiten, an denen Personal vom Fraunhofer IBP im Nordbau der Alten Schäfllerei vor Ort waren, händisch aufgezeichnet. Das folgende Bild zeigt eine graphische Darstellung des Stromverbrauches. Hierbei fällt auf, dass der Verbrauch bei Messraum 3 und Raum 4 am höchsten ist. Dies ist zum Teil darin begründet,

dass diese Räume zum unbeheizten Treppenhaus angrenzen und die beiden anderen Räume zur Jugendherberge, welche in den Wintermonaten beheizt wurde. Der große Unterschied im Energieverbrauch könnte auch durch unterschiedliche Undichtigkeiten der Räume, z. B. der Türe zum Eingangsbereich, und durch Wärmebrücken begründet sein.

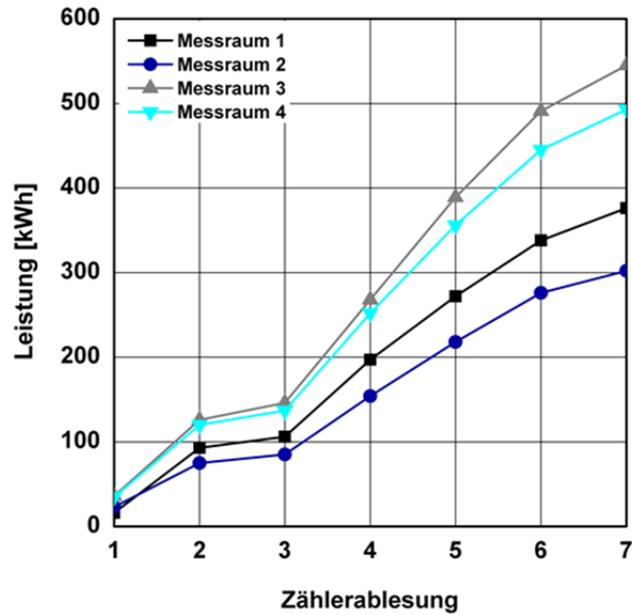


Bild 73:
Darstellung des abgelesenen Verbrauchs für die Heizleistung der jeweiligen Messräume.



Bild 74:
Ansicht der Geräte zur Bestimmung der Luftwechselrate. Im Bild rechts Blowerdoor-Messung und im Bild links die Tracergas-Messung.

Nach der abgeschlossenen Nullmessung wurden die Heiz-körper nochmals auf 20 °C geregelt, damit Anfang Mai 2011 eine Tracergas- (Bild 74 links) und Blowerdoor-Messungen (Bild 74 rechts) durchgeführt werden konnten.

Messung Luftwechsel mit Tracergas

Um die Luftwechselrate bestimmen zu können, wurde in den vier Messräumen eine Tracergas-Messung durchgeführt. Hierzu wurde die Messeinrichtung in allen Räumen aufgebaut. Bei den Messräumen (Raum 3 und 4), welche an das Treppenhaus angrenzen, wurden die Türen durch zusätzliche Maßnahmen abgedichtet. Die Ergebnisse der Messung sind in der Tabelle 21 und die zeitlichen Verläufe in Bild 75 dargestellt.

Für die Auswertung des Luftwechsels wird aus der, im Bild 75 dargestellten, Abklingkurven pro Messraum ein Zeitraum ausgewählt, anhand dessen der Luftwechsel berechnet wurde. Die blaue Kurve (Messraum 3) zeigt nach einiger Zeit einen starken Abfall, dies ist darin begründet dass mittels Zeitschaltuhr die Blower-Door-Messung gestartet wurde.

Tabelle 21:
Ergebnisse des Luftwechsels durch Tracergas-Messung, Mai 2011, vor Abdichtung der Räume.

Messort	Luftwechsel n [1/h]
Messraum 1	0,17
Messraum 2	0,14
Messraum 3	0,21
Messraum 4	0,17

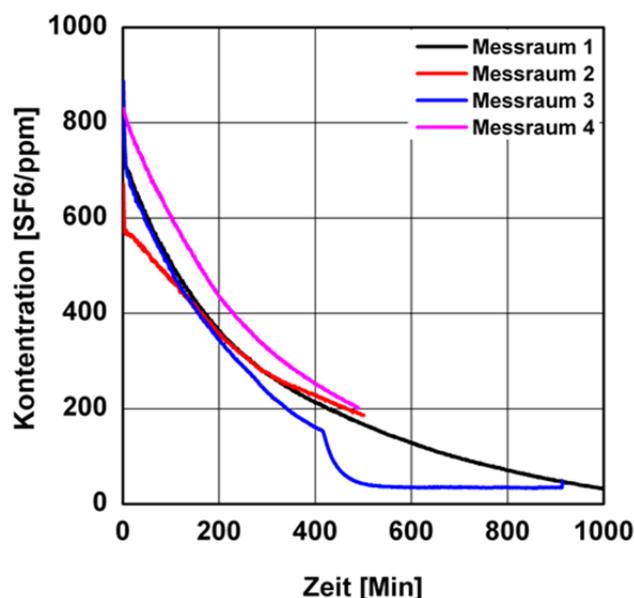


Bild 75:
Zeitlicher Verlauf über die Konzentrationsabnahme der Tracergas-Messung.

Leckageortung an der Gebäudehülle der Messräume

Zur Leckageortung erfolgte die Überprüfung Dichtheit mit Unterdruck und IR-Aufnahmen. Der Unterdruck wurde mit dem Blower Door Messgerät in den Messräumen 2 und 4 erzeugt. Dabei wurde der Ventilator über eine Zeitschaltuhr (ab 00:00 Uhr bzw. 4:00 Uhr) angesteuert, um die Nachtstunden mit kühleren Temperaturen nutzen zu können. Die Überprüfung auf Leckagestellen mit der IR-Kamera erfolgte dann in den Morgenstunden (zwischen 7:00 Uhr und 9:00 Uhr).

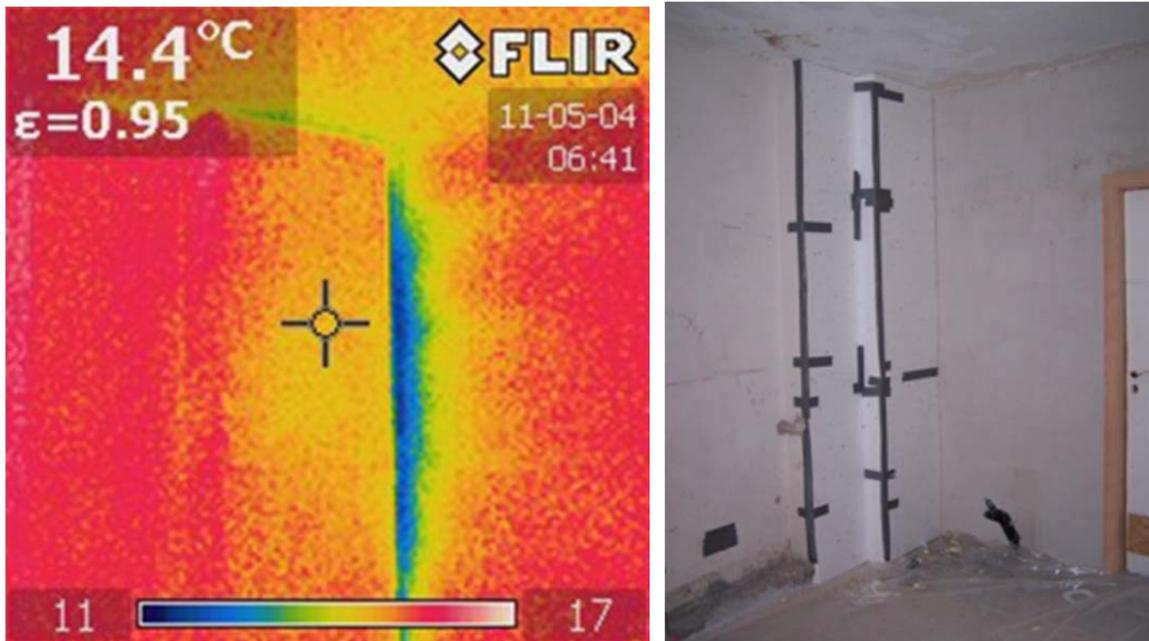


Bild 76:
Abkühlung durch einströmende Kaltluft im Messraum 4 zwischen Kamin und Innenwand.

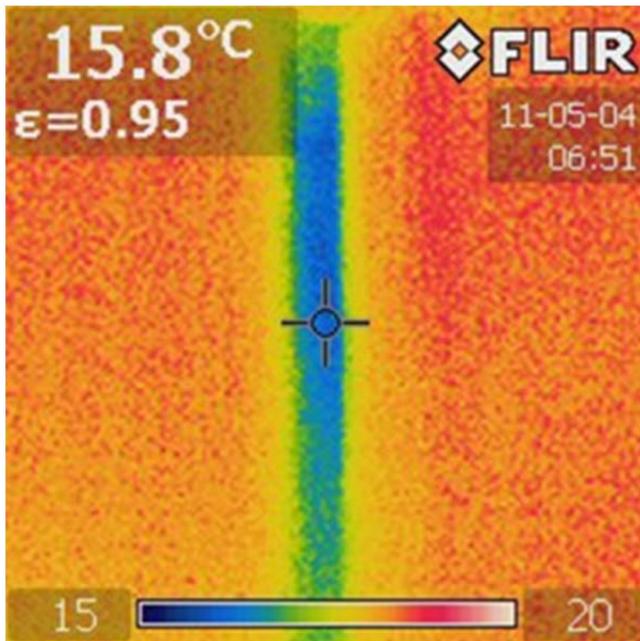


Bild 77:
 Unterkühlte Innenwand im Messraum 2 zum Messraum 4.

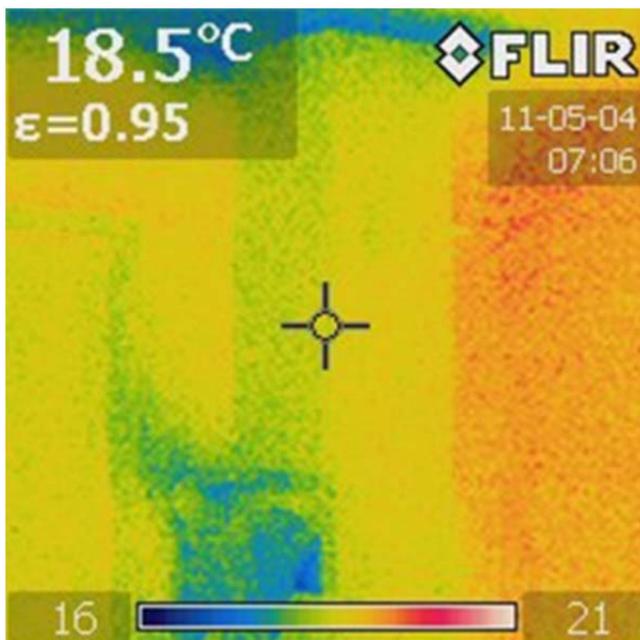


Bild 78:
 Unterkühlte Bereiche durch einströmende Kaltluft im Messraum 3.

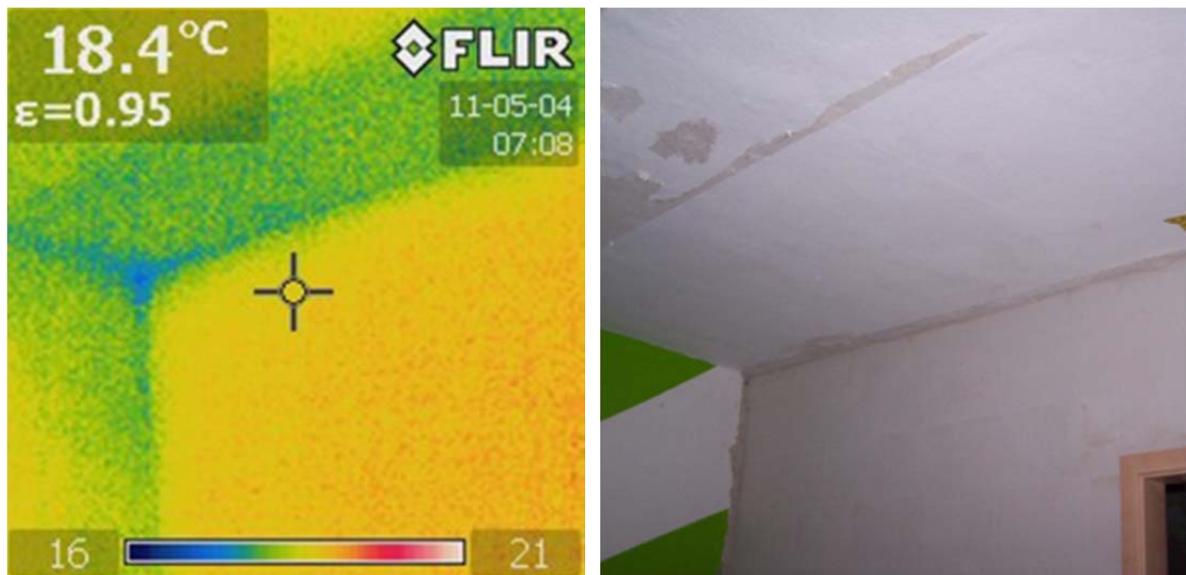


Bild 79:
Unterkühlter Deckenbereich im Messraum 3 vom Kamin bis zur Außenwand,
angrenzend zur Innenwand zwischen Messraum 1 im Messraum 3.

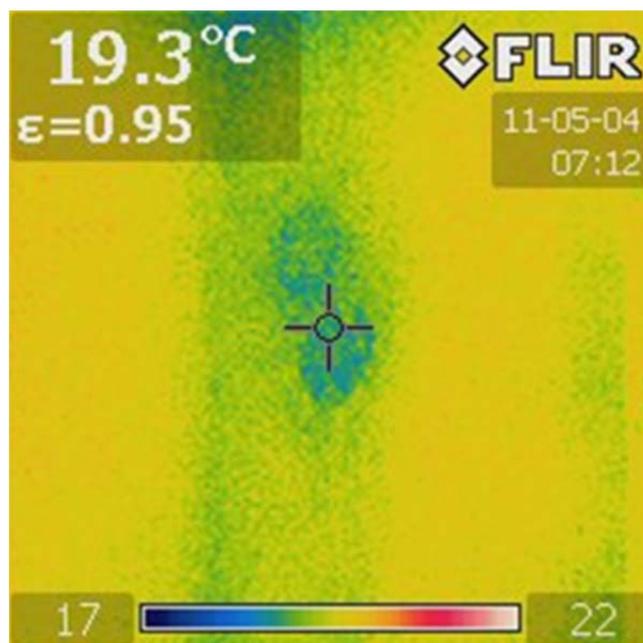


Bild 80:
Unterkühlung am Kamin im Messraum 1.

IR – Aufnahme Außenwände Messräume

Zusätzlich zur messtechnischen Begleitung wurden außenseitig IR-Aufnahmen vom Gebäude, aber hauptsächlich von den Messräumen, getätigt. Somit können eventuelle Wärmebrücken bzw. Wärmeverluste aufgezeigt werden. So ist zum Beispiel im Bereich des Messraums 3 eine deutliche Färbung im Bereich neben dem Fenster zu erkennen, wo vor einiger Zeit der Putz saniert wurde.

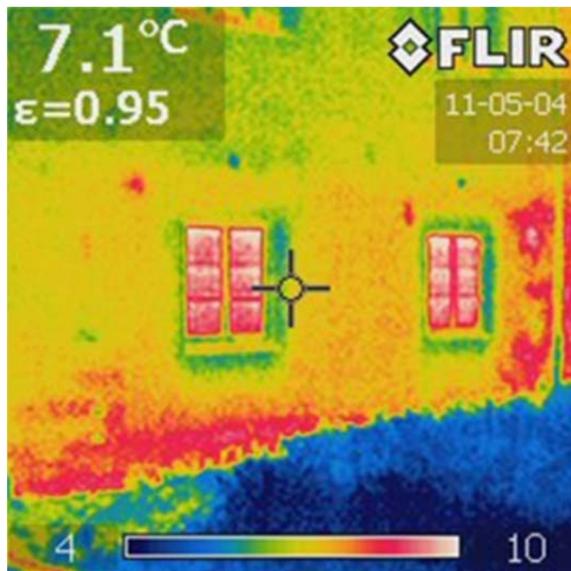


Bild 81:
Ansicht Ostseite Messräume 2 und 4.

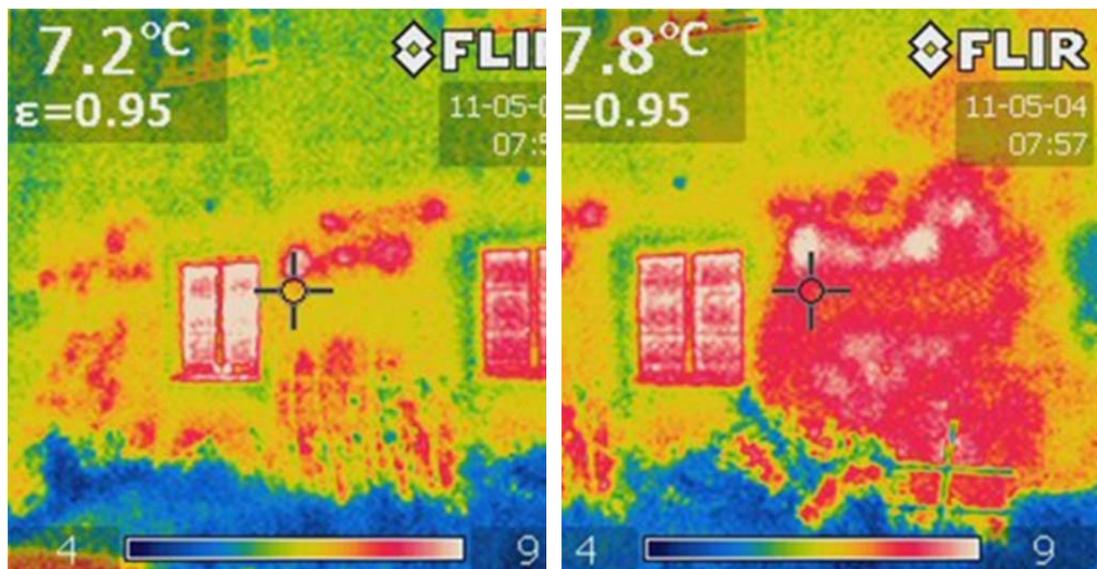


Bild 82:
Westseite, Bilder zusammengesetzt, Messräume 1 und 3. Im linken Bild sind Inhomogenitäten im Wandaufbau gut zu erkennen. Im rechten Bild wurde der Putz kurz vor dem Jahr 2010 in den hier rot dargestellten Bereichen erneuert.

Maßnahmen zur Verbesserung der Vergleichbarkeit Winter 2010 - 2011

- Dämmung des Bodens im EG mit Glasschaumschotter
- Dämmung des Bodens im OG mit Dämmplatten
- Dämmung der Wand zur Jugendherberge
- Dämmung der Wand zum Treppenhaus
- Abkleben der Fenster mit Spiegelfolie, um die solare Einstrahlung zu minimieren

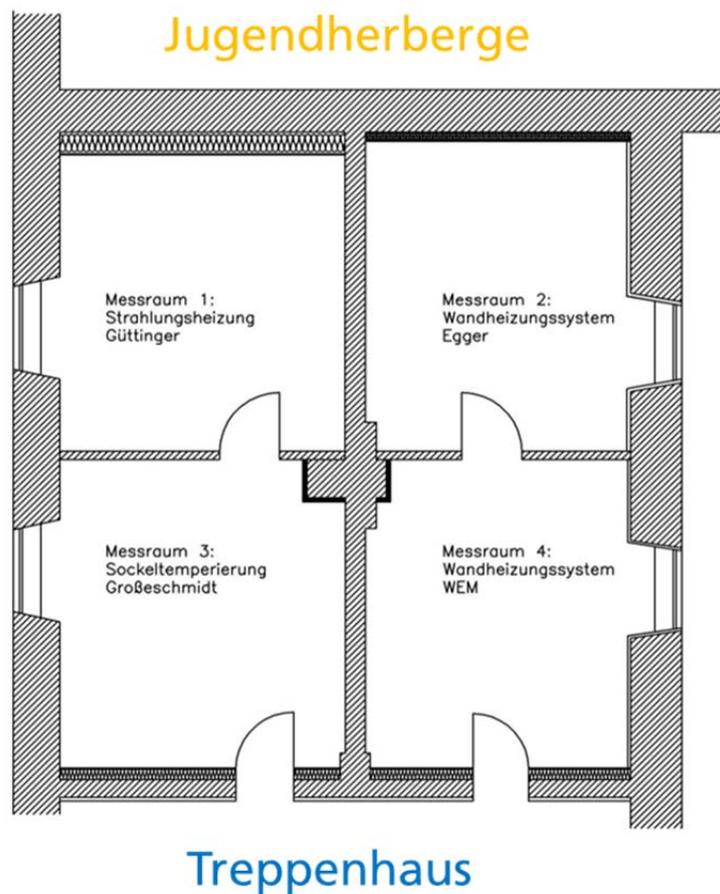


Bild 83:
Maßnahmen zur Verbesserung der Vergleichbarkeit der Messräume.

2. Winter 2011 / 2012

Aufgrund des Umzugs des Projekts von Weyarn nach Benediktbeuern haben sich auch die Einbaumaßnahmen verzögert. So konnte das letzte Heizungssystem erst Mitte Februar 2012 eingebaut werden. Aus diesen Gründen konnte die Messperiode Winter 2011/12 nur zur Einstellung der Regelungsparameter genutzt werden, nutzbare längere Messphasen mit konstanten Bedingungen und kalten Außentemperaturen konnten nicht ermittelt werden.

Zusätzlich wurden auf Grundlage der ersten Messungen Anpassungen des Messkonzeptes vorgenommen. Der ursprüngliche Plan, die Oberflächentemperaturen der Südwände der Messräume 3 und 4 auf die Oberflächentemperaturen der Nordwände von Messraum 1 und 2 mit Hilfe einer Wandheizung zu erwärmen, funktionierte aufgrund der Trägheit der Wände nicht. Um die dortigen Randbedingungen genauer definieren zu können, wurden deshalb Wärme-flussplatte an den Nordwänden der Messräume 1 und 2 angebracht. Zur Berechnung des Wärmestroms durch die Südwände der Messräume 3 und 4 in das Treppenhaus, wurde zunächst das Treppenhaus auf circa 20 Grad beheizt, um den Wärmestrom zu minimieren, zusätzlich wird die Raumlufttemperatur im Treppenhaus erfasst, um den Wärmestrom berechnen zu können. Auch in den Räumen über den Messräumen wurden zwei Sensoren zur Erfassung der Randbedingungen angebracht. Zuletzt werden nun auch die Lufttemperaturen innerhalb Verschattung erfasst, die aufgrund solarer Einstrahlung über den Außenlufttemperaturen liegen können.

Die Bauteiltemperierung erreichte in diesem Winter nicht die Zieltemperatur 20 °C, da im Sockelbereich nur eine Rohrschleife mit Vor- und Rücklauf eingebaut war. Hier wurde eine Veränderung des Systems in Form einer Erweiterung mit einer zweiten Schleife auf Brüstungshöhe notwendig.

Maßnahmen zur Verbesserung der Vergleichbarkeit Winter 2011 – 2012

- Reversibler Einbau dichter Türen zum Treppenhaus
- Beheizung der Wand zum Treppenhaus von außen mit einem Flächenheizungssystem
- Einbau der geregelten Lüftung für alle vier Räume
- Verschattung der Außenwände durch ein Baugerüst mit Plane

Zudem wurde die Entscheidung getroffen, dass die Räume nicht direkt untereinander verglichen werden können, sondern, dass jeder Raum mit sich selbst verglichen wird durch den Einsatz eines einheitlichen Referenzsystems, hier elektrische Heizkörper mit Erfassung der Endenergie.

3. Winter 2012 / 2013

In der zweiten Messperiode Winter 2012/13 konnte mit Hilfe der zusätzlichen Sensoren sowie der neu eingestellten Regelung der Heizsysteme eine konstante Regelung der Messräume auf 20 °C mit den eingebauten Heizungen erreicht werden. Zusätzlich dazu wurden ab Ende Januar Behaglichkeitsmessungen durchgeführt. Dabei wurden vor allem der PMV nach ISO 7730, also die vorausgesagte mittlere Bewertung des Raumes und verschiedene lokale Behaglichkeitskriterien untersucht.

Im Februar wurden dann die Messräume auf den elektrischen Heizbetrieb umgestellt. Auch hier wurde parallel zu den energetischen Messungen Behaglichkeitsmessungen als Vergleichswerte durchgeführt.

Bei der Auswertung der elektrischen Leistungsmessung fiel eine Unregelmäßigkeit bei den Messdaten auf. Eine Fehleranalyse ergab ein Schnittstellenproblem zwischen IMEDAS und der Erfassung der elektrischen Leistung. Aufgrund der Komplexität des Problems war eine nachträgliche Wiederherstellung der Daten nicht mehr möglich. Auch eine schnelle kostengünstige Lösung konnte nicht gefunden werden. Aus diesem Grund hat man beschlossen, die elektrische Leistungsmessung an die Gebäudeautomation anzuschließen. Dazu wurden Thyristorsteller installiert, die über die Gebäudeautomation gesteuert werden und in jedem Messraum je einen elektrischen Heizkörper regeln. An den Thyristorstellern wurde eine Stromstärkemessung installiert, aus der man die elektrische Leistung mittels Kalibrierkurven errechnen kann. Diese Maßnahmen konnten erst im Februar 2013 durchgeführt werden. Deshalb war eine energetische Bilanzierung der unterschiedlichen Heizsysteme zu diesem Zeitpunkt nicht möglich.

Maßnahmen zur Verbesserung der Vergleichbarkeit Winter 2012 – 2013

- Korrekturen an der Regeltechnik
- Erweiterung des Messkonzeptes
- Definierte Beheizung des Treppenhaus EG über Konvektoren anstatt durch Wandheizung
- Weiterhin Verschattung der Außenwände durch ein Baugerüst mit Plane
- Entwicklung eines Verfahrens zur Bilanzierung der Messräume

4. Winter 2013 / 2014

In der Messperiode Winter 2013/14 hat die Regelung der Messräume gut funktioniert. Bei der Aufzeichnung der Messdaten kam es zu Messausfällen einzelner Sensoren sowie zu einem Ausfall eines kompletten Datenloggers aufgrund eines Hersteller-Updates. Dieser Ausfall trat Anfang Januar 2014 auf, konnte aber noch im selben Monat behoben werden. Die Aufzeichnung der elektrischen Vergleichsmessung funktionierte nach Optimierung der Einstellungen zuverlässig und wurde durch eine Redundanzmessung mittels eines kalibrierten Leistungsmessgerätes kontrolliert. Nach Abschluss der Messungen im April 2014 werden die Daten validiert und umfassen ausgewertet.

5.4 Anpassung der Simulationssoftware und Evaluierung

Im Folgenden wird die Anpassung der Simulationssoftware für die Simulation thermischer und hygrischer Prozesse im Kontext der Beheizung von Räumen mit Wandheizungssystemen beschrieben. Hier wurden zahlreiche Weiterentwicklungen im Laufe des Projektes vorgenommen.

5.4.1 Kopplung zwischen zweidimensionaler Simulationsrechnung und Raummodell

Für die Weiterentwicklung von WUFI® Plus durch Kopplung mit einer zweidimensionalen Berechnung wird das Problem der Wärmebrücken herangezogen, da hierfür in der Literatur ausreichend gut dokumentierte Beispiele vorhanden sind, mit denen das neu entwickelte Programm validiert werden kann. Neben der Beurteilung des thermischen Einflusses von Wärmebrücken auf den Gebäudeenergiebedarf ermöglicht eine detaillierte Wärmebrückenberechnung auch die Bestimmung der Oberflächentemperaturen. In Verbindung mit Raumtemperatur und -feuchte lässt sich daraus ein mögliches Risiko für Schimmelpilzwachstum ableiten.

Nachfolgend werden kurz die Grundlagen der Simulationsverfahren für die dynamische hygrothermische Gebäudesimulation und die Wärmebrückenberechnung sowie die Kopplung beider Module beschrieben. Anschließend werden Validierungsberechnungen durchgeführt, die eine normgerechte Umsetzung der Wärmebrückenberechnung sicherstellen. In einem Anwendungsbeispiel wird exemplarisch gezeigt, wie sich die neu entwickelte Software einsetzen lässt.

Die hygrothermische Gebäudesimulation WUFI® Plus

WUFI® Plus ist eine Software zur hygrothermischen dynamischen Simulation eines gesamten Gebäudes basierend auf der hygrothermischen Bauteilsimulation von Künzle [32]. Der eindimensionale sich gegenseitig beeinflussende Wärme- und Feuchtetransport durch opake Bauteile wird berechnet. Wärmeleitung, Wasserdampfdiffusion und Kapillarleitung werden als Transportmechanismen berücksichtigt. Die Wärmeleitfähigkeit und der latente Wärmetransport infolge Wasserdampfdiffusion mit Phasenwechsel sind abhängig von den Feuchtever-

hältnissen im Bauteil. Der Feuchtetransport innerhalb eines Bauteils ergibt sich aus den Randbedingungen an den Oberflächen. Die resultierenden Differentialgleichungen werden mit Hilfe der Finiten-Volumen-Methode diskretisiert. Das gekoppelte Wärme- und Feuchtetransportmodell WUFI® Pro wurde durch eine Vielzahl von Labor- und Feldversuchen validiert [32] und entspricht den Vorgaben der DIN EN 15026 [33].

Der Wärme- und Feuchtetransport über die Gebäudehülle beeinflusst das Klima im Gebäude. Deshalb werden die Bauteile zu einem gesamten Gebäudemodell, bestehend aus einer oder mehrerer Zonen mit einem jeweils zugeordnetem Klima, in WUFI® Plus gekoppelt [34], [35]. Die Zonen bilden somit einen oder mehrere Räume ab und werden durch die Bauteile begrenzt. Das Innenklima dient wiederum als Randbedingung für eine Seite eines Bauteils. Pro Zeitschritt wird das Klima in einer Zone infolge der Zonen-Wärme- und Feuchtebilanz simuliert. Ein in der Gebäudesimulation üblicher Zeitschritt beträgt eine Stunde. Innere Wärme- und Feuchtequellen, unter anderem von anwesenden Personen, werden dabei ebenfalls berücksichtigt. So lange diese Bilanzen nicht ausgeglichen sind, wird die Temperatur und Feuchte pro Zeitschritt iterativ angepasst.

Das Außenklima kann ebenfalls als Zone betrachtet werden. Es wird auf Wetterdaten zugegriffen, mit den erforderlichen Klimawerten für jeden Zeitschritt. Neben der Außentemperatur und der Luftfeuchtigkeit sollten die Wetterdaten auch Informationen über die direkte und diffuse Solarstrahlung, sowie über Windgeschwindigkeit und -richtung sowie Regenmenge enthalten. Daraus wird der Schlagregen auf entsprechende Bauteile angesetzt. Die kurzwellige solare Einstrahlung sowie der langwellige Strahlungsaustausch an den Außenoberflächen der opaken Bauteile werden berücksichtigt. Transparente Bauteile (Fenster) lassen einen gewissen Teil der Strahlung durch, welche den Innenraum und innere Oberflächen aufheizt. Der Luftwechsel sorgt ebenfalls für einen Wärme- und Feuchtetransport. Sowohl der natürliche und als auch der mechanisch angetriebene Luftwechsel kann berücksichtigt werden.

Die Anlagentechnik sorgt dafür, in den Räumen Sollwerte einzuhalten, also die Innentemperatur oder auch die Feuchte innerhalb von Grenzwerten zu halten. Dem Gebäude können ideale Heizungs-, Kühlungs-, Lüftungs-, sowie Be- und Entfeuchtungsgeräte mit einer entsprechenden maximalen Leistungsfähigkeit hinzugefügt werden. Würde das Innenklima die eingegebenen Sollgrenzen über- bzw. unterschreiten, wird der notwendige Bedarf berechnet, um die Sollwerte einzuhalten. Mit einer idealen Heizung wird somit zum Beispiel die Heizleistung pro Zeitschritt berechnet, welche notwendig ist, um eine Solltemperatur von 20 °C nicht zu unterschreiten.

Ergebnisse von WUFI® Plus wurden mit denen anderer Gebäudesimulationssoftware, Messungen und Standards (u.a. [36]) verglichen. Die Validierung der energetischen und hygrischen Simulation ist beschrieben in [37].

Die dynamische Simulation von dreidimensionalen Wärmebrücken

Es gibt Bereiche der thermischen Gebäudehülle, welche mit der eindimensionalen Betrachtung nicht weiter untersucht werden können, sondern bei denen der zwei- oder dreidimensionale Zustand betrachtet werden muss. Um solche Bereiche ebenfalls mit WUFI® Plus analysieren zu können, werden so genannte 3D-Objekte dem Gebäudemodell hinzugefügt. Mit diesen ist es möglich, 2-D oder 3-D Wärmebrücken sowie weitere Spezialfälle, zum Beispiel den transienten Wärmetransport zwischen Raum und Erdreich, zu simulieren. Geometrische und strukturelle Wärmebrücken sind bei so gut wie jedem Gebäude vorhanden. Die Transmissionswärmeverluste in stationären Berechnungsverfahren werden mit linearen oder punktförmigen Verlustkoeffizienten berücksichtigt. In [38], dem Standard zur Berechnung der Norm-Heizlast, sind nur lineare Wärmebrücken enthalten. Die große Vielfalt unterschiedlich ausgebildeter Wärmebrücken und deren komplexer Berechnung, im Vergleich zur eindimensionalen Berechnung, ist der Grund für die oftmalige Vernachlässigung von Wärmebrücken in der energetischen Gebäudesimulation. Daher wurde ein Wärmebrückenmodul mit einfacher Eingabe und dennoch angemessener Berechnungs-Genauigkeit für WUFI® Plus entwickelt.

Für die Berechnung der 3D-Objekte wird die Finite-Volumen-Methode von Eymard [39] angewendet. Basierend auf dem thermodynamischen Gesetz der Energieerhaltung und der physikalischen Interpretation des Wärmestroms und der Wärmespeicherung ist das Modell geeignet für die Simulation der Wärmebrücken. Mit dieser Methode wird der dreidimensionale Raum in kleine Kontrollvolumen aufgeteilt und mittels der Lösung von Integralen durch numerische Methoden der Wärmestrom bestimmt.

Die Eingabe der Geometrie einer Wärmebrücke erfolgt durch Festlegung sämtlicher Grenzebenen zwischen unterschiedlichen Materialien in einem kartesischen Koordinatensystem. Materialdaten für die einzelnen Schichten können aus der WUFI® Datenbank ausgewählt oder vom Anwender ergänzt werden. Die Zuordnung eines Materials einer Schicht erfolgt in der Schnittdarstellung, indem zuerst das Material und folgend die Schicht ausgewählt wird. Danach wird die definierte Schicht im 3-D-Modell visualisiert (Bild 84, rechte Seite). Ergänzend können die Bedingungen an den Oberflächen für die Wärmebrücke definiert werden. Dafür stehen alle Randbedingungen des Gebäudemodells, also die definierten Innen-Zonen, das Außenklima und optional eingegebene Klimata, zur Verfügung. Ferner können einer Wärmebrücke ebenfalls die äußeren Randbedingungen eines bestimmten Bauteils mit entsprechender Orientierung und Neigung zugeordnet werden. Das hat zur Folge, dass die Solarstrahlung auf die Wärmebrücke, bzw. auf die äußere Schicht angesetzt wird. Neben simulierten Zonen, für die das Innenklima iterativ berechnet wird, gibt es angrenzende Zonen, mit vorab festgelegtem Klima. Diese können ebenfalls auf Oberflächen angesetzt werden. Standardmäßig sind adiabate Randbedingungen eingestellt, dort findet kein Wärmeaustausch statt. Die Diskretisierung in kleine Kontroll-Volumen ist automatisiert. Der Nutzer kann zwischen einem groben, mittleren oder feinen Gitternetz wählen; es werden dann entsprechend

mehr oder weniger Kontroll-Volumen erzeugt. Abhängig von der Geometrie der Wärmebrücke kann weiterführend die Unterteilung der Volumen ausgewählt werden. Zur Auswahl steht die expandierende, gleiche oder kontrahierende Unterteilung. An kritischen Stellen kann somit das Gitternetz verfeinert werden. In Bild 84 ist das generierte Gitternetz einer Deckenplatte mit auskragendem Balkon, links unten, dargestellt.

Die räumliche Aufteilung und folgend die Anzahl der Kontroll-Volumen hat einen entscheidenden Einfluss auf die Genauigkeit und gleichzeitig auf die Rechenzeit. Ein feineres Netz sollte an Stellen gewählt werden, an denen hohe Temperaturgradienten oder schnell variierende Randbedingungen erwartet werden. Ein grobes Netz genügt in Richtung adiabater Randbedingungen zur Reduzierung der Rechenzeit.

Eine große Anzahl von Kontroll-Volumen und mehrere solcher 3D-Objekte in einem Gebäudemodell führen zu Speicher- und Rechenzeit-Problemen. Ein impliziter Lösungsalgorithmus erfordert die Erstellung einer $N \times N$ großen linearen Gleichungsmatrix, wobei N für die Anzahl der Kontroll-Volumen steht. Diese Anzahl kann rapide ansteigen. Ist die Wärmebrücke mit 50 Elementen in jeder Richtung diskretisiert, ergeben sich 2500 Elemente für eine 2-D Berechnung und 125000 Elemente für ein 3-D Objekt. Mit der Verwendung des Standard-Datentyps double für Gleitkommazahlen (8 Bytes pro Kontrollvolumen) ergibt sich ein Arbeitsspeicherbedarf für die Matrix einer 2-D Berechnung von 47,7 MB. 3-D Objekte mit 50 definierten Elementen in jede Richtung benötigen für die Matrix 116,5 GB und damit deutlich mehr Arbeitsspeicherplatz, als bei gewöhnlichen PC vorhanden ist. Das explizite Euler-Verfahren wird zur Lösung des Temperaturfeldes angewendet. Das Verfahren erfordert eine Verkürzung des Zeitschritts, um numerisch stabil zu bleiben. Werden bei einer Wärmebrücke Materialien mit hoher thermischer Leitfähigkeit eingesetzt, wie z.B. Metall, kann dies zu Problemen führen. In solchen Fällen ist, zumindest für 2-D Objekte, das implizite Verfahren die bessere Lösung.

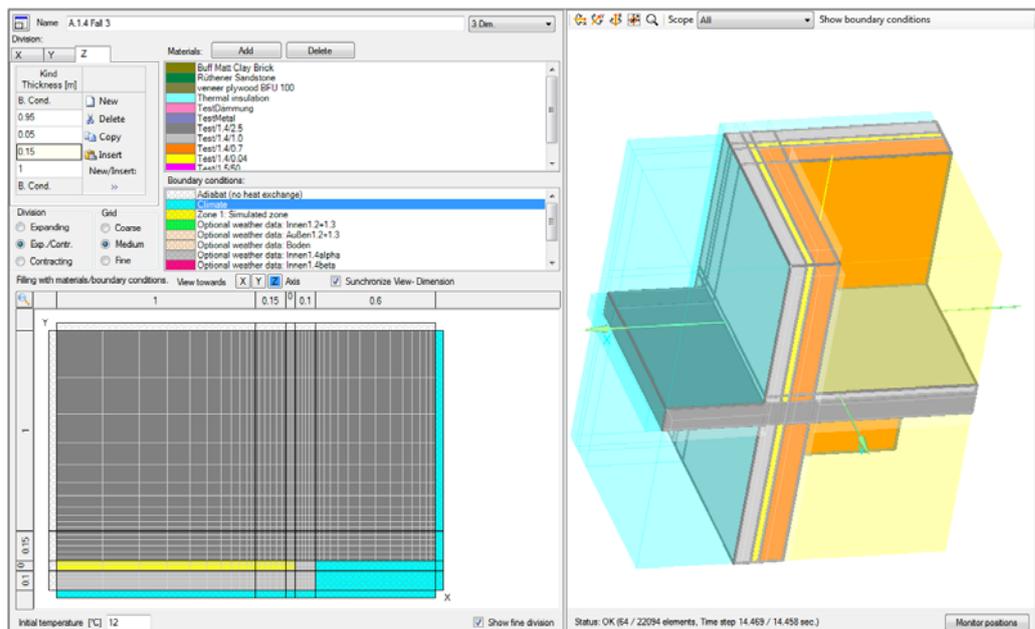


Bild 84.

Bildschirmansicht der Eingabe eines 3D Objektes in WUFI® Plus mit automatisch erzeugtem Gitternetz der Deckenplatte.

Kopplung von dynamischer Wärmebrücken- und Gebäudesimulation

Ist das Gebäudemodell erstellt und sind die 3D Objekte definiert, kann die Simulation gestartet werden. Die Kopplung der 3D Objekte mit dem Gebäudemodell erfolgt über die zuvor beschriebene Zuordnung der Randbedingungen. Mit jedem Zeitschritt werden diese Randbedingungen an das 3D Objekt übergeben. Für den Start des ersten Zeitschritts werden Initialisierungswerte oder Sollwert Einstellungen angenommen. Anschließend werden der gekoppelte Wärme- und Feuchtetransport über die Bauteile und der Wärmetransport über die 3D Objekte berechnet. Deren Ergebnisse fließen in die Wärme- und Feuchtebilanzen der Zonen mit ein, welche folgend geprüft werden. Solange diese nicht ausgeglichen sind, werden die Innentemperaturen und -feuchten angepasst und die Berechnung des Zeitschrittes mit den neuen angepassten Randbedingungen wiederholt.

Die maximal anwendbare Zeitschrittweite für ein 3D Objekt ist gewöhnlich viel kürzer als die Standard-Zeitschrittweite (eine Stunde) für das Gebäude. Daher werden die Wärmebrücken mehrfach mit kleineren Zwischen-Zeitschritten berechnet. Ist die Iteration eines Zeitschrittes abgeschlossen wird das Temperaturfeld des 3D Objektes für den folgenden Zeitschritt zur Initialisierung gespeichert. Der Wärmeaustausch über die 3D Objekte wird bei den Wärmebilanzen simulierter Zonen berücksichtigt und hat einen direkten Einfluss auf das Innenraumklima, den Heizwärmebedarf, Kühlenergiebedarf und weitere Simulationsgrößen. Das Temperaturfeld eines 3D Objektes kann während der Simulation für jede Schnittebene fortlaufend dargestellt werden (Bild 85).

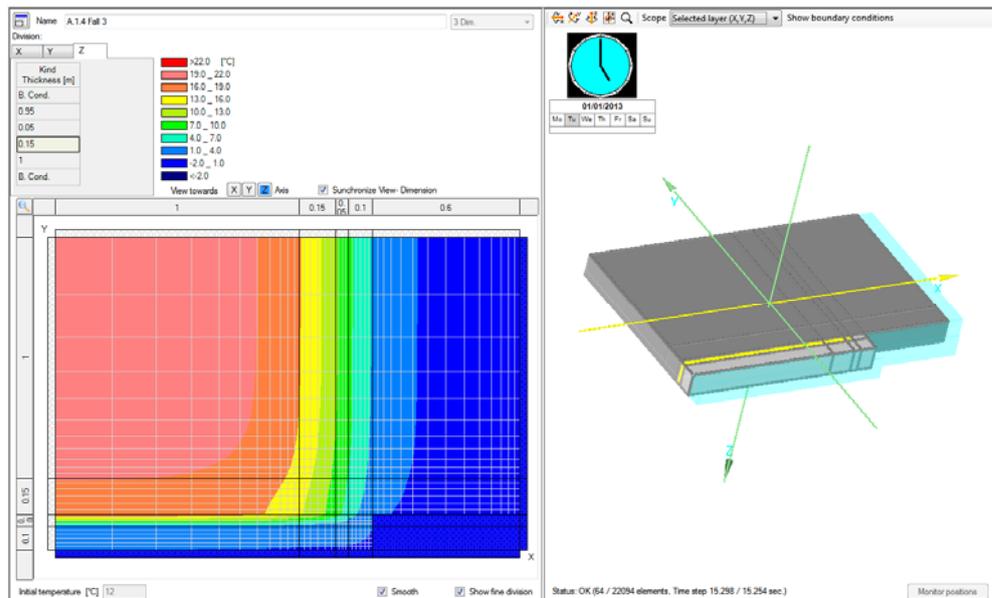


Bild 85:

Bildschirmansicht von WUFI® Plus für die Visualisierung des Temperaturfeldes in einer Schnittebene eines 3D Objektes während der laufenden Simulation.

Validierung der Wärmebrückenberechnung

Das neu entwickelte Modell für die Berechnung der 3D Objekte wurde mit Hilfe der Norm DIN EN ISO 10211 [40] validiert, welche Informationen und detaillierte Berechnungen der Wärmeströme und Oberflächentemperaturen von Wärmebrücken enthält. Es wurde gezeigt, dass das an WUFI® Plus gekoppelte dynamische Wärmebrückenmodul für die Prüfreferenzfälle stets innerhalb der geforderten Genauigkeit der DIN EN ISO 10211 liegt und somit als normgerechtes Verfahren einzustufen ist. Im Folgenden wird hier nur die anschaulichere Cross-Validierung dargestellt.

Für den direkten Vergleich zwischen dem neu entwickelten dynamischen Wärmebrückenmodul in WUFI® Plus und bestehender etablierter Software wurde das Programm ZUB Argos® 2012 [41] und der Wärmebrückenkatalog [42] [43] in der digitalen Version 1.2.5.3

[44] herangezogen. Exemplarisch wurden zwei Wärmebrücken aus dem Wärmebrückenkatalog simuliert, die Ergebnisse sind im Folgenden aufgezeichnet.

Das erste stationär simulierte Beispiel ist eine zweidimensionale Mauerecke. Das 36,5 cm dicke Mauerwerk mit einer Wärmeleitfähigkeit von 0,21 W/(m K) ist außen mit Kalkzementputz ($\lambda = 0,87$ W/(m K)) und innen mit Gipsputz ($\lambda = 0,35$ W/(m K)) verputzt, wie auf Bild 86 dargestellt. Als Randbedingung wird außen -5 °C und $0,04$ W/(m K) als Wärmeübergangswiderstand angesetzt. Die Innentemperatur beträgt 20 °C; hier wird ein erhöhter Wärmeübergangswiderstand von $0,25$ W/(m K) angenommen, der zur Berechnung der Innenoberflächentemperaturen und einer Schimmelpilz Abschätzung, nach

DIN EN ISO 10211 [40] und entsprechend DIN EN ISO 13788 [45] verwendet werden soll.

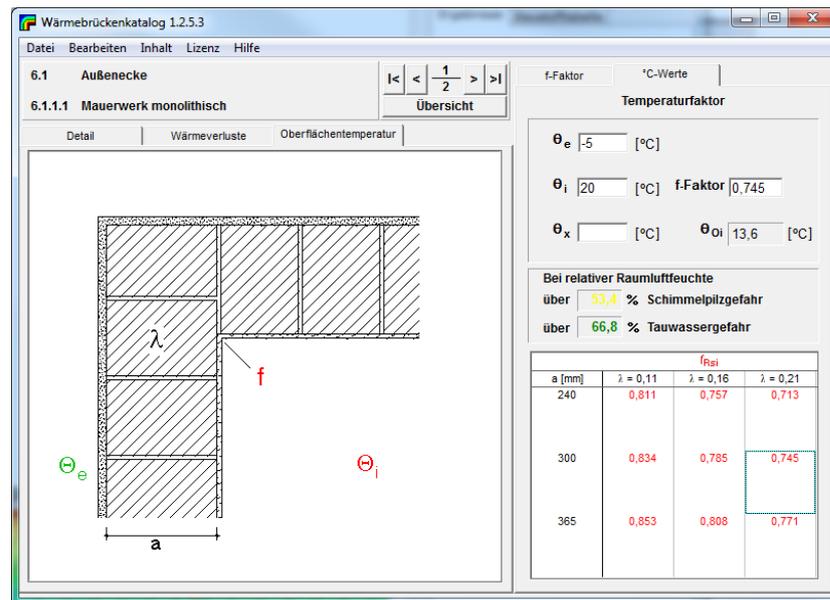


Bild 86:
Ecken-Wärmebrücke, Bildschirmfoto von der Wärmebrückenatlas-Software [44].

Im graphischen Vergleich, ist die resultierende Temperaturverteilung im Bauteil der stationären Berechnung von ZUB Argos® 2011 (Bild 87, links) der Verteilung berechnet mit WUFI® Plus (Bild 87, rechts) sehr ähnlich. Genau betrachtet wird die Oberflächentemperatur an der Innenecke. In Tabelle 22 sind die resultierenden Werte gegenübergestellt. Die vom Wärmebrückenatlas etwas höher angegebene Temperatur ist auf die gröbere Gitterauflösung und die beschränkteren Rechnerkapazitäten zum Zeitpunkt der Erstellung des Wärmebrückenatlas zurückzuführen.

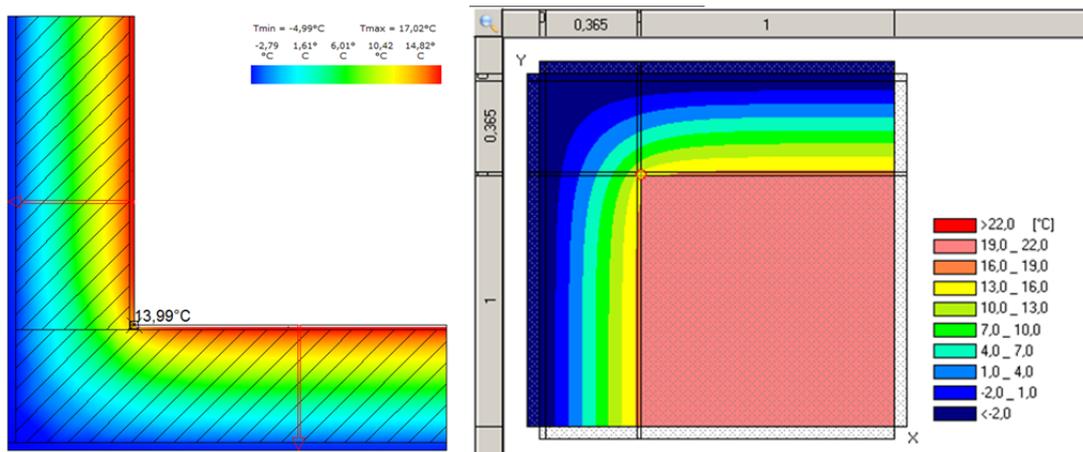


Bild 87:
Temperaturverlauf der Ecken-Wärmebrücke, Bildschirmfoto von ZUB Argos® 2012 [41] (links) und Bildschirmfoto von WUFI® Plus (rechts).

Tabelle 22:
Cross-Validierungs-Ergebnis Mauerwerksecke in [°C].

	Wärmebrückenkatalog	ZUB Argos® 2012	WUFI® Plus
Innenecke	14,3	13,99	13.964

Als zweites Beispiel wurde ein gedämmter Betondeckenanschluss im Mauerwerk aus dem Wärmebrückenkatalog gewählt (Bild 88) und mit den beiden Programmen ZUB Argos® 2011 und WUFI® Plus zweidimensional modelliert und simuliert. Die äußere Dämmung der Betonplatte wurde dabei im Gegensatz zur Darstellung in Bild 88 nicht über die Höhe der Platte hinaus in das Mauerwerk verlegt.

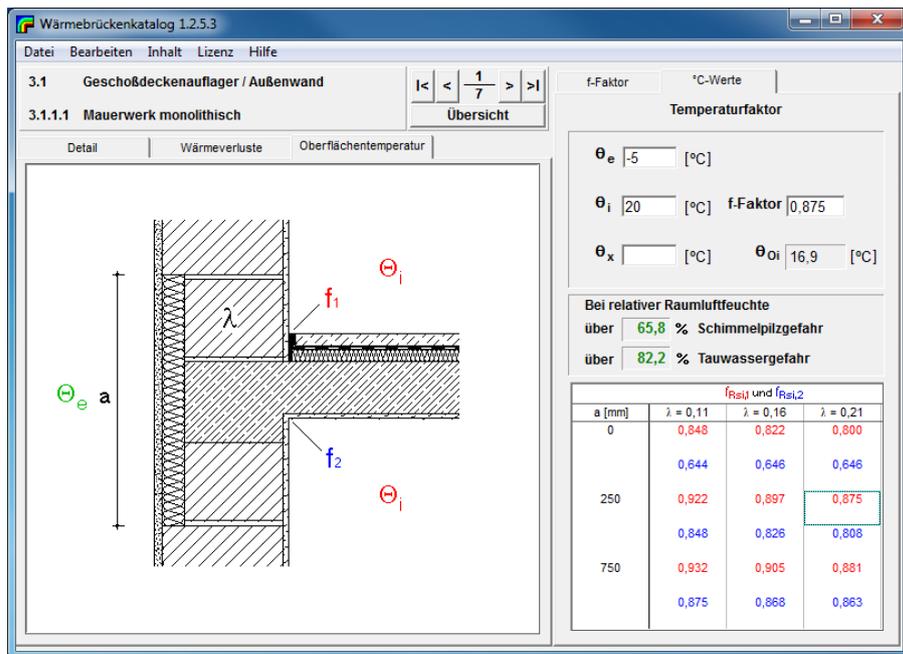


Bild 88:
Deckenanschluss an monolithischem Mauerwerk, Bildschirmfoto von der Wärmebrückenatlas-Software [44].

Die resultierende Temperaturverteilung im Bauteil der stationären Berechnung von ZUB Argos[®] 2011 (Bild 89, links) ist ebenfalls der Verteilung, berechnet mit WUFI[®] Plus (Bild 89, rechts), sehr ähnlich. Bei diesem Beispiel wird die Oberflächentemperatur an der oberen Ecke und an der unteren Ecke, im Übergang zur Wand, verglichen. In Tabelle 23 werden die Ergebnisse präsentiert. Alle drei Programme liefern bei dieser Berechnung Oberflächentemperaturen im Bereich von 0,3 K beziehungsweise 0,1 K Abweichung.

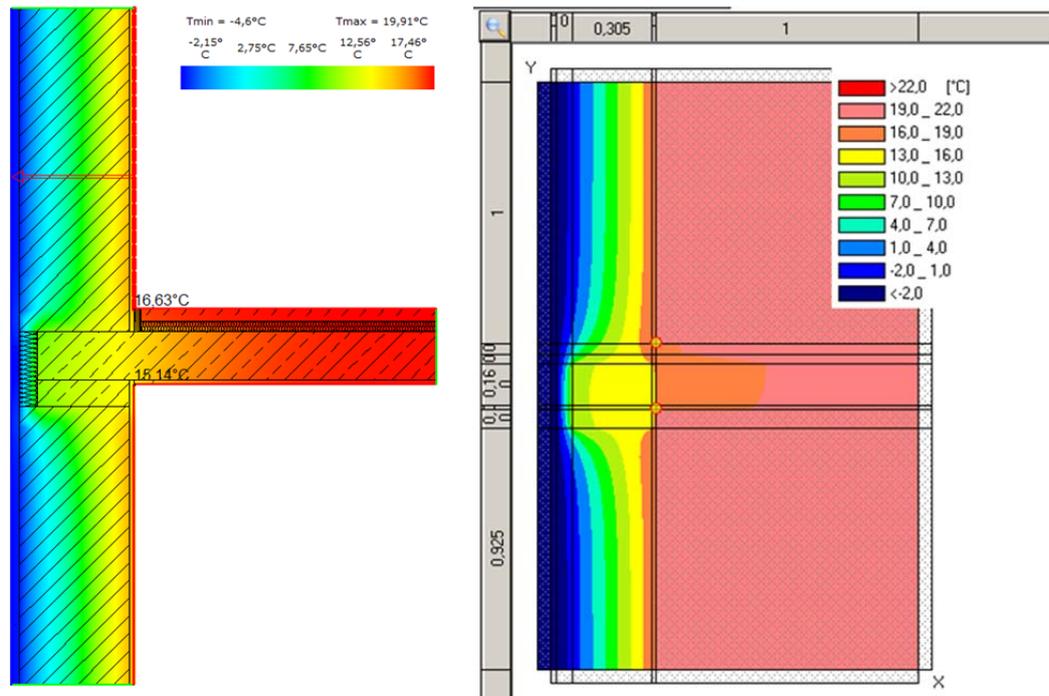


Bild 89:
Temperaturverlauf im Deckenanschluss, Bildschirmfoto von ZUB Argos® 2012 [41] (links) und Bildschirmfoto von WUFI® Plus (rechts).

Tabelle 23:
Cross-Validierungs-Ergebnisse Deckenanschluss in [°C].

	Wärmebrückenkatalog	ZUB Argos® 2012	WUFI® Plus
Obere Ecke	16,9	16,63	16,788
Untere Ecke	15,2	15,14	15,156

Anwendungsbeispiel: Wohnungstrennwand mit und ohne Innendämmung

Gebäudemodell

Die bisher vorgestellten Simulationen zur Validierung von WUFI® Plus waren stationär und wurden mit konstanten Randbedingungen durchgeführt. Dies ist durchaus mit WUFI® Plus möglich, reizt jedoch die Leistungsfähigkeit der dynamischen Simulation bei weitem nicht aus. Daher soll im Folgenden ein Anwendungsbeispiel dynamisch simuliert werden.

Es werden zwei Wohnungen, getrennt durch eine direkt an die Außenwand angeschlossene Innenwand, betrachtet. Für den Referenzfall ist der Wandaufbau beider Wohnungen identisch und nicht gedämmt. Es wird jeweils die Oberflächentemperatur in den Innenecken betrachtet, an denen die Trennwand auf

die Außenwand trifft. Für den Referenzfall ist dort die Temperatur in beiden Wohnungen gleich.

Einem üblichen Anwendungsfall entsprechend, wird in einer Wohnung eine Innendämmung angebracht. In [46] wird gezeigt, dass im gewöhnlichen Altbau bei fehlerfreier Anbringung der Innendämmung im Übergangsbereich zur einbindenden Wand keine Feuchteprobleme auftreten sollten, sofern Nutzerverhalten, Luftwechselraten und sonstige Randbedingungen gleich bleiben.

Weiterführend wird hier untersucht, ob und unter welchen Umständen die Innendämmung einer Wohnung für die daneben liegende, nicht gedämmte Nachbarswohnung zu Feuchteproblemen in der kritischen Ecke führen kann. Beide Wohnungen sind quadratisch und 8 x 8 Meter groß. Es wird angenommen, dass sich über und unter den Wohnungen identische, gleich konditionierte Wohnungen befinden. Jede Wohnung hat je drei Fenster auf der Süd- und Nordseite. Das mit WUFI® Plus visualisierte dreidimensionale Gebäudemodell ist in Bild 90 dargestellt.

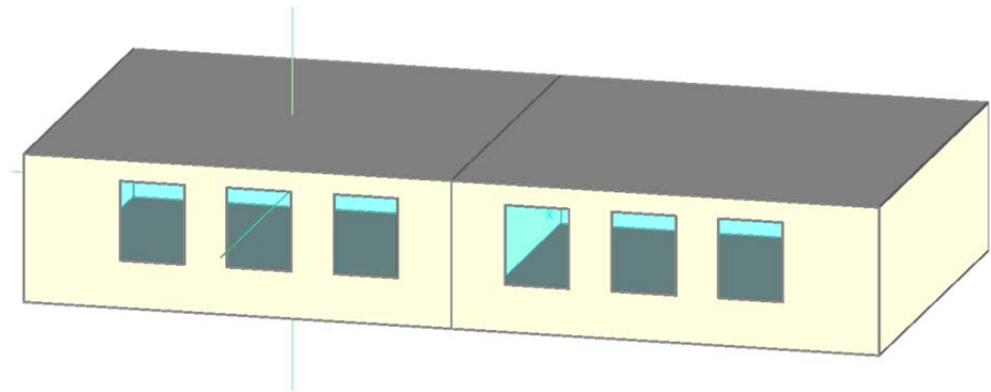


Bild 90:
WUFI® Plus Gebäudemodell des Anwendungsbeispiels.

Bild 91 zeigt das simulierte Detail der einbindenden Wand im Querschnitt. Die Oberflächenübergangswiderstände wurden gemäß [40] mit Verweis auf die ISO 13788 [45] auf $0,25 \text{ (m}^2\text{K)/W}$ gesetzt. Dieser Übergangswiderstand soll zur Einstufung des Schimmelpilzrisikos verwendet werden.

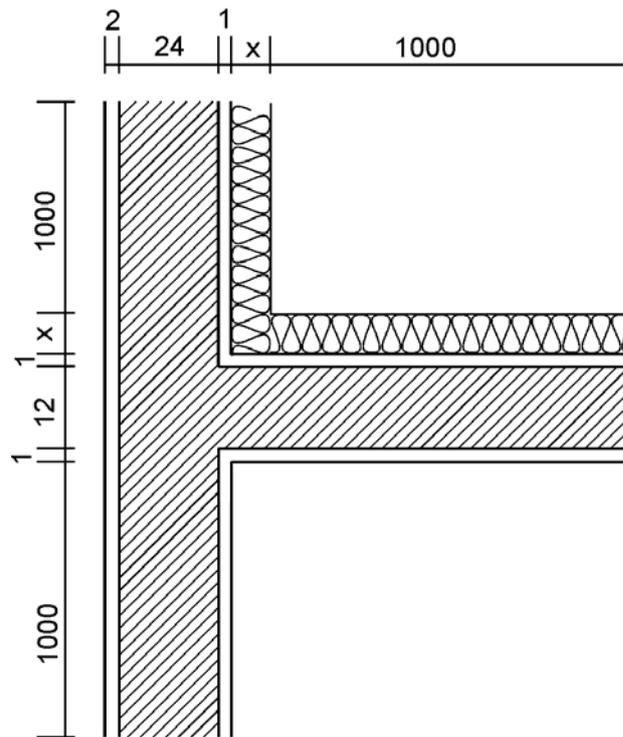


Bild 91:
Zugrunde gelegte Wärmebrücke – Innenwand mit Dämmung.

Parametervariationen

Beide Wohnungen werden pro Fall stets den gleichen, jedoch von Fall zu Fall variierenden, Randbedingungen ausgesetzt. Es werden vier Eingabeparameter variiert: der natürliche Luftwechsel, die Stärke der Innendämmung, die Feuchteproduktion infolge der Bewohneranzahl und die Soll-Innenraumtemperatur. Speziell für die Innenraumtemperatur wurde eine Variante mit Nachtabsenkung simuliert. Dabei soll die Raumlufttemperatur am Tag 21 °C betragen und in der Nacht von 23 bis 5 Uhr auf 16 °C abgesenkt werden. Weitere eingesetzte Parameterwerte sind in Tabelle 24 aufgelistet.

Tabelle 24:
Parametervariationen der Randbedingungen.

	Referenzfall		
Soll-Raumlufttemperatur	19 °C	21 °C	Nachtabsenkung
Bewohner (Feuchteproduktion)	3 Personen (ca. 9 L/Tag)	2 Personen (ca. 6 L/Tag)	4 Personen (ca. 12 L/Tag)
Luftwechsel	0,5 1/h	0,3 1/h	0,7 1/h
Dämmstärke	10 cm	6 cm	14 cm

Simulationsergebnisse

Für den stationär berechneten Testreferenzfall (ohne Innendämmung) ergibt sich ein Temperaturfaktor f_{Rsi} von 0,695. Mit angebrachter Innendämmung, für den teilsanierten Referenzfall, ergibt sich ein Temperaturfaktor f_{Rsi} von 0,875 im gedämmten Eck und f_{Rsi} von 0,615 im nicht gedämmten Eck der Nachbarwohnung. Das Temperaturfeld dazu ist im Bild 92 abgebildet.

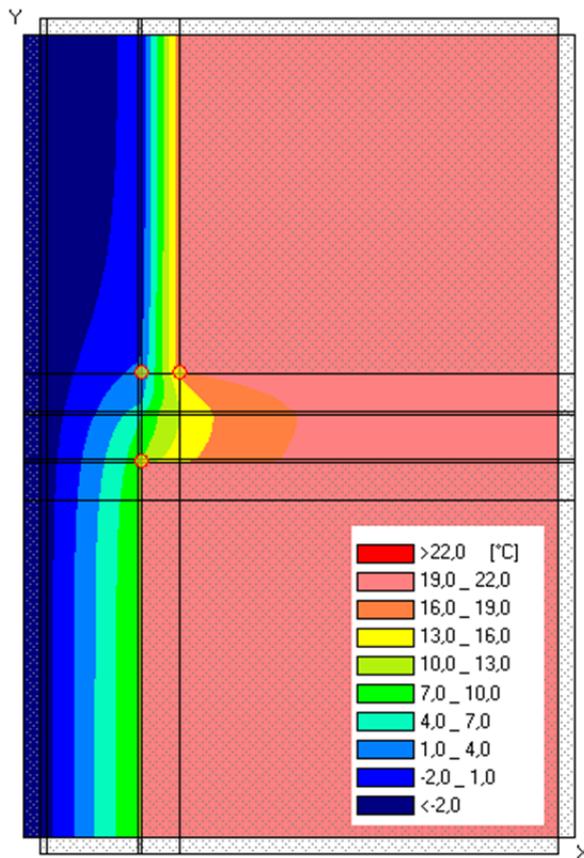


Bild 92:
Temperaturverlauf der stationären Anwendungstestfalls mit Innendämmung aus WUFI® Plus.

Für den Referenzfall zeigt Bild 93 Tagesmittelwerte der relativen Luftfeuchtigkeit im Raum für das erste Quartal eines Jahres. Außerdem ist die erhöhte relative Luftfeuchtigkeit direkt an den Oberflächen der Ecken (infolge der dort niedrigeren Temperaturen und berechnet mit dem Wasserdampfpartialdruck im Raum) aufgetragen. Für den unsanierten Fall ist die Oberflächenfeuchte größtenteils unter 80 %. Nach Sanierung einer Wohnung steigt jedoch beim Referenzfall die Oberflächenfeuchte in dem Eck der unsanierten Wohnung häufig auf über 80 %. Auf den Diagrammen (Bild 94 bis Bild 97) sind die Tagesmittelwerte der Oberflächenfeuchte im kritischen, nicht gedämmten Eck, infolge der Parametervariationen aufgetragen. Ausgehend vom teilsanierten Referenzfall wurde jeweils einer der vier genannten Parameter variiert, um dessen Einfluss auf die relative Feuchte in der unsanierten Ecke zu untersuchen.

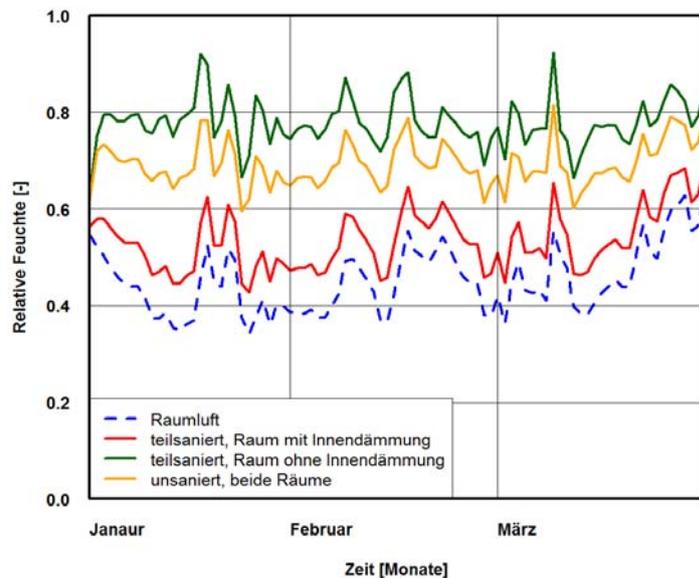


Bild 93:
Verlauf relativer Feuchten im Referenzfall (unsaniert und teilsaniert) im 1. Quartal des Jahres.

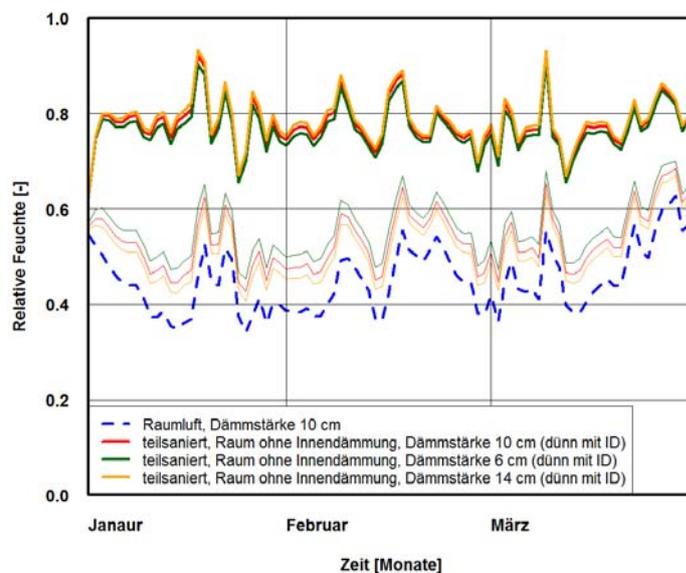


Bild 94:
Verlauf der relativen Feuchten in der Ecke infolge Dämmstärken-Variation im 1. Quartal des Jahres.

Bild 94 zeigt, dass die Stärke der Innendämmung in der sanierten Wohnung kaum Auswirkungen auf die Oberflächenfeuchte im kritischen Eck der unsanierten Wohnung hat. Die relative Feuchte ist für die durchgeführten Variationen unabhängig von der Dicke der Innendämmung annähernd gleich. Zu beachten ist jedoch, dass die Innendämmung über das Eck hinaus, an der Innenwand einen Meter weit angenommen wurde. Die deutlich niedrigere relative

Feuchte im Eck der gedämmten Wohnung, auf Grund der dort höheren Temperaturen, war zu erwarten und ist im gleichen Bild mit dünnen Linien eingezeichnet.

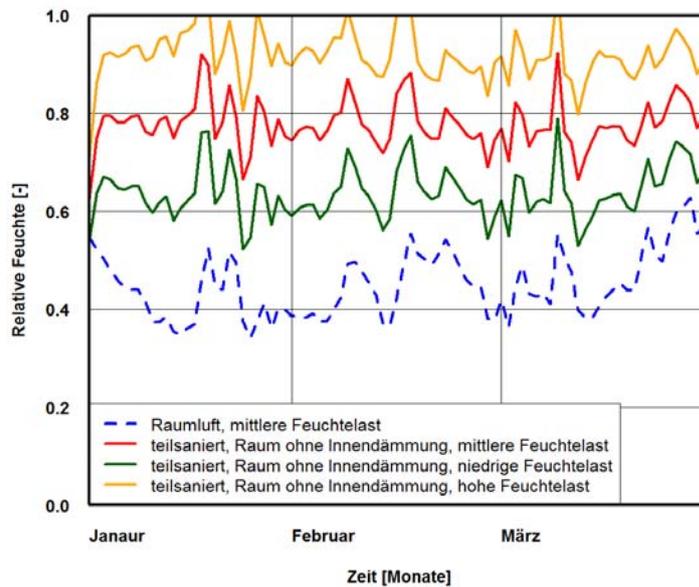


Bild 95:

Verlauf der relativen Feuchten in der Ecke im Raum ohne Innendämmung infolge Feuchtelast-Variation im 1. Quartal des Jahres.

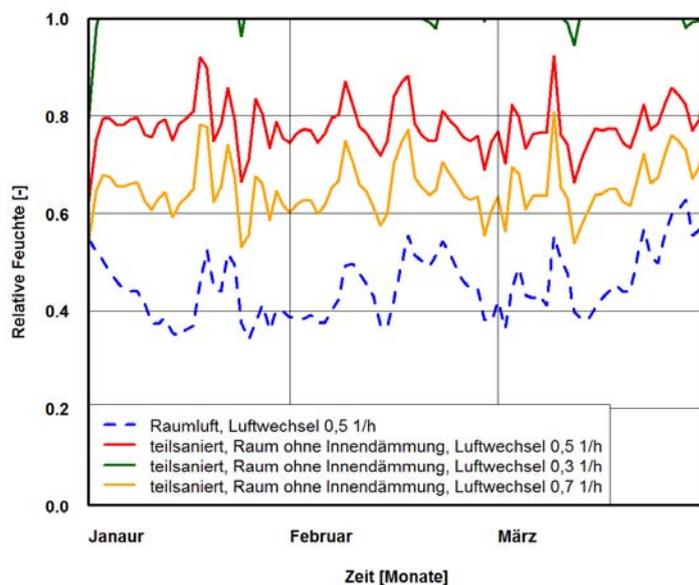


Bild 96:

Verlauf der relativen Feuchten in der Ecke im Raum ohne Innendämmung infolge Luftwechselraten-Variation im 1. Quartal des Jahres.

Die Variationen der Feuchteproduktion (Bild 95) oder des Luftwechsels (Bild 96) liefern deutlich abweichende Oberflächenfeuchten gegenüber dem Referenzfall (rote Linie). Mit der Annahme eines 4 Personen Haushalts und folgend einer Feuchteproduktion von etwa 12 Liter am Tag, liegt die Oberflächenfeuchte im 1. Quartal deutlich über 80 %. Bei einer geringeren Luftwechselrate von 0,3 1/h häufig sogar bei 100 %. In beiden Fällen ist mit Schimmelpilzwachstum an der Wärmebrücke zu rechnen. Dagegen wird mit geringerer Feuchteproduktion (ca. 6 Liter pro Tag) oder einem höheren Luftwechsel (0,7 1/h) das Schimmelpilzrisiko deutlich verringert.

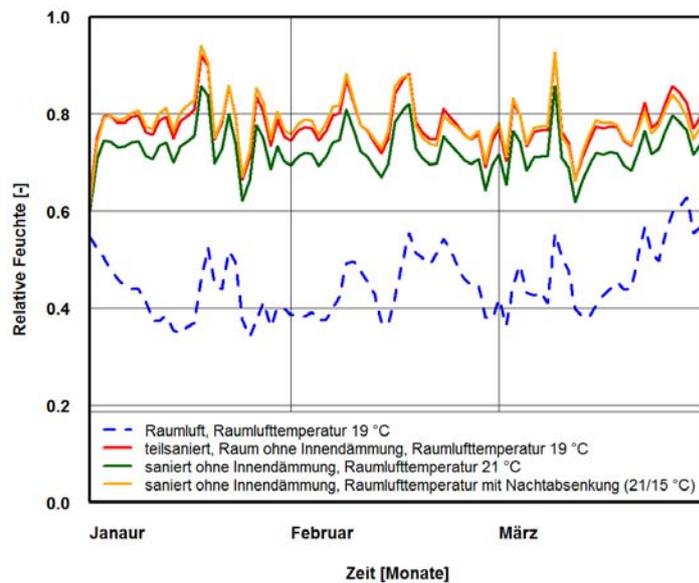


Bild 97:

Verlauf der relativen Feuchten in der Ecke des nicht gedämmten Raums infolge Raumlufteemperatur-Variation im 1. Quartal des Jahres.

Wird die Soll-Raumlufteemperatur um 2 °C auf 21 °C erhöht, sinkt die Oberflächenfeuchte im kritischen Eck (Bild 97). Aus der simulierten Nachtabsenkung resultiert trotz der tagsüber erhöhten Innentemperatur gegenüber dem Referenzfall kaum eine Änderung der Tagesmittelwerte der Oberflächenfeuchte an der kritischen Ecke.

Zusammenfassung Modellentwicklung

Der Einsatz von energetischer Gebäudesimulation zur Planung von Gebäuden nimmt zu. Um Null- und Plusenergiegebäude auslegen zu können, ist durch den notwendigen Abgleich von zeitabhängiger Energieproduktion und –verbrauch der Einsatz instationärer Simulationsverfahren auf noch breiterem Gebiet notwendig. Wenn dazu noch ein Bauteilmodell im Gebäudesimulationsmodell verwendet wird, das den gekoppelten Wärme- und Feuchtetransport abbildet, ist neben Aussagen zum Energiebedarf und Komfort auch die Schadensfreiheit der Gebäudehülle beurteilbar. Dieses Bauteilmodell ist jedoch in der Regel eindimensional. Eine Recherche der wissenschaftlichen Literatur zeigt

jedoch die Notwendigkeit, für genauere Abschätzungen auch zwei- und dreidimensionale Effekte abbilden zu können.

Die Kopplung eines hygrothermischen Gebäudesimulationsmodells mit einer instationären dreidimensionalen Wärmebrückenberechnung wurde beschrieben. Die Validierung des Wärmebrückenmodells unter stationären Bedingungen nach DIN EN ISO 10211 [40] wurde erfolgreich durchgeführt. Ein Validierungsfall der Norm musste hierzu angepasst werden, da sich nachweisbar in der Norm ein Rechen- und ein Anwendungsfehler befindet. Zusätzlich wurde noch eine Cross-Validierung mit einem anderen am Markt verfügbaren Wärmebrückenberechnungsprogramm sowie mit einem Tabellenwerk für Wärmebrücken erfolgreich durchgeführt.

Ein einfaches Anwendungsbeispiel für eine einseitige Innendämmung bei nebeneinander liegenden Wohnungen zeigt exemplarisch Einsatzmöglichkeiten der neuen Software. Wenn bei nebeneinander liegenden Wohnungen nur eine Wohnung mit Innendämmung versehen wird, so kann dies in der nicht gedämmten, vorher schadensfreien, Wohnung dazu führen, dass Schimmelpilzprobleme an der Trennwand auftreten. Die Simulationen zeigen, dass die Wahrscheinlichkeit dafür vom Luftwechsel und der Feuchtproduktion in der nicht sanierten Wohnung, etwas weniger von der Raumlufttemperatur und kaum von der Dämmstoffstärke der Innendämmung in der sanierten Wohnung abhängen.

Diese Anwendung ist nur exemplarisch für eine Vielzahl möglicher Einsatzgebiete einer dynamischen hygrothermischen Simulation mit gekoppelter Wärmebrückenberechnung. Zusammenfassend ist zu sagen, dass ein erfolgreich validiertes 2-D-Modul in die Gebäudesimulationssoftware WUFI® Plus implementiert wurde. Speziell durch die Verbindung mit hygrothermischer Simulation öffnen sich viele neue Anwendungsgebiete

5.4.2 Zweidimensionale Berechnungen zur Bauteiltemperierung

Die Vorteile beim Einsatz der Bauteiltemperierung bei örtlich vorliegendem hohem Materialfeuchten an innenseitigen Oberflächen durch aufsteigende Feuchte, Sommerkondensation oder andere Effekte ist unumstritten. Mit dieser Technik kann an den Problemstellen die Feuchte reduziert und z. B. mikrobieller Bewuchs verhindert werden. Es wird aber auch immer wieder das Argument angeführt, dass die Bauteiltemperierung auch eine Energie sparende Beheizung des Raumes darstellt. Begründet wird dies damit, dass durch die Wandtrocknung die Wärmeleitfähigkeit des Materials sinkt und somit im Vergleich zu einer konventionellen Beheizung die Transmissionsverluste so deutlich reduziert werden, so dass sich insgesamt ein merklicher Energieeinspareffekt ergeben wird. Es stellen sich aber auch eine Reihe zusätzlicher Fragen über die Wirkung einer derartigen Temperierung. Bei aufsteigender Feuchte im Sockelbereich ist von besonderem Interesse, wohin denn die ausgetriebene Feuchte transportiert wird. Trocknet der Wandabschnitt nach außen oder zu einem großen Teil nach innen ab? Wird der bei der aufsteigenden Feuchte auftretende Kapillartransport

aus dem Untergrund durch die Temperierung maßgeblich reduziert oder nicht sogar dauerhaft verstärkt?

Eine Beantwortung dieser Fragestellungen ist mit messtechnischen Mitteln, auch in den Versuchsräumen in Benediktbeuern, nicht möglich, da in situ keine durch Diffusions- oder Kapillartransportvorgänge hervorgerufene Feuchtemassenströme im Wandaufbau ermittelt werden können. Aus diesem Grund werden für diese Fragestellungen rechnerische Untersuchungen durchgeführt. Diese erlauben einerseits die ablaufenden Vorgänge im Mauerwerk zu betrachten und ermöglichen andererseits auch den Vergleich der Situation mit konventioneller Beheizung und Bauteiltemperierung unter exakt gleichen Randbedingungen.

Durchführung der Untersuchungen

Da aus früheren Untersuchungen [47] für die Renatus-Kapelle Messungen zum Innenklima vorliegen, wird für die folgenden grundsätzlichen Untersuchungen dieses Gebäude, bei dem eine Bauteiltemperierung eingebaut wurde, ausgesucht. Für die Berechnungen wird ein Wandaufbau implementiert, der dem der Renatuskapelle möglichst nahe kommt. Die Materialkenndaten entstammen der WUFI®-Materialdatenbank und wurden gegebenenfalls für eine bessere Übereinstimmung modifiziert. Eine exakte Abbildung der in der Renatuskapelle vorliegenden Situation ist aufgrund fehlender Daten nicht möglich, die grundsätzlichen Vorgänge werden aber trotzdem richtig wiedergegeben und ermöglichen somit die Beantwortung der oben aufgeführten Fragen.

Als Außenklima wird das Münchner Testreferenzjahr angesetzt. Als Innenklima wird von einem den durchgeführten Messungen nahe kommendem Jahresverlauf ausgegangen, mit einer Raumlufttemperatur zwischen 8 °C und 20 °C und einer Luftfeuchte zwischen 40 % und 65 %. Die Wärmeübergangskoeffizienten liegen innen bei 8 und außen bei 17 W/m². Da die Feuchtetransportvorgänge sehr langsam ablaufen, wird eine Periode von 1,5 Jahren berechnet. Die Berechnungen erfolgen nicht, wie üblicherweise in Stundenschritten sondern in Schritten von 2 Stunden, um die bei dem vorliegenden komplexen Wandaufbau ansonsten extrem lange Berechnungszeiten etwas zu verkürzen. Die Wand ist nach Norden ausgerichtet, sodass ein Schlagregeneinfluss und die solare Einstrahlung weitgehend vernachlässigt werden kann und der größere Zeitschritt keine Ergebnisverfälschung bewirkt.

In Bild 98 ist der implementierte Aufbau dargestellt. Die beidseitig mit Kalkputz versehene Wand besteht aus Vollziegel. Wie in der realen Renatuskapelle auch ist ca. 10 cm oberhalb des Bodens eine Horizontalsperre eingebaut. Das Vorlaufrohr für die Bauteiltemperierung befindet sich direkt hinter dem Innenputz mit einer Dicke von 1,5 cm in halber Höhe zwischen Boden und Horizontalsperre, der Rücklauf liegt 1 m oberhalb des Bodens, also deutlich oberhalb der Horizontalsperre. Da im verwendeten Berechnungsprogramm keine runden Geometrien eingegeben werden können, sind die Rohre mit quadratischem Querschnitt implementiert. Die Vorlauftemperatur beträgt 60 °C, die des Rücklauf-

tes 55 °C. Da hier vor allem die Transportvorgänge in der Wand von Interesse sind, wurde beim Bodenaufbau neben Wand und Fundament aus Vollziegel von einem nicht kapillar aktiven Material ausgegangen. Das Fundament steht permanent im Grundwasser, sodass aufsteigende Feuchte stattfindet.

In Bild 98 ist links der komplette für die Berechnungen implementierte Aufbau dargestellt. Bei den Berechnungen ohne Bauteiltemperierung wird der gleiche Aufbau angesetzt, allerdings ohne die Heizungsrohre. Bild 98 rechts zeigt einen Detailausschnitt des Aufbaus unterhalb der Horizontalsperre. In diesem Bereich werden die wesentlichen Transportvorgänge stattfinden und er wird im Folgenden genauer betrachtet.

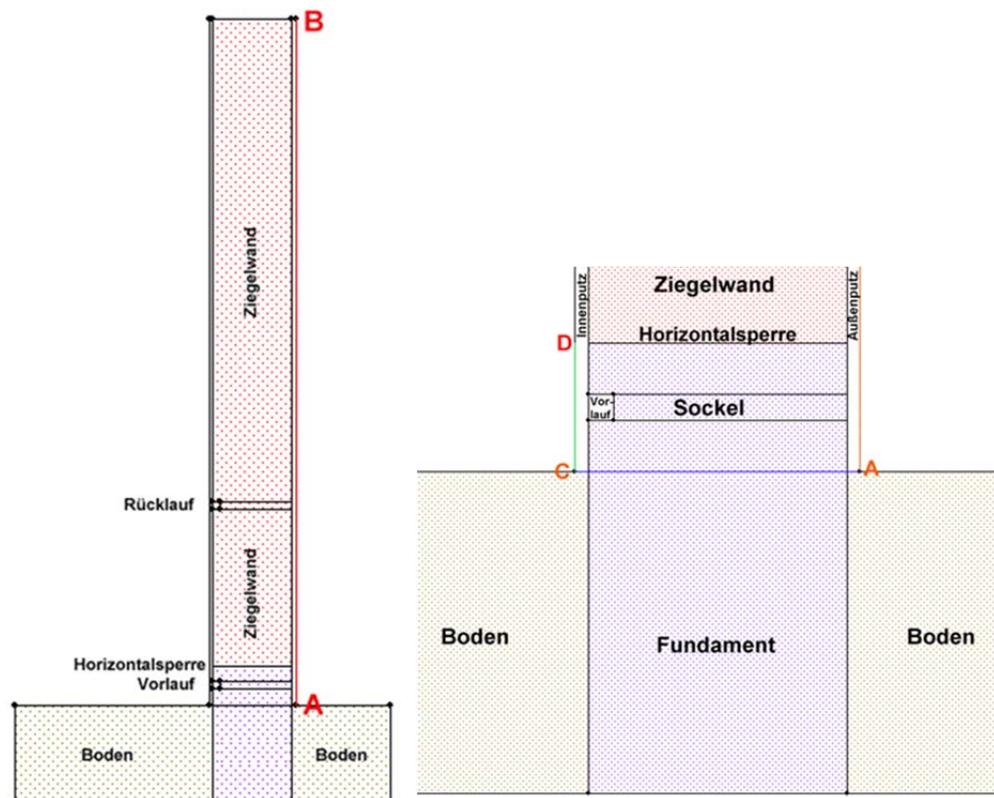


Bild 98: Implementierter Aufbau zur Berechnung (links) der am Beispiel der Renatuskapelle ablaufenden hygrothermischen Vorgänge bei einer Bauteiltemperierung, rechts ein Detailausschnitt unterhalb der Horizontalsperre.

Trocknung durch Bauteiltemperierung

Bild 99 zeigt den Wassergehaltsverlauf des Sockelbereiches unterhalb der Horizontalsperre. Man erkennt, dass auch ohne Bauteiltemperierung eine Trocknung erfolgt. Dies ist darin begründet, dass bei den Berechnungen in diesem Bauteilabschnitt von einem mit Wasser gesättigtem Zustand ausgegangen wurde und nicht von einem bereits eingeschwungenen Zustand, da es derzeit noch nicht möglich ist zweidimensionale Wassergehaltsverteilungen als Anfangszu-

stand einzulesen. Man erkennt aber auch, dass mit Bauteiltemperierung eine verstärkte Trocknung stattfindet.

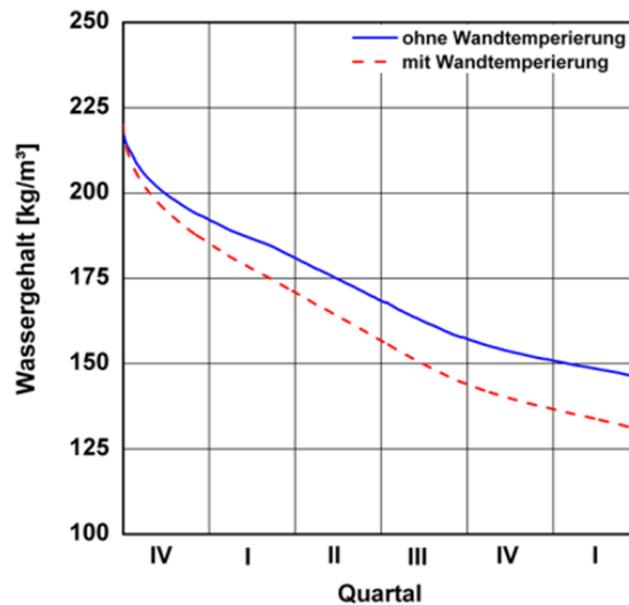


Bild 99:
Verlauf des Wassergehaltes im Sockelbereich unterhalb der Horizontalsperre ohne (rote Linie) und mit (blaue Linie) Bauteiltemperierung.

Der Grund für die schnellere Austrocknung mit Bauteiltemperierung liegt in der starken örtlichen Erwärmung des Mauerwerks. Dies ist gut erkennbar in der Temperaturverteilung, wie sie in Bild 100 für einen ausgewählten Zeitpunkt im Winter dargestellt ist.

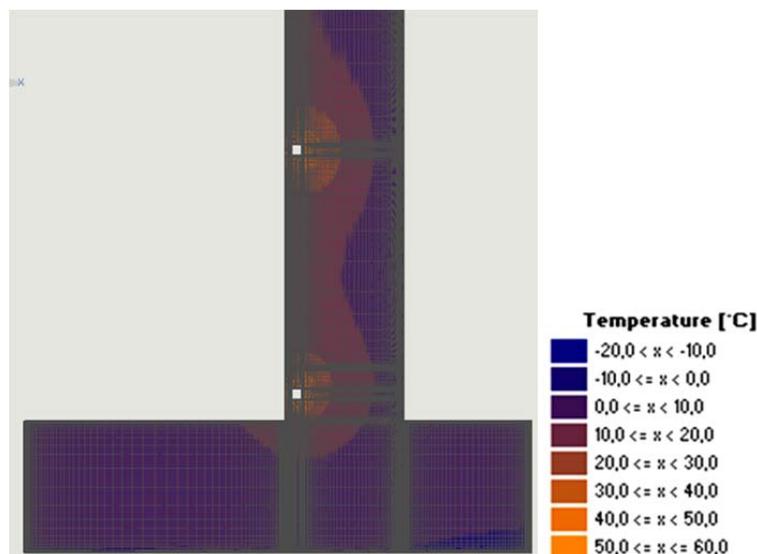


Bild 100:
Berechnete Temperaturverteilung zu einem ausgewählten Zeitpunkt im Winter (15. Februar). Der Einfluss der Bauteiltemperierung (Vor- und Rücklauf) ist klar erkennbar.

In Bild 101 unten ist für die Situation ohne Wandtemperierung die Wassergehaltsverteilung nach 1 Monat dargestellt. Man erkennt eine gewisse Trocknung zur Innen- und Außenseite hin. Vergleicht man dies mit dem Ergebnis bei Betrieb der Bauteiltemperierung (Bild 101 oben), fällt die starke Austrocknung um das Heizrohr herum sofort ins Auge. Auch im Außenbereich ist eine etwas stärkere Abtrocknung gegeben. Dies ist darin begründet, dass auch hier ein höheres Temperaturniveau vorliegt als ohne Bauteiltemperierung. Noch augenfälliger ist die Situation zum Ende der Berechnungszeit nach 1,5 Jahren (Bild 102). Ein wesentlich größerer Bereich um das Vorlaufrohr ist nun nahezu ausgetrocknet, sodass der Wassergehalt zwischen Fußbodenoberkante und Horizontal-sperre deutlich niedriger ist als ohne Betrieb der Bauteiltemperierung. Dies zeigt sich auch, wenn man für diesen Bereich den Verlauf des Wassergehaltes darstellt (Bild 103).

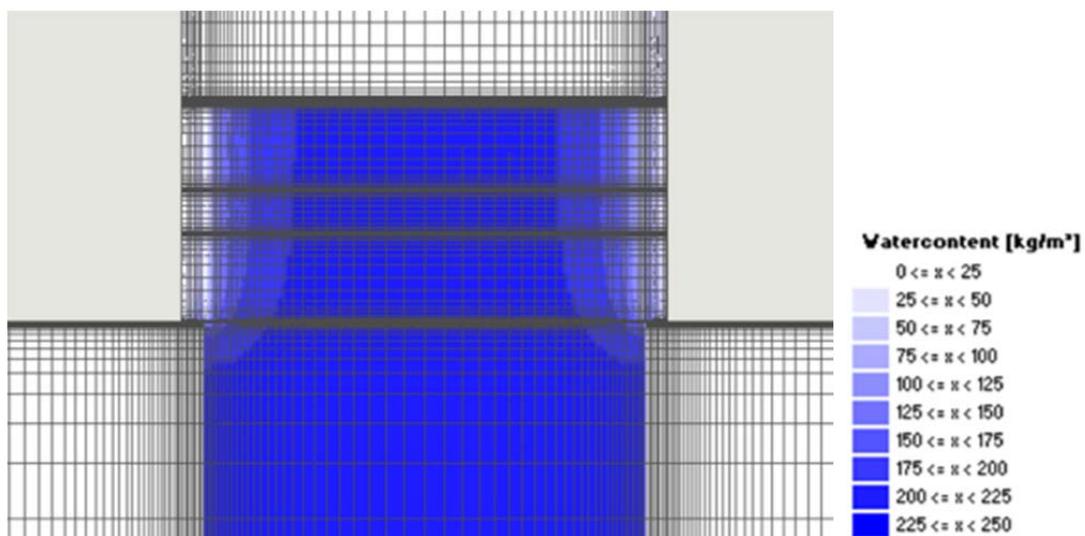
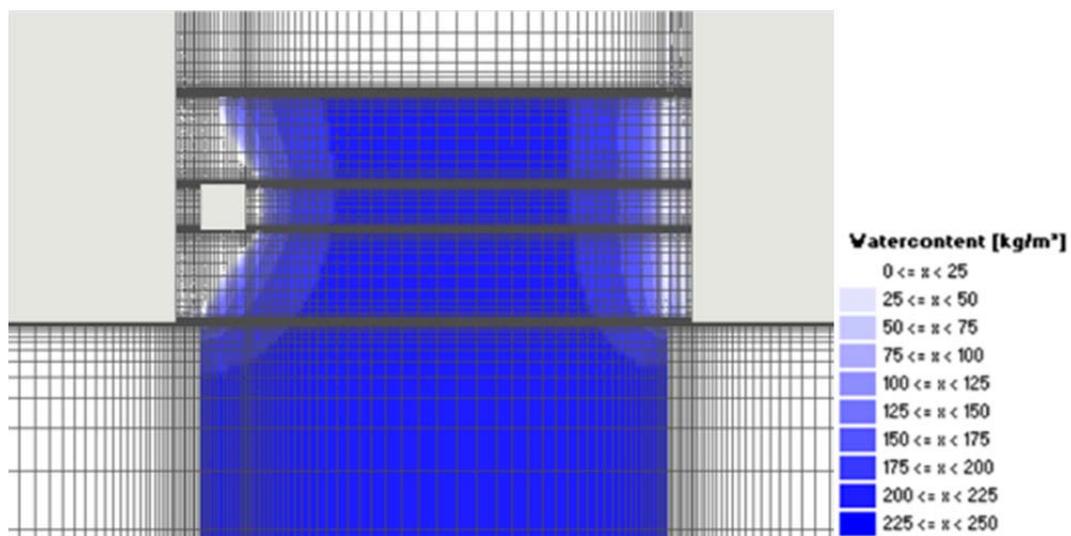


Bild 101:
Berechnete Wassergehaltsverteilung nach einem Monat ohne (unten) und mit Bauteiltemperierung (oben). Der Einfluss der Bauteiltemperierung (hier nur Vorlauf) ist klar erkennbar.

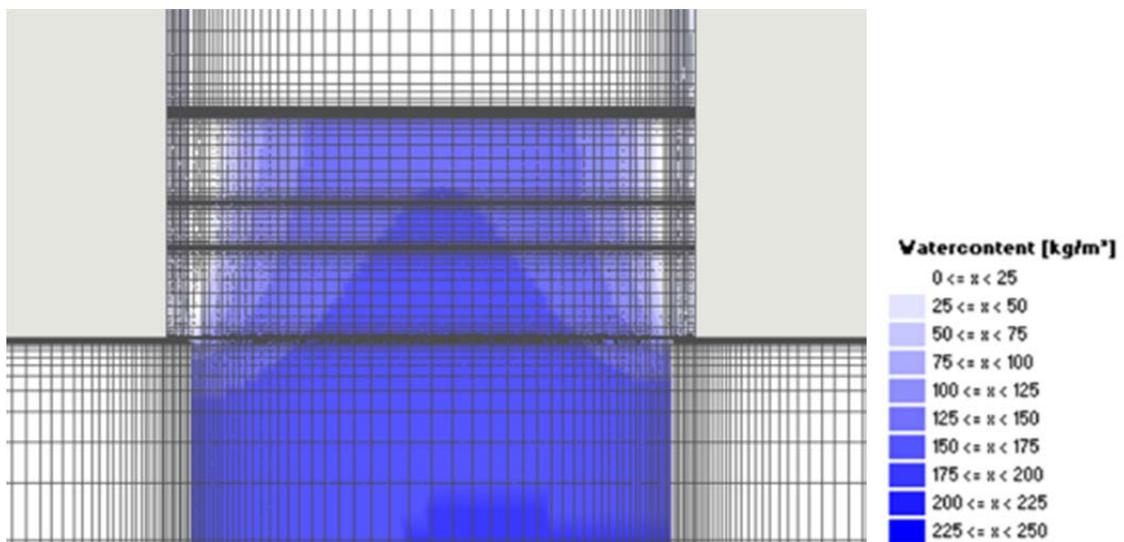
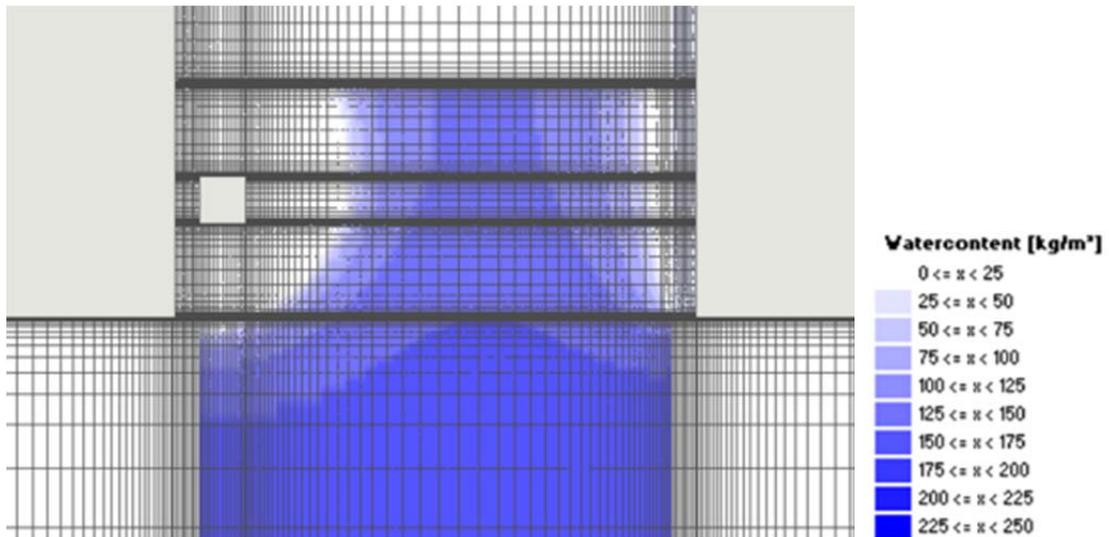


Bild 102:
Berechnete Wassergehaltsverteilung nach einem 1,5 Jahren ohne (unten) und mit Bauteiltemperierung (oben). Der Einfluss der Bauteiltemperierung (hier nur Vorlauf) ist klar erkennbar.

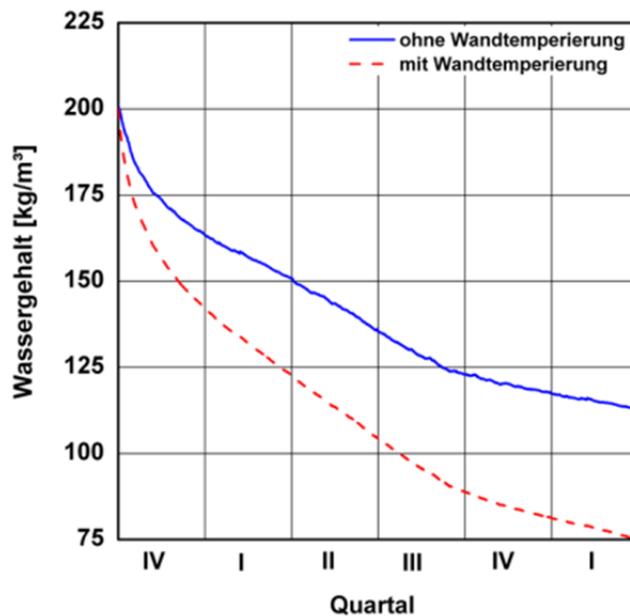


Bild 103:
Verlauf des Wassergehaltes im Bereich zwischen Fußbodenoberkante und Horizontalsperre ohne (blaue Linie) und mit (rote Linie) Bauteiltemperierung.

Energieverbrauch

Um zu überprüfen, ob der Betrieb der Bauteiltemperierung aufgrund der Wandtrocknung eine energiesparende Beheizung darstellt, wird der Verlauf des Energieflusses über die Außenwand oberhalb des Bodens (zwischen Punkt A und B in Bild 99, Bild 104 rote Linie) mit und ohne Temperierung verglichen. Da in beiden Fällen das gleiche Innenraumklima zugrunde liegt, müsste damit eine potentielle Einsparung erkennbar werden. Man erkennt jedoch, dass mit Bauteiltemperierung deutlich höhere Wärmeströme vorliegen. Verstärkend kommt hier hinzu, dass die Bauteiltemperierung auch außerhalb der üblichen Beheizungszeiten in Betrieb ist.

Betrachtet man die Wärmedurchlasswiderstände- bzw. den Wärmedurchgangskoeffizient der Wand wird klar, warum dies so sein muss. Zum Ende der Berechnung liegt der mittlere Wassergehalt ohne Temperierung bei 113 kg/m^3 , mit dagegen nur bei 75 kg/m^3 . Damit steigt der Wärmedurchlasswiderstand der Ziegelwand durch die veränderte Wärmeleitfähigkeit von $0,34 \text{ m}^2\text{K/W}$ auf $0,42 \text{ m}^2\text{K/W}$. Allerdings findet bei der Bauteiltemperierung der Wärmeübergang direkt in der Wand statt, sodass der Wärmeübergangswiderstand von der Raumluft zur Wand wegfällt. Dies führt dazu, dass trotzdem der Wärmedurchgangskoeffizient von $1,9$ auf $2,2 \text{ W/m}^2\text{K}$ steigt.

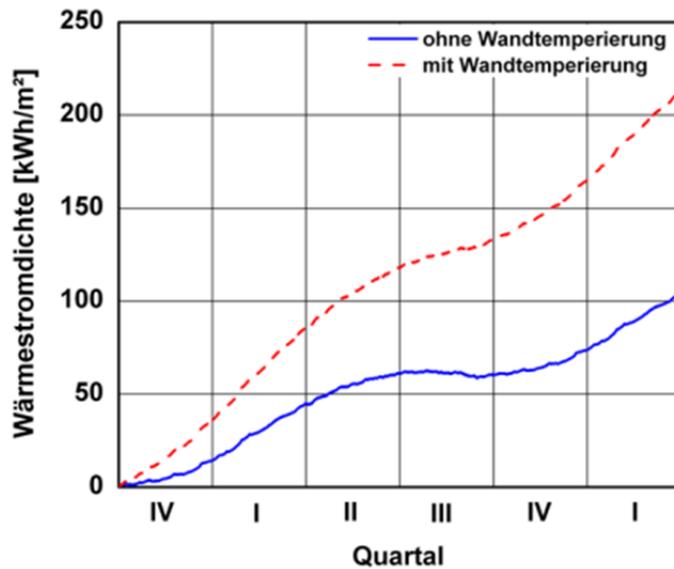


Bild 104:
Integraler Verlauf der Wärmestromdichten über die Außenwand für den Aufbau mit (rote Linie) und ohne Wandtemperierung (blaue Linie).

Aufsteigende Feuchte

In Bild 104 ist der Kapillarstrom über die Grenze C-A (siehe Bild 99Bild 99, blaue Linie) dargestellt. Mit Bauteiltemperierung ergibt sich ein höherer Kapillarstrom als ohne, d.h. der kapillare Feuchtetransport aus dem Boden wird durch die Temperierung der Wand verstärkt. Dies ist darin begründet, dass die durch die Bauteiltemperierung bewirkte Trocknung des Bereiches nahe des Heizrohrs der Wassergehaltsgradient hier vergrößert wird und damit auch die treibende Kraft für den Kapillartransport.

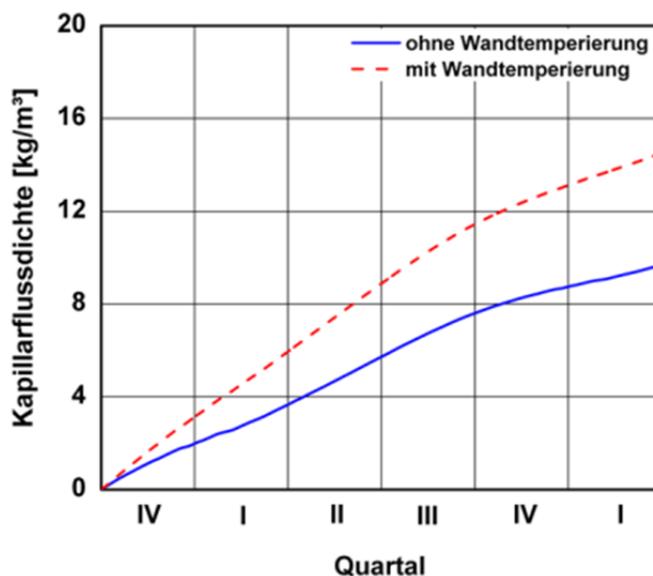


Bild 105:
Integraler Verlauf der Kapillarstromdichten über die Grenze C-A für den Aufbau mit (rote Linie) und ohne Wandtemperierung (blaue Linie).

Diffusion nach innen

Bild 106 zeigt den integralen Verlauf der Diffusionsstromdichte über die Grenze C-D (siehe Bild 98, grüne Linie), also zum Innenraum hin. Mit Bauteiltemperierung ergibt sich ein wesentlich höherer Diffusionsstrom als ohne.

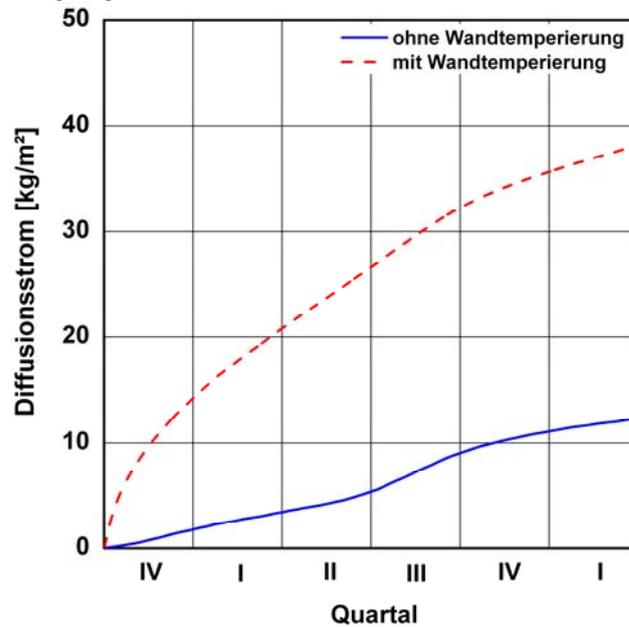


Bild 106:

Integraler Verlauf der Diffusionsstromdichten über die Grenze C-D (siehe Bild 98) für den Aufbau mit (rote Linie) und ohne Wandtemperierung (blaue Linie).

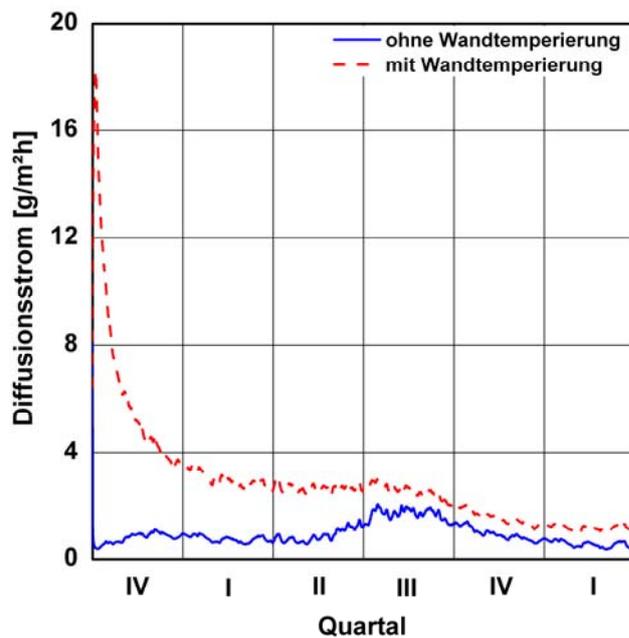


Bild 107:

Verlauf der Diffusionsstromdichten über die Grenze C-D (siehe Bild 98) für den Aufbau mit (rote Linie) und ohne Wandtemperierung (blaue Linie).

Dies bedeutet, dass ein großer Teil der Bauteilfeuchte nach innen abgegeben wird. Der Unterschied zum nicht temperierten Fall ist vor allem anfangs extrem groß, wie sich aus der in Bild 107 dargestellten Diffusionsstromdichte erkennen lässt. Der zu Beginn der Berechnung vorliegende hohe Wassergehalt wird durch die Beheizung sehr schnell ausgetrieben, was zu enorm hohen Diffusionsströmen nach innen führt. Nach etwa 10 Monaten wird aber ein nahezu eingewungener Zustand erreicht, sodass sich für beide Fälle die Diffusionsströme annähern. Die Diffusionsströme verlaufen ab diesem Zeitpunkt nahezu parallel. Allerdings ist mit Bauteiltemperierung der Diffusionsstrom nach innen mit etwa doppelter Höher weiterhin wesentlich größer.

Zusammenfassung

Zur Beurteilung der hygrothermischen Vorgänge bei einer Bauteiltemperierung wurden zweidimensionale instationäre Berechnungen durchgeführt. Zugrunde gelegt wurde dazu das Beispiel der Renatuskapelle, da hierfür zumindest teilweise messtechnische Untersuchungsergebnisse vorliegen. Es wurde versucht, die dortige Situation möglichst realitätsnah abzubilden. Eine exakte Abbildung ist aber mangels ausreichender Daten für Material und Randbedingungen sowie programmtechnischer Einschränkungen nicht möglich. Insofern geben die Rechenergebnisse nicht die exakte Situation der Renatuskapelle wider. Dies war aber auch nicht die Zielsetzung dieser Berechnungen. Der Zweck dieser Untersuchungen liegt darin, die offenen Fragen, die bei einer Bauteiltemperierung auftreten, zu beantworten und die dabei auftretenden hygrothermischen Vorgänge besser zu verstehen.

Die Berechnungen bestätigen, dass die Bauteiltemperierung ihre eigentliche Aufgabe, das gefährdete Bauteil schnell zu trocknen und damit Schäden durch mikrobiellen Bewuchs, Salzkristallisationswechsel oder Frost sicher zu vermeiden, hervorragend erfüllt. Eine Energie einsparende Beheizung kann sie aber nicht darstellen. Auch wenn durch die Trocknung des Mauerwerks eine gewisse Absenkung von dessen Wärmeleitfähigkeit bewirkt wird, führt das Fehlen des innenseitigen Wärmeübergangswiderstandes, der aufgrund des typischerweise schlechten Dämmstandards des Mauerwerks eine große Rolle spielt, zu insgesamt höheren Wärmeströmen nach außen.

Bei der Anwendung muss, wie die Berechnungen zeigen, beachtet werden, dass durch die Bauteiltemperierung eine gegebenenfalls vorliegende aufsteigende Feuchte aufgrund des gestiegenen Wassergehaltsgradienten verstärkt werden kann. Dies bedeutet nicht, dass das Wasser weiter aufsteigt, da durch die lokal vorliegende erhöhte Temperatur eine deutlich erhöhte Verdunstung stattfindet. Aber der kapillare Fluss unterhalb der Temperierung im Bauteilsockel wird damit erhöht. Dies kann im ungünstigen Fall zu einer verstärkten Anreicherung von Salzen im Mauerwerk führen und sollte deshalb im Einzelfall bei der Beurteilung der Maßnahme mit berücksichtigt werden.

Aus den Berechnungen ergibt sich auch, dass die Bauteiltemperierung zu einem erhöhten Diffusionsstrom vom Mauerwerk zur Raumseite führen kann. Dies ist

in besonderem Maß zu Beginn der Temperierung gegeben, da in diesem Zeitraum eine große Menge an Wasser aus dem Mauerwerk getrieben wird. Aber auch im langfristigen Betrieb ist aufgrund des oben beschriebenen Anstiegens des Kapillartransports ein erhöhter Diffusionsmassenstrom nach innen gegeben. Dies kann zu einer Erhöhung der Raumluchtfeuchte führen, weshalb zumindest in den ersten Monaten nach Inbetriebnahme für eine erhöhte Feuchteabfuhr gesorgt werden sollte.

Die Bauteiltemperierung ist in vielen Fällen eine sinnvolle und angebrachte Maßnahme, die richtig eingesetzt wertvolle Kultursubstanz erhalten kann. Vor diesem Hintergrund sollten auch andere Fragestellungen, wie z.B. die Energieeinsparung, erst in zweiter Hinsicht Bedeutung haben. Außerdem kann durch eine angepasste Betriebsführung, bei der z.B. die Temperierung so geregelt wird, dass sie ausschließlich der Schadensvermeidung dient, ein Großteil der erhöhten Wärmeverluste vermieden werden.

5.4.3 Berechnungen zum Einfluss einer Dämmung zwischen Mauerwerk und Wandheizung

Eine Wandheizung wird meist eingesetzt, um einerseits eine hohe Behaglichkeit zu erzielen und andererseits Feuchteprobleme an der Außenwand zu vermeiden. Es ist naheliegend zwischen Wandheizung und Außenwand eine zusätzliche Dämmschicht einzubringen. Damit ergeben sich aber die folgenden zusätzlichen Fragestellungen:

1. Welche Energieeinsparung bringt eine Dämmschicht zwischen Flächenheizung und Außenwand?
2. Wie hängt im Vergleich zur Beheizung der ungedämmten Wand diese Energieeinsparung von der Dicke bzw. dem Wärmedurchlasswiderstand der Dämmschicht ab?
3. Werden durch diese Dämmmaßnahme Feuchteschäden induziert?
4. Hier ist als potentieller Schaden die Tauwasserproblematik im Mauerwerk hinter der Dämmung und das außenseitige Frostschadensrisiko durch vermindertes Trocknungspotential zu untersuchen.

Durchführung der Untersuchungen

Bei den Berechnungen werden die folgend beschriebenen Randbedingungen zugrunde gelegt. Als Außenklima dient ein für den Standort Holzkirchen typisches Jahresklima, als für deutsche Verhältnisse besonders ungünstiges Klima. Als Wärmeübergangskoeffizienten wird innenseitig von $8 \text{ W/m}^2\text{K}$ und außenseitig von $17 \text{ W/m}^2\text{K}$ ausgegangen. Für das Innenklima dienen Wohnraumverhältnisse mit normaler Feuchtelast (entsprechend WTA-Merkblatt 6-3-01/D [48]). Es wird als Wandausrichtung die hygrisch ungünstigste Westausrichtung (Wetterseite) gewählt.

Es wird bei den rechnerischen Untersuchungen von einem Wandaufbau mit 36 cm Vollziegel und einem Innenputz ausgegangen, auf den eine Wandflächenheizung, die in einem Putz eingebettet ist, aufgebracht ist. Zwischen Heizung und Altputz wird ein Dämmstoff eingebaut. Als Dämmstoff wird zum einen mineralische Dämmplatte eingesetzt. Außerdem wird ein aufspritzbarer Dämmstoff in die Untersuchungen einbezogen, da er bei der im Altbaubereich üblichen Unebenheit der Wand den Vorteil hat, dass im Gegensatz zu einer Dämmplatte eine zusätzliche Ausgleichsschicht nicht erforderlich ist. Die Dämmstoffdicke sollte aus praktischen Gründen im Bereich zwischen 2 cm und 10 cm variieren; größere Dicken werden beim Kunden kaum durchsetzbar sein. Die Berechnungen werden für einen Zeitraum von mehreren Jahren durchgeführt, um das langfristige Verhalten beurteilen zu können.

Bei der Wandflächenheizung wird von einer konstanten Heiztemperatur von 23 °C über die Heizperiode ausgegangen und die Transmissionswärmeverluste durch Aufintegrieren der Wärmeströme über diese Periode ermittelt. Für die vergleichende Bewertung wird die außenwandflächenbezogene Wärmestromdichte in Abhängigkeit von der Dämmung dargestellt.

Es werden folgende Dämmvarianten untersucht:

- Grundvariante: ungedämmtes Mauerwerk
- Untervariante 1.1: Dämmung mit mineralischer Dämm-Platte 50 mm
- Untervariante 1.2: Dämmung mit mineralischer Dämm-Platte 80 mm
- Untervariante 1.3: Dämmung mit mineralischer Dämm-Platte 100 mm
- Untervariante 2.1: Dämmung mit Perlite-Dämmputz 30 mm
- Untervariante 2.2: Dämmung mit Perlite-Dämmputz 50 mm

Bis auf die Dämmstoffe kommen sämtliche Materialkennwerte als Standardwerte aus der WUFI®-Materialdatenbank. Die wesentlichen hygrothermischen Materialkenndaten der Dämmstoffe wurden zum Teil den technischen Merkblättern der mineralischen Dämm-Platte bzw. des Perlite-Dämmputzes entnommen. Fehlende Daten wurden anhand eines vergleichbaren Baustoffes aus der Materialdatenbank ergänzt. Die bauphysikalischen Grundkennwerte sind für beide Materialien in Tabelle 25 aufgelistet. Bild 108 zeigt den implementierten Wandaufbau mit mineralischer Dämmplatte und Wandheizung als Beispiel.

Tabelle 25:
Materialkennwerte der eingesetzten Dämmstoffe.

Eigenschaft	Einheit	Dämmstoff	
		Mineralische Dämmplatte	Perlite Dämmputz
Rohdichte	kg/m ³	115	300
Porosität	%	95	65
Diffusionswiderstandszahl μ (23-0/50)	-	3	6
Wasseraufnahmekoeffizient w	kg/m ² /h	2 - 3	3
Bezugsfeuchtegehalt bei 23 °C u. 80 % r.F.	[Vol.-%]	< 0,7	0,45
freie Wassersättigung	[Vol.-%]	30	40
Wärmeleitfähigkeit	[W/mK]	0,045	0,08

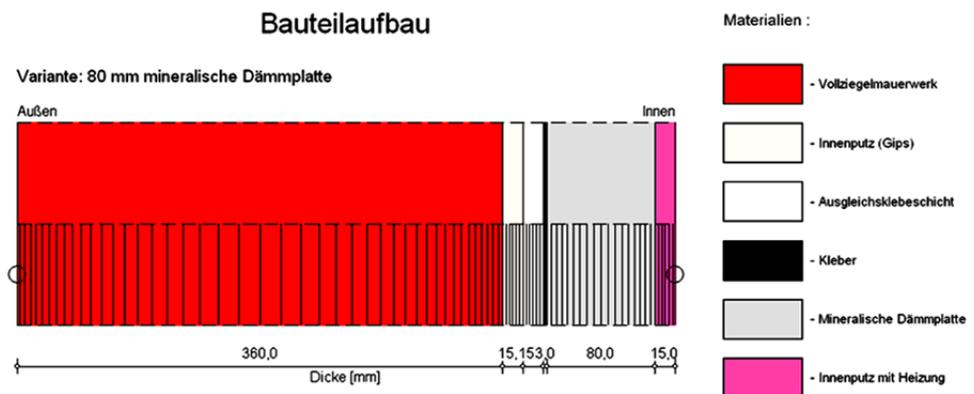


Bild 108:
Implementierter Wandaufbau am Beispiel der Innendämmung mit mineralischer Dämmplatte und Wandtemperierung.

Ergebnisse

Im Folgenden wird zunächst der Einfluss der unterschiedlichen Dämmung zwischen Außenwand und Wandheizung beschrieben. Anschließend werden die Ergebnisse zu den Untersuchungen zum außenseitigen Frostschadensrisiko durch vermindertes Trocknungspotential und zum Schimmelpilzwachstumsrisiko dargestellt.

Energetischer Einfluss

Für die Ermittlung des Einflusses der unterschiedlichen Dämmung zwischen Außenwand und Wandheizung wurde der zwischen Wand und Innenputz berechnete Wärmestrom herangezogen. Um auch den immer wieder auftretenden Fall einer nur teilweise mit einer Wandheizung belegten Außenwand zu

untersuchen, wird nicht von einer raumhohen Außenwandheizung ausgegangen werden, sondern diese nur bis zu einer Höhe von 1,50 m ausgeführt. Eine exakte rechnerische Ermittlung der Transmissionswärmeverluste gemittelt über die gesamte Raumhöhe ist mit einer eindimensionalen Berechnung nicht durchführbar. In guter Näherung können der temperierte Wandteil und der unbeheizte getrennt eindimensional berechnet werden und durch anteilige Wichtung der mittlere Wärmeverlust ermittelt werden.

In Tabelle 24 ist für den Wandteil mit Heizung der Wärmestrom für eine angenommene Heizperiode von Anfang Oktober bis Ende März für alle Dämmvarianten zusammengestellt.

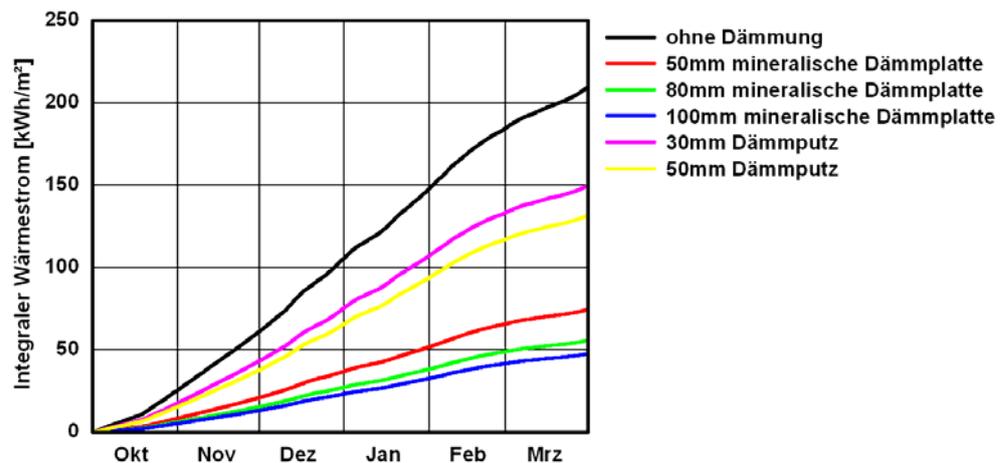


Bild 109:

Zusammenstellung der über die Heizperiode von Anfang Oktober bis Ende März aufintegrierten Wärmeströme der unterschiedlichen Dämmvarianten für den Wandteil mit Heizung.

Der Einfluss der Dämmung ist deutlich zu erkennen. Aufgrund der geringeren Wärmeleitfähigkeit zeigt die mineralische Dämmplatte eine wesentlich größere Wirkung. Während im Vergleich zur ungedämmten Wand der Dämmputz eine Absenkung der Transmissionswärmeverluste um etwa 29 % (30 mm Dicke) bzw. 38 % (50 mm Dicke) bewirkt, wird durch die Dämmplatte der Wärmestrom um 64 % (50 mm Dicke) bis 69 % (100 mm Dicke) verringert.

Bild 110 zeigt die analogen Ergebnisse für den unbeheizten Wandteil. Besonders auffällig ist der Unterschied des Wärmestroms der ungedämmten Wand mit Heizung zur Variante ohne Heizung. Ohne Wandheizung liegt der Transmissionswärmeverlust nur bei etwa zwei Drittel dessen ohne Wandtemperierung.

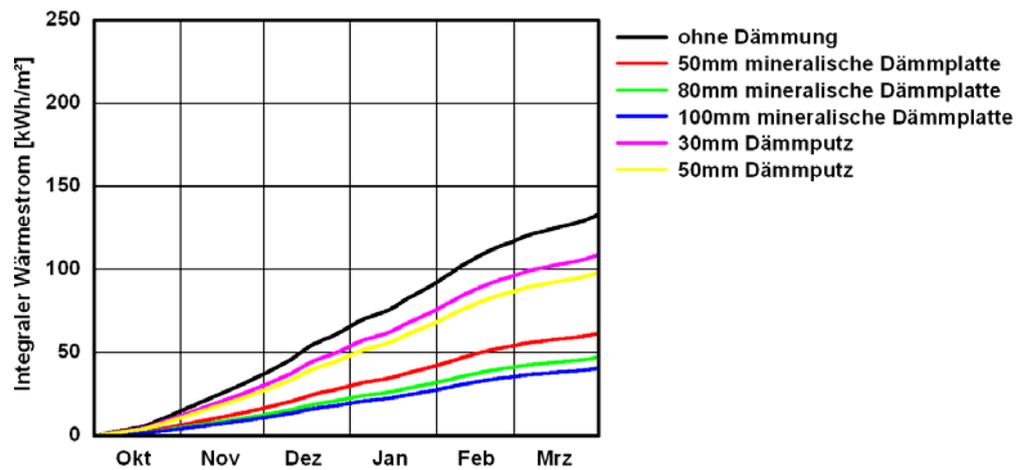


Bild 110:

Zusammenstellung der über die Heizperiode von Anfang Oktober bis Ende März aufintegrierten Wärmeströme der unterschiedlichen Dämmvarianten für den Wandteil ohne Heizung.

Dies ist zum einen im fehlenden innenseitigen Wärmeübergangswiderstand bei der Wandheizung begründet, was sich vor allem bei niedrigem Wärmedämmstandard besonders bemerkbar macht. Zum anderen wird eine Heiztemperatur von 23 °C angenommen, während die Raumlufttemperatur in der Heizperiode mit etwa 20 °C angenommen wird. Bei den gedämmten Varianten ergibt sich eine gleichartige Reihung wie bei der beheizten Wand mit auch hier durch den innenseitigen Übergangswiderstand und der niedrigeren Raumlufttemperatur geringeren Werten. In Tabelle 26 sind die integralen Wärmeströme für alle Varianten mit und ohne Wandheizung aufgezählt. Mit aufgelistet ist auch der mittlere Wärmebedarf bei einer beheizten Höhe von 1,5 m und 2,5 m Raumhöhe sowie die auf die ungedämmte Wand bezogene Einsparung in %.

Tabelle 26:
 Integrale Wärmeströme für alle Varianten mit und ohne Wandheizung.

Integrale Transmissionswärmeverluste der Heizperiode	Temperiert [kWh/m²]	Nicht temperiert [kWh/m²]	Szenario mit 60 % temperierter Fläche [kWh/m²]	Einsparung im Szenario [%]
ungedämmt	211	134	180	0
Mineralische Dämm-Platte 50 mm	75	62	70	61
Mineralische Dämm -Platte 80 mm	56	48	53	71
Mineralische Dämm -Platte 100 mm	48	41	45	75
Perlite-Dämmputz 30 mm	150	110	134	26
Perlite-Dämmputz 50 mm	132	99	119	34

Einfluss der Dämmung auf den Feuchtehaushalt der Wand

Bild 111 zeigt den Verlauf des Gesamtwassergehaltes der Wand für den nicht temperierten Wandteil (links) und den temperierten (rechts) für die Varianten ohne (oben) Dämmung, mit 50 mm Dämmputz (mittig) und mit 80 mm Dämmplatte (unten). Man erkennt, dass bereits nach einem Jahr in allen Fällen ein eingeschwungener Zustand vorliegt. Insgesamt ergeben sich aufgrund der sehr erheblichen Schlagregenbelastung hohe Wassergehalte im Wandaufbau. Im temperierten Wandteil (rechts) ist der Wassergehalt stets etwas niedriger als im nicht temperierten (links). Einen deutlich größeren Einfluss auf den Gesamtwassergehalt hat die Wärmedämmung. Mit 50 mm Dämmputz (mittig) steigt der mittlere Gesamtwassergehalt von ca. 48 kg/m² (ungedämmt, oben) auf ca. 51 kg/m². Mit 80 mm Dämmplatte (unten) steigt er deutlich weiter an auf ca. 60 kg/m².

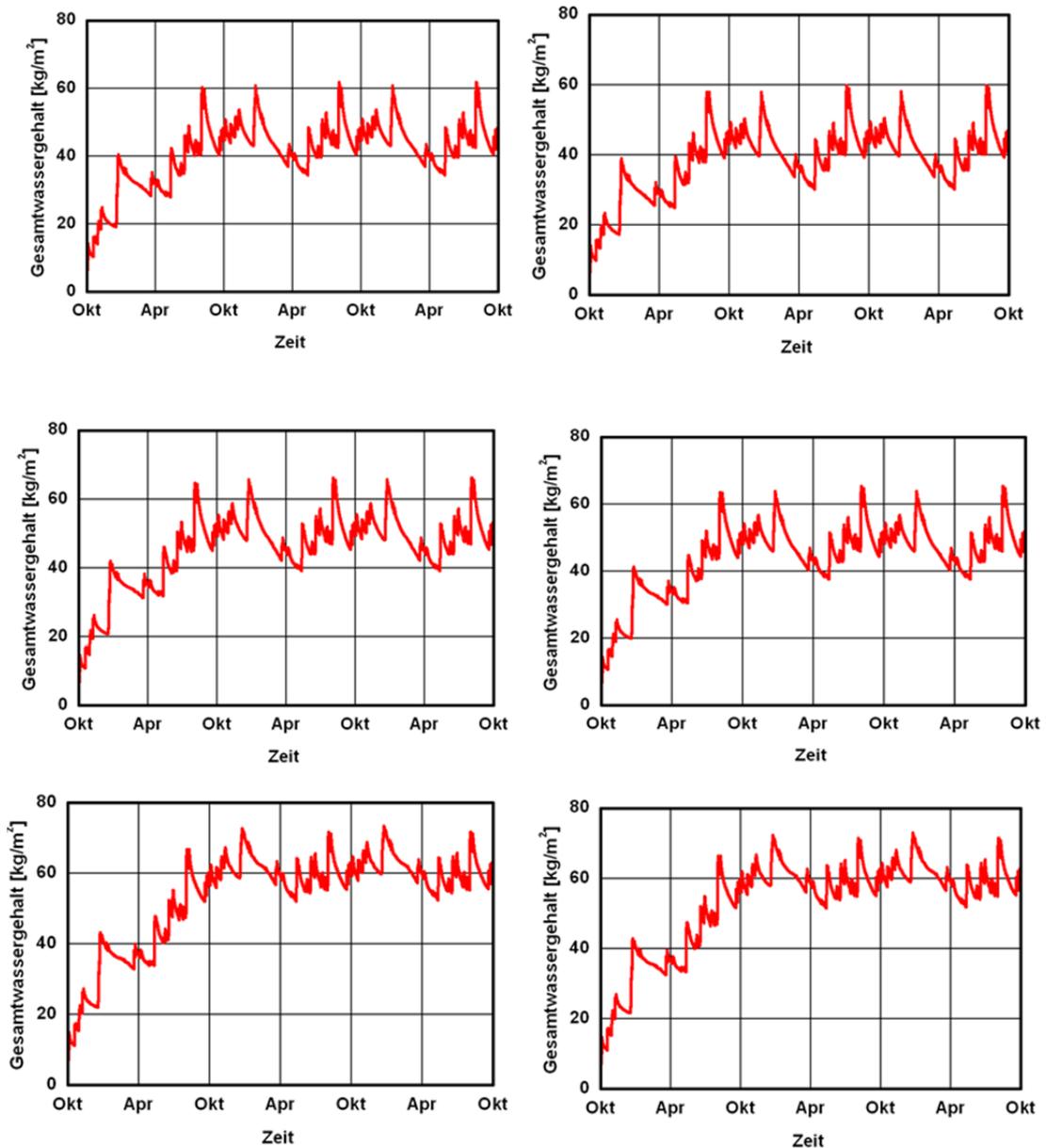


Bild 111:
Verlauf des Gesamtwassergehaltes der Wand für den nicht temperierten Wandteil (links) und den temperierten (rechts) für die Varianten ohne (oben) Dämmung, mit 50 mm Dämmputz (mittig) und mit 80 mm Dämmplatte (unten).

Frostschadensrisiko

Da durch eine Innendämmung das Trocknungspotential der Wand verringert wird und somit deren Wassergehalt ansteigt, besteht die Möglichkeit, dass nach Anbringen einer Innendämmung an einer vorher langfristig unbeschädigten Wand Frostschäden auftreten. Als einfaches Kriterium zur Beurteilung, ob ein Schadensrisiko gegeben sein könnte, wird der Wassergehalt beim Frosterignis ermittelt. Dabei wird davon ausgegangen, dass aufgrund der Kapillarstruktur im Ziegel frühestens bei -1 °C das Kapillarwasser gefriert. Da die Eisbildung eine Volumenvergrößerung von etwa 10 % mit sich bringt, kann man

davon ausgehen, dass erst bei Sättigungsgraden oberhalb 0,9 ein Frostschaden auftreten kann, da andernfalls ausreichend freier Porenraum zu Eisbildung vorhanden ist. Typischerweise zeigen sich in einer monolithischen, kapillaraktiven Wand Frostschäden vorwiegend ca. 0,5 cm bis 2 cm unterhalb der Außenoberfläche. Dies ist darin begründet, dass die Oberfläche sehr schnell nach einem Regenereignis wieder abtrocknet, weshalb auch im Jahresmittel der maximale Wassergehalt einer berechneten Wand in diesen 0,5 cm bis 2 cm unterhalb der Außenoberfläche liegt. Für die Beurteilung des Frostschadensrisikos wird deshalb für die ersten 2 cm der Fassade bestimmt, wie häufig in Abhängigkeit von der eingesetzten Innendämmvariante bei Wassergehalten oberhalb 90 % Sättigung der Gefrierpunkt unterschritten wird und dies mit dem ungedämmten Urzustand verglichen. In Tabelle 27 ist die Häufigkeit der Gefrierpunktsunterschreitung aller Dämmvarianten für den temperierten und den nicht temperierten Wandteil aufgelistet.

Ohne Innendämmung tritt kein Frostereignis bei Wassergehalten oberhalb 90 % freier Sättigung auf. Dies ist ebenfalls gegeben bei beiden Dämmvarianten mit Dämmputz und bei der mineralischen Dämmplatte mit 50 mm Dicke. Bei 80 mm Dicke ist im temperierten Wandteil ebenfalls keine Frostgefährdung gegeben, im nicht temperierten Teil treten dagegen zu vier Zeitpunkten Frostereignisse bei Wassergehalten oberhalb 90 % freier Sättigung auf. Dies ist zwar eine eher geringe Anzahl, eine langfristige Frostschädigung ist aber nicht sicher auszuschließen. Bei Verwendung einer 100 mm dicken mineralischen Dämmplatte gilt diese Aussage auch für den temperierten Wandteil.

Tabelle 27:
Anzahl der Gefrierpunktsunterschreitungen der unterschiedlichen Varianten.

Anzahl der Gefrierpunktsunterschreitungen	Temperiert [-]	Nicht temperiert [-]
ungedämmt	0	0
Mineralische Dämm -Platte 50 mm	0	0
Mineralische Dämm -Platte 80 mm	0	4
Mineralische Dämm -Platte 100 mm	4	4
Perlite-Dämmputz 30 mm	0	0
Perlite-Dämmputz 50 mm	0	0

Risiko von Schimmelpilzbildung

Bild 112 zeigt die sich im Bauteilquerschnitt einstellenden Profile für die Temperatur (rote Linie bzw. Fläche), den Wassergehalt (blaue Linie bzw. Fläche) und die relative Luftfeuchte (grüne Linie bzw. Fläche) für den letzten berechneten Jahreszyklus. Die durchgezogenen Linien beschreiben jeweils die aktuelle Verteilung und die Flächen repräsentieren die im Jahresverlauf durchlaufenen Werte.

In Bild 112 sind als Beispiele die Ergebnisse für eine Innendämmung mit 50 mm Dämmputz (oben) und mit 80 mm mineralische Dämmplatte (unten) dargestellt. Bei der Innendämmung mit 50 mm Dämmputz erkennt man, dass sich beim nicht temperierten Wandteil (links oben) aufgrund der hohen Schlagregenbelastung im Ziegelmauerwerk sehr hohe Wassergehalte einstellen. Dies führt dazu, dass sich fast im gesamten Mauerwerk permanent relative Luftfeuchten von annähernd 100 % einstellen. Dies bewirkt auch hohe Luftfeuchten im Dämmputz. Im darauf anschließenden Innenputz fällt die Luftfeuchte dann aber auf Werte unterhalb von 65 % ab, die eine Schimmelpilzbildung an der Oberfläche ausschließen. Die näherungsweise als Grenzwert für Schimmelpilzbildung geltenden 80 % relative Luftfeuchte werden erst in einer Tiefe von annähernd 10 mm überschritten, also an einer Stelle an die keine Sporen gelangen können, sodass hier Schimmelpilzbildung ausgeschlossen werden kann.

Bild 112 oben rechts zeigt das Ergebnis für den temperierten Wandteil, erkennbar auch daran, dass die Temperatur im Innenputz mit den Heizungsrohren konstant bei 23 °C beharrt. Die Wandtemperierung führt zu einer Verschiebung der Feuchte nach außen, sodass z.B. die 80 % relative Luftfeuchte im gesamten beheizten Innenputz unterschritten bleibt.

Um den Einfluss der extremen Schlagregenbelastung zu zeigen, wurden für die Variante mit 50 mm Dämmputz zusätzlich Berechnungen ohne Regenwasseraufnahme durchgeführt, deren Ergebnisse in Bildmitte dargestellt sind. Erwartungsgemäß ergibt sich dadurch ein wesentlich geringerer Wassergehalt im Mauerwerk. Dies hat aber auch einen starken Einfluss auf den Wassergehalt des Dämmputzes und des Innenputzes und führt dazu, dass die 80 % relative Luftfeuchte erst im alten Innenputz überschritten werden (Bild 112 mittig links). Auch hier bewirkt die Wandheizung (rechte Abbildung) eine etwas günstigere Situation.

In den unteren Abbildungen sind die Ergebnisse für eine Wanddämmung mit 80 mm dicker mineralischer Dämmplatte dargestellt. In der Dämmplatte stellen sich deutlich niedrigere Wassergehalte als in dem Dämmputz ein. Dies ist vor allem darin begründet, dass die zusätzliche Ausgleichsschicht und vor allem der relativ hydrophobe Kleber den Kapillartransport nach innen bremst. Deswegen wird hier auch im nicht temperierten Wandteil (Bild 112 unten links) eine relative Luftfeuchte von 80 % erst hinter dem Innenputz überschritten. Im beheizten Wandteil (Bild 112 unten rechts) ergibt sich dementsprechend eine weitere Verschiebung der Feuchte nach außen.

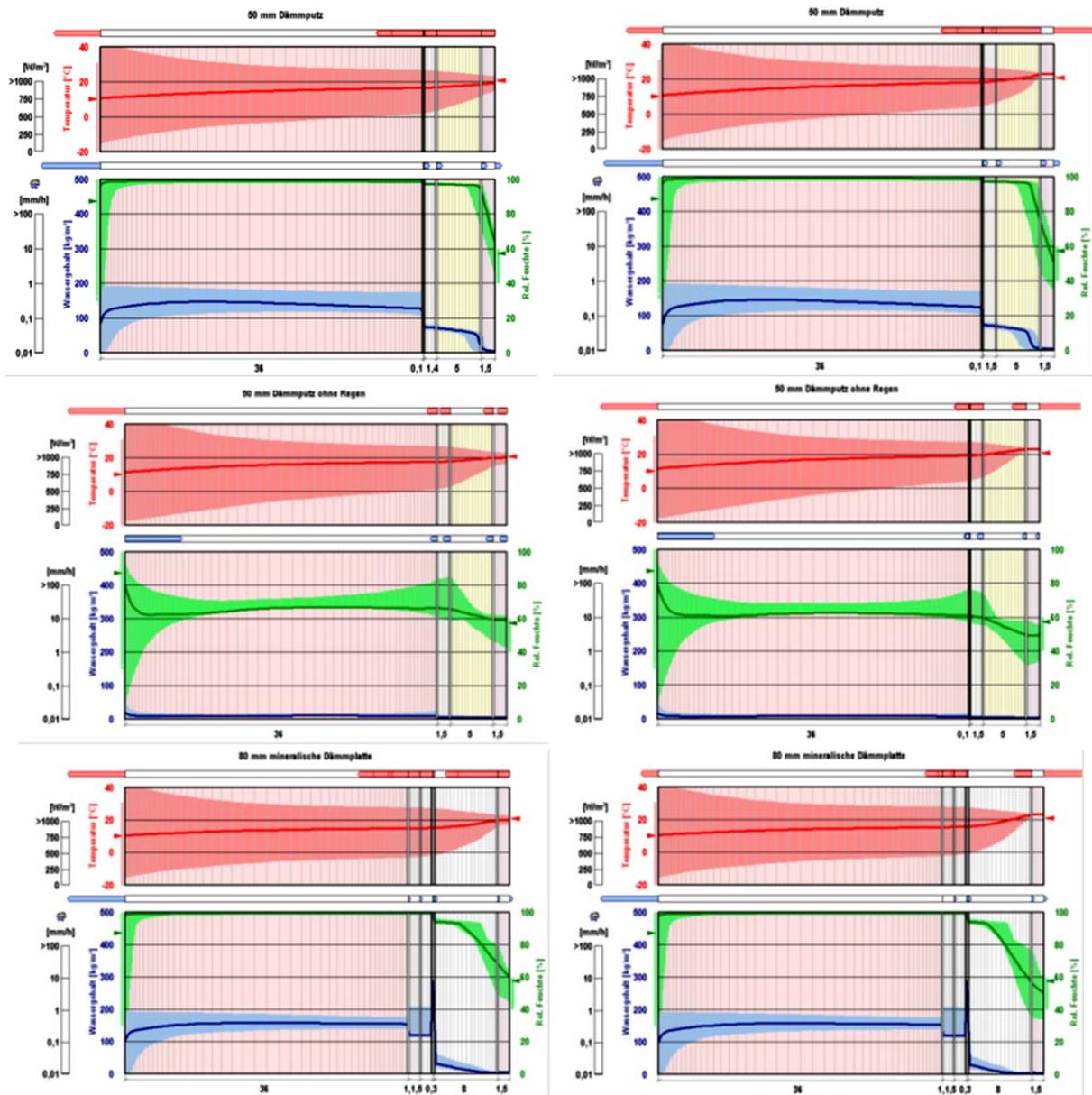


Bild 112:

Im Bauteilquerschnitt sich einstellende Profile für die Temperatur (rot), den Wassergehalt (blau) und die relative Luftfeuchte (grün) für den letzten berechneten Jahreszyklus bei Innendämmung mit 50 mm Dämmputz (oben) und 80 mm mineralischer Dämmplatte (unten). Die Abbildungen in der Mitte zeigen

Links: Ergebnisse für den nicht temperierten Wandteil

Rechts: Ergebnisse für den temperierten Wandteil.

Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Es wurden rechnerische Untersuchungen für einen typischen zu sanierenden Altbau mit Ziegelmauerwerk wird einer Flächenheizung durchgeführt. Das Ziel ist dabei, ein behagliches Raumklima zu erreichen, aber typische Feuchteschäden, wie z.B. Schimmelpilzbildung, zu vermeiden. Dabei soll geklärt werden, welche Energieeinsparung eine Dämmschicht zwischen Flächenheizung und Außenwand bringt und wie diese von der Dicke bzw. dem Wärmedurchlasswiderstand der Dämmschicht im Vergleich zur Beheizung der ungedämmten Wand abhängt. Da Innendämmungen aber aus bauphysikalischen Gründen - Absenkung der Temperatur der Außenwand - nicht unkritisch sind, sollte die Wahl des Dämmstoffes sowie der gesamte Konstruktionsaufbau den hygrothermischen Verhältnissen genau angepasst werden. Dabei sind Frost- und Tauwasserschutz von entscheidender Bedeutung für den Erhalt und die Dauerhaftigkeit des Gebäudes.

Im Vergleich zum ungedämmten Wandaufbau wird ein Aufbau mit 30 mm sowie 50 mm Dämmputz und mit 50 mm, 80 mm und 100 mm mineralischer Dämmplatte zwischen Altbauwand und neuem Innenputz mit Wandheizung untersucht. Da geplant ist, die Wandheizung nur bis zu einer Höhe von 1,5 m aufzubringen, werden zur Beurteilung der hygrothermischen Vorgänge im darüber liegenden Wandbereich für alle Varianten Berechnungen ohne Wandheizung durchgeführt.

Zur Beurteilung der möglichen Energieeinsparung wird der Wärmefluss zwischen altem Innenputz und Ziegelwand über die Heizperiode aufintegriert. Anhand dieses Kennwertes ist der Einfluss der Dämmung deutlich zu erkennen. Mit dem Dämmputz kann dieser Wärmefluss im Vergleich zur Variante ohne Dämmung um bis etwa ein Drittel abgesenkt werden. Aufgrund der geringeren Wärmeleitfähigkeit zeigt die mineralische Dämmplatte eine wesentlich größere Wirkung. Hiermit ist eine Verminderung der Transmissionswärmeverluste um 61 % (50 mm Dicke) bis 75 % (100 mm Dicke) gegeben. Bei der Bewertung der berechneten Einsparung muss aber berücksichtigt werden, dass hier nur die Transmissionswärmeverluste durch die Wand berücksichtigt werden. Der Einfluss der Fenster mit seinen Transmissionswärmeverlusten, aber auch solaren Gewinnen sowie die Lüftungswärmeverluste werden hier nicht betrachtet.

Die hygrothermischen Berechnungen zeigen aber auch, dass die Innendämmung aufgrund des damit verbundenen verringerten Trocknungspotentials zu einer Erhöhung des Wassergehaltes der Ziegelwand führt. Trotz der wegen der sehr starken Schlagregenbelastung hohen Wassergehalte ist nur bei einer Innendämmung mit einer 100 mm starken mineralischen Dämmplatte eine Frostschadensgefahr gegeben, dies sowohl im unbeheizten Teil als auch im beheizten. Von dieser Dämmstärke ist deshalb abzuraten. Bei 80 mm dicker Dämmplatte besteht nur im nicht temperierten Wandteil Frostschadensgefahr, weshalb bei Wahl dieser Dämmung auf der Wetterseite eine raumhohe Beheizung der Wand anzuraten ist.

Bei allen Dämmvarianten ist auf der Innenoberfläche aufgrund der niedrigen Oberflächenfeuchten Schimmelpilzbildung ausgeschlossen. Vor allem die extreme Schlagregenbelastung bewirkt aber, wie die zum Vergleich durchgeführten Berechnungen ohne Regenaufnahme zeigen, dass bei der Variante mit Dämmputz im unbeheizten Wandbereich bereits wenige Millimeter hinter der Innenoberfläche Luftfeuchten oberhalb 90 % vorliegen. Im temperierten Bereich ist die Situation etwas günstiger. Auch in Bezug auf diese Fragestellung zeigt die Dämmplatte Vorteile gegenüber dem Dämmputz. In der Dämmplatte stellen sich deutlich niedrigere Wassergehalte als in dem Dämmputz ein. Dies ist vor allem darin begründet, dass die zusätzliche Ausgleichsschicht und vor allem der relativ hydrophobe Kleber den Kapillartransport nach innen bremst. Aus diesen Gründen sollte bei Gebäuden mit hoher Schlagregenbelastung und geringem Schlagregenschutz auf der Wetterseite eine raumhohe Beheizung der Wand vorgesehen werden.

Gerade bei Innendämmungen ist eine fachgerechte Anbringung der Dämmung zur Schadensvermeidung zwingend. Aufgrund der Temperaturabsenkung der Außenwand dürfen keinesfalls Fehlstellen durch die Dämmschicht oder deren Hinterlüftung vorkommen, da dies zwangsläufig zu einem Feuchteschaden und gegebenenfalls zu Schimmelpilzbildung führen wird. Deshalb muss der Dämmstoff grundsätzlich vollflächig und hohlraumfrei auf die Außenwand geklebt werden.

Nach gängiger Lehrmeinung ist der Übergangsbereich der Innendämmung zur einbindenden Wand oder Decke kritisch, wobei als Argument die Wärmebrückenwirkung der durch die Innendämmung kälteren Wand auf diesen Bereich angeführt wird. Bereits durchgeführte Berechnungen zeigen aber, dass hier kein besonderes Problem vorliegt, weil umgekehrt die einbindende Wand bzw. Decke durch ihre auf der warmen Seite liegenden großen Oberfläche an dieser Stelle eher für eine höhere Temperatur und damit geringere Feuchte sorgt. Sofern im Gebäude vor der Anbringung der Innendämmung im Übergangsbereich zur einbindenden Wand oder Decke keine Schimmelpilzprobleme aufgetreten sind, sind danach auch keine zu erwarten. Diese Aussage gilt allerdings nur unter der Voraussetzung, dass die sonstigen Randbedingungen unverändert bleiben. Liegt nach der thermischen Sanierung eine Nutzungsänderung mit höherer Feuchtelast oder ein verändertes Lüftungsverhalten (z. B. durch Einbau neuer dichter Fenster) vor, ist diese Fragestellung unter den neuen Randbedingungen zu überprüfen.

In die Außenwand einbindende Holzbalkenköpfe müssen bei der Gefährdungsbeurteilung gesondert betrachtet werden. Hier kann sich aufgrund der Temperaturabsenkung der Außenwand eine kritische Situation ergeben, die im ungünstigsten Fall zu einer Zerstörung der Balkenköpfe führen kann.

5.4.4 Berechnungen zum Einfluss von feuchtepuffernden Materialien und von intermittierender Nutzung auf das Raumklima mit dem Raummodell WUFI®-Plus

Hintergrund und Zielsetzung

Die Anforderungen an das Raumklima und dessen Stabilität zum Erhalt von Kulturerbe werden maßgeblich von den zu schützenden Materialien bestimmt. Eine umfassende Klimatisierung ist u.a. aus Kostengründen nicht immer möglich. Oftmals kann durch geeignete Maßnahmen, z. B. den Einsatz von feuchtepuffernden Materialien, eine gewisse Stabilisierung des Raumklimas erreicht bzw. der Klimatisierungsaufwand verringert werden. Dies gilt auch, wenn die Räume nicht gleichmäßig genutzt werden, sondern wenn sie, z. B. durch Sonderveranstaltungen, einem hohen Feuchte- und Wärmeeintrag durch eine große Anzahl von anwesenden Personen ausgesetzt sind.

Die Auswirkung des Sorptionsverhaltens der Umschließungsflächen auf das sich einstellende Raumklima und damit auf den Klimatisierungsaufwand auch bei intermittierender Nutzung wird exemplarisch am Beispiel des in der Alten Schäferei in Benediktbeuern geplanten Ausstellungsraums mit Hilfe des Raummodells WUFI®-Plus untersucht. Dabei wird besonderes Augenmerk auf kurzfristige Schwankungen der Temperatur und relativen Feuchte gelegt, da diese zu Schädigungen am Ausstellungsgut führen können.

Durchführung der Untersuchungen

Das hygrothermische Raumklimamodell WUFI®-Plus

Mithilfe des Softwaretools WUFI® Plus können die hygrothermischen Zustände der Umschließungsflächen und der Innenraumluft sowie der Energieaufwand bzw. -bedarf bei in stationären Randbedingungen berechnet werden. Für die Berechnung werden, neben den eingesetzten Materialien der einzelnen Bauteile, die Randbedingungen, wie Luftwechsel, Feuchteproduktion und die Leistung der Heizung und Kühlung im betrachteten Raum, berücksichtigt (Bild 113).

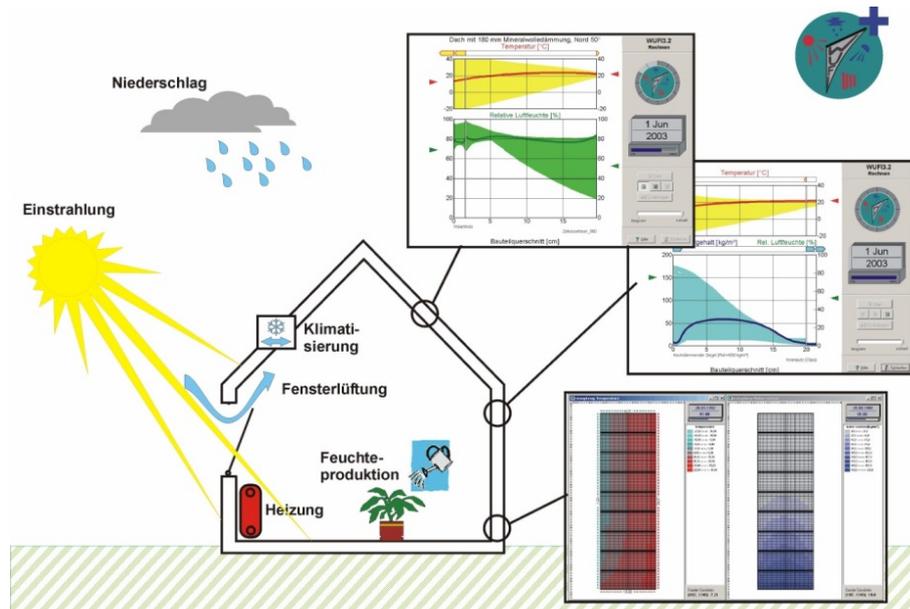


Bild 113:
 Beispielhafte Darstellung der Modellverknüpfungen bei der Raumklimasimulation mit WUFI® Plus zur Berücksichtigung der hygrothermischen Wechselwirkung zwischen Raumluft und Gebäudehülle.

Implementierter Aufbau

Für die Durchführung der Berechnungen wird der Aufbau des Raumes gemäß Bild 114 im Obergeschoss der Alten Schäfflerei in Benediktbeuern in das Programm implementiert.

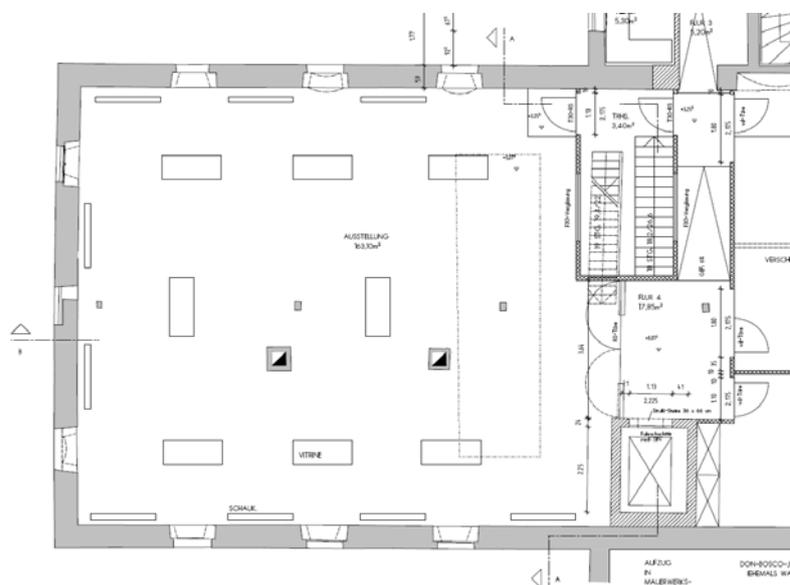


Bild 114:
 Ausschnitt aus dem Grundrissplan Alte Schäfflerei Benediktbeuern Obergeschoss (Quelle: Architekturbüro Spaenle).

Die Grundfläche beträgt 179,2 m² und die Ausstellungsfläche 163,1 m². Die Raumhöhe beträgt 3,4 m. Sowohl die Fensterflächen als auch das Interieur, in diesem Fall die offenen Ausstellungsvitrinen mit dem Ausstellungsgut, werden berücksichtigt. Der U-Wert der Decke beträgt $U = 0,247 \text{ W/m}^2\text{K}$. Die Außenwände bestehen aus historischem Ziegel (56 - 61 cm). Außen befindet sich ein mineralischer Putz und innen ein Gipsputz. Als feuchtepufferndes Material wird bei den rechnerischen Untersuchungen der Gipsputz (1 cm) durch einen Lehmputz (2,4 cm) ersetzt, wobei der U-Wert der Wände gleich bleibt.

Außenklima

Als Außenklimarandbedingung wird das Testreferenzjahr des nahe gelegenen Holzkirchen (siehe Bild 115) angesetzt.

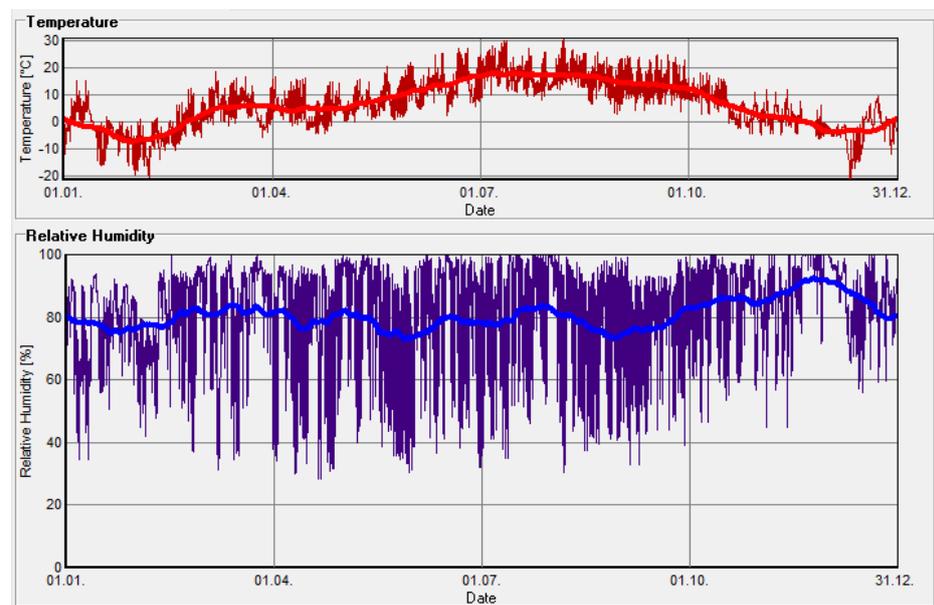


Bild 115:
Außenklimabedingungen (Temperatur und relative Feuchte) im Jahresverlauf von Holzkirchen (Testreferenzjahr).

Innenraumklima der Nebenräume

Für das Innenraumklima in den benachbarten Räumen, im Erdgeschoss und im Dachraum werden folgende Annahmen getroffen: Die Temperatur in den benachbarten Räumen und im Erdgeschoss liegt bei $21 \pm 1 \text{ °C}$ und im Dachraum bei $25 \pm 15 \text{ °C}$. Die relative Feuchte bewegt sich stets um $50 \pm 10 \text{ %}$.

Interne Lasten

Durch die Anwesenheit von Personen werden Feuchtigkeit und Wärme in den Raum eingetragen, wobei die Abgaberraten u.a. von der Größe (Erwachsener, Kind) und der Aktivität der Person abhängen. Bei dem Besuch einer Ausstellung ist davon auszugehen, dass die Wärme- und Feuchteabgaberrate der Kategorie

“Erwachsene Person, sitzend, entspannt“ zuzuordnen ist. In Anlehnung an [49] wird damit die Wärme- mit 65 W und die Feuchteabgaberate von 43 g/h je Person angesetzt.

Laut [50] ist je 100 m² Ausstellungsfläche im Mittel mit der Anwesenheit von 5 - 20 Personen zu rechnen. Davon ausgehend wird für die Berechnungen bei der Ausstellungsfläche von 163 m² eine ständige Anwesenheit von 16 Personen während der täglichen Öffnungszeiten von 9:00 bis 17:00 Uhr angenommen. Dadurch ergibt sich für diesen Zeitraum ein Gesamteintrag von 8,3 kWh Wärme und 5,5 kg Wasser am Tag.

Intermittierende Nutzung

Werden die Ausstellungsräume auch für Sonderveranstaltungen, z. B. Vernissagen oder Tagungen, genutzt, ergeben sich erhöhte Anforderungen an das Management des Raumklimas. Bei Anwesenheit von vielen Personen in Ausstellungsräumen ist mit einem schnellen und teilweise massiven Anstieg der relativen Feuchte und u. U. der Raumtemperatur zu rechnen. Durch geeignete Maßnahmen muss Vorsorge getroffen werden, damit das Raumklima stabil bleibt und das Ausstellungsgut nicht Schädigungen erleidet. Werden die Räumlichkeiten nicht ständig dieser Belastung durch die Anwesenheit großer Menschenmengen ausgesetzt, ist zu überlegen, welche Maßnahmen wirtschaftlich vertretbar sind. Der Einsatz von feuchtepuffernden Materialien kann eine leicht anzuwendende und kostengünstige Maßnahme darstellen, um das Raumklima in gewissen Bereichen zu stabilisieren,

Für die Berechnung des sich bei intermittierender Nutzung einstellenden Raumklimas wird davon ausgegangen, dass an zwei aufeinanderfolgenden Tagen in der Woche eine Sonderveranstaltung mit insgesamt 45 Personen von 9:00 bis 17:00 Uhr stattfindet. Je Tag werden somit gut 15 kg Wasser und ca. 23 kWh in den Ausstellungsraum eingetragen (siehe Bild 116).

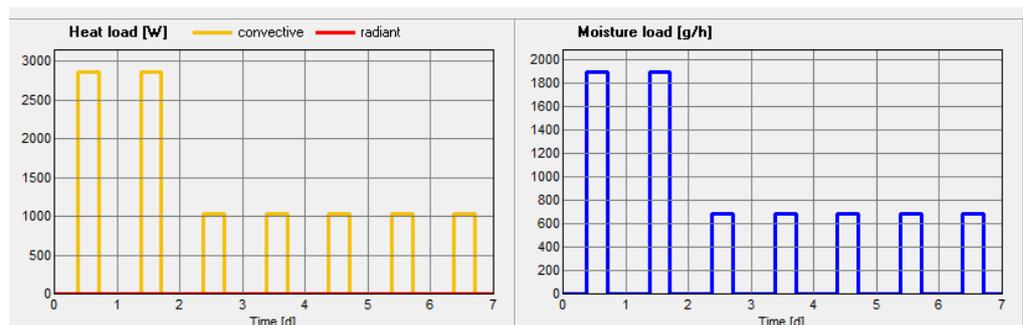


Bild 116:

Wärme- (links) und Feuchteintrag (rechts) in den Ausstellungsraum bei intermittierender Nutzung.

Den Eintrag von Wärme durch die Beleuchtung und technische Geräte wird hier nicht berücksichtigt.

Klimatisierung

Da die Klimagrenzen vom Ausstellungsgut abhängig sind, wird hier als Kompromiss von einer gemischten Sammlung ausgegangen. Es wird in Anlehnung an [50] ein Klimakorridor von 18 - 22 °C Raumlufttemperatur und 45 – 55 % relativer Raumluftfeuchte angestrebt. Kommt keine Vollklimatisierung zum Einsatz, wird bei einer Raumlufttemperatur von unter 18 °C auf 18 °C geheizt.

Luftwechselrate

Die Luftwechselrate inklusive Luftwechsel durch Infiltration und Nutzerverhalten wird mit 0,5 1/h angesetzt. Dies bedeutet, dass innerhalb von 2 Stunden das gesamte Luftvolumen des Raumes einmal ausgetauscht wird.

Um für das Ausstellungsgut schädliche kurzfristige Schwankungen zu vermeiden, ist es von Vorteil, die Luftwechselrate so gering wie möglich zu halten, wobei gleichzeitig für ausreichend Frischluft für die anwesenden Personen zu sorgen ist. Exemplarisch werden zusätzliche Berechnungen mit einer reduzierten Luftwechselrate von 0,2 1/h durchgeführt.

Durchführung der Berechnungen

Als Wärmeübergangskoeffizienten wird innenseitig von 8 W/m²K und außenseitig von 17 W/m²K ausgegangen. Die Materialkennwerte werden der WUFI®-Materialdatenbank entnommen.

Die Berechnungen erfolgen in Stundenschritten und werden für zwei Jahre durchgeführt, wobei das zweite Jahr ausgewertet wird. Dadurch wird berücksichtigt, dass ein eingeschwungener Zustand erreicht ist.

5.4.5 Ergebnisse der Untersuchungen und Diskussion

Einfluss von feuchtepuffernden Materialien der Umschließungsflächen auf das Raumklima

Der Einfluss eines feuchtepuffernden Putzes auf das Raumklima im Ausstellungsraum ist in Bild 117 aufgezeigt. Auf die Temperatur im Innenraum hat die Verwendung von feuchtepufferndem Putz nahezu keinen Einfluss. Die Schwankungen der relativen Feuchte im Raum werden durch den Putz abgemildert. Dies zeigt sich deutlicher in Bild 118 und Bild 119, in denen jeweils eine Woche im Winter und im Sommer exemplarisch dargestellt ist. Insgesamt sorgen die feuchtepuffernden Umschließungsflächen des Innenraumes dafür, dass die relative Feuchte im Tagesverlauf im Winter nicht so stark absinkt bzw. im Sommer nicht so stark ansteigt. Auch im Jahresverlauf wird die Spreizung zwischen minimaler und maximaler relativer Raumluftfeuchte verringert (siehe auch Tabelle 28). Der Einfluss ist jedoch, auch durch die Luftwechselrate von 0,5 1/h, nicht sehr groß.

Im Jahresverlauf wird durch das Heizen sichergestellt, dass die Raumlufttemperatur nicht unter 18 °C sinkt (Bild 117). In den Sommermonaten übersteigt die Raumlufttemperatur, u.a. infolge der geringen Dämmwirkung der historischen Wände, den angestrebten Klimakorridor deutlich. Es werden Raumlufttemperaturen von kurzfristig mehr als 30 °C erreicht. Es müssten also, wenn keine Vollklimatisierung möglich ist, Maßnahmen für den sommerlichen Wärmeschutz ergriffen werden, z. B. eine Nachtlüftung. Die relative Raumluftfeuchte erreicht im Sommer nahezu 70 %. Dagegen sinkt sie im Winter auf unter 20 %. Dies ist eine Belastung für das Ausstellungsgut. Der Einsatz von feuchtepuffernden Materialien trägt zur Verbesserung der Situation bei, reicht jedoch als alleinige Maßnahme zur Stabilisierung des Raumklimas nicht aus. Eine zusätzliche Möglichkeit ist die Reduzierung der Luftwechselrate bzw. die Vollklimatisierung des Raumes.

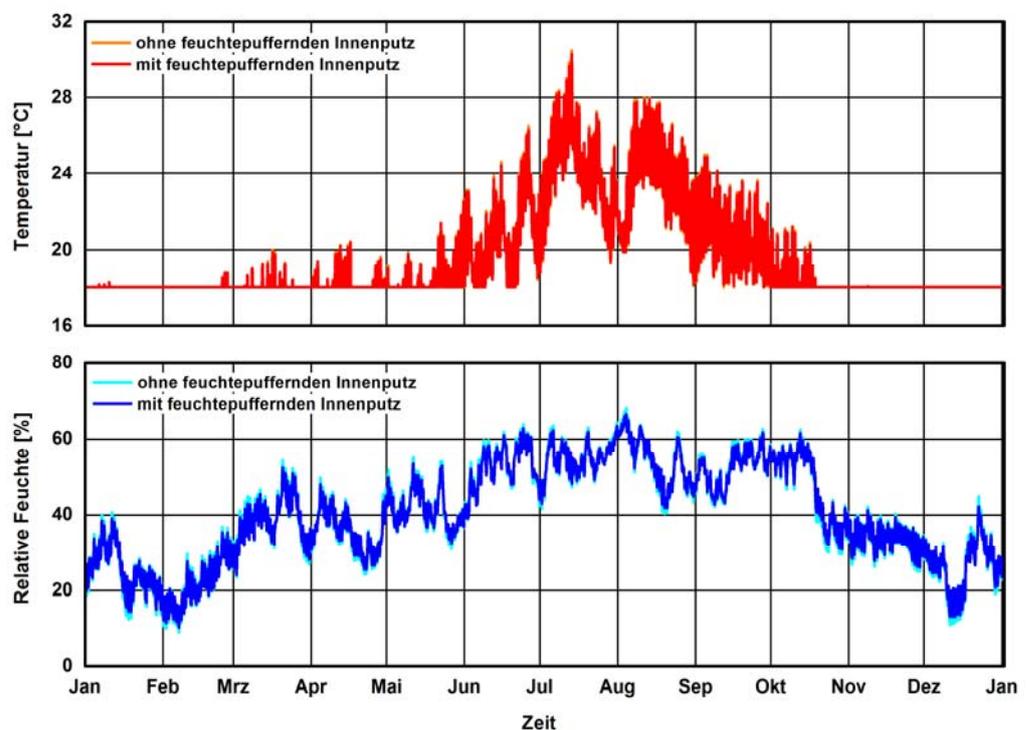


Bild 117:

Raumklima mit und ohne feuchtepuffernden Innenputz (Anwesenheit: 16 Personen, Luftwechselrate 0,5 1/h, Heizen ab 18 °C).

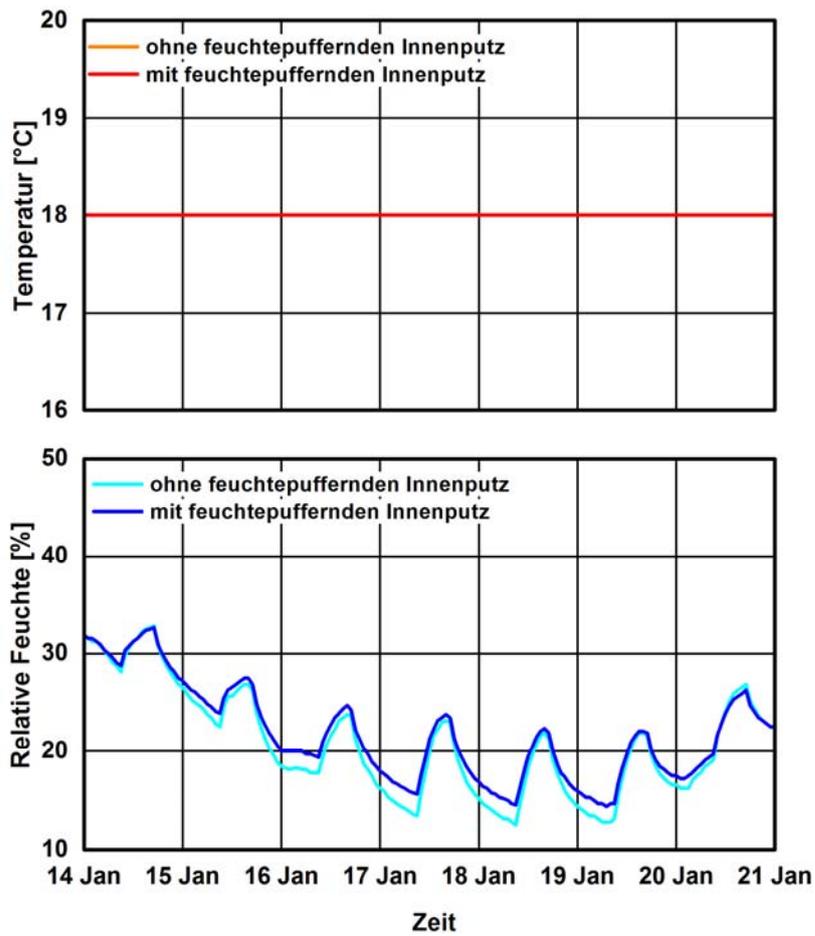


Bild 118:
Raumklima mit und ohne feuchtespeichernden Innenputz während einer Woche im Winter (Anwesenheit: 16 Personen, Luftwechselrate 0,5 1/h, Heizen ab 18 °C).

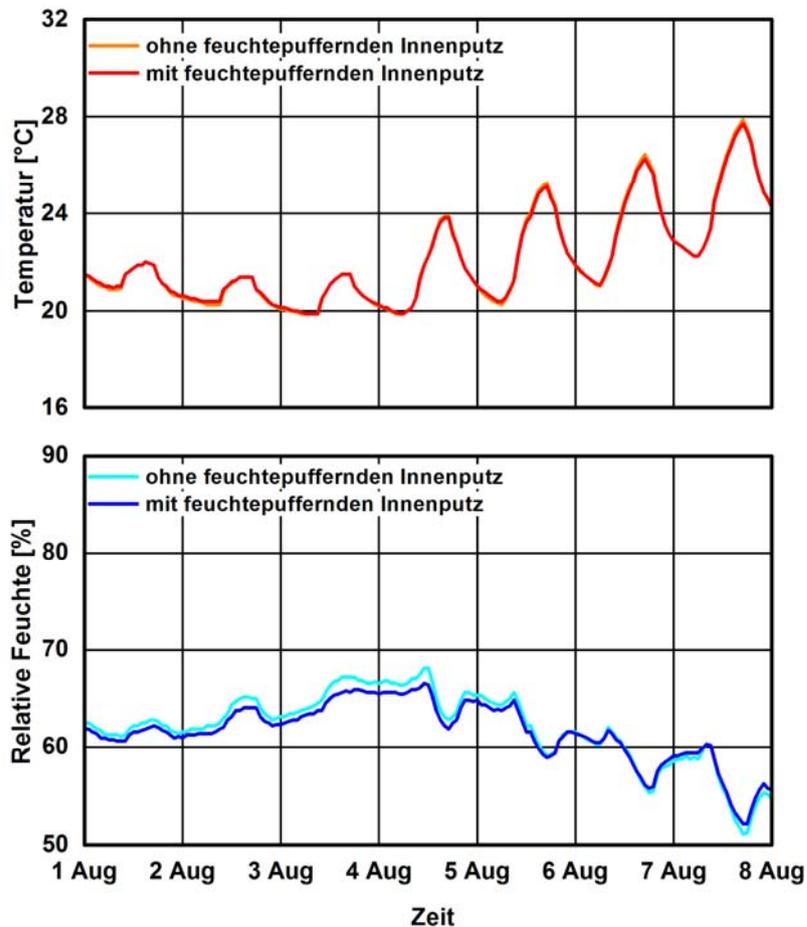


Bild 119:
Raumklima mit und ohne feuchtepuffernden Innenputz während einer Woche im Sommer (Anwesenheit: 16 Personen, Luftwechselrate 0,5 1/h, Heizen ab 18 °C).

Tabelle 28:
Vergleich der Innenraumtemperaturen und relativen Feuchten (jeweils Minimum, Maximum, Mittelwert, maximale Änderung am Tag, Spreizung im Jahr) mit und ohne Verwendung von feuchtepuffernden Innenputz (16 Personen, Heizen ab 18 °C, Luftwechselrate 0,5 1/h).

	Temperatur [°C]					Relative Luftfeuchte [%]				
	Jahr				Tag	Jahr				Tag
	Min	Max	Spreizung	MW	Δ max	Min	Max	Spreizung	MW	Δ max
ohne feuchtepuffernden Innenputz	18,0	30,5	12,5	19,4	5,8	9,1	68,1	59,0	40,4	14,4
mit feuchtepuffernden Innenputz	18,0	30,3	12,3	19,5	5,6	10,3	66,6	56,3	40,4	12,2

Δ max - maximale Änderung am Tag

Wird der Raum in den vorgegeben Grenzen vollklimatisiert, ergibt sich das in Bild 120 dargestellte Innenraumklima. Auch in diesem Fall wirkt sich die Verwendung von feuchtepuffernden Materialien stabilisierend auf das Raumklima aus (siehe auch Tabelle 29).

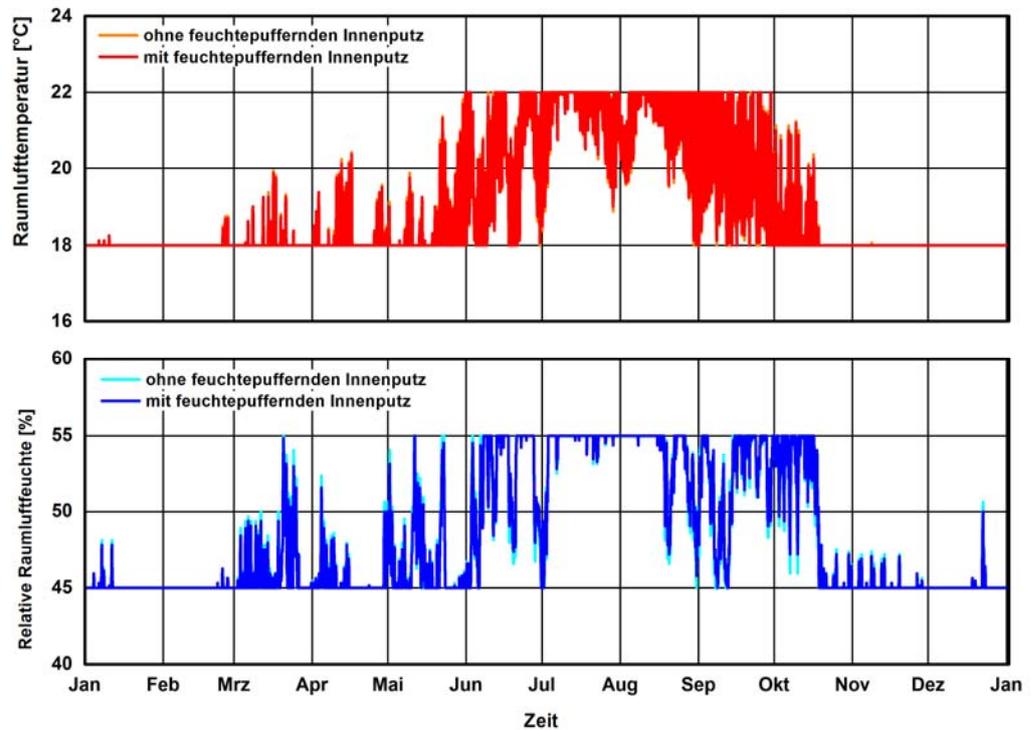


Bild 120:
Raumklima bei Vollklimatisierung (Anwesenheit: 16 Personen, Luftwechselrate 0,5 1/h).

Tabelle 29:
Vergleich der Innenraumtemperaturen und relativen Feuchten (jeweils Minimum, Maximum, Mittelwert, maximale Änderung am Tag, Spreizung im Jahr) mit und ohne Verwendung von feuchtepuffernden Innenputz (16 Personen, Vollklimatisierung, Luftwechselrate 0,5 1/h).

	Temperatur [°C]					Relative Luftfeuchte [%]				
	Jahr				Tag	Jahr				Tag
	Min	Max	Spreizung	MW	Δ max	Min	Max	Spreizung	MW	Δ max
ohne feuchtepuffernden Innenputz	18,0	22,0	4,0	19,0	4	45,0	55,0	10,0	48,4	10,0
mit feuchtepuffernden Innenputz	18,0	22,0	4,0	19,0	4	45,0	55,0	10,0	48,4	9,5

Δ max - maximale Änderung am Tag

In Tabelle 30 ist der Energiebedarf für die Klimatisierung des Innenraumes mit und ohne Verwendung eines feuchtepuffernden Innenputzes aufgelistet. Kommt ein feuchtepuffernder Innenputz zum Einsatz, so sinkt der energetische Aufwand, vorrangig für die Be- und Entfeuchtung des Raumes, geringfügig um ca. 65,4 kWh im Jahr. Durch die feuchtepuffernde Wirkung sind etwa 33 kg Wasser weniger notwendig für die Befeuchtung. Die Wassermenge, die im Jahresverlauf durch Entfeuchtung aus dem Raum entnommen werden muss, sinkt um ca. 43 kg.

Tabelle 30 :
Energiebedarf für die Klimatisierung des Ausstellungsraumes mit und ohne Verwendung eines feuchtepuffernden Innenputzes.

Energiebedarf [kWh]	Einsatz eines feuchtepuffernden Innenputzes	
	Nein	Ja
Heizen	20.690,7	20.700,4
Kühlen	1.644,9	1.621,2
Befeuchten	2.890,2	2.867,9
Entfeuchten	889,5	860,4
Gesamt	26.115,3	26.049,9

Die Auswirkungen einer reduzierten Luftwechselrate von 0,2 1/h auf das Raumklima sind in den folgenden Bildern zu sehen. Die maximale Raumlufttemperatur steigt auch bei der reduzierten Luftwechselrate im Sommer sehr stark an. Es ist jedoch eine Verbesserung in Bezug auf die minimale und maximale relative Raumluftfeuchte zu verzeichnen. Gerade im Winter liegen die relativen Raumluftfeuchten um bis zu 8 % höher als bei einer Luftwechselrate von 0,5 1/h (Bild 122) und im Sommer um ca. 5 % niedriger (Bild 123). Auch die maximalen täglichen Schwankungen sind etwas geringer als bei der Luftwechselrate von 0,5 1/h (Tabelle 31). Jedoch muss bedacht werden, dass bei Anwesenheit von Personen die Luftwechselrate nicht beliebig reduziert werden kann. Der Einsatz von feuchtepuffernden Materialien ist auch bei reduzierter Luftwechselrate von Vorteil.

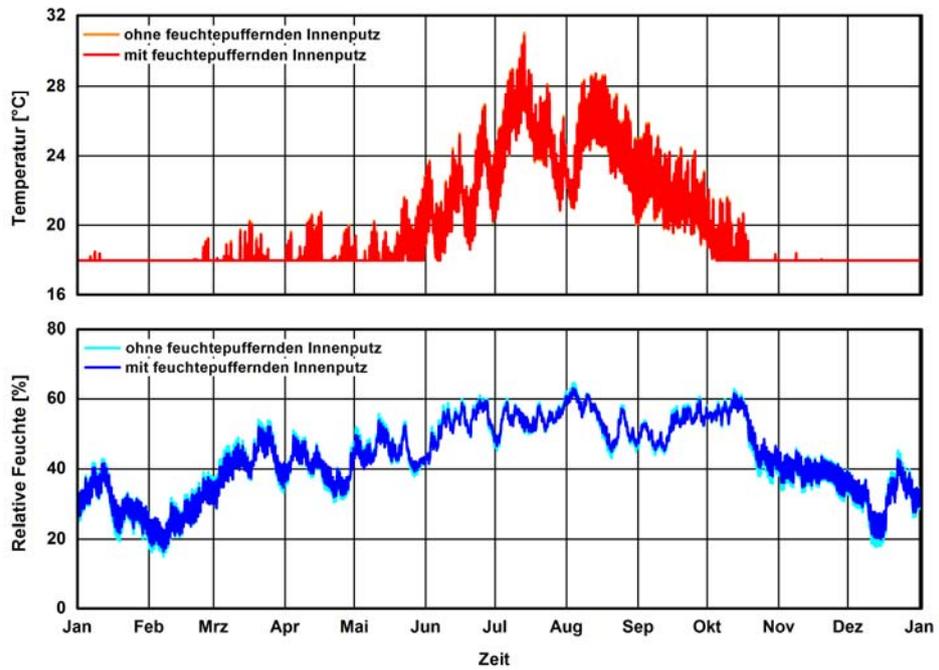


Bild 121:
Raumklima mit und ohne feuchtepuffernden Innenputz (Anwesenheit: 16 Personen, Luftwechselrate 0,2 1/h, Heizen ab 18 °C).

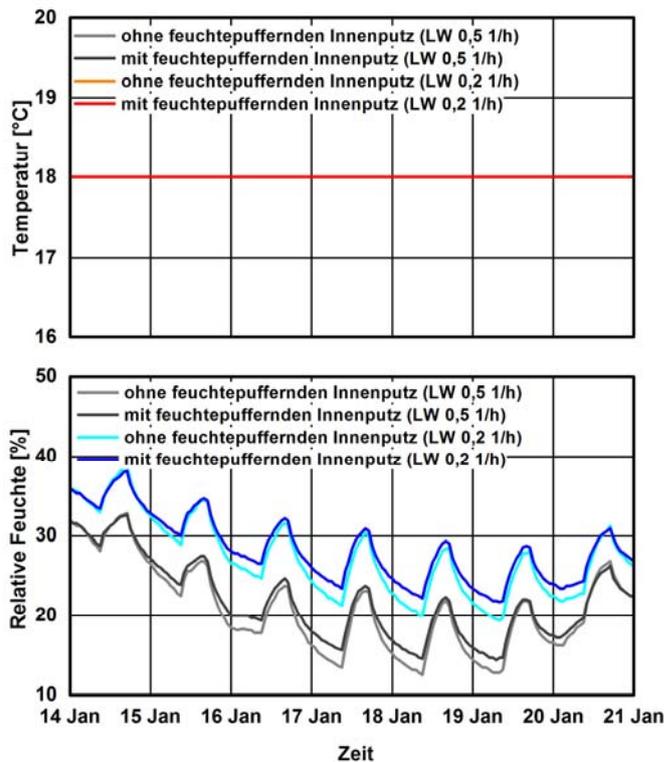


Bild 122:
Raumklima mit und ohne feuchtepuffernden Innenputz während einer Woche im Winter (Anwesenheit: 16 Personen, Luftwechselrate 0,2 1/h und zum Vergleich 0,5 1/h, Heizen ab 18 °C).

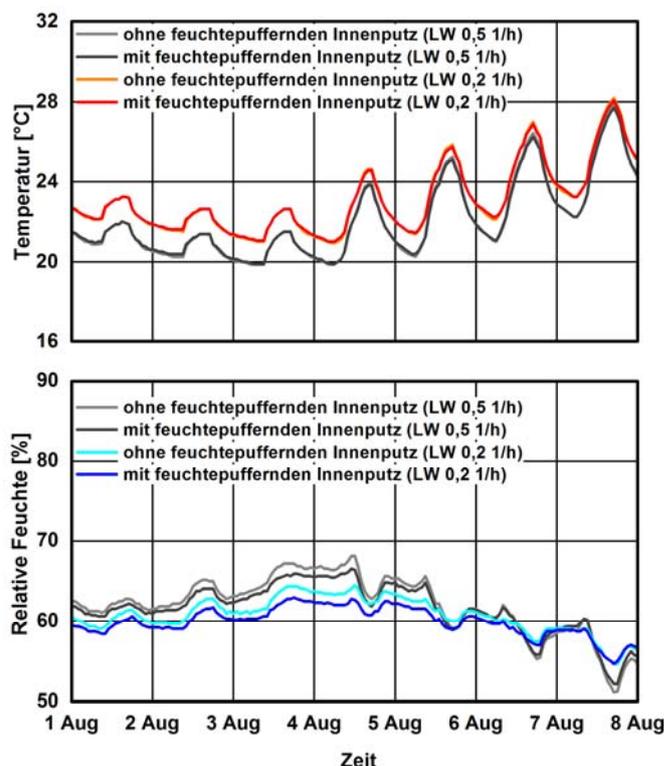


Bild 123:

Raumklima mit und ohne feuchtepuffernden Innenputz während einer Woche im Sommer (Anwesenheit: 16 Personen, Luftwechselrate 0,2 1/h und zum Vergleich 0,5 1/h, Heizen ab 18 °C).

Tabelle 31:

Vergleich der Innenraumtemperaturen und relativen Feuchten (jeweils Minimum, Maximum, Mittelwert, maximale Änderung am Tag, Spreizung im Jahr) mit und ohne Verwendung von feuchtepuffernden Innenputz (16 Personen, Heizen ab 18 °C, Luftwechselrate 0,2 1/h).

	Temperatur [°C]					Relative Luftfeuchte [%]				
	Jahr				Tag	Jahr				Tag
	Min	Max	Spreizung	MW	Δ max	Min	Max	Spreizung	MW	Δ max
ohne feuchtepuffernden Innenputz	18,0	31,0	13,0	19,9	5,0	15,0	64,5	49,5	43,2	11,6
mit feuchtepuffernden Innenputz	18,0	30,8	12,8	19,9	4,9	16,6	63,0	46,4	43,2	9,5

Δ max - maximale Änderung am Tag

Einfluss von intermittierender Nutzung auf das Raumklima

Unterliegt der Ausstellungsraum der beschriebenen intermittierenden Nutzung, so steigt an den Tagen, an denen viele Personen über einen längeren Zeitraum anwesend sind, die Raumlufttemperatur und relative Raumluftfeuchte zeitweise stark an. Das sich im Jahresverlauf einstellende Raumklima ist in Bild 124 zu sehen. Bild 125 und Bild 126 zeigen exemplarisch eine Woche im Winter und eine im Sommer. Zum Vergleich sind die relativen Raumluftfeuchten bei nicht intermittierender Nutzung zusätzlich dargestellt. Infolge des höheren Feuchteintrages durch die intermittierende Nutzung ist die relative Raumluftfeuchte im Winter höher als bei der konstanten Nutzung, vorrangig an den beiden Tagen, an denen 45 Personen anwesend sind. In Bild 125 und Bild 126 sind dies der 14. und 15. Januar und der 5. und 6. August. Während es im Winter bei der niedrigen relativen Feuchte im Raum durch den erhöhten Feuchteeintrag durch die Anwesenheit von vielen Personen zu einem deutlichen Anstieg der relativen Raumluftfeuchte kommt, ist dies in den Sommermonaten nicht so ausgeprägt zu beobachten. Hier liegt die relative Raumluftfeuchte bereits in einem hohen Bereich. Der Einsatz von feuchtpuffernden Materialien mildert ebenfalls die maximalen täglichen Schwankungen (siehe Tabelle 32).

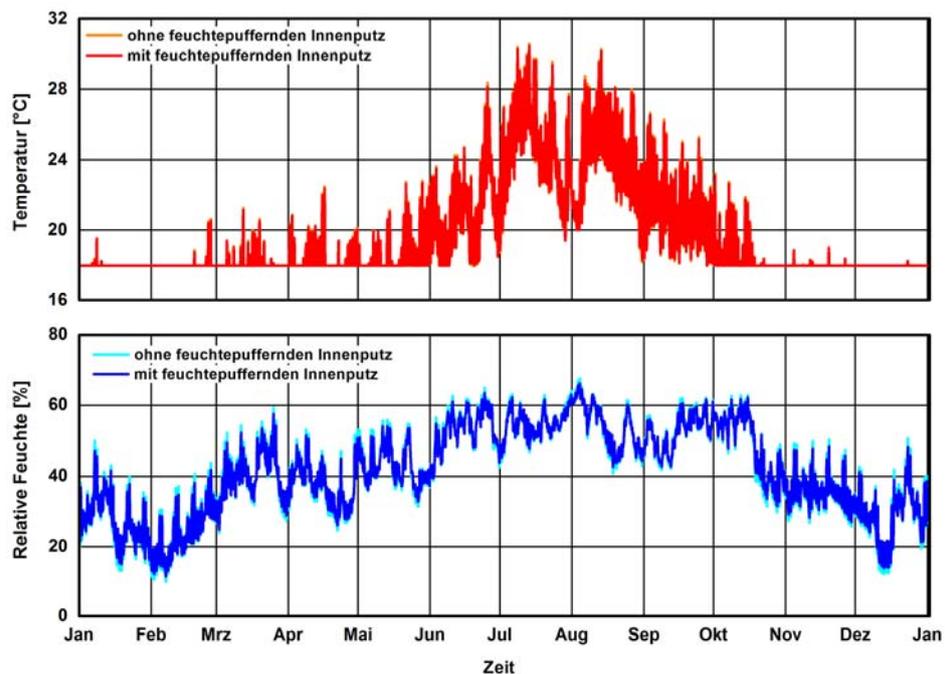


Bild 124:

Raumklima mit und ohne feuchtpuffernden Innenputz (bei intermittierende Nutzung: 2 Tage 45 Personen, ansonsten 16 Personen, Luftwechselrate 0,5 1/h, Heizen ab 18 °C).

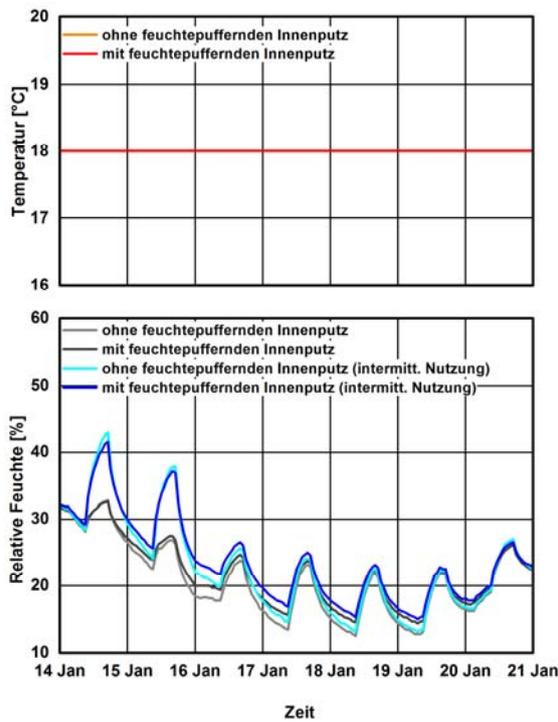


Bild 125:
Raumklima mit und ohne feuchtepuffernden Innenputz während einer Woche im Winter (bei intermittierender Nutzung: 45 Personen, ansonsten 16 Personen, Luftwechselrate 0,5 1/h, Heizen ab 18 °C).

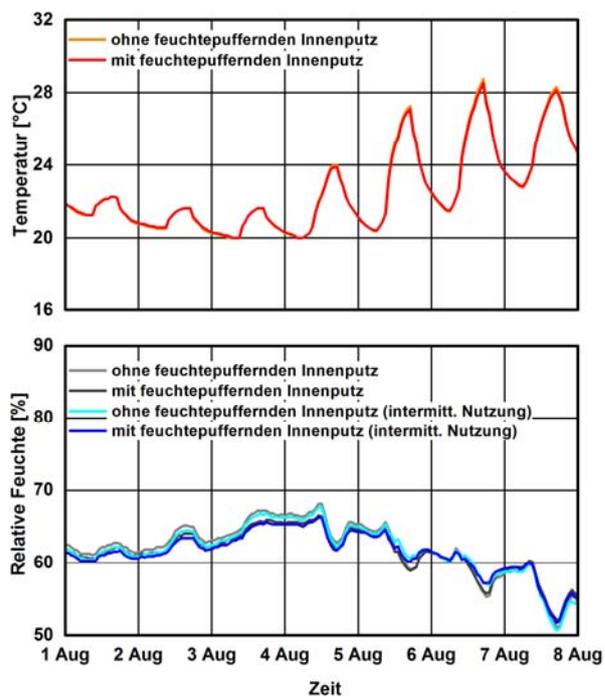


Bild 126:
Raumklima mit und ohne feuchtepuffernden Innenputz während einer Woche im Sommer (bei intermittierender Nutzung: 45 Personen, ansonsten 16 Personen, Luftwechselrate 0,5 1/h, Heizen ab 18 °C).

Tabelle 32:

Vergleich der Innenraumtemperaturen und relativen Feuchten (jeweils Minimum, Maximum, Mittelwert, maximale Änderung am Tag, Spreizung im Jahr) mit und ohne Verwendung von feuchtepuffernden Innenputz (intermittierende Nutzung, Heizen ab 18 °C, Luftwechselrate 0,5 1/h).

	Temperatur [°C]					Relative Luftfeuchte [%]				
	Jahr				Tag	Jahr				Tag
	Min	Max	Spreizung	MW	Δ max	Min	Max	Spreizung	MW	Δ max
ohne feuchtespeichernden Innenputz	18,0	30,6	12,6	19,7	7,3	10,0	67,6	57,6	41,6	22,8
mit feuchtespeichernden Innenputz	18,0	30,4	12,4	19,6	7,1	11,6	66,2	54,6	41,6	19,5

Δ max - maximale Änderung am Tag

Zusammenfassung zur hygrothermischen Simulation

Mit Hilfe des hygrothermischen Raummodells WUFI® Plus wurden Berechnungen durchgeführt, um die Auswirkungen feuchtepuffernder Materialien an den Innenoberflächen der Umschließungsflächen des geplanten Ausstellungsraums in der Alten Schäferei in Benediktbeuern auf das Raumklima zu untersuchen. Folgende Ergebnisse zeigen sich:

- Der Einsatz von feuchtepufferndem Innenputz verringert die Spreizung der relativen Raumluchtfeuchte im Jahresverlauf.
- Durch den Einsatz von feuchtepuffernden Materialien können maximale tägliche Schwankungen reduziert werden.
- Eine verringerte Luftwechselrate verringert auch die maximalen täglichen Schwankungen. Die durch die Anwesenheit von Personen notwendige Mindestluftwechselrate ist zu beachten.
- Bei Vollklimatisierung reduziert der Einsatz von feuchtepuffernden Materialien den Energiebedarf für die Klimatisierung. Es ist eine geringere Wassermenge für die Be- und Entfeuchtung notwendig.
- Bei intermittierender Nutzung werden die Auswirkungen des hohen Feuchteintrages durch die Personen durch den Einsatz feuchtepuffernder Materialien abgemildert.

Der Einsatz von feuchtepuffernden Materialien, z. B. beim Innenputz, ist eine kostengünstige Methode, um eine Stabilisierung des Raumklimas zu erreichen und damit das Ausstellungsgut besser zu schützen. Das Gleiche gilt auch, wenn die Ausstellungsräume nicht kontinuierlich genutzt werden, sondern wenn sie nur temporär, z. B. durch Sonderveranstaltungen, einem hohen Feuchte- und Wärmeeintrag durch eine große Anzahl von anwesenden Personen ausgesetzt sind. Des Weiteren sinkt der Energiebedarf für die Klimatisierung, allerdings nur geringfügig. Die hier berechneten Effekte fallen bei dem sehr großen Raum in Benediktbeuern aufgrund des damit verbundenen ungünstigen Verhältnis von Wandfläche zu Raumvolumen etwas geringer aus als bei kleineren Räumen zu erwarten wäre.

5.5 Energetische Bilanzierung der Messräume

Im Folgenden werden der Ansatz und die Ergebnisse der energetischen Bilanzierung der Messräume dargestellt. Ziel der energetischen Bilanzierung der Messräume ist ein Vergleich des Energieverbrauchs der einzelnen Wandheizungssysteme.

Der Messaufbau wurde dahingehend optimiert, dass die Transmissionswärmeverluste durch die Außenwand inklusive Wandheizungssystem ermittelt werden können und durch einen Bezug auf die Temperaturdifferenz von innen zu außen vergleichbar gemacht werden. Das Konzept geht davon aus, dass die Wärmeflüsse zwischen den Räumen und zu den angrenzenden internen Räumen, sowie durch Böden und Decken möglichst minimiert und konstant sind. Damit sollte der Hauptanteil der Energieverluste durch die Außenwände stattfinden und ein Vergleich der Heizleistung in Bezug auf die Außenlufttemperatur ermöglicht werden.

Durch Vergleichsmessungen zu Beginn der Umsetzung des Projekts in der Alten Schäferei in Benediktbeuern wurde festgestellt, dass die Räume trotz ähnlichem Grundriss und umfangreichen Maßnahmen zur Verbesserung der Vergleichbarkeit in ihrem thermischen Verhalten voneinander abweichen. Für die vergleichende Bilanzierung der Wandheizungssysteme wurde deshalb die energetische Bilanzierung mit dem jeweiligen Messraum selbst mittels eines Referenzsystems durchgeführt, anstatt die Räume untereinander direkt zu vergleichen. Hierfür wurde die temperaturspezifische Heizleistung der Varianten von Wandheizungssystemen bezogen auf diejenige des jeweiligen Referenzsystems, einem elektrische Heizkörper ohne Wandkontakt. Mit der temperaturspezifischen Heizleistung wird ausgedrückt, wie viel Leistung ein Heizungssystem erbringen muss, um die Innenlufttemperatur um ein Kelvin über die Außenlufttemperatur anzuheben. Dieser Temperaturdifferenzbezug ist deshalb erforderlich, weil es nicht gelingen wird, zwei klimatisch exakt gleiche Perioden für den Betrieb der Wandheizung und den zeitlich darauf folgenden Betrieb der elektrischen Referenzheizung zu finden

5.5.1 Ansatz zur Beurteilung der Leistungsmessung

Den für die energetische Bilanzierung herangezogenen Bilanzraum mit den relevanten Energieflüssen zeigt Bild 132 exemplarisch für Messraum 1.

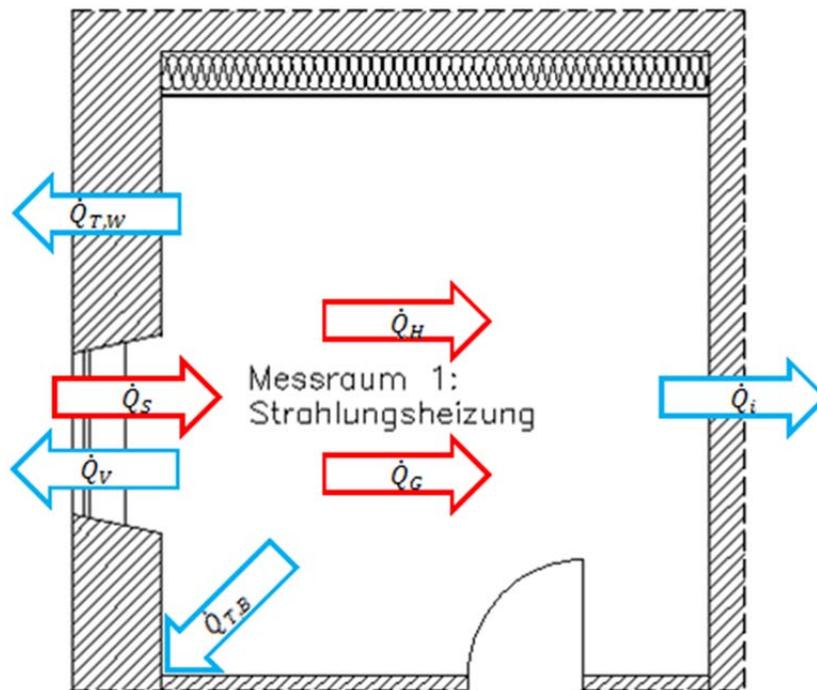


Bild 127:
Darstellung der Wärmeströme am Beispiel von Messraum 1.

Im Wesentlichen sind dies die Wärmegewinne durch das Heizungssystem, Geräte und solare Einstrahlung sowie die Wärmeverluste innerhalb des Gebäudes und diejenigen nach Außen: die Lüftungswärmeverluste sowie die Transmissionswärmeverluste durch den Boden und die Außenwand. Als Bilanzgleichung ergibt sich somit:

$$\dot{Q}_H + \dot{Q}_S + \dot{Q}_G = \dot{Q}_i + \dot{Q}_a$$

- mit
- \dot{Q}_H – Wärmegewinne durch das Heizsystem
 - \dot{Q}_S – solare Wärmegewinne
 - \dot{Q}_G – Wärmegewinne durch zusätzliche Geräte
 - \dot{Q}_i – Wärmeverluste innerhalb des Gebäudes
 - \dot{Q}_a – Wärmeverluste nach Außen

Solare Wärmegewinne

Die möglichen Wärmegewinne durch solare Einstrahlungen – die aufgrund der Gebäudetopologie ohnehin gering sind – wurden durch Sonnenschutzfolie auf den Fensterscheiben und zusätzlicher Verschattung der gesamten Fassade mit einer an einem vorgestellten Gerüst montierten opaken Plane eliminiert. Damit kann von $\dot{Q}_S = 0 \text{ W}$ ausgegangen werden.

Wärmegewinne aufgrund zusätzlicher elektrischer Geräte

Aufgrund zusätzlicher elektrischer Geräte in Form eines Messrechners und Datenloggers sind nur in Messraum 2 weitere interne Wärmequelle zu berücksichtigen. Da deren Leistungsaufnahme in der Messung der elektrischen Referenzheizung enthalten ist, die Geräte jedoch auch während des Wandheizungsbetriebes betrieben wurden, muss für den Vergleich deren Leistungsaufnahme zu dem Ergebnis der Leistungsmessung der Wandheizung hinzuaddiert werden. Hierfür wurde die elektrische Leistungsaufnahme der Geräte über mehrere Tage vermessen: die mittlere elektrische Leistungsaufnahme beträgt $\dot{Q}_{G,MR2} = 25,4 \text{ W}$. Für alle anderen Messräume gilt $\dot{Q}_G = 0 \text{ W}$. Diese werden in der Tabelle 35 in der Größe $\dot{Q}_{H,V}^* = \dot{Q}_{H,V} + \dot{Q}_G$ zu einer Gesamtheizleistung zusammengefasst.

Wärmeverluste innerhalb des Gebäudes

Innerhalb des Gebäudes grenzen die Messräume aneinander, sowie über die Nord- bzw. Südwände sowie die Decke an Nebenräume an. Um möglichst robust hinsichtlich etwaiger Schwankungen der Raumlufttemperaturen in den umliegenden Räumen zu sein, wurden die Nord- und Südwände sowie die Decke mit zusätzlichen Dämmschichten versehen.

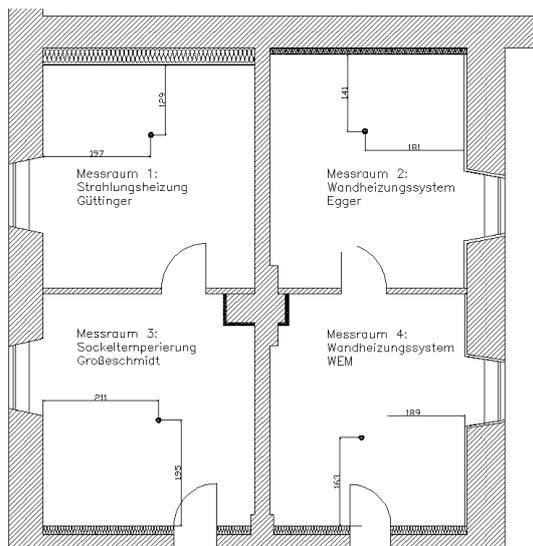


Bild 128:
Grundriss der Messräume mit zusätzlicher Dämmung zu den angrenzenden Räumen.

Der Einfluss der internen Wärmeströme könnte bei gleichen Raumtemperaturen der Messräume theoretisch vernachlässigt werden. Eine genauere Analyse der Raumtemperaturen, in Bild 129 ist der zeitliche Verlauf der Raumlufttemperaturen dargestellt, zeigt, dass die Lufttemperaturen im Raum 2 und 3 nahezu identisch sind und zu Raum 1 nur eine geringe Abweichung aufweisen. Zum Messraum 4 besteht dagegen ein nicht zu vernachlässigender Temperaturunterschied. Im Mittel weicht die Raumtemperatur im Messraum 4 um ca. 0,3 K von den angrenzenden Messräumen 2 und 3 ab. Dies verursacht geringe Wärmeströme zwischen den Innenräumen. Diese Wärmeströme werden daher in der Berechnung in Form einer korrigierten Heizleistung berücksichtigt. Die Wärmeströme von Messraum 2 und 3 in den Messraum 4 berechnen sich über die Temperaturdifferenz, dem Wärmedurchgangskoeffizient der Trennwand und der Fläche der Trennwand (vereinfacht inklusive Zwischentür). Die minütlich berechneten Wärmeströme werden als Mittelwert jeweils von dem Messraum 2 und 3 abgezogen und deren Summe zum Messraum 4 hinzuaddiert und. Die geringen Wärmeströme zwischen den Messräumen 1, 2 und 3 können vernachlässigt werden. Die Wärmeströme zwischen den Messräumen während der elektrischen Leistungsmessung werden wegen der geringen Temperaturabweichung ebenfalls vernachlässigt. In Tabelle 33 sind die Ergebnisse der Berechnungen dargestellt.

$$\dot{Q}_{T,intern} = \sum_i A_{ab} U_{ab} (T_{i,MRa} - T_{i,MRb})$$

Diese Wärmeströme werden daher in der Berechnung in Form einer korrigierten Heizleistung berücksichtigt:

$$\dot{Q}_H^* = \dot{Q}_H + \dot{Q}_G - \dot{Q}_i$$

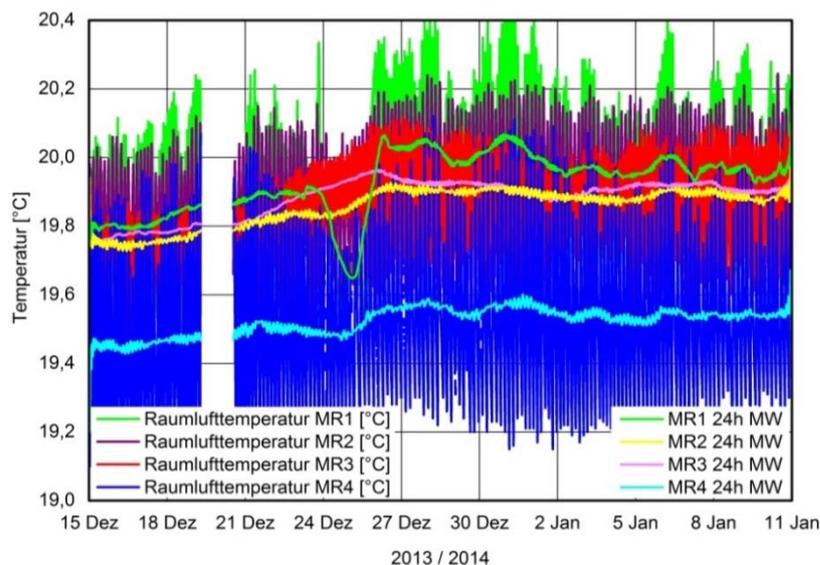


Bild 129:

Zeitlicher Verlauf der Raumtemperaturen als minütliche Messwerte und gleitende Tagesmittel. Die Raumtemperatur im Messraum 4 weicht im Mittel um ca. 0,3 K von den angrenzenden Messräumen 2 und 3 ab.

Tabelle 33:

Mittlere Raumlufthtemperaturen und berechnete Wärmemengen, die zwischen den Messräumen 2, 3 und 4 während des Messzeitraums der Wandheizungssysteme als Summe ausgetauscht werden.

Kenngröße	Einheit	MR2	MR3	MR4
\bar{T}_i	°C	19,9	19,9	19,5
\dot{Q}_i	W	5,8	8,6	-14,4

Wärmeverluste nach Außen

Die Wärmeverluste nach Außen setzen sich aus den Lüftungswärmeverlusten \dot{Q}_V , den Transmissionswärmeverlusten in den Boden $\dot{Q}_{T,B}$ sowie den Transmissionswärmeverlusten durch die Außenwand $\dot{Q}_{T,W}$ zusammen:

$$\dot{Q}_a = \dot{Q}_V + \dot{Q}_{T,B} + \dot{Q}_{T,W}$$

Wärmeverluste nach Außen: Lüftungswärmeverluste

Die Luftwechselraten werden durch eine für alle Räume gleichermaßen geregelte mechanische Belüftung im Überdruck kontrolliert. Der Luftvolumenstrom wurde hierbei auf $\dot{V} = 9 \text{ m}^3/\text{h}$ eingestellt. Damit sind die Wärmeverluste nach Außen durch Lüftung \dot{Q}_V für alle Messräume identisch und bei geregelter Innenlufttemperatur von $\bar{T}_i = 20 \text{ °C}$ nur noch von der mittleren Außenlufttemperatur \bar{T}_a abhängig, die sich in den Messperioden der Varianten und Referenz unterscheidet:

$$\dot{Q}_V = c_{p,L} \dot{V} \rho_L (\bar{T}_i - \bar{T}_a)$$

mit $c_{p,L} = 1,005 \text{ k J}/(\text{kg K})$ – spezifische Wärmekapazität von Luft

$$\rho_L = 1,204 \text{ kg}/\text{m}^3 \text{ – Luftdichte (bei } 20 \text{ °C)}$$

Daraus folgt hier: $\dot{Q}_V \approx 3,02505 (20 - \bar{T}_a)$ in [W]

Wärmeverluste nach Außen: Transmissionswärmeverluste in den Boden

Der Fußbodenaufbau aller Messräume wurde vor Beginn der Versuchsreihe identisch komplett erneuert und dabei mit Glasschaumschotter hoch gedämmt. Während der Messperioden im Winter ist von der gleichen mittlere Untergrundtemperatur unter allen Messräumen auszugehen. Da alle Messräume gleichermaßen auf eine Innenlufttemperatur von $\bar{T}_i = 20 \text{ °C}$ geregelt wurden ist damit der Transmissionswärmeverlust in den Boden \dot{Q}_B für alle Messräume identisch und konstant anzunehmen.

Wärmeverluste nach Außen: Transmissionswärmeverluste durch die Außenwand

Die Transmissionswärmeverluste durch die Außenwand über eine mehrtägige Messperiode kann mithilfe der mittleren Innen- und Außenlufttemperatur unter Berücksichtigung der spezifischen Wärmedurchgangskoeffizienten wie folgt berechnet werden:

$$\dot{Q}_{T,W} = \left(\sum_i A_i U_i + \sum_j H_{WB} \right) (\bar{T}_i - \bar{T}_a)$$

mit A_i – Außenwandflächen

U_i – Wärmedurchgangskoeffizienten der Außenwandflächen

H_{WB} – Wärmedurchgangskoeffizienten der Wärmebrücken

Da die Flächen und die Wärmedurchgangskoeffizienten im Versuchsaufbau während der Messperioden unverändert bleiben, sind die Transmissionswärmeverluste durch die Außenwand bei der geregelten Innenlufttemperatur von $\bar{T}_i = 20 \text{ °C}$ nur noch von der mittleren Außenlufttemperatur \bar{T}_a abhängig, die sich in den Messperioden der Varianten und Referenz unterscheidet.

Berücksichtigung der U-Wert-Verbesserung der Außenwand durch den Einbau flächiger Wandheizungssysteme

Bei dem Vergleich der Leistungsabgabe der Wandheizungen mit der der elektrischen Heizkörper sind die Aufbauten der Wandheizungssysteme mit zu berücksichtigen. Aufgrund des wechselnden Betriebs der Wandheizungssysteme und des elektrischen Referenzsystems für einen Vergleich bei ähnlichen Witterungsbedingungen sind die Wandheizungssysteme auch bei Betrieb der elektrischen Heizkörper installiert. Durch den damit vorhandenen systemspezifischen zusätzlichen Wandaufbau der Wandheizung erhöht sich der Wärmedurchgangswiderstand der Außenwand und reduziert damit die notwendige Leistungsabgabe des elektrischen Heizkörpers in der Referenzmessung. Die reale Leistungsabgabe des elektrischen Referenzsystems wäre bei einem nicht um den Wandheizungsbauelement ergänzten Raum dementsprechend aufgrund einer größeren Wärmetransmission durch die Außenwand höher. Diese Verbesserung des U-Wertes der Außenwand auch während der Referenzmessung wird hier deshalb durch eine Korrektur der elektrischen Leistungsaufnahme des Referenzheizkörpers um einen Korrekturfaktor $f_{H,R}$ berücksichtigt.

Dieser Korrekturfaktor wurde vereinfachend über eine Betrachtung der flächenmäßigen U-Wert-Verbesserungen der Wandaufbauten (ohne Berücksichtigung von Wärmebrücken) berechnet. In den Messräumen 1 und 3 wurden keine Wandaufbauten vorgenommen, der Transmissionswärmeverlust bleibt daher gleich und der Faktor beträgt 1,0. In den Messräumen 2 und 4 sind vollflächige Wandaufbauten mit der nahezu vollflächig verlegten Wandheizungen erstellt

worden. Dadurch verändert sich offensichtlich der Transmissionswärmeverlust durch die Außenwand. Zur Ermittlung dieses Korrekturfaktors wurde unter Zugrundelegung des Bestandswandaufbaus der jeweilige Gesamtwärmebedarf des Messraums berechnet. Wird nun die Bestandswand um das Wandheizungssystem ergänzt, ergibt sich für die jeweilige Wand ein etwas verminderter Wärmedurchgangskoeffizient und damit eine verminderte Gesamtwärmebedarf. In Tabelle 34 sind die derart berechneten Wärmebedarfe je Messraum angegeben: jeweils ohne und mit eingebautem Wandheizungssystem. Der Korrekturfaktor ergibt sich letztlich aus dem Verhältnis der des Bedarfs vor zu nach dem Einbau der Wandheizung.

Tabelle 34:
Rechnerische Wärmebedarfswerte der Messräume vor und nach dem Einbau der Wandheizung und resultierender Korrekturfaktor.

Messraum	MR1	MR2	MR3	MR4
Rechnerische Wärmebedarfswerte in W eines Messraums bei Beheizung mit dem elektrischen Referenzheizkörper ...				
... vor Einbau der Wandheizung	318	300	312	296
... nach Einbau der Wandheizung (d.h. mit Dämmwirkung der Wandheizung)	318	262	312	282
Korrekturfaktor $f_{H,R}$	1,00	1,145	1,00	1,050

Die tatsächlich abgegebene Leistung ist um den berechneten Korrekturfaktor zu erhöhen. Dies erfolgt durch die Multiplikation der gemessenen Leistung mit diesem Faktor:

$$\dot{Q}'_{H,R} = f_{H,R} \dot{Q}_{H,R}$$

5.5.2 Ergebnisse der Leistungsmessung

Eine starke Dynamik des Außenklimas führt zu stark schwankenden Randbedingungen, die über die Speicherfähigkeit der Gebäudehülle und im Falle der Wandheizung auch über direkte Wärmeleitung einen Einfluss auf die Leistungsabgabe hat. Daher ist es wichtig, dass die Randbedingungen während den Messungen möglichst konstant sind. Für die Auswertung der zwei Messperioden für die jeweilige Variante (Wandheizung) und die Referenz (elektrischer Heizkörper) wurden daher nur die Zeiträume verwendet, bei denen die Raumtemperatur und die Außentemperaturen ähnlich waren und auch vergleichbare Zeiträume vorliegen.

In Bild 130 sind die gemessenen Leistungsabgaben der Wandheizsysteme für die Periode vom 14. Dezember 2013 bis 11. Januar 2014 zusammen mit Raum- und Außenlufttemperatur dargestellt. Nicht mit ausgewertet wurden zwei Tage in diesem Zeitraum, an denen die Randbedingungen gleicher Raumlufttemperaturen nicht vorlagen. Bild 131 zeigt die Leistungsabgaben der elektrischen Heizkörper für den Zeitraum vom 19. Februar 2014 bis 10. März 2014, ebenfalls mit Raum- und Außenlufttemperatur.

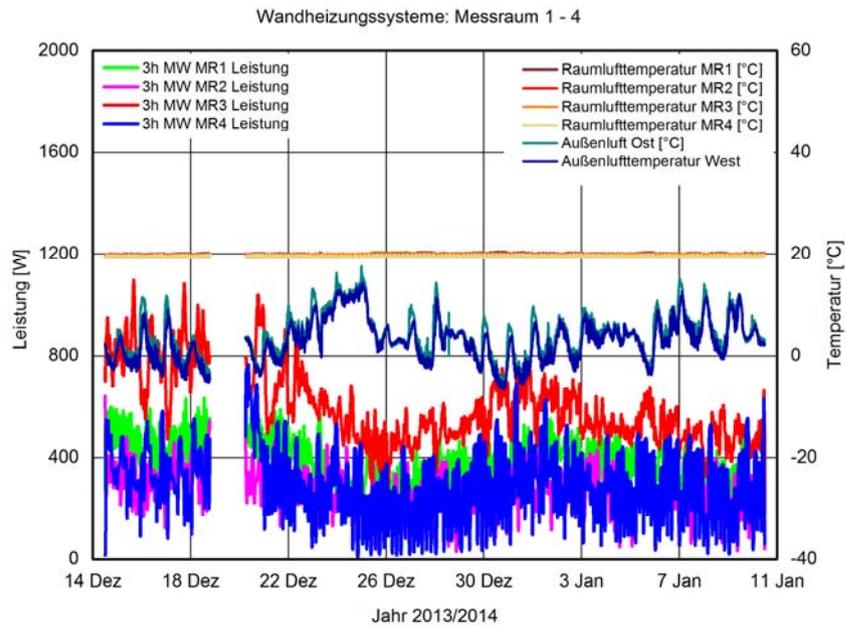


Bild 130:
Zeitlicher Verlauf der Messgrößen für die Messung der Wandheizungssysteme.

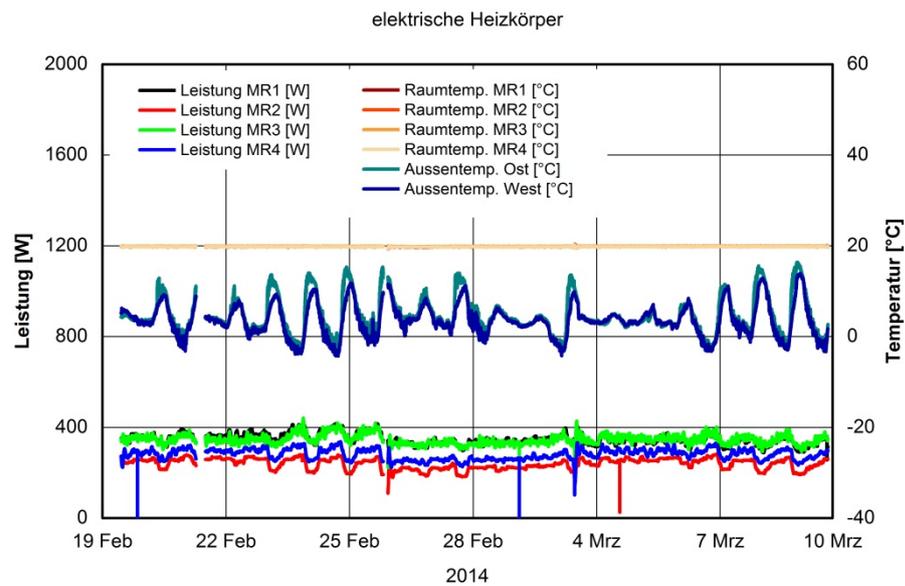


Bild 131:
Zeitlicher Verlauf der Messgrößen für die Messung der elektrischen Heizkörper.

Die wassergeführten Heizsysteme zeigen insgesamt stärkere Schwankungen im Energieverbrauch, können aber ebenfalls die Raumlufttemperaturen konstant bei 20 °C halten. Anders als bei den elektrischen Heizkörpern kann das ausgeprägte Regelverhalten der Wandheizungssysteme einen Einfluss auf die ermittelte Heizleistung haben.

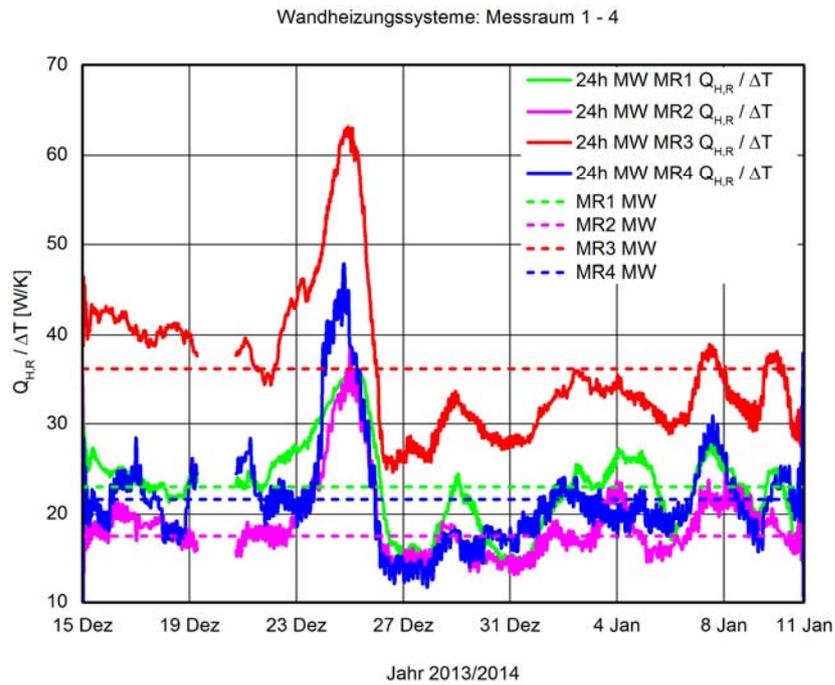


Bild 132:
 Zeitlicher Verlauf der gleitenden Tagesmittelwerte (berechnet aus der Leistungsabgabe der Wandheizungssysteme bezogen auf die Temperaturdifferenz Innen zu Außen) mit Gesamtmittelwert (gestrichelte Linien).

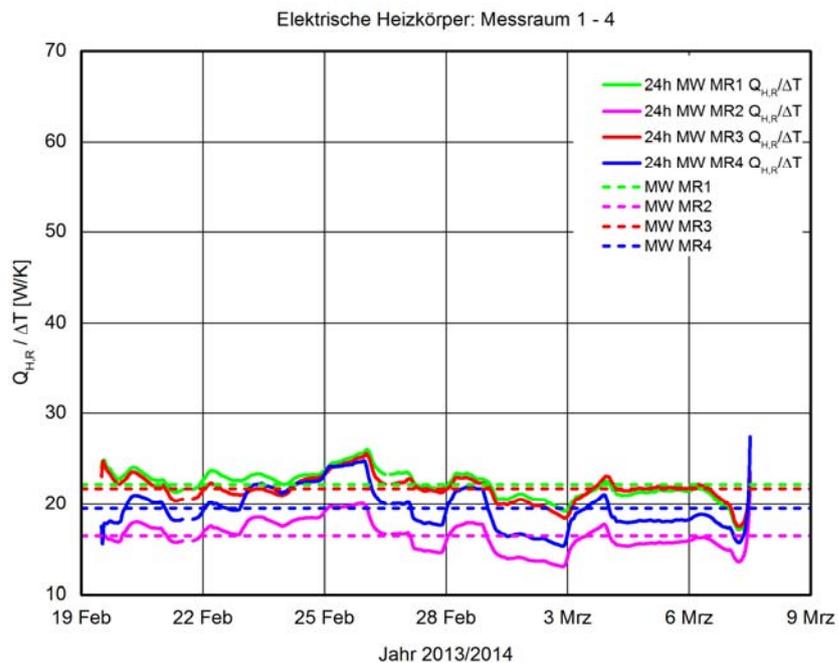


Bild 133:
 Zeitlicher Verlauf der gleitenden Tagesmittelwerte (berechnet aus der Leistungsabgabe der elektrischen Heizkörper bezogen auf die Temperaturdifferenz Innen zu Außen) mit Gesamtmittelwert (gestrichelte Linien).

Für die Berücksichtigung der Dynamik wurde daher zunächst die Energieabgabe eines Heizungssystems bezogen auf die mittlere stündliche Temperaturdifferenz zwischen Innen und Außen berechnet und in den Diagrammen Bild 132 und Bild 133 für die Wandheizungen und elektrische Beheizung gesondert ausgewiesen. Aus diesen stündlichen Mittelwerten der minütlichen Messwerte wird dann die mittlere Leistung bezogen auf die Temperaturdifferenz Innen zu Außen berechnet.

Mit den ermittelten Kennwerten für jedes Heizsystem kann mit Hilfe der temperaturspezifische Heizleistung jedes der Wandheizsysteme (Variante) mit dem jeweiligen elektrischen Heizkörper (Referenz) ins Verhältnis gesetzt und damit verglichen werden.

In Tabelle 35 sind die Ergebnisse der Leistungsmessung zusammen mit den für die Bewertung einbezogenen internen Wärmegewinnen und -verlusten sowie den mittleren Randbedingungen sowohl für die Messperiode mit den unterschiedlichen Wandheizungssystemen als auch die mit der Referenzmessung durch den elektrischen Heizkörper aufgelistet und der auf die elektrische Beheizung bezogene prozentuale Verbrauch p der Wandheizungssysteme angegeben. Die Berücksichtigung des Korrekturfaktors erfolgt nach der Betrachtung des Leistungsvergleiches p mit p' :

$$p' = \frac{H_{H,V}}{H_{H,R} * f_{H,R}}$$

Wobei mit $H_{H,R}$ die gemessene Leistung $\dot{Q}_{H,R}$ in \dot{Q}_{H,R_i}^* enthalten ist:

$$H_{H,R} = \overline{\left(\frac{\dot{Q}_{H,R_i}^*}{\Delta T_{R_i}} \right)}$$

Tabelle 35:
 Ergebnisse der Leistungsmessung der jeweiligen Heizsysteme mit internen
 Wärmetransport und Wärmegewinnen sowie berücksichtigter Korrektur und
 Vergleichszahl zur Referenzmessung.

Kenngröße	Einheit	MR1	MR2	MR3	MR4
Variante: Wandheizungssystem					
$\dot{Q}_{H,V}$	W	375,3	262,7	604,1	306,6
\dot{Q}_G	W	0	25,4	0	0
\dot{Q}_i	W	0	5,8	8,6	-14,4
$\dot{Q}_{H,V}^* = \dot{Q}_{H,V} + \dot{Q}_G - \dot{Q}_i$	W	375,3	282,3	595,5	321,0
\bar{T}_i	°C	19,9	19,9	19,9	19,5
$\bar{T}_{a,V}$	°C	2,8	3,9	2,8	3,9
$\Delta T_V = \bar{T}_i - \bar{T}_{a,V}$	K	17,1	16,0	17,1	15,6
$H_{H,V} = \left(\frac{\dot{Q}_{H,V}^*}{\Delta T_{V_i}} \right)$	W/K	23,04	18,80	36,12	21,61
Referenz: Elektrischer Heizkörper					
$\dot{Q}_{H,R}$	W	351,1	215,1	346,8	281,3
\dot{Q}_G	W	0	25,4	0	0
\dot{Q}_i	W	0	0,0	0,0	0,0
$\dot{Q}_{H,R}^* = \dot{Q}_{H,R} + \dot{Q}_G - \dot{Q}_i$	W	351,1	240,5	346,8	281,3
$\bar{T}_{l,R}$	°C	19,8	19,8	19,9	19,8
$\bar{T}_{a,R}$	°C	3,4	4,4	3,4	4,4
$\Delta T_R = \bar{T}_{l,R} - \bar{T}_{a,R}$	K	16,4	15,5	16,5	15,4
$H_{H,R} = \left(\frac{\dot{Q}_{H,R}^*}{\Delta T_{R_i}} \right)$	W/K	22,18	16,46	21,73	19,41
Vergleich: Variante / Referenz					
$p = \frac{H_{H,V}}{H_{H,R}}$	%	103,9	114,2	166,2	111,3
$f_{H,R}$	-	1,0	1,145	1,0	1,050
$p' = \frac{H_{H,V}}{H_{H,R}} \frac{1}{f_{H,R}}$	%	103,9	99,8	166,2	106,0

Fehlerrechnung

Bei der Betrachtung der möglichen fehlerbedingten Abweichung des Gesamtergebnisses mit Einfluss der Messungenauigkeiten wurden folgende Einflüsse und Parameter berücksichtigt:

- Volumenstrommessung
- Temperaturmessung Heizleitung Vor- und Rücklauf
- Temperaturmessung Innen- und Außenklima
- Elektrische Leistungsmessung

Die Volumenstrommessung und Temperaturmessung von Vor- und Rücklauf haben auf das Messergebnis den größten Einfluss, da diese die größte Messunsicherheit aufweisen. Für die Volumenstrommessung kann nach einer Vergleichsmessung mit einer institutseigenen Kalibriermesseinrichtung eine höhere Genauigkeit gegenüber der Werkskalibrierung angegeben werden. Die Ergebnisse der Vergleichsmessung sind in Bild 134 dargestellt.

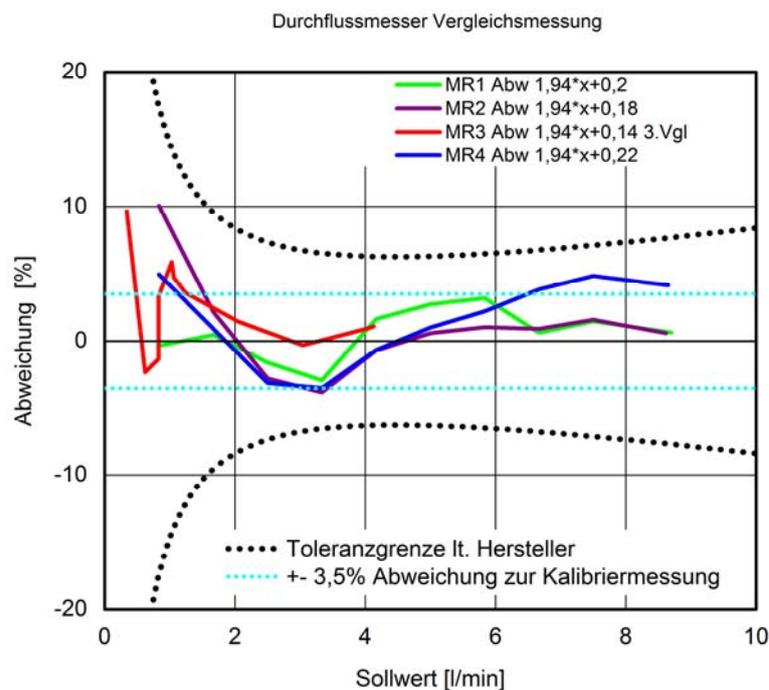


Bild 134:

Vergleichsmessung der Volumenstrommessung mit Angabe der Kalibrierfaktoren der Durchflussmesser. Die mögliche Gesamtabweichung beträgt $\pm F_V = \pm 3,5 \%$, addiert zum jeweils errechneten Ergebnis für alle vier Messräume.

$$F_V = \text{Fehler Messung Volumenstrom}$$

Die Temperaturmessung kann mit einer typischen kalibrierten Genauigkeit von $\pm 0,1$ Kelvin über den gesamten Messbereich angegeben werden. Bei der Betrachtung der möglichen Abweichung bei der Temperaturdifferenzmessung wird folgende Messunsicherheit berechnet:

$$\pm F_T = \sqrt{T_1^2 + T_2^2} = \pm 0,141 \text{ K}$$

F_T = Fehler Messung Temperaturdifferenz

Für die Messung der Temperaturdifferenz von Vor- und Rücklauf der Heizleitung sowie von Raum- und Außentemperatur ist für die weitere Fehlerfortpflanzung die relative Abweichung zum Ergebnis erforderlich. Bei einer mittleren Temperaturspreizung der Heizleitung z. B. für Messraum 4 von $\overline{\Delta T} = 3,14 \text{ K}$ ergibt sich eine Messunsicherheit für die Temperatur-Messung an den Heizleitungen F_{HL} :

$$\pm F_{HL} = \frac{F_T}{\overline{\Delta T}} = \pm 4,49 \%$$

Bei einer mittleren Temperaturdifferenz zwischen Raum- und Außentemperatur z.B. für Messraum 4 von $\overline{\Delta T} = 15,65 \text{ K}$ ergibt sich eine Messunsicherheit für die Messung der Klimatemperaturdifferenz F_{KD} :

$$\pm F_{KD} = \frac{F_T}{\overline{\Delta T}} = \pm 0,90 \%$$

Der Fehler F_Q der Leistungsberechnung der Wandheizungssysteme wird aus den Fehlern F_V , F_{HL} und F_{KD} am Beispiel Messraum 4 berechnet zu:

$$\pm F_Q = \sqrt{F_V^2 + F_{HL}^2 + F_{KD}^2} = \pm 5,0 \%$$

Der Gesamtfehler F_p mit Berücksichtigung der möglichen Abweichung der elektrischen Leistungsmessung von $F_{el} = 2,5\%$ ergibt sich am Beispiel Messraum 4 schließlich zu:

$$\pm F_p = \sqrt{F_Q^2 + F_{el}^2} = \pm 5,6 \%$$

In Bild 135 ist der in Bezug auf die elektrische Beheizung ermittelte Leistungsvergleich grafisch dargestellt. Mit eingetragen ist die jeweilige spezifische Fehler der Messung für jeden Messraum.

Leistungsvergleich der Wandheizungssysteme zu den elektrischen Heizkörpern mit Angabe des Messfehlers im Zeitraum 15.12.2013 bis 10.03.2014

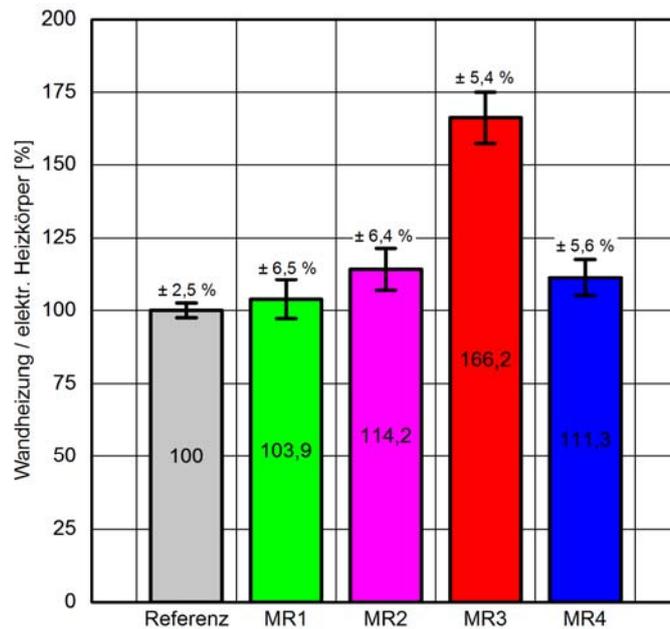


Bild 135:
Verhältnis der temperaturspezifischen Heizleistung der Heizungssysteme zum el. Heizkörper in % mit Angabe des spezifischen Fehlers. Die mögliche Gesamtabweichung beträgt bis zu ± 6,5 % zum angegebenen Ergebnis.

Leistungsvergleich der Wandheizungssysteme zu den elektrischen Heizkörpern mit Angabe des Messfehlers im Zeitraum 15.12.2013 bis 10.03.2014

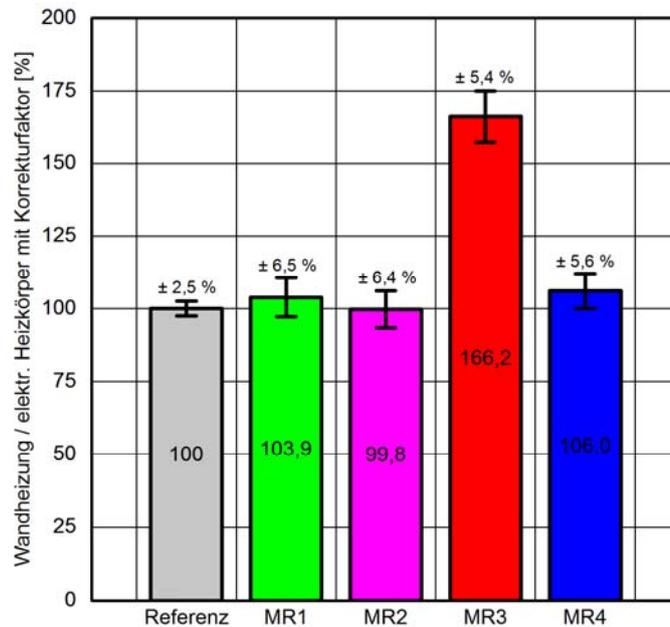


Bild 136:
Verhältnis der temperaturspezifischen Heizleistung der Heizungssysteme zur korrigierten elektrischen Leistung in %. Die elektr. Leistung wurde in Bezug auf die Dämmwirkung der Wandheizungssystem (MR2 und MR4) angepasst.

Diese Ergebnisse müssen noch um die zusätzliche Dämmwirkung der Wandaufbauten der Wandheizungssysteme korrigiert werden. Die elektr. Leistungsmessung als Referenzgröße wurde daher in Bezug auf die Dämmwirkung der Wandheizungssysteme (MR2 und MR4) angepasst. Nach Berücksichtigung des Korrekturfaktors ergeben die sich in Bild 136 dargestellten Ergebnisse.

Fast alle untersuchten Wandheizsysteme zeigen einen ähnlichen Energieverbrauch wie die Beheizung mit einem konventionellen, konvektiven elektrischen Heizkörper. Lediglich die Wandtemperierung (MR3) verbraucht unter den gegebenen Umständen deutlich mehr Energie als der elektrische Referenzheizkörper.

5.5.3 Zusammenfassung zur energetischen Bilanzierung

Ziel dieser Messungen war der Vergleich der untersuchten Wandheizungssysteme und des strahlungsoptimierten Heizkörpers zu konvektiven Heizkörpern aus energetischer Sicht in einem realen historischen Gebäude.

Durch die Nullmessung zu Beginn des Experiments wurde gezeigt, dass die Räume trotz thermischer Entkoppelung und Dämmmaßnahmen nicht komplett identisch ausgebildet werden konnten. Aus diesem Grund wurde der Versuchsaufbau dahingegen geändert, dass die Energieverbräuche der eingebauten Wandheizungssysteme für jeden Raum mit einer Referenzbeheizung mit einem elektrischen Heizkörper, der in die Fensternische platziert wurde, verglichen wurden.

Bei der Erfassung der Energieverbräuche wurde auf konstante Randbedingungen in beiden Messphasen geachtet, was naturgemäß im Bestand nur in einem bestimmten Rahmen möglich ist. Die für den Vergleich herangezogenen Kennwerte wurden täglich berechnet und über mehrere Wochen gemittelt. Mit dem Mittelwert wurden die Vergleichskennwerte für die jeweiligen Heizsysteme bezogen auf die elektrische Heizkörperleistung berechnet.

Der Messraum 1 mit dem als „Strahlungsheizkörper“ bezeichneten Heizkörper hat eine gemessene Leistungsabgabe, die sehr nahe der des entsprechenden elektrischen Heizkörpers liegt. Der „Strahlungsheizkörper“ ist bauartbedingt rückseitig gedämmt, nicht aber an den Heizkörperseiten, und wird relativ dicht in die Heizungs-nische eingebaut. Aus diesem Grund erhitzt sich der Luftraum hinter dem Heizkörper. Die rückseitige Dämmung bringt hier deshalb keine merkliche Energieeinsparung.

Der Messraum 2 mit der Wandtemperierung als nahezu vollflächig montierte Wandheizung mit spezieller Entkopplungsmatte und parallelem Durchströmungsprinzip hat einen erhöhten gemessenen Energieverbrauch gegenüber der Vergleichsmessung mit elektrischem Heizkörper. Aufgrund der Energieabgabe direkt im Wandaufbau ist wegen des fehlenden konvektiven Übergangswiderstandes im Vergleich zur Beheizung im Raum ist auch ein erhöhter Transmissionswärmeverlust zu erwarten. Berücksichtigt man allerdings den durch den

Wandheizungsaufbau zusätzlichen gegebenen Wärmewiderstand, so wird dieser Effekt aber gerade kompensiert und es ergibt sich ein nahezu exakt gleicher Energiebedarf mit diesem System im Vergleich zur Nutzung eines Heizkörpers im Raum. Neben der energetischen Betrachtung sollten bei der Planung auch mögliche positive Effekte zum Schutz der Bausubstanz und gewisse Vorteile in Bezug auf die Behaglichkeit berücksichtigt werden.

Der Messraum 3 mit der Wandheizung durch Bauteiltemperierung mit in der Wand integrierten Heizrohren hat einen deutlich erhöhten Energieverbrauch gegenüber der Vergleichsmessung mit elektrischem Heizkörper. Dies ist zum einen darin begründet, dass hier Wärmeabgabe in der Bestandwand stattfindet (ohne zusätzliche dämmende Schichten) und dass hier die Wärmeabgabe sehr lokal begrenzt auf einem hohen Temperaturniveau erfolgt. Positive Effekte zum Schutz der Bausubstanz und konservatorische Aspekte können eine derartige Temperierung aber durchaus sinnvoll machen. Dabei ist aber zu überlegen, Bauteiltemperierung vor allem zur Schadensvermeidung oder für museale Nutzung mit konservatorischem Hintergrund einzusetzen und entsprechend zu regeln, weniger jedoch für die Beheizung von Arbeits- oder Wohnräumen.

Der Messraum 4 mit einer Wandheizung mit vorgefertigten Lehmbauplatten wurde als ebenfalls nahezu vollflächig montierte Wandheizung mit in vorgefertigten Lehmbauplatten integrierten Heizrohren ausgeführt und wie die Wandflächenheizung in Raum 2 aufgrund der Energieabgabe direkt im Wandaufbau wegen des fehlenden konvektiven Übergangswiderstandes einen erhöhten gemessenen Energieverbrauch gegenüber der Vergleichsmessung mit elektrischem Heizkörper. Berücksichtigt man den durch den Wandheizungsaufbau zusätzlichen gegebenen Wärmewiderstand, so wird dieser Effekt aber reduziert. Da die Dämmwirkung dieses Wandheizungsaufbaus aber im Vergleich zum System in Raum 2 aber etwas geringer ausfällt ergibt sich doch noch ein leicht erhöhter Verbrauch im Vergleich zur Nutzung eines Heizkörpers im Raum. Aber auch hierbei sollten bei der Bewertung neben der energetischen Betrachtung auch mögliche positive Effekte zum Schutz der Bausubstanz und gewisse Vorteile in Bezug auf die Behaglichkeit berücksichtigt werden.

5.6 Exergetische Untersuchungen

Aufbauend auf den messtechnischen Untersuchungen der in den vorangestellten Kapiteln beschriebenen Wärmeübergabesysteme wird in diesem Kapitel die Möglichkeit Niedertemperatur (Niederexergie) Technologien im Gebäudebestand einzusetzen mit Hilfe von dynamischen Simulationen untersucht. Hierfür werden die Auswirkungen der vorgesehenen Niedertemperatursysteme („LowEx“-Systeme) auf den Exergiebedarf der einzelnen Messräume berechnet und Optimierungsstrategien entwickelt.

Für diese Untersuchung wird die Simulationsumgebung TRNSYS in der Version 17 verwendet. TRNSYS [51] ist ein modular aufgebautes Simulationsprogramm, mit dem das Verhalten von Energiesystemen sowie Gebäudesystemen simuliert werden kann. Das Programm enthält eine große Anzahl von Standardkomponenten sogenannte TYPES in der Modulbibliothek, die je nach der Anforderung zur Nachbildung des realen Systems miteinander kombiniert werden können. Vor allem enthält das Gebäudemodell (TRNBuild) eine Standardkomponente für thermisch aktivierte Bauteilsysteme, die durch mehrere Studien validiert wurde.

5.6.1 Simulationsmodell

Zur detaillierten Berechnung des thermischen Verhaltens der einzelnen Messräume (vgl. Kap. 5.6.2) wird ein Mehrzonen-Modell aufgebaut. Hierbei erfolgt die Aufteilung des Gebäudemodells in vier thermische Zonen, um eine möglichst differenzierte Betrachtung der vier zu untersuchenden Messräume zu ermöglichen. Jede thermische Zone besitzt jeweils einen Luftknoten, der die thermische Speicherkapazität des Luftvolumens und die enthaltene thermische Masse der Bauteile, abbildet. Die Wärmebilanz am Luftknoten besteht aus einem konvektiven und radiativen Wärmestrom sowie der eindimensionalen Wärmeleitung durch die umschließenden Bauteile. Dabei wird der konvektive Wärmestrom an allen umgebenden inneren Oberflächen und durch Infiltration, Ventilation sowie benutzerdefinierten Luftmassenströme über die Systemgrenze (Gebäudehülle) beschrieben.

Der radiative Wärmestrom wird durch interne Strahlungsgewinne aller Oberflächenknoten von den umgebenden Bauteilen berücksichtigt. Die Wärmeleitung in den Wänden wird eindimensional unter Berücksichtigung der kapazitiven Einflüsse einzelner, homogener Bauteilschichten durch Übertragungsfunktionen formuliert. Damit wird der momentane Wärmestrom aus Stoffdaten, Oberflächentemperaturen und den Wärmeströmen vorheriger Zeitschritte errechnet [52].

Zur Modellierung des thermischen Verhaltens der Wände ist die auf eine Dimension reduzierte Fouriersche-Differentialgleichung zugrunde gelegt. Zur Lösung der Differentialgleichung in TRNSYS wurde eine Transferfunktionsberechnung entwickelt und dient der Berechnung der Wärmeleitung durch die Wände. Für eine ausführliche Beschreibung der Transferfunktionsberechnung ist auf die angegebene Literatur [53], [54] verwiesen.

5.6.2 Gebäudemodell

Die geometrischen und bauphysikalischen Daten der thermischen Zonen wurden über GoogleSketchUp in Verbindung mit TRNBuild hinreichend genau als 3D-Modell abgebildet (Bild 137). Die Berücksichtigung der 3D-Geometrie einer Zone ermöglicht eine genauere Berechnung des Strahlungsaustausches sowie eine positionsabhängige Komfortbestimmung. Damit können unterschiedliche langwellige Emissionsgrade der Bauteiloberflächen sowie die kurzwellige Strahlungsverteilung über die gesamte Zone berücksichtigt werden [55]. Jedoch ist es aufgrund der Eingabe der dreidimensionalen Geometriedaten über SketchUp nicht möglich, Wärmebrückeneffekte an Bauteilen nachträglich in TRNSYS einzufügen. Somit wird der Einfluss von Wärmebrücken in den folgenden Simulationen nicht berücksichtigt. Ein weiteres Augenmerk in der Simulation liegt auf der genauen Abbildung des thermischen Verhaltens der Wandheizsysteme in den Außenwänden. Diese wird in Übereinstimmung mit der tatsächlichen Ausführung der Wandheizsysteme modelliert, wobei die Gebäudedaten zur Datenaufnahmen der Bestandgebäude herangezogen werden. Der Simulationszeitschritt beträgt eine Stunde.

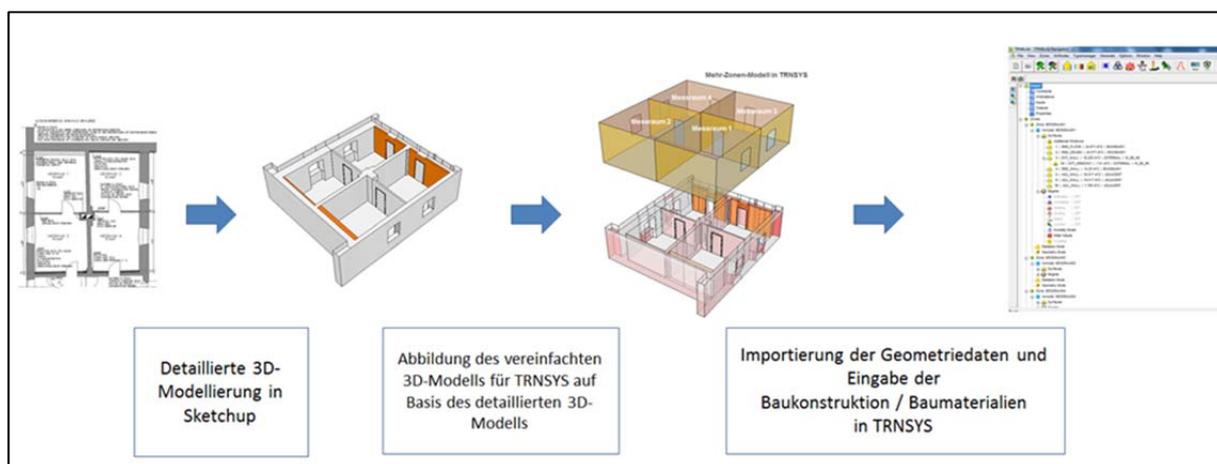
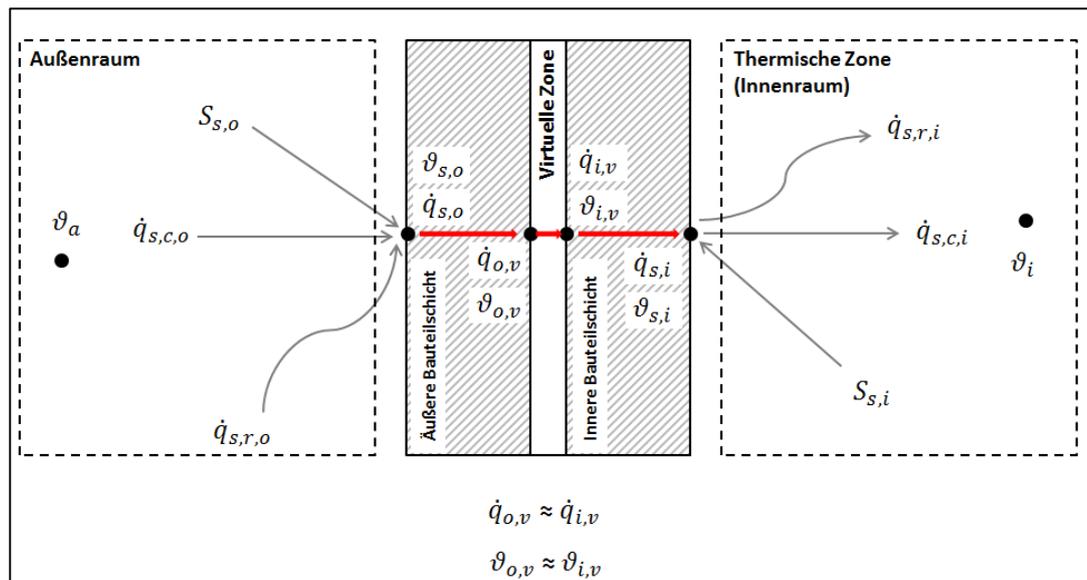


Bild 137:
Modellierung der Messräume in der Simulation.

Wie bereits erwähnt werden die Wärmeströme durch die Wände und die Oberflächentemperatur in TRNSYS mit Hilfe der Methode der Transferfunktionen berechnet. Dabei wird der Wärmestrom im aktuellen Zeitschritt aus den Randtemperaturen im aktuellen und den vorangegangenen Zeitschritten sowie den Wärmeströmen in den vorangegangenen Zeitschritten berechnet.

Jedoch liegt die Schwierigkeit der realen Abbildung des thermischen Verhaltens darin, dass die Transferfunktion von TRNSYS bei dicken Bauteilen bzw. bei hoher Trägheit ihre Stabilität massiv verliert. Dies macht eine hinreichend genaue Berechnung des thermischen Verhaltens von den bestehenden Bauteilen, wie z.B. der Außenwand (Dicke = 70cm) und der Innenwand (Dicke = 94cm) bestehend aus Porenbeton im Messraum 1, unmöglich.

Dieses Problem lässt sich jedoch durch eine alternative Annahme einer virtuellen Zone (s. Abbildung 2) zwischen den äußeren und inneren Bauteilschichten umgehen. Hierbei werden die massiven Bauteile durch eine virtuelle Zone getrennt, die eine minimale thermische Speicherkapazität enthält. Die Trennung durch die virtuelle Zone erfolgt dabei in der Mitte der Außenwand, wodurch sich die thermische Speicherkapazität der einzelnen Außenwandschichten halbiert. Im Gegensatz zu den realen Verhältnissen wird dort vorausgesetzt, dass ein Wärmeverlust zwischen den nebeneinanderliegenden Abschnitten des inneren und äußeren Bauteils nicht auftritt und somit die einfließenden und ausfließenden Wärmeströme der virtuellen Zone nahezu gleich sind. Durch die virtuelle Zone können die Wärmeströme der massiven Bauteile getrennt berechnet und Ungenauigkeit der Simulation reduziert werden.



- | | |
|--------------------------------------|---|
| $S_{s,i}, S_{s,o}$: | Absorbierte Strahlungsgewinne |
| $\dot{q}_{r,s,i}, \dot{q}_{r,s,o}$: | Strahlungsaustausch mit anderen Flächen |
| $\dot{q}_{s,i}, \dot{q}_{s,o}$: | Wärmefluss durch Wärmeleitung von der Wand zur Oberfläche |
| $\dot{q}_{c,s,i}, \dot{q}_{c,s,o}$: | Wärmefluss durch Konvektion von der Wand zur Luft |
| $\dot{q}_{o,v}, \dot{q}_{i,v}$: | Wärmefluss durch Konvektion in der virtuellen Zone |
| $\vartheta_{o,v}, \vartheta_{i,v}$: | Oberflächentemperatur der Wand in der virtuellen Zone |
| $\vartheta_{s,i}, \vartheta_{s,o}$: | Oberflächentemperatur |
| ϑ_a, ϑ_i : | Lufttemperatur |
| Index : | (i) Innenseite, (o) Außenseite |

Bild 138:
Aufbau eines Bauteils mit einer virtuellen Zone.

5.6.3 Modell Strahlungsheizung (Messraum 1)

Im Vergleich zu der Wandheizung besitzt die wassergeführte Strahlungsheizung eine leichte thermische Masse und reagiert schnell auf die Regelung. Die ideale Heizung in der Simulationsumgebung von TRNSYS wirkt wie eine Heizung mit einem bestimmten Strahlungs- und Konvektionsanteil und die keine

Trägheit besitzt. Hierbei wird die Trägheit vom Wasser sowie des Metalls des Radiators nicht berücksichtigt. Die ideale Heizung gleicht Temperaturschwankungen im Raum nur mit einer geringen Verzögerung aus. Aus diesem Grund wird die Strahlungsheizung in der Simulation als eine ideale Heizung mit einem Strahlungsanteil von 48 % [56] modelliert, wodurch die gemessene Wärmeleistung der Strahlungsheizung direkt in den Raum zugeführt wird. Hierbei wird der Einfluss der Oberflächentemperatur der Strahlungsheizung auf die Raumlufttemperaturänderung nicht berücksichtigt.

5.6.4 Modell Wandheizung (Messraum 2, Messraum 3, Messraum 4)

In TRNSYS wurde das 3-dimensionale, instationäre Wärmeleistungsverhalten der thermisch aktivierten Bauteilsysteme unter geringfügigen Einschränkungen mit einer 1-dimensionalen Variante approximiert. Dieses Verfahren zur Ableitung des Wärmeleistungsverhaltens sowie Validierung des Simulationsmodells sind in [57] ausführlich beschrieben. Um eine genaue Berechnung der thermisch aktivierten Bauteilsysteme zu ermöglichen, wird die Heizfläche in der Simulation in mehrere Segmente unterteilt. Somit ist die Wassertemperatur des Heizrohrs keine konstante Größe, sondern ändert sich längs einer Rohrschleufe. Aus diesem Grund wird für jedes einzelne Segment eine eigene Wärmebilanz erstellt. Die Anzahl der notwendigen Segmente in Strömungsrichtung ist abhängig vom Volumenstrom und von den geometrischen und materialspezifischen Größen der Konstruktion.

So berücksichtigt das Modell für die Wandheizung die Temperaturänderung entlang der Rohrachse durch die Hintereinanderschaltung von gleichartigen Segmenten in Strömungsrichtung. Das heißt, dass die Austrittstemperatur eines Segmentes direkt als die Eintrittstemperatur für das nächste Segment verwendet wird. Bild 139 und Bild 140 beschreiben die Unterteilung der Heizfläche durch die Segmente in der Simulation.

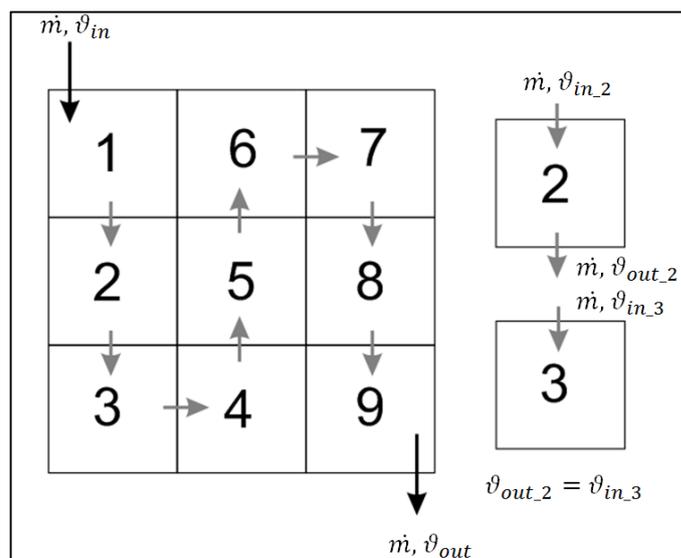


Bild 139:
Unterteilung der Heizfläche durch Segmente.

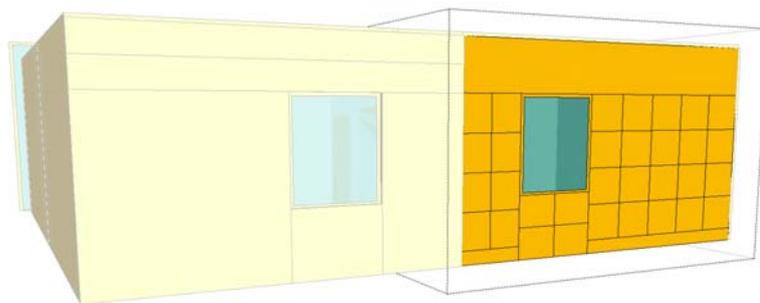
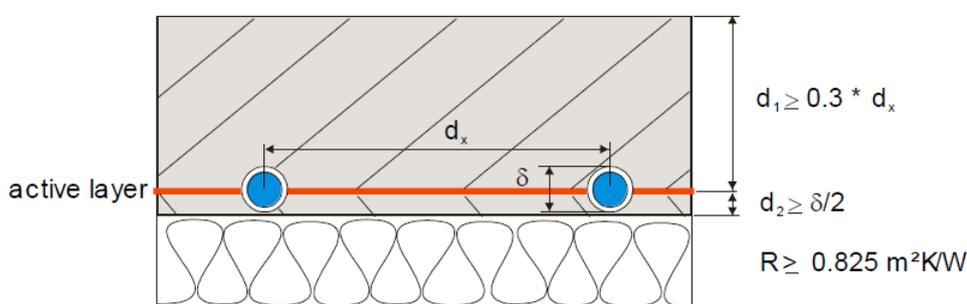


Bild 140:
Unterteilung der Heizfläche in TRNSYS (Beispiel : Messraum 2).

Jedoch unterliegt die Gültigkeit dieses Modells folgenden geometrischen Einschränkungen (Bild 141).



- Für das Verhältnis von Überdeckung d_1 zu Rohrteilung d_x muss gelten:
 $d_1 \geq 0,3 \times d_x$
- Für das Verhältnis von Rohraußendurchmesser δ zu Unterdeckung d_2 muss gelten:
 $d_2 \geq \delta/2$
- Die Forderung des Wärmeleitwiderstands unterhalb der Decke (R) beträgt
- $0,825 \text{ (m}^2\text{K)/W}$

Bild 141:
Aufbau eines thermisch aktivierten Bauteilsystems und dessen geometrischen Einschränkungen in der Simulation.

Bei der Abbildung des Wandheizungsmodells wird dies als problematisch angesehen, da der Rohrabstand der Wandheizsysteme aufgrund der geringen Überdeckung beschränkt wird. Zum Beispiel beträgt bei einer Überdeckung von 15 mm der maximale Rohrabstand 5 cm. Dies erhöht die Wärmestromdichte an die Raumluft sowie die Oberflächentemperatur der Wandheizung. Demzufolge ist die Genauigkeit der Ergebnisse bei der Flächenheizung mit geringer Überdeckung niedriger als bei Flächenheizsystemen, wie zum Beispiel der Betonkernaktivierung. Jedoch zeigt die Validierung des Simulationsmodells in Kapitel 5.6.8, dass das thermische Verhalten der Wandheizsysteme trotz der Einschränkungen ausreichend genau abgebildet werden kann.

5.6.5 Klimadaten

In der Simulation werden die Klimadaten der Meteomedia Group Wetterstation in Benediktbeuern für den Zeitraum von 27. Dezember 2013 - 10. Januar 2014 zugrunde gelegt. Diese Klimadaten beinhalten die Außenlufttemperatur, Windgeschwindigkeit, Windrichtung, Globalstrahlung sowie Luftfeuchtigkeit in stündlicher Auflösung. Neben den Klimadaten von Meteomedia wurde auch die Außenlufttemperatur an der ortsnahen Wetterstation des Klosters Benediktbeuern gemessen. In Bild 142 werden die beiden Außenlufttemperaturen miteinander verglichen. Wie deutlich zu erkennen ist, weichen die gemessene Außenlufttemperatur und die Außenlufttemperatur der Meteomedia unerheblich voneinander ab. Jedoch ist zu beobachten, dass die gemessene Außenlufttemperatur am Standort größeren Schwankungen unterliegt. In der Regel haben diese Kurzzeit-Schwankungen einen geringen Einfluss bei der Untersuchung eines Gebäudes in Massivbauweise, da die Gebäudespeichermasse vergleichsweise träge auf diese Schwankung reagiert.

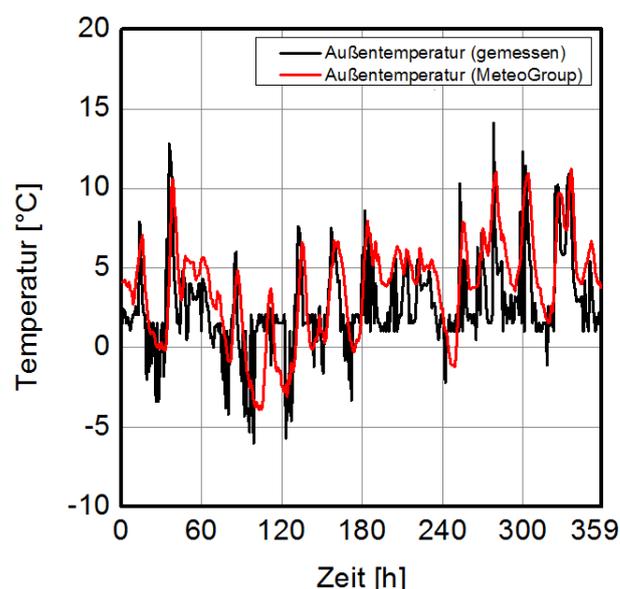


Bild 142:
Vergleich der Außenlufttemperaturen.

5.6.6 Strahlungsmodell

Der Einsatz des detaillierten Strahlungsmodells in TRNSYS ermöglicht eine genauere Berechnung des Strahlungsaustausches in Verbindung mit den Geometrieminformationen des Raummodells aus Sketch-Up (s. Kapitel 5.6.2). Eine Besonderheit liegt darin, dass der diffuse Strahlungsaustausch im Raum sowohl von den geometrischen Verhältnissen zwischen den Flächen (Sichtfaktor) als auch von den optischen Eigenschaften (wie etwa dem Emissions- oder Reflexionsgrad der Raumumschließungsflächen) abhängig ist[55]. Hierbei stellt der Sichtfaktor ein rein geometrisches Verhältnis dar. Der Sichtfaktor definiert den diffusen Strahlungsanteil, der von der Fläche A abgegebene Strahlung direkt auf die Fläche B auftrifft (siehe Bild 143).

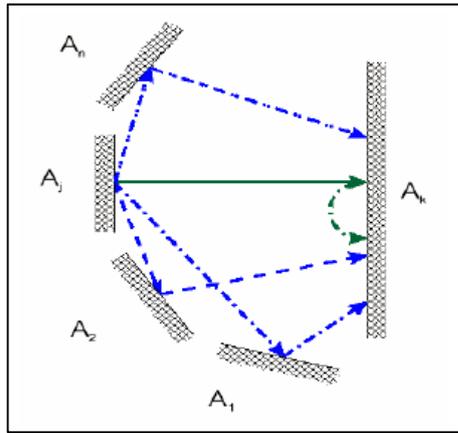


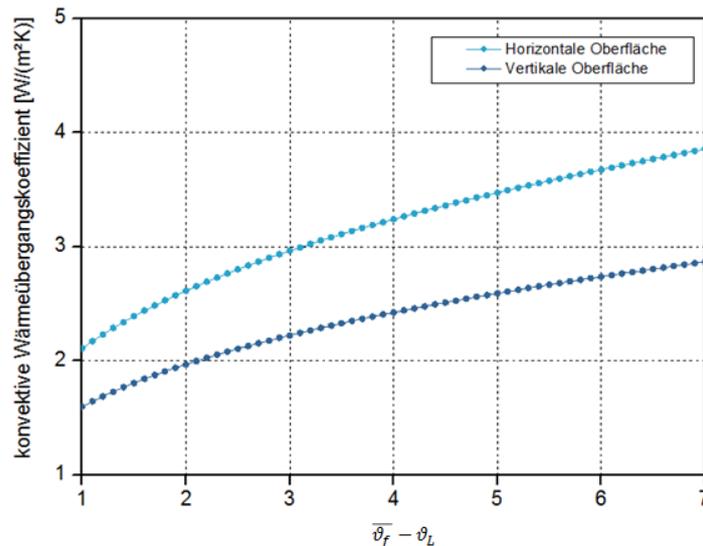
Bild 143:
Einzelseinflüsse der Fläche A_j auf für A_k langwellige Strahlung [55]

Neben dem Sichtfaktor wird die konvektive Wärmeübertragung an die Raumluft unabhängig vom Strahlungsaustausch berechnet. Diese separate Berechnung der langwelligigen Strahlung sowie der konvektiven Wärmeübertragung der Heizfläche ermöglicht eine genaue Betrachtung des Wärmeaustauschs der Flächenheizung mit den Raumumschließungsflächen. Jedoch erhöht die Nutzung des detaillierten Strahlungsmodells in Verbindung der Flächenheizung deutlich die Simulationsdauer.

5.6.7 Wärmeübergangskoeffizienten

Innere konvektive Wärmeübergangskoeffizienten

Für die konvektive Wärmeübertragung der Bauteilinnenoberflächen basieren die Wärmeübergangskoeffizienten auf den Näherungsgleichungen, die allein abhängig von der Temperaturdifferenz zwischen der Raumlufttemperatur und Oberflächentemperatur sind. Dies ist besonders bedeutungsvoll bei der Berechnung der Wärmestromdichte eines Niedertemperatur-Flächenheizsystems [58], da die Wärmestromdichte der Flächenheizung ausschließlich von der geringen Temperaturdifferenz zwischen der Heizfläche und dem Raum abhängig ist. Die Wärmeübergangskoeffizienten lassen sich mittels der nachfolgenden Gleichungen (siehe Bild 144) näherungsweise berechnen.



$$\alpha_h = 2,11 \times (\bar{\vartheta}_f - \vartheta_L)^{0,31} \quad (1)$$

$$\alpha_v = 1,6 \times (\bar{\vartheta}_f - \vartheta_L)^{0,3} \quad (2)$$

α_h : konvektiver Wärmeübergangskoeffizient der horizontalen Bauteiloberfläche

α_v : konvektiver Wärmeübergangskoeffizient der vertikalen Bauteiloberfläche

$\bar{\vartheta}_f$: mittlere Oberflächentemperatur

ϑ_L : Raumlufttemperatur

Bild 144:

Konvektiver Wärmeübergangskoeffizient der horizontalen Oberfläche und vertikalen Oberflächen [58] .

Äußere konvektive Wärmeübergangskoeffizienten

Bei der Berechnung der äußeren Wärmeübergangskoeffizienten wird die erzwungene Konvektion durch Wind zugrunde gelegt. Die äußeren Wärmeübergangskoeffizienten lassen sich mittels der nachfolgenden Gleichung [59] näherungsweise berechnen.

$$h_{cve} = 4 + 4v = 4(1 + v) \quad (3)$$

h_{cve} : Äußerer Wärmeübergangskoeffizient [W/(m² K)]

v : Windgeschwindigkeit [m/s]

5.6.8 Validierung der Simulation

Die Validierung des Simulationsmodells wird anhand des Abgleichs mit den erfassten Messdaten von einem begrenzten Zeitraum (27. Dezember 2013 - 10. Januar 2014) überprüft. Der Abgleich der Simulationsmodelle mit den Messdaten ist nicht einfach und erfordert eine umso genauere Vorgehensweise. Bild 145 zeigt die Vorgehensweise der Validierung. Die für die Validierung der Simulationsmodelle genutzte Vorgehensweise setzt sich aus drei aufeinander folgenden Schritten zusammen. Bei der Datenakquisition werden zunächst für die Simulation benötigte Messdaten sowie Gebäudedaten (Geometrische und bauphysikalische Daten) auf Basis der Masterarbeit [56] und IMEDAS (Internet Messdaten Erfassungs- und Auswertungssystem) zusammengestellt. Weiterhin erfolgt eine Zusammenstellung der Messwerte, die für die Gestaltung der Simulationsrandbedingungen erforderlich sind:

- Vorlauftemperatur und Volumenstrom des Heizkreises
- Zulufttemperatur und Zuluftmenge der mechanischen Lüftung
- Raumlufthtemperaturen der Nebenräume

Anhand dieser Basisdaten werden die Simulationsmodelle der vier Messräume in TRNSYS abgebildet. Zum Schluss werden die gemessenen Daten mit Simulationsergebnissen verglichen. Dabei liegen folgende Ausgangsdaten zu Grunde.

- Raumlufthtemperatur
- Operative Raumtemperatur
- Wärmeleistung der Flächenheizung
- Rücklauftemperatur des Heizkreises

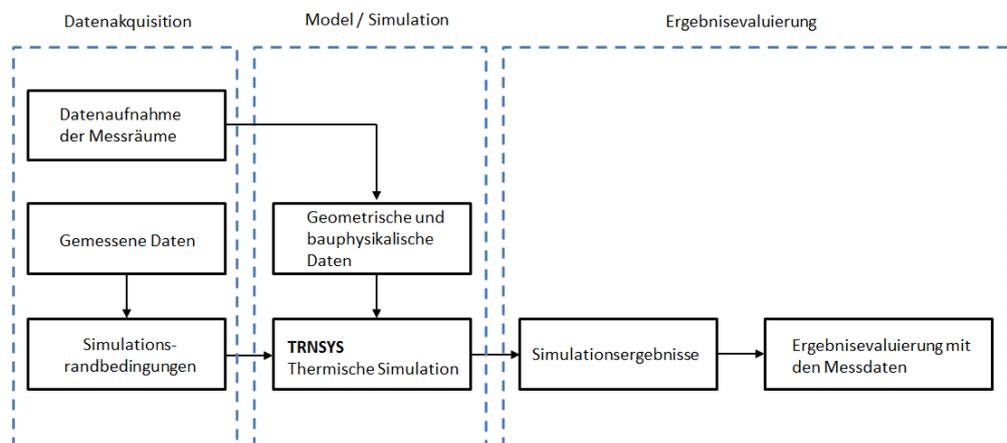


Bild 145:
Grafische Darstellung der Vorgehensweise bei der Validierung.

5.6.9 Validierung der Ergebnisse

Die Validierung des Simulationsmodells wird mit den zur Verfügung stehenden erfassten Messdaten aus dem Zeitraum vom 27. Dezember 2013 bis zum 10. Januar 2014 durchgeführt, wobei die fehlenden Messwerte aufgrund der Sensorfehler oder -ausfällen gering bleiben. In den Messräumen 1, 2 und 4 sind die Messdaten nahezu vollständig vorhanden. Im Messraum 3 beträgt der Anteil der fehlenden Messwerte etwa 29 %. Die möglichen Messfehlerquellen werden in dieser Arbeit nicht näher untersucht.

Jede Simulation besitzt eine Einschwingphase (siehe Beispiel Messraum 4 in Bild 146), in der Extremwerte auftreten können, wodurch die Ergebnisse in der Auswertung verfälscht werden können. Aus diesem Grund ist es sinnvoll, die Auswertung nach dem Ende der Einschwingphase durchzuführen. Um diese Einflüsse der Einschwingphase zu reduzieren, wurde in dieser Arbeit der Simulationslauf drei Mal nacheinander wiederholt, wobei die Ergebnisse der dritten Simulation als Endergebnisse betrachtet werden

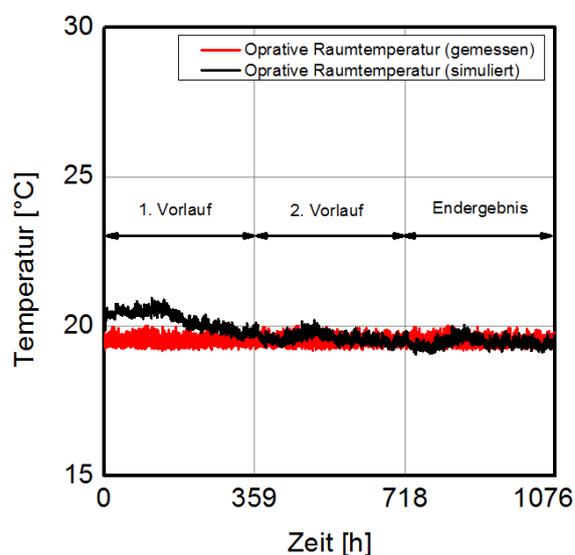


Bild 146:
Vergleich der operativen Raumtemperaturen im Messraum 4.

Für die Validierung sowie Untersuchung des thermischen Verhaltens der Flächenheizsysteme werden hauptsächlich die folgenden Simulationsergebnisse mit den Messdaten verglichen. Dies ermöglicht einen optimalen Vergleich der Flächenheizsysteme auf deren thermisches Verhalten.

- Raumlufttemperatur (Messraum 1)
- Operative Raumtemperatur (Messraum 2,3,4)
- Oberflächentemperatur der Heizfläche (Messraum 2,3,4)
- Wärmestromdichte der Heizfläche (Messraum 2,3,4)
- Wärmeleistung des Heizrohrregisters (Messraum 2,3,4)

5.6.10 Validierung von Messraum 1 (Strahlungsheizkörper)

In Messraum 1 wird lediglich die Raumlufttemperatur des Simulationsmodells mit den Messwerten verglichen, da der Einfluss der Oberflächentemperatur der Strahlungsheizung auf die Raumtemperaturänderung aufgrund der idealen Heizung nicht berücksichtigt werden kann. In Bild 147 wird die simulierte Raumlufttemperatur mit der gemessenen Raumlufttemperatur verglichen. Die Intensität der Farbgebung der unterschiedlichen Messpunkte gibt die Abweichung in Kelvin an: Je näher die Messpunkte an der Diagonalen zwischen Ordinate und Abszisse liegen, desto kleiner deren Abweichung zur Realität. Befinden sich die Messwerte oberhalb der Diagonalen, so sind die Simulationsergebnisse höher als die Messergebnisse, liegen sie unterhalb, so sind die Ergebnisse niedriger als die Messergebnisse. Die Abweichung zwischen den Werten der Simulation und der Messung liegt unterhalb von 0,7 K, somit ergibt sich eine hinreichend gute Übereinstimmung von Simulations- und Messergebnissen. Außerdem ist deutlich zu erkennen, dass das Simulationsmodell mit der idealen Heizung eine deutlich größere Raumlufttemperaturschwankung aufweist. Um eine exakte Untersuchung des Strahlungsheizkörpers durchführen zu können, ist in künftigen Arbeiten ein physikalisches Modell in TRNSYS zu entwickeln

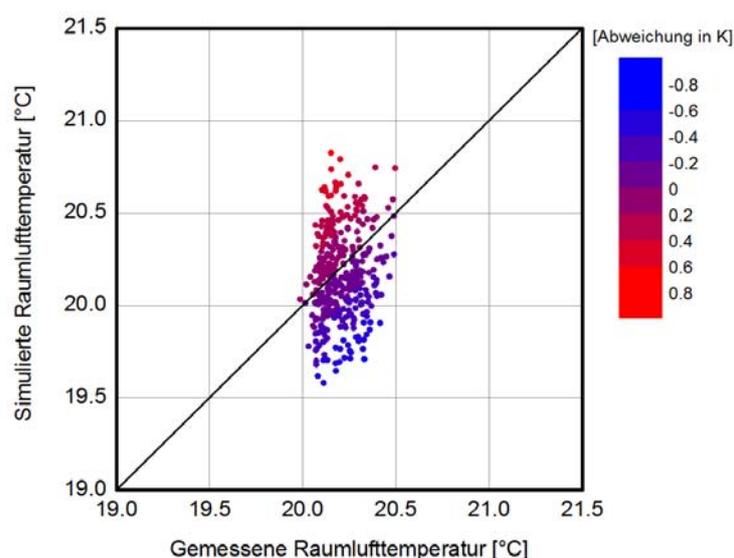


Bild 147:
Vergleich der Raumlufttemperatur im Messraum 1.

5.6.11 Messraum 2 (Wandheizung 1)

Die Untersuchung der Einflussgröße der Wandheizungen sowie Wandtemperierung auf das thermische Verhalten der Messräume 2, 3 und 4 basiert auf dem Vergleich der operativen Raumtemperatur, da bei der Ermittlung der operativen Raumtemperatur das thermische Verhalten der gesamten Raumumschließungsfläche mit berücksichtigt wird. In Messraum 2 liegt die maximale Abweichung der operativen Raumtemperatur bei 0,7 K, dies entspricht einer guten Übereinstimmung zwischen dem gemessenen und simulierten Ergebnissen (siehe Bild 148). Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass die Innenraumlufttemperatur in der Simulation deutlich geringer ist als die der vorliegenden Messdaten. Weiterhin besitzen in der Simulation die Input-Daten der mechanischen Lüftung sowie die Oberflächentemperaturen, der an den Heizflächen angrenzenden Nebenräume, einen großen Einfluss auf die Abbildung der Innenraumlufttemperatur. Aus diesem Grund sollten umfangreiche Parameterstudien durchgeführt werden, um die Herkunft der Abweichung der operativen Raumtemperatur zu ermitteln. Dafür werden vollständige Messdaten benötigt, da die Abbildung der operativen Raumtemperatur von vielen Faktoren abhängig ist. Der Fehler durch diese Abweichung ist in der Validierung verhältnismäßig klein und spielt demzufolge in Bezug auf die Genauigkeit der Berechnung des thermischen Verhaltens der Flächenheizung nur eine untergeordnete Rolle.

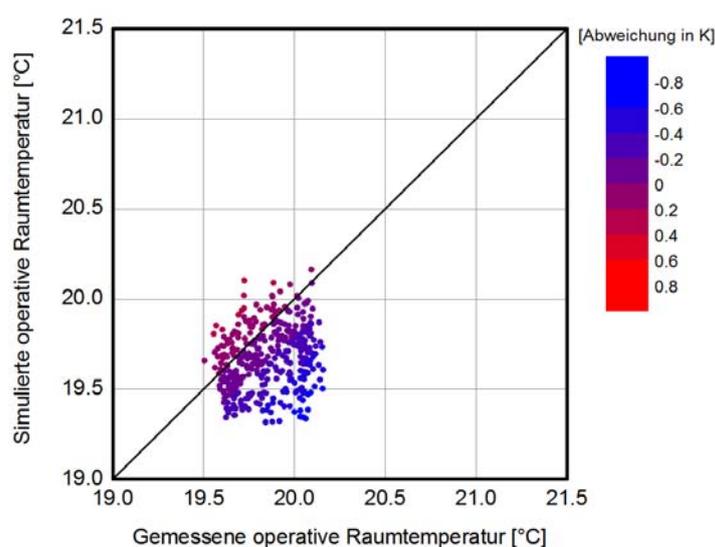


Bild 148:
Vergleich der operativen Raumtemperaturen im Messraum 2.

Zur Untersuchung des thermischen Verhaltens der Wärmeübertragungsfläche der Wandheizungen sowie Wandtemperierung werden die simulierte Oberflächentemperatur, Wärmestromdichte der Heizfläche sowie Wärmeleistung des Heizrohrregisters mit den Messergebnissen verglichen. Bei der Validierung der simulierten Oberflächentemperatur und Wärmestromdichte der Wandheizung verursacht die inhomogene Temperaturverteilung über der gesamten Wandheizfläche eine leichte Abweichung der Messwerte, je nachdem, an welchem Standort sich der Messpunkt (Sensoren) befindet. In der Regel entsteht an der

Oberseite der Wandheizung eine Abweichung (Welligkeit) der Oberflächentemperatur in der Form, dass jeweils oberhalb des Rohres ein Temperaturmaximum und zwischen den Rohren ein Temperaturminimum erreicht wird [60]. Hervorgerufen wird diese Abweichung durch die unterschiedlichen Messpunkte innerhalb der Messräume. Es wird angenommen, dass dieser Effekt neben der Ungenauigkeit des Simulationsmodells einen Einfluss auf die Validierung der Simulationsergebnisse haben kann.

In Bild 149 wird die simulierte Oberflächentemperatur mit der gemessenen Oberflächentemperatur des Wandheizsystems verglichen. Hierbei beträgt die maximale Abweichung 4K. Auffällig ist, dass die Oberflächentemperatur der Simulation- und Messergebnisse sich meist zwischen 20 und 24 °C befindet. Die Streuung der Einzelwerte lassen sich mit Hilfe der unterschiedlich großen Wellenlänge (Verschiebung der Temperaturverläufe) der Oberflächentemperaturverläufe erklären. Das heißt, dass diese Abweichung hauptsächlich auf die unterschiedlich große Wellenlänge der Oberflächentemperaturverläufe zurückzuführen ist.

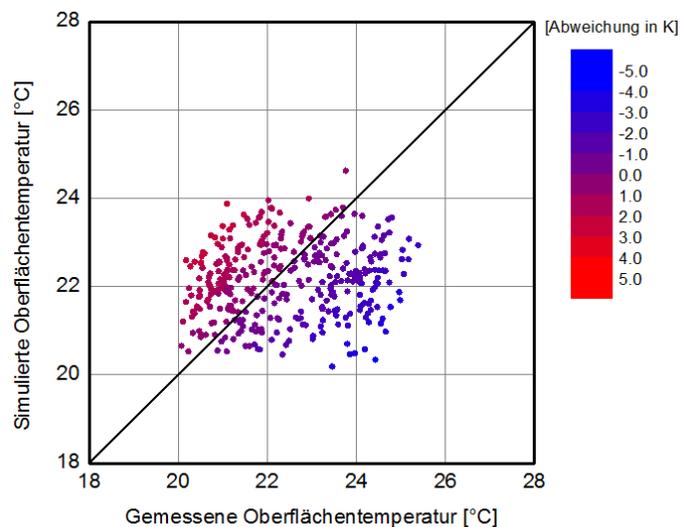


Bild 149:
Vergleich der Oberflächentemperatur der Heizfläche im Messraum 2.

Aus dem oben genannten Grund zeigt Bild 150 auch eine hohe Abweichung (etwa 20 W/m²) zwischen der gemessenen und simulierten Wärmestromdichte der Heizfläche. Die simulierte Wärmestromdichte der Wandheizung ist teilweise mehr als doppelt so groß, wie die der gemessenen Wärmestromdichte.

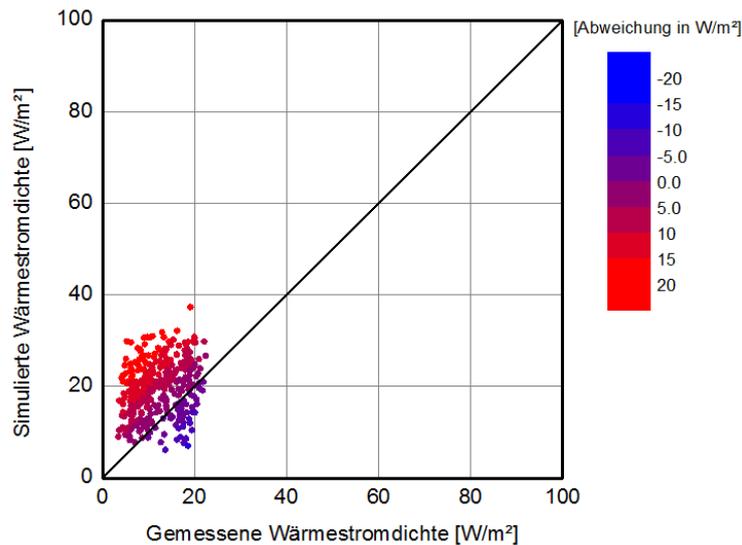


Bild 150:
Vergleich der Wärmestromdichte der Heizfläche im Messraum 2.

Als weiterer Indikator zur Validierung der Wandheizungen und Wandtemperierung wurde die Heizleistung des Heizrohrregisters (Wärmeaufnahme der Wandheizung über dem Heizregister) gewählt, wodurch die Eigenschaft des Heizregisters sowie die Materialeigenschaft der Wandheizung mit berücksichtigt werden. Die Berechnung der Heizleistung ist hauptsächlich von der Vor- und Rücklaufemperatur sowie der Durchflussmenge des Heizkreises abhängig. Bei der Validierung der Heizleistung weist die simulierte Heizleistung große Diskrepanzen (teilweise über 100 %) zu den Messwerten auf. Diese große Diskrepanz zwischen Messungs- und Simulationsergebnissen lässt sich hauptsächlich darauf zurückzuführen, dass das Modell der thermisch aktivierten Bauteilsysteme in TRNSYS nicht hinreichend genau die kurzen An- und Abfahrvorgänge des wassergeführten Heizregisters abbildet. Im Vergleich zu dem realen Wandheizsystem fällt die Temperatur des Heizregisters während der Abfahrvorgänge deutlich schneller ab. Dies geschieht vor allem bei einer niedrigen Außenlufttemperatur, da die thermische Trägheit des wassergeführten Heizregisters in der Simulation nicht berücksichtigt wird. Dieser Sachverhalt erhöht deutlich die Wärmeaufnahme des Wandheizsystems während der anschließenden Anfahrvorgänge. Als weiterer möglicher Grund kommt auch die Beschränkung des Rohrabstands, aufgrund der geringen Überdeckung des Wandheizsystems, in Frage (s. Kap. 5.6.4).

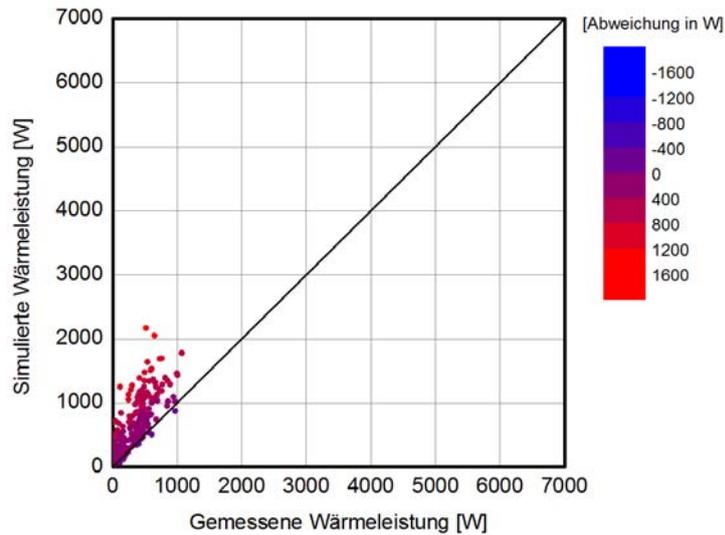


Bild 151:
Vergleich der Wärmeleistung des Heizrohregisters im Messraum 2.

5.6.12 Messraum 3 (Wandtemperierung)

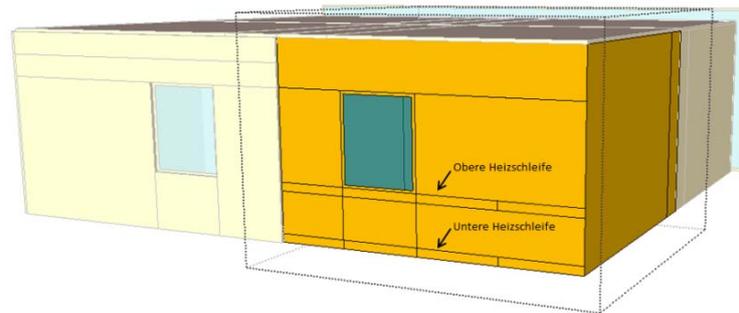


Bild 152:
Wandtemperierungsmodell im Messraum 3.

In Messraum 3 werden die Messwerte der oberen Heizschleife (unter dem Fenster) für die Validierung zugrunde gelegt, da viele Sensorausfälle bei der Messung der Heizschleife im Sockelbereich (untere Heizschleife) aufgetreten sind. Damit ist eine Validierung der Wandtemperierung aufgrund der fehlenden Messwerte bzw. operativen Raumtemperatur, Wärmestromdichte der Wandtemperierung sowie Rücklauftemperatur des Heizkreises nur begrenzt möglich. In den bewertbaren Bereichen liegt die maximale Abweichung der operativen Raumtemperatur bei 0,7 K (siehe Bild 153).

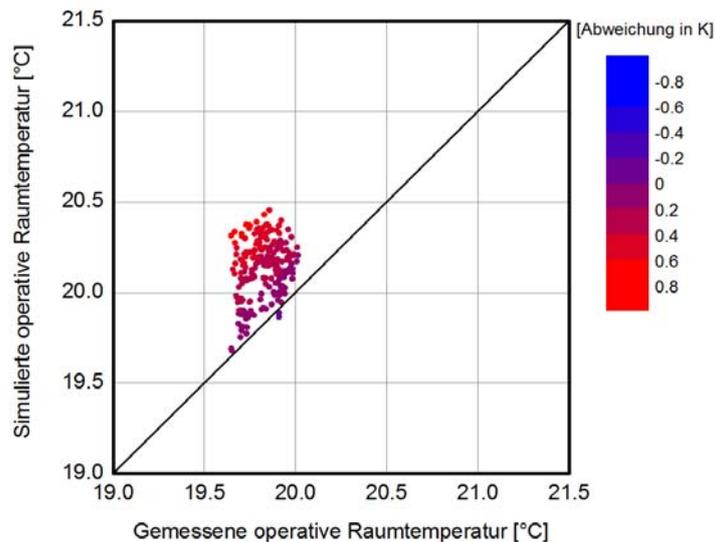


Bild 153:
Vergleich der Oberflächentemperatur der Heizfläche im Messraum 3 (Heizschleife unter dem Fenster).

Im Vergleich zu der operativen Raumtemperatur zeigt der Vergleich der Oberflächentemperatur, Wärmestromdichte sowie Wärmeleistung des Heizrohrregisters größere Abweichungen sowie Streuungen (siehe Bild 154 und Bild 155). Die mittlere Abweichung der Oberflächentemperatur der Heizschleife liegt bei 9,5 K. Dementsprechend liegen die Abweichungen der Wärmestromdichte sowie Wärmeleistung etwa bei 50 %. Es wird angenommen, dass die große Diskrepanz zwischen Messungs- und Simulationsergebnissen darauf zurückzuführen sind, dass die in dem Simulationsmodell definierte wärmeübertragende Fläche der Wandtemperierung deutlich kleiner ist, als die reale Heizfläche der Wandtemperierung (siehe Bild 152). Der Grund liegt darin, dass die Wärmeleitung der definierten Heizschleifenflächen an die in vertikaler Richtung angrenzenden Außenwandflächen aufgrund des eindimensionalen Rechenmodells in TRNSYS nicht berücksichtigt wird. Dadurch wird die Wärmeaufnahme dieser Heizschleifen in der Simulation deutlich größer im Vergleich zu der realen Wandtemperierung. Als weiterer möglicher Grund sind auch die unvollständigen Messwerte für die Lüftungsanlage sowie die Vorlauftemperatur des Heizkreises, die hauptsächlich die Simulationsrandbedingung gestalten, zu nennen. Außerdem kommen messpunktabhängige Abweichungen der Messwerte als weiterer Grund in Frage. Besonders bei der Hochtemperatur-Wandtemperierung sind die Messwerte zum Beispiel für die Oberflächentemperatur sowie die Wärmestromdichte stark von dem Messpunkt abhängig.

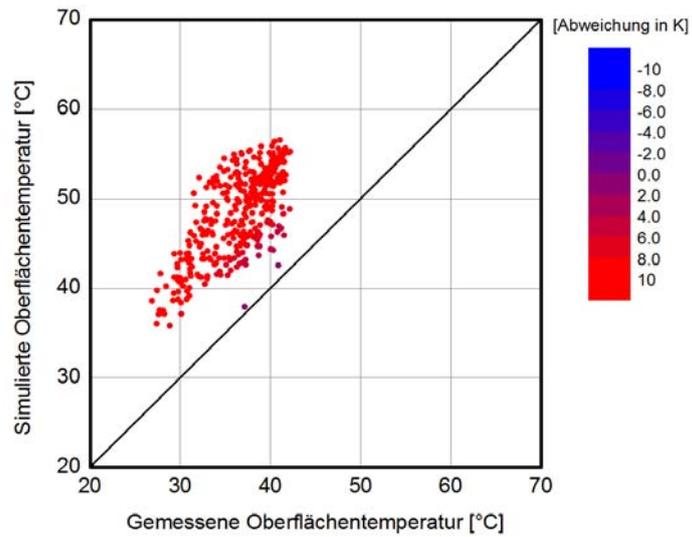


Bild 154:
Vergleich der Oberflächentemperatur der Heizfläche im Messraum 3 (Heizschleife unter dem Fenster).

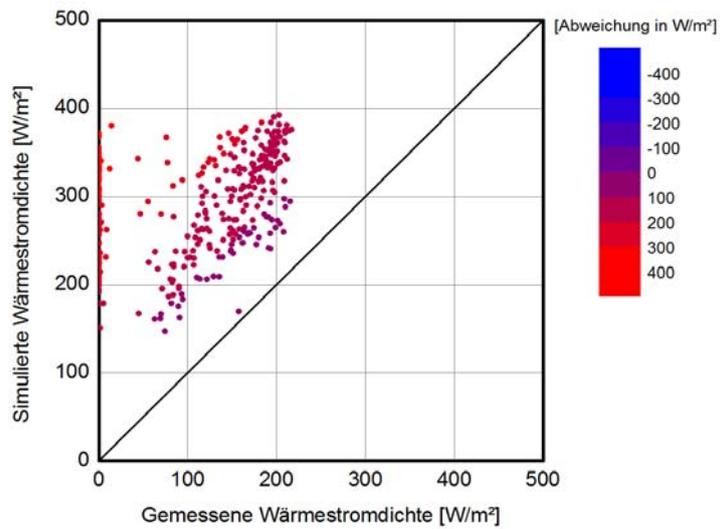


Bild 155:
Vergleich der Wärmestromdichte der Heizfläche im Messraum 3 (Heizschleife unter dem Fenster).

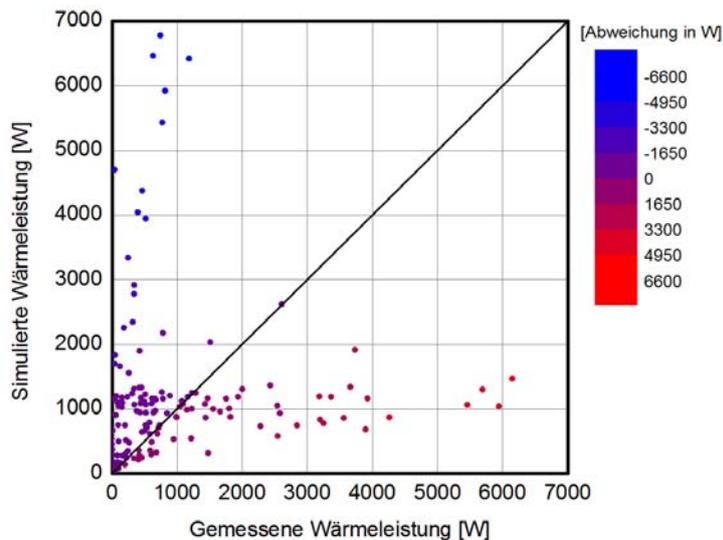


Bild 156:
Vergleich der Wärmeleistung des Heizrohregisters im Messraum 3 (Heizschleife unter dem Fenster).

5.6.13 Messraum 4 (Wandheizung 2)

Grundsätzlich zeigt sich in den Verläufen dieselbe Tendenz wie in Messraum 2 zuvor. Die maximale Abweichung der operativen Raumtemperatur zwischen der Simulation liegt bei 0,7 K (siehe Bild 157). Die operativen Raumtemperaturen der Simulations- und Messergebnisse liegen zwischen 19 °C und 20 °C. Wie bei Messraum 2 stimmt die Amplitude der Temperaturverläufe gut überein (siehe Bild 158). Jedoch ist die simulierte Wärmestromdichte häufig geringer als die gemessene Wärmestromdichte (siehe Bild 159). Die möglichen Gründe der Abweichungen sind in Kap. 5.6.11 erläutert. Bei der Wandheizung 2 ist ebenfalls zu erkennen, dass das Simulationsmodell teilweise eine große Abweichung bei der Wärmeleistung aufweist (siehe Bild 160). Diese Abweichung beeinträchtigt die energetische Bilanzierung der Wandheizsysteme signifikant (s. Kap. 5.5). Daher lässt sich dieses Problem nur lösen, wenn die Wandheizsysteme mit längeren An- und Abfahrvorgängen betrieben werden.

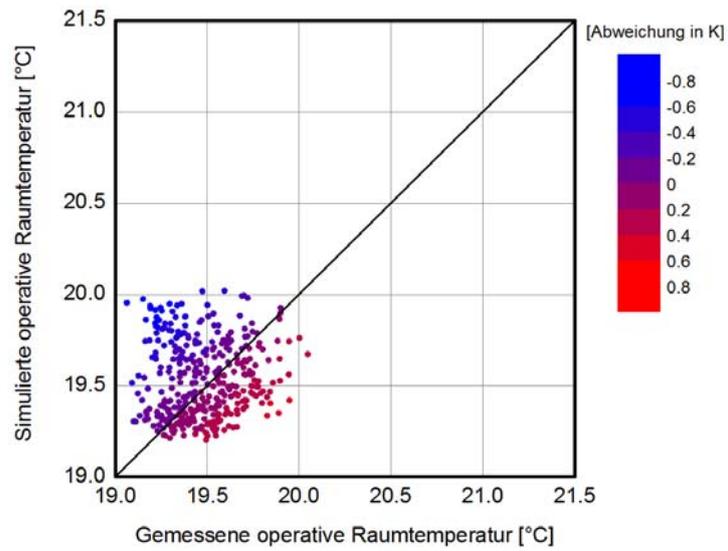


Bild 157:
Vergleich der operativen Raumtemperaturen und Oberflächentemperaturen der Heizfläche im Messraum 4.

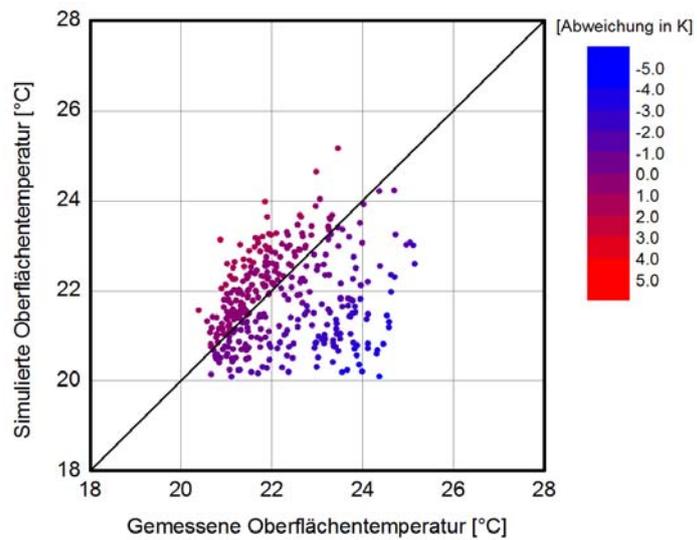


Bild 158:
Vergleich der Oberflächentemperatur der Heizfläche im Messraum 4.

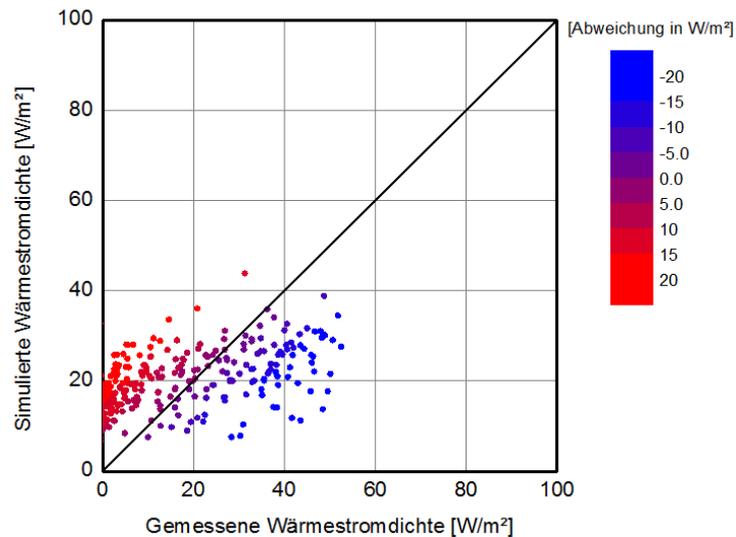


Bild 159:
Vergleich der Wärmestromdichte der Heizfläche im Messraum 4.

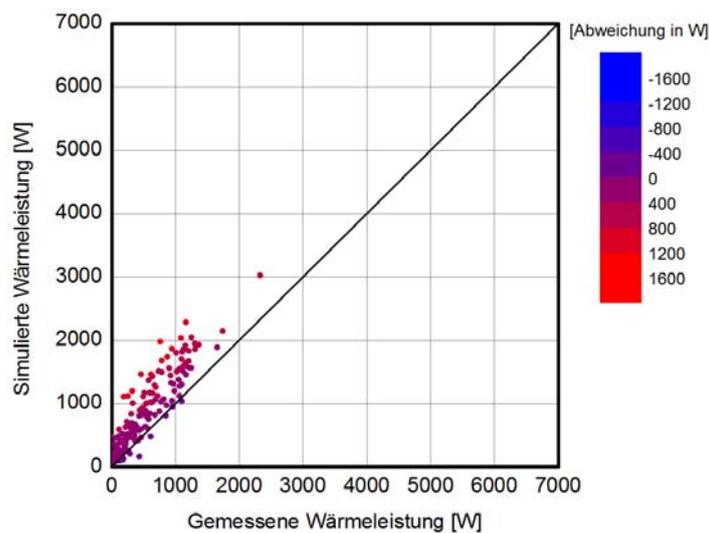


Bild 160:
Vergleich der Wärmeleistung des Heizrohrgitters im Messraum 4.

5.6.14 Zusammenfassung der exergetischen Simulation

Trotz der Einschränkungen des Simulationsmodells stellen die vergleichenden Validierungsergebnisse generell eine zufrieden stellende Übereinstimmung dar. Somit kann dieses Simulationsmodell zur weiteren Systemoptimierung der Wärmeübertragungssysteme herangezogen werden. Um die Einflussgröße der Einschränkungen des Simulationsmodells zu vermeiden, sollen die Randbedingungen der messtechnischen Untersuchung und dem Simulationsuntersuchung im Vorfeld des Projektes aufeinander abgestimmt werden.

5.6.15 Exergetische Bewertung

Eine typische Anwendung der Exergieanalyse stellt die Bewertung von Systemen zur Raumheizung und –klimatisierung von Gebäuden dar, die auf einem Niedertemperaturniveau nahe der Innenraumlufttemperatur arbeiten. Die zentrale Fragestellung bezieht sich auf die ausgewählte Bilanzgrenze, die die exergetische Bewertung maßgeblich beeinflusst. In dieser Arbeit werden die Innenseite der Gebäudehülle in den Messräumen 2, 3, 4, und die Oberfläche des Strahlungsheizkörpers zum Messraum 1 als Bilanzgrenze festgelegt. Der zu bilanzierende Exergiestrom ergibt sich aus der Exergie des Heizwärmestroms über das Heizrohrregister. In der Berechnung der Exergieströme über das Heizrohrregister fließt die logarithmische Mitteltemperatur (Systemtemperatur) zwischen dem Heizungsvor- und Rücklauftemperatur, sowie Oberflächentemperatur der Heizfläche mit ein, wobei die Raumlufttemperatur als Referenztemperatur betrachtet wird. Die Berechnung der Exergie erfolgt mit folgenden Gleichungen (4), (5) und (6) wobei die für die Berechnung erforderlichen Temperaturen und Wärmemengen den Simulationsergebnissen (s. Kap. 5.6.8) entnommen werden.

$$\dot{Q} = \dot{m}c_p(\vartheta_v - \vartheta_r) \quad (4)$$

$$\dot{E} = \left(1 - \frac{\vartheta_a}{\vartheta_v - \vartheta_r} \times \left(\ln \frac{\vartheta_v}{\vartheta_r} \right) \right) \times Q \quad (5)$$

$$\dot{E} = \left(1 - \frac{\vartheta_a}{\vartheta_{log}} \right) \times Q \quad (6)$$

- \dot{Q} : Wärmestrom [W]
- \dot{E} : Exergiestrom über das Heizrohrregister [W]
- ϑ_a : Raumlufttemperatur [°C]
- ϑ_v : Vorlauftemperatur [°C]
- ϑ_r : Rücklauftemperatur [°C]
- ϑ_{log} : Logarithmische Mitteltemperatur [°C]
- \dot{m} : Durchflussmenge [kg/h]
- c_p : Spezifische Wärmekapazität von Wasser [kJ/(kgK)]

In Bild 161 und Bild 162 sind die Exergieströme sowie die Wärmeströme der vier zu untersuchenden Wärmeübergabesysteme über das Heizrohrregister gegenübergestellt. Zu erkennen ist, dass je geringer die Differenz zwischen dieser Mitteltemperatur und der Referenztemperatur (Raumlufttemperatur), desto kleiner ist die mit dem Heizwärmestrom verbundene erforderliche Exergiemenge des betrachteten Systems. In Bild 161 ist zu erkennen, dass die Wandtemperierung im Messraum 3 im Vergleich zu anderen Wärmeübergabesystemen mit einer höheren Mitteltemperatur betrieben wird. Demzufolge hat diese den größten Exergiebedarf (siehe Bild 162) und ist damit als exergetisch ungünstiger zu bewerten als die beiden untersuchten Wandheizsysteme und die Strahlungsheizung.

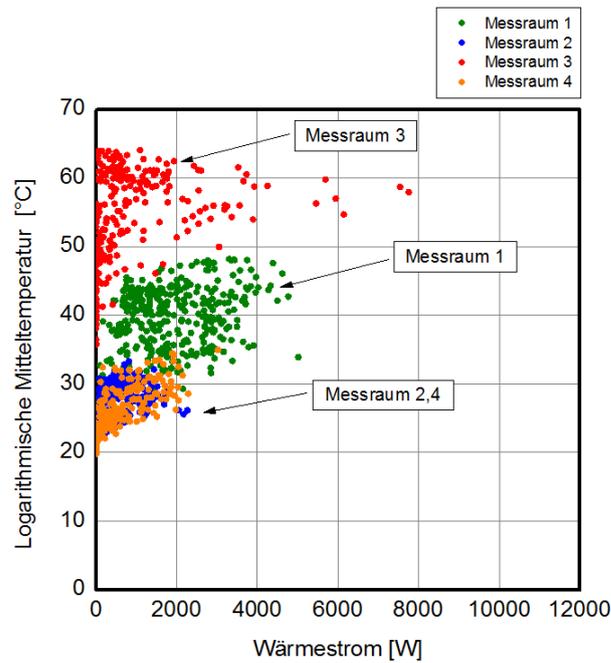


Bild 161:
Vergleich der logarithmischen Mitteltemperaturen und Wärmeströme der vier Wärmeübergabesysteme.

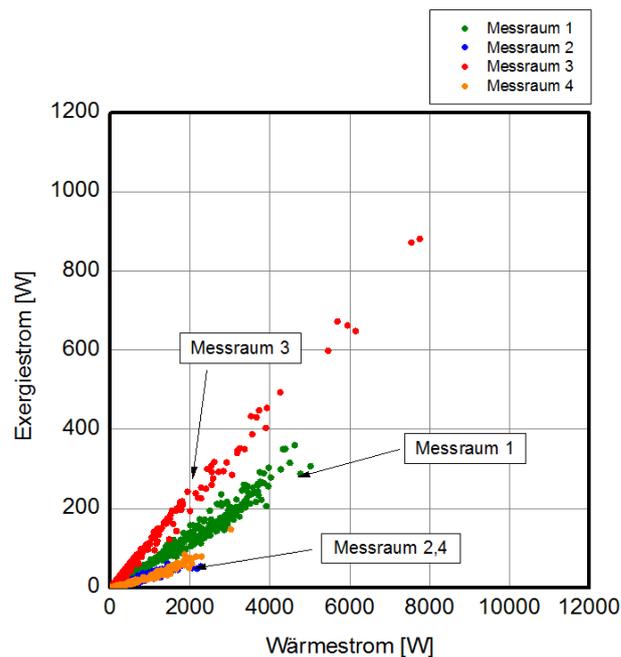


Bild 162:
Vergleich der Exergieströme und Wärmeströme der vier Wärmeübergabesystemen.

Diese Abhängigkeit der Exergie des Heizwärmestroms von der logarithmischen Mitteltemperatur (Systemtemperatur) führt dazu, dass bei den Wandheizungen mit niedriger Systemtemperatur eine geringere Menge an Exergie zur Aufrecht-

erhaltung der Raumtemperatur aufgewendet wird als bei der Strahlungsheizung und der Wandtemperierung. Daraus resultieren niedrige mittlere Carnot-Faktoren der Wandheizung 1 in Messraum 2 und Wandheizung 2 in Messraum 4 mit Werten von 0,025 bzw. 0,024, wobei der Carnot-Faktor das Verhältnis von Exergie zur Energie des erzeugten Wärmestroms darstellt. Der mittlere Carnot-Faktor der Strahlungsheizung in Messraum 1 ist mit einem Wert von 0,06 um den Faktor 2,4 größer im Vergleich zu den Wandheizungen. Den größten Wert des mittleren Carnot-Faktors besitzt die Wandtemperierung mit 0,11.

5.6.16 Zusammenfassung exergetische Untersuchungen

Die exergetische Bewertung ermöglicht eine Vergleichbarkeit von den unterschiedlichen Wärmeübergabesystemen in Hinblick auf die Exergieeffizienz. Hierbei lässt sich feststellen, dass die Wandheizungen 1 und 2 aus exergetischer Sicht wesentlich effizienter sind als die Strahlungsheizung und die Wandtemperierung. Jedoch erschließt die Verwendung eines effizienten Wärmeübergabesystems nur einen begrenzten Teil der exergetischen Optimierung. Vielmehr muss die gesamte Kette des Wärmeerzeugungssystems sowie der Wärmeverteilung in die Überlegung mit einbezogen werden. Hierbei stellt die Nutzung der Wärmepumpe zur Deckung des niedrigexergetischen Heizbedarfs im Gebäude eine optimale und effiziente Lösung dar, da diese Wärmeerzeugungssysteme in der Regel auf niedrigem Temperaturniveau und mit hohen Leistungszahlen arbeiten.

5.7 Untersuchung der thermischen Behaglichkeit

Im Rahmen des Forschungsvorhabens ist ein zentraler Aspekt die Frage nach den Komfortwirkungen der Wandheizungen und des strahlungsoptimierten Heizkörpers im Vergleich zur herkömmlichen, konvektiven Heizung. Dabei steht insbesondere die Homogenität der Temperaturverteilung horizontal wie auch vertikal im Vordergrund, wie auch der Predicted Mean Vote (PMV), der die Einschätzung der Nutzer zum Komfort beschreibt.

5.7.1 Entwicklung des Messkonzeptes

Für das Messkonzept zur Untersuchung der thermischen Behaglichkeit in den Messräumen wird das in ISO 7730 geregelte Konzept der Predicted Mean Vote (PMV) und des daraus direkt ermittelbaren Predicted Percentage of Dissatisfied (PPD) nach Fanger zugrunde gelegt [61].

Die Ermittlung der PMV bietet sich für eine solche Untersuchung an, da sie allgemein anerkannt und normativ geregelt ist. Außerdem fließen in die PMV neben der Lufttemperatur auch die Strahlungstemperatur, Luftgeschwindigkeit und relative Feuchte ein. Insbesondere der Strahlungstemperatur kommt bei dem Vergleich der Wandheizsysteme mit konventionellen Systemen eine wichtige Rolle zu, da im Strahlungsaustausch ein wesentliches Unterscheidungsmerkmal erwartet wird.

Neben den oben genannten Größen haben die Aktivität (siehe Tabelle 36) und die Bekleidung (Tabelle 37) der Nutzer einen Einfluss auf deren thermische Behaglichkeit, die entsprechend Tabelle 38 eingeschätzt werden kann.

Tabelle 36:
Stoffwechselraten für unterschiedliche typische Aktivitäten nach [61]

Aktivität	Energieumsatz	
	W/m ²	Met
Schlafen	40	0,7
Sitzen, entspannt	58	1,0
Stehen, entspannt	70	1,2
Sitzende Tätigkeit	70	1,2
Stehende, leichte Tätigkeit	93	1,6
Stehende, mittelschwere Tätigkeit	116	2,0
Gehen mit 2 km/h	110	1,9
Wohnung putzen	115 bis 200	2,0 bis 3,4

Tabelle 37:
Thermische Isolationswerte für typische Bekleidungskombinationen nach [61]

Arbeitsbekleidung	I_{cl}		Tägliche Kleidung	I_{cl}	
	clo	$m^2 \cdot K/W$		clo	$m^2 \cdot K/W$
Unterhose, Latzhose, Socken, Schuhe	0,70	0,110	Slip, T-Shirt, Shorts, leichte Socken, Sandalen	0,30	0,050
Unterhose, Hemd, Latzhose, Socken, Schuhe	0,80	0,125	Unterhose, Hemd mit kurzen Ärmeln, leichte Hose, leichte Socken, Schuhe	0,50	0,080
Unterhose, Hemd, Hose, Arbeitskittel, Socken, Schuhe	0,90	0,140	Slip, Petticoat, Strümpfe, Kleid, Schuhe	0,70	0,105
Unterwäsche mit kurzen Ärmeln und Beinen, Hemd, Hose, Jacke, Socken, Schuhe	1,00	0,155	Unterwäsche, Hemd, Hose, Socken, Schuhe	0,70	0,110
Unterwäsche mit langen Beinen und Ärmeln, Thermojacke, Socken, Schuhe	1,20	0,185	Slip, Hemd, Hose, Jacke, Socken, Schuhe	1,00	0,155
Unterwäsche mit kurzen Ärmeln und Beinen, Hemd, Hose, Jacke, schwere Steppjacke und Overalls, Socken, Schuhe, Mütze, Handschuhe	1,40	0,220	Slip, Strümpfe, Bluse, langer Rock, Jacke, Schuhe	1,10	0,170
Unterwäsche mit kurzen Ärmeln und Beinen, Hemd, Hose, Jacke, schwere Steppjacke und Overall, Socken, Schuhe	2,00	0,310	Unterwäsche mit langen Ärmeln und Beinen, Hemd, Hose, Pullover mit V-Ausschnitt, Jacke, Socken, Schuhe	1,30	0,200
Unterwäsche mit langen Ärmeln und Beinen, Thermojacke und Hose, Parka mit schwerer Steppung, Overall mit schwerer Steppung, Socken, Schuhe, Mütze, Handschuhe	2,55	0,395	Unterwäsche mit kurzen Ärmeln und Beinen, Hemd, Hose, Weste, Jacke, Mantel, Socken, Schuhe	1,50	0,230

Tabelle 38:
Kategorien des Umgebungsklimas nach DIN EN ISO 7730.

Kategorie	PPD	PMV	Prozentsatz an Unzufriedenen aufgrund von			
			Zugluft	Vertikaler Lufttemperaturunterschied	Warmer oder kalter Fußboden	asymmetrische Strahlung
	in %		in %	in %	in %	in %
A	< 6	- 0,2 < PMV < + 0,2	< 10	< 3	< 10	< 5
B	< 10	- 0,5 < PMV < + 0,5	< 20	< 5	< 10	< 5
C	< 15	- 0,7 < PMV < + 0,7	< 30	< 10	< 15	< 10

Als Alternative zur relativ aufwändigen Bestimmung des PMV über die Einzelnen Einflussgrößen, kann die Äquivalenttemperatur der Räume mithilfe eines Klimasummen- Messgeräts aufgenommen werden. Die Äquivalenttemperatur integriert mehrere für das thermische Empfinden wesentliche physikalische Größen, in der Regel Lufttemperatur, Luftgeschwindigkeit und Strahlung, da die Vielzahl der Kombinationen dieser Einflussgrößen eine Vergleichbarkeit unterschiedlicher thermischer Umgebungen schwierig macht. Der Begriff der Äquivalenttemperatur als Klimasummenmaß und die Bedeutung für die Messungen (hier: in Kraftfahrzeugen) wird ausführlich in der [62] beschrieben. Sie ist dort folgendermaßen definiert: „Die Äquivalenttemperatur ist die homogene Temperatur des gedachten Raumes mit einer Luftgeschwindigkeit gleich Null, in dem eine Person die gleiche trockene Wärme durch Strahlung und Konvektion abgibt wie in der tatsächlichen Umgebung ohne einheitliche Bedingungen“.

Zur näheren Betrachtung des Strahlungseinflusses der untersuchten Heizsysteme auf die thermische Behaglichkeit im Raum, kann die Strahlungstemperatur separat mit einem Strahlungstemperatur-Messgerät oder über die Oberflächentemperaturen der Raumumschließungsflächen gemessen werden.

Zur Bestimmung der einzelnen Messgrößen wurden folgende Sensoren ausgewählt.

Tabelle 39:
Untersuchte Messgrößen und festgelegte Sensoren.

Messgröße übergeordnet	Messgröße	Sensor
PMV	Lufttemperatur	Strahlungsgeschützter PT100 Sensor
	Luftgeschwindigkeit	
	Mittlere Strahlungstemperatur	Anemometer
	Relative Feuchte	kapazitiver Feuchtefühler
Äquivalenttemperatur	Äquivalenttemperatur	Globe-Thermometer RST-Meter
Strahlungstemperatur	Flächenstrahlungstemperatur	Flächenstrahlungssensor
	Oberflächentemperatur	PT100

Da es nicht wirtschaftlich wäre, alle Messgrößen an allen mögliche Stellen im Raum zur gleichen Zeit aufzunehmen, werden 2 Arten der Messung beschrieben:

- Langzeitmessung
- Punktuelle Messung

Die Langzeitmessungen sollen über einen mindestens 24-stündigen Zeitraum durchgeführt werden. Dadurch können das Regelverhalten der Heizsysteme und die Veränderung der Messgrößen über den Tagesverlauf mit aufgenommen werden. Die Sensoren werden dazu auf einer festgelegten Stelle aufgebaut und während der Messung nicht bewegt.

Mit den punktuellen Messungen soll die Verteilung der Messgrößen im Raum aufgezeichnet werden. Diese Verteilung ist als eine Momentaufnahme zu verstehen, zu der an mehreren Stellen möglichst zeitgleich gemessen werden soll. Diese Messungen sollten eine Messdauer von 2 Stunden nicht überschreiten, da sonst etwaige Veränderungen des Außen- und Innenklimas mit aufgenommen werden. Um an möglichst vielen Stellen innerhalb von 2 Stunden messen zu können, ohne unnötig viele Sensoren zu verwenden, wird ein Stativ benutzt, das innerhalb des Messzeitraums versetzt wird. Durch die begrenzte Verweildauer an jedem Punkt, muss die Reaktionszeit der Sensoren schnell sein.

Die Messgrößen Lufttemperatur, Luftgeschwindigkeit und relative Feuchte eignen sich gut für eine Verteilungsmessung mit Stativ. Um die Auswertbarkeit und die Übersichtlichkeit der Messwerte zu optimieren, werden für die Verteilungsmessungen lediglich die Lufttemperaturen und Luftgeschwindigkeiten erfasst. Für die Strahlungstemperatur wird eine eigene Verteilungsmessung durchgeführt, da nur ein Sensor für die Messungen verfügbar ist.

Unabhängig von der Messdauer, ist es bei Behaglichkeitsmessungen grundsätzlich sinnvoll, verschiedene Messhöhen zu beobachten. Entsprechend [27] werden folgende Höhen verwendet.

Tabelle 40:
Empfohlene Messhöhen nach [27]

Anordnung der Messwertaufnehmer	Empfohlene Höhe (Anhaltswerte)	
	Sitzend	Stehend
Kopfhöhe	1,1 m	1,7 m
Unterleibshöhe	0,6 m	1,1 m
Knöchelhöhe	0,1 m	0,1 m

Für die Durchführung der Messungen wird daher folgende Einteilung getroffen.

Tabelle 41:
Einteilung der Messgrößen nach Messdauer und Messhöhe.

Messdauer	Messwert	Sensor	Messhöhe
Langzeit	PMV	PT100 (strahlungsgeschützt)	170 cm
		Globe-Thermometer	
		Anemometer	
		Feuchtesensor	
	Äquivalenttemperatur	RST-Meter	170 cm 110 cm 60 cm 10 cm
Lufttemperatur	PT100 (strahlungsgeschützt)		
Luftgeschwindigkeit	Anemometer		
punktuell 1	Lufttemperatur	PT100 (strahlungsgeschützt)	170 cm 110 cm 60 cm 10 cm
	Luftgeschwindigkeit	Anemometer	
punktuell 2	Strahlungstemperatur	Flächenstrahlungssensor	170 cm 110 cm

Die Anordnung dieser Sensoren ist in Bild 163, am Beispiel von Messraum 1, grafisch dargestellt.

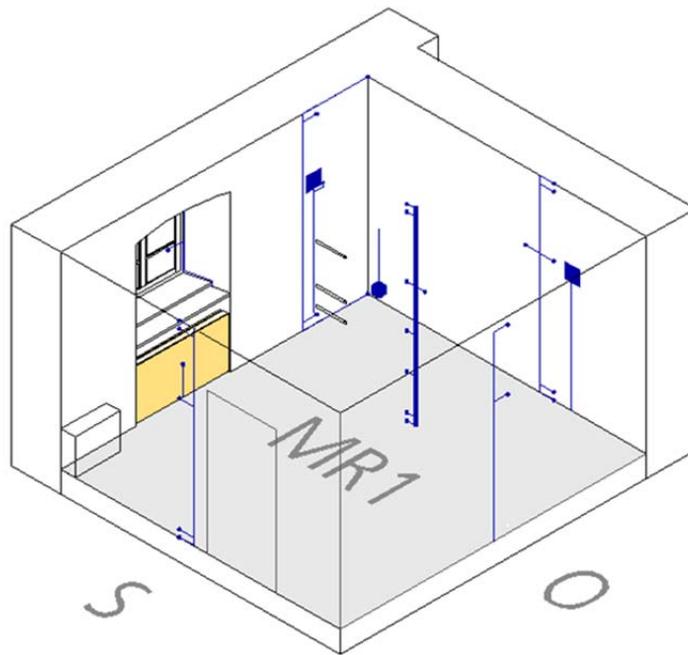


Bild 163:
Darstellung von Messraum 1 mit dem festinstallierten Messbaum ca. in Raummitte und den an den Wänden angebrachten Sensoren.

Wie in Bild 163 zu sehen, sind in Messraum 1 und analog dazu in allen Messräumen Oberflächentemperatur-Sensoren an verschiedenen Positionen angebracht:

- In der Ecke zur Decke
- 10 cm unterhalb der Decke
- 170 cm über dem Boden
- 10 cm über dem Boden
- In der Ecke zum Boden

Zusätzlich ist in Raummitte in jedem Messraum ein Stativ mit PT100-Sensoren (nicht strahlungsgeschützt) in den Höhen 255 cm, 170 cm, 110 cm, 60 cm und 10 cm verbaut. Alle fest installierten Messgeräte sind über das Internet-Messdaten-Erfassungs- und Auswertungssystem IMEDAS vernetzt und ablesbar.

Nomenklatur der Messpunkte

Um in den verschiedenen Räumen vergleichbare Ergebnisse zu bekommen, muss die Lage des jeweiligen Messpunktes in jedem Raum möglichst ähnlich sein. Dafür wurde ein Messraster verwendet, welches auf alle Räume übertragbar ist.

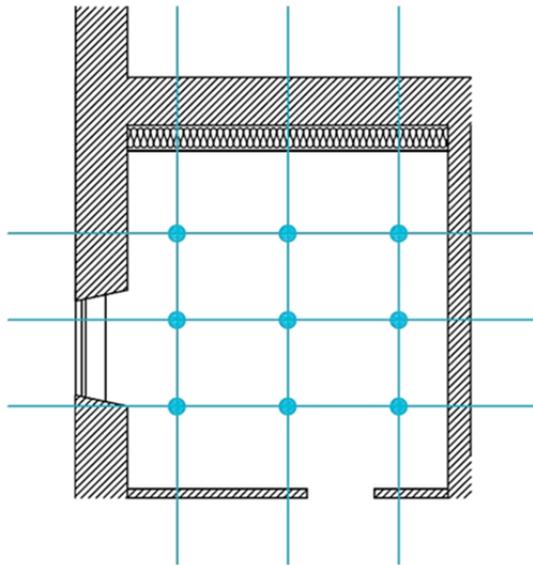


Bild 164:
Messraster Verteilungsmessung.

Für die Messung der Raumverteilung wurde ein Aufenthaltsbereich definiert, der bis 50 cm zur Außenwand und 100 cm zu den vom Fenster aus gesehenen seitlichen Wänden reicht.

An jedem Punkt wurde für die Verteilungsmessung 15 min lang gemessen. Um lediglich eine Momentaufnahme ohne Tagesgang in dem jeweiligen Messraum aufzuzeichnen, wurde die Anzahl der Messpunkte auf 9 begrenzt, was zu obigem Raster führte. Die gesamte Messdauer betrug dadurch ca. 2 Stunden.

Um die einzelnen Messpunkte zu erfassen, muss der Messbaum von Hand versetzt werden. Dadurch entsteht eine gewisse Störung des sich im Raum einstellenden stationären Zustandes. Um diese Störung aus den Messergebnissen herauszufiltern, wurden die Messergebnisse von probehaften Langzeitmessungen untersucht. Mit dem Ergebnis, dass sich in den untersuchten Räumen in Benediktbeuern bereits nach ca. 5 Minuten die Werte angleichen und als konstant betrachtet werden können. Daher wird von jedem Messintervall ausschließlich die zweite Hälfte der Ergebnisse verwendet und daraus Mittelwert und Standardabweichung ermittelt. Somit gehen die ersten 50 % der Werte, also ca. bis zur 8. Minute nicht mit in die Ergebnisse ein.

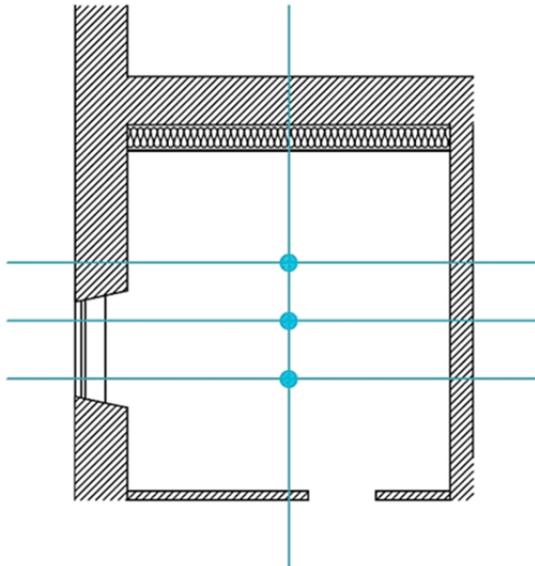


Bild 165:
Messrastrer Langzeitmessung.

Für die Langzeitmessungen wurde die Anzahl der Messpunkte aus zeitlichen Gründen auf 3 beschränkt. Die Punkte sind so orientiert, dass sowohl die Raummitte erfasst wird, als auch die Positionen direkt vor und neben dem Fenster. Die Lage der raumhalbierenden Achse parallel zur Außenwand stellt sicher, dass alle raumumschließenden Flächen in etwa im gleichen Abstand zu den Messpunkten liegen.

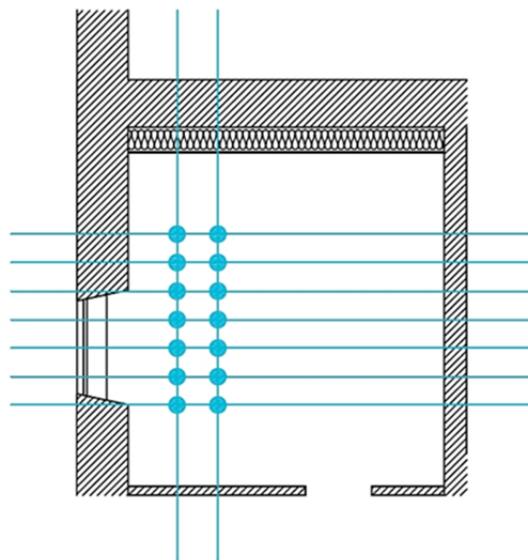


Bild 166:
Messrastrer Strahlungstemperatur.

Das verwendete Strahlungstemperatur-Messgerät hat eine schnelle Ansprechzeit von etwa 2 Minuten. Dadurch ist eine größere Anzahl an Messpunkten

möglich, um eine Verteilung aufzunehmen. Bei einer gesamten Messdauer von 30 Minuten sind somit 14 Messpunkte möglich.

Um eine eventuelle Veränderung der Strahlungstemperatur mit zunehmendem Abstand zur Außenwand ermitteln zu können, wurden 2 Achsen im Abstand 50 cm und 100 cm parallel zur Außenwand gewählt.

Bei der Beschriftung der Messachsen wurde die punktsymmetrische Anordnung der Messräume beachtet.

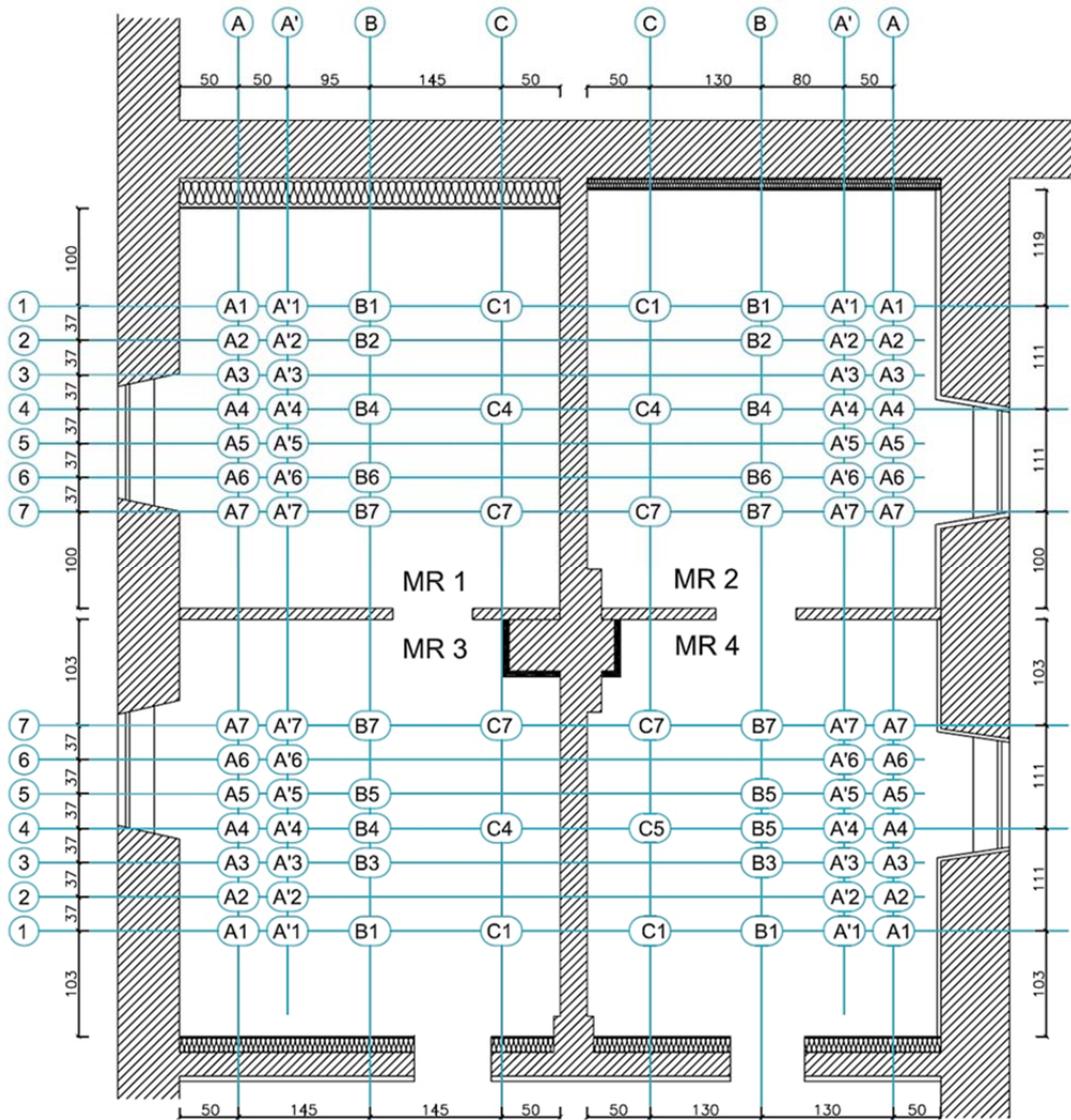


Bild 167:
Darstellung aller Messpunkte.

5.7.2 Spezifische Sensorik für die Messungen zur thermischen Behaglichkeit

Für die Behaglichkeitsmessungen werden neben den bereits beschriebenen Sensoren noch zusätzliche Messinstrumente benötigt, die folgend aufgelistet sind.

Anemometer



Bild 168:
Thermoelektrischer Strömungssensor bzw. Anemometer [28] .

Das für die Messung der Luftgeschwindigkeiten im Raum verwendete Anemometer ist ein Thermoelektrischer Strömungssensor, der aus einem Sondenrohr mit beheizten Miniaturthermistoren und einem Präzisions-NTC-Widerstand zur automatischen Kompensation aufgebaut ist. Der Sensor ist als richtungsunabhängige Kugelspitze ausgeführt und von einem Schutzkorb umgeben.

Hersteller: Ahlborn
Bezeichnung: FVA 605 TA1(O)
Auflösung: 0,001 m/s

Messgenauigkeit (laut Herstellerangabe) [Ahlborn-3]:
 $\pm 1,0$ % vom Endwert und $\pm 1,5$ % vom Messwert, bei 22 °C

RST-Meter

Das in dieser Arbeit verwendete RST-Meter misst die resultierende Oberflächentemperatur auf einer künstlichen, beheizten Haut (Resultant Surface Temperature) und wurde entwickelt, um den thermischen Komfort beurteilen zu können.

Das RST-Meter, dessen Oberfläche durch einen definierten Wärmestrom beheizt wird, gibt Wärme an die Umgebung des untersuchten Raumes ab. Aus der resultierenden Oberflächentemperatur auf dem RST-Meter wird dann die Äquivalenttemperatur ermittelt. Aufgrund der Geometrie des Messgerätes – einer flachen Heizplatte – spricht man von einer gerichteten Äquivalenttemperatur. Diese definiert sich als „gleichförmige Temperatur eines gedachten umschlossenen Raumes mit gleicher Temperatur von Luft und umgebenden Oberflächen sowie mit einer Luftgeschwindigkeit von null, in dem eine kleine, flache, beheizte Oberfläche die gleiche trockene Wärme durch Strahlung und Konvektion abgibt wie in der tatsächlichen nicht gleichförmigen Umgebung.“ [62]

Das in der vorliegenden Arbeit gewählte Messgerät ist das von Mayer und Schwab entwickelte RST-Meter [17]. Das RST-Meter misst die resultierende Oberflächentemperatur einer künstlichen, beheizten Haut. Die Wärmeabgabe erfolgt nur über Konvektion und Strahlung. Schwitzen wird dabei nicht berücksichtigt, weil sonst die Wärmeabgabe durch Verdunstung miteinbezogen werden müsste.

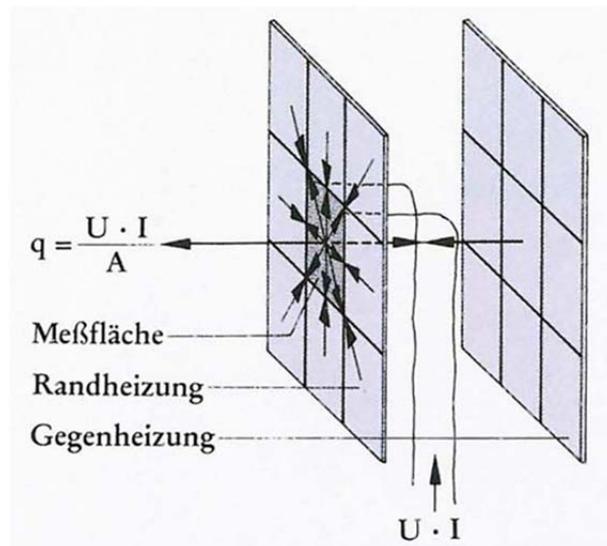


Bild 169:
Aufbau des RST-Meter-Fühlers.

„Unter RST ist hier diejenige Temperatur zu verstehen, die sich auf der Oberfläche einer mit einer konstanten elektrischen Leistung beheizten Scheibe mit Emissivität $\epsilon \sim 1$ einstellt. Die Scheibenoberfläche soll die Hautoberfläche simulieren. Die elektrische Heizleistung kann entsprechend einem bestimmten Tätigkeitsgrad [...] vorgegeben werden. Die eigentliche Messfläche des RST-Meters befindet sich in der Mitte der in Bild 169 erkennbaren neun Quadrate. Die um die Messfläche und dahinter angeordneten Rand- und Gegenheizflächen gewährleisten einen definierten Wärmestrom senkrecht zur Oberfläche“ [Mayer 1983], der eigentlichen Messfläche.

Der Wärmeverlust des Menschen bei thermischem Komfort wird im Wesentlichen durch Konvektion und Wärmestrahlung beeinflusst und lässt sich unter Vernachlässigung von Wärmeleitung und Schwitzen vereinfacht in folgender Wärmebilanzgleichung formulieren, wobei 85 W/m^2 der eingestellten Wärmestromdichte des Sensors entsprechen [17].

$$q = \alpha_K(RST - t_L) + C \times \left[\left(\frac{RST + 273,2}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_{HR} + 273,2}{100} \right)^4 \right]$$

Mit

q Wärmestromdichte = 85 W/m²

α_K konvektiver Wärmeübergangskoeffizient in W/(m²K)

RST resultierende Oberflächentemperatur des mit 85 W/m² beheizten Körpers in °C

t_L Lufttemperatur in °C

C $\varepsilon_{RST} \times \varepsilon_{UF} \times C_S = \text{Strahlungskoeffizient} = 4,9 \text{ W/(m}^2\text{K}^4)$
(gemessen für typische, nichtreflektierende Oberflächen)

ε_{RST} Emissionsverhältnis des RST-Meters, hier 0,9

ε_{UF} Emissionsverhältnis des Halbraums, mit dem sich das RST-Meter im Strahlungsaustausch befindet

C_S Strahlungskoeffizient des schwarzen Körpers = 5,67 W/(m²K⁴)

t_{HR} mittlere Strahlungstemperatur des Halbraums in °C

Der Umrechnungsfaktor von gemessener Oberflächentemperatur (RST) zu Äquivalenttemperatur wird durch eine zuvor durchgeführte Kalibriermessung festgelegt.

Bezeichnung: RST-Meter

Messgenauigkeit (laut Schwab):
±1,0 °C

Flächenstrahlungssensor

Ein Flächenstrahlungssensor misst die Strahlungstemperatur an einer bestimmten Stelle im Raum mit einer bestimmten Ausrichtung. Dabei wird nicht nur der Einfluss der Wand bzw. Wandheizung gemessen, sondern der Einfluss aller sich im Messfeld des Messinstrumentes befindlichen Oberflächen. Dadurch entsteht ohne eine aufwändige Berechnung der Winkelbeziehungen der einzelnen Flächen eine Aussage über den relativen Einfluss der Oberflächentemperatur, zum Beispiel einer Wandheizung auf die Strahlungstemperatur an einem bestimmten Punkt.

Das Messfeld des Messgerätes sind zwei Halbräume. Je näher das Messgerät zum Beispiel an der Wand aufgestellt wird, desto größer wird der Einfluss dieser Wand. Ebenso steigt der Einfluss von Decke, Boden, Fenster und benachbarten Wänden mit zunehmender Entfernung von der Wand.

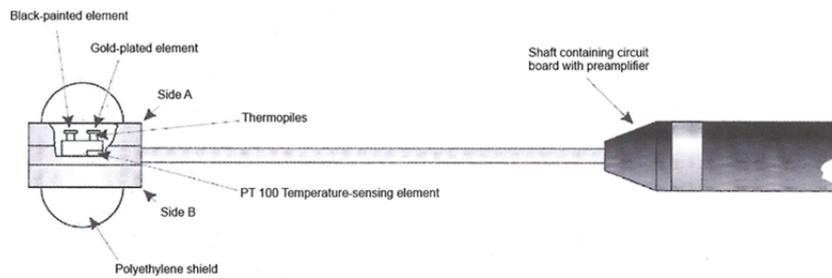


Bild 170:
Schematischer Aufbau des Strahlungstemperatur-Sensors zur Erfassung der Halbraum-Strahlungstemperaturen [LumaSense Technologies].

Hersteller: LumaSense Technologies

Bezeichnung: INNOVA MM0036

Messgenauigkeit (laut Herstellerangabe) [LumaSense Technologies]:

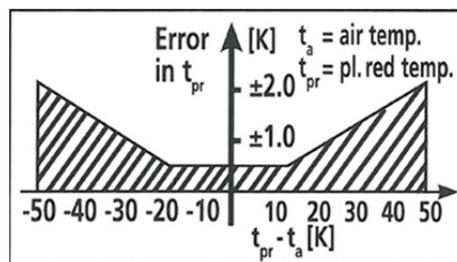


Bild 171:
Messgenauigkeit des Flächenstrahlungsmessgerätes INNOVA MM0036.

5.7.3 Ergebnisse

Der Vergleich der Heizsysteme erfolgt anhand verschiedener Beurteilungskriterien. Verglichen werden die 4 Heizsysteme in den 4 verschiedenen Messräumen gegenüber einem herkömmlichen elektrischen Heizkörper.

Tabelle 42:
Übersicht der untersuchten Heizsysteme und Messräume.

Heizsystem 1	Heizsystem 2	Messraum
Strahlungsheizkörper (SHK)	Elektrischer Heizkörper	1
Wandheizung 1 (WH1)	Elektrischer Heizkörper	2
Wandtemperierung (WT)	Elektrischer Heizkörper	3
Wandheizung 2 (WH2)	Elektrischer Heizkörper	4

PMV und PPD

Zur Berechnung der vorausgesagten durchschnittlichen Bewertung (PMV) sind zwei Eingangsgrößen zu definieren. Bekleidung und Aktivität werden hier für eine Nutzung des Raumes im Winter als Museum betrachtet. Dazu könnten Besucher entspannt im Raum stehen und Innenraum-Winterbekleidung tragen. Nach [18] folgen daraus:

- Met = 1,2
- Clo = 1,0

Unter diesen Bedingungen ergeben sich für die Messpunkte B6 (Achse Fenster FE) und B2 (Achse Außenwand AW) in 170 cm Höhe in Messraum 1 und der Berechnung nach DIN EN 7730 folgende Komfortkenngrößen:

Tabelle 43:

Auflistung der einzelnen Messgrößen und der daraus abgeleiteten Werte für PMV und PPD des Strahlungsheizkörpers zu der Referenzmessung des elektrischen Heizkörpers.

MR1 170cm		Strahlungsheizkörper (SHK)		elektrischer Heizkörper (eHK)		Δ (SHK - eHK)	
		FE	AW	FE	AW	FE	AW
TL	°C	20,0	19,9	20,2	20,4	-0,2	-0,5
TR	°C	20,2	20,0	20,1	20,1	0,1	-0,1
TO	°C	20,1	20,0	20,2	20,3	-0,1	-0,3
vL	m/s	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
RH	%	29,5	45,4	28,3	31,1	1,1	14,3
PMV		-0,4	-0,3	-0,4	-0,3	0,0	0,0
PPD	%	8,3	6,9	8,3	6,9	0,0	0,0

PMV Vorausgesagte durchschnittliche Bewertung
(Predicted mean vote)

PPD Vorausgesagter Prozentsatz an Unzufriedenen
(Predicted percentage of dissatisfied) in %

MR1 Messraum 1

170 cm Messhöhe 170 cm

FE Messstelle in Achse Fenster (B6)

AW Messstelle in Achse Außenwand (B2)

Δ	Differenz (Strahlungsheizkörper – elektrischer Heizkörper)
TL	Lufttemperatur in °C
TR	mittlere Strahlungstemperatur in °C
TO	Operativtemperatur in °C
vL	Luftgeschwindigkeit in m/s
RH	relative Raumlufftfeuchte in %

Es wurden die Unterschiede für die Fensterachse (B6) und die Achse neben dem Fenster (B2) betrachtet. Für die übrigen Messräume wurde in gleicher Weise vorgegangen. An dieser Stelle wird nur eine Zusammenstellung der Unterschiede der einzelnen Heizsysteme zu den elektrischen Referenzmessungen abgebildet.

Tabelle 44:
Zusammenstellung der Unterschiede von PMV und PPD der untersuchten Heizsysteme zu den Referenzmessungen der elektrischen Heizkörper.

170 cm		Strahlungsheizkörper		Wandheizung 1		Wandtemperierung		Wandheizung 2	
		Δ FE	Δ AW	Δ FE	Δ AW	Δ FE	Δ AW	Δ FE	Δ AW
TL	°C	-0,2	-0,5	-0,2	-0,3	-0,4	-0,8	-0,5	-0,5
TR	°C	0,1	-0,1	0,3	-0,2	0,2	-0,1	-0,1	-0,2
TO	°C	-0,1	-0,3	0,0	-0,2	-0,1	-0,4	-0,3	-0,3
vL	m/s	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
RH	%	1,1	14,3	10,6	1,7	15,8	2,9	20,1	6,1
PMV		0,0	0,0	0,1	0,0	0,1	-0,1	0,0	-0,1
PPD	%	0,0	0,0	-1,4	0,0	-1,4	1,9	0,0	1,9

FE	Messstelle in Achse Fenster
AW	Messstelle in Achse Außenwand
Δ	Differenz (Untersuchtes Heizsystem – elektrischer Heizkörper)

Die Unterschiede der Werte für PMV und PPD sind kaum messbar und hängen im Wesentlichen mit dem Unterschied der Lufttemperaturen zusammen. Diese Differenz entstand wohl durch die nicht exakt einstellbaren Raumtemperaturregelungen der Heizungssysteme.

Zugluft

Die Beeinträchtigung durch Zugluft kann nach DIN EN 7730 als der vorausgesagte Prozentsatz an Menschen angegeben werden, die sich durch Zugluft beeinträchtigt fühlen.

$$DR = (34 - t_{a,l}) \times (\bar{v}_{a,l} - 0,05)^{0,62} \times (0,37 \times \bar{v}_{a,l} \times Tu + 3,14)$$

DR Draught Rating bzw. vorausgesagter Prozentsatz an Unzufriedenen durch Zugluft in %

$\bar{v}_{a,l}$ lokale mittlere Luftgeschwindigkeit in Meter je Sekunde, < 0,5 ms⁻¹

$t_{a,l}$ die lokale Lufttemperatur in °C, 20 °C bis 26 °C

Tu der lokale Turbulenzgrad in Prozent, 10 % bis 60 %, falls der Wert nicht bekannt ist, darf 40 % verwendet werden

Für $\bar{v}_{a,l} < 0,05 \text{ ms}^{-1}$ ist $\bar{v}_{a,l} = 0,05 \text{ ms}^{-1}$

Nach DIN EN ISO 7730 wird das Umgebungsklima in Kategorien eingeteilt. Die beste Kategorie, die Kategorie A, erreicht man mit DR < 10 %. (siehe Tabelle 38)

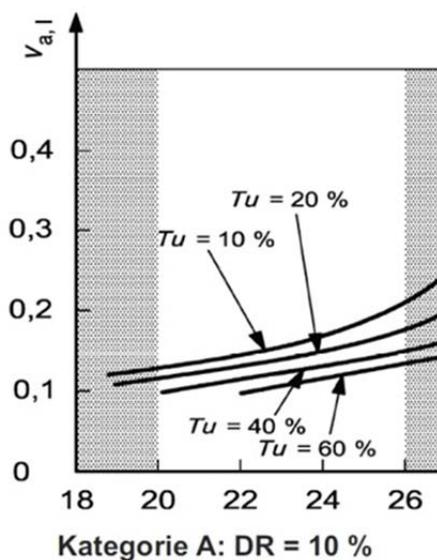


Bild 172:

Höchstzulässige mittlere Luftgeschwindigkeit als Funktion der Lufttemperatur und des Turbulenzgrades vor Ort [18].

Die gemessenen Luftgeschwindigkeiten lagen im Durchschnitt immer unter 0,1 ms⁻¹ für alle Heizsysteme und teilweise unterschritten sie sogar den Grenzwert von 0,05 ms⁻¹, unter dem nach DIN EN ISO 7730 kein Zugluftisiko besteht.

Tabelle 45:

Auflistung der einzelnen Messgrößen und der daraus abgeleiteten Werte für das Zugluftrisiko des Strahlungsheizkörpers zu der Referenzmessung des elektrischen Heizkörpers in 10 cm Höhe.

MR 1 10 cm		Strahlungsheizkörper		elektrischer Heizkörper		Δ (SHK – el.)	
		FE	AW	FE	AW	FE	AW
TL	°C	19,4	19,5	18,9	18,9	0,5	0,6
vL	m/s	0,08	0,06	0,02	0,03	0,05	0,03
SDv	m/s	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01
TU	%	22	33	30	29	-8	4
DR	%	6,3	3,2	0,0	0,0	6,3	3,2

DR Zugluftrisiko (Draft Risk) bzw. Vorausgesagter Prozentsatz an Unzufriedenen aufgrund von Zugluft

FE Messstelle in Achse Fenster (B6)

AW Messstelle in Achse Außenwand (B2)

Δ Differenz (Strahlungsheizkörper – elektrischer Heizkörper)

Berechnung des lokalen Turbulenzgrades TU nach DIN EN ISO 7726

$$TU = \frac{SD_v}{v_L} \times 100$$

SDv Standardabweichung der Luftgeschwindigkeit in m/s

Im Vergleich der verschiedenen Messpunkte war klar ersichtlich, dass in 10 cm Höhe das größte Zugluftrisiko der gemessenen Punkte herrscht. Daher wurde für den Vergleich diese Höhe besonders betrachtet. Das Zugluftrisiko steigt mit sinkenden Lufttemperaturen und steigender Luftgeschwindigkeit. Die Ergebnisse zeigen, dass die Wandheizsysteme höhere Lufttemperaturen im Knöchelbereich erreichen, jedoch auch höhere Luftgeschwindigkeiten entstehen. Es verursachen die Wandheizungssysteme im Gesamtvergleich tendenziell ein höheres Zugluftrisiko. Dabei ist zu bemerken, dass sich die Werte der verschiedenen Heizsysteme nur sehr geringfügig unterscheiden.

Tabelle 46:
Zusammenstellung der Unterschiede der Zugluftisiko-Differenzen der untersuchten Heizsysteme zu den Referenzmessungen der elektrischen Heizkörper.

10 cm		Strahlungsheizkörper		Wandheizung 1		Wandtemperierung		Wandheizung 2	
		Δ FE	Δ AW	Δ FE	Δ AW	Δ FE	Δ AW	Δ FE	Δ AW
TL	°C	0,51	0,63	0,52	0,23	0,94	0,89	0,28	0,42
vL	m/s	0,05	0,03	0,01	0,02	0,02	0,03	0,01	0,07
SDv	m/s	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,02
TU	%	-8	4	29	29	23	6	13	-33
DR	%	7,1	4,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	9,3

DR Zugluftisiko (Draft Risk) bzw. Vorausgesagter Prozentsatz an Unzufriedenen aufgrund von Zugluft

FE Messstelle in Achse Fenster

AW Messstelle in Achse Außenwand

Δ Differenz (Untersuchtes Heizsystem – elektrischer Heizkörper)

Warme und kalte Fußböden

Trägt man Schuhe, spielt die Oberflächentemperatur des Fußbodens zwar keine übergeordnete Rolle, sie hat jedoch Einfluss auf die mittlere Strahlungstemperatur und die Lufttemperatur – besonders der bodennahen Luftschichten. Die vorhergesagte Anzahl Unzufriedener kann nach ISO 7730 basierend auf der Oberflächentemperatur des Fußbodens wie folgt berechnet werden:

$$PD = 100 - 94 \times \exp(-1,387 + 0,118 \times t_f - 0,0025 \times t_f^2)$$

t_f Oberflächentemperatur des Fußbodens in °C

Für die Bestimmung der Fußboden-Oberflächentemperaturen wurde auf die fest installierte Messtechnik (siehe Bild 163) zurückgegriffen. Daher wurde zu dieser Messung in jedem Messraum ein fest installierter PT100 Sensor in Raummitte über das Auswertungssystem Imedas ausgewertet. Hier ist somit keine Unterscheidung zwischen den beiden Raumachsen Fenster und Außenwand möglich. Als Messintervall wurde ein Zeitraum über 15 Tage betrachtet und gemittelt.

Tabelle 47:

Vergleich der Fußbodentemperaturen und der daraus abgeleiteten Werte für den vorausgesagten Prozentsatz an Unzufriedenen (PD) der Wandtemperierung zu der Referenzmessung des elektrischen Heizkörpers.

MR 3		Wandtemperierung (WT)	elektrischer Heizkörper (eHK)	Δ (WT – eHK)
		Raummitte	Raummitte	Raummitte
T Fußboden	°C	19,3	17,3	2,0
PD	%	9,8	14,4	-4,7

PD Vorausgesagter Prozentsatz an Unzufriedenen aufgrund der Fußbodentemperatur

Δ Differenz (Wandtemperierung – elektrischer Heizkörper)

In Messraum 3 konnte die Fußbodentemperatur durch das untersuchte Heizsystem um ca. 2,0 °C erhöht werden, was ein erheblicher Unterschied zu den elektrischen Heizkörpern darstellt.

Tabelle 48:

Zusammenstellung der Unterschiede der Fußbodentemperaturen der untersuchten Heizsysteme zu den Referenzmessungen der elektrischen Heizkörper.

		Strahlungsheizkörper	Wandheizung 1	Wandtemperierung	Wandheizung 2
		Δ Raummitte	Δ Raummitte	Δ Raummitte	Δ Raummitte
T Fußboden	°C	0,9	0,1	2,0	0,6
PD	%	-1,7	-0,2	-4,7	-1,5

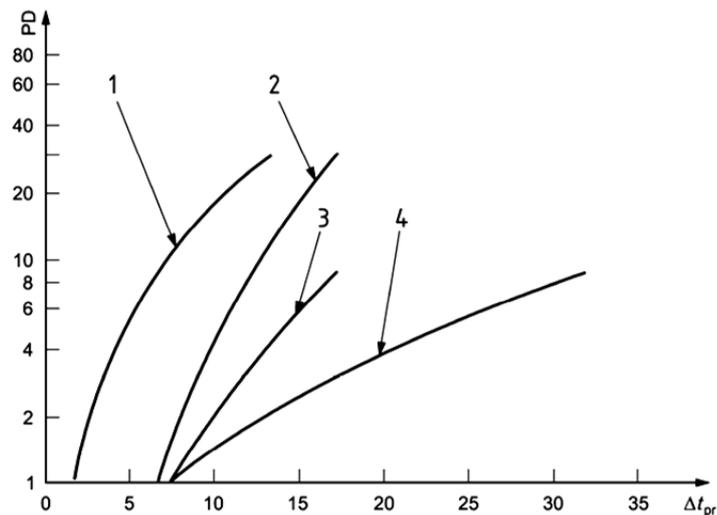
PD Vorausgesagter Prozentsatz an Unzufriedenen aufgrund der Fußbodentemperatur

Δ Differenz (Untersuchtes Heizsystem – elektrischer Heizkörper)

Allgemein ist eine leichte bis stärkere Verbesserung der Fußbodentemperatur und der damit verbundenen vorhergesagten Zufriedenheit durch die untersuchten Heizsysteme zu beobachten.

Asymmetrie der Strahlungstemperatur

Um eine Abschätzung der Auswirkung verschieden temperierter Decken- und Wandflächen auf die Rate an Unzufriedenen geben zu können, ist in ISO 7730 ein Modell zur Asymmetrie der Strahlungstemperatur angegeben. Für deren Berechnung werden die Differenzen in der Strahlungstemperatur der zwei Halbräume vor und hinter einer kleinen Platte herangezogen.



- Legende**
- PD Prozentsatz an Unzufriedenen, %
 Δt_{pr} asymmetrische Strahlungstemperatur, °C
- 1 warme Decke
 2 kühle Wand
 3 kühle Decke
 4 warme Wand

Bild 173:
 Lokale thermische Unbehaglichkeit durch asymmetrische Strahlungstemperatur [18].

Für die vorliegenden Räume sind die Graphen „kalte Wand“ und „warme Wand“ relevant. Die nach ISO 7730 ermittelten Werte für den Prozentsatz der Unzufriedenen liegen jedoch in den vorliegenden Messergebnissen immer unter 1 %, da die Asymmetrie bei keiner Messung mehr als 5 °C beträgt. Auch bei allen anderen Messungen wurde dieser Wert nicht überschritten. Somit wird die Unbehaglichkeit infolge Temperaturasymmetrie für den Vergleich der Heizsysteme hier nicht weiter behandelt.

Äquivalenttemperatur

Die Äquivalenttemperatur wurde mithilfe einer Messpuppe, an der die einzelnen RST-Meter befestigt waren, ermittelt. Die Messungen wurden jeweils in Raummitte, über einen Zeitraum von ca. 24 Stunden durchgeführt. Dabei wurden an jeder Messhöhe 2 Sensoren mit unterschiedlicher Ausrichtung verwendet. Somit konnten zeitgleich 8 Äquivalenttemperaturen aufgezeichnet werden.

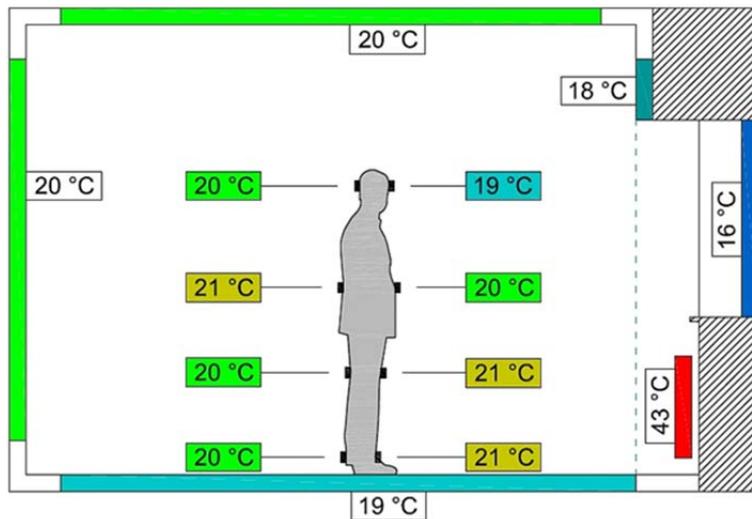


Bild 174:
Äquivalenttemperaturen und Oberflächentemperaturen in Messraum 2 mit elektrischem Heizkörper, Messdauer ca. 24 Stunden.

Die Messergebnisse der einzelnen Sensoren weichen in Bild 174 um ca. $\pm 1\text{ °C}$ voneinander ab. Damit liegen die Messungen innerhalb der beschriebenen Messgenauigkeit [62]. Die Äquivalenttemperaturen in Bild 174 betragen also über den gesamten Messbereich $t_{eq,gerichtet} = 20\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$, wobei tendenziell die warme Strahlungsfläche und das kalte Fenster darin abgebildet werden.

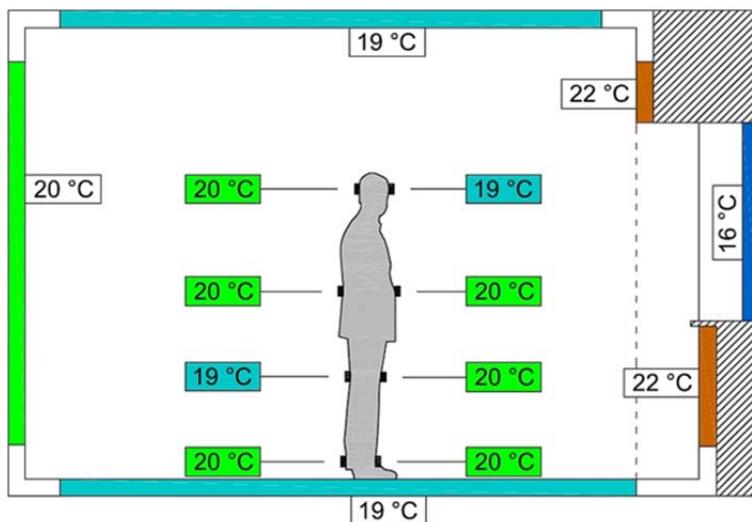


Bild 175:
Äquivalenttemperaturen und Oberflächentemperaturen in Messraum 2 mit Wandheizung 1, Messdauer ca. 24 Stunden.

Vergleicht man die Messergebnisse bei elektrischem Heizkörper in Messraum 2 mit der Wandheizung 1, so beträgt die größte Veränderung der Äquivalenttemperatur $\pm 1\text{ °C}$. Aufgrund der geringen Messgenauigkeit des RST-Meters, können zwischen den beiden Heizsystemen in Messraum 2 keine Unterschiede festgestellt werden.

Tabelle 49:

Differenz der Messergebnisse der untersuchten Wandheizsysteme zu den Messungen mit elektrischem Heizkörper in °C.

Raummitte	Vorne				Hinten			
	Kopf	Hüfte	Knie	Knöchel	Kopf	Hüfte	Knie	Knöchel
Strahlungsheizkörper	+ 1,0	-	+ 1,0	+ 1,0	-	-	-	+ 0,5
Wandheizung 1	+ 0,5	-	- 0,5	-	- 1,0	- 0,5	- 0,5	- 0,5
Wandtemperierung	+ 0,5	-	+ 0,5	+ 1,0	- 1,0	- 0,5	-	+ 0,5
Wandheizung 2	-	- 0,5	-	-	- 1,0	- 1,0	- 0,5	- 0,5

Keines der untersuchten Wandheizungssysteme konnte eine signifikante Erhöhung der Äquivalenttemperatur erzielen. Eine Erhöhung der Gleichmäßigkeit der Verteilung der Äquivalenttemperatur über den gesamten Messbereich wurde nicht erreichen, da bereits die elektrischen Heizkörper konstante Äquivalenttemperaturen erzeugten.

Horizontale Lufttemperatur-Verteilung im Raum

Für die Darstellung der Messergebnisse der horizontalen Raumverteilung werden die Messpunkte zunächst in ihrer Messhöhe unterschieden.

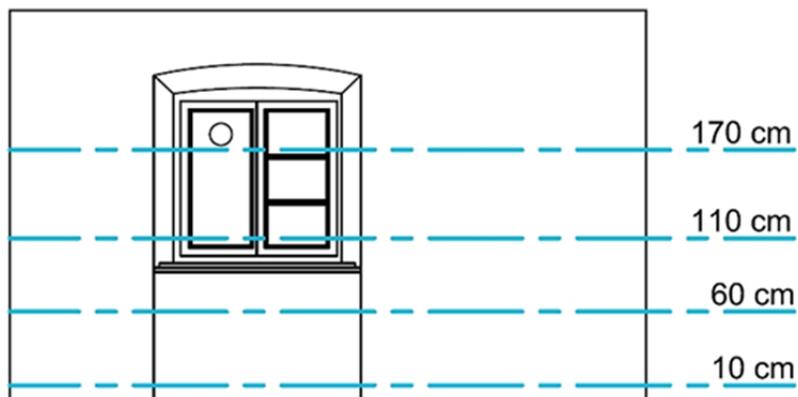


Bild 176:
Messhöhen der horizontalen Raumverteilung.

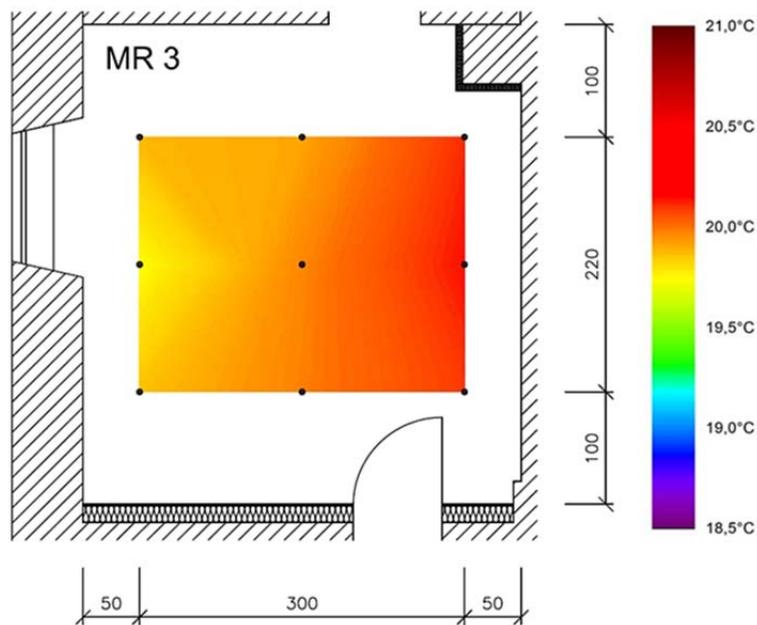


Bild 177:
Erklärende Darstellung des Messbereichs und der Messpunkte am Beispiel von Messraum 3.

Zwischen den gemessenen Punkten werden die Werte linear interpoliert und die verschiedenen Temperaturniveaus farblich dargestellt. Alle Flächendiagramme der horizontalen Verteilung sind wie Bild 177 aufgebaut. Das heißt, dass der obere Rand des Diagramms die nördliche Begrenzung der Messfläche darstellt, der rechte Rand die östliche Begrenzung und die anderen analog dazu.

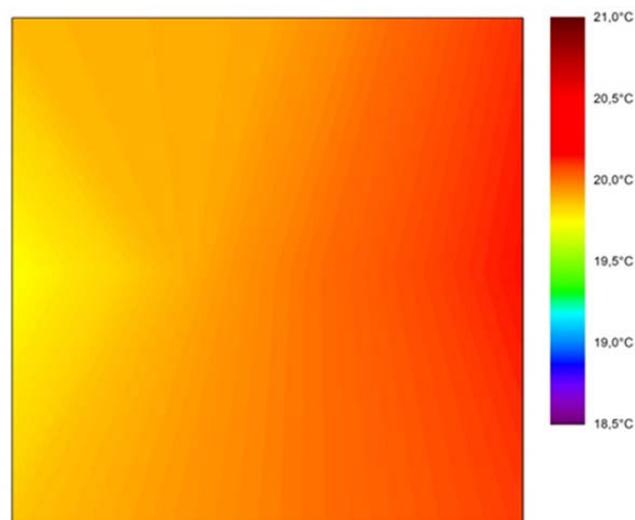


Bild 178:
Horizontale Verteilung der Raumlufttemperatur in MR3 in der Messhöhe 170 cm mit Wandtemperierung.

In Bild 179 sieht man die Raumluftverteilung und kann den kühlenden Einfluss des Fensters erahnen, der sich am linken, also westlichen Rand sichtbar macht. So deutlich wie in diesem Diagramm kann man die Einflüsse von kalten oder warmen Flächen nur selten sehen. Das liegt unter anderem an dem Abstand von mindestens 50 cm von den entsprechenden Flächen.

Vergleicht man nun die Räume mit den Referenzmessungen sieht man besonders starke Verbesserungen durch die Wandheizsysteme im Bereich 10 cm über dem Fußboden. Beispielhaft wird hier das Ergebnis aus Messraum 1 dargestellt.

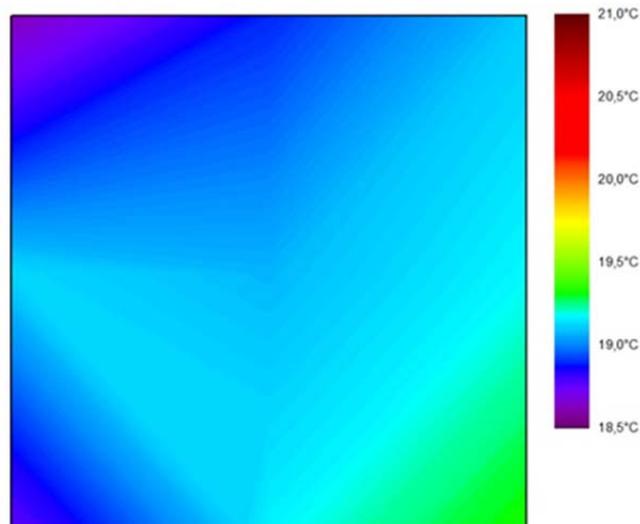


Bild 179:
Horizontale Lufttemperaturverteilung in 10 cm Höhe in Messraum 1 mit elektrischem Heizkörper.

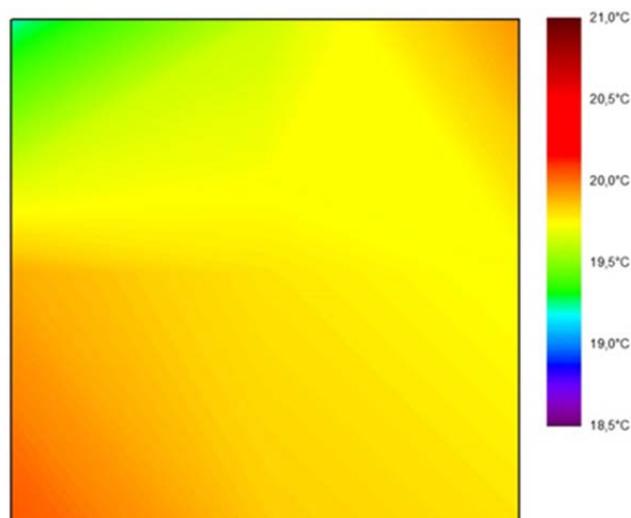


Bild 180:
Horizontale Lufttemperaturverteilung in 10 cm Höhe in Messraum 1 mit Strahlungsheizkörper.

In Messraum 1 sieht man deutlich eine kühlere Außenecke im Nord-Westen des Raumes. Dagegen wird der dem Fenster zugewandte Bereich mit dem Strahlungsheizkörper wesentlich besser erwärmt als mit dem elektrischen Heizkörper. Insgesamt kann sowohl bei dem elektrischen wie auch bei den Wandheizungssystemen eine sehr gleichmäßige horizontale Verteilung beobachtet werden.

Vertikale Lufttemperatur-Verteilung im Raum

Für die Darstellung der Messergebnisse im Schnitt werden die Messpunkte, die auf der mittleren Messachse, der Achse 4, liegen verwendet.

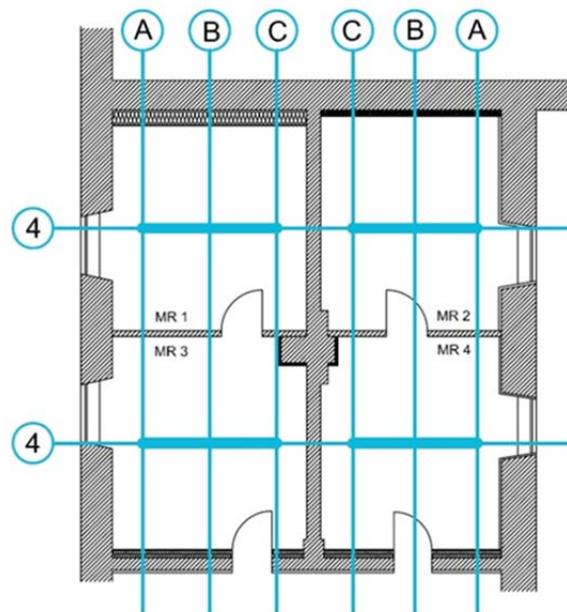


Bild 181:
Lage der Schnittachsen als Messebenen der Raumverteilung im Schnitt.

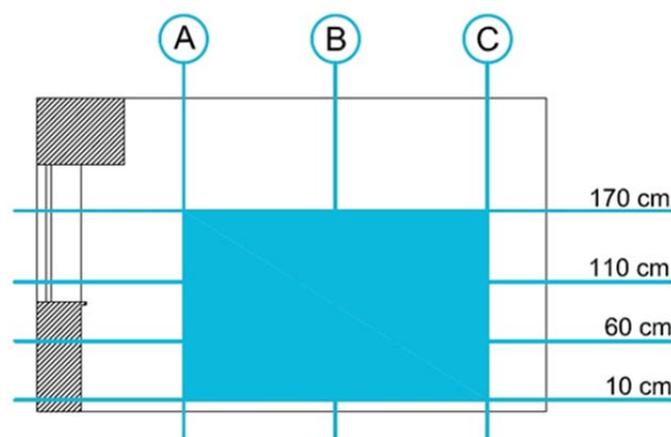


Bild 182:
Darstellungsbereich der erzeugten Flächendiagramme der Verteilung im Schnitt.

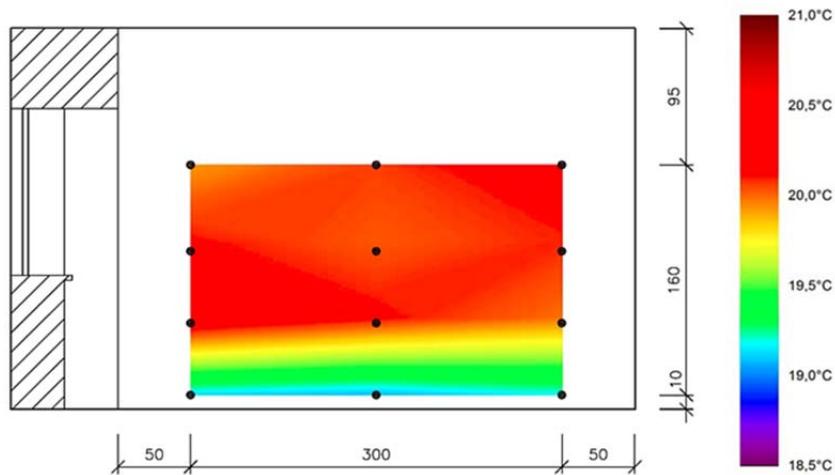


Bild 183:
Erklärende Darstellung des Messbereichs und der Messpunkte der horizontalen Verteilung, am Beispiel von Messraum 1 mit elektrischem Heizsystem.

Dabei sind die ermittelten Flächendiagramme so angeordnet wie in Bild 181 beschrieben. So beschreibt bei allen Flächendiagrammen der obere Rand die Messhöhe von 170 cm, der linke Rand die der Außenwand zugewendeten Messachse A und analog dazu der untere Rand die Messhöhe 10 cm, sowie der rechte Rand die Messachse C.

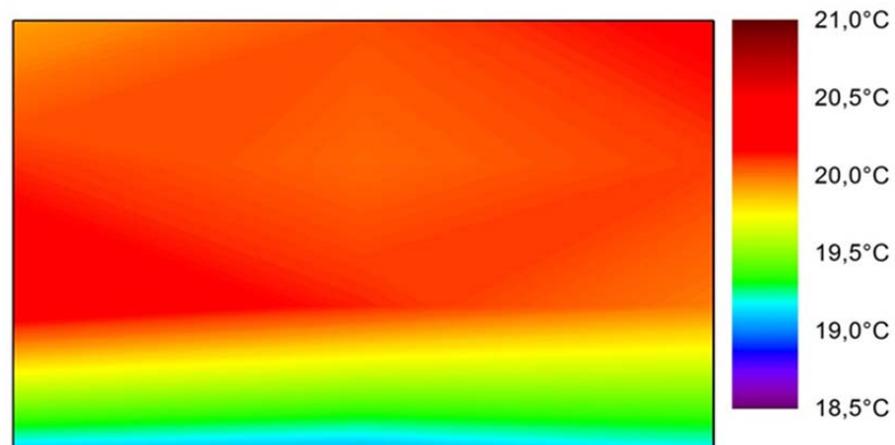


Bild 184:
Flächendiagramm der Verteilung der Raumlufttemperatur im Schnitt im Messraum 1 mit elektrischem Heizsystem.

Wie in Bild 184 weisen alle Raumluftverteilungen im Schnitt bei den elektrischen Heizkörpern eine eindeutige Höhengschichtung der Lufttemperaturen auf. Die Raumlufttemperatur fällt in diesem Beispiel zur 10 cm Marke hin auf ca. 19 °C.



Bild 185:
Flächendiagramm der Verteilung der Raumlufthtemperatur im Schnitt im Messraum 1 mit dem Strahlungsheizkörper.

Die Verbesserung hinsichtlich der Raumlufthtemperaturverteilung wird in Bild 185 besonders deutlich. Im Gegensatz zu der in Bild 186 sichtbaren Schichtung der Lufttemperaturen ist in mit dem Strahlungsheizkörper die Raumlufthtemperatur sehr gleichmäßig verteilt. Diese Verbesserung kann unterschiedlich stark ausgeprägt bei allen untersuchten Wandheizungssystemen beobachtet werden.

Vertikale Lufttemperatur-Schichtung

Die im vorherigen Kapitel beobachteten Raumlufthtemperatur-Schichtungen werden auch bei den Langzeitmessungen in den Messpunkten B2/B3 und B5/B6 sichtbar. Bei den ca. 24 stündigen Messungen konnte auch der Tagesgang und die dementsprechende Standardabweichung vom Mittelwert mitaufgezeichnet werden.

Dabei zeigen sich bei allen Messungen mit elektrischen Heizkörpern die Tendenzen zu kühleren Temperaturen im Fußbereich, höheren Temperaturen im Kopfbereich und einer sehr geringen Standardabweichung der Raumlufthtemperatur.

Bei den mit den untersuchten Wandheizungssystemen gemessenen Höhenprofilen sieht man einen unterschiedlich stark ausgebildeten „Bauch“, der daher kommt, dass Kopf- und Knöcheltemperatur recht ähnlich sind, hingegen Knie- und Hüfttemperatur höhere Werte erreichen.

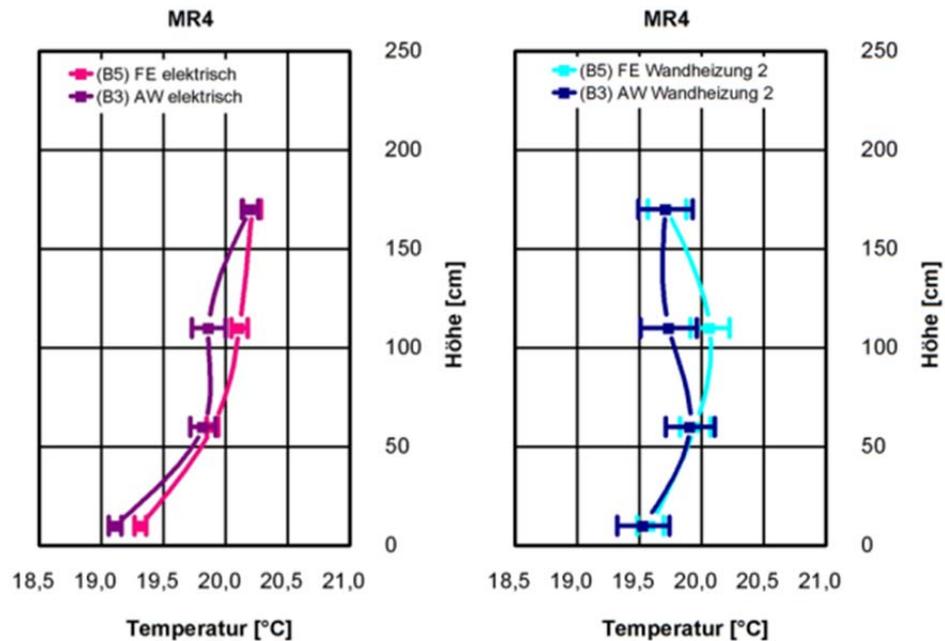


Bild 186:

Höhenprofil mit Standardabweichung der Raumlufttemperatur in Messraum 4 mit elektrischem Heizsystem (links) und Wandheizung 2 (rechts). Messdauer: 24 Stunden.

Der bereits beschriebene vertikale Lufttemperaturunterschied zwischen Kopf und Knöchel wird in Bild 186 nachvollziehbar. Die beiden Kurven liegen relativ nah beieinander, zeigen aber einen Unterschied auf Hüfthöhe. Bei dem Vergleich ist zu berücksichtigen, dass die Messwerte in unterschiedlichen Zeiträumen gewonnen wurden und daher insbesondere vor dem Fenster eine höhere Messungengenauigkeit vorliegt.

Die Höhenprofile der untersuchten Wandheizungssysteme zeigen im Vergleich zu den elektrischen Heizkörpern tendenziell eine Verbesserung des vertikalen Lufttemperaturunterschiedes zwischen Kopf und Knöchel, wenngleich sie auch eine Erhöhung der Raumlufttemperaturen im Bereich Knie und Hüfte erzeugen. Dazu führt das Regelverhalten der untersuchten Wandheizungssysteme zu einer größeren Standardabweichung der Raumlufttemperaturen vom Mittelwert. Dieses Regelverhalten könnte durch eine optimierte Steuerung verringert werden.

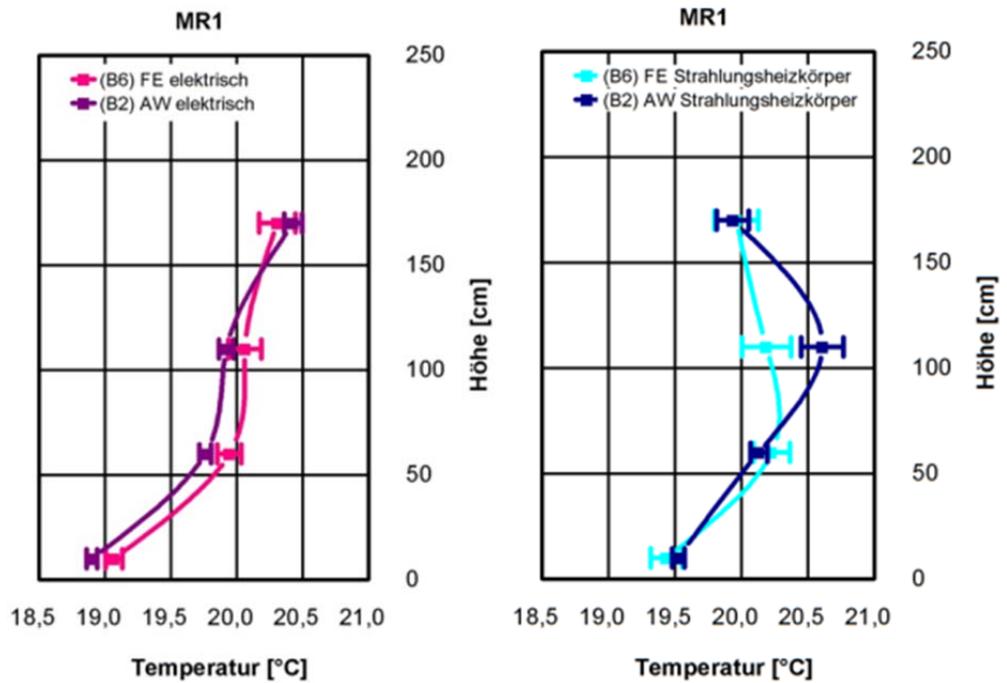


Bild 187:
Lufttemperatur in Fenster- und Wandachse ca. 2 m von der Außenwand entfernt in Messraum 1 mit elektrischem Heizkörper (links) und Strahlungsheizkörper (rechts). Messdauer: 24 Stunden.

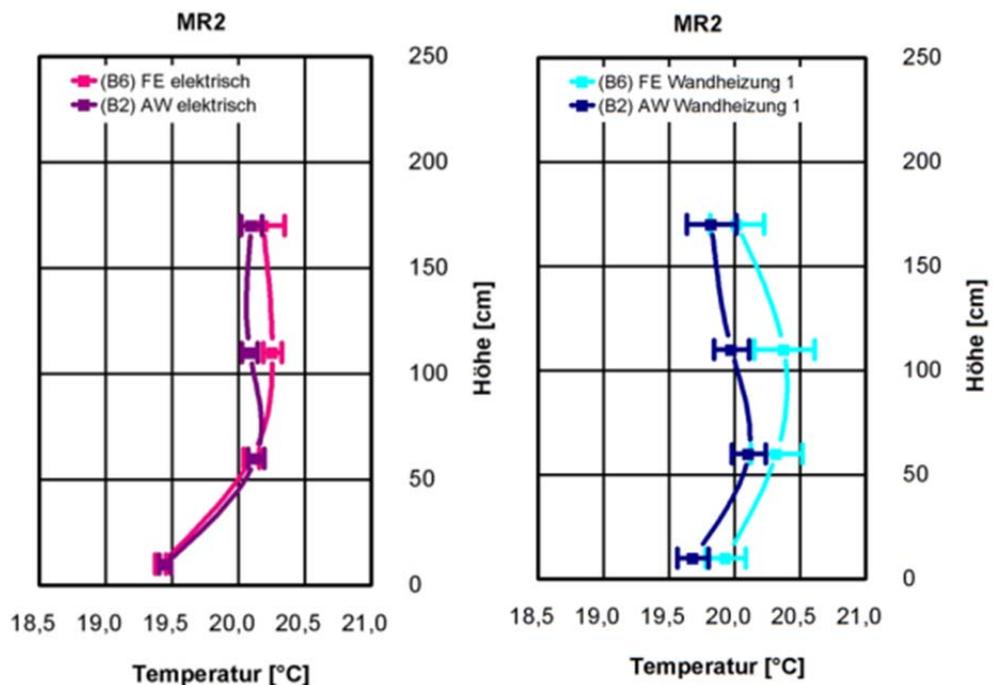


Bild 188:
Lufttemperatur in Fenster- und Wandachse ca. 2 m von der Außenwand entfernt in Messraum 2 mit elektrischem Heizkörper (links) und Wandheizung 1 (rechts). Messdauer: 24 Stunden.

Auch in Messraum 2 muss bei der Interpretation der Höhenkurven die zeitliche Komponente beachtet werden. So liegt der deutlich wärmere Verlauf der Höhenkurve „FE Wandheizung 1“, trotz ähnlicher Randbedingungen während der Messphase vermutlich daran, dass diese Messung im Mai durchgeführt wurde. Die anderen 3 Kurven resultieren aus Messungen von Januar bis Februar und sind gut vergleichbar. Deutlich zu sehen sind hier die verbesserte Lufttemperatur in 10 cm Höhe mit der Wandheizung 1 und die höhere Lufttemperatur in 170 cm Höhe mit dem elektrischen Heizkörper. Das führt zu einem höheren vertikalen Temperaturunterschied in Bild 188.

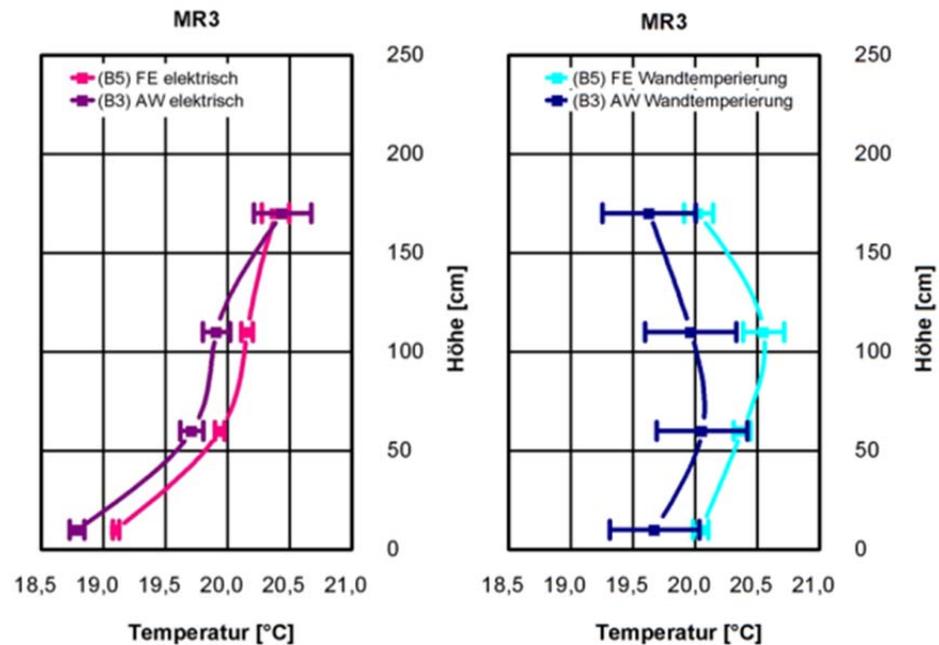


Bild 189:

Lufttemperatur in Fenster- und Wandachse ca. 2 m von der Außenwand entfernt in Messraum 3 mit elektrischem Heizkörper (links) und Wandtemperierung (rechts). Messdauer: 24 Stunden.

Die Wandtemperierung resultiert in deutlichen Unterschieden zum elektrischen Heizsystem. Zum einen wird der extreme vertikale Lufttemperaturunterschied der Messungen mit dem elektrischen Heizkörper durch die Wandtemperierung erfolgreich gegen Null verbessert. Zum anderen fällt die große Standardabweichung der Lufttemperaturen bei der Wandtemperierung auf. Dies könnte dem Regelverhalten des Heizsystems geschuldet sein, das mit hohen Vorlauftemperaturen starke Temperaturschwankungen erzeugt (siehe Bild 189).

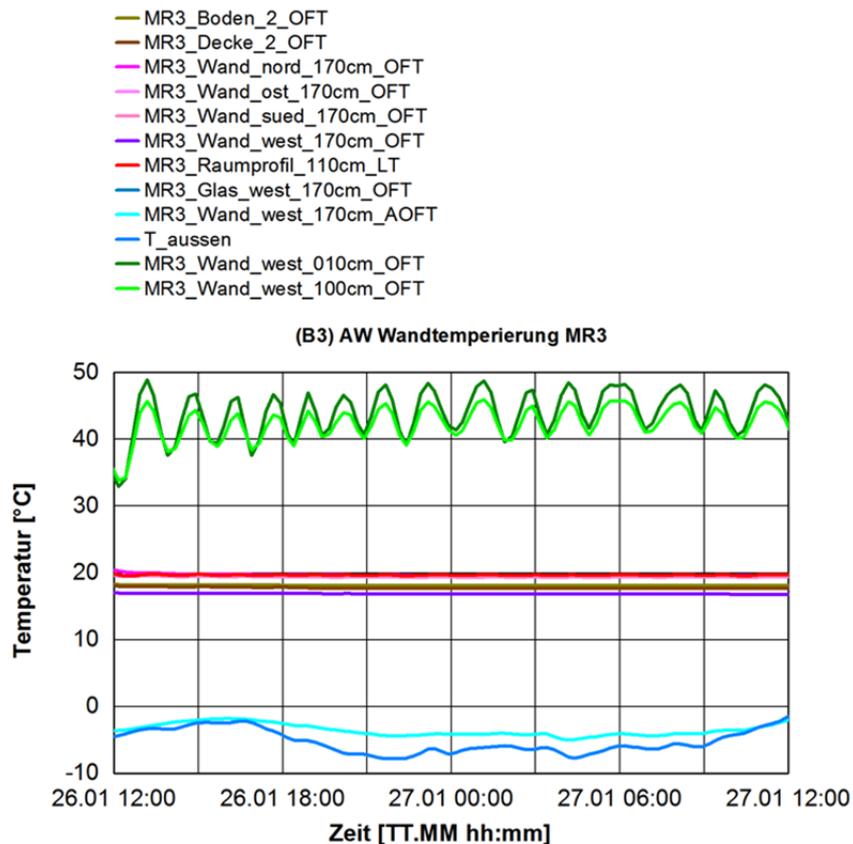


Bild 190:
Temperaturverlauf während der 24-Stundenmessung an Messpunkt MR3 B3 (AW) mit Wandtemperierung.

Strahlungstemperatur-Verteilung

Um den Einfluss der Strahlungsleistung der Wandheizungssysteme einschätzen zu können, wurde zunächst die Referenzmessung mit den elektrischen Heizkörpern durchgeführt. Zu dem Zeitpunkt dieser Messungen wurden die Messräume ausnahmsweise auf 22 °C betrieben. Diese erhöhte Temperatur sollte zu einer höheren Oberflächentemperatur der Heizkörper und somit auch zu einem deutlicheren Einfluss der Heizkörper auf die Strahlungstemperaturverteilung führen.

Bei den elektrischen Heizkörpern, die für eine vornehmlich konvektive Wärmeabgabe konstruiert sind, wurde kein Einfluss der Strahlungstemperatur der Heizung auf die Strahlungstemperatur an den gemessenen Stellen erwartet.

Für die Verteilungsmessung wurde in den Achsen A und A' gemessen.

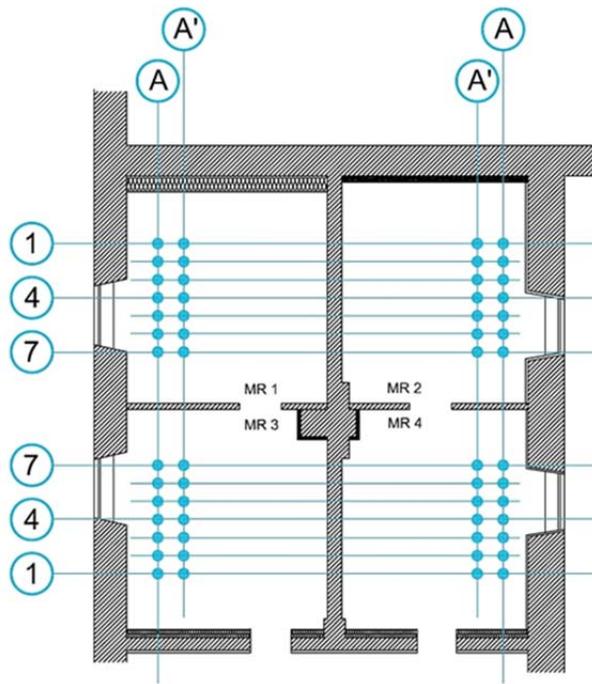


Bild 191:
Messpunkte der Strahlungstemperatur-Verteilung.

An jedem dieser Punkte wurde in zwei Höhen – 170 cm und 110 cm – der Halbraum der der Außenwand zugewandten Seite gemessen. Wie man in Bild 193 erkennen kann, sinkt der Einfluss der Außenwand mit zunehmender Entfernung von dieser, da die Anteile von Decke, Boden und den seitlich angrenzenden Innenwänden steigen.

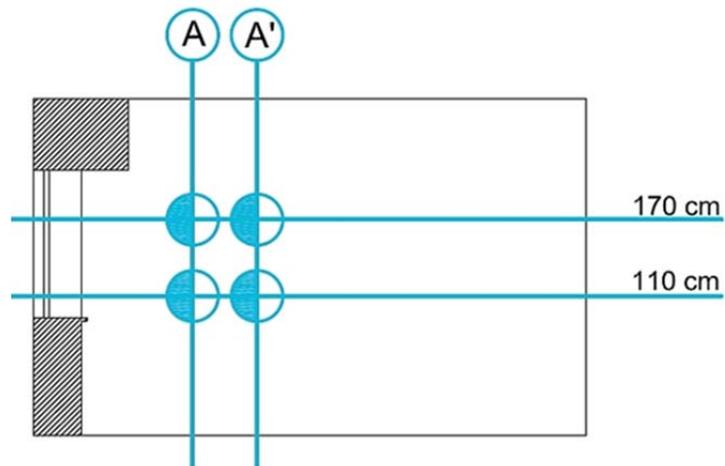


Bild 192:
Messhöhen der Strahlungstemperatur-Verteilung. Achse A ist 50 cm von der Außenwand entfernt, Achse A' ist 100 cm von der Außenwand entfernt.

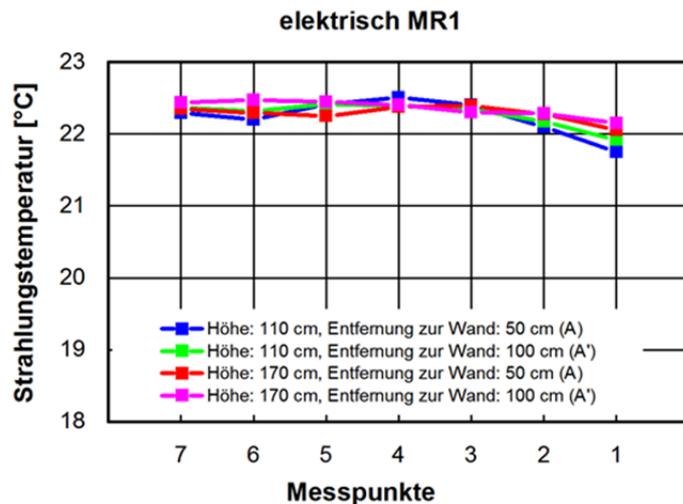


Bild 193:
Strahlungstemperatur-Verteilung in Messraum 1 mit elektrischem Heizsystem.

Wie erwartet, konnte bei den elektrischen Heizkörpern kein Einfluss der Heizkörper auf die Strahlungstemperatur beobachtet werden. Der Einfluss der Fensteroberflächentemperatur wurde weitestgehend eliminiert, da die Fenster für diese Messung von außen mit weiß gestrichenen Holzplatten abgeschirmt wurden. Dadurch kommt ein recht konstanter Strahlungstemperatur-Verlauf zustande.

Die Messungen bei eingeschalteten Wandheizungssystemen musste aus Rücksicht auf andere, parallel laufende Versuche bei 20 °C durchgeführt werden. Was die Vergleichbarkeit mit der Nullmessung beeinflusst, jedoch die Rahmenbedingungen der übrigen bereits durchgeführten Messungen aufgreift.

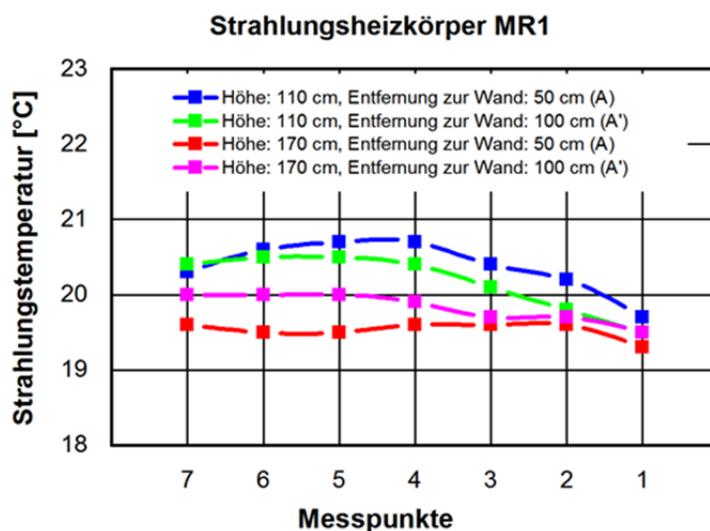


Bild 194:
Strahlungstemperatur-Verteilung in Messraum 1 mit Strahlungsheizkörper.

Die Strahlungstemperatur-Verteilung in Bild 194 des Strahlungsheizkörpers zeigt – im Gegensatz zu Bild 193 – eine Streuung der Verläufe. Hier ist zu beobachten, dass die niedriger gelegenen Messpunkte auf 110 cm Höhe höhere Strahlungstemperaturen aufweisen als die Messpunkte auf 170 cm. Dieser Unterschied nimmt mit zunehmender Entfernung von der Außenwand ab – die Kurven gleichen sich an. Nahe an der Wand, also in 50 cm Entfernung zeigt sich ein Unterschied von 1 °C zwischen den zwei Höhen 110 cm und 170 cm, zumindest in der Messachse Fenster, in dem auch der Strahlungsheizkörper steht. Je weiter man sich von der Lage des Heizkörpers (Messpunkt 5) entfernt, desto mehr nähern sich alle Messkurven einander an, bis in Messpunkt 1 die Werte bis auf 0,5 °C zusammengedrückt sind.

Ähnliche Ergebnisse liefern die Messungen bei der Wandtemperierung.

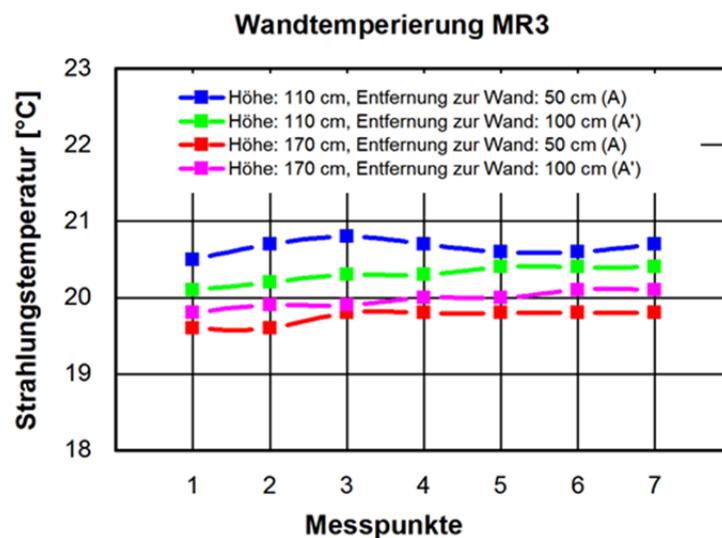


Bild 195:
Strahlungstemperatur-Verteilung in Messraum 3 mit Wandtemperierung.

Dabei ist hier zu beobachten, dass die Streuung der Temperaturen von Messpunkt 1 bis 7 gleich bleibt. Dies entspricht auch der Lage des Heizkörpers, die sich bei der Wandtemperierung über die gesamte Messfeldbreite erstreckt.

Ein Unterschied konnte bei den Messungen mit den vollflächig angebrachten Wandheizungssystemen 1 und 2 festgestellt werden. Hier zeigt sich eine sehr homogene Strahlungstemperatur, die weder in Messfeldhöhe noch -breite variiert und sich um die 20 °C bewegt.

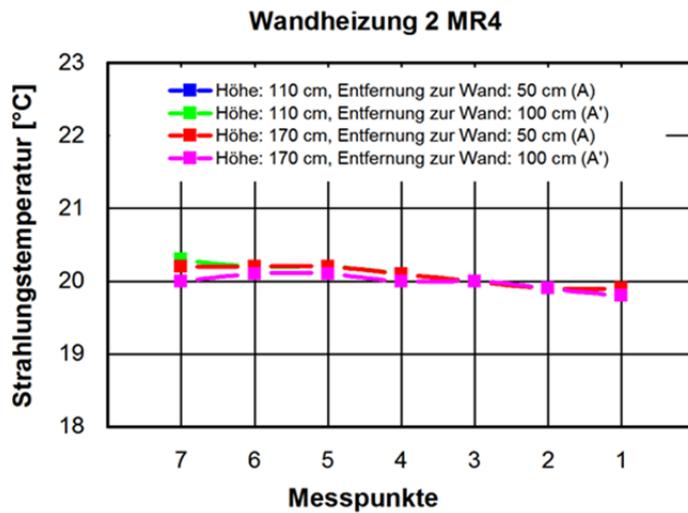


Bild 196:
Strahlungstemperatur-Verteilung in Messraum 4 mit Wandheizung 2.

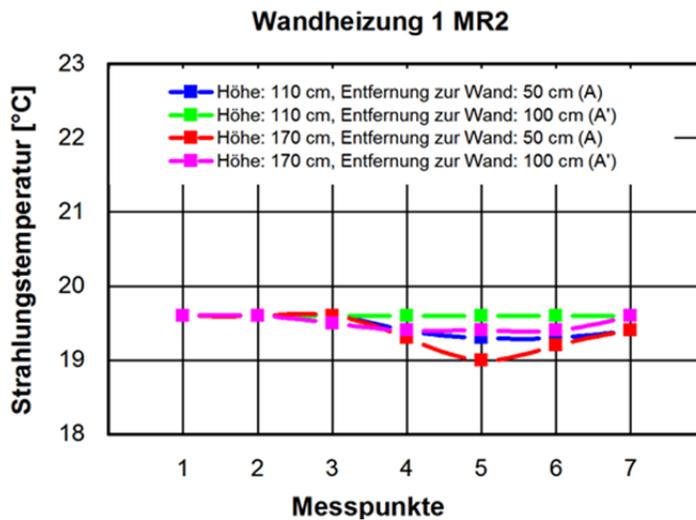


Bild 197:
Strahlungstemperatur-Verteilung in Messraum 2 mit Wandheizung 1.

Bei der Strahlungstemperatur-Verteilung in Bild 197 mit Wandheizung 1, kann man vermutlich den Einfluss des Fensters oder der Fensternische bei kühleren Außentemperaturen ablesen.

5.7.4 Analyse der Ergebnisse

Anhand der Höhenprofile der vertikalen Lufttemperatur-Schichtungen können die Vergleichbarkeiten der Messungen untersucht werden. Bei den Ergebnissen fällt auf, dass die Höhenprofile der elektrischen Heizkörper kaum Unterschiede zwischen den 2 Messpositionen Außenwand (AW) und Fenster (FE) aufweisen. Bei den Höhenprofilen der untersuchten Wandheizsysteme zeigen sich dagegen teilweise sehr starke Unterschiede. Vergleicht man die Höhenprofile nach Messzeitraum getrennt, kann man Gemeinsamkeiten von verschiedenen Heizsystemen im gleichen Messzeitraum erkennen.

Vergleicht man nur die zeitnahen Messungen ergeben sich folgende Höhenprofile:

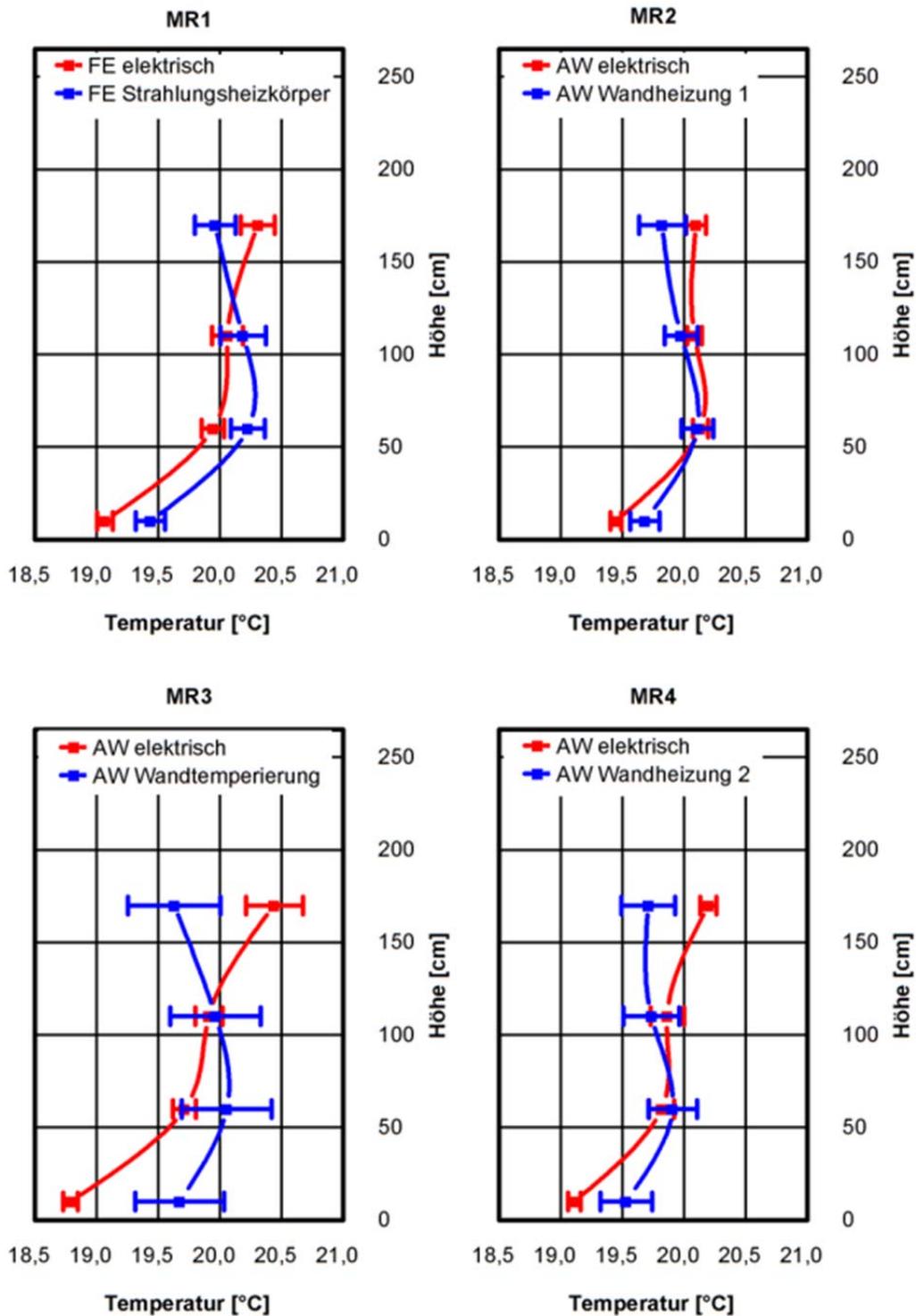


Bild 198:
Höhenprofile der 24-Stunden Messungen von Januar und Februar.

In Messraum 1 und 3 kann man eine wesentliche Verbesserung des vertikalen Lufttemperatur-Unterschiedes durch die untersuchten Wandheizungssysteme erkennen. Das Regelverhalten der Wandtemperierung schlägt sich jedoch we-

sentlich schwächer auf die Schwankung der Lufttemperatur nieder, als bei der 24-Stundenmessung (siehe Bild 198).

Bei den vollflächig eingebauten Systemen Wandheizung 1 in Messraum 2 und Wandheizung 2 in Messraum 4 kann man deutlich die einheitliche Verteilung der Raumlufttemperaturen über die Aufenthaltshöhe sehen. Diese Messräume haben auch während der Messung mit den elektrischen Heizkörpern durch die eingebauten Wandflächenheizungen systembedingt leicht gedämmte Außenwände. Dadurch sind hier auch die Kurven der Messungen mit dem elektrischen System weniger extrem in ihrer vertikalen Lufttemperaturdifferenz.

Vergleicht man nun die verschiedenen Heizungssysteme miteinander, kann man sowohl Gemeinsamkeiten, als auch Unterschiede feststellen.

Gemein haben alle untersuchten Wandheizungssysteme, dass sie den globalen PMV Index des Raumes im Vergleich zum elektrischen Konvektoren-Heizkörper weder verbessern noch verschlechtern. Der PMV und somit auch der PPD eines Raumes wurden jedoch nur in Raummitte ermittelt. Die Einflussgrößen des PMV ändern sich bezüglich der Raummitte offensichtlich nicht stark genug, um eine Änderung herbeizuführen.

Betrachtet man die lokale thermische Behaglichkeit, so kann man eine Verbesserung des vertikalen Lufttemperaturunterschiedes feststellen, die Lufttemperatur in Knöchelhöhe nähert sich der durchschnittlichen Raumtemperatur an und auch die Fußbodenoberflächentemperatur wird bei den meisten untersuchten Wandheizungssystemen positiv erhöht.

Die Kriterien relative Feuchte und Luftgeschwindigkeit bewegen sich sowohl bei den elektrischen, als auch bei den Wandheizungssystemen in Größenordnungen, die keine genauere Betrachtung erfordern. Auf einen Vergleich wurde daher verzichtet.

Die Strahlungstemperatur liegt im Aufenthaltsbereich sehr nahe an der Raumlufttemperatur und kann daher bei keinem untersuchten Heizsystem, in Raummitte bei 170cm Höhe, eine Verbesserung der thermischen Behaglichkeit durch Wärmestrahlung bewirken.

Die Äquivalenttemperatur ist bei allen durchgeführten Messungen konstant um die $20\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$ und kann somit nicht zur Unterscheidung der Heizsysteme herangezogen werden. Auch hier ist die nur sehr kleine Änderung in der Strahlungsaustauschbilanz verantwortlich dafür, dass keine Veränderungen in der Messgröße ermittelt werden können.

Die deutlichste Veränderung der Heizsysteme gegenüber dem elektrischen Heizkörper ist im vertikalen Lufttemperatur-Unterschied zu beobachten. Hier ist der Einfluss des Messmonats trotz konstanter klimatischer Bedingungen im Innenraum erkennbar. Aus diesem Grund werden für den abschließenden Vergleich keine Messungen später als März berücksichtigt.

Für jedes Heizsystem wurden mindestens eine 24 Stunden Messung und eine 15 Tage Messung für den abschließenden Vergleich ausgewertet.

In Messraum 1 konnte der Strahlungsheizkörper eine Verbesserung des vertikalen Lufttemperatur-Unterschiedes erreichen. Diese betrug bei der 24 Stunden Messung im Punkt B6 (Achse Fenster) 0,4 °C und bei der 15 Tage Messung in Raummitte 0,6 °C.

In Messraum 2 wurde der Unterschied durch die Wandheizung 1 ebenfalls verbessert. Diese betrug bei der 24 Stunden Messung im Punkt B2 (Achse Außenwand) 0,2 °C und bei der 15 Tage Messung in Raummitte 0,2 °C.

Die Wandtemperierung zeigt den geringsten vertikalen Lufttemperatur-Unterschied der untersuchten Heizsysteme. Die Verbesserung betrug bei der 24 Stunden Messung im Punkt B3 (Achse Außenwand) 1,0 °C und bei der 15 Tage Messung in Raummitte mindestens 0,8 °C. Die Angabe für den fest installierten Messbaum ist geschätzt, da der Temperaturfühler in 10 cm Höhe ausgefallen ist. Deswegen wurde an dieser Stelle der Unterschied zwischen 170 cm und 60 cm Messhöhe gewählt.

Auch die in Messraum 4 eingebaute Wandheizung 2 konnte den vertikalen Lufttemperatur-Unterschied verbessern. Die Verbesserung betrug bei der 24 Stunden Messung im Punkt B3 (Achse Außenwand) 0,4 °C und bei der 15 Tage Messung in Raummitte 0,8 °C.

5.7.5 Diskussion der Ergebnisse

Um den relativ geringen gemessenen Einfluss der Wärmestrahlung auf die Behaglichkeit im Raum zu erklären, wird die Strahlungstemperatur an dieser Stelle anhand eines Beispiels rechnerisch betrachtet.

Um mit den Randbedingungen

- $Clo = 1$
- $Met = 1,2$
- Relative Feuchte = 50 %
- Luftgeschwindigkeit = 0,05 m/s
- Lufttemperatur = 20 °C

beispielsweise einen PMV von +0,08 zu erreichen, müsste die mittlere Strahlungstemperatur an einem beliebigen Punkt im Raum 24 °C betragen. Wählen wir als Bezugspunkt die Raummitte und betrachten eine stehende Person, können wir die dafür nötigen Oberflächentemperaturen der jeweiligen Heizsysteme ausrechnen.

Mit dem am Fraunhofer IBP entwickelten BNB Komfort Tool, ist eine Berechnung der mittleren Strahlungstemperatur auf Grundlage der Oberflächentemperaturen der Raumumschließungsflächen möglich.

Für eine Beispielrechnung wurden folgende Vereinfachungen getroffen:

- Kein Fenster
- Konstante Temperaturen der jeweiligen Oberflächen
- Oberflächentemperaturen aller Oberflächen, außer der des jeweiligen Heizsystems betragen 20 °C
- Raummaße (B x H x T) = 4 m x 4 m x 2,6 m
- Wandheizungen 1 und 2: Heizsystem vollflächig an der Außenwand
- Strahlungsoptimierter Heizkörper: Abmessungen des Heizkörpers (B x H) = 1 m x 1 m in Mitte Außenwand
- Wandtemperierung: Heizsystem über die gesamte Breite der Außenwand in 5 cm Höhe mit einer Höhe von 10cm, d.h. Abmessungen des Heizkörpers (B x H) = 4 m x 0,1 m

Tabelle 50:

Nötige Oberflächentemperaturen der Heizsysteme, um in Raummitte eine mittlere Strahlungstemperatur von 24 °C zu erzeugen und während den Versuchen gemessene Oberflächentemperaturen der Heizsysteme.

Heizsysteme	Oberflächentemperatur	
	Für 24 °C mittlere Strahlungstemperatur nötig	Im Versuch gemessen
Wandheizungen	45 °C	23 °C
Strahlungsheizkörper	150 °C	44 °C
Wandtemperierung	200 °C	50 °C

Die in diesem vereinfachten Beispiel für eine mittlere Strahlungstemperatur von 24°C nötigen Oberflächentemperaturen liegen weit über den gemessenen. Unter den nötigen Oberflächentemperaturen würden sich jedoch die Raumluft und die übrigen Oberflächentemperaturen der Raumumschließungsflächen derart ändern, dass eine komplexere Betrachtungsweise notwendig würde. Für eine Abschätzung der Größenordnungen für die Erzielung des gewünschten Effekts gibt sie jedoch einen brauchbaren Anhaltspunkt.

Unter den vorgegebenen Bedingungen in den Messräumen ist letztlich der Effekt, Behaglichkeit trotz niedriger Raumlufttemperaturen zu gewährleisten, in Raummitte nicht erreichbar.

5.7.6 Zusammenfassung zur Behaglichkeitsuntersuchung

Mit Hilfe von Messungen wurde der Einfluss der 4 verschiedenen Heizsysteme auf die thermische Behaglichkeit in Räumen ausgewertet und verglichen. Diese Heizsysteme haben gemein, dass sie in der Denkmalpflege eingesetzt werden und ihre Hersteller eine positive Auswirkung ihrer Funktionsweise auf den Energieverbrauch und die Behaglichkeit im Raum versprechen. Vor allem der Einfluss der Strahlungstemperatur soll bei diesen Systemen erhöhte thermische Behaglichkeit trotz verminderter Raumlufttemperatur ermöglichen.

Verglichen wurden folgende Messgrößen:

1. Thermische Behaglichkeit nach DIN EN ISO 7730 durch die Werte für PMV und PPD nach Fanger und für die Bewertungsgrößen Zugluftrisiko, vertikaler Lufttemperatur-Unterschied, Fußbodentemperatur und Asymmetrie der Strahlungstemperatur.
2. Äquivalenttemperatur nach Mayer und Schwab.
3. Horizontale und vertikale Verteilung der Lufttemperatur im Raum.
4. Verteilung der Strahlungstemperatur.

Die Auswertung der Ergebnisse zeigt, dass keines der untersuchten Heizsysteme eine deutliche Verbesserung der Behaglichkeit nach DIN EN ISO 7730 erreicht. Die Untersuchungen zur thermischen Behaglichkeit wurden jedoch nur in 2 m Entfernung zur Außenwand ermittelt. Ein größerer Einfluss der Heizsysteme auf die Behaglichkeit ist nahe der Außenwand, durch die höheren Strahlungstemperaturen der jeweiligen Heizsysteme im Vergleich zum elektrischen Heizkörper zu erwarten, konnte aber durch die geführten Strahlungstemperaturmessungen nicht bestätigt werden, da die Bilanz des Strahlungsaustauschs sich in zu geringem Maße zwischen den Varianten verändert.

Die deutlichsten Differenzen der Heizsysteme untereinander wurden bei den Vergleichen der Fußbodentemperatur und des vertikalen Lufttemperatur-Unterschiedes gemessen. Die Fußbodentemperatur konnte durch die Wandtemperierung mit einer Verbesserung um 2 °C in Raummitte am deutlichsten erhöht werden, gefolgt vom Strahlungsheizkörper mit 0,9 °C, der Wandheizung 2 mit 0,6 °C und Wandheizung 1 mit 0,1 °C. Hierzu ist aber zu erwähnen, dass, wie aus Erfahrungen mit den elektrischen Vergleichsmessungen ersichtlich wurde, die Wandtemperierung und die Wandheizung 2 raumbedingt eine günstigere Ausgangssituation für Verbesserungen der genannten Kriterien hatten.

Beim vertikalen Lufttemperatur-Unterschied wird die Differenz zwischen der Lufttemperatur in Kopfhöhe (170 cm) und Knöchelhöhe (10 cm) betrachtet. Auch hier konnte die Wandtemperierung mit einem Unterschied von 1,7 °C zum elektrischen Heizkörper die größte Verbesserung erreichen und den verti-

kalen Lufttemperatur-Unterschied auf 0 °C reduzieren. Die Wandheizung 2 erreichte eine Verbesserung um 0,9 °C, der Strahlungsheizkörper um 0,8 °C und die Wandheizung 1 konnte den vertikalen Lufttemperatur-Unterschied um 0,7 °C verringern.

Die Messergebnisse der Äquivalenttemperatur zeigen keine Verbesserung der thermischen Behaglichkeit in Raummitte.

Die Verteilung der Lufttemperaturen im Raum war bei allen untersuchten Heizsystemen gleichförmig.

Das von den Heizungsherstellern angestrebte Ziel, die Behaglichkeit im Raum im Vergleich zu herkömmlichen Heizkörpern deutlich zu erhöhen, konnte durch die vorliegenden Untersuchungen messtechnisch nicht bestätigt werden.

5.8 Umbau / Optimierung des experimentellen Aufbaus

Die Optimierung der Wandheizung mit Entkopplungsmatte erfolgte in den parallel an der Freilandversuchsstelle in Holzkirchen stattfindenden Untersuchungen (siehe Kapitel 5.2). Diese zeigten, dass die erhoffte Energieeinsparung durch die Entkopplungsmatte allein nur gering ausfallen. Es wurden auch verschiedene Varianten mit Dämmung betrachtet, die zeigen, dass bei Wandheizungen schon eine geringe Dämmstärke zu erheblicher Energieeinsparung führen kann. Dies wurde auch durch Variantenrechnungen (siehe hierzu Kapitel 5.4.3) mittels hygrothermischer Bauteilsimulation untersucht und bestätigt.

5.9 Zusammenfassung der wissenschaftlich technischen Ergebnisse des Forschungsprojekts

Ziel des Projektes war es durch vergleichende Untersuchungen verschiedene Wandheizungssysteme zu bewerten in Hinsicht auf ihre energetische und exergetische Effizienz, in Hinsicht auf Komfort-Wirkung sowie das Potential zur Schadensvermeidung in historischen Bauten. Dadurch sollen neue Wege aufgezeigt werden für die energetische Altbausanierung und Denkmalpflege, indem Planern, Bauherren und Behörden bessere Grundlagen für Planungsentscheidungen an die Hand gegeben werden.

5.9.1 Exergetische Betrachtung

Die exergetische Bewertung ermöglicht eine Vergleichbarkeit von den unterschiedlichen Wärmeübergabesystemen in Hinblick auf die Exergieeffizienz. Hierbei lässt sich feststellen, dass die Niedertemperaturwandheizungen aus exergetischer Sicht wesentlich effizienter sind als die Strahlungsheizung und die Wandtemperierung. Jedoch erschließt die Verwendung eines effizienten Wärmeübergabesystems nur einen begrenzten Teil der exergetischen Optimierung. Vielmehr muss die gesamte Wärmeversorgungskette von der Erzeugung bis hin zur Verteilung und Übergabe in den Raum in die Überlegung mit einbezogen werden. Hierbei stellt die Nutzung der Wärmepumpe zur Deckung des niedrig-exergetischen Heizbedarfs im Gebäude eine optimale und effiziente Lösung dar, da diese Wärmeerzeugungssysteme in der Regel auf niedrigem Temperaturniveau und mit hohen Leistungszahlen arbeiten

Die untersuchte Sole-Wärmepumpe stellt eine effiziente Alternative zum Hackschnitzel BHKW dar. Sie besitzt den Vorteil der Nutzung frei verfügbarer Umweltenergie, in Form von Erdwärme. Die Sole-Wärmepumpe erreicht mögliche Leistungszahlen zwischen 4-5 [Fraunhofer ISE, 2011] in Abhängigkeit von den geforderten Temperaturniveaus. Umso geringer die Vorlauftemperatur, desto höher ist die Leistungszahl der Anlage. Insbesondere Flächenheizsysteme, wie z.B. Wandheizungen sind ideale Wärmeübergabesysteme, da sie mit Vorlauftemperaturen von rund 35 °C arbeiten. Damit kann eine optimale Anpassung von Angebot und Nachfrage erzielt und damit die Verluste auf ein Minimum reduziert werden. Auch exergetisch ist die Wärmepumpe als sehr positiv zu bewerten, da der eingesetzte Energieträger Umweltwärme mit einem Temperaturniveau von rund 10°C einen sehr geringen Exergiefaktor = 0,01 im Vergleich zu Gas und Hackschnitzel (rund 1) besitzt.

5.9.2 Energetische Betrachtung

Der energetische Vergleich der Systeme zeigt, dass die beiden Niedertemperatur-Wandheizungen im Vergleich zu den herkömmlichen konvektiven Heizkörpern in einem ähnlichen Bereich liegen.

Der strahlungsoptimierte Heizkörper ist aus energetischer Sicht gleich zu beurteilen, wie ein konvektiver Heizkörper.

Die Bauteiltemperierung nach Großschmidt, die mit hoher Vorlauf­temperatur betrieben wurde, um auch im Winter komfortable und vergleichbare Temperaturen zu erreichen wie alle anderen Systeme schneidet energetisch am schlechtesten ab.

Schwierig bei allen derartigen, vergleichenden Untersuchungen in realen Bestandsgebäuden ist, dass die Räume, in der Alten Schäfflerei sogar trotz thermischer Entkoppelung und Dämmmaßnahmen, nicht komplett identisch ausgebildet werden konnten. Aus diesem Grund wurde hier ein neuer Ansatz gewählt und der Versuchsablauf dahingegen geändert, dass die Energieverbräuche der eingebauten Wandheizungssysteme für jeden Raum mit einer Referenzbeheizung mit einem elektrischen Heizkörper, der in die Fensternische platziert wurde, verglichen wurden.

Bei der Erfassung der Energieverbräuche wurde auf konstante Randbedingungen in beiden Messphasen geachtet, was naturgemäß im Bestand nur in einem bestimmten Rahmen möglich ist. Die für den Vergleich herangezogenen Kennwerte wurden täglich berechnet und über mehrere Wochen gemittelt. Mit dem Mittelwert wurden die Vergleichskennwerte für die jeweiligen Heizsysteme bezogen auf die elektrische Heizkörperleistung berechnet.

Der Messraum 1 mit dem als „Strahlungsheizkörper“ bezeichneten Heizkörper hat eine gemessene Leistungsabgabe, die sehr nahe der des entsprechenden elektrischen Heizkörpers liegt. Der „Strahlungsheizkörper“ ist bauartbedingt rückseitig gedämmt, nicht aber an den Heizkörperseiten, und wird relativ dicht in die Heizungs­nische eingebaut. Aus diesem Grund erhitzt sich der Luftraum hinter dem Heizkörper. Die rückseitige Dämmung bringt hier deshalb keine merkliche Energieeinsparung.

Der Messraum 2 mit der Wandtemperierung als nahezu vollflächig montierte Wandheizung mit spezieller Entkopplungsmatte und parallelem Durchströmungsprinzip hat einen erhöhten gemessenen Energieverbrauch gegenüber der Vergleichsmessung mit elektrischem Heizkörper. Aufgrund der Energieabgabe direkt im Wandaufbau ist wegen des fehlenden konvektiven Übergangswiderstandes im Vergleich zur Beheizung im Raum ist auch ein erhöhter Transmissionswärmeverlust zu erwarten. Berücksichtigt man allerdings den durch den Wandheizungsaufbau zusätzlichen gegebenen Wärmewiderstand, so wird dieser Effekt aber gerade kompensiert und es ergibt sich ein nahezu exakt gleicher Energiebedarf mit diesem System im Vergleich zur Nutzung eines Heizkörpers im Raum. Neben der energetischen Betrachtung sollten bei der Planung auch mögliche positive Effekte zum Schutz der Bausubstanz und gewisse Vorteile in Bezug auf die Behaglichkeit berücksichtigt werden.

Der Messraum 3 mit der Wandheizung durch Bauteiltemperierung mit in der Wand integrierten Heizrohren hat einen deutlich erhöhten Energieverbrauch gegenüber der Vergleichsmessung mit elektrischem Heizkörper. Dies ist zum einen darin begründet, dass hier Wärmeabgabe in der Bestandswand stattfindet (ohne zusätzliche dämmende Schichten) und dass hier die Wärmeabgabe sehr

lokal begrenzt auf einem hohen Temperaturniveau erfolgt. Positive Effekte zum Schutz der Bausubstanz und konservatorische Aspekte können eine derartige Temperierung aber durchaus sinnvoll machen. Dabei ist aber zu überlegen, Bauteiltemperierung vor allem zur Schadensvermeidung oder für museale Nutzung mit konservatorischem Hintergrund einzusetzen und entsprechend zu regeln, weniger jedoch für die Beheizung von Arbeits- oder Wohnräumen.

Der Messraum 4 mit einer Wandheizung mit vorgefertigten Lehmbauplatten wurde als ebenfalls nahezu vollflächig montierte Wandheizung mit in vorgefertigten Lehmbauplatten integrierten Heizrohren ausgeführt und wie die Wandflächenheizung in Raum 2 aufgrund der Energieabgabe direkt im Wandaufbau wegen des fehlenden konvektiven Übergangswiderstandes einen erhöhten gemessenen Energieverbrauch gegenüber der Vergleichsmessung mit elektrischem Heizkörper. Berücksichtigt man den durch den Wandheizungsaufbau zusätzlichen gegebenen Wärmewiderstand, so wird dieser Effekt aber reduziert. Da die Dämmwirkung dieses Wandheizungsaufbaus aber im Vergleich zum System in Raum 2 aber etwas geringer ausfällt ergibt sich doch noch ein leicht erhöhter Verbrauch im Vergleich zur Nutzung eines Heizkörpers im Raum. Aber auch hierbei sollten bei der Bewertung neben der energetischen Betrachtung auch mögliche positive Effekte zum Schutz der Bausubstanz und gewisse Vorteile in Bezug auf die Behaglichkeit berücksichtigt werden.

5.9.3 Komfort

Mit Hilfe von Messungen wurde der Einfluss der 4 verschiedenen Heizsysteme auf die thermische Behaglichkeit in Räumen ausgewertet und verglichen. Diese Heizsysteme haben gemein, dass sie in der Denkmalpflege eingesetzt werden und ihre Hersteller eine positive Auswirkung ihrer Funktionsweise auf den Energieverbrauch und die Behaglichkeit im Raum versprechen. Vor allem der Einfluss der Strahlungstemperatur soll bei diesen Systemen erhöhte thermische Behaglichkeit trotz verminderter Raumlufttemperatur ermöglichen.

Die Auswertung der Ergebnisse zeigt, dass keines der untersuchten Heizsysteme eine deutliche Verbesserung der Behaglichkeit nach DIN EN ISO 7730 erreicht. Die Untersuchungen zur thermischen Behaglichkeit wurden jedoch nur in 2 m Entfernung zur Außenwand ermittelt. Ein größerer Einfluss der Heizsysteme auf die Behaglichkeit ist nahe der Außenwand, durch die höheren Strahlungstemperaturen der jeweiligen Heizsysteme im Vergleich zum elektrischen Heizkörper zu erwarten, konnte aber durch die geführten Strahlungstemperaturmessungen nicht bestätigt werden, da die Bilanz des Strahlungsaustauschs sich in zu geringem Maße zwischen den Varianten verändert.

Die deutlichsten Differenzen der Heizsysteme untereinander wurden bei den Vergleichen der Fußbodentemperatur und des vertikalen Lufttemperatur-Unterschiedes gemessen. Die Fußbodentemperatur konnte durch die Wandtemperierung mit einer Verbesserung um 2 °C in Raummitte am deutlichsten erhöht werden, gefolgt vom Strahlungsheizkörper mit 0,9 °C, der Wandheizung 2 mit 0,6 °C und Wandheizung 1 mit 0,1 °C. Hierzu ist aber zu erwäh-

nen, dass, wie aus Erfahrungen mit den elektrischen Vergleichsmessungen ersichtlich wurde, die Wandtemperierung und die Wandheizung 2 raumbedingt eine günstigere Ausgangssituation für Verbesserungen der genannten Kriterien hatten.

Beim vertikalen Lufttemperatur-Unterschied wird die Differenz zwischen der Lufttemperatur in Kopfhöhe (170 cm) und Knöchelhöhe (10 cm) betrachtet. Auch hier konnte die Wandtemperierung mit einem Unterschied von 1,7 °C zum elektrischen Heizkörper die größte Verbesserung erreichen und den vertikalen Lufttemperatur-Unterschied auf 0 °C reduzieren. Die Wandheizung 2 erreichte eine Verbesserung um 0,9 °C, der Strahlungsheizkörper um 0,8 °C und die Wandheizung 1 konnte den vertikalen Lufttemperatur-Unterschied um 0,7 °C verringern.

Die Messergebnisse der Äquivalenttemperatur zeigen keine Verbesserung der thermischen Behaglichkeit in Raummitte.

Die Verteilung der Lufttemperaturen im Raum war bei allen untersuchten Heizsystemen gleichförmig.

Das von den Heizungsherstellern angestrebte Ziel, die Behaglichkeit im Raum im Vergleich zu herkömmlichen Heizkörpern deutlich zu erhöhen, konnte durch die vorliegenden Untersuchungen messtechnisch nicht bestätigt werden.

5.9.4 Schadensvermeidung

Wandheizungen stellen gerade für historische Bauten in Hinblick auf die Vermeidung von Schäden eine interessante Alternative zu herkömmlichen Wärmeübergabesystemen wie Konvektoren dar. Durch die Beheizung der Wand werden bauphysikalisch kritische Stellen der Baukonstruktion erwärmt, sodass das Risiko von Feuchteschäden an diesen Punkten reduziert wird, siehe und . Hier ist insbesondere die Bauteiltemperierung nach Großes Schmidt zu nennen, die die Schadensvermeidung als vornehmliches Ziel hat. Da hier aber auch ggf. höhere Wärmeverluste auftreten können, wie die vorliegenden Untersuchungen gezeigt haben, sind Energieeffizienz und konservatorischer Nutzen im Einzelfall gegeneinander abzuwägen.

In Hinblick auf den Einsatz von Flächenheizungssystem in Kombination mit Innendämmungen sollten die Potentiale der Schadensvermeidung in der Konstruktion weiter untersucht werden. Auch das instationäre Gebäudeverhalten bei einer temporären Nutzung sollte näher betrachtet werden.

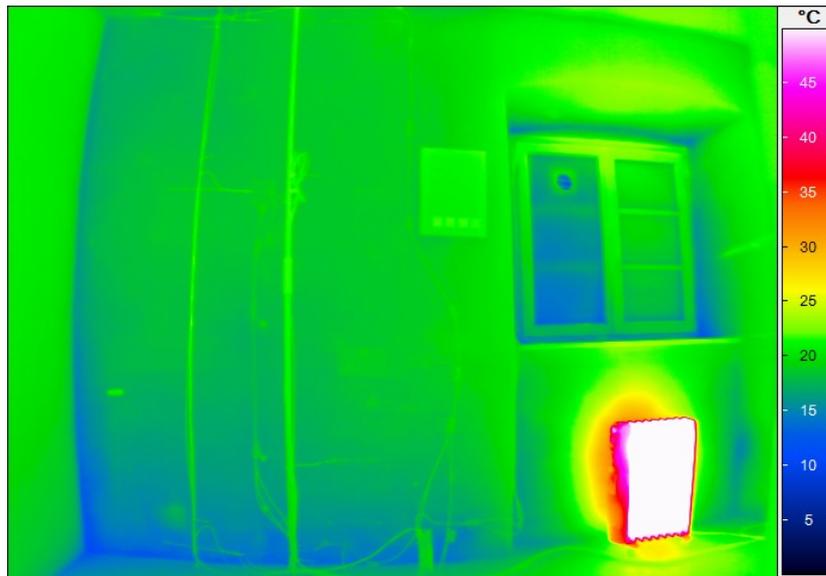


Bild 199:
Bei der Beheizung von Messraum 3 mit einem konvektiven Heizkörper zeigt sich die Ausprägung von geometrischen Wärmebrücken an den Raumecken deutlich. Diese Punkte sind potentiell gefährdet in Bezug auf mikrobielles Wachstum.

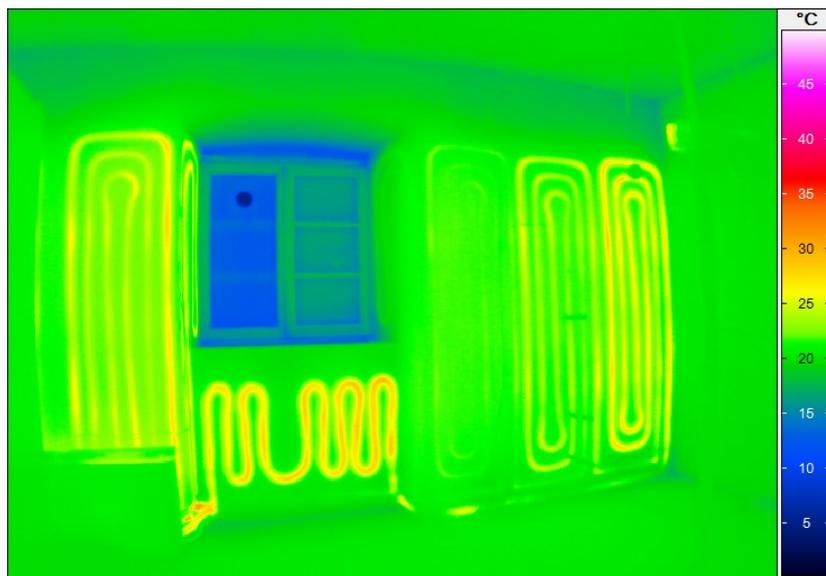


Bild 200:
Durch die homogene Verteilung der Wärme an der Außenwand werden Risiken von Feuchteschäden und mikrobiellem Befall an Wärmebrücken reduziert.

Auch in Hinblick auf die Schaffung eines konstanten Raumklimas, das für die Erhaltung von Sammlungen in Museen und historischen Gebäuden von Interesse ist, sind Wandheizungen wegen ihrer Trägheit und der je nach Ausprägung mehr oder weniger homogenen Verteilung der Wärme im Raum hilfreich. Im Fall eines Einsatzes im Museum muss jedoch ein Abwägungsprozess stattfinden, ob das Mikroklima vor einer beheizten Wand ein Risiko für ein Kunstwerk

darstellt oder nicht. Bei einer Aufstellung vor der Wand müssen sonst ggf. Maßnahmen zum Schutz der Ausstattung oder des Kunstwerkes getroffen werden.

Insbesondere bei Innendämmungen können Wandheizungen von Vorteil sein. Die nachträgliche Innendämmung führt bei niedrigen Außentemperaturen zu einer Absenkung der Temperatur der Außenwand. Dies kann dazu führen, dass die Trocknung der Wand nach außen und infolge des Diffusionswiderstandes der Innendämmung auch die nach innen deutlich reduziert wird. Bei nicht ausreichendem Regenschutz kann damit durch die Innendämmung ein außenseitiger Frostschaden hervorgerufen werden. Ist der Aufbau der Innendämmung dagegen zu diffusionsoffen, führt dies gelegentlich zu Tauwasser auf der Innenseite der Bestandswand und damit zu einer kontinuierlichen Auffeuchtung. Die Innendämmung kann bei unsachgemäßem Aufbau aber auch Schimmelpilzprobleme mit sich bringen. Hier sind vor allem drei Ursachen zu nennen, die Hinterströmung der Dämmung mit Raumluft, Fehlstellen in der Dämmung und die Wärmebrückenwirkung von einbindenden Wänden oder Decken. All diese mit einer Innendämmung verbundenen Risiken werden durch den Einsatz einer Wandheizung auf der Außenwand deutlich entschärft bzw. gegebenenfalls komplett vermieden.

5.9.5 Vorschläge zur Optimierung der Systeme

Wandheizungen haben gegenüber Raumluftheizungen aus energetischer Sicht grundsätzlich den Nachteil, dass der Wärmeübergang im Wandaufbau stattfindet, sodass der Wärmeübergangswiderstand von der Raumluft zur Wand (typischerweise $0,125 \text{ m}^2\text{K/W}$) nicht nur wegfällt, sondern in umgekehrter Richtung zur Beheizung des Raumes aufgebracht werden muss. Dies ist vor allem bei niedrigem Dämmstandard der Wand von Bedeutung, da hier die Wärmeübergangswiderstände zum Teil einen erheblichen Teil des Gesamttransmissionswiderstandes ausmachen. Geht man z.B. bei einem alten Gebäude vom Mindestdämmwert (U-Wert von $1,5 \text{ W/m}^2\text{K}$) aus, beträgt der Anteil des inneren Wärmeübergangskoeffizienten am Gesamtwärmewiderstand immerhin fast 20 %. Eine Dämmschicht zwischen altem Wandaufbau und Wandheizung wird nicht nur die Energieverluste reduzieren, sie verringert auch den diesbezüglichen energetischen Nachteil einer Wandheizung ganz wesentlich, sodass eher die Vorteile einer Wandheizung zutage treten (siehe auch Kapitel (5.12.4)

Eine derartige zur Wandseite hin gut gedämmte Wandheizung kann sich vor allem auch bei instationärer Betriebsweise als vorteilhaft erweisen, da über die damit verbundene relativ große Heizfläche eine recht schnelle Aufheizung des Raumes ermöglicht wird. Dies gestattet deutlich bessere Anpassungen an das Nutzerverhalten.

Die mit in die Untersuchungen einbezogene Bauteiltemperierung muss hier besonders betrachtet werden. Wie die messtechnischen Untersuchungen belegen, wird es damit kaum gelingen, eine Energie sparende Beheizung von Räumen zu betreiben. Hier sollte bei deren Einsatz vor allem die Schadensvermeidung im

Vordergrund stehen. Die Bauteiltemperierung ist in vielen Fällen eine sinnvolle und angebrachte Maßnahme, die, richtig eingesetzt Schäden vermeiden und damit auch wertvolle Kultursubstanz erhalten kann. Generell sollte eine Temperierung aber nicht ungeregt betrieben werden, sondern so gesteuert werden, dass möglichst nur so viel Energie in die Wand eingetragen wird, wie zur Schadensvermeidung erforderlich ist. Z.B. im Falle von Sommerkondensation wäre eine Regelung über die Oberflächentemperatur der kritischen Stelle im Bauwerk nahe liegend, die die Oberflächenfeuchte gerade soweit absenkt dass kein mikrobielles Wachstum möglich ist. Analoge Regelungsansätze können auch im Falle von aufsteigender Feuchte und Salzproblematik entwickelt werden. Sofern höhere Raumlufttemperaturen erwünscht sind, als sie durch diesen betrieb erreicht werden, ist es aus energetischer Sicht stets günstiger den restlichen Bedarf über eine zusätzliche Heizung zu liefern.

5.9.6 Methodik der vergleichenden Untersuchung

Das vorliegende Projekt hat aufgezeigt, wie komplex vergleichende energetische Untersuchungen in realen Bauten sind. Trotz großer Anstrengungen vergleichbare Verhältnisse herzustellen, – trotz annähernd gleicher Größe der Räume, definierter Beheizung, Lüftung, Dämmung zu den angrenzenden Räumen, Dämmung des Bodens und der Decke, äußerer Verschattung während der Messperiode, keiner Nutzung der Räume durch Bewohner sowie Lage in unmittelbarer Nachbarschaft im selben Baukörper, – beeinflussen zahlreiche, teils unbekannt Randbedingungen das Ergebnis massiv.

Grundsätzlich müssen bei vergleichenden Untersuchungen die Randbedingungen definiert sein, Unsicherheiten und Grenzen der Übertragbarkeit müssen klar benannt werden. Alle vergleichenden Messungen, die in realen, genutzten Gebäuden stattfinden, sind in Hinsicht auf ihre Aussagekraft mit großer Vorsicht zu betrachten.

Essentiell für die vergleichende Untersuchung in realen Gebäuden ist eine Nullmessung mit einem einheitlichen System vor dem Einbau der neuen Systeme. Zeigt diese Nullmessung größere Unterschiede, wie dies hier der Fall war, bleibt nur eine Bilanzierung des jeweiligen Raums und der Vergleich mit einem einheitlichen Referenzsystem, hier elektrischen Konvektoren-Heizkörpern.

Die Alternative zu Realversuchen stellen rechnerische Untersuchungen dar. Durch Simulationen kann beispielsweise die Anwendung der vorliegenden Systeme oder deren Übertragung auf andere Bauweisen oder Baualtersklassen bewertet werden. Doch gerade die Realversuche zeigen, wie sehr einzelne Randbedingungen (wie Lüftungsverhalten, lokale Wärmebrücken, Nutzung, Regelung der Systeme, etc.) zum Teil sehr geringe Unterschiede in der energetischen Effizienz der verschiedenen Heizungssysteme überlagern können.

6 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Inhalte des Projektes wurden entsprechend den im Projektantrag genannten Zielen erarbeitet und untersucht. Wegen zahlreicher Schwierigkeiten, auch solcher, auf die das Fraunhofer IBP keinen Einfluss hatte, wie der Umzug des Zentrums und damit auch des Forschungsprojektes von Weyarn nach Benediktbeuern, hat sich die Bearbeitung um 2 Jahre verlängert. Diese beiden extra Jahre waren notwendig wegen aufwendiger Fehlersuche und Fehlerbeseitigung in der Regelung der Heizungssysteme wie auch in der Aufzeichnung der Messdaten.

Das Ziel eines Vergleichs der Systeme aus energetischer, exergetischer Sicht, sowie in Hinblick auf Komfort und Schadensvermeidung wurde erreicht.

7 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertung des Ergebnisses

Durch diese Untersuchungen stehen Planern, Behörden und Bauherren nun fundierte Ergebnisse als Entscheidungsgrundlage für den Einsatz von Wandheizungssystemen in der energetischen Altbausanierung und Denkmalpflege zur Verfügung.

8 Fortschritt Dritter während der Projektlaufzeit

Im Rahmen des von der EU geförderten Projekts „Cool-Bricks“ wurden ähnliche, vergleichende Untersuchungen an Gebäuden in Hamburg durchgeführt. Hier wurden jedoch genutzte Wohnungen messtechnisch begleitet. Die Ergebnisse dieses Vorhabens sind zum aktuellen Zeitpunkt noch nicht umfassend publiziert.

In Bezug auf die Bauteiltemperierung startete im Jahr 2012 ein Vorhaben der VW-Stiftung mit dem Titel „Sammlungen erhalten – Die Temperierung in Museen als Mittel der Präventiven Konservierung“. Im Rahmen dieses Projektes finden Messungen in mehreren Museen in Bayern statt, die mit einer Temperierung ausgestattet sind. Auch hier steht eine Publikation der Ergebnisse noch aus.

9 Erfolgte / geplante Veröffentlichungen der Projektergebnisse

Da bei der Durchführung Messungen immer wieder technische Probleme auftraten, wurde zunächst nur das Konzept der Untersuchungen als solches in einem Vortrag vorgestellt. Verschiedene rechnerische Untersuchungen wurden bereits publiziert. Eine weitergehende Veröffentlichung der umfangreichen Ergebnisse des Vorhabens in verschiedenen Print und Online-Medien sowie auf Konferenzen ist geplant.

Übersicht über die erfolgten Veröffentlichungen:

Krus, Martin & Kilian, Ralf: Calculative investigations on the "Temperierung" wall heating system – Hygric and thermal aspects. In: Proceedings of the 1st Central European Symposium on Building Physics, 13-15. September 2010, Cracow – Lodz, Poland 2010

Krus, M.; Sedlbauer, K.: Innendämmung und Schimmelpilzproblematik. Internationaler Innendämmkongress, 20.-21. Mai 2011. Dresden Tagungsunterlage S. 53-64. ISBN 3-940117-07-06.

Krus, M.; Kilian, R.; Bichlmair, St.; Wehle, B.; Sedlbauer, K.: Schadensdiagnostik und Bewertung in historischen Gebäuden. In: Fouad, Nabil (Hrsg.): Bauphysik-Kalender 2012. Berlin: Ernst & Sohn, 2012, S. 505-558.

Krus, M.; Kilian, R.: Rechnerische Untersuchungen zur Wandtemperierung – Feuchtetechnische und Wärmetechnische Aspekte. Tagungsband Vierte deutsch-österreichische IBPSA Konferenz: „Gebäudesimulation auf den Größenskalen Bauteil, Raum, Gebäude, Stadtquartier“, 26. - 28. September 2012 in Berlin. S 46-52.

Krus, M.; Kilian, R.: Die Bauteiltemperierung – Untersuchungen des Feuchtetransports und Energieverbrauchs durch hygrothermische Simulation am Beispiel der Renatuskapelle. Schriftenreihe des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege – die Temperierung; Nr. 8; 2014; S. 47 – 52. Volk Verlag München; ISBN978-86222-144-8.

Kilian, R.; Krus, M.; Sedlbauer, K. Accuracy Assessment of Hygrothermal Building Simulations of Historic Buildings. Proceedings of 10th Nordic Symposium on Building Physics. 15-19 June 2014 Lund, Sweden, p. 664-669.

Vorstellung des Projektes auf Tagungen im Rahmen von Vorträgen:

Britta v. Rettberg und Ralf Kilian: „Energetische Optimierung des Obergeschosses der „Alten Schäferei“ im Kloster Benediktbeuern“. DBU-Fachkolloquium „Zukunftsweisende Sanierung denkmalgeschützter Altbausubstanz“ 14.-15. September 2010, Zentrum für Umweltkommunikation, Osnabrück.

Ralf Kilian: „Préservation du patrimoine et de l’efficacité énergétique : le rôle des outils de simulation appliqués aux bâtiments. Heritage preservation and energy efficiency : the role of building simulation tools“. TECHA conference, Arles, September, 21st 2010.

Ralf Kilian: “Fraunhofer Centre Benediktbeuern – Showcasing energy efficiency retrofit.” ENERGY EFFICIENCY IN TRADITIONAL BUILDINGS. Bringing together research, industry and practitioners. Tuesday, 11 September 2012 at Our Dynamic Earth, Edinburgh, Scotland.

Ralf Kilian: Indoor Environment in Historic Buildings – Problems and Possibilities for Energy Efficiency. International Symposium on Monitoring Techniques for Cultural Heritage, Taichung, 23 October 2012, Taiwan.

Ralf Kilian, Maximilian Benter, Martin Krus, Doris Roesler, André Thiel, Martina Hackl, Johann Gottschling, Stefan Bichlmair und Christine Milch: „Forschungsprojekt „Innovative Wandheizungssysteme“ in der Alten Schäferei im Fraunhofer-Zentrum Benediktbeuern“. Tagung „Temperierung – Zum aktuellen Forschungsstand“ im Rahmen des Forschungsvorhabens „Sammlungen erhalten – Die Temperierung als Mittel der Präventiven Konservierung – Eine Bewertung“. 12. November 2012, Benediktbeuern, Zentrum für Umwelt und Kultur.

Britta v. Rettberg: „Fraunhofer-Zentrum für energetische Altbausanierung und Denkmalpflege Benediktbeuern“. 9. Österreichischer Altbautag, 25. November 2010, Salzburg.

Britta v. Rettberg: „Fraunhofer-Zentrum für energetische Altbausanierung und Denkmalpflege Benediktbeuern“. 19. Kongress Städtebaulicher Denkmalschutz in Quedlinburg, 20. – 21. September 2011).

Britta v. Rettberg: „Fraunhofer-Zentrum für energetische Altbausanierung und Denkmalpflege Benediktbeuern“. GCTP-Fachtagung DBU 16-17. Februar 2012, Osnabrück.

Präsentation des Projektes im Rahmen von Führungen durch die Alte Schäfflerei in Benediktbeuern (Auswahl):

Tag des offenen Denkmals in der alten Schäfflerei in Benediktbeuern in den Jahren 2010, 2011, 2012 und 2013.

Im Rahmen der Tagung: Das modulare Nullenergie-Depot. Neue Wege für Depot- und Archivbauten. Benediktbeuern am 12. Mai 2011.

Im Rahmen der Tagung „Temperierung – Zum aktuellen Forschungsstand“ im Rahmen des Forschungsvorhabens „Sammlungen erhalten – Die Temperierung als Mittel der Präventiven Konservierung – Eine Bewertung“. 12. November 2012, Benediktbeuern, Zentrum für Umwelt und Kultur.

Treffen der Working Group „WG 8 Energy Efficiency“ des CEN TC 346 „Conservation of Cultural Property“ in Benediktbeuern im Herbst 2013.

Treffen des EU-Projektes „EFFESUS“ im Januar 2015 in Benediktbeuern.

Geplante Veröffentlichungen:

IBP-Mitteilung zu den Projektergebnissen, Artikel in Baufachmagazinen wie der Bausubstanz, Bautenschutz und Bausanierung, sowie Beiträge auf nationalen und internationalen Tagungen.

Darüber hinaus wird das Projekt und Kernergebnisse auf der Internetseite des Fraunhofer-Zentrum Benediktbeuern (denkmalpflege.fraunhofer.de) präsentiert und bei weiteren Veranstaltungen und Führungen im Zentrum gezeigt.

Messeauftritte:

10. Münchner Wissenschaftstage, 2010
denkmal 2010, Messe Leipzig
BAU 2011, Messe München
denkmal 2012, Messe Leipzig
denkmal 2014, Messe Leipzig

Literaturverzeichnis

- [1] Kotterer, Michael; Großschmidt Henning; Body, Frederick; Kippes, Wolfgang: Klima in Museen und historischen Gebäuden, Wissenschaftliche Reihe Schönbrunn, Band 9, 2004.
- [2] [Holmberg 2004] Holmberg, Jan: Comparison of Tempering and Conventional Convection Heating. 2004.
- [3] Käferhaus, Jochen: Kartause Mauerbach: Auf der Suche nach der schadenspräventiven Heizung für historische Gebäude. 2004.
- [4] Künzel, Helmut; Holz, Dieter: Bauphysikalische Untersuchungen in unbeheizten Gebäuden alter Bauart, IRB Nr. T 2396, Holzkirchen 1991.
- [5] Helmut Künzel: Bauphysik und Denkmalpflege, Stuttgart 2007
- [6] Kilian, Ralf: Die Wandtemperierung in der Renatuskapelle in Lustheim – Auswirkungen auf das Raumklima. Diplomarbeit Technische Universität München, München 2004.
- [7] Helmut Künzel: Der Bausachverständige, Heft 2, April 2007.
- [8] Löther, Thomas; Untersuchungen zur Temperierung in historischen Gebäuden. Diplomarbeit Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig, Norderstedt 2005
- [9] Kalmer, P.: Die Temperierung von Gebäuden. Untersuchung zur Wirtschaftlichkeit im Vergleich zu einem konventionell beheizten Gebäude mit vergleichbarer Nutzung. Probearbeit. München. 1994. Unveröffentlicht.
- [10] Freytag, O. Dr.: Erhalt und Nutzung temporär genutzter Gebäude. Vermeidung von Feuchteschäden durch Nutzung regenerativer Energiequellen. Abschlussbericht der Deutschen Bundesstiftung Umwelt, AZ 17430. Leipzig. 2005.
- [11] Schmidt, Dietrich; Sager, Christina; Schurig, Marlen; Torío Herena; Kühl, Lars; Fraunhofer-Institut für Bauphysik (Hrsg.), Institut für Gebäude- und Solartechnik: Projektverbund LowEx: Nutzung von regenerativen Energiequellen in Gebäuden durch den Einsatz von Niedrigexergiesystemen. IBP Bericht ES-342 01/2009.
- [12] Umwelterklärung 2010 der Einrichtungen im Kloster Benediktbeuern nach der EMAS-Verordnung Nr. 761/2001. Benediktbeuern, November 2010.
- [13] Kühler, Daniel; Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Universität Kassel: Beitrag der Kraft-Wärme-Kopplung zur rationellen Exergieversorgung von Gebäuden und Siedlungen – Vergleich unterschiedlicher Bewertungsmethoden; Masterarbeit, Dezember 2008.

- [14] DIN V 18599 [2011-12] "Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung.
- [15] Fraunhofer ISE (2011): Wärmepumpen Effizienz – Messtechnische Untersuchung von Wärmepumpenanlagen zur Analyse und Bewertung der Effizienz im realen Betrieb, Abschlussbericht Kurzfassung, 27.05.2011.
- [16] EnEV 2014 : Energieeinsparverordnung , in Kraft getreten am 01.05.2014.
- [17] Schwab, R. (2002): DRESS-MAN. Dummy REpresenting Suit for Simulation of huMAN heat-loss. In: VIP.
- [18] DIN EN ISO 7730, Januar 2013: 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.
- [19] Schneider, Klaus-Jürgen (Hrsg.): Bautabellen für Ingenieure 15. Auflage Düsseldorf, 2002.
- [20] Güttinger, Dipl.-Ing. (FH) Kurt; Güttinger Ingenieure (Hrsg.): Kloster Roggenburg – Wirtschaftlichkeitsbetrachtung und Energiekostenvergleich Raumerwärmungssysteme. Firmenbericht. Kempten, 12.06.2008.
- [21] Egger Wohlfühlklima (Hrsg.): Thermo Energetik – Gesundes Heizen, gesundes Kühlen. Produktblatt. Mils, 2009.
- [22] Großschmidt, Henning: Das temperierte Haus: Sanierte Architektur – behagliche Räume – „Großvitrine“. In: Wissenschaftliche Reihe Schönbrunn, Band 9. Wien, 2004.
- [23] Künzel, Dr.-Ing. Helmut (Verf.): Bauphysik und Denkmalpflege Teil 9 – Bauteiltemperierung nach Großschmidt. In: Fraunhofer IRB Verlag (Hrsg.): Der Bausachverständige, Ausgabe 2/2007. Köln, 2007.
- [24] WEM WANDHEIZUNGS-GMBH-1] Die WEM Lehmbauplatte (Art. 10013), WEM Wandheizungs-GmbH. Produktblatt.
- [WEM WANDHEIZUNGS-GMBH-2 Lehm-Oberputz, WEM Wandheizungs-GmbH. Produktblatt.
- [WEM WANDHEIZUNGS-GMBH-3 Lehm-Unterputz, WEM Wandheizungs-GmbH. Produktblatt.
- [25] WEM WANDHEIZUNGS-GMBH-4 WEM Klimatelement - Die Wandheizung aus Lehm für den Holz- und Trockenbau, WEM Wandheizungs-GmbH. Produktblatt.
- [26] DIN EN 60751: Industrielle Platin-Widerstandsthermometer und Platin-Temperatursensoren (IEC 60751:2008) Mai 2009.
- [27] EN ISO 7726: Umgebungsklima – Instrumente zur Messung physikalischer Größen (ISO 7726:1998). Juli 2001.

- [28] Ahlborn (Hrsg.): Gesamtkatalog – Messgeräte und Sensoren. Ausgabe 2009.
- [29] Kipp & Zonen: Bedienungsanleitung CMP Serie – Albedometer, Pyranometer. Version 0806. Delft, 2006.
- [30] Kobold Messring GmbH (Hrsg.): Bedienungsanleitung für Ultraschall Durchflussmesser/ -wächter/ -zähler/ -dosierer – Typ DUK. Hofheim, 2009.
- [31] Schmidt Technology (Hrsg.): Schmidt Strömungssensor SS 20.500 Gebrauchsanweisung. St. Georgen, 2007. S.15.
- [32] Künzel, H.M.: Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten. Dissertation, Universität Stuttgart, 1994.
- [33] DIN EN 15026: Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen - Bewertung der Feuchteübertragung durch numerische Simulation
- [34] Holm, A.; Radon, J.; Künzel, H. M.; Sedlbauer, K.: Berechnung des hygrothermischen Verhaltens von Räumen. WTA Schriftenreihe (2004), H. 24, S. 81–94.
- [35] Lengsfeld, K., Holm, A. 2007. Entwicklung und Validierung einer hygrothermischen Raumklima-Simulationssoftware WUFI® Plus, Bauphysik 29 (2007), H. 3, S. 178-186.
- [36] ASHRAE Standard 140: Building Thermal Envelope and Fabric Load Tests. 2007.
- [37] Antretter, F., Sauer, F., Schöpfer, T., Holm, A.: Validation of a hygrothermal whole building simulation software. Tagungsunterlage: 12th International Building Performance Simulation Association 2011, Nov 14-17, 2011, Sydney, Australia.
- [38] DIN EN 12831: Heizungsanlagen in Gebäuden – Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast (EN 12831:2003).
- [39] Eymard, R., Gallouët, T.R., Herbin, R.: The Finite volume method. Handbook of numerical Analysis, Vol. VII (2000), S. 713–1020. North-Holland, Amsterdam.
- [40] DIN EN ISO 10211: Wärmebrücken im Hochbau – Wärmeströme und Oberflächentemperaturen – Detaillierte Berechnungen (EN ISO 10211:2007).
- [41] ZUB Argos® 2012, Software, ZUB Systems GmbH
- [42] Hauser, G., Stiegel, H.: Wärmebrücken-Atlas für den Mauerwerksbau. Bauverlag Wiesbaden, 1990, 2. durchgesehene Auflage 1993, 3. durchgesehene Auflage 1996.
- [43] Hauser, G., Stiegel, H.: Wärmebrücken-katalog für Modernisierungs- und Sanierungsmaßnahmen zur Vermeidung von Schimmelpilzen, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart 2006.

- [44] Hauser, G., Stiegel, H., Haupt, W.: Wärmebrückenkatalog Version 1.2.5.3, Software ZUB Systems GmbH.
- [45] DIN EN ISO 13788: Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen - Raumseitige Oberflächentemperatur zur Vermeidung kritischer Oberflächenfeuchte und Tauwasserbildung im Bauteilinneren – Berechnungsverfahren (EN ISO 13788:2013).
- [46] Krus, M., Sedlbauer, K.: Innendämmung und Schimmelpilzproblematik. Tagungsunterlage: 1. Internationaler Innendämmkongress 2011, 20-21. Mai 2011, Dresden, Deutschland. Hrsg.: TU Dresden, Institut für Bauklimatik, S. 53-64.
- [47] Kilian, R.: Die Wandtemperierung in der Renatuskapelle in Lustheim – Auswirkungen auf das Raumklima, Siegl Verlag, München, 2004.
- [48] WTA-Merkblatt 6-3-01/D: Simulation wärme- und feuchte- technischer Prozesse. 2002
- [49] Leipoldt, D.: Kurzbericht über Heizkostenreduzierung. Energieeinsparung und Investitionskosten einsparung im Anlagenbau durch Einsatz der Temperierung: Vergleichende Untersuchungen im Gymnasium Waldstraße Hattingen. In: Boody, F./Großschmidt, H./Kippes, W./Kotterer, M.(Hrsg.): Klima in Museen und historischen Gebäuden. Die Temperierung. Wissenschaftliche Reihe Schönbrunn. Bd. 9. 2004. S. 209- 213.
- [50] Landesstelle für die nichtstaatlichen Museen in Bayern (Hg.): Freilichtmuseen Geschichte - Konzepte – Positionen; Museumsbausteine, Bd. 11, München 2006.
- [51] Solar Energy Laboratory: A TraNsient System Simulation Program, Version 17.: University of Wisconsin Madison, 2010.
- [52] Van Treeck, C: Dynamische Simulation des thermischen Verhaltens von Gebäuden, 1998.
- [53] Mitalas, G.P,Stephenson,D.G.: Calculation of Heat Conduction Transfer Functions for Multilayer Slabs. Washington D.C., 1971.
- [54] Merz, R.M.: Objektorientierte Modellierung thermischen Gebäudeverhaltens. Kaiserslautern, 2002.
- [55] Aschaber, J.,Hiller,M.,Weber,R.: TRNSYS 17: Das 3D-Strahlungsmodell. Dübendorf (Schweiz), 2008.
- [56] Benter, M.: Auswertung der Vergleichsmessung von vier unterschiedlichen Heizsystemen. München.
- [57] Koschenz, M.,Lehman,B.: Thermoaktive Bauteilsysteme tabs, 2000.
- [58] Glück, B.: Wärmeübergangskoeffizienten an thermisch aktiven Bauteiloberflächen und der Übergang zu Basiskennlinien für die Wärmestromdichte, 2007.

[59] DIN EN ISO 6946 : Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient- Berechnungsverfahren, 2003.

[60] Radtke, U.: Flächenheizung.: Heizungsjournal, 2005.

[61] 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 (ISO 7730:2005); Deutsche Fassung EN ISO 7730:2005.

[62] Ergonomie der thermischen Umgebung - Beurteilung der thermischen Umgebung in Fahrzeugen - Teil 2: Bestimmung der Äquivalenttemperatur (ISO 14505-2:2006); Deutsche Fassung EN ISO 14505-2:2006

Weiterführende Literatur

ASHRAE [American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers]. Museums, libraries and archives. Chap. 21 in 2003 ASHRAE Handbook, (SI), Atlanta 2003

Arendt, Claus; Eicke-Hennig, W.; Gronau, J.; Thermische Bausanierung: Beheizen und Trockenlegen?, in: Arbeitskreis Energieberatung des Freistaates Thüringen bei dem Thüringer Ministerium für Wirtschaft und Infrastruktur: Energieförderung in Thüringen. Energiesparpotentiale im Gebäudebestand. Thermische Bausanierung, Wandheizung. Weimar. 1/1996.

DIN EN 12831:2003 (D): Heizungsanlagen in Gebäuden, Aug 03.

DIN EN 13829: Bestimmung der Luftdurchlässigkeit von Gebäuden, Feb 2001.

DIN EN ISO 10211: Wärmebrücken im Hochbau – Wärmeströme und Oberflächentemperaturen – Detaillierte Berechnungen (ISO/DIS 10211:2005); Deutsche Fassung prEN ISO 10211:2005, 2005.

DIN EN ISO 12569: Bestimmung des Luftwechsels in Gebäuden, Mrz 2001.

DIN EN ISO 13370: Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden – Wärmeübertragung über das Erdreich – Berechnungsverfahren (ISO/DIS 13370:2005); Deutsche Fassung prEN ISO 13370:2005, Jun 2005.

DIN EN ISO 14683: Wärmebrücken im Hochbau – Längenbezogener Wärmedurchgangskoeffizient – Vereinfachte Verfahren und Anhaltswerte (ISO 14683:2007); Deutsche Fassung EN ISO 14683:2007, Apr 2008.

DIN V 18599-2:2011-12: Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 2: Nutzenergiebedarf für Heizen und Kühlen von Gebäudezonen, Dez 2011.

Dischinger, Gabriele: Bauliche Entwicklung der Klosteranlage Benediktbeuern. In: Kirmeier, Josef (Hrsg.); Treml, Manfred (Hrsg.): Glanz und Ende der alten Klöster – Säkularisierung im bayerischen Oberland 1803. München, 1991.

Eicke-Hennig, W.: Das Beispiel Regensburger Salzstadel. Wandheizung als Energiespar- und Endfeuchtungsmaßnahme? In: Arbeitskreis Energieberatung des Freistaates Thüringen bei dem Thüringer Ministerium für Wirtschaft und Infrastruktur: Energieförderung in Thüringen. Energiesparpotentiale im Gebäudebestand. Thermische Bausanierung, Wandheizung. Weimar. Heft 1/1996. S. 85-97.

Egger Wohlfühlklima (Hrsg.): Thermo Energetik – Gesundes Heizen, gesundes Kühlen. Produktblatt. Mils, 2009.

EN 1264: Raumflächenintegrierte Heiz und Kühlsysteme mit Wasserdurchströmung, Okt 2008.

Fraunhofer Gesellschaft (Hrsg.): Fraunhofer in Benediktbeuern – Glashütte und Werkstatt. München, 2008.

Freytag, O. Dr.: Erhalt und Nutzung temporär genutzter Gebäude. Vermeidung von Feuchteschäden durch Nutzung regenerativer Energiequellen. Abschlussbericht der Deutschen Bundesstiftung Umwelt, AZ 17430. Leipzig. 2005.

Großes Schmidt, H.(a): Verfahren zur thermischen Bausanierung, Raumtemperierung und Klimatisierung in Museen und anderen Gebäuden. In: Stadtmuseum Nordico / Linzer Planungsinstitut (Hrsg.): Neue Wege der Klimatisierung im Altbau. Bauphysik in Bezug auf die Sanierung historischer Gebäude. Linzer Werkstattgespräche 3. Linz. 1992. S. 1-53.

Großes Schmidt, H.(b): Die Temperierung – Verfahren zur Thermischen Bausanierung, Raumtemperierung und Klimastabilisierung in Museen und anderen Gebäuden. In: Arbeitskreis Energieberatung des Freistaates Thüringen bei dem Thüringer Ministerium für Wirtschaft und Infrastruktur: Energieförderung in Thüringen. Energiesparpotentiale im Gebäudebestand. Thermische Bausanierung, Wandheizung. Weimar. Heft 1/1996. S. 9-40.

Großes Schmidt, H.: Das temperierte Haus: Sanierte Architektur – behagliche Räume – Großvitrine. In: Boody, F./Großes Schmidt, H./Kippes, W./Kotterer, M.(Hrsg.): Klima in Museen und historischen Gebäuden. Die Temperierung. Wissenschaftliche Reihe Schönbrunn. Bd. 9. 2004. S. 325-381.

Güttinger, Dipl.-Ing. (FH) Kurt; Güttinger Ingenieure (Hrsg.): Kloster Roggenburg – Wirtschaftlichkeitsbetrachtung und Energiekostenvergleich Raumerwärmungssysteme. Firmenbericht. Kempten, 12.6.2008.

Hauser, Gerd (Verfasser); Stiege, Horst (Verfasser); Fraunhofer IRB Verlag (Hrsg.): Wärmebrücken-katalog für Modernisierungs- und Sanierungsmaßnahmen zur Vermeidung von Schimmelpilzen. Stuttgart, 2006.

Kalmer, P.: Die Temperierung von Gebäuden. Untersuchung zur Wirtschaftlichkeit im Vergleich zu einem konventionell beheizten Gebäude mit vergleichbarer Nutzung. Probearbeit. München. 1994. Unveröffentlicht.

Kilian, R.; Bichlmair, S.; Wehle, B.; Holm, A.: Passive sampling as a method for air exchange measurements for whole building simulation of historic buildings. Proceedings of the 9th Nordic Building Symposium on Building Physics, NSB 2011, Tampere, Finland 2011.

Kilian, Ralf: Die Wandtemperierung in der Renatuskapelle in Lustheim – Auswirkungen auf das Raumklima. Diplomarbeit Technische Universität München, München 2004

Kilian, Ralf: „Umgang mit Klimadaten im Vergleich zwischen Museen und Denkmalpflege“, in: Jeberin, Alexandra (Hrsg.): „Präventive Conservation - Von der ‚Passiven Konservierung‘ zum Risk Management‘ - Erfahrungen und Konzepte zur Präventiven Konservierung in der gegenwärtigen restauratorischen Praxis“, Berlin 2007.

Krus, Martin; Kilian, Ralf: Calculative Investigations on the "Temperierung" Wall Heating System – Hygric and Thermal Aspects. In: Proceedings of the 1st Central European Symposium on Building Physics, 13-15. September 2010, Cracow - Lodz, Poland 2010.

Künzel, Helmut; Holz, Dieter: Bauphysikalische Untersuchungen in unbeheizten Gebäuden alter Bauart, IRB Nr. T 2396, Holzkirchen 1991.

Künzel, Helmut: Bauphysik und Denkmalpflege, Stuttgart 2007.

Künzel, Dr.-Ing. Helmut (Verf.): Bauphysik und Denkmalpflege Teil 9 – Bauteiltemperierung nach Großesmidt. In: Fraunhofer IRB Verlag (Hrsg.): Der Bausachverständige, Ausgabe 2/2007. S. 14-17. Köln, 2007.

Landesstelle für die nichtstaatlichen Museen in Bayern (Hg.): Das Museumsdepot. Grundlagen - Erfahrungen - Beispiele, Museumsbausteine, Bd. 4, München 1998.

Löther, Thomas; Untersuchungen zur Temperierung in historischen Gebäuden. Diplomarbeit Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig, Norderstedt 2005

Forschung für Energieoptimiertes Bauen. Förderkonzept der Forschungsinitiative EnOB im Rahmen des 6. Energieforschungsprogramms der Bundesregierung „Forschung für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung“. BMWi, Sept. 2012.

Schmidt Technology (Hrsg.): Schmidt Strömungssensor SS 20.500 Gebrauchsanweisung. St. Georgen, 2007. S.15.

Seele, J.: Bauteiltemperierung. Untersuchungen zur Anwendung – Auswertung von Praxisbeispielen. IGS Institut für Gebäudeanalyse und Sanierungsplanung München GmbH. München. Unveröffentlicht.

Spaenle, Martin: Kloster Benediktbeuern, Alte Schäfllerei Nordbau/ EG/ Messräume. Architektenzeichnung. München, 27.01.2011.

Weber, Pater Leo: Geschichte des Gebäudes der ehemaligen Schäfllerei und Wagnerei im Kloster Benediktbeuern. Recherche des Klosterhistorikers. Benediktbeuern, März 2010.

Leonhardt, H.; Fraunhofer-Institut für Bauphysik: Absorberdächer als Wärmequelle von Wärmepumpenheizungsanlagen. IBP-Mitteilung, 1981.

Panzhauser, Erich; Geppert, Ulf; Fail, Alfred; Energiedach in Denkmalgeschützten Baugebieten. F 728/1, November 1984.

Internet

<http://www.elv.de/Temperatur-und-Feuchtemessung>
Teil44/x.aspx/cid_726/detail_30821 (aufgerufen am 13.7.2012).
<http://www.brunnenbau-stockbauer.de> Stand 17.5.2011.
<http://www.unendlich-viel-energie.de> Stand 17.5.2011.
<http://www.erdwaerme-zeitung.de> Stand 18.5.2011.
<http://www.strom-infos.net> Stand 17.5.2011.