

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

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. Philip Leistner

Prof. Dr. Klaus Peter Sedlbauer

IBP-Bericht HTB-003/2017

## Energetische Untersuchungen und Optimierung von Innendämmungen

Durchgeführt im Auftrag des  
Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie  
Förderkennzeichen 03ET1123A

Der Bericht umfasst  
194 Seiten Text  
8 Tabellen  
183 Bilder

Auszugsweise Veröffentlichung nur mit  
schriftlicher Genehmigung des Fraun-  
hofer-Instituts für Bauphysik gestattet.

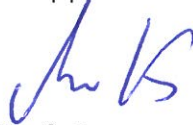
Prof. Dr. Ralf Kilian, Prof. Dr. Martin Krus  
Christine Milch, Stefan Bichlmair  
André Thiel, Doris Rösler, Tabea Beck  
Stephanie Conrad, Sarah Schneider,  
Bernd Pfundstein

Hinweis: „Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröf-  
fentlichung liegt beim Autor.“

Laufzeit 01.06.2012 – 30.06.2016

Valley, 24. Februar 2017

Gruppenleiter



Prof. Dr.  
Martin Krus

Projektleiter



Prof. Dr.  
Ralf Kilian

Bearbeiter



M.Eng.  
Stefan Bichlmair

# Inhalt

<b>1</b>	<b>Kurzdarstellung der Aufgabenstellung</b>	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>Kurzdarstellung der Voraussetzungen des Vorhabens</b>	<b>7</b>
<b>3</b>	<b>Kurzdarstellung von Planung und Ablauf des Vorhabens</b>	<b>7</b>
<b>4</b>	<b>Kurzdarstellung des wissenschaftlich-technischen Standes</b>	<b>13</b>
4.1	Stand von Wissenschaft und Technik zu den vorgesehenen Dämmstoffen	13
4.1.1	Diffusionsoffene kapillaraktive Dämmstoffe	13
4.1.2	Diffusionshemmende Systemaufbauten	14
4.2	Bisherige Arbeiten des Antragstellers	15
4.2.1	Forschungsarbeiten zu Materialien für Innendämmung	15
4.2.2	Demonstrationszentrum Handwerkskammer Bildungszentrum Münster (HBZ)	15
<b>5</b>	<b>Vorhabensziele, Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse</b>	<b>17</b>
5.1	Hintergrund und Umsetzung der Versuche	18
5.2	Praxisprobleme der Innendämmung (AP 1)	19
5.2.1	Einbindende Decken bzw. Innenwände	19
5.2.2	Tauwasser in bzw. hinter der Dämmung	20
5.2.3	Fehlstellen bei Innendämmung	20
5.2.4	Frostschadensgefahr außen durch Innendämmung	21
5.2.5	Fensterlaibungen	22
5.2.6	Nutzungsänderung	22
5.2.7	Neue, dichte Fenster	22
5.2.8	Balkenköpfe	23
5.3	Untersuchung des Bestandes (AP 2) und Bautechnische Vorversuche	23
5.3.1	Baugeschichte der Alten Schäfflerei	23
5.3.2	Die Räume im ersten Obergeschoß der Alten Schäfflerei	24
5.3.3	Bauforschung zum Wandaufbau im ersten Obergeschoß der Alten Schäfflerei	26
5.3.4	Schichtenabfolge Farbauftrag im ersten Obergeschoß der Alten Schäfflerei	27

5.3.5	Zustand der Walzendekorationsmalerei	31
5.3.6	Ursachen der Schäden	31
5.3.7	Zielfestlegung des Restaurierungskonzeptes bezüglich der Anpassung an den späteren Innendämmungseinbau	32
5.3.8	Durchgeführte restauratorischen Arbeiten	32
5.4	Beschreibung der verwendeten Systeme	33
5.4.1	Untersuchte Systeme und Materialien	33
5.4.2	Klimatisierung	46
5.4.3	Begründung der getroffenen Planungsentscheidungen	46
5.5	Untersuchung zum hygrothermischen Verhalten der Innendämmsysteme	49
5.5.1	Ermittlung der hygrothermischen Materialkennwerte (AP 3)	50
5.5.2	Rechnerische Untersuchungen (AP4)	51
5.5.3	Verwendete Software	53
5.5.3.1	WUFI®	53
5.5.3.2	WUFI®-Bio	54
5.5.4	1-dimensionale Berechnung	54
5.5.5	Fragestellung und Untersuchungsweg	55
5.5.6	Ergebnisse der rechnerischen Untersuchungen	58
5.5.7	2-dimensionale Berechnung (Fensterlaibung)	62
5.5.8	Verweis auf Balkenkopf-Projekt	71
5.6	Einbau der Innendämmung (AP 5)	72
5.6.1	Systemaufbau mit reversiblen Mörtel am Beispiel Feld 13	73
5.6.2	Trockenbauweise mit Japanpapier-Kaschierung am Beispiel Feld 6	85
5.6.3	Sonderkonstruktionen (Schilfrohr und Dämmziegel)	98
5.7	Messtechnische Begleitung der Maßnahme zur Erfolgskontrolle (AP 6)	98
5.7.1	Messkonzept und Sensorik	99
5.7.2	Messwerterfassung am Beispiel von Feld 13	100
5.7.3	Sensorik	100
5.7.4	Positionen der Sensoren	101
5.7.5	Darstellung der Messdaten 2013 bis 2016 am Beispiel Feld 13	103
5.7.6	Detailliertere Betrachtungen für den Winterzeitraum 2015 für Feld 13	110
5.7.7	Detaillierte Darstellung der Messwerte für den Winterzeitraum 2015 in der Ecke Wandfeld 12	114
5.7.8	Infrarot-Thermographie	116
5.7.9	Vergleichende Darstellung der Messergebnisse	121
5.8	Evaluierung – Vergleich von Messung und Simulation (AP 7)	124
5.8.1	Hygrothermische Ausgangssituation des Mauerwerks vor Applikation der Innendämmsysteme	125

5.8.2	Validieren des Bestandmauerwerks	126
5.8.3	Validierung der Simulation der Innendämmsysteme durch Messungen	128
5.8.3.1	Thermische Validierung an Feld 11, Aerogeldämmputz	129
5.8.3.2	Hygrische Validierung am Feld 11, Aerogeldämmputz	135
5.8.3.3	Ergebnisse der Validierung für die übrigen Systeme	137
5.9	Rechnerische Untersuchungen zu typischen Fragestellung bei Innendämmungen	146
5.9.1	Trocknungszeiten	148
5.9.2	Feuchteverlauf in der Grenzschicht	149
5.9.3	Schimmelrisiko	150
5.9.4	Frostschadensgefahr	153
5.9.5	Vergleich der Temperaturschwankungen auf der Grenzschicht	157
5.9.6	Energetische Verluste	160
5.10	Einfluss und Verhalten der reversiblen Trennschicht	162
5.10.1	Reversibles Putzsystem	162
5.10.2	Japanpapier	164
5.11	Lebenszyklusbetrachtung (AP 8)	165
5.11.1	Vorstudie Ökobilanz-Datensätze Dämmmaterial	165
5.11.2	Ökobilanz des Typha-Dämmstoffs	166
5.12	Reversibilität und Bauteilkontrolle (AP 9)	168
5.12.1	Durchführung der Untersuchungen zur Reversibilität	169
5.12.2	Farbmatrizes	170
5.12.3	Aufbau des reversiblen Mörtelsystems	172
5.12.4	Ablauf des Versuches	175
5.12.5	Partielle Öffnung des Versuchsfelds 13 mit reversiblen Mörtel	177
5.12.6	Farbmatrix am Beispiel Feld 13	179
5.12.7	Ergebnisbeschreibung der partiellen Öffnung des Innendämmsystems Feld 13	181
5.12.8	Innendämmung in Trockenbau mit Japanpapier als kaschierende Trennschicht	182
5.12.9	Partielle Öffnung eines Versuchsfeld mit Japanpapier-Kaschierung,	183
5.13	Ergebnisbeschreibung der partiellen Öffnung des Innendämmsystems mit Japanpapier-Kaschierung	187
5.14	Zusammenfassung der wissenschaftlich technischen Ergebnisse des Forschungsprojekts	187
<b>6</b>	<b>Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit</b>	<b>189</b>
<b>7</b>	<b>Voraussichtlicher Nutzen und Verwertung des Ergebnisses</b>	<b>190</b>



<b>8</b>	<b>Fortschritt Dritter während der Projektlaufzeit</b>	<b>190</b>
<b>9</b>	<b>Erfolgte / geplante Veröffentlichungen der Projektergebnisse</b>	<b>191</b>
<b>10</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>193</b>

# 1 Kurzdarstellung der Aufgabenstellung

Die bauphysikalisch günstigste Art der energetischen Ertüchtigung von existierenden Gebäuden ist die Außendämmung. Gerade bei denkmalgeschützten Objekten besteht jedoch die Gefahr, dass diese Maßnahme das Erscheinungsbild der Fassaden in unakzeptabler Weise verändert. Deshalb kommt hier meist nur eine Innendämmung der Außenwände in Frage. Eine Innendämmung hat außerdem bei intermittierender Nutzung des Gebäudes den Vorteil, dass sich die Innenoberflächen der Außenwände schneller erwärmen und dadurch rascher behagliche Temperaturverhältnisse im Raum erreicht werden können.

Eine Innendämmung birgt jedoch auch Risiken in sich, da die ursprüngliche Wand kälter wird und sich ihr Trocknungspotential dadurch deutlich reduziert. Dies kann in ungünstigen Fällen zu Feuchteschäden an der historischen Bausubstanz führen. Richtig gemacht und auf das Gebäude abgestimmt ist eine Innendämmung jedoch eine Maßnahme die langfristig dem Erhalt historischer Gebäude förderlich ist, da die energetische Sanierung nicht nur Energie sparen hilft, sondern auch die hygienischen und raumklimatischen für die Nutzer verbessert. Eine hochwertige Nutzung erleichtert den Erhalt und die regelmäßige Wartung der historischen Bausubstanz. Voraussetzung für die richtige Planung und Ausführung einer Innendämmmaßnahme ist die genaue Kenntnis des hygrothermischen Verhaltens der ursprünglichen Bausubstanz vor und nach Aufbringen eines Innendämmsystems. Daraus lässt sich ableiten, ob eine Maßnahme als sicher oder risikobehaftet einzuschätzen ist.

Das Ziel des Vorhabens „EnOB: Innendämmungen“ besteht darin, unterschiedliche Systeme zur Innendämmung vergleichend zu untersuchen und dabei zu ermitteln, welche Dämmstoffdicken ohne Risiko von Feuchteschäden und den damit verbundenen gesundheitlichen Problemen und Schäden an historischer Gebäudesubstanz vertretbar und sinnvoll sind. Dabei sollen zum einen typische Anwendungsfehler berücksichtigt werden.

Zum anderen sollen vor allem auch neuartige, dünne und reversibel angebrachte Dämmstoffe zum Einsatz kommen, die aufgrund ihrer Kapillaraktivität ein großes Potenzial zur Vermeidung von Feuchteschäden besitzen, besonders niedrige Wärmeleitfähigkeiten aufweisen oder aus nachwachsenden bzw. recycelten Rohstoffen hergestellt wurden. Folgende Dämmstoffe werden betrachtet:

- Rohrkolbendämmung (Typha), neuer Dämmstoff mit hoher Schimmelpilzresistenz, nachwachsender Rohstoff.
- Aerogelplatten (geschäumtes Silikagel), Innovation aus dem Bereich der Nanotechnologie mit sehr geringer Wärmeleitfähigkeit.
- Zwei unterschiedliche Aerogelputze
- Zelluloseschüttung (eingeblesen), nachwachsender Rohstoff
- Mineralwolle als klassische Trockenbau-Lösung mit feuchteadaptiver Dampfbremse als ein bewährtes Referenzsystem

- Schilfrohr als Vertreter heimischer nachwachsender Rohstoffe von lokalen Produzenten, sehr geringe graue Energie.
- Perlite Schüttung in Trockenbau-Lösung
- mit Perlite gefüllte Ziegel als vorgemauerte Wand
- mineralische Dämmplatte mit großem Porenvolumen, ein sehr häufig eingesetztes Material für Innendämmsysteme

## 2 Kurzdarstellung der Voraussetzungen des Vorhabens

Um sich der Herausforderung zu stellen, für den Gebäudebestand und insbesondere denkmalgeschützte Gebäude innovative Technologien und Materialien zu erforschen und zu entwickeln, begann das Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP seit 2006 ein Zentrum für Denkmalpflege und energetische Altbausanierung zu etablieren. Dieses Zentrum wurde in den Jahren 2010 bis 2016 in Benediktbeuern erfolgreich im Gebäude der Alten Schäferei des Klosters, datiert auf 1760 eingerichtet und sukzessive erweitert. 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 spricht das Fraunhofer IBP damit die Bauindustrie an, die dort erprobten Produkte zeigen bzw. neue Entwicklungen für den schützenswerten Altbaubestand an einem realen historischen Gebäude testen und weiter entwickeln können.

In diesem Kontext wurde auch die Idee für das vom BMWi seit 2012 auf einen Beschluss des Bundestags geförderte Projekt „EnOB: Innendämmungen“ verfolgt, das es zum Ziel hat, neue Lösungen für die energetische Sanierung im Altbau und Denkmal zu entwickeln. Dadurch sollen Planer und Bauherren bei der Gebäudesanierung eine fundiertere Grundlage erhalten für Entscheidungen im Zusammenhang von energiesparender Ertüchtigung, Lösungen zum Erhalt wertvoller originaler Bausubstanz und höherer Planungssicherheit.

## 3 Kurzdarstellung von Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Projekt gliedert sich in die folgenden Arbeitspakete. Entsprechend dieser wurden die Arbeiten durchgeführt und die Untersuchung umgesetzt.

- **AP 1: Praxisprobleme der Innendämmung**
- **AP 2: Untersuchung des Bestandes**
- **AP 3: Ermittlung der hygrothermischen Materialkennwerte**
- **AP 4: Rechnerische Untersuchungen**
- **AP 5: Einbau der Innendämmung**
- **AP 6: Messtechnische Begleitung der Maßnahme zur Erfolgskontrolle**
- **AP 7: Evaluierung – Vergleich von Messung und Simulation**
- **AP 8: Lebenszyklusbetrachtung**
- **AP 9: Reversibilität und Bauteilkontrolle**
- **AP 10: Verbreitung der Ergebnisse**
- **AP 11: Projektleitung**

Der zeitliche Ablauf des Projektes ist in der folgenden Tabelle zusammengefasst.

Tabelle 1:  
Übersicht über den Projektverlauf.

Jahr	Beschreibung
<b>2012</b>	<p>Das Projekt hat mit einer umfangreichen Projekt- und Meilensteinplanung für alle beteiligten Arbeitspakete begonnen, um einen effizienten Projektfortschritt und die Eintaktung in weitere Forschungsvorhaben sowie Baumaßnahmen am Fraunhofer-Zentrum für energetische Altbausanierung und Denkmalpflege in Benediktbeuern zu gewährleisten. Dazu erfolgt die regelmäßige Abstimmung mit der Leitung des Zentrums, der Fraunhofer Bauabteilung und dem Architekten. Bauliche Anschlüsse zu den angrenzenden Geschoßdecken sowie Klimatisierung des Raums für die Versuche wurden festgelegt und werden derzeit im Detail geplant.</p> <p>Die Wandflächen im Obergeschoß der Alten Schäferei wurden fotografisch dokumentiert und für die Tauglichkeit der Montage unterschiedlicher Innendämmsysteme (Plattenware, Schüttungen, Matten) eingestuft.</p> <p>Es wurde ein umfangreiches Messkonzept erstellt, die Art und Lage der Messwerterfassung und die Sensoren in einer detaillierten Messplanung erfasst. Neue Konzepte zur Feuchtemessung in der Konstruktion werden aktuell diskutiert. Methoden für die reversible Montage von Sensoren auf wertvollen historischen Architekturoberflächen werden aktuell entwickelt und getestet.</p> <p>Konzepte für die reversible Montage verschiedener Dämmstofftypen (Plattenware, Schüttungen, Matten) wurden diskutiert. Erste Prototypen von Mörteln für die reversible Montage von Innendämmungen existieren. Die entsprechenden hygrothermischen Kennwerte für die rechnerische Simulation der Aufbauten vor dem Einbau wurden ermittelt.</p> <p>Die Gewinnung von Partnern aus der Industrie ist ein langwieriger Prozess, der im Jahr 2013 noch nicht komplett abgeschlossen sein wird. Derzeit sind 3 Industriepartner konkret in Verhandlungen für eine Beteiligung am Projekt eingebunden. 3-5 weitere Partner sollen noch gefunden und involviert werden. Daher werden im Winter 2013 / 2014 noch nicht alle Wandflächen mit den finalen Systemen zur Innendämmung ausgestattet. Nachwachsende Rohstoffe und traditionelle Materialien wie z.B. Schilfrohr, die ein besonderes Interesse für die Denkmalpflege haben, werden bereits dieses Jahr umgesetzt und eingebaut.</p>

<b>2013</b>	<p><b>Vorversuche und Tests</b></p> <p>Die reversiblen Materialien für die Innendämmung sind in Prototypen soweit testbereit, auch hier wird die Entwicklung aber noch in den kommenden Jahren weiter gehen, auch vor dem Hintergrund geplanter Schutzrechtsanmeldungen.</p> <p>Im September 2013 beginnt der Einbau der ersten 5 verschiedenen Systeme zur reversiblen Innendämmung in Benediktbeuern.</p> <p>Die Wandflächen im Obergeschoss der Alten Schäferei wurden fotografisch und zeichnerisch dokumentiert und für die Tauglichkeit der Montage unterschiedlicher Innendämmsysteme (Plattenware, Schüttungen, Matten) eingestuft.</p> <p>Die Flächen wurden durch den Restaurator konserviert, Löcher geschlossen und gereinigt. Anschlüsse zu Boden und Decke wurden geplant und ausgeführt. Das Lüftungssystem zur Klimatisierung des Raumes wurde beauftragt.</p> <p>Es liegt ein umfangreiches Messkonzept vor, die Art und Lage der Messwerterfassung und die Sensoren sind in einer detaillierten Messplanung erfasst. Neue Konzepte zur Feuchtemessung in der Konstruktion werden aktuell im Rahmen einer studentischen Arbeit entwickelt. Methoden für die reversible Montage von Sensoren auf wertvollen historischen Architekturoberflächen werden weiter entwickelt und getestet.</p> <p>Konzepte für die reversible Montage verschiedener Dämmstofftypen (Plattenware, Schüttungen, Matten) wurden erarbeitet. Erste Prototypen von Mörteln für die reversible Montage von Innendämmungen wurden für die Applikation in der alten Schäferei weiterentwickelt und zur Praxisreife gebracht. Die entsprechenden hygrothermischen Kennwerte für die rechnerische Simulation der Aufbauten vor dem Einbau wurden ermittelt und die Funktionsweise der Systeme rechnerisch vor dem Einbau überprüft.</p> <p>Parallel laufen Versuche am Fraunhofer IBP in Holzkirchen in der Freilandversuchsstelle, um die Funktionalität der reversiblen Systeme zu überprüfen und weiter zu entwickeln.</p>
-------------	---

<p><b>2014</b></p>	<p><b>Einbau der ersten Systeme</b></p> <p>Im Winter 2013 / 2014 wurden die ersten 4 verschiedenen Systeme zur reversiblen Innendämmung in Benediktbeuern messtechnisch untersucht. Dazu wurde eine entsprechende Messinfrastruktur aufgebaut und die Daten regelmäßig geprüft und verifiziert.</p> <p>Anschlüsse der Dämmsysteme zu Boden und Decke wurden geplant und ausgeführt.</p> <p>Über rechnerische Untersuchungen wurde der Umfang einer notwendige Hydrophobierung der Fassade ermittelt. Derzeit läuft die Ausschreibung für die Fassadensanierung der Alten Schäfflerei in Benediktbeuern.</p> <p>Das Lüftungssystem zur Klimatisierung des Raumes wurde beauftragt. Für die Regelung der Lüftung, Heizung und Be- und Entfeuchtung wurde eine Anbindung an das bereits bestehende DESIGO System beauftragt. Die Inbetriebnahme der Regelung ist schrittweise mit den jeweiligen Installationen der Endgeräte vorgesehen.</p> <p>Es liegt ein umfangreiches Messkonzept vor, die Art und Lage der Messwerterfassung und die Sensoren sind in einer detaillierten Messplanung erfasst. Dieses Messsystem wird kontinuierlich erweitert.</p> <p>Konzepte für die reversible Montage verschiedener Dämmstofftypen (Plattenware, Schüttungen, Matten) wurden erarbeitet. Der Schwerpunkt im Sommer 2014 lag auf der Entwicklung eines Systems für den Trockenbau, das auch zur Montage von Schilfrohrdämmmatten Verwendung finden kann. Zwei Wände sollen im Herbst 2014 entsprechend in Trockenbau ausgeführt werden und mit Schüttdämmstoffen (Perlite und Zellulose) verfüllt werden.</p> <p>Das Lüftungssystem zur Klimatisierung des Raumes wurde beauftragt . Für die Regelung der Lüftung, Heizung und Be- und Entfeuchtung wurde eine Anbindung an das bereits bestehende DESIGO System beauftragt. Die Inbetriebnahme der Regelung ist schrittweise mit den jeweiligen Installationen der Endgeräte vorgesehen.</p> <p>Das Messsystem wird kontinuierlich erweitert.</p> <p>Konzepte für die reversible Montage verschiedener Dämmstofftypen (Plattenware, Schüttungen, Matten) wurden erarbeitet. Der Schwerpunkt im Sommer 2014 lag auf der Entwicklung eines Systems für den Trockenbau, das auch zur Montage von Schilfrohrdämmmatten Verwendung finden kann.</p> <p>Im Herbst 2014 wurden 2 Wände in Trockenbau ausgeführt und mit Schüttdämmstoffen (Perlite und Zellulose) verfüllt. Hier kam ein anderes System zur Verdeckung der originalen Befunde zum Einsatz, dass eine Japan-Papier Kaschierung nutzt.</p> <p>Auch wurde ein weiterer Aerogel-Dämmputz eingebaut, der in der Schweiz bereits im Außenbereich an verschiedenen Baudenkmalern im Einsatz ist und hier auf seine Tauglichkeit als reversible Innendämmung überprüft werden soll.</p>
--------------------	---

<b>2015</b>	<p>Im Winter 2014 / 2015 wurden weitere Systeme zur reversiblen Innendämmung in Benediktbeuern eingebaut und messtechnisch untersucht. Dazu wurde eine entsprechende Messinfrastruktur aufgebaut und die Daten regelmäßig geprüft und verifiziert.</p> <p>Über rechnerische Untersuchungen wurde der Umfang einer notwendige Hydrophobierung der Fassade ermittelt. Die Ausschreibung für die Fassadensanierung der Alten Schäferei in Benediktbeuern ist auf den Weg gebracht. Diese wird aber voraussichtlich erst im Frühsommer 2015 umgesetzt, wenn es wieder warm genug für Fassadenarbeiten ist.</p> <p>Im Frühjahr und Sommer 2015 liefen die Messungen an den Systemen zur reversiblen Innendämmung in Benediktbeuern. Die Daten wurden regelmäßig geprüft und verifiziert. Erste Auswertungen zeigen, dass die Daten zuverlässig gemessen wurden und Verlauf von Temperatur und Feuchte in den Aufbauten weitestgehend den Erwartungen entspricht.</p> <p>Über rechnerische Untersuchungen wurde der Umfang einer notwendigen Hydrophobierung der Fassade ermittelt. Die fassaden-restauratorischen Maßnahmen an der Alten Schäferei zur Putzsanierung und Instandsetzung der Fassade haben im Sommer begonnen. Zunächst werden hohlliegende Stellen abgenommen bzw. hinterfüllt und die Flächen gereinigt.</p> <p>Die Sanierung der Fassade mit Putzreparatur und leicht hydrophobem Anstrich analog zu den Ergebnissen der Voruntersuchungen und der hygrothermischen Simulationen vorab wurde im November 2015 abgeschlossen.</p> <p>Das Lüftungssystem zur Klimatisierung des Raumes wurde im Herbst 2014 eingebaut und in Kürze in Betrieb genommen. Unabhängig davon findet bereits eine Klimatisierung der Innenräume auf das aktuelle Zielklima 45 % r.F. und 20 °C statt. Für die Regelung der Lüftung, Heizung und Be- und Entfeuchtung wurde eine Anbindung an das bereits bestehende DESIGO System geschaffen. Die Inbetriebnahme der Regelung erfolgt schrittweise mit den jeweiligen Installationen der Endgeräte. Das Lüftungssystem zur Klimatisierung des Raumes wurde im Herbst 2014 eingebaut und wird im September 2015 in Betrieb genommen.</p>
-------------	---

<b>2016</b>	<p>Im Winter 2015/2016 liefen die Messungen an den Systemen zur reversiblen Innendämmung in Benediktbeuern. Die Daten werden regelmäßig geprüft und verifiziert.</p> <p>Es findet weiterhin eine Klimatisierung der Innenräume auf das aktuelle Zielklima 45 % r.F. und 20 °C statt.</p> <p>Es wurde im Herbst 2015 noch ein weiteres Feld mit einem System realisiert, mit einer Vorsatzschale aus mit Perliten gefüllten Ziegeln. Als letztes, experimentelles System wurde eine „Glas-Innendämmung“ realisiert, die historische Befunde sichtbar lässt. Damit ist das Ziel einer möglichst großen Zahl untersuchter Systeme mit Einbindung von entsprechenden Industriepartnern erreicht, insgesamt 11 Varianten von Innendämmung werden nun vergleichend untersucht.</p>
-------------	--



## 4 Kurzdarstellung des wissenschaftlich-technischen Standes

Im Folgenden wird kurz der wissenschaftlich-technische Stand zusammengefasst. Dabei werden insbesondere bauphysikalische Aspekte der Innendämmung beleuchtet.

### 4.1 Stand von Wissenschaft und Technik zu den vorgesehenen Dämmstoffen

Im Folgenden wird die Wirkungsweise typischer Dämmstoffe beschrieben, die für die Innendämmung Anwendung finden.

#### 4.1.1 Diffusionsoffene kapillaraktive Dämmstoffe

Hierzu zählen vor allem mineralische Dämmstoffplatten. Sie sind die am längsten auf dem Markt erhältlichen Vertreter der diffusionsoffenen kapillaraktiven Dämmstoffe. Kapillaraktive Dämmstoffe leiten das an der Grenzschicht zwischen Dämmstoff und originaler Wand anfallende Tauwasser bis zu einem gewissen Grad wieder nach innen zurück. Eine Dampfbremse soll durch dieses Funktionsprinzip nicht erforderlich sein. Auch organische Materialien, teilweise in Verbindung mit mineralischen Zusatzstoffen, wie Typha, Hanf, Miscanthus, Zellulose und Holzfaser wird häufig nachgesagt, dass sie entsprechend dem Prinzip des kapillaren Feuchterücktransportes auch ohne Dampfbremse eingesetzt werden können.

Wichtig ist dabei, wie auch Berechnungen zeigen, dass vor allem im hygroskopischen Feuchtebereich ein ausreichendes Kapillartransportvermögen vorliegt. In diesem Feuchtebereich sind die Transportkoeffizienten mit einem normalen Saugversuch aber nur ungenau zu bestimmen, da der Gesamttransport durch den sehr effektiven Transport in den großen Poren dominiert wird.

Zu kapillaraktiver Dämmung liegen rechnerische Untersuchungen und Anwendungsbeispiele vor. Allerdings finden sich noch kaum Veröffentlichungen, in denen rechnerischen Untersuchungen messtechnisch bestätigt werden. Zu diesem Thema wurde jedoch am Fraunhofer IBP ein einfacher Laborversuch entwickelt, bei dem ähnlich wie bei der Innendämmung einer Wand, durch rückseitige Unterkühlung eine Taupunkttemperaturunterschreitung erzeugt wurde [2]. Dadurch konnten nichtisotherme Klimarandbedingungen nachgestellt werden. Es wurde ein Testverfahren speziell zur Quantifizierung des kapillaren Rücktransports in kapillaraktiven Innendämmstoffen konzipiert und durchgeführt. Ein Vergleich mit rechnerischen Untersuchungen zeigte teilweise Übereinstimmung mit den Messergebnissen, jedoch bei einzelnen Materialien auch deutliche Abweichungen. Nachfolgende Arbeiten können auf diesen Ansatz aufbauen.

Dämmputze bieten für den Altbaubereich vorteilhafte Eigenschaften. Das Verfahren kann große Unebenheiten der Oberfläche leicht ausgleichen. Zudem

sind beliebige Formen damit möglich, so auch im Bereich von Gewölben oder gerundeten Bauteilen.

Für die Denkmalpflege bietet dieser Baustoff einen zusätzlichen Vorteil: Durch das Verzicht auf zusätzliche mechanische Befestigung ist das Aufspritzen des Dämmstoffs eine schadensarme Montage. Inwieweit die aufgespritzte Dämmung schadensarm rückbaubar und damit reversibel im Sinne der Denkmalpflege ist, wurde noch nicht untersucht.

Ein Nachteil stellt hier sicher die hohe Feuchte beim Einbringen des Materials dar, ein Aspekt, der bei den hygrothermischen Berechnungen zur Anwendbarkeit bzw. bei der Applikation unbedingt berücksichtigt werden muss.

Aerogelmatten oder auch Aerogelplatten sind als Dämmmaterial bisher nur in den Vereinigten Staaten von Amerika und im Rahmen der EMPA Material Science & Technology, einer interdisziplinären Forschungs- und Dienstleistungsinstitution für Materialwissenschaften und Technologieentwicklung innerhalb des ETH-Bereichs, untersucht worden. Das Fraunhofer IBP setzte 2009/2010 das Material im Rahmen einer Untersuchung zu Wandtemperierungssystemen auf der Wand eines Versuchsgebäudes der Freilandversuchsstelle des Instituts in Holzkirchen ein. Bei der Versuchsanordnung war allerdings nicht die Wirkungsweise der Aerogelmatte im Fokus, vielmehr wurden Fragestellungen hinsichtlich der Heizungssysteme untersucht. Aerogelmatten sind diffusionsoffen aber durch die erforderliche Hydrophobierung wenig kapillaraktiv.

#### **4.1.2 Diffusionshemmende Systemaufbauten**

##### **Ausführungen mit Dampfbremse**

Ausführungen mit vorgeständerten Wände mit Dämmstoff z.B. aus Mineralwolle oder Zellulose benötigten i.d.R. eine Dampfbremse. Im Falle undichter Anschlüsse oder Luftspalte innerhalb des Aufbaus, besteht jedoch eine gewisse Gefahr der Hinterströmung durch feuchte Raumluft. Durch die Dampfbremse werden die Diffusionsströme in das System i.d.R. so stark verringert, dass Tauwasserprobleme ausgeschlossen werden können. Gleichzeitig kann jedoch über Fehlstellen eindringende oder durch Schlagregen zugeführte Feuchte aufgrund der Dampfbremse oft nur ungenügend nach innen austrocknen. Die Situation kann über sogenannte feuchteadaptive Dampfbremsen verbessert werden. Diese Dampfbremsen ermöglichen in den Sommermonaten eine verbesserte Rücktrocknung aus dem Systemaufbau.

##### **Diffusionsdichte Innendämmung**

Vakuum-Isolations-Paneele (VIP) oder Schaumglasplatten wirken im Systemaufbau dampfsperrend. Bei VIP's resultieren wegen der sehr niedrigen Wärmeleitfähigkeit und Diffusionsdichtheit des Materials und der fertigen Vorkonfektionierung im Werk, hohe Anforderung an die Ausführung vor Ort. Die vorgefer-

tigten Elemente können nicht abgeändert werden. Die Konvektion im Luftspalt in der Grenzschicht zum originalen Mauerwerk stellt eine Detailproblematik dar, für die Forschungsbedarf besteht. Bei dem Einsatz von Vakuumisolationspaneelen als Innendämmung kann es, wie Veröffentlichungen des Fraunhofer IBP zeigen [20], zu Problemen mit hohen Materialfeuchten und Schimmelpilzwachstum in der Konstruktion kommen.

## 4.2 Bisherige Arbeiten des Antragstellers

Am Fraunhofer-Institut für Bauphysik wurden in den letzten Jahrzehnten unterschiedliche Untersuchungen zu Innendämmungen in verschiedenen Ausführungen durchgeführt.

### 4.2.1 Forschungsarbeiten zu Materialien für Innendämmung

#### Kalziumsilikatplatten

Im Rahmen eines von der DBU (AZ: 24058-25) geförderten Forschungsprojekts wurden Untersuchungen zur Weiterentwicklung der Kalziumsilikatplatten in Zusammenarbeit mit der Industrie durchgeführt.

#### Typha

Auch die Entwicklung der Innendämmung aus Typha wurde in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer IBP durchgeführt. Verbaut wurde das Material beispielsweise bereits in der Pfeiffer Gasse in Nürnberg an einem Fachwerkhaus und wurde dort untersucht und messtechnisch begleitet (DBU AZ: 27918).

#### Dämmung mit Vakuumisolationspaneelen

Am Fraunhofer IBP wurden bereits Simulationsrechnungen für einen VIP-Hersteller durchgeführt. Weiter wurden durch das Fraunhofer IBP ausführliche Erfahrungen mit VIPs bei deren Einbau und Prüfung im Rahmen des Dachdemozentrums Holzkirchen gesammelt. Ziel des Projektes war die messtechnische Untersuchung unterschiedlicher Dachaufbauten im Vergleich, sowie die didaktische Aufbereitung. Kernpunkte in der Arbeit waren hierbei der Feuchte- und sommerliche Wärmeschutz, die Luftdichtheit bei Anschlüssen und Durchdringungen und das Aufzeigen dieser Problemstellen.

### 4.2.2 Demonstrationszentrum Handwerkskammer Bildungszentrum Münster (HBZ)

Im Kompetenzzentrum Bauen mit nachwachsenden Rohstoffen (KNR) im „**Demonstrationszentrum Bau und Energie**“ der **Handwerkskammer Münster** haben Fachleute und Bauherren die Möglichkeit, in Lehrgängen und Beratungen ihre Fragen mit Experten des KNR-Teams zu diskutieren (Bild 1). Vor Ort wurde in Kooperation mit dem **Fraunhofer IBP** eine feste Ausstellung mit didaktisch aufbereiteten Exponaten und Animationen errichtet, um Produkte und

Konstruktionen mit Baustoffen aus zukunftsverträglichen Rohstoffen bekannter zu machen und ihre Einsatzgebiete zu veranschaulichen. Unterschiedliche Gebäudetypen, wie Glasbau, Bürobau, Niedrigenergie-, Passiv- und Nullheizenergiehaus werden verglichen und innovative Haustechniken vorgestellt.

Als Kompetenzzentrum Bau und Energie ist das HBZ eine Anlaufstelle für alle am Bau beteiligten Gruppen. Handwerker, Ingenieure, Architekten und Bauherren können sich aktuelles Fachwissen über das innovative Bauen, in Beratungen und auf Fachveranstaltungen, Ausstellungen und Lehrgängen aneignen. Mit dem Kompetenzzentrum Bauen mit Nachwachsenden Rohstoffen (KNR) ist ein bundesweit tätiges, unabhängiges Forum entstanden, in dem gezeigt wird, wie unterschiedlichste Baumaterialien aus nachwachsenden Rohstoffen umweltverträglich verarbeitet werden können.

<http://www.hbz-bildung.de/>



Bild 1:  
Demonstrationszentrum „Bau und Energie“ am Handwerkskammer Bildungszentrum Münster

Die Sanierung und Modernisierung von Altbauten ist ein zentrales Thema der **IGS - Initiative für Gebäudesanierung - in Gelsenkirchen-Buer**. Hier werden Techniken in Form eines beispielhaft sanierten Gebäudes demonstriert. Besucher können sich in dem im sanierten Gebäude entstandenen Anwendungs- und Beratungszentrum über Lüftungskonzepte, Kellersanierung und Dämmsysteme informieren (Bilder 2, 3).



Bild 2 und Bild 3 :

Anwendungs- und Beratungszentrum der Handwerkskammer Münster in einem beispielhaft sanierten Gebäude in Gelsenkirchen-Buer.

Das Fraunhofer IBP Holzkirchen befasste sich mit den bauphysikalischen Aspekten wie dem Wärme- und Feuchteschutz und stellte die Ergebnisse bzw. bauphysikalischen Vorgänge mit Hilfe von Erläuterungstafeln, begreifbaren Modellen und Computeranimationen dar. Mit dem vom Fraunhofer IBP Holzkirchen entwickelten Messdatenerfassungssystem „IMEDAS“ können die Messergebnisse anhand einer Online-Visualisierung präsentiert werden.

## 5 Vorhabensziele, Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

Bei dem Forschungsprojekt „Innendämmungen“ stehen innovative Materialien zur Innendämmung im Baubestand sowie die Weiterentwicklung vorhandener Produkte für die Denkmalpflege im Fokus. Hierbei ist vor allem die Frage der Reversibilität von großer Bedeutung. Innenraumoberflächen in historischen Gebäuden sind oft mit einer Vielzahl von übereinander liegenden Farbfassungen, also farbigen und teilweise ornamentalen Anstrichen, versehen. Diese Schichten sind materielle Zeugnisse der Vergangenheit und geben Aufschluss über den jeweiligen Zeitgeschmack. Beim Einbau von Dämmplatten werden diese Oberflächen üblicherweise mit Montageklebern verdeckt, die bei einem späteren Rückbau die historischen Befunde mit ablösen und zerstören. Ziel des Projektes ist daher die Entwicklung von Systemen für eine rückbaubare Montage der Innendämmung, die bei einfacher Applikation mit möglichst geringem Verlust an wertvoller, historischer Bausubstanz auskommen. Dazu werden verschiedene Varianten betrachtet, von kaschierenden Zwischenschichten bis hin zu vorgeständerten Trockenbaukonstruktionen, die die originalen Oberflächen schützen

sollen. Aber auch für den Bestandsbau mit regelmäßig wiederkehrenden Sanierungsintervallen bieten die neuen reversiblen Lösungen höhere Flexibilität in der Sanierung. Am „Fraunhofer-Zentrum für energetische Altbausanierung und Denkmalpflege“ in der der Alten Schäflerei im Kloster Benediktbeuern werden neue Methoden und Verfahren für die Sanierung von historischen Bauten entwickelt, wie auch bestehende Techniken demonstriert und deren Wirkungsweise gezeigt. Im Projekt „EnOB: Innendämmungen“ wurden elf unterschiedliche Systeme an ca. 11 m<sup>2</sup> großen Wandflächen mit Fenstern montiert und energetische, thermische wie auch hygrische Wirkungsweise der Systeme untersucht. Durch diese Untersuchungen und die parallel laufende Weiterentwicklung der hygrothermischen Berechnungsmodelle werden weitere Grundlagen für eine praxisnahe, fachlich begründete Bemessung für die energetische Sanierung geschaffen.

Die Umsetzung des Vorhabens erfolgte im Fraunhofer-Zentrum für energetische Altbausanierung und Denkmalpflege Benediktbeuern in der Alten Schäflerei (Bild 4). Das auf das Jahr 1760 datierte Gebäude verfügt im sog. Kopfbau über einen großen, zusammenhängenden Raum im 1. Obergeschoß. Dieser Raum wurde für die Experimente ausgewählt, entsprechend hergerichtet und ausgestattet.



Bild 4:

Ansichten der Alten Schäflerei in Benediktbeuern. Das Bild links zeigt den Kopfbau im Jahr 2010 vor der Sanierung und das Bild rechts im Jahr 2016 nach Abschluss der Arbeiten.

## 5.1 Hintergrund und Umsetzung der Versuche

Für die Anbringung der einzelnen Innendämmsysteme sind für den schonenden Umgang mit der historischen und evtl. denkmalgeschützter Bausubstanz herkömmliche Montagesysteme kritisch zu hinterfragen und neuartige Befestigungssysteme zu entwickeln. Die in Vorüberlegungen eruierten neuen Montagesysteme müssen auch bautechnisch ausführbar sein. Hierzu sind in Zusammenarbeit mit den Dämmstoffherstellern Möglichkeiten auszuloten und um-

setzbare Lösungen zu erarbeiten. Aus den Ergebnissen der Vorüberlegungen, rechnerischen Voruntersuchungen und praktischen Vorversuchen werden für das jeweilige Innendämmsystem anwendbare und innovative, reversible Lösungen erarbeitet.

## **5.2 Praxisprobleme der Innendämmung (AP 1)**

Die Innendämmung ist eine aus bauphysikalischer Sicht durchaus kritische Fragestellung, da sie zahlreiche Aspekte aufweist, die es für eine dauerhafte und schadensfreie Umsetzung zu beachten gilt.

Anhand von Literaturlauswertungen und Umfragen bei den beteiligten Dämmstoffherstellern werden die ermittelten, typischen Praxisprobleme der Innendämmung beschrieben. Aus den Beschreibungen ergeben sich die Randbedingung und Grundlagen für die rechnerische Voruntersuchungen, Einbau der Innendämmung, Reversibilität und Schadensanalyse.

### **5.2.1 Einbindende Decken bzw. Innenwände**

Eine nachträgliche Innendämmung führt bei niedrigen Außentemperaturen zu einer Absenkung der Temperatur der Außenwand. Da im Altbaubereich die Decken und Innenwände meist ohne thermische Trennung an diese Außenwand angebunden sind, ist damit in Außenwandnähe auch deren Temperatur zum Teil deutlich erniedrigt. In Bild 5 ist dies am Beispiel einer angrenzenden Innenwand veranschaulicht (stationäre Betrachtung). Die Innendämmung bewirkt eine Absenkung der Oberflächentemperatur auf der Innenseite des Mauerwerks. Da die Innenwandoberfläche über die Außenwand abgekühlt wird, ergibt sich dagegen am Übergang zum gedämmten Bereich eine deutlich abgesenkte Temperatur mit der Folge von Schimmelpilzwachstum. Nach gängiger Lehrmeinung ist deshalb der Übergangsbereich der Innendämmung zur einbindenden Wand oder Decke kritisch. Am Fraunhofer IBP mit dem instationären Berechnungsprogramm WUFI® 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 in dem 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.



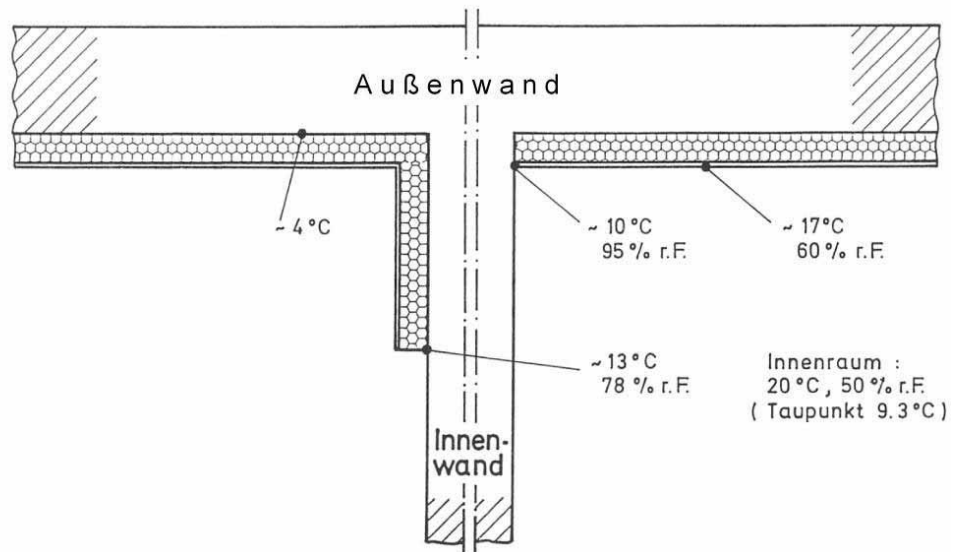


Bild 5:  
Schematische Darstellung der Wärmebrückenproblematik durch eine Innendämmung.

### 5.2.2 Tauwasser in bzw. hinter der Dämmung

Durch die Dämmmaßnahme kann die Temperatur hinter der Dämmung unter den Taupunkt der Raumluft sinken. Wasserdampfdiffusion oder Luftkonvektion aus dem Wohnraum führen dann zu einer Feuchterhöhung in diesem Bereich. Aus diesem Grund eignen sich diffusionsoffene Standarddämmstoffe, wie z.B. Mineralwolle, als Innendämmung nur sofern der Dämmwert dieser Innendämmung im Vergleich zum Dämmwert des anschließenden Wandaufbaus gering ist oder raumseitig eine zusätzliche Dampfbremse angebracht wird. Bezüglich dieser Problematik könnten sich diffusionsoffene aber kapillaraktive Dämmstoffe auch ohne Dampfbremse als geeignet erweisen. Neben der im Denkmalbereich bereits bekannten Dämmung aus Calciumsilikat wäre auch die Anwendung von Dämmputzen denkbar. Sie sind ebenfalls bis zu einem gewissen Grad kapillaraktiv und gegenüber der starren Calciumsilikat-Platte wesentlich einfacher auf unebene Untergründe applizierbar.

### 5.2.3 Fehlstellen bei Innendämmung

Bekanntermaßen sind gerade im Baubereich häufig Ausführungsfehler zu finden. Dies kann dazu führen, dass am Bauwerk eventuell durch die raumseitige Bekleidung und die Dämmung ein durchgehender diffusionsoffener Spalt auftritt. Auch bei korrekter Bauausführung ist aufgrund der Bewegungen im Mauerwerk oder Schrumpfungs- und Dehnvorgängen das Auftreten derartiger Fehlstellen nicht auszuschließen. Auch bezüglich dieser Fragestellung kann sich eine gewisse Kapillaraktivität des Dämmstoffes als fehlertoleranter erweisen, indem über kapillare Querleitung die örtliche Feuchtesituation entspannt wird.



## 5.2.4 Frostschadensgefahr außen durch Innendämmung

Eine zusätzliche Innendämmung kann den Trocknungsverlauf nach einem Schlagregenereignis gravierend beeinflussen, wie anhand von Bild 6 verdeutlicht wird. Bei einem Wandaufbau ohne Dämmung kann die Feuchte nach beiden Richtungen, also auch zur Raumseite hin, austrocknen. Dies ist insbesondere dann wichtig, wenn die Fassade keinen modernen Schlagregenschutz aufweist. Bringt man eine Innendämmung auf, die nach gängiger Praxis entweder selbst relativ dampfdicht ist (z.B. Hartschaumplatten) oder eine Dampfsperre beinhaltet, wird eine Austrocknung nach innen weitgehend unterbunden. Zusätzlich senkt die Innendämmung, außer im Hochsommer, das Temperaturniveau des dahinter liegenden Mauerwerks, was auch die Trocknung nach außen verlangsamt. Aus diesem Grund sollte versucht werden, den  $s_d$ -Wert der raumseitigen Dämmschicht inklusive Dampfbremse zu minimieren, ohne den Tauwasserschutz zu gefährden.

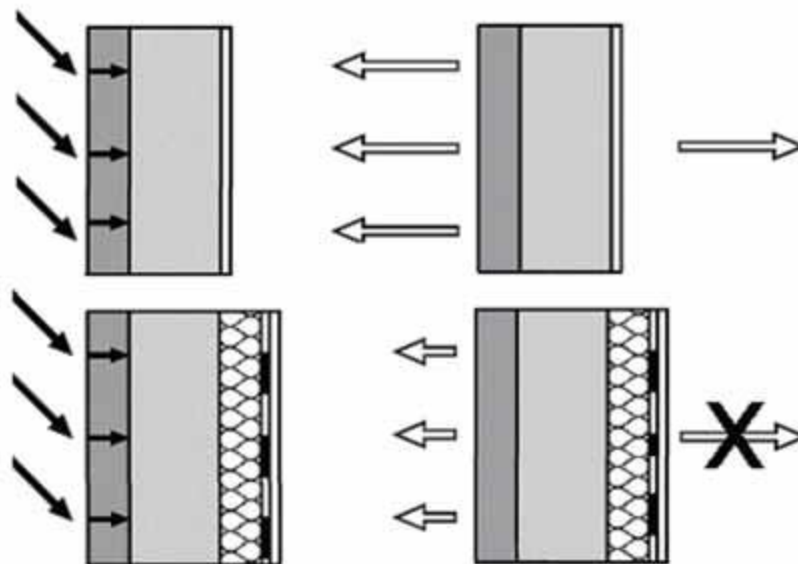


Bild 6:  
Schematische Darstellung der Befeuchtung und Trocknung einer Außenwand ohne Dämmung und mit Innendämmung.

Im Gegensatz zur schlagregenbedingten Feuchteaufnahme, die durch die Dämmung nicht beeinflusst wird, verlangsamt die Innendämmung durch Absenkung des Temperaturniveaus die Austrocknung nach außen und die Dampfsperre unterbindet eine Trocknung nach innen.

Die Absenkung des Temperaturniveaus in der Außenwand durch die Innendämmung und die damit einhergehende Verschlechterung der Trocknungsbedingungen lassen sich allerdings durch eine Anpassung des raumseitigen  $s_d$ -Wertes nicht lösen. Hier muss, wenn die rechnerischen Untersuchungen eine

diesbezügliche Gefährdung anzeigen, dafür gesorgt werden, dass der Schlagregenschutz verbessert wird.

### **5.2.5 Fensterlaibungen**

Eine Innendämmung führt natürlich auch zu einer Absenkung der Temperatur im Laibungsbereich der Fenster. Hier sind die Anwendungsmöglichkeiten für eine Dämmung meist sehr stark eingeschränkt, da im Falle der Beibehaltung der bestehenden Fenster im Bereich des Fensterstockes meist nur wenige Zentimeter zur Verfügung stehen. Dieser Bereich muss deshalb besonders beachtet werden und erfordert häufig gesonderte Dämmösungen mit gegebenenfalls anderem Dämmstoff als bei der Innendämmung der Wandflächen. Zu beachten ist, dass bei unterschiedlichen Materialkombinationen sich im zweidimensionalen Wärme- und Feuchtefeld anderen Bedingungen einstellen wie im Fall der Wandflächen.

### **5.2.6 Nutzungsänderung**

In vielen Fällen erfolgt die thermische Sanierung eines unter Denkmalschutz stehenden Gebäudes, weil eine neue Nutzung geplant ist, z. B. zu Wohnzwecken oder als Gaststätte. Zumeist ist dies mit einer deutlichen Erhöhung der innenseitigen Feuchtelast verbunden. Dies muss bei der energetischen Sanierung entsprechend Berücksichtigung finden, da damit Bereiche, die vorher keinerlei Schäden zeigten, aufgrund der neuen Belastung problematisch werden können.

### **5.2.7 Neue, dichte Fenster**

In den allermeisten unter Denkmalschutz stehenden Gebäuden sind keine Lüftungsanlagen eingebaut und deren nachträglicher Einbau selten mit den denkmalpflegerischen Vorstellungen vereinbar. Dies bedeutet, dass zumeist die Lüftung über die Fenster durch sogenannte Stoßlüftung erfolgt. Allerdings sollte neben der Stoßlüftung stets eine kontinuierliche Lüftung vorhanden sein, die permanent eingebrachte Feuchte abführt. Je schlechter der Wärmedämmstandard, desto höher muss bei gleicher Feuchtelast die durch Dauerlüftung erzielte Luftwechselrate sein. Diese Dauerlüftung erfolgt in Form des Infiltrationsluftwechsels vor allem über die Undichtheiten der Fenster. Im Altbaubereich liegt der typische Infiltrationsluftwechsel bei 0,5 h<sup>-1</sup> oder höher, sodass in den meisten Fällen für eine ausreichende Abfuhr der permanent eingebrachten Feuchte gesorgt ist. Bei Einbau dichter Fenster mit der Folge einer Absenkung des Infiltrationsluftwechsels auf 0,1 h<sup>-1</sup> kann die Restfeuchte nicht mehr in allen Fällen sinnvoll über Stoßlüftung abgeführt werden, mit der Folge des Risikos von Schimmelpilzwachstum.

### 5.2.8 Balkenköpfe

Große Unsicherheit besteht immer noch ausgerechnet im sensibelsten Bereich der Außenwand von historischen Gebäuden: den Holzbalkenköpfen von Decken. Was in diesem Bereich nach der Applikation eines Innendämmsystems geschieht, ist bislang nur ansatzweise untersucht worden. Mit Verweis auf diese Unsicherheit wird in der Praxis das durch Innendämmung erzielbare mögliche Energieeinsparpotenzial nur teilweise oder gar nicht ausgeschöpft. Die Problematik entsteht durch die Tatsache, dass die Deckenbalken die Dämmebene durchstoßen. In Abhängigkeit von der Konstruktion und den klimatischen Randbedingungen (Raumluftfeuchte, Schlagregen) kann es auf der Außenseite der Innendämmung bei Innendämmsystemen zu erhöhten Feuchteansammlungen kommen. Folglich kommt der Balkenkopf regelmäßig mit hoher Feuchte in Kontakt. Im Vergleich zu den meisten (mineralischen) Baustoffen sind Holzbalken jedoch weitaus sensibler. Längerfristig zu hoher Feuchte ausgesetzt folgt fast unweigerlich der Befall mit Mikroorganismen (Schimmel, Pilze, etc.), welche die Zerstörung der Deckenbalken herbeiführen können. Bauphysikalische Ursachen bewirken so den Verlust der Tragfähigkeit. Kommt es zu einem Schaden, ist die „Sanierung der Sanierung“ ausgesprochen kostspielig, zudem ist eine Schädigung an Holzbalkenköpfen oft erst spät zu erkennen.

Bei der rechnerischen Betrachtung der Balkenköpfe muss auch die hier möglicherweise auftretende Umströmung mit berücksichtigt werden. Dies wird durch Quell- und Schrumpfvorgänge des stark anisotropen Holzes mit beeinflusst.

## 5.3 Untersuchung des Bestandes (AP 2) und Bautechnische Vorversuche

Zu Beginn des Projektes stand eine umfangreiche Untersuchung des historischen Gebäudes der Alten Schäfflerei am Kloster Benediktbeuern.

### 5.3.1 Baugeschichte der Alten Schäfflerei

Die alte Schäfflerei ist Teil des Klosters Benediktbeuern. Sie befindet sich im Westen der Klosteranlage und liegt im dritten Klosterhof, dem Handwerkshof. Dieser Hof wurde nach den Bauplänen aus dem 18. Jahrhundert nicht vollendet. Zur Ausführung kam ab 1760 lediglich das Gebäude mit der heute noch erhaltenen Alten Schäfflerei und Wagnerei, als ein von Norden nach Süden verlaufender Flügelbau.

Das Gebäude der Alten Schäfflerei ist in zwei Gebäudeteile gegliedert: in Kopfbau und Nordbau, die jeweils in Erdgeschoss, Obergeschoss und Dachraum untergliedert sind. Der Kopfbau ist in Ost-West-Richtung orientiert.

Im Jahre 1930 erwarb die Ordensgemeinschaft der Salesianer Don Boscos (SDB) die Klosteranlage in Benediktbeuern. Ab den 1930er Jahren wurde der Kopfbau der Alten Schäfflerei im Zuge der Übernahme durch die Salesianer Don

Boscos zur Schmiede umgebaut und seitdem als solche genutzt. In der Zeit um 1945 wurden im ersten Obergeschoss Zwischenwände eingezogen, um Wohnungen für Flüchtlingsfamilien zu errichten. Diese Räume wurden später zum Teil von einem Mitglied der Salesianer Don Boscos bis 2010 bewohnt. Das Erdgeschoss des Kopfbaus diente bis zuletzt als Hausmeisterei des Klosters.

Seit der Übernahme des Klosters durch die Salesianer Don Boscos wurde der Gebäudekomplex durch Sanierungs- und Restaurierungsperioden vor dem Verfall bewahrt. Entsprechend dem Auftrag ihres Gründers, dem Priester und Jugendzieher Johannes Bosco (1815-1888), entwickelten die Salesianer Don Boscos das Kloster zu einem Zentrum religiöser Bildung, Wissenschaft und Erziehung im Dienst an jungen Menschen.

### 5.3.2 Die Räume im ersten Obergeschoß der Alten Schäfllerei

Die Alte Schäfllerei eignet sich mit einem für historische Gebäude typischen, im Vergleich zu den heutigen Anforderungen, geringen Wärmeschutz und der historischen Bausubstanz bestens für die vorgesehenen Untersuchungen. Das Gebäude verfügt über keine Dämmung im Wand-, Boden- oder Dachbereich. Das offene Dachwerk ist stark belüftet und weist eine historische Dacheindeckung auf (Bild 7). Vor, während und nach der Dämm-Maßnahme werden an diesem Gebäude beispielhaft Messungen, sowie rechnerische Untersuchungen an verschiedenen Innendämmsystemen durchgeführt, um daraus vergleichend die Vor- und Nachteile der unterschiedlichen Systeme abzuleiten. Die Ergebnisse werden didaktisch für Fort- und Weiterbildungsmaßnahmen aufbereitet und später sowohl vor Ort, als auch über Publikationen und den Internetauftritt des Kompetenzzentrums ([www.denkmalpflege.fraunhofer.de](http://www.denkmalpflege.fraunhofer.de)) dargestellt. Zusätzlich soll eine gezielte, unabhängige Beratung vor Ort angeboten werden.



Bild 7:  
Die Alte Schäfllerei im Kloster Benediktbeuern beherbergt das Fraunhofer-Zent-

rum für energetische Altbausanierung und Denkmalpflege, Aufnahme 18. Oktober 2012.

Bis zu zehn unterschiedliche Dämmmaterialien werden im Obergeschoss des Kopfbaus der Alten Schäferei aufgebracht. Hierbei werden auch Gebäudeecken, einbindende Wände und Fensterlaibungen berücksichtigt.

Das Obergeschoss weist eine lichte Wandhöhe bis Unterkante Zerrbalkenebene von 3,50 m auf. Abzüglich der Unterkonstruktion einer neu eingezogenen Geschossdecke hin zum Dachraum verbleiben ca. 3,00 m lichte Raumhöhe. Es wird darauf geachtet, dass die Innendämmsysteme einer Wandebene aus hygrothermischen und auch optischen Gründen mit annähernd gleicher Dicke an jeweils einer Wandseite zusammengefasst werden. Dadurch lassen sich die gegenseitigen Beeinflussungen der Dämmsysteme verringern. Ein homogenerer Schichtaufbau wird damit auf einer Wandflucht ermöglicht.

An den Nord- und Südseiten sind jeweils drei Bereiche für unterschiedliche Materialien vorgesehen – an der Westseite 2 Flächen, wobei in jedem Feld je ein Fenster eingeschlossen ist. Auf der Ostseite wurde eine Flächen mit einem Dämmmaterial belegt (Bild 8). In der Mitte der Ostfassade wird ein Feld nicht mit einer Innendämmung belegt und dient somit als Referenzfläche für die Versuche. Auch hier beinhalten die Felder jeweils ein Fenster, sodass die unterschiedlichen Ansätze zur Dämmung von Fensterlaibungen ebenfalls begutachtet und untersucht werden können. Vorgesehen ist auch, unterschiedliche Varianten der Laibungsdämmung zu untersuchen und am Gebäude zu zeigen.

In der Mitte der Westfassade wird ein Feld nicht mit einer Innendämmung belegt, sondern mit einem innenliegenden wandhohen Fenster versehen. An dieser Stelle weist das historische Fenster einige Besonderheiten auf. Hier sollte vermutlich die Fenstersituation in den 1940ern im Zuge von Wohnraumeinbauten für Flüchtlinge angepasst werden. Dies kollidierte mit dem äußeren Erscheinungsbild und so wurde das veränderte, vergrößerte Fenster wieder halbseitig verdeckt. Diese Begebenheit möchte man im Rahmen der Ausstellung, die im Obergeschoss stattfinden wird, als Zeitzeugnis erhalten und zeigen.

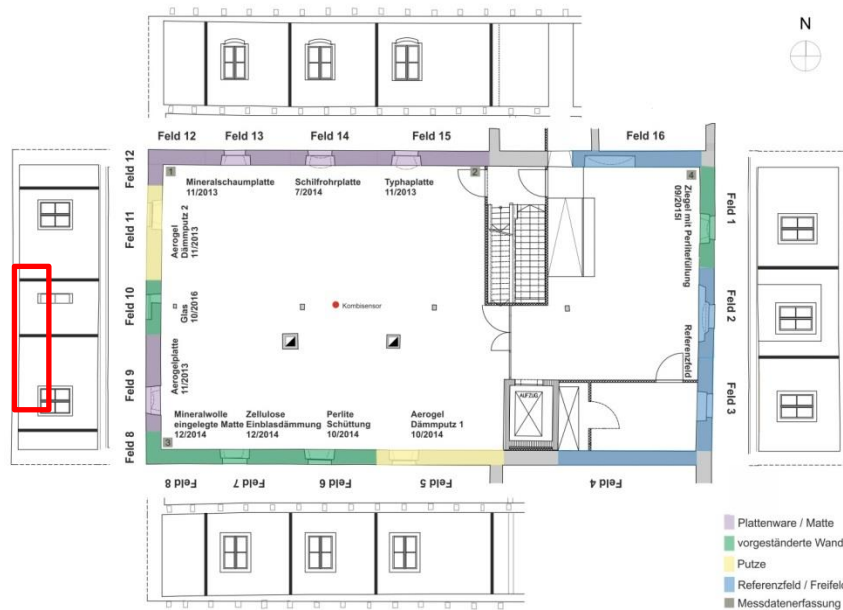


Bild 8:  
Verteilung der Dämmsysteme auf die unterschiedlichen Versuchsfelder.

### 5.3.3 Bauforschung zum Wandaufbau im ersten Obergeschoß der Alten Schöfflerei

In denkmalgeschützten Bauwerken werden im Rahmen der Bauforschung aus Untersuchungs- und Dokumentationszwecken die verschiedenen Schichten der Oberflächenfassungen an repräsentativen Flächen in Form von kleinen Öffnungen freigelegt. Vor Beginn der Versuche in der Alten Schöfflerei erfolgte daher eine Voruntersuchung der historischen Farbfassungen in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Restaurierung, Kunsttechnologie und Konservierungswissenschaft der Technischen Universität München. Der stratigraphische Aufbau der Malereien und die zeitlichen Abfolgen der dekorativen Elemente wurde in einem weiteren Kooperationsprojekt untersucht [4].

Die Außen- und Innenwände der alten Schöfflerei bestehen zum größten Teil aus Mischmauerwerk. Das Mischmauerwerk ist sowohl bauzeitlich bedingt, als auch resultierend aus baulichen Umbaumaßnahmen, wie der Vermauerung von Fensteröffnungen oder ehemaligen Durchgängen. Diese wurden mit Ziegeln und dunklem Putz durchgeführt. Dieser Putz wird auf etwa 1940 datiert. In Bereichen, in denen keine Umbaumaßnahmen stattgefunden haben, setzt sich das Mauerwerk aus ungleichmäßig gebrochenen Ziegelsteinen zusammen. Zudem wurde in den Innenräumen Kalkputz mit einer Dicke von ca. 2,5 cm identifiziert [1]. Bild 9 zeigt den Wandaufbau exemplarisch an Feld 08.



Bild 9:  
Wandaufbau, exemplarisch Feld 08.

#### 5.3.4 Schichtenabfolge Farbauftrag im ersten Obergeschoß der Alten Schäfflerei

Die Versuchsfelder 06, 07, 08, 09 und 10 stellen hinsichtlich des Farbauftrages auf den Bestandswänden der Alten Schäfflerei eine Besonderheit dar. Auf diesen Versuchsfeldern wurden Walzendekorationsmalereien gefunden, die wohl in den 1960er Jahren entstanden sind. Der Farbauftrag der Malereien erfolgte mit leimgebundenen Pigmenten und mit bis zu neun Schichten. Exemplarisch für alle Versuchsfelder wurde an diesen Feldern die Schichtenabfolge der Farbaufträge analysiert. Bild 10 bis Bild 14 veranschaulichen den Schichtenaufbau. Die oberste Malschicht war schwach gebunden und stark puderartig. Bild 10 bis 11 zeigen ein Element der Walzendekorationsmalerei. Zur besseren Untersuchung des Schichtenaufbaus sind Dünnschliffproben angefertigt worden. Bild 13 zeigt eine Dünnschliffprobe exemplarisch für alle Versuchsfelder an Feld 06. Zu erkennen sind bis zu neun Schichten Bemalung der Wandfläche. Die Wandbemalung wurde mit leimgebundener Farbe durchgeführt. Gut sichtbar ist in Probe Feld06, rechts oben, die Schollenbildung der oberen Farbschicht. Zu sehen sind des Weiteren ca. 60 % Kalkstein, hell und dunkel abgerundet, 30 % Quarzsandkörner, 10 % Fossilienreste und andere Komponenten. Ebenfalls zu sehen sind zwei unterschiedliche Kalksteine. Dunkel-schwarz opake und durchsichtige. Die Kalksteinkomponenten sind abgerundet Sedimentgesteine. Im kalkhaltigen Mörtel sind feine Risse erkennbar. Bild 14 zeigt die stratigraphische Untersuchung der historischen Farbfassungen exemplarisch am Feld 10.





Bild 10:  
Walzendekorationsmalerei, exemplarisch Feld 08.



Bild 11:  
Schichtenaufbau, exemplarisch Feld 07.





Bild 12:  
Schichtenaufbau, exemplarisch Feld 08.

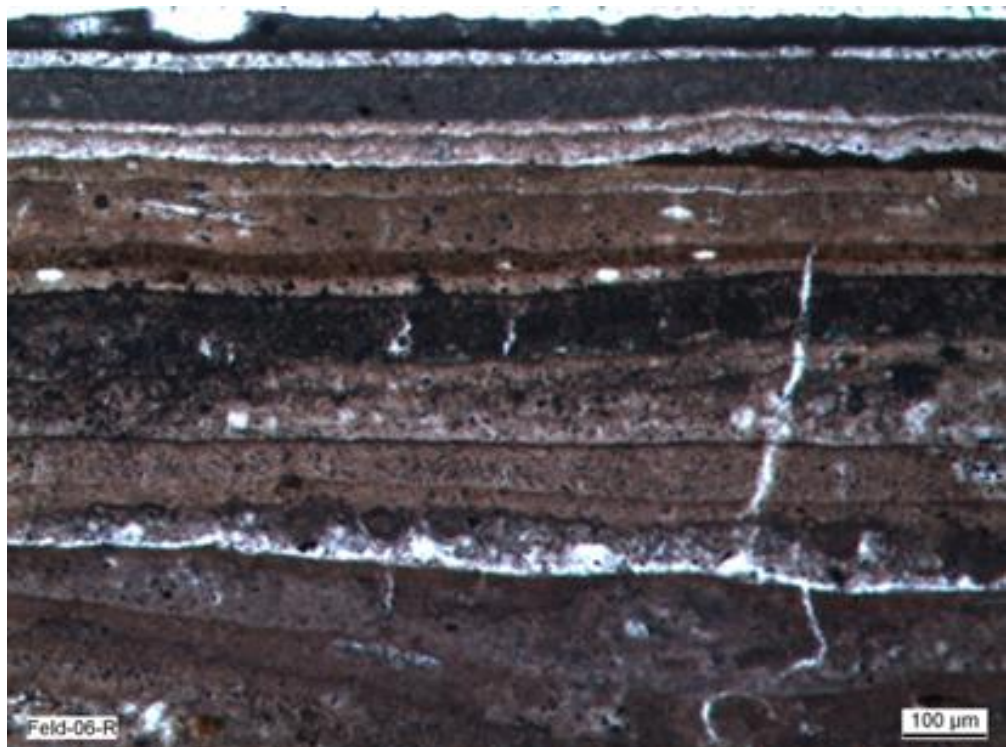


Bild 13:  
Mikroskopischer Dünnschliff, Feld 06, rechts.




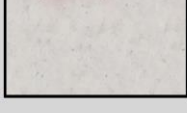


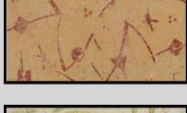



Schicht	Beschreibung	Löslichkeit und Freilegbarkeit
0	 Putz	
1	 Farbschicht: weiß	Nicht wasserlöslich. Vermutlich Kalktünche (HCl-Test?). Schwierig freizulegen, da erste Farbschicht über rauer Putzoberfläche.
2	 Farbschicht: <b>hellblaue Grundfarbe mit rot-grünem Band.</b> Unter grüner Malerei blaue Untermalung. Band vermutlich mit dem Pinsel gemalt.	Grundfarbe nicht wasserlöslich. Walzenmalerei wasserlöslich. Darüberliegende Farbschichten als zusammen- hängendes Schichtpaket mechanisch leicht von Schicht 2 trennbar.
3	 Farbschicht: weiß	Nicht wasserlöslich. Schwacher Verbund zwischen 2. und 3. Farb- schicht, deshalb schwierig mechanisch freizule- gen.
4	 Farbschicht: <b>dunkelrosa, Walzenmalerei unbekannt.</b> Spuren von violetten Punkte oder Spre- ngel ohne erkennbare Regelmäßigkeit.	Nicht wasserlöslich. Erschwerte mechanische Freilegbarkeit wegen hohem Verbund zur darunter- und darüberlie- gender Schicht.
5	 Farbschicht: <b>weiße Grundfarbe mit blauer Walzenmalerei.</b> Über blauer Walzenmalerei möglicherwei- se dünne weiße Lasur.	Geringer wasserlöslich. Erschwerte mechanische Freilegbarkeit wegen hohem Verbund zur darunter- und darüberlie- gender Schicht.
6	 Farbschicht: <b>gelbe Grundfarbe mit roter Walzenmalerei.</b> Gelbe Grundfarbe zweischichtig mit da- zwischenliegenden braunen Farbresten.	Grundfarbe nicht wasserlöslich. Walzenmalerei wasserlöslich. Gut mechanisch freilegbar.
7	 Farbschicht: <b>hellgrüne Grundfarbe mit grüner Walzenmalerei.</b>	Grundfarbe wasserlöslich. Walzenmalerei wasserlöslich.
8	 Farbschicht: <b>weiße, leicht blaustichige Grundfarbe mit rot-orangener Walzenmalerei</b>	Grundfarbe nicht wasserlöslich. Walzenmalerei wasserlöslich.
9	 Farbschicht: <b>rosa Grundfarbe mit orangener Blumenwalzenmalerei.</b> Rosa Grundfarbe lasierend über darun- terliegender durchscheinender 8. Schicht.	Grundfarbe und Walzenmalerei löslich mit warmem Wasser. Mit Wasser entmineralisiert schlechtere Lösung.

Bild 14:  
Stratigraphische Untersuchung der historischen Farbfassungen am Feld 10.

### 5.3.5 Zustand der Walzendekorationsmalerei

Die oberste Farbschicht ist stark puderartig. Zudem kam es in einzelnen Bereichen zu Schollenbildung der einzelnen Farbschichten. Stellenweise wurden die Walzendekorationsmalereien wieder mit Farbe überstrichen. Vereinzelte Ornamente sind in diesen Bereichen stets sichtbar (Bild 15).



Bild 15:  
Zustand Malerei, Schollenbildung.

### 5.3.6 Ursachen der Schäden

Die Schäden sind vermutlich auf ein nicht konstantes Raumklima und auf anhaltende Bauteilfeuchte der Außenwände der Alten Schäflerei zurückzuführen. Die Walzendekorationsmalereien z. B. befinden sich alle auf Außenwänden. Diese weisen in den Wintermonaten hohe Feuchtigkeitswerte auf, welche unter anderem durch den schlechten außenseitigen Regenschutz ( $w$ -Werte des Außenputzes von 1,8 bis 7,7 kg / (m<sup>2</sup> · h<sup>0,5</sup>) mit verursacht werden. Es kommt zu Quellverhalten der Malschicht in extrem feuchten Perioden und zum Schwindverhalten in extrem trockenen Perioden. Das Resultat sind Haf-

tungsverluste der Malschichten untereinander und Schollenbildungen der obersten Malschicht.

Ebenfalls sind die Schadensursachen in der unterschiedlichen Materialfestigkeit von Träger und Malgrund zu suchen. Hierdurch kann es zu Spannungen und in Folge dessen zu Rissbildungen und Schollenbildungen im Malgrund kommen.

### **5.3.7 Zielfestlegung des Restaurierungskonzeptes bezüglich der Anpassung an den späteren Innendämmungseinbau**

Um eine Montage und Demontage des Schichtenaufbaus der reversiblen Innendämmungssysteme ohne Schädigung der historischen Bestandswandoberfläche gewährleisten zu können, muss eine homogene, geschlossene Wandoberfläche vorhanden sein. Bereiche mit Fehlstellen waren zu kitten, Schollen mussten weitestgehend niedergelegt und konsolidiert und die puderartige Malschicht gefestigt werden. Die Kittungen wurden nach Absprache im Team durchgeführt. Die Funktionalität der Kittung, eine ebene Oberfläche herzustellen, war vordergründig. Dies war die Voraussetzung für einen gleichmäßigen Verbund der Wandoberfläche und des darauf aufbauenden reversiblen Schichtenaufbaus der Innendämmungssysteme.

### **5.3.8 Durchgeführte restauratorischen Arbeiten**

Die Wandoberfläche wurde zunächst vorsichtig mittels Pinsel gereinigt. Die Kittung der Fehlstellen erfolgte wie folgt: Zum Schutz der historischen Bestandswandoberfläche wurde am Rand der Fehlstelle Cyclododecan in der Schmelze mit Siedegrenzbenzin 100-140 °C, verdünnt mit dem Pinsel, aufgetragen. Nach oberflächlicher Trocknung der aufgetragenen Schmelze wurden die Fehlstellen mit Mörtel aus Sumpfkalk und Sand im Verhältnis 1: 3 Teile geschlossen. Schollenbildung wurden wie folgt behandelt: Die Schollen wurden mit Ethylen vorbenetzt (Mischungsverhältnis: Ethylen : Wasser = 1:3). Der Auftrag erfolgte mit einer Spritze und entsprechender Kanüle. Die Niederlegung erfolgte nach jeweils der Schollendicke angepassten Einwirkzeit und wurde mit Tylose K 300, Methylhydroxyethyl-cellulose im Mischungsverhältnis Tylose : Wasser : Ethylen = 1:40:20 und einem Stempel aus Watte und Hostaphanfolie durchgeführt. Die Festigung der puderartigen Malschicht erfolgte mit Tylose K 300, Methylhydroxyethyl-cellulose (Mischungsverhältnis Tylose: Wasser : Ethylen = 1:40:20). Hierzu wurde die puderartige Malschichtoberfläche zuvor mit Japanpapier mit 11 g pro m<sup>2</sup> bedeckt, um ein Verwischen der Walzendekorationsmalereien durch den Auftrag des Festigungsmittels mit dem Pinsel zu vermeiden. Danach erfolgte der Auftrag des Festigungsmittels mit dem Pinsel. Überschuss an Festigungsmittel wurde entfernt. Anschließend wurde das Japanpapier wieder abgenommen.

## 5.4 Beschreibung der verwendeten Systeme

Im Folgenden erfolgt die Beschreibung der Randbedingungen für die Versuche und des experimentellen Aufbaus.

Als Dämmstoffe werden sowohl innovative, hochdämmende und dabei dünne Systeme, als auch Materialien aus nachwachsenden Rohstoffen einbezogen. Beide Kriterien sind für die Denkmalpflege relevant, da hier zum Einen dünne hoch effiziente Systeme gefragt sind, die das Erscheinungsbild der historischen Gebäude möglichst wenig beeinträchtigen, zum anderen aber auch Materialien, die aufgrund ihrer denkmalpflegerischen Kompatibilität mit historischen Baustoffen bislang von Vertretern der Denkmalpflege bevorzugt werden. Grundsätzlich können die Systeme in diffusionsoffene und zum Teil kapillarkaktive Dämmstoffe und diffusionshemmende bis diffusionsdichte Dämmmaterialien und -systeme unterschieden werden. Beide Varianten finden Betrachtung. Insgesamt zehn unterschiedlichen Dämmvarianten werden im Fraunhofer-Zentrum Benediktbeuern eingebaut und messtechnisch untersucht. Jede der ca. 10 m<sup>2</sup> großen Wandflächen, bis auf Feld 9 mit Mineralwolle, schließt dabei eine Fensteröffnung mit ein, um auch die Laibungs- und Anschlussproblematik zu untersuchen.

### 5.4.1 Untersuchte Systeme und Materialien

#### Typha

Rohrkolben (Typha) ist eine Süßgrasart, die als Wasser- und Sumpfpflanze in Feuchtgebieten auf der gesamten Welt verbreitet ist. In Deutschland wächst sie an Ufern von Teichen und Seen, wird jedoch nicht großflächig angebaut. Die Blätter der Typha-Pflanze besitzen ein faserverstärktes Stützgewebe, das mit einem weichen Schwammgewebe ausgefüllt ist. Durch diese von Natur aus gegebene Beschaffenheit der Pflanze ist der Baustoff leicht und umschließt eine große Menge ruhender Luft, wodurch er als Dämmstoff sehr gut geeignet ist. Darüber hinaus besitzen Typha-Pflanzen eine natürliche Schimmelpilzresistenz, die bei der Winterernte ausgeprägter ist, da dann der größte Teil der Nährstoffe aus den Blättern in die Rhizome umverteilt ist.

Für die Herstellung von Dämmplatten werden die Halme mit dicken Blättern, die bis zu fünf Meter lang werden können, längs in stabförmige Teilstücke aufgeschnitten. Die auf etwa sieben Zentimeter gekürzten Stäbe werden dann in einer Trommel mit einem mineralischen Kleber eingesprüht, um die Masse anschließend in einer beheizten Presse zu formen.

Die auf diese Weise hergestellten Dämmplatten sind diffusionsoffen und bieten bei relativ geringer Wärmeleitfähigkeit einen guten Wärmeschutz. Der Magnetit-gebundene Dämmstoff besitzt außerdem verbesserte Brandschutzeigenschaften und aufgrund der relativ hohen Rohdichte eine bessere Schalldämmung als andere Systeme. Ein weiterer wesentlicher Vorteil besteht in der energiearmen Produktion und Schadstofffreiheit des Materials, welches direkt kompostierbar ist.



Kennwerte (Typha):

Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$ : ~0,055 W/mK

Rohdichte:  $\rho$ : ca. 260 kg/m<sup>3</sup>

Druckfestigkeit: ca. 0,50 N/mm<sup>2</sup>

Baustoffklasse nach DIN 4102: B1 schwer entflammbar



Bild 16:  
Schmalblättriger Rohrkolben (*Typha angustifolia*).



Bild 17:  
Anschnitt eines Typharohres.



Bild 18:  
Typha-Dämmplatten und Typha-Fugenmörtel zur winddichten Dämmung der Wandausfachung.

## Schilfrohr-Matten

Schilf bzw. Schilfrohr (Reet) ist eine Süßgräserart, die in verschiedenen Arten weltweit vorkommt. Die Wasserpflanze kann an einem Tag bis zu 3 cm wachsen und erreicht in Europa eine Höhe bis zu 4 m. Schilf wird bereits seit der Frühsteinzeit für Bauzwecke verwendet, als Dachdeckung oder als Unterkonstruktion für Lehm- oder Kalkputze. Heute ist die Verwendung von Schilf als Dämmstoff für Dach-, Wand- und Bodenkonstruktionen sehr vielseitig. Die Halme werden nach der Trocknung nach Größe und Einsatzzweck sortiert. Lange dicke Schilfrohre finden für Schilfrohrdämmung Einsatz, dabei werden mehrere parallele lange Schilfrohre in einer Dämmplatte verpresst. Die Luftkammern in und um die Schilfrohre ergeben gute Dämmwerte.

Der hohe Kieselsäureanteil in den Halmen sorgt im trockenen Zustand für Resistenz gegen Fäulnis, Pilze und Schädlinge, verhindert Aufquellen und Schwinden und bewirkt, dass Schilf im Verbund mit Putz nur schwer entflammbar ist. Schilfrohr-Matten liegen auch an nicht ganz ebenen Wänden problemlos an. Da die Halme in sich verschiebbar sind, lassen sich Bewegungen im Untergrund sehr gut ausgleichen.

Schilfrohr-Matten werden umweltverträglich und ressourcenschonend hergestellt und erlauben ein problemloses Recycling. Da Schilf jedoch in vielen Ländern Europas unter Naturschutz steht, müssen teilweise lange Transportwege in Kauf genommen werden. Für Schilfrohr-Matten gibt es derzeit noch keine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung.

### Kennwerte:

(Quelle: Baunetzwissen.de / Wikipedia.de)

Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$ : ~ 0,055 W/mK

Rohdichte  $\rho$ : ca. 190 - 225 kg/m<sup>3</sup>

Wasserdampfdiffusionswiderstand  $\mu$ : 2

Baustoffklasse nach DIN 4102: B2 normal entflammbar





Bild 19:  
Naturbaustoff Schilfrohr mit Draht in Schilfrohr-Matten gebündelt (Quelle: HISS  
REET Schilfrohrhandel GmbH, Bad Oldesloe).

## Zelluloseflocken

Dämmstoffe aus Zellulose werden aus mechanisch zerkleinertem Zeitungspapier hergestellt, das zerfasert wird, sodass Flocken entstehen. Am häufigsten eingesetzt wird der Dämmstoff als Einblasdämmung für Hohlräume, auch ein Aufsprühen des Materials ist möglich.

Der Primärenergieeinsatz zur Herstellung inklusiv aller Prozesse liegt mit ca. 50 kWh/m<sup>3</sup> unter dem vieler anderen Dämmmaterialien. Durch chemische Zusätze (3 - 20% Borsalze oder Ammoniumphosphat) erreicht der Dämmstoff die Baustoffklassen B2 bis B1, normal bzw. schwer entflammbar. Die mineralischen Salze machen die Zelluloseflocken resistent gegen Ungeziefer und Schimmelpilze sowie verrottungssicher.

Der Dämmstoff wird auch für Innendämmungen verwendet: Auf der Unterkonstruktion werden diffusionsoffene Plattenwerkstoffe oder Dampfbremsen montiert und luftdicht verklebt. Zum Innenraum hin werden Trockenbauplatten aus Gips oder Putze auf Trägerplatten angebracht. Anschließend werden die Zelluloseflocken in den Hohlraum eingeblasen.

Kennwerte (Zellulosefasern):

(Quelle: Baunetzwissen.de)

Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$ : 0,040 W/mK

Rohdichte  $\rho$ : 60 kg/m<sup>3</sup>

Wasserdampfdiffusionswiderstand  $\mu$ : 1 - 2

Baustoffklasse nach DIN 4102: B2 normal entflammbar

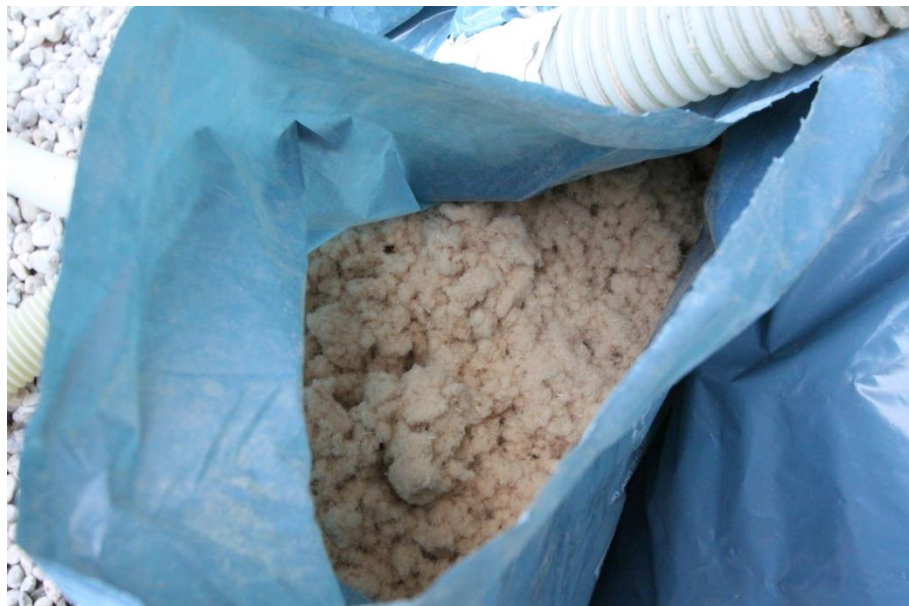


Bild 20:

Zelluloseflocken als Einblasdämmstoff zur Hohlraumdämmung.

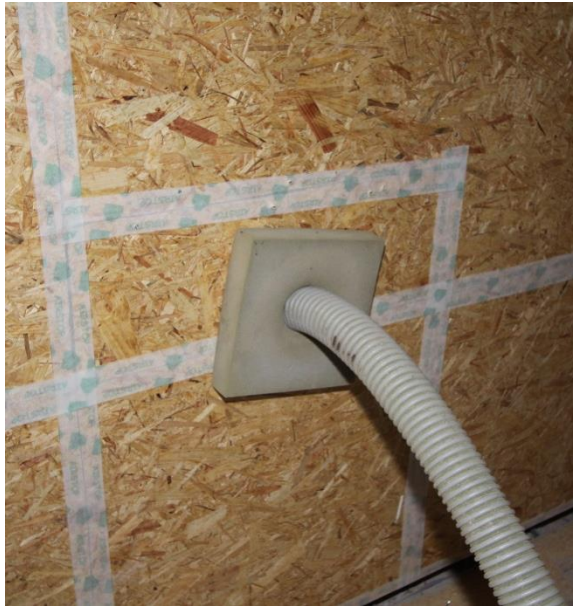


Bild 21:  
Einblasen der Zelluloseflocken zur Hohlräumdämmung.

### **Mineralische Dämmplatten**

Die mineralischen Grundstoffe für die Herstellung von Mineraldämmplatten sind Quarzsand (Siliciumdioxid) und die Bindemittel gebrannter Kalk (Calciumoxid) und Zement. Diese werden mit Wasser gemischt und mittels organischer (Proteine) oder anorganischer (Aluminium) Schaumbildner aufgeschäumt, in Formen gefüllt und bei hohem Druck mit Wasserdampf gehärtet. Auf diese Weise entsteht ein feinporiger und harter Schaum, der zu Platten geschnitten und hydrophobiert wird. Mineraldämmplatten lassen sich schneiden und sägen und werden vollflächig auf tragfähigen Untergrund geklebt. Aufgrund ihrer Druckempfindlichkeit werden sie in der Regel verputzt oder verspachtelt.

Das Material zeichnet sich aus durch ein geringes spezifisches Gewicht (hoher Luftporenanteil) und hohe Porosität und dadurch eine geringe Wärmeleitfähigkeit und gute Dämmwirkung. Kalkgebundene Mineraldämmplatten sind diffusionsoffen und kapillaraktiv. Mineraldämmplatten sind nicht brennbar.

#### Kennwerte:

(Quelle: Baunetzwissen.de)

Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$ : ~ 0,045 W/mK

Rohdichte  $\rho$ : 90 - 130 kg/m<sup>3</sup>

Wasserdampfdiffusionswiderstand  $\mu$ : 3 - 5

Baustoffklasse nach DIN 4102: A1 nicht brennbar



Bild 22:  
Verputzte Mineraldämmplatte zur Innendämmung einer Außenwand.

### **Mineralwolle**

Bei Mineralwolle oder Mineralfaser-Dämmstoffe handelt es sich um künstlich hergestellte mineralische Fasern. Je nach Ausgangsmaterial unterscheidet man Glaswolle und Steinwolle. Bei der Herstellung von Glasfasern werden die Grundstoffe Quarzsand, Soda und Kalkstein eingesetzt. Den Rohstoffen wird zwischen 60 und 70 % Altglas zugesetzt. Steinfasern werden hauptsächlich aus Basalt, Diabas, Feldspat, Dolomit, Sand, Kalkstein und Altglas oder Basalt, Diabas und Recycling-Formsteinen hergestellt.

Für die Herstellung von Mineralwolle im Zieh-, Blas- oder Schleuderverfahren werden die Rohstoffe zwischen 1.200 und 1.600 °C geschmolzen. Die Schmelze wird zerkleinert und anschließend geschleudert bzw. versponnen. Dem Dämmstoff werden bis zu 7 % Kunstharze als Binder zugegeben, um die Formstabilität zu gewährleisten. Anschließend wird der Faservlies im Heißluftstrom ausgehärtet, wobei flüchtige Bestandteile (Phenol, Formaldehyd) entfernt werden. Zurück bleibt das ausgehärtete Kunstharz (z.B. Bakelit). Als weitere Zusätze können Öle, die den Staubanteil verringern, und wasserabweisende Stoffe enthalten sein. Mineralwolle wird als weiche und formbare Vliesrolle oder -matte hergestellt oder in stärkerer Verdichtung als Platten.

Durch die Variabilität der Rohstoffe und Zusatzstoffe sowie unterschiedliche Herstellungsverfahren entsteht eine breite Palette von Mineralfaserdämmstoffen mit verschiedenen Eigenschaften, die sich überall im Gebäude einsetzen lassen. Mineralwolle ist leicht zu verarbeiten, nicht brennbar und gegen Schimmel, Fäulnis und Ungeziefer resistent. Sie besitzt eine gute Wärmeleitfähig-



higkeit von 0,032-0,040 W/mK. Steinwolle besitzt im Vergleich zu Glaswolle eine höhere Temperaturbeständigkeit.

Für die Herstellung von Mineralwolle wird ein RAL-Gütezeichen vergeben, um bestimmte Kriterien des Gesundheitsschutzes zu erfüllen. Die Herstellung von Mineralwolle ist energieintensiv. Das Material ist begrenzt recyclingfähig und nicht kompostierbar.

#### Kennwerte:

(Quelle: Baunetzwissen.de)

Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$ : 0,032 - 0,040 W/mK

Rohdichte  $\rho$ : 8 - 500 kg/m<sup>3</sup>

Wasserdampfdiffusionswiderstand  $\mu$ : 1 - 2

Baustoffklasse nach DIN 4102: A1 / A2 nicht brennbar



Bild 23:

Vorgeständerte Wand mit Mineralwollendämmung zwischen Metallprofilen eingelegt.

### **Perlite-Schüttung**

Ausgangsmaterial für den Dämmstoff Perlite ist das Silikatgestein Perlit, welches vulkanischen Ursprungs ist. Das Rohmaterial wird zu kleinen Körnern zermahlen und kurzzeitig auf über 1000 °C erhitzt. Dabei entweicht das chemisch gebundene Wasser im Gestein und die Perlitkörner werden auf das 15 bis 20-fache ihres Volumens aufgebläht. Auf diese Weise entstehen Granulate mit zahlreichen Lufteinschlüssen, die für die gute wärmedämmende Eigenschaft von Perlite verantwortlich sind. Je nach Anwendungsgebiet werden Perlite mit Silikonen hydrophobiert oder mit Bitumen oder Naturharzen ummantelt. Perlite ist selbst ohne chemischen Zuschlagstoff nicht brennbar und wird des-

halb in die Brandschutzklasse A1 eingestuft. Der Dämmstoff ist äußerst temperaturbeständig, unempfindlich gegen Feuchtigkeit, Verrottung und Ungeziefer und kann als Trockenschüttung in Fußboden-, Wand- und Dachkonstruktionen eingesetzt werden. Bei der Anwendung als Schüttung muss die Dichtigkeit der Unterkonstruktion sichergestellt sein. Natürlicher Bläherperlite ist schadstofffrei und gesundheitlich unbedenklich. Perlite haben eine nahezu unbegrenzte Lebensdauer und sind jederzeit wiederverwertbar bzw. als Bauschutt deponierbar.

Kennwerte:

(Quelle: Baunetzwissen.de)

Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$ : 0,040 - 0,060 W/mK

Rohdichte  $\rho$ : 80 - 180 kg/m<sup>3</sup>

Wasserdampfdiffusionswiderstand  $\mu$ : 5 - 6

Baustoffklasse nach DIN 4102: A1 nicht brennbar



Bild 24:

Weißer Perlite-Schüttung (Quelle: Wikipedia.de).

### **Vorgemauerte Ziegel mit Perlite-Füllung**

Vormauerziegel mit Perlite-Füllung wurden speziell für die (nachträgliche) Innendämmung von Wänden entwickelt und optimiert. Es handelt sich dabei um eine Ziegelsteinhülle, gefüllt mit dem natürlichen Dämmstoff Perlite (siehe *Perlite-Schüttung*). Im Gegensatz zu vielen anderen Dämmsystemen werden die Ziegel freistehend vor der Bestandswand gemauert. Sowohl Ziegel als auch Perlite sind gesundheitlich unbedenklich. Das Innendämmsystem eignet sich insbe-

sondere für Anwendungen, wo mechanische Widerstandsfähigkeit erforderlich ist oder eine selbststehende Vormauerung Vorteile bringt.

Technische Daten:  
(Herstellerangaben)

Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$ : 0,065 W/mK  
Rohdichte  $\rho$ : 580 kg/m<sup>3</sup>  
Wasserdampfdiffusionswiderstand  $\mu$ : 4 - 6  
Baustoffklasse nach DIN 4102: A2 nicht brennbar



Bild 25:  
Vormauerziegel mit Perlite-Füllung zur Innendämmung von Wänden.

### **Aerogelputz**

Aerogele sind Festkörper mit einer extrem porösen Gefügestruktur, deren Volumen bis zu 98 % Prozent aus luftgefüllten Poren besteht. Zur Herstellung dient am häufigsten amorphes Siliciumdioxid, aber auch Metalloxide wie z. B. Aluminium und Chrom sowie Kohlenstoffverbindungen finden Anwendung. Um Silicat-Aerogel herzustellen, wird zunächst Natriumsilicat in Wasser gelöst (Wasserglas). Nach Zugabe von Salzsäure fallen die Kieselsäuremoleküle aus, welche sich bedingt durch die Brownsche Molekularbewegung in der Lösung verteilen und zusammenstoßen. Die Mixtur trübt sich und geliert zu einem porreichen Kieselgel. In einem Prozess „überkritischer Trocknung“ (bei hohen Temperaturen und/ oder hohem Druck) wird dem Gel Flüssigkeit entzogen und unter Beibehaltung des Porengefüges Luft zugesetzt. Da die luftgefüllten Poren lediglich wenige Nanometer groß sind, wird die Gas-Wärmeleitung stark eingeschränkt. Dies macht Aerogel zu dem weltweit leichtesten Feststoff mit der niedrigsten Wärmeleitfähigkeit und einer sehr guten

Dämmwirkung. Je nach Ausgangsstoff können die Dämmeigenschaften variieren. Das Material zeichnet sich außerdem durch eine hohe Lichtdurchlässigkeit, starke Schallabsorption und hohe Druckfestigkeit im Verhältnis zu seinem Gewicht aus. Die Herstellung von Aerogel ist jedoch sehr energieintensiv und aufgrund der bislang geringen Herstellungsmengen noch relativ teurer.

Aerogelgranulat wird unter anderem als Zuschlagstoff für mineralische Dämmputze auf Basis von hydraulischem Kalk und Zement verwendet. Hierdurch wird eine hervorragende Wärmeleitfähigkeit von 0,028 W/mK erreicht. Aerogelputze eignen sich für den Innen- und Außenbereich und werden im Spritzverfahren auf die Wand aufgetragen. Eine hervorragende Dämmwirkung bei gleichzeitig geringen Schichtstärken empfiehlt die Anwendung von Aerogelputz für Sanierungsobjekte, bei denen es darum geht, das historische Erscheinungsbild zu bewahren. Der Putz ermöglicht einen fugenlosen Auftrag, wodurch Wärmebrücken reduziert werden. Dank der mineralischen Zusammensetzung und hohen Diffusionsoffenheit werden Oberflächenkondensate und Schimmelbildung vermieden. Der Dämmstoff ist wasserabweisend, besitzt ein gutes Schalldämmvermögen und eine hohe Resistenz gegen Algen-, Pilz- und Schädlingsbefall. Durch die Verwendung mineralischer Bindemittel ist Aerogelputz nicht brennbar. Als Oberputze werden mineralische Deckputze und -Anstriche empfohlen.

Technische Daten (Aerogeldämmputz):  
(Herstellerangaben)

Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$ : 0,028 W/mK  
Rohdichte  $\rho$ : ca. 220 kg/m<sup>3</sup>  
Wasserdampfdiffusionswiderstand  $\mu$ : 4 - 5  
Baustoffklasse nach DIN 4102: A2 nicht brennbar



Bild 26:  
Aerogelgranulat (Quelle: Hersteller)





Bild 27:  
Maschinelle Applikation von Aerogel-Wärmedämmputz auf einer Außenwand.

### **Aerogelplatten**

Der Dämmstoff Aerogel (siehe *Aerogelputz*) findet außerdem Einsatz für die Herstellung von Dämmplatten. Das Material wird durch aussteifende Faser- oder Vliesstrukturen gebunden. Aufgrund ihrer mechanischen Flexibilität ergeben sich für Aerogelplatten vielfältige Anwendungsgebiete im Bereich des Schall-, Wärme-, und Brandschutzes. Die geringe Wärmeleitfähigkeit von bis zu 0,017 W/mK ermöglicht die Verwendung der hoch wärmedämmenden Platten in geringer Stärke (üblicherweise 10 mm - 40 mm), was insbesondere für die Verwendung als Innendämmsystem Vorteile bietet. Das Material lässt sich insbesondere in Laibungen und Bereichen für geringe Dämmstoffdicken (Nischen, Anschlüsse etc.) sehr gut anbringen. Aerogelplatten sind diffusionsoffen und werden im System mit einem kapillaraktiven Klebemörtel angebracht. Das Material ist wasserabweisend. Je nach eingesetztem Aerogeltyp und Verarbeitung wird das Brandverhalten unterschiedlich klassifiziert.

#### Kennwerte:

(Quelle: Energie-Experten.org )

Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$ : ~ 0,017 W/mK

Rohdichte  $\rho$ : ca. 130 bis 350 kg/m<sup>3</sup>

Wasserdampfdiffusionswiderstand  $\mu$ : 11

Baustoffklasse nach DIN 4102: B2



Bild 28:  
Aufbringen von Aerogeldämmplatten an einer Außenwand mit Fensterlaibung.

#### 5.4.2 Klimatisierung

Das Raumklima im Versuchsraum wird während der kalten Jahreszeit auf übliche Wohnraum-Temperaturen beheizt und mit Feuchtelasten beaufschlagt, um eine entsprechende Feuchtlast für die Untersuchung der Systeme herzustellen, die auch realen Bedingungen in Wohnungen entspricht. Das tatsächlich erreichte Raumklima wird aufgezeichnet und bei den Auswertungen bzw. Simulationen berücksichtigt.

Die erforderliche Lüftungs- sowie Heizungstechnik wurde im Rahmen des Gesamtkonzeptes des Fraunhofer-Zentraums in der Alten Schäfflerei installiert und kann für das Forschungsprojekt „Innendämmung“ genutzt werden. Die Regelung der Heizung erfolgt über eine bereits bestehende DESIGO-Regelanlage. Die Regelung der Befeuchtung erfolgt über den geräteinternen Sensor. Eine Einbindung der Lüftungsregelung in die DESIGO-Regelanlage ist vorgesehen.

Das Raumklima wird im Winter 2014 / 2015 auf die Zielwerte 20 °C und 50 % r. F. konditioniert.

#### 5.4.3 Begründung der getroffenen Planungsentscheidungen

Für die Untersuchungen an dem realen, denkmalgeschützten Gebäude der historischen Alten Schäfflerei war es wichtig, die Schadensfreiheit der Konstruktion vorab durch hygrothermische Simulationen zu klären und insbesondere die Anschluss-Problematik der Konstruktion zu beachten, um eine Durchströmung kalter, außenliegender Bereich der Wand zu unterbinden. Dies wurde zum Einen wegen des Risikos der Aktivität von Mikroorganismen besonders untersucht, zum anderen auch zur Beurteilung der Feuchteverhältnisse an den Balkenköpfen, die zudem in einem assoziierten Projekt mit erfasst wurden.

## Geschossdämmung

Die Zerrbalkenebene des Dachwerks war ursprünglich nicht geschlossen und somit öffnete sich der Raum des Obergeschosses bis unter das Dach. Im Rahmen der Instandsetzungsmaßnahmen des Gebäudes wurde hier eine Geschossdecke eingezogen, die mit unterschiedlichen Materialien im Sinne der Forschung und Demonstration des Gesamtkonzeptes des Zentrums gedämmt ist. Durch das Dämmen der neuen obersten Geschossdecke kann das historische Dachwerk als belüftetes System bestehen bleiben. In Bild 29 und Bild 30 sind die ausgeführten Anschlussdetails für den Decken- und Bodenbereich der Wandversuchsfläche dargestellt. Die Bilder 31 bis 33 zeigen den Bodenbereich von unten mit der Dämmung zwischen den Balken.

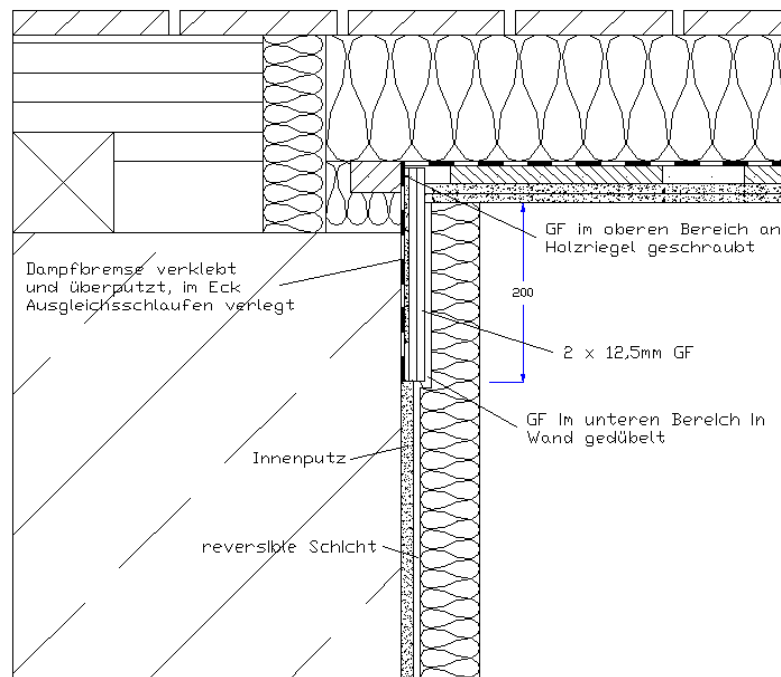


Bild 29:  
Detail Deckenanschluss der Innendämmung and die oberste Geschossdecke  
OG – DG.

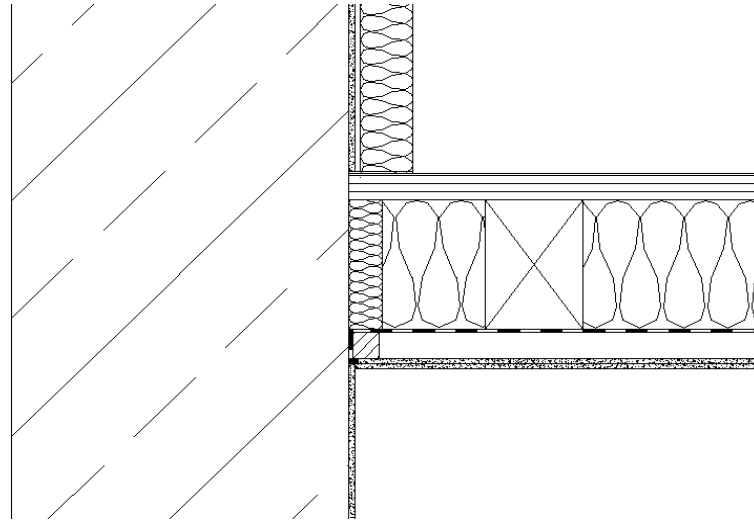


Bild 30:  
Detail Bodenanschluss der Innendämmung an die Zwischendecke  
EG – OG.



Bild 31:  
Ansicht der Geschossdecke von unten (EG) mit Rieselschutzflies und noch ohne  
Zwischendämmung.



Bild 32:  
Detailansicht der Geschosdecke von unten (EG) mit Wandanschlussdämmung aus Mineraldämmplatten zwischen den Deckenbalken.



Bild 33:  
Detail der Geschosdeckendämmung zwischen EG und OG von unten her gesehen mit vollflächiger Ausdämmung des Zwischenbalkenbereichs und unterseitiger Dampfbremse.

## 5.5 Untersuchung zum hygrothermischen Verhalten der Innendämmsysteme

Die Innendämmsysteme wurden vor Einbau mittels hygrothermischen Simulationen auf Risiken hin untersucht. Während der Versuche erfolgte ein umfangreiches Monitoring mit paralleler Simulation der tatsächlich implementierten Aufbauten.

### 5.5.1 Ermittlung der hygrothermischen Materialkennwerte (AP 3)

Voraussetzung für die rechnerische Beurteilung des Einflusses der Dämmmaßnahme ist die Kenntnis aller notwendigen hygrothermischen Materialeigenschaften. Außer für das Ziegelmauerwerk und das Material der Innendämmung können diese größtenteils der WUFI- oder der MASEA-Materialdatenbank entnommen werden. Soweit nicht vorhanden, werden die erforderlichen Kennwerte für jeden Dämmstoff bzw. Einzelmaterialien eines Systemaufbaus ermittelt (Tabelle 2).

Tabelle 2:  
Übersicht über die ermittelten Materialkennwerte.

Material	Rohdichte	Porosität	Diffusion dry cup	Diffusion wet cup	Wärmeleitfähigkeit	s <sub>d</sub> Wert
	[kg/m <sup>3</sup> ]	[%]	[-]	[-]	[W/(mK)]	[m]
Putz 1, Latex-Leichtmörtel Nr. 20	377	56	6,3	6,8	0,093	
Putz 2, Leichtmörtel Nr. 38	381	75	4,2	4,1	0,078	
Cyclododecan	506		217,0	516,0		
JPP 2x11g/m <sup>2</sup>						0,08
Hydraulkalk Vorspritzmörtel 675	1750	51	15,0	12,0	0,930	
Perlite	121	96	3,0	2,9	0,050	
Zellulosefasern	50	95	1,8		0,037	
Klebe- und Armiermörtel A abgezogenen Oberfläche	1357		20,0		0,540	
Klebe- und Armiermörtel A nicht abgezogenen Oberfläche	1357		20,0		0,540	
Klebe- und Armiermörtel B abgezogenen Oberfläche	1493		0,3			
Klebe- und Armiermörtel B nicht abgezogenen Oberfläche	1493		1,2			
Einbett- und Ausgleichsmörtel	1750	60		14,0	0,830	
Aerogel Dämmputz Fabrikat A nicht abgezogenen Oberfläche	247		3,5	3,3	0,030	
Mineralwolle 20 mm Estrich-Dämmplatte	30		1,0		0,032	
Mineralwolle 45 mm	21		1,0		0,350	
Feuchteadaptive Dampfbremse mit Flieskaschierung						0,3 bis 20
Dampfbremse (Papierbasis)						2,00
GKB Fabrikat A 12,5mm	680		10,0	4,0	0,210	
GKF 12,5 mm	1153	48	16,0	16,0	0,320	
GKB Fabrikat B 12,5 mm	680		10,0	4,0	0,250	
OSB3 12,0 mm	600	10	300,0	200,0	0,130	

Schilfrohrmatten	155		2,0			
Typhaplatte	270	75	28,0	20,0	0,055	
Aerogel Dämmplatte 40 mm	154	90	10,4	10,0	0,017	
Klebe- und Armiermörtel C	1211	53	9,0	8,7	0,400	
Klebe- und Armiermörtel D	790		11,0	10,0		
Mineralewolleplatten	105	96	2,7	2,7		
Aerogel Dämmputz Fabrikat B	191	91	3,7	3,8	0,030	

### 5.5.2 Rechnerische Untersuchungen (AP4)

Mit Hilfe eines rechnerischen Prognosewerkzeugs können zunächst Abschätzungen zur Schadensvermeidung erfolgen, um Schäden am Bauwerk auszuschließen. Dafür werden instationäre Rechenmodelle verwendet, die die hygrothermischen Vorgänge in Bauteilen unter realen Umwelteinwirkungen bauphysikalisch korrekt abbilden können. Mit diesen Simulationsberechnungen werden die verschiedenen Innendämmsysteme im Systemaufbau dimensioniert. In Parameterstudien zum Systemaufbau können die energetische Auswirkung sowie das mögliche Schadenspotential für die jeweilige Dämmlösung, den ursprünglichen Wandaufbau in Abhängigkeit von Himmelsrichtung und Nutzung rechnerisch abgeschätzt werden. Aus diesen Simulationen ergeben sich für den Regelquerschnitt zusätzlich mögliche Schwachpunkte der Gesamtkonstruktion.

Die rechnerische Voruntersuchung wird erweitert für die Entwicklung neuartiger Befestigungssysteme, die den denkmalpflegerischen Ansatz der Reversibilität berücksichtigen. Oft sind in denkmalgeschützten Gebäuden mehrere Schichten von historischen Fassungen (Bemalung und Anstriche) auf den Wänden vorhanden. Diese liefern ein Bild, wie die Menschen in früherer Zeit gelebt haben und stellen damit ein wichtiges Primärdokument dar, das für die Nachwelt überliefert werden soll. Daher sind Lösungen gefragt, die diese Zeit-Schichten reversibel überdecken können, also diese möglichst nicht beschädigen und gleichzeitig rückbaubar sind. Dabei sind neue Ansätze, die in der bauphysikalischen Wirkungsweise von herkömmlichen Befestigungssystemen abweichen, auf deren verändertes hygrothermisches Verhalten zu untersuchen.

Die mit Berechnungen unterstützten Untersuchungen zu den einzelnen Innendämmsystemen und neue Ansätze zur Montage werden dann im realen Maßstab überprüft und validiert.

Mittels der Berechnungen werden die zuvor beschriebenen Problembereiche in Abhängigkeit der eingesetzten Materialien in Hinblick auf die Feuchte- und auch auf die Schimmelpilzproblematik bewertet. Dazu werden Berechnungen an einem Wandaufbau mit den jeweiligen Dämmsystemen durchgeführt. Als Klimarandbedingungen ist die Verwendung der realen Klimadaten am Standort Benediktbeuern vorgesehen. Dies ermöglicht einen direkten Vergleich mit den Messdaten.

Die rechnerischen Untersuchungen erfolgen bereits in der Anfangsphase des Projekts zur Abschätzung der Auswirkungen auf das Gebäude „Alte Schöffle- rei“ sowie zur Abschätzung der unterschiedlichen Wirkungen der Innen- dämmsysteme. Die Voruntersuchen legen jedoch den Fokus auf die korrekte Dimensionierung der Dämmstoffe für den Einbau der Innendämmungen und die Sicherung von Reversibilität und Schadensfreiheit.

Alle aufgeführten Problembereiche bei Innendämmungen können mit moder- nen instationären Softwaretools, wie WUFI®-1D, WUFI®-2D und dem Schim- melpilzprognosemodell WUFI®-Bio in Abhängigkeit von den baulichen Gege- benheiten, dem Standort und der derzeitigen bzw. geplanten Nutzung rechne- risch untersucht werden.

Nachfolgende ausgewählte Problemstellungen werden im Rahmen des Projek- tes messtechnisch und rechnerisch detailliert untersucht.

Fragestellungen zum ungestörten Wandbereich:

- Tauwasser in bzw. hinter der Dämmung
- Frostschadensgefahr durch Innendämmung
- Fehlstellen bei Innendämmung

Eine gesonderte Untersuchung wird bezüglich möglicher Fehlstellen für Hinter- strömung, Durchströmungen oder Strömung in Luftschichten innerhalb des je- weiligen Systemaufbaus durchgeführt. Hierzu erfolgt eine Bewertung entspre- chend dem Unterpunkt „Schadensanalyse“ im Arbeitspaket 9 „Reversibilität und Schadensanalyse“. Es werden hierzu im Vorfeld aus den ermittelten Grundlagen im Arbeitspaket 1 „Praxisprobleme der Innendämmung“ sowie dem Arbeitspaket 9 „Reversibilität und Schadensanalyse“ die Konstruktionen auf das mögliche Schadenspotential und Ursachen untersucht. Für mögliche Material- / Produktspezifische Schwachstellen werden Vorschläge für die prakti- sche Versuchsumsetzung ermittelt und bewertet.

Zweidimensionalen Fragestellungen:

- Einbindende Innenwände
- Außenwandecken
- Fensterlaibungen

Interessant im Bereich der Fensterlaibung ist die mögliche Kombination unter- schiedlicher Systeme und Dämmstoffe. Im Gegensatz zur Wandfläche handelt es sich hier um eine 2-dimensionale hygrothermische Betrachtung. Aus diesen Gründen wird dieser Punkt als gesondertes Arbeitspaket betrachtet. Denkbar ist die Verwendung von innovativen, dünneren Materialien in der Laibung in Ver- bindung mit einer dickeren Dämmung z. B. aus nachwachsenden Rohstoffen auf der angrenzenden Wandfläche. Der Übergang zwischen beiden Materialien ist dabei zu untersuchen.



Fragestellung zu Balkenköpfe:

Für diese Fragestellung läuft zusammen mit anderen Forschungseinrichtungen (z. B. TU Dresden) ein separates Projekt, sodass dies hier nicht betrachtet wird und Untersuchungen zu diesem Themenkomplex nicht im Rahmen dieses Forschungsvorhabens vorgesehen sind. Eine punktuelle, nicht kontinuierliche messtechnische Überwachung hinsichtlich der Holzfeuchte wurde allerdings im Zuge dieses Projektes im Arbeitspaket 8 „Messtechnische Begleitung“ vorgesehen, um hier Schäden auszuschließen.

### 5.5.3 Verwendete Software

Für die Berechnung von Feuchte- und Temperaturverlauf innerhalb der Konstruktion stehen verschiedene Berechnungsmodelle mit unterschiedlicher Genauigkeit, bzw. stationäre und dynamische Rechenverfahren, zur Verfügung. Wirklich realistische Ergebnisse liefern die instationären Berechnungsverfahren WUFI® Pro bzw. WUFI® 2D vom Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Holzkirchen. Diese Programme berechnen den gekoppelten Wärme- und Feuchtetransport in der Konstruktion basierend auf:

- realen Klimadaten, inkl. der Berücksichtigung von Temperatur und relativer Feuchte, Strahlung, Niederschlag und Wind,
- das Baustoffverhalten hinsichtlich Wärme- und Feuchtetransportvorgängen sowie Speicherverhalten und
- der geographischen Ausrichtung der Gebäudeteile (Neigung, Himmelsrichtung).

#### 5.5.3.1 WUFI®

Zur rechnerischen Beurteilung wird das Simulationsprogramm WUFI® angewendet. Das Programm verknüpft dabei energetische und hygrothermische Bauteilberechnungen und liefert Temperatur- und Feuchteverläufe der Bauteile. WUFI® ist ein menügesteuertes Windowsprogramm, das die realitätsnahe Berechnung des instationären hygrothermischen Verhaltens von mehrschichtigen Bauteilen unter natürlichen Klimabedingungen erlaubt. Es basiert auf den neuesten Erkenntnissen in Bezug auf Dampfdiffusion und Flüssigkeitstransport in Baustoffen. WUFI® arbeitet mit Standardstoffkennwerten sowie mit einfach zu bestimmenden Speicher- und Flüssigtransportfunktionen. Dieses Programm kann auch als Randbedingungen gemessene Außenklimawerte verwenden, einschließlich Schlagregen und Sonneneinstrahlung. Mit WUFI® kann die Austrocknungszeit von Baufeuchte, die Tauwassergefahr in Bauteilen, der Einfluss von Schlagregen auf Außenbauteile, die Auswirkung von Umbau- oder Sanierungsmaßnahmen sowie das hygrothermische Verhalten von Dach- und Wandkonstruktionen bei Nutzungsänderungen berechnet werden [5].

### 5.5.3.2 WUFI®-Bio

Da die Temperatur- und Feuchteverhältnisse wesentliche Einflussfaktoren für das Schimmelpilzwachstum darstellen, kann aus der Kenntnis der hygrothermischen Bedingungen und deren zeitlicher Veränderung eine Wachstumswahrscheinlichkeit für Schimmelpilze abgeleitet werden. Sogenannte Isoplethensysteme beschreiben die Abhängigkeit der Sporenkeimung bzw. des Myzelwachstums von der Oberflächentemperatur und -feuchte. Um den Einfluss des Substrats, also des Untergrundes auf die Schimmelpilzbildung berücksichtigen zu können, werden Isoplethensysteme für drei unterschiedliche Substratgruppen vorgeschlagen: 0 = optimaler Nährboden, I = biologisch gut verwertbar, II = biologisch kaum verwertbare Substrate. Aufbauend auf diesen Isoplethensystemen wurde, um die Wirkungsweise der wesentlichen Einflussgröße auf die Auskeimung der Sporen, nämlich die bei bestimmten Temperaturen verfügbare Feuchte, bauphysikalisch korrekt beschreiben zu können, ein biohygrothermisches Modell entwickelt. Dieses ist in der Lage, den Feuchtehaushalt einer Modellschimmelpilzspore in Abhängigkeit von instationären Randbedingungen rechnerisch zu ermitteln, also auch ein zwischenzeitliches Austrocknen der Pilzsporen zu berücksichtigen.

Ist ein bestimmter Wassergehalt (Grenzwassergehalt) im Sporennieren erreicht, kann die Sporenkeimung als abgeschlossen betrachtet werden und das Schimmelpilzwachstum beginnt. Dieser Grenzwassergehalt wird mithilfe der Isoplethensysteme für Sporenauskeimung festgelegt. [6]

### 5.5.4 1-dimensionale Berechnung

Die Materialien und Systeme werden in diesem Forschungsvorhaben vorab in 1-dimensionalen hygrothermischen Berechnungen simulativ mit der Software WUFI® Pro untersucht und nur bei positivem Ergebnis appliziert bzw. nach entsprechender Anpassung vor Ort messtechnisch auf ihre Eignung, Wirkungsweise und Dauerhaftigkeit im Altbaubestand und Denkmalbereich überprüft. Dabei stehen Schadensfreiheit, Schimmelpilzvermeidung und Energieeffizienz im Vordergrund. Diese Kriterien spielen für die Akzeptanz im schützenswerten Altbau und denkmalgeschützten Gebäude eine essentielle Rolle. Mit Hilfe der Prognosewerkzeuge können zunächst Abschätzungen zur Schadensvermeidung erfolgen, um Schäden am Bauwerk auszuschließen. Dafür werden instationäre Rechenmodelle verwendet, die die hygrothermische Vorgänge in Bauteilen und realen Umwelteinwirkungen bauphysikalisch korrekt abbilden können.

Für die rechnerische Untersuchung von gekoppelten Wärme- und Feuchtetransportvorgängen liegen am IBP ein erprobtes eindimensionales Simulationsprogramm WUFI®, sowie das zweidimensionale hygrothermische Simulationsprogramm WUFI®-2D vor. Bisherige Beschreibungen des Feuchtetransportverhaltens von Baustoffen mit Hilfe dieser Verfahren haben eine gute Übereinstimmung zwischen rechnerischer Aussage und praktischer Untersuchung am Objekt ergeben.

Mit Hilfe derartiger rechnerischer Untersuchungen sollen für die Innendämmsysteme die Einsatzmöglichkeiten beurteilt werden. Dies dient auch der Eignungsprüfung der Dämmsysteme, um vor deren Einsatz in der Alten Schafflerei Feuchteschäden mit hoher Wahrscheinlichkeit von vorne herein auszuschließen. Voraussetzung für die Berechnungen ist die Kenntnis aller notwendigen hygrothermischen Kennwerte. Diese können zum Teil der WUFI®-Materialdatenbank oder der MASEA-Datenbank entnommen werden.

Mit diesen Simulationsberechnungen werden die verschiedenen Innendämmsysteme im Systemaufbau dimensioniert. In Parameterstudien zum Systemaufbau können die energetische Auswirkung sowie das mögliche Schadenspotential für die jeweilige Dämmlösung, dem ursprünglichen Wandaufbau, die Himmelsrichtung und Nutzung rechnerisch abgeschätzt werden. Aus diesen Simulationen ergeben sich für den Regelquerschnitt zusätzlich Hinweise auf mögliche Schwachpunkte der Gesamtkonstruktion. Die rechnerische Voruntersuchung wird erweitert für die Entwicklung neuartiger Befestigungssysteme, die den denkmalpflegerischen Ansatz der Reversibilität berücksichtigen. Oft sind in historischen Gebäuden mehrere Schichten von Fassung (Bemalung und Anstriche) auf den Wänden. Diese liefern ein Bild, wie die Menschen in früherer Zeit gelebt haben und stellen damit ein wichtiges Primärdokument dar, das für die Nachwelt überliefert werden soll. Daher sind Lösungen gefragt, die diese Zeit-Schichten reversibel überdecken können, also diese möglichst nicht beschädigen und rückbaubar sind. Dabei sind neue Ansätze, die in der bauphysikalischen Wirkungsweise von herkömmlichen Befestigungssystemen abweichen, auf deren verändertes hygrothermisches Verhalten zu untersuchen.

Die mit Berechnungen unterstützten Untersuchungen zu den einzelnen Innendämmsystemen und neue Ansätze zur Montage müssen im realen Maßstab überprüft und validiert werden.

### 5.5.5 Fragestellung und Untersuchungsweg

#### Spezielle Fragestellungen bei Innendämmung

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, aber durch den Diffusionswiderstand der Innendämmung auch die nach innen, deutlich reduziert wird. Die Innendämmsysteme weisen konstruktionsbedingt einen Wärmedurchlass- und einen Dampfdiffusionswiderstand auf, weshalb im Folgenden der Einfluss auf den Feuchtehaushalt einer berechneten Außenwand rechnerisch untersucht wird.

Da es bei einem massiven Wandaufbau mehrere Jahre dauert, bis ein eingeschwungener Zustand erreicht ist, die zweidimensionalen Berechnungen aber sehr langwierig sind, wird zunächst eine eindimensionale Berechnung der berechneten Originalwand durchgeführt, um damit einen geeigneten Ausgangswert für den mittleren Wassergehalt des Mauerwerks zu erhalten.

Nach etwa vier Jahren ist der eingeschwungene Zustand erreicht. Das Ziegelmauerwerk weist dabei einen mittleren Wassergehalt von ca.  $30 \text{ kg/m}^3$  auf. Dieser Wert wird für alle folgenden Berechnungen als Ausgangsfeuchte zugrunde gelegt, wobei bei den folgenden Berechnungen jeweils ein Zeitraum von vier Jahren berechnet wird.

### **Bewertung der Schlagregenbelastung und Auslegung der Innendämmung**

Mit Hilfe rechnerischer zweidimensionaler Untersuchungen werden für die Innendämmsysteme die Einsatzmöglichkeiten beurteilt. Dies dient auch der Eignungsprüfung der Dämmsysteme, um vor deren Einsatz in der Alten Schäfflerei Feuchteschäden von vorne herein auszuschließen. Als äußere Randbedingung für die Berechnungen dienen Klimadaten von der Wetterstation Benediktbeuern. Als Innenklima werden  $20 \text{ °C}$  und  $50 \text{ %}$  relative Feuchte zu Grunde gelegt, da der Raum später mit diesen klimatischen Randbedingungen betrieben werden soll. Die Systemaufbauten werden mit Westausrichtung berechnet, da dies die durch Schlagregen beanspruchte Fassade ist.

In Bild 34 ist als Beispiel der Wandaufbau für das System mit Mineraldämmplatte dargestellt. Für die anderen Dämmsysteme gestaltet sich der Aufbau analog in angepasster Form.

### Variante: Feld 13 Mineralfällplatte

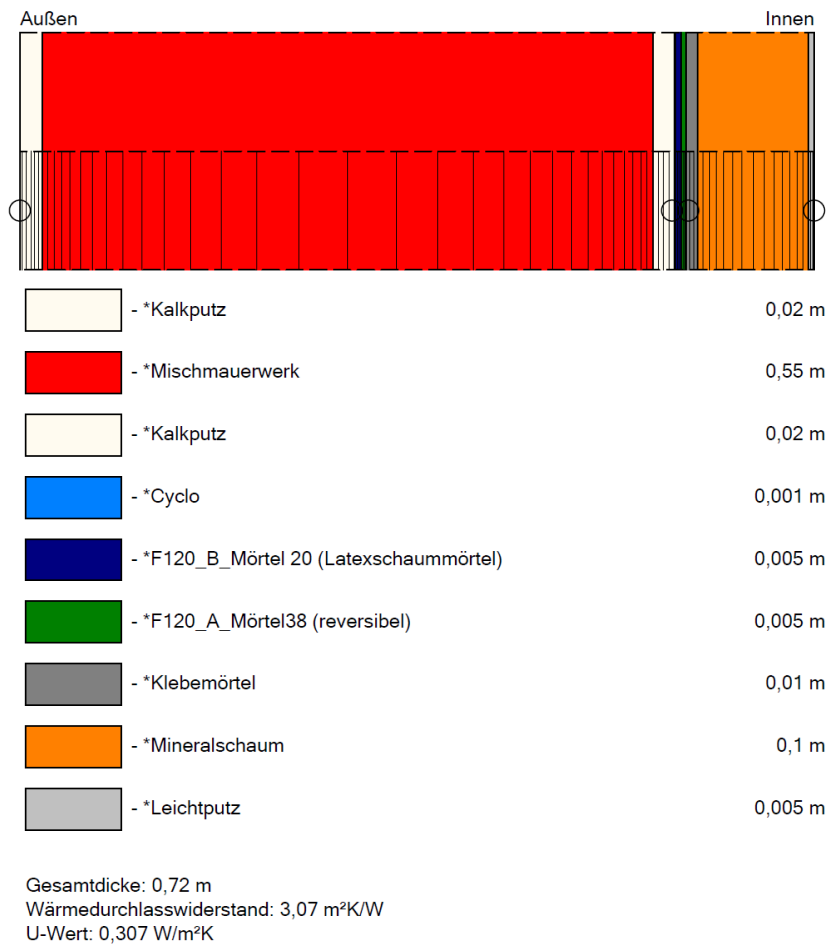


Bild 34:

Bauteilaufbau in WUFI® 1D mit Implementierung des neu entwickelten reversiblen Mörtels und des Innendämmsystems am Beispiel Dämmung mit Mineralfällplatte, Feld 13.

Folgende Dämmsysteme wurden in der Simulation als Beispiel-Varianten untersucht:

- 3 Scheiben-Verbundglas als innere, dichte Wandschale
- Holzfaser-Dämmplatten
- Aerogel-Dämmmatte
- Vakuum-Insulations-Paneele
- Mineralfällplatten

Als Referenz dazu dient die Bestandswand ohne Dämmung.

### 5.5.6 Ergebnisse der rechnerischen Untersuchungen

Ausgehend von einem Anfangsfeuchtegehalt in den einzelnen Materialien entsprechend einer Ausgleichsfeuchte bei 80 % relativer Luftfeuchte nimmt der Wassergehalt im Kalkputz der Bestandswand bei allen Varianten stetig zu, siehe Bild 35. Vergleicht man die Ergebnisse der Bestandswand ohne Innendämmung mit den Dämmsystemen fällt auf, dass die Bestandswand trotz Schlagregenbelastung einen geringeren Wassergehalt aufweist.

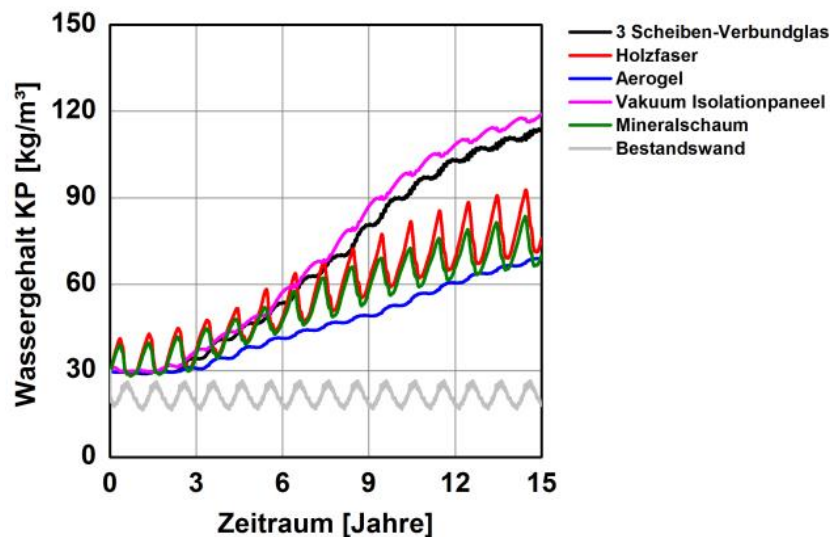


Bild 35: Simulierter Verlauf der Wassergehalte im Kalkputz (KP) unter der Dämmung versus der ungedämmten Bestandswand ohne hydrophobierende Maßnahmen der berechneten Westwand außen.

Der Anstieg des Wassergehaltes ist damit begründbar, dass durch den hohen Wasseraufnahmekoeffizient des Außenputzes Regenwasser aufgenommen und durch das Mauerwerk kapillar weiter geleitet wird. Im Gegensatz zur Situation ohne Innendämmung findet aber aufgrund der zusätzlichen Diffusionswiderstände der Innendämmsysteme und der Temperaturabsenkung der Bestandinnoberfläche kaum noch eine Austrocknung nach innen statt.

Zum Zeitpunkt des Einbaus der Innendämmsysteme war es aus baupraktischen Gründen noch nicht möglich die Außenfassade entsprechend zu sanieren. Diese Maßnahme war aber zu einem späteren noch nicht genau bestimmbar Zeitpunkt geplant. Um abzuschätzen, ob der Einbau der Innendämmungen trotzdem ohne nennenswertes Schadensrisiko erfolgen kann, wurde als worst-case-Szenario die Situation berechnet für eine Fassadensanierung erst vier Jahre nach Anbringung der Dämmsysteme. Dabei wurde auch der Einfluss der Einbaufeuchten mit berücksichtigt.

In Bild 36 ist der Verlauf des Wassergehaltes im Kalkputz und in Bild 37 der des Mauerwerks in den verschiedenen Phasen (eingeschwungener Zustand Be-

stand, Einbau der Innendämmung mit Einbaufeuchte sowie nach Absenkung der Wasseraufnahme des Außenputzes) dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass es nach dem Einbau der Innendämmung zu einer starken Aufweitung im Kalkputz und im Mauerwerk kommt. Würde nach 4 Jahren eine Verringerung der Wasseraufnahme (w-Wert) des Außenputzes erfolgen, dauert der Anstieg auch noch etwa ein Jahr nach der Fassadensanierung an, bis, eine langsame Austrocknung im innenseitigen Kalkputz stattfindet. Der dabei maximal auftretende Sättigungsgrad liegt dabei aber unterhalb von 50% im Kalkputz.

Bei dem vorliegenden Wandaufbau mit seinem niedrigen Dämmstandard ist somit weitgehend unabhängig von der Art der gewählten Innendämmung zur Vermeidung eines Feuchteschadens ein zusätzlicher Regenschutz unabdingbar.

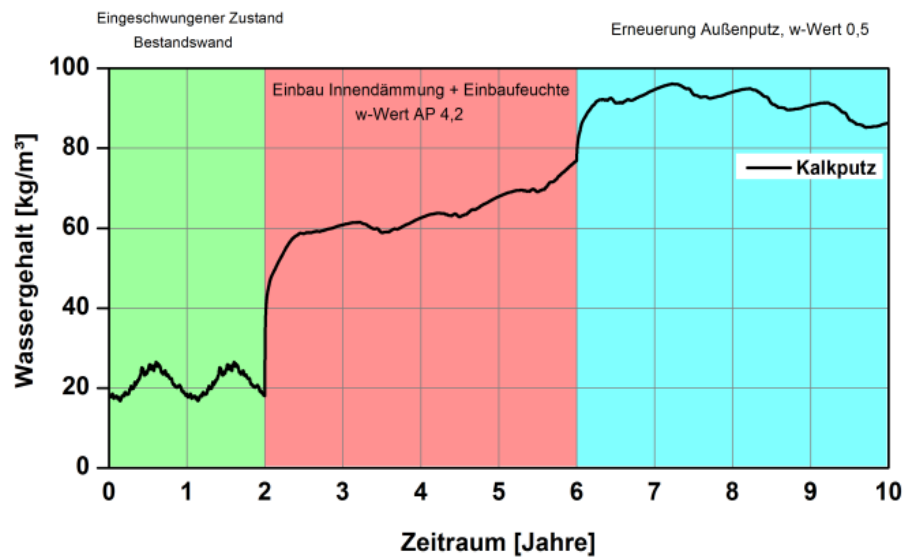


Bild 36: Verlauf des Wassergehaltes im Kalkputz in den verschiedenen Phasen bei einer Fassadensanierung nach 4 Jahren.

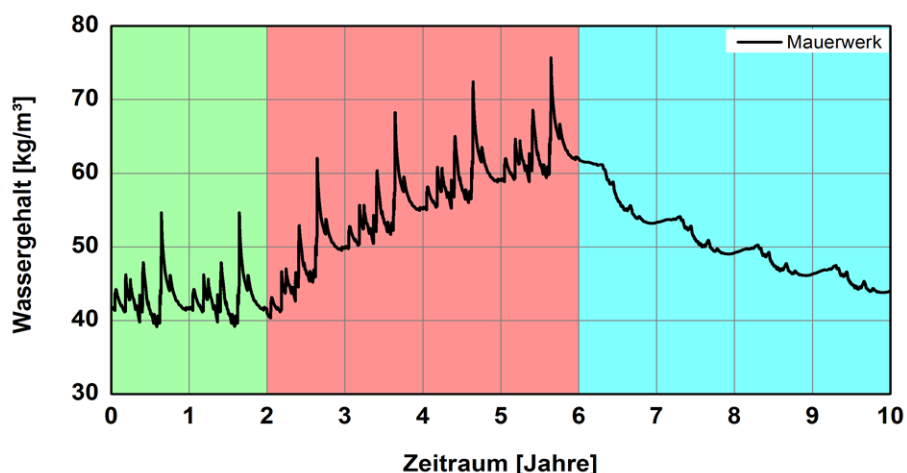


Bild 37: Verlauf des Wassergehaltes im Mauerwerk in den verschiedenen Phasen bei einer Fassadensanierung nach 4 Jahren.

Um Schäden an der Oberfläche des Kalkputzes bzw. an den historischen Farben zu vermeiden, muss der w-Wert des Außenputzes verringert werden. Möglichkeiten zur Senkung der Wasseraufnahme wären die Hydrophobierung, eine stärker Wasser abweisende Beschichtung oder das Aufbringen eines neuen Putzsystems. Es wurden deshalb rechnerische Untersuchungen durchgeführt, um so den erforderlichen w-Wert der Außenbeschichtung zu ermitteln. Hierbei ergab sich, dass ab einem w Wert von  $0,5 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{h}^{0,5})$  keine Auffeuchtung mehr im Putz stattfindet. Bei den beiden diffusionsdichten Systemen (3 Scheiben-Verbundglas & VIP) konnte sogar eine leichte Abnahme des Wassergehaltes verzeichnet werden (Bild 38).

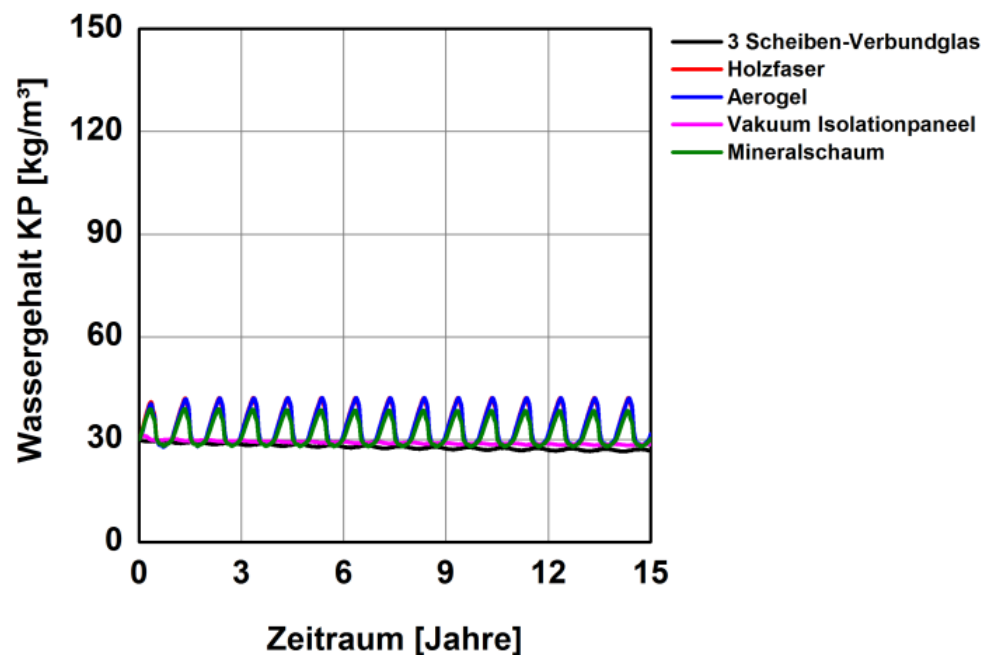


Bild 38:  
Simulierter Verlauf des Wassergehaltes des Kalkputzes (KP) unter der Dämmung bei einem w-Wert außen von  $0,5 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{h}^{0,5})$ .

Die Fassade an der Alten Schäfflerei wurde inzwischen, etwa 1,5 Jahre nach der Applikation der Innendämmung, saniert und mit einem wasserabweisenden Anstrich versehen. Dadurch ergibt sich, gemäß den mit diesem Zeitpunkt durchgeführten Berechnungen, eine deutlich günstigere Situation (Bild 39 und Bild 40).



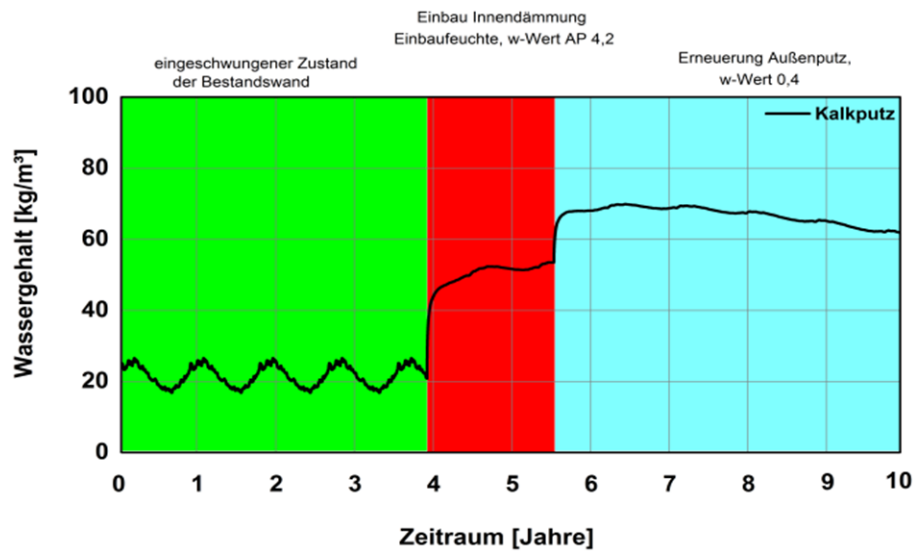


Bild 39:  
Verlauf des Wassergehaltes im Kalkputz in den verschiedenen Phasen bei einer Fassadensanierung nach 1,5 Jahren.

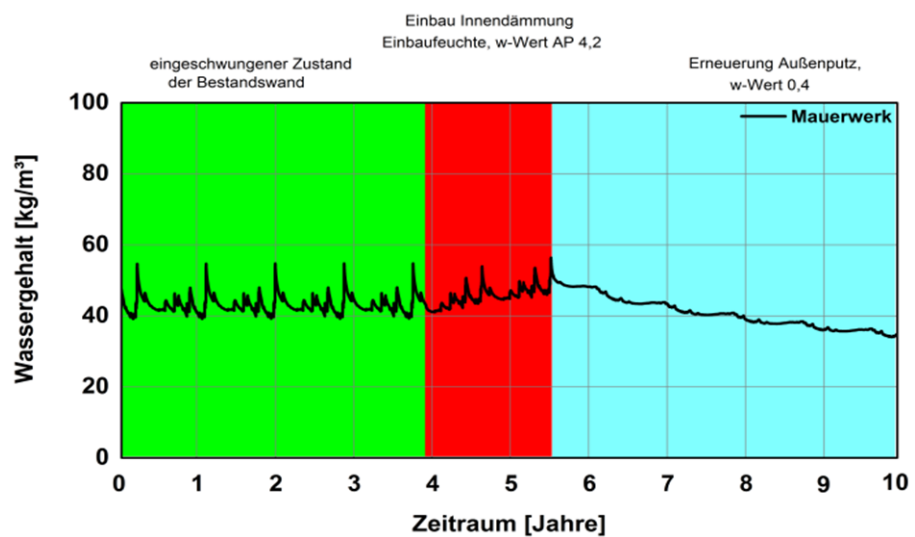


Bild 40:  
Verlauf des Wassergehaltes im Mauerwerk in den verschiedenen Phasen bei einer Fassadensanierung nach 1,5 Jahren.

### 5.5.7 2-dimensionale Berechnung (Fensterlaibung)

Um die hygrothermische Situation der Fensterlaibung beurteilen zu können, werden Berechnungen mit WUFI®-2D durchgeführt. Bei der Gelegenheit wird auch das Fenster mit Einfachverglasung implementiert, um auch Aussagen bezüglich des Tauwasserausfalls auf der Scheibe zu bekommen.

Bild 41 zeigt beispielhaft, den in WUFI®-2D implementierten Aufbau. Aus programmtechnischen Gründen können mit einem sinnvollen Aufwand weder gekrümmte Oberflächen noch Schrägen implementiert werden, weshalb der Aufbau etwas vereinfacht wurde. Auf die Ergebnisse hat das nur einen sehr geringen Einfluss.

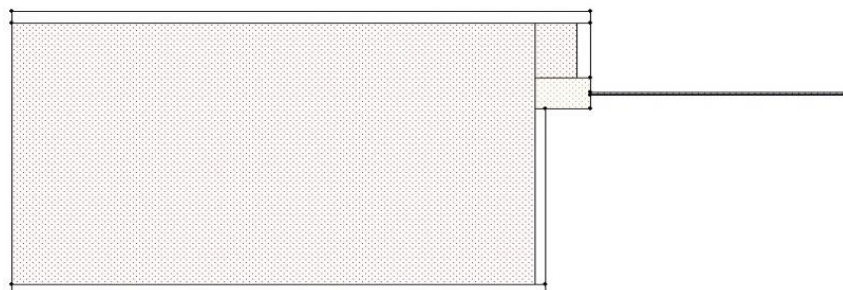


Bild 41:  
In WUFI®-2D implementierter Aufbau des Laibungsbereiches einschließlich eines vereinfachten Fensterrahmens und der Einfachverglasung.

Die verwendeten Materialkennwerte stammen aus der WUFI®-Materialdatenbank. Als Außenrandbedingung werden die gemessenen Klimawerte der Messstation nahe der Alten Schäferei verwendet.

Vor allem auf der Einfachverglasung wird Tauwasserbildung erwartet. Da Glas als nichtporöses Material kein Wasser aufnehmen kann, wird für die Beurteilung des Tauwasserausfalls eine sogenannte Tauwasserschicht (Dicke: 1 mm) auf der Innenseite des Glases angeordnet.

Bild 42 zeigt die interessanten Zonen des Fensterbereichs hinsichtlich Tauwasserausfall oder Schimmelpilzwachstum. Diese Bereiche werden bei der WUFI®-2D Berechnung genauer betrachtet.

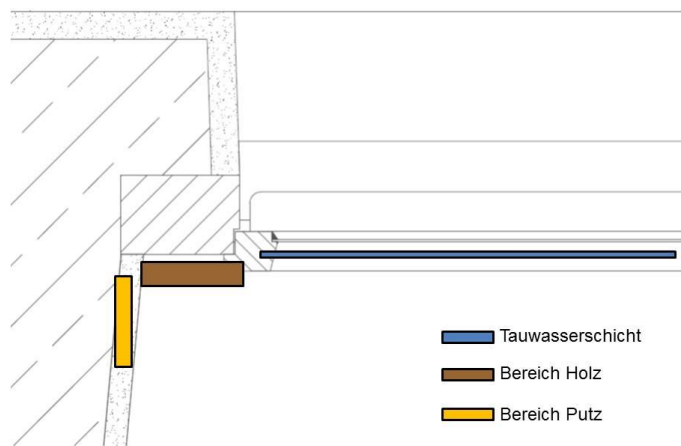


Bild 42:  
Analysierte Bereiche der WUFI®-2D-Berechnungen.

Der Berechnung werden die aufgezeichneten Wetterdaten von Benediktbeuern zu-grunde gelegt. Die Feuchtelast wird nach WTA-Merkblatt 6-2-14 [19] bestimmt.

Bild 43 und Bild 44 zeigen die relative Feuchte für den Bereich der Holzoberfläche und den der Putzoberfläche in der Laibung nahe des Fensterrahmens. Für diese Berechnung wurde nach dem WTA-Merkblatt 6-2-14 [19] ein Innenklima mit niedriger Feuchtelast angesetzt (entspricht z. B. einer Büronutzung). Das dürfte am ehesten der in der Alten Schäfflerei in den letzten Jahrzehnten vorliegenden Feuchtebeanspruchung entsprechen.

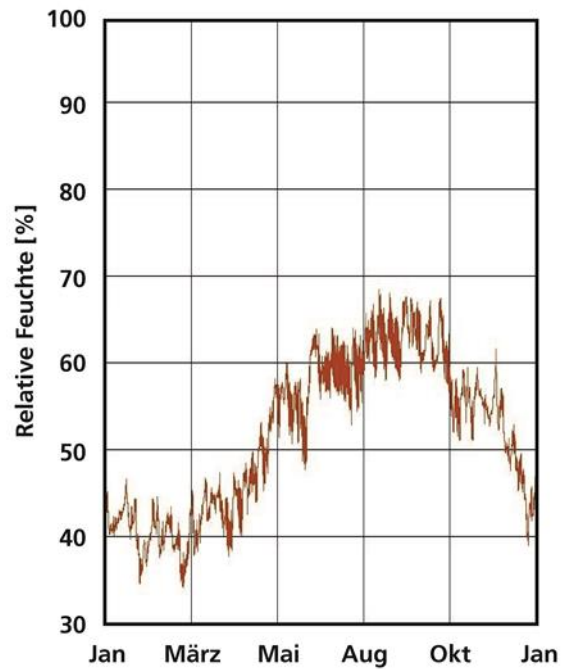


Bild 43:  
Relative Feuchte auf der Holzoberfläche mit niedriger Feuchtelast.

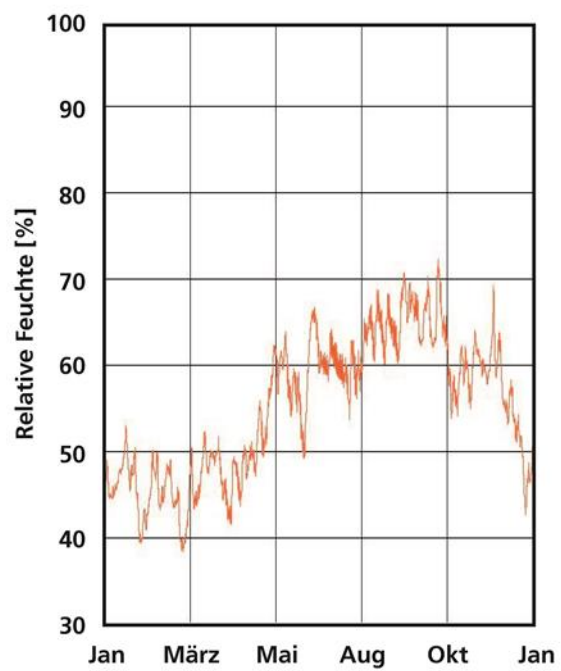


Bild 44:  
Relative Feuchte auf der Putzoberfläche mit niedriger Feuchtelast.

Die Rechenergebnisse zeigen an beiden Stellen einen unkritischen Zustand an. Weder auf dem Holz noch auf dem Putz wird der kritische Bereich von 80 Prozent relativer Feuchte überschritten. Bis auf einen kurzfristigen Zeitpunkt liegen die Oberflächenfeuchten sogar unter 70 % relative Feuchte. An beiden Bauteilen kann somit die Gefahr von Schimmelpilzwachstum aufgrund von zu hoher Feuchtebelastung ausgeschlossen werden, was auch mit den Beobachtungen vor Ort übereinstimmt.

Die Berechnungen zeigen aber auch, dass trotz niedriger Feuchtebelastung auf der Innenseite der Scheibe immer wieder Tauwasser ausfällt (vgl. Bild 45). Eine dauerhafte Belastung liegt aber nicht vor und wird dadurch für umliegende Bauteile als nicht kritisch eingestuft. Durch diese hier durchgeführte instationäre Berechnung werden aber Aussagen über Dauer der Feuchtebelastung und die Menge des Tauwasserausfalls möglich.

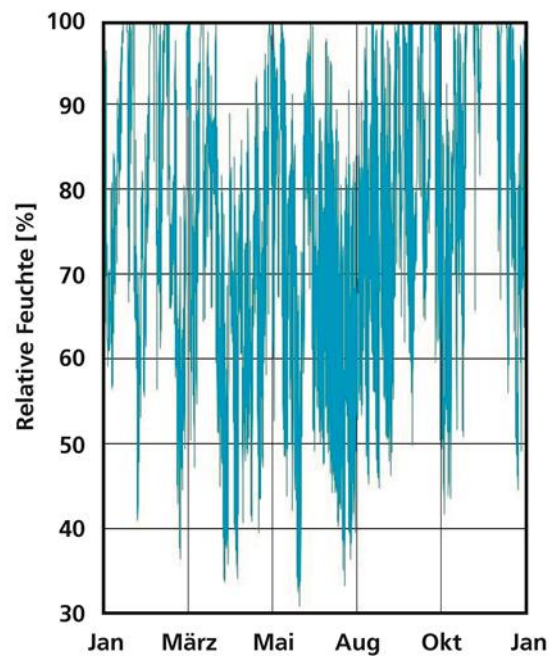


Bild 45:  
Relative Feuchte auf der Innenseite der Verglasung mit niedriger Feuchtebelastung.

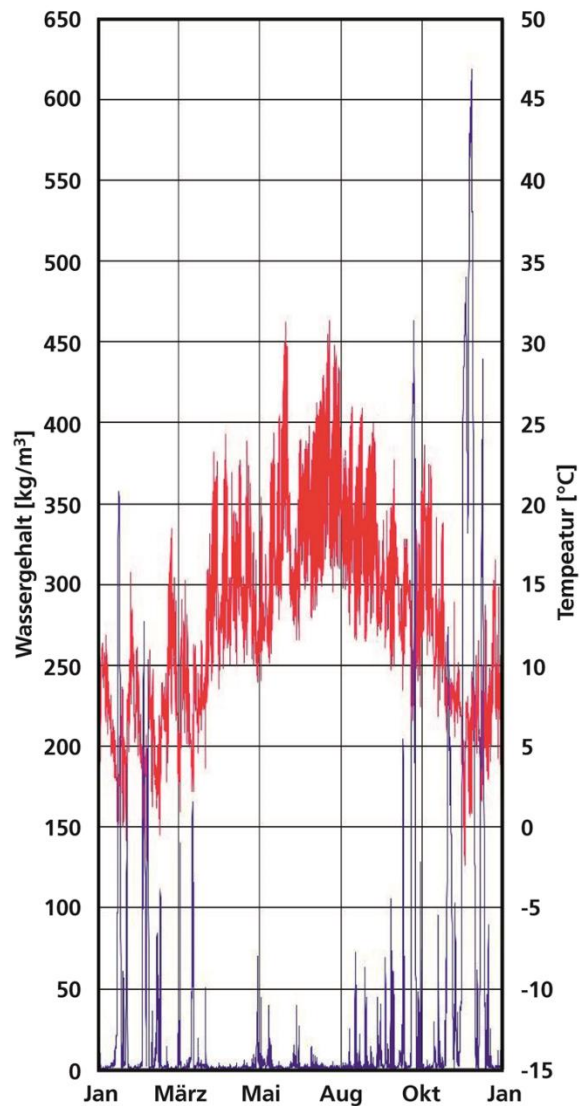


Bild 46:  
Wassergehalt und Temperatur auf der Innenseite der Verglasung mit niedriger Feuchtebelastung.

In Bild 46 ist der Wassergehalt (blaue Linie) in der Tauwasserschicht dargestellt. Diese Tauwasserschicht wurde mit einem Millimeter Dicke eingegeben. Dies bedeutet, dass ein Wassergehalt von  $1 \text{ kg/m}^3$  auf die Fläche bezogen  $1 \text{ g/m}^2$  entspricht. Der höchste Wert liegt bei über  $600 \text{ g/m}^2$ . Wichtig bei dieser Betrachtung ist auch die Temperatur auf der Innenseite der Verglasung (Bild 46 als rote Linie dargestellt). Daraus kann man erkennen, dass zum Zeitpunkt des Höchstwertes, die Temperatur unter  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  liegt. Das Wasser liegt somit als Eis, wahrscheinlich in Form der allgemein bekannten Eisblume, vor. Zu den Zeiten mit Glasoberflächentemperaturen oberhalb des Gefrierpunktes wird ab einem Tauwasseranfall von mehr als etwa  $200 \text{ g/m}^2$  zu einem Abfließen des Tauwassers kommen.

Es wurde auch eine Berechnung mit normaler Feuchtelast durchgeführt, um zu zeigen, wie sich bei wohnraumähnlicher Nutzung die Situation verändert. Die berechneten Ergebnisse sind in Bild 47 und Bild 48 dargestellt.

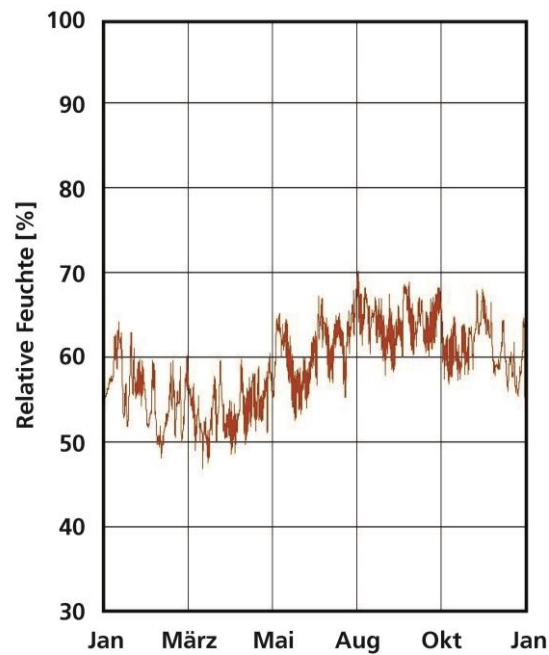


Bild 47:  
Relative Feuchte auf der Holzoberfläche mit normaler Feuchtelast.

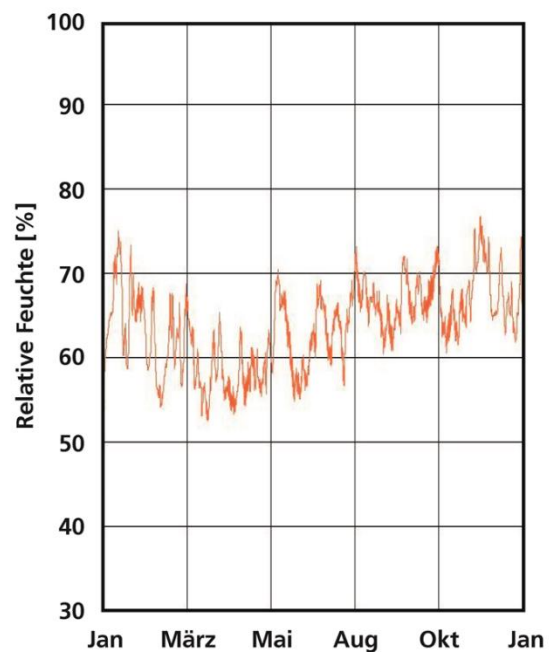


Bild 48:  
Relative Feuchte auf der Putzoberfläche mit normaler Feuchtelast.

Wie zu erwarten, liegen die Werte der relativen Feuchte auf den Bauteilen etwas höher als bei der Betrachtung mit niedriger Feuchtelast, sind jedoch ebenfalls als unkritisch einzustufen.

Im Vergleich zur Berechnung mit niedriger Feuchtelast ist festzustellen, dass sich die Erhöhung der Feuchtelast vor allem in den Wintermonaten auf den Tauwasserausfall auf der Scheibeninnenseite auswirkt (vgl. Bild 49). Über nahezu den ganzen Winterzeitraum liegen an der Scheibe Tauwasserbedingungen vor. Dementsprechend ergeben sich wesentlich höhere berechnete Wassergehalte auf der Scheibeninnenseite (Bild 50). Zu den Zeiträumen mit dem höchsten Wassergehalt liegt die Temperatur wieder unter 0 °C. Auch hier liegt das Wasser in Form von Eisblumen auf der Scheibe vor. Die meiste Zeit wird aber an der Scheibe ablaufendes Tauwasser vorliegen. Der insgesamt gute Zustand der Fenster lässt aber darauf schließen, dass wohl kaum über längere Zeiträume eine derartige Feuchtebelastung vorgelegen hat.

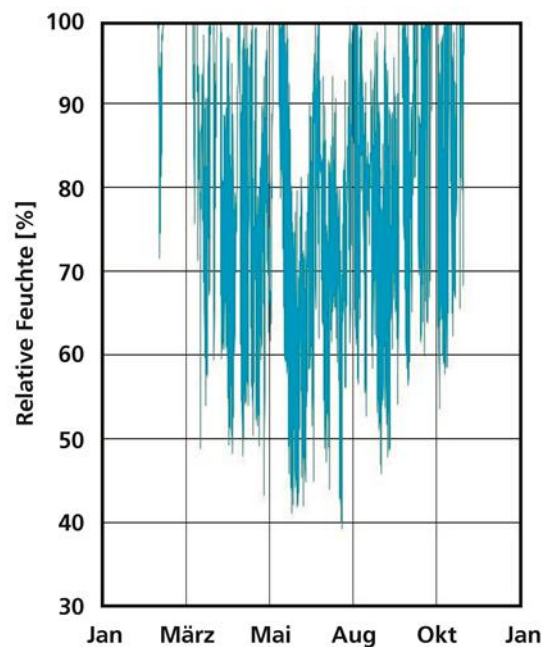


Bild 49:  
Relative Feuchte auf der Innenseite der Verglasung mit normaler Feuchtebelastung.



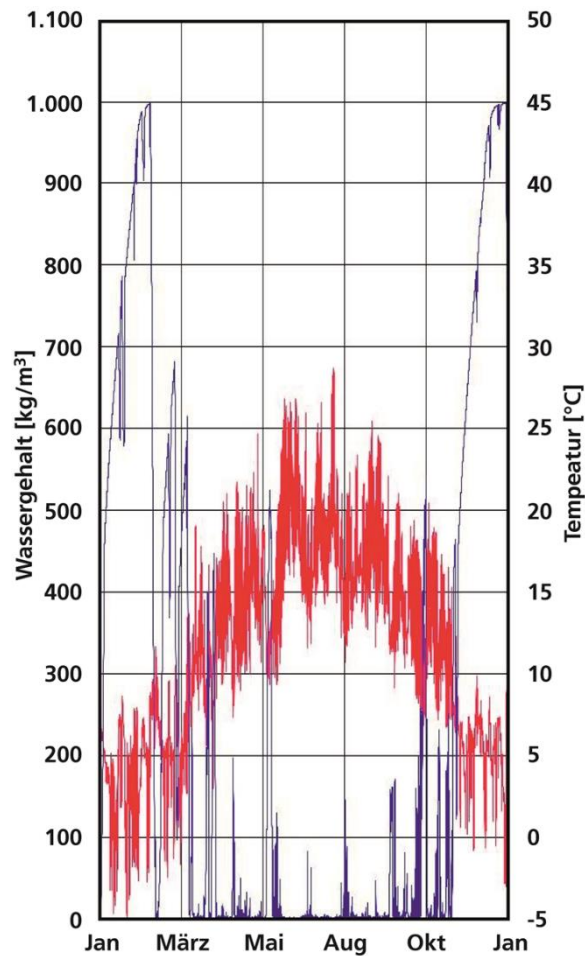


Bild 50:  
Wassergehalt und Temperatur auf der Innenseite der Verglasung mit normaler Feuchtebelastung.

Mit stationären Berechnungsmethoden kann naturgemäß der Einfluss der thermischen Masse nicht beurteilt werden. Im folgendem, wird um diesen Einfluss beurteilen zu können, das Gebäude als „Leichtbaukonstruktion“ angenommen. Dazu wird der Einfachheit halber als Extremfall die Konstruktion unverändert belassen, aber die spezifische Wärmekapazität des Baustoffs von 850 J/kgK auf 1 J/kgK abgesenkt. Diese Berechnungen werden mit normaler Feuchtebelastung durchgeführt.

In Bild 51 und Bild 52 sind die Verläufe der relativen Feuchte auf der jeweiligen Bauteiloberfläche (Holz bzw. Putz) bei Berechnung ohne thermische Masse dargestellt. Vergleicht man diese mit Bild 51 bzw. Bild 52 kann man den Einfluss der thermischen Masse auf die Oberflächenfeuchte erkennen. Die relative Feuchte auf der Bauteiloberfläche ist bei dieser Betrachtung stärker an den instationären Temperaturverlauf des Außenklimas gekoppelt, weshalb hier besonders bei der Putzoberfläche größere kurzfristige Schwankungen auftreten.

Das Niveau der Oberflächenfeuchte wird durch das Fehlen der thermischen Masse dagegen kaum beeinflusst.

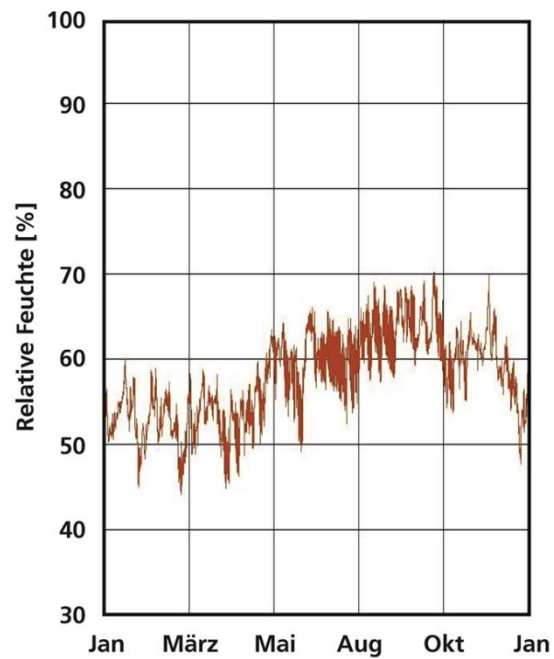


Bild 51:  
Relative Feuchte auf der Holzoberfläche bei Berechnung ohne thermische Masse.

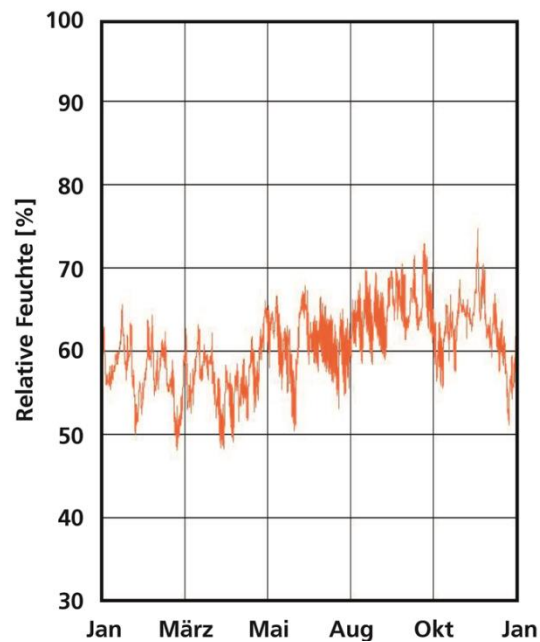


Bild 52:  
Relative Feuchte auf der Putzoberfläche bei Berechnung ohne thermische Masse.

### 5.5.8 Verweis auf Balkenkopf-Projekt

Die in Benediktbeuern durchgeführten Untersuchungen zum Feuchtehaushalt von Holzbalkenköpfen des Bodenaufbaus des Obergeschosses der alten Schäfllerei sind Inhalt eines anderen Forschungs-Projektes. Die dabei gewonnenen Ergebnisse werden ausführlich in dem dazu gehörenden Abschlussbericht beschrieben. Zur allgemeinen Information wird im Folgenden eine Kurzzusammenfassung der Ergebnisse gegeben.

Bei der Öffnung der Holzbalkendecke der alten Schäfllerei des Klosters Benediktbeuern zeigte sich, dass fast alle Holzbalkenköpfe massiv von Holz zerstörenden Pilzen befallen waren. Als Resultat mussten nahezu alle Holzbalkenköpfe grundlegend saniert werden. Dies bot die Möglichkeit, an einem Gebäude unterschiedliche Sanierungstechniken zu erproben und messtechnisch zu begleiten. Es wurden insgesamt 24 zerstörte Holzbalkenköpfe saniert. Die durchgeführten Sanierungsvarianten unterscheiden sich dabei vor allem in der Art der Dämmung im Auflager und in den Hohlräumen um den Balkenkopf.

Dabei zeigte sich, dass mit Beginn der Einbauarbeiten für die Innendämmungen im Oktober/ November 2013 ein leichter Feuchteanstieg in den Holzbalkenköpfen der Südseite zu beobachten war, obwohl zu diesem Zeitraum auf der Südseite noch keine Innendämmungen verbaut wurden. Dies zeigt, dass hier als Hauptbefeuchtungsmechanismus die durch Einbau der Innendämmungen auf der Nordseite erhöhte Raumluftfeuchte ursächlich war. Folgerichtig macht sich zwar der Einbau des Aerogelputzes auf der Südseite im Oktober 2014 als Feuchteanstieg bemerkbar, nicht aber die Installation der Trockenbauvarianten mit Zellulose-Einblasdämmung und Perlitschüttung im Dezember 2014. Nahezu alle Balkenköpfe auf der Südseite trocknen bis auf die erwähnten kurzfristigen Feuchteerhöhungen kontinuierlich mit der Zeit ab und erreichen Holzfeuchten von deutlich unter 20 M.-%. Sie liegen damit erwartungsgemäß etwas niedriger als auf der Nordseite, aber auch hier ergeben sich niedrige unkritische Holzfeuchten.

Insgesamt stimmen die Ergebnisse im Großen und Ganzen mit den Erwartungen überein, der Einfluss der unterschiedlichen Auflagervarianten und seitlichen Dämmungen des Balkenkopfes ist aber deutlich geringer ausgeprägt als erwartet. Es zeigen sich nur in den ersten ein bis zwei Jahren merkliche Unterschiede, die aber vor allem in den unterschiedlichen Anfangsfeuchten begründet sind. Danach ergeben sich bis auf geringe zeitliche Verschiebungen kaum noch Unterschiede zwischen den verschiedenen Varianten. Der vorab erwartete deutliche Einfluss der Art der Balkenkopfsanierung scheint nur in sehr geringem Umfang gegeben zu sein und im ist Vergleich zum Einfluss der Inhomogenitäten des Wandaufbaus von eher untergeordneter Bedeutung. Bei allen Balkenköpfen ergeben sich längerfristig trotz der mit Raumluftfeuchten von 50 % r. F. relativ hohen Feuchtelast auch mit Einbau der Innendämmung völlig unkritische Wassergehalte. Dies zeigt aber auch, dass die hygrothermische Situation am Balkenkopf doch wesentlich unkritischer ist als erwartet, sofern als wesentliche Vo-

raussetzung ein ausreichender Regenschutz von außen gegeben ist und keine relevante Hinterströmung mit warmfeuchter Innenluft auftritt. Die immer wieder vorgefundenen massiven Schäden an Balkenköpfen dürften somit in den meisten Fällen durch unzureichenden Regenschutz der Fassade sowie in temporären lokalen massiven Feuchtebelastungen durch Havarien verursacht sein, wie z. B. undichte Dächer oder Regenwasserableitungen.

## 5.6 Einbau der Innendämmung (AP 5)

Für die verschiedenen Innendämmsysteme sind, entsprechend dem vorgeschlagenen Grundriss, gleich große Wandflächen mit jeweils einem Fenster vorgesehen. Der Einbau der Systeme erfolgt parallel mit der messtechnischen Begleitung der Maßnahme.

Zusätzlich zu den Wandflächen sind Eckflächen an den Wandecken sowie an den Laibungen und einer einbindenden Wand mit Innendämmung zu versehen. Die Anordnung der Materialtypen nebeneinander in den Flächen sowie an den Ecken und Laibungen ergibt sich aus den rechnerischen Untersuchungen.

Das Planungskonzept sieht vor, ein Feld in der Mitte der Ostfassade als Referenz ohne Dämmung zu belassen.

Tabelle 3:

Flächenbelegungen der Innendämmung mit gesamter belegter Wandfläche (ohne Fensterflächen) von ca. 123 m<sup>2</sup> und Laibungsflächen von ca. 13 m<sup>2</sup>.

Flächentyp	Anzahl Flächen	Einzelfläche	Gesamtfläche
Wandfläche	9	11 m <sup>2</sup>	99 m <sup>2</sup>
Wandecken	4	6 m <sup>2</sup>	24 m <sup>2</sup>
Laibungen (vertikal)	22	1,5 lfm	33 lfm
Einbindende Wände	2	1,5 lfm	3 lfm

Im Projekt wurden zwei in ihrem Grundsatz unterschiedliche Systeme für die reversible Montage von Innendämmungen untersucht.

- **Systemaufbau mit reversiblen Mörtelsystem**  
Dieses reversible System wurde speziell im Projekt „EnOB: Innendämmungen“ neu entwickelt und erstmals erprobt.
- **Systemaufbau mit Kaschierung der originalen Oberflächen durch Japanpapier**  
Japanpapier ist ein in der Restaurierung von Wandmalerei häufig eingesetz-

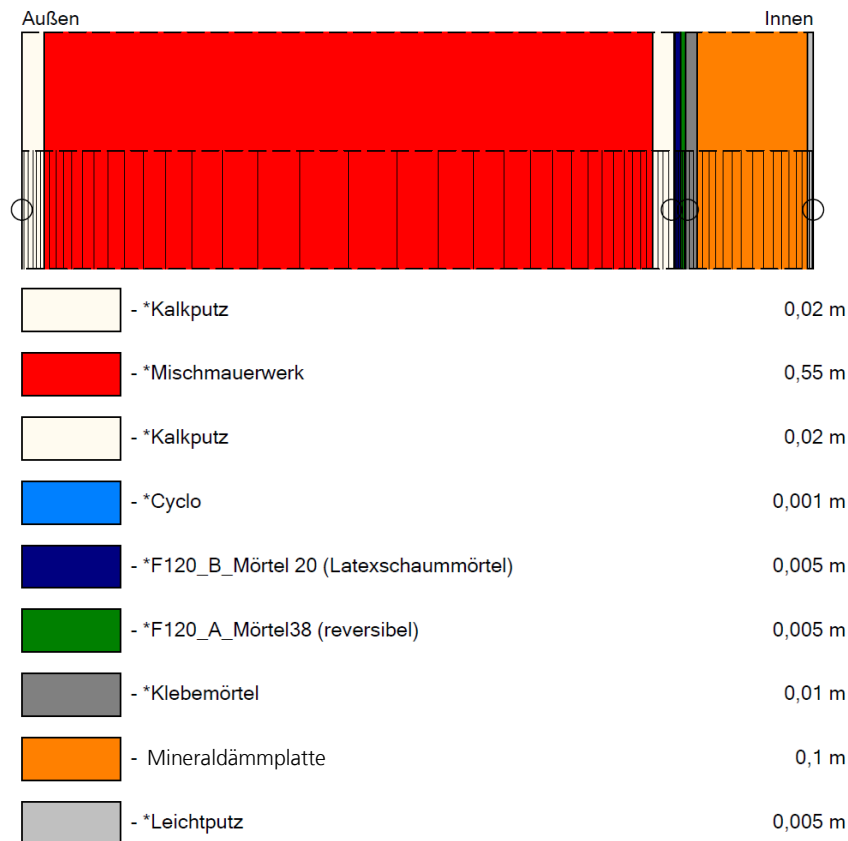
tes Produkt, wenn es um temporäre Kaschierungen oder Kompressen geht. Auf die originale Oberfläche wird eine Schutzschicht aufgebracht. Das eigentliche Innendämm-System wird dann in Trockenbauweise oder als vorgehängte Konstruktion bzw. Vormauerung vor der Wand installiert, ohne in die Originale Bausubstanz einzugreifen.

### 5.6.1 Systemaufbau mit reversiblen Mörtel am Beispiel Feld 13

Im Folgenden wird der Systemaufbau mit reversiblem Mörtel beispielhaft an den Untersuchungen am Feld 13 mit Mineralfällplatten auf reversiblem Mörtel beschrieben.

In Bild 53 ist der Wandaufbau für das System mit Mineralfällung an Feld 13 dargestellt. Für die anderen Dämmssysteme gestaltet sich der Aufbau analog in angepasster Form.

#### Variante: Feld 13 Mineralfällplatte



Gesamtdicke: 0,72 m  
 Wärmedurchlasswiderstand: 3,07 m<sup>2</sup>K/W  
 U-Wert: 0,307 W/m<sup>2</sup>K

Bild 53:  
 Bauteilaufbau in WUFI® 1D mit Implementierung des neu entwickelten reversiblen Mörtels und des Innendämm-systems mit kapillaraktiver Mineralfällplatte, Feld 13.

## Vorzustand

In Bild 54 ist die Innenecke der Außenwand (Feld 12) und in Bild 55 da Feld 13 in der frühen Bauphase im ursprünglichen Zustand nach ersten Umbauarbeiten abgebildet.

Bild 56 zeigt Feld 13 vor der restauratorischen Bearbeitung der Fläche. Die allgemeine Sanierung am Gebäude ist mit der Dachsanierung und Balkenkopfrenuerung abgeschlossen.

In Bild 57 ist die Wandoberfläche von Feld 12 und Feld 13 für die Aufbringung des reversiblen Schichtaufbaus vorbereitet. Wo notwendig, wurden Ablösungen der Malschichten mit Celluloseleim gefestigt. Anschließend erfolgte der Auftrag der Farbmatrix.

Die Abbildung in Bild 58 zeigt den fertig aufgebrachten reversiblen Putz. Am oberen Bildrand sind die fertigen Anschlüsse zu der Dämmung der oberen Geschosdecke erkennbar. Nach der Installation der Messtechnik wurde das Innendämmsystem eingebaut. Bild 56 zeigt die fertig gestellte Innendämmung mit Bauteilöffnung zur Freilegung der Farbmatrix.



Bild 54:  
Feld 12 (Eckfeld) während der ersten Bauphase nach partiellem Rückbau der Innenwände der Flüchtlingseinbauten der 1940 / 50er Jahre, Aufnahme am 11.11.2011.



Bild 55:  
Feld 13 während der ersten Bauphase nach Rückbau der Innenwände der  
Flüchtlingseinbauten der 1940 / 50er Jahre, Aufnahme am 11.11.2011.

### **Zwischenzustand**

Nach Reinigung, Festigung und Kittung von Fehlstellen im Putz.



Bild 56:  
Feld 12 und 13 (Wandabschnitt neben dem linken Fenster und rechte Wand)  
vor dem Einbau der Innendämmung, 18.3.2013.





Bild 57:  
Wandansicht mit Testfarbfelder zur Überprüfung der Reversibilität an Feld 12 und 13 und erster Sensorik, Aufnahme am 16.09.2013.



Bild 58:  
Feld 13 mit reversibler Putzschicht und fertigen Anschlüssen zur oberen Geschossdecke, Aufnahme am 30.09.2013.

## Endzustand

Bild 59 zeigt die Wand nach Ablauf des Versuchs mit Messungen und Freilegungen im Frühjahr 2016.



Bild 59:

Feld 13 mit Innendämmung und partieller Freilegung der Farbmatrix, Aufnahme am 22.03.2016.

### Beispielhafter Wandaufbau der Versuchswand an Feld 13

Bild 60 zeigt die Abwicklung der Wandfläche. Feld 12 bezeichnet dabei das Eckfeld (linkes Feld in Bild 60) und Feld 13 das Standard-Messfeld mit Fenster (rechtes Feld in Bild 60). In Bild 61 bzw. Bild 62 ist der horizontale bzw. vertikale Schnitt der Versuchswand dargestellt. In Tabelle 3 sind die wesentlichen Abmessungen und Flächeninhalte aufgelistet.

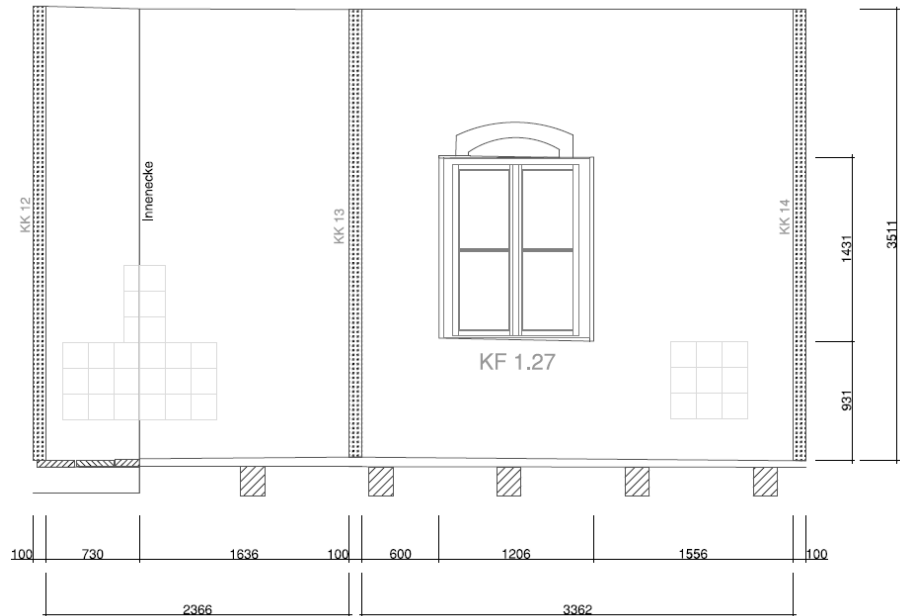


Bild 60:  
Abwicklung der Wandansicht Feld 12 und 13 mit Bemaßung der Wand, des Fensters und der Kabelkanäle, Zeichnung vereinfacht dargestellt, mit ca. Maßen.

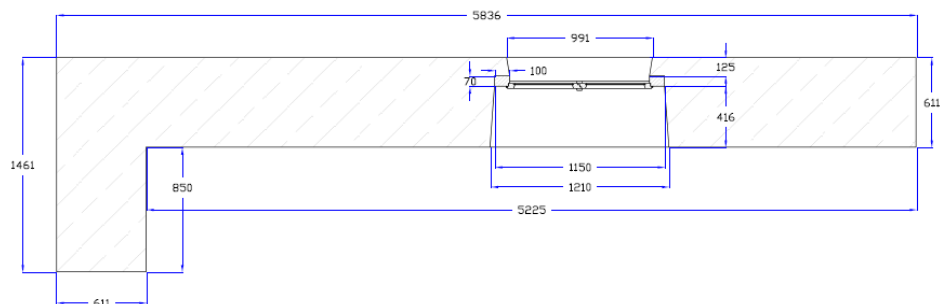


Bild 61:  
Horizontaler Schnitt der Außenwand im Bereich von Feld 12 und 13 mit Bemaßung der Wand und des Fensters.

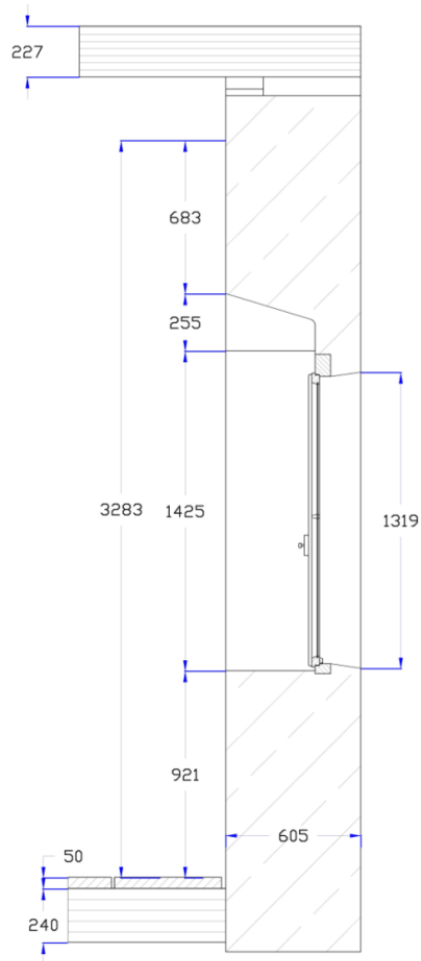


Bild 62:  
Vertikalschnitt der Außenwand im Bereich des Fensters in Feld 13 Bemaßung der Wand und des Fensters.

Tabelle 4:  
Daten zu Wandfeld 12 und 13.

Wandfeld	Feld-Höhe	Feld-Breite	Fensterfläche	Wandfläche
<b>12</b>	3,51 m	0,85 m 1,70 m	-	8,95 m <sup>2</sup>
<b>13</b>	3,51 m	3,42 m	1,71 m <sup>2</sup>	12,00 m <sup>2</sup>

## Einbau

Am 14.10.2013 wurde mit den Arbeiten des Wandaufbaus begonnen. Der Leichtmörtel wurde im Mischungsverhältnis von 20 kg auf 8 l Wasser zunächst in einer dünnen Schicht auf die mit dem reversiblen Mörtel vorbereitete Wand aufgetragen, um eine glatte Fläche zu erhalten. Anschließend wurde der Mörtel auch auf die Mineralfüllplatten mit einem Zahnpachtel aufgezogen und die Platten im Verbund auf die Wand aufgebracht (Bild 63). Feld 13 wurde auf der gesamten Fläche bearbeitet, Feld 12 zunächst nur bis zur Gerüsthöhe. Der obere Teil von Feld 12 wurde am folgenden Tag fertiggestellt.



Bild 63:  
Feld 12 und 13 (Wandabschnitt neben dem linken Fenster und rechte Wand) mit reversibler Putzschicht und darüber liegenden Mineralfüllplatten, Oktober 2013.

Für die Sensorik wurden die Mineralfüllplatten passend eingekerbt bzw. eingesägt. In Bild 64 ist die Anpassung der Dämmplatten an den oberen Deckenanschluss im Detail zu sehen.



Bild 64:  
Feld 13 mit zurechtgeschnittenen Mineraldämmplatten, Oktober 2013.

Die Gesamtdicke des Wandaufbaus beträgt auf 160 cm Höhe ca. 10,5 cm. Jedoch schwankt diese Dicke der Innendämmschicht durch den unebenen Untergrund. Die Stärke der Mineraldämmplatten beträgt rund 9,5 cm. Daraus ergibt sich eine Putzdicke von ca. 1 - 2 cm.

Zwischen den einzelnen Arbeitsschritten wurden durch das Fraunhofer IBP die erforderlichen Sensoren an den entsprechenden Stellen montiert (Bild 65).



Bild 65:  
Feld 13 (rechte Wand) mit Sensorik auf der reversiblen Putzschicht, Oktober 2013.

Am 15.10.2013 wurden die Arbeiten an der Versuchswand fortgeführt. Zunächst wurde das Feld 12 mit Mineraldämmplatten beklebt. Die Fensterlaibung wurde im selben Verfahren mit Laibungsplatten mit einer Dicke von 3 cm ausgefüllt. Hierzu wurden die Dämmplatten zu Keilen geschnitten (Bild 66). An-

schließlich wurde die gesamte Wand abgeschliffen und entstaubt. Zum Schluss wurde mit einer Zahnpachtel der Leichtputz aufgezogen, das Gewebe und Gewebekante eingebettet und alles flächig abgezogen.



Bild 66:  
Fensterlaibung von Feld 13 verkleidet mit Laibungsplatten, Oktober 2013.

Bei dem Gewebe handelt es sich um ein Glasseidengewebe mit einem Gewicht von  $160 \text{ g/m}^2$  und einer Maschenweite von  $4 \text{ mm}$  (Bild 67). Am 15.10.2013 wurde die Arbeit an Feld 12 die Arbeiten weitestgehend fertiggestellt (Bild 68 und Bild 69).



Bild 67:  
Glasseidengewebe, Oktober 2013.





Bild 68:  
Glasfaserdichtungsgewebe auf den Leichtputz aufgezogen und eingebettet,  
Oktober 2013.



Bild 69:  
Glasfaserdichtungsgewebe auf Dämmplatten mit Leichtputz verputzt, Oktober 2013.

Am dritten Tag, dem 16.10.2013, konnten die Arbeiten komplett abgeschlossen werden. Es wurden nur noch kleine Ausbesserungsarbeiten rund ums Fenster von Feld 12 durchgeführt (Bild 70).



Bild 70:  
Feld 12 und 13 (Wandabschnitt neben dem linken Fenster und rechte Wand)  
mit eingebettetem Glasfasergewebe im Grundputz, fertiger Zustand, Oktober  
2013.

Von dem Dämmsystem wurden Rückstellproben und Prüfkörper erstellt.

Verwendete Baustoffe:

- Mörtel: Kalkfeinputz als Klebemörtel für Mineraldämmplatten
- Dämmung: Mineraldämmplatten & Laibungsplatten
- Glasseidengewebe
- Leichtputz: Kalkfeinputz

### **Kenndaten**

Vom Hersteller wurden die Kenndaten von  $\lambda$ ,  $\rho$  und die Einbaudicke  $d$  zur Verfügung gestellt. Diese sind nach Angaben der Firma beispielhaft für die Mineraldämmplatten:

$$\lambda = 0,042 \text{ W/mK}$$

$$\rho = 90 \text{ kg/m}^3$$

$$d = 100 \text{ mm}$$

Aufbau:

- I. Kalkfeinputz

- II. Mineraldämmplatte
- III. Kalkfeinputz

## 5.6.2 Trockenbauweise mit Japanpapier-Kaschierung am Beispiel Feld 6

### Durchführung des Versuchs am Messfeld 6

Bild 71 zeigt Feld 6 vor der restauratorischen Bearbeitung der Fläche. Die allgemeine Sanierung am Gebäude ist mit der Dachsanierung und Balkenkopfrenuerung abgeschlossen.

In Bild 72 ist die Wandoberfläche von Feld 6 für die Aufbringung des reversiblen Schichtaufbaus vorbereitet. Wo notwendig, wurden Ablösungen der Malerschichten mit Celluloseleim gefestigt. Anschließend erfolgte der Auftrag der Farbmatrix.

Zum Schutz der Wandoberfläche vor dem losen Perlit Dämmmaterial, wurde diese mit dünnem Japan-Seidenpapier ( $11 \text{ g/m}^2$ ) kaschiert. Das Japanpapier wurde mit einer Mischung aus Methyl-Hydroxyethyl-Cellulose (Tylose), destilliertem Wasser und Ethylen im Mischungsverhältnis 1:60:30 bestrichen und in zwei Lagen an die Wand gebracht, siehe Bild 73.

Am oberen Bildrand sind die fertigen Anschlüsse zu der Dämmung der oberen Geschossdecke erkennbar. Nach der Installation der Messtechnik wurde das Innendämmsystem eingebaut. Bild 74 zeigt die fertig gestellte Innendämmung (noch ohne Endanstrich) und Bild 75 die Innendämmung mit Bauteilöffnung und Freilegung der Farbmatrix.



Bild 71:  
Feld 6 vor der restauratorischen Aufbereitung der Oberfläche und Instandsetzung des Mauerwerks, Aufnahme am 18.3.2013.



Bild 72:  
Feld 6 mit Testfarbfelder zur Überprüfung der Reversibilität und erster Sensorik, Aufnahme am 16.09.2013.



Bild 73:  
Feld 6 mit fertig montierten Sensoren und vollflächig aufgebrachter Kaschierung mit Japanpapier, Aufnahme am 7.10.2014.



Bild 74:  
Feld 6 mit Innendämmung und fertig verspachtelter Trockenbauplatte der Innendämmkonstruktion, Aufnahme am 16.10.2014.



Bild 75:  
Feld 6 mit Innendämmung und partieller Freilegung der Farbmatrix, Aufnahme  
am 19.07.2016.

## Beispielhafter Wandaufbau der Versuchswand mit Perlite Schüttung

Bild 76 zeigt die Wandansicht mit Abmessungen der Wandfläche Feld 6. In Bild 77 bzw. Bild 78 ist der horizontale bzw. vertikale Schnitt der Versuchswand dargestellt. In Tabelle 5 sind die wesentlichen Abmessungen aufgelistet.

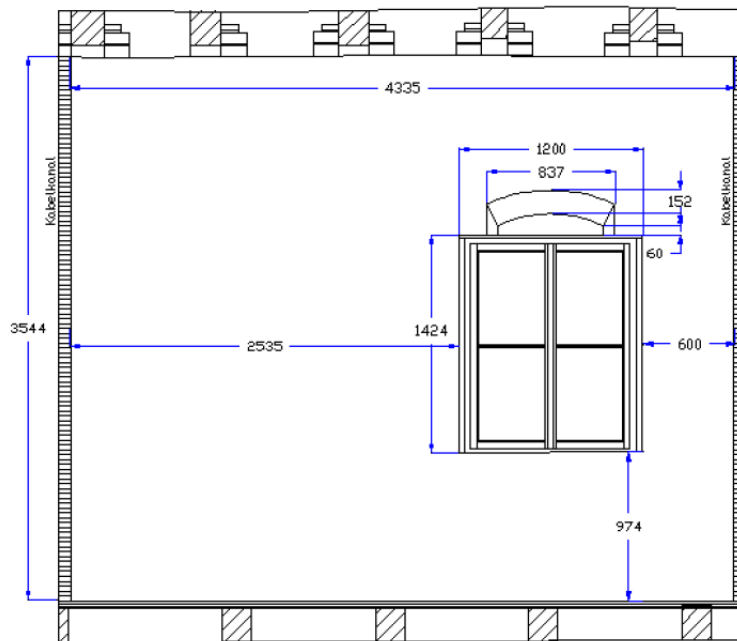


Bild 76:  
Abwicklung der Wandansicht Feld 6 mit den begrenzenden Kabelkanälen links und rechts zur Aufnahme der Messkabel, Zeichnung vereinfacht dargestellt, mit ca. Maßen.

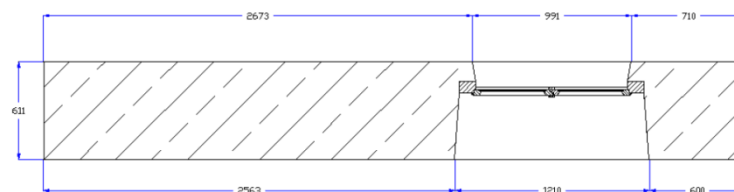


Bild 77:  
Horizontaler Schnitt der Außenwand im Bereich von Feld 6 mit Bemaßung der Wand und des Fensters im Rohzustand.



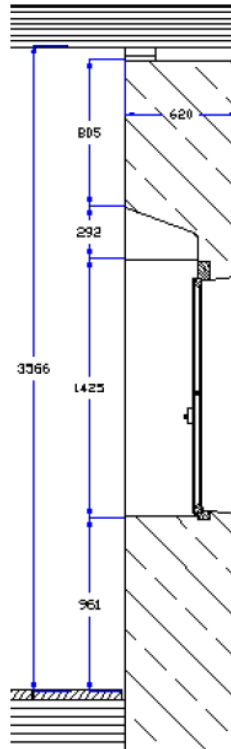


Bild 78:  
Vertikalschnitt der Außenwand von Feld 6 im Rohzustand.

Tabelle 5:  
Daten zum Wandfeld 6.

Wandfeld	Feld-Höhe	Feld-Breite	Fensterfläche	Wandfläche
6	3,54 m	4,33 m	1,71 m <sup>2</sup>	13,65 m <sup>2</sup>

### Einbau

Am 16.10.2014 wurde mit den Arbeiten des Wandaufbaus begonnen. Zum Schutz der Wandoberfläche vor dem losen Perlit Dämmmaterial, wurde diese mit dünnem Japan-Seidenpapier (11 g/m<sup>2</sup>) kaschiert. Das Japanpapier wurde mit einer Mischung aus Methyl-Hydroxylethyl-Cellulose (Tylose), destilliertem Wasser und Ethylen im Mischungsverhältnis 1:60:30 bestrichen und in zwei Lagen an die Wand gebracht, siehe Bild 79.



Bild 79:  
Oberfläche des Wandfeld 6, kaschiert mit Japanpapier, Oktober 2014.

Im Vorfeld wurden durch das Fraunhofer IBP die erforderlichen Kabelkanäle mit Sensoren an den entsprechenden Stellen montiert. Der Anschluss an die flankierenden Kabelkanäle erfolgte durch Profilband. Darüber wurde ein Rahmengestell bestehend aus UA 50 Profilen angebracht und an einer in der Decke umlaufenden Holzdielle sowie an einem Holzriegel im Sockelbereich des Wandfeldes verschraubt (Bild 80 und Bild 81). Die Fugen zwischen Stahlrahmen und den rechts und links das Feld 6 flankierenden Kabelkanälen sowie dem Sockel- & Deckenanschluss zu den Holzbalken wurden durch eine Vario XtraSafe Dampfbremse und Vario Xtra Tape abgedichtet. Vor dem Anbringen der Dampfbremse sind die Anschlüsse bereits durch Aluklebeband diffusionsdicht angeschlossen worden.

Danach wurden auf das Ständerwerk Gipskartonbauplatten mit einer Stärke von 12,5 mm angebracht. Die gesamte Fläche hinter den Gipskartonbauplatten wurde mit ca. 900 Litern Perlite Dämmschüttung mit einer Körnung von 0-6 mm hinterfüllt. Die Dämmschicht hat eine Stärke von ca. 80 mm. Über die Gipskartonbauplatten wurde eine Dampfbremse verlegt. Die Stöße der Gipskartonbauplatten und der Dampfbremse wurden Dichtklebeband abgedichtet (Bild 82 bis Bild 84).



Bild 80:  
Rahmengestell für die vorgeständerte Innendämmkonstruktion aus Perlite-Schüttung, Oktober 2014.

Der Bereich des Farbtestfelds wurde extra gerahmt, um eine Revisionsöffnung zu schaffen. Dazu wurde ein doppeltes Profil als Anschlag an das Rahmengestell verschraubt (Bild 81).



Bild 81:  
Farbtestfelds mit Revisionsöffnung, Oktober 2014.



Bild 82:  
Wandfeld 6 mit vorgebauten Gipskartonbauplatten, Oktober 2014.



Bild 83:  
Gipsfaserplatten als raumseitiger Abschluss, Oktober 2014.



Bild 84:  
Laibung mit Vlies und Band abgedichtet und mit Gipsfaserplatten-Streifen abgeschlossen, Oktober 2014.

Nachfolgend wurden 12,5 mm starke Gipsfaserplatten auf dem gesamten Wandfeld angebracht (Bild 85). Die Fugen der Gipsfaserplatten wurden verspachtelt (Bild 86). Die Fensterlaibung wurde im Anschluss mit einer Mischung aus gipsgebundenem Perlit verputzt. Die Laibung wurde mit einer ca. 50 mm starken Dämmputzschicht und der Sturz mit einer ca. 30 mm starken Dämmputzschicht verputzt. Abschließend ist der Laibungsbereich mit Kantenschutz und Glasfasergewebe gesichert und mit Gipsputz verputzt worden (Bild 87 und Bild 88).



Bild 85:  
Fläche des Wandfeldes 6 verkleidet mit Gipsfaserplatten und Fensterlaibung mit Wärmedämmputz verputzt, Oktober 2014.



Bild 86:  
Fugen der Gipsfaserplatten mit Gipsspachtelmasse verspachtelt, Oktober 2014.





Bild 87:  
Fensterlaibung ausgekleidet mit Glasfasergewebe, Oktober 2014.



Bild 88:  
Abschließender Gipsputz in der Fensterlaibung, Oktober 2014.

Von dem Dämmsystem wurden Rückstellproben und Prüfkörper erstellt.

Verwendete Baustoffe:

- Japanpapier Kaschierung:
  - Japan-Papier 2x11 g/m<sup>2</sup>

- Celluloseleim dünnflüssig K 300, Methyl-Hydroxyethyl-Cellulose, Kremer
- Ethylen
- Destilliertes Wasser
- Dämmung und Putz:
  - Profile UA 50
  - HY Perlit (0-6 mm Körnung) Schüttung
  - Gipskartonbauplatte 12,5 mm DIN 18180 A2
  - Gipsfaserplatten 12,5 mm
  - Klimamembran Variable Dampfbremse (sd: 0,3 bis 20 m)
  - Dichtband Tape
  - Gips-Spachtelmasse
  - Glasfasergewebe
  - Ansetzbinder

### **Kenndaten**

Vom Hersteller wurden die Kenndaten von  $\lambda$  und  $\rho$  zur Verfügung gestellt. Diese sind nach Angaben der Firma für mineralische Dämmsysteme durch Perlite Schüttungen:

$$\lambda = 0,05 \text{ W/mK}$$

$$\rho = 90 \text{ kg/m}^3$$

$$d = 80 \text{ mm}$$

Aufbau:

- IV. Reversible Trennschicht (Japanpapier), 1mm
- V. Perlit Dämmschüttung, 80 mm
- VI. Gipskartonplatte, 12,5 mm
- VII. Variable Dampfbremse, 1mm
- VIII. Gipsfaserplatte, 12,5 mm



### 5.6.3 Sonderkonstruktionen (Schilfrohr und Dämmziegel)

Im Fall von Schilfrohr wurde eine besondere Ständerbauweise ausgeführt, da es das Ziel war, einen ähnlichen Wärmedurchlasswiderstand  $R$  bei allen Flächen zu erreichen. Unter den Schilfrohrmatten wurde auch der reversible Putz ausgeführt.

Die mit Perlite gefüllten Dämmziegel wurden vor der Wand aufgemauert. Analog den Trockenbaukonstruktionen wurde zuvor die Wand mit Japanpapier kaschiert.

### 5.7 Messtechnische Begleitung der Maßnahme zur Erfolgskontrolle (AP 6)

Der Erfolg der Dämmmaßnahme wie auch die Schadensfreiheit wird durch messtechnische Erfassung der wesentlichen Kenngrößen über zwei Jahre (hier sind vor allem die Wintermonate von Bedeutung) kontrolliert. Zur Beurteilung der Energieeffizienz, der hygienischen Bedingungen und der Behaglichkeit werden die notwendigen Sensoren in und auf den Außenwänden sowie im Raum installiert. Hierzu werden Messfühler zur Erfassung der Feuchte und Temperatur an den kritischen Stellen installiert, sowie Wärmeflussmessscheiben zur Erfassung des Wärmestroms.

Darüber hinaus erfasst die Wetterstation in der näheren Umgebung des Gebäudes alle notwendigen Daten zu den Bereichen Lufttemperatur, relative Feuchte, Niederschlag, Globalstrahlung und diffuse Strahlung, sowie Windgeschwindigkeit.

Die Umsetzung des Messprogramms umfasst folgende Aufgaben:

- Entwicklung des Messkonzeptes,
- Kalibrierung und Bereitstellung von Messfühlern und Messanlage für den Zeitraum der geplanten Untersuchungen,
- Installation von Messfühlern und Messanlage,
- Kontinuierliche Erfassung der relevanten Messgrößen über den gesamten Untersuchungszeitraum,
- Datenfernübertragung der Messdaten zum Fraunhofer IBP nach Holzkirchen mittels IMEDAS,
- Laufende Datenkontrolle und Datenüberwachung,
- Infrarot-Thermographie der Gebäudehülle vor und nach Einbau der Innendämmung,
- Aufbereitung der gewonnenen Messdaten in tabellarischer und graphischer Form, die der Projektgruppe und auf Wunsch den Projektpartnern zur Verfügung gestellt werden.

### 5.7.1 Messkonzept und Sensorik

Alle Sensoren werden an ein zentrales Datenerfassungssystem angeschlossen. Die vorhandene Benutzeroberfläche der am Fraunhofer IBP entwickelten Datenbank IMEDAS wird zur Messdatenauswertung projektspezifisch angepasst. Damit wird eine kontinuierliche Kontrolle der Messwerte und anschauliche graphische Ausgabe der Messdaten vor Ort und im Büro des Bearbeiters ermöglicht.

Die Sensoren werden dabei in den Wandflächen in ungestörten Bereich eingebettet, um Randeinflüsse auszuschließen. Im Eckbereich der Innenecken an den Außenwänden und Außenecken an den Laibungen werden die Sensoren entsprechend den kritischen Bereichen angeordnet. Einen Überblick über das Messkonzept und Anordnung in der Alten Schäfflerei ist in Bild 89 dargestellt.

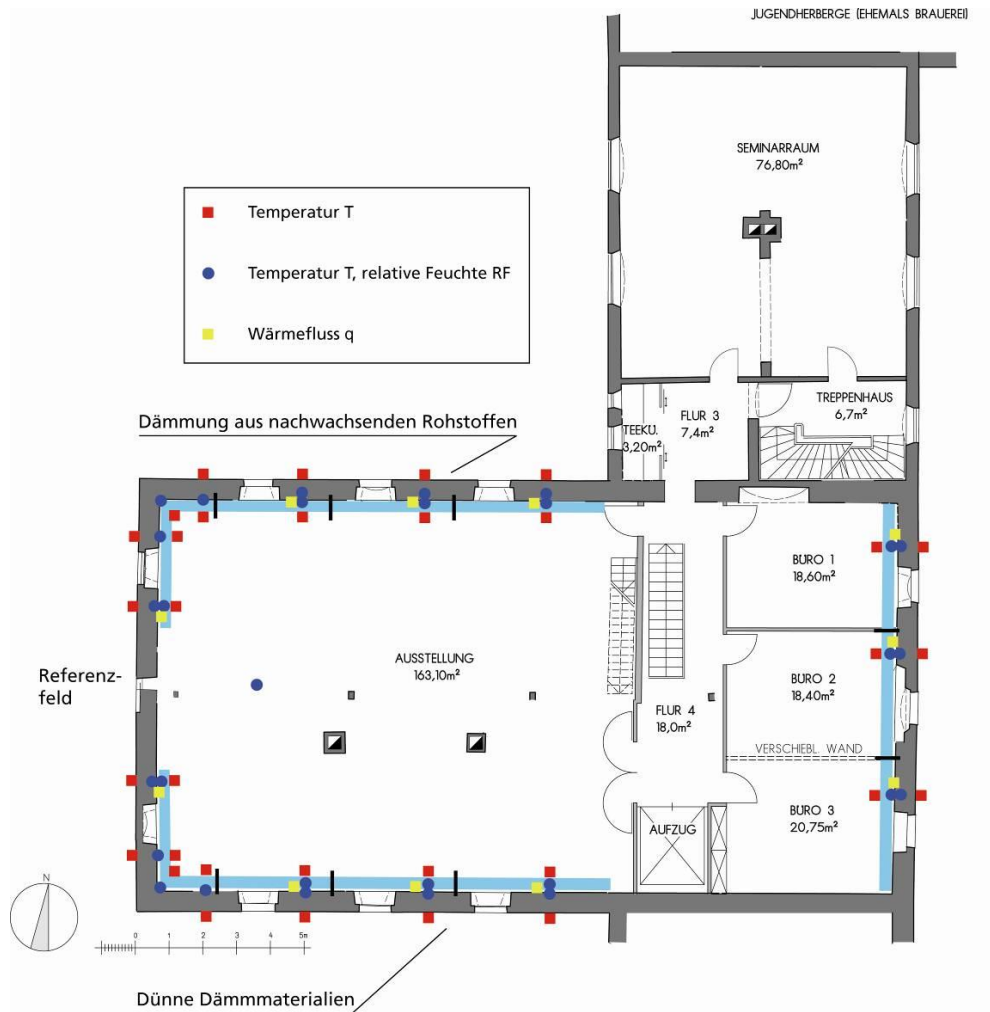


Bild 89: Grundriss Obergeschoss Kopfbau der Alten Schäfflerei mit schematischer Darstellung der Belegung mit Dämmmaterial- bzw. Laibungsvarianten sowie Sensorpositionen für relative Feuchte (RF) und Temperatur (T) in Raummitte, unterhalb der Wärmedämmung (RF, T, q) und auf der Wandoberfläche. Hierzu kommen nach Bedarf noch Messfühler in der Fensterlaibung.

## 5.7.2 Messwerterfassung am Beispiel von Feld 13

Im Folgenden wird ein typischer Messaufbau am Beispiel des Wandfelds 13 beschrieben, das mit einer Mineraldämmplatte gedämmt wurde.

## 5.7.3 Sensorik

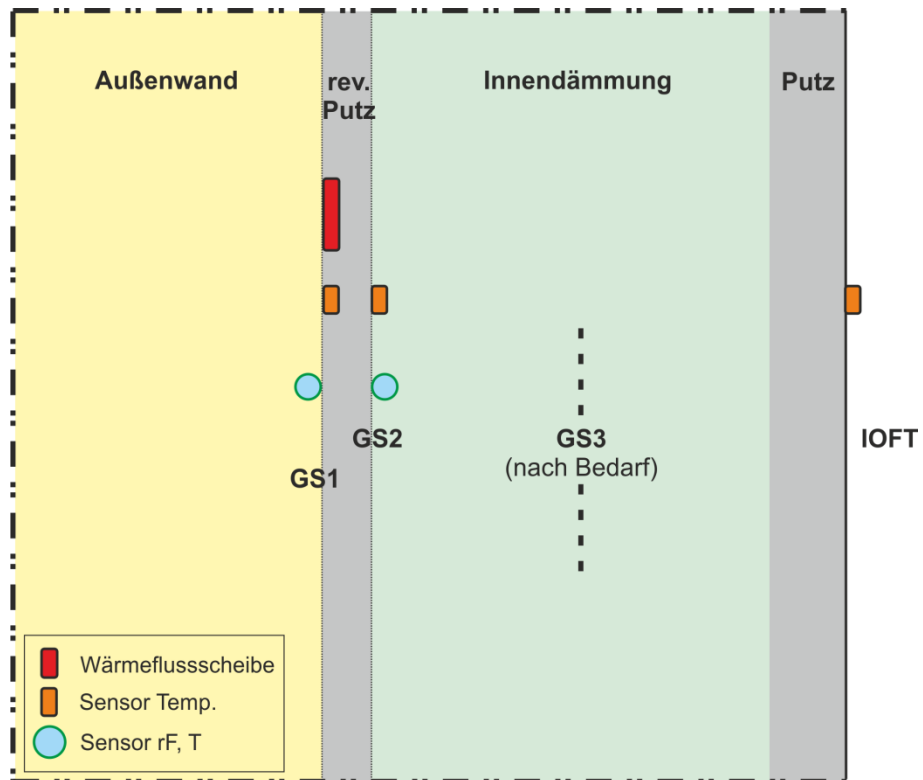
Zur Beurteilung der Energieeffizienz, der hygienischen Bedingungen und der kritischen Positionen der Konstruktion werden die notwendigen Sensoren zur Erfassung von Temperatur, relativer Feuchte und Wärmefluss in und auf den Außen- und Innenwänden sowie im Raum installiert. Der Einbau der Sensoren wurde zum Teil parallel zum Einbau der Dämmsysteme durchgeführt.

Die Temperaturmessungen erfolgen mit PT100 Sensoren mit einer kalibrierten Genauigkeit von  $\pm 0,1$  Kelvin. Die Messung der relativen Feuchte wird mit Kombisensoren zweier unterschiedlichen Fabrikate, Fa. Rotronic und Fa. Ahlborn FHAD 462, durchgeführt. In den Abbildungen sind die Messwerte des Sensor der Fa. Rotronic HC2-C05 abgebildet. Die angegebene Genauigkeit ist nach Werkskalibrierung für den Sensor Rotronic HC2-C05 für die Temperatur  $\pm 0,3$  Kelvin und für die relative Feuchte  $\pm 1,5$  % r. F. Die verwendete Wärmefluss-scheibe FQA 118 wird vom Hersteller mit einer Genauigkeit von 5 % vom Messwert angegeben.

Alle Sensoren werden an ein zentrales Datenerfassungssystem angeschlossen und an die institutionseigene Datenbank IMEDAS® geleitet, dauerhaft gespeichert und verwaltet.

#### **5.7.4 Positionen der Sensoren**

Die Art und Lage der Messwerterfassung und die Sensoren sind in einer detaillierten Messplanung erfasst. Bild 90 und Bild 91 zeigt den Messplan mit Ansicht der Versuchswand mit dem Messaufbau sowie dem horizontalen Schnitt durch die Wand in Höhe der Messachse. Es sind die Lage und Art der Sensoren mit Messachse und Datenbankbezeichnung gekennzeichnet. In der Hauptmessachse M1 sind neben den Temperaturmessern auch die Kombisensoren für relative Feuchte und Temperatur, sowie die Wärmefluss-scheibe angeordnet. Für die erforderlichen Untersuchungen wird die Messachse M1 herangezogen. In Tabelle 6 werden die in den Messplänen angeführten Kurzbezeichnungen erläutert.



Vertikalschnitt  
Innendämmung - Außenwand  
15.02.2017 StB

Bild 90:  
Schnitt durch eine Innendämmung mit prinzipieller Messanordnung der Standard-Messachse mit Bezeichnung der Positionen in der Bauteilschichtung.

Tabelle 6:  
Bezeichnungen im Messplan und Diagrammen.

Kurzbezeichnung	Bezeichnung
M1	Messachse 1
M2	Messachse 2
M3	Messachse 3
IOFT	Innen-Oberflächentemperatur
AOFT	Außen-Oberflächentemperatur
GS 1	Grenzschicht 1
GS 2	Grenzschicht 2
GS 3	Grenzschicht 3
T	Sensor Temperatur
rF,T oder T,rF	Kombisensor für relative Feuchte und Temperatur
KS, KR	Fabrikat Kombisensor
WS	Wärmesfluss-Messplatte
LT	Sensor Luft-Temperatur

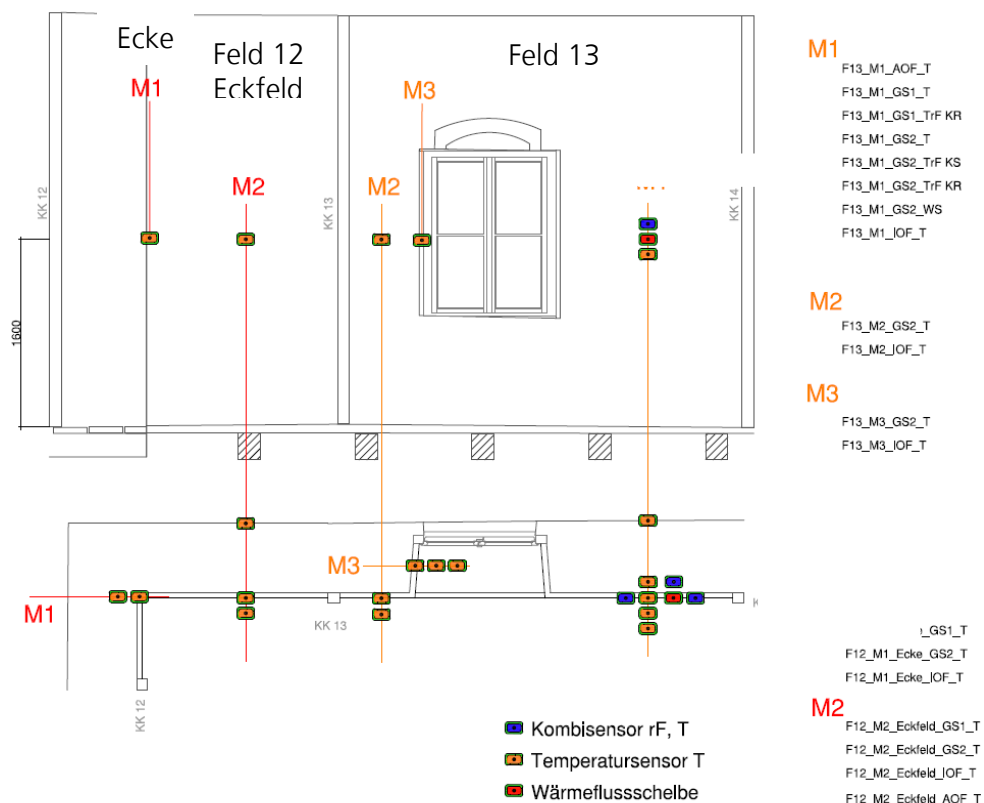


Bild 91:  
Messplan für Wanddecke, Eckfeld 12 und Wandfeld 13.

### 5.7.5 Darstellung der Messdaten 2013 bis 2016 am Beispiel Feld 13

Die Messdaten werden in zwei unterschiedlichen Zeitabschnitten dargestellt. Der Gesamtzeitraum für das Feld 13 mit der Mineralplatten-Dämmung erfasst die Daten von 1.12.2013 bis 1.5.2016. Der „Winter“-Zeitraum erfasst die Daten von 1.1.2015 bis Anfang März 2015.

Es erfolgt eine weitere Unterteilung der Darstellung der Messdaten für das Innen- und Außenklima, Feld 12 mit Außenecke (Messachse 1 und Messachse 2) sowie Feld 13 Hauptmessung in Feldmitte (Messachse 1).

#### Übersicht Messdaten 2013 bis 2016

##### Innen- und Außenklima

Es findet eine Klimatisierung im Winter mit Beheizung des Raumes auf 20 °C, sowie einer Raumluft-Befeuchtung auf 50 % r. F statt. Das Innenraumklima wurde in etwa in Raummitte aufgezeichnet (Bild 92). Die Raumtemperaturen und die relativen Luftfeuchten konnten in den Heizperioden 2014 – 2015 und

2015 – 2016 in einem engen Korridor gehalten werden. Die in den Sommermonaten auftretenden hohe relativen Feuchten sind z. T. auf Baufeuchte sowie auf relativ geringe sommerliche Raumerwärmung in dem Gebäude zurückzuführen. In Bild 93 ist das auf der Nordseite aufgezeichnete Außenklima mit relativer Luftfeuchte und Außenlufttemperatur abgebildet. In beiden Heizperioden wurden für kurze Zeitperioden Außenlufttemperaturen bis ca. -10 °C erreicht.

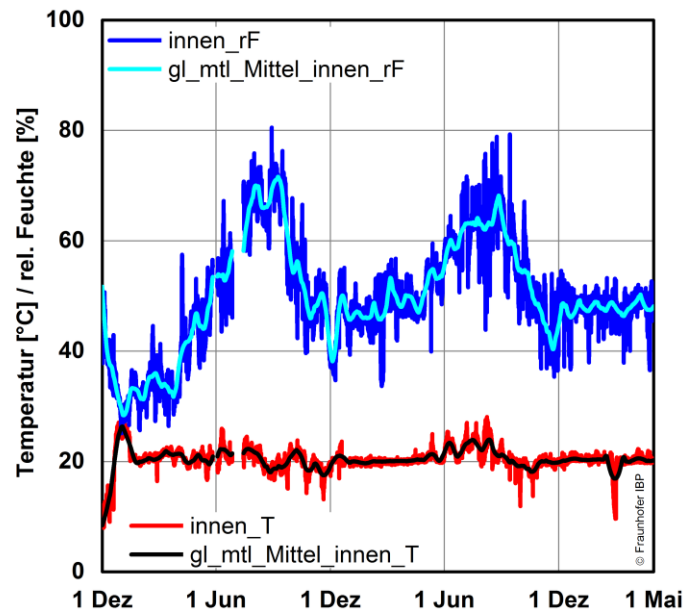


Bild 92:  
Innenklima des gesamten Messzeitraums von 1.12.2013 bis 1.5.2016 mit stündlichen Werten und gleitendem Monatsmittelwert.

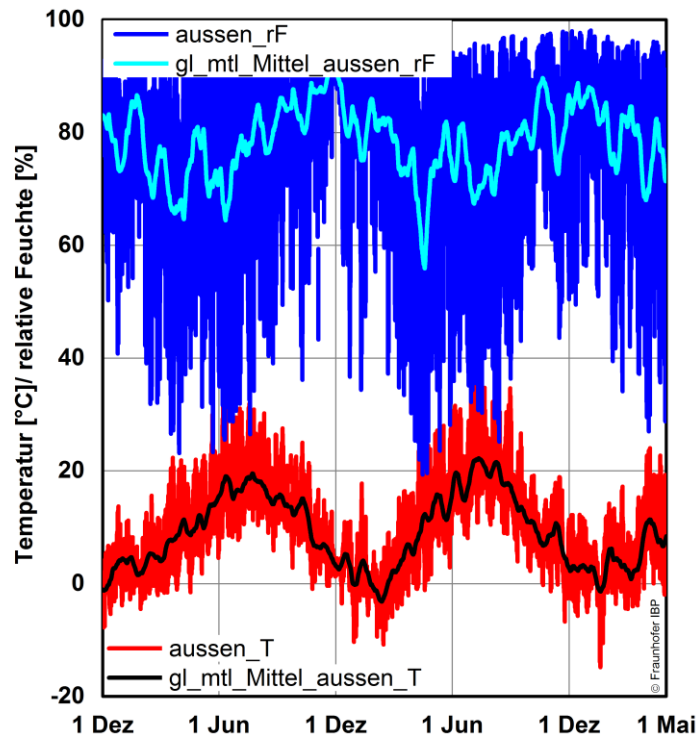


Bild 93:  
 Außenklima des gesamten Messzeitraums von 1.12.2013 bis 1.5.2016 mit  
 stündlichen Werten und gleitendem Monatsmittelwert.



## Übersicht Messdaten Feld 13 Messachse 1

In den Abbildungen Bild 94 bis Bild 97 sind die Messdaten der Messachse 1, zum Teil mit dem Außen- oder Innenklima, überwiegend mit gleitenden Monatsmittelwerten der minütlich erfassten Messwerte im Zeitraum vom 1.12.2013 bis 1.5.2016 abgebildet.

In Bild 93 sind die Temperaturverläufe über die Messachse mit Raum- und Außentemperatur dargestellt. Zusätzlich ist der Verlauf des Wärmestroms im Graphen mit eingetragen. Bild 94 zeigt den Verlauf der relativen Feuchte innen und außen, sowie in der Grenzschicht 1 (GS1) auf der originalen Wandoberfläche unter dem reversiblen Mörtel und in der Grenzschicht 2 (GS2) auf dem reversiblen Mörtel. Nach dem Einbau des Innendämmsystems ist durch die Baufeuchte der Feuchtesensor in Grenzschicht 2 bei 100 % r. F. Ab März beginnt die Austrocknung an dieser Grenzschicht. Über dem Sommer und Herbst liegt die relative Feuchte bei ca. 80 % im gleitenden Monatsmittel und steigt ab Anfang Dezember stark an. Im Winterzeitraum bleiben in der Grenzschicht 2 und Grenzschicht 1 die Werte dauerhaft bei 100 % r. F. Es beginnt ab Mai erneut die Austrocknung in beiden Grenzschichten und der Zyklus wiederholt sich. Die eingebrachte Baufeuchte zeigt nur geringe Auswirkungen im ersten Winter. In allen drei Wintern findet zu einem ähnlichen Zeitpunkt ein Absinken auf unter 100 % r. F. statt.

Eine zusätzliche Darstellung der Feuchte der Raumluft in Form der Taupunkttemperatur mit Vergleich zur Schichttemperatur der Grenzschicht 2 ist in Bild 93 abgebildet. Während der Winter- und Frühjahrsmonate steigt die Taupunkttemperatur bis auf die Temperatur der Grenzschicht 2 an.

Die absoluten Feuchtegehalte der Raum- und Außenluft sowie der Feuchtesensoren in der Grenzschicht 1 und 2 sind in Bild 97 abgebildet. Die absolute Raumluftfeuchte liegt im ersten Winter nur geringfügig über der Außenluft. Es erfolgte im ersten Winter keine zusätzliche Befeuchtung der Raumluft. Die absolute Feuchte in der Grenzschicht 2 zeigt jedoch aufgrund der Einbaufeuchte höhere Werte. Im weiteren Verlauf wurde die Raumluft in der jeweiligen Heizperiode befeuchtet. Der absolute Feuchtegehalt der Raumluft liegt deutlich über der Außenluft. Die Verläufe der absoluten Feuchten in der Grenzschicht 1 und 2 zeigen in den Winter- und Frühjahrsmonaten im Wesentlichen einen ähnlichen Verlauf, die jeweils etwas unterhalb der absoluten Feuchte der Raumluft liegen. Während der Austrocknungsphasen im Sommer ergeben sich bis auf die höheren Schwankungen ähnliche absolute Feuchten wie in der Raumluft.

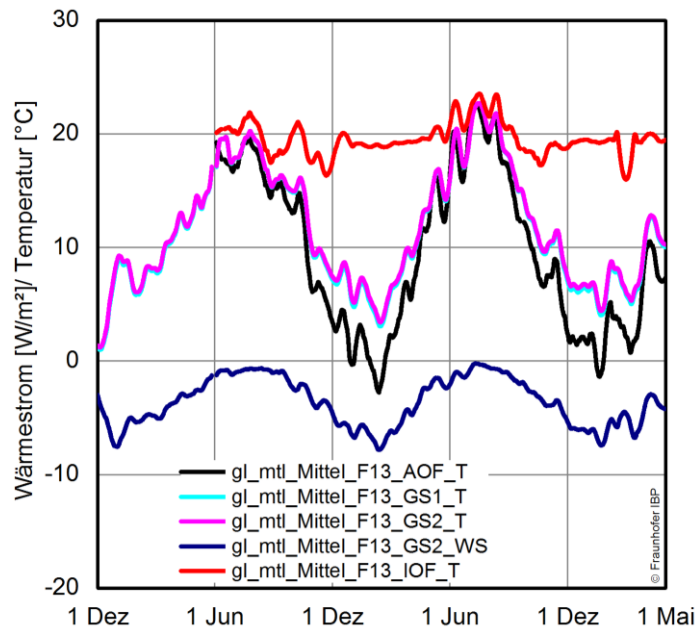


Bild 94:  
Wärmestrom und Temperaturen in der Grenzschicht und Temperaturen an der Innenoberflächen sowie von Innen- und Außenklima im vom 1.12.2013 bis 1.5.2016 als gleitendem Monatsmittelwert, Feld 13 mit Mineraldämmplatte.

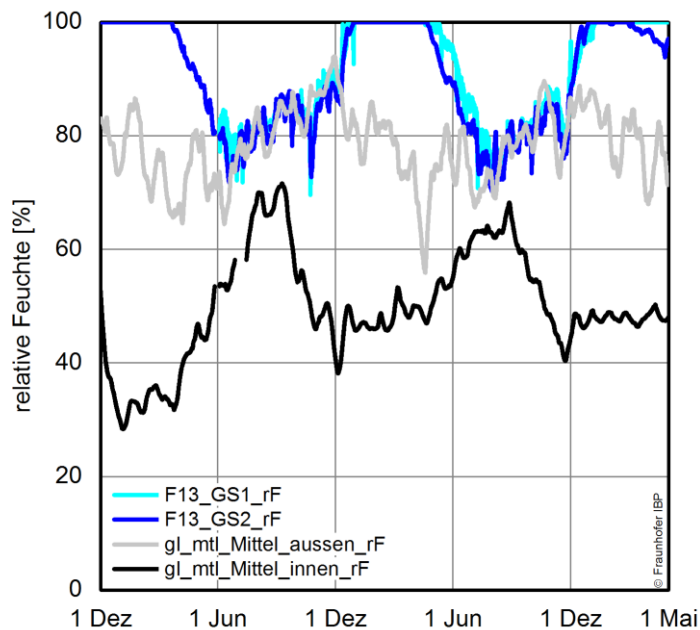


Bild 95:  
Relative Feuchte im Messzeitraum von 1.12.2013 bis 1.5.2016 als gleitender Monatsmittelwert der Messwerte in der Grenzschicht zwischen Dämmung und Außenwand sowie des Raum- und Außenklimas, Feld 13 mit Mineraldämmplatte.

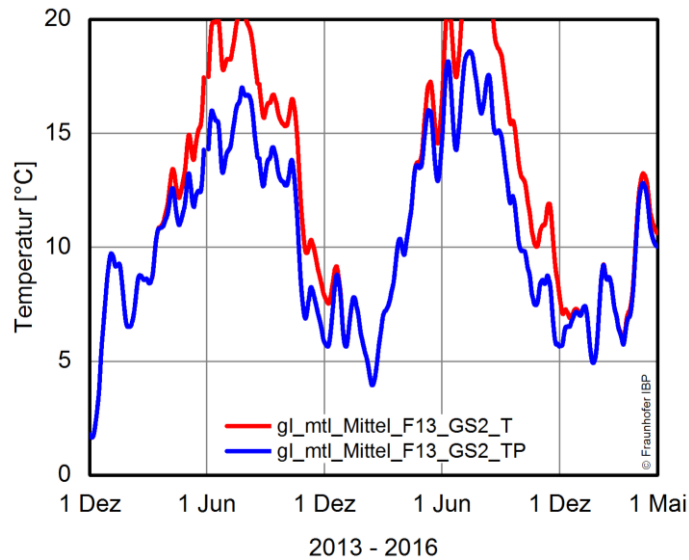


Bild 96:  
 Temperatur im Messzeitraum von 1.12.2013 bis 1.5.2016 als gleitender Monatsmittelwert der Messwerte in der Grenzschicht zwischen Dämmung und Außenwand, im Vergleich mit aus der r. F. berechneter Taupunkttemperatur (blaue Kurve), Feld 13 mit Mineraldämmplatte.

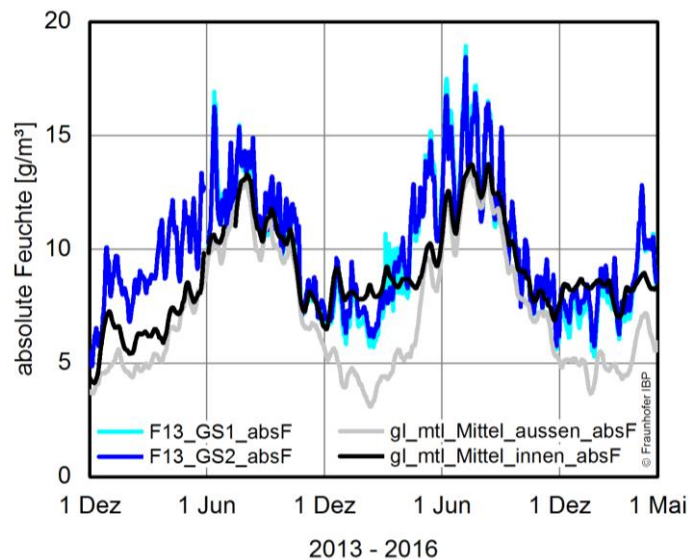


Bild 97:  
 Berechnete absolute Feuchte im Messzeitraum vom 1.12.2013 bis 1.5.2016 mit stündlichen Werten in der Grenzschicht zwischen Dämmung und Außenwand sowie den gleitendem Monatsmittelwert des Raum- und Außenklimas, Feld 13 mit Mineraldämmplatte.

## Übersicht Messdaten Feld 12 Wanddecke Messachse 1 und Messachse 2

In den Abbildungen Bild 98 und Bild 99 sind die Messdaten der in der Wand-  
ecke (Messachse 1) bzw. Feldmitte des Eckfeldes (Messachse 2) zum Teil mit  
dem Außen- oder Innenklima abgebildet. Die Messdaten sind zum Teil mit glei-  
tenden Monatsmittelwerten der minütlich erfassten Messwerte im Zeitraum  
vom 1.12.2013 bis 1.5.2016 dargestellt.

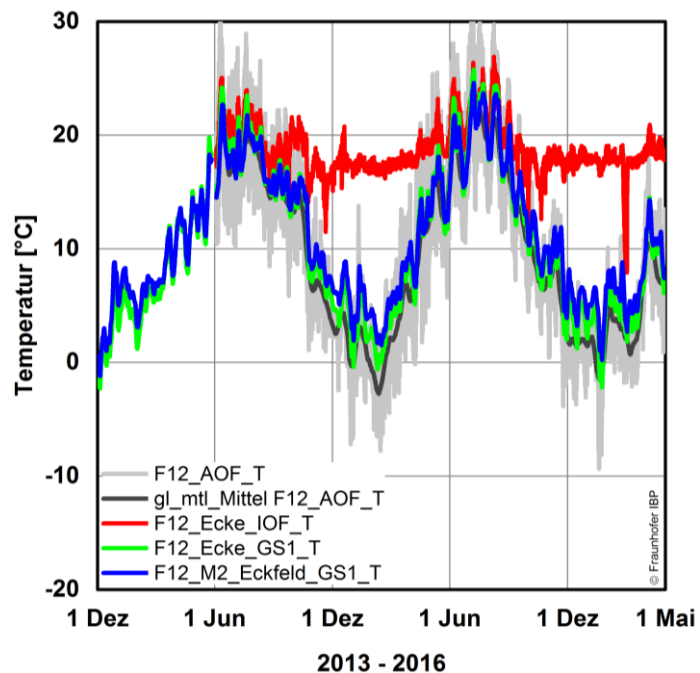


Bild 98:

Temperaturen in der Grenzschicht und Temperaturen an der Innenoberfläche  
mit stündlichen Mittelwerten sowie die Außenoberflächentemperatur mit glei-  
tendem Monatsmittelwert vom 1.12.2013 bis 1.5.2016, Feld 13 mit Mineral-  
dämmplatte.

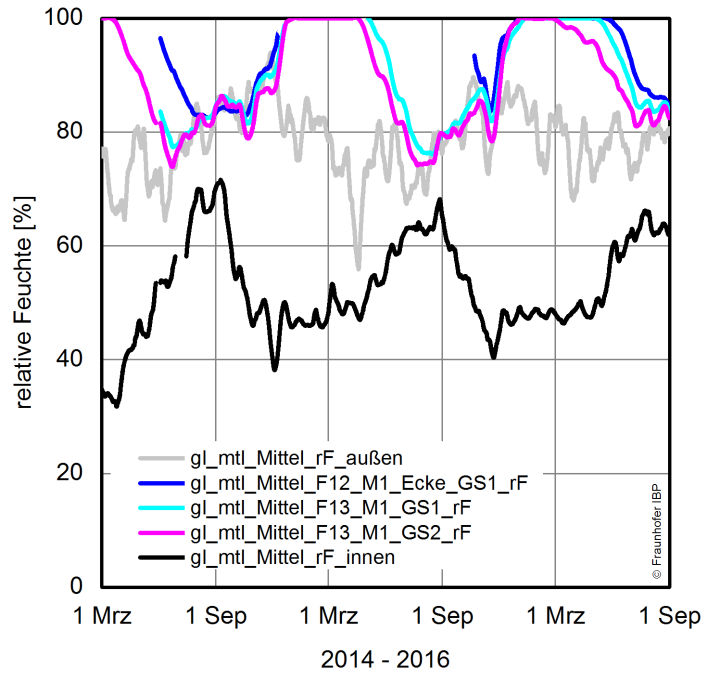


Bild 99:  
Relative Feuchte im Messzeitraum von 1.3.2014 bis 1.9.2016 als gleitender Monatsmittelwert der Messwerte in der Grenzschicht zwischen Dämmung und Außenwand in der Außenwanddecke sowie des Raum- und Außenklimas, Feld 13 mit Mineraldämmplatte.

### 5.7.6 Detailliertere Betrachtungen für den Winterzeitraum 2015 für Feld 13

#### Innen- und Außenklima 1.1. – 1.3.2015

In Bild 100 ist das Raumklima für den Zeitraum vom 1.1. bis 2.3.2015 abgebildet. Die relative Feuchte zeigt geringe Schwankungen bis auf einen Zeitraum von 5 Tagen ab dem 20.2., in dem der Luftbefeuchter ausfiel. Die Raumtemperatur ist bis auf minimale Schwankungen nahezu konstant.

Bild 101 zeigt das Außenklima mit relativer Luftfeuchte und Außenlufttemperatur für den gleichen Zeitraum wie für das Innenraumklima. Die Lufttemperatur schwankt in diesem Zeitraum im gleitenden Monatsmittel um 0 °C. Die Temperatur schwankt mit dem Tagesgang, wobei in diesem Zeitraum kurzfristige Erwärmungen bis über 15 °C und Abkühlungen bis -10 °C vorkommen. Die relative Feuchte schwankt im gleitenden Monatsmittel in etwa um 80 % r. F.

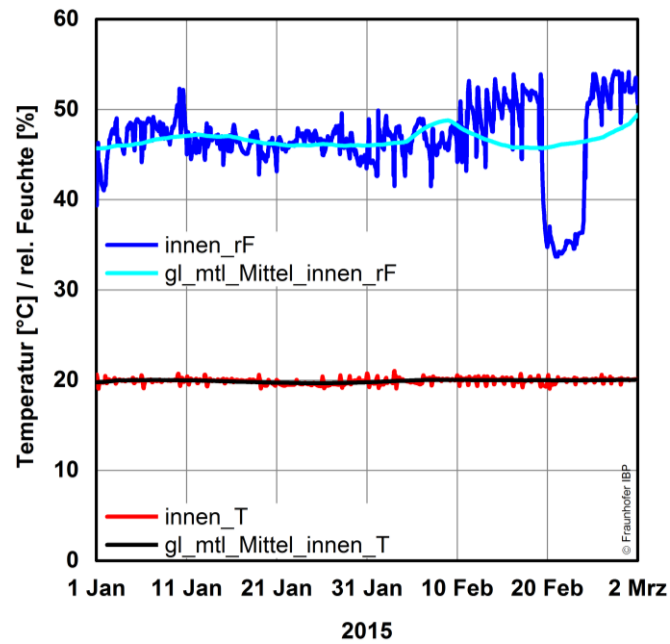


Bild 100:  
Innenklima im Winter vom 1.1.2015 bis 2.3.2015 mit stündlichen Werten und gleitendem Monatsmittelwert.

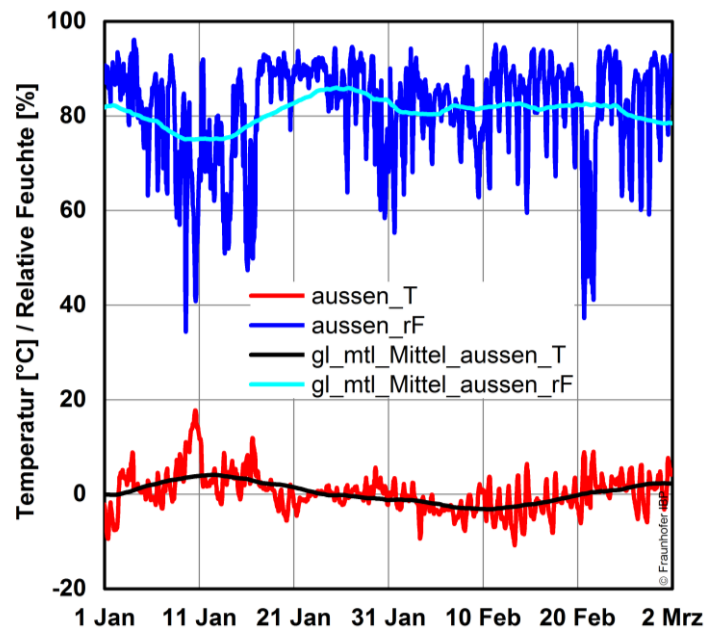


Bild 101:  
Außenklima im Winter vom 1.1.2015 bis 2.3.2015 mit stündlichen Werten und gleitendem Monatsmittelwert.

## Messwerte Wandfeld 13 Messachse 1 vom 1.11.2014 – 1.3.2015

In den Abbildungen Bild 102 bis Bild 105 sind die Messdaten der in der Wand-ecke (Messachse 1) bzw. Feldmitte des Eckfeldes (Messachse 2) zum Teil mit dem Außen- oder Innenklima abgebildet. Die Messdaten sind zum Teil mit gleitenden Monatsmittelwerten der minütlich erfassten Messwerte für den Zeit-raum vom 1.1.2015 bis 1.3. 2015 abgebildet. In Bild 102 wurde zusätzlich der Zeitraum vom 1.11.2014 bis 1.1.2015 dargestellt, in der der Anstieg der relati-ven Feuchte von ca. 85 % r. F. bis auf 100 % r. F. in der Grenzschicht 1 und 2 abgebildet sind. Bild 103 zeigt den Verlauf der relativen Feuchte vom 1.1. - 1.3.2015. Die relative Feuchte bleibt in diesen Zeitraum bei 100 % r. F. in bei-den Grenzschichten. Der Ausfall des Luftbefeuchters über einige Tage zeigt keinerlei Auswirkung auf die relative Feuchte in den Grenzschichten.

Bild 104 zeigt die Temperaturverläufe über die Messachse mit Raum- und Au-ßentemperatur dargestellt. Zusätzlich ist der Verlauf des Wärmestroms im Gra-phen mit eingetragen.

Die absolute Feuchtegehalte der Raum- und Außenluft sowie der Feuchtesen-soren in der Grenzschicht 1 und 2 sind in Bild 105 abgebildet. Die absolute Raum-luftfeuchte ist in etwa um  $4 \text{ g/m}^3$  höher zum Feuchtegehalt der Außenluft. Die absolute Feuchte in den Grenzschichten unterscheiden sich geringfügig mit et-was niedrigeren Werten in der Grenzschicht 1 unter dem reversiblen Putz.

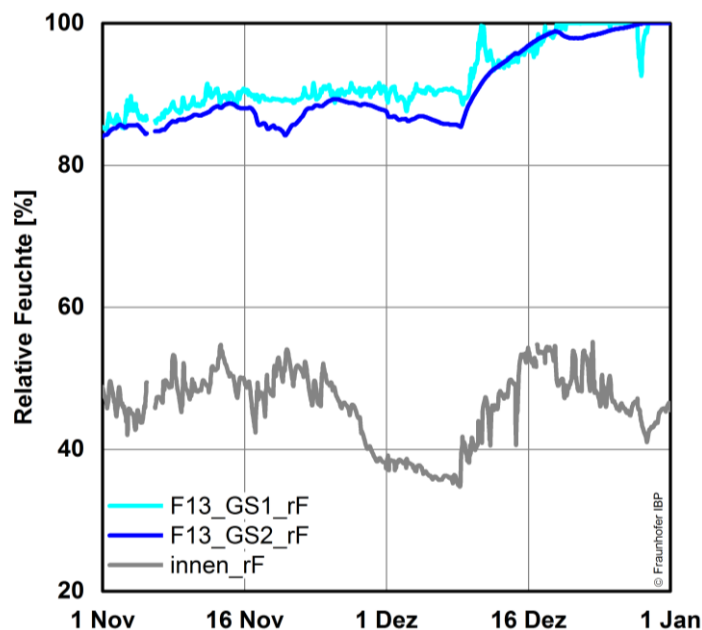


Bild 102:

Relative Feuchte im Messzeitraum vom 1.11.2014 bis 1.1.2015 mit stündlichen Werten in den Grenzschichten zwischen Dämmung und Außenwand sowie gleitendem Monatsmittelwerten des Raum- und Außenklimas, Feld 13 mit Mineraldämmplatte.

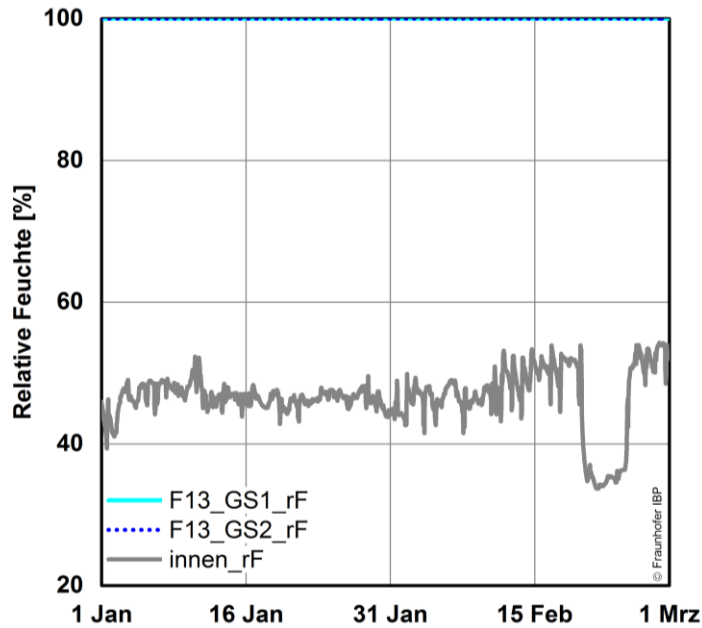


Bild 103:  
Relative Feuchte im Messzeitraum vom 1.1. bis 1.3.2015 mit stündlichen Werten in den Grenzschichten zwischen Dämmung und Außenwand sowie gleitendem Monatsmittelwerten des Raum- und Außenklimas, Feld 13 mit Mineraldämmplatte.

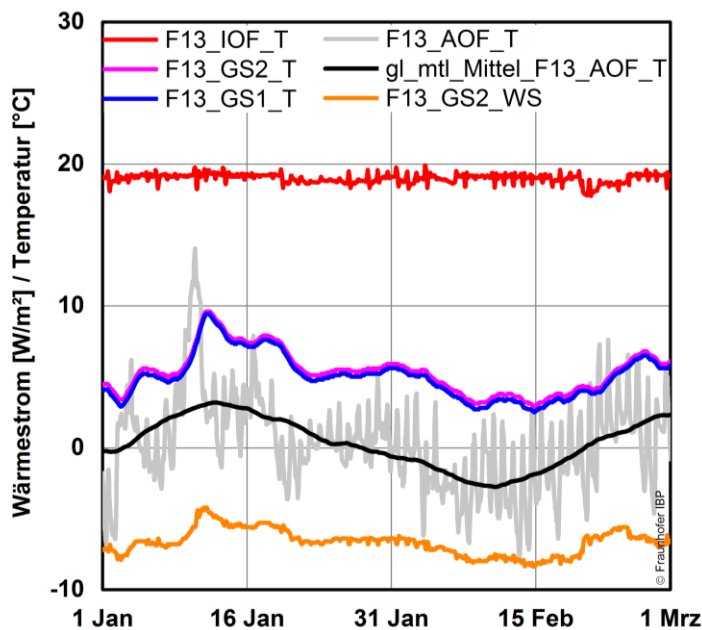


Bild 104:  
Wärmestrom und Temperatur im Zeitraum vom 1.1. bis 1.3.2015 mit stündlichen Werten der Grenzschichttemperaturen sowie Oberflächentemperaturen mit zusätzlich gleitendem Monatsmittelwert, Feld 13 mit Mineraldämmplatte.



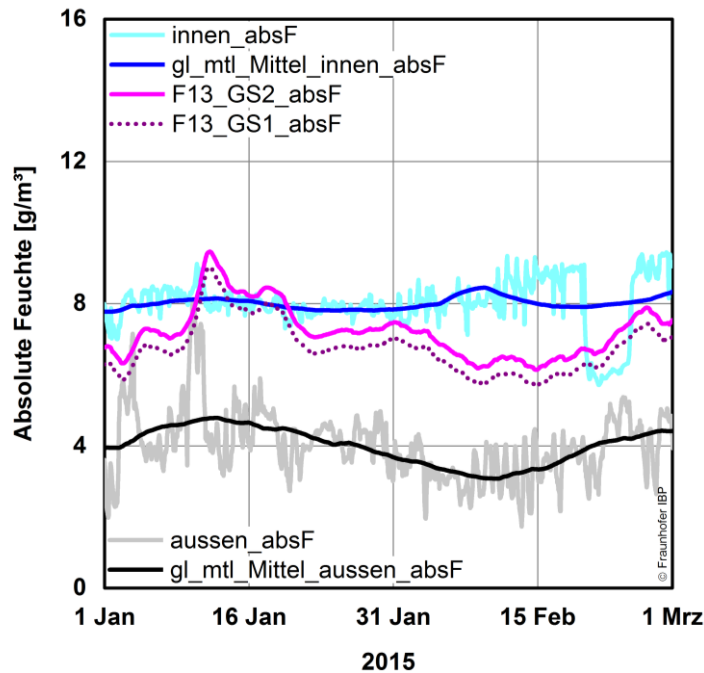


Bild 105:

Berechnete absolute Feuchte im Messzeitraum vom 1.1. bis 1.3.2015 mit stündlichen Werten in der Grenzschicht zwischen Dämmung und Außenwand sowie gleitendem Monatsmittelwerten des Raum- und Außenklimas, Feld 13 mit Mineraldämmplatte.

### 5.7.7 Detaillierte Darstellung der Messwerte für den Winterzeitraum 2015 in der Ecke Wandfeld 12

#### Messachse 1

In Bild 106 sind die Verläufe der relativen Feuchte in der Ecke in der Grenzschicht 1 im Vergleich zu den relativen Feuchten des Wandfeldes eingezeichnet. Der Zeitraum umfasst dabei das Austrocknungsverhalten über einen Zeitraum von sechs Monaten. Zuerst beginnt der Trocknungsvorgang in der Grenzschicht 2 im Wandfeld 13 um dann erst ca. zwei Monate später in der Grenzschicht 1 auszutrocknen. Die relative Feuchte in der Außenwanddecke an der Grenzschicht verringert sich erst Ende Mai.

Der Temperaturverlauf in der Außenecke im Vergleich zum Wandfeld 12 ist in Bild 107 abgebildet. Dabei ist ein Absinken der Innenoberflächen-Temperatur vom Feld 13 auf das Eckfeld 12 bis zur Ecke in Feld 12 zu beobachten. Die Temperaturverläufe in der Grenzschicht 1 zeigen das gleiche Verhalten über diese drei Messachsen.

In der Ecke liegen die Oberflächentemperaturen etwas mehr als 1 Kelvin unterhalb denen des Regelquerschnitts (F12 Messachse 2 Eckfeld)

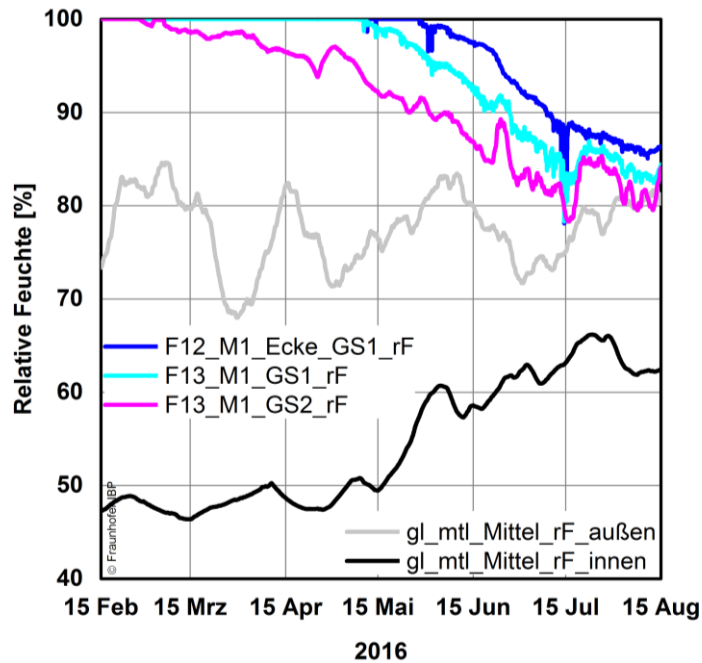


Bild 106:  
Relative Feuchte im Zeitraum vom 15.2.2016 bis 15.8.2016 mit stündlichen Werten der Grenzschichten sowie gleitendem Monatsmittelwert von Außen- und Innenklima, Feld 12 mit Mineralfüllplatte.

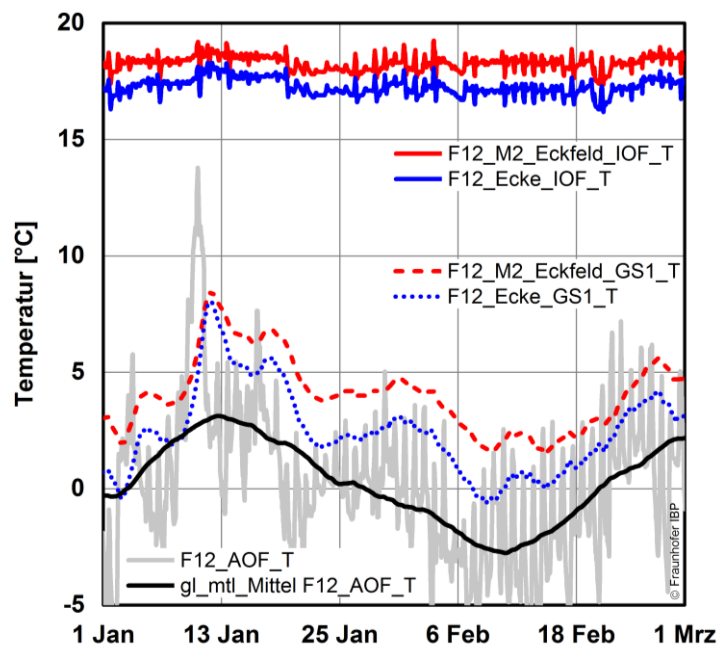


Bild 107:  
Temperatur im Zeitraum vom 15.1.2015 bis 1.3.2015 mit stündlichen Werten der Grenzschichten sowie gleitendem Monatsmittelwert der Außentemperatur, Feld 12 mit Mineralfüllplatte.

### 5.7.8 Infrarot-Thermographie

Zur Überprüfung und Dokumentation der Wirkung des Innendämmsystems wurden IR-Bilder der Innendämmung in der Wandansicht und eine Detailaufnahme der oberen Fensterecke zum Fenstersturz erstellt (Bild 108 bis Bild 115). Die Oberflächentemperaturen sind über die Fläche sehr homogen. Die Absenkung der Oberflächentemperaturen in der Ecke der Außenwand wurde mit einer hochauflösenden IR-Nahaufnahme dokumentiert (Bild 112 und Bild 113). Die Langzeitmessung der Ecktemperaturen sind im Abschnitt „Darstellung der Messdaten“ abgebildet. In der Fensterecke zum Sturz sind typische Wärmebrückeneffekte in den Anschluss- und Eckbereichen mit kühlen Temperaturen erkennbar (Bild 114). Der Anschluss- und Eckbereich zur nicht gedämmten Fensterbank ist in Bild 115 abgebildet.



Bild 108:  
Fertig erstellte Innendämmung mit IR-Kamera im Vordergrund, Aufnahme vom  
4. März 2014.



Bild 109:  
IR-Aufnahme fertig erstellter Innendämmung mit Mineraldämmplatten, Auf-  
nahme vom 4. März 2014, Temperatur außen 3,6 °C, Temperatur innen  
21,3 °C.



Bild 110:  
Fertig erstellte Innendämmung mit Oberflächen-Temperatursensoren, Aufnahme vom 9. Februar 2015.

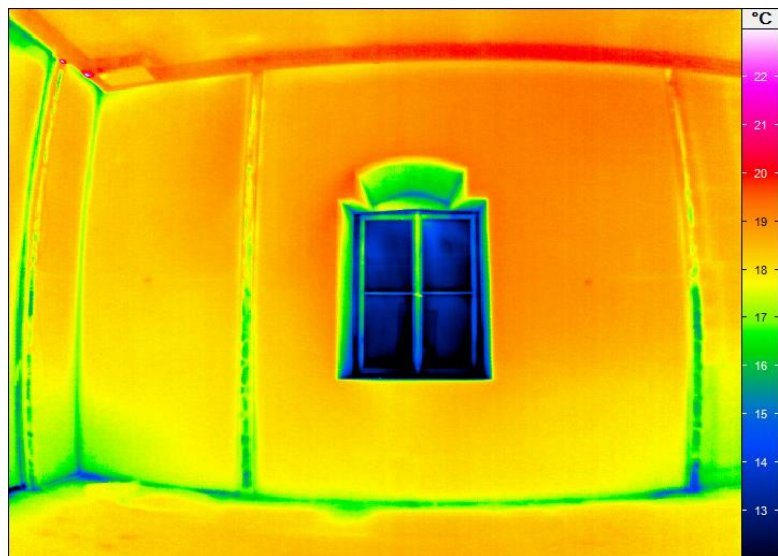


Bild 111:  
Infrarot-Bild der Innendämmung, Aufnahme am 9. Februar 2015, Temperatur außen  $-2,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ , Temperatur innen  $20,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Die als schwacher Punkt erkennbaren Temperatursensoren wurden vor der IR-Aufnahme thermisch markiert.



Bild 112:  
Hochaufgelöste IR-Aufnahme der Wandecke. Aufnahme am 4. März 2014,  
Temperatur außen 3,6 °C, Temperatur innen 21,3 °C.

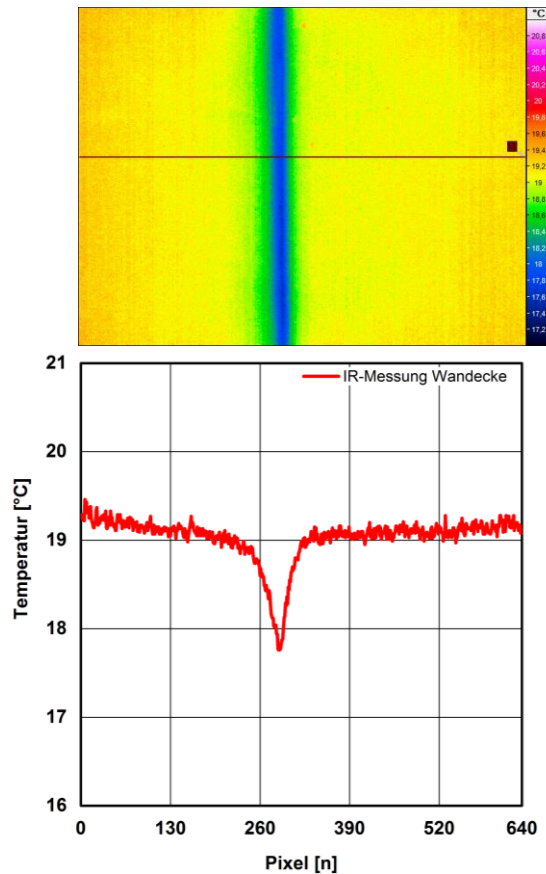


Bild 113:  
Hochaufgelöste IR-Aufnahme der **Wandecke (Bild ? oben)** mit Temperaturgraph  
mit Auswertung der Temperaturen entlang des horizontalen Messlineals im IR-  
Bild. Die örtliche Messgenauigkeit der Thermographie ist < 1 mm. Aufnahme  
am 4. März 2014, Temperatur außen 3,6 °C, Temperatur innen 21,3 °C.

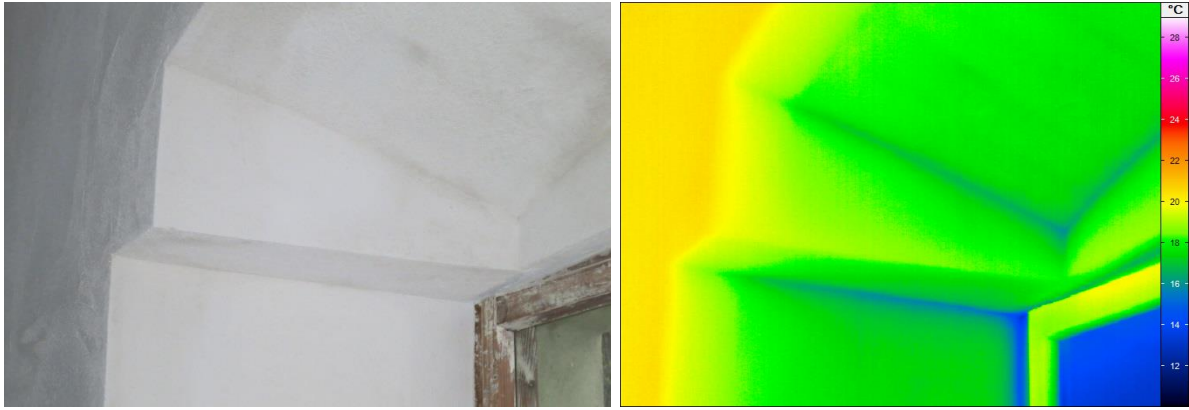


Bild 114:  
 Detailansicht der Fensterlaibungsecken visuell (linkes Bild) mit hochauflöstem IR-Bild (rechtes Bild) am Sturz, Aufnahme am 4. März 2014, Temperatur außen 3,6 °C, Temperatur innen 21,3 °C.

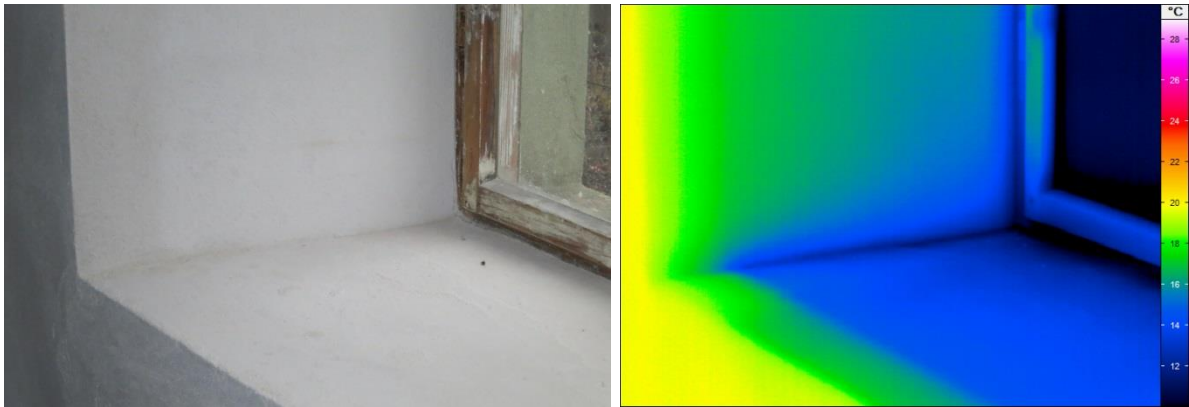


Bild 115:  
 Detailansicht der Fensterlaibungsecken visuell (linkes Bild) mit hochauflöstem IR-Bild (rechtes Bild) an der verputzten Fensterbank, Aufnahme am 4. März 2014, Temperatur außen 3,6 °C, Temperatur innen 21,3 °C.



### 5.7.9 Vergleichende Darstellung der Messergebnisse

In Bild 116 sind die Temperaturverläufe hinter der Dämmung dargestellt. Dazu sind von den Kategorien hochdämmender Dämmstoff, vorgeständerte Trockenbauweise und nachwachsender sowie kapillaraktiver Dämmstoff ein typischer Vertreter ausgewählt worden (Aerogeldämmung, Perlit-Schüttung und Typhaboard sowie Mineraldämmplatte). Mit angegeben ist der jeweilige Wärmedurchlasswiderstandswert des Dämmsystems, der sich vor allem aus der Wärmeleitfähigkeit und Dicke des Dämmstoffs ergibt. Erwartungsgemäß ergeben sich in der Sommerperiode nur geringe Unterschiede im Gegensatz zum Winterzeitraum mit Beheizung (Bild 117). Vergleicht man die Lage der Kurven mit den Wärmedurchlasswiderständen, ergibt sich die erwartete Reihung. Mit höherem R-Wert ergibt sich eine niedrigere Temperatur hinter der Dämmung.

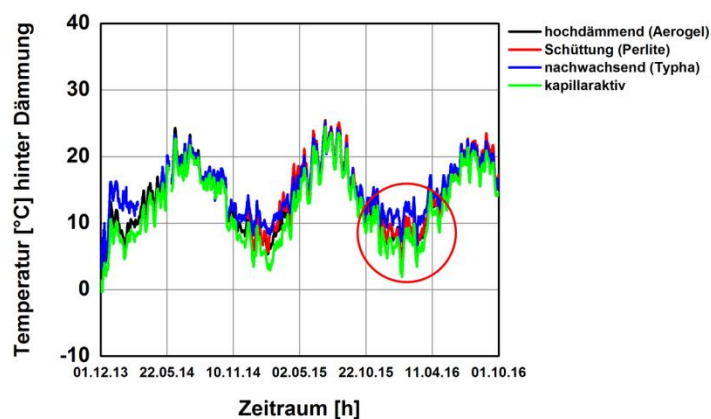


Bild 116: Gemessene Temperaturverläufe hinter der Dämmung auf der reversiblen Schutzschicht (reversibler Putz oder Japanpapierkaschierung) für den gesamten Messzeitraum. Der rote Kreis zeigt den im nachfolgenden Bild dargestellten Zeitraum.

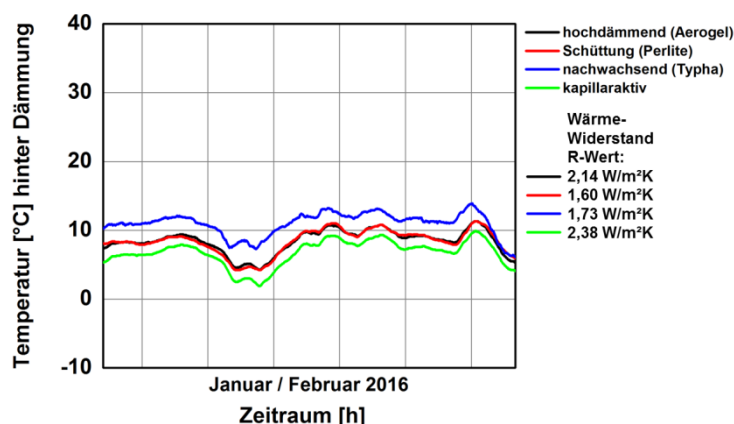


Bild 117: Gemessene Temperaturverläufe hinter der Dämmung auf der reversiblen



Schutzschicht (reversibler Putz oder Japanpapierkaschierung). Mit aufgelistet sind die rechnerischen Werte für den Wärmedurchlasswiderstand der einzelnen Dämmsysteme.

Bild 118 zeigt den Verlauf des gemessenen Wärmestroms hinter der Dämmung für den Winterzeitraum Januar und Februar 2016. Obwohl die Perlite-Schüttung den geringsten Wärmedurchlasswiderstand aufweist, ergibt sich bei der damit gedämmten Wand ein deutlich geringerer Wärmeverlust. Betrachtet man die den Verlauf der gemessenen Außenoberflächentemperatur (Bild 119) wird dieses Verhalten erklärbar. Da die perlitgedämmte Fassade eine Südausrichtung aufweist, ergeben sich durch die solare Einstrahlung immer wieder recht hohe Außenoberflächentemperaturen, was sich auch im Verlauf der Tagesmittel der gemessenen Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Außenoberfläche widerspiegelt.

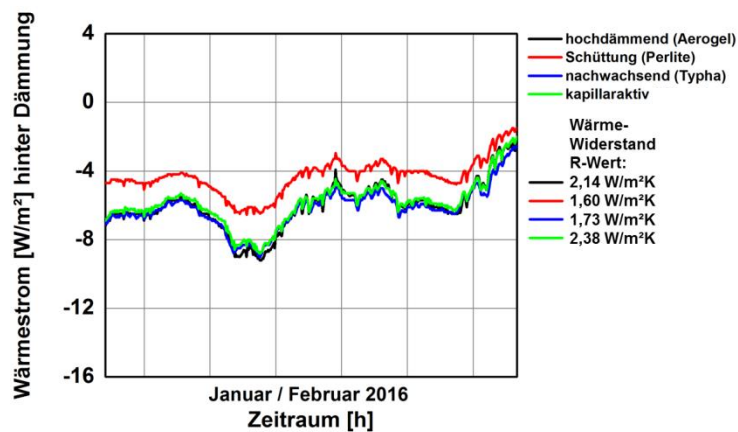


Bild 118: Gemessener Wärmestrom hinter der Dämmung auf der reversiblen Schutzschicht (reversibler Putz oder Japanpapierkaschierung). Mit aufgelistet sind die rechnerischen Werte für den Wärmedurchlasswiderstand der einzelnen Dämmsysteme.

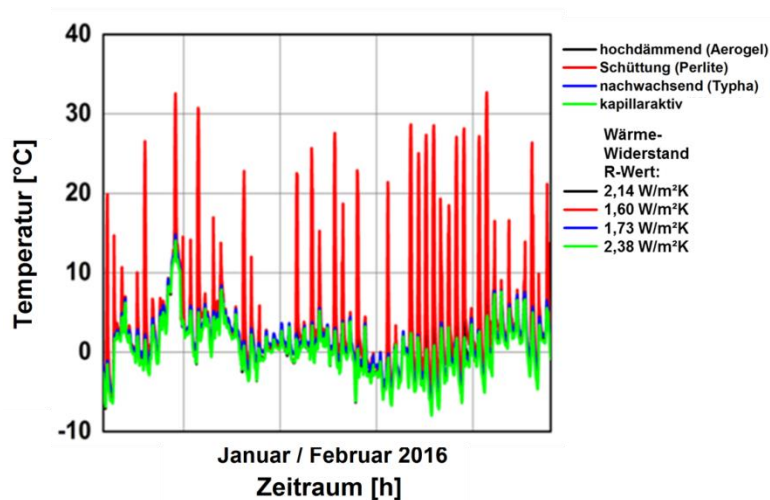


Bild 119:

Verlauf der gemessenen Außenoberflächentemperatur für eine Auswahl von Dämmstoffen jeder Kategorie.

Die untersuchten Dämmsysteme weisen aufgrund ihrer materialtechnischen Eigenschaften und der Art des Einbaus ein deutlich unterschiedliches Feuchteverhalten auf. Bild 120 zeigt den Verlauf der relativen Luftfeuchte hinter der Dämmung für die Gesamtmesszeit und Bild 121 für den Zeitraum Januar/Februar 2016. Man erkennt sofort die niedrige Luftfeuchte bei der Perlitedämmung (Messbeginn Nov. 2014); die darin begründet ist, dass es sich zum einen um Trockenbauweise handelt und zum Anderen ein Dampfbremse eingesetzt wurde. Aufgrund der Einbaufeuchte starten die Messkurven der Aerogeldämmung und des Mineraldämmung bei 100 %. Nur bei der Typhadämmung ergeben sich etwas niedrigere Werte. In der Sommerperiode findet bei allen drei Systemen eine merkliche Austrocknung statt, sodass zeitweise die 80 % unterschritten werden. Auffällig ist dabei der deutlich ruhigere Verlauf der Typhadämmung, welcher in dem Feuchtepuffervermögen dieses Materials begründet sein dürfte. Im Anschluss an diese Trocknungsperiode findet bei allen Systemen (außer der Perlitedämmung) eine deutliche Auffeuchtung statt. Bei der Mineraldämmplatte ergibt sich ein besonders schneller Anstieg bis auf 100 % rel. Feuchte. Ab Ende Dezember bleibt hier die gemessene Luftfeuchte bei 100 %. Dies ist typisch für ein kapillaraktives diffusionsoffenes Dämmsystem, das darauf beruht, dass das im Material auftretende Tauwasser kapillar zurück geleitet wird, um eine kontinuierliche Auffeuchtung zu vermeiden. Bei der Aerogel- und der Typhadämmung ergeben sich in diesem Zeitraum Luftfeuchten zwischen 93 und 97 % (Aerogel) und 93 und 95 % (Typha). Auch hier zeigen sich die geringeren zeitlichen Schwankungen bei der Typhadämmung.

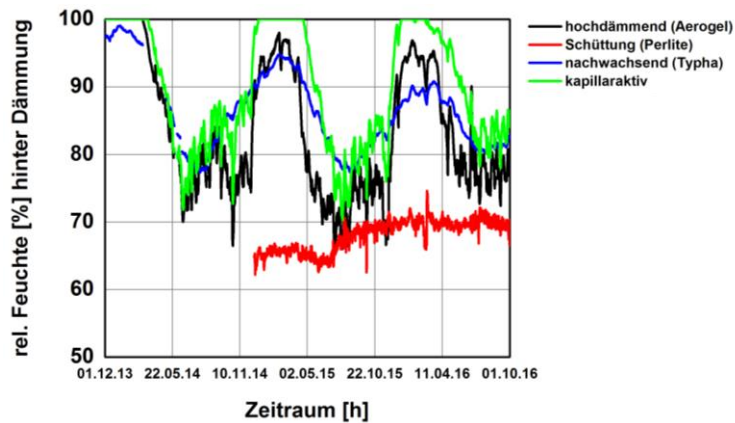


Bild 120:  
Gemessene relative Feuchte hinter der Dämmung auf der reversiblen Schutzschicht (reversibler Putz oder Japanpapierkaschierung) für den gesamten Messzeitraum.

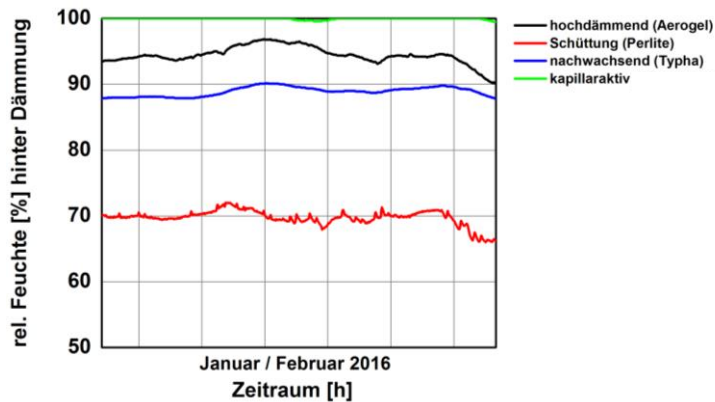


Bild 121:  
Gemessene relative Feuchte für den Zeitraum Januar und Februar 2016 hinter der Dämmung auf der reversiblen Schutzschicht (reversibler Putz oder Japanpapierkaschierung).

## 5.8 Evaluierung – Vergleich von Messung und Simulation (AP 7)

Bisherige Berechnungen mit den Programmen der WUFI®-Softwarefamilie haben eine gute Übereinstimmung mit durchgeführten Praxisuntersuchungen ergeben. Die Erfahrungen haben aber auch gezeigt, dass bei neuartigen Fragestellungen eine Evaluierung der Rechenergebnisse erfolgen sollte, um sicher gehen zu können, dass die Simulationsergebnisse die Realität in ausreichendem Maße widerspiegeln. Außerdem ergibt sich bei Berechnungen zu Anwendungen im historischen Bestand meist das Problem nicht ausreichender Kenntnis der für die Berechnungen erforderlichen Materialkennwerte der Originalsubstanz. Aufgrund der bei Bestandswänden häufig vorliegenden Inhomogenität des Wandaufbaus ist eine ausreichende messtechnische Bestimmung aller notwendigen Kennwerte häufig nicht möglich. Dies ist nicht nur in den damit ver-

bundenen finanziellen Aufwand begründet, sondern häufig auch in der aus Denkmalschutzgründen stark eingeschränkten Möglichkeit der Materialprobenentnahme. Als gangbare Lösung bleibt somit nur der Weg der „Ermittlung“ der Materialkennwerte über die sukzessive Anpassung der Berechnungsergebnisse an die gemessenen Verläufe der Temperaturen und Feuchten.

Um Simulation und Messwerte vergleichen zu können, werden dazu alle Messdaten in die Berechnung eingelesen. Bei der Berechnung der verschiedenen Verläufe wird auf „Monitore“ zurückgegriffen, die in der Berechnung an die Stelle im Wandaufbau gesetzt werden, an der sich auch real die Sensoren befinden. Es werden somit alle hygrothermischen Vorgänge an dieser Position berechnet.

### **5.8.1 Hygrothermische Ausgangssituation des Mauerwerks vor Applikation der Innendämmsysteme**

Wie bereits in Kapitel 5.3.6 erläutert wird, hat der Außenputz des Mauerwerks keinen klar definierten  $w$ -Wert. Zur Vereinfachung der Simulation wird ein Mittelwert von  $4,2 \text{ kg/m}^2\text{h}^{0,5}$  herangezogen. Das inhomogene Mauerwerk kann sowohl Ziegelreste, wie auch ganze Flusssteine enthalten. Deshalb kann keine sichere Aussage über Wärmeleitfähigkeit oder Feuchtetransport im Material getroffen werden.

Um eine Aussage über den Wassergehalt im Bestandsmauerwerk zu treffen, wird über einen Zeitraum von zehn Jahren ein angenommenes Innenklima, sowie das Feuchtereferenzjahr aus Holzkirchen für die Berechnung verwendet. Für die Erzeugung des geeigneten Innenklimas wird ein sinusförmiger Jahresverlauf der Raumtemperatur und Luftfeuchte angesetzt. Als Basis dienen die umfangreiche, aber nicht lückenlose, Erfassung des Innenraumklimas aus der Zeit vor Umbau und Klimatisierung des Gebäudes (2010 bis 2013). Das Innenklima wird daher mit folgenden Verläufen angenommen (Bild 122).

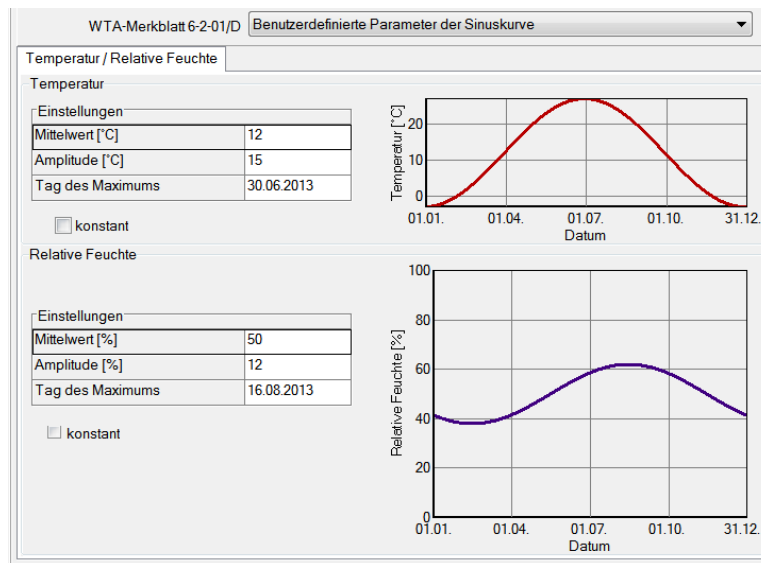


Bild 122:  
Idealisiertes Innenklima vor Klimatisierung, Auszug aus WUFI.

Die somit ermittelten Wassergehalte werden als Startbedingung in die Berechnung ab aufgezeichnetem Innenklima eingelesen.

## 5.8.2 Validieren des Bestandmauerwerks

Zur Validierung des Bestandmauerwerks können in erster Linie nur thermische Daten herangezogen werden. Die bereits im Vorfeld ermittelten Kenngrößen geben eine Größenordnung, die unter Betrachtung der Referenzfelder geprüft werden können. Dazu werden Feld 1 und Feld 6 näher betrachtet.

Nachdem für Feld 6 nur ein Innenoberflächentemperatursensor (Verlauf in Bild 123) vorliegt, wird dessen Messwertverlauf genutzt, um iterativ Berechnungen mit verschiedenen Wärmedurchlasswiderständen durchzuführen. Das Mauerwerk lässt anhand dieser Berechnungen auf einen Wärmedurchlasswiderstand  $\lambda_{\text{m}} = 1,0 \text{ W/(mK)}$  schließen. Es kann keine exaktere Aussage getroffen werden. Damit kann über den betrachteten Zeitraum von ca. 9 Monaten eine gute Übereinstimmung von Messung und Rechnung erreicht werden.

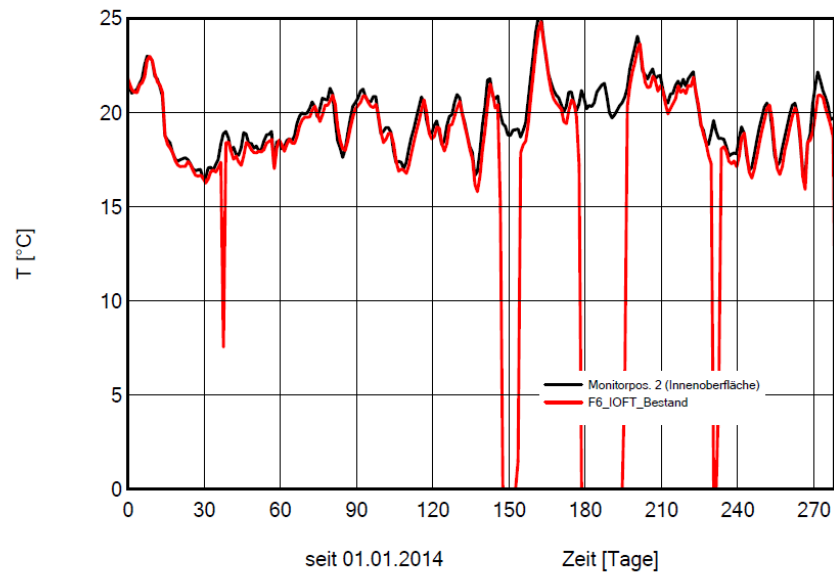


Bild 123:  
Abbildung 1: Feld 6 Bestand, Vergleich gemessener und berechneter Verlauf der Innenoberflächentemperatur.

Feld 1 hat zusätzlich eine Wärmeflusscheibe an der Innenoberfläche. Bei identischen Annahmen, wie sie für Feld 6 zugrunde gelegt wurden, stellt sich allerdings ein zu hoher Wärmestrom ein, weshalb, ebenfalls durch mehrere Versuche Messverlauf und Berechnung nur mit einem abweichendem  $\lambda=0,8$  W/mK annähernd in Deckung zu bringen sind (Bild 124).

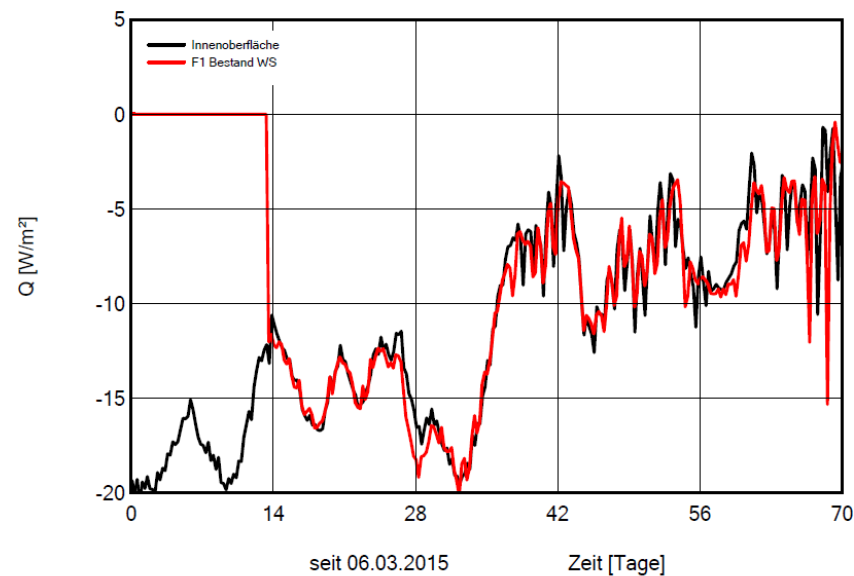


Bild 124:  
Feld 1 (Referenzfeld), Vergleich der Verläufe des gemessenen und berechneten Wärmestroms.

Für die weitere thermische Betrachtung der einzelnen Wandfelder wird deshalb ein Toleranzbereich von  $\lambda=0,6$  bis  $1,0$  W/mK zu Grunde gelegt. Angaben zum Feuchtetransport können an dieser Stelle nicht getroffen werden. Das später gemessene Innenraumklima weist ebenfalls Zeiträume auf, in denen die Messwerterfassung ausgefallen ist. Um mit WUFI® das hygrothermische Verhalten der Wände darstellen zu können, wird eine lückenlose Klimadatei benötigt. Für den Fall des Innenklimas werden die Lücken geradlinig interpoliert, um somit alle Stundenwerte zu erzeugen. Die betroffenen Zeiträume können deshalb nicht näher betrachtet werden.

Lücken im Innenklima bestanden zu folgenden Zeitperioden:

06.02.2014	bis	07.02.2014	14 Stunden
27.05.2014	bis	03.06.2014	171 Stunden
27.06.2014	bis	15.07.2014	427 Stunden
18.08.2014	bis	21.08.2014	65 Stunden
05.11.2014	bis	06.11.2014	19 Stunden

### 5.8.3 Validierung der Simulation der Innendämmsysteme durch Messungen

Für die Validierung der eingebauten Innendämmsysteme wird zunächst der Zeitraum betrachtet, der möglichst weit vom Einbaupunkt entfernt liegt, da damit der Einfluss der Einbaufeuchte möglichst gering ist. Außerdem ist es von Vorteil, wenn kalte und warme Perioden abgebildet sind, um auch bereits das Verhalten bei unterschiedlicher Temperaturdifferenz zwischen innen und außen zu betrachten. Sobald die gemessenen Temperaturverläufe durch Anpassung der thermischen Materialkennwerte mit der Simulation in Deckung zu bringen sind, kann der Zeitraum unmittelbar nach Einbau genauer betrachtet werden. Zuerst wird die thermische Validierung am Beispiel des Feldes 11 genauer erläutert. Im Anschluss wird ebenfalls an Feld 11 auf die iterative Festlegung der Einbaufeuchte eingegangen.

Nachdem für die weitere Betrachtung in erster Linie der Bestandsputz als schützenswerte Schicht entscheidend ist, werden für alle weiteren Felder die Temperatur- und Feuchteverläufe in Grenzschicht 1 (Innenoberfläche Bestandsputz) nach erfolgter Validierung angegeben. In Ausnahmefällen muss die Grenzschicht 2 (Oberfläche des reversiblen Putzsystems) betrachtet werden, da die Richtigkeit der Messwerte zur relativen Feuchte des Bestandsputzes nicht bei allen Systemen hinreichend sichergestellt ist.

Im Projektverlauf hat sich gezeigt, dass das mit verbaute Kunststoffrohr, über das der Feuchtesensor eingeschoben wird, ein unerwartetes Problem darstellt. Dieses Einschubrohr soll eine Beschädigung des Feuchtesensors verhindern, indem es ermöglicht, den Sensor immer wieder zu entnehmen und zu regenerieren, um ihn dadurch vor Beschädigung durch dauerhaft ausfallendes Tauwasser zu schützen. Dieses Rohr liegt im Bestandsputz oder zusätzlich in der Klebemörtelenebene. Nachdem es offensichtlich nicht dauerhaft verschlossen war, kann es passieren, dass die Raumluft über diesen Weg zum Feuchtesensor strömt oder

Feuchte über Diffusionsvorgänge durch das Rohr zum Sensor gelangt und zwar sowohl an den im Rohr liegenden Sensor wie auch den direkt angrenzenden Kombisensor (siehe Bild 125).

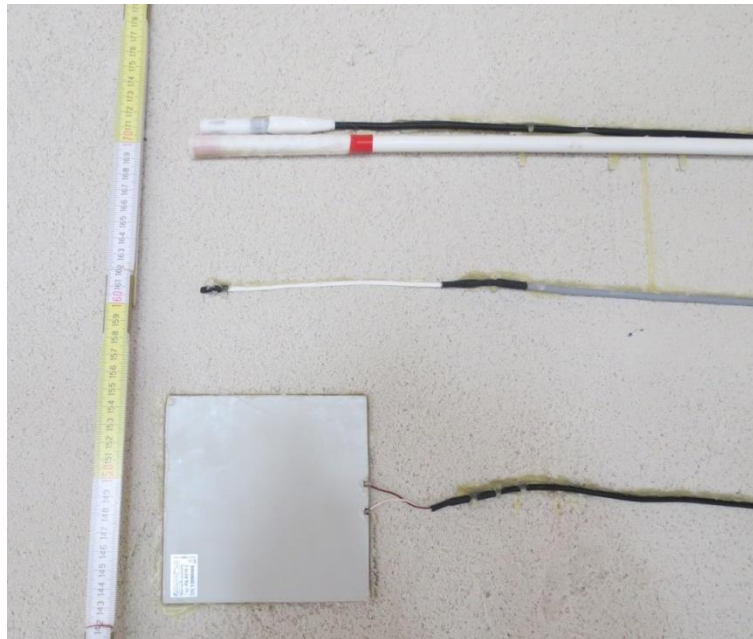


Bild 125:  
Sensorik auf dem reversiblen Putz-Mörtel mit Kombisensoren (Rohr in weiss),  
Temperatursensor (Bildmitte) und Wärmefluss-scheibe (Bild unten) vor  
Applikation der Innendämmung.

### 5.8.3.1 Thermische Validierung an Feld 11, Aerogeldämmputz

Die Verläufe werden der Reihenfolge nach von außen nach innen dargestellt. Alle berechneten Verläufe sind in schwarz dargestellt, gemessene Temperaturverläufe in rot, gemessene Feuchteverläufe in blau. Im dargestellten vier wöchigen Zeitraum des Außenoberflächentemperaturverlaufs (Bild 126) gibt es eine hervorragende Übereinstimmung der Berechnung zu den Messdaten. Hierzu ist die Außenoberfläche des Bestandsputzes als „dunkler Putz“ (WUFI-Eingabe) angenommen worden. Dies entspricht der matten Oberfläche des historischen Putzes gut. Auch für den langen Zeitraum der Außenoberflächentemperatur (Bild 127) zeigen sich mit der oben genannten Anpassung keine großen Abweichungen.



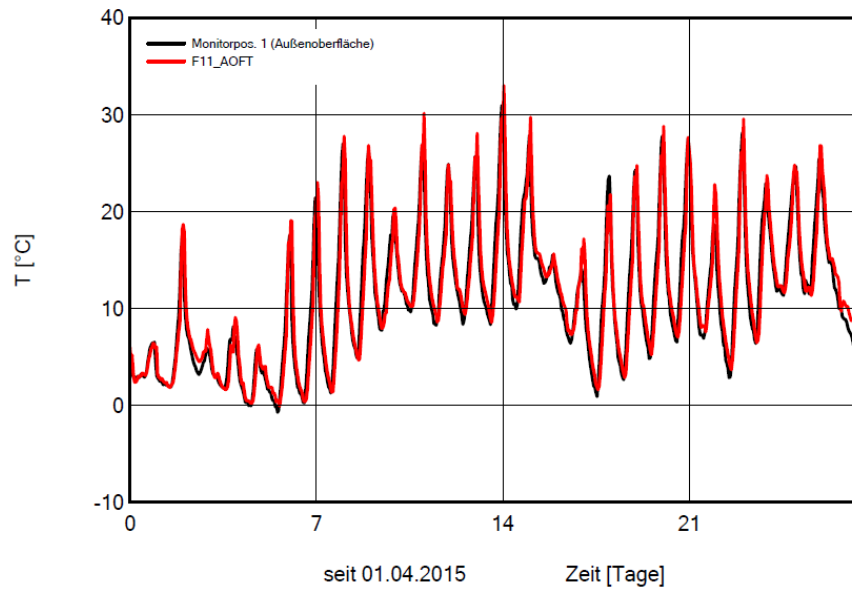


Bild 126:  
 Feld F11 mit Aerogeldämmputz, Vergleich des gemessenen und berechneten Verlaufs der Außenoberflächentemperatur, Monats-Zeitraum

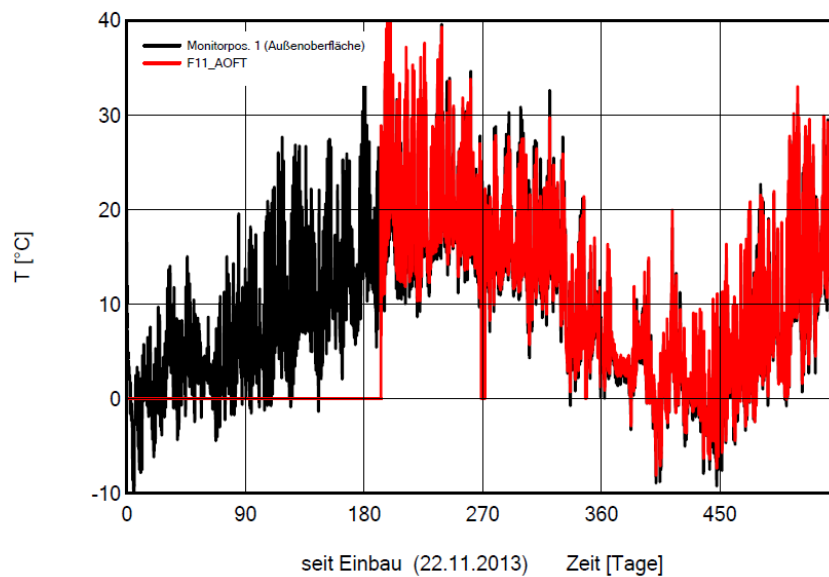


Bild 127:  
 F11 mit Aerogeldämmputz, Vergleich des gemessenen und berechneten Verlaufs der Außenoberflächentemperatur, langer Zeitraum

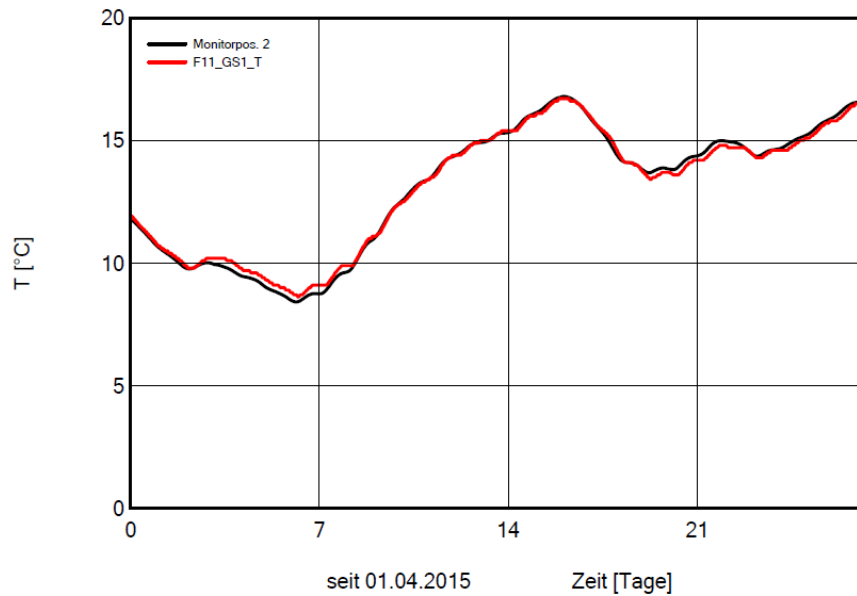


Bild 128:

Abbildung 2: F11 mit Aerogeldämmputz, Vergleich des gemessenen und berechneten Verlaufs der Temperatur auf dem Bestandsputz, Monats-Zeitraum.

Die berechnete Temperatur auf dem Bestandsputz (Grenzschicht 1 in Bild 128) stimmt für den kurzen dargestellten Zeitraum gut mit den Messwerten überein.

Über den Zeitraum von ca. 18 Monaten liegt die Berechnung vor Allem bei niedrigen Temperaturen sehr nahe am Messverlauf, wobei bei höheren Außentemperaturen eine schnellere Erwärmung der Grenzschicht auffällt (Bild 129). Diese Berechnung ist durch die Änderung der Wärmeleitfähigkeit des Mischmauerwerks von 0,8 W/mK auf 0,7 W/mK verbessert worden (Bild 130). Die, für die Grenzschicht kritischen kalten Temperaturen werden exakter berechnet. Zum Ende des Zeitraums zeigt der Messverlauf einen Sprung. In dieser Zeit war der betroffene Kombifühler außerhalb des Messrohrs und hat im Wesentlichen die Raumluft aufgezeichnet.

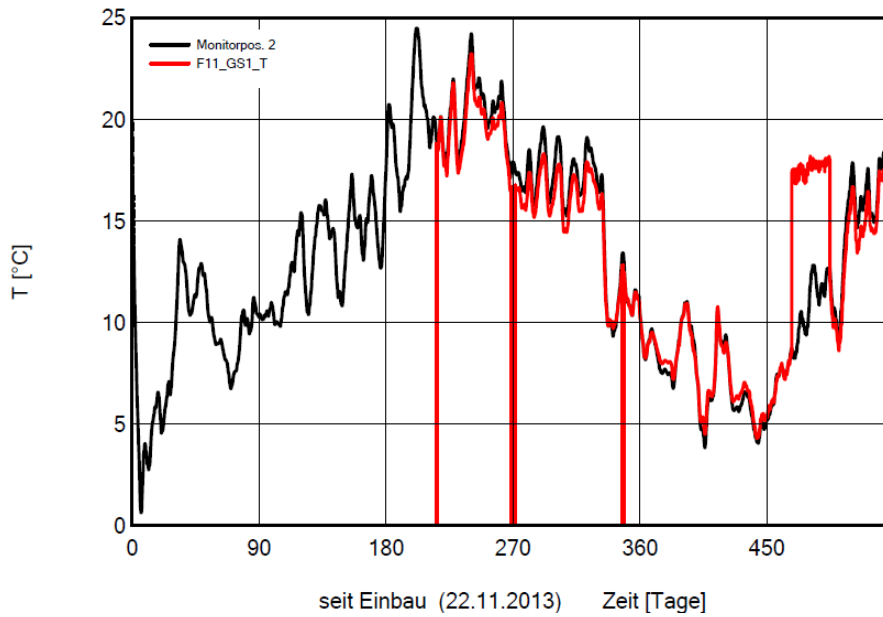


Bild 129:  
F11 mit Aerogeldämmputz, Vergleich des gemessenen und berechneten Ver-  
laufs der Temperatur auf dem Bestandsputz, langer Zeitraum, ohne Anpassung  
der Wärmeleitfähigkeit.

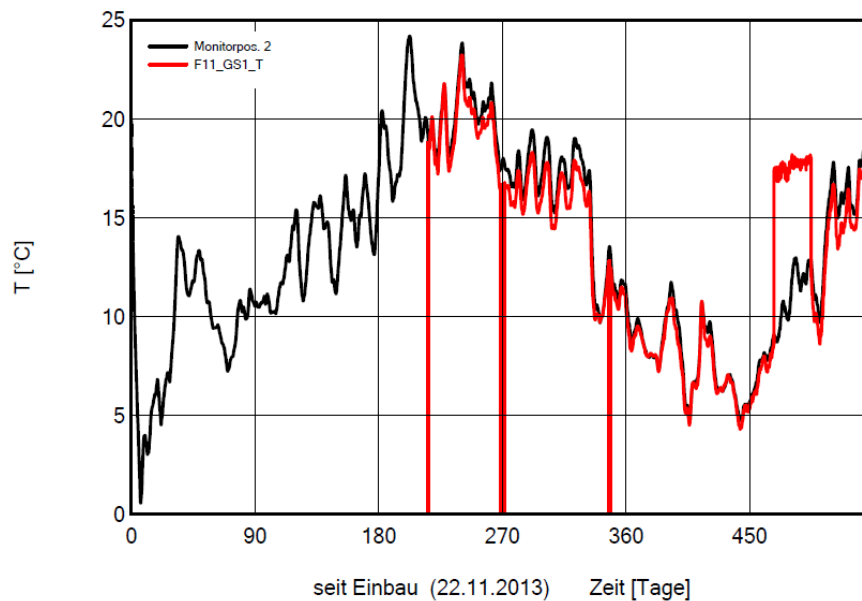


Bild 130:  
F11 mit Aerogeldämmputz, Vergleich des gemessenen und berechneten Ver-  
laufs der Temperatur auf dem Bestandsputz, langer Zeitraum, mit Anpassung  
der Wärmeleitfähigkeit.

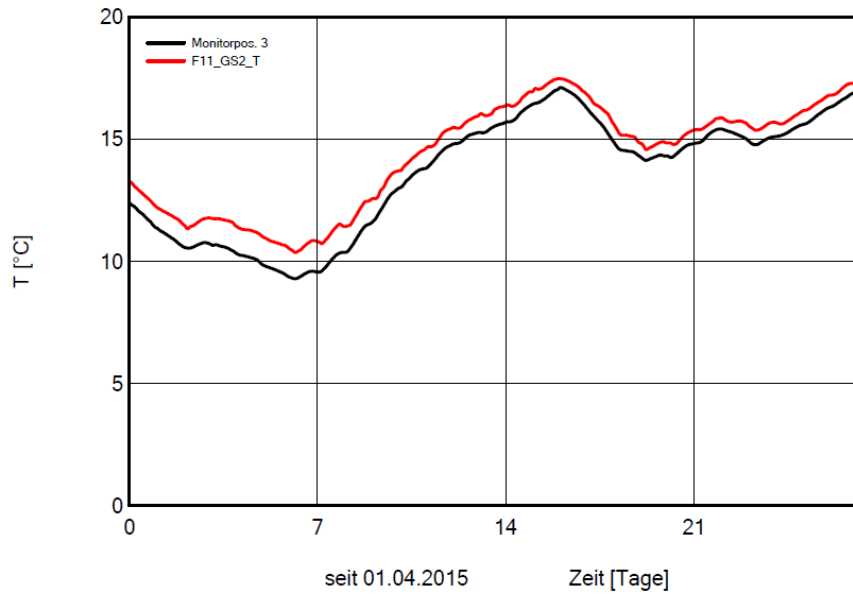


Bild 131:  
Abbildung 3: F11 mit Aerogeldämmputz, Vergleich des gemessenen und berechneten Verlaufs der Temperatur im Klebemörtel, kurzer Zeitraum, ohne Anpassung der Wärmeleitfähigkeit.

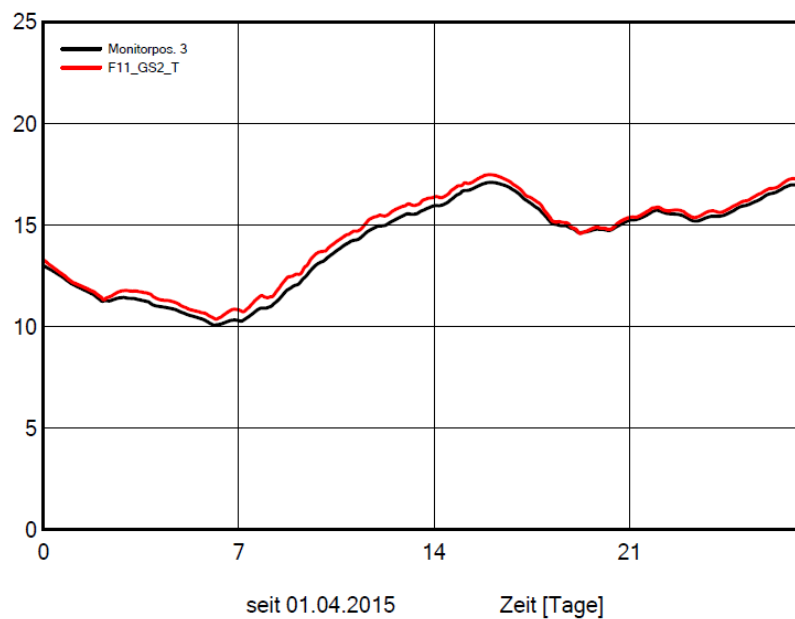


Bild 132:  
Abbildung 4: F11 mit Aerogeldämmputz, Vergleich des gemessenen und berechneten Verlaufs der Temperatur im Klebemörtel, kurzer Zeitraum, mit Anpassung der Wärmeleitfähigkeit.

Die Grenzschicht 2 (Bild 131) im Klebemörtel wird ohne Anpassung der Wärmeleitfähigkeit etwas zu kalt berechnet. Im validierten Verlauf der Grenz-

schichttemperatur 2 (Bild 132) stimmen die berechneten Daten gut mit den Messdaten überein.

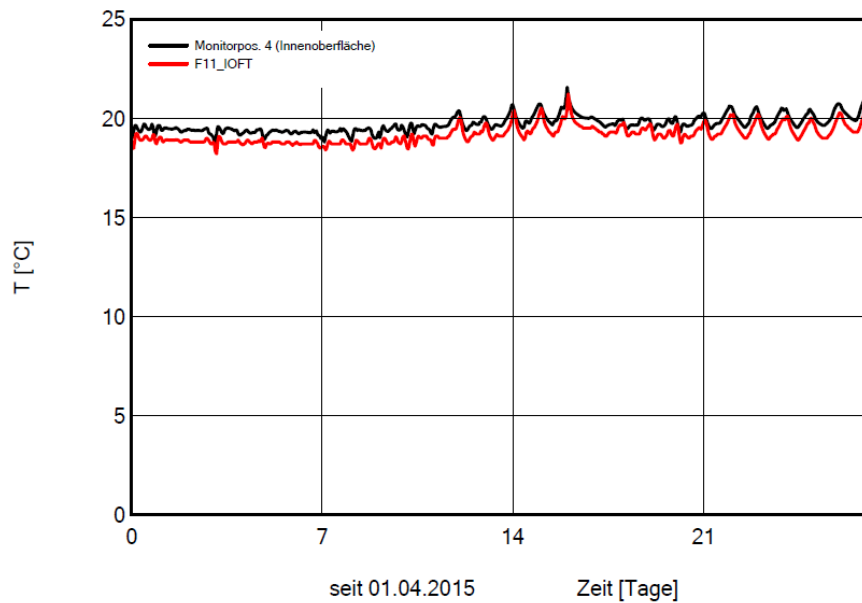


Bild 133:

Abbildung 5: F11 mit Aerogeldämmputz, Vergleich des gemessenen und berechneten Verlaufs der Innenoberflächentemperatur, kurzer Zeitraum.

Die Innenoberflächentemperatur (Bild 133) liegt etwas über der Messung. Die Betrachtung im Gesamtzeitraum in Bild 134 zeigt jedoch keine markanten Abweichungen. Der Innenoberflächentemperaturverlauf zeigt eine ausreichend genaue Darstellung der Messwerte.

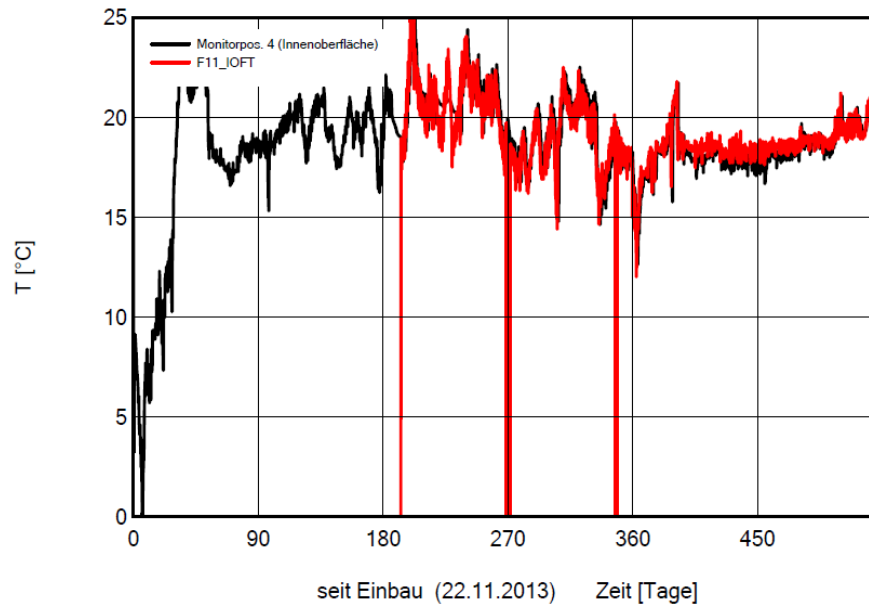


Bild 134:  
Abbildung 6: F11 mit Aerogeldämmputz, Vergleich des gemessenen und berechneten Verlaufs der Innenoberflächentemperatur, langer Zeitraum.

### 5.8.3.2 Hygrische Validierung am Feld 11, Aerogeldämmputz

Im Folgenden wird versucht, den Verlauf der gemessenen relativen Luftfeuchte im Bestandputz rechnerisch nachzuvollziehen. Bild 135 zeigt das resultierende Ergebnis.

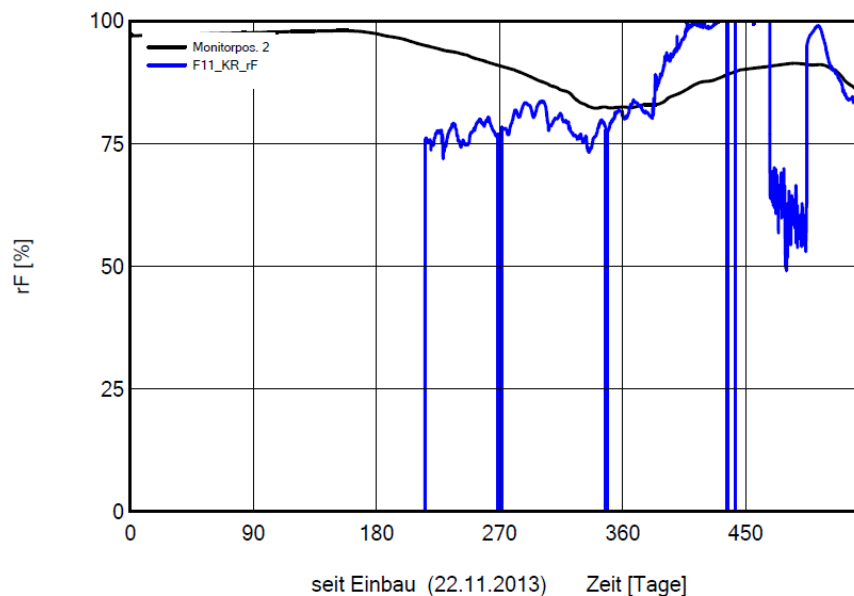


Bild 135:  
F11 mit Aerogeldämmputz, Verlauf der relativen Feuchte im Bestandputz, langer Zeitraum.

Der Feuchteverlauf im Bestandsputz ist hier nicht in Deckung zu bringen. Frühere Untersuchungen hatten gezeigt, dass auch als tauwasserresistent eingestufte Luftfeuchtefühler keine langfristige Betauung vertragen. Aus diesem Grund wurde hier ein Einschubrohr für den Feuchtefühler mit verbaut, sodass der Feuchtefühler zeitweise entnommen werden kann, um ihn immer wieder nach längeren Betauungszeiten regenerieren zu können. Dies kann natürlich die Messgenauigkeit negativ beeinflussen. Man erkennt im Bild am zunächst schnellen Absinken des Messwertes auf um die 65 % r.F. mit nachfolgendem langsamem weiteren Absinken auf um die 55 % r.F. die Phase während der der Fühler herausgenommen wurde. Nach dieser Regenerationsphase ergibt sich eine bessere Übereinstimmung von Messung und Rechnung.

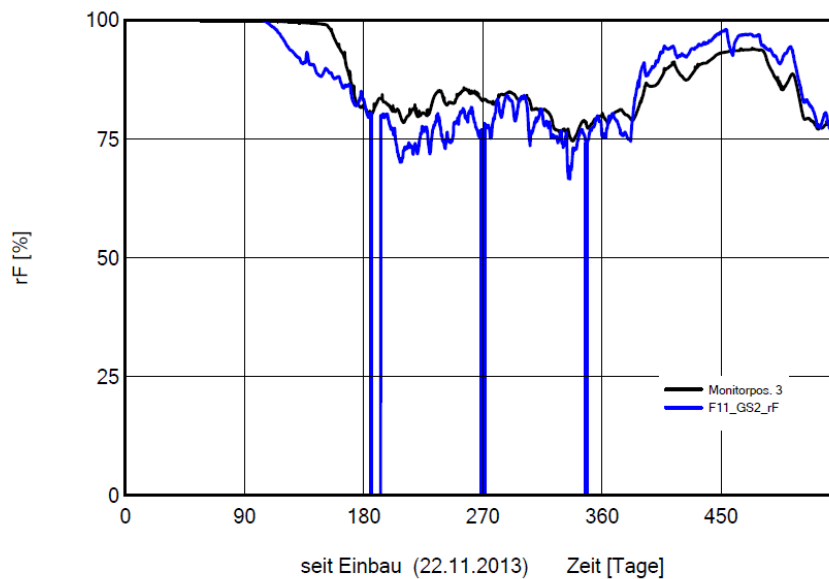


Bild 136:

F11 mit Aerogeldämmputz, Verlauf der relativen Feuchte im Klebemörtel, langer Zeitraum.

Der dargestellte Messverlauf in Bild 136 zeigt eine ganz gute Übereinstimmung zwischen Messung und Rechnung. Grundsätzlich wird für die Validierung in erster Linie der Wert für die Wärmeleitfähigkeit des Mischmauerwerks sowie die Werte der Feuchtweiterleitung im Mischmauerwerk variiert. Eine deutliche Annäherung der Außenoberflächentemperaturkurve ergibt sich durch einen anderen Absorptionskoeffizienten der Fassade, in WUFI® durch „Putz dunkel“ hinterlegt.

Die bereits bestimmten Kennwerte der Wärmeleitfähigkeit liegen oft als Rechenwert mit Zuschlägen für Fertigungstoleranzen und Feuchteinflüsse vor, so dass hier eine Optimierung von bis zu 10 % angesetzt werden kann, da für die Wärmeleitfähigkeit in WUFI® eine Feuchte- und Temperaturabhängigkeit hinterlegt ist.

### 5.8.3.3 Ergebnisse der Validierung für die übrigen Systeme

Für die Validierung der folgenden Systeme werden nur die nach unterschiedlichen Anpassungen erzielten Ergebnisse ohne die Zwischenschritte dargestellt und die Art der Anpassung genannt.

#### F5 Zweiter Aerogelputz, Südseite

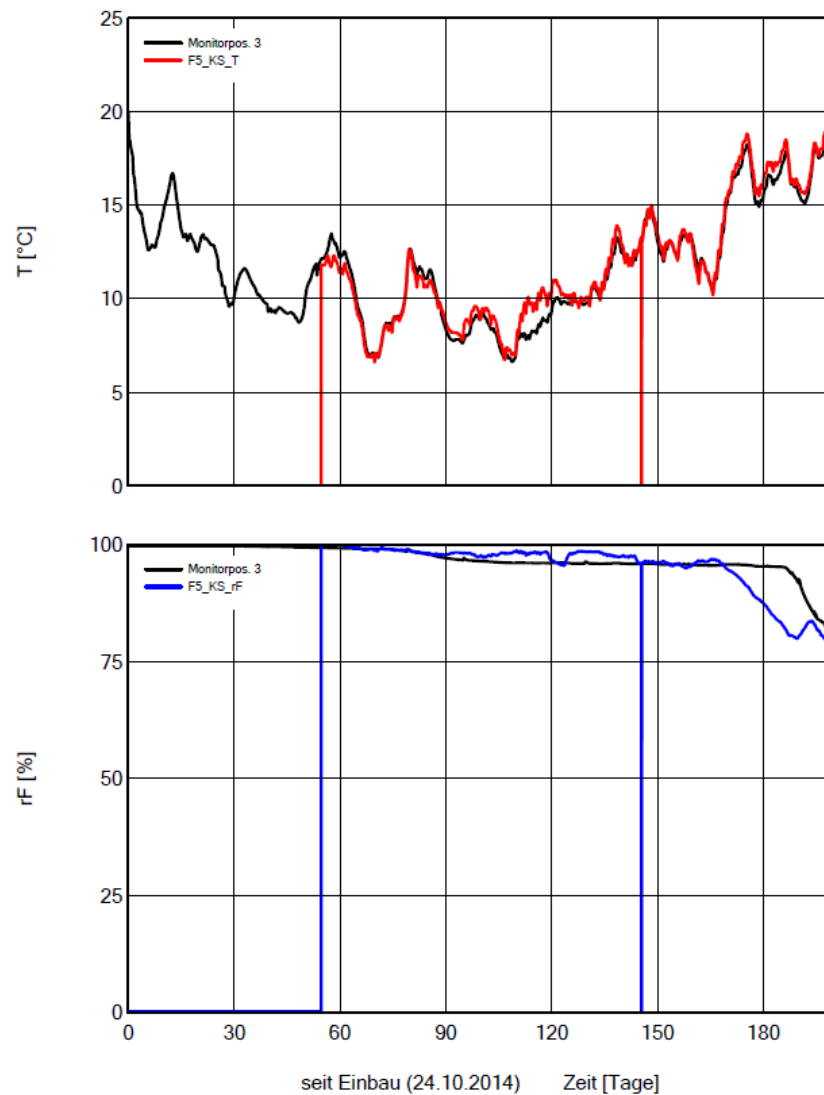


Bild 137:  
Ergebnis der Validierung von Feld 5, 2. Aerogelputz, Südseite.

Feld 5 weist als einziges System, welches am Ende des Jahres 2014 eingebaut wurde, eine hohe Einbaufeuchte auf. Das hygrische Verhalten ist hier deshalb nur begrenzt nachrechenbar, da keine genauen Angaben über die Anfangsfeuchte vorliegen. Trotzdem ergibt sich eine ganz gute Übereinstimmung



(Bild 137), wobei als wesentliche Änderung der Kennwerte hier die Optimierung der Wärmeleitfähigkeit des Dämmputzes von 0,028 auf 0,026 W/mK zu nennen ist.

### F6 Perlite-Schüttung, Südseite

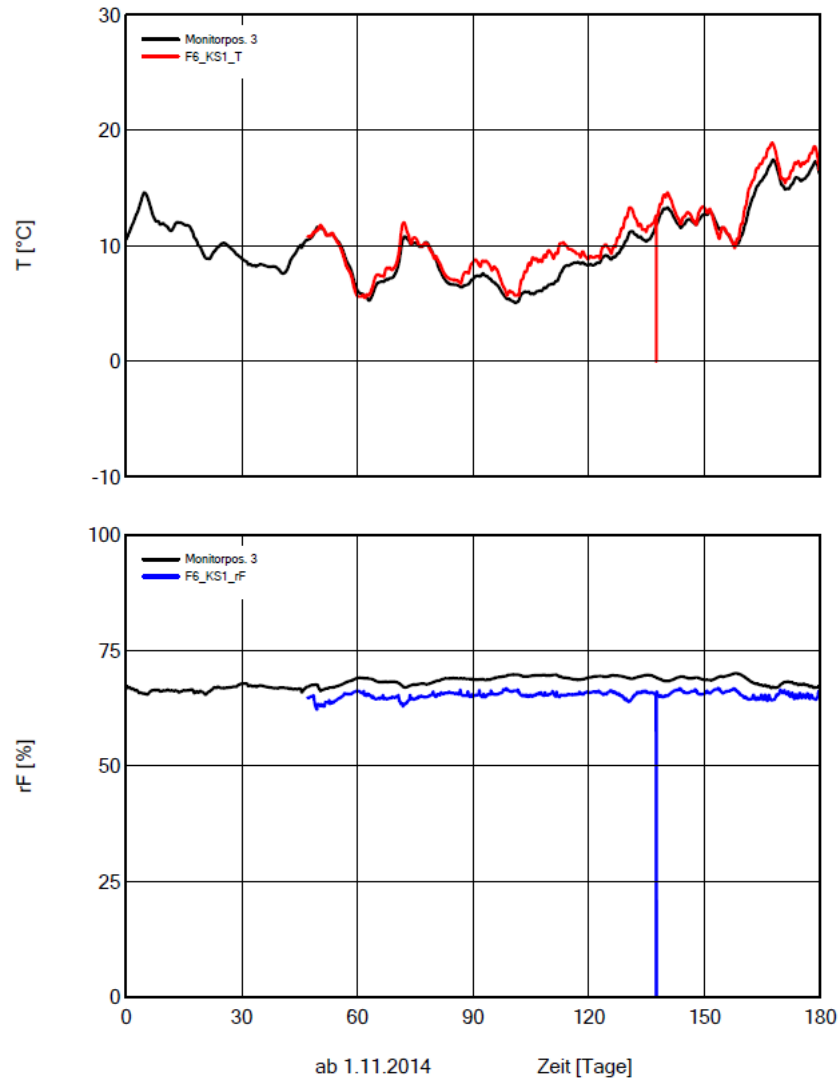


Bild 138:  
Ergebnis der Validierung von Feld 6, Perlite-Schüttung, Südseite.

Die Perlite auf Feld 6 weist als Trockenbaukonstruktion kaum Einbaufeuchte auf. Der Feuchteintrag definiert sich aus dem Verputzen der Schrauben, gegebenenfalls einem Anstrich und im Wesentlichen aus dem Feuchtegehalt der Werkstoffe, je nachdem unter welchem Klima sie im Vorfeld gelagert wurden. Der rechnerische Verlauf der relativen Feuchte auf der Bestandswand liegt ca. 5 % oberhalb des Messverlaufs (Bild 138 unten). Die zugrundeliegende Ausgleichsfeuchte der Baumaterialien wird für die weitere Berechnung beibehalten. Üblicherweise wird eine relative Anfangsfeuchte von 80 % angenommen, hier

sind es 70 %. Die Betrachtung mit einer Ausgleichsfeuchte bei 70 % relativer Feuchte startet trotzdem auf der sicheren Seite und würde eher ein schnelleres Versagen beschreiben.

Der Temperaturverlauf (Bild 138 oben) zeigt vereinzelt Abweichungen zum Messverlauf. Diese Differenzen lassen sich nicht sicher klären. Es kann einen Zusammenhang zum Stahlprofil der Ständerkonstruktion geben. Das Profil kann als Wärmebrücke wirken und Richtung Temperaursensor abstrahlen. Auf eine hier notwendige 2-D-Simulation wird aber verzichtet. Die relative Feuchte reagiert zwar ebenfalls auf die Temperaturschwankung, jedoch sind die Differenzen gering, und der Verlauf wird realitätsnah dargestellt.

## F7 Zellulose Einblasdämmung, Südseite

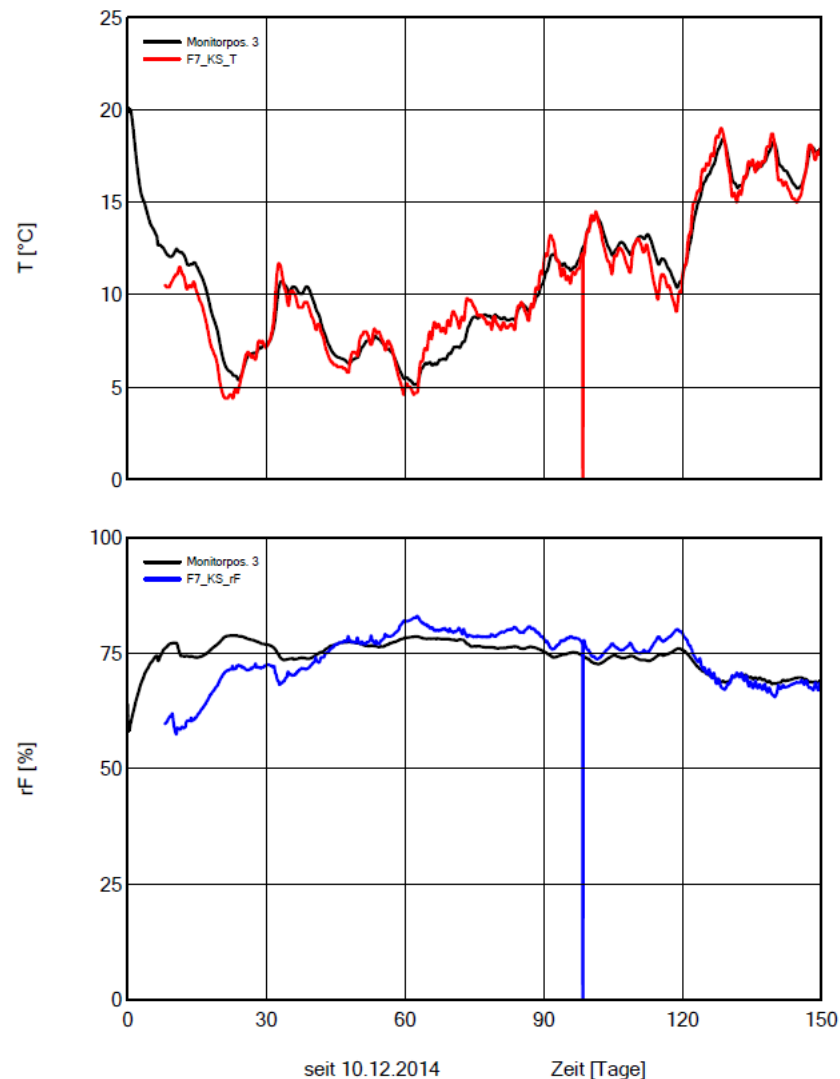


Bild 139:  
Validierter Verlauf von Feld 7, Zellulose Einblasdämmung.

Feld 7 ist ebenfalls als Trockenbaukonstruktion ausgeführt. Die anfangs etwas zu hohe relative Feuchte (Bild 139) lässt sich auf den Feuchtegehalt des Baustoffes bei einer Ausgleichsfeuchte von 80 % zurückführen. Der gemessene Verlauf reagiert etwas schneller auf Feuchteänderung als der berechnete. Zudem ist der gemessene Feuchtegehalt etwas höher. Das lässt auf einen leichten Einfluss von Raumluft schließen. Es gibt zwei wesentliche Unbekannte an diesem System. Zum einen liegen keine sicheren Wasserdampfdiffusionskennwerte der eingebauten OSB-Platte vor und zum anderen ist die vorgeständerte Konstruktion beim Einblasen der Zellulose so stark verformt worden, dass hier bis 13.05.2015 kein luftdichter Anschluss des Laibungsbereichs vorlag. Die zur Erzielung einer guten Übereinstimmung von Rechnung und Messung angesetzte

einzigste Annahme an dieser Stelle ist eine Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl von 70 für die OSB-Platte, das entspricht ca. dem halben Wert des in der WUFI®-Datenbank hinterlegten Wertes und lässt den  $s_d$ -Wert von 2,5 auf 1,3 m sinken. Ein reduzierter  $s_d$ -Wert auf der Innenseite stellt für das System eine erschwerte Bedingung dar. Dadurch wird auch hier auf der sicheren Seite mit diesen Werten weitergerechnet.

### F8 Mineralwolledämmung, Südseite

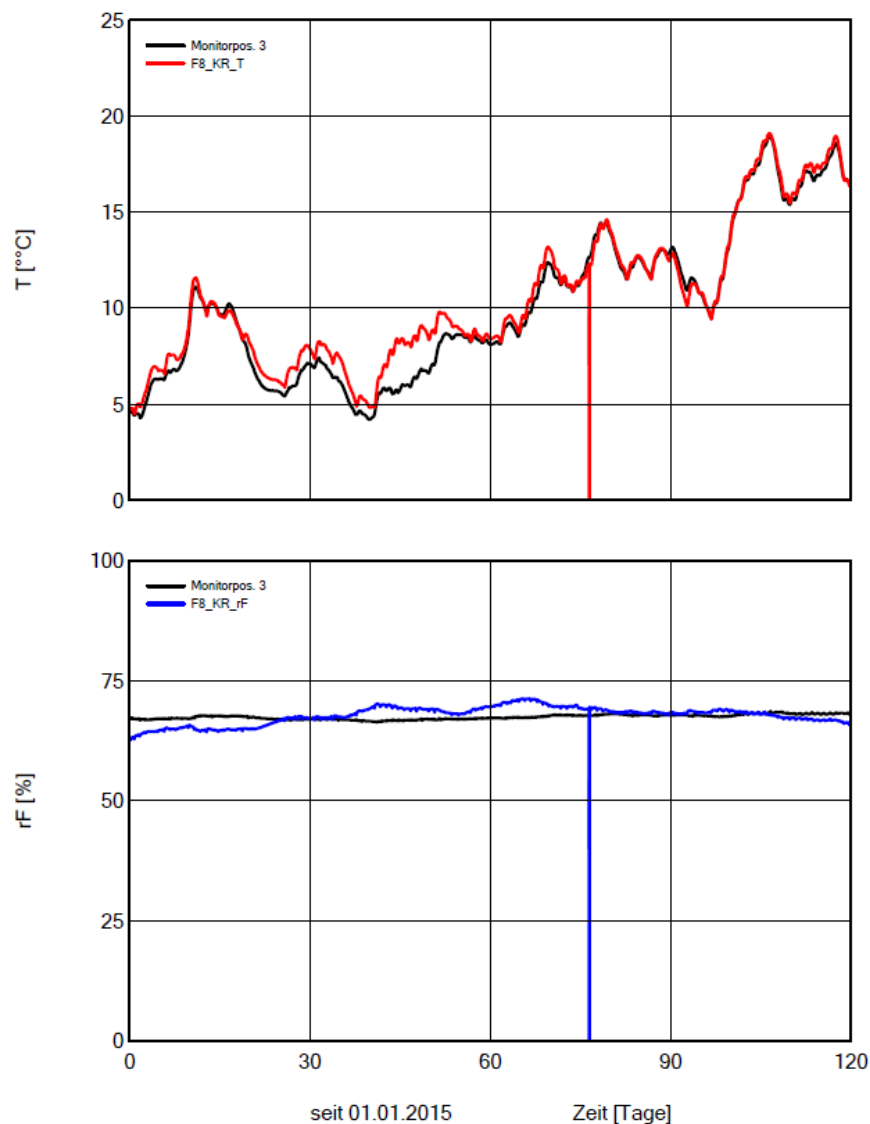


Bild 140:  
Validierter Verlauf von Feld 8, Mineralwolledämmung.

Der rechnerische Verlauf der relativen Feuchte hat als Randbedingung die Ausgleichsfeuchte seiner eingebauten Materialien bei 70 % relativer Luftfeuchte. Die entscheidende Kenngröße für den Eintrag von Feuchte aus dem Raum in die Wand wird bei diesem System durch die variable Dampfbremse bestimmt.

Deren Eigenschaften sind ausreichend verifiziert, so dass hier keine weiteren Anpassungen vorgenommen werden. Insgesamt ergibt sich eine gute Übereinstimmung, wie aus Bild 140 ersichtlich.

### F9 Aerogeldämmplatte, Westseite

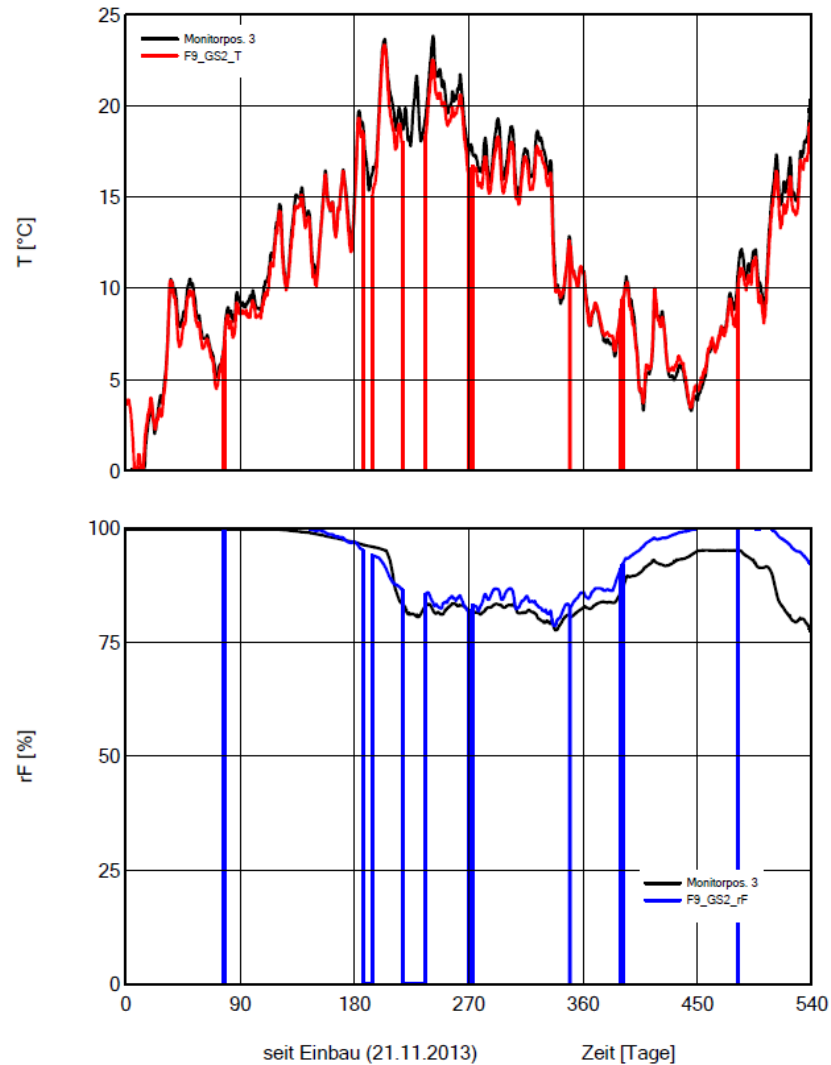


Bild 141:  
Validierter Verlauf von Feld 9, Aerogeldämmplatte.

Die Wärmeleitfähigkeit der Aerogelplatte wird hier von 0,015 auf 0,017 W/mK korrigiert. Der Verlauf der relativen Feuchte zeigt die gleiche Problematik wie bereits bei Feld 11 beschrieben (Bild 141). Es liegen keine Feuchtetransportkennwerte des Dämmstoffs vor. Der berechnete Verlauf zeigt trotzdem eine gute Übereinstimmung mit den Messdaten. Dies ist wahrscheinlich darin begründet, dass das Material sehr hydrophob sein wird und Kapillartransportvorgänge damit keinen nennenswerten Einfluss haben.

## F13 Mineraldämmplatte, Nordseite

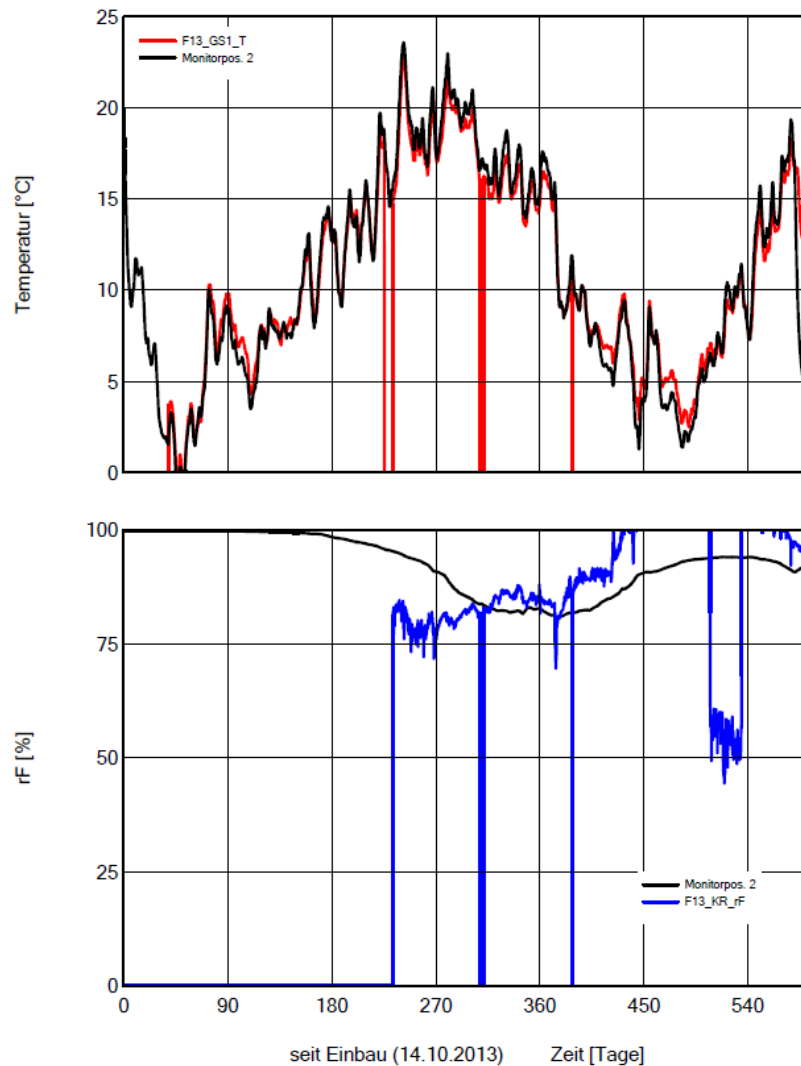


Bild 142:  
Validierter Verlauf von Feld 13, Mineraldämmplatte.

Der berechnete Temperaturverlauf (siehe Bild 142 oben) in der Grenzschicht von Feld 13 kommt ohne Optimierung des Dämmstoffes zustande, die thermischen Eigenschaften des Dämmstoffes bleiben unverändert. Der Verlauf der relativen Feuchte deutet aber auch einen Einfluss der Raumluft durch das Messrohr an (Bild 142 unten). Vergleicht man den gemessenen Verlauf der relativen Feuchte mit dem Verlauf in Feld 11, erkennt man die gleiche Geschwindigkeit der Feuchteänderung. Bei der Mineraldämmplatte liegen genau gemessene Kennwerte vor, weshalb keine Änderungen an den Feuchtetransportkennwerten vorgenommen werden.

## F14 Schilfrohrmatte, Nordseite

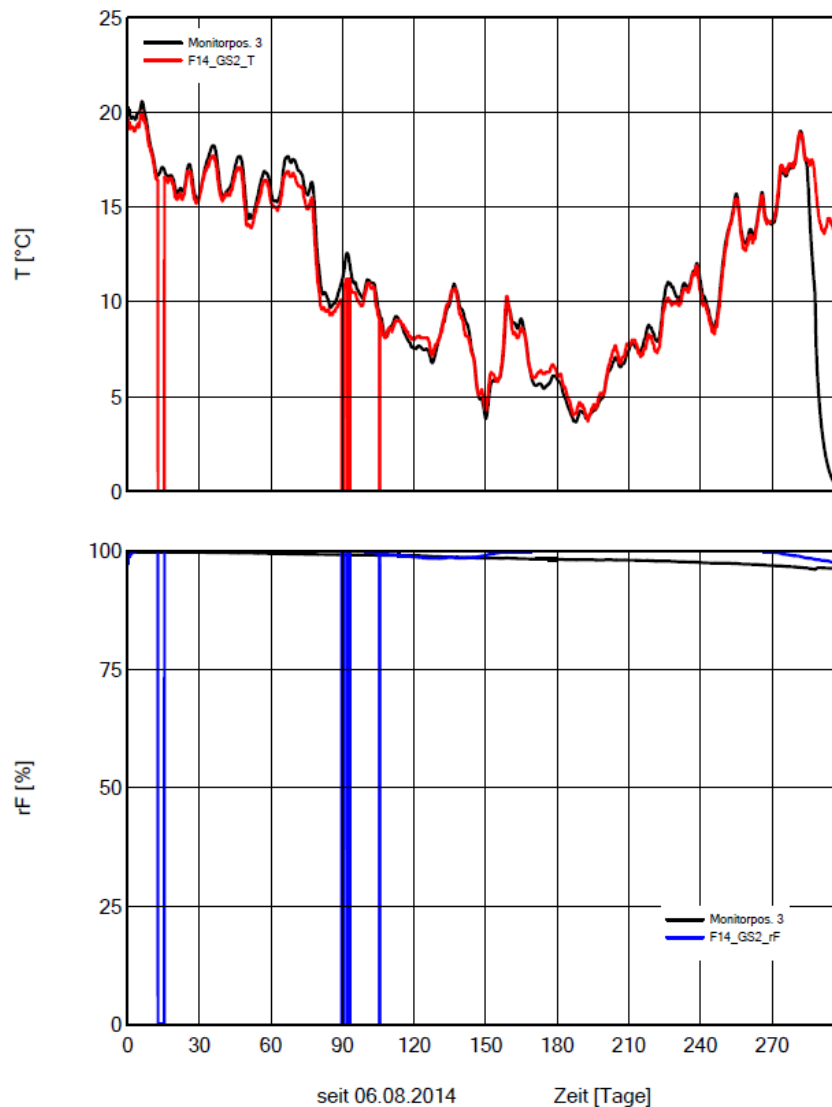


Bild 143:  
Validierter Verlauf von Feld 14, Schilfrohrmatte.

Der berechnete Temperaturverlauf wird mit den vorhandenen thermischen Kennwerten nahezu deckungsgleich zur Realität dargestellt (Bild 143 oben). Es sind keine weiteren thermischen Anpassungen am Dämmstoff notwendig. Die relative Feuchte liegt nahezu kontinuierlich bei 100 % (Bild 143 unten). Feld 14 weist nach der ersten Lage Schilfrohr in einer Tiefe von 8 cm eine Dampfbremse mit einem  $s_d$ -Wert von 2 m auf. Diese erschwert eine schnelle Austrocknung nach innen. Der betrachtete Zeitraum scheint zu kurz, um über Schwankungen im Feuchtegehalt eine Aussage über die Feuchttransporteigenschaften zu machen. Für Schilfrohr liegen ohnehin keine technischen Kennwerte aus dem Labor vor, so dass hier aus den Kennwerten für Holz abgeleitet und angepassten Feuchtespeicher Kennwerten gerechnet wird. Es wird auf

unsichere Anpassung von Feuchttransportmechanismen verzichtet und mit den bestehenden Kennwerten weitergearbeitet.

### F15 Magnesitgebundene Typhplatte, Nordseite

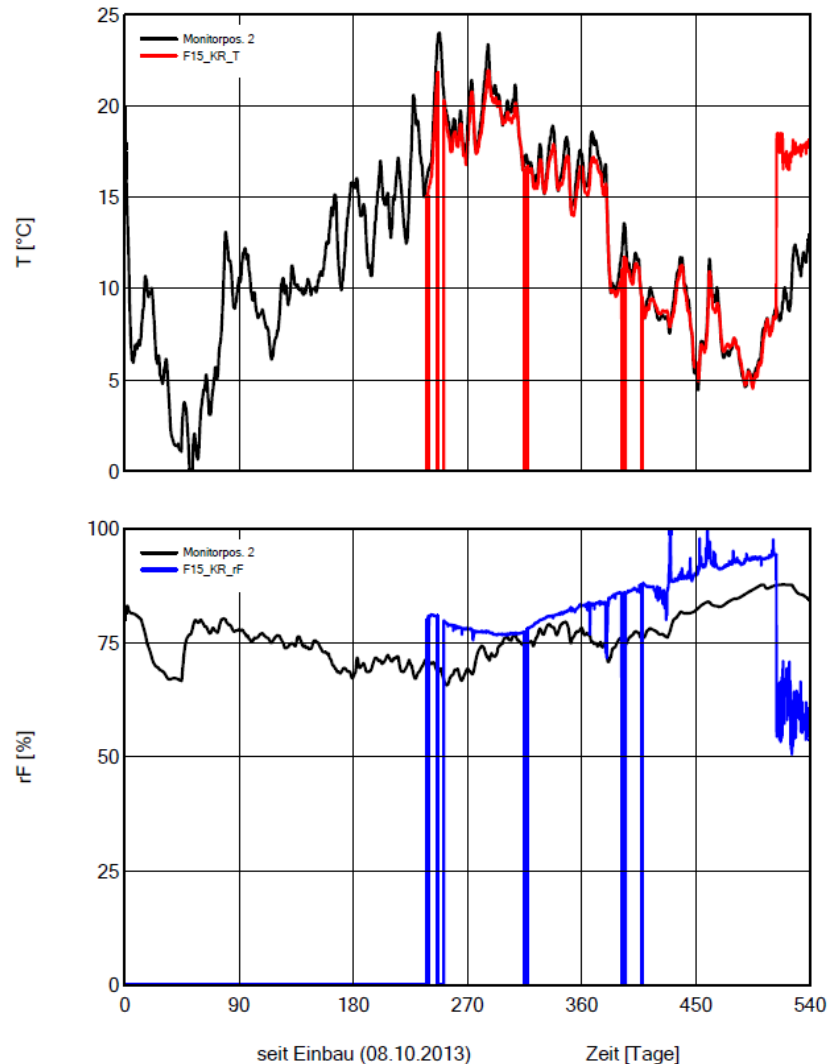


Bild 144:  
Validierter Verlauf von Feld 15, magnesitgebundene Typhplatte.

Der berechnete Temperaturverlauf im Bestandsputz verläuft in Feld 15 etwas oberhalb der Messwerte (Bild 144 oben), bildet sie aber gut ab. Der gemessene Verlauf der relativen Feuchte liegt etwas oberhalb des berechneten (Bild 144 oben). Dies könnte in einem gegenüber der Annahme etwas höheren Anfangsfeuchtegehalt begründet sein.



## 5.9 Rechnerische Untersuchungen zu typischen Fragestellung bei Innendämmungen

Als eine Grundlage für die Betrachtung der folgenden Fragestellungen werden Wärmedurchlasswiderstand und Materialdicken tabellarisch und mit ermittelten Vergleichsgrößen in Tabelle 7 dargestellt. Die Werte dienen im Weiteren für einen Teil der energetischen Betrachtung und für das Widerstand-Dicken-Verhältnis, welches mit in die Bewertung eingeht. Die unterschiedlichen Innendämmsysteme sind zu verschiedenen Zeitpunkten und mit abweichenden Orientierungen eingebaut worden. Eine direkte vergleichende Bewertung anhand der Messverläufe ist daher nicht möglich. Nachdem die gezeigt werden konnte, dass die gemessenen Verläufe im Wesentlichen mit guter Übereinstimmung rechnerisch nachvollzogen werden kann, bietet sich für eine vergleichende Beurteilung hinsichtlich unterschiedlicher Fragestellungen die hygrothermische Berechnung an.

Tabelle 7:  
Wärmedurchlasswiderstand und Materialdicken aller Felder.

						Summe	
<b>Aerogeldämmputz</b>	rev. Schicht	Kleber	Dämmstoff	Deckputz			
	Dicke	0,010	0,005	0,045	0,005	0,065	[m]
<b>F5</b>	Lambda	mix	0,830	0,026	0,368		[W/mK]
	Widerstand	0,12	0,01	1,73	0,01	1,87	[m²K/W]
	Verhältnis R/d					28,78	[R/m]
<b>Perlite</b>	Japanpapier	Dämmstoff	Gipskarton	Gipsfaser			
	Dicke	-	0,08	0,0125	0,0125	0,105	[m]
<b>F6</b>	Lambda	-	0,045	0,2	0,32		
	Widerstand	-	1,78	0,06	0,04	1,88	[m²K/W]
	Verhältnis R/d					17,90	[R/m]
<b>Zellulose</b>	Japanpapier	Dämmstoff	OSB	Gipsfaser			
	Dicke	-	0,08	0,0125	0,0125	0,105	[m]
<b>F7</b>	Lambda	-	0,037	0,12	0,32		
	Widerstand	-	2,16	0,10	0,04	2,31	[m²K/W]
	Verhältnis R/d					21,96	[R/m]
<b>Mineralwolle</b>	Japanpapier	Dämmstoff	Dämmstoff	Gipskarton			
	Dicke	-	0,02	0,045	0,0125	0,078	[m]
<b>F8</b>	Lambda	-	0,032	0,035	0,2		
	Widerstand	-	0,63	1,29	0,06	1,97	[m²K/W]
	Verhältnis R/d					25,46	[R/m]
<b>Aerogelplatte</b>	rev. Schicht	Kleber	Dämmstoff	Deckputz			
	Dicke	0,010	0,01	0,04	0,005	0,065	[m]
<b>F9</b>	Lambda	mix	0,87	0,017	0,87		
	Widerstand	0,12	0,01	2,35	0,01	2,49	[m²K/W]
	Verhältnis R/d					38,31	[R/m]
<b>Aerogeldämmputz 2</b>	rev. Schicht	Kleber	Dämmstoff	Deckputz			
	Dicke	0,010	0,006	0,045	0,005	0,066	[m]
<b>F11</b>	Lambda	mix	0,5	0,03	0,368		
	Widerstand	0,12	0,01	1,50	0,01	1,65	[m²K/W]
	Verhältnis R/d					24,93	[R/m]
<b>Mineralschaumplatte</b>	rev. Schicht	Dämmstoff	Dämmstoff	Deckputz			
	Dicke	0,010	0,01	0,1	0,005	0,125	[m]
<b>F13</b>	Lambda	mix	0,89	0,042	0,18		
	Widerstand	0,12	0,01	2,38	0,03	2,54	[m²K/W]
	Verhältnis R/d					20,32	[R/m]
<b>Schilfrohr</b>	rev. Schicht	Kleber	Dämmstoff	Deckputz			
	Dicke	0,010	0,01	0,11	0,01	0,140	[m]
<b>F14</b>	Lambda	mix	0,43	0,05	0,7		
	Widerstand	0,12	0,02	2,20	0,01	2,36	[m²K/W]
	Verhältnis R/d					16,84	[R/m]
<b>Typhaplatte</b>	rev. Schicht	Kleber	Dämmstoff	Deckputz			
	Dicke	0,010	0,01	0,09	0,01	0,120	[m]
<b>F15</b>	Lambda	mix	0,43	0,055	0,7		
	Widerstand	0,12	0,02	1,64	0,01	1,79	[m²K/W]
	Verhältnis R/d					14,95	[R/m]

### 5.9.1 Trocknungszeiten

Die Trocknungsgeschwindigkeit der verschiedenen Innendämmsysteme beschreibt deren Umgang mit der eingebrachten Baufeuchte. Nachdem Einbaufeuchte nicht selten Grund für Schimmelpilzwachstum ist, folgt diese Betrachtung direkt im nachfolgenden Kapitel. Die Dauer der Trocknung wird hier vereinfacht durch den Gesamtwassergehalt der jeweiligen Konstruktion dargestellt (Bild 145). Die Trockenbausysteme werden hierbei aufgrund deren minimalen Einbaufeuchte nicht einbezogen.

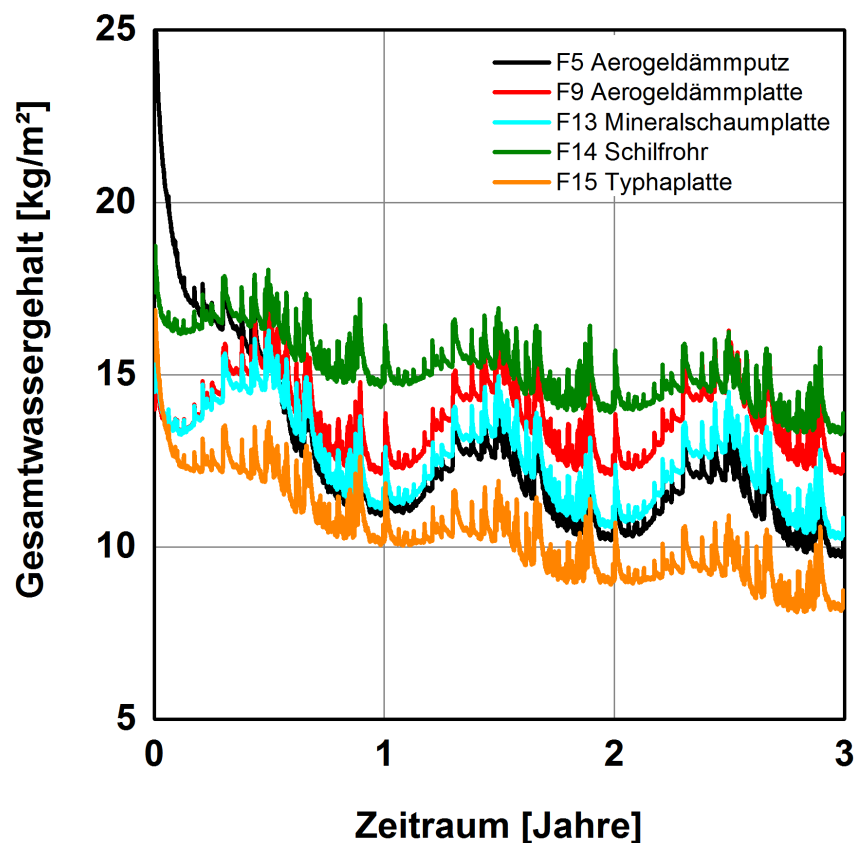


Bild 145:  
Verlauf des Gesamtwassergehaltes der unterschiedlichen Innendämmsysteme seit der Applikation.

Die gemessenen Klimadaten aus Benediktbeuern reichen über einen Zeitraum von ca. zweieinhalb Jahren, die rechnerische Simulation benötigt aber vollständig abgeschlossene Kalenderjahre, um durch Wiederholung eine längerfristige Beurteilung zu ermöglichen. Um die Systeme im weiteren Verlauf der Auswertung vergleichen zu können, wird hierfür als Außenklima das Feuchtereferenzjahr aus Holzkirchen verwendet. Zudem weist das Feuchtereferenzjahr kritische Randbedingungen wie Schlagregen oder Frosttage für eine sichere Interpretation der Ergebnisse auf.

Bild 145 zeigt das Austrocknungsverhalten aller Systeme, die bei der Applikation einen wesentlichen Feuchteintrag aufweisen. Der Eintrag der Feuchtemenge ist anhand der Validierung nicht sicher festzustellen, deshalb werden die verschiedenen Dämmsysteme an den Schichten, die identisch sind, z.B. das reversible Putzsystem oder der Klebemörtel, mit identischen Feuchteaufschlägen versehen. Die Dämmstoffe selbst werden mit einem Feuchtgehalt bei einer Ausgleichsfeuchte von 80 % eingebaut. Eine Ausnahme bilden die Dämmputzsysteme, bei denen der Hauptteil der Baufeuchte mit der Dämmung eingebracht wird. Somit können die Systeme unter gleichen Randbedingungen verglichen werden. Die Felder mit dem größten Eintrag an freiem Wasser sind Feld 11 und Feld 5 mit den beiden Dämmputzen. Die Einbaufeuchte wird durch die Putzmaschine bestimmt und liegt hier bei etwa 300 bis 400 Liter/m<sup>3</sup>, das entspricht zwischen 15 und 20 Liter/m<sup>2</sup>. Die Aerogeldämmputze weisen identische Materialkennwerte auf, weshalb nur Feld 5 dargestellt wird. Der Dämmputz hat eine geringe Dampfdiffusionswiderstandszahl ( $\mu=4$ ) und trocknet somit auch schnell nach innen aus. Der Feuchteverlauf entspricht nach wenigen Monaten bereits dem Verlauf der Mineraldämmplatte auf Feld 13.

Außer Feld 5 und Feld 11 liegt allen anderen Systemen lediglich der Feuchteintrag durch den Klebemörtel als Baufeuchte vor. Feld 14 trocknet zu Beginn am langsamsten. Dies ist das einzige der mit der Wand verklebten Systeme bei dem eine Dampfbremse eingebaut wurde, in diesem Fall mit einem  $s_d$ -Wert von 2 m. Feld 9 trocknet zwar anfangs rasch, bleibt nach ca. drei Jahren aber feuchter als die übrigen Systeme. Im vierten Winter hat Schilfrohr bereits einen niedrigeren Feuchtegehalt als der Aufbau mit Aerogelplatten. Die Typhaplatte auf Feld 15 weist einen hohen Weiterverteilungskoeffizienten auf, und trocknet dadurch rasch ab.

## 5.9.2 Feuchteverlauf in der Grenzschicht

In Bild 146 ist der berechnete Verlauf der relativen Feuchte im Bestandputz aller Systeme dargestellt. Der Zeitraum umfasst vier Jahre. Auch hier wird das Feuchtereferenzjahr aus Holzkirchen mit Westausrichtung verwendet.

Hinter der Mineraldämmplatte auf Feld 13 ergeben sich die höchsten Feuchtegehalte. Das ist darin begründet, dass der Dämmstoff sehr diffusionsoffen ist und deshalb im Winter Tauwasserausfall auftritt. Aufgrund seiner Kapillaraktivität bleibt der Maximalwassergehalt aber begrenzt. Die beiden Aerogelputze und die Aerogelmatte haben einen ähnlichen Verlauf der Feuchte. Sie sind auch sehr diffusionsoffen, wobei die beiden Dämmputze im Gegensatz zur Dämmplatte einen Kapillartransport aufweisen. Dies zeigt sich in der besseren Austrocknung im Sommerhalbjahr. Von allen Trockenbausystemen schwingt Feld 7 mit Zellulosedämmstoff am stärksten. Die Zellulose weist den höchsten Sorptionsfeuchtegehalt auf. Perlite in Feld 6 liegt etwas darunter und Mineralwolle in Feld 8 zeigt die geringste Feuchtedifferenz im Jahresverlauf aller verbauten Systeme. Das Schilfrohr auf Feld 14 schwingt ebenfalls nicht sehr stark, trocknet aber auch nicht stark aus, was vor Allem an der eingeschränkten Diffusion auf-

grund der eingebauten Dampfbremse liegt und ein kapillarer Feuchtetransport durch den gesamten Dämmbau nicht möglich ist. Die Typhaplatte auf Feld 15 weist den geringsten Feuchtegehalt auf.

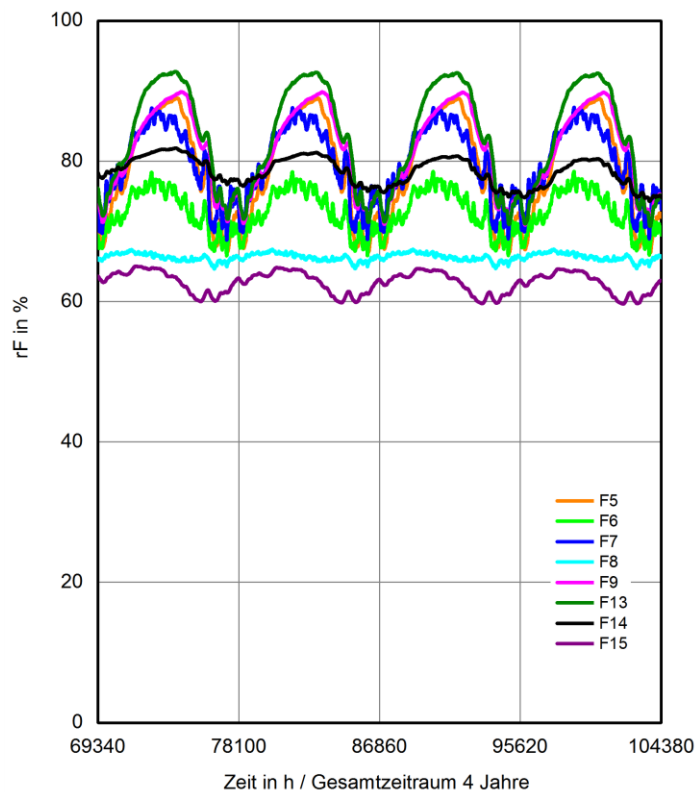


Bild 146:  
Berechneter Verlauf der relativen Feuchte im Bestandsputz aller Systeme.

### 5.9.3 Schimmelrisiko

Die mit WUFI® Bio berechneten Oberflächenbedingungen dienen als Eingangsgröße für das Biohygrothermische Modell. Sowohl vorgegebene, stationäre Randbedingungen als auch periodische Feuchtigkeitsbelastungen und die Auswirkungen von Oberflächenqualitäten sind in diesem Modell als Randbedingung auswählbar. Mit diesem Modell wird auch die Verzögerung des Schimmelwachstums durch schwankende Feuchtebedingungen implementiert. Die Ergebnisausgabe erfolgt in Form des Mould-Indexes nach Viittanen [7].

0 = kein Wachstum

1 = ein wenig Wachstum (mikroskopisch)

2 = mäßiges Wachstum (mikroskopisch) Bedeckung > 10 %

3 = wenig sichtbares Wachstum

4 = sichtbares Wachstum

5 = Bedeckung > 50 %

6 = dichte Bedeckung 100 %

Das Schimmelpilzrisiko wird in zwei wesentlichen Grenzschichten betrachtet. Zum einen wird die schützenswerte Bestandsoberfläche untersucht (Bild 147), zum anderen auch der Übergang von Klebemörtel zu Dämmstoff (Bild 148). Schimmelpilzwachstum ist vor Allem dort möglich, wo beim Ankleben von Dämmstoffen Lufträume entstehen, beispielsweise aufgrund von Unebenheiten der Wandoberfläche. Dabei ist aber zu berücksichtigen, dass solange die Hohlräume keiner Hinterströmung ausgesetzt sind kein Risiko besteht, da keine keimfähigen Sporen dorthin gelangen. Zur Einschätzung der potenziellen Gefahr wird aber auch dieser Fall untersucht.

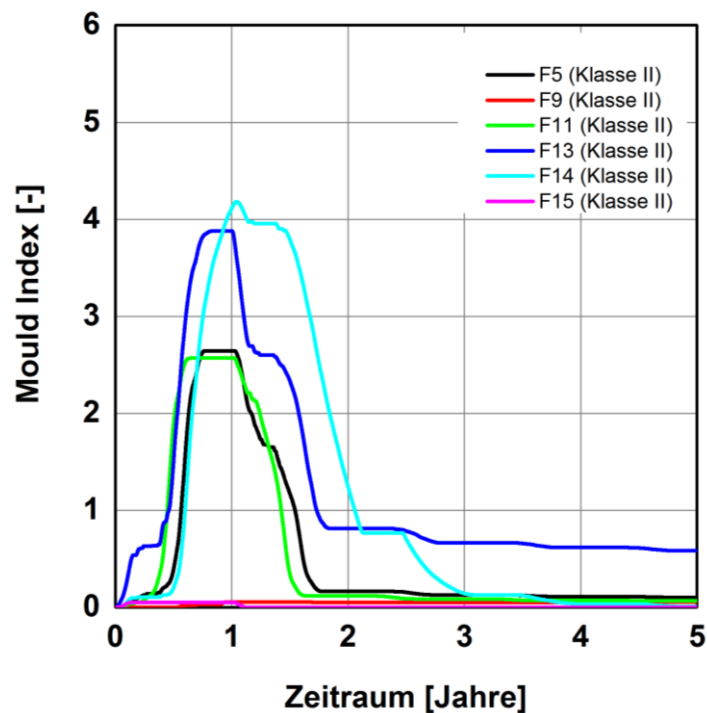


Bild 147:

Verlauf des Mould-Index im Bestandsputz seit Applikation der unterschiedlichen Innendämmsysteme.

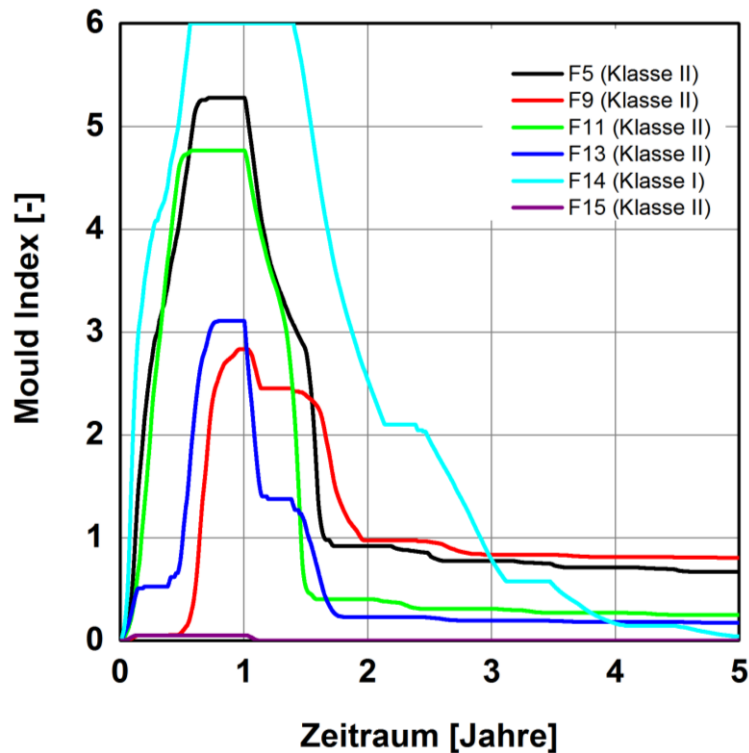


Bild 148:

Verlauf des Mould-Index auf dem reversiblen Putz seit Applikation der unterschiedlichen Innendämmsysteme.

In Bild 147 und Bild 148 werden alle relevanten Dämmsysteme ab Einbau dargestellt. Feld 6, 7 und 8 werden in der Grafik nicht dargestellt, da ihr berechneter Mould-Index dauerhaft bei 0 liegt. Das ist in erster Linie darin begründet, dass es sich hierbei um Trockenbausysteme handelt, die ohne Eintrag von Baufeuchte erstellt werden. Außerdem feuchten die Systeme auch im Laufe der Zeit nicht auf, was auf die Dampfbremse innen zurückzuführen ist.

Bild 150 zeigt den Verlauf des Mould-Index auf der Bestandsoberfläche. Für den Bestandsputz kann in allen Fällen die Substratklasse II zugrunde gelegt werden. Feld 9 und Feld 15 zeigen einen Mould-Index kleiner 0,1. Es liegt dort keinerlei Risiko vor. An allen anderen Verläufen ist zu erkennen, dass der Mould-Index erst zeitverzögert ansteigt, was an der langsamen Feuchteumverteilung der eingebrachten Baufeuchte durch das reversible Putzsystem hin zum Bestandsputz liegt. Feld 13 und Feld 14 überschreiten als einzige den Mould-Index 3, bei dem sichtbares Wachstum beginnt; Feld 14 weil die Dampfbremse das Austrocknen nach innen verringert, Feld 13, weil die Mineralfüllplatte durch ihre hohe Dampfdiffusion und den hohen Wärmedurchlasswiderstand einen hohen Feuchtegehalt auf der Kaltseite bedingt. Nach einem (F13), bzw. eineinhalb Jahren (F14) wird diese Grenze dauerhaft unterschritten. Bei den beiden Aerogeldämmputzen liegt das Risiko niedriger, sie können die Baufeuchte gut in den Innenraum abgeben.

Die Grenzschicht auf dem reversiblen Putzsystem (Bild 148) stellt zwar keine schützenswerte Schicht dar, aber sie liegt direkt hinter der Dämmung. Dort liegt zeitweise der wesentliche Teil der Einbaufeuchte vor. Bei Feld 14 mit der Schilfrohrdämmung wurde Substratklasse I zugrunde gelegt, da dieses Material für Mikroorganismen leicht verwertbar ist und außerdem die Sporen dieser Organismen bereits mit eingebaut werden. Die Typhaplatte in Feld 15 hat hingegen eine hohe Resistenz gegen den Befall durch Mikroorganismen, weshalb hier Substratklasse II gewählt wurde. Die Aerogeldämmputze auf Feld 5 und 11 bringen die meiste Baufeuchte ein, dadurch ist der Bereich des reversiblen Putzes stärker belastet. Im Wesentlichen lässt sich über das Schimmelpilzrisiko auf dem reversiblen Putz sagen, dass alle Systeme bis auf Feld 14 nach ca. zwei Jahren auf einen Mould-Index von unter 1 fallen, und spätestens zu diesem Zeitpunkt das Wachstum quasi stagniert.

Im Vergleich des Schimmelpilzwachstumsrisikos zwischen den beiden Grenzschichten fällt auf, dass alle Systeme im Bestandsputz einen niedrigeren Mould-Index aufweisen, außer hinter der Mineraleisplatte auf Feld 13.

#### 5.9.4 Frostschadensgefahr

Innendämmungen führen zu einer Absenkung des Temperaturniveaus in der darunter liegenden Außenwand. Eine höhere Dämmschichtdicke bewirkt zwar einen höheren Wohnkomfort durch höhere Temperaturen der raumseitigen Bekleidung, gleichzeitig aber eine entsprechend niedrigere Temperatur des Mauerwerks. Sind weitere Feuchtebelastungen vorhanden, wie z. B. eine hohe Schlagregenbeanspruchung, steigt das Frostschadensrisiko [8]. Bei nicht intaktem Schlagregenschutz saugt die Fassade anfallendes Wasser in die tieferen Schichten. Um das zu verhindern wird die Fassade häufig mit einem wasserabweisenden Anstrich versehen.

Um das Risiko von Frostschäden an der Außenwand abzuschätzen, werden die innengedämmten Wandbereiche mit bereits instandgesetzter Fassade ( $w$ -Wert  $0,4 \text{ kg/m}^2\text{h}^{0,5}$ ) mit der Fassade der Bestandsmauer ( $w$ -Wert  $4,0 \text{ kg/m}^2\text{h}^{0,5}$ ) im ungenutzten Zustand verglichen. Alle Berechnungen haben als Außenklima das Feuchtereferenzjahr Holzkirchen. Als Kriterium zur Frostsicherheit wird der Zusammenhang zwischen der Temperatur und dem Gefrierpotenzial [9], das der relativen Feuchte über dem gerade noch nicht gefrorenem Porenwasser in kapillaraktiven Baustoffen entspricht, durch eine rote Linie eingezeichnet, dargestellt in Bild 152 und Bild 153. Dies bedeutet, dass bei einer Ausgleichsfeuchte von unter 100 % das vorhandene Wasser erst unterhalb von  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  gefriert, z. B. bei 90 % Ausgleichsfeuchte also erst bei ca.  $-11 \text{ }^\circ\text{C}$ . Der betrachtete Bereich in der Fassade liegt in etwa 4 mm Tiefe, da sich die kritischen Bedingungen bei zunehmender Tiefe und intaktem Anstrich stark vermindern. Somit ist hier ein Bereich gewählt worden, der sich besser vergleichen lässt.



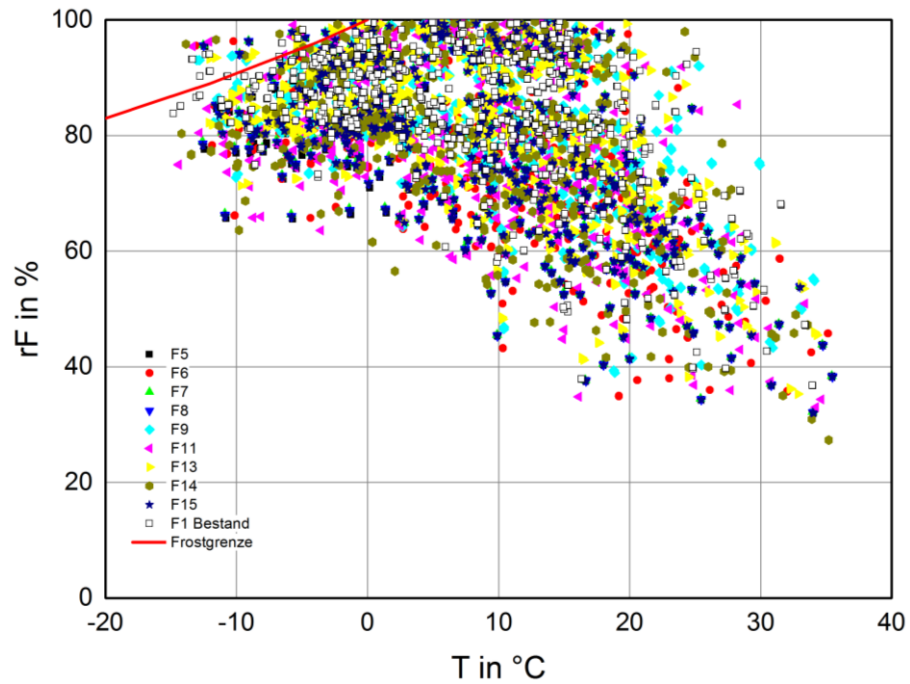


Bild 149:  
Verteilung von Temperatur und dazugehöriger Feuchte aller Felder im Außenputz inklusive historischem Bestandsputz.

Bild 149 zeigt die gesamte Streuung aller Felder. Auf den ersten Blick fällt auf, dass das Grenzkriterium in 4 mm Tiefe überschritten wird. Eine detailliertere grafische Darstellung ist in Bild 150 an Feld 14 dargestellt. Hier wird beispielhaft ein Vergleich zwischen dem unveränderten Bestandsputz der Fassade und dem instandgesetzten Putz der bereits innen gedämmten Wand gezogen. Beide Putze überschreiten das Grenzkriterium zur Frostvorhersage im Gefüge deutlich.

Der historische Putz war über einen langen Zeitraum intakt, deshalb wird dessen Situation als Referenz für alle einzelnen Systeme herangezogen. Die Überschreitung der Grenzfunktion lässt sich analysieren über die Häufigkeit und Höhe der Überschreitung.

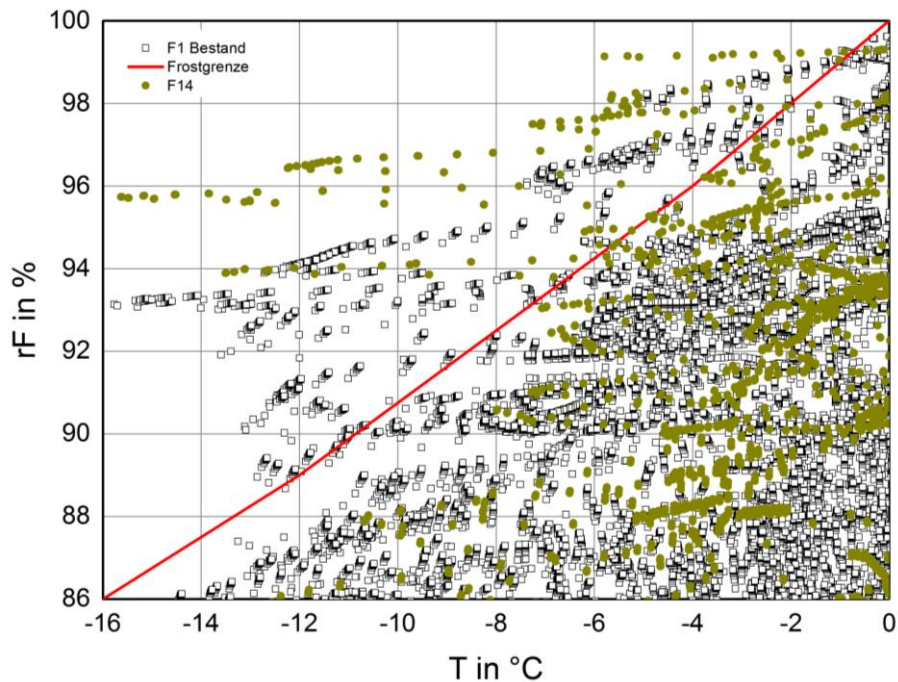


Bild 150:

Verteilung von Temperatur und dazugehöriger Feuchte von Feld 14 im Außenputz inklusive historischem Bestandsputz.

In Tabelle 8 werden alle Felder mit dem Bestandsputz verglichen. Hierzu wird die Summe der gewichteten Temperaturunterschreitung in einem Zeitraum von 15 Jahren ermittelt. Sie setzt sich zusammen aus der Differenz von Grenztemperatur und errechneter Temperatur bei Überschreiten der Grenze in Abhängigkeit der vorliegenden Luftfeuchtigkeit. Alle Überschreitungen und ihre Temperaturdifferenzen werden als Summe und Betrag dargestellt. Hierbei stellt der Bestandsputz und seine Summe (100 %) eine hohe Sicherheit gegen Frostschäden dar, begründet durch das zumeist schadensfrei erreichte Alter des Putzes.

Die instandgesetzte Fassade hat zwar einen deutlich verbesserten w-Wert, doch wird sie durch die Innendämmung nicht mehr mit Wärme aus dem Innenraum versorgt. Dadurch zeigen alle Systeme einen deutlichen Anstieg der Frostwechselereignisse in einer Tiefe von 4 mm. In Tabelle 8 ist auch die Häufigkeit der Unterschreitung des Grenzwertes erfasst. Hierbei fällt auf, dass die Bestandswand zwar am häufigsten die Grenze überschreitet (1806 h), aber mit der geringsten Unterschreitungstiefe von 2,72 K. Die Fassade des Aerogelputzes auf Feld 5 z.B. sinkt nur 1650 Stunden lang unter die Grenztemperatur, aber mit einer unterschreitungstiefe von knapp über 4 K. Daraus resultiert, dass eine wesentlich höhere Temperaturunterschreitung bei geringerer Häufigkeit der Unterschreitung für den Anstieg der Summe verantwortlich ist. Dies ist aus Tabelle 8 gut abzulesen. Dabei zeigt sich, dass Gesamtwärmedurchlasswiderstand der verbauten Systeme den wesentlichen Einfluss darstellt. In Bild 151 sind die Zahlenwerte nochmals grafisch dargestellt. Insgesamt lassen die Ergebnisse mit

einer Erhöhung um bis zu 50 % im Vergleich zur Bestandssituation keine wesentliche Verkürzung der Dauerhaftigkeit erwarten.

Tabelle 8:

Summe und Häufigkeit aller Unterschreitungen der Grenztemperatur und prozentualer Vergleich zum Bestandsputz sowie Gesamtwärmedurchlasswiderstand.

	Summe Temperaturunterschreitung im Zeitraum von 15 Jahren (Berechnungszeitraum) [Kh]	Überschreitung der Bestandswand-Temperatur-Summe in %	Gesamtwärmedurchlasswiderstand des Dämmaufbaus	Häufigkeit der Unterschreitung [h]	mittlerer Unterschreitung pro Stunde [K]
F1 Bestand	4918	100	-	1806	2,72
F5	6807	138	1,87	1650	4,13
F6	7113	145	1,88	1710	4,16
F7	7347	149	2,31	1710	4,30
F8	7204	146	1,97	1710	4,21
F9	7511	153	2,49	1740	4,32
F11	6654	135	1,65	1650	4,03
F13	7458	152	2,54	1710	4,36
F14	7225	147	2,36	1710	4,23
F15	7164	146	1,79	1710	4,19

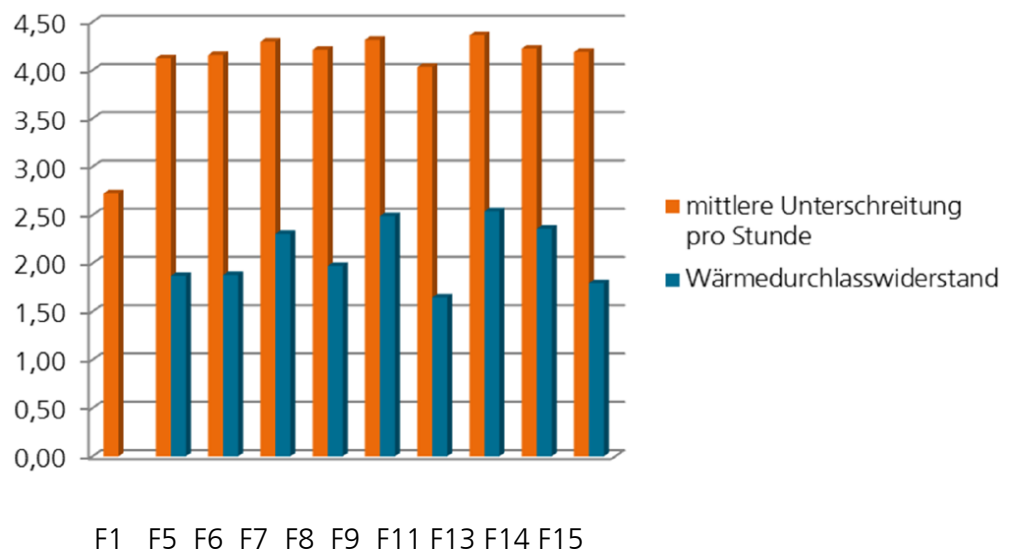


Bild 151:

Mittlere Gefrierpunkttemperaturunterschreitung im Vergleich zum Gesamtwärmedurchlasswiderstand aller Systeme

### 5.9.5 Vergleich der Temperaturschwankungen auf der Grenzschicht

Die schützenswerte Bestandsoberfläche wird auf ihre Temperaturschwankungen untersucht. Mit einer Veränderung der Temperatur- und Feuchteverhältnisse im Gefüge der Putz- und Malschichten sowie der dahinter liegenden Mauerwerksmaterialien stellen sich zumeist Formänderungen ein, die im Falle einer Behinderung des Formänderungsbestrebens zu einer Beanspruchung führen und eine Schwächung des Materialgefüges zur Folge haben [9]. In Bild 142 ist der Jahrestemperaturverlauf aller Systeme dargestellt. Es zeigt sich eine träge, mit dem Jahresverlauf mitschwingende Temperaturänderung. Der Gesamtwärmedurchlasswiderstand der einzelnen Innendämmsysteme (Tabelle 8) weist so geringere Unterschiede auf, dass im Jahresverlauf keine großen Differenzen zwischen den Systemen zu beobachten sind.

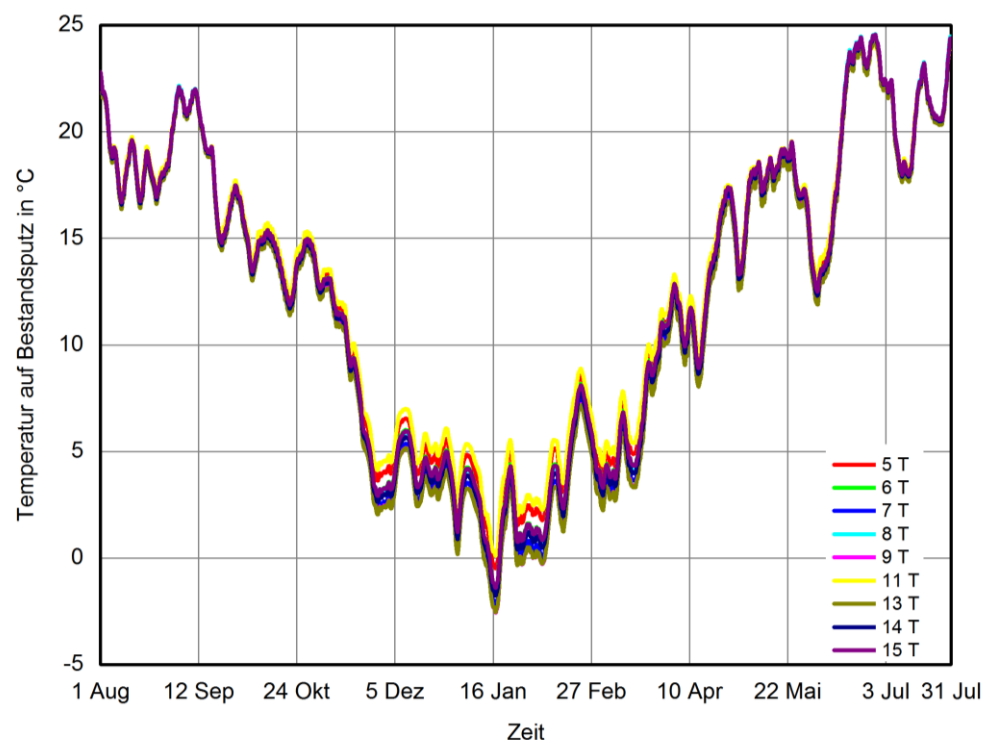


Bild 152:  
Jahreszeitlicher Verlauf der Temperaturen auf der Bestandsoberfläche.

Die betrachtete Grenzschicht liegt zwischen der Bestandsmauer und dem Innendämmsystem. Das massive Mischmauerwerk reagiert durch seine hohe thermische Masse sehr träge auf die Tag- und Nachtwechsel und das Innenraumklima ist annähernd stationär (20 °C/50 % r. F.) klimatisiert. Am Beispiel von Feld 13, der Minerale Dämmplatte, wird in Bild 153 das Ergebnis auf die Wintermonate eingeschränkt dargestellt. Auch hier lassen sich kaum tageszeitliche Schwankungen erkennen.

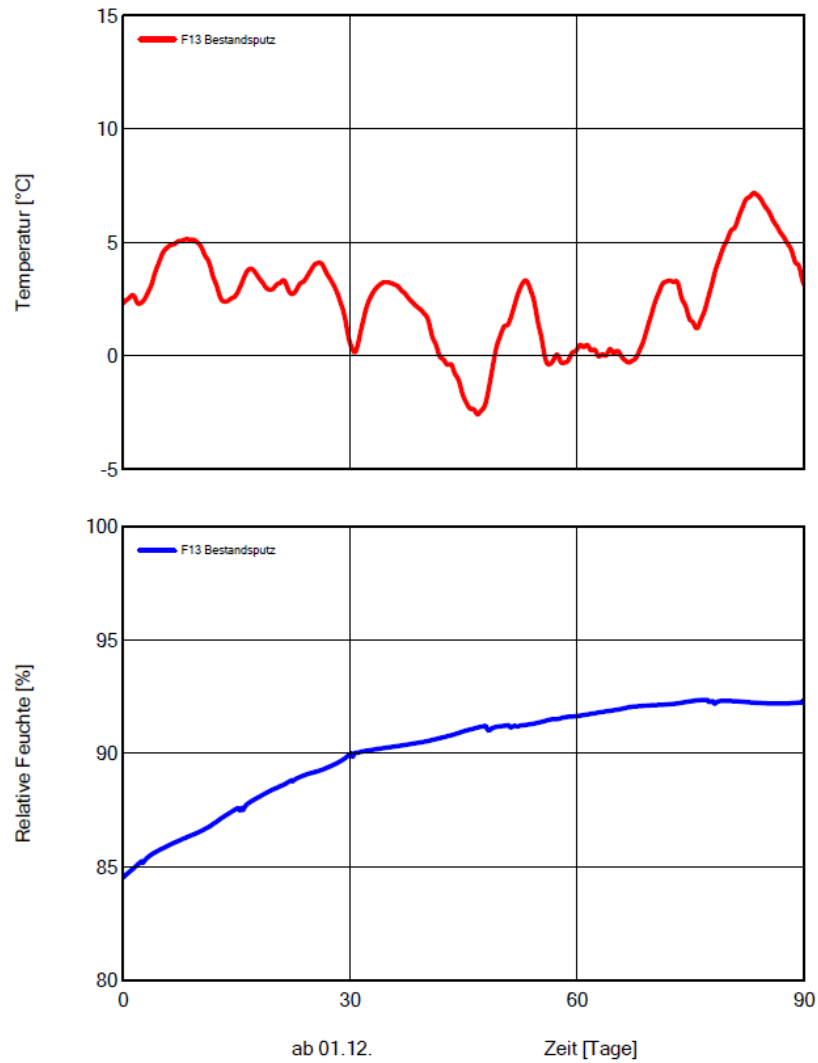


Bild 153:  
Temperaturverlauf auf der Bestandsoberfläche bei Feld 13 im Winter.

Der Temperaturverlauf in Bild 153 zeigt nach ca. 60 Tagen den interessantesten Temperaturbereich. Der Graph lässt ein tageszeitliches Schwingen erahnen. Dieser Zeitraum wird detailliert in Bild 154 und Bild 155 dargestellt.

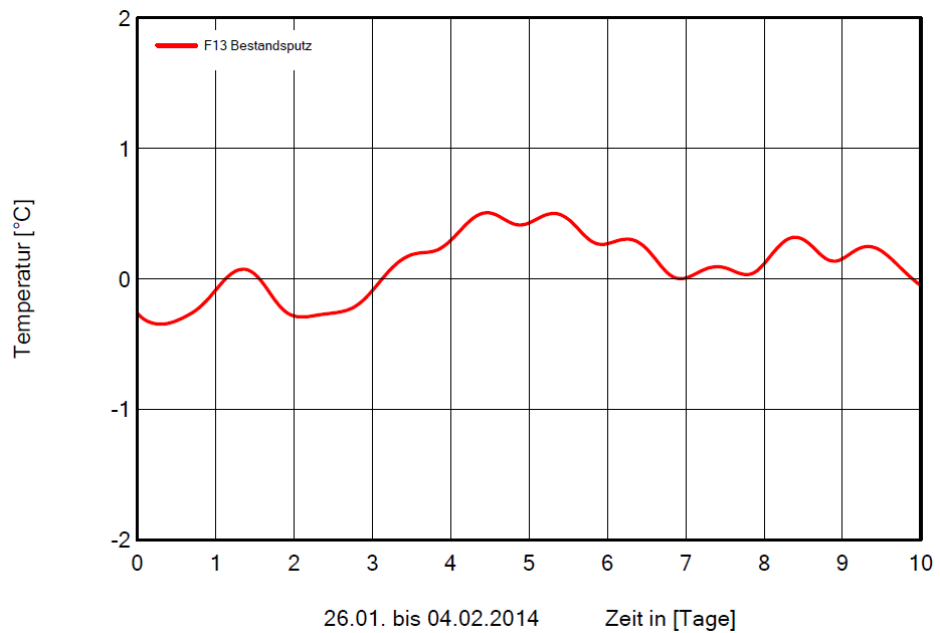


Bild 154:  
10-tägiger Verlauf der Grenzschichttemperatur bei Feld 13.

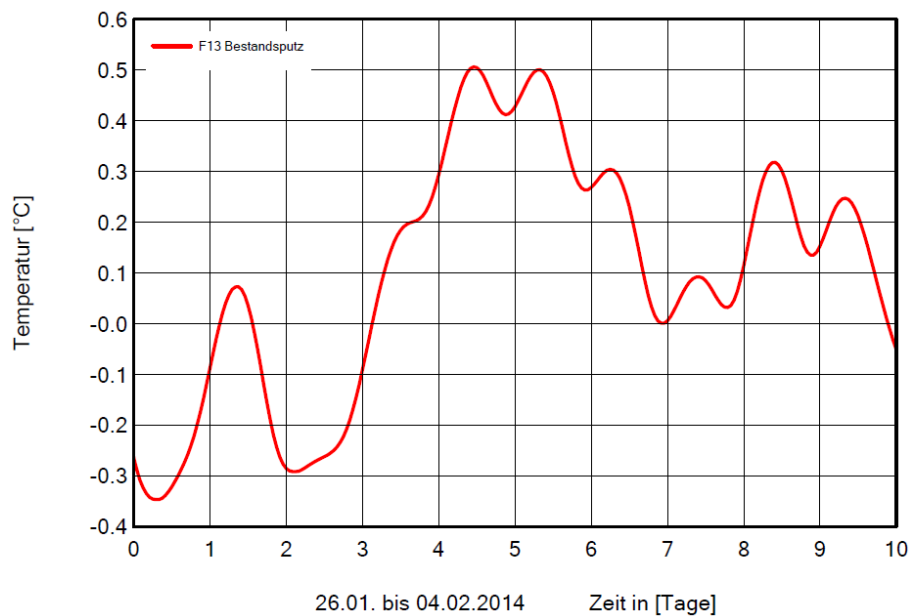


Bild 155:  
10-tägiger Verlauf der Grenzschichttemperatur bei Feld 13, erhöhte Temperaturauflösung.

In Bild 155 ist die Temperaturskalierung deutlich vergrößert dargestellt. Es sind tageszeitliche Schwankungen erkennbar. Sie stellen die deutlichste Schwankung im Winter dar. Aus Bild 155 lassen sich die Temperaturdifferenzen am besten ablesen. Es handelt sich hier um Schwankungen von maximal 0,4 bis 0,5

Kelvin, teilweise sind es nur etwa 0,1 Kelvin. Somit ist der Einfluss der tageszeitlichen Temperaturschwankungen als äußerst gering zu bezeichnen. Zusätzlich zu der Betrachtung für die Westausrichtung wäre hier die Südausrichtung interessant, da dort noch höhere Temperaturschwankungen im Tagesverlauf zu erwarten sind, aufgrund der bisherigen Ergebnisse ist dort allerdings auch ein geringer Einfluss zu erwarten.

### 5.9.6 Energetische Verluste

Die energetischen Verluste resultieren aus den einzelnen Wärmedurchlasswiderständen der Bauteile, sowie den Übergangswiderständen. Bild 156 zeigt den Verlauf aller Wärmeströme zur Winterzeit. Ihre Anordnung ist den Gesamtwiderständen der jeweiligen Innendämmsysteme gleichzusetzen. Eine rein energetische Beurteilung der Systeme rückt in diesem Projekt etwas in den Hintergrund, da in erster Linie die Schadensfreiheit der Innendämmungen gewährleistet werden muss und sie auch entsprechend geplant worden sind.

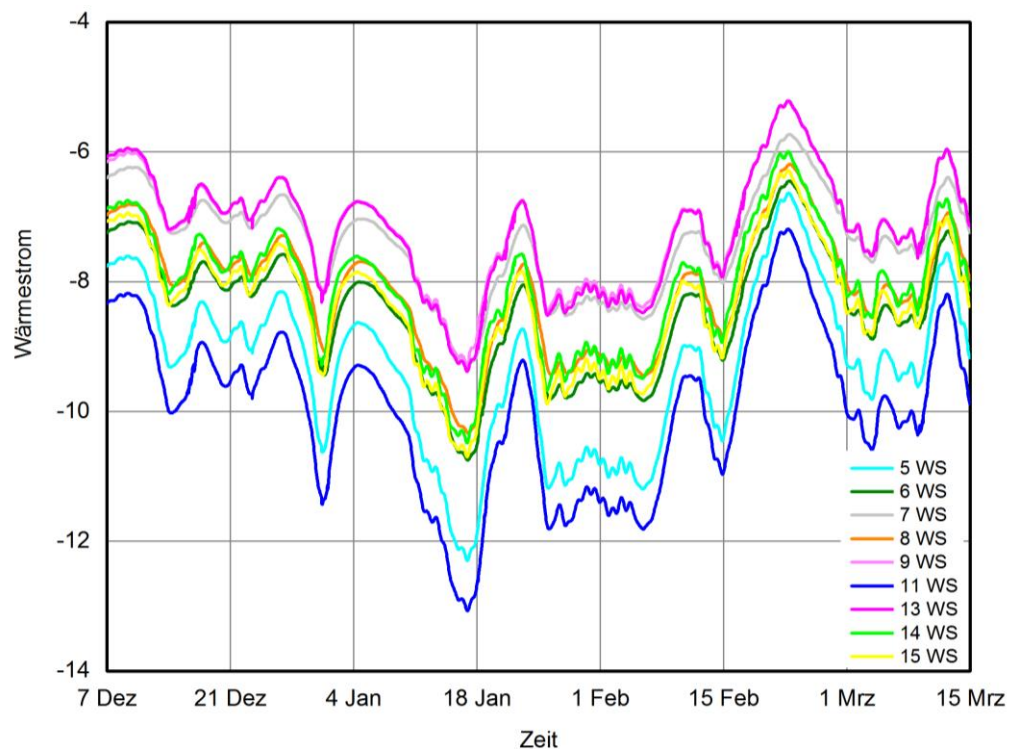


Bild 156:  
Verlauf aller Wärmeströme in der Bestandsoberfläche im Winter.

Untersucht werden sollte auch der Einfluss der Feuchtesituation der Dämmstoffe im eingeschwungenen Zustand auf den sich ergebenden Wärmeverlust. Je nach Art des Dämmstoff und des Einbaus der Innendämmungen werden so hohe Bauteilfeuchten erreicht, dass durch die Feuchteabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit eine Erhöhung der energetischen Verluste resultieren können. Um dies zu quantifizieren, wurden zum Vergleich Berechnungen durchgeführt,

bei denen die Feuchteabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit des Dämmstoffes nicht berücksichtigt wurde. Alle Systeme wurden im eingeschwungenen Zustand im Zeitraum von 01.10. bis 01.05. des Folgejahres mit Westausrichtung betrachtet. Unter diesem Kriterium werden die Innendämmsysteme mit sich selbst verglichen und die Ergebnisse erläutert (Bild 157).

**Zusätzlicher bez. Wärmeverlust durch Feuchteinfluss je Dämmsystem**

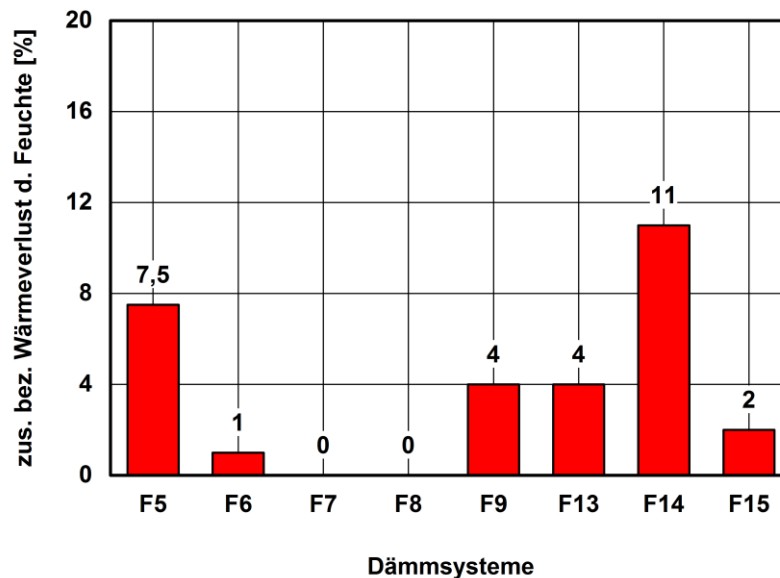


Bild 157:  
Zusätzlicher bezogener Wärmeverlust mit Berücksichtigung der Feuchte im Dämmstoff.

Feld 7 und 8 zeigen keinen nennenswerten Unterschied zwischen der Betrachtung mit und ohne Feuchteinfluss. Das liegt vor Allem daran, dass sie als Trockenbausystem mit einer variablen Dampfbremse ausgerüstet sind, die eine Auffeuchtung aus der Raumluft vermeiden. Somit ergeben sich keine hohen Feuchten im Dämmstoff, weshalb kaum ein Feuchteinfluss zu verzeichnen ist. Für Perlite (Feld 6) liegt ein etwas höherer Sorptionsfeuchtegehalt vor, weshalb die Feuchtezunahme bereits bei niedrigeren Luftfeuchtegehalten einsetzt und so früher die Wärmeleitfähigkeit ansteigt. Schilfrohr auf Feld 14 hat durch seine feste Dampfbremse ungünstige Voraussetzungen für die Austrocknung in den Raum. Dadurch stellt sich ein höherer Feuchtegehalt in der Konstruktion ein. Den zweithöchsten Feuchteinfluss weist System F5 mit seinem diffusionsoffenen Aerogeldämmputz auf, gefolgt von ebenfalls diffusionsoffenen aber kapillaraktiven Minerale Dämmplatte auf Feld 13. Die Aerogeldämmplatte auf Feld 9 hat den gleichen Feuchteinfluss wie F13, ohne Kapillaraktivität aber dafür höherem Diffusionswiderstand. Die Typhaplatte auf Feld 15 zeigt nur einen geringen Einfluss, da dort insgesamt der Feuchtegehalt vergleichsweise niedrig ist (Bild 157).



Je nach Feuchtespeicherung und damit verbundener Gewichtszunahme des Dämmstoffs stellen sich andere Wärmeleitfähigkeiten ein. Die energetischen Verluste lassen sich demnach nicht pauschal über die Wärmeleitfähigkeit der Baustoffe bestimmen. Vielmehr ist es entscheidend, in welcher Einbausituation der Dämmstoff vorzufinden ist und wie er mit der anfallenden Feuchte umgeht.

## **5.10 Einfluss und Verhalten der reversiblen Trennschicht**

Der Aufbau und der Anwendungsbereich sind bereits unter Kapitel 5.6 erläutert.

### **5.10.1 Reversibles Putzsystem**

In Bild 158 sind jeweils der Temperatur- und relativer Feuchte-Verlauf in Bestandsputz und Klebemörtel an Feld 11 dargestellt. Im Winterzeitraum, wenn eine hohe Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Außenklima anliegt, ist der thermische Einfluss des Putzsystems anhand der Verläufe gut ablesbar. Die betrachtete Schicht hat einen rechnerischen R-Wert von  $R=0,12 \text{ m}^2\text{K/W}$ . Der hier aufgebrauchte Aerogeldämmputz kommt mit einer Dicke von 45 mm auf einen R-Wert von  $1,5 \text{ m}^2\text{K/W}$ . Die reversible Schicht erhöht den Wärmedurchlasswiderstand also nochmals um fast 10 %.

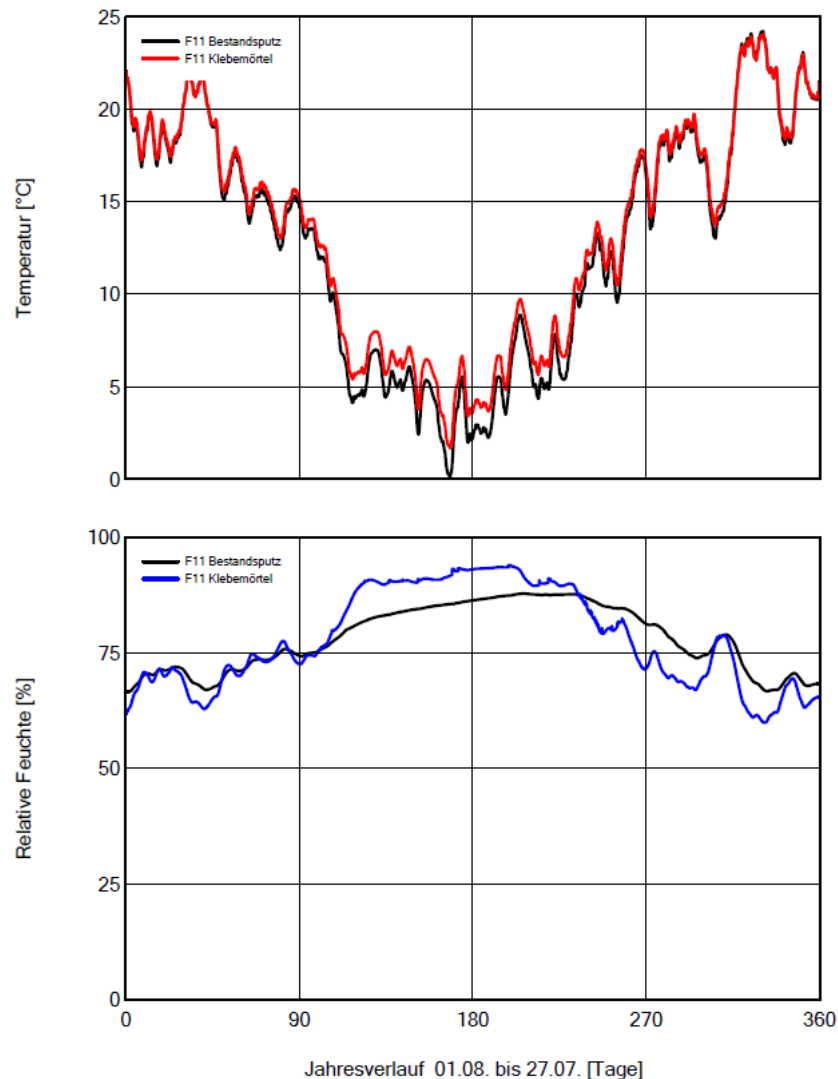


Bild 158:

Jahresverlauf der Temperatur (oben) und der relativen Feuchte (unten) im Klebermörtel und im Bestandsputz im eingeschwungenen Zustand.

Der Verlauf der relativen Feuchte zeigt, dass im Winter die relative Feuchte im Kleber deutlich über die des Bestandsputzes steigt, obwohl in diesem eine niedrigere Temperatur anliegt. Das bedeutet eine Differenz in der absoluten Feuchte. Als hygrisch relevant ist hier die Schicht des Cyclododecan zu betrachten. Cyclododecan weist eine sehr hohe Dampfdiffusionswiderstandzahl von  $\mu = 370$  auf. Die Auftragsdicke liegt in etwa bei 0,5 mm, wodurch der Einfluss zwar gering aber dennoch beobachtbar ist. Cyclododecan hat somit einen  $s_d$ -Wert von 0,185 m, zusammen mit den Anteilen aus den zwei Mörtelschichten ergibt sich ein  $s_d$ -Wert von 0,238 m.

Somit lässt sich dem reversiblen Aufbau eine positive Wirkung für den Bestandsputz zuschreiben. Die Feuchtebelastung aus dem Innenraumklima wird vor allem im Winterhalbjahr im unempfindlichen Bereich des Klebemörtels zu-

rückgehalten. Ohne den vorhandenen Diffusionswiderstand des reversiblen Aufbaus würde der Feuchtegehalt des Bestandputzes ansteigen.

Im Sommerhalbjahr lässt sich das Gegenteil beobachten. Die Umkehr der Dampfdiffusion lässt Feuchtigkeit aus dem Mauerwerk in den Dämmbau wandern. Während der Klebemörtel relativ schnell auf das Innenklima reagieren kann, insbesondere aufgrund des diffusionsoffenen Dämmputzes, ändert sich das Feuchteniveau im Bestandputz nur träge.

Das somit insgesamt trägere Feuchteverhalten im Bestandputz kann hier als positiver Effekt für die schützenswerte Oberfläche gewertet werden. Die raschen klimabedingten Feuchteänderungen werden durch das Mischmauerwerk mit seiner hohen Speichermasse auf der einen Seite und dem diffusionshemmenden reversiblen Aufbau auf der anderen Seite gepuffert. Der Bestandputz hat somit einen gleichmäßigeren Feuchtegehalt und sein Gefüge ist weniger dem Aufweichen und Trocknen ausgesetzt und somit auch einem geringeren Risiko von Schädigung, wie unter dem Aspekt der Temperaturschwankungen unter 5.9.5 bereits beschrieben.

### 5.10.2 Japanpapier

Japanpapier ist in der Restaurierung ein häufig eingesetztes dünnes Papier zum Schutz von Oberflächen und temporären Sicherungsmaßnahmen. Der Schutz der Bestandswand durch Japanpapier hat nur geringe Einflüsse auf das hygrothermische Verhalten der Gesamtkonstruktion. Es lassen sich weder thermische noch hygri-sche Einflüsse anhand von Messdaten oder Berechnung darstellen. Die Materialkennwerte des Papiers beschreiben den geringen Einfluss deutlich. Eine Diffusionswiderstandszahl von ca. 1, sowie eine geschätzte Wärmeleitfähigkeit von 0,2 W/mK haben bei einer Materialstärke von ca. 0,1 mm einen vernachlässigbaren Einfluss.

Somit lässt sich über das Japanpapier aber ein Vergleich zum reversiblen Putzsystem ziehen. Die Kaschierung mit Papier und Tylose verzichtet auf den Einsatz des Cylododecans, dadurch entfällt hier die diffusionshemmende Wirkung wie sie beim Putzsystem nachgewiesen ist. Dafür greifen die Trockensysteme von vornherein auf eine raumseitig der Dämmung angebrachte Dampfbremse zurück.

## 5.11 Lebenszyklusbetrachtung (AP 8)

Gebäude spielen eine Schlüsselrolle in der Klimaschutz-Thematik. Der hohe Sanierungsbedarf von Gebäuden, insbesondere Altbauten, und das große Potential der Energieeinsparung von Sanierungen, auch bei denkmalgeschützten Gebäuden, erfordern ein besonderes Augenmerk. Dabei unterscheiden sich Dämmmaterialien zum einen hinsichtlich ihrer Umweltauswirkungen bzw. ihres Ressourcenverbrauchs während Herstellung, Nutzung und Lebensende. Dieser Aspekt wird im technischen Anhang anhand einer Vorstudie über existierende Ökobilanz-Datensätze von geeigneten Dämmmaterialien und anhand einer neu erstellten Ökobilanz von Typha-Dämmstoff näher beleuchtet.

### 5.11.1 Vorstudie Ökobilanz-Datensätze Dämmmaterial

Um die Nachhaltigkeit von Bauprodukten bewerten zu können, müssen ökologische ebenso wie ökonomische und soziale Aspekte betrachtet werden. Die ökologischen Aspekte lassen sich dabei unter anderem mit Hilfe einer Ökobilanz bewerten. Um eine Vergleichbarkeit einzelner Bauprodukte bzw. deren ökobilanziellen Ergebnisse zu ermöglichen, müssen die Berechnungen nach DIN EN ISO 14040 und 14044 [10], [11] erfolgen. Dies war innerhalb des Projektes nicht durchführbar. Um jedoch einen ersten Eindruck der im Projekt betrachteten Innendämmmaterialien bezüglich ihrer umweltlichen Emissionen zu bekommen, wurden bereits bestehende Datensätze der Ökobau.dat [10], Umweltproduktdeklarationen sowie weitere Literaturdaten untersucht. Bei folgendem Vergleich, ist daher zu beachten, dass den Ergebnissen teilweise unterschiedliche Quellen zugrunde liegen. Es wurden zudem lediglich die Herstellungsphasen A1-A3 nach DIN EN 15978 [13] in die Bewertung miteinbezogen, da die Nutzungsphase und die Phasen des Lebensendes (Modul B, C und D nach DIN EN 15978) nicht in allen ökobilanziellen Untersuchungen enthalten sind. Dies ist bei der Bewertung zu beachten, da sich die Ergebnisse insbesondere durch die Betrachtung des End-of-Lifes signifikant ändern können.

Im Bild 159 ist als wesentliches Ergebnis das Treibhauspotential des unterschiedlichen Dämmmaterials inklusive des gesamten Schichtaufbaus dargestellt. Bei diesen Ergebnissen ist zu berücksichtigen, dass einen nicht unerheblichen Einfluss die Art der reversiblen Schicht hat. Die Trockenbausysteme haben diesbezüglich durch die Verwendung des Japanpapiers anstelle der reversiblen Mörtelschicht deutliche Vorteile. Zu beachten ist auch, dass hier nur der Regelquerschnitt berücksichtigt wird. Die bei den Trockenbausystemen verwendeten Befestigungsprofile, die in der Gesamtbetrachtung durchaus einen nennenswerten Anteil haben, sind einberechnet worden.

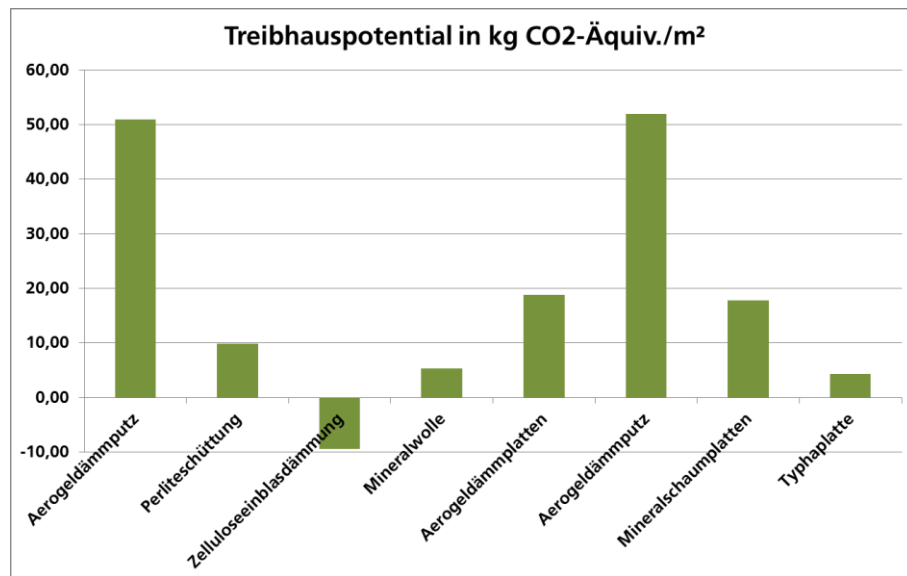


Bild 159:  
Ergebnisse Treibhauspotential der einzelnen Dämmmaterialien inklusive des gesamten Schichtaufbaus.

### 5.11.2 Ökobilanz des Typha-Dämmstoffs

Die hier vorliegende ökobilanzielle Betrachtung der Innendämmungsplatten aus Typha bezieht sich auf die Bereitstellung und den Transport der Vorprodukte, sowie auf die Produktion des Endproduktes. Alle relevanten Material- und Energieflüsse des Herstellungsprozesses werden in die ökobilanzielle Betrachtung miteinbezogen. Die Daten für die Modellierung der Herstellung des Typha-Dämmmaterials stammen vom Hersteller. Für Parameter, die durch Primärdaten nicht abgedeckt werden können, werden Literatur- und Datenbankdaten genutzt oder es werden durch Erfahrungswerte gedeckte Annahmen getroffen.

Nach der Auswertung dieses Basisszenarios, das der jetzigen Herstellung der Magnesitgebundenen Typhaplatte entspricht, erfolgt eine Sensitivitätsberechnung mithilfe von acht Szenarien:

- *Szenario 1*  
Typhaernte in Deutschland mit Hilfe einer dieselbetriebenen Erntemaschine. Der Transport von Rumänien entfällt, die verbleibende Transportstrecke innerhalb Deutschlands wird auf 200 km festgesetzt.
- *Szenario 2*  
*Magnesiumsulfat wird anstelle von Magnesiumchlorid verwendet. Ersteres wird als Nebenprodukt der Kalisalzhherstellung angenommen und geht somit lastenfrei in die Bilanzierung ein.*

- Szenario 3  
Lufttrocknung der Dämmplatten.
- Szenario 4  
Der gesamte Energieverbrauch bei der Herstellung wird ausgehend vom Basisszenario halbiert, um herauszufinden wie stark sich der Prozess dadurch optimieren lässt.
- Szenario 5  
Kombination der Szenarien 1, 2 und 3.
- Szenario 6  
Kombination der Szenarien 1 und 2.
- Szenario 7  
Kombination der Szenarien 2 und 3.
- Szenario 8  
Kombination der Szenarien 2 und 4.

Beim Treibhauspotential zeigt sich das Wachstum der Pflanzen in der Lebenszyklusphase „Anbau und Ernte“ mit einem negativen Beitrag, der die Einbindung von CO<sub>2</sub> während des Pflanzenwachstums widerspiegelt. Die Beiträge von Transport und Produktion, verursacht durch die Verbrennung fossiler Kraftstoffe, spielen eine untergeordnete Rolle.

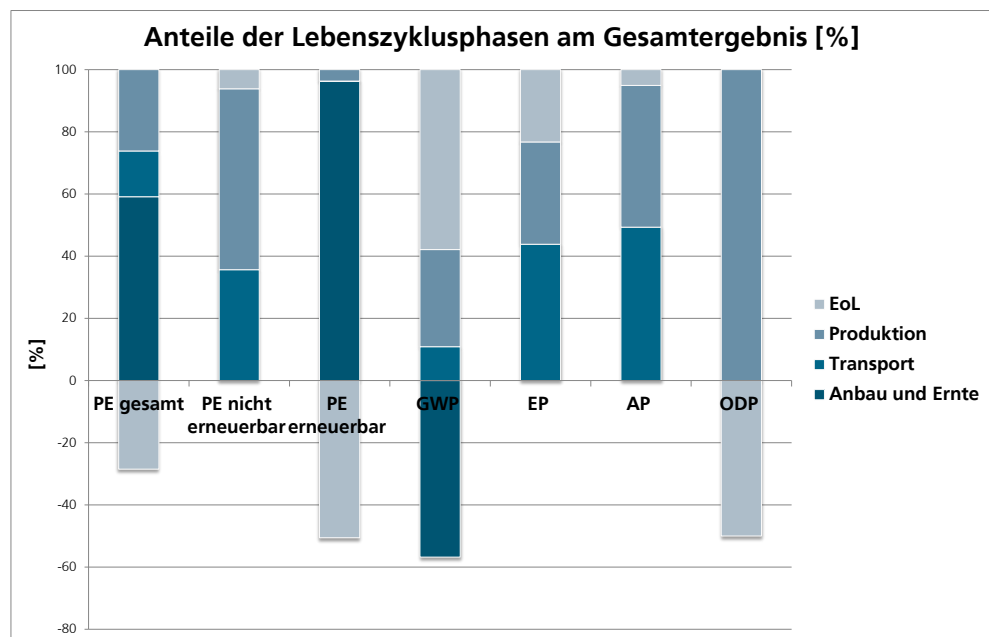


Bild 160:  
Ergebnisse LCA Typhadämmstoff Lebenszyklusphasen relativ.

Die folgende Abbildung zeigt das Treibhauspotential der einzelnen Szenarien, wobei die Szenarien 1-4 einzelne Änderungen enthalten, und die Szenarien 5-8 Kombinationen der vorangegangenen darstellen.

Szenario 1 bezieht sich auf die Verkürzung des Transportweges von 1670 km auf 200 km. Trotz der in Deutschland zusätzlich anfallenden maschinellen Ernte reduzieren sich die Umweltwirkungen um bis zu ca. 30 %. Die Szenarien 2-4 beziehen sich auf Veränderungen im Produktionsprozess. Wie oben beschrieben nimmt die Herstellung des Magnesitklebers innerhalb der Produktion eine dominante Rolle ein. Das spiegelt sich auch in den dargestellten Ergebnissen: die Szenarien 3 und 4 bewirken keine signifikanten Änderungen der Ergebnisse, der Ersatz von Magnesiumchlorid durch Magnesiumsulfat zeigt jedoch deutliches Verbesserungspotential in allen Kategorien außer dem erneuerbaren Primärenergiebedarf. Dieses hohe Verbesserungspotential beim Magnesitkleber spiegelt sich auch in allen in aufgeführten Szenarien wider, da das Szenario 2 in allen hier vorkommenden Szenarien mit enthalten ist.

Differenzierter betrachtet beinhaltet das Szenario 5 (Anbau und Ernte in Deutschland, Magnesiumsulfat, Lufttrocknung) die höchsten Einsparpotentiale, gefolgt vom Szenario 6 (Anbau in Deutschland, Magnesiumsulfat). Die Szenarien 7 und 8, die zusätzlich zum Magnesiumsulfat die Szenarien 3 und 4 kombinieren, zeigen aus den oben genannten Gründen geringere Einsparpotentiale.

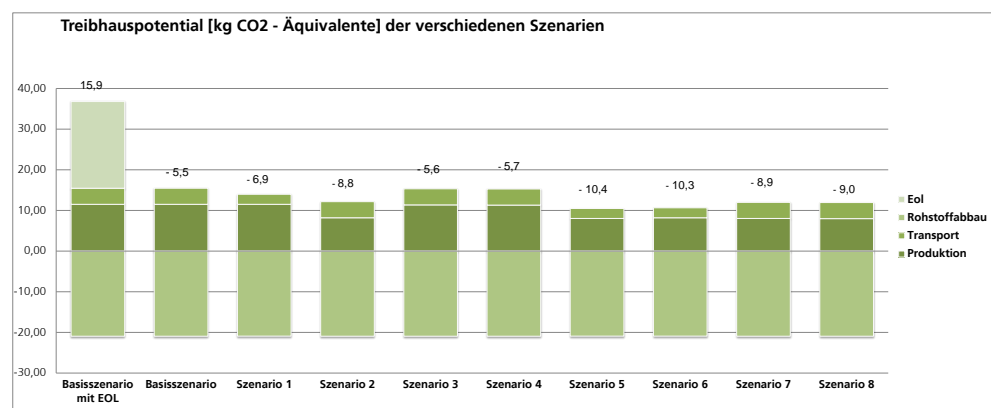


Bild 161:  
Ergebnisse Treibhauspotential für alle betrachteten Szenarien.

## 5.12 Reversibilität und Bauteilkontrolle (AP 9)

Ein zentraler Teilbereich des Forschungsprojektes ENOB-Energetische Untersuchung und Optimierung von Innendämmungen beinhaltet die Reversibilität. Der einwandfreie Rückbau sowie die schadensarme Montage einer Sanierungs- bzw. Dämmungsmaßnahme im Bereich der denkmalgeschützten Bauten kann für die Entscheidung zur Durchführung der Maßnahme ein ausschlaggebendes Kriterium sein. Daher erfolgte die Ausarbeitung von Konzepten für die reversible und beschädigungsarme Montage der Innendämmungen.

Die für die meisten Dämmvarianten obligatorischen Verdübelungen bedeuten eine gewisse Beschädigung der darunterliegenden Farbschichten, evtl. vorhandenen Malschichten, historischen Putzen und Mauerwerk. Eine Reduzierung oder, soweit sinnvoll möglich, vollständiger Verzicht von mechanischen Befestigungen an sensiblen Bereichen wird in diesem Projekt angestrebt.

Restauratoren der Wandmalerei haben unterschiedliche Methoden entwickelt, die bestehende Fassungen oder Malschichten auf Putzen schützen und sie somit als Zeitzeugnisse erhalten. Dieses vorhandene Wissen soll für dieses Projekt genutzt werden und soweit möglich auf die reversible und schadens-arme Montage von Innendämmsystemen übertragen werden.

Denkbar ist auch eine Kaschierung, die auf den historischen Putz aufgelegt wird und als Trennschicht für die neue Innendämmung dient. Diese Methode stammt ursprünglich aus der Wandmalerei-Konservierung und soll hier auf die neue Fragestellung der reversiblen Anbringung von Innendämmung angewandt werden. Geplant ist in Zusammenarbeit mit den Herstellerfirmen hier anwendbare Lösungen oder Produktverbesserungen in diesem Projekt anzustoßen bzw. zu entwickeln.

Für das Projekt wurde ein externer, im Schutz von Wandmalereien erfahrener, Restaurator hinzugezogen, um mit dem Fraunhofer IBP und ggf. beteiligten Firmen gemeinsam geeignete Lösungen für den schadensfreien Rückbau von Innendämmungen zu erarbeiten.

Um die bestehenden Oberflächen der denkmalgeschützten Alten Schäfflerei bei den ersten Untersuchungen diesbezüglich nicht zu verletzen bzw. zu zerstören, wurden hierzu Voruntersuchungen an geeigneten Flächen auf dem Freilandversuchsgelände des Fraunhofer IBP in Holzkirchen und im Labor durchgeführt.

Für die Beurteilung einer möglichen Schadensentwicklung nach der Applikation der Dämmung in der Alten Schäfflerei erfolgt eine Untersuchung bzw. Kontrolle in über Revisionsöffnungen. Beurteilt werden Veränderungen im Feuchtegehalt, Materialentfestigungen infolge hoher Feuchteeinwirkung und Schimmelpilzansiedlungen.

Nach der Untersuchungs- und Messphase werden die unterschiedlichen Systeme in Teilen wieder abgenommen. Es erfolgt eine abschließende Begutachtung und Dokumentation zu Reversibilität und Bauteilkontrolle der einzelnen System und Bauteilanordnungen (Wanddecken, Laibungen, Einbindende Wände,...).

### **5.12.1 Durchführung der Untersuchungen zur Reversibilität**

In diesem Teilbereich des Projekts wird die Reversibilität der einzelnen Innendämmsysteme hinsichtlich der Oberflächenbeschaffenheit der Bestandswände nach dem Rückbau der Systeme für den Einsatz in der Baudenkmalpflege ge-





Farbmatrix aus traditionellen Farbmitteln, die in Baudenkmalern häufig vorkommen, aufgebracht. Diese hat die Maße 60 x 60 cm. Ein kleines Farbfeld entspricht 20 x 20 cm. Bild 163 veranschaulicht den Aufbau dieser Matrizes. Vor dem Auftrag der Farbmatrize erfolgte die Trockenreinigung und die Konsolidierung der Bestandswandoberflächen. Die Oberfläche wurde trocken mit dem Pinsel gereinigt. Die Festigung des Untergrundes erfolgte mit Celluloseleim dünnflüssig K 300, Methyl-hydroxyethyl-cellulose im Mischungsverhältnis Tylose : Wasser : Ethylen = 1:40:20. Abstehende Schollen wurden zudem mit Ethylen vorbenetzt, im Mischungsverhältnis Ethylen: Wasser = 1:3. Die Fläche der Farbmatrix wurde mit Emulsionsfarbe Weiß grundiert. Die Farben wurden, nach Bindemittel unterschieden in den Farbtönen Englischrot, Goldocker und Kobaltblau, wie folgt von oben nach unten angeordnet aufgetragen:

Kalk-Kasein-Farbe  
 Emulsionsfarbe  
 Zelluloseleim

Näheres zu den einzelnen Farben ist den Datenblättern im Anhang zu entnehmen.

<b>01.01</b>	<b>01.02</b>	<b>01.03</b>
<b>01.04</b>	<b>01.05</b>	<b>01.06</b>
<b>01.07</b>	<b>01.08</b>	<b>01.09</b>

**01.01:** großes Wandfeld 01,  
 davon kleines Feld 01

Bild 163:  
 Einteilung und Benennung der Farbmatrixfelder, Beispiel Wandfeld 01.

Der reversible Rückbau der Innendämmsysteme wird durch die Aufbringung einer Trennschicht zwischen Bestandswand und der ersten Schicht der herkömmlichen Innendämmsysteme erreicht. Der reversible Schichtenaufbau ist zu unterscheiden in zwei unterschiedliche, grundlegende Systeme. Der Unterschied besteht in der ersten Kontaktfläche zwischen der Bestandswand und den Schichten des herkömmlichen Aufbaus des Innendämmsystems.

Es kommen zwei unterschiedliche bauliche Varianten der reversiblen Montage zum Einsatz:

- Die erste Variante besteht aus einem neu entwickelten, reversiblen Trägerputzsystem unter Einsatz des flüchtigen Bindemittels Cyclododecan.
- Die zweite Variante nutzt Japanpapier als Kaschierung. Diese kommt insbesondere bei Trockenbausystemen und vor die Wand gesetzten Systemen zum Einsatz.

### 5.12.3 Aufbau des reversiblen Mörtelsystems

Bild 164 zeigt den Schichtenaufbau des reversiblen Mörtelsystems bestehend aus Cyclododecan, welches ca. 0,2 mm stark (in WUFI® aus rechtechnischen Gründen mit einer Schichtdicke von 1 mm eingegeben), in zweimaligem Auftrag, aus der Schmelze, mit einer beheizbaren Spritzpistole aufgetragen wurde. Bild 165 und Bild 166 zeigen den Auftrag. Danach wurde ein 2-5 mm starker Latex-Schaummörtel (Nr. 20) und eine silikatisch gebundene Deckschicht, (Leichtmörtel Nr. 38), ca. 5-15 mm aufgebracht, siehe Bild 167.

Cyclododecan ( $C_{12}H_{14}$ ) ist ein gesättigter, alicyclischer Kohlenwasserstoff. Der Schmelzpunkt liegt bei 58-61 °C. Lösbar ist es in unpolaren Lösungsmitteln. Es sublimiert bei Raumtemperatur. Die Dicke des zuvor auf einer Fläche aufgetragenen Films ist entscheidend für die Geschwindigkeit der Sublimation. Beim Erstarrungsvorgang kommt es zur Bildung von nadelförmigen Kristallen. Die Art der Kristallbildung kann durch die Schnelligkeit der Abkühlung des Filmes beeinflusst werden. Der Auftrag von Cyclododecan kann in Form eines Sprays, reiner Schmelze oder in Lösung erfolgen [3].

In der Altbausanierung findet es Anwendung als temporärer Schutz von historischen Oberflächen. Als Teil des reversiblen Schichtenaufbaus, der in Benediktbeuern durchgeführten Versuchsreihe, erfüllt Cyclododecan ebenfalls eine temporäre Schutzfunktion.

### Variante: Feld 11 Aerogeldämmputz



	- *Kalkputz	0,02 m
	- *Mischmauerwerk	0,55 m
	- *Kalkputz	0,02 m
	- *Cyclo	0,001 m
	- *F120_B_Mörtel 20 (Latexschaummörtel)	0,005 m
	- *F120_A_Mörtel38 (reversibel)	0,005 m
	- *Klebemörtel	0,006 m
	- *Aerogeldämmputz	0,05 m
	- *Rotkalkgrund	0,005 m

Gesamtdicke: 0,66 m  
 Wärmedurchlasswiderstand: 2,26 m<sup>2</sup>K/W  
 U-Wert: 0,41 W/m<sup>2</sup>K

Bild 164:  
 Beispiel für den Einsatz des neu entwickelten, reversiblen Mörtels, hier mit Ae-  
 rogel-Dämmputz, Feld 11.



Bild 165:  
Auftrag Cyclododecan als Schmelze mit einer beheizten Sprühpistole und Luftdruck.



Bild 166:  
Farbmatrizes während Auftrag des Cyclododecans.



Bild 167:  
Auftrag des Latex-Leichtmörtels.

#### 5.12.4 Ablauf des Versuches

Die Reinigung der gesamten Bestandswand erfolgte trocken mit dem Pinsel oder dem „akapad“ Schwamm weich. Wo notwendig wurden Ablösungen der Malschichten mit Celluloseleim gefestigt. Anschließend erfolgte der bereits genannte partielle Auftrag der Farbmatrix. Bild 168 und Bild 169 zeigen exemplarisch Feld 12 und 13 vor dem Einbau der Innendämmung.



Bild 168:  
Feld 12 und 13 (Wandabschnitt neben dem linken Fenster und rechte Wand)  
vor dem Einbau der Innendämmung, Oktober 2013.



Bild 169:  
Wandansicht mit Testfarbfelder zur Überprüfung der Reversibilität an Feld 12  
und 13, vor Einbau der Innendämmungen.

Nach der Vorbereitung der Felder wurden die Messtechnik, sowie das Innen-  
dämmsystem, eingebaut. Erläuterung hierzu sind dem gesonderten Kapitel zu



entnehmen. Die Mindestmessdauer erstreckte sich über ein Jahr. Insbesondere im Winter wurde dafür eine erhöhte Feuchtelast im Raum über einen Raumluftbefeuchter erzeugt (20 °C bei 45-50 % r. F).

### 5.12.5 Partielle Öffnung des Versuchsfelds 13 mit reversiblen Mörtel

Zur Überprüfung der bauphysikalischen Wirkungsweise und der Reversibilität wurden die Innendämmungen im Frühjahr 2016 partiell im Bereich der Farbmatriizes geöffnet. Bild 170, Bild 171 und Bild 172 zeigen exemplarisch Bearbeitungsschritte während des Rückbaus des Innendämmsystems von Feld 13.

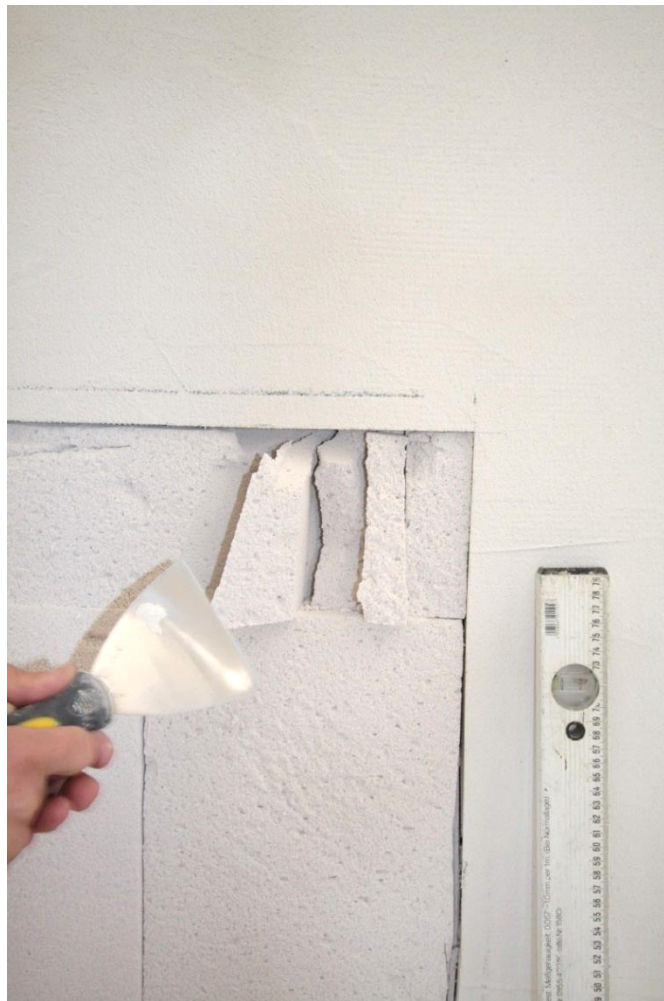


Bild 170:

Partielle Versuchsfeldöffnung, Feld 13 mit Mineraldämmplatten. Die Platten lassen sich leicht mit einer Spachtel zerteilen und abnehmen.





Bild 171:  
Partielle Versuchsfeldöffnung, Feld 13. Unter dem Dämmstoff wird der reversible Mörtel sichtbar und erste Bereiche der verdeckten Farbfassung / Farmatrix.



Bild 172:  
Restauratorische Abnahme des Latex-Leichtmörtels mit dem Skalpell, am Feld 13.01.

### 5.12.6 Farbmatrix am Beispiel Feld 13

In Bild 173 ist die Farbmatrix vor dem Einbau der Innendämmung abgebildet. Im direkten Vergleich darunter ist in Bild 174 die gleiche Farbmatrix abgebildet, jedoch nach der partiellen Bauteilöffnung. Die Dauer der Innendämmanwendung betrug knapp 2 ½ Jahre. In der unteren Hälfte des Feldes (Bild 174) sind noch Reste des flüchtigen Bindemittels Cyclododecan zusehen, Detailaufnahmen siehe Bild 175 und Bild 176. Bis auf das Feld links unten (13.07) ließen sich die Farbfelder gut freilegen.

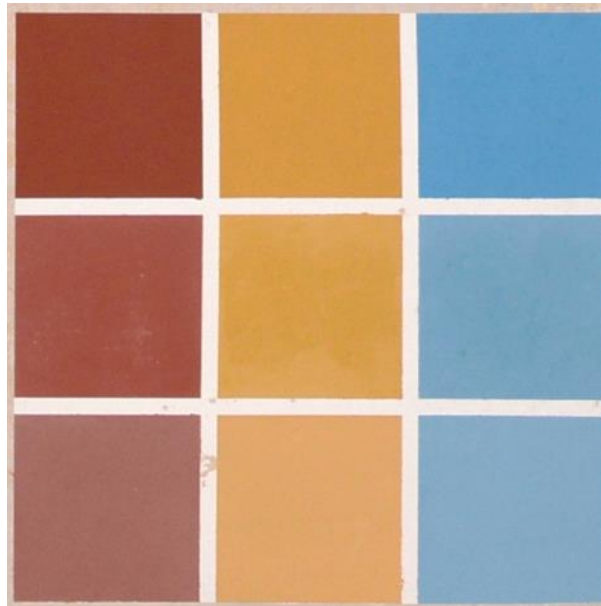


Bild 173:  
Farbmatrix vor dem Einbau der Innendämmung, Feld 13.



Bild 174:  
Farbmatrix nach partiellem Rückbau der Innendämmung, Feld 13



Bild 175:  
Detail, Farbmatrix nach partiellem Rückbau der Innendämmung mit Weiß-

schleier durch das noch aufliegende Cyclododecan.



Bild 176:  
Detail, Farbmatrix nach partiellem Rückbau der Innendämmung mit Resten des Cyclododecans und des Latexmörtels.

### 5.12.7 Ergebnisbeschreibung der partiellen Öffnung des Innendämmsystems Feld 13

#### Latexmörtel

Pro kleines Feld der Farbmatrix wurde für die Abnahme der Latexschicht ca. 5 - 15 Minuten benötigt. Die Abnahme erfolgte unter der zur Hilfenahme eines Skalpellmessers. Der Latexmörtel konnte leicht abgenommen werden, wenn dieser gleichmäßig und mit einer Dicke von 3 mm aufgetragen wurde. Ein geringerer Schichtauftrag von < 3 mm ermöglichte keine homogene Abnahme, es kam zu Latexrückständen auf der Farbmatrixoberfläche. Ein Schichtauftrag von einer Dicke von deutlich > 3 mm führte zu einer Versteifung der Schicht. Bei der Abnahme kam es zu Rissbildungen.

#### Cyclododecan

Auf Bild 174 ist das Cyclododecan als weißer, milchiger Belag auf der gelben Farbschicht zu erkennen. Ebenfalls sind kleine, weiße, kugelförmige Materialien zu erkennen. Dies sind verbleibende Rückstände vom Latexmörtel nach dessen Abnahme. Das Cyclododecan hatte sich, bis zum Zeitpunkt der Freilegung, nur teilweise verflüchtigt. Im genannten Beispiel ist es noch zu ca. 30 % vorhanden. Die Verflüchtigung des Cyclododecans lässt sich unter anderem durch das sehr diffusionsoffene Innendämmmaterial (Minerale Dämmplatte) erklären.

## Farbmatrix

Allgemein besteht ein Verlust der aufgetragenen Farbschicht von ca. 10 % der gesamten Farbmatrix im Feld 13.

Feld 13.07 wies eine starke Haftung der aufgetragenen Farbe mit der abgenommenen Latexmörtelschicht auf, wodurch die Farbschicht partiell mit der Latexschicht abgenommen wurde. Die Bestandswand wies hier, im Gegensatz zu den anderen Feldern dieser Matrix, erhöhte Feuchtwerte auf. Vermutlich konnte die aufgetragene Farbe, vor Auftrag des Cyclododecans, nicht ausreichend trocknen, wodurch es folglich zur verminderten Haftung mit dem Untergrund und zum Verbund des Cyclododecans und des Latexmörtels mit der Farbschicht kam.

Feld 13.09 wies ebenfalls einen partiellen Verlust der aufgetragenen Farbschicht auf. Dieser ist jedoch deutlich geringerer als bei Feld 13.07.

## Schimmelpilz

Feld 13.01 weist eine geringe Bildung von Schimmelpilz schwarzer Farbigkeit, im Bereich ohne bestehenden Cyclododecanauftrag, auf. Bereiche mit noch verbleibendem Cyclododecanauftrag weisen keinen Schimmel auf. Vermutlich waren die Schimmelsporen schon vor dem Beginn des Einbaus der Innendämmungen in der Bestandswand vorhanden.

## Fazit zur Reversibilität des untersuchten Systems am Feld 13

Wegen lokaler instabiler Untergrundbeschaffenheit gab es an diesem Versuchsfeld partielle, sehr geringe Verluste (< 5%) im Bereich der originalen Malerschicht. Die originalen Putze blieben komplett unbeschädigt. Das vorliegende System ist gut für stabile Untergründe geeignet, was auch die Versuchsplatten, die parallel hergestellt wurden und am Fraunhofer IBP archiviert sind, zeigen.

### 5.12.8 Innendämmung in Trockenbau mit Japanpapier als kaschierende Trennschicht

Bild 177 zeigt den für die hygrothermische Berechnung implementierten Aufbau bei der Verwendung von Japanpapier als kaschierende Trennschicht zwischen Bestandswand und Innendämmsystem. Dieses wurde in zwei Lagen mit Hilfe von Celluloseleim dünnflüssig K 300 auf die Wand aufgebracht. Der Systemaufbau ist hier am Beispiel Mineralwolle dargestellt. An der Stelle der Mineralwolle wurde analog Perlite-Schüttung bzw. Zellulose-Flocken in zwei weiteren Trockenbausystemen eingebaut.

Variante: Feld 08 Mineralwolle

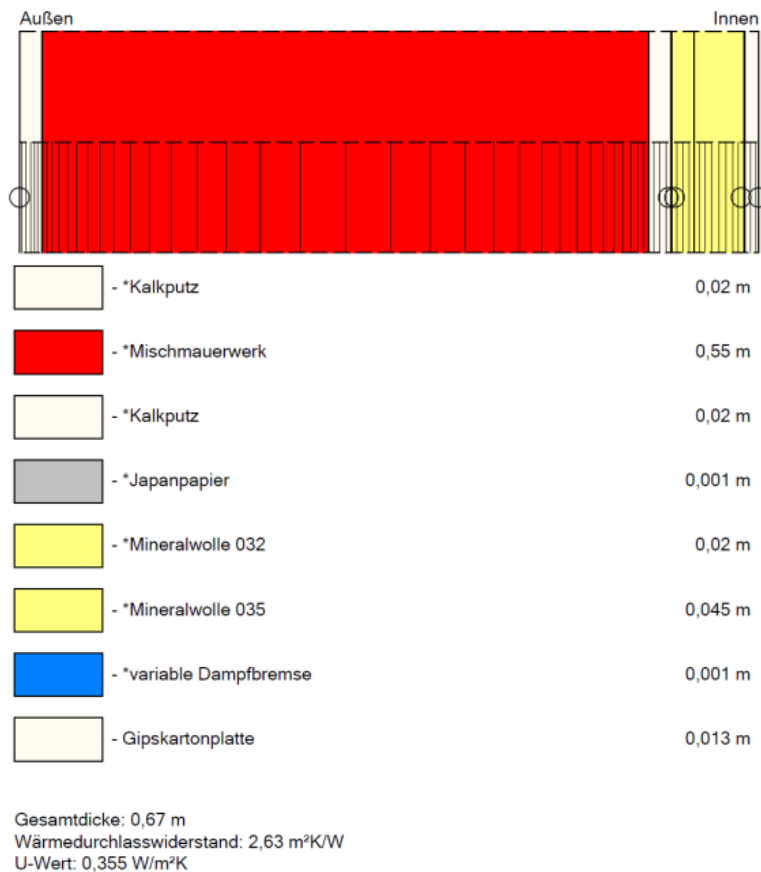


Bild 177:

Beispiel für den reversiblen Aufbau mit Japanpapier in Trockenbauweise, Feld 08, am Beispiel Mineralwolle, analog für Perlite-Schüttung bzw. Zellulose-Flocken. (Bild: Pfundstein 2015)

### 5.12.9 Partielle Öffnung eines Versuchsfeld mit Japanpapier-Kaschierung,

Am Beispiel Perlite-Schüttung in Trockenbauweise, Feld 6, wird im Folgenden die partielle Öffnung eines Versuchsfeldes mit Japanpapier-Kaschierung beschrieben.

Zur Überprüfung der bauphysikalischen Wirkungsweise und der Reversibilität wurden die Innendämmungen im Sommer 2016 partiell im Bereich der Farbmatrize geöffnet. Bild 178 bis Bild 181 zeigen exemplarisch einige Bearbeitungsschritte während des Rückbaus des Trockenbau-Innendämmsystems mit Perlite-Schüttung und Japanpapier-Kaschierung als temporärem Schutz der originalen Fassungen an Feld 6. In Bild 182 ist die Farbmatrize vor Einbau Innendämmung und in Bild 183 nach Ende des Versuchs dargestellt.





Bild 178:  
Partielle Versuchsfeldöffnung, nach Entfernen der Gipskartonplatte, Feld 6.



Bild 179:  
Partielle Versuchsfeldöffnung, Feld 6.



Bild 180:  
Partielle Versuchsfeldöffnung nach Entnahme des Dämmstoffs, vor Abnahme  
des Japanpapiers, Feld 6.



Bild 181:  
Partielle Versuchsfeldöffnung – Abnahme des Japanpapiers, Feld 6.





Bild 182:  
Farbmatrix vor Einbau der Innendämmung, Feld 6.

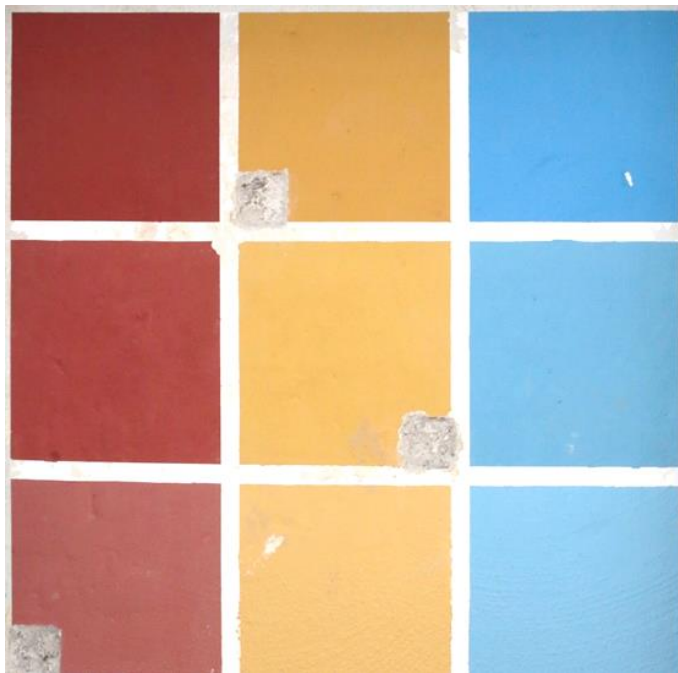


Bild 183:  
Farbmatrix nach partiellem Rückbau der Innendämmung, Feld 6 mit nahezu schadensfreiem Zustand der Farbfelder. Die drei größeren, quadratischen Fehlstellen im Putz sind durch Probennahmen und Messungen der Haftzugfestigkeit entstanden, nicht durch die Freilegung.

## 5.13 Ergebnisbeschreibung der partiellen Öffnung des Innendämmsystems mit Japanpapier-Kaschierung

### Japanpapier

Pro kleines Feld der Farbmatrix wurde für die Abnahme des Japanpapiers eine Zeit von maximal einer Minute benötigt. Die Abnahme des Japanpapiers gestaltete sich problemlos und erfolgte unter zur Hilfenahme eines Wasserzerstäubers. Die Einbringung von Feuchtigkeit wurde hierbei auf ein Mindestmaß beschränkt. Die Japanpapierlagen wurden mit einem Skalpellmesser seitlich der Farbmatrix durchtrennt. Danach wurde das Japanpapier vorsichtig von der Farbmatrix abgenommen.

### Farbmatrix

Während der Abnahme des Japanpapiers kam es im Matrixfeld 06.08 zu einem geringen Verlust des Farbauftrages. Die Verluste des Farbauftrages in den Feldern 06.02, 06.05, 06.07, seitlich der quadratischen Entnahmestellen, haben ihre Ursachen in den Einfräsungen zur Materialentnahme zur Bestimmung der Materialfeuchte im Labor. Ergebnisse dieser Beprobung sind dem entsprechenden Bericht zu entnehmen.

### Schimmelpilz

Nach partieller Bauteilöffnung von Feld 6 wurde kein Schimmelpilz festgestellt.

### Fazit zur Reversibilität des untersuchten Systems

Die originalen Putze und Farbschichten blieben nahezu unbeschädigt. Das vorliegende System ist gut für stabile wie auch fragile Untergründe geeignet.

## 5.14 Zusammenfassung der wissenschaftlich technischen Ergebnisse des Forschungsprojekts

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Untersuchungen zusammengefasst für jeden Dämmstoff einzeln bewertet.

Die **Aerogelputze** (die Varianten auf Feld 5 und auf Feld 11 ergeben aufgrund ihrer sehr ähnlichen Eigenschaften das gleiche Ergebnis in der Bewertung) weisen vor allem große Vorteile hinsichtlich der energetischen und der denkmalpflegerischen Aspekte auf. Aus bautechnischer und denkmalpflegerischer Sicht sind der materialgleiche Einbau in den Laibungen und die einfache Anwendung bei komplizierten Geometrien, wie z.B. ein abgesetzter Rundbogensturz, vorteilhaft. Auch in Bezug auf die bautechnischen Aspekte ergibt sich eine gute Beurteilung. Aufgrund der hohen Einbaufeuchte sowie der Diffusionsoffenheit in Verbindung mit der Hydrophobizität ergeben sich ungünstigere Beurteilungen hinsichtlich der feuchtetechnischen Aspekte.

Die **Trockenbauwand mit Perlite** weist vor allem große Vorteile hinsichtlich der Feuchteschutzaspekte auf. Aus bautechnischer und denkmalpflegerischer Sicht ist der Einbau bei komplizierten Geometrien, wie z.B. ein abgesetzter Rundbogensturz, aufwändig. Hier und bei den Laibungen wurde deshalb auf einen Dämmputz ausgewichen, der sinnvoller Weise materialgleich mit Dämmstoff aus Perlite hergestellt wurde. Die Verwendung einer Dampfbremse kann fehleranfällig sein, insbesondere die Anschlüsse zur Bestandswand, und wird deshalb als ungünstig eingestuft.

Auch die **Trockenbauwand mit Zellulose-Schüttung** weist vor allem große Vorteile hinsichtlich der Feuchteschutzaspekte auf. Aus bautechnischer und denkmalpflegerischer Sicht ist der Einbau bei komplizierten Geometrien, wie z. B. ein abgesetzter Rundbogensturz, aufwändig. Hier und bei den Laibungen wurde deshalb auf einen Dämmputz ausgewichen, der bei dieser Anwendung leider nicht materialgleich mit Dämmstoff aus Zellulose hergestellt wurde. Die Verwendung einer Dampfbremse kann fehleranfällig sein, insbesondere die Anschlüsse zur Bestandswand, und wird deshalb als ungünstig eingestuft.

Die Trockenbauwand mit Dampfbremse und **Mineralwolle** (Feld 8) hat vor allem große Vorteile hinsichtlich der Feuchteschutzaspekte. Aus bautechnischer und denkmalpflegerischer Sicht ist der Einbau bei komplizierten Geometrien, wie z. B. ein abgesetzter Rundbogensturz, mit Stahlprofilen aufwändig. Es erfolgte hier nur eine eingeschränkte Bewertung da in dem Testfeld keine Fensteröffnung vorhanden war. Die Verwendung einer Dampfbremse kann fehleranfällig sein, insbesondere die Anschlüsse zur Bestandswand, und wird deshalb als ungünstig eingestuft.

Die **Aerogelplatten** weisen vor allem große Vorteile hinsichtlich der energetischen und der denkmalpflegerischen Aspekte auf. Aus bautechnischer und denkmalpflegerischer Sicht sind der materialgleiche Einbau in den Laibungen und die einfache Anwendung bei komplizierten Geometrien, wie z. B. ein abgesetzter Rundbogensturz, vorteilhaft. Positiv stellt sich die Bewertung des Schimmelpilzrisikos auf der Bestandsoberfläche dar. Aufgrund der Einbaufeuchte sind einige feuchtschutztechnische Aspekte nur als mäßig einzustufen. Insgesamt können die feuchtetechnischen Aspekte jedoch als gut bewertet werden.

Die **kapillaraktiven Mineraleämmplatten** (Feld 13) zeigen vor allem Vorteile hinsichtlich der bautechnischen und der denkmalpflegerischen Aspekte. Aus bautechnischer und denkmalpflegerischer Sicht ist der materialgleiche Einbau in den Laibungen und auch bei komplizierten Geometrien, wie z. B. ein abgesetzter Rundbogensturz, zum Teil aufwändig aber problemlos möglich. Aufgrund der Diffusionsoffenheit in Verbindung mit der Kapillaraktivität ergibt sich eine mäßige Beurteilung hinsichtlich der feuchtetechnischen Aspekte. Aus energetischer und feuchtetechnischer Sicht ist das reale Dämmverhalten durch die Feuchtaufnahme etwas ungünstiger im Vergleich zum (trockenen) Laborwert.

Die Wandkonstruktion mit Dampfbremse und **Schilfrohmatten** (Feld 14) hat vor allem große Vorteile hinsichtlich der ökologischen Aspekte. Bei den Feuchteschutzaspekten schneidet der Dämmstoff aufgrund der Diffusionsoffenheit in Verbindung mit der dadurch erforderlichen Dampfbremse jedoch relativ ungünstig ab. Ebenso ist ein energetisch hohes Niveau nur mit großen Dämmstoffdicken zu erreichen. Bautechnisch ist der Einbau mit der gewählten Konstruktion besonders aufwändig, da zur Erzielung des gewünschten Wärmedurchlasswiderstandes ein zweischichtiger Aufbau mit Rahmenkonstruktion erforderlich wurde. Hinzu kommt auch hier die Problematik bei komplizierten Geometrien, wie z. B. ein abgesetzter Rundbogensturz. Aus denkmalpflegerischer Sicht wird das bereits seit Jahrhunderten verwendete Material als günstig bewertet.

Das **Typhaboard** (Feld 15) aus nachwachsendem Rohstoff zeigt vor allem Vorteile hinsichtlich der ökologischen Aspekte. Aus bautechnischer Sicht ist der materialgleiche Einbau in den Laibungen und auch bei komplizierten Geometrien, wie z. B. ein abgesetzter Rundbogensturz, problemlos möglich. Aufgrund der leicht dampfbremsenden Wirkung in Verbindung mit der Kapillaraktivität ergibt sich eine günstige Beurteilung hinsichtlich der feuchtetechnischen Aspekte. Die energetische Bewertung fällt etwas ungünstiger aus, da für ein hohes Dämmniveau vergleichsweise große Materialdicken erforderlich sind. Aus denkmalpflegerischer Sicht wird der nachwachsende Rohstoff günstig bewertet.

Die vorgesetzte Wand aus **Perlite gefüllter Dämmziegel**, mit Ausgleichschüttung ebenfalls aus Perlite zwischen originaler Wand und Ziegelmauer, hat vor allem große Vorteile hinsichtlich der Feuchteschutzaspekte, jedoch wurden hier nicht alle Aspekte bewertet. Der Systemaufbau mit trockener Schüttung zwischen Ziegelwand und originaler Oberfläche stellt sich positiv dar. Aus bautechnischer und denkmalpflegerischer Sicht ist der Einbau bei komplizierten Geometrien, wie z. B. ein abgesetzter Rundbogensturz, aufwändig. Hier und bei den Laibungen wurde deshalb auf einen Dämmputz ausgewichen, der sinnvoller Weise materialgleich mit Dämmstoff aus Perlite bzw. gleichem Putzfabrikat wie der Innenputz hergestellt wurde.

## 6 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Inhalte des Projektes wurden entsprechend den im Projektantrag genannten Zielen erarbeitet und untersucht. Der geplante Zeitrahmen wurde dabei im Wesentlichen eingehalten und das Projekt nach vier Jahren Bearbeitungszeit planmäßig abgeschlossen.

Das Ziel der Entwicklung eines reversiblen Systems zur Innendämmung wurde erreicht. Darüber hinaus wurden mehrere Varianten gegenübergestellt.

## 7 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertung des Ergebnisses

Durch diese Untersuchungen stehen Planern, Behörden und Bauherren nun erstmals fundierte Ergebnisse als Entscheidungsgrundlage für den Einsatz von Innendämmungen in der energetischen Altbausanierung und Denkmalpflege in einer reversiblen Ausführung zur Verfügung. Die Erkenntnisse werden zudem Eingang finden in den Bereich der Wandmalerei-Restaurierung, wo immer wieder die Frage nach einer reversiblen Verdeckung versehentlich freigelegter, wertvoller Malereien aus vergangenen Jahrhunderten auftaucht.

Es ist angedacht, das System der reversiblen Innendämmung, insbesondere den reversiblen Mörtel aus dem Projekt-Konsortium heraus weiter zu entwickeln und als Produkt allgemein verfügbar zu machen. Eine entsprechende Patentanmeldung wurde bereits veranlasst und ist aktuell in Bearbeitung.

## 8 Fortschritt Dritter während der Projektlaufzeit

Innendämmung ist ein immer noch weit diskutiertes Feld und aktuell bieten zahlreiche Firmen neue Lösungen und Systeme zur Innendämmung an. Die WTA (Wissenschaftlich-Technischen Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege (WTA) e. V.) hat bereits 2009 ein Merkblatt zum Thema Innendämmungen herausgegeben, das 2016 nun aktualisiert wurde, auch unter Beteiligung des Fraunhofer IBP sowie ein Merkblatt zur bauphysikalischen Auslegung mittels hygrothermischer Simulation.

Parallel zum hier durchgeführten Vorhaben EnOB Innendämmungen, wurde am Fraunhofer IBP zusammen mit dem FIW München ein weiteres Projekt zum Thema Innendämmungen mit dem Titel „Energieeffizienzsteigerung durch Innendämmsysteme – Anwendungsbereiche, Chancen und Grenzen“ in den Jahren 2014 bis 2017 zu baupraktischen Fragen, Anwendung und Grenzen von Innendämmungen durchgeführt.

## 9 Erfolgte / geplante Veröffentlichungen der Projektergebnisse

Das Projekt und Konzept der Untersuchungen wurde erstmals 2014 auf dem EnOB Symposium in der Zeche Zollverein in Essen in einem Vortrag vorgestellt. Verschiedene rechnerische Untersuchungen wurden bereits publiziert. Auch eher allgemeine Baufachzeitschriften wie „Ausbau und Fassade“ haben über das Projekt und die Neuentwicklung der reversiblen Innendämmung berichtet. Darüber hinaus wurde das Projekt bei allen öffentlichen Vorstellungen des Fraunhofer-Zentrums für Energetische Altbausanierung und Denkmalpflege Benediktbeuern gezeigt. Eine weitergehende Veröffentlichung der umfangreichen Ergebnisse des Vorhabens in verschiedenen Print und Online-Medien sowie auf Konferenzen ist geplant.

### **Übersicht über die erfolgten Veröffentlichungen / Vorträge:**

Kilian, Ralf, Krus, Martin und von Rettberg, Britta: „Reversible Innendämmsysteme für Baudenkmäler und Bestandsbau“. In: EnOB Symposium 2014 - Energieinnovationen in Neubau und Sanierung. Essen, Zeche Zollverein, 20.-21. März 2014. Jülich 2014

Kilian, Ralf und Krus Martin: „Reversible Innendämmsysteme“. In: Gebäudehülle. Schweiz. Verband der Schweizer Gebäudehüllen-Unternehmungen (Hrsg.). (2015) 12. Uzwil 2015

Kilian, Ralf: „Innendämmung für historische Gebäude“. In: Ausbau + Fassade 2, 2015, S. 26-27

Heimsoeth, B.: Denkmalforschung. In: Deutsches Handwerksblatt. Rubrik: Spezial Denkmalpflege. Nr. 13/14, 18. Juli 2013.

Bichlmair, S.: Reversible Internal wall insulation for historic buildings with use of Cyclododecan as a protective layer. Poster. Subliming Surfaces, Conference, Cambridge, April 2015

Kilian, Ralf: „Forschungsprojekt Reversible Innendämmungen in Benediktbeuern“. Vortragsreihe „Bauphysik in der Forschung“ an der Technischen Universität München, Lehrstuhl für Bauphysik, am 15. Mai 2015

Krus, Martin; Kilian, Ralf; Pfundstein, Bernd: Comparison of Different Systems for Internal Wall Insulation with Reversible Application for Historic Buildings. Proceedings of the International Conference on Energy Efficiency and Comfort of Historic Buildings. Bruxelles 2016

Krus, Martin; Kilian, Ralf; Pfundstein, Bernd: „Das Forschungsvorhaben EnOB-Innendämmung – Untersuchungsergebnisse aus Benediktbeuern“. Technologien für die Denkmalpflege, Tagung am Fraunhofer-Zentrum für Energetische Altbausanierung und Denkmalpflege Benediktbeuern am 17. November 2016

Klarner Klaus, Eberhard Wendler: „Entwicklung eines Systems zur reversiblen Montage von Innendämmungen auf historischen Oberflächen“. Technologien für die Denkmalpflege, Tagung am Fraunhofer-Zentrum für Energetische Altbauersanierung und Denkmalpflege Benediktbeuern am 17. November 2016

## 10 Literaturverzeichnis

- [1] Stein, Michael: Untersuchung und Befundsicherung 2010, ehemalige Schäfllerei des Klosters Benediktbeuern, Landkreis Bad Tölz-Wolfratshausen, interner Bericht (unveröffentlicht) Inzell 2010.
- [2] Binder, A. et. al.: Praxisgerechte Beurteilung und Quantifizierung der Kapillaraktivität von Innendämmmaterialien. IBP-Mitteilung 514, 2011.
- [3] Hangleiter: Vorübergehender Schutz empfindlicher Oberflächen. Über den Umgang mit flüchtigen Bindemitteln, Berlin 2000.
- [4] Friedl, Clara; Gietz, Caroline und Kimmerle, Dorothea: „Untersuchung und Konservierung eines Teilabschnitts der östlichen Innenwand in der Alten Schäfllerei des Klosters Benediktbeuern“. Projektarbeit Lehrstuhl für Restaurierung, Kunsttechnologie und Konservierungswissenschaft an der Technischen Universität München. München 2015.
- [5] Künzel, H.; WUFI PC-Programm zur Berechnung des gekoppelten Wärme und Feuchtetransport in Bauteilen; Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Stuttgart, Holzkirchen, Berlin (Hrsg.), Holzkirchen 2001, Seite 1,2
- [6] Krus, M.; Sedlbauer, K.; 1.Innendämmkongress Tagungsunterlage; S. 54; Hrsg. Fakultät Architektur - TU Dresden (2011)
- [7] Krus, M.; Seidler, C. M.; Sedlbauer, K.; Übertragung des Mould-Indexes auf das Biohygrothermische Modell zur Schimmelpilzvorhersage (2011)
- [8] Künzel, H.; Energetische Altbausanierung durch Innendämmung; WTA-Journal 2 (2004), Heft 4, S. 361-374
- [9] Garrecht, H.; Hörenbaum, W.; Müller, H.S.; Untersuchungen zum witterungsbeanspruchten Mauerwerk und Folgerungen für die Bausanierung. Beitrag zum 4. Int. Kolloquium Werkstoffwissenschaften und Bauinstandsetzen (1996)
- [10] ISO 14040 Environmental Management – Life Cycle Assessment – Principles and Framework, 2006
- [11] ISO 14044 Environmental Management – Life Cycle Assessment – Requirements and Guidelines, 2006
- [12] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit BMUB: Informationsportal Nachhaltiges Bauen - Ökobau.dat 2015. URL: <http://www.oekobaudat.de/> (2016).
- [13] DIN EN 15978: Nachhaltigkeit von Bauwerken - Bewertung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden - Berechnungsmethode; Deutsche Fassung EN 15978:2011.



- [14] Carbotech AG, AdvancedEPD für Fixit 222 Aerogel Hochleistungsämmputz, Basel 2015
- [15] Aspen Aerogels, Inc.; Environmental Product Declaration Spaceloft Aerogel Insulation, 2013
- [16] Rieger, Verena: Ökobilanz von Typhadämmstoff in denkmalgeschützten / historischen Gebäuden. Bachelorarbeit, Abteilung Ganzheitliche Bilanzierung, 2004.
- [17] GaBi 6: Software-System und Datenbanken zur Ganzheitlichen Bilanzierung. thinkstep AG in Zusammenarbeit mit der Universität Stuttgart, Lehrstuhl für Bauphysik. Stuttgart und Echterdingen 2013
- [18] Centre of Environmental Science – Leiden University (CML): Characterization and normalization factors. Leiden. 2016 URL: <https://www.universiteitleiden.nl/en/research/research-output/science/cml-ia-characterisation-factors>.
- [19] WTA-Merkblatt 6-2-01: Simulation wärme- und feuchtetechnischer Prozesse. Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V., 2002.
- [20] Bichlmair, S.; Krus, M.; Kilian, R.: Eine neue Methode zur VIP- Innendämmung im Bereich der Denkmalpflege. In: Grunewald, J.; Plagge, R. (Hrsg.): 2. Internationaler Innendämmkongress – Tagungsunterlage, S. 126 – 135, TU Dresden Institut für Bauklimatik, Dresden 2013

### Weiterführende Literatur

Bichlmair, Stefan; Krus, Martin und Kilian, Ralf: Eine neue Methode zur VIP- Innendämmung im Bereich der Denkmalpflege. Konzept – Aufbau – Erste Ergebnisse. 2. Internationaler Innendämmkongress, 12.-13. April 2013, Dresden, Internationales Kongress Center.

Krus, Martin, Silberhorn, Oswald; Kilian, Ralf und Kratzmeier, Matthias: Innovative Innendämmung im Denkmalschutz. Energetische Sanierung des Augsburger Landesamtes für Finanzen - Simulation und messtechnische Begleitung. – BAUSUBSTANZ 4 (2013); H. 1, S. 24 – 33; ISSN 2190-4278.

Krus, M.; Sedlbauer, K.: Innendämmung und Schimmelpilzproblematik. Internationaler Innendämmkongress, 20.-21. Mai 2011. Dresden Tagungsband S. 53-64. ISBN 3-940117-07-06.

Krus, M.; Theuerkorn, W.; Großkinsky, Th.; Georgiev, G.: Neuer, tragfähiger Dämmstoff aus Rohrkolben (Typha) zur Fachwerksanierung und Innendämmung. Bauphysiktag Kaiserlautern, 27. – 28. November 2013, Tagungsband S. 115-117. ISBN 978-3-943995-41-1.

Theuerkorn, W.; Fritsch, A.; Mach, M.; Krus, M; Großkinsky, Th.; Fitz, C. Theuerkorn, D. Knodt, H. Walter, U.: Neuer Baustoff für umweltfreundliche und bautechnische Sanierung in der Denkmalpflege. DBU-Bericht (Förderkennzeichen AZ 27918)

Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V. -WTA- (Hrsg): „Innendämmung nach WTA I: Planungsleitfaden“. WTA Merkblatt 6-4-16/D. Deutsche Fassung. Stand Oktober 2016. Referat 6 Bauphysik, München 2016

Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V. -WTA- (Hrsg): „Innendämmung nach WTA II: Nachweis von Innendämmsystemen mittels numerischer Berechnungsverfahren“. WTA Merkblatt 6-5-14/D. Deutsche Fassung. Stand April 2014. Referat 6 Bauphysik, München 2014