

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

Institutsleitung

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gerd Hauser

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

IBP-Bericht RK-022/2013/294

Vakuumdämmung mit Klebmatte im Altbau

Antragsforschung

SF-10.08.18.7-11.29

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung
(BBSR) Forschungsinitiative Zukunft Bau

Deichmanns Aue 31-37

53179 Bonn

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

Abteilungsleiter



Dr.-Ing. Gunnar Grün

Projektleiter



M. Eng. Stefan Bichlmair

Bearbeiter



Dr.-Ing. Ralf Kilian

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

Institutsleitung

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gerd Hauser

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

IBP-Bericht RK 022/2013/294

Vakuumdämmung mit Klebmatte im Altbau

Antragsforschung

SF-10.08.18.7-11.29

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung
(BBSR) Forschungsinitiative Zukunft Bau

Deichmanns Aue 31-37

53179 Bonn

Der Bericht umfasst

63 Seiten Text

10 Tabellen

59 Abbildungen

Projektleiter: M. Eng. Stefan Bichlmair

Bearbeiter: Dr. Ralf Kilian

Bearbeiter: Dr. Martin Krus

Bearbeiter: André Thiel

Valley, 30. Oktober 2013

Inhalt

1	Projektbeschreibung und Problemstellung	4
1.1	Ziel des Forschungsvorhabens	4
1.1.1	Kurzbeschreibung des Forschungsvorhabens	4
1.1.2	Beschreibung der zu lösenden Probleme	4
1.1.3	Begründung des Forschungsvorhabens	5
1.2	Projektablauf	6
1.2.1	Modifizierung der ursprünglichen Projektbeschreibung im Antragstext	6
1.2.2	Sachstandsbeschreibung	7
1.2.3	Erhebungsbogen	7
1.3	Bisherige Stand der Technik	7
1.3.1	Literaturrecherche	7
1.3.2	Montage von VIP-Paneelen	8
1.3.3	Erhaltung von Oberflächen und Putzen in der Denkmalpflege	8
1.3.4	Reversible Montage von VIP	9
1.4	Forschungsansatz und Untersuchungsmethodik	10
2	Durchführung der Untersuchungen	11
2.1	Vorbereitende Arbeiten zur Versuchsdurchführung	11
2.1.1	Vorbereitung Versuchsgebäude	11
2.1.2	Systemauswahl VIP-Innendämmung	12
2.1.3	Auswahl Klebmatte	13
2.1.4	Vorbereitung des Untergrunds für Beurteilung der reversiblen Montage	13
2.2	Versuchsaufbau und Messanordnung	14
2.2.1	Anordnung der Innendämmung und Messplan- Übersicht	14
2.2.2	Messkonzept und Messplan zur Hinterströmung	15
2.2.3	Reversible Ausbildung der horizontalen Abdichtung	17
2.2.4	Messpläne der Sensoren und Sampler mit Anordnung der horizontalen Abdichtung	19
2.2.4.1	Wand Nord:	19
2.2.4.2	Wand Ost	20
2.2.4.3	Wand Süd	21
2.3	Einbau der Innendämmung	23
3	Rechnerische Untersuchungen im Vorfeld	24

4	Ergebnisse der Messungen	29
4.1	Bewertung der Reversibilität der Innendämmung	29
4.1.1	Rückbau des Innendämmsystems	29
4.1.2	Bewertung der Oberfläche im Gesamteindruck	30
4.1.3	Farbmessungen	30
4.1.3.1	Wand Süd	30
4.1.3.2	Wand Ost	38
4.2	Messergebnisse der Tracergasmessung zur Hinterströmung	45
4.3	Infrarot Aufnahmen der Wandoberflächen	46
4.4	Messergebnisse für relative Feuchte, Temperatur und Wärmestrom	47
4.5	Validierungsberechnungen	53
4.5.1	Rechnerische Untersuchung anhand der Messdaten	53
4.5.2	Langzeitberechnungen in Anlehnung an den Versuchsaufbau	56
4.5.3	Zusammenfassung der Ergebnisse der Langzeitberechnung	61
5	Zusammenfassung und Ausblick	62
6	Literatur	63

1 Projektbeschreibung und Problemstellung

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert.

Aktenzeichen SF-10.08.18.7-11.29 / II 3-F20-10-1-087

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt beim Autor.

1.1 Ziel des Forschungsvorhabens

1.1.1 Kurzbeschreibung des Forschungsvorhabens

Generelles Ziel des Vorhabens ist die innovative Anwendung eines beispielhaften Wandaufbaus mit Vakuumisulationspaneelen (VIPs) in Kombination mit einer Klebematte für den Bereich Innendämmung bei der Altbausanierung.

Der Einsatz von Innendämmung im Bereich des Altbaubestandes wirft oft konstruktive Probleme sowie Fragen zur Rückbaubarkeit bzw. Reversibilität auf. VIPs bieten eine interessante Möglichkeit für Anwendungen, bei denen besondere Rücksicht auf das äußere Erscheinungsbild eines Gebäudes genommen werden muss und geringe Dämmstoffdicken erforderlich sind. In Verbindung mit einer Klebematte als Trennlage besteht die Möglichkeit, die Innendämmung austausch- bzw. rückbaubar zu gestalten. Durch die Untersuchungen sollen neue Lösungsansätze erarbeitet und aufgezeigt werden.

1.1.2 Beschreibung der zu lösenden Probleme

Im Falle der VIPs sind folgende spezifische Fragestellungen zur Anwendung im Bausektor zu klären und zu untersuchen: Die Ausmaße der Dämmplatten müssen für den Einbau am Gebäude flexibel gestaltet werden, um auf die Geometrie des Raumes sowie die Anschlüsse an Fenster- und Türleibungen eingehen zu können. Im Rahmen des Projektes soll eine prototypische Lösung in Form eines Sandwich-Wandaufbaus rechnerisch und messtechnisch geprüft und angewendet werden.

Hinzu kommt der wichtige Aspekt der Reversibilität von Sanierungs- und Instandsetzungsmaßnahmen im Altbau- und Denkmalpflegebereich. Der neue, reversible Ansatz sieht daher die Befestigung mit speziellen großflächigen Klebematten vor, die punktuell mit Dübeln befestigt werden. Die Klebematten bestehen aus einseitig mit Vlies kaschiertem Wirrgelege. Das Vlies dient dazu, den originalen Untergrund vor dem Klebemörtel zu schützen und damit eine weitgehend reversible Anbringung zu ermöglichen. Ebenso ist mit diesen Matten eine bessere Anpassungsmöglichkeit der Dübelposition auf den Untergrund gegeben, was die Möglichkeit der Platzierung in Fehlstellen und damit zur Schonung von wertvollen Wandbereichen bietet und damit aus Denkmalschutzgründen vorteilhaft sein kann. Dies stellt eine Weiterentwicklung gegenüber dem Klebeankersystem oder der klassischen vollflächigen Verklebung dar.

Es entstehen keinerlei Wärmebrücken und Dübelabzeichnungen, wie es bei einer Verdübelung des Dämmstoffes mit dem Mauerwerk oftmals der Fall sein kann.

1.1.3 Begründung des Forschungsvorhabens

Neue Bauten müssen heutzutage einen langen Katalog an Vorschriften und Normen erfüllen. Vor allem in Zeiten rasant steigender Energiepreise und erhöhter Bedeutung von Umwelt- und Nachhaltigkeitsaspekten wird immer mehr auch bei der Altbausanierung gesteigerter Wert auf Einsparungen im Energieverbrauch gelegt. Liegt der aktuelle Altbauanteil im Gebäudebestand in Deutschland bei 77 %, so zählen energetisch betrachtet sogar 95 % zum Altbauanteil. Natürlich ist es im Interesse der Nutzer, die Kosten für den Unterhalt eines Gebäudes möglichst niedrig zu halten, bei gleichzeitiger Schaffung von Komfort und Behaglichkeit.

VIPs sind bereits in verschiedensten Bereichen auf dem Vormarsch, wie z. B. der Luft- und Raumfahrt, Automobilindustrie sowie im Bereich der Hausgeräte, temperaturgeregelter Verpackungen oder der Brennstoffzelle. Das mikroporöse Produkt wird für Bereiche zwischen ca. -50°C bis hin zu Temperaturen bis zu ca. 120°C eingesetzt. Die Basis des Dämmmaterials ist eine hochdisperse Kieselsäure, dessen Struktur durch das Einbringen von Faserfilamenten gestützt und dadurch druckfest und selbsttragend wird.

VIPs verfügen über eine geringe Wärmeleitfähigkeit von $0,005 \text{ W/mK}$ und bestehen aus einem "Kern", der von einer Schutzfolie umgeben ist. Das System wird auf ein Vakuum zwischen $0,001$ und $1,5 \text{ mbar}$ evakuiert. Durch die geringen Aufbaustärken, die VIPs gegenüber konventioneller Dämmstoffe benötigen, können diese überall dort eingesetzt werden, wo aus gestalterischen oder ökonomischen Gründen Platz eingespart werden soll. Das Verschwinden einer bestehenden Fassadengestaltung unter einem dicken WDVS wird damit vermieden, was den Einsatz von VIPs für denkmalgeschützte Gebäude besonders interessant macht.

Dadurch wird gleichsam ein architektonischer Beitrag zur Baukultur in Deutschland geliefert. Im Innenbereich lassen sich auf diese Weise bei gleichzeitiger Erfüllung der energetischen Vorschriften größere Nutzflächen erreichen. Als hochinnovatives Produkt tragen VIPs auch zur Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Bauwirtschaft bei.

Durch die Verwendung von Klebematten kann zudem bei der Sanierung im Denkmalsbereich und im Gebäudebestand auf die Rückbaubarkeit der Sanierungsmaßnahmen eingegangen werden. Dies ist ein essentielles Anliegen der Denkmalämter bei der Sanierung von Baudenkmalern. Anstelle einer Verdübelung oder gar vollflächigen Verklebung des Dämmmaterials direkt auf dem Mauerwerk bzw. der Altputzschicht lässt sich die Dämmung mit Klebematten aufbringen, die mit wenigen, fast frei wählbaren Dübeln oder bestandsverträglicher partieller Klebung befestigt wird.

Handwerker, die sich über das Projekt „Vakuuminwendämmung mit Klebmatte Altbau“ informieren und weiterbilden lassen, können durch ihr dort angeeignetes Fachwissen über Methoden der Energieeinsparung in Altbauten im europäischen Markt bestehen und gewinnen so einen klaren Marktvorteil. Hinzu kommen Weiterentwicklungen der VIPs in Zukunft, die z.B. eine weitere Verringerung der Wärmeleitfähigkeit ermöglichen. Es werden zur Zeit auch preiswerte Alternativmaterialien für VIPs entwickelt, deren Einsatzmöglichkeiten für allgemeine Anwendungen als auch speziell für Bauanwendungen noch geprüft werden müssen.

1.2 Projektablauf

Durch das BMVBS/BBSR wurde das Projekt „Anwendung einer Innendämmkonstruktion mit Vakuumisolationspaneelen im Gebäudebestand in Verbindung mit einem Klebeankersystem“ am 29.11.2011 bewilligt.

Bei der ersten Arbeitsgruppensitzung am 12.9.2012 wurde der Stand der Arbeiten vorgestellt und das weitere Vorgehen im Projekt diskutiert. Die Ergebnisse der Diskussion sind bei der Umsetzung mit berücksichtigt worden. Nach der Arbeitsgruppensitzung erfolgte die bauliche Umsetzung im Versuchsgebäude sowie Aufbau des Versuchs. Dieser wurde Ende Dezember 2012 abgeschlossen. Nach dem Einbau erfolgte die Etablierung des Raumklimas mit elektrischen Heizgeräten und einem mobilen Befeuchter. Das technische Personal regelte das Raumklima ein und prüfte die Messanlage. Die Messungen mit geregelter Klima liefen seit Anfang Januar 2013 und wurden bis zum Rückbau der VIP Innendämmung Anfang Mai 2013 aufrecht erhalten. Nach der Demontage erfolgte eine Einschätzung der Auswirkungen der Innendämmung und des Rückbaus auf die Bestandswand und die Auswertung der Ergebnisse, die hier im weiteren detailliert vorgestellt werden.

1.2.1 Modifizierung der ursprünglichen Projektbeschreibung im Antragstext

Während der Antragsphase erfolgte eine Anpassung der Projektbeschreibung mit Schreiben vom 7.7.2011 und 15.7.2011. Der Projektbeschreibung wurde für die Forschungsarbeit entsprechend angepasst und bei der ersten Arbeitsgruppensitzung vom 12.9.2012 besprochen und an die Arbeitsgruppenmitgliedern verteilt. Die inhaltlichen Änderungen sind in der nachfolgenden Tabelle 1 aufgelistet.

Tabelle 1:
Inhaltliche Änderungen in der Projektbeschreibung.

Ursprüngliche Ausführung	Geändert in
Klebeanker	Klebmatte
Ausführung in Benediktbeuern / Weyarn	Ausführung am Fraunhofer IBP in Holzkirchen
	Untersuchung der Hinterströmung
Untersuchung des Bestandes (AP1 > Salzbelastung, Feuchte)	Entfällt

1.2.2 Sachstandsbeschreibung

Es erfolgte die geforderte Sachstandsbeschreibung am 14.5.2012.

1.2.3 Erhebungsbogen

Der Erhebungsbogen zur Bekanntmachung des Forschungsprojektes in der Fachöffentlichkeit wurde am 24.7.2012 erstellt.

1.3 Bisherige Stand der Technik

1.3.1 Literaturrecherche

Wichtige Quellen für Informationen über die praktische Umsetzung von VIPs im Bauwesen sind die Tagungsbände zu den Fachtagungen VIP-BAU und den International Vacuum Insulation Symposia. [Sedlbauer et al. 2005] stellt fest: „Bei dem Einsatz von Vakuumisulationspaneelen als Innendämmung kann es, wie Ergebnisse zeigen, zu Problemen mit hohen Materialfeuchten und Schimmelpilzwachstum in der Konstruktion kommen.“ Eine Recherche auf www.baufachinformation.de und www.vip-bau.de zum Thema VIPs in Kombination mit Klebeankern oder Klebmatte ergab, dass derzeit zu diesem Thema keine wissenschaftlichen Untersuchungen von Anwendungsbeispielen vorliegen.

Am Fraunhofer IBP wurden bereits Simulationsrechnungen für einen VIP-Hersteller durchgeführt. Auf diesen Ergebnissen werden weitere Rechnungen aufgebaut. Die Ergebnisse wurden 2005 publiziert.

Für die erforderliche Literaturrecherche wurde das Fraunhofer IRB beauftragt. Es erfolgte eine Auswertung der IRB Datenbank anhand einer Stichwortsuche zu den Themen Vakuuminnendämmung im Bestand, Reversibilität, Montage, Klebeanker bzw. Klebmatte. Das Ergebnis der Literaturrecherche umfasst 23 Treffer. Mit dem Rechercheergebnis wurde zu der Literaturfundstelle

die jeweilige Kurzfassung mitgeliefert. Die Kurzfassungen wurden auf die wesentlichen Kernziele dieses Projektes durchgesehen. Es wurde hier keine Publikation aufgefunden, die wesentliches zum Forschungsthema zum Inhalt hatte.

1.3.2 Montage von VIP-Paneelen

Ein wichtiges, bauphysikalisches Problem von besonders dampfdichten Systemen wie VIP ist das empfindliche Reagieren auf Undichtigkeiten, die zu Hinterströmungen zwischen VIP und Wand führen können. Diese Hinterströmungen können durch Eintrag von Feuchte aus der Raumluft und deren Kondensation an kalten Oberflächen hinter der Dämmung zu erheblichen Schäden führen. Die Montage über vollflächiges Verkleben vermeidet zwar Hinterströmungen von VIP-Paneelen, jedoch ist eine fehlerfreie Ausführung nicht immer garantiert. Am besten wird im beidseitigen Verfahren mit Kleberauftrag auf der zu beklebenden Wand und auf dem aufzubringenden Panel geklebt. Mit dieser Technik ist eine vollflächige Verklebung auf einer weitestgehend ebenen Wand mit nur geringen Fehlstellen möglich. Die reale Montage unter Baustellenbedingungen kann jedoch in weit geringerer Ausführungsqualität resultieren. Insbesondere größere Unebenheiten, wie sie im Altbau oft vorhanden sind, die Steifigkeit von VIP und zu sparsamer Einsatz des Klebers wegen der Materialkosten können in der Summe zu erheblichen Fehlstellen führen. Über undichte Anschlussfugen können sich in einem solchen Fall ungünstige Hinterströmungen etablieren.

Im Altbau sind jedoch durchaus auch Oberflächensysteme vorhanden, die eine ausreichende Haftung über reines Verkleben als zu unsicher erscheinen lassen. In manchen Fällen kann daher eine Verdübelung der Paneele erforderlich sein. Eine Befestigung von VIP Paneelen mit herkömmlichen Mauerwerksdübeln ist meist nur mit zusätzlichen Randzonen, zum Beispiel aus Polystyrol, möglich. Dübel sind wiederum thermische Schwachstellen. Die Stoßstellen von VIP Elementen sind systembedingt unabhängig von der Befestigung ohnehin thermische Schwachstellen. Bei der Anwendung als Außendämmung sind entsprechend einschlägige Vorschriften zur Befestigung mit Dübeln vorhanden. Beim Einsatz als Innendämmung gibt es keine entsprechenden Vorschriften, die ein Dübeln analog zur Außenanwendung als WDVS vorschreiben. Das vollflächige Aufkleben reicht zudem meist als Befestigung im Innenbereich aus.

1.3.3 Erhaltung von Oberflächen und Putzen in der Denkmalpflege

Aus Sicht der Denkmalpflege wird im Grundsatz immer die möglichst umfassende Überlieferung der vorhandenen Bausubstanz im Sinne eines historischen Primärdokuments angestrebt [Charta von Venedig, 1964]. Auch Farbfassungen (Anstriche) und Putze geben Aufschluss über die vorhandene Technik und die Lebensweise vergangener Tage und sollen daher für künftige Generationen erhalten werden. Ein Ankleben von Dämmungen mit bauüblichen zementären und kunststoffvergüteten Klebern schädigt oder zerstört diese oberflächennahen Schichten. Mit einer Verklebung auf der obersten Schicht können zudem Inhaltsstoffe in die unteren Schichten wandern. Es erfolgt damit eine oftmals

nicht mehr rückgängig machbare Schädigung dieser Schichten. Bei dem Rückbau eines Innendämmsystems kann bei einer entsprechend guten Haftung des Klebers der Bestandputz mit verloren gehen. Ein Beispiel, was alles unter oberflächennahen Schichten zu verstehen ist, zeigt Bild 1. Die in diesem Beispiel freigelegten Schichten dokumentieren einen Teil der Geschichte des Gebäudes und geben einen einmaligen Einblick in den Geschmack der jeweiligen Zeit.



Bild 1:
Freilegungstreppe historischer Farbfassungen in einem Pfarrhaus aus dem 16. Jahrhundert in Haimhausen nahe München (Foto: Klaus Klarner, Restaurator, München).

Hierbei spielt es zunächst keine Rolle, ob ein Gebäude unter Denkmalschutz steht oder nicht. Die Erhaltungswürdigkeit von Malschichten und überlieferter Bausubstanz sollte prinzipiell immer in Erwägung gezogen werden, auch bei wertvollen Altbauten. Wichtig ist hier, dass die Konsequenz der möglichen Zerstörung beim Rückbau in der Diskussion zur energetischen AltbauSanierung kontraproduktiv für die Akzeptanz von energetischen Sanierungsmaßnahmen sein kann. Ein Ausweg daraus kann eine Verbesserung der Montage sein, die eine Schädigung der Oberflächen weitestgehend reduziert. Verglichen mit der oft hunderte Jahre langen Geschichte alter Gebäude ist die Innendämmung wohl eher eine temporäre Episode. Neben der Schadensfreiheit durch bauphysikalische richtige Montage, Dimensionierung und Schlagregenschutz wird daher die schädigungsarme Montage und die problemlose Rückbaubarkeit für die Akzeptanz von Innendämm-Maßnahmen bei historischen Gebäuden aller Art an Bedeutung gewinnen.

1.3.4 Reversible Montage von VIP

Eine den Untergrund und Oberflächen nur gering beschädigende Montage wird hier als reversible Montage bezeichnet werden. Gemäß der Charta von Venedig ist dies eine zentrale Anforderung für alle Maßnahmen an einem Denkmal. Die Rückbaubarkeit von Maßnahmen ohne oder mit möglichst geringem Verlust an originaler Bausubstanz soll den weitest gehenden Erhalt an Bausubstanz sichern helfen. Ein neuer Ansatz ist die Montage mit einer Trennlage aus Wirrgelege mit aufkaschiertem Flies. Diese Trennlage wird mit bauüblichen Tellerdübeln auf die Wand angedübelt. Die typische Anwendung von die-

sen Matten kommt aus dem Tiefbau als sogenanntes Geotextil oder dem Dachhandwerk bei Blecheindeckungen als Korrosionsschutz und Dränfunktion. Durch das stabile Wirrgelege, das in Rollenware am Markt erhältlich ist, kann die Anordnung der Dübel im Prinzip frei gewählt werden. So können sensiblere Wandbereiche ausgespart oder mit weniger Dübel versehen werden. Diese Wirrgelege werden zum Teil in der Denkmalpflege und im Altbau auch als Salzspeicherschichten und Putzträgermatten bei feuchtem Mauerwerk eingesetzt.

Aus der Sicht der Denkmalpflege stellen Klebeschichten ungünstige Systeme dar, da die oberen originalen Mal- und Putzschichten bei einem Rückbau stark beschädigt oder gar zerstört werden und/oder ungünstig wirkende Substanzen aus der Klebeschicht eindiffundieren können. Bei der Anwendung der Klebematte entstehen diese Nachteile nicht. Durch die Übertragung von Kräften innerhalb der Matte können die notwendigen Mauerwerksdübel als kraftschlüssiger Verbund flexibel gesetzt werden und müssen nicht zwingend einem bestimmten Raster oder Muster folgen. Über die genaue Anzahl der erforderlichen Dübel gibt es derzeit keine gesicherte Erkenntnis. Anwendungsvorschriften bei Fassadendämmstoffen empfehlen in der Regel in der flächigen Anwendung außen 8 Stück/m². Im Innenbereich können ggf. deutlich weniger Dübel ausreichend sein, da viel geringere Lasten auf die Wände wirken, insbesondere nicht die außen anliegenden Windlasten oder Schlagregen.

1.4 Forschungsansatz und Untersuchungsmethodik

In diesem Projekt wird eine Kombination aus messtechnischen Untersuchungen an einem Beispielobjekt und rechnerische Begleituntersuchungen durchgeführt, die dazu dienen, einen prototypischen Wandaufbau für die wirtschaftliche und sichere Anwendung von VIPs für den Gebäudebestand zu überprüfen. Zusätzlich wird der Zustand des Mauerwerks durch die Anbringung der Dämmplatten mit Klebematten begutachtet und messtechnisch aufbereitet.

Vor der Installation wird die Konstruktion mit der am Fraunhofer IBP entwickelten hygrothermischen Gebäudesimulationssoftware WUFI® rechnerisch überprüft und energetisch wie auch feuchtetechnisch optimiert. Für die Überprüfung der entwickelten Konstruktion in der Anwendung wird eine Kombination aus Messung und Rechnung eingesetzt.

Die Durchführung der Versuche erfolgte auf dem Freigelände des Fraunhofer-IBP. Hier sind geeignete Testräume, Laboratorien und Werkstätten zur Durchführung des Projektes vorhanden sowie die erforderlichen Klimadaten für diesen Standort.

Um eine höhere Sicherheit gegenüber Hinterströmungen bei der verwendeten Klebematte zu erreichen wird eine spezielle Dichtungsfuge zwischen den Dämmplatten ausgebildet. Die Oberfläche der Wand wurde zum Teil mit bunten Farben in unterschiedlichen historischen Bindemitteln versehen, um Veränderungen in Folge der Dämmung leichter beurteilen zu können. Die Dichtheit des Systems wird über IR-Messungen und über spezielles Tracergas Untersu-

chungen überprüft. Nach Abnahme der Innendämmung erfolgt eine weitere Überprüfung auf der originalen Wand auf Schadensfreiheit und Veränderung der Farbwerte.

Mit Hilfe der institutsinternen Messwerterfassung IMEDAS ist eine kontinuierliche Kontrolle der Messwerte online sowie eine anschauliche graphische Ausgabe zur Prüfung der Daten vor Ort und im Büro des Bearbeiters gegeben.

2 Durchführung der Untersuchungen

2.1 Vorbereitende Arbeiten zur Versuchsdurchführung

2.1.1 Vorbereitung Versuchsgebäude

Für die Durchführung der Versuche konnte das bestehende Versuchsgebäude H-4 auf dem Freigelände des Fraunhofer-IBP genutzt werden. Das Gebäude ist ein Bau aus den 1950iger Jahren und entstand in den Anfängen des Instituts- teils Holzkirchen. Das Mauerwerk besteht aus einem Hochlochziegel, beidseitig verputzt, mit einer Gesamtdicke von ca. 34 cm. Für die Nutzung für dieses Forschungsprojekte waren einige Umbauarbeiten erforderlich. So wurden bestehende Versuchseinbauten an der Fassade und gemauerte/betonierte Inneneinbauten rückgebaut. Zusätzlich wurde die Inneneinrichtung entfernt, Mauerwerksöffnungen verschlossen sowie Putzschäden ausgebessert. Außerdem erfolgte ein Rückbau der Elektroinstallation, soweit für die Innendämmung erforderlich. Vorbereitungen zur Installation der Messtechnik, wie Instandsetzung, Glasfaserkabel und Test des Intranet-Anschlusses erfolgten ebenfalls. In Bild 2 ist das Versuchsgebäude mit den Rückbauarbeiten an der Fassade dargestellt.



Bild 2:
Für das Forschungsprojekt erforderliche Umbauarbeiten des bestehenden Versuchsgebäudes H-4 am Freigelände des Fraunhofer IBP, Rückbau einer vorhandenen Außendämmung.

2.1.2 Systemauswahl VIP-Innendämmung

Für die spezielle Versuchsanordnung in diesem Forschungsprojekt wurde ein System gesucht, bei dem die Anforderungen einer speziellen horizontalen Abdichtung in der Wandebene möglichst wärmebrückenfrei realisiert werden können. In Bild 3 und 4 sind zwei unterschiedliche VIP Systeme dargestellt. Bild 3 zeigt ein einlagiges System, wie es in dieser oder ähnlicher Form von verschiedenen Herstellern angeboten wird. Nachteilig ist hier die große Wärmebrückenwirkung von Ausgleichsflächen oder einer zusätzlichen horizontalen Abdichtung. Bild 4 zeigt ein zweilagiges Innendämmsystem, bei dem die Wärmebrücken weitestgehend minimiert werden können. Damit eignet sich dieses System sehr gut für die gezielte Untersuchung der Hinterströmungssicherung mit einer horizontalen Abdichtung.

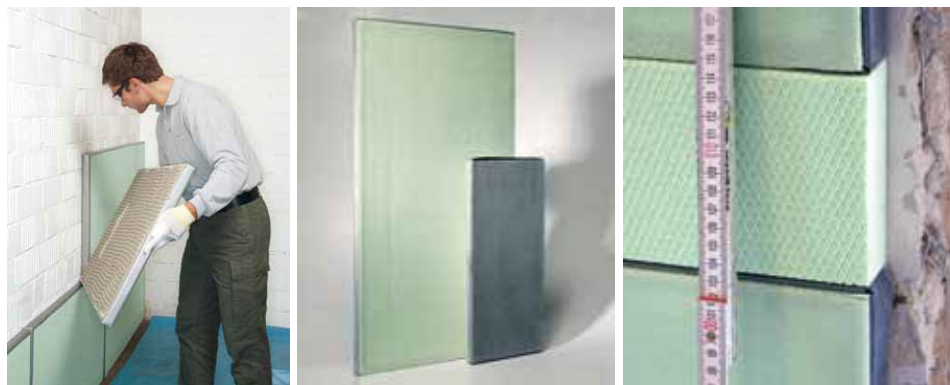


Bild 3:
VIP Beispiel für einlagige Innendämmanwendung mit vollflächiger Verklebung und Polystyrol Kaschierung. Quelle: Weber-St.Gobain, Typ Kontur VVP 007.



Bild 4:
VIP für zweilagige Innendämmanwendung mit vollflächiger Verklebung und Polystyrol Kaschierung. Dieses System wurde zur Anwendung ausgewählt. Quelle: Weber-St.Gobain, Typ Lock-Plate.

2.1.3 Auswahl Klebmatte

Für den Ansatz einer reversiblen Montage wird hier ein System anvisiert, das ohne vollflächige Verklebung auskommt. Durch die Übertragung von Kräften innerhalb der Matte können die notwendigen Mauerwerksdübel als kraftschlüssiger Verbund flexibel gesetzt werden und müssen nicht zwingend einem bestimmten Raster oder Muster folgen. In Bild 5 werden Beispiele unterschiedlicher Klebmatte von verschiedenen Herstellern gezeigt. Erste Erfahrungen mit der Anwendung von Klebmatte am Fraunhofer IBP wurden bei einem anderen Forschungsprojekt mit dem System der Firma Klemoflex gemacht, das in Verbindung mit einer Wandheizung angewendet wurde. Das System der Firma Klemoflex ist zur Zeit nicht mehr erhältlich.

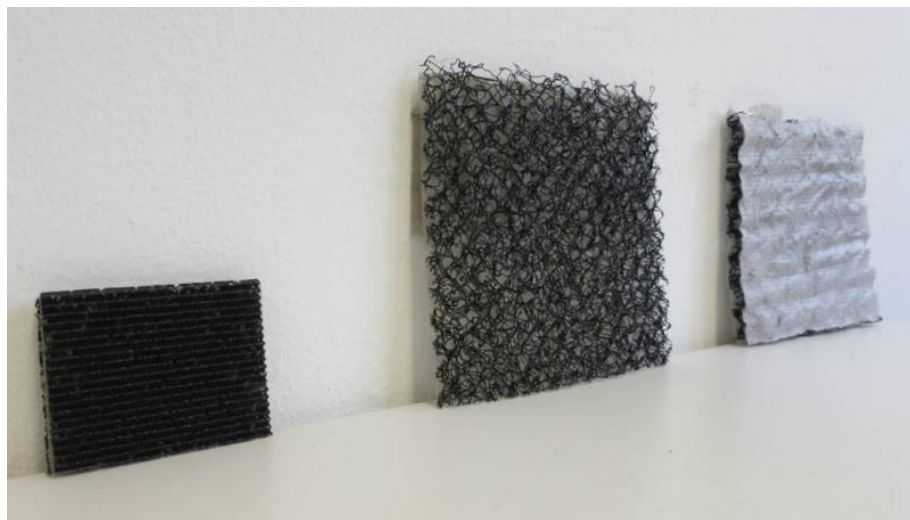


Bild 5:
Unterschiedliche Klebmatte von verschiedenen Herstellern (Siku-San, Klemoflex, Bedrain).

Zur Anwendung kam eine einseitig kaschierte Klebmatte, die in Bild 5 in Bildmitte dargestellt ist. Die Kaschierung liegt auf der Innendämmung zugewandten Seite, um einen Kleberauftrag zu ermöglichen und gleichzeitig ein Durchschlagen des Klebers auf den Untergrund sicher zu vermeiden.

2.1.4 Vorbereitung des Untergrunds für Beurteilung der reversiblen Montage

Für eine Beurteilung der Auswirkungen der Innendämm-Maßnahme auf die vorhandene Oberfläche wurden für den Versuchsaufbau mit farbigen Neuanstrichen definierte Bedingungen geschaffen.

Um hier differenzierter auswerten zu können, wurde die neu applizierte Malerschicht mit vier unterschiedlichen Farbtypen Silikat-, Kalk-Kasein-, Zelluloseleim- und Emulsionsfarbe, die in historischen Gebäuden auftreten können, ausgeführt, siehe Tabelle 3. Hierfür wurden die Innenwand auf der Ostseite und Süd-

seite entsprechend vorbereitet. Zur Vorbereitung des Untergrundes sind die Altanstriche vorher größtenteils entfernt worden.

Tabelle 2:
Varianten der neu applizierten Farbuntergründe.

	Farbtypen	Farbtöne
Variante 1	Kalk-Kasein	Englischrot, Goldocker, Kobaltblau
Variante 2	Emulsion	Englischrot, Goldocker, Kobaltblau
Variante 3	Zelluloseleim Polycon	Englischrot, Goldocker, Kobaltblau
Variante 4	Silikat	Englischrot, Goldocker, Kobaltblau

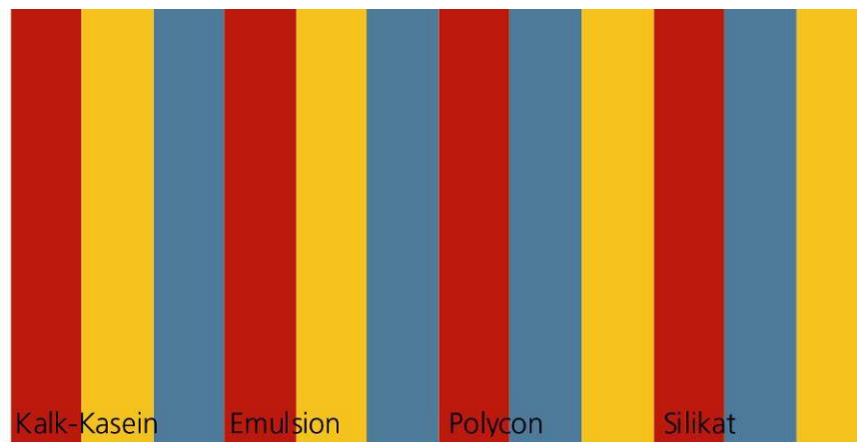


Bild 6:
Farbfelder mit verschiedenen Bindemittelsystemen und in jeweils gleichem Farbton.

2.2 Versuchsaufbau und Messanordnung

2.2.1 Anordnung der Innendämmung und Messplan-Übersicht

Das Messkonzept sieht drei Messachsen vor, an der Nord- und Südseite sowie an einer Gebäudeecke. Hierzu werden an verschiedenen Ebenen Temperatursensoren angebracht: Oberflächentemperatur innen, Temperatur in der Zwischenschicht auf der originalen Innenoberfläche und auf der Außenoberfläche. Zusätzlich erfolgt eine Messung der relativen Feuchte und der Temperatur mit einem Kombisensor in der Schicht der Klebmatte zwischen Innendämmung und der originalen Wandoberfläche. Zur Erfassung des Wärmestroms wird eine Wärmestrommessscheibe auf der originalen Wandoberfläche platziert. Die Anordnung der Messachse erfolgt in einem mittleren Feld zwischen zwei horizontalen Abdichtungsebenen. Bei der Messachse in der Außenwanddecke sind Temperatursensoren an den gleichen Positionen wie bei der bereits beschriebene Messachse angebracht. In Bild 7 ist der Gebäudegrundriss mit den Position

von Sensoren und der Messachsen sowie die Anordnung der VIP-Innendämmung dargestellt.

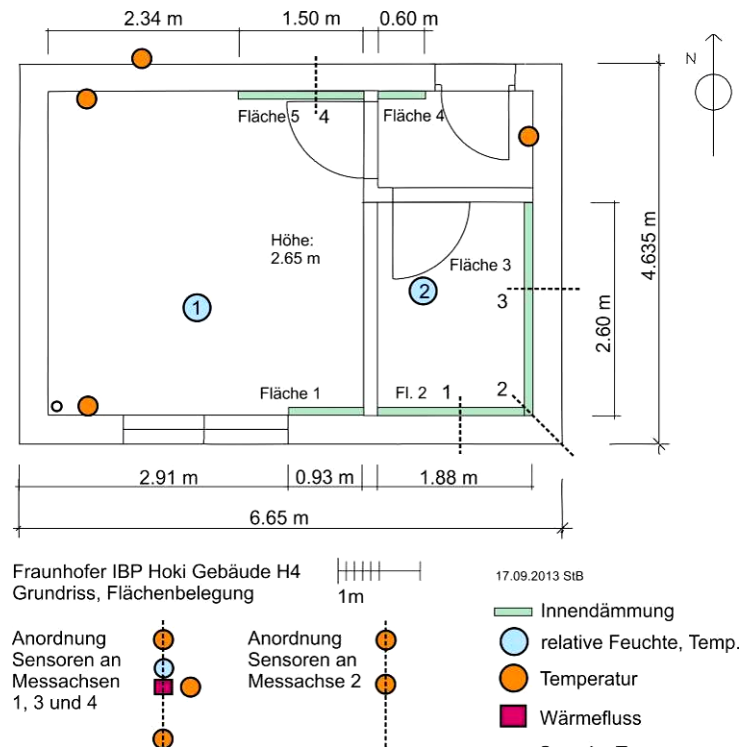


Bild 7:
Messkonzept mit Anordnung der Sensoren und Messachsen im Versuchsgebäude.

2.2.2 Messkonzept und Messplan zur Hinterströmung

Die Messung der Hinterströmung sollte mit der Spurengas- oder Tracergas-Methode realisiert werden. Das Messprinzip beruht auf der Messung eines Spurengases, das in der Raumluft freigesetzt wird. Mit einem Sammler oder Sampler, der das Spurengas absorbiert, kann nachgewiesen werden, in welcher Menge Spurengas der Raumluft in der Schicht zwischen Innendämmung und originaler Wand eingeströmt ist. Der Nachweis der Hinterströmung mit Tracergas ist qualitativ angelegt. Falls eine Hinterströmung mit Raumluft vorliegt, sollte sich das Tracergas in den Samplern nachweisen lassen. Wie in Abbildung 8 zu sehen, wurden die Sampler direkt in das Wirrgelege eingebaut. Erst nach dem Aufbringen des kompletten Systems wurde das Tracergas in den Raum eingebracht. Für diese Anwendung wird die Tracergas-Methode für die Messung des mittleren Luftalters in entsprechend angepasster Weise verwendet. Diese Methode hat sich für die Langzeitmessung in Gebäuden bewährt. Eine Beschreibung der Methode erfolgt in [NTVVS 118, 1997] und [DIN ISO 16000-8, 2008]. Ein Beispiel für Anwendung und Ergebnisse von Tracergas Messungen in

denkmalgeschützten Gebäuden im laufenden Museumsbetrieb gibt [Kilian et al, 2011].

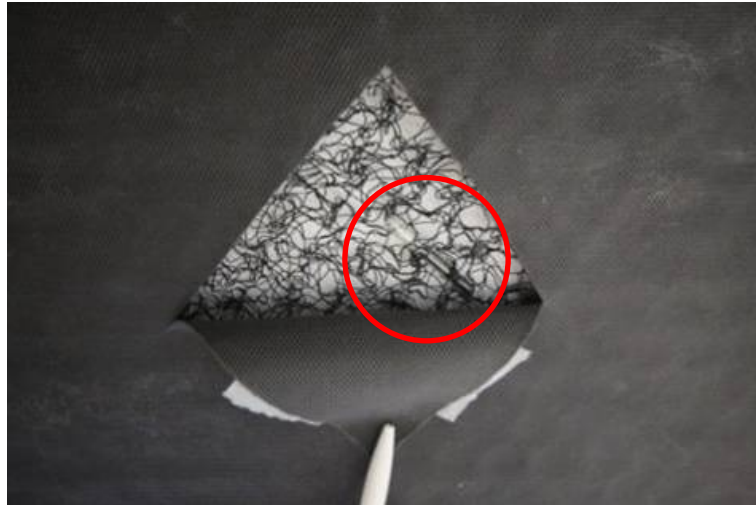


Bild 8:
Tracergas-Sampler, im Wirrgelege hinter dem Abdeckvlies eingebracht. Das Vlies schützt den Sampler vor der vollflächigen Klebung des VIP Elements auf dem Wirrgelege.

Die Tracergasmessung wird wegen der besseren Übersicht in einem gesonderten Messplan dargestellt. Die Messung der Hinterströmung wurde in jeweils einem mittleren Wandfeld zwischen zwei horizontalen Abdichtungen durchgeführt. Die erforderlichen Tracergas Quellen (Sources) sind nicht dargestellt. Die Auswahl der Anzahl und Anordnung der Sources erfolgt durch den Lieferanten des Tracergases. In Bild 9 sind ist die Anordnung der Tracergas Quellen schematisch im Grundriss mit VIP-Innendämmung dargestellt.

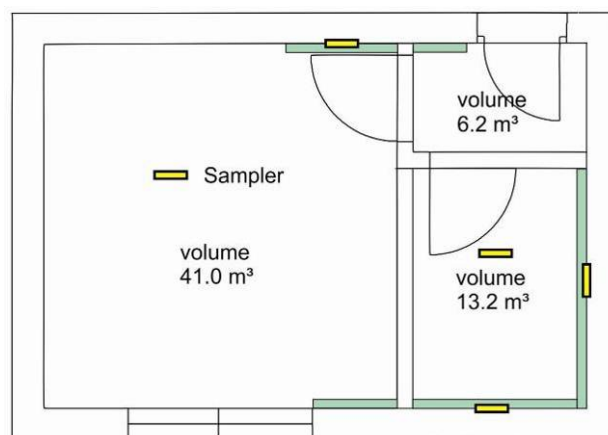


Bild 9:
Messkonzept für die Tracergasmessung mit schematischer Anordnung der Sampler (Sammler). Die erforderlichen Sources (Quellen) sind nicht mit dargestellt.

Abbildung 10 zeigt schematisch einen vertikalen Schnitt durch eine Außenwand mit Innendämmsystem, mögliche Strömungspfade, Abdichtungsebenen sowie die Anordnung des Samplers. Über die Raumhöhe von ca. 2,64 m wurden zusätzlich zu der allgemeinen umlaufenden Randabdichtung zwei horizontale Abdichtungsebenen eingebaut. Zusätzlich zu den unterschiedlichen horizontalen Abdichtungen wurde zum Einschätzen der Sensibilität der Tracergas-Messung bei einigen Messfeldern ein definierter offener Spalt in der umlaufenden Randabdichtung am Boden- sowie am Deckenanschluss vorgenommen.

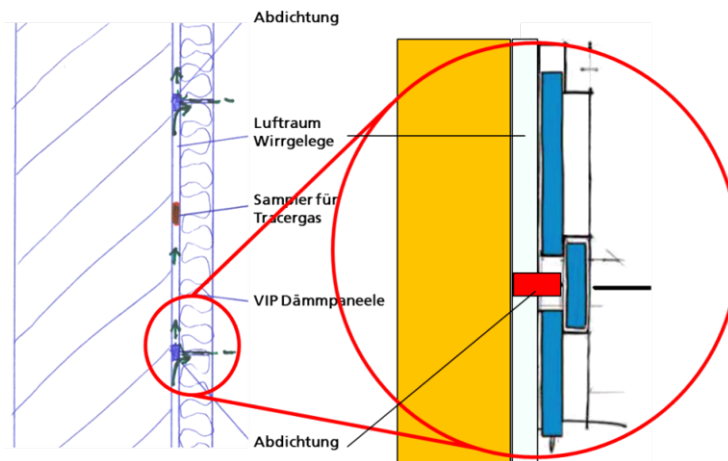


Bild 10:
Schematische Anordnung der Abdichtungsebenen Tracergas Sampler. VIP Darstellung in Vergrößerung: Weber-St.Gobain, Typ Lock-Plate.

2.2.3 Reversible Ausbildung der horizontalen Abdichtung

Bei der Anwendung einer mit Trennlage befestigten VIP Innendämmung ist systembedingt eine Luftschicht vorhanden. Ein Hinterströmen dieser Luftschicht gilt es zur Schadensvermeidung gezielt zu unterbinden. Hierzu wurde in einem Abstand von einem Meter eine Abdichtungsebene eingebracht. Die Aufgabe dieser horizontalen Abdichtungsebene ist, die vertikale Hinterströmung zwischen originaler Wand und Innendämmung sicher zu unterbinden.

Die Herstellung der horizontalen Abdichtung brachte weitere Herausforderungen mit sich. Um sicher zu stellen, dass die horizontale Abdichtung auch dicht eingebaut wird, war eine Sichtkontrolle erforderlich. Die Abdichtung konnte deshalb nur an einem Plattenstoß hergestellt werden. Durch die Breite der Abdichtung von ca. 2-3 Zentimetern entsteht eine wesentliche Wärmebrücke an dieser Stelle. Um diese Wärmebrücke zu vermeiden wurde ein VIP-System gewählt, das zweilagig ausgeführt wird. Damit war es möglich, eine dichte Fugenausbildung und eine weitestgehende wärmebrückenfreie Innendämmung herzustellen. In Abbildung 11 ist die bereits fertig montierte Grundplatte mit einer horizontalen Abdichtung zu sehen. Die Abdichtung wird mit einer Deckplatte, die ein VIP Element enthält, überdämmt.



Bild 11:

Grundplatte der VIP Innendämmung mit horizontaler Abdichtung. Über die Abdichtung wird mit einer Deckplatte mit VIP Element überdämmt. Die VIP Elemente sind in Polystyrol als Schutzmantel mit kürzbarem Randstreifen eingebettet.

Die Ausbildung der horizontalen Abdichtung erfolgte mit verschiedenen Materialien bzw. Montagekonzepten. Der Abdichtungstreifen benötigt mit ca. 2 cm und einem Abstand von einem Meter nur eine geringe Fläche. Das Prinzip einer reversiblen Montage wurde auch auf die Abdichtung übertragen. Anhand einiger Vorversuche wurden mit einem handelsüblichen zementären Kleber sowie einem Schaumstoffdichtband unterschiedliche Dichtungen hergestellt. Bei dem zementären Kleber wurden verschiedene Schichtaufbauten gewählt, um den Untergrund vor den flüchtigen Bestandteilen des Klebers sowie des Schaumstoffes zu schützen. Es wurden vier unterschiedliche Varianten eingebaut, die in der Tabelle 3 zusammengestellt sind. In Abbildung 12 sind das Wirrgelege, die Farbvarianten und Abdichtungsaufbauten einiger Varianten dargestellt.

Tabelle 3:

Varianten der horizontalen Abdichtung.

	Schichtaufbau	Anmerkung
Variante 1	Schaumstoff	mit zusätzlicher Folientrennschicht
Variante 2	Zementäre Abdichtung	direkt appliziert
Variante 3	Zementäre Abdichtung „CCD“	mit zusätzlicher Trennschicht
Variante 4	Zementäre Abdichtung „CCD + Sand“	mit zus. Trennschicht und Zwischenschicht

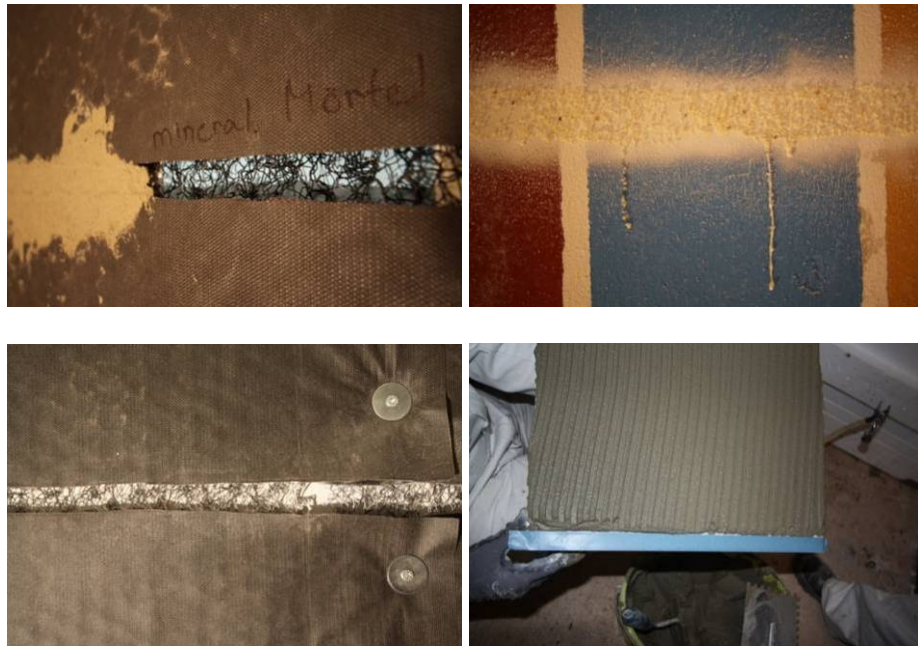


Bild 12:

Bild links oben zeigt die Ausführung der Abdichtungsebene im Wirrgelege ohne Zwischenschicht und rechts oben im Bild mit zusätzlicher Zwischenschicht auf unterschiedlichen Farbvarianten. Im Bild rechts unten ist der Klebemörtel vollflächig mit der Zahnpachtel auf das VIP Element aufgetragen. Die Klebung erfolgt an dem Abdeckvlies des Wirrgeleges.

2.2.4 Messpläne der Sensoren und Sampler mit Anordnung der horizontalen Abdichtung

2.2.4.1 Wand Nord:

Bild 13 zeigt die Anordnung der Messachsen und Tracergas Sampler auf der Nordseite des Versuchsgebäudes. Zusätzlich ist die Anordnung der horizontalen Abdichtungen mit dargestellt. Rechts im Bild 13 ist der Wandschnitt dargestellt. Die Hauptmessachse befindet sich im unteren Feld.

Die beiden Abdichtungsebenen sind mit mineralischem Mörtel ausgeführt.



Bild 13:
Ansicht Wand Nord mit Messaufbau und Abdichtungsebenen.

2.2.4.2 Wand Ost

Bild 14 zeigt die Anordnung der Messachsen und Tracergas Sampler auf der Ostseite des Versuchsgebäudes. Zusätzlich ist die Anordnung der horizontalen Abdichtungen mit dargestellt. Rechts im Bild 14 ist der Wandschnitt dargestellt. Die Hauptmessachse befindet sich im unteren Feld.

Der Boden- und Deckenanschluss wurden mit offener Fuge ausgebildet. Die Fuge wurde mit einem bei der Montage eingelegtem Blech mit ca. 1-2 mm Dicke hergestellt. Die restlichen umlaufende Abdichtung erfolgte mittels zementären (mineralischen) Klebemörtel.

Die Ausführung der Abdichtungsfuge Nr. 4 erfolgt an der Wand Ost oben mit CCD (Cyclododecan) + Sand und zementärem Mörtel

Die Ausführung der Abdichtungsfuge Nr. 3 erfolgte an der Wand Ost unten mit CCD + zementärer Mörtel.

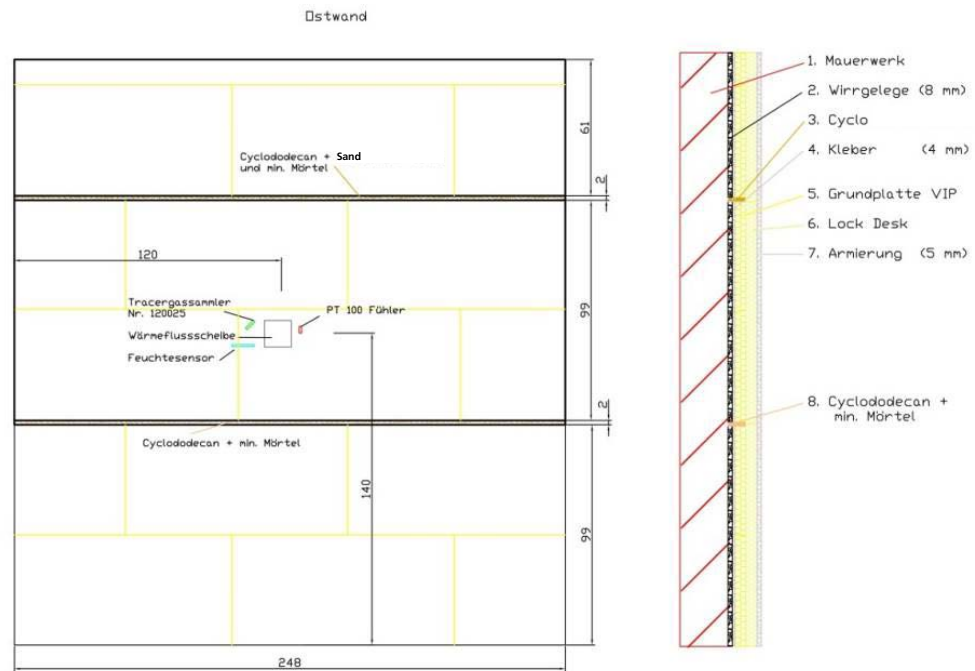


Bild 14:
Ansicht Wand Ost mit Messaufbau und Abdichtungsebenen.

2.2.4.3 Wand Süd

Bild 15 zeigt die Anordnung der Messachsen und Tracergas Sampler auf der Südseite des Versuchsgebäudes. Zusätzlich ist die Anordnung der horizontalen Abdichtungen mit dargestellt. Rechts im Bild 15 ist der Wandschnitt dargestellt. Die Hauptmessachse befindet sich im mittleren Feld.

Die umlaufende Abdichtung erfolgte mittels zementären (mineralischen) Klebemörtel.

Die Ausführung der Abdichtungsfuge Nr. 2 erfolgt an der Wand Süd oben mit zementären Klebemörtel direkt appliziert.

Die Ausführung der Abdichtungsfuge Nr. 1 erfolgt an der Wand Süd unten mit vorkomprimiertem Dichtband aus Schaumstoff (Kompriband).

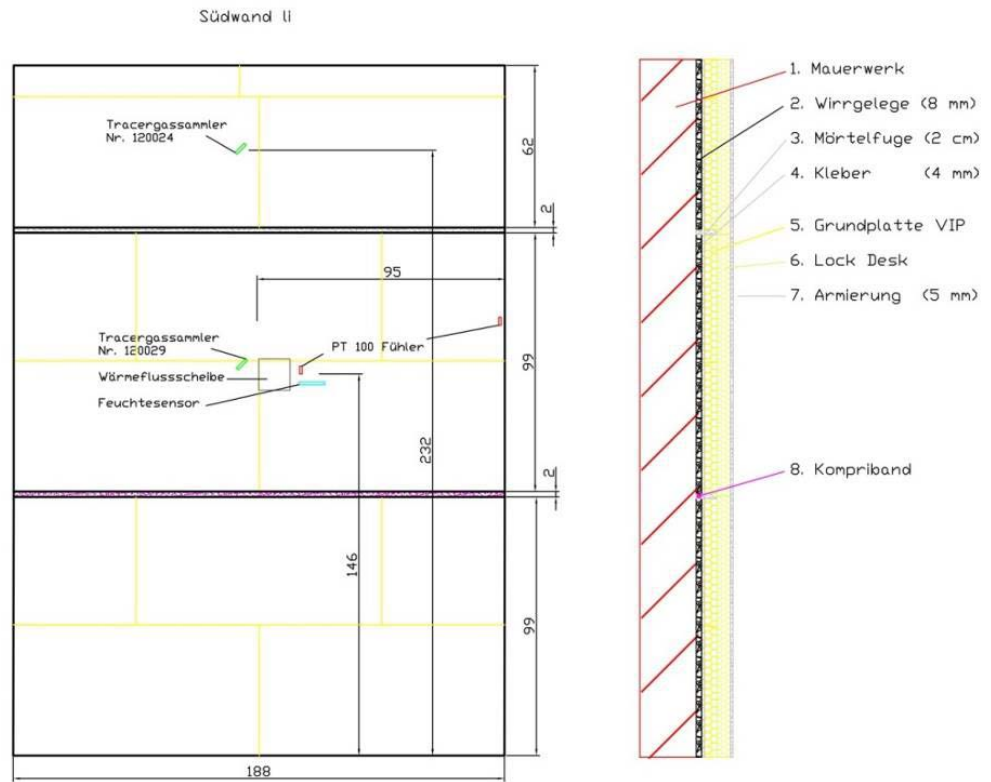


Bild 15:
Ansicht Wand Süden kleiner Raum mit Messaufbau und Abdichtungsebenen.

Die Bilder 16 und 17 zeigen die vorbereitenden Wände Süd und Ost mit Anstrich, Messachse und teilweise mit aufgedübelter Klebmatte.



Bild 16:
Ansicht der Südwand mit Farbanstrich und Messtechnik.



Bild 17:
Messkonzept mit Anordnung der Sensoren und Messachsen im Versuchsgelände mit den Wänden Ost und Süd.

2.3 Einbau der Innendämmung

Die nachfolgenden Bilder 18 und 19 zeigen den Einbau der Innendämmung während der unterschiedlichen Verarbeitungsschritte.



Bild 18:
Anordnung der umlaufenden (grauer Fugenstreifen) Abdichtung mit Anarbeitung der unteren VIP Dämmplatte mit Klebemörtel bis zur ersten horizontalen Zwischenabdichtung bei der Wand Nord.



Bild 19:

Das linke Bild zeigt die Innendämmung fertig montiert mit Grund- und Deckenelemente vor dem Verputzen der Wände Ost und Süd. Das rechte Bild zeigt den kompletten Systemaufbau mit Armierungsputz als fertige Oberfläche für den Versuchsaufbau.

3 Rechnerische Untersuchungen im Vorfeld

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 hohen Diffusionswiderstand der Innendämmung auch die Trocknung nach innen, deutlich reduziert wird. Die Vakuumisulationspaneele weisen konstruktionsbedingt einen sehr hohen Wärme- und einen extremen Diffusionswiderstand auf, weshalb im Folgenden der Einfluss auf den Feuchtehaushalt einer berechneten Außenwand rechnerisch untersucht wird. Für die rechnerische Untersuchung wird das am Fraunhofer IBP entwickelte und erprobte zweidimensionales EDV-Programm WUFI-2D® [Künzel, 1994] eingesetzt. Bei den Berechnungen wird das Ziegelmauerwerk des Versuchshauses mit einer Ausrichtung nach Westen zugrunde gelegt. Die Wand ist innenseitig mit einem Kalkputz und außenseitig mit einem Kalkzementputz mit einem Wasseraufnahmekoeffizienten von $1 \text{ kg/m}^2\sqrt{\text{h}}$ ausgeführt. Als Außenklima dient das für den Standort Holzkirchen typische Jahresklima. Als Wärmeübergangskoeffizienten wird innenseitig von $8 \text{ W/m}^2\text{K}$ und außenseitig von $17 \text{ W/m}^2\text{K}$ ausgegangen. Für das Innenklima wird das bei den messtechnischen Untersuchungen konditionierte Innenklima zu Grunde gelegt. Dies bedeutet eine konstante Raumlufttemperatur von 21 °C und eine ebenfalls konstante relative Raumluftfeuchte von 50 % . Sämtliche Materialkennwerte kommen als Standardwerte aus der WUFI®-Materialdatenbank oder entspre-

chen den Angaben des Herstellers des Dämmsystems. Abbildung 20 zeigt den implementierten Aufbau mit der Innendämmung aus Vakuumisolationspaneelen.

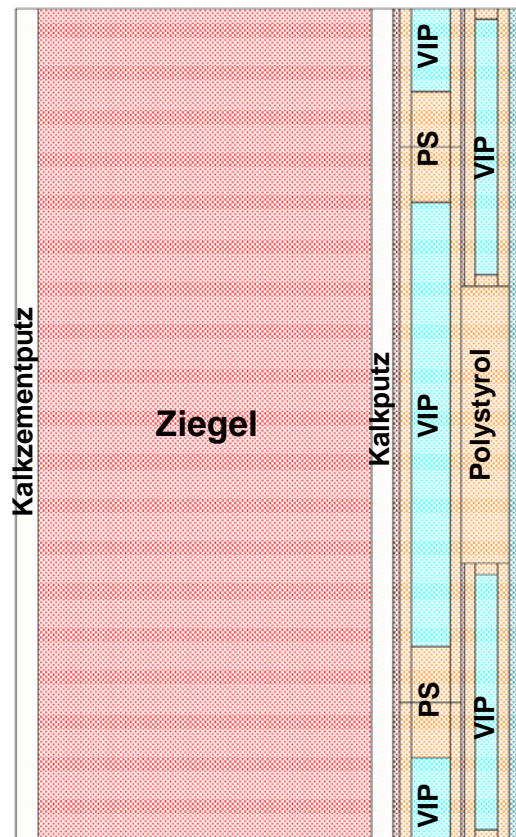


Bild 20:

In WUFI®-2D implementierter Wandaufbau mit dem Innendämmsystem aus Vakuumisolationspaneelen.

Da es bei einem massiven Wandaufbau mehrere Jahre dauert, bis ein eingeschwungener Zustand erreicht ist, 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. Abbildung 21 zeigt für einen Zeitraum von zehn Jahren den Verlauf des Wassergehaltes des Ziegelmauerwerks.

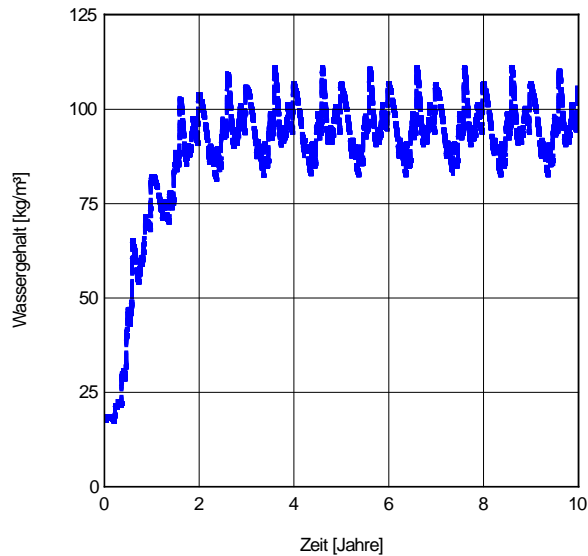


Bild 21:
Mit WUFI-1D[®] berechneter Verlauf des Wassergehaltes des ungedämmten Ziegelmauerwerks.

Nach etwa 4 Jahren ist der eingeschwungene Zustand erreicht. Das Ziegelmauerwerk weist dabei einen mittleren Wassergehalt von ca. 90 kg/m² auf. Bild 22 zeigt für die ungedämmte Bestandswand die Rechenergebnisse mit diesem Anfangswassergehalt von 90 kg/m². Dieser Wert wird für alle folgenden Berechnungen als Ausgangsfeuchte zugrunde gelegt, wobei bei den folgenden Berechnungen jeweils ein Zeitraum von vier Jahren berechnet wird.

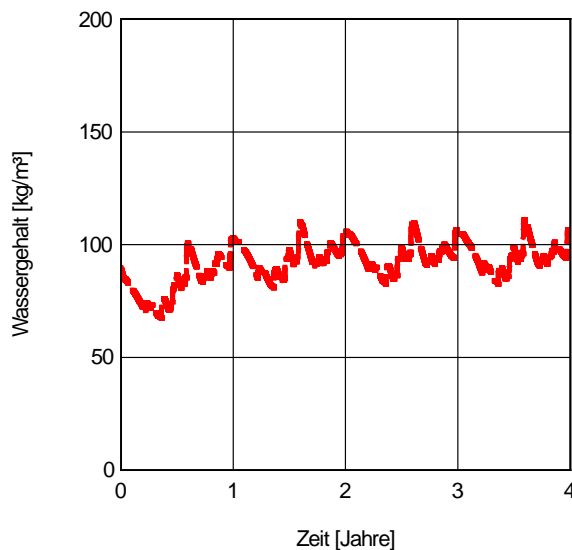


Bild 22:
Berechneter Verlauf des Wassergehaltes des ungedämmten Ziegelmauerwerks bei einer mittleren Ausgangsfeuchte von 90 kg/m².

In Abbildung 23 ist das Ergebnis für das gedämmte Mauerwerk dargestellt. Mit der Innendämmung ergibt sich ein deutlich anderes Bild, wie aus dem Vergleich des in Abbildung 23 dargestellten Ergebnisses mit dem von Abbildung 22 ersichtlich.

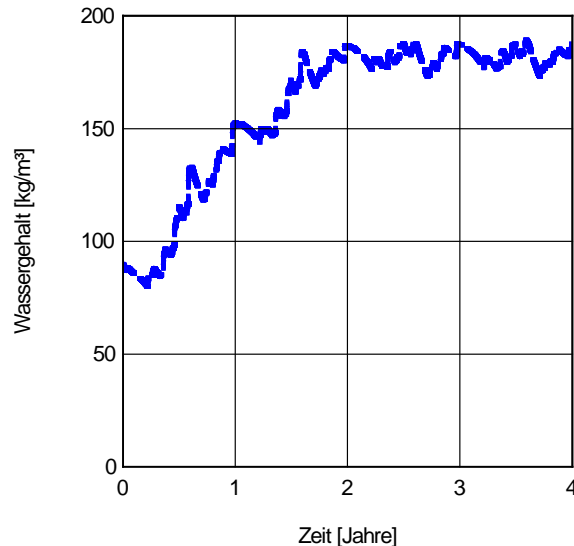


Bild 23:

Berechneter Verlauf des Wassergehaltes des mit VIP innen gedämmten Ziegelmauerwerks ohne zusätzlichen Regenschutz zeigt einen Anstieg der Feuchtebelastung auf bis zu 190 kg/m^2 nach 2 Jahren.

Der Wassergehalt ist nun nahezu verdoppelt, was bedeutet, dass das Mauerwerk permanent Wassergehalte nahe der freien Wassersättigung von 190 kg/m^2 aufweist. Frostschäden sind somit auf jeden Fall zu erwarten und es müssen deshalb im Zuge der Innendämmung unbedingt Maßnahmen zum Regenschutz durchgeführt werden. Eine Möglichkeit besteht darin, durch einen Anstrich oder eine Hydrophobierungsmaßnahme den Wasseraufnahmekoeffizienten der Außenbeschichtung zu reduzieren. Eine dementsprechende Berechnung zeigt, dass eine Absenkung des w -Wertes von $1 \text{ kg/m}^2/\text{h}$ auf $0,2 \text{ kg/m}^2/\text{h}$ bereits ausreicht, um niedrigere mittlere Wassergehalte des Mauerwerks zu erreichen als bei dem ungedämmten Originalzustand (Abbildung 24).

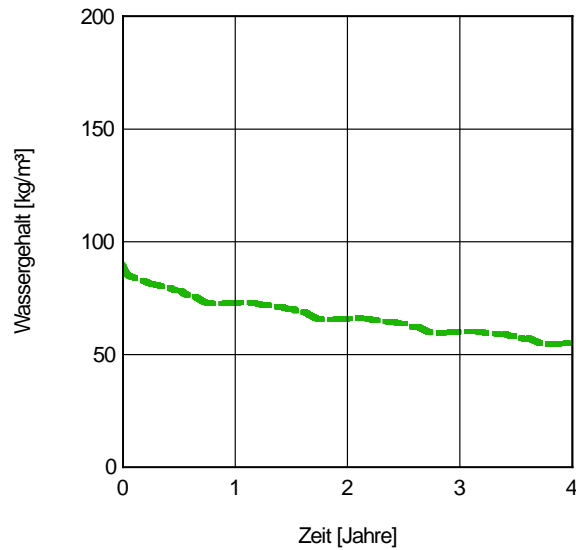


Bild 24:
Berechneter Verlauf des Wassergehaltes des mit VIP innen gedämmten Ziegel-
mauerwerks mit zusätzlichem Regenschutz (w -Wert auf $0,2 \text{ kg/m}^2\sqrt{\text{h}}$ abge-
senkt).

Interessenhalber wurde zum Vergleich auch berechnet, welches Ergebnis sich
ohne Regenschutz bei einer „Standard-Innendämmung“ aus 8 cm Mineralwol-
le, Feuchteadaptiver Dampfbremse und Gipskarton ergeben würde (Abbildung
25).

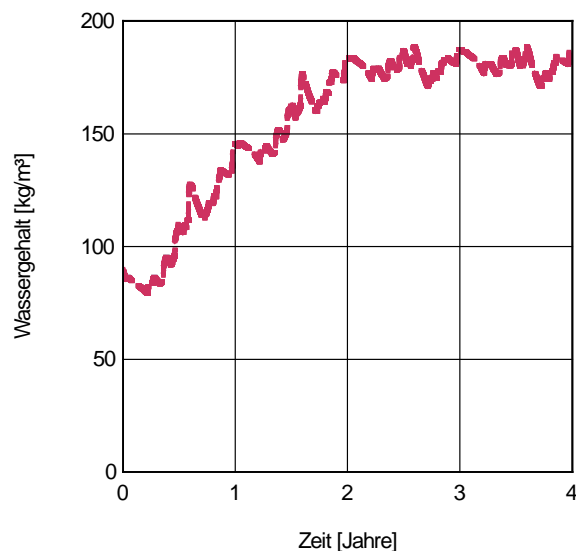


Bild 25:
Berechneter Wassergehalt des Ziegelmauerwerks mit Standard-Innendämmung
(8 cm Mineralwolle, Feuchteadaptive Dampfbremse, Gipskarton) ohne zusätzli-
chen Regenschutz.

Vergleicht man dieses Ergebnis (Abbildung 25) mit dem Ergebnis für den Wandaufbau mit VIP (Abbildung 23), zeigt sich trotz des deutlich niedrigerem Wärmewiderstand der Mineralwolle und wesentlich höherem Trocknungspotential nach innen ein nahezu gleicher Verlauf des Wassergehaltes. Bei dem beim Versuchshaus vorliegenden Wandaufbau mit seinem außerordentlich niedrigen Dämmstandard ist somit weitgehend unabhängig von der Art der gewählten Innendämmung zur Vermeidung eines Feuchteschadens ein zusätzlicher Regenschutz unabdingbar.

4 Ergebnisse der Messungen

4.1 Bewertung der Reversibilität der Innendämmung

Die Bewertung der Reversibilität beinhaltet den Aufwand des Rückbaus und die Bewertung des Zustandes der originalen, ursprünglichen Innenoberfläche. Hierzu wurden die Farboberflächen fotografische dokumentiert, um einen Vergleich nach dem Rückbau zu ermöglichen. Weiter wurde der Farbwert und der Glanzgrad gemessen, um objektive, messbare Werte vor und nach der Innendämmmanwendung zu erhalten.

Der Versuch ist hier auf eine Heizperiode begrenzt. Langzeitaussagen können damit nicht getroffen werden. Die Versuchsreihe soll Aufschluss über die prinzipielle Eignung der ausgewählten Varianten und des Versuchsaufbaus aufzeigen.

4.1.1 Rückbau des Innendämmsystems

Der Rückbau der Innendämmung erfolgte mit handwerklichen Methoden. Die hierfür eingesetzten Werkzeuge (Bild 26) und durchgeführten Arbeitsschritte konnten von einem Monteur bewältigt werden. Im Bild 27 wurde zur Erläuterung des Schichtaufbaus Bauteilöffnung als Befundtreppe angelegt.



Bild 26:
Eingesetztes Werkzeug für den Rückbau des Innendämmsystems.



- 1 Wandoberfläche
- 2 Klebmatte
- 3 Kleber
- 4 VIP Grundelement
- 5 VIP Deckelement
- 6 Armierungsputz
- 7 Abdichtung

Bild 27:
Bauteilöffnung der Innendämmung als Befundtreppe auf der Ostwand.

4.1.2 Bewertung der Oberfläche im Gesamteindruck

Durch die Dübel sind unvermeidbare Beschädigungen und Substanzverlust an der Oberfläche sowie in der Putzschicht entstanden, die bei Dübelungen üblich sind. Weitere Schäden in geringeren Umfang sind durch den Abbruchvorgang entstanden. Während der Demontage zeigt sich eine sehr gute Schutzwirkung durch die Klebmatte vor der mechanischen Einwirkung des Rückbaus. Einen Überblick hierzu gibt die nachfolgende Bild 28. Reste der Innendämmung sind in den Wandecken noch vorhanden. Ebenfalls sind die Schraubenköpfe der mechanischen Befestigung als schwarze Punkte zu erkennen. Die horizontalen Streifen sind Rückstände der Abdichtung bzw. Beschädigung. Ebenfalls noch montiert sind die Sensoren. Die Oberfläche ist nach erster optischer Einschätzung im Wesentlichen erhalten geblieben. Kleine mechanische Beschädigungen erfolgten durch den Rückbauvorgang. Insgesamt wird der Verlust an originaler Oberfläche auf unter 5 % geschätzt.

4.1.3 Farbmessungen

Für die Bewertung der Oberfläche wurden Farbmessungen vor dem Einbau der Innendämmung und nach dem Rückbau durchgeführt. Die Farbmessungen erfolgten an jedem Farbstreifen, siehe Bild 28. Jede Farbmessung wurde fünfmal je Messfläche durchgeführt. Die jeweiligen fünf Einzelmessungen wurden über die Höhe des Farbstreifens verteilt durchgeführt. Die jeweiligen fünf Einzelmessungen in Höhe der Abdichtung wurden nur im Bereich der Abdichtung durchgeführt. Das Messgerät ermittelt aus diesen fünf Einzelmessungen den Mittelwert. Dieser Mittelwert ist der angegebene Messwert.

4.1.3.1 Wand Süd

Die Farbmessung erfolgte kurz vor dem Einbau der Innendämmung am 06.12.2012. Die Anstriche wurden ca. zwei Wochen vorher appliziert. Die Auswertungen erfolgen an den Detailflächen 1 und 2.

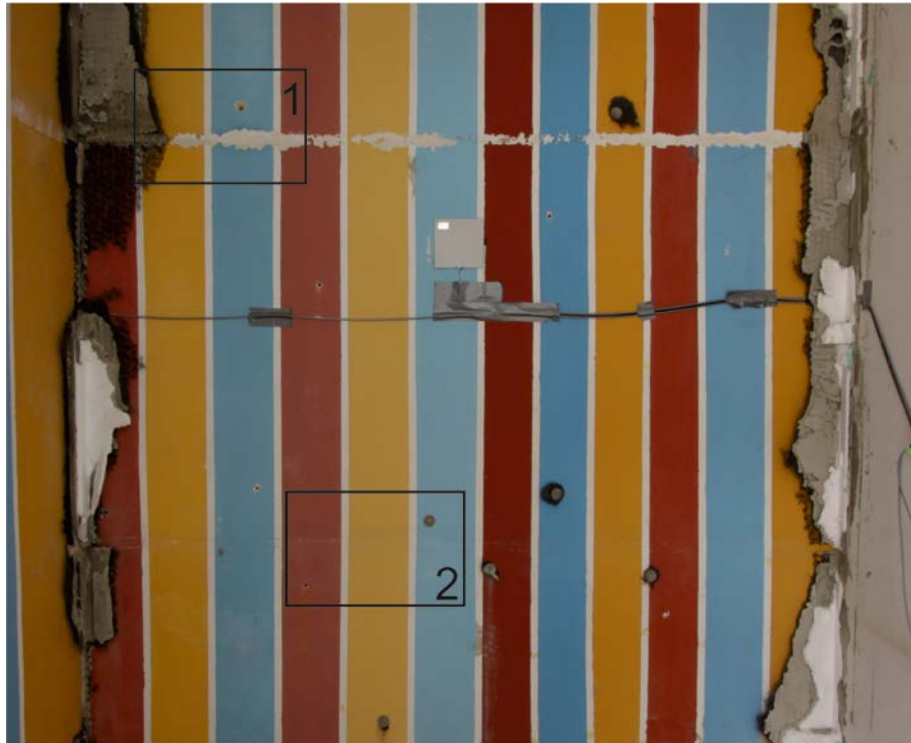


Bild 28:
Wand Süd nach dem Ausbau der Innendämmung. Die Felder 1 und 2 kennzeichnen die Bereiche deren Oberfläche im Detail betrachtet wird.

Bild 29 zeigt die Wand Süd vor dem Einbau der Innendämmung. Die Felder 1 und 2 kennzeichnen auch hier die Bereiche deren Oberfläche im Detail betrachtet wird. Die Sensoren für Wärmefluss, relative Feuchte und Temperatur sind bereits installiert. Es sind die Zuordnung der verschiedenen Bindemittelsysteme und Farbtöne mit eingetragen. Zu den nummerierten Feldern wurden Makro-Aufnahmen erstellt, die nachfolgender eingehender untersucht werden.

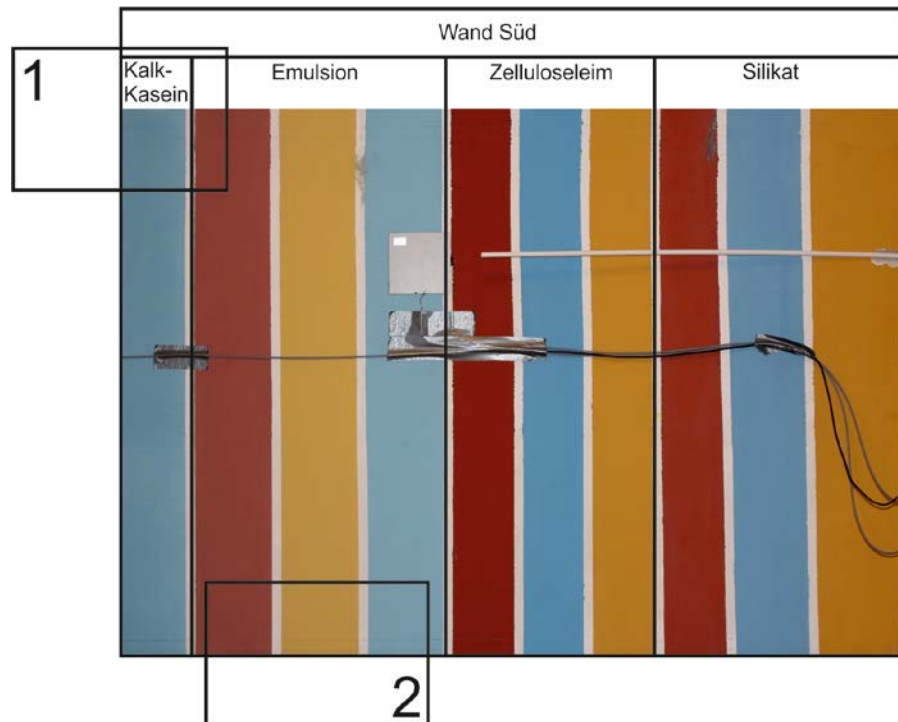


Bild 29:

Wand Süd vor dem Einbau der Innendämmung. Die Felder 1 und 2 kennzeichnen die Bereiche, deren Oberfläche im Detail betrachtet wird. Die Sensoren für Wärmefluss, relative Feuchte und Temperatur sind bereits installiert.

In Tabelle 4 ist eine Übersicht über die Messpositionen angegeben, an denen gemessen wurde. Die im folgenden ausgewerteten Messfelder sind farblich gekennzeichnet.

Tabelle 4:
Übersicht zur Farbmessung auf der Wand Süd.

Hersteller / System	Bezeichnung	Bezeichnung Farbmessgerät	Position an der Wand
Kalk-Kasein	Farbe 1 rot	F1SR 000	Fuge oben
		F1SR 001	Farbstreifen gesamt
		F1SR 002	Fuge unten
	Farbe 2 gelb	F2SG 003	Fuge oben
		F2SG 004	Farbstreifen gesamt
		F2SG 005	Fuge unten
	Farbe 3 blau	F3SB 006	Fuge oben
		F3SB 007	Farbstreifen gesamt
		F3SB 008	Fuge unten
Emulsion	Farbe 4 rot	F4SR 009	Fuge oben
		F4SR 010	Farbstreifen gesamt
		F4SR 011	Fuge unten
	Farbe 5 gelb	F5SG 012	Fuge oben
		F5SG 013	Farbstreifen gesamt
		F5SG 014	Fuge unten
	Farbe 6 blau	F6SB 015	Fuge oben
		F6SB 016	Farbstreifen gesamt
		F6SB 017	Fuge unten
Leimfarbe Polycon	Farbe 7 rot	F7SR 018	Fuge oben
		F7SR 019	Farbstreifen gesamt
		F7SR 020	Fuge unten
	Farbe 8 blau	F8SB 021	Fuge oben
		F8SB 022	Farbstreifen gesamt
		F8SB 023	Fuge unten
	Farbe 9 gelb	F9SG 024	Fuge oben
		F9SG 025	Farbstreifen gesamt
		F9SG 026	Fuge unten
Silikat	Farbe 10 rot	F10SR 027	Fuge oben
		F10SR 028	Farbstreifen gesamt
		F10SR 029	Fuge unten
	Farbe 11 blau	F11SB 030	Fuge oben
		F11SB 031	Farbstreifen gesamt
		F11SB 032	Fuge unten
	Farbe 12 gelb	F12SG 033	Fuge oben
		F12SG 034	Farbstreifen gesamt
		F12SG 035	Fuge unten

Detailfeld 1: Kalk-Kasein, Abdichtung 2

Bild 30 zeigt die Wand Süd mit Detailansicht 1 nach dem Rückbau in Höhe des Abdichtungsstreifens mit direkt auf die Oberfläche appliziertem zementärem Kleber (Abdichtung 2 „zementärer Kleber“). Es liegt in diesem Bereich nahezu ein Totalverlust der Farbschicht vor. Die Farbflächen gelb und blau sind mit Kalk-Kasein gestrichen. Der Farbwerte vor und nach der Innendämmanwendung sind in der Tabelle 5 wiedergegeben.



Bild 30:

Wand Süd mit Detailansicht 1 nach dem Rückbau in Höhe des Abdichtungsstreifens mit direkt auf die Oberfläche appliziertem zementärem Kleber (Abdichtung 2).

Tabelle 5:

Farbwerte vor und nach der Innendämmanwendung, außerhalb der Abdichtungen in den jeweiligen Farbfeldern.

Anwendung	Detail	Farbton Kalk- Kasein	Sample CIELab	Datum	Anzahl N	Color scale		
						L*	a*	b*
Feld	Links von 1	rot	F1SR _001	6.12.12	5	50,6	29,11	15,8
Feld	Links von 1	rot	F1SR 001	13. 6.13	10	51,05	27,88	14,94
Feld	1	gelb	F2SG _004	6.12.12	5	74,59	13,21	49,45
Feld	1	gelb	F2SG 004	13.6.13	10	75,16	12,56	46,32
Feld	1	blau	F3SB _007	6.12.12	5	69,22	-16,91	-19,90
Feld	1	blau	F3SB 007	13.6.13	10	69,38	-15,57	-17,82

Ein Vergleich der Spektralkurven für das Gelbe und Blaue Kalk-Kasein Feld lässt keine wesentlichen Unterschiede erkennen, siehe Bild 31.

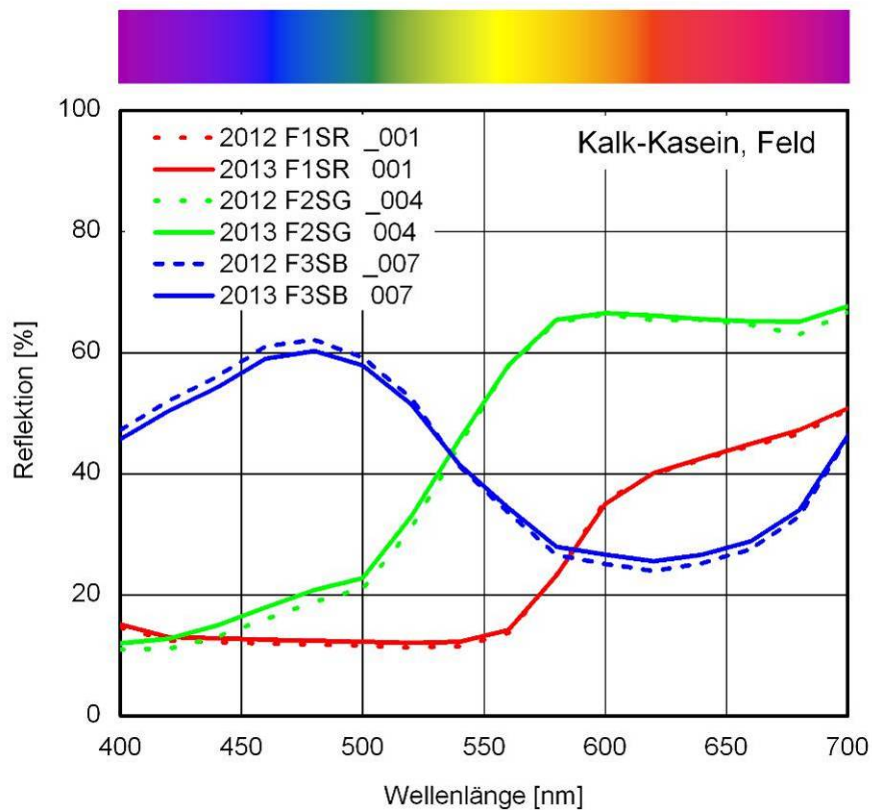


Bild 31:

Vergleich der Spektralkurven der Farbfläche Kalk-Kasein im Farbton rot, gelb und blau vor der Innendämmanwendung und danach. Es lassen sich keine wesentlichen Veränderungen erkennen.

Detailfeld 2: Emulsion

Bild 32 zeigt die Wand Süd mit Detailansicht 2 nach dem Rückbau in Höhe der Abdichtung, die mit komprimiertem Schaumstoff hergestellt wurde (Abdichtung 1 „Schaumstoff“). Es liegen in diesem Bereich kaum Schäden an der Farbschicht vor. Die Farbflächen rot, gelb und blau sind mit Emulsion gestrichen. Die Farbwerte vor und nach der Innendämmanwendung sind in der Tabelle 6 wiedergegeben.



Bild 32:
Wand Süd mit Detailansicht 2 in Höhe der Abdichtung 1 „Dichtband“. Es sind kaum Schäden vorhanden. Bei dem Ausschneiden des Wirrgeleges für die Herstellung der Dichtungsebene wurde die Oberfläche unabsichtlich geritzt.

Tabelle 6:
Farbwerte des Bindemitteltyps Emulsion vor und nach der Innendämmanwendung unter der Abdichtung 1 „Schaumstoff“ für den Farbton rot.

Anwendung	Detail	Farbton Emulsion	Sample CIELab	Datum	Anzahl N	Color scale		
						L*	a*	b*
Feld	2	rot	F4SR _010	6.12.12	5	54,12	25,65	13,88
Feld	2	rot	F4SR 010	13.6.13	10	56,28	24,37	12,94
Abdicht. 1	2	rot	F4SR _011	6.12.12	5	54,38	25,21	13,70
Abdicht. 1	2	rot	F4SR 011	13.6.13	10	57,93	21,88	11,29

Ein Vergleich der Spektralkurven in Bild 33 der Farbfläche Emulsion unter der Schaumstoff Abdichtung im Farbton rot, vor der Innendämmanwendung und danach lassen marginale Veränderungen erkennen. Die beiden Messungen liegen vor der Innendämmanwendung sehr nahe beieinander, danach kann eine geringe Abweichung zu einen höheren Reflektionsgrad festgestellt werden.

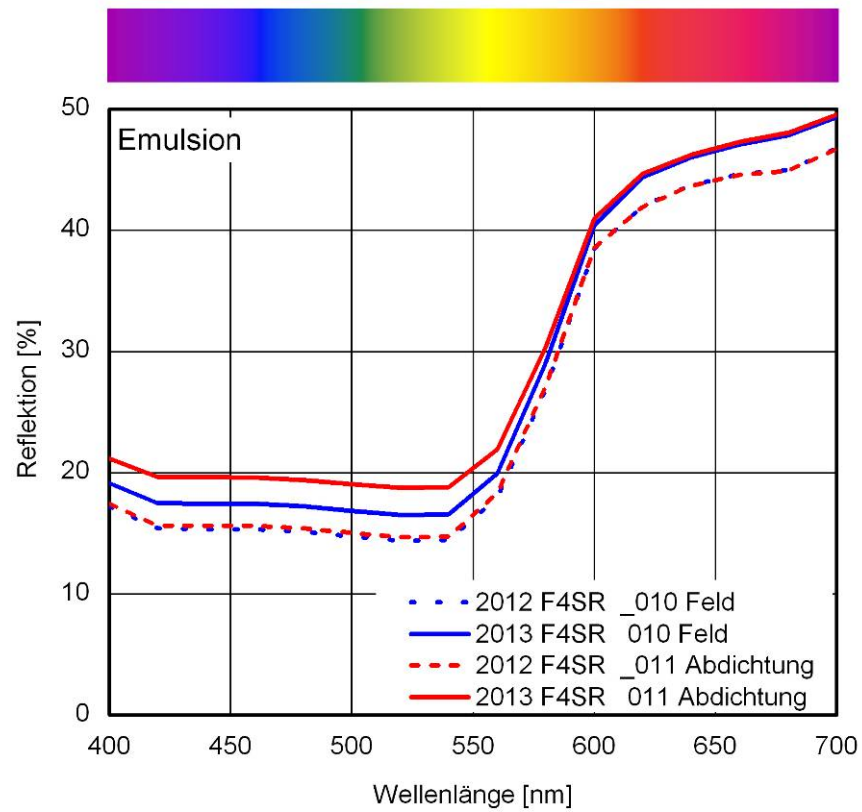


Bild 33:
 Vergleich der Spektralkurven der Farbfläche Emulsion unter der Schaumstoff Abdichtung und Feldfläche unter der Klebmatte im Farbton rot, vor der Innendämmmanwendung und danach. Es lassen sich nur marginale Veränderungen erkennen.

4.1.3.2 Wand Ost

Bild 34 zeigt die die Übersicht zu den Detailbildern und Farbmessungen für die Wand Ost.

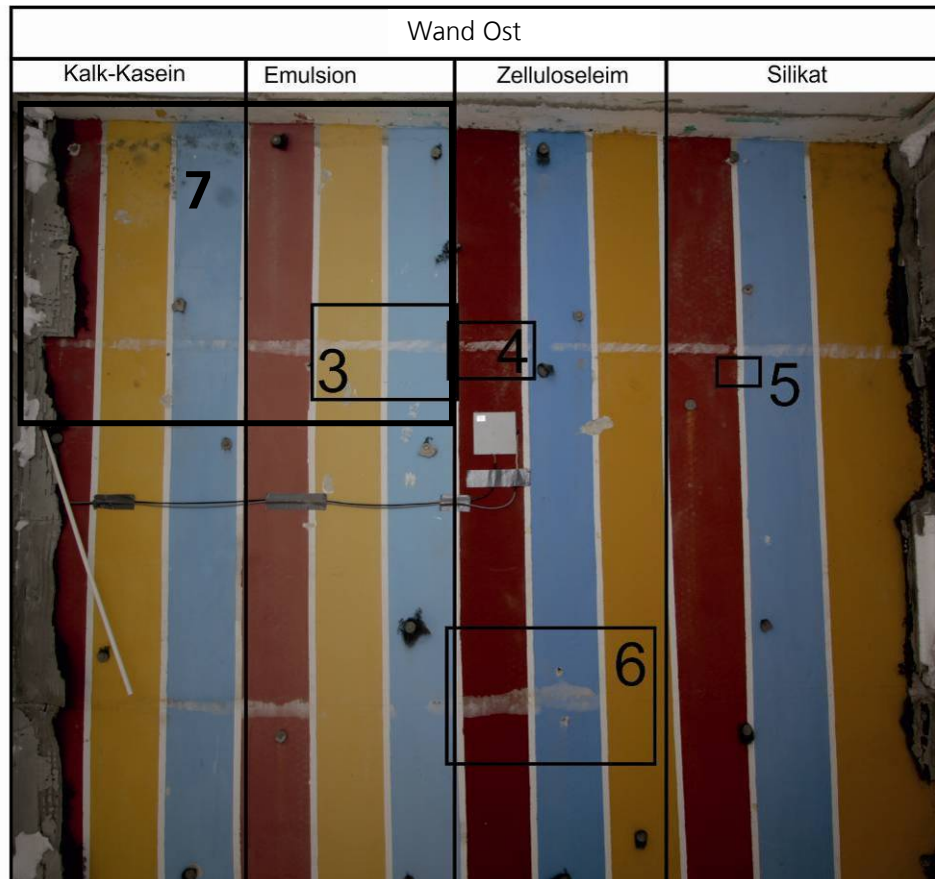


Bild 34:
Übersicht zu den Detailbildern und Farbmessungen für die Wand Ost.

Tabelle 7:
Übersicht zur Farbmessung auf der Wand Ost

Hersteller / System	Bezeichnung	Bezeichnung im Farbmessgerät	Position an der Wand
Kalk-Kasein Caparol	Farbe 1 rot	F1R_1	Fuge oben
		F1R 000	Farbstreifen gesamt
		F1R 001	Fuge unten
	Farbe 2 gelb	F2G 002	Fuge oben
		F2G 003	Farbstreifen gesamt
		F2G 004	Fuge unten
	Farbe 3 blau	F3B 005	Fuge oben
		F3B 006	Farbstreifen gesamt
		F3B 007	Fuge unten
Emulsion Caparol	Farbe 4 rot	F4R 008	Fuge oben
		F4R 009	Farbstreifen gesamt
		F4R 010	Fuge unten
	Farbe 5 gelb	F5G 011	Fuge oben
		F5G 012	Farbstreifen gesamt
		F5G 013	Fuge unten
	Farbe 6 blau	F6B 014	Fuge oben
		F6B 015	Farbstreifen gesamt
		F6B 016	Fuge unten
Zelluloseleim Silin Polycon	Farbe 7 rot	F7R 017	Fuge oben
		F7R 018	Farbstreifen gesamt
		F7R 019	Fuge unten
	Farbe 8 blau	F8B 020	Fuge oben
		F8B 021	Farbstreifen gesamt
		F8B 022	Fuge unten
	Farbe 9 gelb	F9G 023	Fuge oben
		F9G 024	Farbstreifen gesamt
		F9G 025	Fuge unten
Silikat Silin	Farbe 10 rot	F10R 026	Fuge oben
		F10R 027	Farbstreifen gesamt
		F10R 028	Fuge unten
	Farbe 11 blau	F11B 029	Fuge oben
		F11B 030	Farbstreifen gesamt
		F11B 031	Fuge unten
	Farbe 12 gelb	F12G 032	Fuge oben
		F12G 033	Farbstreifen gesamt
		F12G 034	Fuge unten

Detailfeld 7: Kalk-Kasein, Abdichtung 4 CCD

Bild 35 zeigt den linken oberen Teil der ostseitigen Außenwand. Im unteren Bildbereich ist noch das als Schutzfläche aufgetragene flüchtige Bindemittel Cyclododecan (CCD) zu erkennen. Im oberen Bereich ist ein Schimmelpilz Bewuchs zu erkennen. Hier wurde die obere Abdichtung gezielt undicht über eine ca. 2 mm breiten Spalt ausgeführt. Die linken drei Farbflächen aus Kalk-Kasein zeigen hierbei einen stärkeren Befall im Vergleich zu den rechten drei Farbflächen mit Emulsion.



Bild 35:
Detailfeld 3 auf der Ostseite mit dem Bindemittelsystem Emulsion und Abdichtungsebene 4 "CCD". Es sind geringe mechanische Schäden vorhanden.

Tabelle 8:
Farbwerte des Bindemitteltyps Kalk-Kasein vor und nach der Innendämmung unter der Abdichtung 3 und 4 „CCD“ sowie unter der Klebmatte (Feld) für den Farbton gelb.

Anwendung	Detail	Farbton Kalk- Kasein	Sample CIELab	Datum	Anzahl N	Color scale		
						L*	a*	b*
Abdicht. 4	7	gelb	F2G _002	6.12.12	5	75,34	11,41	45,39
Abdicht. 4	7	gelb	F2G 002	13.6.13	10	74,25	11,71	41,76
Feld	7	gelb	F2G _003	6.12.12	5	75,98	11,78	46,43
Feld	7	gelb	F2G 003	13.6.13	10	75,65	12,21	46,03
Abdicht. 3	7	gelb	F2G _004	6.12.12	5	74,98	12,20	47,09
Abdicht. 3	7	gelb	F2G 004	13.6.13	10	73,63	12,93	43,77

Ein Vergleich der Spektralkurven in Bild 36 der Farbfläche Emulsion unter der „CCD“ Abdichtung 3 und 4 im Farbton gelb vor der Innendämmanwendung und danach lassen kaum Veränderungen erkennen. Aufgetragen sind die Farbmessungen im Feld unter der Klebmatte sowie unter der Abdichtung 3 und 4. Die Abweichungen sind nach der Innendämmanwendung geringer als vor dem Versuchseinbau.

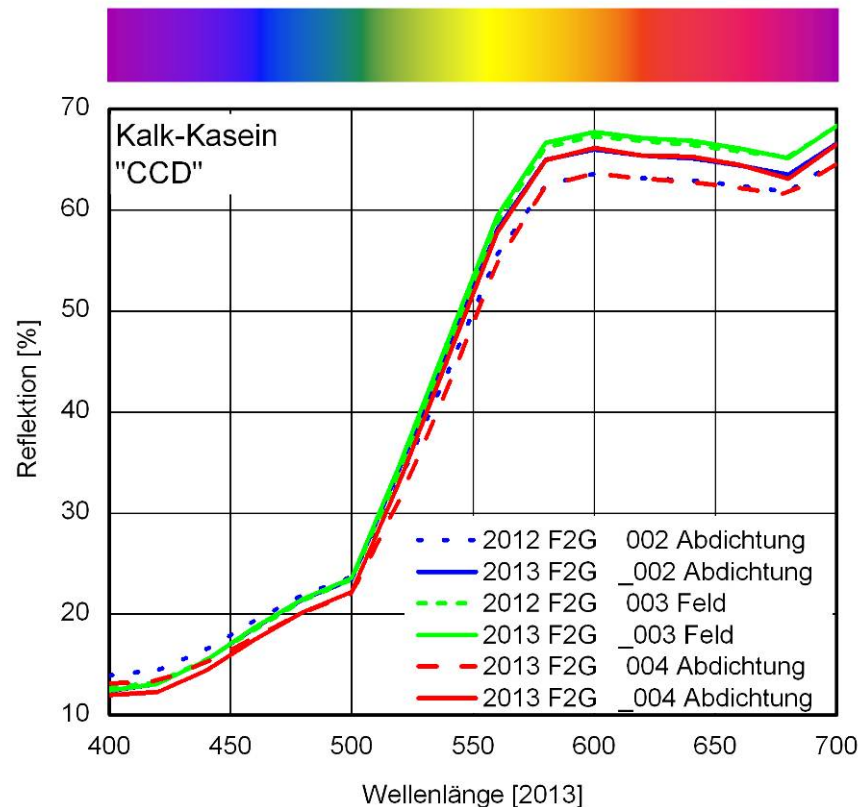


Bild 36:
Ein Vergleich der Spektralkurven der Farbfläche Kalk-Kasein auf der ostseitigen Außenwand.

Detailfeld 6: Emulsion, Abdichtung 3 CCD

Bild 37 zeigt die Detailaufnahme von der ostseitigen Wand im unteren Bereich auf der Höhe der Abdichtung 3 mit zementären Kleber und CCD als Zwischenschicht. Die Messung der Reflektion in Bild 37 zeigt eine geringe Erhöhung nach dem Ausbau der Innendämmung. Die Werte des Farbraums L* zeigen sich entsprechend etwas erhöht wie in Tabelle 9 dargestellt. In Bild 38 ist der Verlauf der Spektralkurven dargestellt. Es zeigen sich nur geringe Veränderungen.



Bild 37:
Detailbild 6 mit Resten von CCD der Abdichtung 3. An den Farbtönen des Bindemittelsystems Zellulose-Leims können keine Veränderungen erkannt werden.

Tabelle 9:
Farbwerte des Bindemitteltyps Zellulose-Leim vor und nach der Innendämmanwendung unter der Abdichtung 3 „CCD“ für den Farbton rot.

Anwendung	Detail	Farbton Zellulose- Leim	Sample CIELab	Datum	Anzahl N	Color scale		
						L*	a*	b*
Abdicht. 4	6	rot	F7R _017	6.12.12	5	39,28	30,53	20,33
Abdicht. 4	6	rot	F7R 017	13.6.13	10	41,39	28,62	17,45
Feld	6	rot	F7R _018	6.12.12	5	39,60	30,63	20,34
Feld	6	rot	F7R 018	13.6.13	10	41,45	28,89	17,64
Abdicht. 3	6	rot	F7R _019	6.12.12	5	39,63	30,66	20,34
Abdicht. 3	6	rot	F7R 019	13.6.13	10	43,70	26,25	15,46

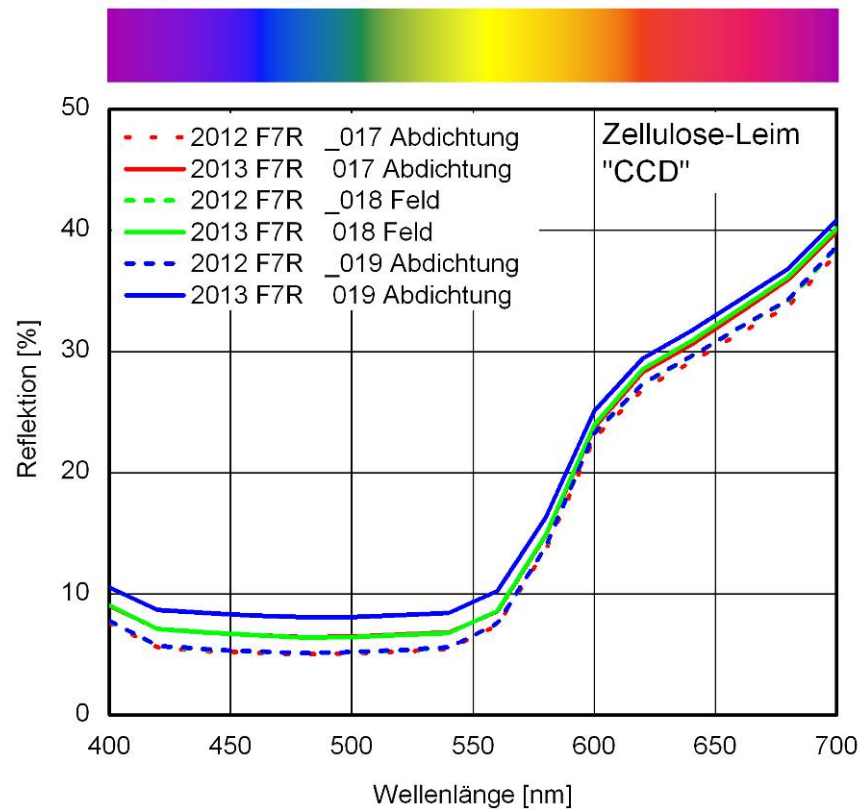


Bild 38:

Ein Vergleich der Spektralkurven der Farbfläche Zellulose-Leim unter den Abdichtungen 3 und 4 sowie Feldfläche unter der Klebmatte im Farbton rot, vor der Innendämmanwendung und danach lässt nur geringe Veränderungen erkennen.

Detailfeld 5: Silikat, Abdichtung 3 und 4 CCD

Im Detailfeld 5 (Bild 39) ist auf dem silikatischem Bindemittelsystem eine Farbveränderung an der Oberfläche erkennbar. Auf dem weißen Trennstreifen aus vorhandener Innenwanddispersion ist Schimmelpilzwachstum festzustellen. Die Tabelle 10 gibt die gemessenen Farbwerte wieder. In Bild 40 sind die Spektralkurven dargestellt. Die Veränderungen sind hier im Vergleich zu den anderen Bindemittelsystemen am geringsten ausgeprägt.



Bild 39:
 Detailaufnahme eines silikatischen Bindemittelsystems mit Schimmelpilz auf dem mit Innenwanddispersion gestrichenen Untergrund.

Tabelle 10:
 Übersicht der L*a*b* Messwerte für das Bindemittelsystem Silikat für den Farbton blau.

Anwendung	Detail	Farbton Silikat	Sample CIELab	Datum	Anzahl N	Color scale		
						L*	a*	b*
Abdicht. 4	5	blau	F11B _029	6.12.12	5	65,66	-17,40	-24,65
Abdicht. 4	5	blau	F11B 029	13.6.13	10	66,71	-16,05	-23,27
Feld	5	blau	F11B _030	6.12.12	5	65,12	-17,44	-24,57
Feld	5	blau	F11B 030	13.6.13	10	66,14	-16,48	-23,82
Abdicht. 3	5	blau	F11B _031	6.12.12	5	65,20	-17,37	-24,44
Abdicht. 3	5	blau	F11B 031	13.6.13	10	66,29	-16,13	-23,43

Bild 40 zeigt die Spektralkurven des Bindemittelsystems Silikat im Farbton blau. Die Messungen vor dem Einbau liegen sehr eng beieinander. Nach der Innendämmmanwendung zeigt sich eine sehr geringe Erhöhung in der Reflektion. Die Werte danach liegen ebenfalls alle dicht beieinander.

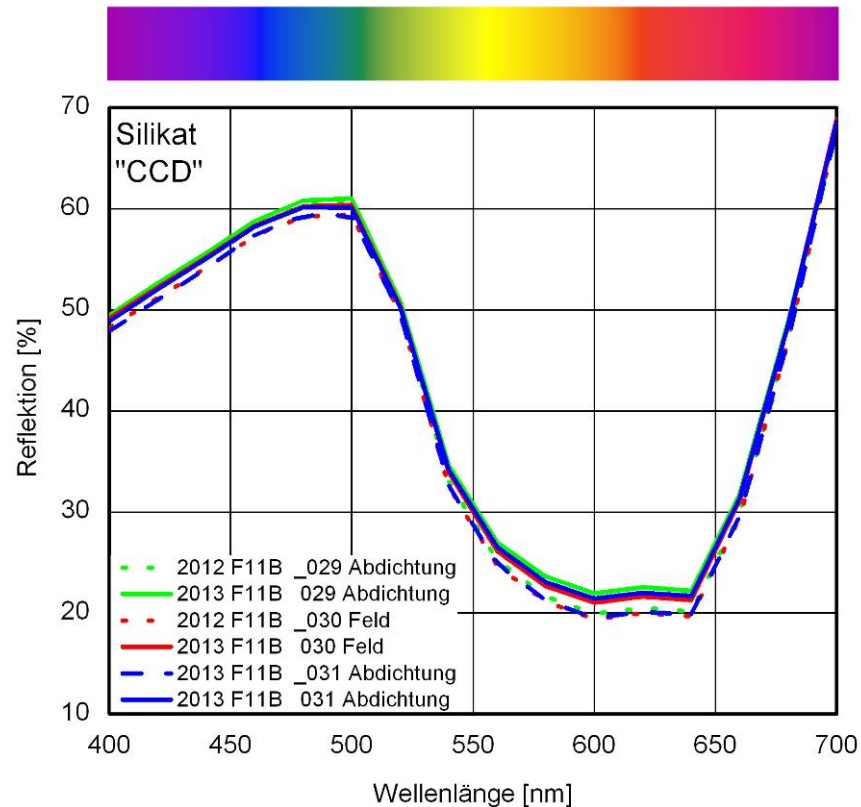


Bild 40:
Vergleich der Spektralkurven der Farbfläche Silikat unter den Abdichtungen 3 und 4 sowie der Feldfläche unter der Klebmatte im Farbton blau, vor und nach der Innendämmmanwendung.

4.2 Messergebnisse der Tracergasmessung zur Hinterströmung

Der Messaufbau für die Tracergasmessung wurde in enger Abstimmung mit dem für die Bereitstellung und Auswertung beauftragtem Labor durchgeführt. Vorangegangene Messungen in anderen Forschungsprojekten hatten bisher zu erfolgreichen Messungen geführt [Kilian et al. 2011].

Bei den gezielt hergestellten Fugen bei einigen Randabdichtungen zwischen Wand und Innendämmung war mit Hinterströmung zu rechnen. Die Sampler der Tracergasmessung sind vermutlich durch die zu lange Versuchsdauer in einen nicht auswertbaren Bereich gelangt. Dadurch kann zur Hinterströmung keine Aussage gemacht werden.

Bei den Samplern für die gezielt komplett abgedichteten Bereiche konnte wegen der gleichen Problematik ebenfalls kein interpretierbares Ergebnis durch das beauftragte schwedische Institut ermittelt werden. Zur Messung der Hinterströmung mit Tracergas gab es auch seitens des schwedischen Institutes keine Erfahrungen. Durch eine nicht nachvollziehbare Lagerung bei dem beauftragtem Institut kann nicht mit ausreichender Sicherheit ein Fehler im methodischen Ansatz nachgewiesen werden.

Für die begleitende Messung des Luftwechsels im Versuchsgebäude mit Tracergas konnte ebenfalls kein Ergebnis durch das schwedische Institut ermittelt werden, obwohl es sich hierbei um eine Standard Verwendung der Tracergas Methode handelte.

4.3 Infrarot Aufnahmen der Wandoberflächen

Durch die Infrarotaufnahmen wurde überprüft, inwieweit die Innendämmung Ihre Funktion erfüllt. Dabei erfolgt eine Kontrolle auf mögliche Schwachstellen oder Ausfall der VIP-Element durch Beschädigung. Mit Ausfall wird hier eine Druckausgleich im Dämmelement auf Umgebungsdruck bezeichnet. Damit einhergehend verringert sich die sehr hohen Dämmleistung zu einer deutlich schlechteren Dämmleistung. Bild 41 zeigt das Versuchsgebäude von der Nordseite vor dem Einbau der Innendämmung mit Bild und IR-Aufnahme.

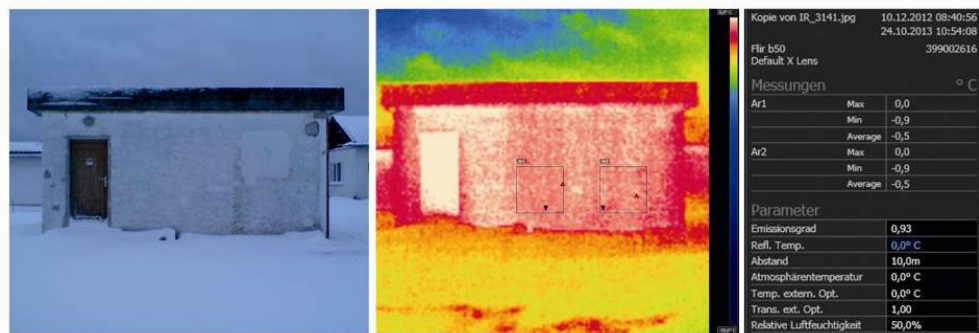


Bild 41:

IR-Aufnahme außen Nordseite am 10. Dezember 2012 kurz vor dem Einbau der Innendämmung. Die Wand rechts von der Eingangstüre hat in etwa eine gleiche Temperaturverteilung. Die gemittelten Temperaturen in den Messfeldern der IR Kamera mit jeweils 400 Messpunkten sind identisch mit -0,5 °C angegeben.

Bild 42 zeigt eine IR-Aufnahme mit Bild von der Nordseite (gleiche Ansicht wie Bild 41) des Versuchsgebäudes vom 14. Februar 2013. Die Nordseite ist rechts von der Eingangstüre bis in etwa Bildmitte mit Innendämmung gedämmt. Der ganz rechte Wandteil wurde nicht gedämmt. Die Außenoberflächen-Temperaturen unterscheiden sich am 14.2.2013 um 8.23 Uhr als Momentaufnahme mit der IR-Kamera im gedämmten Bereich mit -12,4 °C zu -9,9 °C im nicht gedämmten Bereich deutlich um 2,5 Kelvin. Der Messwert ist der Mittelwert der Messfelder der IR-Aufnahme mit jeweils 400 Messpunkten. Die mit einem PT 100 durchgeführte Oberflächen-Temperaturmessung liegt innerhalb der Messfelder der IR-Kamera. Die Temperatursensoren sind auf $\pm 0,1$ Kelvin kalibriert. Die gemessene Oberflächentemperatur beträgt für die gedämmte Fläche als stündliches Mittel um 8.00 Uhr - 11,8 °C und für die nicht gedämmte Fläche - 9,0 °C, die Differenz beträgt hiermit 2,8 Kelvin. Die IR-Messung liegt mit der angegebenen absoluten Genauigkeit von $\pm 1,5$ Kelvin im Rahmen der

Messtoleranz. Die Außentemperatur betrug am 14.2.2013 um 8.00 als stündliches Mittel -15,3 °C.

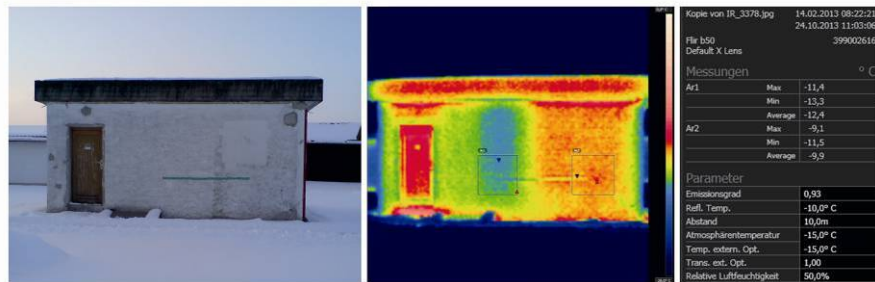


Bild 42:
IR-Aufnahme außen Nordseite am 14. Februar 2013. Die Nordseite ist rechts von der Eingangstüre bis in etwa Bildmitte mit Innendämmung gedämmt. Der ganz rechte Wandteil ist ungedämmt.

4.4 Messergebnisse für relative Feuchte, Temperatur und Wärmestrom

In Bild 43 ist das für den gesamten Versuchszeitraum vorherrschende Außenklima dargestellt. Die Außentemperaturen zeigen eine lange Wintersaison 2012 / 2013 mit tiefen Temperaturen bis -17 °C.

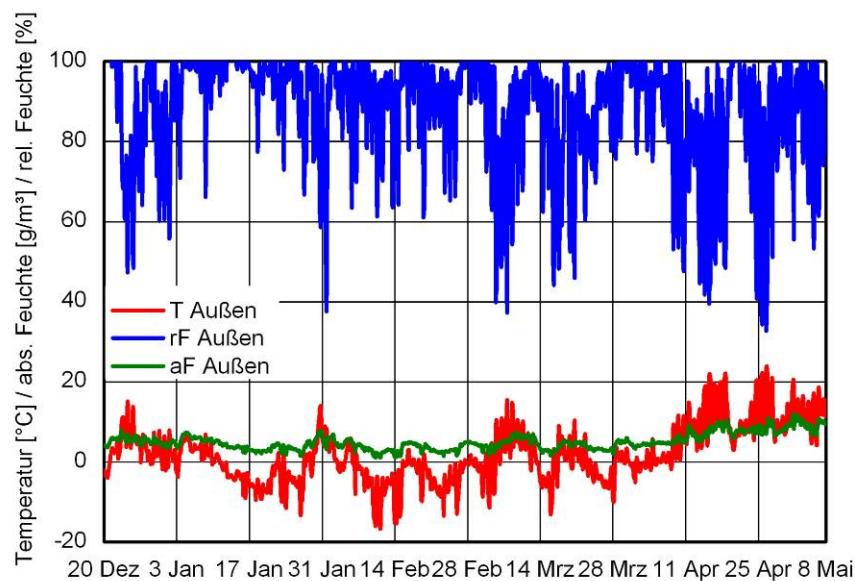


Bild 43:
Außenklima, gemessen an der Wetterstation am Fraunhofer IBP vom 20.12.2012 bis 8.5.2013.

Wand Nord

Ein Vergleich der Messdaten (Bild 44) an der Wand Nord im gedämmten Bereich mit nicht gedämmte Wandbereiche zeigt den Unterschied im Temperaturverlauf der Oberflächentemperaturen und der Grenzschichttemperatur an der ehemaligen Innenoberfläche. Deutlich erkennbar sind die tiefen Temperaturen an der Außenoberfläche. Im gedämmten Bereich sinken die Außenoberflächentemperaturen weiter ab. Durch hohe Dämmwirkung der Innendämmung kommt es zu einer erheblichen Absenkung der Temperatur an der ehemaligen Außenoberfläche. Eine Detailauswertung erfolgt im Bild 45 für den Monat Februar.

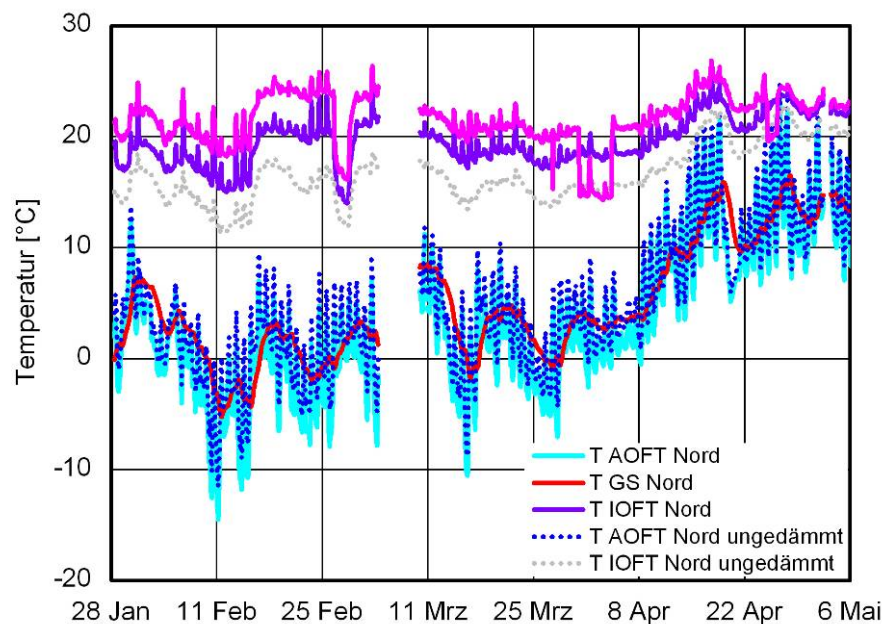


Bild 44:

Ein Vergleich der Wand Nord im gedämmten Bereich mit nicht gedämmte Wandbereiche zeigt den Unterschied im Temperaturverlauf. Detailauswertung der Wand Nord für den Zeitraum 01. Februar bis 01. März 2013. T ist die Abkürzung für Temperatur, AOFT ist die Außenoberfläche, GS die Grenzschicht zwischen ehemaliger Innenoberfläche und Innendämmung, IOFT die Innenoberfläche.

Die neue Innenoberfläche auf der Innendämmung hat eine im Mittel um 3,5 Kelvin höhere Oberflächentemperatur im Vergleich zur originalen Oberfläche während des Zeitraums vom 01. Februar bis 01. März 2013. Die Außenoberflächentemperatur der gedämmten Wand sinkt im Mittel um 2,0 Kelvin von 0,3 °C auf -1,7 °C ab. Die Temperatur an der ehemaligen Innenoberfläche sinkt auf nahezu der Außenoberflächentemperatur ab. Im Mittel beträgt die Grenzschichttemperatur 0,7 °C für den Monat Februar. In Bild 45 sind die Temperaturverläufe dargestellt.

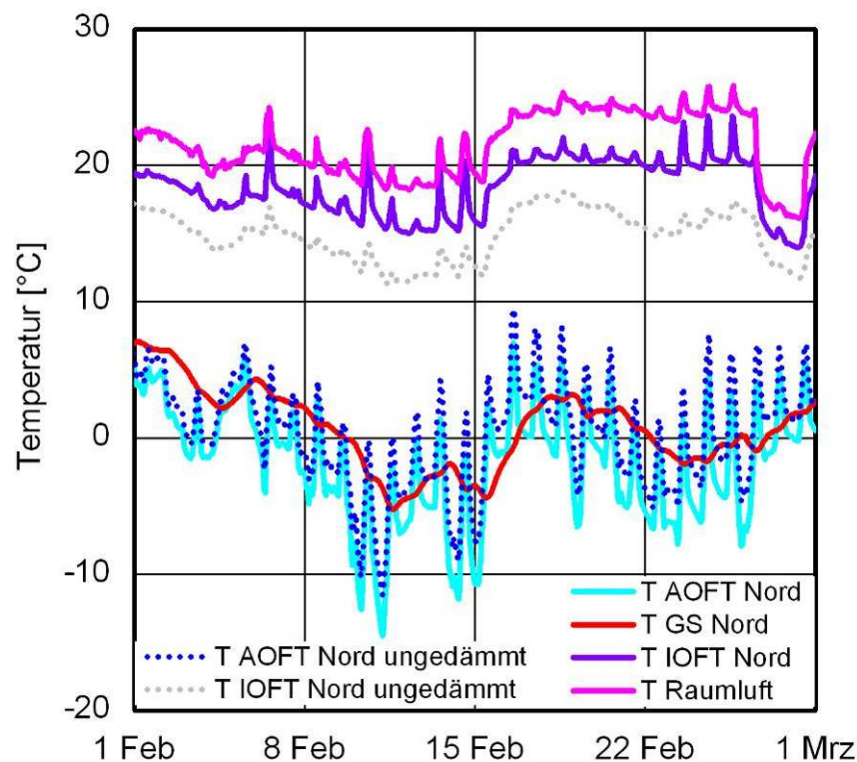


Bild 45:

Vergleich der Wand Nord im gedämmten Bereich mit nicht gedämmte Wandbereich zeigt den Unterschied im Temperaturverlauf der Oberflächentemperaturen und Grenzschichttemperatur zwischen Innendämmung und ehemaliger originaler Innenoberfläche.

Die Temperaturverläufe der Raumluft sowie der Temperaturen in der Messachse der Wand Nord sowie der aufgezeichnete Wärmestrom sind in Bild 46 dargestellt.

In Bild 47 und 48 sind über jeweils 16 Tage die Messwerte für Temperatur und relativer Feuchte ($T_{GS\ Kombi}$ und $rF_{GS\ Kombi}$) in der Grenzschicht (GS) zwischen ehemaliger Innenoberfläche und Innendämmung gezeigt. Bild 47 zeigt den Verlauf für den Zeitraum der zweiten Februarhälfte. Die relative Feuchte liegt bei 100 %. Bild 48 zeigt den Messverlauf für die ersten zwei Aprilwochen. Die relative Feuchte in der Grenzschicht liegt nach wie vor bei 100 %. Der Feuchtsensor wurde so verbaut, dass dieser zur Regeneration und Überprüfung während des Versuches ausgebaut werden konnte. Der Sensor war nach den Messungen noch intakt. Ein Absenken der relativen Feuchte in der Grenzschicht konnte bis zum Ausbau der Innendämmung mit der Messung der relativen Feuchte nicht beobachtet werden.

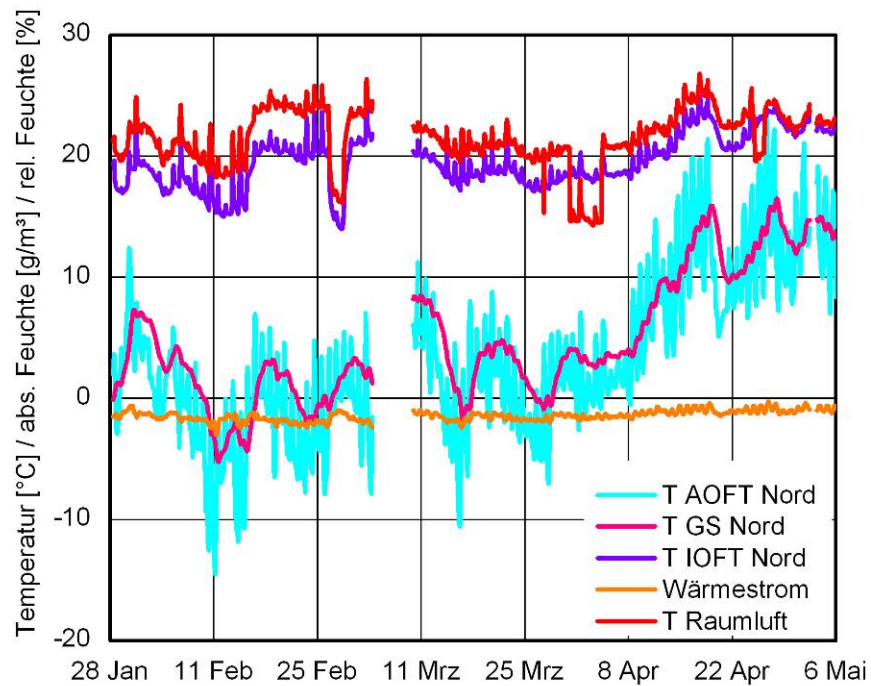


Bild 46:
Temperaturverlauf in der Messachse Wand Nord mit zusätzlicher Raumlufttemperatur und Wärmestrommessung.

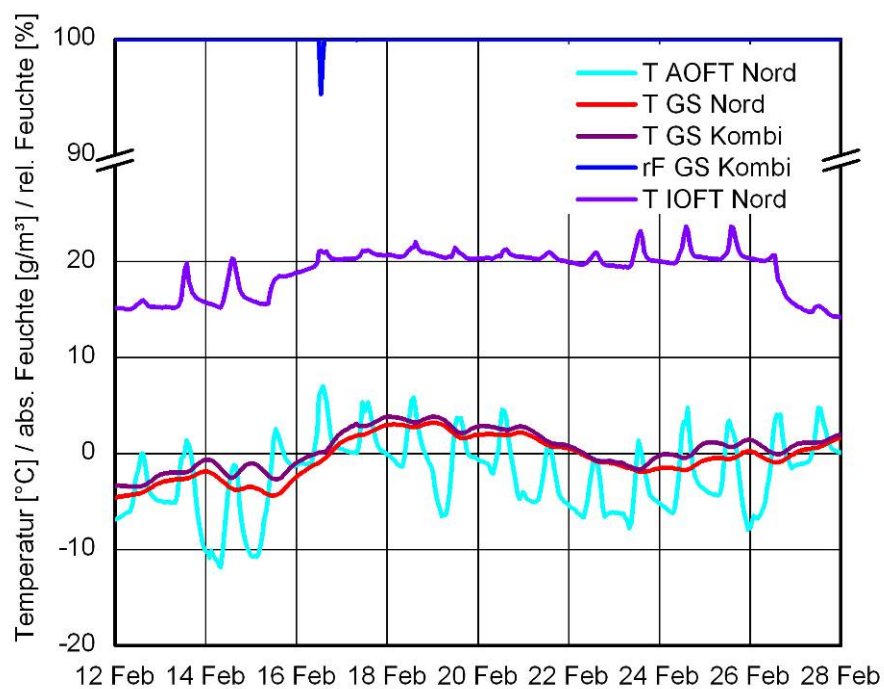


Bild 47:
Temperaturverlauf und Verlauf der relativen Feuchte während des Messzeitraumes vom 12.2.2013 bis 28.2.2013.

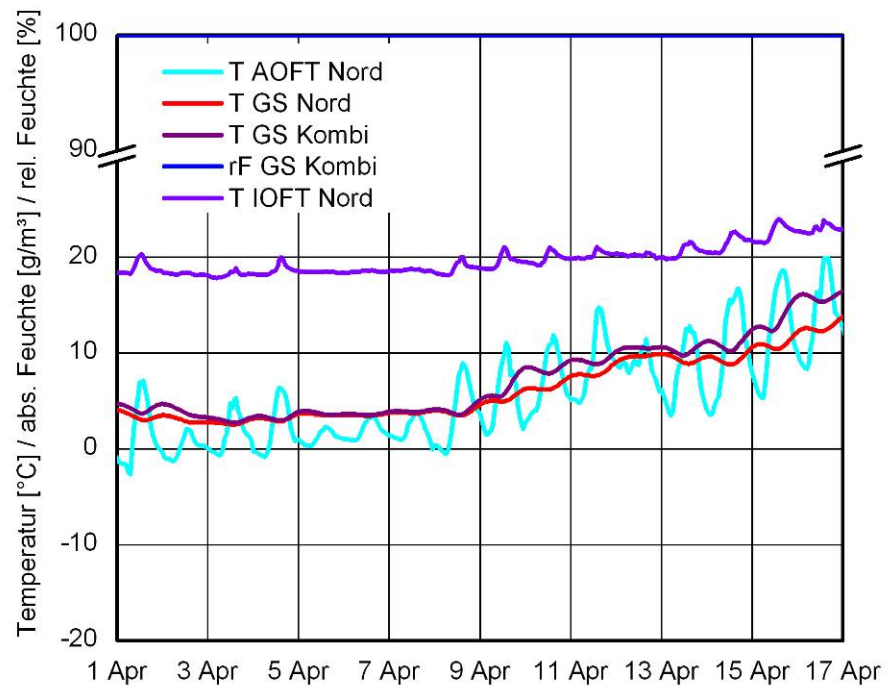


Bild 48:
Temperaturverlauf und Verlauf der relativen Feuchte während des Messzeitraumes vom 1.4.2013 bis 17.4.2013. Die relative Feuchte liegt bei 100 %.

Wand Ost

Die Messwerte für Temperatur und Wärmestrom sowie Raumlufthtemperatur sind in Bild 49 dargestellt. Es ergeben sich ähnlich Verläufe wie für die Messachse Wand Nord. Die Temperatur an der Außenoberfläche (T AOFT) zeigt deutlich stärkere Schwankungen im Temperaturverlauf bedingt durch die Sonneneinstrahlung auf der Ostseite.

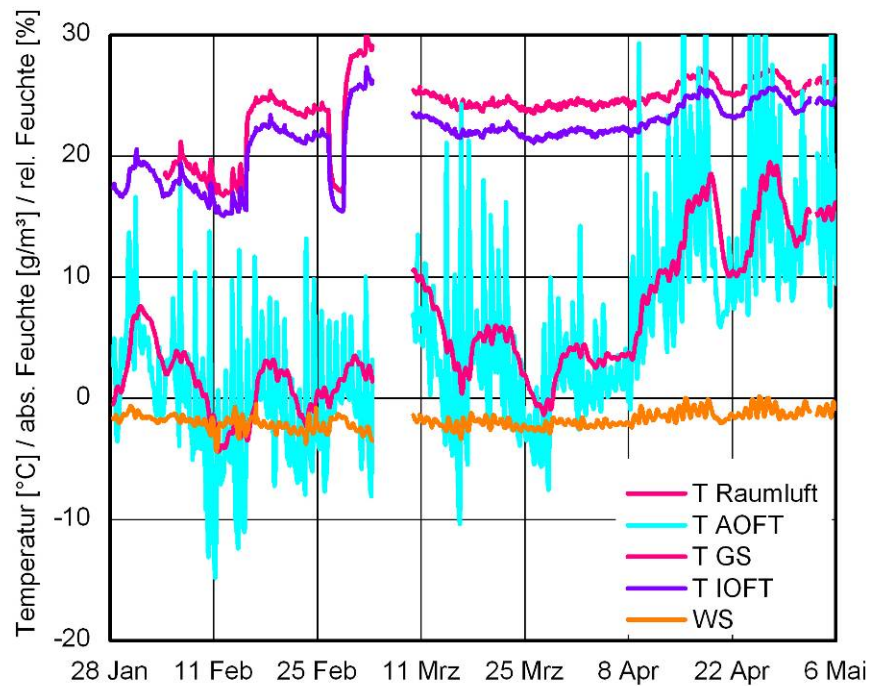


Bild 49:
Temperaturverlauf in der Messachse der ostseitigen Wand mit Raumlufttemperatur.

Wand Süd

Die Messwerte für Temperatur und Wärmestrom sowie Raumlufttemperatur sind in Bild 50 dargestellt. Es ergeben sich ähnlich Verläufe wie für die Messachse Wand Nord. Die Temperatur an der Außenoberfläche (T AOFT) zeigt deutlich stärkere Schwankungen im Temperaturverlauf bedingt durch die Sonneneinstrahlung auf der Südseite.

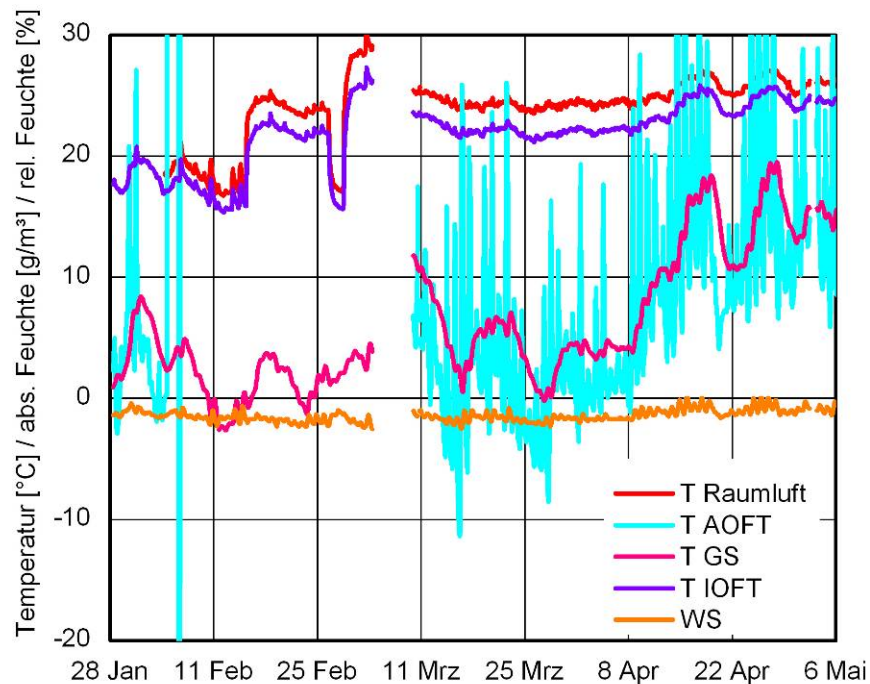


Bild 50:

Temperaturverlauf in der Messachse der südseitigen Wand mit Raumlufttemperatur. Der Temperatursensor auf der Außenoberfläche (T AOFT) ist nach einigen Tagen ausgefallen.

4.5 Validierungsberechnungen

4.5.1 Rechnerische Untersuchung anhand der Messdaten

Im Rahmen der Untersuchungen werden die Ergebnisse der durchgeführten Messungen der Temperatur- und Feuchteverhältnisse in den Außenwänden für Validierungsberechnungen verwendet. Die rechnerischen Untersuchungen von gekoppelten Wärme- und Feuchtetransportvorgängen werden auch hierzu mit dem am Fraunhofer IBP entwickelten und mehrfach verifizierten eindimensionalen Simulationsprogramm WUFI® Pro [Künzel, 1994] durchgeführt. Mithilfe der Simulationssoftware WUFI® Pro und den bekannten Materialkennwerten und Klimarandbedingungen werden die hygrothermischen Verhältnisse in der Nord- und Südwand des Versuchsgebäudes simuliert und mit den Messergebnissen verglichen.

Zur Durchführung einer erfolgreichen Validierungsberechnung ist es wichtig, dass der genaue Konstruktionsaufbau und die verwendeten Materialien, sowie die genauen Außen- und Innenklimabedingungen bekannt sind. In der nachfolgenden Bild 51 ist der Wandaufbau mit den eingesetzten Materialien und der Lage der Monitorpositionen dargestellt. Für die Validierungsberechnungen wird die Messstelle an der Grenzschicht (grüner Punkt in Bild 51) zwischen dem alten Innenputz und dem aufgetragenen Wirtgelege verwendet, da es sich hier aus hygrothermischer Sicht um die kritischste Stelle handelt.

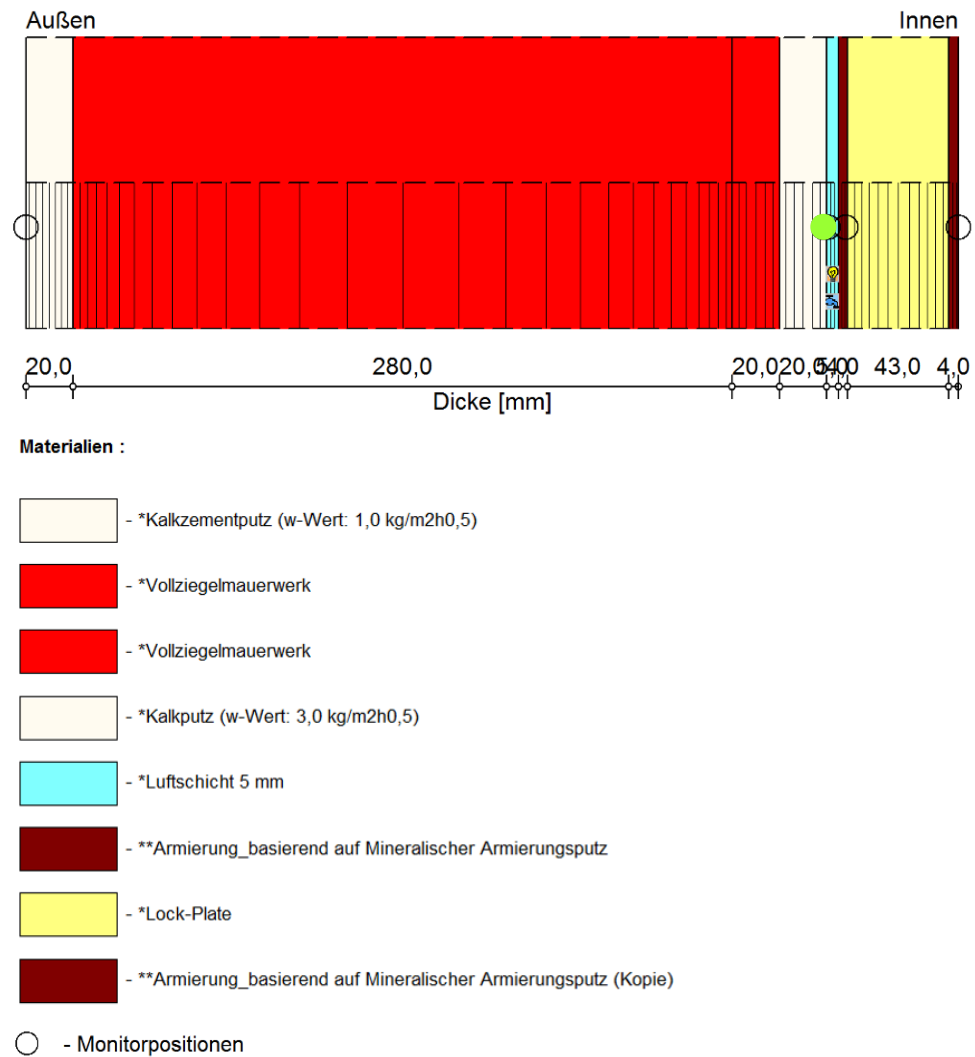


Bild 51:
Schematische Darstellung des Wandaufbaus der Nord- bzw. Südwand des Versuchshauses mit innenseitiger VIP-Dämmung und Kennzeichnung der Monitorposition, sowie die Zuordnung der Materialien zu den jeweiligen Farbschichten.

Als Klimarandbedingungen werden die gemessenen Außenklimadaten der Wetterstation vom Fraunhofer-IBP und die gemessenen Innenraumtemperaturen- und feuchten angesetzt. Die verwendeten Materialdaten werden hauptsächlich aus der WUFI-Materialdatenbank entnommen. Die Materialdaten der VIP-Dämmung werden anhand der Herstellerangaben im Programm implementiert.

Die Validierungsberechnungen werden für den Zeitraum vom 10. Feb. bis 3. März 2013 und vom 28. März bis 18. April 2013 durchgeführt und dargestellt. Der Zeitraum vom 3.3. bis 28.3.2013 wird nicht dargestellt, da in diesem Zeitraum einerseits die Messung ausgefallen ist und andererseits der Feuchtefühler zur Überprüfung aus der Messstelle herausgenommen wurde. Die Ergebnisse der Validierung für die Nordwand zeigt Bild 52 und für die Südwand

Bild 53 dargestellt. Bei der Durchführung der Validierungsberechnungen werden pro Wand jeweils zwei Varianten dargestellt. Die blauen Linien zeigen den Verlauf der Temperaturen und absoluten Feuchten, wenn es zu keiner Hinterlüftung der Dämmung kommt und die grüne Linie zeigt den Verlauf auf, wenn es zu einer geringen und konstanten Hinterlüftung der Dämmung mit Innenraumluft kommt. Durch das Annehmen einer geringen Hinterlüftung gelingt es, dass die berechneten Verläufe der Temperaturen, wie auch die der absoluten Feuchten, etwas näher entlang der Messkurven verlaufen. Insgesamt können für die Nord- und Südwand die Temperatur- und Feuchteverläufe realitätsnah nachgerechnet werden, und somit für weitere Berechnungen verwendet werden.

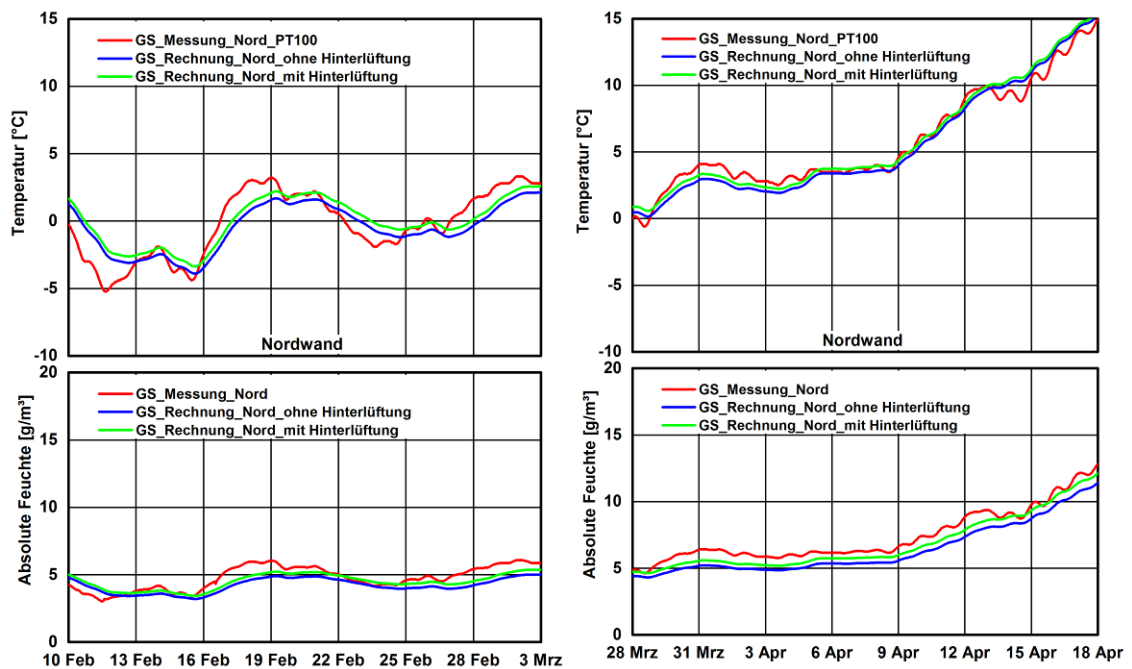


Bild 52:

Darstellung der Ergebnisse der Validierungsberechnung für die Nordwand mit und ohne Hinterströmung der VIP-Dämmung. In der oberen Grafik sind jeweils die Temperaturen an der Grenzschicht zwischen dem alten Innenputz und dem Wirrgelege dargestellt. Die unteren Grafiken zeigen die Verläufe der absoluten Feuchten an der Grenzschicht dargestellt.

links: Messzeitraum vom 10.2. – 3.3.2013

rechts: Messzeitraum vom 28.3. – 18.4.2013

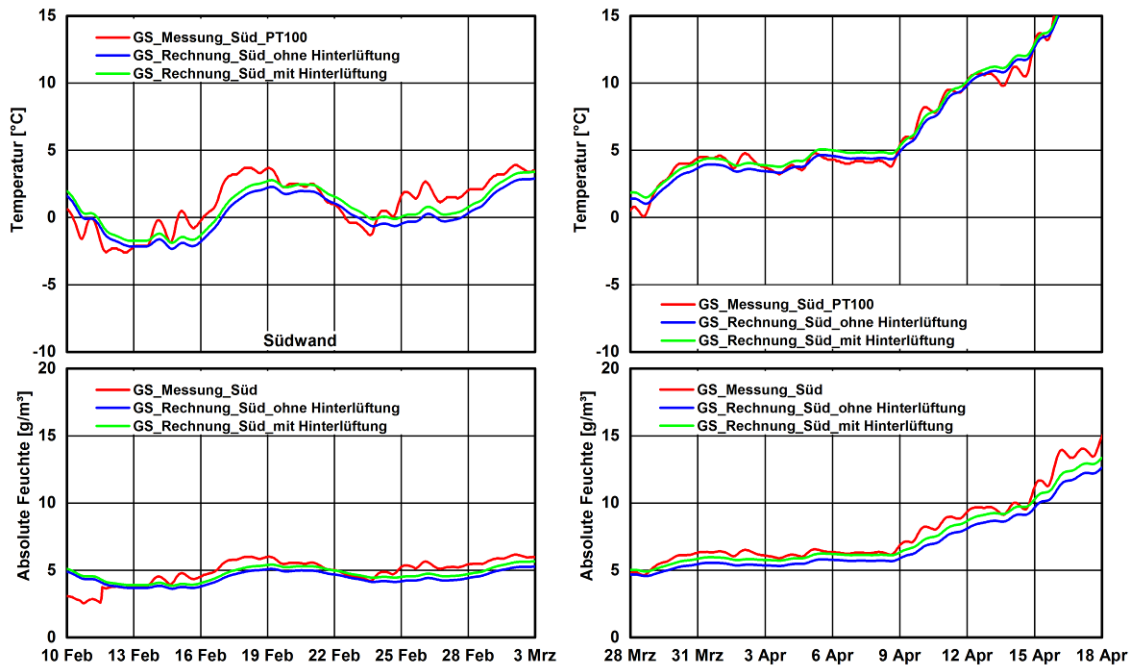


Bild 53:

Darstellung der Ergebnisse der Validierungsberechnung für die Nordwand mit und ohne Hinterströmung der VIP-Dämmung. In der oberen Grafik sind jeweils die Temperaturen an der Grenzschicht zwischen dem alten Innenputz und dem Wirrgelege dargestellt. Die unteren Grafiken zeigen die Verläufe der absoluten Feuchten an der Grenzschicht dargestellt.

links: Messzeitraum vom 10.2. – 3.3.2013

rechts: Messzeitraum vom 28.3. – 18.4.2013

4.5.2 Langzeitberechnungen in Anlehnung an den Versuchsaufbau

Aufbauend auf die Validierungsberechnungen soll in einem weiteren Schritt das Langzeitverhalten der hygrothermischen Verhältnisse einer Nord- und Südwand mit VIP-Innendämmung mit und ohne Hinterlüftung beurteilt werden. Des Weiteren wird das Schimmelpilzwachstum an der Grenzschicht zwischen dem alten Innenputz und dem neu aufgetragenen Wirrgelege mit dem Vorhersagemodell WUFI® Bio [Sedlbauer, 2001] bewertet, das auf Basis von drei Wachstumsvoraussetzungen (Feuchte, Temperatur und Substrat) entwickelt wurde und instationäre Randbedingungen berücksichtigt.

Hierfür werden die bereits implementierten Konstruktionen und Materialien in einer neuen Berechnung angesetzt. Als außen anliegendes Klima wird das Holzkirchner Klima von 1991 angesetzt. Innen herrschen Wohnraumverhältnisse mit normaler Feuchtelast, dies entspricht einem sinusförmigen Verlauf der Temperatur zwischen 22 °C im Juni und 20 °C im Dezember, sowie einer relativen Feuchte zwischen 60 % im August und 40 % im Februar. Die Wärmeübergangswiderstände sind für die Wand außenseitig mit 0,0588 [m²*K/W] und innenseitig mit 0,125 [m²*K/W] berücksichtigt.

Für die Bewertung der Konstruktion wird jeweils der Wassergehalt des alten Innenputzes und des Ziegelmauerwerkes, sowie Temperatur und relative Feuchte direkt auf dem alten Innenputz, dargestellt. Ebenfalls wie bei der Validierung werden die Wandvarianten einmal ohne und einmal mit Hinterströmung der Dämmung berechnet, um hier den Einfluss von Undichtigkeiten auf den Feuchtehaushalt der Konstruktion aufzuzeigen. Die hygrothermischen Verhältnisse an der ausgewählten Monitorposition auf dem alten Innenputz werden des Weiteren für die Berechnung des Schimmelpilzbewuchses verwendet und nachfolgend mit dargestellt und anhand der folgenden Bewertungsskala beurteilt.

Durch die Verknüpfung der Ergebnisse des Biohygrothermisches Modells mit dem Mould-Index des Viitanen-Modells [Viitanen, 1991] wird erreicht, dass ein inzwischen anerkanntes und vor allem anschauliches Bewertungsmaß auch bei WUFI®-Bio genutzt werden kann [Krus et al, 2011]. Der Mould-Index ist dabei folgendermaßen definiert:

0 = kein Wachstum

1 = ein wenig Wachstum (mikroskopisch)

2 = mäßiges Wachstum (mikroskopisch) Bedeckung > 10 %

3 = ein wenig sichtbares Wachstum (dünne Hyphen sind zusätzlich mikroskopisch erkennbar)

4 = sichtbares Wachstum (Wachstum ebenfalls mikroskopisch erkennbar)

5 = Bedeckung > 50 %

6 = dichte Bedeckung 100 %

Erst ab einem Mould-Index von 2 ist unter dem Mikroskop ein mäßiges Schimmelpilzwachstum zu erkennen und erst ab einem Mould-Index von 3 wird das Schimmelpilzwachstum sichtbar. Aus diesem Grund wird bei einem Mould-Index von unter 1 von keiner Gefährdung ausgegangen und erst bei über 3 sind unbedingt Maßnahmen erforderlich. Dazwischen hängt die Entscheidung über die Notwendigkeit von den jeweiligen Randbedingungen ab.

Nachfolgend sind in Bild 54 bis Bild 56 die berechneten Wassergehalte für eine Nordwand über einen Zeitraum von zehn Jahren dargestellt. In Bild 54 oben ist der Wassergehalt im alten Innenputz mit (rote Linie) und ohne (schwarze Linie) Hinterlüftung der Dämmung abgebildet. Hier zeigt sich, dass es durch eine Undichtigkeit der Dämmung einerseits zu einer jahreszeitlich bedingten Schwankung und andererseits zu einem kontinuierlich leichten Anstieg des Wassergehaltes kommt. Im Ziegelmauerwerk zeigt sich ein ähnlicher Effekt, allerdings steigt der Wassergehalt bei einer Hinterströmung der Dämmung im Vergleich zu einer dichten Konstruktion nur geringfügig höher an.

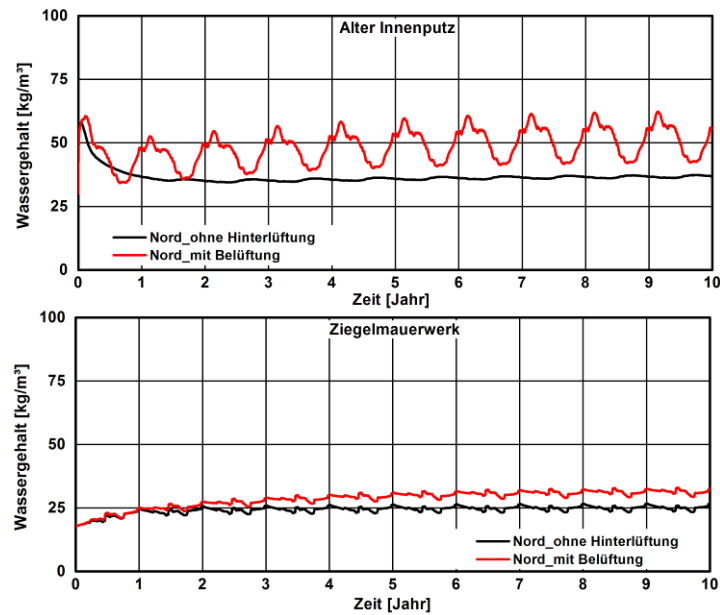


Bild 54:
Zeitliche Verläufe der Wassergehalte im alten Innenputz und im Ziegelmauerwerk einer Nordwand mit und ohne Hinterströmung der VIP-Dämmung über einen Zeitraum von zehn Jahren.

Für die Bewertung des Schimmelpilzwachstums an der Grenzschicht zwischen altem Putz und neu aufgebrachtem Wirrgeleges werden die Temperatur- und Feuchteverhältnisse der Monitorposition (Bild 55) verwendet. Der Verlauf der relativen Feuchte an der Grenzschicht zeigt hier ebenfalls, welchen Einfluss eine Undichtigkeit der Dämmebene auf die Konstruktion hat. Die relative Feuchte steigt bei Vorhandensein einer Undichtigkeit kontinuierlich über zehn Jahre an. Der entsprechende Verlauf des Mould-Indexes für das letzte berechnete Jahr ist in Bild 56 für eine Nordwand mit und ohne Hinterlüftung dargestellt. Hierbei zeigt sich, dass es durch eine Hinterströmung der Dämmung zu einem bereits sichtbaren Schimmelwachstum kommt. Ist die Konstruktion dicht, ergibt sich lediglich ein minimales Risiko von Schimmelpilzwachstum an dieser Stelle der Wandkonstruktion.

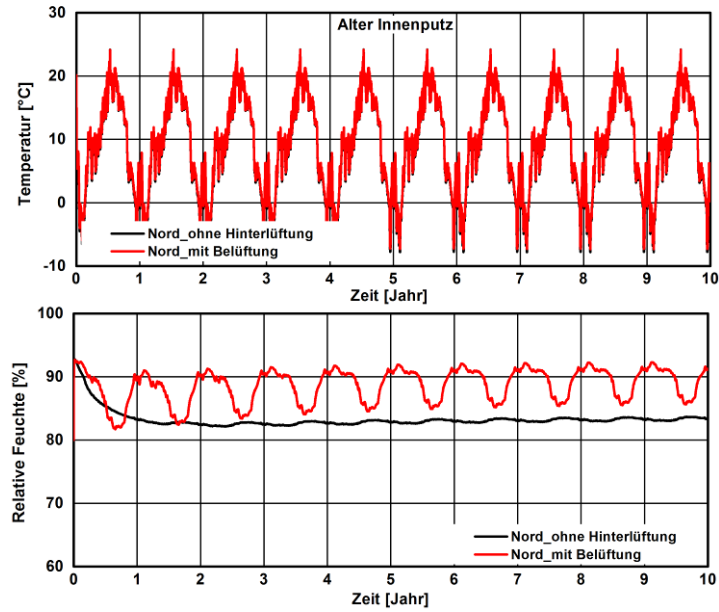


Bild 55:
Temperatur- und Feuchteverläufe an der Grenzschicht zwischen dem alten Innenputz und neu aufgebrachtem Wirrgelege bei einer dichten und undichten Konstruktion über einen Zeitraum von zehn Jahren.

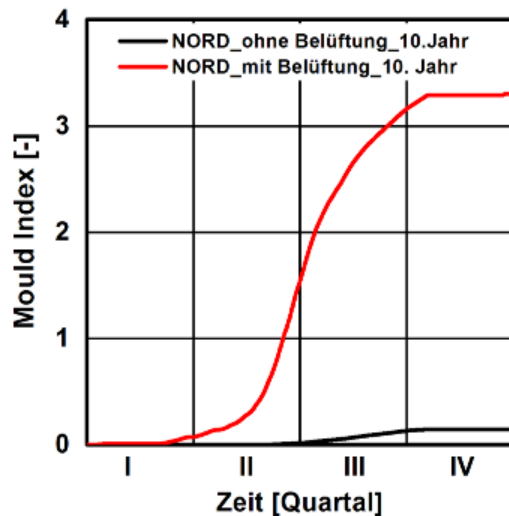


Bild 56:
Zeitlicher Verlauf des Mould-Indexes an der gewählten Monitorposition an der Grenzschicht des alten Innenputzes in einer Nordwand im Vergleich mit und ohne Hinterlüftung der Dämmung während des letzten berechneten Jahres.

Weiterführend werden die Ergebnisse einer Südwand mit und ohne Hinterströmung der Dämmung dargestellt. Hier zeigt sich in Bild 57, wie auch im Norden, dass es durch eine leichte Hinterströmung der Dämmung zu jahreszeitlichen Schwankungen im Wassergehalt des alten Putzes kommt. Allerdings

zeigt sich im Süden, dass auch ohne Hinterströmen der Wassergehalt des alten Innenputzes, wie auch des Ziegelmauerwerkes über einen Zeitraum von zehn Jahren kontinuierlich und leicht ansteigt. Dies ist darin begründet, dass das außenseitig aufgenommene Regenwasser durch die solare Einstrahlung erwärmt wird, sodass dort ein höherer Dampfdruck entsteht. Dies führt dazu, dass eine Diffusion nach innen stattfindet, ein Effekt der in der Bauphysik als Umkehrdiffusion bezeichnet wird.

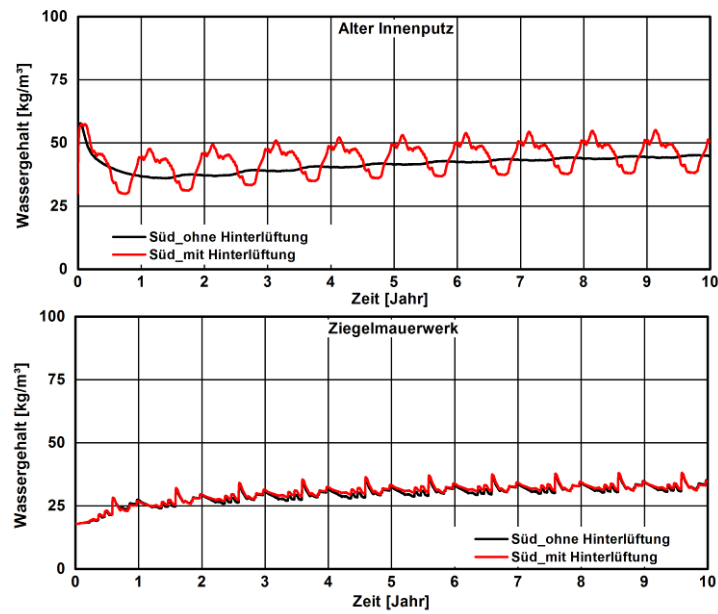


Bild 57:

Zeitliche Verläufe der Wassergehalte im alten Innenputz und im Ziegelmauerwerk einer Südwand mit und ohne Hinterströmung der VIP-Dämmung über einen Zeitraum von zehn Jahren.

Auch an der Monitorposition der Südwand (Bild 58) zeigt sich, dass es mit und ohne Undichtigkeit in der Konstruktion zu einem kontinuierlichen Anstieg der relativen Feuchte an der Grenzschicht zwischen Putz und Wirtgelege kommt. Deshalb ergibt sich in der Berechnung des Mould-Indexes (Bild 59), dass beide Varianten ein nahezu identisches, aber noch mäßiges Schimmelpilzwachstum aufweisen.

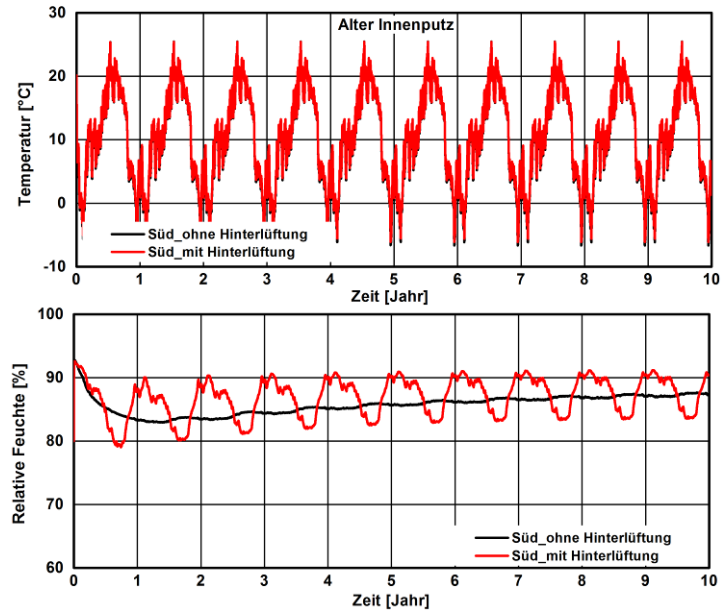


Bild 58:
Temperatur- und Feuchteverläufe an der Grenzschicht zwischen dem alten Innenputz und neu aufgebrachtem Wirrgelege bei einer dichten und undichten Konstruktion auf der Südseite über einen Zeitraum von zehn Jahren.

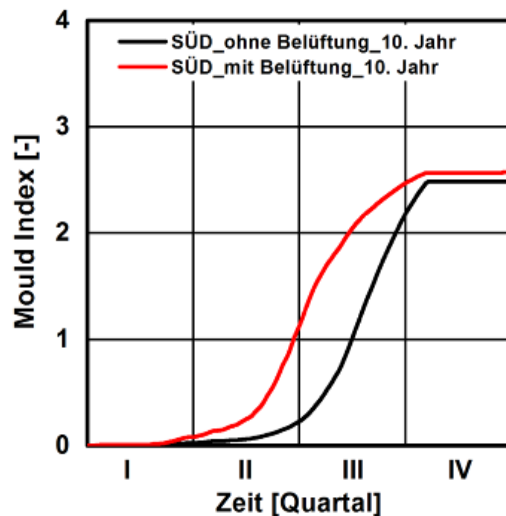


Bild 59:
Zeitlicher Verlauf des Mould-Indexes an der gewählten Monitorposition an der Grenzschicht des alten Innenputzes in einer Südwand im Vergleich mit und ohne Hinterlüftung der Dämmung während des letzten berechneten Jahres.

4.5.3 Zusammenfassung der Ergebnisse der Langzeitberechnung

Anhand der Auswertung der Ergebnisse der Langzeitbetrachtung der hygrothermischen Verhältnisse einer innenseitig gedämmten Wandkonstruktion mit VIP-Dämmung zeigt sich, dass es je nach Ausrichtung der Konstruktion zu

einer Auffeuchtung und einem sichtbaren Schimmelpilzwachstum an der Grenzschicht zwischen Alt und Neu kommen kann. Eine Undichtigkeit in der Dämmebene führt ebenfalls zu einer Erhöhung der kritischen Situation an der Grenzschicht. Voraussetzung für das Schimmelpilzwachstum ist aber das vorhanden sein lebensfähiger Sporen an dieser Stelle. Im Falle der Hinterlüftung über Undichtigkeiten ist die immer gegeben. Bei einer dichten Konstruktion werden die auf der Originaloberfläche vorhandenen Sporen durch den zumeist noch alkalischen Kleber abgetötet, sodass trotz für das Schimmelpilzwachstum geeigneter Feuchten und Temperaturen Schimmelpilzwachstum ausgeschlossen werden kann.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Der Einbau der Innendämmung erfolgte zum kalendarischen Winteranfang. Nach ca. 5 ½ Monate erfolgte die Demontage der Innendämmung zur Bewertung der originalen Oberfläche.

Erst mit dem Rückbau der Innendämmung nach der Heizperiode waren die Trägergas Sampler zugänglich für eine Auswertung. Ein auswertbares Ergebnis konnte aus den im Kapitel 4.2 beschriebenen Gründen leider nicht erzielt werden.

Der Rückbau erfolgte mit Dokumentation der entstanden Materialverluste an dem originalen Putz und Mauerwerk durch die Montage. Die Oberfläche zeigte zunächst kaum Spuren einer Veränderung. Der Rückbau konnte dank der applizierten Klebematte ohne nennenswerte Schäden erfolgen. Bei den Detailuntersuchungen zur Farbwiedergabe wurden nur geringfügige Farbveränderungen festgestellt. Belastbare Aussagen zur Alterung können jedoch wegen der Kürze der Versuchsdauer nicht gemacht werden. Ebenfalls ist zu berücksichtigen, dass es bei den neu aufgetragenen Bindemittelsystemen um Anstriche nahe historischen Farben handelt, die jedoch neu aufgebracht wurden. Eine Übertragung auf bereits gealterte Materialien ist deshalb noch zu prüfen.

Durch die gezielt hergestellten Schlitze in einigen Versuchsfeldern ist eine Hinterströmung anzunehmen. Eine Schimmelpilzbildung wurde an den Grenzschichtflächen festgestellt. Die Simulation mit den Messdaten und darauf aufbauenden weiteren Berechnungen bestätigen ein mögliches Schimmelpilzwachstum. Mit der Simulation konnte die Hinterströmung mit berücksichtigt werden.

Die Untersuchungen zur reversiblen Montage tragen zu einer wesentlichen Weiterentwicklung der reversiblen Innendämmsysteme bei. Die Ergebnisse hinsichtlich des Erhaltungszustandes der Farboberflächen sind ermutigend. Die Schimmelpilzproblematik durch Hinterströmung konnte trotz des betriebenen Aufwandes zur Abdichtung nicht gelöst werden. Hier wäre zu überlegen, ob anstelle des offenen Wirrgeleges nicht doch eine vollflächige Verklebung günstiger wäre. Allerdings müsste zwischen dem Kleber und der Originaloberfläche eine geeignete Trennschicht eingebracht werden, die einen direkten Kontakt vermeidet sowie ein Eindiffundieren ungünstiger Chemikalien aus dem Kleber.

Eine Weiterentwicklung reversibler System ist für die energetische Sanierung von Bestandsbauten und historisch wertvollen Gebäuden dringend erforderlich. Weiterer Forschungsbedarf ist hier gegeben um reversible und dabei hinterströmungssichere Systeme zu entwickeln. Das Konzept der Tracergasmessung ist trotz des nicht quantifizierbarem Ergebnis qualitativ interpretierbar. Weitere Untersuchungen hierzu mit einem veränderten Versuchsaufbau sind ein vielversprechender Ansatz, um die Hinterströmung mit begleitender Simulation zu quantifizieren.

6 Literatur

Sedlbauer, Klaus; Lenz, K.; Leistner, P.; König, N.: Vakuuminisationspaneele aus hygrothermischer und akustischer Sicht. Online Ressource 2005; Quelle: 2. Fachtagung VIP Bau - Erfahrungen aus der Praxis, 16.-17. Juni 2005.

Charta von Venedig, entnommen von der Homepage der Vereinigung der Landesdenkmalpfleger <http://www.denkmalpflege-forum.de/Download/Nr01.pdf>

NTVVS 118: Ventilation: Local Mean Age of Air-Homogeneous Emission Technique; Nordtest Method, Finland 1997

DIN ISO 16000-8: Innenraumluftverunreinigungen – Teil 8: Bestimmung des lokalen Alters der Luft in Gebäuden zur Charakterisierung der Lüftungsbedingungen, Beuth-Verlag GmbH, Berlin 2008

Kilian, R., Bichlmair, S., Wehle, B. & Holm, A., 2011. Passive sampling as a method for air exchange measurements for whole building simulation of historic buildings. 9th Nordic Symposium on Building Physics, NSB 2011, Proceedings V3, p. 1135- 1142, Tampere University of Technology, Tampere, Finland.

Künzel, H.M.: Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten. Diss. Universität Stuttgart 1994.

DIN ISO 1664 – 4: Farbmeterik - Teil 4: CIE 1976 L*a*b* Farbenraum, 2012.

Sedlbauer K.: Vorhersage von Schimmelpilzbildung auf Bauteilen. Dissertation, Stuttgart, 2001.

Krus, M.; Seidler, C.M.; Sedlbauer, K.: Übertragung des Mould-Indexes auf das biohygrothermisches Modell zur Schimmelpilzvorhersage. IBP-Mitteilung 38, Valley 2011.

Viitanen, H.; Ritschkoff, A.: Mould growth in pine and spruce sapewood in relation to air humidity and temperature. Uppsala: Swedish University of Agriculture Sciences, Department of Forest Products, 1991.