

Wissenschaftliche Analyse eines auf vorgefertigten Vakuum-Paneel-Verbundplatten beruhenden Innendämmsystems

Abschlussbericht

Antragsteller des Forschungsprojektes:

VARIOTEC GmbH & Co. KG
Weißmarterstraße 3-5
D-92318 Neumarkt

Forschende Stelle:

Passivhaus Institut
Dr. Wolfgang Feist
Rheinstraße 44 – 46
D-64283 Darmstadt

gefördert von:

Forschungsinitiative Zukunft Bau
Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung
Referat II3
Deichmanns Aue 31 – 37
D-53179 Bonn

Autoren:

Teil A / B: Dr. Ing. Rainer Pfluger, Wolfgang Hasper
Teil C: Dr. Burkhard Schulze Darup
Teil D: Fa. VARIOTEC / Dr. Sommer
Teil E: Dr. Ing. Rainer Pfluger, Wolfgang Hasper, Prof. Dr. Wolfgang Feist
Teil F: Dr. Burkhard Schulze Darup, Martin Forstner

Projektlaufzeit:

August 2006 bis Januar 2011

Inhalt

Zusammenfassung	8
Teil A Grundlagen.....	10
Grundlagen für Innendämmung	10
Feuchtequellen bei Außenwandbauteilen.....	11
Feuchtegehalt von Baustoffen	12
Sorptions- und Feuchtespeicherung im Baustoff	13
Gleichgewichtsfeuchte und Wasseraktivität	14
Feuchtetransportmechanismen.....	17
Besonderheiten bei Vakuum-Innendämmung	23
VIP-Elemente als Dampfbremse bzw. Dampfsperre	23
Einfluss des Wärmedurchgangswiderstandes des VIP-Elementes	24
Konvektiver Feuchteeintrag	24
Simulationsberechnung.....	26
Auswertung der Berechnung.....	29
Empfehlungen zum Einsatz von VIP-Innendämmung	29
Einsatzmöglichkeiten und –grenzen	29
Einbau und Montage	32
Anforderungen zum Schlagregenschutz.....	32
Literatur	35
Teil B Laboruntersuchung.....	36
Einführung.....	36
Probenkörper	36
Versuchsaufbau der Labormessung	38
Differenzklimakammer-Prüfstand	38
Probeneinbau in der Klimakammer	39
Sensoreinbau und Messstellenübersicht	42
Versuchsdurchführung.....	44
Randbedingungen und Versuchsablauf.....	44
Wägung des Probenkörpers.....	45
Luftgeschwindigkeitsmessung zur Bestimmung des Wärmeübergangs an der Probenoberfläche	45
Befeuchtungsexperiment zur Schlagregensimulation.....	46
Infrarotthermografie	46
Messdaten	47
Warmseite	49
Kaltseite.....	49
Beton	50
Ausgleichsschicht.....	50
VIP-Element	50
Simulationsmodell.....	52
Stoffeigenschaften und Randbedingungen.....	52
Wärmebrückeneffekt am Probenrand.....	53
Simulationsergebnisse	54
Fazit	56
Detailaufbauten von 1870-1920	57
Detailaufbauten von 1920-1945	61
Detailaufbauten 1945-1960.....	67
Detailaufbauten 1960-1972.....	72

Detailaufbauten 1972-1985.....	77
Teil D Wärmebrückenberechnungen nach Baualtersklassen	83
Detailaufbauten von 1870-1920	83
Detailaufbauten von 1920-1945	83
Detailaufbauten 1945-1960	83
Detailaufbauten 1960-1972	83
Detailaufbauten 1972-1985	83
Teil E Pilotprojekt Neuwied	84
Projektbeschreibung Neuwied	84
Konstruktion	85
Messkonzept.....	89
Erste Ergebnisse aus dem Montagevorgang	91
Messbegleitung	93
Zusammenfassung.....	93
Auswertezeitraum.....	94
Wetterdaten.....	95
Messdatenauswertung.....	96
Wetter	96
Schlagregenbelastung.....	97
Außentemperatur.....	104
Globalstrahlung	105
Raumluftkonditionen, Raumnutzung	106
Eigenschaften der Konstruktion	107
Oberflächentemperaturen.....	107
Feuchteverhältnisse im Bauteilaufbau.....	110
Vergleich Feuchteverhältnisse aus Messung – Simulation.....	111
Wärmedurchgang.....	114
Literatur	118
Projektbeschreibung Springe-Eldagsen.....	119
5.2.2 und 5.2.3 Messkonzept und erste Ergebnisse	126
Messauswertung Feuchteverlauf November 2007.....	126
Messauswertung Temperaturverlauf November 2007	127
Messauswertung Holzfeuchte von Probekörper zwischen Dämmung und Wand November 2007	127
Messkonzept.....	128
Teil F Konstruktive Anforderungen	129
Grundlagen für die Konstruktion	129
Bauphysikalische Grundlagen	129
Diffusion	129
Auswirkungen des U-Wertes	130
Aufsteigende Kapillarfeuchte	131
Schlagregenschutz.....	131
Konvektion und Luftdichtheit	134
Abhängigkeit von der Luftfeuchtigkeit und Lüftung.....	134
Einflüsse der Heizwärmezufuhr.....	135
Einsatzmöglichkeit	135
Handlungsanweisungen.....	137
Grundkonstruktionen.....	138
Systemdetails:	138
Erforderliche Fehlertoleranz	140
Hinweise zur Baustellenabwicklung	142

Bildfolge zu Einbausituationen	142
Zusammenfassung und Ausblick.....	143
Anhang	145

Ziel des Forschungsvorhabens

Ziel dieses Projektes: Untersuchungen an einem marktfähigen integralen Innendämmungssystem auf der Basis von Verbundplatten mit Vakuum-Dämmpaneelen inkl. der zugehörigen Planungs- und Anwendungshinweise. Einbettung in ein längerfristiges Forschungsprojekt "Validierung der Anwendung eines Vakuum-Innendämmsystems", das 2007-2008 durchgeführt werden soll.

Arbeitsschritte zur Erreichung des Ziels innerhalb des hier beantragten Projektes:

Arbeitsschritt 1: Aufbau eines thermisch-hygrischen Modells mit vorhandener Software zur Simulation des mehrjährigen Feuchterhaltens eines Vakuum-Innendämmsystems an verschiedenen Altbau-Außenwänden und unter verschiedenen feuchtetechnischen Randbedingungen.

Unterziel 1.1: Identifikation der bauphysikalischen Voraussetzungen, die für den Einsatz eines Vakuum-Innendämmsystems geeignet sind.

Unterziel 1.2: Untersuchung der Verbundplatte aus Funktionsoberfläche, Tragstruktur, Feuchteschutzebene, Vakuumpaneelschutzebene, Vakuumpaneel und wandseitiger Schutz- und Befestigungsebene. Analyse eines vorgefertigten Verbindungssystems zwischen den Platten (gesicherte Luftdichtheit, Feuchteschutz, Schutz der Vakuumplatten, Wärmebrückenreduktion) und der Standardanschlussdetails (Decke, Boden, Fenster, Innenwand). Entscheidende Fragestellungen sind dabei das dauerhafte Feuchteverhalten und das Feuchteschutzsystem.

Arbeitsschritt 2: Analyse von Prototyp-Verbundplatten im laborseitigen Aufbau zum Test der Eigenschaften.

Unterziel 2.1: Bestätigung der durch die Simulation erwarteten Eigenschaften.

Unterziel 2.2: Erkennen evtl. bestehender Schwachpunkte und Überwindung solcher Punkte.

Arbeitsschritt 3: Planung der Modernisierung und Durchführung der Modernisierung von mindestens zwei Musterwohnungen im deutschen Altbaubestand unter Verwendung des Systems, Produktion der zugehörigen vorgefertigten Elemente und Detailverbindungskomponenten.

Unterziel 3.1: Lösung aller spezifischen Anschlussdetails und Dokumentation dieser Lösungen.

Unterziel 3.2: Sammeln praktischer Erfahrungen mit der Ausführung der Innendämmmaßnahme unter Verwendung dieses Systems.

Arbeitsschritt 4: Planung und Installation einer Feldmessdatenaufnahme (Temperaturen, Feuchtigkeit, Wärmeströme) an mindestens je drei Messtellen der Innendämmkonstruktion (inkl. der alten Bestandswände) zur kontinuierlichen Messdatenerfassung. Durchführung von Luftdichtheitsprüfungen und Erstellung von Thermographieaufnahmen nach Fertigstellung der Dämmarbeiten.

Unterziel 4.1: Schaffung der Möglichkeit, die langfristigen Simulationsläufe der unter Arbeitsschritt 1 durchgeführten Simulationsergebnisse durch Messungen zu validieren.

Die Durchführung der kontinuierlichen Messung und die Validierung ist nicht mehr Gegenstand dieses Projektantrages, sondern Teil des oben erwähnten längerfristigen Forschungsprojektes "Validierung", das sich über mindestens 2 Jahre Daueraufzeichnung und Auswertung der Messdaten erstrecken soll. Das Endziel des Gesamtprojektes sind gesicherte Grundlagen für den Einsatz von Vakuum-Innendämmsystemen bei der Altbau-Modernisierung.

Begründung des Forschungsvorhabens

Der Einsatz effizienter nachträglicher Dämmmaßnahmen in bestehenden Gebäuden ist bisher auf von der Außenseite zugängliche Wände und solche Objekte, in denen genügend Platz und die Zulässigkeit bzgl. Bautenschutz, Bauphysik und Baukultur zur Anbringung konventioneller Innendämmsysteme vorhanden ist, beschränkt. Selbst im letzteren Fall bestehen derzeit Einschränkungen auf Grund nur beschränkt verfügbarer zuverlässiger Materialien für die Detailgestaltung und Planungsanleitungen für eine dauerhaft und den Bautenschutz verbessernde Anbringung. Es muss darauf hingewiesen werden, dass Fehler in dieser Hinsicht nicht nur die Wirksamkeit der Dämmung in Frage stellen, sondern die Bausubstanz dauerhaft schädigen können.

Die von der Firma VARIOTEC entwickelten und praxiserprobten Vakuum-Dämm-Verbundelemente erlauben eine integrale Gesamtlösung für die beschriebene Problematik. Die Elemente sind bereits im Neubau und für die außenliegende Dämmung im Bestand verwendet worden. Gerade bei der Innendämmung bieten sie jedoch eine innovative Lösung einiger der oben angesprochenen Fragen, wenn die die Aufgabe des Feuchteschutz adäquat gelöst ist. Dies zu überprüfen ist die zentrale Aufgabe dieses Forschungsprojektes; auf Grund der vorliegenden Erfahrungen des Passivhaus Institutes sind die Antragsteller sehr zuversichtlich, dass dies der Fall ist.

Notwendigkeit und Dringlichkeit sehen wir durch die Tatsache gegeben, dass in den nächsten Jahren eine große Zahl von Sanierungen stattfinden wird, die ohne Verfügbarkeit solcher hocheffizienter Systemdämm Lösungen ein hohes Energieeinsparpotential ungenutzt verstreichen lassen werden oder sogar durch nicht sachgerechte Ausführung zu Schäden an der Substanz führen.

Deutschland ist derzeit im Bereich der praktischen Anwendung von Vakuum-Dämmsystemen weltweit führend. Es besteht eine bedeutende Chance, dass dieser Vorsprung auch für die marktfähige Verfügbarkeit von Vakuum-Innendämmsystemen genutzt werden kann. Solche Produkte sind für viele Anwendungsbereiche weltweit interessant. Die zugehörigen Basismaterialien werden ebenfalls in der EU produziert. Die Erschließung von praktischen Einsatzmöglichkeiten dieser Technologie stärkt daher die deutsche Wirtschaft im internationalen Wettbewerb - dies nicht nur direkt durch die Anwendung dieser Produkte, sondern auch indirekt durch Verringerung der Importabhängigkeit bzgl. nicht erneuerbarer Energierohstoffe.

Die Lebensqualität in den sanierten Wohnungen wird zudem bedeutend erhöht, wodurch ein weiterer Beitrag in der Wertschöpfungskette entsteht. Dies ist einer der wesentlichen Gründe, weshalb wir das Marktpotential der hier zu entwickelnden Lösung als hoch einstufen.

Auf Basis vorausgehender Arbeiten ist absehbar, dass die Elemente eine sehr gute Lebenszyklus-Primärenergiebilanz aufweisen werden und nach weiteren ökologischen Kriterien ebenfalls günstig abschneiden. Die ökonomische Bewertung wird stark von zwei Parametern abhängen: Dem künftigen Preis für das verwendete nanoporöse Strukturmaterial und den monetären Bewertungen vermiedener künftiger Bauschadensreparaturen.

Zusammenfassung

Gegenstand des Forschungsvorhabens ist ein System zur Innendämmung von Gebäuden, bei dem so genannte Vakuum-Isolationspaneele eingesetzt werden. Diese bieten den Vorzug hervorragender Wärmedämmeigenschaften bei gleichzeitig geringer Schichtdicke, was sie für den Bereich der Innendämmung besonders interessant macht.

Um einen Einblick in das thermische und hygrische Verhalten des Innendämmsystems zu erhalten wurden mit dem Simulationswerkzeug DELPHIN Modellberechnungen durchgeführt und wichtige Parameter identifiziert (vergl. hierzu Teil A). Die Anwendbarkeit des Systems konnte darauf hin in einem ersten Schritt auf Fälle mit sehr gutem Schlagregenschutz begrenzt werden. Parallel wurden für die modellhafte Anwendung des Systems in einem Testgebäude in Neuwied Maßnahmen zum Toleranzausgleich und geeignete Befestigungsmöglichkeiten entwickelt. Anschlussdetails an Boden, Wände und Decke wurden untersucht und optimiert. Wärmebrückeneffekte von Paneelstößen und Befestigungen wurden berechnet. Im engen Zusammenwirken aller Projektbeteiligten konnten die für die Anwendung im Bereich einer Innendämmung erforderlichen Veränderungen an der Ausführung der Vakuum-Isolationspaneele spezifiziert werden.

Um zugleich das Innendämmsystem unter zeitlich gerafften Bedingungen messtechnisch untersuchen zu können und um die Zuverlässigkeit der Modellrechnungen abzusichern wurde eine umfangreiche Laboruntersuchung durchgeführt (vergl. hierzu Teil B). Hierzu wurde ein verkleinerter Probekörper aufgebaut und instrumentiert, der anschließend von Mai 2007 bis Oktober 2007 in einem Differenzklimaprüfraum wechselnden Randbedingungen ausgesetzt wurde. Temperaturen und Feuchten, sowie der Wärmestrom durch den Aufbau wurden in 10-minütigen Intervallen aufgezeichnet und ließen eine Nachbildung des Verhaltens im Simulationsmodell zu

Daneben wurden für eine Vielzahl von Gebäudetypen unterschiedlicher Baualtersklassen geeignete Konstruktionen und Detaillösungen untersucht (vergl. Hierzu Teil C). Ein Katalog dieser Detaillösungen soll zusammengestellt werden und zukünftig die Planung wesentlich erleichtern. Kriterien zur Beurteilung der Eignung eines Gebäudes für den Einsatz von Innendämmungen aus Vakuum-Isolationspaneelen wurde entwickelt (vergl. hierzu Teil F). Zur Erleichterung der Planungsabläufe wurden für eine Vielzahl von Detailsituationen musterhaft Wärmestromberechnungen durchgeführt, die in einer großen Zahl von Anwendungsfällen eine Beurteilung der auftretenden Wärmebrückenverlustkoeffizienten schnell ermöglichen sollen (vergl. hierzu Teil D).

Um das Verhalten der realen Konstruktion in einem Feldtest untersuchen zu können wurde ein Beispielgebäude in Neuwied mit einer Innendämmung aus VIP ausgestattet. Um einen Abgleich mit den Simulationsrechnungen zu gestatten wurde ein geeignetes Messkonzept entworfen (vergl. hierzu Teil E). Bei der Montage der Innendämmung im Juni 2007 wurde darauf hin eine umfangreiche Anordnung von Sensoren zur

messtechnischen Langzeit-Erfassung des realen Verhaltens der Konstruktion eingebaut. Eine Datenerfassungsanlage ermöglicht die Aufzeichnung aller Sensordaten in kurzen Intervallen, sie wurde am 21.08.2007 installiert und bis 23.04.2010 betrieben. Die Erwartungen an das Dämmsystem haben sich in dem Demonstrationsobjekt bestätigt. Es konnte keine Auffeuchtung im Dämmsystem beobachtet werden, vielmehr liegen Anzeichen für eine weitere Austrocknung vor. Dabei ist allerdings zu beachten, dass an dem Objekt in Neuwied weitgehend ideale Randbedingungen gegeben waren.

Der vorliegende Bericht stellt die einzelnen Arbeitsschritte und ihre jeweiligen Ergebnisse im Näheren vor.

Teil A Grundlagen

Grundlagen für Innendämmung

Der Einsatz effizienter nachträglicher Dämmmaßnahmen in bestehenden Gebäuden ist bisher auf von der Außenseite zugängliche Wände und solche Objekte, in denen genügend Platz und die Zulässigkeit bzgl. Bautenschutz, Bauphysik und Baukultur zur Anbringung konventioneller Innendämmsysteme vorhanden ist, beschränkt. Selbst im letzteren Fall bestehen derzeit Einschränkungen auf Grund nur beschränkt verfügbarer zuverlässiger Materialien für die Detailgestaltung und Planungsanleitungen für eine dauerhaft und den Bautenschutz verbessernde Anbringung. Fehler in dieser Hinsicht stellen nicht nur die Wirksamkeit der Dämmung in Frage, sie können die Bausubstanz dauerhaft schädigen.

Notwendigkeit und Dringlichkeit für die Weiterentwicklung der technischen Möglichkeiten in diesem Bereich ist insbesondere dadurch gegeben, dass in den nächsten Jahren eine große Zahl von Sanierungen stattfinden wird, die ohne Verfügbarkeit hocheffizienter Systemdämm Lösungen ein hohes Energieeinsparpotential ungenutzt verstreichen lassen würden oder sogar durch nicht sachgerechte Ausführung zu Schäden an der Substanz führen. Ohne verstärkte Anstrengungen in der Ertüchtigung des Gebäudebestandes hin zu wesentlich verbesserter Energieeffizienz im Bereich Raumwärmenutzung werden die notwendigen Primärenergie-Einsparungen auf deutscher und europäischer Ebene kaum zu erreichen sein.

Deutschland ist derzeit im Bereich der praktischen Anwendung von Vakuum-Dämmsystemen weltweit führend. Es besteht eine bedeutende Chance, dass dieser Vorsprung auch für Entwicklung von Vakuum-Innendämmsystemen genutzt werden kann. Solche Produkte sind für viele Anwendungsbereiche weltweit interessant.

Die zugehörigen Basismaterialien werden ebenfalls in der EU produziert. Die Erschließung von praktischen Einsatzmöglichkeiten dieser Technologie stärkt daher die deutsche und europäische Wirtschaft im globalen Wettbewerb - dies nicht nur direkt durch die Anwendung dieser Produkte, sondern auch indirekt durch Verringerung der Importabhängigkeit bezüglich nicht erneuerbarer Energierohstoffe.

Die Lebensqualität in den sanierten Wohnungen wird zudem bedeutend erhöht, wodurch ein weiterer Beitrag in der Wertschöpfungskette entsteht.

Auf Basis vorausgehender Arbeiten ist absehbar, dass Vakuum-Isolationspaneele (VIP) eine sehr gute Lebenszyklus-Primärenergiebilanz aufweisen werden und nach weiteren ökologischen Kriterien ebenfalls günstig abschneiden. Die ökonomische Bewertung wird stark von zwei Parametern abhängen: Dem künftigen Preis für das verwendete nanoporöse Strukturmaterial und den monetären Bewertungen vermiedener künftiger Bauschadensreparaturen.

Die von der Firma VARIOTEC entwickelten und praxiserprobten Vakuum-Dämm-Verbundelemente erlauben eine integrale Gesamtlösung für die beschriebene Problematik. Die Elemente sind bereits im Neubau und für die außenliegende Dämmung im Bestand verwendet worden. Gerade bei der Innendämmung bieten sie jedoch eine innovative Lösung einiger der oben angesprochenen Fragen, wenn die Aufgabe des Feuchteschutzes adäquat gelöst ist. Dies zu überprüfen ist die zentrale Aufgabe dieses Forschungsprojektes.

In den folgenden Absätzen sollen zunächst allgemeine Grundlagen im Zusammenhang mit Innendämmmaßnahmen dargestellt und erläutert werden. Teilweise wurden diese im Rahmen des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser Phase III, Arbeitskreis 32 „Faktor 4 auch bei sensiblen Altbauten: Passivhauskomponenten + Innendämmung“ erarbeitet. Dieser wurde ermöglicht durch die freundliche Unterstützung des Hessischen Ministeriums für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung, E.ON Energie AG und LUWOG GmbH. Einige Abschnitte („Feuchtequellen bei Außenwandbauteilen“ bis „Zusammenfassung“) wurden aus dem Protokollband des AKKP 32 entnommen.

Feuchtequellen bei Außenwandbauteilen

Der Feuchtegehalt von Außenbauteilen besitzt unabhängig von den Bedingungen von Innendämmmaßnahmen große Bedeutung. Insbesondere in historischen Gebäuden stellt Feuchte eine der Hauptschadensursachen dar. Darüber hinaus stellt ein hoher Feuchtegehalt einen aus hygienischer Sicht problematischen Zustand dar, insbesondere, wenn nur geringer Wärmeschutz besteht und niedrige Temperaturen an den Innenoberflächen hinzukommen.

An dieser Stelle soll zunächst geklärt werden, aus welchen Quellen Wasser in Bauteilen auftreten kann.

Jeder Baustoff enthält bereits aus dem Entstehungsprozess (Anmachwasser von Mörteln und Beton, Produktionsfeuchte von Baustoffen) bzw. durch die Lagerung Feuchte, die als **Herstellungs- bzw. Anfangsfeuchte** bezeichnet wird. Insbesondere Konstruktionen und Wandaufbauten, bei welchen die Austrocknung dieser Anfangsfeuchte behindert wird, sollten mit möglichst trockenen Werkstoffen und Verfahren erstellt werden, um Feuchteschäden schon in der Anfangsphase zu vermeiden.

Wände, die Schlagregenbelastung ausgesetzt sind und keinen entsprechenden Schutz aufweisen, können Wasser durch **Beregnung** aufnehmen.

Ein häufiges Problem insbesondere bei Altbauten, welche noch keine Feuchtesperre in den Grundmauern aufweisen, ist die im Mauerwerk **kapillar aufsteigende Grundfeuchte**. Hierfür gibt es verschiedene Sanierungsvarianten, insbesondere Injektionsverfahren, welche im Altbau nachträglich durchgeführt werden können.

Eine weitere Möglichkeit des Feuchteintrags in Bauteilen ist die **Wasserdampfdiffusion**, auf diesen Transportmechanismus sowie die entsprechende Einspeicherung durch Sorption und Kapillarkondensation wird in diesem Beitrag noch näher eingegangen.

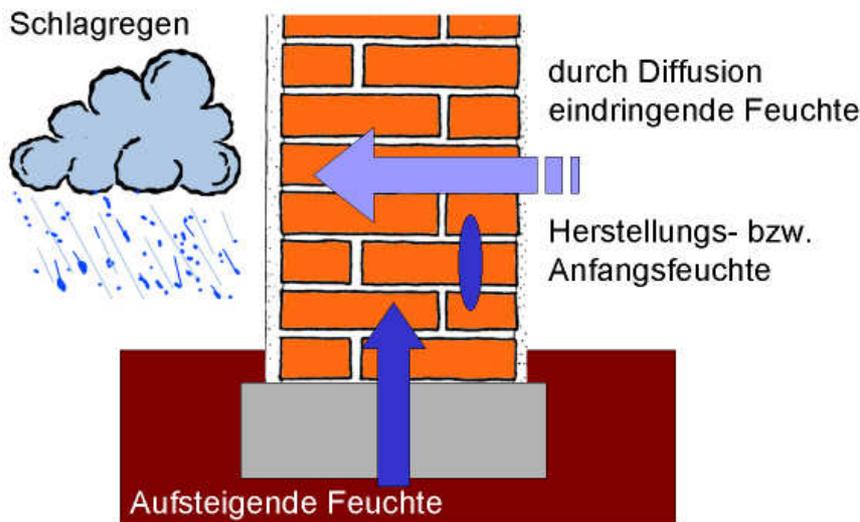


Abbildung 1: Feuchtequellen bei Außenwänden (Beregnung, Tauwasseranfall, aufsteigende Grundfeuchte und anfängliche Baufeuchte)

Feuchtegehalt von Baustoffen

Ist die Dichte des trockenen Baustoffs bekannt, kann die Baustofffeuchte jeweils durch Wägung bestimmt werden. Diese wird entweder als massen- (u_M) bzw. volumenbezogene (u_V) Baustofffeuchte in Massen- bzw. Volumenprozent angegeben, sie können jeweils über die Dichte ineinander umgerechnet werden.

$$u_M = \frac{\rho_{\text{wasser}}}{\rho_{\text{Baustoff}}} \cdot u_V$$

Darüber hinaus ist die Angabe des Feuchtegehaltes w mit der Einheit g/m^3 üblich.

In Tabelle 1 sind exemplarisch typische volumenbezogenen Baustofffeuchten für Ziegel, Poren- und Normalbeton aufgeführt.

Baustoff	üblich (Praxis)	max. (Praxis]	max. möglich
Ziegel	1 [Vol-%]	10...12 [Vol-%]	20 [Vol-%]
Porenbeton	3...4 [Vol-%]	ca. 30 [Vol-%]	80 [Vol-%]
Normalbeton	ca. 5 [Vol-%]	ca. 10 [Vol-%]	20 [Vol-%]

Tabelle 1: Volumenbezogene Baustofffeuchte für Ziegel, Poren- und Normalbeton

Sorption und Feuchtespeicherung im Baustoff

Fast alle Baustoffe weisen Hohlräume im Material auf. Das Verhältnis von eingeschlossenen Hohlräumen zum Volumen des Feststoffs wird als Porosität (Einheit $[m^3/m^3]$) bezeichnet. In Tabelle 2 ist in Bild (1) eine solche Pore symbolisch im Schnitt dargestellt. Die Anlagerung von Wassermolekülen an der Porenwandung ((2) bis (4)) wird als Sorption bezeichnet. Dabei wächst zunächst eine mono-, später eine polymolekulare Sorbatschicht auf der Porenwandung. Kleinere Poren füllen sich nach und nach mit flüssigem Wasser durch die sogenannte Kapillarkondensation, diese tritt aufgrund der Dampfdruckerniedrigung der Kapillaren bereits deutlich vor der Taupunktunterschreitung auf. Diese Aufweitung kann mit einer vollständigen Benetzung der Porenwandung (6) bis zur so genannten freien Wassersättigung (7) anwachsen. Es verbleiben eingeschlossene Luftblasen. Diese werden nur bei längerer Unterwasserlagerung bzw. bei Unterschreitung des Taupunkts restlos mit Wasser gefüllt. Man spricht dann von der maximalen Feuchte (8).

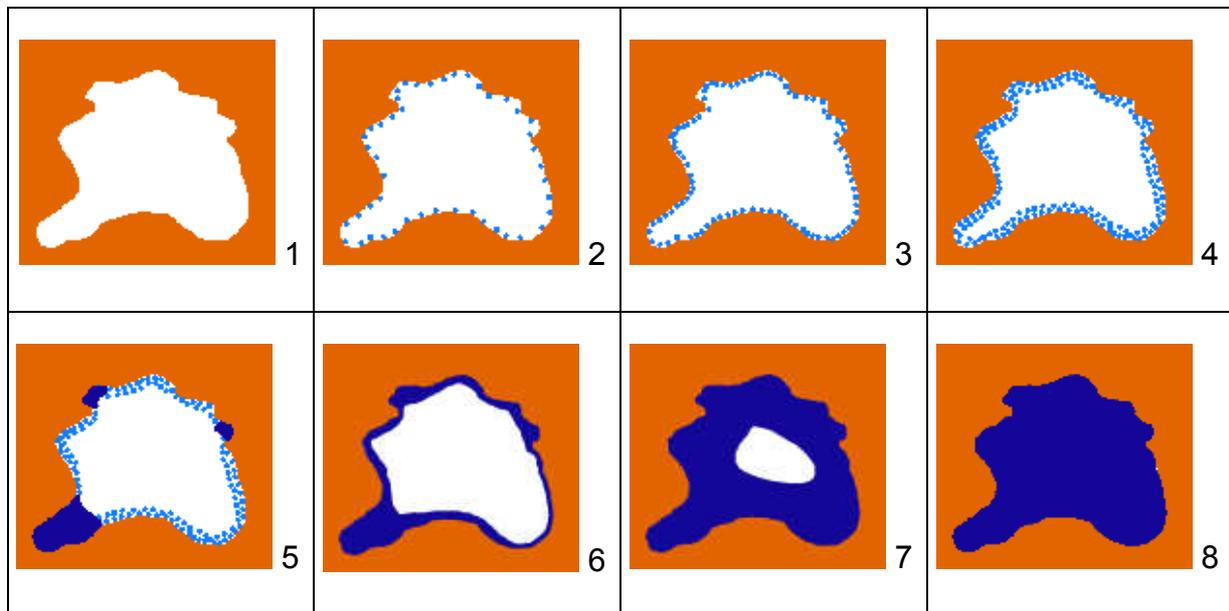


Tabelle 2: Feuchtespeicherung in einer Baustoffpore: (1) trockene Pore, (2) und (3) monomolekulare bzw. (4) polymolekulare Sorbatschicht, (5) Kapillarkondensation, (6) Porenwandung vollständig mit Wasser benetzt, (7) freie Wassersättigung mit eingeschlossener Luftblase, (8) maximale Feuchte

Der Feuchtegehalt von Baustoffen kann entsprechend den genannten Speichermechanismen in drei Bereiche unterteilt werden: den Sorptionsbereich, den Kapillarbereich und den Übersättigungsbereich (siehe Abbildung 2). Die Festlegung der Grenze zwischen Sorptions- und Kapillarbereich bei einer relativen Feuchte von 90 % ist nur als Anhaltswert zu verstehen, die Übergänge sind hier „fließend“.

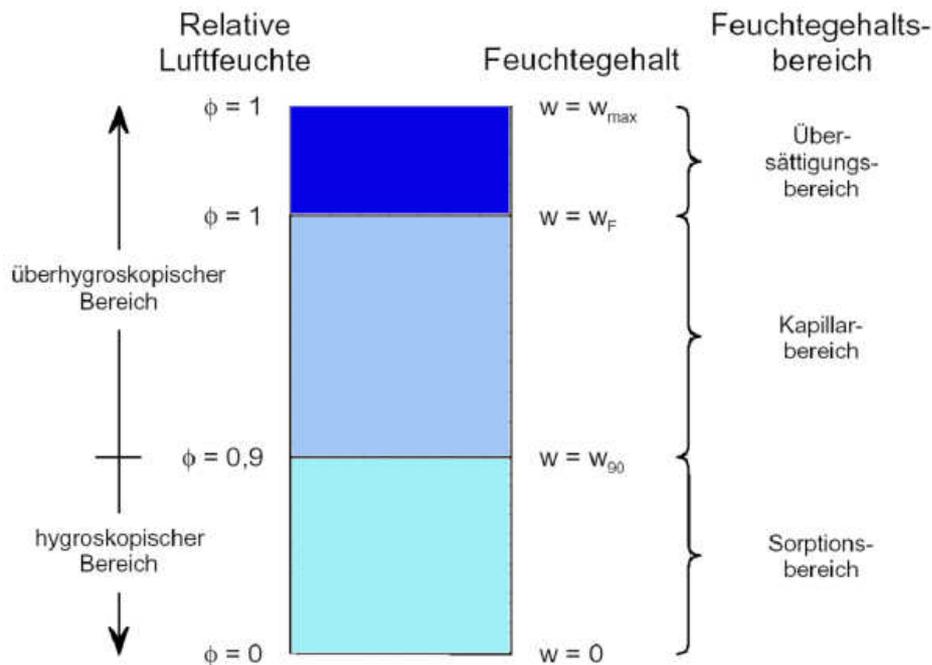


Abbildung 2: Feuchtegehaltsbereiche hygroskopischer Stoffe

Als freier Wassergehalt w_F wird dabei der maximale Wassergehalt bezeichnet, welcher ein Baustoff allein durch kapillare Wasseraufnahme ohne Anwendung zusätzlicher Druckkräfte annehmen kann. Erst durch Unterwasserlagerung bzw. Taupunktunterschreitung wird der maximale Feuchtegehalt w_{\max} erreicht. Kapillarbereich und Übersättigungsbereich werden auch unter der Bezeichnung „überhygroskopischer Bereich“ zusammengefasst, weil hier Wasser über das rein hygroskopisch speicherbare Maß hinaus aufgenommen wird.

Gleichgewichtsfeuchte und Wasseraktivität

Hygroskopische Materialien sind stets bestrebt, mit der umgebenden Luft in ein Feuchtgleichgewicht zu kommen.

Das freie Wasser in einem hygroskopischen Material bewirkt einen Dampfdruck auf der Materialoberfläche. Wenn der Wasserdampfdruck auf der Materialoberfläche und der Wasserdampfdruck der umgebenden Atmosphäre gleich sind, spricht man von **Gleichgewichtsfeuchte**. In der Bauphysik wird diese mit dem Symbol w und dem Index der jeweiligen relativen Luftfeuchte im Gleichgewicht angegeben, so steht beispielsweise w_{50} für den Feuchtegehalt eines Baustoffs im Gleichgewicht mit 50 % relativer Luftfeuchte.

Bringt man den Baustoff nach und nach bei einer festen Temperatur mit unterschiedlicher relativer Luftfeuchte ins Gleichgewicht, so kann man dessen so genannte **Sorptionsisotherme** bestimmen. Auf der Abszisse trägt man die relative Luftfeuchte, auf der Ordinate den jeweiligen Feuchtegehalt auf. In Abbildung 3 sind Beispiele solcher

Sorptionsisothermen üblicher Baustoffe aufgetragen. Man erkennt, dass sich die Baustofffeuchte bei gleicher relativer Feuchte je nach Material zum Teil stark unterscheiden. So beträgt die volumenbezogene Feuchte von Gips- bzw. Kalkputz bei 60 % r.F. unter 0,5 Vol.-%, von Kalkzement- bzw. Zementputz dagegen 1,5 bzw. 2 Vol.-%.

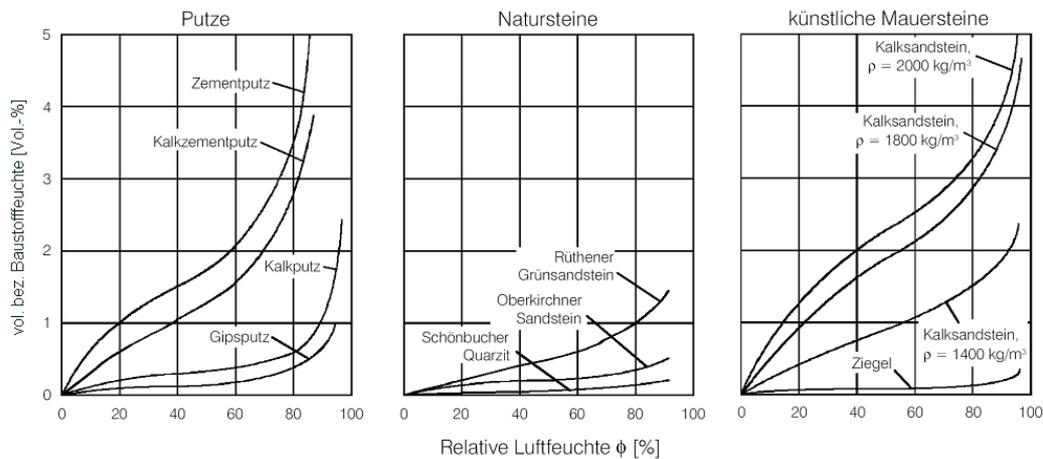


Abbildung 3: Sorptionsisothermen unterschiedlicher Baustoffe (nach [Künzel 94])

Neben der Gleichgewichtsfeuchte wird, insbesondere im Zusammenhang mit der Mikrobiologie, bei Baustoffen (und Lebensmitteln) von **Wasseraktivität** (activity of water) gesprochen.

Der so genannte **aw-Wert** gibt Aufschluss über das chemisch nicht gebundene Wasser. Die Messung beruht auf der Gleichgewichtsfeuchte. In einem abgeschlossenen Raum mit einer anteilmäßig geringeren Menge Luft als Feststoff bestimmt das im Feststoff enthaltene freie Wasser die relative Feuchte der umgebenden Luft.

Die Wasseraktivität (aw-Wert) ist also die Gleichgewichts- Feuchte in einem abgeschlossenen Raum. Üblicherweise wird der aw-Wert nicht in % sondern mit Werten von 0 bis 1 angegeben.

Für die bauphysikalische Bewertung unterschiedlicher Konstruktionen ist der aw-Wert von besonderer Bedeutung, weil das frei verfügbare Wasser eine Grundvoraussetzung für das Schimmelpilzwachstum darstellt. Er wird daher für die Auswertung der Simulationsrechnungen in diesem Band als Kriterium herangezogen, um Konstruktionen aus hygienischer Sicht zu bewerten. Neben der Menge an frei verfügbarem Wasser spielt auch die Temperatur für die Wachstumsgeschwindigkeit eine wichtige Rolle.

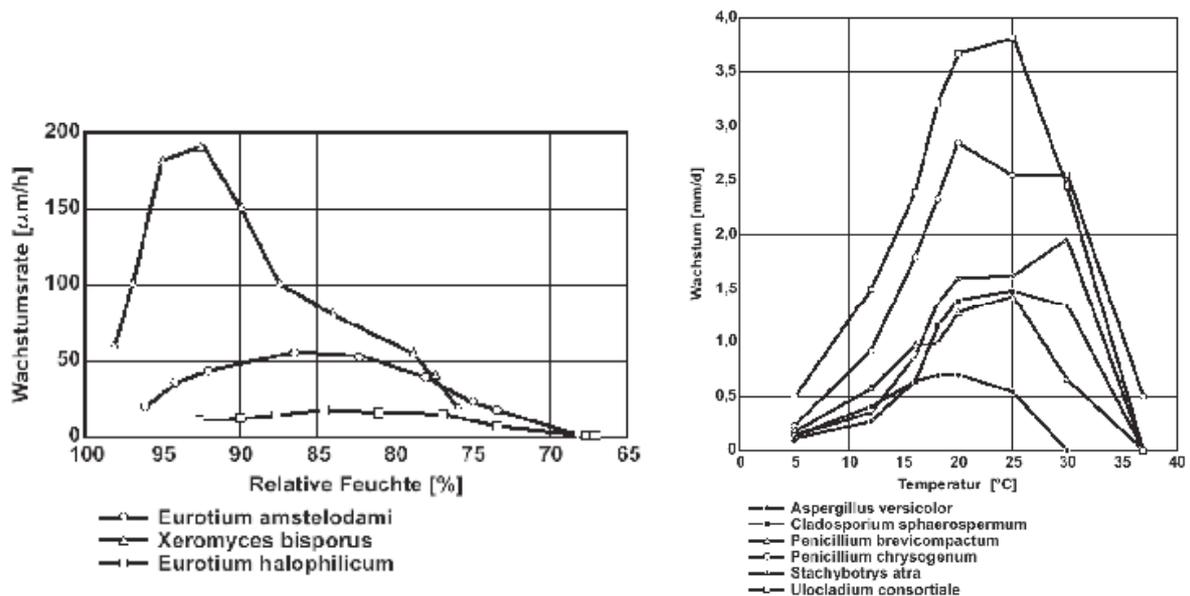


Abbildung 4: Wachstumsraten einiger Schimmelpilzarten in Abhängigkeit von relativer Feuchte (links nach [Grant 1989]) und Temperatur (rechts nach [Hocking 1993])

Die beiden Einflussgrößen auf die Wachstumsraten (Temperatur und Feuchte) können in der so genannten Isoplethendarstellung in einem Diagramm zusammengefasst werden. In Abbildung 5 wird dies am Beispiel der Pilzart *Aspergillus restrictus* dargestellt. Die Isoplethen stellen dabei Linien gleicher Wachstumsgeschwindigkeit dar. Die höchste Wachstumsrate wird in diesem Beispiel im Bereich von 30 $^{\circ}\text{C}$ und ca. 97 % r.F. erreicht. Eine systematische Untersuchung zur Anwendbarkeit dieser Isoplethen zur Vorhersage von Schimmelpilzbildung auf und in Bauteilen wurde von [Sedlbauer 2001] im Rahmen seiner Dissertation durchgeführt.

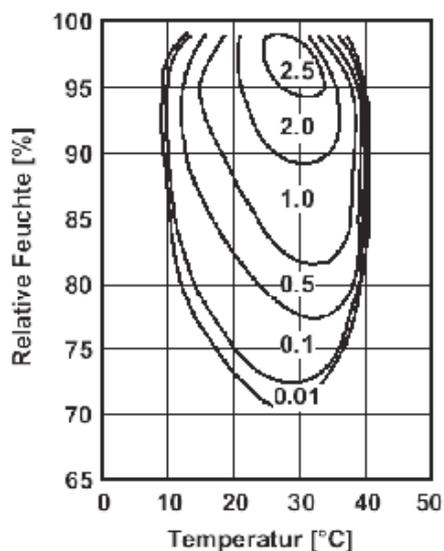


Abbildung 5: Wachstum in mm pro Tag (Isoplethen nach [Smith 1982]) am Beispiel von *Aspergillus restrictus*

Vereinfachend lässt sich festhalten, dass für Schimmelpilzwachstum im Allgemeinen keine scharfen Grenzen angegeben werden können. Eine grobe Einstufung lässt sich aber durch folgende Obergrenzen des aw-Wertes angeben:

0,85 für neue Putzoberflächen bzw. gereinigte und mit Kalkfarbe gestrichener Altputz (basischer PH-Wert)

0,8 für ungesäuberte, verunreinigte Altputze (siehe DIN 4108-2, Juli 2003)

unter 0,7 Wachstumsmöglichkeiten für relevante Pilzsporen können ausgeschlossen werden

Je nach Temperatur liegt die kritische Einwirkzeit der erhöhten Feuchterandbedingung (engl.: time of wettness, prozentualer Anteil der Zeit mit einem aw-Wert über einem gewissen Grenzwert) bei Temperaturen um 20 °C bei 36 bis 48 h, bei 5°C dagegen liegt sie bei 3 bis 5 Tagen.

Feuchtetransportmechanismen

Diffusion

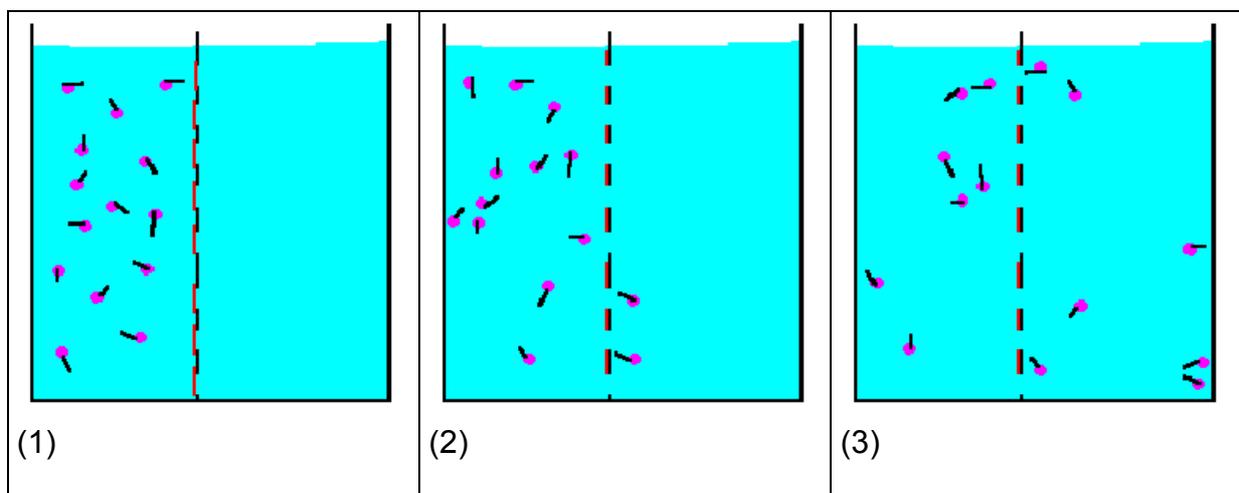


Abbildung 6: Diffusion als Konzentrationsausgleich durch thermische Eigenbeweglichkeit

Ein wesentlicher Feuchtetransportmechanismus in Baustoffen ist die Wasserdampfdiffusion. Wie in Abbildung 6 symbolisch dargestellt, führt die thermische Eigenbeweglichkeit der Wasserdampfmoleküle zu einem Konzentrationsausgleich. Dabei ist der Diffusionsstrom i proportional zur Differenz der Wasserdampfpartialdrücke.

$$i = (p_i - p_a) / (1/\Lambda) \text{ [kg/m}^2\text{h]}$$

$$(1/\Lambda) = 1,5 \cdot 10^6 (\mu_1 s_1 + \mu_2 s_2 + \dots + \mu_n s_n) \text{ [m}^2 \text{ h Pa / kg]}$$

mit $(1/\Lambda)$ Wasserdampf-Diffusionsdurchlasswiderstand
 μ Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl
 s Bauteildicke

Jeder Baustoff weist eine bestimmte Porenstruktur auf, welche den Diffusionsstrom mehr oder minder behindert. Zum einen wird der freie Raum vom Feststoff eingeschränkt, zum anderen müssen die Wasserdampfmoleküle je nach Porenstruktur mehr oder minder lange Umwege zurücklegen. Diese beiden Einflüsse werden zu einer gemeinsamen Widerstandszahl μ zusammengefasst:

$$\mu = \frac{\text{Wasserdampf - Diffusionsleitkoeffizient in Luft}}{\text{Wasserdampf - Diffusionsleitkoeffizient in einem Stoff}}$$

In Abbildung 7 sind diese Einflüsse mit symbolischen Schnitten durch anisotropes (richtungsabhängige Porenstruktur) Material unterschiedlicher Porosität dargestellt. Sehr deutlich tritt dieser Effekt z.B. beim Baustoff Holz auf, Kiefernholz weist quer zur Faserrichtung eine Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl von 40 auf, in Längsrichtung beträgt sie nur 5.

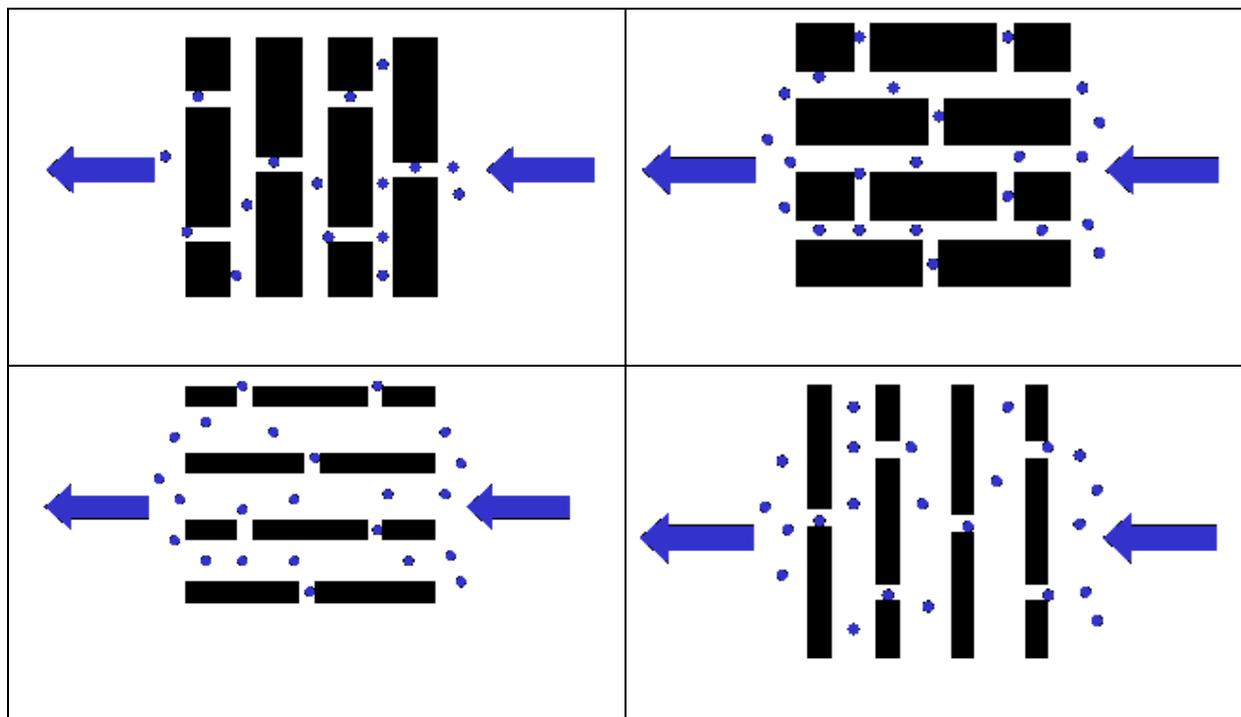


Abbildung 7: Diffusion durch Materialien unterschiedlicher Porosität und Porengeometrie

In Tabelle 3 sind exemplarisch einige Baustoffe mit ihrer Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl aufgeführt. Übliche Bau- und Dämmstoffe liegen im Bereich 10 bis 500, eine Ausnahme bilden hier Faserdämmstoffe, welche sich hinsichtlich der Diffusion kaum von Luft unterscheiden und daher eine Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl von 1 aufweisen. Schaumglas ist hingegen diffusionsdicht und daher mit ∞ anzusetzen.

Baustoff	μ [-]
Kalkzementputz	15-35
Normalbeton	60-100
Polystyrol(PS)-Partikelschaum	20 -100
Polyurethan(PUR)-Hartschaum	80-250
Faserdämmstoffe	1
Gebrannter Vollziegel	10
Schaumglas nach DIN 18174	∞

Tabelle 3: Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahlen unterschiedlicher Baustoffe

Multipliziert man diese Widerstandszahl mit der jeweiligen Schichtdicke des Bauteils, so erhält man dessen diffusionsäquivalente Luftschichtdicke s_d . Diese ist definiert als die Dicke der ruhenden Luftschicht, die den gleichen Wasserdampf-Diffusionswiderstand besitzt wie die betrachtete Bauteilschicht. Je nach s_d -Wert werden Bauteilschichten als diffusionsoffen, -hemmend oder –dicht bezeichnet:

diffusionsoffen: $s_d \leq 0,5 \text{ m}$
diffusionshemmend: $0,5 \text{ m} < s_d < 1500 \text{ m}$
diffusionsdicht: $s_d \geq 1500 \text{ m}$

Mineralischer Außenputz mit einer Schichtdicke von 2 cm weist z.B. eine diffusionsäquivalente Luftschichtdicke von ca. 0,4 m auf und ist damit als diffusionsoffen zu bezeichnen. Diese Einteilung ist nicht mit den Begriffen Dampfbremse bzw. Sperre zu verwechseln. Als Dampfsperren wurden Schichten mit $s_d > 100$ bezeichnet, heute verwendet man ausschließlich den Begriff Dampfbremse und gibt den jeweiligen s_d -Wert mit an.

Oberflächendiffusion

Wie im Abschnitt zur Wasserspeicherung erläutert, findet an den Wandungen von Kapillaren eine Anlagerung von Wassermolekülen durch Sorption statt.

Das an den Wandungen sorbierte Wasser bleibt zunächst unbeweglich aufgrund hoher Adhäsionskräfte.

Steigt die Feuchte insgesamt an, so bildet sich auf der Porenwand ein Sorbatfilm, der im Außenbereich wegen der dort herrschenden größeren relativen Feuchte dicker ist als im Innenbereich.

Je höher allerdings die Filmdicke ist, um so beweglicher werden die Wassermoleküle, wobei sie sich von Bereichen höherer Filmdicke in Bereiche mit geringerer Filmdicke bewegen. Dieser Vorgang wird als Oberflächendiffusion bezeichnet [Künzel 1994]. Sein treibendes Gefälle ist die relative Luftfeuchte.

Damit gehört die Oberflächendiffusion wie die Kapillarleitung zum Flüssigtransport und nicht zur Dampfdiffusion, wie häufig angenommen.

Die Richtung dieser Oberflächendiffusion wird durch den Gradienten der relativen Feuchte vorgegeben, sie kann also der Dampfdiffusion auch entgegengerichtet sein. Dies wird anhand des Beispiels in Abbildung 8 deutlich. Der Gradient der relativen Feuchte ist in der oberen Abbildung von rechts (60% r.F.) nach links (40% r.F.) gerichtet, das Dampfdruckgefälle zeigt in diesem Beispiel jedoch in die entgegengesetzte Richtung (links 940 Pa, rechts 749 Pa).

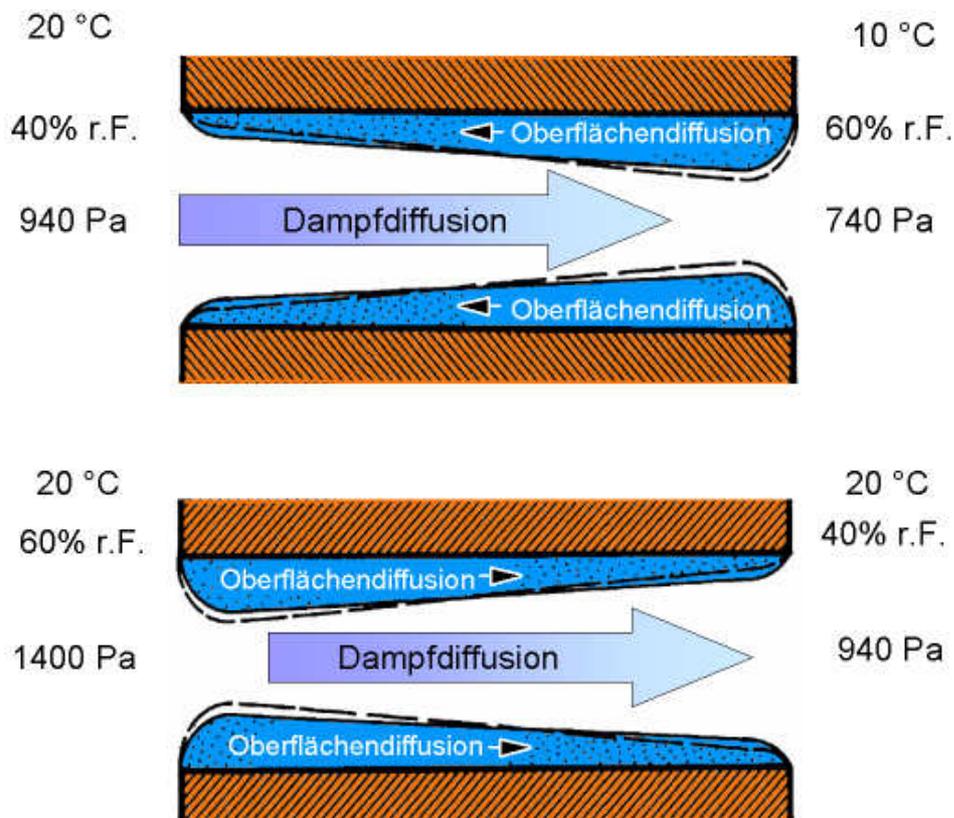


Abbildung 8: Transportrichtung von Wasserdampfdiffusion und Oberflächendiffusion in Abhängigkeit von Wasserdampfpartialdruck und relativer Feuchte; je nach Randbedingung können die Transportrichtungen gegen- oder gleichgerichtet sein.

Die Oberflächendiffusion wird bei Zellulose bereits bei 30 % relativer Feuchte und bei Sandsteinen bei etwa 60 % relativer Feuchte wirksam. Erst sehr viel später, nämlich ab

der in [Schwarz 1974] beschriebenen kritischen Feuchte im überhygroskopischen Bereich beginnt die im folgenden Abschnitt erläuterte Kapillarleitung einzusetzen.

Kapillarleitung

Bei der Kapillarleitung handelt es sich um einen Transportmechanismus zur Aufnahme flüssigen Wassers bei Kontakt mit flüssigem Wasser aufgrund der kapillaren Saugspannungen des benetzten kapillarporösen Materials. Kleinere Kapillaren weisen eine höhere Saugspannung auf (siehe Abbildung 9 links), größere Kapillaren dagegen eine höhere Sauggeschwindigkeit. Damit überhaupt Kapillarleitung auftreten kann, muss der Durchmesser der Kapillare im Bereich von 100 nm bis 0,1mm liegen. Ist der Durchmesser größer, kann Wasser nur durch externe Druckkräfte eindringen, ist er kleiner, spricht man von Gel- oder Mikroporen, in denen nur Einlagerung von Feuchte durch Sorption stattfindet. Vereinfachend gilt für mineralische Baustoffe: Je dichter der Baustoff ist, desto geringer ist in der Regel seine Kapillarität. Je kleiner die Poren und je größer die Anzahl der Poren ist, desto größer ist die Kapillarität.

Die Saugspannung kann durch Aufbringen von Überdruck auch messtechnisch bestimmt werden. Zur Entwässerung eines Baustoffs muss dieser Druck mindestens die Höhe der Saugspannung aufweisen.

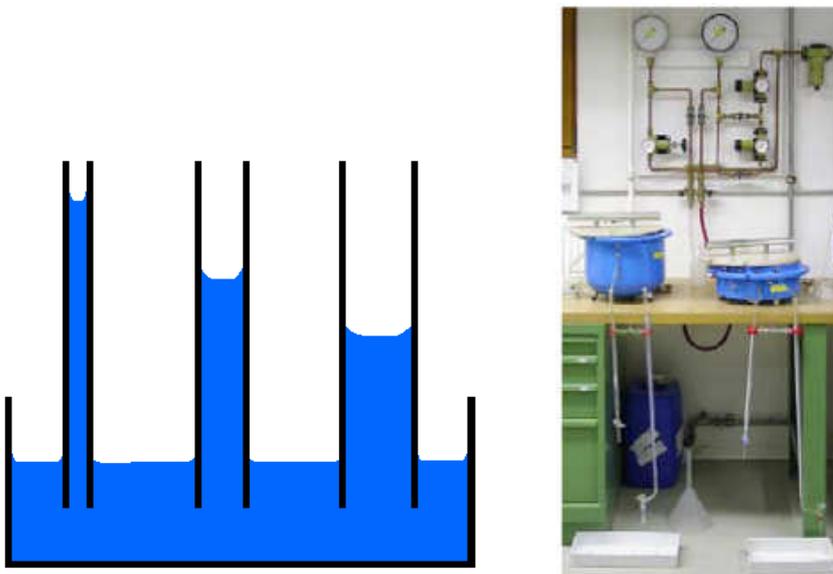


Abbildung 9: Kapillare Saugspannung in Abhängigkeit des Durchmessers der Kapillare (links) und Messung der Saugspannung im Laborversuch (rechts, Quelle: IBP)

Nach E DIN EN ISO 1515148 wird der so genannte **Wasseraufnahmekoeffizient w** (mit der Einheit $\text{kg/m}^2\text{h}^{0,5}$) durch einen Saugversuch ermittelt. Dabei wird eine definierte Fläche des Baustoffs mit flüssigem Wasser in Kontakt gebracht und in regelmäßigen Zeitabschnitten dessen Gewichtszunahme bestimmt. Trägt man auf der Abszisse die Wurzel aus der Zeit auf, so wird die Wasseraufnahme näherungsweise zu einer Geraden, dessen Steigung den Wasseraufnahmekoeffizienten w angibt (siehe Abbildung 10).

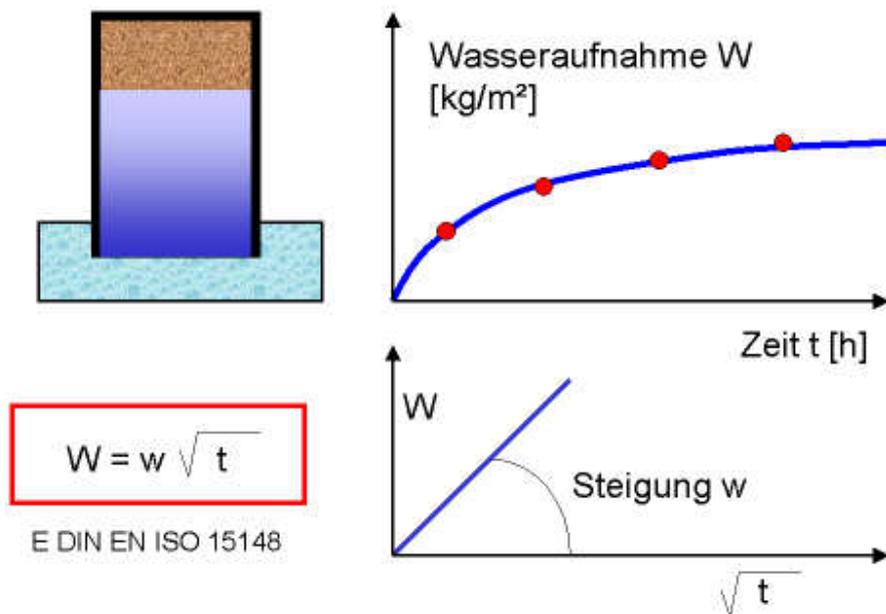


Abbildung 10: Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten w mittels Saugversuch und Auswiegen

Zusammenfassung

Die wesentlichen Feuchtequellen in Außenwänden gliedern sich in Beregnung, Tauwasseranfall, aufsteigende Grundfeuchte und anfängliche Baufeuchte.

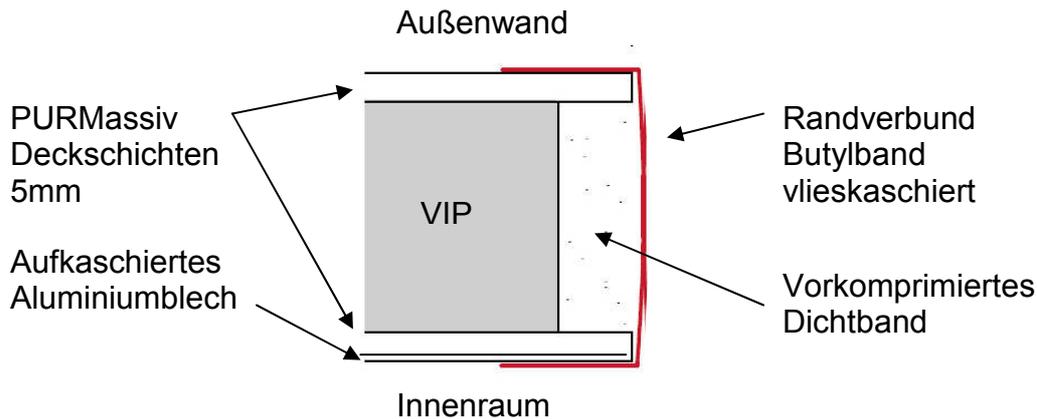
Der Feuchtegehalt von Baustoffen kann im Wesentlichen in drei Bereiche eingeteilt werden, den Sorptionsbereich (auch hygroscopischer Bereich), den Kapillarbereich und den Übersättigungsbereich. Die beiden letzten Bereiche werden auch mit der Bezeichnung überhygroscopischer Bereich zusammengefasst. Mit Ausnahme der Aufnahme von Schlagregenbelastung oder aufsteigender Grundfeuchte (Kapillarbereich) ist der wichtigste Speichermechanismus die Sorption, also die Anlagerung von Wassermolekülen an der Porenwandung.

Die relative Luftfeuchte in einer Baustoffpore oder Oberfläche ist die so genannte Gleichgewichtsfeuchte. Sie ist auch ein Maß für die Menge an ungebundenem Wasser und wird daher auch als Wasseraktivität oder a_w -Wert bezeichnet. Dieser Wert wird in der Bauphysik zur Bewertung von Konstruktionen hinsichtlich der Gefahr von Schimmelpilzwachstum herangezogen. Als Grenze für neue Putzoberflächen gilt hier ein a_w -Wert von 0,85, für Altputze (siehe DIN 4108-2, Juli 2003) liegt diese bei 0,8.

Die wesentlichen Feuchte transportmechanismen lassen sich in Dampfdiffusion, Oberflächendiffusion und Kapillarleitung unterteilen, sie treten in der Praxis je nach Wassergehalt des Baustoffs auch in Kombination auf. Im trockenen Baustoff tritt lediglich Diffusion auf, im feuchten Baustoff kommt die Oberflächenleitung hinzu, Kapillarleitung erfordert einen Feuchtegehalt im überhygroscopischen Bereich.

Besonderheiten bei Vakuum-Innendämmung

Vakuum Isolationspaneele werden durch Umhüllung einer Stützmatrix aus pyrogener Kieselsäure mit einer geeigneten Hochbarrierefolie und anschließender Evakuierung hergestellt. Der Innendruck zum Produktionszeitpunkt beträgt ca. 1-5 mbar. Formate von 200 X 300 mm² bis 1250 x 3000 mm² sind möglich. Um eine Perforation der Hochbarrierefolie auszuschließen, werden (mehrere) VIP-Elemente zwischen geeigneten Deckschichten als Sandwich-Modul verarbeitet. Hier haben sich feste, ca. 5 mm starke



Platten aus Polyurethan-Recyclingmaterial gut bewährt, je nach Erfordernis können zusätzlich Deckschichten aus dünnem Aluminiumblech angebracht werden. Ein Randverbund aus elastischem, vlieskaschiertem Butylklebeband umschließt den gesamten Umfang des Paneels, wobei ein untergelegter Streifen aus vorkomprimiertem Dichtband eine Nachgiebigkeit der Randzone gewährleistet. Ein Ausgleich von Toleranzen ist damit ebenso gewährleistet wie auch ein wärmebrückenarmer Paneelstoß ohne klaffende Fugen. Ein besonderes Potential dieser Bauweise liegt in einer mehrfach funktionalen Einheit aus Wärmedämmschicht (VIP) und Dampfsperre (Aluminiumblech) in Form eines ebenen, großflächigen Paneels.

VIP-Elemente als Dampfbremse bzw. Dampfsperre

Der Aufbau der Vakuum Isolationspaneele aus Hochbarrierefolie ist systemimmanent dampfdiffusionsdicht. Für jedes daraus aufgebaute Innendämmsystem ist folglich ein konsequent diffusionsdichter Aufbau zwingend. Um dies zu erreichen müssen alle Stoßfugen der Paneele, alle Durchdringungen sowie die Ränder und Bauwerksanschlüsse sorgfältig abgedichtet werden. Im Gegenzug können großflächige Paneele (geschosshoch) vorgefertigt angeliefert werden, die die Forderung nach



Diffusionsdichtheit in besonderer Weise erfüllen.

Schutz gegenüber Feuchteintrag in die Innendämmung und die Außenwand aus der Raumluft, sei es durch Diffusion oder aber durch konvektive Hinterströmung der Dämmelemente ist bei einer dichten Ausführung wie oben beschrieben, gegeben. Wie bei jeder diffusionsdichten Innendämmung ist aber ein Austrocknen der Wand über die Innenoberfläche dauerhaft ausgeschlossen. Dem zuverlässigen Schutz vor äußerlichen Feuchteinträgen, z.B. infolge Schlagregen, kommt deshalb entscheidende Bedeutung zu. Siehe hierzu Kapitel 1.5.3.

Einfluss des Wärmedurchgangswiderstandes des VIP-Elementes

In der Regelfläche wird bei produktionsfrischen Paneelen eine Wärmeleitfähigkeit von $\lambda=0,004 \text{ W/(mK)}$ erreicht. Auf eine 50-jährige Nutzungsdauer hochgerechnet beträgt die Wärmeleitfähigkeit noch $\lambda=0,008 \text{ W/(mK)}$. Dies ist auf einen Anstieg des Innendrucks infolge Diffusionsvorgängen zurückzuführen. Wird ein Element perforiert und damit belüftet, stellt sich eine Wärmeleitfähigkeit um $\lambda=0,019 \text{ W/(mK)}$ ein.

Damit weisen Vakuum-Isolationspaneele gegenüber herkömmlichen Dämmstoffen eine 5- bis 10-fach geringere Wärmeleitfähigkeit in der ungestörten Regelfläche auf. Sie bieten damit eine Möglichkeit, hoch wärmedämmende Konstruktionen auf begrenztem Bauraum zu realisieren. Da Innendämmungen grundsätzlich die nutzbare Gebäudefläche reduzieren kann diese Eigenschaft besonders wertvoll werden.

Wie bei jeder Innendämmung- jedoch in verstärktem Ausmaß- gewinnen Wärmebrückeneffekte besondere Bedeutung. Hier sind alle Unterbrechungen der Dämmschicht durch einbindende Bauteile, also Geschossdecken und Innenwände zu nennen, aber auch Elementfugen und Befestigungspunkte. Einbindende Bauteile sind zumeist nicht veränderlich und so kann nur eine Reduzierung der Wärmebrückenverluste, etwa durch Begleitdämmung, erreicht werden. Insbesondere müssen durch solche Maßnahmen kritisch geringe Oberflächentemperaturen, die durch Feuchteanreicherung ein Schimmelpilzwachstum ermöglichen können, ausgeschlossen werden.

Einer sorgfältigen Detailausbildung bei Elementfugen und Durchdringungen kommt daneben große Bedeutung zu. Hier sind neben der Verminderung von Wärmebrückeneffekten Aspekte des Toleranzausgleichs, der Stabilität gegen äußere Lasten, der Luft- und Dampfdiffusionsdichtheit sowie der baupraktischen Handhabung zu beachten.

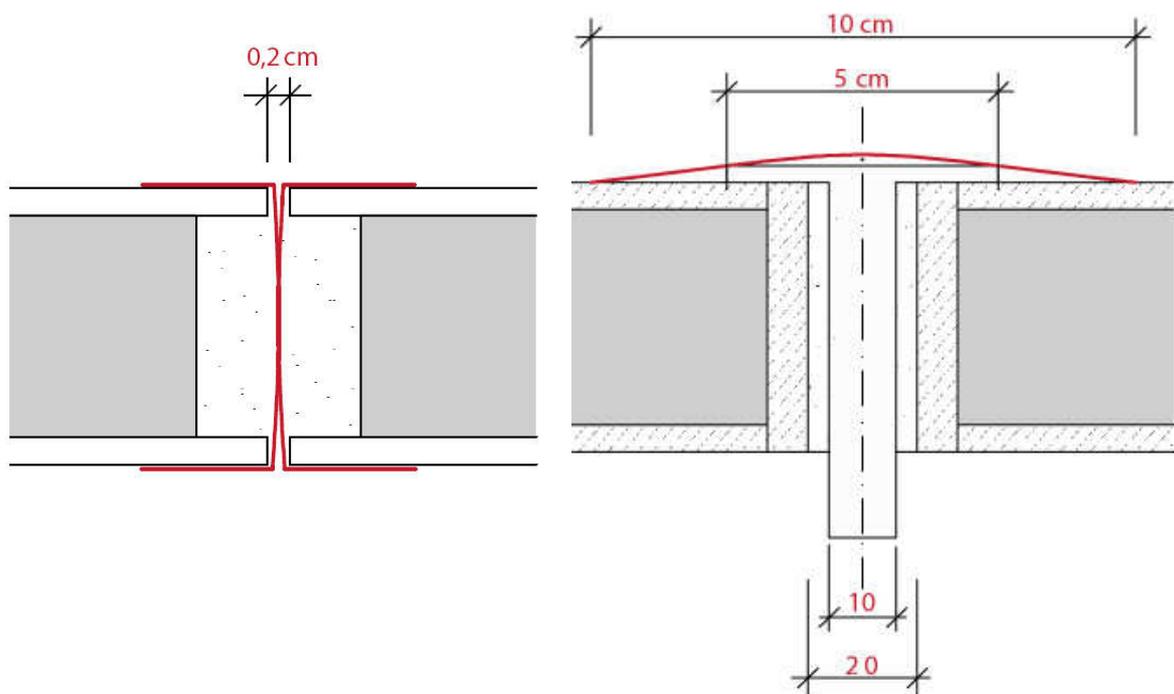
Konvektiver Feuchteintrag

Wie eingangs beschrieben folgt eine Innendämmung aus Vakuum-Isolationspaneelen dem diffusionsdichten Ansatz. Auch bietet sie einige günstige Ansatzpunkte für die vereinfachte Herstellung einer raumseitigen Dampfsperre, indem auf den Paneelen

aufkaschierte Aluminiumbleche geringer Stärke als mechanisch wenig anfällige Sperrschicht dient. Elementstöße und Durchdringungspunkte sind für eine einfach herstellbare Verklebung mit hochwertigen Butyldichtbändern geeignet.

Fehlstellen durch Mängel in der Ausführung, unbekannte Fugen in der bestehenden Konstruktion oder aber durch Beschädigung während der Nutzungsdauer sind nicht auszuschließen. Ihr Einfluss soll daher im Folgenden untersucht werden, damit eine Aussage getroffen werden kann, ob und in welchem Ausmaß eine Fehlertoleranz besteht.

Um Ebenheitstoleranzen der bestehenden Außenwand auszugleichen und um konvektive Luftbewegungen in Spalten und Fugen zwischen Paneel und Außenwand auszuschließen, wird eine elastische Zwischenlage vorgesehen. Die Anforderungen an das zu verwendende Material sollen im Zuge der Fehlstellenuntersuchung näher formuliert werden.



Durch Diffusion an Fugen und Bohrungen möglicherweise eindringender Wasserdampf könnte hinter dem Paneel zu einer lokalen Auffeuchtung führen. Die davon betroffene Fläche hängt von den Eigenschaften der Wandoberfläche und der Ausgleichsschicht zwischen VIP und Bestandswand ab. Vorhandener Innenputz wirkt sich in jedem Falle positiv auf die Vergleichmäßigung bei lokaler Auffeuchtung aus. Dennoch darf in jedem Falle ein Mindest- S_d -Wert von 2,5 m bei einer äquivalenten Fugenbreite von 1 mm nicht unterschritten werden. Bei einer zuverlässigen Abdichtung aus Bitumen mit einem Diffusionswiderstandskoeffizienten von 75000 ist diese Anforderung bei entsprechender Sorgfalt erfüllbar.

Simulationsberechnung

Im Vorfeld der Feldmessung wurde ein Berechnungsmodell zur gekoppelten thermischen und hygrischen Simulation aufgestellt. Ziel der Simulationsrechnung war es, die bauphysikalische Funktionsfähigkeit des Aufbaus theoretisch zu überprüfen und insbesondere die Notwendigkeit der Fassadenbeschichtung als Schlagregenschutz nachzuweisen.

Gegenüber der Feld- und Labormessung bietet die Simulation einige Vorteile bei der bauphysikalischen Bewertung bestehender Wandaufbauten, insbesondere aber der Untersuchung geplanter Konstruktionen oder bei der Variantenuntersuchung und dem Vergleich unterschiedlicher Systeme bei verschiedenen Randbedingungen. Im vorliegenden Fall konnte z.B. das Feuchteverhalten der Wand mit und ohne Fassadenbeschichtung bei gleichen Randbedingungen verglichen werden..

Da es sich bei den Feuchtetransportvorgängen im Vergleich zu den Wärmetransportvorgängen meist um Vorgänge mit sehr hohen Zeitkonstanten handelt, ist für eine gesicherte Bewertung die Betrachtung der Ergebnisse über mehrere Jahre (ca. 5 bis 10 Jahre) notwendig, weil Auffeuchtungsvorgänge der Baukonstruktion erst in diesen Zeiträumen erkennbar ablaufen. Ist der Betrachtungszeitraum bei Messungen aus praktischen Gründen begrenzt, so ist es bei der numerischen Simulation allein eine Frage der Rechenleistung sowie der Simulationszeit, letztere beschränkt sich bei heutiger Prozessortechnologie und eindimensionalen Berechnungsmodellen je nach Diskretisierung und Genauigkeit auf wenige Minuten bis einer Stunde. Zweidimensionale Modelle benötigen zwar noch immer mehrere Stunden bis zu einigen Tage, dennoch lassen sich in vertretbarer Zeit Ergebnisse über das hygrische Verhalten des Baudetails in „Realzeit“ eines Jahrzehnts ableiten.

Hängt die Innenrandbedingung (Raumlufttemperatur und relative Feuchte) einer Feldmessung insbesondere vom Nutzerverhalten ab, so kann bei der Simulation die Randbedingung nach Belieben variiert werden um z.B. die Grenzen der bauphysikalischen Funktionsfähigkeit zu untersuchen und damit Planungsvorgaben für zukünftige Bauvorhaben ableiten zu können. Hinsichtlich der Außenrandbedingung kann entweder mit normierten Randbedingungen entsprechend der Schlagregengruppen I bis III nach DIN 4108-3 oder mit Messdaten des jeweiligen Standortes gerechnet werden. Der Standort der Feldmessung in Neuwied kann in die Beanspruchungsgruppe II eingeordnet werden.

Die nachfolgenden Diagramme zeigen den zeitlichen Verlauf der Wasseraktivität an der Innenoberfläche der Betonwand mit VIP-Innendämmung. Da Beton mit einer Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl von 100 im Vergleich zu anderen Mauerwerksaufbauten als sehr diffusionsdicht zu bezeichnen ist, sind hier sehr lange

hygrische Zeitkonstanten zu erwarten. Ein Einschwingverhalten ist erst nach ca. 8 bis 9 Jahren zu erkennen. Der gewählte Simulationszeitraum betrug 10 Jahre. Wie in Abbildung 11 zu erkennen, steigt der Aw-Wert ohne Fassadenbeschichtung insbesondere nach dem zweiten Jahr noch stark an und erreicht nach 10 Jahren schließlich werte um 95 %, mit Fassadenbeschichtung ist dagegen eine Austrocknung zu beobachten (siehe Abbildung 12). Die Simulation konnte damit die Notwendigkeit eines wirksamen Schlagregenschutzes nachweisen. In beiden Diagrammen wurde darüber hinaus der Verlauf mit und ohne Ausgleichsschicht dargestellt, deren Effekt (etwas geringerer Aw-Wert mit Ausgleichsschicht), nur im Falle ohne Schlagregenschutz erkennbar ist. Aber auch mit Ausgleichsschicht kann nicht verhindert werden, dass der Aw-Wert in kritische Bereiche deutlich über 90 % ansteigt.

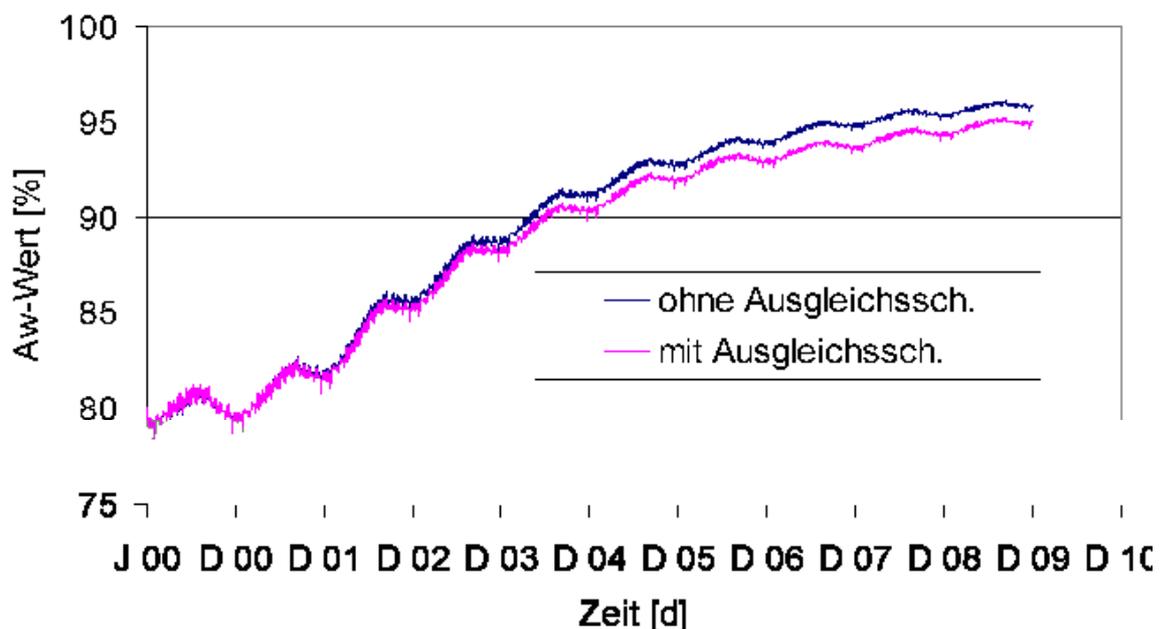


Abbildung 11: Verlauf der Wasseraktivität des Wandaufbaus ohne Anstrich und Spachtelung jeweils mit und ohne Ausgleichsschicht zwischen Beton und VIP-Innendämmung

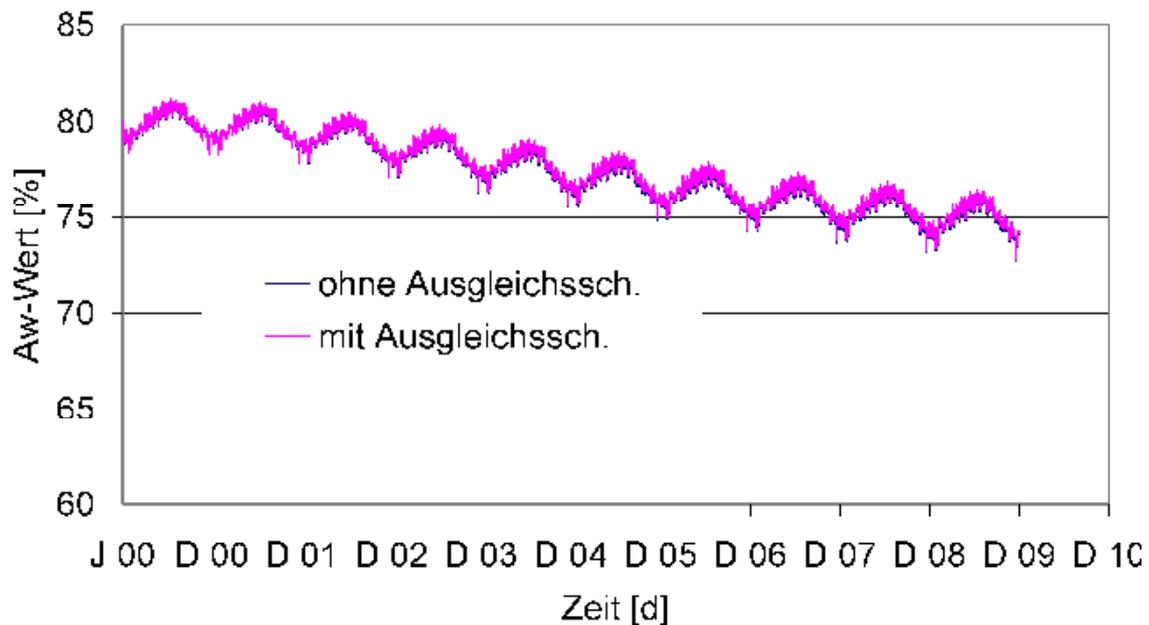


Abbildung 12: Verlauf der Wasseraktivität des Wandaufbaus mit Anstrich und Spachtelung jeweils mit und ohne Ausgleichsschicht zwischen Beton und VIP-Innendämmung

In den beiden vorangegangenen Diagrammen sind die Berechnungsergebnisse mit der Stärke der Betonwand von 18 cm dargestellt, nachfolgend zum Vergleich die Ergebnisse bei 30 cm Beton bzw. 30 cm Ziegelmauerwerk. Dieser Vergleich zeigt die Abhängigkeit von Wandstärke und Baustoff, in jedem Falle ist jedoch eine Auffeuchtung über die Jahre zu erkennen, wenn kein Schlagregenschutz vorhanden ist.

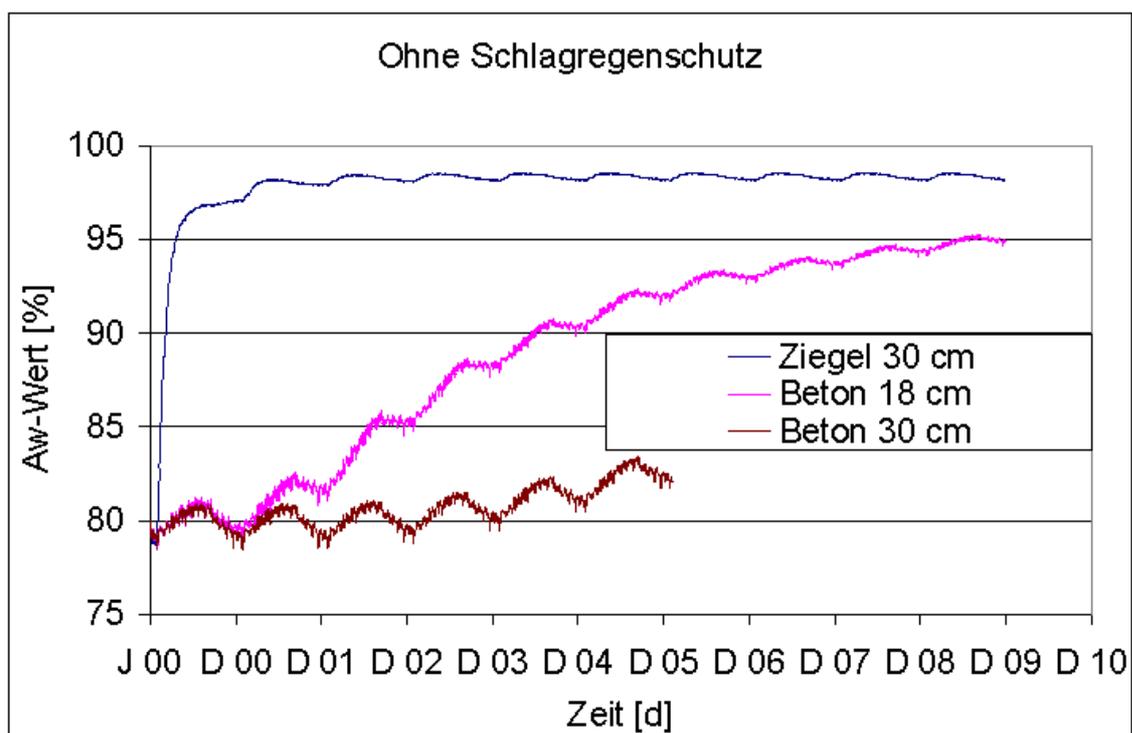


Abbildung 13: Verlauf der Wasseraktivität an der Innenoberfläche des Wandaufbaus ohne Schlagregenschutz bei unterschiedlichen Wandbildnern (Beton 18 cm, Beton 30 cm und Ziegel 30 cm)

Auswertung der Berechnung

Aus den gezeigten Berechnungsergebnissen sowie zusätzlichen Simulationen und Untersuchungen unterschiedlicher Wandaufbauten kann geschlossen werden, dass zur Vermeidung der dauerhaften Überschreitung der 80 %-Grenze des Aw-Wertes auf der raumseitigen Oberfläche der Bestandswand unabhängig vom Wandaufbau ein wirksamer und vollflächiger Schlagregenschutz erforderlich ist. Dessen Eigenschaften und Anforderungen werden in den nachfolgenden Abschnitten erläutert.

Empfehlungen zum Einsatz von VIP-Innendämmung

Der Einsatz von VIP-Innendämmung kann für folgende Fassaden empfohlen werden, wenn keine Außendämmung möglich ist:

- Alle Fassaden die mit wasserabweisendem Putz und Anstrich versehen werden können
- Klinkerfassaden mit sanierten Fugen und geprüfter Hydrophobierung
- Fassaden mit Behang oder Vormauerwerk

Im Folgenden Abschnitt werden die Bedingungen und Grenzen im Einzelnen näher erläutert. Darüber hinaus werden anschließend die Montagebedingungen und der Schlagregenschutz erläutert.

Einsatzmöglichkeiten und –grenzen

Auf Grundlage der Simulationsrechnungen und Messungen sowie Praxiserfahrungen ist der Einsatz von VIP-Elementen als Innendämmung (ebenso wie alle anderen diffusionsdichten Innendämmsysteme) nicht uneingeschränkt für alle Einsatzgebiete der Bestandsmodernisierung geeignet. Wie bereits in den einführenden Abschnitten erläutert, bestehen zwar einerseits keine Probleme durch während der Heizperiode eindiffundierende Feuchte vom Raum, andererseits kann bei dieser Art der Innendämmung auch keine sommerliche Austrocknung zum Raum hin erfolgen. Die Austrocknung kann ausschließlich nach außen erfolgen. Dieser Trocknungsweg ist normalerweise auch völlig ausreichend, solange die im Bauteil eingedrungenen Wassermengen gering sind. Eindringender Schlagregen oder aufsteigende Mauerwerksfeuchte hingegen müssen auf jeden Fall vermieden werden.

VIP-Innendämmsysteme können daher problemlos dort eingesetzt werden, so wasserabweisender Putz und Anstrich aufgebracht werden können. In diesem Falle setzt man einen möglichst diffusionsoffenen Leichtunterputz (S_d ca. 0,06 m) ein, darauf als Fassadenputz einen silikatischen Mineralleichtputz ($S_d < 0,1$ m). Als Fassadenfarbe bietet sich Silikonharzfarbe (S_d ca. 0,03 m, w ca. 0,05 kg/(m²h^{1/2})) als wasserabweisende

Beschichtung an. Der gesamte Sd-Wert beschränkt sich dabei auf ca. 0,2 m. Bei vorhandenen Putzsystemen und Anstrichen ist vorab zu prüfen, ob die Anforderung $S_d < 2,0$ m inklusive dem Neuanstrich überhaupt noch erfüllt werden kann. In manchen Fällen ist bereits ein diffusionsdichter Altanstrich vorhanden. Häufig können solche Anstriche nicht (oder nur mit unverhältnismäßig hohem Aufwand) entfernt werden, insbesondere dann wenn dieser tief in die Porenstruktur eingedrungen ist. In jedem Fall sind hier Messungen an Materialproben als Entscheidungsgrundlage erforderlich. Für wasserabweisende Putze und Beschichtungen werden nach DIN 4108-3 und DIN 18550 folgende Werte gefordert:

$$w \leq 0,5 \text{ kg} / (\text{m}^2 \text{ h}^{0,5})$$

$$s_d \leq 2,0 \text{ m}$$

$$w \cdot s_d \leq 0,2 \text{ kg} / (\text{m} \text{ h}^{0,5})$$

Für den Einsatz von VIP-Innendämmung soll darüber hinaus ein

$$w \leq 0,1 \text{ kg} / (\text{m}^2 \text{ h}^{0,5})$$

eingehalten werden.

Die Einschränkung des Einsatzgebietes auf Fassaden die das Aufbringen von wasserabweisendem Putz und Anstrich ermöglichen würde die Zahl der geeigneten Bestandsgebäude allerdings sehr stark einschränken, weil gerade dieses Gebäudesegment in vielen Fällen ja auch mit Außendämmung versehen werden kann. Ist letzteres der Fall sollte ohnehin von Innendämmung abgeraten werden.

Eine Vielzahl von Bestandsgebäuden, insbesondere aus der Baualtersklasse vor 1918 weist Klinkerfassaden auf. Diese können mit einigen Einschränkungen auch für den Einsatz von VIP-Innendämmung ertüchtigt werden. Voraussetzung hierfür ist, je nach Zustand der Fassade, eine Überprüfung und ggf. Sanierung der Fugen. Hierbei müssen insbesondere Risse und offene Fugen verschlossen werden. Eine Reinigung der Fassaden erfolgt trocken, als Strahlmittel können insbesondere Glasperlen zur schonenden Oberflächenbehandlung eingesetzt werden. Dabei werden die im Laufe der Jahre verschlossenen Oberflächenporen (Patinabildung) freigelegt und die ursprüngliche Saugfähigkeit wiederhergestellt. Nach dieser Behandlung sind die Wasseraufnahmekoeffizienten der Fassade zu bestimmen. Eine hohe Wasseraufnahmefähigkeit wirkt sich positiv auf die Wirksamkeit der Hydrophobierung aus, Eindringtiefen von ca. 3 cm sind erreichbar (siehe Abbildung 14). Das Aufbringen der Hydrophobierung erfolgt normalerweise in mehreren Arbeitsgängen nass in nass. Dabei ist darauf zu achten, dass die Herstellerangaben nur als Richtwerte zu betrachten sind, da Wirksamkeit und Eindringvermögen sehr stark von der tatsächlichen Beschaffenheit des Mauerwerks abhängen. Die richtige Dosierung und Zahl der Anwendungen kann eigentlich nur experimentell durch Vorversuche bestimmt werden, erst dann sollte mit der

Hydrophobierung der gesamten Fassade begonnen werden (wichtig: Voruntersuchung auf Feuchtegehalt, Wasseraufnahme, Salzgehalt, kapillares Saugvermögen).

Ziel der Hydrophobierung ist die Einhaltung oben genannter Bedingung $w \leq 0,1 \text{ kg} / (\text{m}^2 \text{ h}^{0,5})$, wie sie bereits bei verputzten Fassaden gefordert wurde. Ob dieses Ziel erreicht wird muss vorab durch anlegen von Musterflächen geprüft werden (dabei ist nicht nur der Stein sondern auch die Fuge zu prüfen). Die Wasserdampfdurchlässigkeit wird bei der Hydrophobierung kaum beeinträchtigt. Beeinflusst wird lediglich die Oberflächenspannung, der Wirkstoff lagert sich als Film an den Porenwandungen an, ohne diese zu verschließen.

Wie in Freilandversuchen des Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP) an der Testhalle auf dem Versuchsgelände in Holzkirchen festgestellt werden konnte, reduziert die Hydrophobierung die Austrocknungsgeschwindigkeit der bereits vor der Hydrophobierung vorhandenen Regenfeuchte, so dass es vorteilhaft sein kann, die Dämmmaßnahme erst einige Zeit nach der Fassadenimprägnierung vorzusehen.

Unbedingt erforderlich für die Entscheidung zu einer Hydrophobierungsmaßnahme ist die Kenntnis der wesentlichen Feuchtequellen. Nur wenn sicher gestellt ist, dass außer über den Schlagregen nur eine geringfügige Menge an Feuchte von anderen Quellen (aufsteigende Feuchte, Leckagen etc.) herrührt, ist eine solche Maßnahme angezeigt. Bei einer hohen Salzbelastung des Mauerwerks kann eine Imprägnierung zum Abplatzen der Oberfläche führen, da Salz beim Trocknen hinter der hydrophobierten Zone kristallisiert und dabei entsprechende Sprengkräfte entwickelt [Künzel 2003].



Abbildung 14: Hydrophobierungsprobe: Die Eindringtiefe der Hydrophobierung wurde anhand einer Materialprobe durch Auflegen auf einen befeuchteten Schwamm sichtbar gemacht (der heller Bereich vom ca. 3 cm hat praktisch kein Wasser aufgenommen).

Ebenfalls unproblematisch für den Einsatz von VIP-Innendämmung, weil bauartbedingt ausreichend vor Schlagregen geschützt, sind Fassaden mit Behang oder Vormauerwerk. Dagegen soll an dieser Stelle ausdrücklich vor dem Einsatz bei Natursteinmauerwerk und insbesondere Fachwerkwänden gewarnt, wenn hier nicht anderweitig ein völliger Schlagregenschutz gewährleistet werden kann.

Einbau und Montage

Zur Befestigung der Paneele an der Außenwand werden in regelmäßigen Abständen Durchbrüche eingearbeitet, durch die eine Verdübelung mit dem Untergrund möglich ist. Hierzu wurden Tellerdübel, wie sie aus dem Bereich der Wärmedämmverbundsysteme bekannt sind, als geeignet und am Bau verfügbar erkannt. Um die Forderung nach Wärmebrückenvermeidung erfüllen zu können, sind Materialien mit geringer Wärmeleitfähigkeit erforderlich. Es sind Dübel in Vollkunststoffkonstruktion erhältlich bei denen der üblicherweise metallene Spreizdorn durch einen solchen aus Polyamid oder glasfaserverstärkte Kunststoffschrauben ersetzt wurde.

Vakuum-Isolationspaneele werden mit geringen Ebenheitstoleranzen hergestellt und sind als starre Platten kaum in der Lage, Unebenheiten des Untergrundes auszugleichen. Da in Hohlräumen zwischen Dämmebene und bestehender Außenwand konvektive Wärmetransportvorgänge unerwünscht und schädlich sind, müssen solche Hohlräume vermieden werden.

Die Lösung besteht in einer elastischen Zwischenlage. Diese sollte, um ihre Wirkung optimal entfalten zu können, mit Vorspannung montiert werden. Da aber jede Durchdringung für Befestigungselemente die Herstellungskosten erhöht und gleichzeitig die thermischen Eigenschaften des Paneels schwächt, ist eine Abwägung erforderlich.

Bei den großflächigen Paneelen ist ein Befestigungsraster von ca. 50 cm x 50 cm realisierbar. Da Dübelkräfte auf maximal ca. 500 N bei gutem Untergrund begrenzt sind, sind der erreichbaren Pressung Grenzen gesetzt. Es ist daher erforderlich ein geeignetes Material geringer Steifigkeit zu finden, das sich bereits unter geringem Druck gut an Unebenheiten anschmiegt.

Weiterhin sollte das Material der Ausgleichsschicht in der Lage sein, lokal erhöht auftretende Feuchte (aus Fehlstellen) gleichmäßig in die Fläche zu verteilen und / oder durch Sorption zu binden, so dass ein Schaden zunächst vermieden wird und eine allmähliche Feuchteabfuhr durch Diffusion durch die Außenwand erfolgen kann.

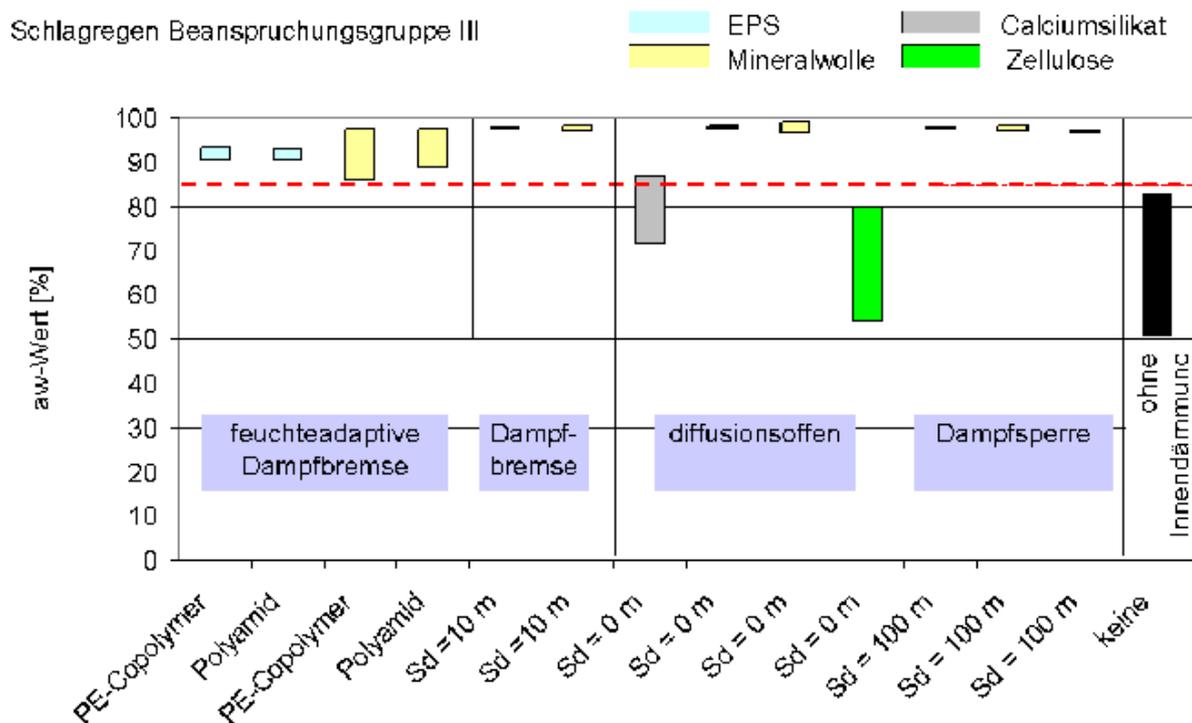
Anforderungen zum Schlagregenschutz

Außenwände, die mit einer diffusionsdichten Innendämmung versehen werden sollen müssen im Vorfeld gründlich hinsichtlich ihres Feuchtehaushalts untersucht und gegebenenfalls ertüchtigt werden. Das Gebäude ist einer Schlagregen-

Beanspruchungsgruppe nach DIN 4108-3 C zuzuordnen und die Frage, ob die jeweilige Fassade einer besonderen Exposition unterliegt, ist zu klären.

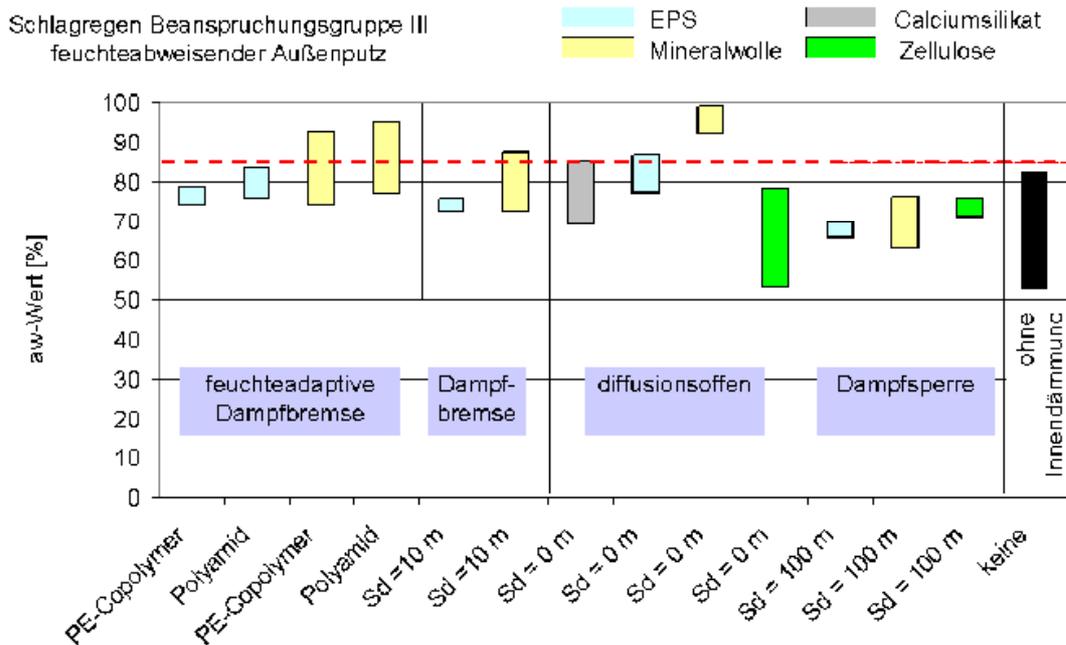
Die folgenden Diagramme stellen beispielhaft die Wasseraktivitäten mit und ohne wasserabweisenden Außenputz sowie die Auswirkung auf die Anwendbarkeit einzelner Innendämmsysteme gegenüber. Aw-Werte $\geq 80\%$ sollten nicht dauerhaft auftreten.

Es zeigt sich, dass bei schlechtem Schlagregenschutz allenfalls diffusionsoffene Innendämmsysteme eingesetzt werden können, da sie ein Austrocknen zum Raum hin weiterhin erlauben. Aber auch hier werden grenzwertige Feuchtverhältnisse erreicht.



Ergebnisübersicht der aw-Werte; Außenwand westorientiert, ohne wasserabweisende Fassadenbeschichtung, Schlagregen Beanspruchungsgruppe III (aus AkkP 32)

Erst eine vor Schlagregen geschützte Fassade ermöglicht eine breitere Anwendung verschiedener Innendämmsysteme. Insbesondere diffusionsdichte Systeme eignen sich bei hochwertigem Schlagregenschutz der Fassade gut. Wie oben genannt, müssen andere Feuchtequellen, etwa aufsteigende Feuchte, ebenfalls zuverlässig ausgeschlossen werden.



Ergebnisübersicht der aw-Werte; Außenwand nordorientiert, mit wasserabweisender Fassadenbeschichtung, Schlagregen Beanspruchungsgruppe III (aus AkkP 32)

Aus der Intensität der zu erwartenden Belastung und den Eigenschaften der Wandkonstruktion kann eine Anforderung an die Fassadenbeschichtung abgeleitet werden. Unbedingt sollte im Zweifel dem hochwertigeren Feuchteschutz der Vorzug gegeben werden.

Im Fall von Sichtmauerwerk kommen hydrophobierende, nicht sichtbare Beschichtungen in Frage. Hier sind dann weitere, besondere Voruntersuchungen erforderlich, um eine zuverlässige Hydrophobierung gewährleisten zu können; auch darf der Anfangsfeuchtegehalt der Wand nicht zu hoch sein.

Bei Putzfassaden können Putze und Anstriche verschiedener Qualität zu hoch wirksamen Schutzschichten kombiniert werden. Wichtig ist, dass der Dampfdiffusionswiderstand des gesamten Aufbaus niedrig genug ist um ein Austrocknen der Wand zuzulassen.

Ideal verhalten sich vorgehängte, hinterlüftete Verkleidungen, die einen vollständigen Schlagregenschutz aufweisen können. In Kombination mit solchen Verkleidungen bietet sich freilich oft eine Außendämmung an.

Die genauen Anforderungen und Voruntersuchungen wurden bereits im Abschnitt 1.5.1 für Fassadenbeschichtung und Hydrophobierung erläutert.

Literatur

- [Künzel 94] Künzel, H. M.: **Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten**, Dissertation am Lehrstuhl für Konstruktive Bauphysik der Universität Stuttgart, Stuttgart 1994
- [Bednar 2000] Bednar, T.: **Beurteilung des feuchte- und wärmetechnischen Verhaltens von Bauteilen und Gebäuden, Weiterentwicklung der Meß- und Rechenverfahren**, Dissertation am Institut für Baustofflehre, Bauphysik und Brandschutz, Technischen Universität Wien, Fakultät für Bauingenieurwesen, Wien, Feb. 2000
- [Grant 1989] Grant, C.; Hunter, C. A.; Flannigan, B.; Bravery, A. F.: **The moisture requirements of moulds isolated from domestic dwellings**. International Biodeterioration 25 (1989), S. 259 - 284.
- [Hocking 1993] Hocking, A. D.: **Responses of xerophilic fungi to changes in water activity**. Jennings, D. H. (Hrsg.): Stress tolerance of fungi. Marcel Dekker Inc., New York (1993).
- [Smith 1982] Smith, S. L.; Hill, S. T.: **Influence of temperature and water activity on germination and growth of *Aspergillus restrictus* and *Aspergillus versicolor***. Transactions of the British Mycological Society, Vol. 79 (1982), H. 3, S. 558 - 560.
- [Sedlbauer 2001] Sedlbauer, K.: **Vorhersage von Schimmelpilzbildung auf und in Bauteilen**. Dissertation Universität Stuttgart (2001).
- [Schwarz 1974] Schwarz, B. und Künzel, H.: **Der kritische Feuchtegehalt von Baustoffen**. Gesundheits-Ingenieur 95 (1974), H. 9, S. 241-246.
- [Künzel 2003] Krus M., H.M. Künzel: **Untersuchungen zum Feuchteverhalten von Fassaden nach Hydrophobierungsmaßnahmen**, WTA-Journal 2/03 S. 149-166

Teil B Laboruntersuchung

Einführung

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden Laboruntersuchungen an einem Innendämmungssystem auf der Basis von Verbundplatten mit Vakuum-Dämmpaneelen durchgeführt.

Ziel dieser Untersuchungen war es, die Grundlagen für die zugehörigen Planungs- und Anwendungshinweise zu schaffen, damit das System in der Umsetzung eine baupraktisch und bauphysikalisch einwandfreie Lösung für die Altbaumodernisierung darstellt.

Die hier dokumentierten Ergebnisse der Laboruntersuchungen und der diesbezüglichen Simulationsrechnungen sind damit in ein längerfristiges Forschungsprojekt "Validierung der Anwendung eines Vakuum-Innendämmsystems" eingebettet, welches mittels längerfristiger Feldmessung auch die Praxistauglichkeit bei realen Randbedingungen untersucht.

In diesem Bericht wird die Analyse von Prototyp-Verbundplatten im laborseitigen Aufbau zum Test der Eigenschaften mit dem Ziel der Bestätigung bzw. dem Abgleich der durch die Simulation erwarteten Eigenschaften vorgestellt und dokumentiert. Bei diesen Laborversuchen ging es nicht darum, den Feldversuch am Prüfstand nachzuvollziehen, sondern vielmehr die Validität des Simulationsmodells zu prüfen und mit den tatsächlichen Materialdaten abzugleichen. Da sich hygrische Vorgänge im Vergleich zu Wärmetransportvorgängen auf wesentlich längeren Zeitskalen abspielen, wurde im Versuchsaufbau z.B. mit reduzierten Materialstärken gearbeitet, um mit vertretbarem Zeitaufwand für die Messung aussagekräftige Datensätze zu erhalten, welche sich für die Validierung der Simulationsmodelle eignen. Ebenfalls zum Zwecke der Modellvalidierung wurden die Randbedingungen in Form von Sprungfunktionen geändert. Eine genaue Beschreibung der Versuchsdurchführung findet sich in Abschnitt 2.4.1.

Probenkörper

Wie bereits einleitend erwähnt, ist der Schichtaufbau des Probenkörpers nicht identisch mit dem tatsächlichen Aufbau wie er bei der Feldmessung ausgeführt wurde, hinsichtlich der Materialien ist er aber identisch. Insbesondere der VIP-Aufbau ist mit den in der Feldmessung eingesetzten Elementen identisch, lediglich die Außenmaße wurden für die Labormessung auf 50 x 50cm verkleinert.

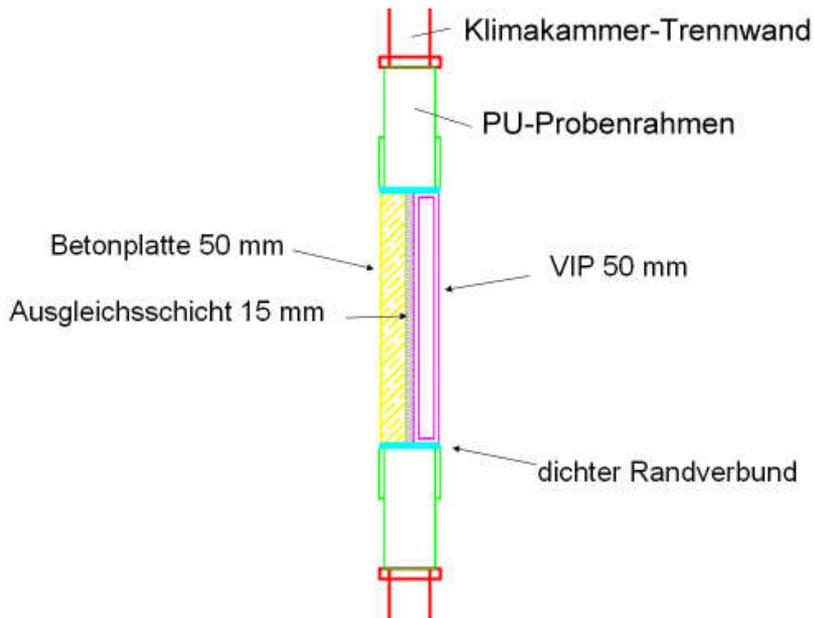


Abbildung 15 Schichtaufbau des Probenkörpers

Stellvertretend für die Außenwand des Bestandsgebäudes wurde wie bei der Feldmessung in Neuwied Beton eingesetzt. Dies hat den Vorteil, dass es sich dabei um einen relativ homogenen Baustoff mit bekannten Stoffeigenschaften handelt. Die Schichtdicke wurde zur Reduzierung der Zeitkonstanten auf 50 mm reduziert. Die Ausgleichsschicht zwischen Beton und VIP-Element wurde wie im Feldversuch aus einer Lage Thermohanf mit einer unkomprimierten Schichtdicke von 30 mm ausgeführt und durch Anpressen auf 15 mm reduziert.



Abbildung 16 Abstandshalter für die Ausgleichsschicht und Schichtaufbau (obere Betonplatte nur zum Verpressen)

In dieser Lage wurde der Probenkörper durch den Randverbund aus Bitumendickbeschichtung sowie mittels Glasfaser-Gewebematten mit Epoxidharzverklebung gesichert. Um Eindiffundieren von Feuchte über den Randverbund

in den Schichtaufbau des Probenkörpers zu unterbinden, wurde dieser zusätzlich mit einer Folie versehen.

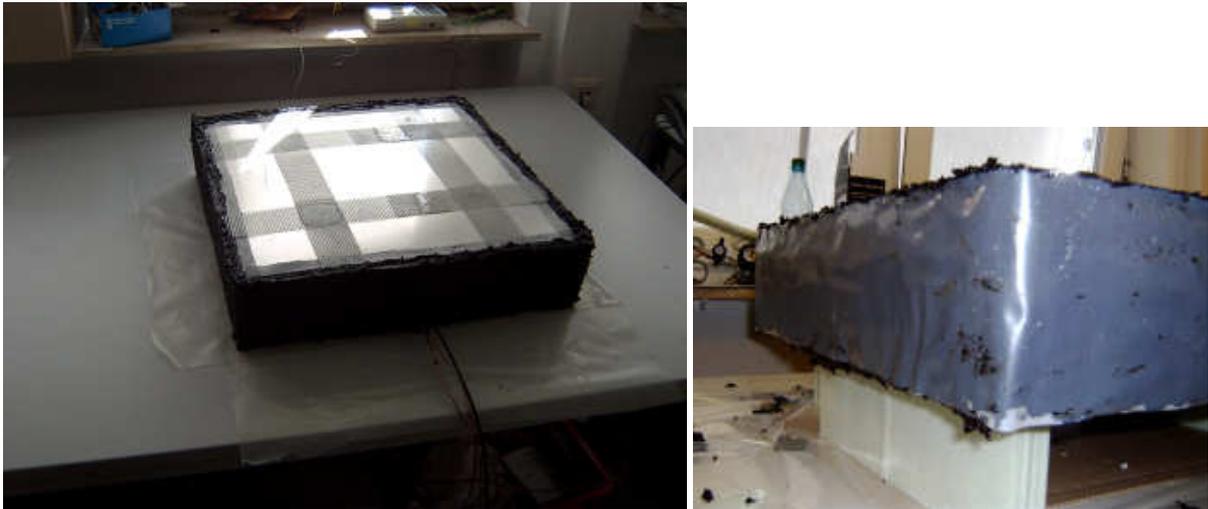


Abbildung 17 Randverbund aus Bitumendickbeschichtung und Sicherung durch Glasfaserbänder (links), Folie als Dampfsperre im Randverbundbereich (rechts)

Versuchsaufbau der Labormessung

Differenzklimakammer-Prüfstand

Der Laborprüfstand des PHI verfügt über eine Doppelklimakammer mit der Möglichkeit zum Probeneinbau mit den Außenmaßen bis 1 x 1 m (lichte Weite des Einbaufensters).

Die Klimakammer kann auf der „Kaltseite“ (Klima 1) bezüglich der Lufttemperatur von -10 °C bis 30 °C und bezüglich der Raumlufffeuchte von 30 %rF bis 90 %rF bzw. auf der „Warmseite (Klima 2) von 15 °C bis 30 °C und von 50 %rF bis 90 %rF geregelt werden.

Die Datenerfassung (Almemo Datalogger Fa. Ahlborn Mess- und Regeltechnik) ermöglicht sowohl die Aufzeichnung der zur Regelung der Kammer eingesetzten Sensoren, als auch der wahlweise zusätzlich eingesetzten Sensoren für Probenkörper und Randbedingungen.



Abbildung 18: Datenerfassung und Regler des Differenzklimakammer-Prüfstandes

Probeneinbau in der Klimakammer

Aus Gewichtsgründen (Gewichtsbegrenzung für Einbau und Wägung) konnte nicht das gesamte zur Verfügung stehende Einbaumaß für den Probenkörper genutzt werden. Zwar hätte man bei größerem Probenmaß geringere Beeinflussung durch den Randverbund zu erwarten gehabt, aus praktischen Gründen, insbesondere wegen dem hohen Gewicht der Betonplatte, wurde das Probenmaß auf 50 x 50 cm reduziert. Trotz dieser Reduzierung ist das Gesamtgewicht der Probe mit rund 36 kg für Probenein- und Ausbau sowie die Wägung vor und nach dem Versuch (siehe Abschnitt 2.4.2) bereits grenzwertig. Für den Probeneinbau wurde die Einbauöffnung mittels Einbaurahmen aus extrudiertem Polystyrol-Hartschaum auf das Probenkörpermaß reduziert (siehe Abbildung 16).

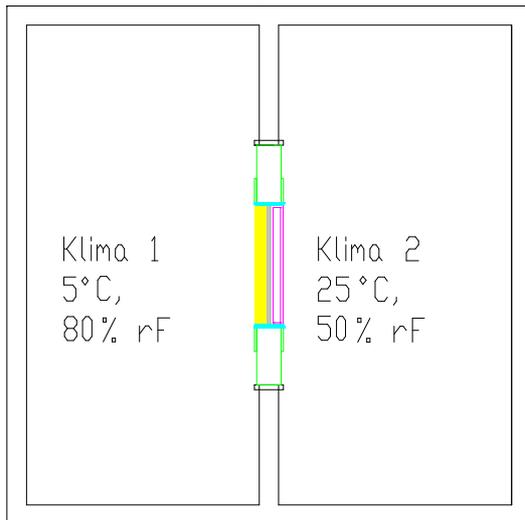


Abbildung 19: Differenzklimakammer-Prüfstand (Klima 1: „Außenklima bzw. Kaltseite“, Klima 2: „Innenklima bzw. Warmseite“)

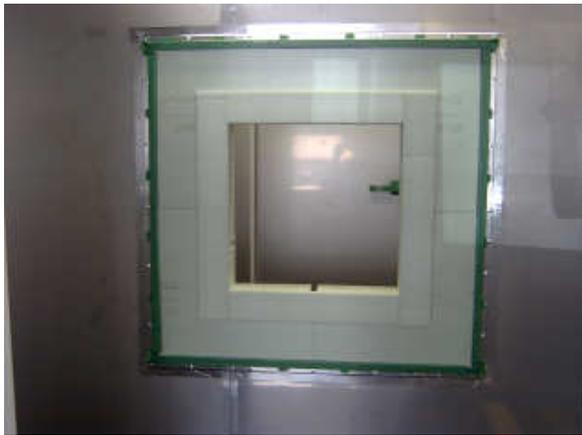


Abbildung 20: Einbaurahmen aus XPS

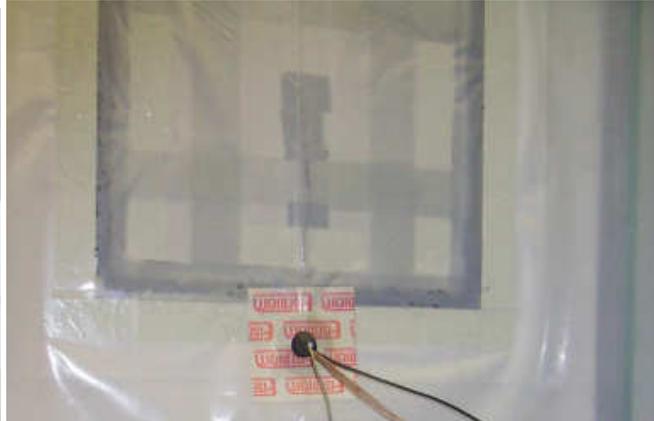
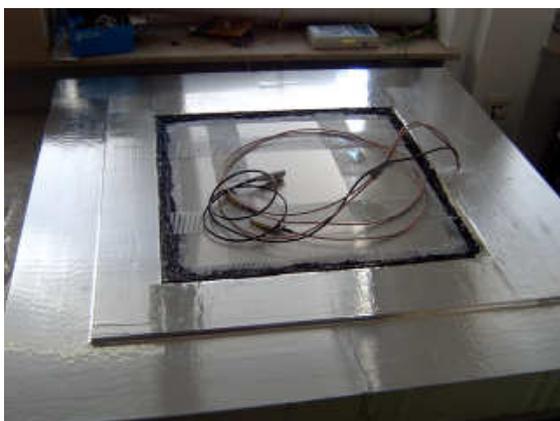


Abbildung 21: Einbaurahmen mit Folienkaschierung und eingebauter Probe inkl. Kabeldurchführung

Der Einbaurahmen und dessen Verbindung zum Probenkörper musste sorgfältig luftdicht ausgeführt werden, um einen Wasserdampftransport zwischen den beiden Differenzklimakammern sicher ausschließen zu können. Der höhere Dampfdruck auf der Warmseite würde sonst je nach eingestellten Randbedingungen zu starkem Kondensat auf der Kaltseite führen. Auf der Warmseite wurde der Einbaurahmen mit Alukaschierung versehen, welche als Dampfsperre fungiert, zusätzlich wurde über den gesamten Aufbau eine Folie aufgezogen um einen sicheren luftdichten Aufbau zu gewährleisten.



Abbildung 22: Blick in die „kaltseitige“ Hälfte der Klimakammer mit fertig eingebauter Probe und Oberflächentempersensoren auf der Betonplatte

Sensoreinbau und Messstellenübersicht

Der Probenkörper wurde jeweils in Proben- und Schichtmitte von Ausgleichs- und Betonschicht mit einem kombinierten Temperatur-/Feuchtesensor ausgestattet (siehe Abbildung 19). Darüber hinaus wird der Wärmefluss durch den Probenkörper mittels Wärmeflussmessplatte, welche sich auf die Oberfläche des VIP-Elements zwischen Ausgleichsschicht und VIP befindet, gemessen (siehe Abbildung 19).



Abbildung 23 Schichtaufbau und Sensorpositionen im Probenkörper

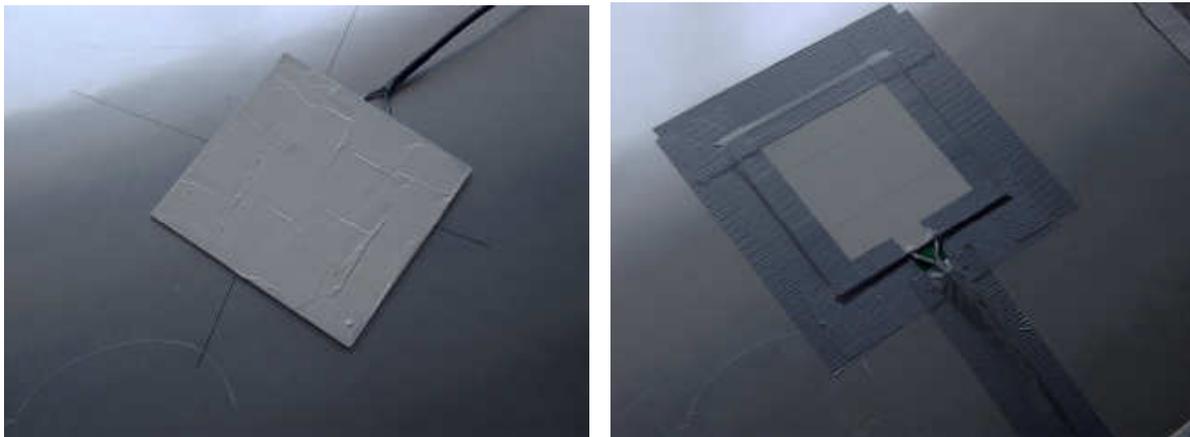


Abbildung 24 Wärmeflussmessplatte auf dem VIP-Element

Darüber hinaus wurden die Oberflächentemperaturen mittels flächiger PT100-Sensoren jeweils auf der dem jeweiligen Klimakammerraum zugewandten Oberfläche (Beton kaltseitig bzw. VIP-Element warmseitig) gemessen (siehe Abbildung 21).

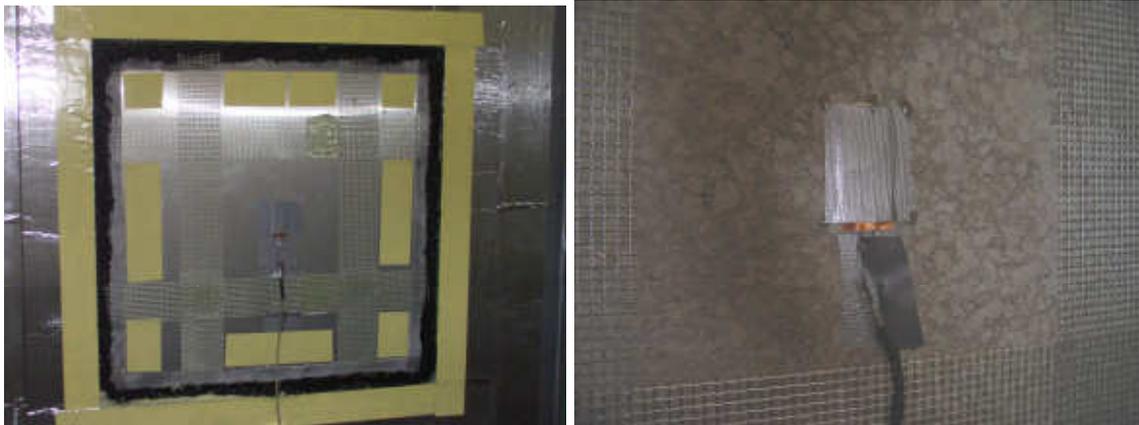


Abbildung 25: Oberflächentempersensoren auf Betonplatte (kaltseitig) bzw. VIP-Element (warmseitig)

Die vollständige Messstellenliste inklusive der Messstellen in Klimakammer und Labor beinhaltet auch die von der Sensorelektronik abgeleiteten Messgrößen.

Kanalbezeichnung	Messgrößenbeschreibung	Einheit
M00	relative Luftfeuchte Kaltseite	%
M01	relative Luftfeuchte Warmseite	%
M02	Temperatur Ausgleichsschicht	°C
M03	Temperatur Betonplatte	°C
M04	Wärmestrom Probe	W/m ²
M05	Oberflächentemperatur VIP	°C
M06	Oberflächentemperatur Betonplatte	°C
M07	Temperatur Labor	°C
M10	Temperatur Warmseite	°C
M11	Temperatur Kaltseite	°C
M12	relative Feuchte Ausgleichsschicht	%
M13	relative Feuchte Betonplatte	%
M17	relative Feuchte Labor	%
M22	Taupunkt Ausgleichsschicht	°C

M23	Taupunkt Betonplatte	°C
M27	Taupunkt Labor	°C
M32	Wassergehalt Ausgleichsschicht	g/kg
M33	Wassergehalt Betonplatte	g/kg
M37	Wassergehalt Labor	g/kg

Messkanäle der Laboruntersuchung

Versuchsdurchführung

Randbedingungen und Versuchsablauf

Bei der Wahl der Randbedingungen und deren zeitliche Abfolge wurde nicht auf realitätsnahe Verhältnisse Wert gelegt, sondern auf die Nutzungsmöglichkeit der resultierenden Messdaten für die Modellvalidierung des thermisch/hygrischen Simulationsmodells. In der nachfolgenden Tabelle sind die wesentlichen Versuchsparameter und deren chronologischer Ablauf dokumentiert. Insgesamt lief die Messung von Anfang Mai bis Mitte Oktober, die Messdauer betrug damit 158,5 Tage bei einem Aufzeichnungsintervall von 10 Minuten.

03.05.07 19:27	Beginn Datenerfassung Vorlauf: Klimakammer ausgeschaltet, Türen 10 cm offen
04.05.07 11:00	Beginn Versuch: Klimakammer eingeschaltet. Kaltseite -5°C/80%, Warmseite 25°C/45%
10.5.07 13:50	Vereisung Verdampfer Kaltseite, Kammer betreten, Thermographie
10.05.07 16:55	Kammer geschlossen, Fortsetzung mit Parametern vom 04.05.07
11.05.07 14:37	Neue Parameter: Kaltseite +3°C/80%, Warmseite 25°C/45%
14.05.07 09:05	ca. 5 l Abtauwasser Kaltseite weggegossen
29.05.07 11:00	Neue Parameter: Kaltseite +3°C/70%, Warmseite 25°C/45%
05.06.07 20:45	Fehlfunktion Regler Kaltseite(Anzeige 67°C), Reset durch kurzes Abschalten, Kammertemperatur auf -8°C gesunken
05.06.07 20:50	Neue Parameter: Kaltseite -7°C/50%, Warmseite 25°C/45%
08.06.07 12:30	Einbau Abtau-Automatik, kurzes Abschalten, nun 2x täglich in der Kalten Kammer Abtaubetrieb bei ausgeschaltetem Ventilator (2°C)
18.06.07 9:10	Neue Parameter: Kaltseite -7°C/65%, Warmseite 25°C/45%
19.06.07 17:55	Neue Parameter: Kaltseite 10°C/65%, Warmseite 25°C/45%

20.06.07 9:00	Neue Parameter: Kaltseite 10°C/75%, Warmseite 25°C/45%
11.07.07 9:00	Neue Parameter: Kaltseite 25°C/60%, Warmseite 25°C/45%
27.07.07 15:12	Kaltseite betreten, Befeuchtungsversuch, 71g Wasser
02.10.07 13:40	Kammertemperatur beidseits auf ca. 36 °C gestiegen, Ausfall der Kühlung, Kompressor abgeschaltet.
02.10.07 16:50	Befeuchter ausgeschaltet, Solltemperatur auf 15°C beide Seiten, Türen geöffnet, Ventilatoren laufen, rF/T in Kammerhälften wird noch aufgezeichnet.
03.10.07 10:00	Kammer komplett ausgeschaltet, rF/T in Kammerhälften wird nun nicht mehr separat gemessen; Türen weiterhin geöffnet.
09.10.07 09:15	Auslesung, Datenerfassung anschließend wieder gestartet

Protokoll der Laboruntersuchung

Wägung des Probenkörpers

Der Laborversuch dient, wie eingangs ausgeführt, primär der Validierung der Simulationsrechnung. Neben der lokalen Messung intensiver Zustandsgrößen wie z.B. der Temperatur und der relativen Feuchte in und am Probenkörper, stellt der Gesamtwassergehalt der Probe eine extensive Größe dar, welche durch Wägung der Probe bestimmt werden kann.

Die Gesamtmasse der Probe wurde vor dem Einbau zu 36305 g bestimmt, nach dem Ausbau betrug die Masse 35603 g, per Saldo also eine Reduzierung der enthaltenen Wassermasse von 702 g durch Austrocknung über die Versuchsdauer. Auch diese Information wird neben den Zeitverläufen der intensiven Messgrößen zur Validierung herangezogen.

Luftgeschwindigkeitsmessung zur Bestimmung des Wärmeübergangs an der Probenoberfläche

Mit Hilfe eines omnidirektionalen Anemometers wurde die Luftgeschwindigkeit jeweils auf der Kalt- und der Warmseite der Probe in 10 s - Intervallen aufgezeichnet. Nachfolgende Tabelle gibt die Mittelwerte und die Standardabweichung dieser Messwerte bei einer Grundgesamtheit von 115 bzw. 200 Werten an.

	Mittelwert	Standardabweichung
Kaltseite	0,79 m/s	0,11 m/s
Warmseite	0,36 m/s	0,06 m/s

Befeuchtungsexperiment zur Schlagregensimulation

Um die Wasseraufnahme bei Schlagregen im Laborversuch unter definierten Bedingungen simulieren zu können, wurden zunächst Vorversuche an einer Betonplatte unternommen. Es zeigte sich, dass das Wasser auf diese Weise zwar relativ gleichmäßig aufgebracht werden konnte, das aus der Flasche austretende Wasser aber nicht vollständig der Platte zugeführt wurde. Ein nicht zu vernachlässigender Anteil des Sprühnebels wurde fortgetragen und verdunstete vor dem Auftreffen auf der Platte. Darüber hinaus wurde festgestellt, dass bei mehrmaligem Aufsprühen sehr rasch ein Ablaufen der Tropfen zu beobachten war, deutlich mehr Wasser konnte ohne Ablaufen der Tropfen von der Probe aufgenommen werden, wenn zwischen den Durchgängen jeweils eine Pause von etwa einer Minute eingehalten wurde. Im Rahmen zahlreicher Vorversuche konnte durch jeweiliges Abwiegen der Betonplatte und der Sprühflasche vor und nach dem Sprühversuch der Massenanteil, der tatsächlich von der Betonplatte aufgenommen wurde, ermittelt werden. Dieser Betrag im Mittel 74,6%.

Am 27.07.07 15:12 Uhr wurde die Probenoberfläche auf der Kaltseite (Betonoberfläche) mit der Sprühflasche in 5 Durchgängen mit jeweils einer Minute Abstand befeuchtet. Nach dem 5. Durchgang konnte die Probe kein weiteres Wasser aufnehmen, die Tropfen begannen abzulaufen. Die von der Sprühflasche abgegebene Wassermenge betrug 71 g, demnach wurden entsprechend der Ergebnisse aus den Vorversuchen netto 53 g von der Betonprobe aufgenommen.



Abbildung 26: Kaltseite Probenkörper, Betonoberfläche nach dem Befeuchtungsexperiment

Infrarotthermografie

Am 10.5.2007 um 16:30 (bis ca. 17:00) wurde der Differenzklimakammer-Prüfstand betreten, um Infrarotaufnahmen der Probenkörper-Oberfläche sowie der Einbausituation vorzunehmen. Zu diesem Zeitpunkt lag am Probenkörper die kaltseitige Randbedingung von ca. $-4,5\text{ °C}$ an. An Messdatenverlauf ist der Zeitpunkt der IR-Aufnahmen an einem kurzzeitigen Temperaturanstieg durch Öffnen der Kammertüren zu erkennen.

Auf den Infrarotaufnahmen ist der Randeinfluss des Probenkörpers sowie der Einbausituation deutlich zu erkennen. Dies ist bei der Simulation sowie der Bewertung der Messergebnisse zu berücksichtigen. Darüber hinaus ist der starke Unterschied der Emissivität der Probenkörperoberfläche und der Innenoberfläche der Differenzklimakammer zu erkennen. Letztere besteht aus Edelstahl und weist damit eine Emissivität im langwelligen Bereich von etwa 0,1 auf. Die Probenoberfläche liegt demgegenüber bei etwa 0,95. Bei der Simulation wird dies beim Ansatz für den Strahlungswärmeübergang berücksichtigt.

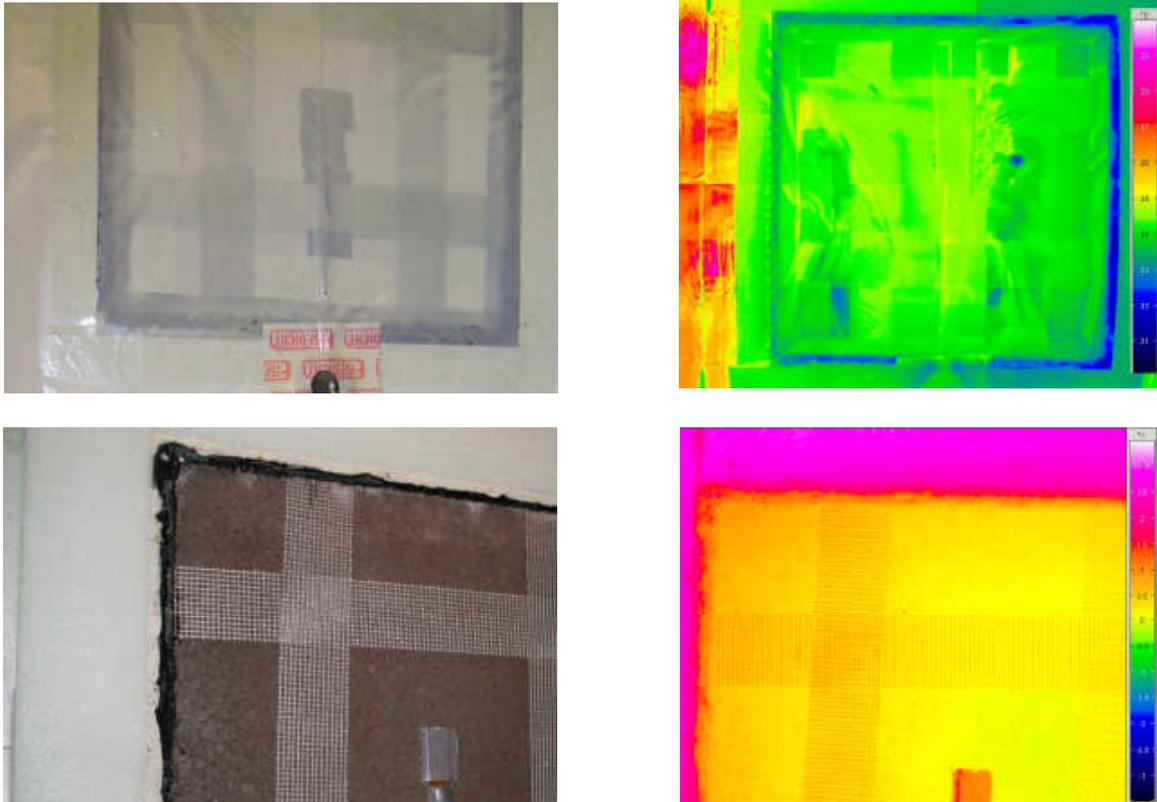


Abbildung 27: Fotos (links) und Infrarotthermografie (rechts) der Probe warmseitig (oben) bzw. kaltseitig (unten). Auf beiden Thermografien ist deutlich der Randeinfluss zu erkennen.

Messdaten

In den folgenden beiden Grafiken wird zunächst ein Überblick über die Gesamtheit der Messdaten jeweils gruppiert nach Messgrößen gegeben. Im Anschluss werden dann die Zeitverläufe der Randbedingungen und der Messwerte am und im Probenkörper dokumentiert.

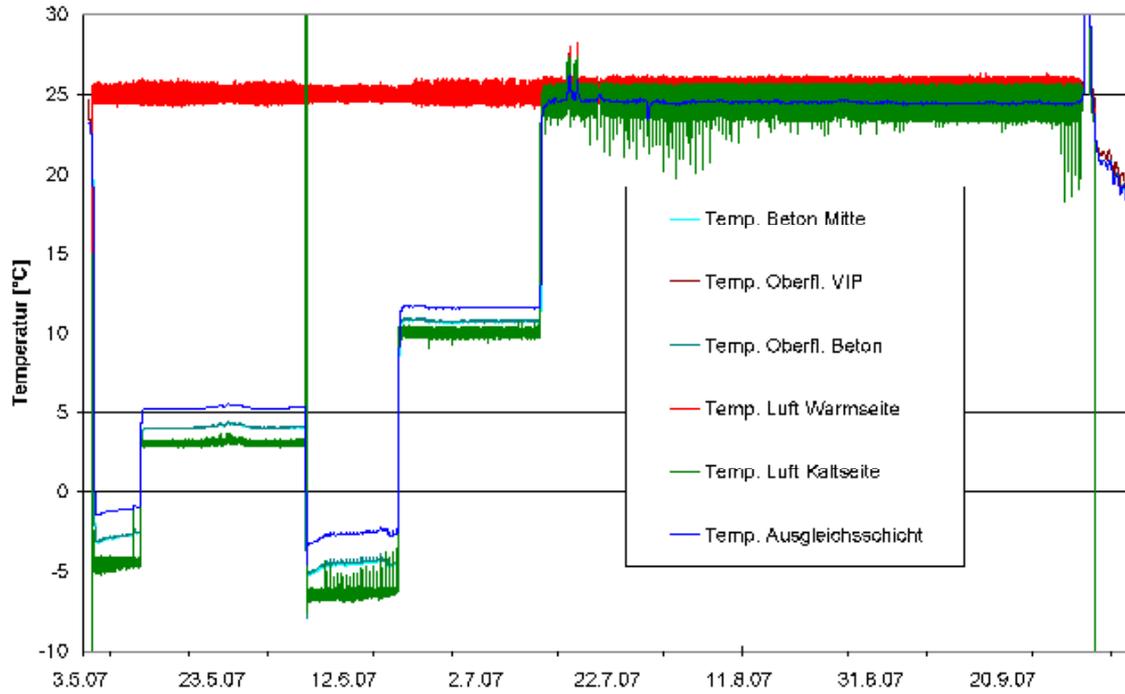


Abbildung 28: Temperaturverläufe in Klimakammer und am Probenkörper

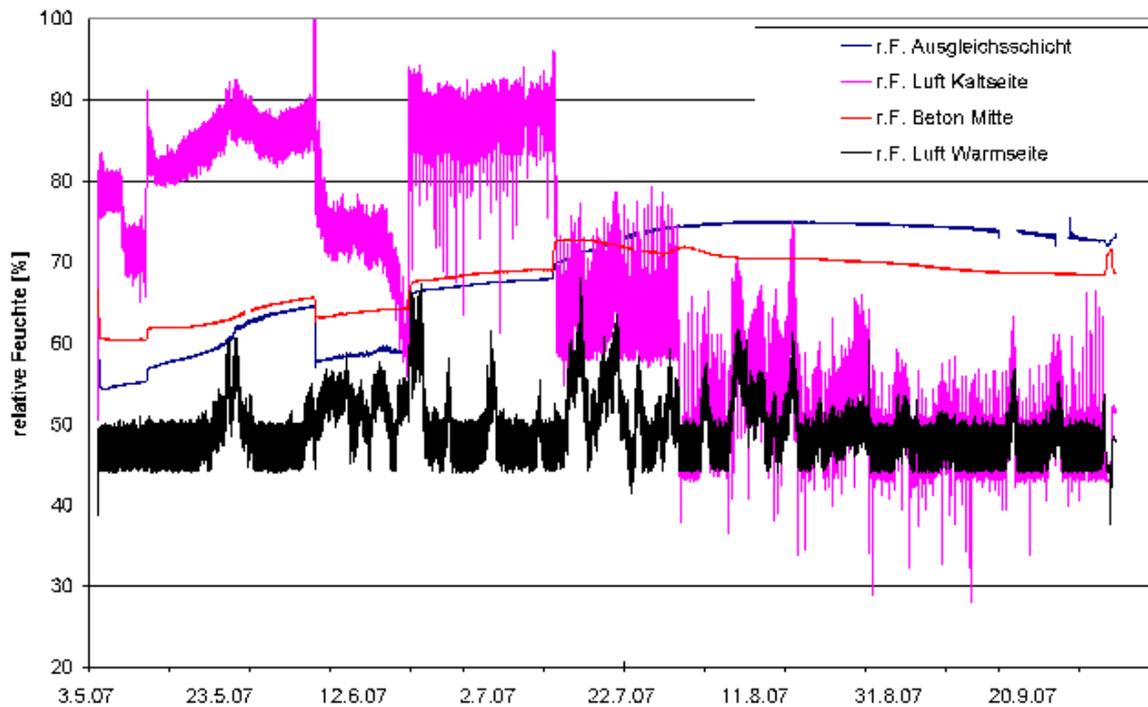


Abbildung 29: Relative Feuchte in Klimakammer und Probenkörper

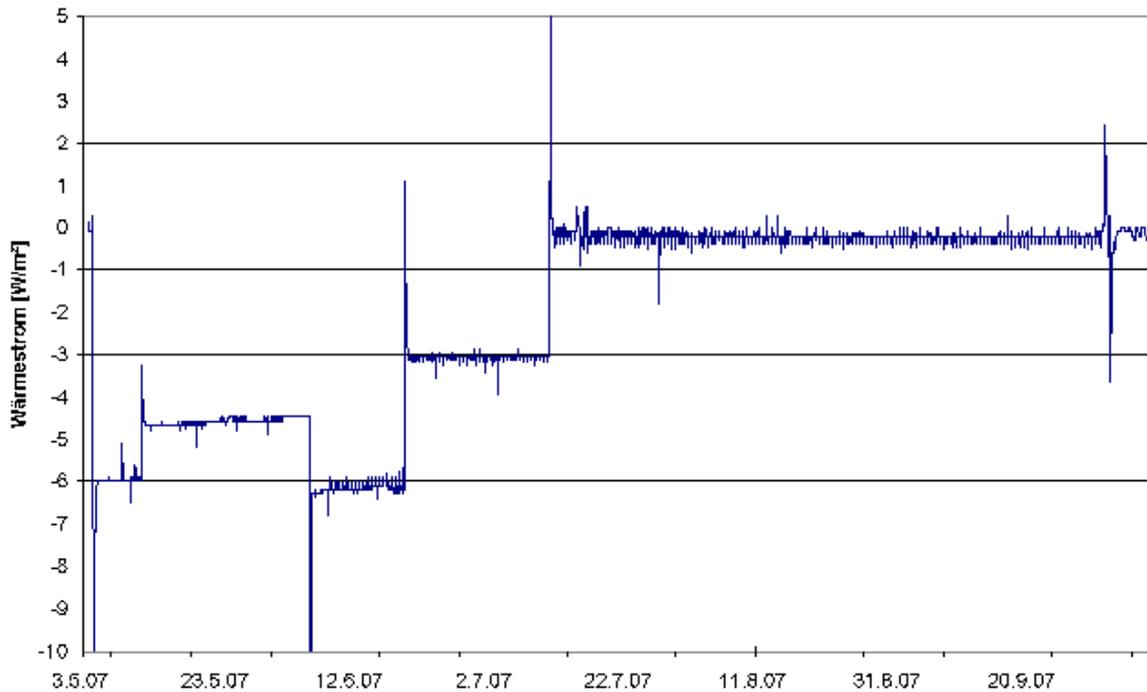


Abbildung 30: Wärmefluss auf dem VIP-Element (zwischen Ausgleichsschicht und VIP)

Warmseite

Die Temperatur der Warmseite wurde praktisch über den gesamten Versuchszeitraum mit einer konstante Solltemperatur von 25 °C geregelt, als Mittelwert über die gesamte Messdauer ergab sich ein Wert von 25,12 °C (Standardabweichung 0,9 K). Die Periodendauer der Regelschwankungen liegt im Bereich von 10 bis 20 Minuten, für die zu untersuchenden bauphysikalischen Vorgänge im Probenkörper. Die relative Feuchte auf der Warmseite wurde dauerhaft auf einen Sollwert von 45 % eingestellt, die Messwerte streuen insbesondere oberhalb dieses Sollwertes. Letztlich ist die Warmseitige Raumluftheuchte für diesen Versuch weitgehend irrelevant, weil die Probe auf dieser Seite diffusionsdicht abgeschlossen wurde.

Kaltseite

Die Solltemperatur der Kaltseite wurde stufenweise verändert, die Mittelwerte der gemessenen Lufttemperatur in den jeweiligen Abschnitten sind in nachfolgender Tabelle aufgeführt.

Zeitraum	Mittelwert der gemessenen Lufttemperatur auf der Kaltseite
4.5.-11.5.07	-4.48 °C

11.5.-5.6.07	+3.47 °C
5.6.-18.6.07	-6.31 °C
19.6.-11.7.07	+10,01 °C
11.7.-2.10.07	+24,57 °C

Tabelle 4: Mittelwerte der gemessenen Temperaturrandbedingung auf der Kaltseite

Beton

Betonoberflächentemperatur und Kerntemperatur folgen erwartungsgemäß der kaltseitigen Raumlufttemperatur mit einer Temperaturdifferenz entsprechend dem kaltseitigen Wärmeübergangskoeffizienten. Erkennbar ist auch die hohe Zeitkonstante bezüglich Änderungen des a_w -Wertes im Probenkern (siehe Abbildung 25)

Ausgleichsschicht

Der Temperaturverlauf gemessen im Kern der Ausgleichsschicht folgt erwartungsgemäß der Betontemperatur mit einer Temperaturdifferenz entsprechend dem zwischenliegenden Wärmedurchgangswiderstand. Interessant ist allerdings der zum Teil gegenläufige Verlauf des a_w -Wertes in der Ausgleichsschicht im Vergleich zu den Messwerten im Beton ab dem 11.7.07.

VIP-Element

Mit Hilfe einer Wärmeflussmessplatte, welche mit Hilfe von Wärmeleitpaste auf das VIP-Element (zwischen VIP und Ausgleichsschicht aufgebracht worden war, wurde der Wärmestrom gemessen. Die Wärmeflussmessplatte der Fa. Phymeas (Cottbus) wurde im Labor mit einer Einplattenapparatur bei einer mittleren Temperatur von 23 °C und einer Wärmestromdichte von ca. 100 W/m² kalibriert (relative Messunsicherheit 5 % laut Kalibrierzertifikat).

Der grafische Zeitverlauf der Wärmestromdichte wurde bereits in Abschnitt 2.5 dargestellt, in nachfolgender Tabelle sind die Mittelwerte in den jeweiligen Zeiträumen mit unterschiedlicher Temperaturrandbedingung aufgeführt.

Zeitraum	Mittelwert des gemessenen Wärmestromes zwischen VIP und Ausgleichsschicht
4.5.-11.5.07	6,12 W/m ²
11.5.-5.6.07	4,60 W/m ²
5.6.-18.6.07	6,20 W/m ²
19.6.-11.7.07	3,06 W/m ²
11.7.-2.10.07	0,18 W/m ²

Tabelle 5: Mittelwerte der gemessenen Wärmeströme in den jeweiligen Abschnitten der Temperaturrandbedingungen

Sieht man die jeweiligen Abschnitte als Zeiträume mit konstenen Randbedingungen und die Wärmetransportvorgänge abschnittsweise als quasistationär an, so kann der Wärmedurchgang aus dem Verhältnis von Wärmestrom und Temperaturdifferenz berechnet werden. Hierbei ist allerdings zu bedenken, dass es sich bei der Probe auch im Zentrum kein ungestörter Bereich vorliegt, sondern dass der Randeinfluss durch den Randverbund sowie den Einbaurahmen sich auch noch im Zentrum, also an der Stelle, an der die Wärmeflussmessplatte eingebaut ist, auswirkt. Dennoch ist der lineare Anstieg des Wärmestroms mit der Temperaturdifferenz gut zu erkennen.

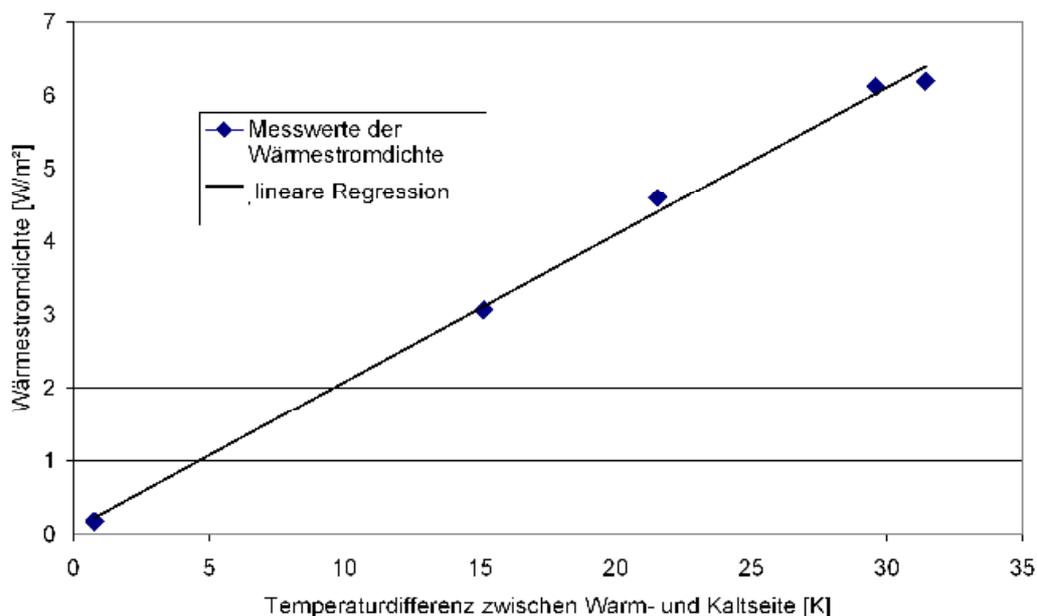


Abbildung 31: Messwerte und Regression der Wärmestromdichte in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz

Der nach der Temperaturdifferenz gewichtete Mittelwert (die Genauigkeit steigt mit der Temperaturdifferenz) des Wärmedurchgangs berechnet sich zu 0,205 W/(m²K)

Simulationsmodell

Gegenüber der Feld- und Labormessung bietet die Simulation einige Vorteile bei der bauphysikalischen Bewertung bestehender Wandaufbauten, insbesondere aber der Untersuchung geplanter Konstruktionen oder bei der Variantenuntersuchung und dem Vergleich unterschiedlicher Systeme bei verschiedenen Randbedingungen. Wesentliche Voraussetzung für die Zuverlässigkeit und Genauigkeit dieser Berechnungen ist allerdings die Kenntnis der thermischen und hygrischen Stoffeigenschaften der im Bauteil enthaltenen Materialien.

Für die gekoppelte thermisch/hygrische Simulation wurde das Programm DELPHIN (IBK Dresden) eingesetzt, die beigefügte Stoffdatenbank basiert weitgehend auf eigenen Labormessungen, welche jedoch entsprechend angepasst werden können.

Stoffeigenschaften und Randbedingungen

In der nachfolgenden Tabelle sind die wichtigsten thermischen und hygrischen Stoffeigenschaften der einzelnen Schichten des Probenkörpers aufgelistet.

Der konvektive Wärmeübergang an der Probe wird nach der Nusselt-Korrelation

$$Nu_L = 0,664 \sqrt{Re_L} \sqrt[3]{Pr}$$

berechnet. Demnach beträgt der konvektive Wärmeübergang auf der Warmseite (Luftgeschwindigkeit vor der Probe $w=0,36$ m/s) etwa 1,7 W/(m²K), auf der Kaltseite ($w=0,79$ m/s) etwa 2,45 W/(m²K).

Der Strahlungsaustausch zwischen dem Probenkörper und der Innenoberfläche der Prüfkammer, welche mit Edelstahl ausgelegt ist berechnet sich wie folgt (reflektierender Anteil aufgrund der geringen Emissivität der Kammeroberfläche nicht vernachlässigbar):

$$Q_{1,2} = \sigma \cdot A \cdot \frac{T_1^4 - T_2^4}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}$$

Der Strahlungswärmeübergang liegt dann je nach aktuellen Oberflächentemperaturen bei etwa 0,5 bis 0,6 W/(m²K). Bei Linearisierung des Strahlungswärmeübergangs kann der Gesamtwärmeübergang auf der Kaltseite mit etwa 2,9 W/(m²K), auf der Warmseite mit 2,2 W/(m²K) abgeschätzt werden, also im Vergleich zu normalen Wärmeübergängen an Außenwänden von Gebäuden deutlich geringer.

Der Feuchteübergang an der Oberfläche steht in direktem Zusammenhang mit dem Wärmeübergangskoeffizienten und damit von der Luftgeschwindigkeit am Probenkörper. Die Wasserdampfstromdichte beträgt

$$g_v = \beta_p \Delta p, \text{ wobei}$$

$$\beta_p = 7 \cdot 10^{-9} \alpha_k, \quad \beta_p \text{ in kg/(m}^2\text{sPa), } \alpha_k \text{ in W/(m}^2\text{K).}$$

Für die Warmseite beträgt β_p damit $1,16 \cdot 10^{-9}$ kg/(m²sPa), auf der Kaltseite $1,72 \cdot 10^{-9}$ kg/(m²sPa).

	Wasserdampf-Diffusions-widerstandszahl	Schicht-dicke	Äquivalente Luftschicht-dicke	Wasser-aufnahme-koeffizient	Wärmeleit-fähigkeit	Rohdichte	Porosi-tät
	μ	s	s_d	w	λ	ρ	θ_{por}
	[-]	[m]	[m]	[kg/(m ² h ^{0,5})]	[W/(mK)]	[kg/m ³]	[m ³ /m ³]
Außenrand-bedingung	Messwerte Lufttemperatur und relative Luftfeuchte aus Laborversuch, Wärme- und Feuchteübergang aus Zusatzexperimenten, Schlagregensimulation durch Sprühbefeuchtung mit 0,2123 l/m ² am 27.7.07 15:12						
Beton	100	0,050	5	0,846	2,7	22100	16 Vol%
Ausgleichs-schicht	12	0,02	0,24	6	0,87	1700	0,32
VIP-Element	\hat{U}	0,05	\hat{U}	0	0,005036	-	-
Innenrand-bedingung	Messwerte Lufttemperatur und relative Luftfeuchte aus Laborversuch, Wärme- und Feuchteübergang aus Zusatzexperimenten						

Wärmebrückeneffekt am Probenrand

Wie bereits die Infrarotthermographie gezeigt hat, können die wärmebrückenbedingten Querwärmeströme bei der in Abschnitt 2.3.2 dokumentierten Einbausituation nicht vernachlässigt werden. Dies liegt einerseits am Einbaurahmen, andererseits an der Bitumendichtbeschichtung sowie dem eigentlichen VIP-Randverbund. Gegenüber dem Wärmestrom im ungestörten Probenkörper im Zentrum der Probe, kommen zusätzliche Wärmeströme über den Rand der Probe hinzu. Die Simulationsrechnungen müssen daher die Wärmebrückeneffekte mit berücksichtigen also mindestens als zweidimensionales Modell (unter Vernachlässigung der Eckeffekte) aufgebaut werden.

Simulationsergebnisse

In nachfolgendem Diagramm sind die in der Mitte der Betonplatte sowie in der Mitte der Ausgleichsschicht gemessenen und berechneten Temperaturverläufe dargestellt. Die Abweichungen erklären sich einerseits aus Abweichungen in den Annahmen der Wärmeleitfähigkeiten der Werkstoffe, andererseits aus der bereits erwähnten Vernachlässigung der Eckeffekte.

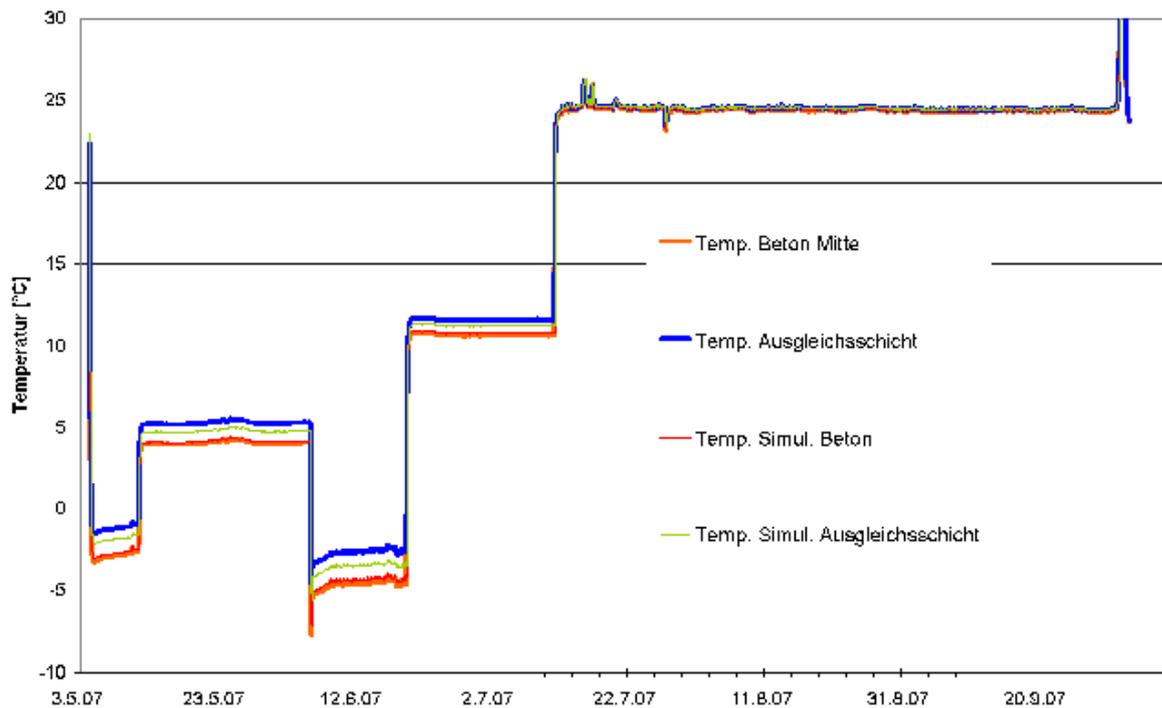


Abbildung 32: Vergleich der gemessenen und berechneten Temperaturverläufe im Beton und in der Ausgleichsschicht

Deutlich komplexer als die reine thermische Simulation ist die gekoppelte hygri-sche Simulation, zum Vergleich sollte daher die Übereinstimmung der Simulation anhand der gemessenen Verläufe der relativen Feuchte im Beton und in der Ausgleichsschicht überprüft werden. Nicht genau definiert ist hierbei allerdings die Anfangsrandbedingung, weil der genaue Wassergehalt der Proben-schichten vor Versuchsbeginn nicht bestimmt werden konnte. Die Übereinstimmung ist bei der Betonschicht besser als bei der Ausgleichsschicht, die Abweichungen liegen aber in beiden Fällen unter 10 % r.F. Die Auf-feuchtung durch den Schlagregenversuch konnte wie in Abbildung 33 erkennbar gut abgebildet werden, in Abbildung 34 führt sie nicht mehr zu einem lokalen Maximum des zeitlichen Feuchteverlaufs sondern zu einer Verzögerung des langfristigen Trocknungsprozesses.

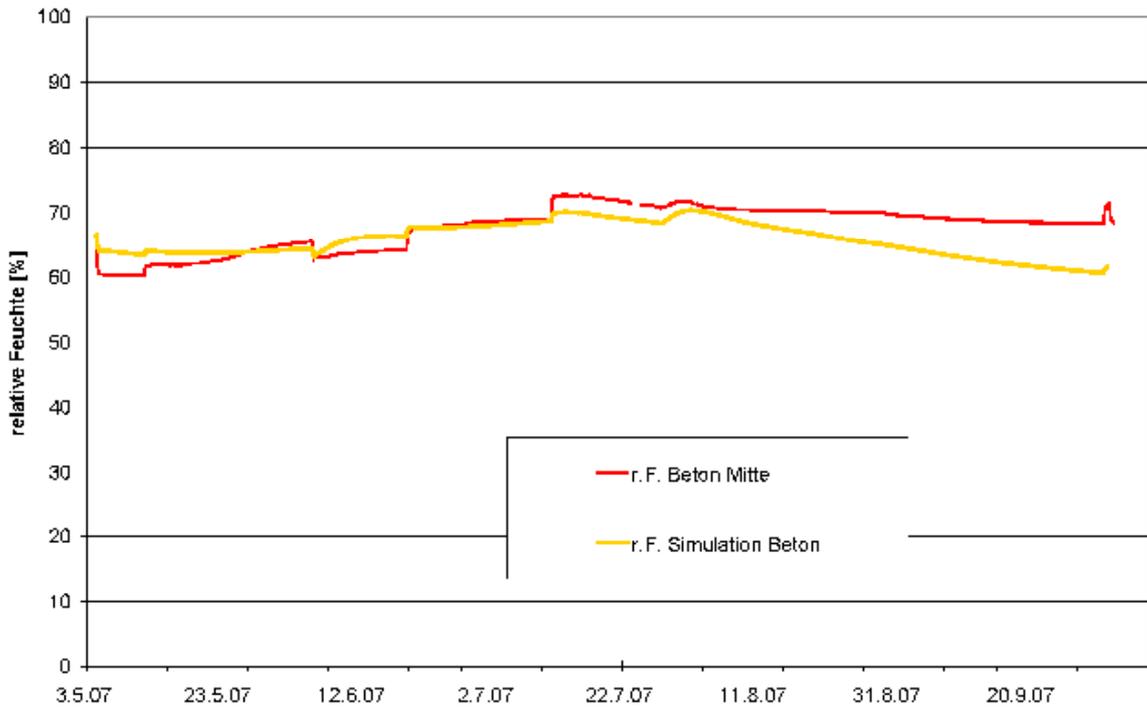


Abbildung 33: Vergleich der gemessenen und berechneten Verläufe der relativen Feuchte (Aw-Wert) im Beton

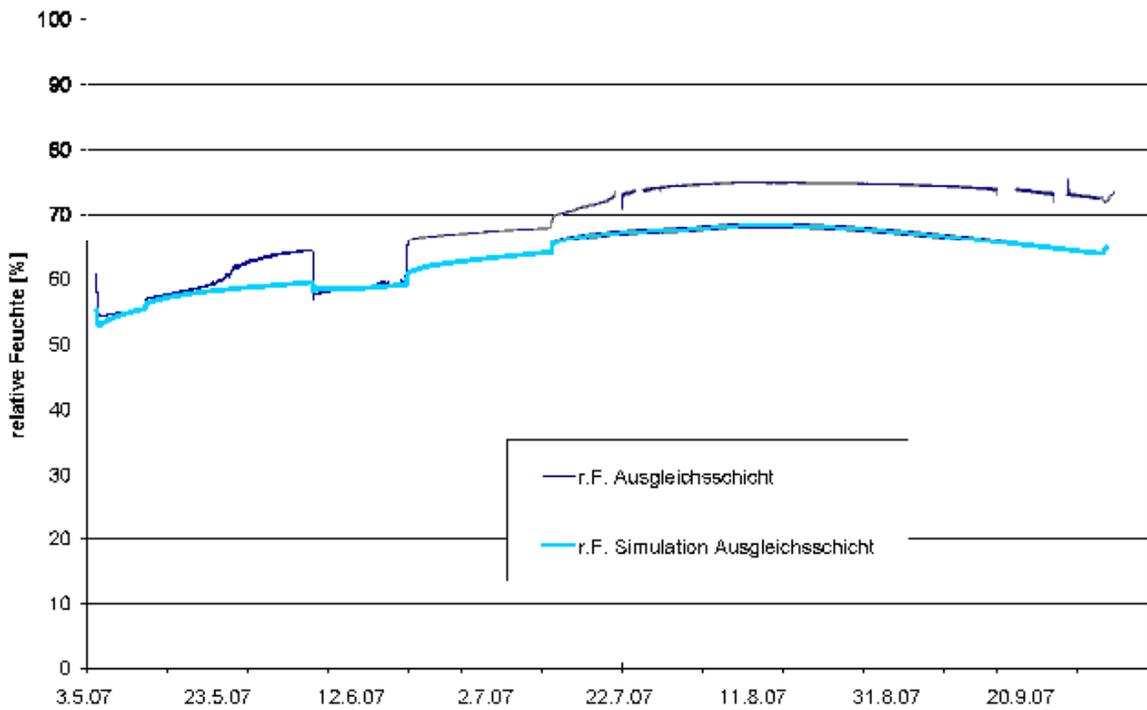


Abbildung 34: Vergleich der gemessenen und berechneten Verläufe der relativen Feuchte (Aw-Wert) in der Ausgleichsschicht

Fazit

Mit Hilfe der gekoppelten thermisch/hygrischen Simulation konnte sowohl der Verlauf der Temperaturen und Wärmeströme als auch des Aw-Wertes im Schichtaufbau des Probenkörpers berechnet werden. Die Übereinstimmung ist, mit einigen Ausnahmen, insbesondere in Bereichen mit niedrigen Temperaturen zufrieden stellend. Auch die Auswirkungen bei auftreffendem Schlagregen (im Laborversuch durch definierte Sprühbefeuchtung simuliert) werden durch das Simulationsmodell realitätsnah wiedergegeben.

Teil C Konstruktionsdetails nach Baualtersklassen

Im Rahmen des Forschungsvorhabens erfolgte eine systematische Aufstellung von relevanten Details für den Einsatz von Vakuum-Innendämmung. Dazu wurden charakteristische Konstruktionen in Abhängigkeit von verschiedenen Baualtersstufen untersucht. Vielfältig einsetzbare Details wurden festgelegt und die dazu gehörigen Detailzeichnungen erstellt.

Da jedes Sanierungsvorhaben individuelle Konstruktionen und Sanierungslösungen fordert, kann dies nur eine schematische Darstellung von ausgewählten, oft vorkommenden Lösungen sein. Anhand dieser Auswahl konnte im Projekt Schwerpunktsetzungen erfolgen und die Machbarkeit von Vakuum-Innendämmung zunächst überschlägig überprüft werden.

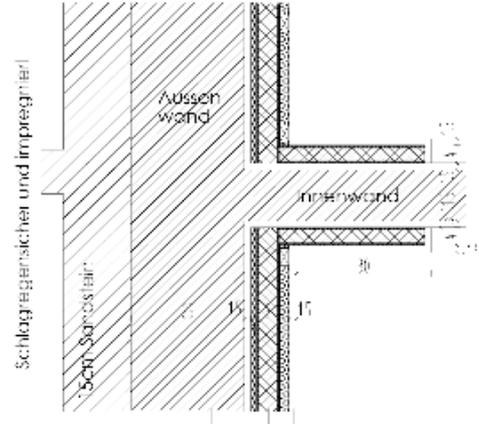
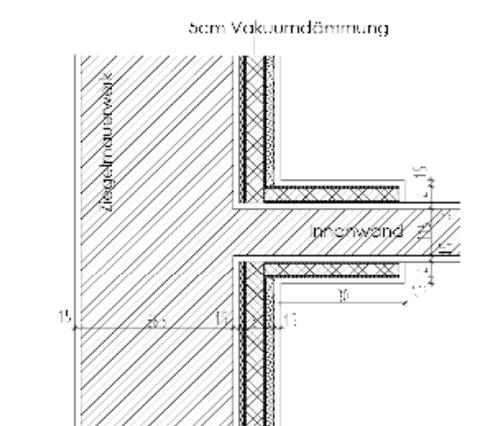
Zum Erreichen konkreter Ergebnisse wurden einerseits die Labormessungen durchgeführt und an einzelnen In-Situ-Situationen Messwerte generiert. Darüber hinaus wurden für eine Auswahl von Details Wärmebrückenberechnungen durchgeführt (siehe Teil D des Abschlussberichts), anhand derer Aussagen zur Machbarkeit möglich sind und Hinweise für die Konstruktionsdetails ermittelt werden konnten.

Im Folgenden werden die Details jeweils mit einer Kurzbeschreibung zusammengestellt.

Detailaufbauten von 1870-1920

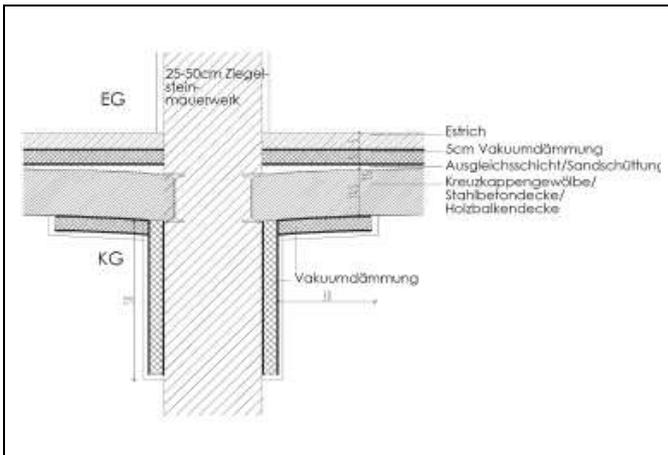
Im Zeitfenster ab den siebziger Jahren des vorletzten Jahrhunderts wurden hochwertige Wohngebäude mit typischen Konstruktionsmerkmalen erstellt. Ein wesentliches Kennzeichen liegt darüber hinaus in den oftmals reich verzierten Straßenfassaden mit Naturstein- oder Backsteinmaterialien. Auf Grund dessen sind diese Fassaden durchweg nur mittels Innendämmung angemessen zu sanieren.

Konstruktiv problematisch sind sowohl aus bauphysikalischer Sicht als auch aus Schall- und Brandschutzgründen dabei oftmals die Holzbalkendecken. Die Anschlüsse erfordern eine hohe Detailgenauigkeit und eine differenzierte bauphysikalische Untersuchung.

 <p>Schlagregensicherer und imprägnierter 10cm Naturstein</p> <p>Außenwand</p> <p>Innenwand</p> <p>25cm Ziegelmauerwerk 1cm Zellulose Dämmung Vakuumdämmung 2cm Dämmung/2x4cm Lattung 1,5cm Gipskartonbeplankung</p>	<p>1870-1920 Außenwand – Innenwand</p> <p>Zur Wärmebrückenreduzierung muss bei einbindenden Innenwänden eine flankierende Dämmung angebracht werden, die wie dargestellt rechteckig oder auch konisch auslaufend gestaltet sein kann. Wichtig ist der Schlagregenschutz für die Natursteinfassade, um eine sichere Konstruktion für Innendämmung zu gewährleisten.</p>
 <p>5cm Vakuumdämmung</p> <p>Ziegelmauerwerk</p> <p>Innenwand</p> <p>36,5 Ziegelmauerwerk 1cm Zellulose Dämmung 5cm Vakuumdämmung 2cm Dämmung/2x4cm Lattung 1,5cm Gipskartonbeplankung</p>	<p>1870-1945 Außenwand aus Ziegelmauerwerk (verputzt) mit Innenwandanschluss</p> <p>Variante zum vorhergehenden Detail mit einer verputzten Innenwand.</p>

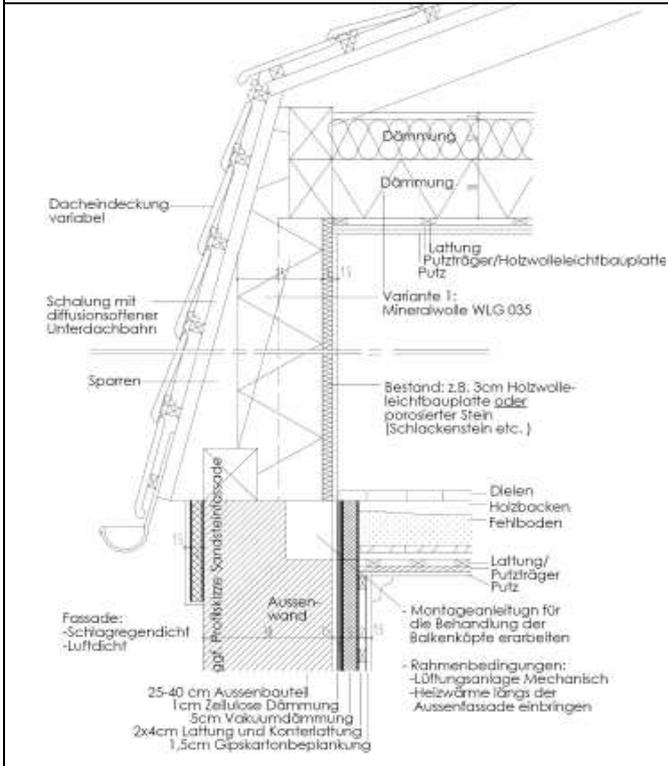
<p>Fassade: -Schlagregendicht -Luftdicht</p> <p>1,5cm Glasfaserbeplankung 2x4cm Lattung und Konterlattung Vakuumdämmung 1cm Zellulose Dämmung 30-50cm Ziegelsteinfassade</p> <p>kgf. mit Fassaden- verleimungsmerkmalen Verleimungsmerkmalen</p> <p>Außen- wand</p> <p>FG</p> <p>Dielen Sandschüttung</p> <p>Kreuzkopfgewölbe/ Stahlbetondecke/ Holzbalkendecke</p> <p>Vakuumdämmung</p> <p>KG</p> <p>Steinplatte im 3% im Gefälle</p> <p>Perimeter- dämmung</p>	<p>1870-1920</p> <p>Sockelbereich der Außenwand zur Kellerdecke (Kappendecke)</p> <p>Wenn der Oberboden im Erdgeschoss nicht geöffnet werden kann, entsteht eine Wärmebrückensituation im Sockelbereich (vgl. Folgedetail)</p>
<p>Fassade: -Schlagregendicht -Luftdicht</p> <p>1,5cm Glasfaserbeplankung 2x4cm Lattung und Konterlattung Vakuumdämmung 1cm Zellulose Dämmung 30-50cm Ziegelsteinfassade</p> <p>kgf. mit Fassaden- verleimungsmerkmalen Verleimungsmerkmalen</p> <p>Außen- wand</p> <p>FG</p> <p>Leinwand</p> <p>Vakuumdämmung Ausgleichsschicht/Sandschüttung</p> <p>Kreuzkopfgewölbe/ Stahlbetondecke/ Holzbalkendecke</p> <p>KG</p> <p>Steinplatte im 3% im Gefälle</p> <p>Perimeter- dämmung</p>	<p>1870-1920</p> <p>Sockelbereich der Außenwand zur Kellerdecke (Kappendecke)</p> <p>Entgegen der Darstellung im vorhergehenden Detail ist es empfehlenswert, zusätzlich unterhalb des Oberbodens eine Dämmschürze von der Wand ca. 30 bis 50 cm in den Raum zu verlegen, um die Wärmebrückensituation zu verbessern</p>
<p>1,5cm Glasfaserbeplankung 2x4cm Lattung und Konterlattung 5cm Vakuumdämmung 1cm Zellulose Dämmung 30-50cm Ziegelsteinfassade</p> <p>Fassade: -Schlagregendicht -Luftdicht</p> <p>Außen- wand</p> <p>EG</p> <p>Trittschalldämmung Estrich</p> <p>Betonplatten</p> <p>Stahlbetonrippe</p> <p>Vakuumdämmung</p> <p>KG</p> <p>Steinplatte im 3% im Gefälle</p> <p>Perimeter- dämmung</p> <p>SCHNITT A-A</p>	<p>1870-1945</p> <p>Sockelbereich der Außenwand zur Kellerdecke (Rippendecke)</p> <p>Eine Alternativkonstruktion zum vorgehenden Detail, die bei zahlreichen Gebäuden auch bis 1945 und z. T. darüber hinaus weiter angewandt wurde</p>

	<p>1870-1920 Außenwand-Geschossdecke</p> <p>Eine detaillierte bauphysikalische Begleitung ist besonders für diesen Detailpunkt erforderlich. Der Balkenkopf muss luftdicht angeschlossen werden und es muss zusätzlich das Diffusionsverhalten überprüft werden.</p>
	<p>1870-1920 Außenwand – Oberste Decke unausgebautes Dachgeschoss</p> <p>Der Anschluss zur Decke über dem obersten Vollgeschoss kann in dieser Situation problemlos erstellt werden. Bleibt der Fehlboden erhalten, sollte eine Dämmung oberhalb der Decke ausgeführt werden. In dem Fall muss ggf. das VIP-Gesims erstellt werden, um Wärmebrückenreduzierung zu erhalten</p>
	<p>1870-1920 Kellerdecke – Innenwand (Dämmung unterhalb der Kellerdecke)</p> <p>Innenwände vom unbeheizten Keller zum Erdgeschoss bilden immer eine hohe Wärmebrücke. Eine flankierende Dämmung an den oberen 30 bis 50 cm der Kellergeschosswände vermindert diesen Effekt. Es muss überprüft werden, welchen Zusatzeffekt VIP-Dämmung in diesem Bereich gegenüber Standarddämmstoffen bietet.</p>



1870-1920
 Kellerdecke – Innenwand (Dämmung oberhalb der Kellerdecke)

Eine flankierende Dämmung an den oberen 30 bis 50 cm der Kellergeschosswände und an den angrenzenden Decken vermindert die Wärmebrückeneffekte.



1870-1920
 Mansarde zur obersten Dachgeschossdecke

Konventionell gedämmtes Mansardgeschoss mit Anschluss an die VIP-Innendämmung im Regelgeschoss

	<p>1870-1920 Mansarde zur obersten Dachgeschossdecke</p> <p>VIP-gedämmtes Mansardgeschoss mit Anschluss an die VIP-Innendämmung im Regelgeschoss. Das Problem liegt in der Zugänglichkeit der Konstruktion, um einen lückenlosen Anschluss der VIP-Dämmung zu erhalten. Es ist eine Mischung aus VIP-Dämmung in den räumlich begrenzten Bereichen mit Standarddämmung z. B. im unteren Mansardbereich vorstellbar.</p>
	<p>1870-1920 Oberste Decke-Innenwand</p> <p>Flankierende Dämmung der Wärmebrücke an den Wandübergängen. Es ist ebenso möglich, die Dämmung nach oben zum unbeheizten Dachboden hochzuziehen</p>

Detailaufbauten von 1920-1945

Die Gründerzeit-Konstruktionen erfuhren in den Jahren ab 1920 eine deutliche Änderung. Beim Mauerwerk wurde vornehmlich Ziegelmauerwerk eingesetzt in Verbindung mit Außenputz. Bei den Decken wurde zunehmend von den Holzkonstruktionen zu massiven Deckenvarianten gewechselt. Beim Geschosswohnungsbau traten diese Entwicklungen früher ein als bei Einfamilienhäusern. Insofern ist eine deutliche zeitliche Zuordnung bei diesen Baujahren schwierig zu treffen.

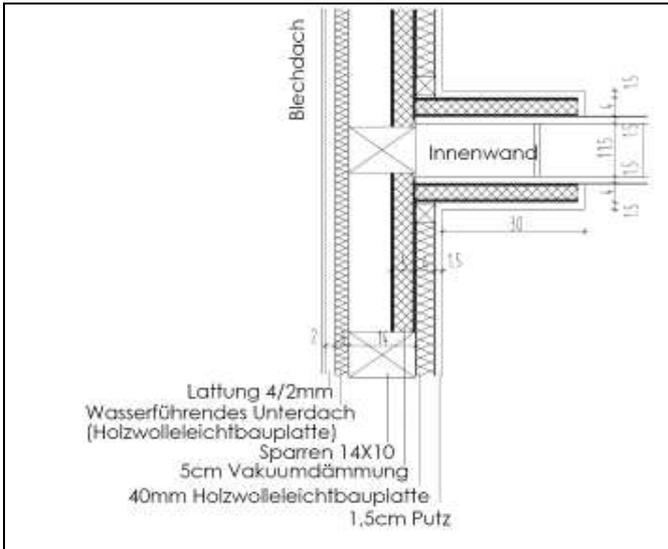
Bei diesen Jahrgängen sollte überprüft werden, ob eine Dämmung im Wandbereich auch außen aufgebracht werden kann, da dies bauphysikalisch und kostenmäßig günstiger ist.

<p>36,5 Ziegelmauerwerk 1cm Zellulose Dämmung 5cm Vakuumdämmung 2cm Dämmung/2x4cm Lattung 1,5cm Gipskartonbeplankung</p>	<p>1920-1945 Außenwand aus Ziegelmauerwerk (verputzt) mit Innenwandanschluss</p> <p>Charakteristisches Detail für Außenwände mit verputztem Ziegelmauerwerk in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts. Innendämmung ist meist problemlos möglich. Es kann allerdings überprüft werden, inwieweit ggf. gestalterische Lösungen auch bei leicht verzierten Fassaden mit einer außenliegenden Dämmung zu erzielen sind.</p>
<p>Variante 2 Variante 3</p> <p>30cm Aussenbauteil 1cm Zellulose Dämmung 5cm Vakuumdämmung 2cm Dämmung/2x4cm Lattung 1,5cm Gipskartonbeplankung</p>	<p>1945-1960 Außenwand mit Innenwandanschluss</p> <p>Detailalternativen</p>
<p>1,5cm Gipskartonbeplankung 2x4cm Lattung und Konterlattung 5cm Vakuumdämmung 1cm Zellulose Dämmung 30-50cm Ziegelsteinfassade</p> <p>Fassade: Schlagregendicht-Luftdicht</p> <p>Steinplatte im 3% im Gefälle</p> <p>Perimeterdämmung</p> <p>Außenwand</p> <p>EG</p> <p>Dielen Sandschüttung</p> <p>Kreuzkappengewölbe/ Stahlbetondecke/ Holzbalkendecke</p> <p>5cm Vakuumdämmung</p> <p>KG</p>	<p>1920-1945 Sockelbereich der Außenwand zur Kellerdecke (Kappendecke)</p> <p>Wie bei den Details der Gründerzeitgebäude entsteht eine Wärmebrückensituation, wenn der Oberboden im Erdgeschoss nicht geöffnet werden kann. Zu empfehlen ist eine ca. 30 bis 50 cm breite dünne Dämmlage, die von der Wand unter dem Oberboden in den Raum hineingeführt wird.</p>

<p>1,5cm Gipskartonbeplankung 2x4cm Lattung und Konterlattung 5cm Vakuumdämmung 1cm Zellulose Dämmung 30-50cm Ziegelsteinfassade</p>	<p>1920-1945 Außenwand – Geschossdecke als Trägerdecke</p> <p>Es sollte Wärmebrückentechnisch geklärt werden, inwieweit unterhalb und oberhalb der Decke ein ca. 30 – 50 cm breiter Dämmstreifen eingebracht werden kann. Oberhalb kann die Dämmung unter dem Estrich liegen, unterhalb kann ein gestalterisch stimmiges Element entweder als bewusst sichtbares Rechteckprofil, als konisch zulaufende Dämmung oder aber in Verbindung mit einer Gardinen- oder Beleuchtungsleiste ausgeführt werden</p>
<p>1,5cm Gipskartonbeplankung 2x4cm Lattung und Konterlattung 5cm Vakuumdämmung 1cm Zellulose Dämmung 30-50cm Ziegelsteinfassade</p>	<p>1920-1945 Außenwand mit Verblendern oder Sichtmauerwerk - Anschluss zur Geschossdecke</p> <p>Siehe Vordetail; zu beachten ist bei Sichtmauerwerk darüber hinaus die sichere Schlagregenausführung</p>
<p>1,5cm Gipskartonbeplankung 2x4cm Lattung und Konterlattung 5cm Vakuumdämmung 1cm Zellulose Dämmung 30-50cm Ziegelsteinfassade</p>	<p>1920-1945 Außenwand mit Verblendern oder Sichtmauerwerk - Anschluss zur Kellerdecke als Kappendecke</p> <p>Sinnvoll ist die Ausführung einer Dämmschürze unter dem Estrich bzw. Oberboden zur Verringerung des Wärmebrückeneffekts</p>

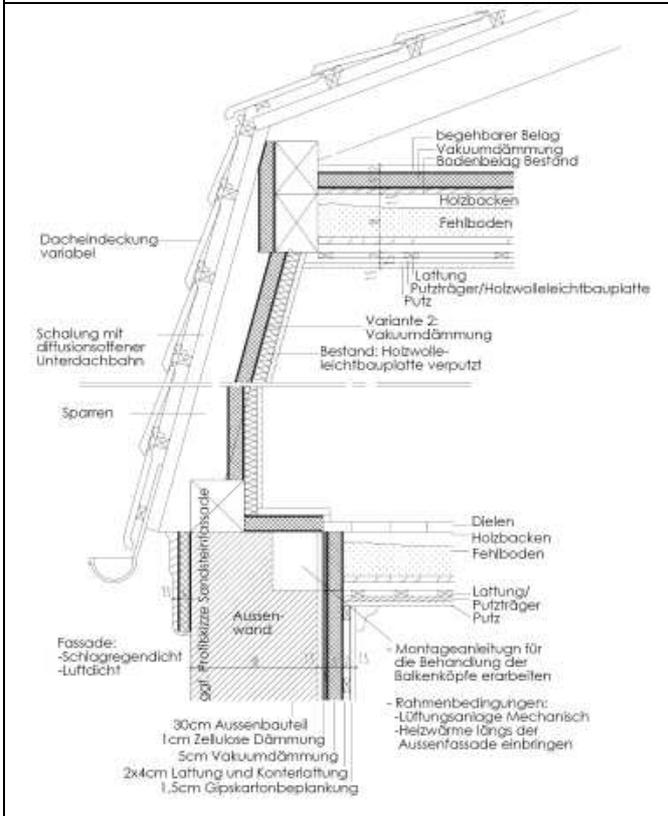
<p>1,5cm Gipskartonbeplankung 2x4cm Lattung und Konterlattung 5cm Vakuumdämmung 1cm Zellulose Dämmung 30-50cm Ziegelsteinfassade</p>	<p>1920-1945 Außenwand mit Verputz oder Sichtmauerwerk - Anschluss zur Kellerdecke als Holzbalkendecke</p> <p>Besonders bei Einfamilienhäusern ist dieses Detail häufig anzutreffen. Eine detaillierte bauphysikalische Begleitung ist für diesen Detailpunkt erforderlich, damit der Balkenkopf luftdicht angeschlossen werden kann. Zusätzlich muss zusätzlich das Diffusionsverhalten überprüft werden.</p>
<p>1,5cm Gipskartonbeplankung 2x4cm Lattung und Konterlattung 5cm Vakuumdämmung 1cm Zellulose Dämmung 30-50cm Ziegelsteinfassade</p>	<p>1920-1945 Außenwand mit Backstein oder Sichtmauerwerk - Anschluss zur Kellerdecke als Holzbalkendecke</p> <p>Zusätzlich zu den Hinweisen beim Vordetail muss die Schlagregensituation beachtet und die Feuchteisolierung des aufgehenden Mauerwerks genau beachtet werden.</p>
<p>1,5cm Gipskartonbeplankung 2x4cm Lattung und Konterlattung 5cm Vakuumdämmung 1cm Zellulose Dämmung 30-50cm Ziegelsteinfassade</p>	<p>1920-1945 Außenwand mit Verputz oder Sichtmauerwerk - Anschluss zur Kellerdecke als Trägerdecke (Rippen)</p>

	<p>1920-1945 Außenwand (Verputzt) – Oberste Decke Unausgebautes Dachgeschoss</p> <p>Der Anschluss zur Decke über dem obersten Vollgeschoss kann in dieser Situation problemlos erstellt werden. Bleibt der Fehlboden erhalten, sollte eine Dämmung oberhalb der Decke ausgeführt werden. Das VIP-Gesims ist nur optional dargestellt.</p>
	<p>1920-1945 Außenwand mit Sichtmauerwerk bzw. Backstein – Oberste Decke als Holzbalkendecke Unausgebautes Dachgeschoss</p> <p>Vorgehen wie beim Vordetail</p>
	<p>1920-1945 Kellerdecke-Innenwand</p> <p>Bei Dämmung oberhalb der Decke kann der Wärmebrückeneffekt durch Dämmschürzen an den Wänden und Decken im Keller reduziert werden.</p>



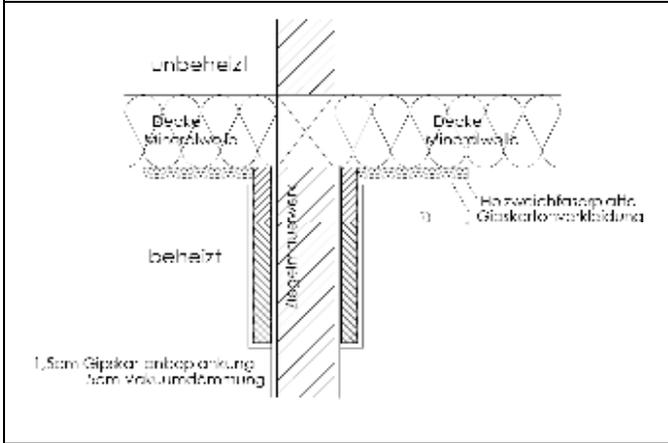
1920-1945
Mansarddach mit
Innenwandanschluss

Bei einem Anschluss an eine Holzkonstruktion z. B. im Mansardbereich kann mit flankierender Dämmung am einbindenden Bauteil gearbeitet werden oder besser mit einer durchgehenden Dämmung in der Wandebene



1920-1945
Mansarde und oberste
Geschossdecke

Der Anschluss von der VIP-Innendämmung der Außenwand zum Mansardgeschoss kann ab DG-Ebene konventionell erfolgen oder wie dargestellt mit VIP-Elementen, was allerdings einen hohen Aufwand bedeutet



1920-1945
Oberste Decke-Innenwand

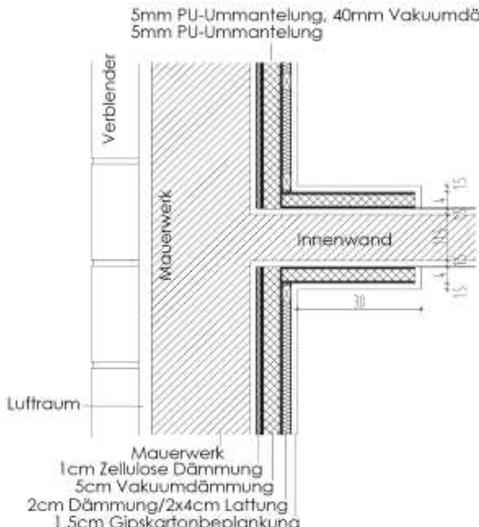
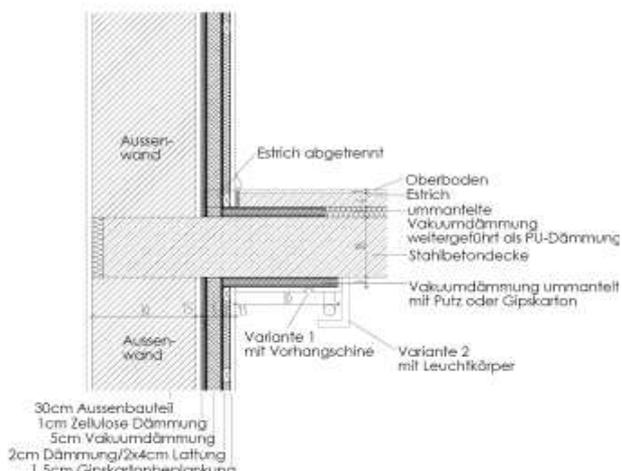
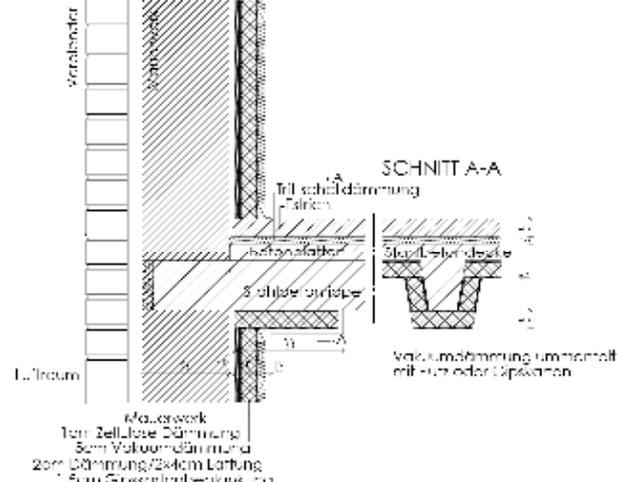
Die flankierende Dämmung zur Wärmebrückenreduktion kann unterhalb wie dargestellt oder oberhalb der obersten Geschossfläche zum kalten Raum hin erfolgen

Detailaufbauten 1945-1960

Die klassischen fünfziger- und sechziger Jahre Bauten bieten sich an, mit außenliegender Dämmung ausgeführt zu werden. Wenn dies aus Gründen des Denkmalschutzes, der Gestaltung, der Konstruktion oder des Nachbarschaftsrechts nicht möglich ist, können im Allgemeinen bauphysikalisch sinnvolle Lösungen mit Vakuum-Innendämmung erstellt werden. Dabei müssen – wie bei allen anderen Baualterstufen – die Wärmebrücken durch optimierte Detailplanung möglichst weitgehend reduziert werden.

<p>1,5cm Gipskartonbeplankung 2cm Dämmung/2x4cm Lattung 5cm Vakuumdämmung 1cm Zellulose Dämmung 30cm Aussenbauteil</p> <p>EG</p> <p>Aussenwand</p> <p>Oberboden Estrich 5mm PU-Ummantelung 40mm Vakuumdämmung 5mm PU-Ummantelung Stahlbeton</p> <p>KG</p> <p>Aussenwand</p>	<p>1945-1960 Sockel KG/EG Verputzte Außenwand – Stahlbeton-Kellerdecke, Dämmung oberhalb Variante 1</p> <p>Dämmung oberhalb der Decke ergibt in Verbindung mit Innendämmung die wärmetechnisch günstigste Situation</p>
<p>1,5cm Gipskartonbeplankung 2cm Dämmung/2x4cm Lattung 5cm Vakuumdämmung 1cm Zellulose Dämmung 30cm Aussenbauteil</p> <p>EG</p> <p>Aussenwand</p> <p>Halbboden Schlüßelung aus Schwachstärkedielen Stahlbetondecke</p> <p>KG</p> <p>Aussenwand</p> <p>5mm PU-Ummantelung 40mm Vakuumdämmung 5mm PU-Ummantelung Gipsputz</p>	<p>1945-1960 Sockel KG/EG Verputzte Außenwand – Stahlbeton-Kellerdecke, Dämmung unterhalb Variante 2</p> <p>Bei Dämmung unterhalb der Decke ergibt sich eine relativ große Wärmebrücke über die Kellerdecke. In diesem Fall sollte eine Dämmschürze unterhalb des Estrichs mit einer Breite von 30 – 50 cm ausgeführt werden</p>

	<p>1945-1960 Sockel KG/EG Verputzte Außenwand – Stahlbeton-Kellerdecke, Dämmung unterhalb Variante 3</p> <p>Dämmung unterhalb des Estrichs (zusätzlich zum vorherigen Detail) verbessert die Wärmbrückensituation deutlich</p>
	<p>1945-1960 Sockel KG/EG Außenwand mit Verblender – Stahlbeton-Kellerdecke, Dämmung oberhalb Variante 4</p> <p>Wärmebrückentechnisch günstige Situation bei Innendämmung; bei ggf. möglicher zusätzlicher Dämmung des Zwischenraums zwischen Verblender und Mauerwerk verbessert sich die Situation nochmals</p>
	<p>1945-1960 Außenwand (verputzt) mit Innenwandanschluss</p> <p>Dämmschürze ca. 30 bis 50 cm am Innenwandanschluss anbringen, gestalterisch wie dargestellt als Recheckprofil oder in anderer angepasster Form, z. B. konisch zulaufend; im Zuge der Wärmebrückenberechnung abprüfen, ob Vakuumdämmung oder Standarddämmung für diese Bereiche verwandt werden können. Ein Vakuumpaneel könnte mit minimalem Schichtaufbau erstellt werden, sodass ggf. ein fast flächenbündiger Anschluss zur Innenwand erstellt werden kann.</p>

 <p>5mm PU-Ummantelung, 40mm Vakuumdämmung, 5mm PU-Ummantelung</p> <p>Verblender</p> <p>Mauerwerk</p> <p>Innenwand</p> <p>Luftraum</p> <p>Mauerwerk 1cm Zellulose Dämmung 5cm Vakuumdämmung 2cm Dämmung/2x4cm Lattung 1,5cm Gipskartonbeplankung</p>	<p>1945-1960 Außenwand (Verblendmauerwerk) mit Innenwandanschluss</p> <p>Wie vor</p>
 <p>Außenwand</p> <p>Estrich abgetrennt</p> <p>Oberboden Estrich ummantelte Vakuumdämmung weitergeführt als PU-Dämmung</p> <p>Stahlbetondecke</p> <p>Vakuumdämmung ummantelt mit Putz oder Gipskarton</p> <p>Außenwand</p> <p>Variante 1 mit Vorhangschiene</p> <p>Variante 2 mit Leuchtkörper</p> <p>30cm Außenbauteil 1cm Zellulose Dämmung 5cm Vakuumdämmung 2cm Dämmung/2x4cm Lattung 1,5cm Gipskartonbeplankung</p>	<p>1945-1960 Außenwand (verputzt) – Geschosdecke</p> <p>Dämmschürze über der Decke unterhalb des Estrichs und unterhalb der Decke als sichtbares Rechteck, als konischer Dämmstreifen, als Vakuumpaneel im Bereich des Deckenputzes (Brandschutz beachten) oder als gestalterisches Element wie Lichtleiste oder Vorhangschiene</p>
 <p>Verblender</p> <p>Verblender</p> <p>SCHNITT A-A</p> <p>Trilscheibendämmung</p> <p>Trilscheibendämmung</p> <p>Stahlbetondecke</p> <p>Stahlbetondecke</p> <p>Vakuumdämmung ummantelt mit Putz oder Gipskarton</p> <p>Luftraum</p> <p>Mauerwerk 1cm Zellulose Dämmung 5cm Vakuumdämmung 2cm Dämmung/2x4cm Lattung 1,5cm Gipskartonbeplankung</p>	<p>1945-1960 Außenwand-Geschosdecke Rippendecke und Verblender</p> <p>Wie vor</p>

	<p>1945-1960 Kellerdecke-Innenwand KG/EG Variante: VIP unter Decke</p> <p>Dämmung der Kellerdecke mit VIP-Dämmung (bei niedrigen Kellerräumen als Problemlösung möglich); Anschluss der Innenwände mit einer Dämmschürze</p>
	<p>1945-1960 Kellerdecke-Innenwand KG/EG Variante: VIP über Decke</p> <p>Wärmebrückenreduktion bei Dämmung oberhalb der Kellerdecke mittels Dämmschürzen am oberen Bereich der Wände und seitlich unter der Decke verlaufend</p>
	<p>1945-1960 oberste Decke-Innenwand</p> <p>Ungestörte Wärmebrückensituation bei einer nicht durchgehenden Innenwand zur obersten Geschossdecke bei durchgehender Dämmung oberhalb der Decke</p>

	<p>1945-1960 oberste Decke-Innenwand</p> <p>Setzt sich die Innenwand oberhalb der obersten Geschossdecke zum unbeheizten Bereich fort, so muss eine flankierende Dämmung erstellt werden in Abhängigkeit vom Lambda-Wert des Mauerwerks 40 bis 80 cm</p>
	<p>1945-1960 Traufe ausgebautes Dach</p> <p>Der Schwachpunkt ist der Wärmeübergang von der ungedämmten Außenwand zum beheizten Dachgeschoss: im Detail wird sowohl ein VIP-Gesims dargestellt als auch eine Dämmschürze im äußeren Bereich oberhalb und unterhalb der obersten Geschossdecke</p>
	<p>1945-1960 Traufe ausgebautes Dach</p> <p>Variante zum vorhergehenden Detail mit konventioneller Dämmung ohne Dämmung in Form eines Außengesimses (wärmebrückentechnisch ungünstiger aber kostengünstiger)</p>

<p>5mm PU-Ummantelung, 40mm Vakuumdämmung, 5mm PU-Ummantelung</p>	<p>1945-1960 Traufe ausgebautes Dach</p> <p>Variante zum vorhergehenden Detail mit Verblendmauerwerk. Wird der Luftzwischenraum zwischen Verblender und Mauerwerk gedämmt, verbessert sich die Situation nochmals</p>
<p>5mm PU-Ummantelung, 40mm Vakuumdämmung, 5mm PU-Ummantelung</p>	<p>1945-1960 Traufe unausgebautes Dachgeschoss</p> <p>Dachbodendämmung mit VIP-Dämmung ist nur erforderlich, wenn dort Nutzungen vorgesehen sind, welche nur eine geringe Aufbauhöhe erlauben</p>
<p>5mm PU-Ummantelung, 40mm Vakuumdämmung, 5mm PU-Ummantelung</p>	<p>1945-1960 Traufe unausgebautes Dachgeschoss</p> <p>Dämmung oberhalb der Geschossdecke mit konventioneller Dämmung; die VIP-Dämmung im Gesimsbereich verbessert die Wärmebrückensituation (bei Schadensfällen ist in diesen Situationen eine Gesimsdämmung bisweilen ein nachträglicher Problemlöser)</p>

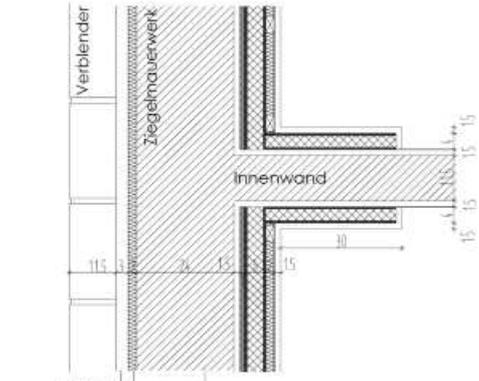
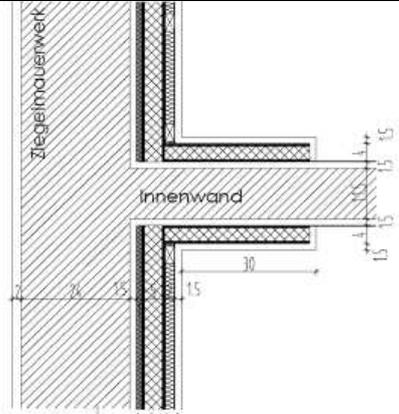
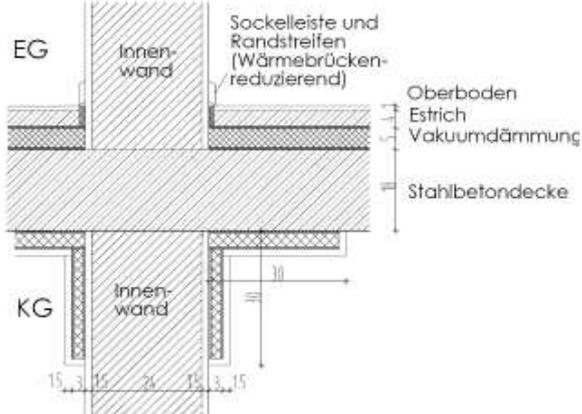
Detailaufbauten 1960-1972

Seit 1960 wurde für die Außenwände im süddeutschen Bereich zunehmend Mauerwerk aus Hochlochziegeln eingesetzt. Die Einschaligkeit war zunächst noch die Regel, erst

einzelne Gebäude wurden während dieser Zeit mit Wärmedämmverbundsystem hergestellt. Die Decken sind durchweg als Stahlbetondecken ausgeführt. Trägerdecken wurden sind bei diesen Baujahren nur noch selten anzutreffen. Durchweg ist es möglich, die Gebäude mit Außendämmung zu versehen. Selten gibt es begründete Aspekte aus Denkmalschutzerwägungen für ein Belassen der Außenfläche in der ursprünglichen Form. Sie müssen abgewogen werden mit den daraus resultierenden bauphysikalischen und kostenmäßigen Einschränkungen. Anders ist die Situation in den nördlichen Gebieten des Bundesgebietes, wo vor allem Klinkerfassaden ausgeführt wurden. Dort ist aus denkmalschützerischer Sicht weiter gehend zu differenzieren, welche Art von energetischer Ertüchtigung für das Gebäude angemessen ist. Dabei kann es in einer größeren Zahl von Fällen angemessen sein, Innendämmung anzuwenden. Weiterhin ist sie in Sondersituationen erforderlich wie z. B. bei der fehlenden Möglichkeit zur Grenzüberbauung.

<p>1,5cm Gipskartonbeplankung 2cm Dämmung/2x4cm Luftluna 5cm Vakuumdämmung 1cm Zellulose Dämmung 30cm Außenbauteil</p> <p>EG</p> <p>Außenwand</p> <p>KG</p> <p>Außenwand</p> <p>Oberboden Estrich 5mm PU-Ummantelung 40mm Vakuumdämmung 5mm PU-Ummantelung Stahlbetondecke</p>	<p>1960-1972 Sockel KG/EG Außenwand Hochlochziegel verputzt – Stahlbetonkellerdecke</p> <p>VIP-Innendämmung an der Wand in Verbindung mit Vakuumdämmung unter dem Estrich ist wärmetechnisch in diesem Bereich die Variante mit der günstigsten Wärmebrückensituation</p>
<p>1,5cm Gipskartonbeplankung 2cm Dämmung/2x4cm Luftluna 5cm Vakuumdämmung 1cm Zellulose Dämmung 30cm Außenbauteil</p> <p>EG</p> <p>Außenwand</p> <p>KG</p> <p>Außenwand</p> <p>Oberboden Estrich Dämmung WLK 035 Stahlbetondecke 5mm PU-Ummantelung 40mm Vakuumdämmung 5mm PU-Ummantelung Oberputz</p>	<p>1960-1972 Sockel KG/EG Außenwand Hochlochziegel verputzt – Stahlbetonkellerdecke</p> <p>Die Dämmung unter der Kellerdecke erfordert zur Wärmebrückenreduktion einen Dämmstreifen unterhalb des Estrichs entlang der Außenwand.</p>

<p>1,5cm Gipskartonbeplankung 2cm Dämmung/2x4cm Lattung 5cm Vakuumdämmung 1cm Zellulose Dämmung 30cm Aussenbauteil</p> <p>EG</p> <p>Verblender</p> <p>Mauerwerk</p> <p>Oberboden Estrich 5mm PU-Ummantelung 40mm Vakuumdämmung 5mm PU-Ummantelung Stahlbeton</p> <p>KG</p> <p>Luftraum</p>	<p>1960-1972 Sockel KG/EG Außenwand KS-Mauerwerk mit Verblendermauerwerk – Stahlbetonkellerdecke</p> <p>Es ist bereits eine geringe Dämmung im Verblenderzwischenraum gegeben. Die dargestellte VIP-Innendämmung in Verbindung mit der VIP-Dämmung unter dem Estrich ist wie bei dem o. a. Detail die günstigste Lösung</p>
<p>Verblender</p> <p>Estrich abgetrennt</p> <p>Oberboden Estrich ummantelt Vakuumdämmung wellengeföhrt als PU-Dämmung</p> <p>Vakuumdämmung ummantelt mit PU-Schaum, verkleidet mit Putz oder Gipskarton</p> <p>Stahlbetondecke</p> <p>Luftraum 4cm Dämmung 20cm Betonschale 1cm Zellulose Dämmung 5cm Vakuumdämmung 2cm Dämmung/2x4cm Lattung 1,5cm Gipskartonbeplankung</p>	<p>1960-1972 Außenwand mit Verblendermauerwerk – Geschosdecke</p> <p>Trotz der geringen Dämmung auf der Tragschale ist die Innendämmung in Verbindung mit Dämmschürzen unter- und oberhalb der Decke auszuführen. Durch die Wärmebrückenberechnung lässt sich die Dimensionierung festlegen. Ggf. ist es sinnvoll, den Luftraum hinter dem Verblender zusätzlich mit Dämmung auszublasen.</p>
<p>Außenputz</p> <p>Betonvorschale</p> <p>Estrich abgetrennt</p> <p>Oberboden Estrich ummantelt Vakuumdämmung wellengeföhrt als PU-Dämmung</p> <p>Vakuumdämmung ummantelt mit PU-Schaum, verkleidet mit Putz oder Gipskarton</p> <p>Stahlbetondecke</p> <p>4cm Luftschicht 4cm Dämmung 20cm Betonschale 1cm Zellulose Dämmung 5cm Vakuumdämmung 2cm Dämmung/2x4cm Lattung 1,5cm Gipskartonbeplankung</p>	<p>1960-1972 Außenwand mit Betonvorschale – Geschosdecke als Stahlbetondecke</p> <p>Wie vor. Ergänzend lässt sich die Dämmschürze unter der Decke als konisches Element, als dünnes VIP-Element im Innenputzbereich oder als Gestaltungselement ggf. mit Zusatzfunktionen wie Lichtleiste oder Vorhangschiene ausführen</p>

 <p>Verblender Ziegelmauerwerk Innenwand</p> <p>Luftraum 4cm Dämmung 30-36cm Ziegelmauerwerk 1cm Zellulose Dämmung 5cm Vakuumdämmung 2cm Dämmung/2x4cm Lattung 1,5cm Gipskartonbeplankung</p>	<p>1960-1972 Außenwand mit Verblendmauerwerk - Innenwandanschluss</p> <p>Es gilt grundsätzlich das Gleiche wie beim vorhergehenden Detail. Die Dämmschürzen entlang der Wand lassen sich gestalterisch als auftragende rechteckige Dämmung, als konisches Dämmelement oder als dünnes VIP-Element, dass in den Innenputz eingespachtelt wird vorstellen.</p>
 <p>Ziegelmauerwerk Innenwand</p> <p>30-36cm Ziegelmauerwerk 1cm Zellulose Dämmung 5cm Vakuumdämmung 2cm Dämmung/2x4cm Lattung 1,5cm Gipskartonbeplankung</p>	<p>1960-1972 Außenwand verputzt mit Innenwandanschluss</p> <p>Wie vor, jedoch wärmebrückentechnisch etwas ungünstiger durch die fehlende Dämmung im Verblender- Luftzwischenraum</p>
 <p>EG Innenwand Sockelleiste und Randstreifen (Wärmebrücken- reduzierend)</p> <p>Oberboden Estrich Vakuumdämmung Stahlbetondecke</p> <p>KG Innenwand</p>	<p>1960-1972 Decke-Innenwand KG/EG Variante 1: VIP über Decke</p> <p>Wenn die Vakuumdämmung auf der Decke über dem KG ausgeführt wird, sollte eine Wärmebrückenberechnung für die Innenwanddurchdringungen erstellt und ggf. durch die dargestellten Dämmschürzen die Verluste reduziert werden.</p>

	<p>1960-1972 Decke-Innenwand KG/EG Variante 2: VIP unter Decke</p> <p>Die Dämmschürze an der Wand verbessert die Wärmebrückenreduktion, es sind aber mittels Wärmebrückenberechnung Kosten und Nutzen abzuwägen</p>
	<p>1960-1972 oberste Decke - Innenwand</p> <p>Problemloses Detail, da die Dämmung im unbeheizten Dachbodenbereich durchläuft</p>
	<p>1960-1972 oberste Decke - Innenwand</p> <p>Begleitende Dämmung der durchdringenden Innenwand im unbeheizten Dachbodenbereich auf eine Höhe von 40 bis 80 cm</p>
	<p>1960-1972 Traufe ausgebautes Dachgeschoß</p> <p>Übergang der Innendämmung zur Dämmung des ausgebauten Dachgeschoßes. Die Wärmebrücke der Decke muss möglichst weitgehend reduziert werden, in diesem Fall durch eine Dämmschürze unterhalb der Decke und eine Dämmung unter dem Estrich</p>

	<p>1960-1972 Traufe ausgebautes Dachgeschoss</p> <p>Höherwertige Dämmung im Vergleich zur Vorposition durch VIP-Dämmstreifen. Mittels Wärmebrückenberechnung sollte ein Optimum zwischen Aufwand und Nutzen ermittelt werden</p>
	<p>1960-1972 Traufe unausgebautes Dachgeschoss</p> <p>Lösung mit Vakuumdämmung auf der Decke zum unausgebauten Dachgeschoss.</p>
	<p>1960-1972 Traufe unausgebautes Dachgeschoss</p> <p>Wie vor, jedoch Lösung mit Standarddämmung im Dachbodenbereich</p>

Detailaufbauten 1972-1985

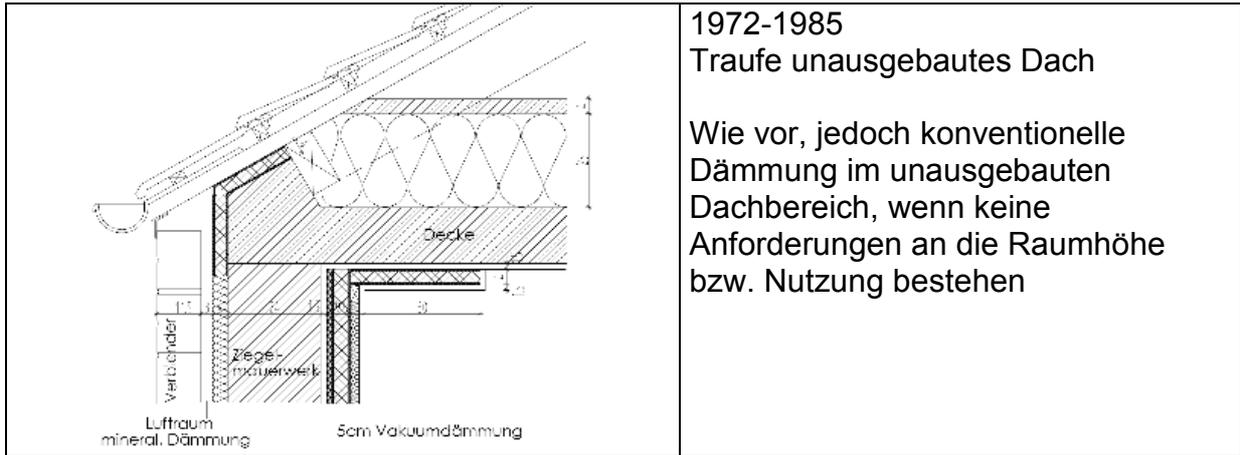
In den siebziger Jahren wurde eine hohe Vielfalt an Detaillösungen ausgeführt. Zusätzlich zum einschaligen Mauerwerk, das zunehmend mit porosiertem Material ausgeführt wurde, kamen wie bisher Verblendmauerwerk ebenfalls mit erhöhten Dämmdicken und Wärmedämmverbundsysteme zum Einsatz.

	<p>1972-1985 Sockel KG/EG Außenwand Hochlochziegel verputzt – Stahlbetonkellerdecke</p> <p>VIP-Dämmung an Außenwand und unter dem Estrich als günstige wärmebrückenarme Lösung</p>
	<p>1972-1985 Sockel KG/EG Außenwand Mauerwerk verputzt – Stahlbetonkellerdecke</p> <p>Vakuumdämmung unter der Kellerdecke, wenn der Bodenaufbau im EG nicht verändert werden kann; die Wärmebrückensituation ist ungünstiger und es sollte im Perimeterbereich gedämmt werden</p>
	<p>1972-1985 Sockel KG/EG Außenwand Mauerwerk mit Verbländern – Stahlbetonkellerdecke</p> <p>Innendämmung mit VIP an Wand und auf der Kellerdecke als wärmebrückentechnisch günstige Situation</p>
	<p>1972-1985 Sockel KG/EG, Keller beheizt Außenwand Hochlochziegel verputzt – Stahlbetonkellerdecke</p> <p>VIP-Dämmung an Außenwand und unter dem Estrich als günstige wärmebrückenarme Lösung, Dämmschürze im Keller zur Wärmebrückenreduktion</p>

	<p>1972-1985 Sockel KG/EG, Keller beheizt Außenwand Mauerwerk mit Verblender – Stahlbetondecke</p> <p>Wie vor, durch die Dämmlage zwischen Verblender und Mauerwerk ist die Ausgangssituation günstiger für die Wärmebrückenberechnung</p>
	<p>1972-1985 Außenwand aus Hochlochziegeln, verputzt mit Innenwandanschluss</p> <p>Dämmschürze beidseitig der einbindenden Innenwand, ggf. konisch zulaufend gestalten oder schlankes VIP-Element einbetten, an das flächenbündig angespachtelt wird mit minimalem Verzug, sodass die Flankendämmung nicht erkennbar ist</p>
	<p>1972-1985 Außenwand mit Verblendern mit Innenwandanschluss</p> <p>Wie vor</p>
	<p>1972-1985 Außenwand – Flachdach</p> <p>VIP-Innendämmung an Außenwand und unter der Stahlbetondecke zum Flachdach als wärmebrückentechnisch günstige Lösung. Eine Erhöhung der konventionellen Dämmlage oberhalb ist ebenso möglich.</p>

	<p>1972-1985 Außenwand verputzt – Geschossdecke</p> <p>Dämmschürze unter dem Estrich und unter der Decke zur Wärmebrückenreduzierung, ausführbar als sichtbare rechteckige Platte, als konischer Dämmstreifen, als Vakuumpaneel im Bereich des Deckenputzes (Brandschutz beachten) oder als gestalterisches Element wie Lichtleiste oder Vorhangschiene</p>
	<p>1972-1985 Außenwand mit Verblender – Geschossdecke</p> <p>Wie vor</p>
	<p>1972-1985 Flachdach-Innenwand</p> <p>VIP-Innendämmung mit Dämmschürze an der Innenwand zur Wärmebrückenreduktion; günstiger ist – wenn möglich – die Erhöhung der Dämmung oberhalb der Stahlbetondecke im Flachdachaufbau</p>
	<p>1972-1985 oberste Decke zum unbeheizten Raum – Innenwand</p> <p>wärmetechnisch günstiges Detail ohne Wärmebrücke</p>

	<p>1972-1985 oberste Decke zum unbeheizten Raum – Innenwand</p> <p>Dämmschürze an der aufgehenden Wand im unbeheizten Bereich 40 bis 80 cm hoch</p>
	<p>1972 – 1985 Traufe ausgebautes Dachgeschoss</p> <p>Übergang der Innendämmung zur Dämmung des ausgebauten Dachgeschosses. Die Wärmebrücke der Decke muss möglichst weitgehend reduziert werden, in diesem Fall durch eine Dämmschürze unterhalb der Decke und eine Dämmung unter dem Estrich; eine Analyse des Kosten-Nutzen-Aufwands der einzelnen Maßnahmen mittels Wärmebrückenberechnung ist empfehlenswert</p>
	<p>1972 – 1985 Traufe ausgebautes Dachgeschoss</p> <p>Wie vor, jedoch oberseitig der Decke und außenseitig mit konventioneller Dämmung</p>
	<p>1972-1985 Traufe unausgebautes Dach</p> <p>Vakuum-Innendämmung mit Dämmschürze unterhalb der Decke und VIP-Dämmung im Dachbodenbereich</p>



Teil D Wärmebrückenberechnungen nach Baualtersklassen

Die Wärmebrückenberechnungen sind Teil der weiterführenden Arbeiten.

Durch die Vielzahl der Möglichkeiten und der komplexen Detailführungen sind wesentliche Positionen zu wählen und zu berechnen.

Die Ausführung der Isothermenberechnungen ist mit feinabgestimmten Detailführungen zu kombinieren und umzusetzen.

Die Auswahl ist Isothermenbereiche ist aus den nachfolgenden Detailaufbauten zu treffen. Dies erfordert weitere Projektarbeit in Verbindung mit durchgeführten Projekten.

Detailaufbauten von 1870-1920

Detailaufbauten von 1920-1945

Detailaufbauten 1945-1960

Detailaufbauten 1960-1972

Detailaufbauten 1972-1985

Teil E Pilotprojekt Neuwied

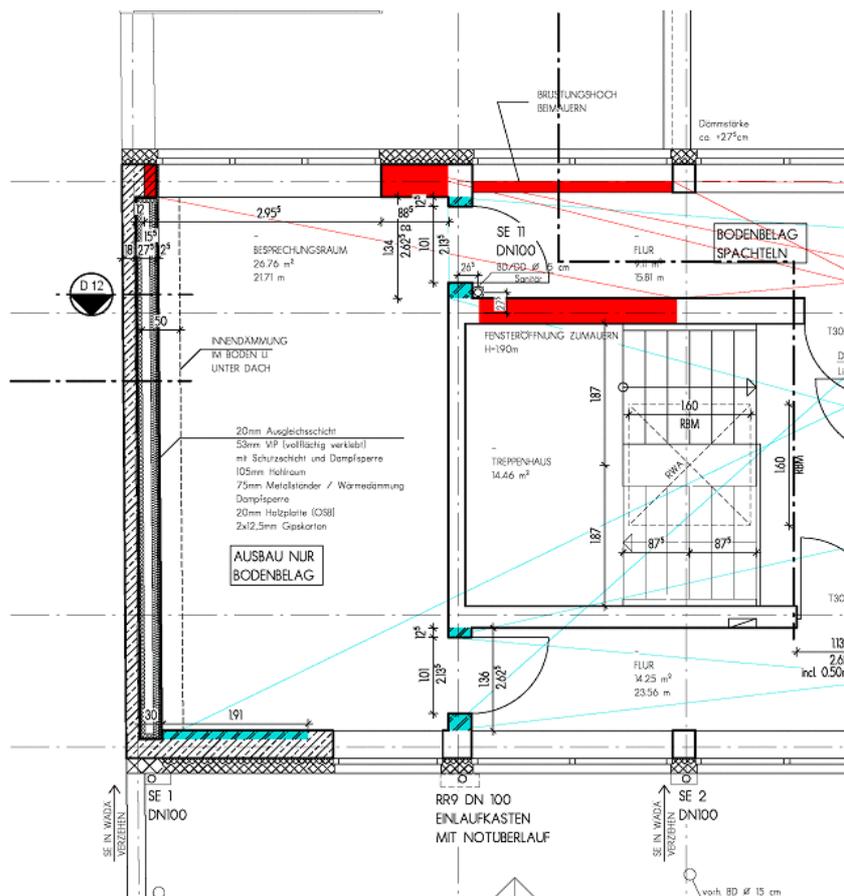
Als erstes Objekt für einen Feldtest der zuvor konzipierten Konstruktion einer Innendämmung mit Vakuum Isolationspaneelen konnte das Wohnheimgebäude des DRK-Krankenhauses in Neuwied gewonnen werden. Das um 1960 als Stahlbetonkonstruktion errichtete Gebäude wurde umfassend energetisch saniert, wobei an drei Hauptfassaden ein Wärmedämmverbundsystem zum Einsatz kam. Bei der vierten Fassade (Nordost) konnte aufgrund der Grenzbebauung keine außenliegende Wärmedämmung realisiert werden, eine Innendämmung wurde erwogen.

Projektbeschreibung Neuwied

Eingebaut wurde die Innendämmung an der Nordostwand des Dachgeschosses, das auch innenräumlich komplett saniert wurde. Hier sind Schulungsräume des DRK-Kreisverbandes Neuwied untergebracht. Bei dem an die Nordostwand mit Innendämmung angrenzenden Raum handelt sich um einen Seminarraum für Gruppen von ca. 15-20 Personen mit Fensterlüftung.



Pilotobjekt Neuwied vor und nach der Sanierung



Pilotobjekt Neuwied Plan Dachgeschoss mit Innendämmung

Die mit Innendämmung versehene Wand ist ca. 7,15 m lang, die Raumhöhe beträgt im Lichten ca. 2,70 m. Die Dämmmaßnahme umfasst damit eine reguläre Wandfläche von ca. 19,3 m².

Konstruktion

Im Pilotprojekt Neuwied wurden geschosshohe Paneele eingesetzt. Hierfür wurde nach präzisiertem Aufmaß ein Herstellungs- und Verlegeplan entwickelt, der der fertigungsbedingten Forderung nach einer möglichst geringen Zahl unterschiedlicher Größen von VIP-Elementen entsprach. Anschließend wurden die Einzelelemente zu 8 großflächigen Paneelen für die Wandfläche gemäß dem unter 2.1 aufgeführten Schichtaufbau zusammengefasst. Dabei handelt es sich um 6 Paneele von je 950 mm Breite für den Bereich im Zentrum und je einem rechten und linken Anschlusspaneel zu den Seitenwänden hin.

Zum Ausgleich von Unebenheiten, an welche die starren VIP-Paneele sich nicht anpassen können und mit dem Ziel, den Feuchtehaushalt im Zwischenraum günstig zu beeinflussen wurde an der 180 mm starken Stahlbeton-Außenwand zunächst eine 30 mm starke Ausgleichsschicht aus Hanffaser-Dämmmatten (ThermoHanf Fa. Hock) angeklebt. Verwendet wurde ein unter Aufnahme von Luftfeuchte aushärtender Kartuschenklebstoff, um einen baubedingten Feuchteintrag in die Konstruktion auszuschließen. Dies ist bei dem gewählten dampfdiffusionsdichten Aufbau von besonderer Bedeutung. Anschließend wurden die Vakuum-Isolationspaneele der Wandfläche in Position gebracht. Aufgrund der recht engen Toleranzen war hier etwas Krafteinsatz erforderlich.



Hanffaser-Dämmmatten als Ausgleichsschicht



Wandflächen-Paneele in Position

Die Befestigt wurden die Paneele mit Tellerdübeln in Vollkunststoff-Ausführung. Es wurden Dübel DIPK 8 der Fa. Fischer eingesetzt. Diese besitzen einen Spreiznagel aus Polyamid, der mit dem Hammer eingetrieben wird. Ein großflächiges Anpressen der Paneele um eine Vorspannung der Ausgleichsschicht zu erzielen war jedoch ohne Hilfsmittel nicht möglich. Hierzu hätte es einer geeigneten Anpressvorrichtung bedurft. So

konnte nur von einer Person gegen das Paneel gedrückt werden während eine zweite Person den Dübel einbrachte.

Die Durchbrüche im Paneel waren für eine Durchsteckmontage ausgelegt, um einen rationellen Arbeitsablauf zu gewährleisten. Es zeigte sich, dass sich beim Bohren der Befestigungslöcher regelmäßig Hanffasern aus der Ausgleichsschicht auf den Bohrer wickelten und so die Bohrmaschine blockierte. Mit provisorischen Locheisen aus einem angeschliffenen Rohrstück konnte zwar leidlich Abhilfe durch vorheriges Ausstanzen der Faserlage geschaffen werden- diese Methode wird den üblichen Anforderungen im Baustelleneinsatz jedoch noch nicht gerecht. Auch konnte nicht an allen Befestigungspunkten ein verlässlicher Halt der Tellerdübel erreicht werden. Manche Dübel versagten unter der Zugbelastung aus Rückstellkräften der Ausgleichsschicht. Außerdem wurden die Paneele durch die Hammerschläge zum Eintreiben der Spreiznägeln stark belastet.



Montierte Begleitdämmung, Vorbereitung der Vorsatzschale

Die Befestigung der Begleitdämmungen erfolgte entsprechend der Wandfläche, wobei an Boden und Decke je ein Wandanschlussprofil aus Stahlblech mit befestigt wurde. Dieses diente später zum Befestigen einer schützenden Vorsatzschale in Leichtbauweise. In diesem speziellen Einsatzfall wurde diese Vorsatzschale mit einigem Abstand zu den Dämmpaneelen montiert, da ein Abschluss der Wand mit der Flucht der Fensterlaibung gewünscht wurde.

Anschließend wurden alle Stoßfugen und Durchdringungen, sowie die Anschlüsse an das Bauwerk mit aluminiumkaschiertem Butyl-Dichtband sorgfältig abgeklebt. Damit war die bauphysikalisch wirksame Maßnahme der Innendämmung fertig gestellt.

Die Vorsatzschale wurde als herkömmliche Leichtbauwand mit einer Verkleidung aus Gipskartonplatten erstellt, in der Vorsatzschale eingelegte Mineralfasermatten haben lediglich akustische Funktion.

04.04.2007	Einbau von Sensoren im Bereich der bestehenden Außenwand
April / Mai 2007	Div. Abbruch & allg. Bauarbeiten
Juni 2007	Montage der Ausgleichsschicht aus Hanffaser
14.06.2007	Anbringung der VIP auf der Wandfläche
18.06.2007	Montage VIP Begleitdämmung
19.06.2007	Montage VIP Begleitdämmung & Vorsatzschale
Juli / August 2007	Fertigstellung des allg. Innenausbau
21.08.2007	Inbetriebnahme der Datenerfassung

Wichtige Daten beim Pilotprojekt Neuwied

Messkonzept

Um die Voraussetzungen für eine Erfassung des realen Verhaltens der Konstruktion zu schaffen wurden Sensoren für alle wichtigen Parameter des thermischen und hygrischen Verhaltens im Zentrum der gedämmten Wand installiert. Zudem wird die Oberflächentemperatur an der kritischen Stelle des Übergangs der Begleitdämmung zum Bauwerk erfasst. Alle Sensoren werden mit einer zentralen Datenerfassungsanlage (ALMEMO Datenlogger 2890-9, Fa. Ahlborn MRT) in minütlichen Intervallen (Mittelwerte) aufgezeichnet. Die Messkanäle sind in folgender Tabelle detailliert aufgeführt.

Nr.	Parameter	Messtelle	Kurzbez.	Typ
1	Schlagregenbelastung Außenwand	Vor Außenwand	Regen1	THIES 5.4103.20.041
2	Temperatur Außenwand	30mm hinter Außenoberfläche Außenwand	Aussenw1 T	E+E 06
3	Relative Feuchte Außenwand	30mm hinter Außenoberfläche Außenwand	Aussenw1 rF	E+E 06
4	Wärmestrom	Innenoberfläche Außenwand	Wäfl1	Phymeas T7
5	Temperatur Ausgleichsschicht	Innenoberfläche Außenwand	Ausgl1 T	E+E 06
6	Relative Feuchte Ausgleichsschicht	Innenoberfläche Außenwand	Ausgl1 rF	E+E 06
7	Feuchte Ausgleichsschicht	Innenoberfläche Außenwand	Holz1	Ahlborn MRT FHA636MF
8	Oberflächentemperatur	Innenoberfläche VIP	OberflVIP1	Pt100 Folienfühler Ahlborn MRT FP0685
9	Oberflächentemperatur	Innenoberfläche Vorsatzschale	OberflGK1	Pt100 1/10 DIN B
10	Oberflächentemperatur	Übergang Begleitdämmung / Bauwerk	OberflVIP2	Pt100 Folienfühler Ahlborn MRT FP0685
11	Raumlufttemperatur	Deckenbereich	Raum1 T	E+E 06
12	Raumluftfeuchte	Deckenbereich	Raum1 rF	E+E 06

Messstellen Pilotprojekt Neuwied

Das minütliche Messintervall wurde gewählt, um möglichst gut aufgelöste Daten der Regenmessung zu erhalten, Zusätzlich wurde ein Regensammler installiert, um über eine erste Periode die Gesamt-Schlagregenmenge bestimmen zu können und damit die elektronische Regenmessung zu eichen.

Für alle übrigen Parameter wäre ein größeres Messintervall ausreichend, insbesondere die Bauteilfeuchten besitzen eine große Trägheit.

Die Messwerterfassung wurde am 21.08.2007 fertig installiert und in Betrieb genommen. Sicherung und Auswertung der erfassten Daten sollen im Rahmen eines Anschlussprojektes erfolgen.



Schlagregenmessung vor der Fassade



Übersicht Messstellen und Sensorfeld an der Innseite der Außenwand

Erste Ergebnisse aus dem Montagevorgang

Bei der Montage der geschosshoch vorgefertigten Vakuum-Isolationspaneele im Pilotprojekt Neuwied traten zunächst Schwierigkeiten beim Einpassen der Elemente auf. Diese hatten ihre Ursache in Unregelmäßigkeiten der Geschosshöhe, welche beim Aufmaß nicht genügend berücksichtigt worden waren. Da zu einer aufmassbasierten Vorfertigung bei dem gewählten Paneelaufbau keine Alternative besteht, ist es notwendig, die Erfassung des Rohbaus zu systematisieren, wo möglich zu automatisieren und mit Hilfe moderner Messmittel präzise zu gestalten. Auf Grundlage eines so gewonnenen Datensatzes kann u. U. auch die Fertigung rationeller gestaltet werden. Alternativ besteht die Möglichkeit an den Paneelrändern breitere Randbereiche aus konventionellen Dämmstoffen (Hartschäume) vorzusehen, die einer Nacharbeit auf der Baustelle zugänglich sind. Die vergrößerten Wärmebrückenwirkungen eines solchen Randes müssen dann entsprechend berücksichtigt werden.

Die zweite Schwierigkeit bestand wie erwähnt darin, dass beim Durchbohren der auf die Wand aufgetragenen Ausgleichsschicht der Bohrer regelmäßig durch aufgewickelte Fasern blockierte. Um dies zu vermeiden und einen Arbeitsgang einzusparen wurde vorgeschlagen, die Ausgleichsschicht direkt auf die Paneelrückseite aufzukaschieren. Dabei können an den Befestigungspunkten entsprechende Aussparungen mit geeignetem Übermaß vorgesehen werden, so dass ein Kontakt von Bohrer und Faserlage ausgeschlossen wird. Zudem würde das Anbringen der Ausgleichsschicht als manueller Arbeitsgang auf der Baustelle eingespart, eine Trockenzeit für verwendete Klebstoffe entfielen und die Montagezeit wäre weiter verkürzt.

Für die Wandfläche wurden Tellerdübel mit Spreiznagel aus Kunststoff eingesetzt. Dabei konnten zwei Schwierigkeiten beobachtet werden. Zum einen war die Haltekraft mancher Dübel trotz des eigentlich idealen Befestigungsgrundes (Stahlbeton) nicht ausreichend. Zum anderen wurden durch die Hammerschläge beim Eintreiben der Spreiznägeln die Paneeloberflächen teilweise beschädigt; auch können die Erschütterungen Ursache verringerter Haltekraften gewesen sein. Ein präzises Justieren der Paneele bzw. Einstellen der Vorspannung der Ausgleichsschicht war erschwert. Im Bereich der Begleitdämmung im Leibungsbereich des östlichen Fensters wurden Dübel vom Typ Termoz KS8 (Fa. Fischer) verwendet. Diese weisen einen aus glasfaserverstärktem Kunststoff hergestellten Schraubnagel auf. Durch die Vermeidung starker Erschütterung und die bessere Steuerbarkeit des Anzugsvorgangs konnten mit diesen Dübeln trotz des an dieser Stelle weniger guten Untergrundes (Mauerwerk) weit bessere Ergebnisse erzielt werden.

Das zum Abkleben von Paneelfugen und Dübeltellern sowie der Randfuge zum Bauwerk hin eingesetzte Butylklebeband bewährte sich gut. Auch die Befestigung der Anschlussprofile für die Leichtbauwand als Vorsatzschale unter Verwendung der Befestigungsdübel der Begleitdämmung ist als erfolgreich zu werten. Das Abdichtungssystem an dieser Stelle sollte jedoch weiter entwickelt werden. Insbesondere sollten baustellenbedingte Fehler dadurch vermieden werden, dass fertig abgelängte, mit Dichtmaterial beklebte Anschlussprofile zusammen mit den Paneelen angeliefert werden. Im Ergebnis würde dies bedeuten, dass die gesamte Innendämmung samt Vorsatzschale als montagefertiger Bausatz angeliefert würde.

Eine Montage durch ein besonders im Umgang mit VIP-Innendämmung geschultes Handwerkerteam wäre wünschenswert, damit Verständnis und Aufmerksamkeit für die besondere Empfindlichkeit des Materials und der besonderen Bedeutung einer dampfdichten Ausführung sichergestellt ist. Dem (standardisierten) Aufmass käme für die montagefertige Vorbereitung aller Einzelteile eine Schlüsselrolle zu.

Die Messdatenerfassungseinrichtung konnte am 21.08.2007 fertig gestellt und in Betrieb genommen werden. In der Außenwand wurde eine Ausgleichsfeuchte von 72,5 %rF bei 18,6°C gemessen, in der Ausgleichsschicht wurde die Ausgleichsfeuchte zu 55,4 %rF bei 18,3 °C bestimmt. Die bauphysikalisch wirksamen Teile der Innendämmungsmaßnahme

waren am 19.06.2007 fertig gestellt worden, die genannten Messwerte wurden also nach einer mehrwöchigen Einstellzeit der Sensoren aufgenommen. Beide Bedingungen können als vollkommen unkritisch bewertet werden und liegen sogar schon unter den Startbedingungen der vorausgegangenen Simulationsrechnung.

Im Verlauf eines Anschlussprojektes wurden die auflaufenden Messdaten gesichert, aufbereitet und ausgewertet. Die Ergebnisse werden im folgenden Kapitel vorgestellt

Messbegleitung

Zusammenfassung

Anhand eines Modellvorhabens in einem Seminarraum des DRK-Krankenhauses Neuwied wurde prototypisch eine Innendämmmaßnahme mit vorgefertigten Vakuum-Isolationspaneelen durchgeführt und über mehrere Jahre messtechnisch begleitet.

Die Analyse der Klimadaten am Standort und der für den Auswertzeitraum 21.08.2007 bis 23.04.2010 vorliegenden Wetterdaten weist auf durchschnittliche Bedingungen während der Messbegleitung hin. Es handelt sich um ein niederschlagsarmes Gebiet mit Winden geringer Stärke aus westlichen bis südöstlichen Richtungen. Die innengedämmte Wand ist windabgewandt und wird einer Schlagregenbelastung im Grenzbereich der Beanspruchungsgruppen I und II der DIN 4108-3 zugeordnet.

Der für die bei Innendämmungen üblichen Verhältnisse sehr geringe U-Wert der sanierten Wand reduziert die Wärmeverluste sehr stark und schafft durch Oberflächentemperaturen nahe der Raumlufttemperatur sehr gute Behaglichkeitsbedingungen. Die gemessenen Werte der Temperaturdifferenz Raumluft-Wandoberfläche lagen im weit überwiegenden Teil während der Heizperioden unter 2 K, nur bei gelegentlichen Anheizvorgängen traten zweimal weniger als je 1 h höhere Temperaturdifferenzen auf.

Die an verschiedenen anderen Stellen der Konstruktion gemessenen Oberflächentemperaturen, insbesondere die am Rand der Begleitdämmung einbindender Bauteile, zeigen ein ausreichend hohes Temperaturniveau um raumluftfeuchtebedingte Schäden ausschließen zu können. Gleichwohl sind die Wärmebrückenverluste durch einbindende Bauteile (Decke, Boden, Wände) erheblich, dies tritt insbesondere bei dem durch die Vakuum-Isolationspaneele möglichen hohen Dämmstandard hervor.

Die Messwerte der Feuchteverhältnisse im Bauteilaufbau zeigen deutlich die langen Zeitskalen hygrischer Vorgänge in Bauteilen, was Extrapolationen erzwingt, die naturgemäß nicht als endgültig messtechnisch validiert gelten können. Die Messwerte liegen durchweg in einem unkritischen Bereich, auch die erkennbaren Trends deuten auf

eine dauerhaft schadensfreie Funktion hin und befinden sich in guter Übereinstimmung mit den durch numerische Simulationsrechnungen vorab ermittelten Werten. Für die Grenzschicht zwischen Betonwand und Vakuum-Isolationspaneelen wird langfristig ein Feuchtegleichgewicht bei einem a_w -Wert von 0,7 erwartet, die Messwerte zum Ende der Messbegleitung lagen um 0,65.

Der rechnerisch ermittelte U-Wert der regulären Wandkonstruktion kann aus den Messwerten des Wärmestromes und der Temperaturdifferenz reproduziert werden.

Insgesamt bestätigt die ausgeführte Konstruktion die in dem Vorgängerprojekt [Pfluger 2008] erarbeiteten Erwartungen. Dies ist ein Beleg für die Anwendbarkeit der in der Planung eingesetzten numerischen Verfahren zur Simulation von thermischen und hygrischen Bauteileigenschaften. Die untersuchten Parameter lassen auf eine dauerhaft zuverlässige Funktion der Konstruktion schließen, eine breitere Anwendung erscheint möglich.

Gleichwohl sollte dies weiterhin umsichtig und mit sorgfältiger Detailplanung unter Verwendung der geeigneten Planungsinstrumente erfolgen, da es sich bei dem vorliegenden Objekt um einen Fall mit günstigen Randbedingungen handelte: Es gab weder eine Anfangsbelastung mit Feuchtigkeit aus dem unsanierten Zustand, noch einen Eintrag von Baufeuchte während der Sanierung und es wurde ein neuer wasserabweisender Putz zum Schutz vor Schlagregen angebracht. Zudem besteht eine geringe Schlagregenbeanspruchung.

Auswertezeitraum

Die Messdatenerfassungseinrichtung konnte am 21.08.2007 fertiggestellt und in Betrieb genommen werden. In der Außenwand wurde eine Ausgleichsfeuchte von 72,5 %rF bei 18,6°C gemessen, in der Ausgleichsschicht wurde die Ausgleichsfeuchte zu 55,4 %rF bei 18,3 °C bestimmt. Die bauphysikalisch wirksamen Teile der Innendämmungsmaßnahme waren am 19.06.2007 fertiggestellt worden, die genannten Messwerte wurden also nach einer mehrwöchigen Einstellzeit der Sensoren aufgenommen. Beide Bedingungen können als unkritisch bewertet werden und liegen sogar schon unter den Startbedingungen der vorausgegangenen Simulationsrechnung.

Die Datenerfassung lieferte nutzbare Daten bis zum 23.04.2010. Der Zeitraum 21.08.2007 bis 23.04.2010 wird der Auswertung zu Grunde gelegt.

Wetterdaten

Wetterdaten konnten im Rahmen des Projektes nicht selbst erhoben werden. Es wurde daher auf Daten der Station Neuwied-Hafenstraße des Rheinland-Pfälzischen Luftmessnetzes [ZIMEN] zurückgegriffen, die vom Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht freundlicherweise als Halbstunden-Mittelwerte zur Verfügung gestellt wurden. Zusätzlich wurde eine eigene Schlagregenmessung an der untersuchten Fassade durchgeführt.

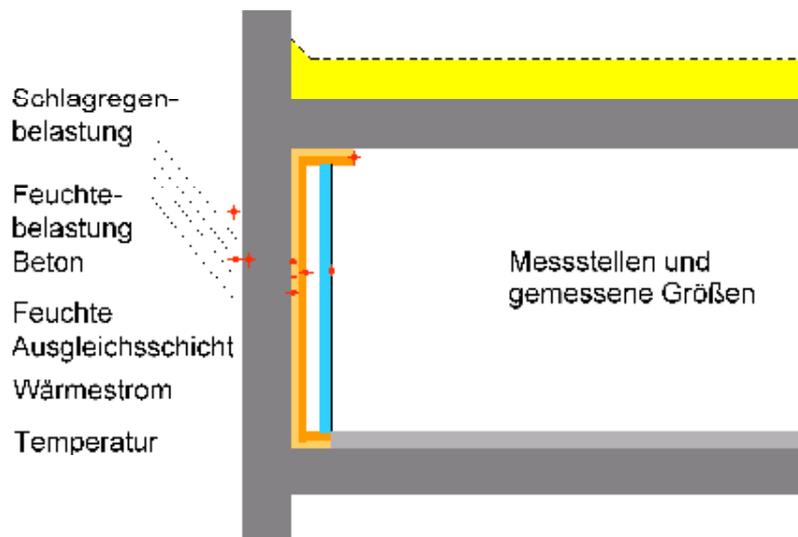


Abbildung 1. Übersicht Messstellen

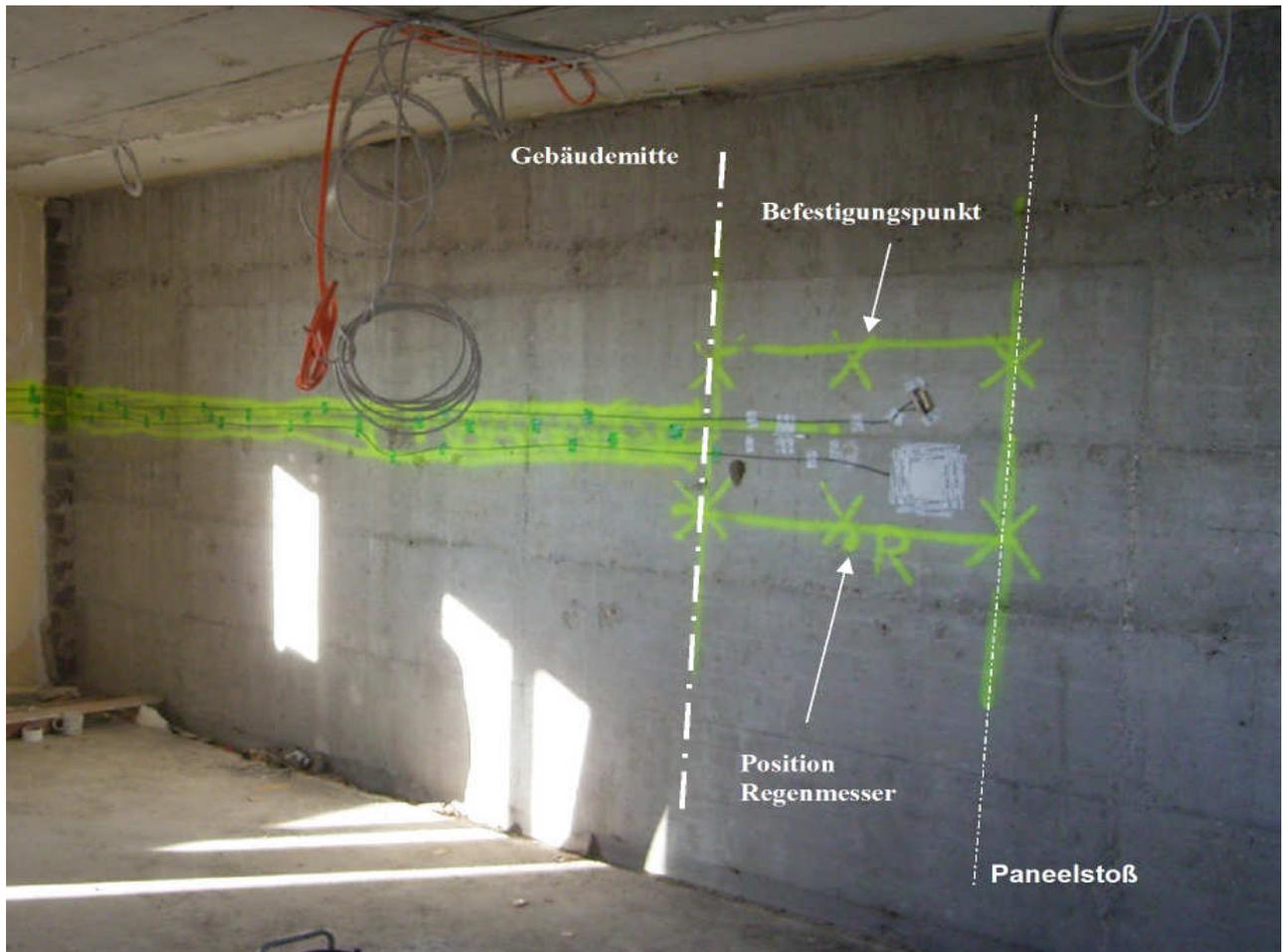


Abbildung 2. Sensorfeld an der Innseite der Außenwand während der Bauarbeiten

Messdatenauswertung

Im Rahmen der Messdatenauswertung wurden zunächst die Randbedingungen im Auswertzeitraum untersucht. Unterschieden wurden die äußeren Bedingungen, also die Beaufschlagung der Konstruktion durch das Wettergeschehen, und die inneren Randbedingungen, die durch die Nutzung des Raumes bestimmt werden und sich insbesondere von den Zuständen der Raumluft (Temperatur und relative Feuchte) dargestellt werden.

Wetter

Das Wettergeschehen bildet die äußere Randbedingung der Innendämmkonstruktion. Durch Temperatur und Feuchte beeinflusst es Trocknungsvorgänge der Bauteile, Schlagregen kann Ursache eines Feuchteintrages von außen sein. Der Schlagregen selbst wird durch Menge und zeitliche Verteilung des Niederschlages am Ort und den kleinräumigen Windverhältnissen am Bauwerk bestimmt. Es war daher notwendig, eine Schlagregennmessung in direkter Nähe der Messtellen vorzunehmen.

Schlagregenbelastung

Eine direkte Messung der Schlagregenereignisse konnte mit Hilfe eines elektronischen Regenmessers vorgenommen werden. Dieser wurde an der Außenoberfläche direkt unterhalb der Messtellen angeordnet, wobei ein von der Dachfläche abgehängtes Stativ verwendet wurde. Eine Beschädigung der Außenoberflächen durch Befestigungsmittel konnte so vollständig vermieden werden. Einen Eindruck der Anordnung gibt die folgende Abbildung.



Abbildung 3. Elektronischer Regenmesser an Stativ vor der Außenoberfläche

Die gewonnenen Werte sind in der folgenden Abbildung dargestellt, auf der Ordinate die stundenmittlere Schlagregenintensität auf der Wandoberfläche. Durch technische Defekte bestehen zwei Datenlücken, die durch Pfeile gekennzeichnet sind. Es fällt auf, dass die Werte gegen Ende der Messperiode deutlich höher ausfallen als zu Beginn.

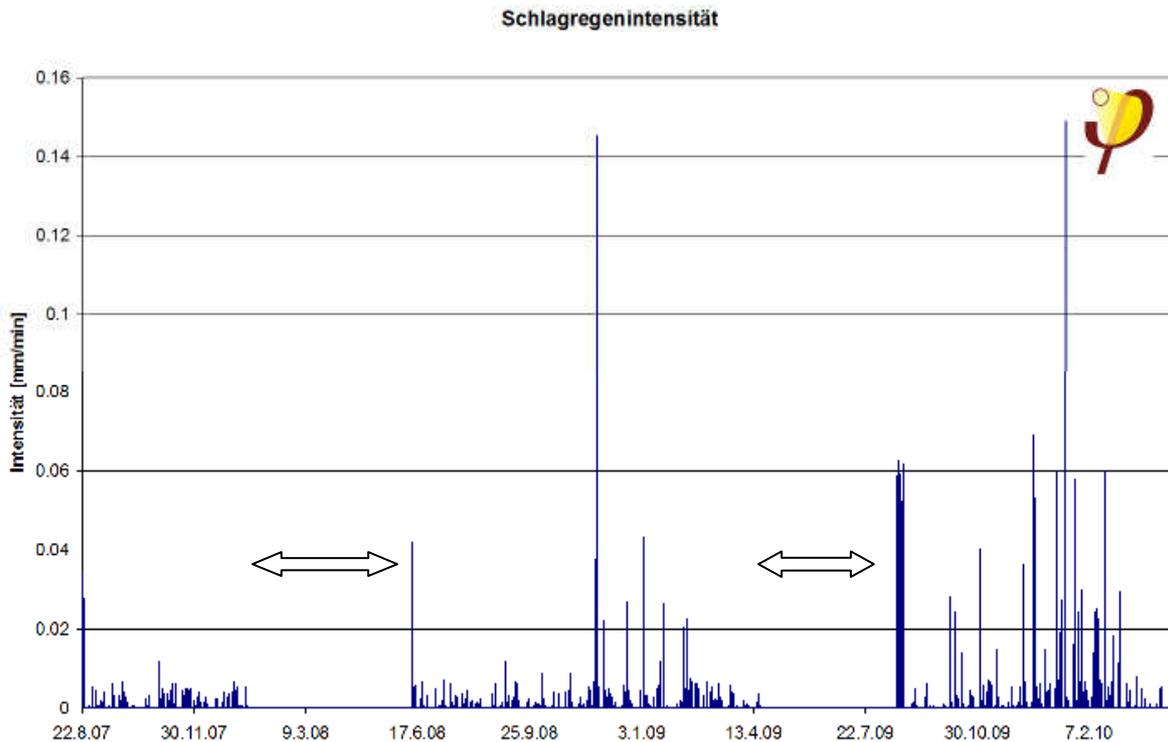


Abbildung 4. Aufgezeichnete Regenereignisse, Perioden ohne Regensignal

Dieses Verhalten ist erstaunlich, sind doch die Windverhältnisse nicht grundlegend anders als zu Beginn der Messperiode und auch die Niederschlagsmengen der Station Neuwied-Hafenstraße befinden sich in guter Übereinstimmung mit dem langjährigen Mittel.

Es ist daher aufschlussreich, die gemessenen Schlagregenereignisse mit den (an anderer Stelle gemessenen) Niederschlagswerten in Verbindung zu bringen. Die folgende Abbildung zeigt die Monatswerte der Schlagregenmengen auf der Fassade im Vergleich mit den Monatssummen der Niederschläge, wegen der unterschiedlichen Größenordnungen wurde eine logarithmische Darstellung gewählt.

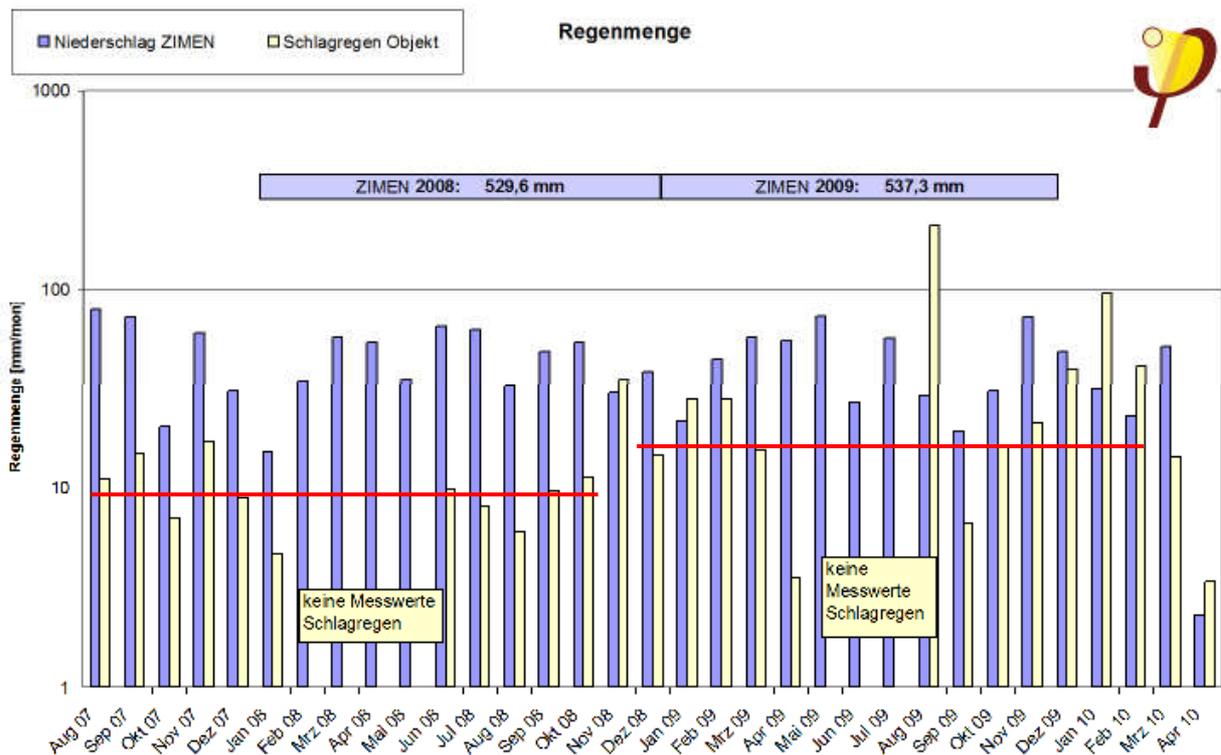


Abbildung 5. Übersicht Regenmengen (logarithmische Darstellung); Vergleich der Schlagregenmessung an der Fassade und der Niederschlagsmengen der Station Neuwied-Hafenstraße [ZIMEN], für die auch die jährlichen Gesamtmengen ermittelt wurden.

Auch dabei fällt auf, dass in der ersten Hälfte der Messperiode die Schlagregenmengen regelmäßig in der Größenordnung von 20 % der Niederschläge betragen, ab etwa dem Jahreswechsel 2008/09 dagegen wesentlich zunehmen. Ein Extrem wird im August 2009 erreicht, hier übertrifft die Schlagregenmenge den horizontal gemessenen Niederschlag erheblich. Dies ist mindestens unwahrscheinlich und lässt Zweifel am quantitativen Ergebnis der elektronischen Regenmessung aufkommen. Zumindest die Werte in der zweiten Hälfte der Messperiode müssen als unsicher eingestuft werden.



Abbildung 6.: Schlagregensammler, der vom 21.08.2007 bis 10.01.2008 neben dem elektronischen Regenmesser die Schlagregenbelastung der Fassade erfasste. Die gesammelte Wassermenge wurde vor Ort durch Wägung bestimmt.

Für die Zeit von 21.08.2007 bis 10.01.2008 wurde am Fassadenstativ ein Schlagregensammler angebracht, der den durch die Sammelöffnung eintretenden Schlagregen in einem Gefäß für die spätere Massenbestimmung auffing. Verdunstungsverluste an einigen wasserführenden Bauteilen sind bei diesem Messprinzip möglich, die Verdunstung aus dem Sammelgefäß wurde jedoch durch eine niedrig viskose Mineralölsperre unterbunden.

In der angegebenen Zeit (153 Tage) wurde über die Sammelöffnung von $0,019 \text{ m}^2$ eine Schlagregenmenge von $0,143 \text{ kg}$ registriert, was einer Schlagregenbelastung von $7,53 \text{ l/m}^2$ in diesem Zeitraum entspricht. Unter der Annahme einer gleichmäßigen zeitlichen Verteilung sind dies $1,48 \text{ l/m}^2$ in 30 Tagen. Dies wäre eine sehr geringe Schlagregenmenge. Dieses Messverfahren kann als zuverlässig eingestuft werden.

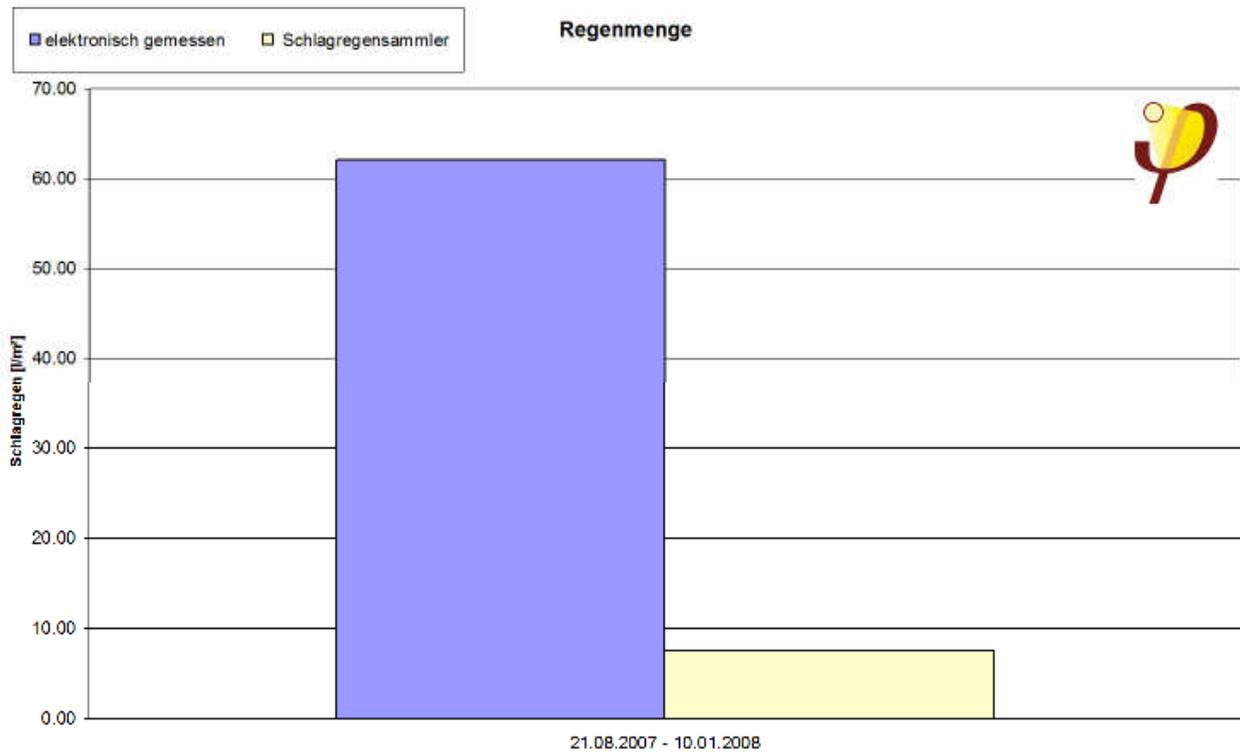


Abbildung 7.: Vergleich der Schlagregenmengen aus elektronischer Messung und Schlagregensammler

Der direkte Vergleich der Messwerte in der 153 Tage dauernden Vergleichsmessung zeigt eine deutlich verschiedene Schlagregenmenge. Aus der elektronischen Messung wird eine Schlagregenmenge von 62 l/m² ermittelt. Nach dem gleichen Verfahren wie beim Schlagregensammler auf 30 Tage normiert sind das 12,15 l/m² Schlagregen, immer noch eine eher geringe Menge. Zu beachten ist dabei, dass die quantitative Messwertausgabe bei dem eingesetzten elektronischen Regenmesser bauartbedingt eine grobe Auflösung besitzt.



Abbildung 8.: Fassadenstativ mit Schlagregensammler, der vom 21.08.2007 bis 10.01.2008 neben dem elektronischen Regenmesser die Schlagregenbelastung der Fassade erfasste. Links der Ausleger mit dem elektronischen Regenmesser.

Das untersuchte Objekt gehört nach [DIN 4108-3] zur Schlagregen-Beanspruchungszone II. Dies wird durch das Ergebnis der elektronischen Schlagregennmessung bestätigt, die mit dem Sammler gewonnenen Werte wären der Beanspruchungszone I zuzuordnen.



Abbildung 9. Schlagregenbeanspruchung gemäß [DIN 4108-3], Lage des Objektes

Die Stadt Neuwied befindet sich gemäß [DWD] in einem kleinräumigen, niederschlagsarmen Gebiet mit Jahresniederschlägen von 500-550 mm. Dies wird durch die Messwerte der Station Neuwied-Hafenstraße [ZIMEN] mit 530 mm im Jahr 2008 und 537 mm in 2009 belegt. Eine Zuordnung zu einer weniger Schlagregen-belasteten Region (Beanspruchungszone I) wäre daher gerechtfertigt, allerdings bietet die exponierte Lage der Messtelle am Gebäude auch Argumente für die Annahme einer höheren Belastung.

Eine Auswertung der Windverhältnisse im Messzeitraum zeigt die folgende Abbildung. Das Wetter wird von Winden aus nordwestlicher bis südöstlicher Richtung bestimmt, die untersuchte Wand (Orientierung nord-ost, 54°) ist also zumeist windabgewandt. Es kann daher auch aus dieser Hinsicht eine Tendenz zu geringer Schlagregenbeanspruchung angenommen werden.

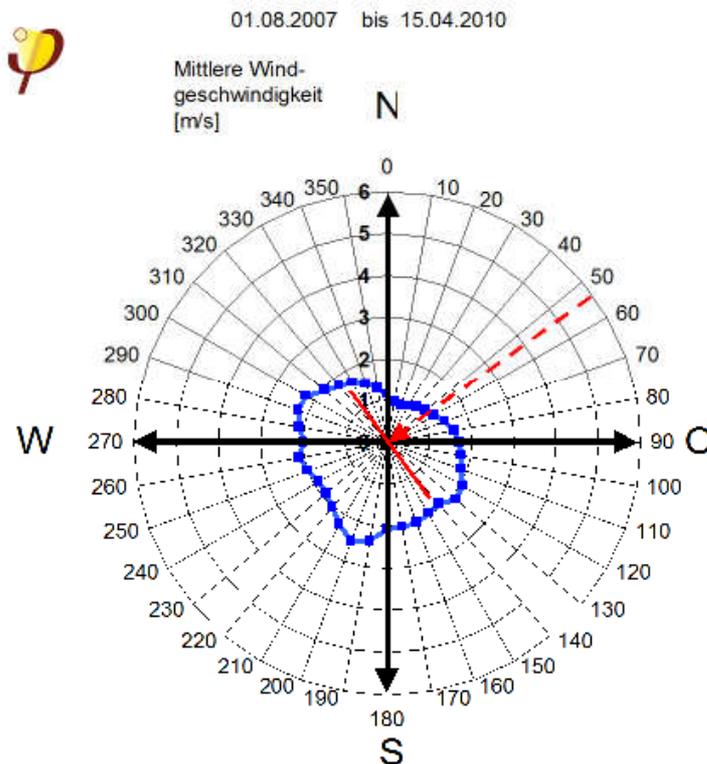


Abbildung 10.: Polardiagramm der Windverhältnisse im Gesamtzeitraum der Untersuchung, rot die Ausrichtung der innen gedämmten Gebäudewand mit Azimut-Pfeil

Weitere, monatsweise Auswertungen der Windverhältnisse in der gleichen Art sind im Anhang dokumentiert (Anhang A 1 – A 12).

Die Diskussion der vorliegenden Messwerte zeigt die Schwierigkeiten der messtechnischen Erfassung von Schlagregenbelastungen, verschiedene Verfahren kommen zu quantitativ abweichenden Aussagen. Insgesamt sprechen jedoch alle verfügbaren Daten für eine nur geringe Schlagregenbelastung der Wand, im Grenzbereich der Beanspruchungszonen I und II. Die Fassade ist zudem durch einen neu aufgetragenen, unbeschädigten Putz und wasserabweisenden Anstrich gut geschützt. Es darf daher für die weitere Betrachtung mit nur vernachlässigbar kleinem Feuchteintrag über die Außenoberfläche der Konstruktion gerechnet werden.

Außentemperatur

Die folgende Abbildung zeigt anhand von Stunden-Mittelwerten die Außentemperatur in Neuwied, wie sie an von der Station Neuwied-Hafenstraße registriert wurde. Temperaturextreme liegen um 35 °C im Sommer und –17 °C im Winter, beide Situationen sind von kurzer Dauer. Der dritte Winter 2009/10 zeigt längere Frostperioden und war ungewöhnlich kalt. Die Mitteltemperatur beträgt in den beiden vollständig vorliegenden Jahren 2008 und 2009 annähernd genau 11,0 °C.

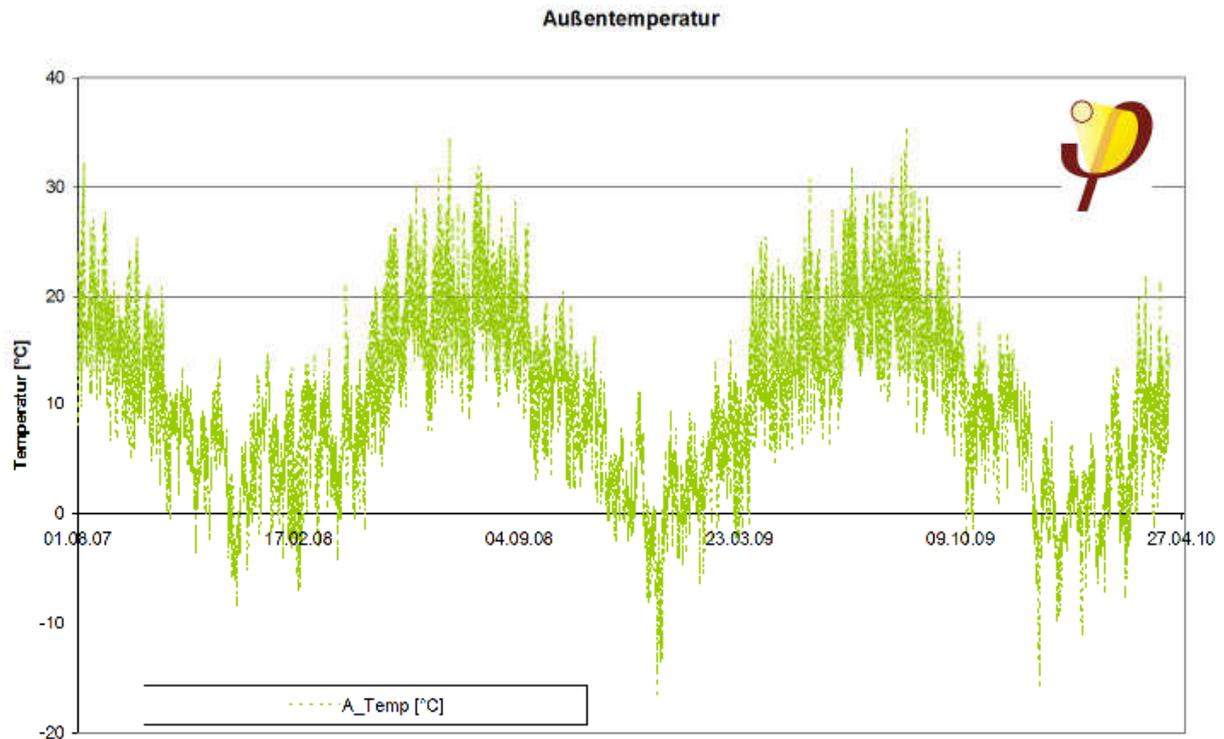


Abbildung 11. Stundenwerte der Außenlufttemperatur im Auswertzeitraum, Quelle [ZIMEN]

Globalstrahlung

Nach den langjährigen Mittelwerten des [DWD] ist für Neuwied mit einer Globalstrahlungssumme um $1010 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ zu rechnen. Von der Station Neuwied-Hafenstraße wurden für 2008 insgesamt $1042 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ gemessen, für 2009 wurden $1048 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ registriert. Demnach wären die betrachteten Jahre um ca. 5 % über dem langjährigen Mittel, dies ist aber nur wenig mehr als die Messunsicherheit. Somit liegen in der Jahresbetrachtung keine bemerkenswerten Globalstrahlungsverhältnisse vor. Der Einfluss der Globalstrahlung auf die nord-ost orientierte Wand ist zudem begrenzt, die Untersuchung wurde daher nicht weiter vertieft.

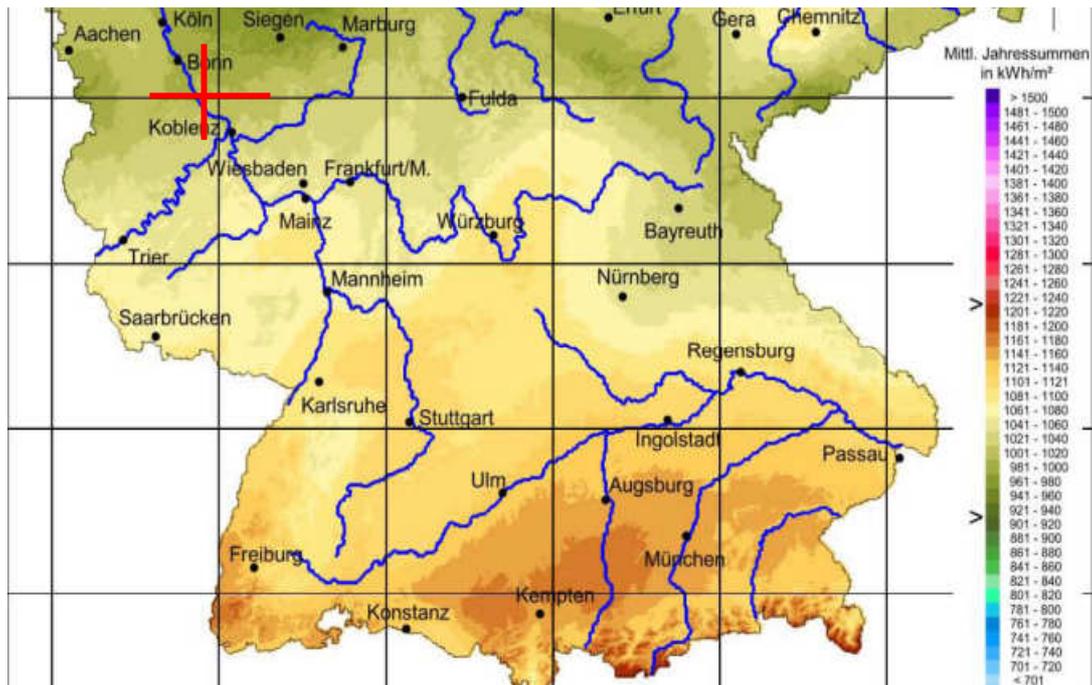


Abbildung 12. Globalstrahlungsmittel 1981-2000, Quelle [DWD]

Raumluftkonditionen, Raumutzung

Die Nutzung des untersuchten Raumes als Seminarraum für ca. 15 Personen ist ihrer Natur nach diskontinuierlich. Nutzungen finden im Regelfall nur tagsüber, gelegentlich auch am frühen Abend statt. Wie die gemessenen Temperaturen zeigen, war der Raum über den größeren Teil der Heizperioden durchgängig auf volle Raumtemperatur geheizt. Die relative Luftfeuchte blieb dabei zumeist unterhalb von 50 %, Überschreitungen dieses Wertes sind von kurzer Dauer und wohl auf eine hohe Zahl anwesender Personen (Seminarveranstaltung) zurückzuführen. In Kälteperioden sinkt die Feuchte wie üblich deutlich, 30 % werden für längere Zeit unterschritten, kurzzeitige Minima liegen um 20 %.

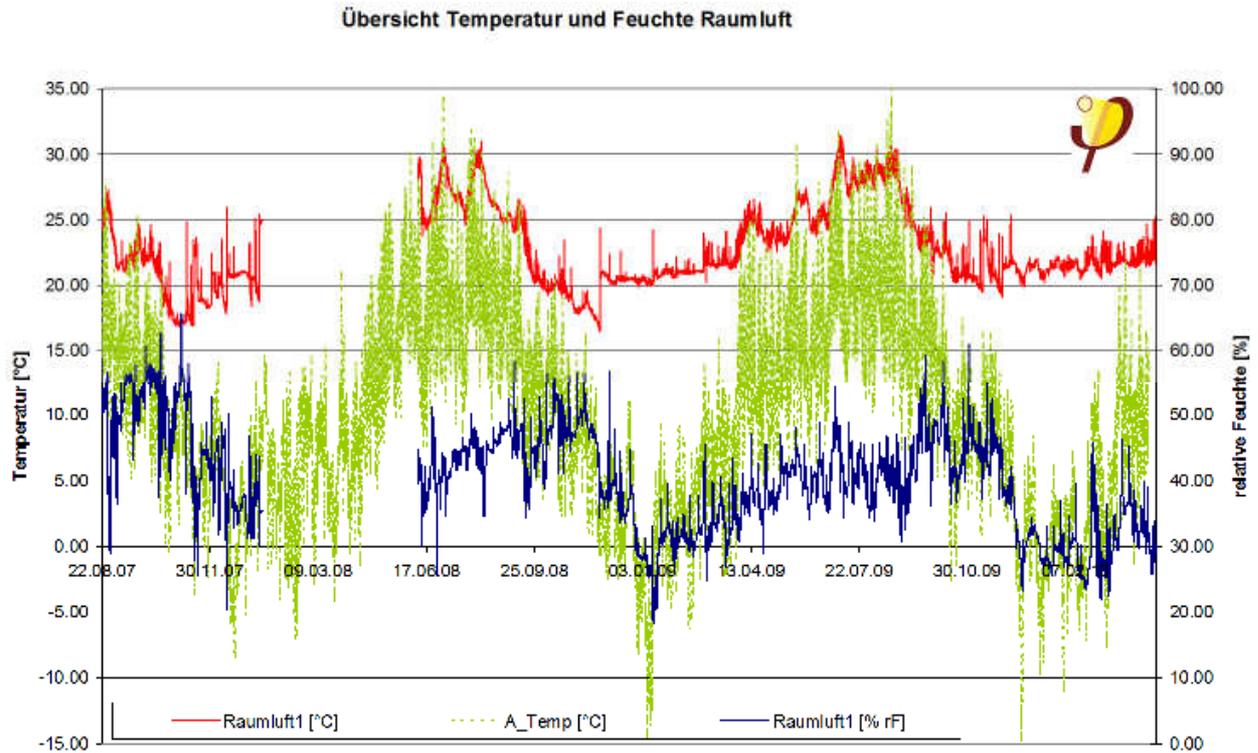


Abbildung 13. Stundenwerte von Temperatur und Feuchte der Innenraumluft, Außenlufttemperatur

Eigenschaften der Konstruktion

Schwerpunkt der vorliegenden Untersuchung ist das im Feldversuch gemessene Verhalten der Wandkonstruktion mit Innendämmung aus vorgefertigten Vakuum-Paneel-Verbundplatten. Können die vorab durch Simulationsrechnungen ermittelten Eigenschaften durch die Messwerte validiert werden und ist die Konstruktion gebrauchstauglich?

Oberflächentemperaturen

Die Oberflächentemperaturen des Raumes wirken sich unmittelbar auf das menschliche Behaglichkeitsempfinden aus. Sie sollen daher nur geringfügig ($< 4,2 \text{ K}$, vergl. [Feist 2007]) unter der Raumlufttemperatur liegen, was durch Wärmedämmmaßnahmen erreicht werden kann. Diese sind, neben ihrem Beitrag zu verbesserter Energieeffizienz eines Gebäudes, auch von wesentlichem Einfluss auf die Aufenthaltsqualität in den Räumen und deren Nutzbarkeit.

Daher wurden an mehreren Stellen der untersuchten Konstruktion Oberflächentemperaturen gemessen. Die Messtellen in der Regelfläche des Bauteilaufbaus erlauben Rückschlüsse über die Behaglichkeitsbedingungen, während an anderen Stellen die niedrigsten auftretenden Bauteiltemperaturen erfasst wurden, wodurch eine Aussage zur

Wahrscheinlichkeit von raumlufffeuchtebedingten Feuchteschäden an diesen Extremstellen möglich wird. Die folgende Abbildung zeigt die Messwerte im Überblick.

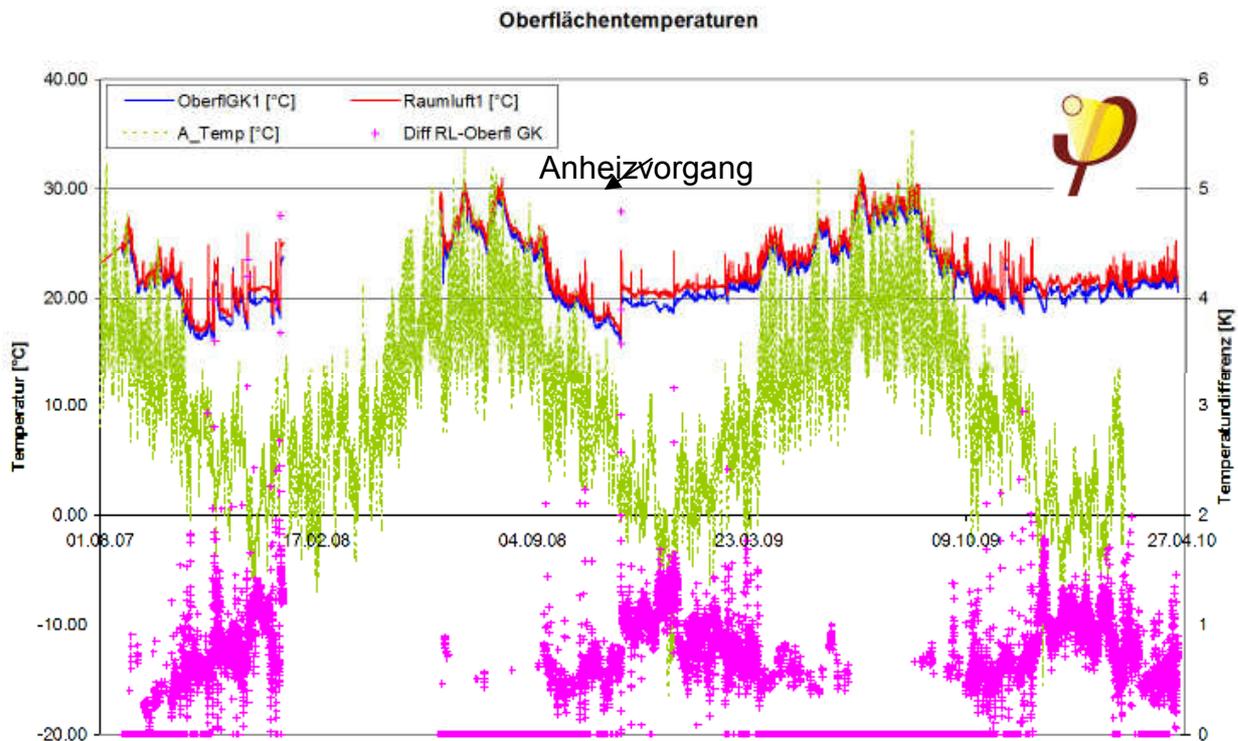


Abbildung 14. Stundenwerte der gemessenen Oberflächentemperatur der GK-Vorsatzschale, der Raumlufftemperatur und Außenlufttemperatur im Vergleich mit den Temperaturdifferenzen der Raumluff zu der GK-Oberfläche (magentafarben)

Rot dargestellt ist die Raumlufftemperatur als innere Randbedingung, zur Einordnung der Werte ist auch die Außentemperatur (grüne Kurve) dargestellt.

Die dunkelblaue Kurve zeigt den Verlauf der raumseitigen Oberflächentemperatur der Gipskartonverkleidung (vergl. die Ausführungen zur Konstruktion am Beginn dieses Berichtes). Die Differenz zur Raumlufftemperatur ist erkennbar gering, im Mittel der Heizperioden (Zeiten mit Außentemperatur $< 10\text{ °C}$) beträgt sie $0,69\text{ K}$ (Standardabweichung $0,43\text{ K}$). Das Maximum der Temperaturdifferenz beträgt $4,79\text{ K}$ und wird kurzzeitig während des markanten Anheizvorganges am 24.11.2008 für eine Stunde erreicht. Die benachbarten Stundenwerte liegen jeweils deutlich unter 4 K . Zu beachten ist, dass die Temperaturmessung der Oberflächentemperatur in der halben Raumhöhe (ca. $1,35\text{ m}$ hoch) erfolgte, während der Temperatursensor für die Raumluff unter der Zimmerdecke angeordnet war ($2,70\text{ m}$ hoch). Eine beim Anheizvorgang noch ausgeprägte Temperaturschichtung im Raum wirkt sich für die hier betrachtete Temperaturdifferenz also besonders stark aus. Hinsichtlich der Behaglichkeit in der Nutzungszeit sind damit hervorragende Voraussetzungen gegeben, es bestehen in der Regel nur vernachlässigbar geringe ($< 2\text{ K}$) Temperaturdifferenzen von Raumluff und Bauteiloberfläche.

Die folgende Abbildung zeigt zusätzlich die Oberflächentemperaturen des Vakuum-Isolationspaneels in der Regelfläche (orange dargestellt) und an einer Extremstelle. Diese befindet sich an der Kontaktstelle der Begleitdämmung an der Decke mit der Stahlbetonoberfläche (hellblaue Kurve). Beide Messtellen befinden sich hinter der Gipskartonverkleidung bzw. Deckenabhängung.

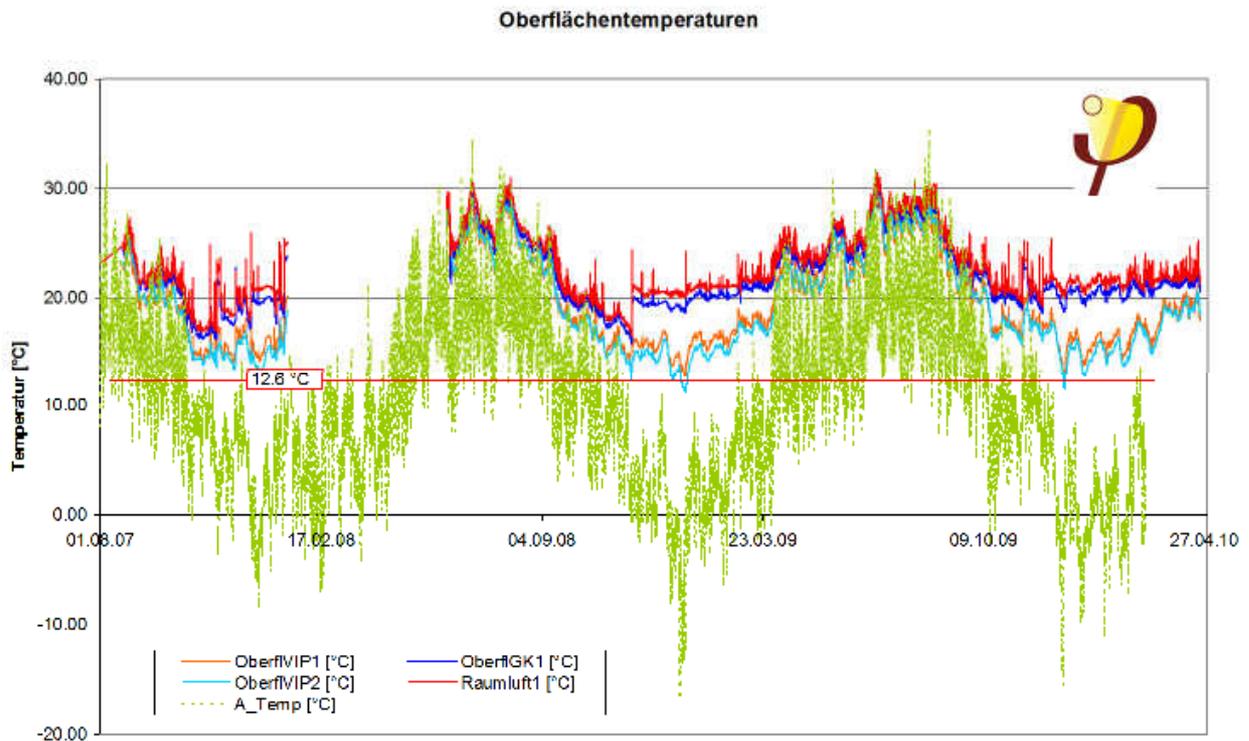


Abbildung 15. Stundenwerte gemessener Oberflächentemperaturen, der Raumlufttemperatur und Außenlufttemperatur

Auffällig ist, dass bereits die Oberflächentemperatur des VIP in der Regelfläche deutlich unter der raumseitigen Oberflächentemperatur der GK-Verkleidung liegt. Ursache hierfür ist der Beitrag der aus akustischen Gründen eingelegten Mineralfaserdämmung und der ruhenden Luftschicht zum gesamten Wärmedurchlasswiderstand des Bauteils.

Ebenfalls eingetragen ist die Linie von 12.6 °C, bei der unter Standardbedingungen der Raumluft (20 °C, 50 % r.F.) eine Wasseraktivität an der Bauteiloberfläche von 0,8 erreicht wird. Dies ist ein Maß für die Möglichkeit von Schimmelpilzwachstum. Diese Grenze wird bis auf sehr kurze Zeiträume deutlich überschritten, es besteht somit keine Gefahr von feuchtebedingten Schimmelschäden. Lediglich in wenigen extremen Kälteperioden wird die Grenze erreicht und an der Begleitdämmung geringfügig unterschritten. In diesen Zeiten liegen aber auch deutlich geringere Luftfeuchten der Raumluft vor – außerdem ist die Dauer zu kurz für eine Sporekeimung.

Die Wärmebrückenentschärfung durch Begleitdämmung ist damit wirksam, das heißt, feuchtebedingte Bauschäden können zuverlässig vermieden werden. Ungeachtet dieser

Tatsache besteht durch die ausgeprägten Wärmebrücken einbindender Stahlbetonbauteile ein hoher zusätzlicher Wärmeverlust.

Feuchteverhältnisse im Bauteilaufbau

Neben den zuvor betrachteten Feuchteverhältnissen an den Bauteiloberflächen ist die Feuchtigkeit innerhalb des Bauteils und ihre langfristige Entwicklung für die Funktionsfähigkeit der Konstruktion von entscheidender Bedeutung. Sie wurde daher in verschiedenen Bauteilschichten fortlaufend erfasst: Je ein Temperatur/Feuchte-Kombifühler wurde im Beton der Außenwand (Messtellenbezeichnung Aussenw1) und in der Ausgleichsschicht (Ausgl1) zwischen Beton und Dämmpaneel angeordnet (Vergl. Abbildung 1, S.95). Die folgende Abbildung zeigt die Messwerte des Auswertzeitraumes im Überblick.

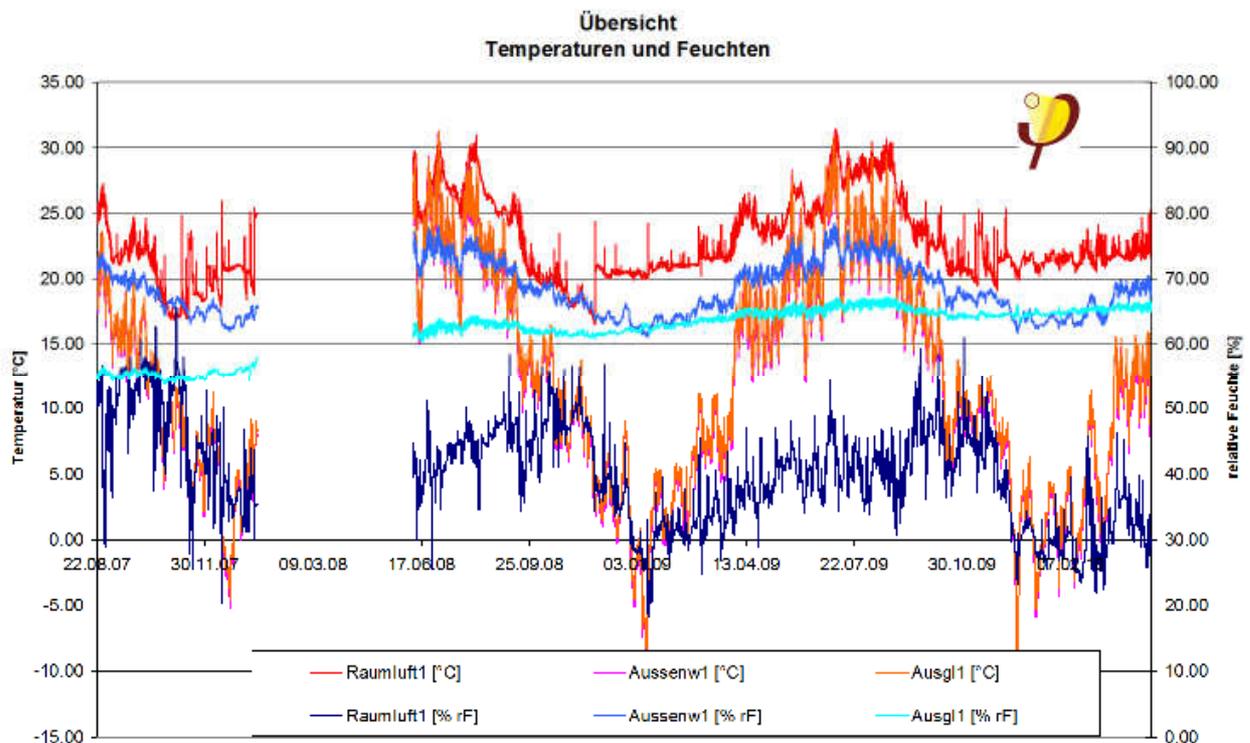


Abbildung 16. Stundenwerte gemessener Ausgleichsfeuchten in verschiedenen Bauteilschichten, der zugehörigen Temperaturen sowie Raumlufttemperatur

Die Ausgleichsfeuchte im Beton der Außenwand (mittelblaue Kurve) zeigt regelmäßige Schwingungen im Jahresverlauf, die Minima und Maxima unterscheiden sich nicht auffällig. Im Mittel liegt eine Feuchte knapp unter 70 % r.F. vor. Dem gegenüber zeigt die Feuchtentwicklung in der Ausgleichsschicht einen Anstieg, der von einer gedämpften, jahreszeitlichen Schwingung überlagert wird. Vom Beginn der Messungen im Sommer 2007 mit ca. 55 % steigt die Feuchte bis auf etwa 65 % im April 2010 an. Die Temperaturen der Messtellen Aussenwand (magentafarben) und Ausgleichsschicht (orange) unterscheiden sich kaum und sind deshalb im Diagramm überlagert.

An beiden Messtellen liegt die Feuchte ständig unterhalb der kritischen Schwelle von 80 % r.F. (entsprechend einem a_w -Wert von 0,8). Da für das Feuchteniveau der Ausgleichsschicht offenbar noch kein Gleichgewicht erreicht wurde, ist jedoch eine Einschätzung zum weiteren Verlauf die Voraussetzung für die Bewertung der Konstruktion. Dies wird im Folgenden durch einen Vergleich mit den vorab aus der numerischen Simulation gewonnenen Erkenntnissen durchgeführt.

Vergleich Feuchteverhältnisse aus Messung – Simulation

In [Pfluger 2008] wurde durch eine thermisch-hygrische Simulationrechnung der Verlauf der Ausgleichsfeuchte in der Grenzschicht von Betonwand (180 mm Stärke) und Dämmpaneelen bestimmt. Verwendet wurde der am Untersuchungsobjekt realisierte Wandaufbau (mit Ausgleichsschicht aus Hanffaser und wasserabweisender Beschichtung der Aussenseite). Die Startbedingung war mit einer mittleren Feuchte von 80 % angesetzt. Die in der folgenden Abbildung dargestellten Rechenergebnisse zeigen die berechnete Feuchteentwicklung über 10 Jahre.

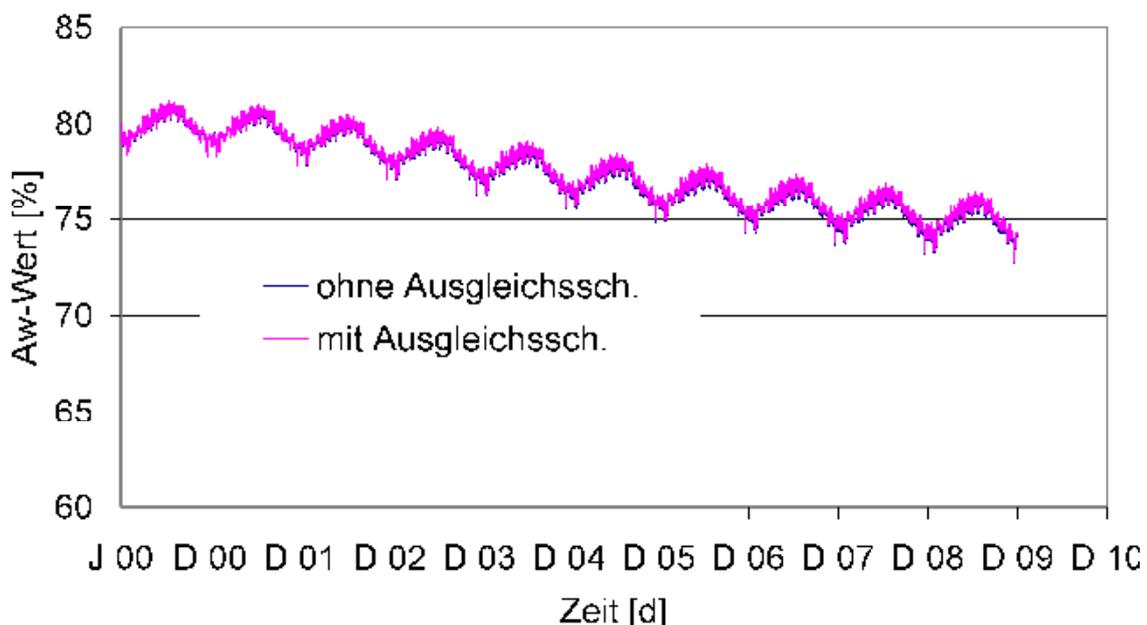


Abbildung 17. Verlauf der Wasseraktivität des Wandaufbaus mit Anstrich und Spachtelung jeweils mit und ohne Ausgleichsschicht zwischen Beton und VIP-Innendämmung; Simulationsergebnisse aus [Pfluger 2008]

Erkennbar ist ein Austrocknungsvorgang, überlagert von den Feuchteschwankungen im Jahresverlauf. Auch nach 10 Jahren ist kein Gleichgewicht eingetreten, die Austrocknung hält vielmehr noch an, dabei nimmt sie an Stärke ab.

Die Extrapolation lässt ein Gleichgewicht bei einer mittleren Feuchte zwischen 70 % und 75 % nach Ablauf weiterer 10 Jahre erwarten:

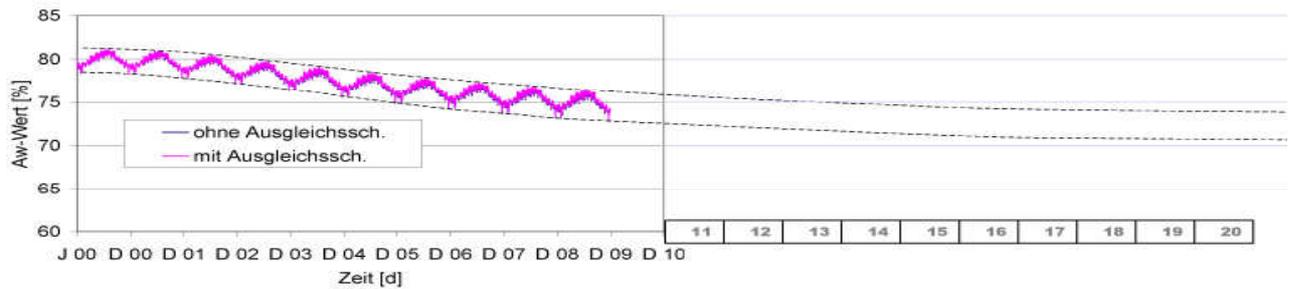


Abbildung 18. Extrapolation des Trocknungsvorganges gemäß numerischer Simulation

Die langen Zeitskalen hygrischer Vorgänge in Bauteilen sind auch bei der Interpretation der Messwerte aus dem Objekt Neuwied zu beachten. Die folgende Abbildung zeigt die bereits vorgestellten Messwerte von Temperaturen und Feuchten, ergänzt um grobe Trendlinien der Feuchteentwicklung im Beton der Außenwand sowie in der Ausgleichsschicht.

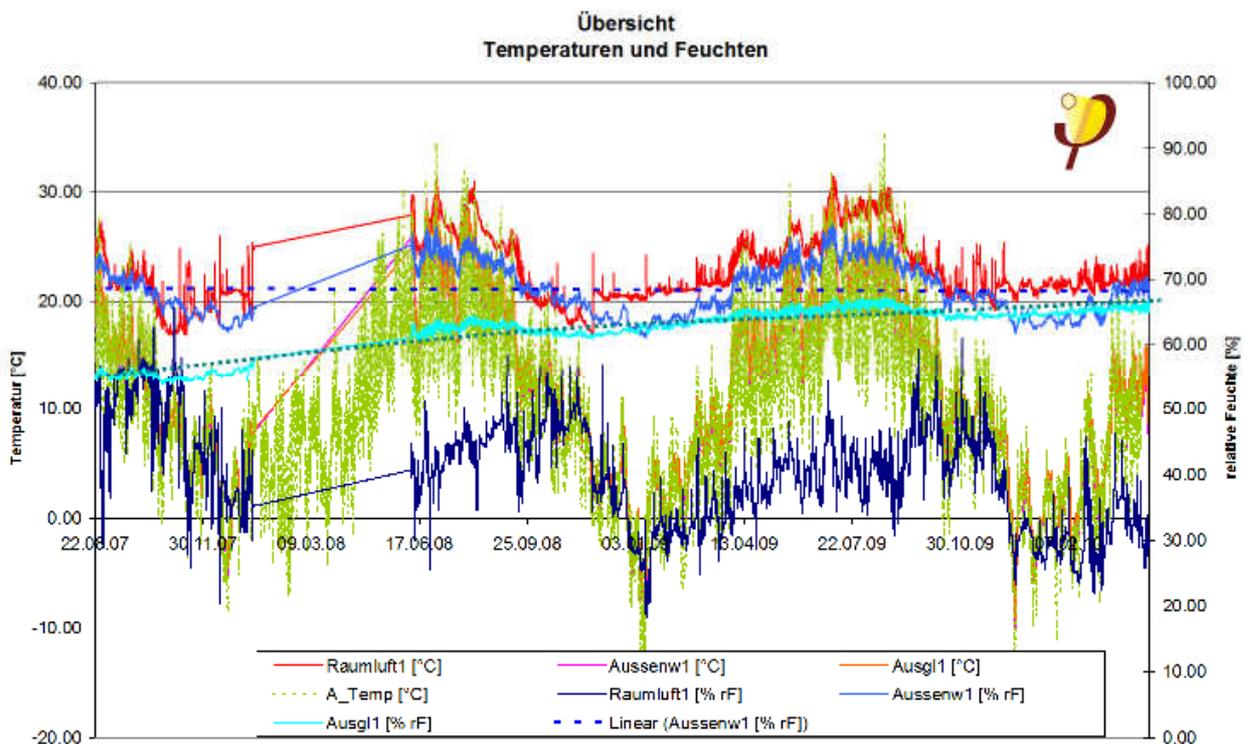


Abbildung 19. Messwerte der Wasseraktivität des ausgeführten Wandaufbaus mit Ausgleichsschicht zwischen Beton und VIP-Innendämmung; hellblaue Kurve: Wasseraktivität in der Ausgleichsschicht

Die Feuchte der Außenwand (blaue Kurve) zeigt ein annähernd gleich bleibendes mittleres Feuchtenivieuvon ca. 70 % (allenfalls könnte auch ein geringfügiges Sinken der mittleren Feuchte gesehen werden). Die Ausgleichsfeuchte im Beton ist somit von Beginn an etwa 10 % geringer als in der Simulationsrechnung angenommen. Der Grund

ist wahrscheinlich das Alter der Betonkonstruktion, Herstellungsfuchte ist vollständig ausgetrocknet und bei der Sanierung wurde keinerlei Baufeuchte eingetragen. Eine erhebliche Bauteilfeuchte aus früherer Schlagregenbelastung hat offenbar auch vor der Sanierung nicht bestanden.

Dem gegenüber zeigt die Ausgleichsfuchte der Grenzschicht (hellblaue Kurve) einen abnehmend ansteigenden Verlauf. Aufgrund des geringen Anfangswertes der Ausgleichsfuchte in dieser Schicht von etwa 55 % und der deutlich höheren Ausgleichsfuchte im Beton der Außenwand muss es hier zu einer Angleichung kommen.

Der Trend zeigt einen sich mit der Zeit abschwächenden Anstieg der Feuchte. Es ist durch eine vergleichbare Extrapolation wie bei den Simulationsergebnissen absehbar, dass bei einem mittleren Wert von ca. 70 % nach etwa vier bis fünf weiteren Jahren ein Gleichgewicht erreicht wird. Dies befindet sich in guter Übereinstimmung mit den zuvor diskutierten Ergebnissen der Simulationsrechnung.

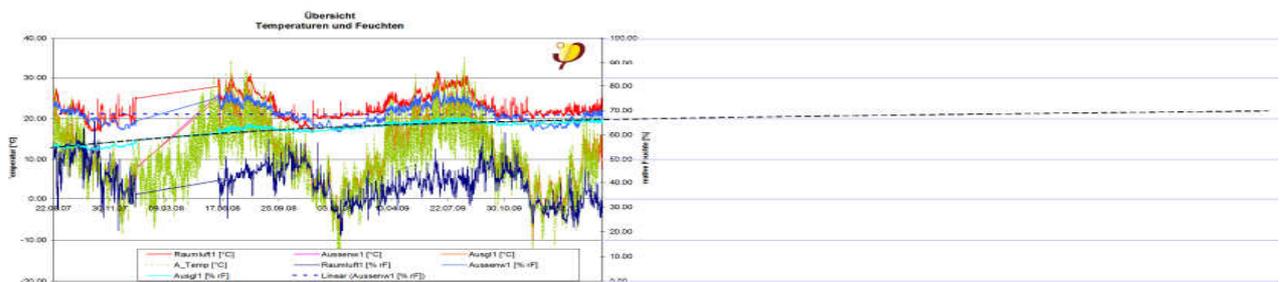


Abbildung 20. Extrapolation des Feuchteausgleichsvorganges gemäß Messwerten.

Durch Berechnen einer Ausgleichsfunktion lässt sich der Vorgang auch mathematisch analysieren. Eine gute Abbildung der Messwerte wird bei einer Zeitkonstanten von 1,7 Jahren erzielt.

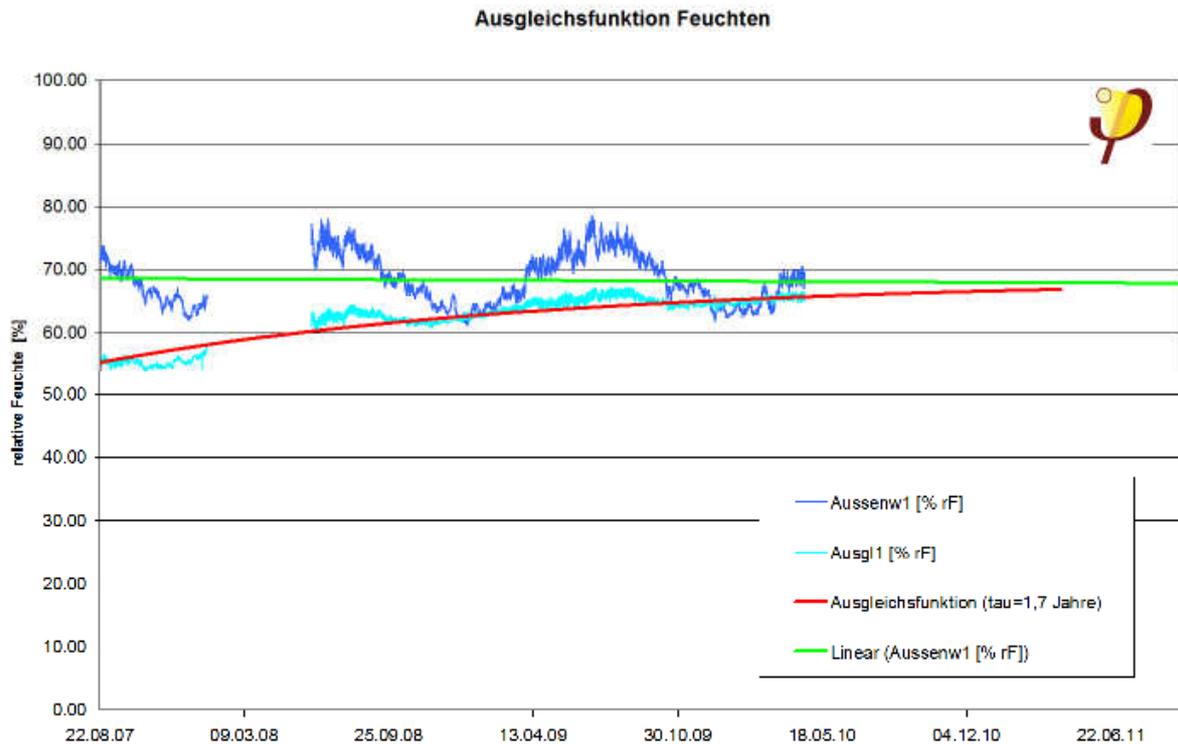


Abbildung 21. Mathematische Analyse des Feuchteausgleichsvorganges. Feuchteentwicklung in der Ausgleichsschicht mit Ausgleichsfunktion, berechnet mit einer Zeitkonstanten von 1,7 Jahren

Insgesamt nimmt die Feuchteentwicklung im Bauteil damit bis auf die abweichenden Anfangsbedingungen den erwarteten Verlauf und bestätigt so die praktische Verwendbarkeit der Konstruktion. Zu berücksichtigen ist allerdings, dass hier nur die Regelfläche untersucht werden konnte, Anschlusspunkte können ein abweichendes Verhalten zeigen. Weiter darf nicht vergessen werden, dass bei dem untersuchten Objekt weitgehend ideale Bedingungen vorlagen hinsichtlich Anfangsfeuchte (keine Baufeuchte vorhanden) und Schlagregenschutz (geschützte Orientierung der Wand, niederschlagsarmes Gebiet, neue wasserabweisende Beschichtung der Fassadenoberfläche, keine Vorbelastung mit Feuchte). Die raumseitige Dampfsperre ist nach den Messwerten (ausreichend) dicht ausgeführt worden, die Raumluffeuchten waren allerdings i.d.R. gering.

Wärmedurchgang

Durch eine Wärmeflussmessplatte im Aufbau der Regelfläche konnte der Wärmestrom zeitaufgelöst aufgezeichnet werden. Die folgende Abbildung zeigt den gemessenen Verlauf zusammen mit den bestimmenden Größen Innentemperatur und Außentemperatur.

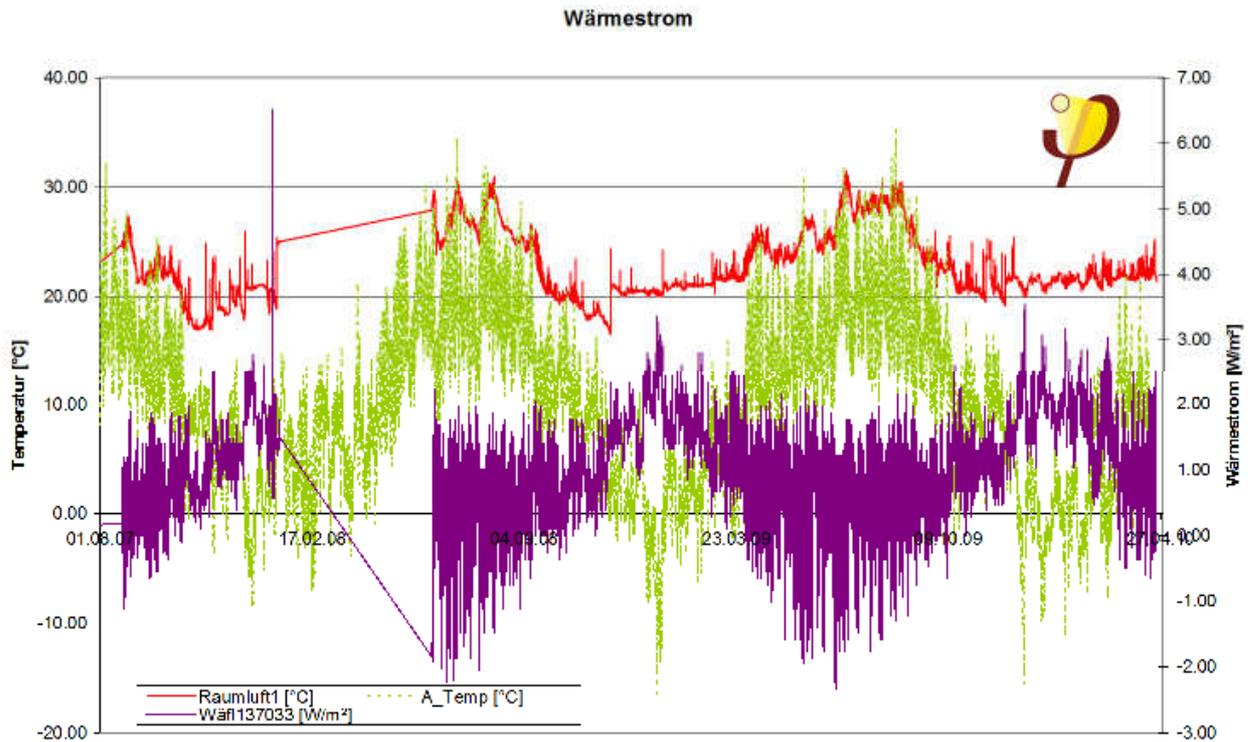


Abbildung 22. Gemessener Wärmestrom in der Regelfläche des Bauteilaufbaus (violett), Innentemperatur (rot) und Außentemperatur (grün)

Da neben dem Wärmestrom die zu jedem Zeitpunkt vorliegende Temperaturdifferenz bekannt ist, kann der Wärmestrom auf die Temperaturdifferenz bezogen werden und so ein temporärer Wärmedurchgangskoeffizient ermittelt werden. Durch instationäre Vorgänge unterliegen die gemessenen temporären Wärmedurchgangskoeffizienten einer Streuung, im Mittel kann aus ihnen jedoch der in stationären Berechnungen verwendete U-Wert gewonnen werden. Die folgende Abbildung zeigt die Messwerte aller Zeitpunkte mit einer Außentemperatur von weniger als 10°C (entspricht grob der Heizperiode).

Wärmedurchgang Regelfläche (Stunden mit < 10°C Außen)

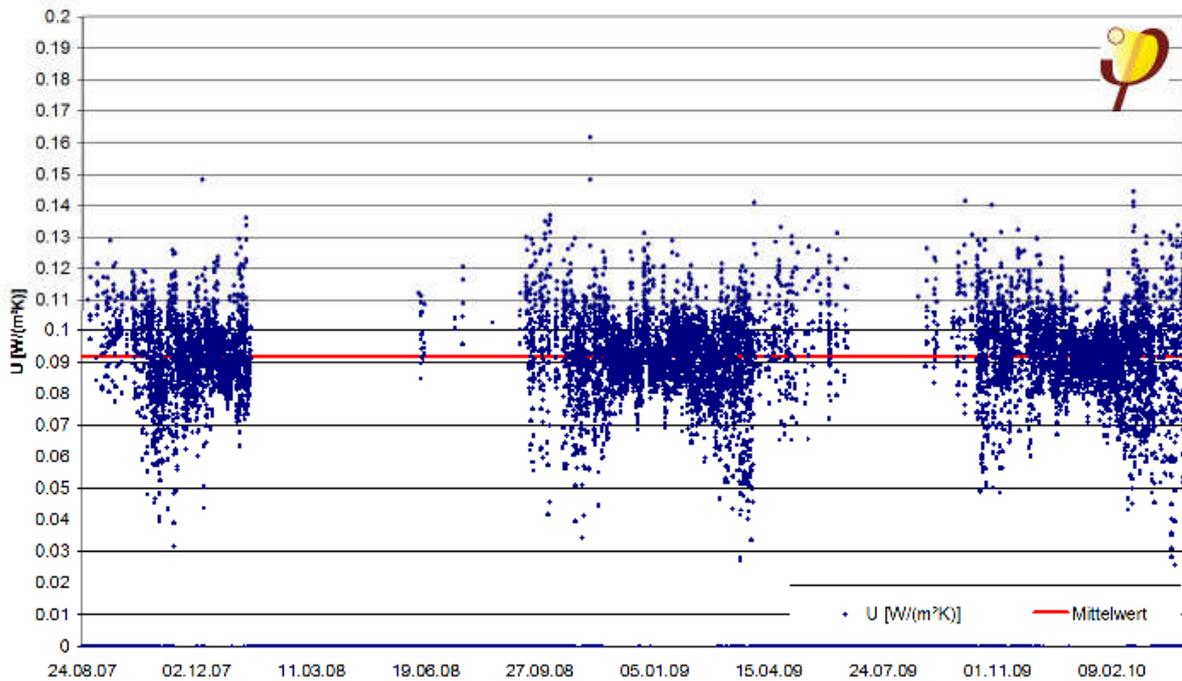


Abbildung 23. Aus den gemessenen Wärmeströmen und Temperaturdifferenzen berechnete Wärmedurchgangskoeffizienten (blau) und das arithmetische Mittel (rot)

Rot dargestellt ist der U-Wert als Mittelwert der Einzelmessungen, er beträgt 0,092 W/(m²K). Dieser Wert unterschreitet nur sehr wenig das nach den Rechenverfahren der DIN EN ISO 6946 ermittelte Ergebnis von 0,098 W/(m²K)

3 ganze Wand							
Bauteil Nr. Bauteil-Bezeichnung		Wärmeübergangswiderstand [m²K/W]		innen Rsi : 0.13			
		außen Rse : 0.04					
Teilfläche 1	Zusatz 1	Teilfläche 2 (optional)	Zusatz 1	Teilfläche 3 (optional)	Zusatz 1	Summe Breite	
						Dicke [mm]	
1. GK	0.800					12.0	
2. MiFA	0.040					50.0	
3. Luft	0.612					100.0	
4. PURMassiv	0.060					5.0	
5. VIP neu	0.005					40.0	
6. PURMassiv	0.060					5.0	
7. Hanf	0.045					15.0	
8. Stahlbeton	2.100					180.0	
		Flächenanteil Teilfläche 2		Flächenanteil Teilfläche 3		Summe	
						40.7	cm
				U-Wert:		0.098	W/(m²K)

Abbildung 24. U-Wert des Bauteils nach PHPP -Berechnung (gemäß DIN EN ISO 6946)

Die Messwerte bestätigen die erwarteten Eigenschaften der Kontruktion in der Regelfläche.

Literatur

- [AKKP24] Feist, W. (Hrsg.), **Einsatz von Passivhauskomponenten für die Altbausanierung**, Passivhaus Institut, Darmstadt, Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Protokollband Nr. 24, 1. Auflage 2004
- [AKKP 32] Feist, W. (Hrsg.), **Faktor 4 auch bei sensiblen Altbauten: Passivhauskomponenten und Innendämmung**, Protokollband Nr. 32, Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser Phase III, Darmstadt, 1. Auflage 2005.
- [DIN 4108-3] **Wärmeschutz und Energieeinsparung in Gebäuden – Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz; Anforderungen und Hinweise für Planung und Ausführung**, Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin 2001
- [DWD] Deutscher Wetterdienst, **Mittlere jährliche Niederschlagshöhe in der Bundesrepublik Deutschland für den Zeitraum 1971-2000** sowie **Globalstrahlung in der Bundesrepublik Deutschland, mittlere Jahressummen 1981-2000**, Hamburg 2004
- [Feist 2007] Feist, Wolfgang: **Passivhäuser in der Praxis**. In: Fouad, Nabil A. (Hrsg.): Bauphysik-Kalender 2007, Berlin 2007
- [Google] **Google Maps**, www.maps.google.de, Zugriff 08.03.2007
- [ISO 7730] **Ergonomie der thermischen Umgebung - Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit** (ISO 7730:2005); Deutsche Fassung EN ISO 7730:2005
- [Peper 2007] **Messtechnische Untersuchungen zum thermischen und hygrischen Verhalten der Innendämmung im Modernisierungsprojekt Sodastraße 40 / Ludwigshafen**, Passivhaus Institut, Darmstadt 2007
- [Pfluger 2008] Pfluger, R. e.a., **Wissenschaftliche Analyse eines auf vorgefertigten Vakuum-Paneel-Verbundplatten beruhenden Innendämmsystems**, Abschlussbericht, Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung AZ: Z6-10.08.18.7-06.28/II2-F20-06-024, Bonn 2008
- [Sedlbauer 2001] Sedlbauer, K.: **Vorhersage von Schimmelpilzbildung auf und in Bauteilen**, Dissertation Universität Stuttgart 2001
- [ZIMEN] **Halbstunden-Mittelwerte der Station Neuwied-Hafenstraße** im Luftmessnetz ZIMEN des Landesamtes für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz, Kaiser-Friedrich-Straße 7, 55116 Mainz,

Projektbeschreibung Springe-Eldagsen

Im Energie- und Umweltzentrum am Deister in Springe Eldagsen wurden im Rahmen eines Innendämmprojektes verschiedene Räume mit unterschiedlichen Innendämmsystemmaterialien ausgestattet. Für die QASA Vakuuminnendämmung wurde ein Büroraum zusammen mit Passivhausfenstern ausgestattet.

Die Montage der Vakuuminnendämmung erfolgte ohne Zwischenlage aus Hanf; der Einbau erfolgte im Gegensatz zum Projekt Neuwied ausschließlich über eine Verklebung mit PU – Baukleber ohne mechanische Befestigung und innere Vorsatzschale mit Unterkonstruktion.

Die Verteilung der Innendämmflächen wird auf den nachfolgenden Bildern wie in der Ansicht markiert dargestellt.

Grün umrandet:

Innendämmung als Holzfaserdämmung mit Lehmputz in Büro 1

Gelb umrandet:

Innendämmung 6 m² Gips Verbundplatten mit Mineralschaumplatten

Rot umrandet:

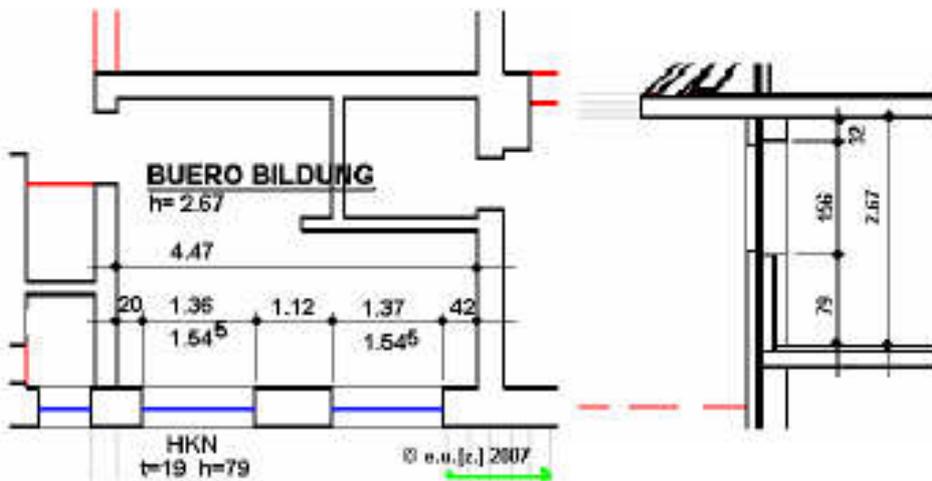
VIP Innendämmung Flächen siehe nachfolgende Aufstellung in Büro 2

Die Maßnahmen wurden im Rahmen eines Bauworkshops im Jahr 2007 zur Qualifizierung von nachträglichen Dachdämmungen und Luftdichtheit von außen und dem Einbau von Passivhausfenstern in Verbindung mit Innendämmsystemen durchgeführt.

Alle Innendämmsysteme wurden mit Feuchte- und Temperaturfühler versehen, Messdaten aufgenommen und zum Zeitpunkt der Berichterstellung teilweise ausgewertet. Im Anhang ist die aktuelle Wandsituation dargestellt. Die Außenwand besteht aus Mauerwerk mit Innenputzlage und zwei Fensterflächen, darunter liegenden Heizkörpernischen und „Wärmebrücken“ (an der Deckenfläche, Boden und seitlichen Wandflächen). Diese Bausituation ist durch die komplexen Anforderungen als klassisch und exemplarisch für Innendämm Lösungen anzusehen.



Grundrissanordnung und Schnitt



Flächenaufstellung der zu dämmenden Vakuumdämm- Innenflächen

$$\text{Wandfläche: } 2,67 \cdot 4,47 \text{ m} = 12,5 \text{ m}^2$$

$$\text{Fensterfläche: } 1,37 \cdot 1,54 \text{ m} \cdot 2 = 4,2 \text{ m}^2$$

$$\text{Fläche Fensterlaibung: } (1,54 \cdot 4 + 1,35 \cdot 2) \cdot \text{ca. } 0,2 = 2,3 \text{ m}^2$$

$$\text{Innendämmung ohne Flankendämmung:} = 10,6 \text{ m}^2$$



Die Raumsituation zeigt die klassische Innenraumsituation mit Heizkörpernische und Fensterbank als Betonbauteil.

Vor den Innendämmmaßnahmen sind vorbereitenden Maßnahmen erforderlich, die den Abbau des Heizkörpers, den Abbau der Fensterbank und das Schließen der Heizkörpernische beinhalten.

Um die Staubentwicklung mit Eintrag in die angrenzenden Räume bei diesen Arbeiten zu verhindern wird ein Blower Door Gerät eingesetzt.



Die Vakuumdämmplatten werden mit beidseitigen Hülldeckschichten ausgestattet.

Als Decklagen werden Sperrholzplatten eingesetzt, welche wandseitig mit einer Lage Aluminium ASS in der Stärke 0,2 mm versehen werden.

Alle Platten werden auf Grundlage des Aufmaßes gefertigt und mit Hüllschichten als QASA Vakuum - Sandwichelemente geliefert.



Die Flankenausbildung als Randabschluss der Platten wird durch einen Kantenschutz ausgeführt, ein umlaufendes Quellband ermöglicht zusammen mit einem Butylklebeband eine dichtschießende flexible Stoßfuge bei Pressverlegung der einzelnen QASA Sandwichplatten .



Die vorbereitenden Baumaßnahmen umfassen das Schließen der Heizkörpernische und das planebene und passgenaue Vorbereiten der Wand- und Fensterleibungsflächen.

Beim Fensterausbau löst sich der Putz im Leibungsbereich, die Heizkörpernischen werden mit Kalksandstein ausgemauert.



Da die Vakkumdämmplatten ausschließlich ohne mechanische Befestigung angebracht werden, ist es erforderlich eine *Kleberabreißprobe* durchzuführen.

Unebenheiten in den Oberflächen sind auszufüllen und planeben vorzubereiten.

Die vorbereitenden Baumaßnahmen umfassen das Schließen der Heizkörpernische und das planebene und passgenaue Vorbereiten der Wand- und Fensterleibungsflächen.





Vor dem Einbau der endgültigen Befestigung werden die Fensterlaibungen eingepasst und das Fenstermaß eingemessen. Auf den richtigen maßgenauen Abstand der Dämmelemente zur Innenwand und zur Fensterbrüstung ist zu achten.

Es folgt die Fenstermontage und das Verspannen und Einrichten der Dämmelemente mit Klebeauftrag.

Vor dem Anbringen der Wand-Innendämmplatten wird der PU-Baukleber als geschlossene konvektionsunterbindende Kleberaupe aufgetragen.

Bei Kleberauftrag ist auf eine zügige Verarbeitung zu achten, da sich sonst eine Klebehaut bilden kann, was zum Verlust der Klebewirkung führt.

Die Messfühler werden wandflächenbündig eingebaut.



Die Kleberaupe wird gemessen und die Wandelemente vollflächig gleichmäßig in das Klebett gedrückt.



Nach Entfernen der Halte- Pressvorrichtung löst sich der obere Teil des Vakuum-Innenpaneels, der Klebvorgang muss nachgebessert werden.



Die vorhandenen Maßtoleranzen von bis zu 1,5 cm sind insbesondere bei passgenau erforderlichen Bauteilen wie den Fensterlaibungen zu berücksichtigen

Fazit:

Die Befestigung der Innendämmpaneele ausschließlich ohne mechanische Befestigungen hat sich als schwierig erwiesen, da der Klebeuntergrund und die Klebebedingungen ideal sein müssen.

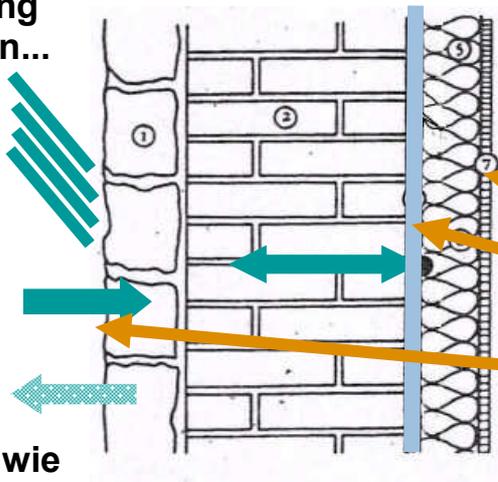
Die Weiterentwicklung der QASA Innendämmelemente haben eine mechanische Befestigung als Grundlage, der Einbau ist nun als problemlos zu betrachten und wird zur Ausführung vorgeschlagen.

5.2.2 und 5.2.3 Messkonzept und erste Ergebnisse

Die Systemzeichnung zeigt die Einbausituation der Messfühler

Messauswertung Feuchteverlauf November 2007

Kapillarleitung
und Diffusion...



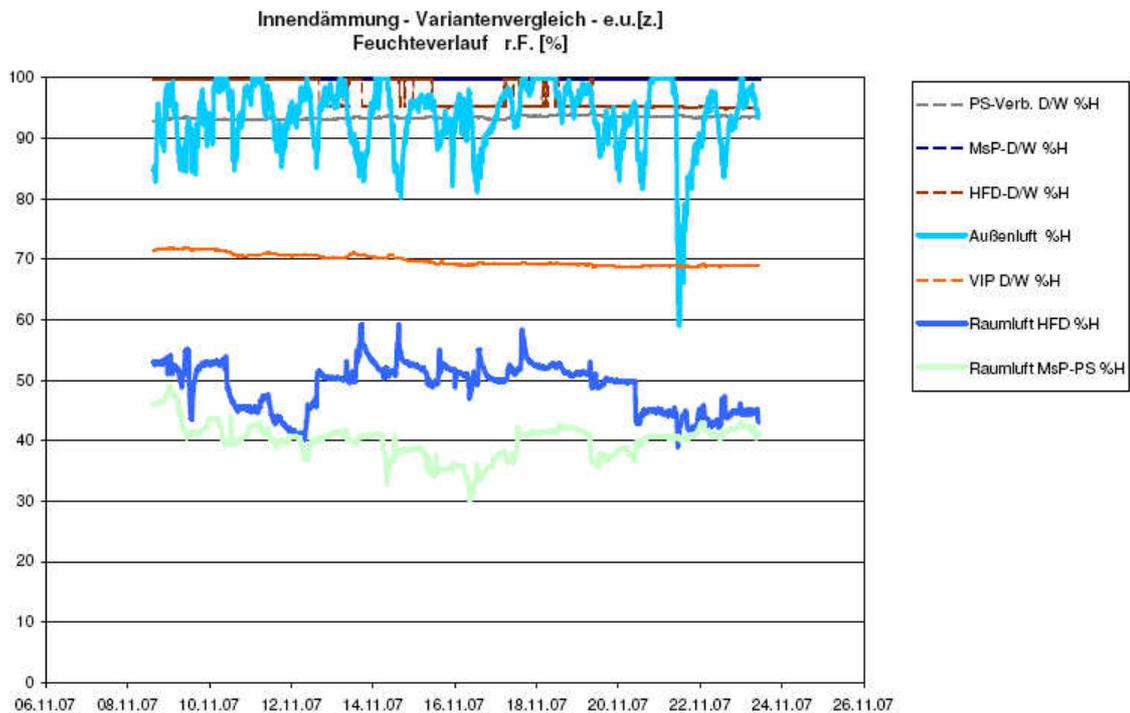
Messstellen

- Raumluftfeuchte
- Raumlufttemperatur
- Oberflächentemperatur innen
- Feuchte/Temperatur in alter Putzschicht
- Oberflächentemperatur außen
- Außenlufttemperatur- feuchte

... im Winter wie
auch im Sommer

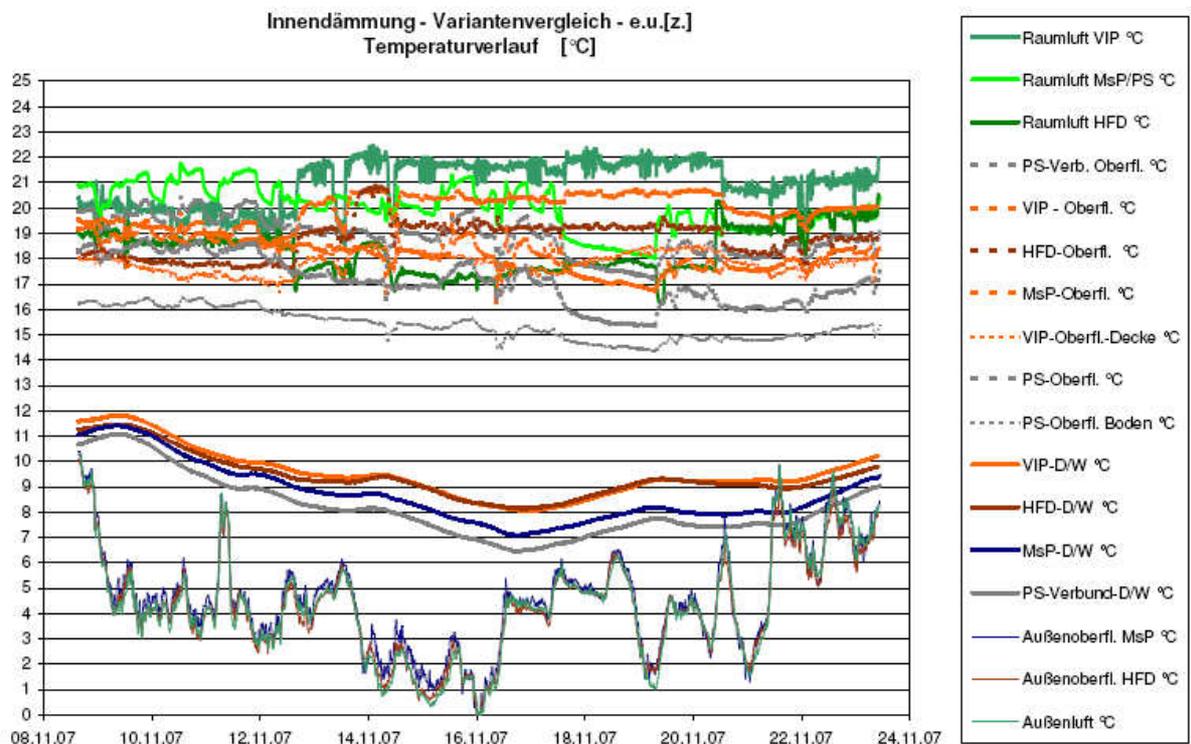
Messauswertung Temperaturverlauf November 2007

Legende: HFD Holzfaserdämmplatte, VIP Vakuumpanelle, MsP Mineralschaumplatte, PS Polystyrol-Verbundplatte, D/W Bereich(Dämmung/Wand, WB Wärmebrücke - Messfühler teilweise noch nicht optimal installiert, Räume teilweise noch nicht bezogen.



Messauswertung Holzfeuchte von Probekörper zwischen Dämmung und Wand November 2007

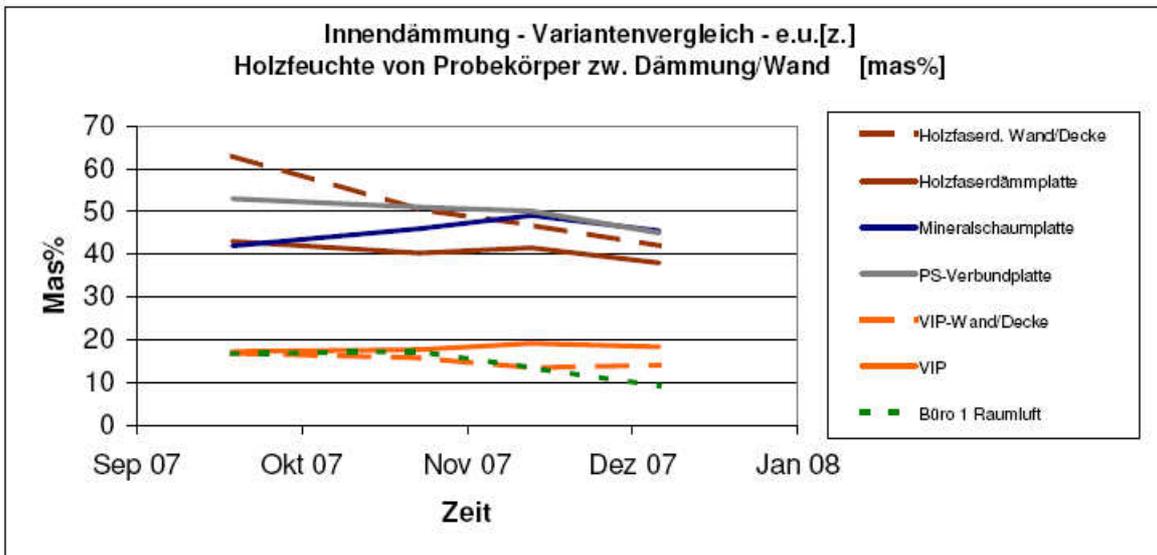
Legende: HFD Holzfaserdämmplatte, VIP Vakuumpanelle, MsP Mineralschaumplatte, PS Polystyrol-Verbundplatte, D/W Bereich(Dämmung/Wand, WB Wärmebrücke - Messfühler teilweise noch nicht optimal installiert, Räume teilweise noch nicht bezogen.



Messkonzept

Holzfeuchtemessung

Standort Datum	Holzfaserd. Wand/Decke	Holzfaserdä mmplatte	Mineralscha umplatte	PS- Verbund platte	VIP- Wand/ Decke	VIP	Böro 1 Raumluft	Innen temper atur	Witterung
02.10.2007	63,0	43	42,0	53,0	16,9	17,3	16,8	20	trocken
06.11.2007	50,5	40,3	46,0	51,0	15,8	17,7	17,3	20	Regen
27.11.2007	46,8	41,5	49,1	50,1	13,5	19,2	13,5	20	Bewölkt nach längerem Regen
21.12.2007	42,0	38	45,5	45,0	14,1	18,4	9,2	20	trocken, kalt -2 Grad



Teil F Konstruktive Anforderungen

Grundlagen für die Konstruktion

Bauphysikalische Grundlagen

Für den Einsatz von Vakuum Innendämmung muss eine sorgfältige Planung durchgeführt werden, welche die bauphysikalischen Parameter möglichst präzise einbezieht.

Neben der Betrachtung der Diffusionsvorgänge müssen folgende Grundvoraussetzungen für den Einsatz von Innendämmung zur Vermeidung von Bauschäden gewährleistet sein:

- Keine aufsteigende Kapillarfeuchtigkeit der zu dämmenden Außenwand
- Sicherer Schlagregenschutz
- Luftdichter Aufbau der Innendämmkonstruktion gegen konvektiven Feuchteeintrag aus der Raumluft

Wärmebrückenreduktion an allen Anschlusspunkten der Innendämmung. [PHI 2006]

Die Beachtung weiterer Aspekte kann für den Erfolg der Maßnahme ebenfalls ausschlaggebend sein wie die Luftfeuchtigkeit in den Räumen, damit verbunden die Lüftungskonstellation sowie die Gestaltung der Heizwärmezufuhr.

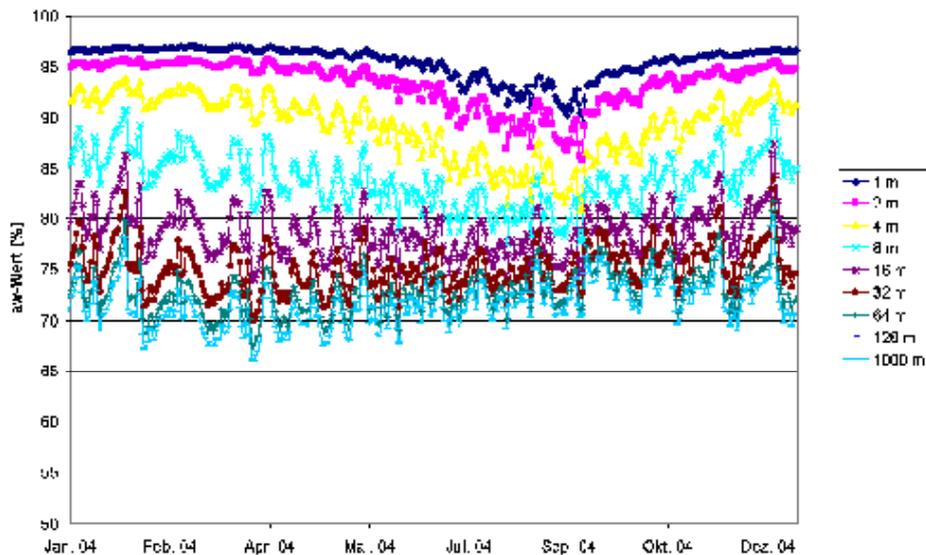
Diffusion

Bei Innendämmung sind hinsichtlich der Diffusionsaspekte grundsätzlich zwei unterschiedliche Konzepte möglich. Einerseits können kapillaraktive Dämmstoffe in einer luftdichten aber diffusionsoffenen Konstruktion verwendet werden. Die zweite Variante ist der Einsatz einer Dampfbremse, durch welche die Dampfdiffusion von innen nach außen auf der warmen Seite reduziert wird, um die kalte Konstruktion außerhalb der Innendämmung vor Feuchtebelastung zu bewahren. In Abb. X wird der Einfluss des s_d -Wertes der Dampfbremse am Beispiel von 8 cm Innendämmung aus Mineralwolle dargestellt: bei dieser konventionellen Innendämmung liegt das Optimum von s_d hinsichtlich Aufwand und Effekt etwa im Bereich von 16 m bis 128 m. Feuchteadaptive Dampfbremsen weisen im allgemeinen in der Wintersituation einen s_d -Wert zwischen 4 und 9 m auf und sind deshalb für den Einsatz bei Innendämmung nicht ideal einsetzbar.

VIP-Innendämmung mit seinem sehr hohen s_d -Wert stellt eine sehr gute Grundlage hinsichtlich des Diffusionsverhaltens dar.

Bei allen Konstruktionen ist der Erfolg davon abhängig, inwieweit Anschlussprobleme ausgeschaltet werden können und der Einbau mängelfrei erfolgt. Technisch aufwändig sind vor allem Konstruktionen mit Holzdurchdringungen, wie z. B. bei Holzbalkendecken,

die auf den Außenwänden aufliegen. Massivdecken sind detailmäßig einfacher einbindbar.



Einfluss des s_d -Wertes der Dampfbremse am Beispiel von 8 cm Innendämmung aus Mineralwolle: bei konventioneller Innendämmung liegt etwa im Bereich von 16 m bis 128 m ein Optimum hinsichtlich Aufwand und Effekt. VIP-Innendämmung mit seinem sehr hohen s_d -Wert stellt mithin eine sehr gute Grundlage hinsichtlich des Diffusionsverhaltens dar. [PHI 2006]

Auswirkungen des U-Wertes

Bei Innendämmung empfiehlt sich bei klassischen Dämmstoffen grundsätzlich eine Dämmdicke von 40 bis 100 mm (Wärmeleitfähigkeiten 035 bis 040). Bei den höheren Dämmdicken ergeben sich hieraus nominale U-Werte der Außenwand um 0.25 bis 0.35 W/(m²K). Die effektiven U_{eff} - Werte der Außenwand unter Berücksichtigung der Wärmebrücken liegen auf Grund der sehr relevanten Wärmebrückenaspekte allerdings bei 0.33 bis 0.5 W/(m²K) und somit deutlich höher als bei empfohlenen Außendämmmaßnahmen im Bestand. Zum Vergleich sei an dieser Stelle noch einmal darauf hingewiesen, dass bei energetischer Sanierung mit Außendämmung ohne Probleme Werte zwischen 0.15 und 0.22 W/(m²K) möglich sind.

In Abhängigkeit von den Dämmdicken variieren die hygrischen Speichervorgänge innerhalb der Konstruktion einer Innendämmung. Neben kurzzeitigen sorptiven Ein- und Ausspeichervorgängen in oberflächennahen Schichten finden insbesondere im Bereich des außen liegenden Mauerwerks saisonale Feuchtespeichervorgänge statt. Mit dynamischen Simulationsrechnungen kann das Verhalten über einen Zeitraum von 5 bis 10 Jahren überprüft werden. Die Abbildung zeigt das Feuchteverhalten einer 30 cm Mauerwerkswand mit EPS-Innendämmung mit Dampfsperre in Abhängigkeit von der Dämmdicke. Auch höhere Dämmdicken sind trotz der geringfügig höher liegenden Feuchte schadensfrei ausführbar.

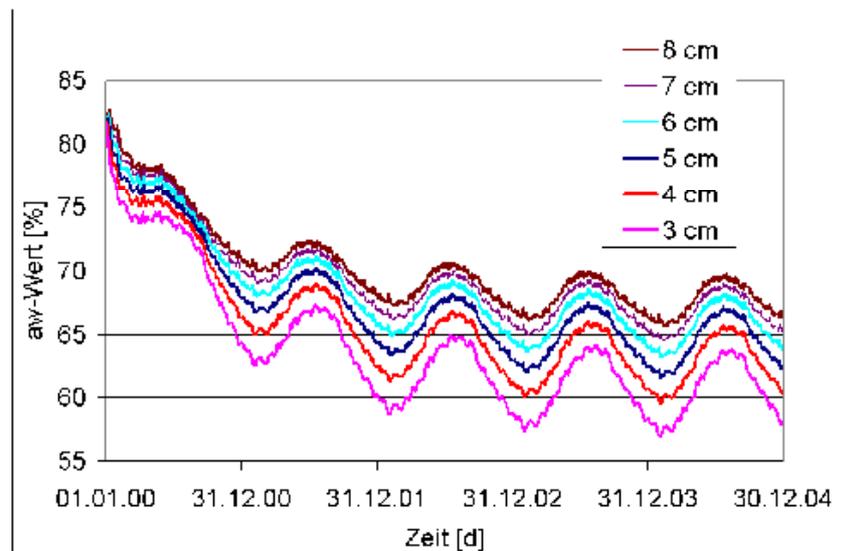


Abb. Feuchteverhalten im Bereich des Innenputzes auf dem Bestandsmauer (aw-Wert) bei EPS-Innendämmung unterschiedlicher Dämmstärke (von 3 bis 8 cm) mit Dampfsperre; wasserabweisende Fassadenbeschichtung, Schlagregengruppe III, Berechnungen mit DELPHIN (Institut für Bauklimatik IBK, TU-Dresden) [PHI 2006]

Ein relevanter Parameter bei der Innendämmung ist die Dicke der Bestandswand, weil neben den höheren Temperaturen auf der Oberfläche des alten Putzes (unter der Innendämmung) sich die höheren Wandstärken auch durch eine stärkere Feuchtepufferwirkung auswirken. Gegenüber dem Fall des innengedämmten Vollziegelmauerwerks mit 30 cm Dicke fallen die maximalen aw-Werte bei einer Außenwand im 51 cm Reichsformat noch günstiger aus. Die sommerliche Austrocknung ist bei letzterer aber etwas geringer. Bei besonders schlanken Wandquerschnitten, wie sie im Fachwerkbau mit 12 cm Ausfachung üblich sind, können dagegen deutlich höhere aw-Werte auftreten. [PHI 2006]

Aufsteigende Kapillarfeuchte

Eine Grundvoraussetzung für den Einsatz von Innendämmung besteht darin, dass die zu dämmende Außenwand kein Problem mit aufsteigender Kapillarfeuchte aufweist. Ein kontinuierlicher Feuchtetransport aus dem Keller-, Sockel oder Fundamentbereich führt zu einer überhöhten Feuchte, die zwangsläufig Schäden auf der Außen- und Innenseite des Mauerwerks nach sich ziehen würde. Deshalb ist eine genaue Überprüfung der Mauerwerksfeuchte und ihrer Ursachen erforderlich und eine sichere Abdichtung gegen aufsteigende Feuchtigkeit auszuführen.

Schlagregenschutz

Der Eintrag von Feuchtigkeit durch Schlagregen in eine Außenwandkonstruktion kann beim Einsatz von Innendämmung zu wesentlichen Schäden in der Konstruktion führen.

Deshalb ist eine diesbezügliche Überprüfung der Fassade im Zuge der Planung von sehr hoher Bedeutung.



Abb. 2.4 Darstellung der regionalen Verteilung der Schlagregenbeanspruchungsgruppen in der Bundesrepublik Deutschland nach DIN 4108-3, Anhang C [DIN 4108-3]

Die räumliche Verteilung der Schlagregenbeanspruchung wird in Abbildung 2.4 dargestellt. Die höchste Beanspruchung mit Beanspruchungsgruppe III weisen vor allem die Gebiete in den Küstenregionen, dem Alpenvorland sowie in windreichen Gebieten der Mittelgebirge auf. Für jedes Gebäude muss überprüft werden, ob darüber hinaus eine individuell windexponierte Lage gegeben ist. Darüber hinaus sollten in Abhängigkeit von der Ausrichtung die windbelasteten Fassaden einer erhöhten Sorgfalt unterzogen werden.

Nach der DIN [DIN 4108-3] wird die Schlagregenbeanspruchung in drei Gruppen eingeteilt:

- Beanspruchungsgruppe I: d. h. geringe Beanspruchung, Jahresniederschlagsmenge unter 600 mm und windgeschützte Lagen (auch bei höheren Mengen),
- Beanspruchungsgruppe II, d. h. mittlere Beanspruchung, Jahresniederschlagsmenge von 600 mm bis 800 mm und windgeschützte Lagen (auch bei höheren Mengen) sowie Hochhäuser und exponierte Lagen mit geringer Beanspruchung
- Beanspruchungsgruppe III, d. h. starke Beanspruchung, Jahresniederschlagsmenge über 800 mm oder windreiche Lagen (auch mit

geringeren Mengen) sowie Hochhäuser und exponierte Lagen bei mittlerer Beanspruchung.

Fachwerk verhält sich äußerst problematisch hinsichtlich der Schlagregensituation. Deshalb wird die Verwendung von Vakuum-Innendämmung in Verbindung mit diesen Konstruktionen nicht empfohlen. Insbesondere bei freigelegtem Fachwerk liegt die maximal zulässige Beanspruchung nach WTA-Merkblatt 8 8-1-96-D (Wissenschaftlich – Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V.) mit $140 \text{ l}/(\text{m}^2\text{a})$ im Übergangsbereich zwischen Beanspruchungsgruppe I und II. Selbst bei sorgfältiger Ausführung während der Sanierung kann auf Grund von Bewegungen zwischen den unterschiedlichen Konstruktionsteilen ein Wassereintritt im Bereich von Fugen zwischen Balken und Ausfachung oder innerhalb der Balken erfolgen.

Sichtmauerwerk ist in zahlreichen Konstruktionsformen möglich und muss deshalb individuell beurteilt werden. **Vollziegelmauerwerk** wurde in der Gründerzeit oftmals in Verbindung mit **Verblendmauerwerk** im Verbund gemauert. Bei diesen Konstruktionen ist sowohl die Situation der Mauerwerksfugen zu überprüfen als auch das Mauerwerk hinsichtlich seiner Aufnahmefähigkeit für Feuchte aus Schlagregen. Eine Hydrophobierung wird im Allgemeinen erforderlich sein, wobei eine sehr genaue Untersuchung der dazu erforderlichen Rahmenbedingungen erforderlich ist. Die gleiche Situation ist bei Konstruktionen mit Sparverblendern gegeben.

Zweischaliges Mauerwerk in Form von **Verblendmauerwerk mit Luftzwischenraum** zum tragenden Mauerwerk ist bei späteren Baujahren vor allem ab den fünfziger bis sechziger Jahren anzutreffen. Die Luftzwischenräume sind in den meisten Fällen hinterlüftet und weisen eine Schichtdicke von drei bis sieben Zentimetern auf. Diese kann oftmals mit kapillarbrechender Perliteschüttung bzw. Mineralfaser verfüllt werden, ohne dadurch allerdings einen zufrieden stellenden U-Wert für die Außenwandkonstruktion zu erhalten. Zweischaliges Mauerwerk ist aus bauphysikalischer Sicht in den meisten Fällen gut zur Verwendung von VIP-Innendämmung geeignet.

Natursteinfassaden sind zu überprüfen auf ihre Fugen und den spezifischen Schlagregeneintrag des Steinmaterials. Dies kann individuell sehr unterschiedlich sein und erfordert ein Fachgutachten.

Putze und Beschichtungen können einen sehr guten Schlagregenschutz darstellen. Anforderungen für die Schlagregenschutzwirkung werden nach DIN 4108 und 18550 [DIN 4108-3 und DIN 18550 Teil 1] gestellt. Für Gebäude in der Beanspruchungsgruppe II müssen mindestens wasserhemmende, für Beanspruchungsgruppe III wasserabweisende Putze ausgeführt werden.

Für die energetische Sanierung in schlagregenbelasteten Regionen ist deshalb der Auftrag wasserabweisender hydrophober aber diffusionsoffener Außenputze geboten. Ein Aufbau mit einem möglichst diffusionsoffenen Leichtunterputz (s_d ca. $0,06 \text{ m}$) in Verbindung mit einem silikatischen Mineralleichtputz ($s_d < 0,1 \text{ m}$) kann angewandt

werden. Als Fassadenfarbe bietet sich Silikonharzfarbe (s_d ca. 0,03 m, w ca. 0,05 kg/(m²h^{1/2}) als wasserabweisende Beschichtung an. Der gesamte s_d -Wert beschränkt sich dabei auf ca. 0,2 m. [PHI 2006]

Konvektion und Luftdichtheit

Luftundichtheiten in der Gebäudehülle führen zu einem deutlich höheren Feuchtetransport als die Kapitel 2.1 beschriebenen Diffusionseffekte. Deshalb ist es beim Einsatz von Vakuuminnendämmung extrem wichtig, eine hohe Luftdichtheit in den gedämmten Bereichen zu erzielen.

Probleme ergeben sich z. B. bei folgenden Situationen:

- **Fachwerkwände** weisen an ihren charakteristischen Übergängen von Holzträgerwerk zu Gefachen Fugen auf. Auch eine fehlerfreie Konstruktion bei Abnahme garantiert keine langfristig luftdichte Fachwerkkonstruktion.
- Die Einbindung von **Holzbalkendecken** in Außenwände erfolgt meistens in unverputzten Fehlbodenbereichen, dort ist regelmäßig eine hohe Undichtheit gegeben. Sowohl in der Außenwandfläche als auch an den Auflagern sowie rund um die Balkenköpfe ist Luftdichtheit herzustellen.
- **Mauerwerk** weist bei Fugen im Innenputz mitunter Luftundichtheiten auf, insbesondere bei porigem Mauerwerk oder in Verbindung mit Luftkanälen, z. B. durch Elektroinstallationen.

Die **Innendämmung** selbst weist oftmals an den unteren, oberen und seitlichen Anschlüssen Undichtheiten zu den anschließenden Konstruktionsteilen auf. Deshalb ist es besonders wichtig, dass die Innendämmung auf der Fläche zur Außenwand vollflächig und ohne Luftzwischenräume angebracht wird. Das kann durch vollflächige Kleber erfolgen oder durch ein verformbares Dämmmaterial. Dadurch wird vermieden, dass Raumluft hinter der Innendämmung zirkuliert und sich Konvektionsfeuchte in diesem kalten Bereich niederschlägt.

Abhängigkeit von der Luftfeuchtigkeit und Lüftung

Die relative Luftfeuchte in Gebäuden mit Innendämmung hat einen relevanten Einfluss auf die Rahmenbedingungen des Feuchteverhaltens. Je niedriger die Raumluftfeuchte in den relevanten Wintermonaten liegt, desto einfacher lassen sich die bauphysikalischen Anforderungen der Innendämmung erfüllen.

Wird in einer Simulationsberechnung die relative Feuchte bei 60, 50 und 40 % für die Innenraumluft angesetzt, so ergibt sich bei einer feuchtetechnisch ungünstigen Variante mit 80 mm Innendämmung aus EPS ohne Dampfbremse für die Raumluft mit 40 % (Mittelwerte in den Wintermonaten) relativer Feuchte gerade noch ein a_w -Wert von 80 %,

bei einem Mittelwert in den Wintermonaten von 60 % r.F. sogar 90 % überschritten (s. Abbildung).

Mit ventilatorgestützter Wohnungslüftung stellt sich typischerweise in den relevanten Monaten Januar bis März eine Raumlufffeuchte von 40 % bis 30 % ein. D. h. durch die Lüftungstechnik wird nicht nur gute Raumluffqualität sichergestellt, sondern es werden auch günstige Rahmenbedingungen für den Einsatz von Innendämmung geschaffen. Es

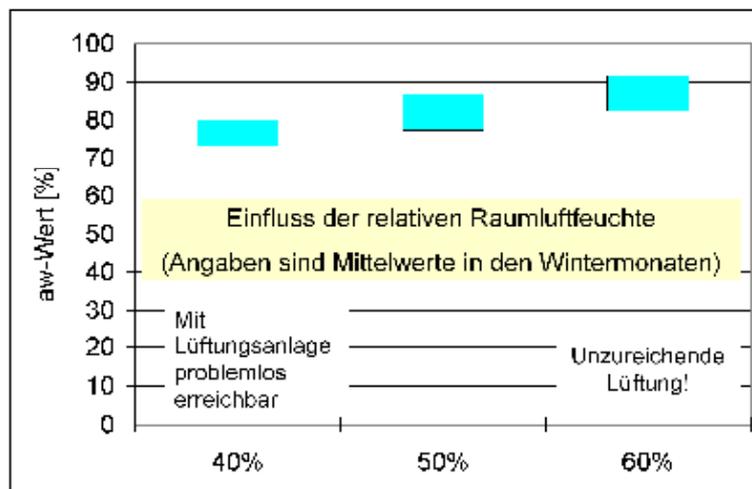


Abb. Änderung des aw-Wertes einer innen gedämmten Wand in Abhängigkeit von der relativen Raumlufffeuchtigkeit am Beispiel von 80 mm EPS Innendämmung ohne Dampfbremse [PHI 2006]

muss allerdings darauf hingewiesen werden, dass dennoch eine bauphysikalisch einwandfreie Lösung ausgeführt werden sollte.

Einflüsse der Heizwärmezufuhr

Da Feuchtigkeit sich immer in den kältesten Bereichen eines Raumes niederschlägt, kann durch die zielgerichtete Planung der Heizwärmeübertragung neben dem Einsatz der Lüftungstechnik ein weiterer günstiger Rahmenaspekt beim Einsatz von Innendämmung erzielt werden. Wird die Heizwärme mit möglichst gleicher Verteilung an den bauphysikalisch ungünstigsten Stellen positioniert, z. B. im Bereich der Außenwand vor der Innendämmung, so werden die Parameter Feuchte und Temperatur günstig beeinflusst – es wird mithin ein zusätzlicher Puffer für die bauphysikalischen Aspekte geschaffen.

Einsatzmöglichkeit

Der Einsatz von VIP-Dämmung ist nicht in allen Bereichen sinnvoll und möglich. Die Einsatzmöglichkeit variiert in Abhängigkeit von Konstruktion, Baujahr, Zustand und Rahmenbedingungen.

Abgeleitet aus den bauphysikalischen Grundlagen in Kapitel 2 werden in folgender Matrix Empfehlungen zum Einsatz von Vakuum-Innendämmung gegeben. Es wird jedoch darauf hingewiesen, dass bei jedem Objekt die individuellen Rahmenbedingungen präzise überprüft werden müssen, um zu den angemessenen Lösungen zu kommen und eine schadensfreie Konstruktion zu erhalten.

Tabelle : Empfehlungen zum Einsatz von VIP-Innendämmung bei unterschiedlichen Wandkonstruktionen

Bauteil	Einsatz VIP-Innendämmung	Anmerkungen
Außenwandkonstruktionen		
Freigelegtes Fachwerk	Nicht empfohlen	
Fachwerk, verputzt	Nicht empfohlen	Ggf. bei günstigen Rahmenbedingungen Einsatz möglich, durch Gutachten überprüfen
Fachwerk, verkleidet mit Hinterlüftung	Bedingt empfohlen	Ggf. bei stimmigen Rahmenbedingungen Einsatz möglich, durch Gutachten überprüfen
Vollziegelmauerwerk	Bedingt empfohlen	Schlagregenschutz ggf. durch Gutachten überprüfen
- mit Vormauerziegeln	Bedingt empfohlen	Schlagregenschutz ggf. durch Gutachten überprüfen
Zweischaliges Mauerwerk	empfohlen	
Natursteinfassaden	Bedingt empfohlen	Schlagregenschutz ggf. durch Gutachten überprüfen
Verputztes Mauerwerk	empfohlen	Schlagregenschutz überprüfen
Dachkonstruktionen		
Schrägdach mit Dachziegeln	empfohlen	Dachabdichtung prüfen, evtl. Vordeckung erneuern
Flachdach	empfohlen	Dachabdichtung prüfen
Kellerdecken		
Holzbalkendecke	bedingt empfohlen	Luft- und dampfdichte Anschlüsse an Holzbalken prüfen, evtl. Holzfügen – und risse dauerhaft verschließen Planebene Unterlage erstellen, evtl. Balkenausgleich durch Beibalken
Trägerdecke	empfohlen	Planebenen Ausgleich als Montagegrundlage herstellen
Stahlbetondecke	empfohlen	
Bodenplatten		
(Stahl)-Betonbodenplatte	empfohlen	Feuchtigkeitsabdichtung prüfen Planebene Unterlage herstellen, evtl. Vliesunterlage als Ausgleich der Schweißbahnstöße Dampfsperre mit Dichtanschluß an alle aufgehenden und begrenzenden Bauteile einbauen; Randdämmstreifen einbauen

Handlungsanweisungen

Innendämmungen stellen die anspruchsvollste Form der Dämmmaßnahmen an einem Gebäude dar. Da hier bauphysikalische und bautechnische Komponenten vereint werden müssen, sind hier Theorie und Praxis konsequent in einer Gesamtlösung zu vereinbaren.

QASA/VIP-Dämmelemente wurden in langjähriger Entwicklung als bausichere Elemente entwickelt.

Der Schutz der Platten und das einfache Handling, sind Grundvoraussetzung zur mängelfreien Montage aller Systemvarianten.

Beide Projekte haben gezeigt, dass die hohe Systemsicherheit durch Schutz vor Beschädigungen wesentlicher Bestandteil der Systemlösungen ist.

Bedingt durch die Verwendung von mechanischen Befestigungsmitteln, sowie im Bauwerk vorhandene Maßtoleranzen, ist es wichtig Fehlertoleranzen, Fugendichtigkeiten und die baupraktische Umsetzung in einer qualitativ hochwertigen Gesamtlösung zu integrieren.

Dem Verarbeiter müssen Grundlagen vermittelt werden, die ihn befähigen mit den Vakuum- Dämmsystemen umzugehen und zu arbeiten. Dabei sind zum geringen Anteil, bedingt durch die hohe baupraktische Anwendbarkeit der QASA Systeme, die mechanisch – technischen Systemgrundlagen wesentlich, sondern vielmehr die bauphysikalische Wirkweise einer Innendämmung an sich.

Die mechanisch technischen Grundlagen umfassen neben der Verarbeitung vor allem auch die Aufmass-Situation und die Integration der Folgegewerke als Schnittstelleninformation.

Die bauphysikalischen Grundlagen müssen die Hinweise zum erforderlichen dampf- und fugendichten Einbau beinhalten. Hier wird zudem eine qualitative Grundlage geschaffen, um Mängel aus Nichtwissen der Verarbeiter in diesem bauphysikalisch hochkomplexen Dämmbereich zu vermeiden.

Hierbei ist der Verarbeiter in einem Handbuch umfänglich zu informieren. Die Erstellung dieses Handbuches wird nach dem Abschluss dieses Forschungsberichtes für alle anwendungsfähigen Innendämmsysteme erarbeitet.

Die Matrix des Handbuches umfasst für jedes System

- Systemaufbau QASA Dämmsystem mit VIP Kern und Deckschichten
- U – Werte und mögliche Elementstärken

- Einbaudetails als Systemschnitte
- Dichtebenen und zu verwendende Materialien
- Bauphysikalische Angaben und Grundlagen zur Umsetzung in der baulichen Situation

Grundkonstruktionen

Es werden 2 Systemschnitte dargestellt, welche klassischen Innendämmsituationen aufzeigen und beschreiben.

Grundlegend sind nun alle Systemanwendungsbereiche in dieser Form zu detaillieren und in einem Detailbuch für Innendämmung darzustellen.

Durch den großen Unterschied der Konstruktionen sind hier sehr umfangreiche Arbeiten und Planungen nötig.

Durch die Vielzahl verschiedener bauepochenabhängiger Möglichkeiten stellt dieses Detailkompendium den Kern der Anwendung für Innendämmungen dar und muss im Nachgang zu dem Forschungsbericht grundlegend erarbeitet werden.

Diese Arbeitsgrundlage ermöglicht auf Basis der Forschungsergebnisse eine wirtschaftliche und zeitgerechte Anwendungsausführung.

Systemdetails:

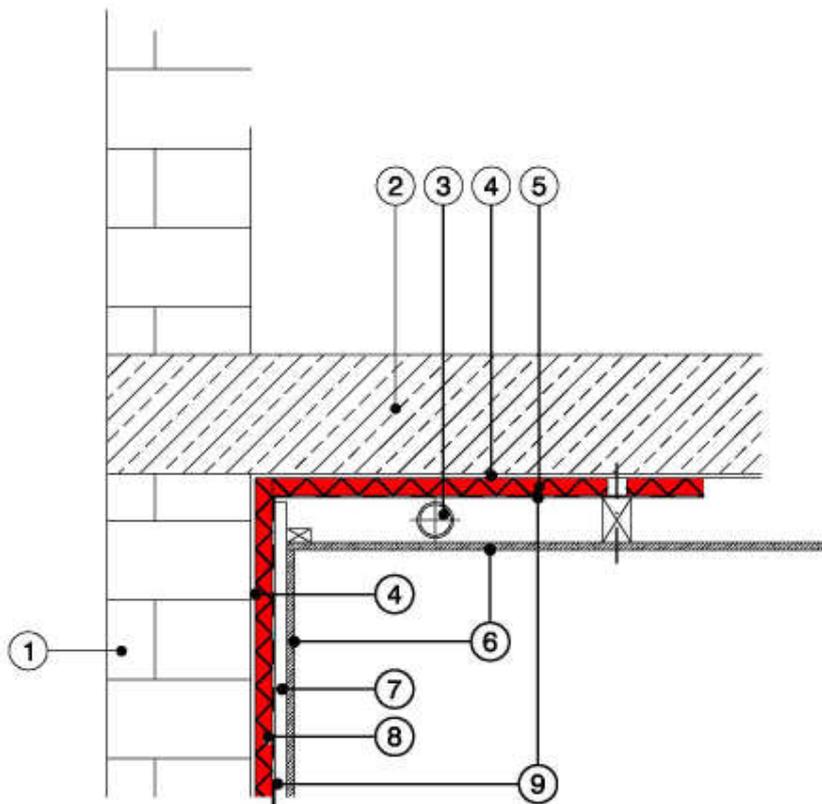
Nachfolgend werden ausschnittsweise 2 Detailmöglichkeiten dargestellt um die grundsätzliche Anwendung der Vakuum-Innendämmung aufzuzeigen.

Die Innenwanddämmung in Verbindung mit der Bodeninnen- und Deckeninnendämmung zeigt die bautechnischen Möglichkeiten auf um QASA VIP Dämmungen im Innenbereich anzuwenden und mit herkömmlichen üblichen Decklagen raumseitig zu kombinieren.

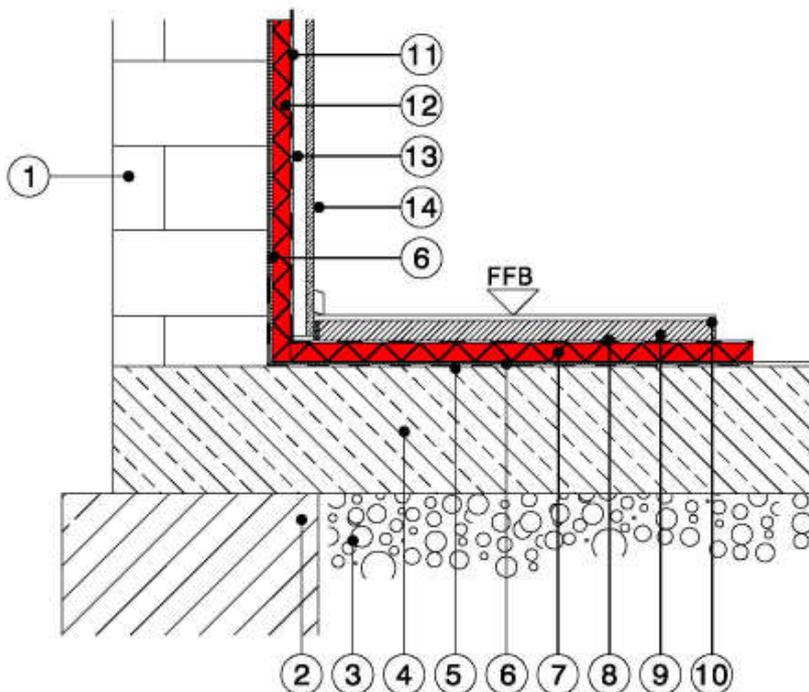
Wichtig ist hierbei die wärmebrückenfreie und fugendichte Detailführung, sowie die mechanischen Befestigungslösungen für Innenschalen und bei Innendämmungen erforderliche haustechnische Leitungsführungen der Lüftungsrohre etc.

Nachfolgend werden Innendämmungs- Einsatzbereiche mit QASA-Vakuumdämmpaneelen aufgezeigt, welche bedingt durch die Häufigkeit des Lösungsbedarfs eine wichtige Ausführungsgrundlage darstellen.

Das Detailbuch muss zudem Isothermen Darstellungen der gewählten Lösungen beinhalten um die bauphysikalische Umsetzbarkeit zu dokumentieren und zu prüfen.



- 1 best. Mauerwerk
- 2 Deckenplatte
- 3 Lüftungsrohr
- 4 Edelhanf
- 5 VIP QASAc ceiling
- 6 Gipskarton
- 7 Unterkonstruktion
- 8 VIP QASAr room
- 9 raumseitige Dampfsperre



- 1 best. Mauerwerk
- 2 Fundament
- 3 Kiesfilter
- 4 Bodenplatte
- 5 Schweißbahn/Abdichtung
- 6 Edelhanf
- 7 VIP QASAFloor
- 8 Dampfsperre; vollflächig als Unterlage für den Estrich
- 9 Estrich
- 10 Fußbodenbelag
- 11 raumseitige Dampfsperre
- 12 QASAr room
- 13 Unterkonstruktion
- 14 Gipskarton

Erforderliche Fehlertoleranz

Wesentliche Grundlage für die mängelfreie Anwendung der QASA Vakuum-Innendämmelemente sind fugendichte und wärmebrückenfreie Anschlüsse und Verbindungen.

Da Fehlertoleranzen in einer üblichen Bausituation unvermeidlich sind, stellen zur Integration der Maß- und Fehlertoleranzen in den Planungs- und Ausführungsprozess nachfolgend dargestellte Maßnahmen wichtige Voraussetzungen für eine hochwertige Ausführung dar:

- Ein genaues Aufmass verformungsgerechtes auf der Baustelle
- die Einarbeitung von baubedingten abweichenden Maßlichkeiten in das Aufmass bzw. in die Vakuumdämmplatten Produktion
- Systemmöglichkeiten zur Anpassung der System-Dämmplatten durch Bearbeitung
- Die Prüfung des Verlegeuntergrundes hinsichtlich Unebenheiten
- Die Angabe der Einbausituation und Lastangaben wie Flächenlasten, Punktlasten seitens des Planers oder Verarbeiters
- Angabe von Durchdringungen, Befestigungsmitteln
- Die Fertigung passgenau einzuarbeitender Vakuum-Dämmplatten

Grundsätzlich ist eine Verformung der Vakuum-Dämmelemente zu vermeiden um Belastungen der Folienstöße und Abklebungen zu vermeiden.

Anhand der folgenden Kurzbeschreibungen werden die wichtigsten Voraussetzungen erörtert

Wand - Innendämmung

- Diese Einbausituation ist im Projekt Neuwied beschrieben und zeigt die Verwendung einer Zwischenlage zum Ausgleich für Bestandsunebenheiten der Unterkonstruktion auf.
- Die Befestigung der inneren Vorsatzschale aus Metallständerprofilen oder einer Lattenunterkonstruktion ist bezugnehmend auf ein Einschraub- oder Befestigungsraaster oder eine freispannende Konstruktion zu prüfen.

- Das Aufmass muss an mehreren Punkten genommen werden um wie bei Projekt beschrieben bauseitige Anpassungsarbeiten zu vermeiden. Ein verformungsgerechtes Aufmass ist hier erforderlich und ist mit einfachen Mitteln durch Lasertechnik, Zollstock oder Maßband umsetzbar.
- Zu beachten sind erforderliche Wanddurchdringungen

Decken - Innendämmung

- In Kombination mit der Wandinnendämmung ist hier besonderes Augenmerk auf Unebenheiten in der Deckenkonstruktion bzw. die Befestigung der raumseitigen Unterkonstruktionen und haustechnischen Einbauten zu legen.
- Die Deckenunterkonstruktion eignet sich zum Einbau der Leitungsführung erforderlicher Be- und Entlüftungsanlagen sowie zur Verlegung der sonstigen Installationen.
- Dargestellt ist die Situation einer Deckeninnendämmung unterhalb eines nicht beheizten Obergeschosses.
- Zu beachten sind Durchdringungen und Leistungsschächte

Boden – Innendämmung mit Estrichaufbau

Sowohl für unterkellerte wie auch nicht unterkellerte Decken- oder Bodenplatten ist eine Bodeninnendämmung wesentlich für eine platz sparende und hocheffiziente Innendämmmaßnahme.

Zu beachten ist

- Die Abdichtungslage unterhalb der Bodenplatte mit entstehenden Überlappungen
- Der Ausgleich der Unebenheiten der Betonplattenoberfläche ist durch eine Ausgleichsschicht Folge zu leisten
- Zu berücksichtigen sind Stütz- und Flächenlasten
- Die Oberfläche ist dampf- und fugendicht an alle begrenzenden Bauteile sowie in der Fläche auszubilden. Dies kann durch ein Abkleben aller Fugen- und Randstöße erfolgen oder durch eine Vollfläche Abdichtungslage mit kraftschlüssigem Randanschluss bewerkstelligt werden.
- Maßgeblich ist hier die Oberfläche der aufgehenden Bauteile, der Untergrund ist hier z.B. durch Putzauftrag eben geeignet vorzubereiten

Maßabweichungen bei bauseitigen Einbausituationen können durch konfektionierte QASA Systeme gelöst werden. Hier besteht die Möglichkeit durch bearbeitbare Randbereiche (QASAFlex) bzw. durch flexible Randabschlüsse mit Quellbändern hohe Fugendichtigkeiten zu erreichen und eine Anpassung der Elemente an die Bausituation zu ermöglichen.

Hinweise zur Baustellenabwicklung

Die Qualität der Innendämmmaßnahmen wird durch eine klare Schnittstellenlösung bestimmt.

Eine qualifizierte Baustellenabwicklung erfordert die Zuteilung von Aufgaben und Leistungen nach folgendem Schema.

Abwicklung einer QASA Vakuum-Innendämm-Maßnahme

- Aufgrund der Anfrage wird anhand von Bildmaterial und/oder einer Ortsbegehung durch einen VARIOTEC Fachmann eine Maßnahmenlösung bestimmt
- Seitens des Verarbeiters oder Planungsbüro wird ein genaues verformungsgerechtes Aufmass erstellt und die Einbausituation detailorientiert dargestellt, Planunterlagen werden übermittelt. Systemdetaillösungen werden von VARIOTEC als Grundlage übermittelt
- Fa. VARIOTEC fertigt einen Verlegeplan in Abstimmung mit dem Verarbeiter oder Planungsbüro und klärt relevante Detailfragen
- Es werden vorbereitende Maßnahmen nach Abstimmung mit VARIOTEC durchgeführt
- Die QASA Vakuum Dämmplatten werden gefertigt, mehrstufig geprüft und geliefert
- Es folgt der Platteneinbau auf der Baustelle mit Ergänzung der Ausbauarbeiten

Bildfolge zu Einbausituationen

Die Bildfolge wird im Bereich 5.2. Projekt Springe-Eldagsen dokumentiert.

Zusammenfassung und Ausblick

Können die Voraussetzungen für den Einsatz von Vakuum-Innendämmung erfüllt werden, so stellt diese Form der Dämmung eine gute Option bei der energetischen Sanierung von Gebäuden dar. Sie verbessert die Behaglichkeit und erbringt eine entscheidende Energieeinsparung, wenn eine Außendämmung nicht möglich ist.

Dennoch sollte bei jedem Objekt gewissenhaft geprüft werden

Bei schützenswerten Objekten sollte eine intensive Zusammenarbeit mit Denkmalschützern bereits ab den ersten Planungsphasen angestrebt werden. Es setzt sich die Erkenntnis durch, dass energetische Sanierung ein wesentlicher Impuls für die Ertüchtigung des Bestandes darstellt – also auch von historisch bedeutsamer Bausubstanz. Dabei rücken in den letzten Jahren auch viele Objekte der fünfziger bis siebziger Jahre des letzten Jahrhunderts ins Blickfeld. Viele Fachleute aus dem Denkmalschutzbereich bringen in sehr konstruktiver ihr Fachwissen ein, wie Gebäude synergetisch unter Beachtung möglichst umfassender Aspekte saniert werden können. Dabei wird gerade bei flächigen Putzfassaden der Einsatz von Wärmedämmverbundsystemen auch von Denkmalschützern zugestimmt. Die meisten Denkmalschutzobjekte können zu einem großen Teil ihrer Hüllflächen von außen gedämmt werden, wobei auch an dieser Stelle noch einmal betont werden sollte, dass dies der bauphysikalisch einfachere und meist auch sinnvollere Weg ist. Die verbleibenden Flächen allerdings können in vielen Fällen mit Innendämmung und insbesondere hocheffizient mit Vakuuminnendämmung energetisch saniert werden.

Grundlage sind hier die Kenntnisse über bauphysikalische Zusammenhänge des Planers und Verarbeiters. So kann eine qualitätvolle Systemlösung umgesetzt werden.

Bei der Analyse der Projekte zeigt sich, dass unter Einsatz von Passivhauskomponenten bei fast allen denkmalgeschützten Gebäuden zumindest eine Energieeinsparung um den Faktor 4 möglich ist, in vielen Fällen auch bis hin zum Faktor 10, wenn der Anteil der innengedämmten Flächen auf einen eher geringeren Prozentsatz gesenkt werden kann.

Literatur

PHI, Protokollband Nr. 32: Faktor 4 auch bei sensiblen Altbauten: Passivhauskomponenten + Innendämmung. – Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Darmstadt 2006

Künzel, H.M.: Feuchteschutz von Fachwerkwänden. Instandsetzung historischer Fachwerkgebäude, WTA-Schriftenreihe (1998), H.16, S. 23-34

Steffen Gnoth: Heizungstechnisch gestützte kapillaraktive Innendämmung bei Holzbalkendecken; Stuttgart : Fraunhofer-IRB-Verl., Schriftenreihe: Bau- und Wohnforschung; 2004

Sedlbauer, Klaus u.a.: Vakuumisolutionspaneele aus hygrothermischer und akustischer Sicht. Online Ressource, Buch: Fachtagung VIP Bau, DE, Wismar, Wuerzburg: Selbstverlag, DE, (2005) IRB

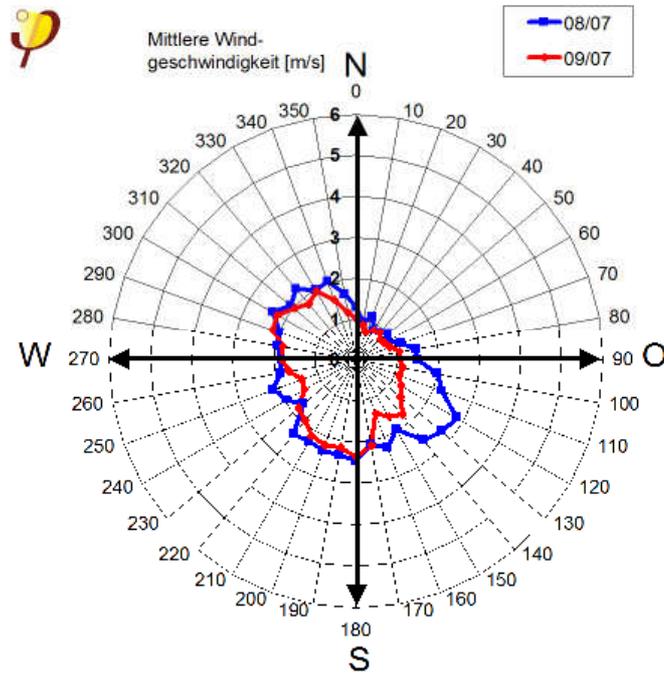
Klein, H.; Zwirger, M.: Vakuumdämmung in Wärmedämmverbundsystemen ; Abschlussbericht zum Verbundforschungsvorhaben; Bericht der Sto AG Stuhlingen : Sto AG, 2005; Förderkennzeichen BMBF 032 7321 J. - Verbund-Nr. 01032292.

Dreyer, J.: Untersuchungen zur thermisch-hygrischen Eignung von Vakuumdaemmplatten zur Sanierung von Gebaeuden der Wiener Gruenderzeit; Bauphysik, Dec 2003, Seite 344-349, Band 25, Heft 6

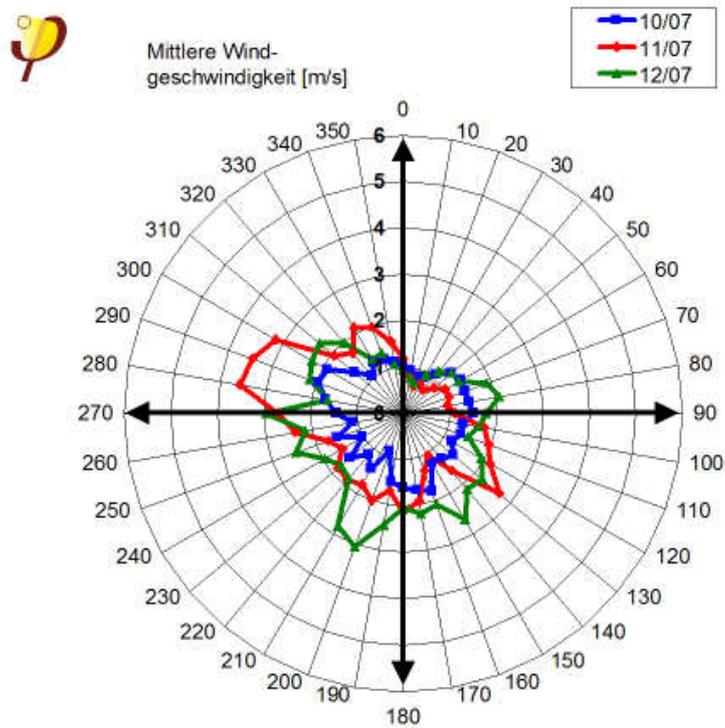
Heinemann, U.: Dämmelement kontra Dämmmaterial - Vakuumisolutionspaneele; Fassadentechnik, Band 12, (2006), Heft 1, Seite 28- 30

Binz, Armin u.a.: Fassadendämmung mit Vakuum, applica, Band 113, (2006), Heft 6, 22-30

Anhang



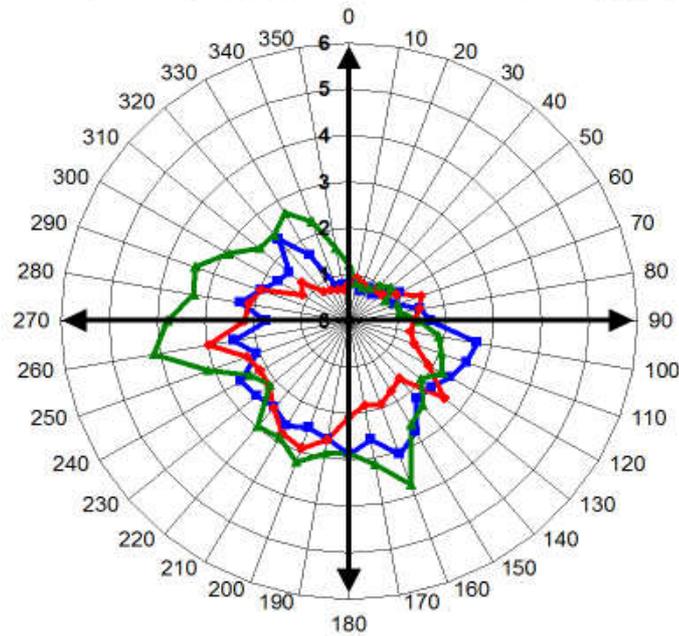
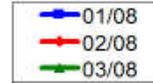
Anhang A 1: Polardiagramm Wind Aug-Sep 2007



Anhang A 2: Polardiagramm Wind 4. Quartal 2007



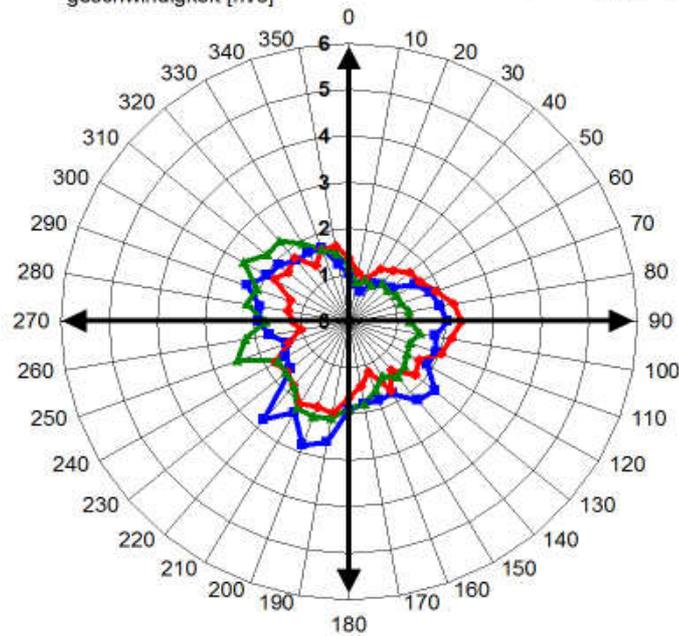
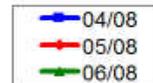
Mittlere Wind-
geschwindigkeit [m/s]



Anhang A 3: Polardiagramm Wind 1. Quartal 2008



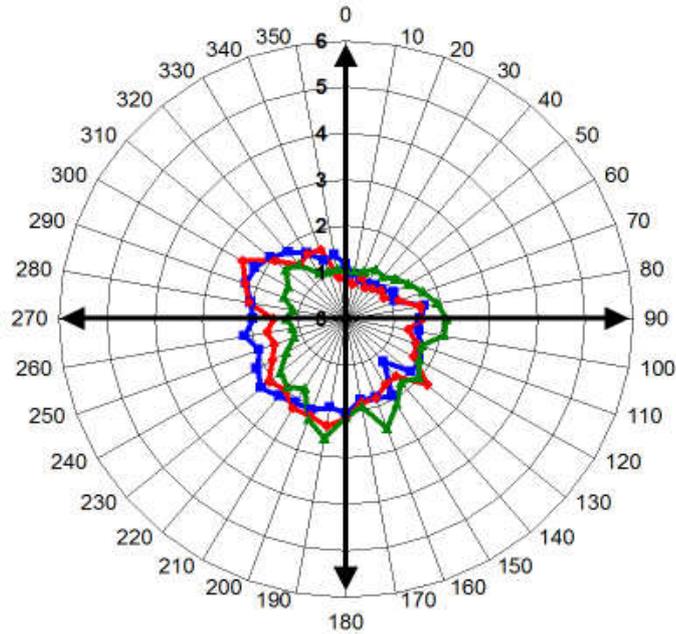
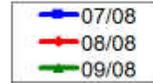
Mittlere Wind-
geschwindigkeit [m/s]



Anhang A 4: Polardiagramm Wind 2. Quartal 2008



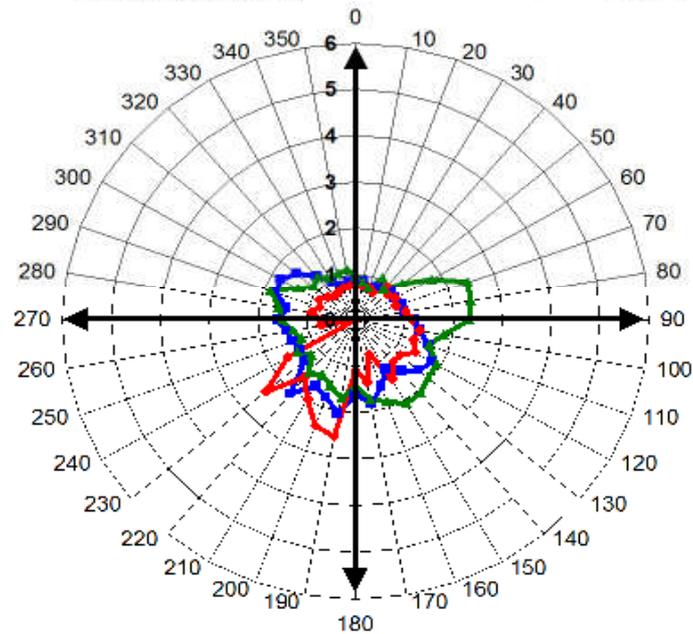
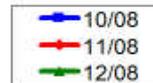
Mittlere Wind-
geschwindigkeit [m/s]



Anhang A 5: Polardiagramm Wind 3. Quartal 2008



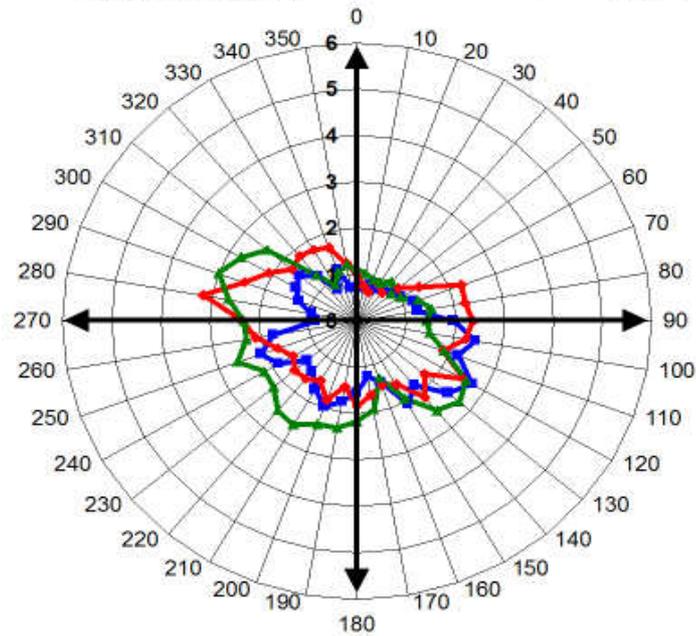
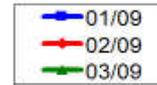
Mittlere Wind-
geschwindigkeit [m/s]



Anhang A 6: Polardiagramm Wind 4. Quartal 2008



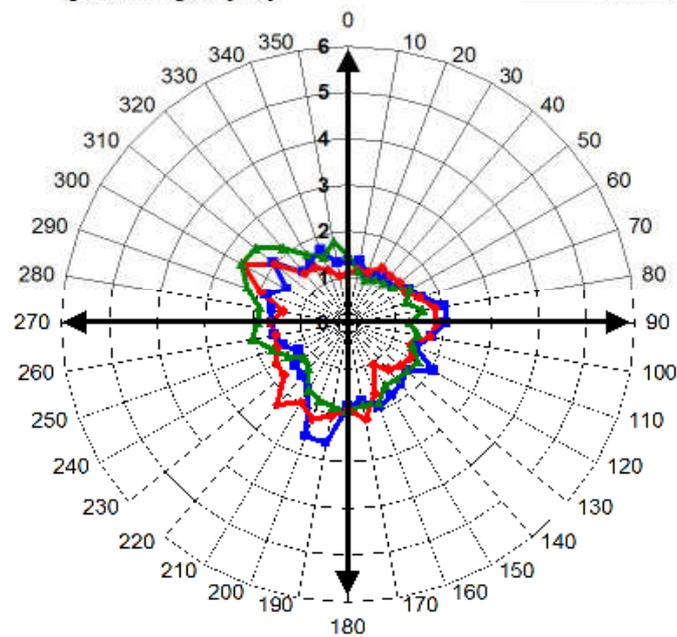
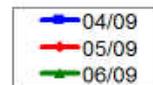
Mittlere Wind-
geschwindigkeit [m/s]



Anhang A 7: Polardiagramm Wind 1. Quartal 2009



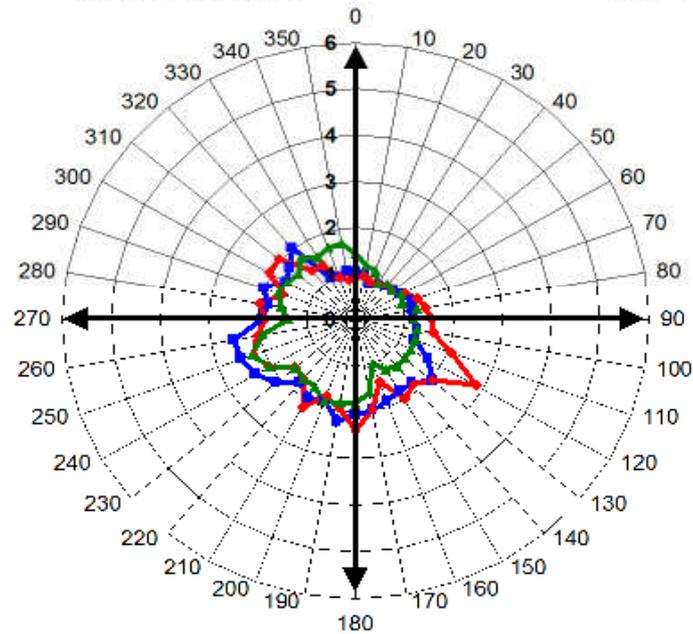
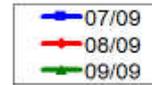
Mittlere Wind-
geschwindigkeit [m/s]



Anhang A 8: Polardiagramm Wind 2. Quartal 2009



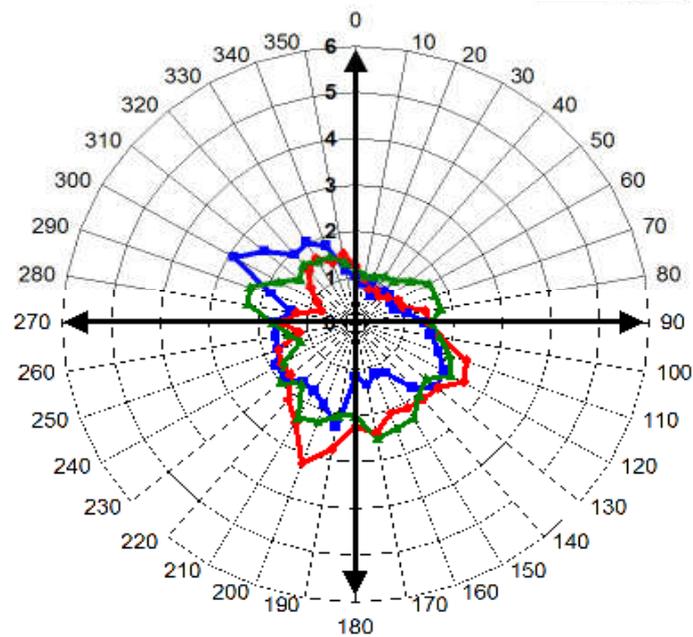
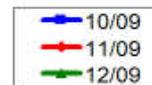
Mittlere Wind-
geschwindigkeit [m/s]



Anhang A 9: Polardiagramm Wind 3. Quartal 2009



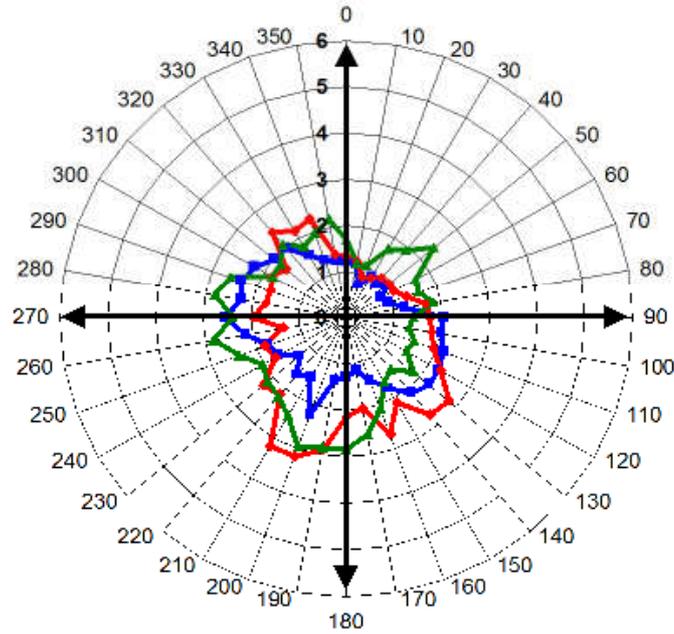
Mittlere Wind-
geschwindigkeit [m/s]



Anhang A 10: Polardiagramm Wind 4. Quartal 2009



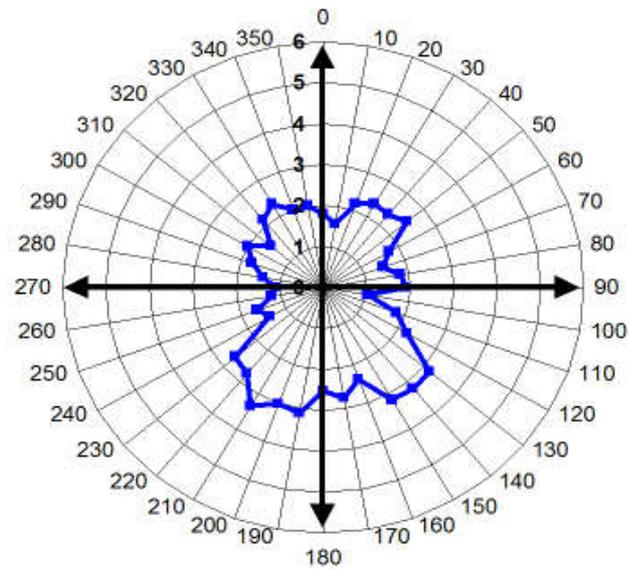
Mittlere Wind-
geschwindigkeit [m/s]



Anhang A 11: Polardiagramm Wind 1. Quartal 2010



Mittlere Wind-
geschwindigkeit [m/s]



Anhang A 12: Polardiagramm Wind Apr 2010