

Arbeitsbereich:

Ökobau, Bauphysik, Baustoff, energieeffizientes Bauen, Feuchteschutz
der Firma:

Calsitherm Verwaltungs GmbH

**Anwendungsgerechte Optimierung
eines Silikatdämmstoffes zur Innenwanddämmung**

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,
gefördert unter dem **AZ: 24058-25** von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Dr. rer. nat. Dipl.-Chem. Winfried Stellmach & Dr.-Ing. Tobias Hölscher

Bad Lippspringe, Januar 2009

1 Inhaltsverzeichnis

1	Inhaltsverzeichnis.....	1
2	Verzeichnis von Bildern und Tabellen.....	2
3	Verzeichnis von Begriffen, Abkürzungen und Definitionen.....	5
4	Zusammenfassung.....	8
5	Einleitung, Hintergrund und Zielsetzung.....	9
6	Hauptteil.....	10
6.1	Fertigungstechnische Produktoptimierung des Silikatdämmstoffes (Firma Calsitherm).....	10
6.1.1	Energetische Optimierung des Herstellungsverfahrens.....	10
6.1.2	Reduzierung der Fertigungskosten.....	11
6.1.3	Verbesserung der bauphysikalischen Eigenschaften.....	11
6.2	Untersuchung der bauphysikalischen Vorteile und Einsatzgrenzen des neuen Dämmstoffes (IBP) 12	
6.2.1	Bestimmung der hygrischen Standardkennwerte.....	13
6.2.2	Widerstandsschicht zwischen den kapillaraktiven Materialien der Sandwichproben.....	14
6.2.3	Bestimmung der Flüssigtransportkoeffizienten.....	15
6.2.4	Approximation der Feuchtespeicherfunktion aus Sorptionskennwerten und freier Sättigung ...	17
6.2.5	Weiterverteilung über die Materialgrenzen.....	18
6.2.6	Optimierung der Materialkennwerte.....	23
6.2.7	Variation der Schichtenabfolge.....	26
6.2.8	Berechnungen zur Anbindung Innenwand/Innendecke.....	31
6.2.9	Bestimmung der Schimmelpilzanfälligkeit (Wachstumsisoplethen).....	38
6.2.10	Berechnungen zur Fehlstellenproblematik.....	39
6.2.11	Akustische Untersuchungen.....	45
6.3	Fazit.....	47
6.4	Öffentlichkeitsarbeit.....	47
7	Literaturverzeichnis.....	48

2 Verzeichnis von Bildern und Tabellen

Bild 1	Schematische Darstellung des Schichtaufbaus der Sandwichplatten.	13
Bild 2	Berechneter Zeitverlauf der Wasseraufnahme für die Sandwichprobe mit Mineralschaumplatte als Kernmaterial unter Zugrundelegung der ermittelten hygrischen Materialkennwerte der beiden Einzelmaterialien (Linie linkes Bild) und mit Einbeziehung einer Widerstandsschicht (Linie rechtes Bild). Zum Vergleich sind die gemessenen Wassergehalte (Punkte) mit dargestellt.	15
Bild 3	Berechneter Zeitverlauf der Wasseraufnahme für die Sandwichprobe mit Perliteplatte als Kernmaterial unter Zugrundelegung der ermittelten hygrischen Materialkennwerte der beiden Einzelmaterialien (Linie linkes Bild) und mit Einbeziehung einer Widerstandsschicht (Linie rechtes Bild). Zum Vergleich sind die gemessenen Wassergehalte (Punkte) mit dargestellt.	15
Bild 4	Wassergehaltsverteilung über die Tiefe einer Probe aus der Calciumsilikatplatte (links), Mineralschaumplatte (mittig) und Perliteplatte (rechts) zu unterschiedlichen Zeitpunkten der Weiterverteilung, anhand von NMR-Messungen. Die dicke schwarze Linie stellt die Startverteilung dar. Die mit einer durchgezogenen Linie dargestellten Verteilungen zeigen die mit den ermittelten Transportkoeffizienten berechneten Verteilungen für dieselben Zeitpunkte.	16
Bild 5	Vergleich zwischen gemessener und angenäherter Feuchtespeicherfunktion für vier Mauerwerksbildner, dargestellt als Funktion des Kapillardrucks.	18
Bild 6	Mit der NMR-Anlage ermittelte Wassergehaltsverteilungen an einer Probe bestehend aus der 60 mm dicken Mineralschaumplatte mit darauf folgender 24 mm dicker Calciumsilikatplatte.	19
Bild 7	Mit der NMR-Anlage ermittelte Wassergehaltsverteilungen an einer Probe bestehend aus der 60 mm dicken Perliteplatte mit darauf folgender 24 mm dicker Calciumsilikatplatte.	19
Bild 8	Mit der NMR-Anlage ermittelte Wassergehaltsverteilungen an einer Probe bestehend aus der 24 mm dicken Calciumsilikatplatte mit darauf folgender 60 mm dicken Perliteplatte.	20
Bild 9	Mit der NMR-Anlage ermittelte Wassergehaltsverteilungen an einer Probe bestehend aus der 24 mm dicken Calciumsilikatplatte mit darauf folgender 60 mm dicken Mineralschaumplatte.	20
Bild 10	Vergleich der nach Anpassung der Feuchtespeicherfunktion berechneten Feuchteprofile mit den mit der NMR-Anlage ermittelten Wassergehaltsverteilungen an einer Probe bestehend aus der 60 mm dicken Mineralschaumplatte mit darauf folgender 24 mm dicker Calciumsilikatplatte.	21
Bild 11	Vergleich der nach Anpassung der Feuchtespeicherfunktion berechneten Feuchteprofile mit den mit der NMR-Anlage ermittelten Wassergehaltsverteilungen an einer Probe bestehend aus der 60 mm dicken Perliteplatte mit darauf folgender 24 mm dicker Calciumsilikatplatte.	21
Bild 12	Vergleich der nach Anpassung der Feuchtespeicherfunktion berechneten Feuchteprofile mit den mit der NMR-Anlage ermittelten Wassergehaltsverteilungen an einer Probe bestehend aus der 24 mm dicken Calciumsilikatplatte mit darauf folgender 60 mm dicken Perliteplatte.	22
Bild 13	Vergleich der nach Anpassung der Feuchtespeicherfunktion berechneten Feuchteprofile mit den mit der NMR-Anlage ermittelten Wassergehaltsverteilungen an einer Probe bestehend aus der 24 mm dicken Calciumsilikatplatte mit darauf folgender 60 mm dicken Mineralschaumplatte.	22
Bild 14	Für die Optimierungsberechnungen implementierter Wandaufbau mit der Perlite-Sandwichplatte als Beispiel für das Innendämmsystem.	23
Bild 15	Ergebnisse der Optimierungsberechnungen der Perliteplatte. Dargestellt ist der Verlauf des Wassergehaltes im Ziegelmauerwerk hinter der Innendämmung.	24
Bild 16	Ergebnisse der Optimierungsberechnungen der Perliteplatte. Dargestellt ist die prozentuale Veränderung des Wassergehaltes im Ziegelmauerwerk hinter der Innendämmung.	24
Bild 17	Ergebnisse der Optimierungsberechnungen der Klebeschicht zwischen der Perliteplatte und Calciumsilikatplatte. Dargestellt ist der Verlauf des Wassergehaltes im Ziegelmauerwerk hinter der Innendämmung.	25
Bild 18	Ergebnisse der Optimierungsberechnungen der Klebeschicht zwischen der Perliteplatte und Calciumsilikatplatte. Dargestellt ist die prozentuale Veränderung des Wassergehaltes im Ziegelmauerwerk hinter der Innendämmung.	25
Bild 19	Ergebnisse der Optimierungsberechnungen der Calciumsilikatplatte. Dargestellt ist der Verlauf des Wassergehaltes im Ziegelmauerwerk hinter der Innendämmung.	26
Bild 20	Ergebnisse der Optimierungsberechnungen der Calciumsilikatplatte. Dargestellt ist die prozentuale Veränderung des Wassergehaltes im Ziegelmauerwerk hinter der Innendämmung.	26
Bild 21	Berechnete Wassergehalte des Ziegelmauerwerks unterhalb der Innendämmung für eine 5 cm dicke Calciumsilikatplatte (untere/schwarze Linie), eine doppelt so dicke Calciumsilikatplatte (mittlere/rote Linie) und ein fiktives Sandwichprodukt mit mittig abgesenkter Wärmeleitfähigkeit (obere/blau Linie). Rechts neben dem Diagramm sind schematisch die Wandaufbauten sowie die resultierenden Wärmewiderstände der Innendämmung dargestellt.	27
Bild 22	Berechnete Wassergehalte des Ziegelmauerwerks unterhalb der Innendämmung für einen Sandwichaufbau mit innenseitiger Perliteplatte (obere/grüne Linie), Mineralschaumplatte (mittlere/rote Linie) und der fiktiven Calciumsilikatplatte mit mittig abgesenkter Wärmeleitfähigkeit (untere/blau Linie). Rechts neben dem Diagramm sind schematisch die Wandaufbauten sowie die resultierenden Wärmewiderstände der Innendämmung dargestellt.	27
Bild 23	Berechnete Wassergehalte des Ziegelmauerwerks unterhalb der Innendämmung für eine Innendämmung aus 10 cm Calciumsilikat mit (untere/rote Linie) und ohne Kapillaraktivität (obere/grüne	

	Linie). Rechts neben dem Diagramm ist schematisch der Wandaufbau sowie die resultierenden Wärmewiderstände der Innendämmung dargestellt.	28
Bild 24	Berechnete Wassergehalte des Ziegelmauerwerks unterhalb der Innendämmung für eine Perlite-Sandwichplatte mit nur raumseitiger Calciumsilikatplatte (obere/braune Linie) im Vergleich zum Gesamtsystem (untere/grüne Linie). Rechts neben dem Diagramm sind schematisch die Wandaufbauten sowie die resultierenden Wärmewiderstände der Innendämmung dargestellt.	28
Bild 25	Berechnete Wassergehalte des Ziegelmauerwerks unterhalb der Innendämmung für eine Perlite-Sandwichplatte mit nur außenwandseitiger Calciumsilikatplatte (untere/rote Linie) im Vergleich zum Gesamtsystem (obere/grüne Linie). Rechts neben dem Diagramm sind schematisch die Wandaufbauten sowie die resultierenden Wärmewiderstände der Innendämmung dargestellt.	29
Bild 26	Berechnete Wassergehalte des Ziegelmauerwerks unterhalb der Innendämmung für eine Perlite-Sandwichplatte mit zwei außenwandseitigen Calciumsilikatplatten (untere/violette Linie) im Vergleich zum Gesamtsystem (obere/grüne Linie). Rechts neben dem Diagramm sind schematisch die Wandaufbauten sowie die resultierenden Wärmewiderstände der Innendämmung dargestellt.	30
Bild 27	Schematische Darstellung der Wärmebrückenproblematik durch eine Innendämmung.	31
Bild 28	Implementierter Wandaufbau mit einer Innenwand aus massivem Ziegel und Darstellung der Problembereiche bei Innendämmung.	32
Bild 29	Berechnete Oberflächenfeuchten an der Übergangsstelle zwischen dem Innenputz auf der Innendämmung und der einbindenden Wand für drei unterschiedliche Dämmstoffvarianten mit gleichem Wärmewiderstand, entsprechend der in Bild 28 abgebildeten Konstruktion.	32
Bild 30	Implementierter Wandaufbau mit einer Betondecke, die 30 cm in die Außenwand einbindet.	33
Bild 31	Berechnete Oberflächenfeuchten an der Übergangsstelle zwischen dem Innenputz auf der Innendämmung und der einbindenden Betondecke für die Konstruktion aus Bild 30.	33
Bild 32	Implementierter Wandaufbau mit einer Betondecke, die oberseitig mit einer Estrichdämmung versehen ist.	34
Bild 33	Berechnete Oberflächenfeuchten an der Übergangsstelle zwischen dem Innenputz auf der Innendämmung und der einbindenden Betondecke mit Estrichdämmung für die Konstruktion aus Bild 32.	34
Bild 34	Temperaturverteilung in der Konstruktion aus Bild 32 für Mitte Februar.	35
Bild 35	Implementierter Wandaufbau mit einer Betondecke, die oberseitig mit einer Estrichdämmung versehen ist und bei dem zwischen Decke und Innendämmung durch eine unfachgemäße Anbringung ein Luftspalt vorhanden ist.	35
Bild 36	Berechnete Oberflächenfeuchten und -temperaturen am Boden des Luftspaltes zwischen der Innendämmung und der einbindenden Betondecke mit Estrichdämmung für die Konstruktion aus Bild 35.	36
Bild 37	Berechnete Oberflächenfeuchten und -temperaturen in der Ecke zwischen Außenwand und der einbindenden Betondecke mit Estrichdämmung für die Konstruktion aus Bild 35 ohne Innendämmung.	36
Bild 38	Verallgemeinertes Isoplethensystem für Sporenauskeimung (oben) bzw. für Myzelwachstum (unten) für alle im Bau auftretenden Schimmelpilze. Die Diagramme gelten links für optimales Substrat, Mitte für Substratgruppe I (leicht verwertbares Substrat, wie z.B. Rauhfasertapete) und rechts für Substratgruppe II (nicht verwertbares Material). Die angegebenen Kurvenscharparameter charakterisieren die Sporenauskeimungszeit (oben) in Tagen und die Wachstumsrate in mm/d (unten).	37
Bild 39	Ergebnis der Berechnungen mit WUFI-Bio für den Wandaufbau ohne (links) und mit Innendämmung (rechts) für die Substratgruppe II. Die oberen Abbildungen zeigen den Vergleich zwischen berechnetem Sporenwassergehalt (blaue Linie) und dem Grenzwassergehalt (rote Linie), bei dessen Überschreitung Schimmelpilzwachstum auftreten kann. Die unteren Abbildungen zeigen das berechnete Schimmelpilzwachstum.	37
Bild 40	Integration der Versuchsergebnisse für die Calsitherm Calciumsilikatplatte in ein Isoplethenmodell. Die Grenzisoplethe für das geprüfte Material liegt innerhalb der schraffierten Fläche. Unterhalb der schraffierten Fläche ist während der gesamten Versuchsdauer keinerlei Schimmelpilzwachstum aufgetreten und daher auch im Realeinsatz nicht zu erwarten.	39
Bild 41	Implementierter Wandaufbau zur Untersuchung des Einflusses einer Fehlstelle (roter Pfeil) bei einer CaSi-Perlite-CaSi-Innendämmung.	40
Bild 42	Berechnete Oberflächenfeuchten (links) und -temperaturen (rechts) am Boden der bis auf die Außenwand durchgängigen Fehlstelle bei einer CaSi-Perlite-CaSi-Innendämmung.	40
Bild 43	Erweiterung des Schimmelpilzberechnungsmodells WUFI-Bio um eine für die Calciumsilikatplatte gültige Substratklasse k mit im Vergleich zur Substratklasse 2 deutlich höherer Grenzisoplethe.	40
Bild 44	Ergebnis der Berechnungen mit WUFI-Bio für die Fehlstelle im Wandaufbau mit einer CaSi-Perlite-CaSi-Innendämmung; links für Substratklasse 2 und rechts für die Substratklasse k. Die oberen Abbildungen zeigen den Vergleich zwischen berechnetem Sporenwassergehalt (blaue Linie) und dem Grenzwassergehalt (rote Linie), bei dessen Überschreitung Schimmelpilzwachstum auftreten kann. Die unteren Abbildungen zeigen das berechnete Schimmelpilzwachstum.	41
Bild 45	Implementierter Wandaufbau zur Untersuchung des Einflusses einer Fehlstelle (roter Pfeil) bei einer Perlite-CaSi-Innendämmung.	41

Bild 46	Berechnete Oberflächenfeuchten (links) und –temperaturen (rechts) am Boden der bis auf die Außenwand durchgängigen Fehlstelle bei einer Perlite-CaSi-Innendämmung.	42
Bild 47	Ergebnis der Berechnungen mit WUFI-Bio für die Fehlstelle im Wandaufbau mit einer Perlite-CaSi-Innendämmung; links für Substratklasse 2. Die Substratklasse k kann bei dieser Schichtung nicht angesetzt werden. Die obere Abbildung zeigt den Vergleich zwischen berechnetem Sporenwassergehalt (blaue Linie) und dem Grenzwassergehalt (rote Linie), bei dessen Überschreitung Schimmelpilzwachstum auftreten kann. Die untere Abbildung zeigt das berechnete Schimmelpilzwachstum.	42
Bild 48	Implementierter Wandaufbau zur Untersuchung des Einflusses einer Fehlstelle (roter Pfeil) bei einer CaSi-Perlite-Innendämmung.	43
Bild 49	Ergebnis der Berechnungen mit WUFI-Bio für die Fehlstelle im Wandaufbau mit einer CaSi-Perlite-Innendämmung; links für Substratklasse 2 und rechts für die Substratklasse k. Die oberen Abbildungen zeigen den Vergleich zwischen berechnetem Sporenwassergehalt (blaue Linie) und dem Grenzwassergehalt (rote Linie), bei dessen Überschreitung Schimmelpilzwachstum auftreten kann. Die unteren Abbildungen zeigen das berechnete Schimmelpilzwachstum.	43
Bild 50	Implementierter Wandaufbau zur Untersuchung des Einflusses einer Fehlstelle (roter Pfeil) bei einer CaSi-CaSi-Perlite-Innendämmung.	44
Bild 51	Ergebnis der Berechnungen mit WUFI-Bio für die Fehlstelle im Wandaufbau mit einer CaSi-Perlite-Innendämmung; links für Substratklasse II und rechts für die Substratklasse k. Die oberen Abbildungen zeigen den Vergleich zwischen berechnetem Sporenwassergehalt (blaue Linie) und dem Grenzwassergehalt (rote Linie), bei dessen Überschreitung Schimmelpilzwachstum auftreten kann. Die unteren Abbildungen zeigen das berechnete Schimmelpilzwachstum.	44
Bild 52	Photos der vollflächigen Verklebung der Innendämmung auf die Referenzwand aus 175 mm Kalksandstein für die Messung des Schalldämmmaßes.	45
Bild 53	Frequenzabhängige Schalldämm-Maße R für die Referenzwand und für drei unterschiedliche Varianten der Innendämmung.	46
Tabelle 1	Wasseraufnahmekoeffizienten der Sandwichplatten.	14
Tabelle 2	Anhand der NMR-Messungen ermittelte Kapillartransportkoeffizienten für die Weiterverteilung 16	
Tabelle 3	Approximierte Feuchtespeicherfunktion der Perliteplatte und der Mineralschaumplatte.	18
Tabelle 4	Wärmedurchlasswiderstände des Wandaufbaus ohne und mit den unterschiedlichen Innendämmvarianten sowie daraus resultierender Wärmedurchgangskoeffizient.	30
Tabelle 5	Vergleich von Schalldämm-Maß- R_w - und ΔR_w -Werten.	46

3 Verzeichnis von Begriffen, Abkürzungen und Definitionen

T [K]

Absolute Temperatur

Der Begriff absolute Temperatur bezeichnet einen Temperaturwert, der sich auf den absoluten Nullpunkt (ca. -273 °C) bezieht.

Delta-R_w-Wert

Der Delta-R_w-Wert beschreibt die durch eine Maßnahme hervorgerufene Änderung des Schalldämmmaßes.

μ

Diffusionswiderstandszahl

Die Diffusionswiderstandszahl beschreibt den Wasserdampfdiffusionswiderstand eines Materials im Vergleich zu einer Luftschicht gleicher Dicke. Die Diffusionswiderstandszahl von Luft ist dementsprechend gleich 1, wogegen die der Baumaterialien meist deutlich höher liegt.

Für die Bundesrepublik Deutschland ist die Durchführung der Messung von Dampfdiffusionskoeffizienten gemäß DIN EN ISO 12572 genormt. Dabei wird nach Trockenbereichsverfahren für einen Feuchtigkeitsbereich zwischen 0 bis 50 % r.F., allgemein als "dry-cup"-Verfahren bekannt, und Feuchtbereichsverfahren für einen Feuchtigkeitsbereich zwischen 50 bis 100 % r.F. ("wet-cup") unterschieden. Die Messung erfolgt unter isothermen Bedingungen.

EnEV

Die Energieeinsparverordnung löste die Wärmeschutzverordnung (WSchV) und die Heizungsanlagenverordnung (HeizAnV) ab und fasste sie zusammen. Zur Umsetzung der EG-Richtlinie über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden (2002/91/EG) vom 16. Dezember 2002 wurde eine Neufassung erstellt, die seit dem 1. Oktober 2007 gültig ist.

u_r [kg/m³]

Freie kapillare Wassersättigung

Die freie kapillare Wassersättigung ist die gewichts- oder volumenbezogene Menge an Wasser, die ein Material bei Wasserlagerung ohne zusätzliche äußere Kräfte (Überdruck oder Vakuum) aufnimmt. Sie liegt aufgrund eingeschlossener Luftporen stets unterhalb der Menge, die das Material aufgrund seiner offenen Porosität aufnehmen könnte.

p_{k1}, p_{k2} [-]

freie Parameter

Anpassungsparameter für die Approximation der Feuchtespeicherfunktion aus 2 gemessenen Sorptionswassergehalten und der freien Wassersättigung

R_D [J/(kgK)]

Gaskonstante für Wasserdampf

Die allgemeine Gaskonstante dient der Verknüpfung der Zustandsgrößen Temperatur, Stoffmenge, Druck und Volumen. Die Gaskonstante hat für alle idealen Gase denselben Wert. Die universelle Gaskonstante geteilt durch die molare Masse eines bestimmten Gases ergibt die spezifische oder auch individuelle Gaskonstante. Gaskonstante für Wasserdampf beträgt 461,5 J/(kgK).

Hydrophobierungsmittel

Schutzmittel, das einen Baustoff dadurch Wasser abweisend macht, dass dessen Saugfähigkeit durch Auskleidung der Porenwänden herabgesetzt wird.

Isoplethensysteme

Ein Isoplethensystem beschreibt die Wachstumsvoraussetzungen bzw. –randbedingungen für Schimmelpilzbildung. Es besteht aus temperatur- und feuchteabhängigen Kurvenscharen, den sog. „Isoplethen“, die zur Vorhersage von Sporen-Auskeimungszeiten und zur Beschreibung des Myzelwachstums dienen.

Kapillaraktivität

Die Kapillaraktivität bezeichnet die Saugfähigkeit eines Materials, also die Eigenschaft über Kapillartransport Feuchte bei Kontakt mit Wasser aufzunehmen.

kapillaraktive Dämmung

Isolierung mit einem Dämmstoff, der kapillaraktiv ist.

Kapillartransportkoeffizienten in [m²/s]

Mit dem Wasseraufnahmekoeffizienten kann die Feuchteverteilung im Material während des Saugvorgangs beschrieben werden. Legt man einen Diffusionsansatz zugrunde, lassen sich die zeitabhängigen Feuchteverteilungen mit dem stark feuchteabhängigen Kapillartransportkoeffizienten rechnerisch beschreiben.

NMR

Die Abkürzung NMR steht für Nukleare Kernmagnetische Resonanz. Mit diesem Messverfahren kann direkt und schnell der Wassergehalt im Material gemessen werden.

φ [-]

Relative Luftfeuchte

Die relative Luftfeuchte ist das Verhältnis der momentanen absoluten Luftfeuchte und größtmögliche absolute Feuchtigkeit bei gleicher Temperatur (Sättigungsfeuchte).

Schalldämm-Maß R_w

Das Schalldämmmaß R_w ist ein logarithmisches Maß und beschreibt das Vermögen eines Bauteils oder eines Übergangs zwischen zwei schallführenden Bauteilen oder Medien, den Schall zu dämmen. Das Schalldämmmaß R_w ist das Verhältnis der auf eine Wand auftreffenden Schallintensität zur gesamten durch die Wand durchgelassenen Schallintensität.

Substratklasse

Um bei den Berechnungen mit WUFI-Bio (siehe dort) den Einfluss des Substrats, also des Untergrundes oder ggf. eventueller Untergrundverunreinigungen, auf die Schimmelpilzbildung berücksichtigen zu können, werden Isoplethensysteme für zwei baustoffspezifischen Substratklassen eingeführt, die aus experimentellen Untersuchungen abgeleitet wurden.

U-Wert

Wärmedurchgangskoeffizient in $W/(m^2K)$

Der Wärmedurchgangskoeffizient U ist ein Maß für den Wärmestromdurchgang durch eine ein- oder mehrlagige Materialschicht, wenn auf beiden Seiten verschiedene Temperaturen anliegen. Er gibt die Energiemenge an, die in einer Sekunde durch eine Fläche von 1 m^2 fließt, wenn sich die beidseitig anliegenden Lufttemperaturen stationär um 1 K unterscheiden. Beim Wärmedurchgangskoeffizient sind die innen- und außenseitigen Wärmeübergangskoeffizienten enthalten.

Wärmedurchlasswiderstand in $[m^2K/W]$

Der Wärmedurchlasswiderstand gibt den Widerstand einer Schicht gegen das Durchströmen von Wärme an.

w-Wert $[kg/m^2\sqrt{h}]$

Wasseraufnahmekoeffizient

Der Wasseraufnahmekoeffizient beschreibt die Feuchteaufnahme eines Materials über die Benetzungsfläche. Bei Materialien mit zeitlich konstanter Porenstruktur erfolgt die Wasseraufnahme stets linear mit der Wurzel der Zeit.

WUFI-Materialdatenbank

Materialdatenbank des kommerziell vertriebenen, am Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP) entwickelten Berechnungsprogramms für instationäre hygrothermische Berechnungen.

WUFI-Bio

Am IBP entwickeltes Modell zur Bestimmung des Schimmelpilzwachstumsrisikos unter realen instationären Randbedingungen.

WTA-Merkblatt „Innendämmung“

Die WTA ist der Wissenschaftlich Technische Arbeitskreis für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege. Seine Merkblätter haben, wenn auch nicht rechtlich bindend, aufgrund der hohen Fachkompetenz nahezu Normungscharakter. Zur Zeit wird unter Mitarbeit des IBP an einem neuen Merkblatt zum Thema Innendämmung gearbeitet.

4 Zusammenfassung

1. Durchgeführte Untersuchungen und Entwicklungen.

Ein Ziel der Untersuchungen war die Optimierung des Fertigungsverfahrens vor allem hinsichtlich der Energieeinsparung. Hierzu wurde auf verschiedene Weise die Autoklavierungs- und Trocknungstechnik und deren Regie verändert.

Das Hauptziel lag in der Entwicklung eines Dämmstoffs mit den Vorteilen der Calciumsilikatplatte (hohe Kapillaraktivität) bei gleichzeitig verbessertem Wärmedämmverhalten (bauphysikalische Optimierung) sowie der Untersuchung der bauphysikalischen Vorteile und Einsatzgrenzen. Dazu wurden geschichtete Dämmplatten hergestellt und deren hygrothermische Kennwerte bestimmt sowie das hygrothermische Verhalten und das Schimmelpilzrisiko im Anwendungsfall berechnet.

Ein weiteres Ziel war die Reduzierung der Fertigungskosten. Hierzu wurde das Entwässerungsverhalten, das Pressverfahren modifiziert und verschiedene Rohstoffsubstitute erprobt.

2. Erzielte Ergebnisse.

Die Optimierung des Fertigungsverfahrens mit der besonderen Zielstellung der Energieeinsparung durch Modifizierungen an den Autoklavierungs- sowie Trocknungsprozessen und einer Reduzierung der Fertigungskosten durch Verbesserungen am Entwässerungsverhalten sowie Pressverfahren konnten ohne Beeinträchtigungen der Materialkennwerte kostengünstiger gestaltet werden. Das Einsparpotential kann - je nach Pressdicke der Dämmplatte - bis zu einer 20% igen Energieeinsparung führen. Die Bemühungen, hieraus auch eine Kostenersparnis zu haben, sind jedoch - durch um ca. 60% höhere Energiekosten im Vergleich zum Vorjahr - am Projektende mehr als zunichte gemacht worden. Experimente mit anderen Technologien, wie der Mikrowellentechnik, zeigten negative Auswirkungen auf die Dämmstoffqualität.

Die bauphysikalischen Untersuchungen zeigen, dass durch den geschichteten Materialaufbau der Dämmwert deutlich verbessert werden kann. Im Anwendungsbeispiel werden mit den unterschiedlichen „Sandwichproben“ fast die bereits beschlossenen Anforderungen der EnEV 2009 (U-Wert $0,35 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$) erfüllt. Jedoch bei einem minimal geringfügig besseren als der zugrunde gelegte äußerst niedrige Dämmstandard (im Beispiel: ungedämmte Wand im Altbau mit U-Wert $1,21 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$) würde die „Sandwichplatte“ den neuen Anforderungen genügen. Die hygrothermischen Berechnungen zeigen, dass entscheidend für den Feuchtehaushalt des Mauerwerks die Dicke der sehr kapillaraktiven Calciumsilikatplatte und deren Anordnung von Bedeutung sind. Entgegen gängiger Lehrmeinung ist kaum ein erhöhtes Schimmelpilzproblem im Übergangsbereich der Innendämmung zur einbindenden Wand oder Decke gegeben, weil durch die auf der warmen Seite liegende große Oberfläche an dieser Stelle eher eine höhere Temperatur und damit geringere Feuchte gegeben ist. Die Berechnungen zeigen, dass aufgrund der messtechnisch ermittelten sehr hohen Schimmelpilzresistenz des Calciumsilikats im Vergleich zu anderen Dämmstoffen ein deutlich vermindertes Schimmelpilzrisiko vorliegt.

3. Empfehlungen für das weitere Vorgehen.

Ganz wesentlich für die Vermarktung ist die Demonstration der Eignung an einem realen Objekt. Nach thermischer Sanierung mit Hilfe dieses neuen Dämmstoffes kann die erreichte Energieeinsparung und vor allem auch die Schadensfreiheit demonstriert werden.

4. Kooperationspartner / Förderung des Vorhabens.

Das Projekt wurde in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer Institut für Bauphysik (IBP) in Holzkirchen bearbeitet und durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt unter dem AZ: 24058-25 gefördert.

5 Einleitung, Hintergrund und Zielsetzung

Die Bundesregierung hat sich verpflichtet, bis zum Jahre 2010 die Emissionen des Treibhausgases CO₂ gegenüber 1990 um 21% zu verringern. Das größte Einsparpotential liegt in der Absenkung des Heizenergiebedarfs der Gebäude. Dabei gilt es vor allem, die Transmissionswärmeverluste durch eine Erhöhung des Dämmstandards zu verringern. Im Bereich des Neubaus sind durch die EnEV verbindliche Regelungen getroffen, die zu einer deutlichen Absenkung des Primärenergiebedarfs und damit verbunden zu einer Reduktion der Abgabe von Treibhausgasen führen. Das größte Einsparpotential liegt aber beim Bestand der Altbauten, die über 90 % des Heizenergieverbrauchs verursachen. Hier können Energieeinsparmaßnahmen nur durch Überzeugungsarbeit und entsprechende kostengünstige Lösungen erreicht werden. Von Vorteil sind diesbezüglich deshalb Maßnahmen, die auch von ungeübten Handwerkern und mit geringem Aufwand durchgeführt werden können.

Aus ganz unterschiedlichen Gründen ist häufig die Innendämmung die einzig sinnvolle Maßnahme zur Verbesserung des Wärmedämmstandards. Oft darf die Außenoberfläche aus Gründen des Denkmalschutzes oder der Ästhetik (in Bayern z. B. aufgrund vorhandener so genannter Lüftelmalerei) nicht verändert werden. Zum Teil sind auch bautechnische Vorgaben einzuhalten, wie z. B. die Einbehaltung eines Mindestgrenzabstandes oder bei Reihenhäusern die Beibehaltung einer ungestörten Fluchtlinie der Außenfassade.

Eine Innendämmung kann aber auch bauphysikalisch vorteilhaft sein. Bei gelegentlich genutzten und deshalb nicht permanent beheizten Räumen (Versammlungsräume, Kirchen, Festsäle etc.) ermöglicht eine Innendämmung ein deutlich schnelleres und damit auch energiesparendes Anheizen des Raumes. Außerdem können im Altbau Unebenheiten der Wand mit einer derartigen Dämmplatte ausgeglichen und durch die kapillare Querleitung in dieser Dämmplatte Unstetigkeiten im Wandaufbau hygrothermisch entspannt werden.

Damit ergeben sich gerade für die Innendämmung zahlreiche Anwendungsmöglichkeiten mit einem entsprechenden Marktpotenzial. Allerdings stellt diese Art der Dämmung aus bauphysikalischer Sicht die schadensanfälligste Lösung dar, sofern die damit gegebene Problematik nicht ausreichend Berücksichtigung findet.

Ein zusätzliches Problem stellt die Forderung der EnEV dar, dass bei jeder großflächigen Sanierung in Bezug auf den Dämmstandard, die für Neubauten erarbeiteten Vorgaben erfüllt werden müssen. Dies führt zu der paradoxen Situation, dass aufgrund einer Gesetzesvorschrift, die zu einer Absenkung des Heizenergiebedarfs führen soll, geeignete Dämmmaßnahmen nicht durchgeführt werden. Unter dem Aspekt des Bestandsschutzes ist es zwar zulässig, eine thermische Sanierung zu unterlassen, eine Verbesserung des Dämmstandards unterhalb der Vorgaben der EnEV ist aber unzulässig. Dabei ist bezüglich einer Innendämmung zu bedenken, dass hohe Dämmwerte nicht nur entsprechende Materialkosten bedeuten sondern, dass mit steigendem Wärmedurchlasswiderstand der Dämmung das Risiko von Feuchteschäden ansteigt. Dieser Problematik wird in der EnEV bei Fachwerkbauten bereits in der Form Rechnung getragen, dass hier niedrigere Grenzwerte gelten.

Für die rechnerische Untersuchung von gekoppelten Wärme- und Feuchtetransportvorgängen liegen am IBP ein erprobtes eindimensionales sowie ein neu entwickeltes zweidimensionales EDV-Programm vor (Künzel, 1994). Bisherige Beschreibungen des Feuchtetransportverhaltens von Baustoffen mit Hilfe dieser Verfahren haben eine gute Übereinstimmung zwischen rechnerischer Aussage und praktischer Untersuchung am Objekt ergeben (Holm und Künzel, 1998; Krus und Künzel, 1996; Krus et al., 1996; Künzel, 1999; Künzel und Krus, 1995; Künzel et al., 1995; Künzel und Kießl, 1998). Die Mitarbeit in mehreren nationalen und internationalen Fachgremien erbringt zusätzlich einen ständigen Überblick über den Stand des Wissens und der Forschungsaktivitäten auf diesem Gebiet im In- und Ausland.

Das Ziel dieses Vorhabens besteht deshalb darin, Vorgaben zur Entwicklung neuartiger besonders fehlertoleranter Innendämmsysteme zu erarbeiten. Sie sollen auf mehrschichtigen Dämmplatten aus Materialien mit unterschiedlicher Kapillaraktivität und Dämmwirkung beruhen.

Die darauf aufbauende Produktentwicklung unterteilt sich in die Bereiche:

- Optimierung des Fertigungsverfahrens mit der besonderen Zielstellung der Energieeinsparung,
- bauphysikalische Produktoptimierung eines Silikatdämmstoffes,
- erste Untersuchungen der bauphysikalischen Vorteile und Einsatzgrenzen des neuen Dämmstoffes.

Die Bereiche konnten nicht unabhängig voneinander bearbeitet werden, ein gegenseitiger Austausch war ganz wesentlich für das Erreichen der gesteckten Ziele.

6 Hauptteil

6.1 Fertigungstechnische Produktoptimierung des Silikatdämmstoffes (Firma Calsitherm)

Bei der Produktoptimierung des Silikatdämmstoffes standen drei Ziele im Vordergrund.

6.1.1 Energetische Optimierung des Herstellungsverfahrens

Der größte Energieaufwand bei der Herstellung des Dämmstoffes wird für die anschließende Autoklavierung, d.h. der mineralischen Kristallisation im Sattdampfmedium und anschließenden Trocknung benötigt.

Eine anlagentechnisch interessante und Erfolg versprechende Möglichkeit bestand in der Kombination der vorhandenen Technik mit der Mikrowellentrocknung bzw. der Modifizierung der vorhandenen Trocknung. Dabei ist aber zu berücksichtigen, dass die Produkteigenschaften ganz wesentlich von der Art und dem zeitlichen Verlauf der Autoklavierung sowie der Trocknung abhängig sind. Diese Untersuchungen konnten deshalb nur schrittweise und in Kooperation mit dem IBP, das die Materialkennwerte bestimmt, erfolgen. Gezeigt hat sich, dass die vorhandene Anlage energetisch weitgehend ausgereizt war, so dass hier nur ein geringes Optimierungspotential gegeben war.

- Modifizierung der Autoklavierung:

Das Überleiten des Dampfes vom entspannenden Autoklav in den zu startenden Autoklaven führt zu einer direkten Energieeinsparnis, ist aber aufgrund der sehr unterschiedlichen Produktionszykluszeiten nur in Ausnahmefällen möglich.

Die erforderlichen Autoklavierungszeiten waren bereits im Vorfeld gut auf die Bildung der Silikate angepasst. Weitere Optimierungsversuche führten zu nicht richtig auskristallisierten Platten und brachten so keine Verbesserung. Jedoch konnte eine Kostenreduzierung durch eine spezielle, höhere Beladung der Transportwagen erreicht werden.

- Modifizierung des Trocknungsprozesses:

Die Versuche mit der Mikrowellentrocknung führten bedingt durch das Auftreten örtlich zu hohen Temperaturen und einer schlechten Wärmeverteilung innerhalb der Platten zu starken Rissbildung. Abgesehen von den umfangreichen Investitionen zur Durchführung weiterer und vom Objekt größerer Trocknungsversuche, deuteten die schlechten Laborergebnisse auf sehr große Probleme für eine Umsetzung auf Produktionsbedingungen hin.

Die Einführung von wesentlich erweiterten Regel- und Erfassungselementen bei der konventionellen Trocknung, - vorerst für einen Trockner - die hinsichtlich der Steuerung der Luft- sowie Materialtemperaturen, der Umluftgeschwindigkeiten, des Luftdruckes und der

Luftfeuchtigkeiten wirken sich sehr positiv auf den Energieeinsatz und damit auf die Kostenstruktur aus.

Durch diese Modifizierung und einer verbesserten Transportwagenbeladung konnte der Trocknungsprozess ebenfalls kostengünstiger gestaltet werden.

6.1.2 Reduzierung der Fertigungskosten

Bei den aufgeführten Optimierungen der Produkteigenschaften und der Energieeinsparmaßnahmen wurde immer auch der Einfluss auf die Fertigungskosten berücksichtigt.

Durchgeführte Versuche zur Fertigungskostenreduzierung der Klimaplatte:

- Entwässerungsverhalten:

Die Modifizierung der Entwässerung wurde durch eine Änderung des Wasser-Feststoffverhältnisses der Rezeptur und einer grundsätzlichen Veränderung der Entwässerung realisiert. Die Untersuchungen zeigten, dass durch eine angepasste Entwässerung mehr Feststoffe im Produkt verbleiben und somit der Rohstoffeinsatz minimiert werden konnte.

- Pressverfahren:

Durch die Erweiterung der Steuerung der Hydraulikaggregate, die das Absenken des Formrahmens und des Pressenstempels, das Pressen mit angepassten Pressgeschwindigkeiten über die gesamte Presshöhe sowie das schnellere Ausfahren der fertigen Platte ermöglichte, wurde der Ausstoß an Plattenmaterial wesentlich erhöht.

- Ersatz der Rohstoffe:

Die Modifizierung der Rohstoffe konnten noch nicht zu kostenreduzierenden Ergebnissen führen. Der Einsatz von kostengünstigeren Rohstoffen führten generell zu schlechteren bauphysikalischen Produkteigenschaften. Die vielen Versuche zeigten, dass selbst kleine Verunreinigungen, die in preiswerteren Rohstoffen vorhanden sind, einen negativen Einfluss auf die Bildung der kapillaraktiven Calciumsilikate haben. Geeignete Substitute, die zwar geringe Materialverbesserungen bewirkten, sind für die entsprechenden späteren Produktionsprozesse mengenmäßig nicht ausreichend verfügbar. Zudem haben sich Preiserhöhungen bei den Rohstoffen negativ ausgewirkt.

6.1.3 Verbesserung der bauphysikalischen Eigenschaften.

Bei Dämmmaterialien zur Innendämmung besteht ein funktioneller Zusammenhang zwischen Kapillarität, Wärmeleitfähigkeit und Schalldämmung. Um ein besonders effizientes fehlertolerantes Innendämmsystem zu erhalten, ist die Kombination eines Dämmstoffes geringerer Rohdichte und damit niedriger Wärmeleitfähigkeit mit einem Dämmstoff höherer Rohdichte und damit besseren Schalldämmwerten zusammen mit der kapillaraktiveren Klimaplatte eine denkbare Lösung. Für eine derartig geschichtete Dämmplatte müssen durch rechnerische Untersuchungen deren Materialkennwerte und Aufbau innerhalb fertigungstechnischer Grenzen optimiert werden.

Es wurde versucht eine mehrschichtige Dämmstoffplatte herzustellen, die aufgrund unterschiedlicher Materialkennwerte in den einzelnen Schichten bauphysikalische Vorteile aufweist. Eine wesentliche Vorgabe lag dabei in der Verbindung der Schichten ohne Verwendung organischer Klebstoffe. Ziel war es, bei der kompletten, geschichteten Dämmstoffplatte entweder nur Calciumsilikatwerkstoffe mit unterschiedlichen Rohdichten oder Calciumsilikatwerkstoffe in Verbindung mit anderen anorganischen Dämmstoffen mit angepassten Eigenschaften ohne oder gegebenenfalls mit mineralischen Kleber zu verwenden, so dass der Dämmstoff weiterhin brandschutztechnisch optimal ist und nach dessen Abbau als reiner Bauschutt entsorgt oder nach entsprechender Aufarbeitung wieder einem Prozess zugeführt werden kann.

Orientierende Versuche mit einem Schichtaufbau von organischen und anorganischen Dämmstoffen zeigten Verschlechterungen der bauphysikalischen Eigenschaften. Der Aufbau einer mehrfachgeschichteten Sandwichplatte mit unterschiedlichen Rohdichten der Schichten mit einer sogenannten Arteigenbindung konnte nicht realisiert werden. Besonders in den Zwischenschichten kam es zu Festigkeitsproblemen. Ebenfalls ist eine technische Realisierung eines Fertigungsverfahrens nicht gegeben, da unterschiedliche Prozessparameter für die jeweiligen Schichten nicht gleichzeitig zu gewährleisten sind. Im weiteren Projektverlauf wurde deshalb der Aufbau der Sandwichplatten - mit der zweiten Option mittels Verklebung der Schichten - mit am Markt befindlichen und ausgereiften Dämmstoffen mit niedrigen Wärmeleitfähigkeiten in Angriff genommen. Allerdings ist eine Anpassung des mineralischen Klebers notwendig geworden, damit die hygrischen Eigenschaften des Verbundsystems erhalten bleiben.

Aus einer Vielzahl von Laborproben, deren generelle Eigenschaften bei Calsitherm vorab bestimmt worden sind, sind zwei unterschiedlich aufgebaute „Sandwich“- Dämmsysteme für die weitere Bestimmung von bauphysikalischen Kennwerten (siehe Kap. 5 und Kap. 6.2) an IBP weitergeleitet worden. Hierbei handelt es sich um die erfolgsversprechenden Varianten.

6.2 Untersuchung der bauphysikalischen Vorteile und Einsatzgrenzen des neuen Dämmstoffes (IBP)

Für die rechnerischen Untersuchungen der bauphysikalischen Vorteile und Einsatzgrenzen des neuen Dämmstoffes ist die Kenntnis der wesentlichen Materialkennwerte Voraussetzung. Folgende Kennwerte müssen dazu an einer Auswahl der neu entwickelten Materialproben messtechnisch bestimmt werden:

Diffusionswiderstandszahl (Messung nach DIN EN ISO 12572)

Wärmeleitfähigkeit (Messung nach DIN EN 12667)

Kapillaraktivität (Bestimmung anhand eines eigens entwickelten Verfahrens (Holm; Krus 1998) und durch Vergleich der Diffusionswiderstandszahlen in dry-cup und wet-cup)

Wasseraufnahmekoeffizient (Kapillare Wasseraufnahme nach DIN 52617)

Schalldämm-Maße R_w in dB nach DIN 4109 in Abhängigkeit der Bauteildicke.

Bei den Berechnungen wird als Ausgangsvariante ein Wandaufbau mit einem Wärmedurchgangskoeffizienten entsprechend einem Altbau und typischer Decken- bzw. Innenwandinbindung zugrunde gelegt. Zu beachten ist dabei, dass es sich um Fragestellungen handelt, die sich nur mit Hilfe deutlich aufwändigerer zweidimensionaler Berechnungen beantworten lassen.

Folgende spezielle Fragestellungen werden dabei untersucht:

1. Welcher maximale Wärmedurchlasswiderstand ist bei Anwendung konventioneller Dämmstoffe bei einer Innendämmung vertretbar? Bisherige Untersuchungen lassen vermuten, dass der von der EnEV geforderte Dämmstandard nicht immer zugrunde gelegt werden darf.

Es muss davon ausgegangen werden, dass der ungeschulte Handwerker weder auf fehlerstellenfreie Anbringung des Dämmstoffes noch auf die spezielle Wärmebrückenproblematik achtet.

2. Inwieweit kann dieser maximale Wärmedurchlasswiderstand durch Einsatz einer kapillaraktiven Dämmung erhöht werden?

Dabei ist zu berücksichtigen, dass der positive Einfluss eines derartigen Dämmstoffes nur zum tragen kommen kann, wenn entweder die Tauwasserebene innerhalb dieses Dämmstoffes liegt oder durch geeignete Anbindung das Tauwasser von der Innenseite der Außenwand kapillar aufgenommen werden kann.

Ein höherer schadensfreier maximaler Wärmedurchlasswiderstand würde einen deutlichen Wettbewerbsvorteil in Konkurrenz zu konventionellen Innendämmstoffen bedeuten.

Eine besondere Beachtung soll dabei die Untersuchung der kapillaren Querleitung in der Dämmplatte finden, die vor allem im Bereich von Wärmebrücken und Anschlussecken zu einer Entspannung der Feuchtesituation führen könnte.

3. Energieeinsparung unter realistischen Bedingungen in Abhängigkeit möglicher einsetzbaren Dicken.

4. Beurteilung eines Schimmelpilzbefalls.

Die Beurteilung der Gefahr eines Schimmelpilzbefalls der im Rahmen dieses Forschungsprojektes zu untersuchenden Lösungsansätze erfolgt mit einem am IBP entwickelten Prognosetools (Sedlbauer 2001), das anhand hygrothermischer Berechnungsergebnisse oder auch vor Ort ermittelter Messverläufe für Oberflächentemperatur und -feuchte das Risiko von Schimmelpilzwachstum abschätzbar macht.

Auf Basis der drei wesentlichen Wachstumsvoraussetzungen (Feuchte, Temperatur und Substrat) von Schimmelpilzen wird die Vorhersage von Schimmelpilzbildung bei instationären Randbedingungen ermöglicht. Die wesentlichen Merkmale werden in Sedlbauer, Krus 2003 erläutert. Die Bewertung einer möglichen Schimmelpilzbildung erfolgt dabei durch den Vergleich des instationär ermittelten Wassergehalts in einer Pilzspore mit dem Grenzwassergehalt, ab dem die Spore auszukeimen und zu wachsen vermag. Dies bedeutet, dass eine längerfristige Überschreitung dieses Grenzwassergehalts Schimmelpilzbildung anzeigt. Die Grundlage für dieses Modell bilden so genannte Isoplethensysteme, die die Abhängigkeit der Keimungszeit bzw. der Wachstumsgeschwindigkeit vom Feuchtezustand und der Temperatur darstellen.

5. Schalldämmwerte in Abhängigkeit der Bauteildicken im Vergleich zu bestehenden Dämmsystemen.

6.2.1 Bestimmung der hygrischen Standardkennwerte

An den von der Fa. Calsitherm entwickelten zwei Sandwichplatten, die beide außenseitig aus einer 24 mm dicken Calciumsilikatplatte und innen aus einer 60 mm dicken Perliteplatte mit einer Rohdichte von 104 kg/m³ bzw. einer Mineralschaumplatte mit einer Dicke von 60 mm und einer Rohdichte von 134 kg/m³ bestehen (siehe Abbildung 1), wurden für jedes Material die hygrischen Standardkennwerte (Rohdichte, Porosität, freie Wassersättigung, Diffusionswiderstandszahl, Sorptionswassergehalte und Wasseraufnahmekoeffizient) ermittelt.

Calciumsilikat 24 mm	oben
Mineralschaumplatte 60cm	Mitte
Calciumsilikat 24 mm	unten

Sandwichplatte Typ 1

Calciumsilikat 24 mm	oben
Perliteplatte 60cm	Mitte
Calciumsilikat 24 mm	unten

Sandwichplatte Typ 2

Bild 1 Schematische Darstellung des Schichtaufbaus der Sandwichplatten.

Alle drei untersuchten Materialien zeichnen sich durch eine hohe Porosität von über 90 % aus. Dieser Porenraum kann bei den Calciumsilikatplatten beinahe vollständig mit Wasser gefüllt werden, wie die Ergebnisse beim Sättigungsversuch zeigen. Auch bei der Perliteplatte steht ein Großteil des Porenvolumens für die Einlagerung von Wasser zur Verfügung. Bei der Mineralschaumplatte wird dagegen nur etwa ein Drittel des zur Verfügung stehenden Porenraumes mit Wasser befüllt, was darauf hindeutet, dass hier größere nicht kapillaraktive Poren vorliegen.

Alle Materialien besitzen eine hohe Wasserdampfdurchlässigkeit. Die Perliteplatte hat eine Diffusionswiderstandszahl μ von 6, die Mineralschaumplatte von 2 und die Calciumsilikatplatte von 3. Die Feuchteabhängigkeit des Diffusionswiderstandes ist sehr

gering, wie sich aus dem Vergleich der Messergebnisse im Trocken- und Feuchtbereich ergibt.

Bei der kapillaren Wasseraufnahme zeigen sich deutliche Unterschiede zwischen den Materialien. Die Mineralschaumplatte hat mit $11,5 \text{ kg/m}^2\sqrt{\text{h}}$ den geringsten w-Wert und ist nach 24 Stunden noch nicht vollständig durchfeuchtet.

Die Perliteplatte mit extrem hohen $93 \text{ kg/m}^2\sqrt{\text{h}}$ ist bereits nach 5 Minuten und die Calciumsilikatplatte mit $44 \text{ kg/m}^2\sqrt{\text{h}}$ nach 10 Minuten durchfeuchtet.

Von den Sandwichplatten wurde der Wasseraufnahmekoeffizient der gesamten Probe bestimmt (Tabelle 1). Es können je zwei Wasseraufnahmekoeffizienten ermittelt werden. Für den ersten Bereich ergibt sich ein w-Wert von $42 \text{ kg/m}^2\sqrt{\text{h}}$, der dem w-Wert der Calciumsilikatplatte entspricht. Sobald das Wasser in die zweite Schicht, die Mineralschaumplatte bzw. Perliteplatte, dringt, ergibt sich ein w-Wert von 2,9 bzw. $7,5 \text{ kg/m}^2\sqrt{\text{h}}$, der deutlich niedriger liegt als für das Ausgangsmaterial bestimmt wurde. Dies lässt vermuten, dass sich an den Übergängen zwischen den Materialschichten eine so genannte Widerstandsschicht ausgebildet hat, die den Transport von Wasser behindert.

Tabelle 1 Wasseraufnahmekoeffizienten der Sandwichplatten

Probe Nr.	Kernmaterial	w-Wert [$\text{kg/m}^2\sqrt{\text{h}}$]	
		1. Abschnitt	2. Abschnitt
H957_B1	Mineralschaumplatte	42,6	3,2
H957_B2		42,2	2,9
H957_B3		41,7	2,6
Mittelwert		42,2	2,9
H957_E1	Perliteplatte	28,2	7,6
H957_E2		40,7	7,6
H957_E3		31,8	7,4
Mittelwert		33,6	7,5

6.2.2 Widerstandsschicht zwischen den kapillaraktiven Materialien der Sandwichproben

Wie aus Tabelle 1 ersichtlich ergibt sich beim Saugversuch an den Sandwichplatten nach Überschreiten der Grenze zwischen Calciumsilikatplatte und Kernmaterial ein Wasseraufnahmekoeffizient, der deutlich unterhalb des am Kernmaterial allein bestimmten liegt. Die Ursache liegt zum einen in den unterschiedlichen Feuchtespeicherfunktionen der Materialien. Hinzu kommt, dass sich zwischen den Materialien eine kapillare Widerstandsschicht ausbilden kann. Aussagen über die Widerstandsschicht können nur durch Messung der Wasseraufnahme an der entsprechenden Materialkombination und nachfolgende rechnerische Anpassung erfolgen. Durch die Einführung einer solchen Widerstandsschicht, die bis auf die Kapillartransportkoeffizienten die gleichen hygrischen Eigenschaften des Folgematerials besitzt, kann nach Anpassung der Transportkoeffizienten das reale Verhalten rechnerisch gut nachvollzogen werden.

Bild 2 links zeigt die für die Sandwichprobe mit Mineralschaumplatte als Kernmaterial berechnete Wasseraufnahme unter Zugrundelegung der ermittelten hygrischen Materialkennwerte der beiden Einzelmaterialien. Man erkennt deutlich, dass die Wasseraufnahme nach Überschreiten der Grenzsicht wesentlich schneller erfolgt als gemessen.

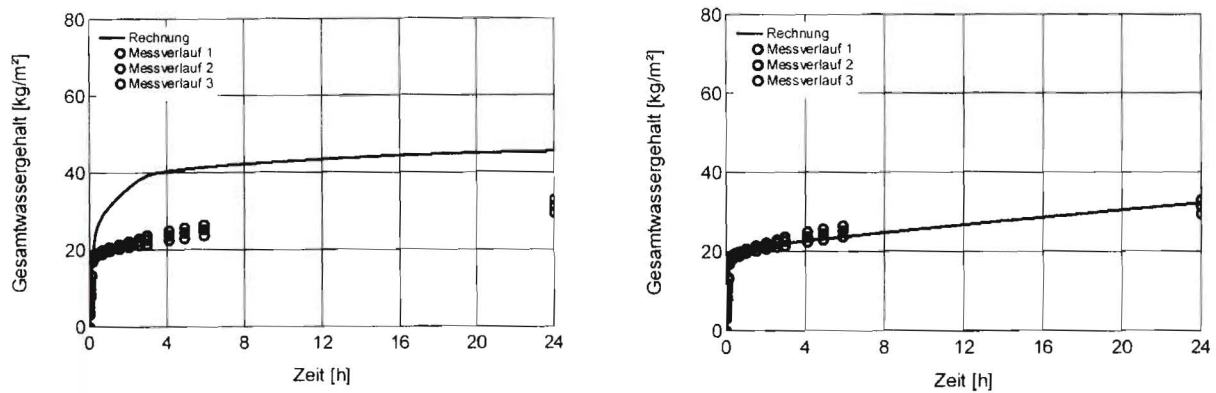


Bild 2 Berechneter Zeitverlauf der Wasseraufnahme für die Sandwichprobe mit Mineralschaumplatte als Kernmaterial unter Zugrundelegung der ermittelten hygrischen Materialkennwerte der beiden Einzelmaterialien (Linie linkes Bild) und mit Einbeziehung einer Widerstandsschicht (Linie rechtes Bild). Zum Vergleich sind die gemessenen Wassergehalte (Punkte) mit dargestellt.

Mit Einführung einer Widerstandsschicht zwischen beiden Materialien wird dagegen eine gute Übereinstimmung zwischen Messung und Rechnung erreicht, wie in Bild 2 rechts dargestellt. Der Wasseraufnahmekoeffizient der Widerstandsschicht ist dabei gegenüber der Mineralschaumplatte um den Faktor 27 verringert worden.

Für die Sandwichprobe mit der Perliteplatte als Kernmaterial ergibt sich eine noch größere Abweichung des berechneten Zeitverlaufs der Wasseraufnahme unter Zugrundelegung der ermittelten hygrischen Materialkennwerte (siehe Abbildung 3 links). Auch für diese Materialkombination kann unter Einbeziehung einer Widerstandsschicht eine gute Übereinstimmung zur Messung erreicht werden, wie aus Bild 3 rechts erkenntlich. Der Wasseraufnahmekoeffizient der Widerstandsschicht ist dabei gegenüber der Perliteplatte allerdings um den Faktor 90 verringert worden.

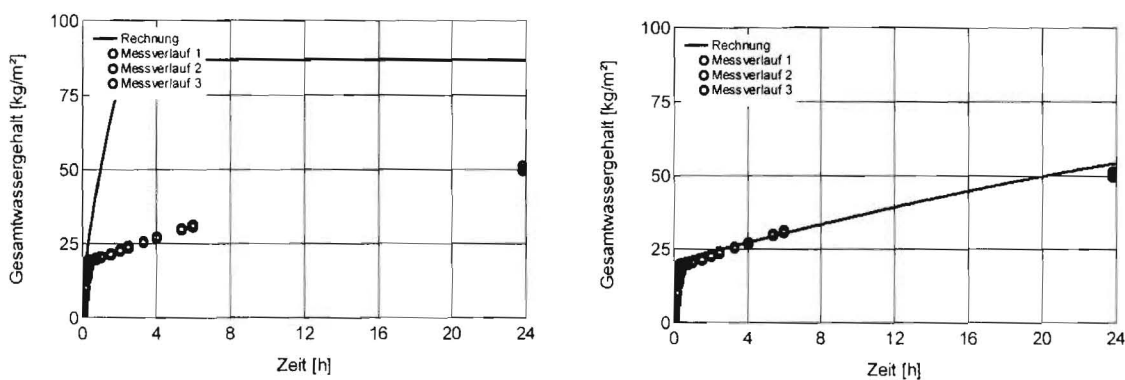


Bild 3 Berechneter Zeitverlauf der Wasseraufnahme für die Sandwichprobe mit Perliteplatte als Kernmaterial unter Zugrundelegung der ermittelten hygrischen Materialkennwerte der beiden Einzelmaterialien (Linie linkes Bild) und mit Einbeziehung einer Widerstandsschicht (Linie rechtes Bild). Zum Vergleich sind die gemessenen Wassergehalte (Punkte) mit dargestellt.

6.2.3 Bestimmung der Flüssigtransportkoeffizienten

Der Wasseraufnahmekoeffizient beschreibt nur die Wasseraufnahme eines Baustoffes über die Oberfläche, nicht aber die Verteilung des Wassers innerhalb des Materials. Mit Hilfe von Kapillartransportkoeffizienten lassen sich für die Wasseraufnahme die Feuchteverteilungen berechnen. Wird die Wasserzufuhr unterbunden, findet ein Weitertransport der Flüssigkeit statt, obwohl sich an der nicht mehr mit Wasser versorgten Oberfläche Gegenmenisken ausbilden. Diese Weiterverteilung der Flüssigkeit beruht darauf, dass die noch nicht gefüllten kleineren Poren aufgrund ihrer höheren Saugkraft über die vorhandenen Querverbindungen die größeren gefüllten Poren leer saugen. Es ist zu erwarten, dass dieses Weiterverteilen der Flüssigkeit deutlich langsamer abläuft als der

Transport beim Saugvorgang. Dies bedeutet, dass für den Flüssigtransport also je nach Randbedingungen (benetzte oder unbenetzte Oberfläche) unterschiedliche Flüssigtransportkennfunktionen angesetzt werden müssen. Zur Bestimmung dieser Koeffizienten wurden mit Hilfe der kernmagnetischen Resonanz die Wassergehaltsverteilungen ermittelt.

Für die Anwendung des Dämmstoffes als Innendämmung ist der Saugvorgang, der nur bei Kontakt der Oberfläche mit flüssigem Wasser (Regen) auftritt, unbedeutend. Durch Tauwasser eingebrachte Feuchte kann nur durch Weiterverteilung transportiert werden, weshalb im Folgenden dies allein betrachtet wird. Hierfür werden Proben der drei eingesetzten Materialien (Calciumsilikat-, Mineralschaum- und Perliteplatte) hergestellt, seitlich abgedichtet und solange mit Wasser beaufschlagt, bis das Wasser auf etwa ein Drittel der Probenlänge eingedrungen ist. In Bild 4 sind mit der NMR-Messanlage ermittelte Profile zu ausgewählten Zeitpunkten als Kreise dargestellt. Der für die Weiterverteilung vorliegende Anfangswassergehalt (nach Beendigung des Saugvorgangs) ist als dicke schwarze Linie eingetragen.

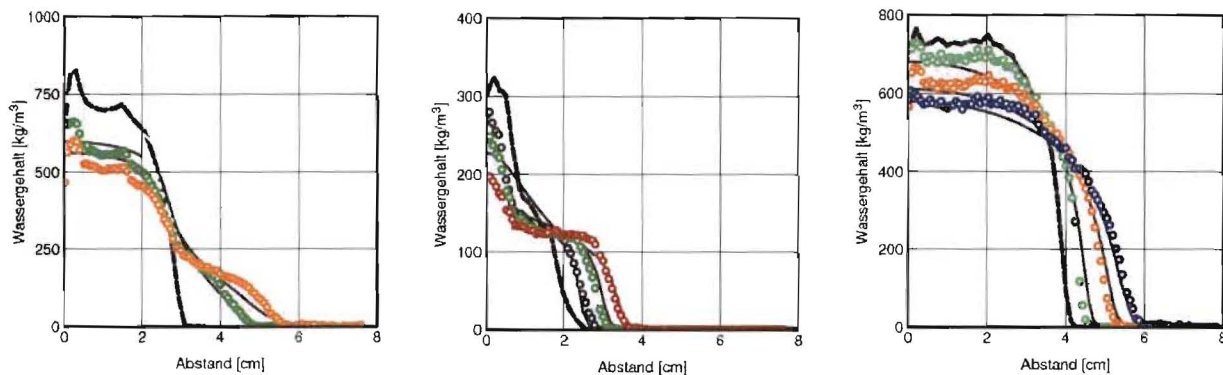


Bild 4 Wassergehaltsverteilung über die Tiefe einer Probe aus der Calciumsilikatplatte (links), Mineralschaumplatte (mittig) und Perliteplatte (rechts) zu unterschiedlichen Zeitpunkten der Weiterverteilung, anhand von NMR-Messungen. Die dicke schwarze Linie stellt die Startverteilung dar. Die mit einer durchgezogenen Linie dargestellten Verteilungen zeigen die mit den ermittelten Transportkoeffizienten berechneten Verteilungen für dieselben Zeitpunkte.

Anhand dieser gemessenen Verteilungen wurden die Kapillartransportkoeffizienten für die Weiterverteilung ermittelt. Die durchgezogenen Linien in Bild 4 sind die damit berechneten Wassergehaltsverteilungen. Es wird mit den in Tabelle 2 aufgelisteten Transportkoeffizienten eine gute Übereinstimmung von Messung und Rechnung erreicht.

Tabelle 2 Anhand der NMR-Messungen ermittelte Kapillartransportkoeffizienten für die Weiterverteilung

Material	Wassergehalt [kg/m³]	Kapillartransportkoeffizient für die Weiterverteilung [m²/s]
Calciumsilikatplatte	4.1	$3 \cdot 10^{-9}$
	150	$8 \cdot 10^{-9}$
	450	$8 \cdot 10^{-9}$
	840	$5 \cdot 10^{-8}$
Mineralschaumplatte	2.8	$2 \cdot 10^{-10}$
	130	$3 \cdot 10^{-8}$
	324	$1 \cdot 10^{-8}$
Perliteplatte	2	$2 \cdot 10^{-9}$
	273	$4.5 \cdot 10^{-7}$

6.2.4 Approximation der Feuchtespeicherfunktion aus Sorptionskennwerten und freier Sättigung

Für instationäre Berechnungen des Feuchtehaushaltes von Bauteilen sind bei neuen Rechnerverfahren zusätzliche Kennwerte notwendig. Neben den Flüssigtransportkoeffizienten für das kapillare Saugen bzw. die Trocknung ist dies die Feuchtespeicherfunktion. Eine korrekte Kenntnis dieser Funktion ist vor allem dann unabdingbar, wenn ein Feuchtetransport zwischen in Kontakt miteinander stehenden kapillaraktiven Materialien auftritt. Sie ergibt sich im hygrokopischen Feuchtebereich aus der Sorptionsisotherme und in höherem Feuchtebereich aus der Saugspannungsmessung. Diese Messungen sind allerdings aufwendig und zeitintensiv. Deswegen ist am IBP eine Approximationsmethode zur Bestimmung der Feuchtespeicherfunktion auf Basis einfach zu ermittelnder Kennwerte entwickelt worden.

Trägt man die komplette Feuchtespeicherfunktion nicht mehr als Funktion der relativen Feuchte, sondern als Funktion des Kapillardrucks auf, so ergibt sich für nahezu alle Materialien ein typischer s-förmiger Verlauf, der vor allem durch den Gradienten im Bereich der Feuchtespeicherfunktion zwischen 80 % (entspricht 300 bar) und 93 % r. F. (entspricht 95 bar) bestimmt wird. Aufbauend auf dieser Erkenntnis wird deshalb hier die folgende empirische Funktion mit den beiden freien Parametern p_{k1} und p_{k2} verwendet (mit p_c als Kapillardruck in Pa):

$$u(p_c) = \frac{u_f}{1 + \left(\frac{p_c}{p_{k1}}\right)^{p_{k2}}} = \frac{u_f}{1 + \left(\frac{\rho_w \cdot R_D \cdot T \cdot \ln(\varphi)}{p_{k1}}\right)^{p_{k2}}} \quad (1)$$

p_{k1}, p_{k2} [-]	freie Parameter
R_D [J/kgK]	Gaskonstante für Wasserdampf
T [K]	Absolute Temperatur
u_f [kg/m ³]	Freie kapillare Wassersättigung
ρ_w [kg/m ³]	Dichte von Wasser
φ [-]	Relative Luftfeuchte

Sie lassen sich durch Einsetzen der beiden gemessenen Sorptionsfeuchten bei 80 % und 93 % relativer Luftfeuchte (oder einen anderen möglichst hohen Wert) errechnen. Die Umrechnung der relativen Feuchte in den Kapillardruck erfolgt mit Hilfe der Kelvin-Formel Gl.(1). Für verschiedene Mauersteine sind die Ergebnisse der beiden Approximationsmethoden im Vergleich zu den jeweils gemessenen Feuchtespeicherfunktionen in Bild 5 dargestellt. Die gemessenen Werte stammen dabei entweder aus eigenen Untersuchungen oder aus der WUFI-Materialdatenbank. Es zeigt sich, dass für die hier aufgeführten Beispiele eine deutlich bessere Übereinstimmung der neu vorgeschlagenen Approximation mit den gemessenen Werten erzielt wird als bei einem Ansatz aus u_{80} und freier Sättigung allein und deshalb die vorgeschlagene Funktion in guter Näherung verwendet werden kann.

Mauersteine

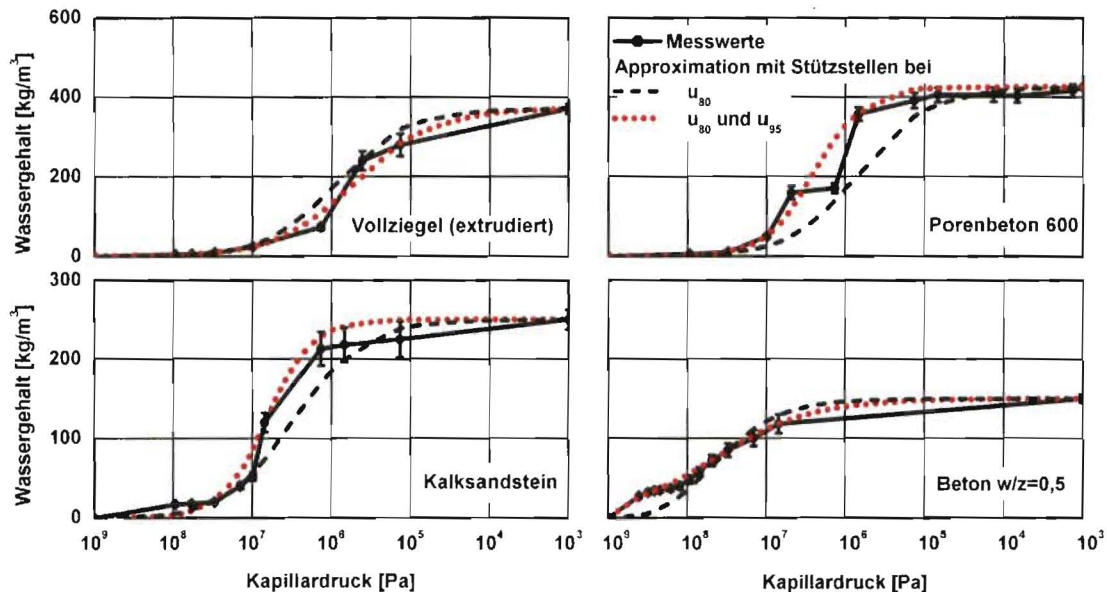


Bild 5 Vergleich zwischen gemessener und angenäherter Feuchtespeicherfunktion für vier Mauerwerksbildner, dargestellt als Funktion des Kapillardrucks.

In Tabelle 3 sind die auf die beschriebene Weise approximierten Feuchtespeicherfunktionen für die Perliteplatte und die Mineralschaumplatte aufgelistet. Man erkennt deutlich, dass über den gesamten Feuchtebereich, trotz höherer freier Sättigung der Perliteplatte, die Mineralschaumplatte eine höhere Saugspannung besitzt.

Tabelle 3 Approximierte Feuchtespeicherfunktion der Perliteplatte und der Mineralschaumplatte

ϕ [-]	Perlite [kg/m ³]	Mineralschaum [kg/m ³]	ϕ [-]	Perlite [kg/m ³]	Mineralschaum [kg/m ³]	ϕ [-]	Perlite [kg/m ³]	Mineralschaum [kg/m ³]
0,10	0,66	0,13	0,75	1,78	2,01	0,96	4,46	24,30
0,20	0,79	0,21	0,80	2,00	2,80	0,97	5,12	34,50
0,30	0,90	0,31	0,85	2,32	4,23	0,98	6,21	55,00
0,40	1,03	0,44	0,90	2,85	7,40	0,99	8,62	110,00
0,50	1,17	0,64	0,91	3,00	8,53	0,995	11,90	182,00
0,55	1,255	0,77	0,92	3,18	9,98	0,999	25,20	296,00
0,60	1,35	0,95	0,93	3,40	11,90	0,9995	34,50	312,00
0,65	1,47	1,19	0,94	3,61	14,60	0,9999	70,50	322,00
0,70	1,60	1,52	0,95	4,00	18,40	1,00	773,00	324,00

6.2.5 Weiterverteilung über die Materialgrenzen

Bei der Anwendung der Sandwichplatten als Innendämmung soll die Kapillaraktivität des Dämmstoffes genutzt werden, um anfallendes Tauwasser über Kapillartransport zu verteilen und nach innen zu transportieren. Von besonderem Interesse ist deshalb die Weiterverteilung des Wassers auch über die Materialgrenzen. Als erstes wurde dazu mit Hilfe der NMR-Messanlage untersucht, inwiefern in der Mineralschaum- bzw. Perliteplatte befindliches Wasser über Weiterverteilung auch von der innenseitigen Calciumsilikatplatte aufgenommen wird. Dazu wurde bei den Proben an einer Seite die Calciumsilikatplatte entfernt und die Mineralschaum- bzw. Perliteplatte mit Wasser beaufschlagt. Anschließend wurde die Probe abgedichtet, um ein Trocknen zu verhindern. Zu geeigneten Zeitpunkten wurden die sich mit der Zeit ergebenden Wassergehaltsprofile gemessen. Bild 6 zeigt das Ergebnis am Beispiel einer Probe, bestehend aus der 60 mm dicken Mineralschaumplatte mit darauf folgender 24 mm dicker Calciumsilikatplatte. Ausgehend von der

Anfangswassergehaltsverteilung (obere/violette Linie) hat sich das Wasser bereits nach 6 Stunden bis über die Grenze zur Calciumsilikatplatte weiterverteilt (2. von oben/gelbe Linie). Nach 24 Stunden ist der Wassergehalt in der Calciumsilikatplatte bereits ca. doppelt so hoch wie in der Mineralschaumplatte (2. von unten/türkise Linie). Dies bedeutet, dass die Calciumsilikatplatte aufgrund ihrer hohen Saugspannung die Mineralschaumplatte „leer saugt“.

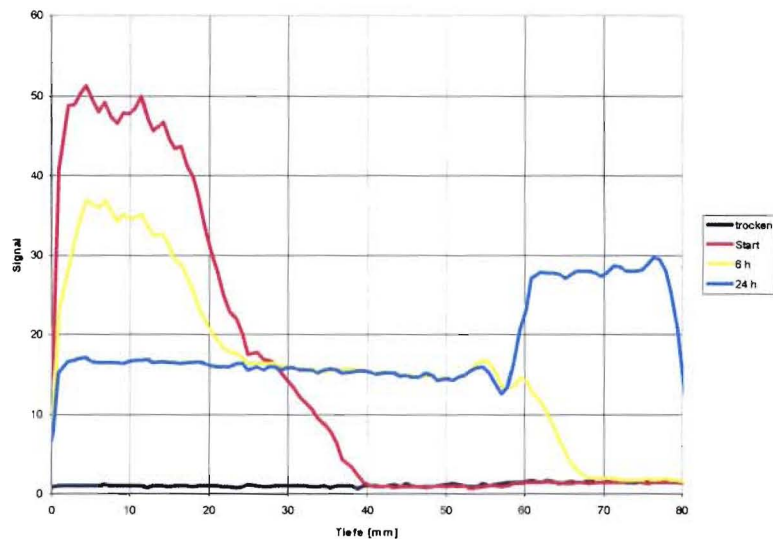


Bild 6 Mit der NMR-Anlage ermittelte Wassergehaltsverteilungen an einer Probe bestehend aus der 60 mm dicken Mineralschaumplatte mit darauf folgender 24 mm dicker Calciumsilikatplatte.

Bei der Kombination aus der 60 mm dicken Perliteplatte mit darauf folgender 24 mm dicker Calciumsilikatplatte zeigt sich ein ganz ähnliches Verhalten (siehe Bild 7)

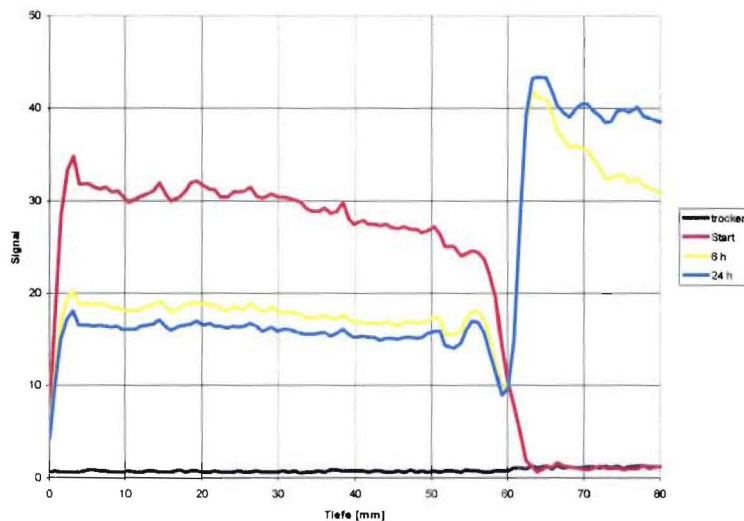


Bild 7 Mit der NMR-Anlage ermittelte Wassergehaltsverteilungen an einer Probe bestehend aus der 60 mm dicken Perliteplatte mit darauf folgender 24 mm dicker Calciumsilikatplatte.

Bei umgekehrter Reihenfolge ergibt sich ein ganz anderes Bild. Bei der Kombination aus der 24 mm dicken Calciumsilikatplatte mit darauf folgender 60 mm dicken Perliteplatte findet die Weiterverteilung nur bis zur Schichtgrenze statt (siehe Bild 8). Selbst nach 3 Tagen hat die Perliteplatte noch keinerlei Wasser aufgenommen.

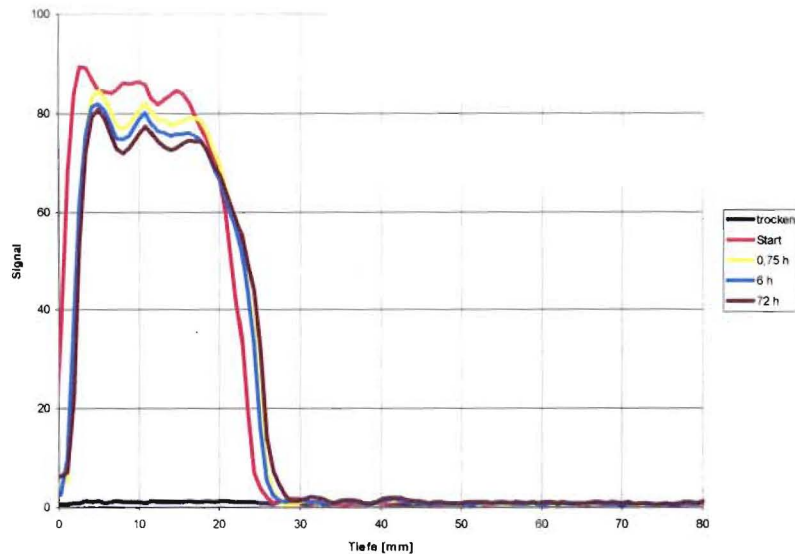


Bild 8 Mit der NMR-Anlage ermittelte Wassergehaltsverteilungen an einer Probe bestehend aus der 24 mm dicken Calciumsilikatplatte mit darauf folgender 60 mm dicken Perliteplatte.

Auch hier zeigt sich wieder ein ganz ähnliches Verhalten bei der Kombination aus der 24 mm dicken Calciumsilikatplatte mit darauf folgender 60 mm dicken Mineralschaumplatte (siehe Bild 9). Allerdings findet hier wenigstens eine geringfügige Weiterverteilung in die Mineralschaumplatte statt.

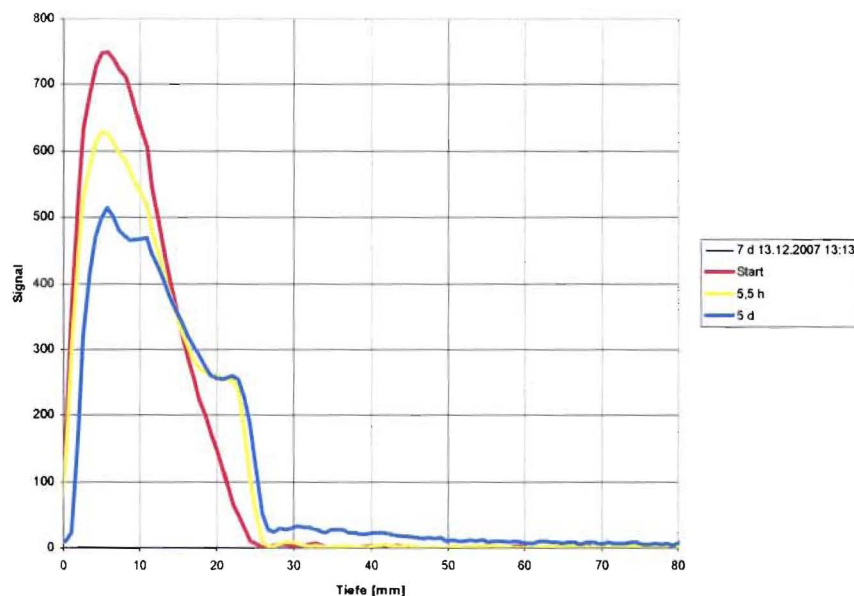


Bild 9 Mit der NMR-Anlage ermittelte Wassergehaltsverteilungen an einer Probe bestehend aus der 24 mm dicken Calciumsilikatplatte mit darauf folgender 60 mm dicken Mineralschaumplatte.

Um das sich anhand der obigen Bilder ergebende Feuchteverhalten korrekt nachrechnen zu können, muss vor allem die Feuchtespeicherfunktion exakt angepasst werden, da sie hier die Haupteinflussgröße darstellt. Dies erfolgt durch iterative Anpassung mit dem Vergleich der berechneten und der gemessenen Wassergehaltsprofile. Bild 10 zeigt das erzielte Ergebnis am Beispiel einer Probe, bestehend aus der 60 mm dicken Mineralschaumplatte mit darauf folgender 24 mm dicker Calciumsilikatplatte.

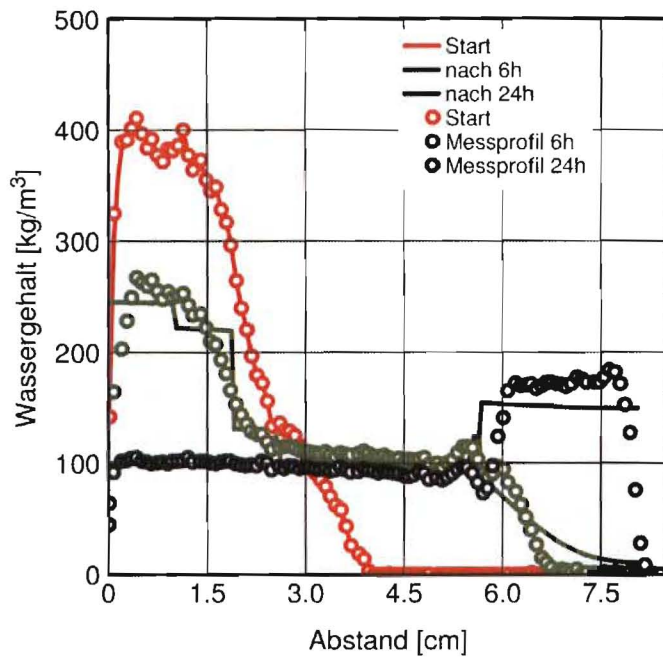


Bild 10 Vergleich der nach Anpassung der Feuchtespeicherfunktion berechneten Feuchteprofile mit den mit der NMR-Anlage ermittelten Wassergehaltsverteilungen an einer Probe bestehend aus der 60 mm dicken Mineralschaumplatte mit darauf folgender 24 mm dicker Calciumsilikatplatte.

Man erkennt, dass auf diese Weise die Berechnungen die Profile in guter Übereinstimmung mit den gemessenen Werten wider geben. Eine ebenso gute Übereinstimmung erhält man für den Feuchteübergang von der Perliteplatte in die Calciumsilikatplatte, wie aus Bild 11 ersichtlich.

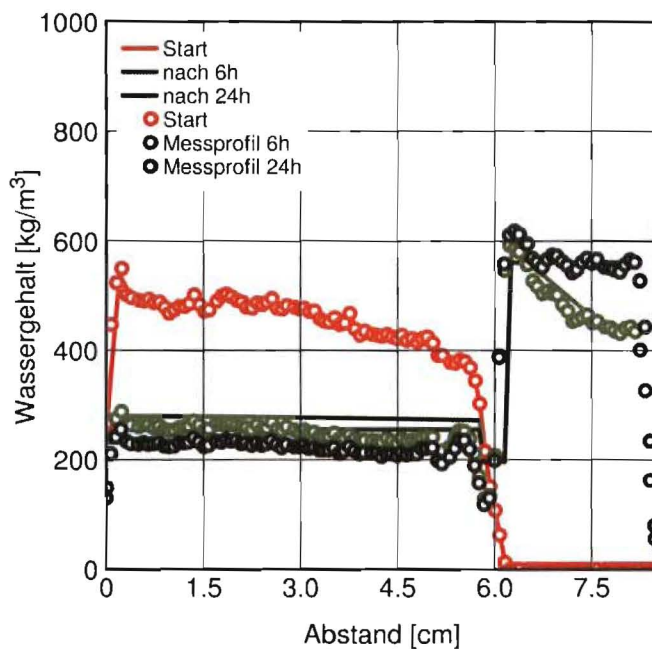


Bild 11 Vergleich der nach Anpassung der Feuchtespeicherfunktion berechneten Feuchteprofile mit den mit der NMR-Anlage ermittelten Wassergehaltsverteilungen an einer Probe bestehend aus der 60 mm dicken Perliteplatte mit darauf folgender 24 mm dicker Calciumsilikatplatte.

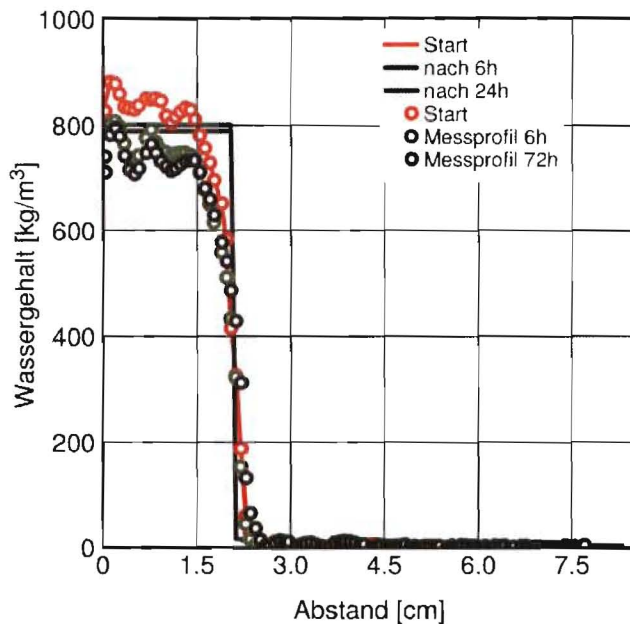


Bild 12 Vergleich der nach Anpassung der Feuchtespeicherfunktion berechneten Feuchteprofile mit den mit der NMR-Anlage ermittelten Wassergehaltsverteilungen an einer Probe bestehend aus der 24 mm dicken Calciumsilikatplatte mit darauf folgender 60 mm dicken Perliteplatte.

Mit derselben angepassten Feuchtespeicherfunktion lässt sich auch der Feuchteübergang in umgekehrter Richtung, also von der Mineralschaumplatte bzw. der Perliteplatte in die Calciumsilikatplatte, mit guter Übereinstimmung zur Messung berechnen, wie aus Bild 12 und 13 ersichtlich.

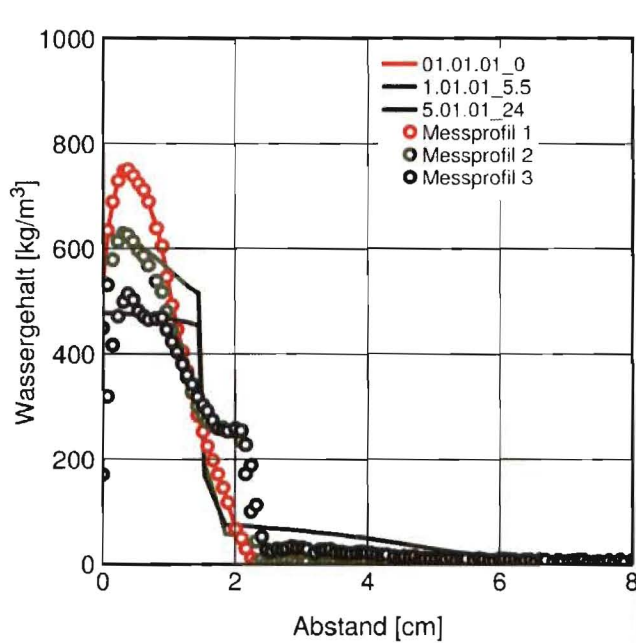


Bild 13 Vergleich der nach Anpassung der Feuchtespeicherfunktion berechneten Feuchteprofile mit den mit der NMR-Anlage ermittelten Wassergehaltsverteilungen an einer Probe bestehend aus der 24 mm dicken Calciumsilikatplatte mit darauf folgender 60 mm dicken Mineralschaumplatte.

Nachdem gezeigt werden konnte, dass sich die Feuchtetransportvorgänge in den Sandwichplatten rechnerisch korrekt nachvollziehen lassen, werden im Folgenden unter Verwendung dieser angepassten Materialkennwertfunktionen die Optimierungsberechnungen durchgeführt.

6.2.6 Optimierung der Materialkennwerte

Bei der rechnerischen Optimierung der hygrischen Materialkennwerte des Innendämmsystems wurde als typisches Beispiel für einen Altbau ein Ziegelmauerwerk zugrunde gelegt, das mit einem Wärmedurchgangskoeffizienten von $1,25 \text{ W/m}^2\text{K}$ nur geringfügig oberhalb des Mindestdämmstandards liegt. Außenseitig ist das Mauerwerk mit einem typischen Kalkzementputz versehen. Innenseitig wird das Innendämmsystem mit dem dafür vorgesehenen Kleber (CaSi-KP-Kleber) aufgebracht, wobei die Innendämmung in ihrer kompletten Schichtenfolge einschließlich der Widerstandsschichten implementiert wird. Bild 14 zeigt am Beispiel der Dämmung mit der Calciumsilikat (CaSi)- Perlite-Sandwichplatte den kompletten implementierten Aufbau.

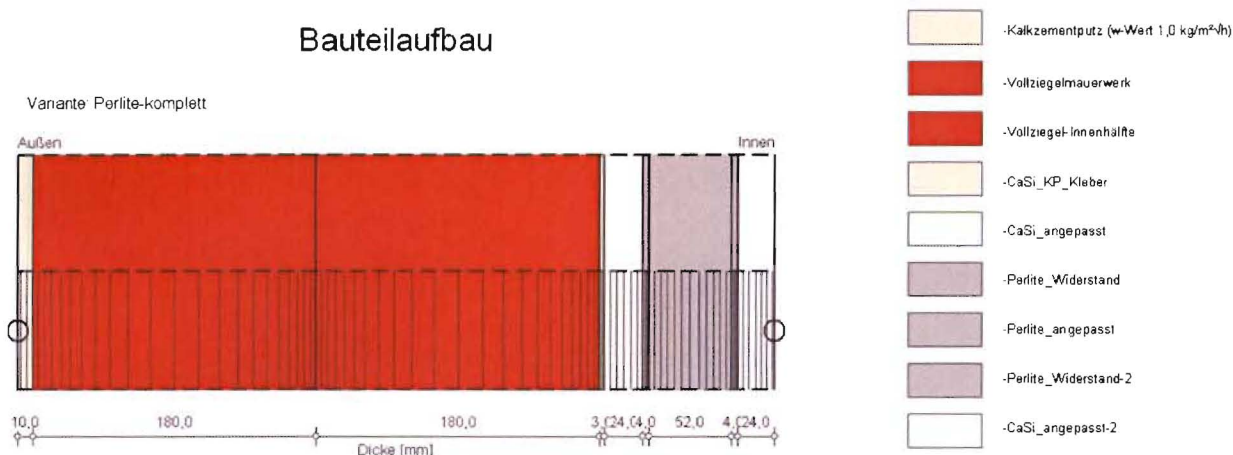


Bild 14 Für die Optimierungsberechnungen implementierter Wandaufbau mit der Perlite-Sandwichplatte als Beispiel für das Innendämmsystem.

Bei den Berechnungen wurde als möglichst ungünstige Variante von einer Nordausrichtung der Wand ausgegangen; als klimatischer Standort wurde Holzkirchen ausgewählt. Innenseitig wurde eine normale Feuchtelast angenommen, entsprechend einer Wohnraumnutzung. Der innenseitige Wärmeübergangskoeffizient wurde mit $8 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ und der außenseitige mit $17 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ angesetzt. Als Optimierungskriterium wurde in Analogie zu früheren rechnerischen Untersuchungen an der TU-Dresden der Wasserhaushalt im Ziegelmauerwerk hinter der Innendämmung herangezogen.

Bei den Optimierungsberechnungen wurden als wesentliche hygrothermische Materialkenngröße der Diffusionswiderstand, die Feuchtespeicherfunktion sowie die Kapillaraktivität in der Materialschicht des Innendämmsystems variiert, wobei unter Variation dieser Kennwerte für die Materialschicht jeweils 20 Berechnungen durchgeführt wurden. Als Ausgangszustand wurde in allen Berechnungen die langfristige berechnete Wassergehaltsverteilung der Grundvariante gewählt, um keine mehrjährigen Berechnungen durchführen zu müssen. Aus diesem Grund beginnen alle Variationsberechnungen im gleichen Punkt und fächern sich entsprechend ihres Einflusses dann zu günstigeren oder ungünstigeren Wassergehaltsverläufen auf. Bild 15 zeigt die Ergebnisse der Variationsberechnungen für die Perliteplatte. In den folgenden Bildern sind jeweils, bezogen auf den Ausgangszustand, die durchgeführten Änderungen der Materialkennwerte, die zu einer maximalen Erhöhung oder Reduzierung des Wassergehaltes führen, genannt. Man erkennt in diesem Fall aus den berechneten Ergebnissen, dass eine Verminderung der Kapillaraktivität der Platte eine Verschlechterung und eine Verdoppelung eine Verbesserung bewirkt.

Betrachtet man die prozentuale Beeinflussung, wie sie in Bild 16 dargestellt ist, zeigt sich, dass durch die Parametervariation an der Perliteplatte die Feuchtsituation um bis zu ca. 15 % verschlechtert, aber nur um bis zu ca. 8 % verbessert werden kann.

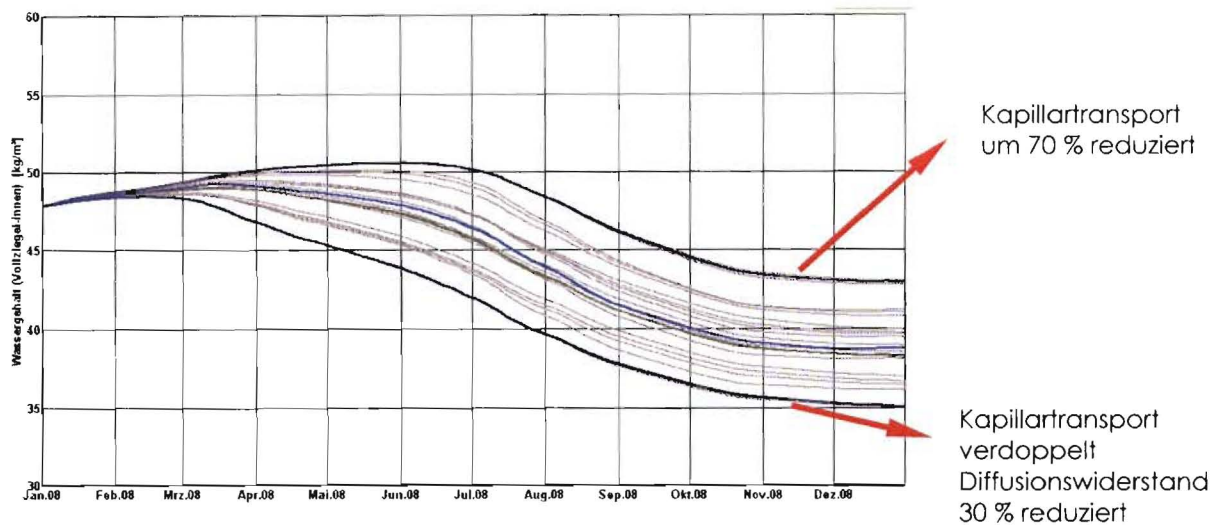


Bild 15 Ergebnisse der Optimierungsberechnungen der Perliteplatte. Dargestellt ist der Verlauf des Wassergehaltes im Ziegelmauerwerk hinter der Innendämmung.

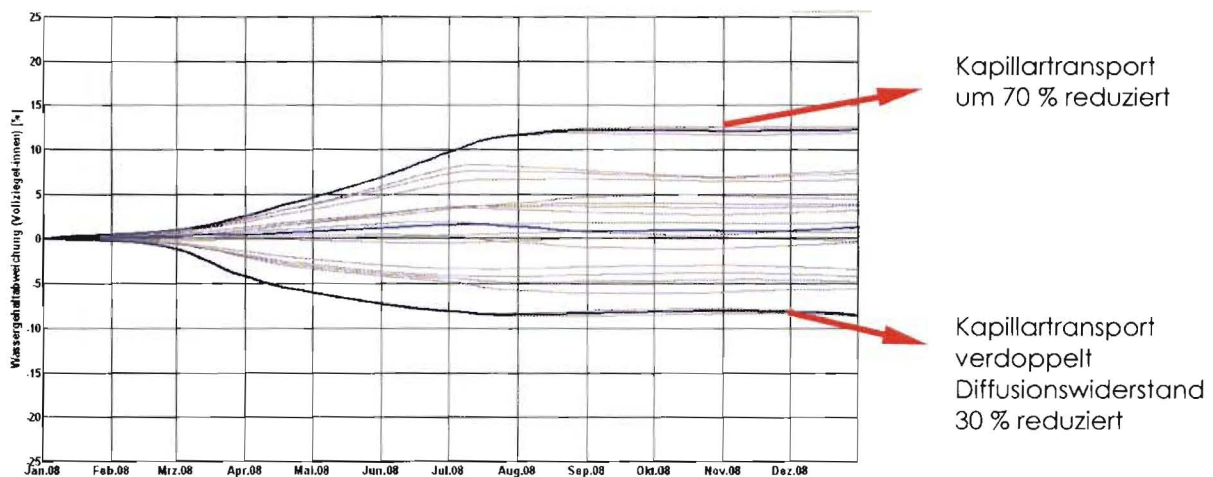


Bild 16 Ergebnisse der Optimierungsberechnungen der Perliteplatte. Dargestellt ist die prozentuale Veränderung des Wassergehaltes im Ziegelmauerwerk hinter der Innendämmung.

Noch geringer ist der Einfluss der innenseitigen Klebschicht zwischen Perliteplatte und Calciumsilikatplatte, wie anhand der in Bild 17 bzw. Bild 18 dargestellten Ergebnissen erkennbar. Die Haupteinflussgröße ist hier der Diffusionswiderstand, wobei durch Variation desselben nur Veränderungen von wenigen Prozent bewirkt werden. Ein ganz ähnliches Ergebnis wird bei Variation der Materialparameter der außenseitigen Klebschicht erzielt, weshalb auf eine gesonderte Darstellung verzichtet wird.

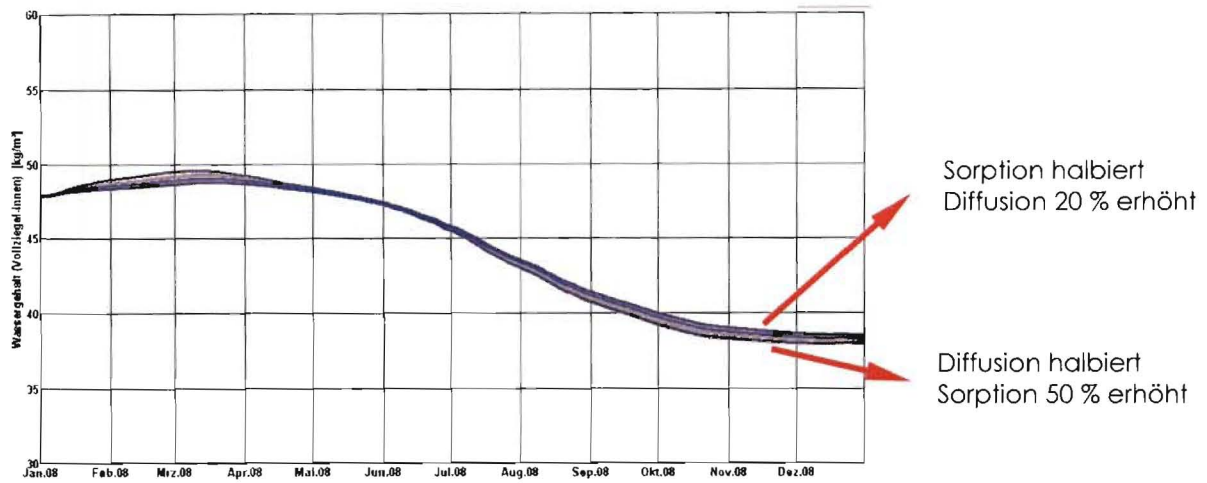


Bild 17 Ergebnisse der Optimierungsberechnungen der Klebeschicht zwischen der Perliteplatte und Calciumsilikatplatte. Dargestellt ist der Verlauf des Wassergehaltes im Ziegelmauerwerk hinter der Innendämmung.

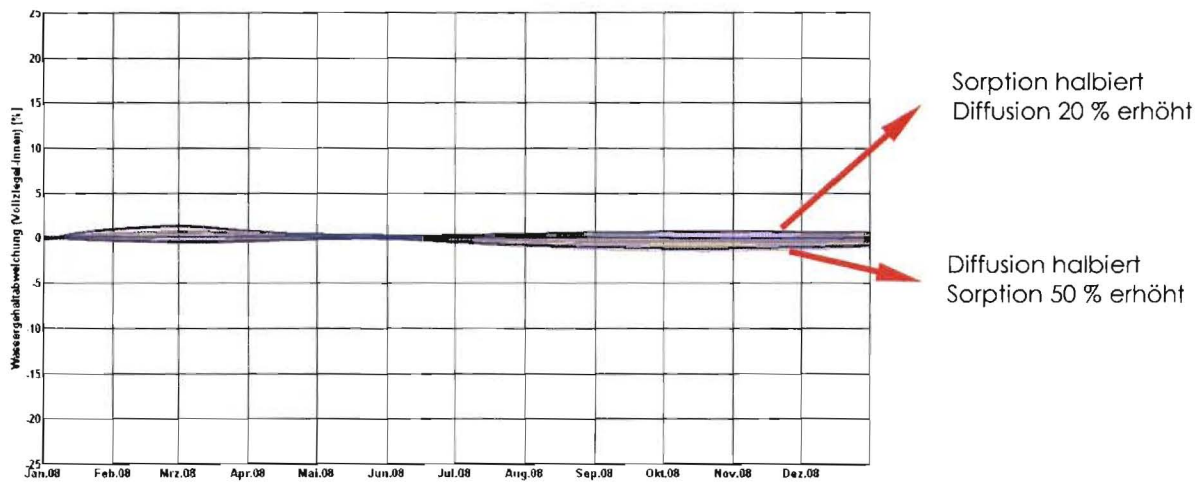


Bild 18 Ergebnisse der Optimierungsberechnungen der Klebeschicht zwischen der Perliteplatte und Calciumsilikatplatte. Dargestellt ist die prozentuale Veränderung des Wassergehaltes im Ziegelmauerwerk hinter der Innendämmung.

Für die Variation der Materialparameter der Calciumsilikatplatte sind die Ergebnisse in Bild 19 und 20 dargestellt. Besonders interessant ist dabei, dass durch Herabsetzen der Kapillaraktivität das feuchtetechnische Verhalten zwar merklich verschlechtert werden kann, aber nahezu keine Verbesserung möglich ist. Dies bedeutet, dass es sich hierbei um ein Produkt handelt, das bezüglich seiner hygrischen Eigenschaften nicht weiter optimiert werden kann und braucht.

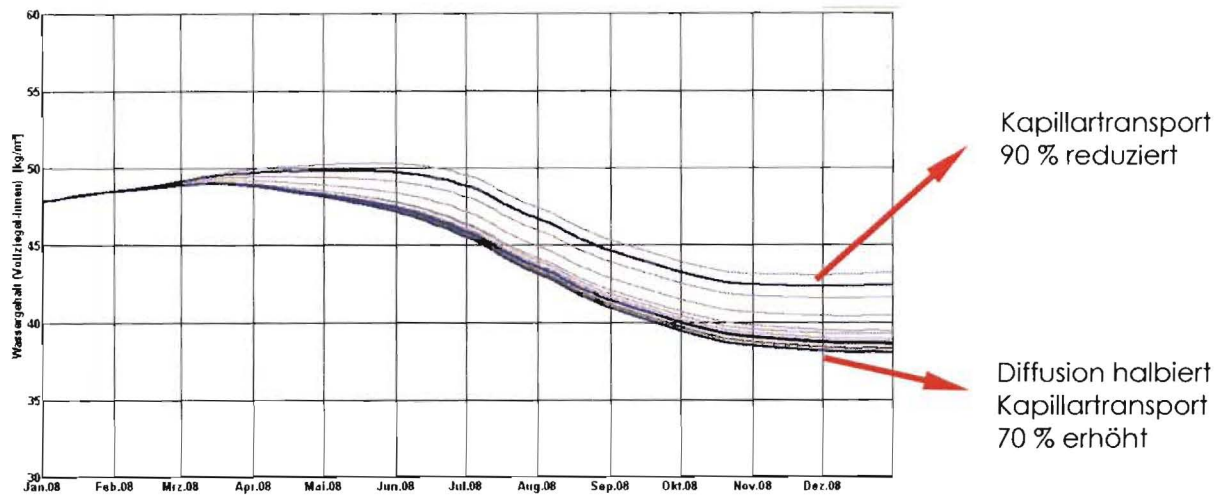


Bild 19 Ergebnisse der Optimierungsberechnungen der Calciumsilikatplatte. Dargestellt ist der Verlauf des Wassergehaltes im Ziegelmauerwerk hinter der Innendämmung.

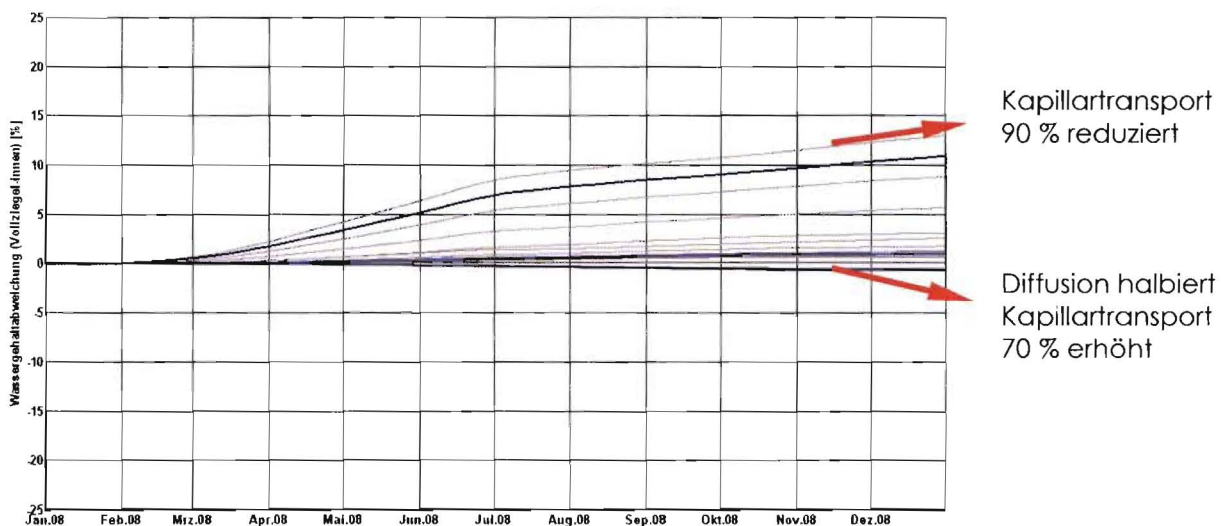


Bild 20 Ergebnisse der Optimierungsberechnungen der Calciumsilikatplatte. Dargestellt ist die prozentuale Veränderung des Wassergehaltes im Ziegelmauerwerk hinter der Innendämmung.

Nachdem sich gezeigt hat, dass eine Optimierung der hygrischen Materialkennwerte im realistischen Variationsbereich nur eine relativ geringe Verbesserung der Situation bewirkt, wird im folgenden das Hauptaugenmerk auf den Einfluss der Schichtenfolge gelegt.

6.2.7 Variation der Schichtenabfolge

Zunächst wird, um den Einfluss des Wärmewiderstandes auf den Feuchtehaushalt des Ziegelmauerwerks hinter der Innendämmung zu zeigen, die Innendämmung aus einer Standard-Calciumsilikatplatte mit 5 cm Dicke (untere/schwarze Linie) verglichen mit einer doppelt so dicken Innendämmung (mittlere/rote Linie). Die in Bild 21 dargestellten Ergebnisse zeigen, dass sich aufgrund der mit steigender Innendämmung sinkenden Mauerwerkstemperatur höhere Mauerwerksfeuchten ergeben. Bei dem zu Vergleichszwecken mit berechnetem Sandwich mit einer fiktiven Calciumsilikatplatte in der Mitte, die bei gleicher Kapillaraktivität eine von 0,07 auf 0,05 W/(mK) reduzierte Wärmeleitfähigkeit aufweist, ergibt sich eine noch etwas höhere Ziegelfeuchte (siehe obere blaue Linie).

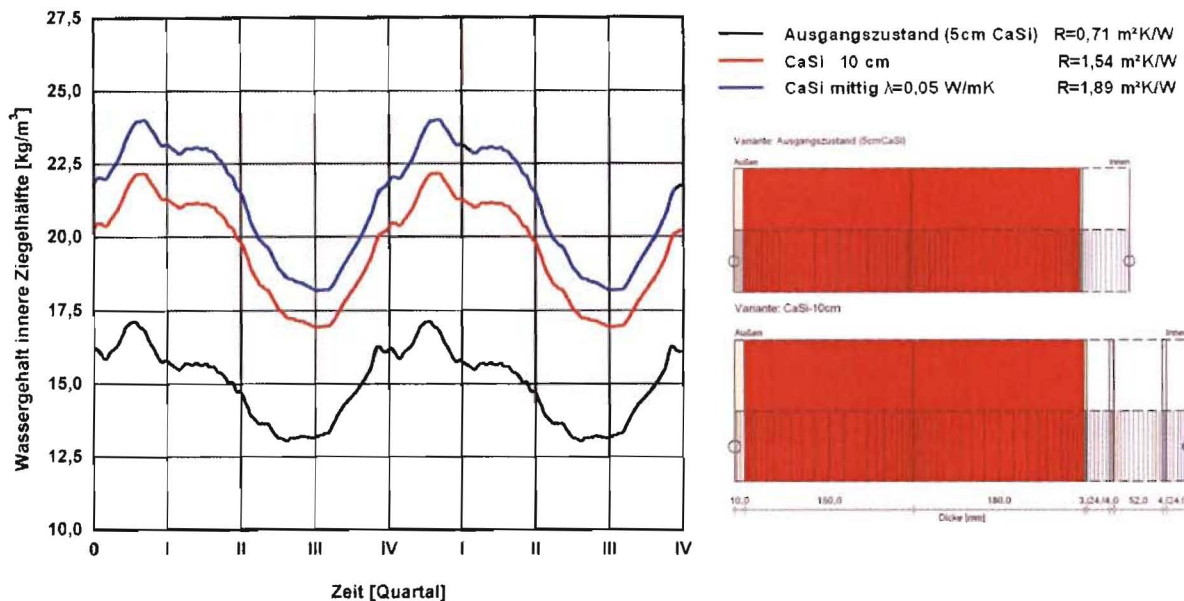


Bild 21 Berechnete Wassergehalte des Ziegelmauerwerks unterhalb der Innendämmung für eine 5 cm dicke Calciumsilikatplatte (untere/schwarze Linie), eine doppelt so dicke Calciumsilikatplatte (mittlere/rote Linie) und ein fiktives Sandwichprodukt mit mittig abgesenkter Wärmeleitfähigkeit (obere/blau Linie). Rechts neben dem Diagramm sind schematisch die Wandaufbauten sowie die resultierenden Wärmewiderstände der Innendämmung dargestellt.

In Bild 22 sind die Ergebnisse für die zwei untersuchten Sandwichplatten dargestellt. Beide Systeme liefern nahezu das gleiche Ergebnis, was den bereits dargestellten geringen Einfluss der Materialkennwerte bestätigt. Nur bei der fiktiven Sandwichplatte aus Calciumsilikat ergibt sich ein anderes Ergebnis. Um zu ergründen, was die Ursache dafür ist, wurde bei der Calciumsilikatplatte die Kapillaraktivität ausgeschaltet (was natürlich nur rechnerisch oder mit Hilfe von Hydrophobierungsmittel möglich ist). Anhand der Ergebnisse in Bild 23 wird erkennbar, dass bei gleichem Wärmewiderstand dadurch ein deutlich höherer Wassergehalt resultiert und dass somit die Kapillarwirkung des Dämmstoffes entscheidend für den Wasserhaushalt ist.

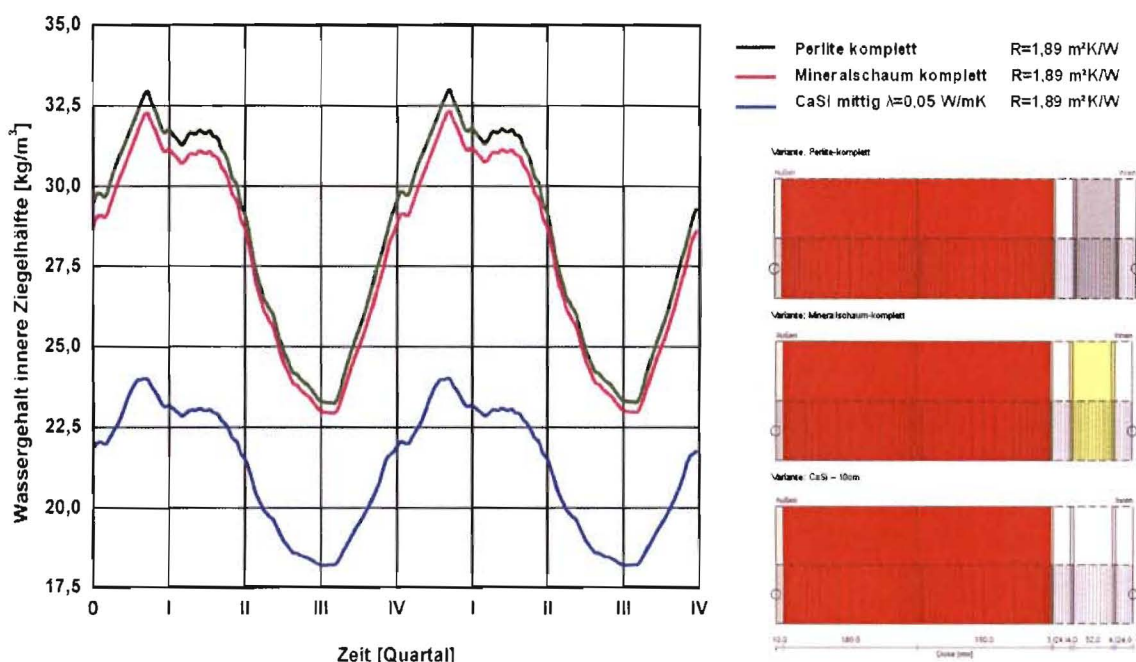


Bild 22 Berechnete Wassergehalte des Ziegelmauerwerks unterhalb der Innendämmung für einen Sandwichaufbau mit innenseitiger Perliteplatte (obere/grüne Linie), Mineralschaumplatte (mittlere/rote Linie) und der fiktiven Calciumsilikatplatte mit mittig abgesenkter Wärmeleitfähigkeit (untere/blau Linie). Rechts neben dem Diagramm sind schematisch die Wandaufbauten sowie die resultierenden Wärmewiderstände der Innendämmung dargestellt.

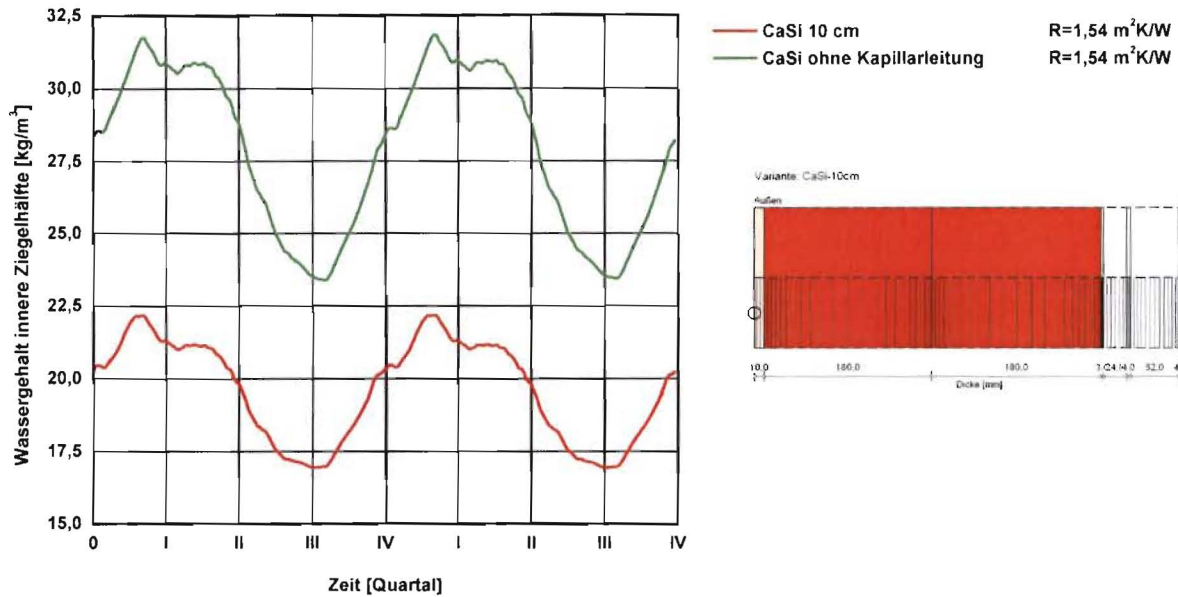


Bild 23 Berechnete Wassergehalte des Ziegelmauerwerks unterhalb der Innendämmung für eine Innendämmung aus 10 cm Calciumsilikat mit (untere/rote Linie) und ohne Kapillaraktivität (obere/grüne Linie). Rechts neben dem Diagramm ist schematisch der Wandaufbau sowie die resultierenden Wärmewiderstände der Innendämmung dargestellt.

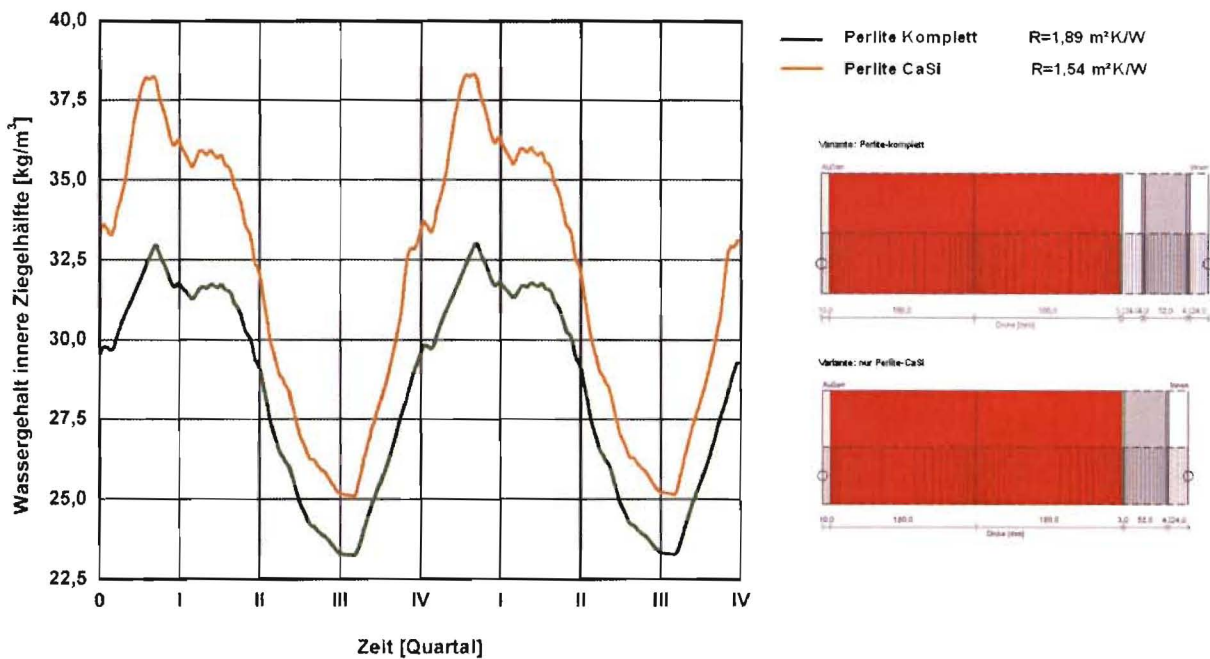


Bild 24 Berechnete Wassergehalte des Ziegelmauerwerks unterhalb der Innendämmung für eine Perlite-Sandwichplatte mit nur raumseitiger Calciumsilikatplatte (obere/braune Linie) im Vergleich zum Gesamtsystem (untere/grüne Linie). Rechts neben dem Diagramm sind schematisch die Wandaufbauten sowie die resultierenden Wärmewiderstände der Innendämmung dargestellt.

Wird bei der Sandwichplatte auf die außenseitige Calciumsilikatplatte verzichtet, ergibt sich trotz niedrigerem Wärmewiderstand der Innendämmung eine Verschlechterung des Feuchtehaushalts (siehe Bild 24). Ein Verzicht auf die raumseitige Calciumsilikatplatte führt dagegen, wie aufgrund der Absenkung des Wärmewiderstandes zu erwarten, zu einer Verbesserung der Situation (Bild 25). Dies bedeutet, dass die hohe Kapillaraktivität der Calciumsilikatplatte vor allem im Übergangsbereich zur Außenwand bedeutsam ist. Aus diesem Grund wurde eine weitere Version berechnet, bei der beide Calciumsilikatplatten außenwandseitig angebracht sind. Es ergibt sich im Vergleich zur Perlite-Sandwichplatte mit beidseitiger Calciumsilikatplatte ein niedrigerer Wassergehalt im Ziegelmauerwerk

(Bild 26). Dieser ist sogar niedriger als bei der Variante aus Bild 25 mit nur einer Calciumsilikatplatte und somit niedrigerem Wärmewiderstand.

Entscheidend für den Feuchtehaushalt des Mauerwerks hinter der Innendämmung ist somit die Dicke der sehr kapillaraktiven Calciumsilikatplatte. Da die Perliteplatte ebenso wie die Mineralschaumplatte nur eine sehr geringe Festigkeit bzw. Druckbeständigkeit aufweist, wird aus praktischen Gründen wahrscheinlich trotzdem auch raumseitig eine Calciumsilikatplatte vorzusehen sein. Diese sollte dann aber möglichst dünn ausfallen, um außenwandseitig eine maximale Dicke zu ermöglichen. Die Rechenergebnisse legen die Vermutung nahe, dass ein Ersatz der Perlite- bzw. Mineralschaumplatte durch eine neu entwickelte Calciumsilikatplatte mit durch niedrigerer Dichte abgesenktem Wärmeleitkoeffizienten, aber dementsprechend auch geringerer Kapillaraktivität, die Feuchtesituation kaum verändern würde. Der Vorteil eines derartigen Sandwichsystems bestünde daran, dass man bei einem Material bleibt.

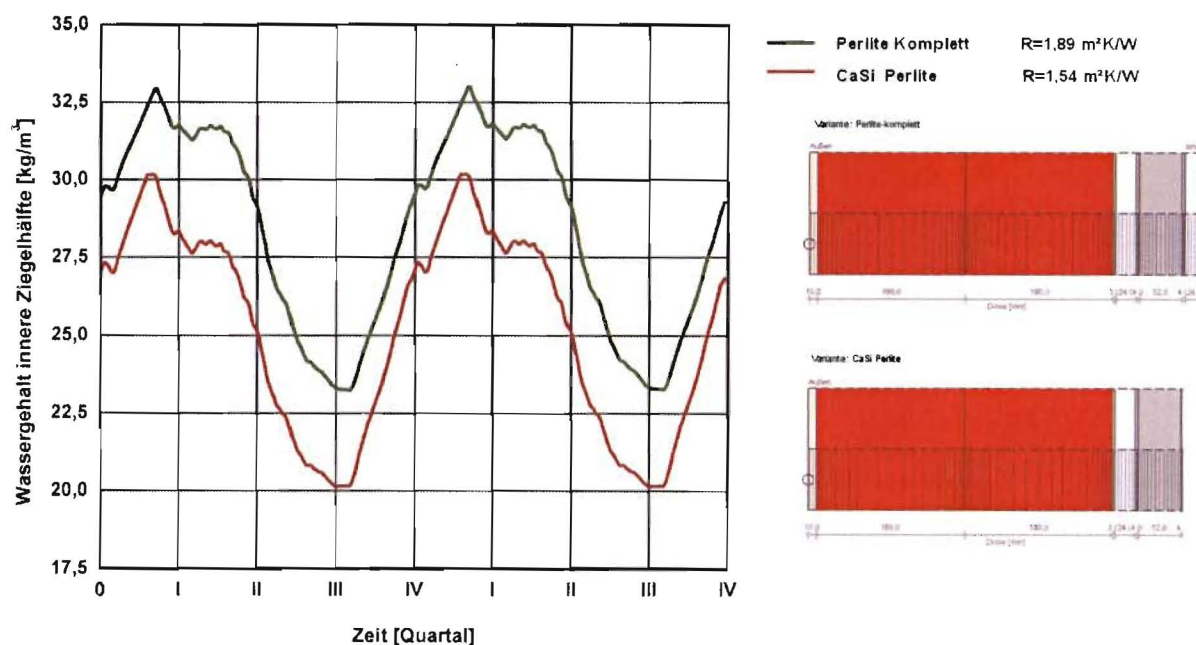


Bild 25 Berechnete Wassergehalte des Ziegelmauerwerks unterhalb der Innendämmung für eine Perlite-Sandwichplatte mit nur außenwandseitiger Calciumsilikatplatte (untere/rote Linie) im Vergleich zum Gesamtsystem (obere/grüne Linie). Rechts neben dem Diagramm sind schematisch die Wandaufbauten sowie die resultierenden Wärmewiderstände der Innendämmung dargestellt.

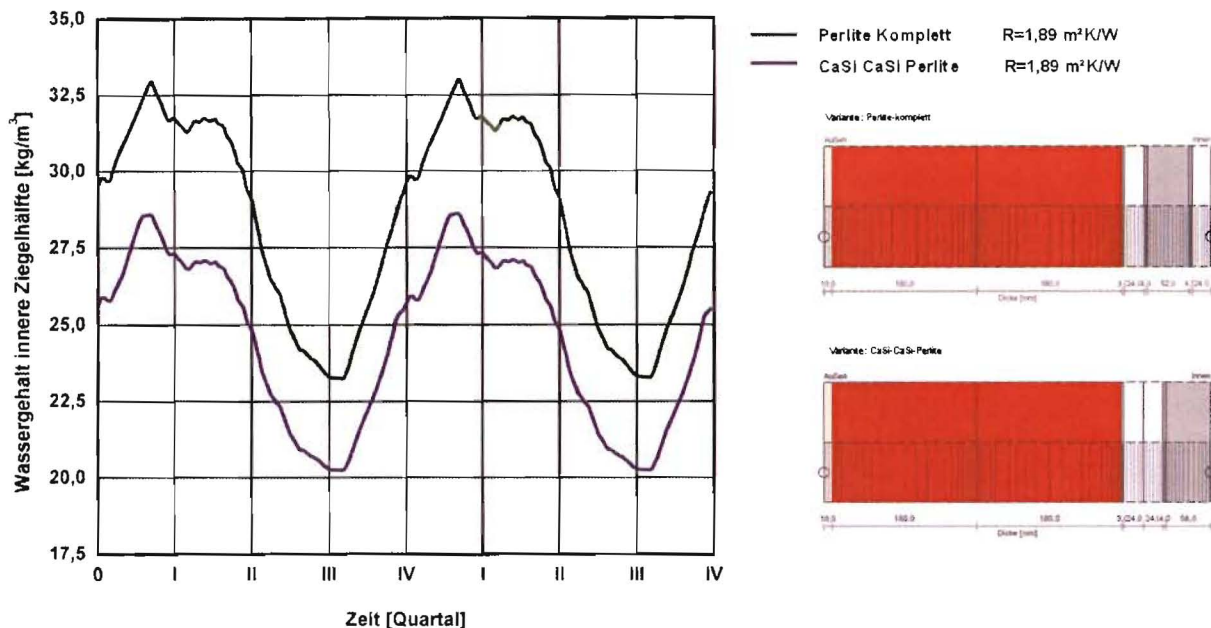


Bild 26 Berechnete Wassergehalte des Ziegelmauerwerks unterhalb der Innendämmung für eine Perlite-Sandwichplatte mit zwei außenwandseitigen Calciumsilikatplatten (untere/violette Linie) im Vergleich zum Gesamtsystem (obere/grüne Linie). Rechts neben dem Diagramm sind schematisch die Wandaufbauten sowie die resultierenden Wärmewiderstände der Innendämmung dargestellt.

In Tabelle 4 sind die Wärmedurchlasswiderstände der Wandaufbauten ohne und mit den unterschiedlichen Innendämmvarianten sowie die daraus resultierenden Wärmedurchgangskoeffizienten aufgelistet. Mit 100 mm einer Calciumsilikatplatte wird ein U-Wert von 0,43 W/(m²K) erreicht und somit die Anforderungen der EnEV 2007, die einen maximalen U-Wert von 0,45 W/(m²K) vorschreibt, erfüllt. Deutliche bessere Ergebnisse werden mit 0,36 W/(m²K) bei den unterschiedlichen „Sandwichproben“ erzielt. Damit werden auch fast die zu erwartenden Anforderungen der EnEV 2009, die einen maximalen U-Wert von 0,35 W/(m²K) vorschreibt, erfüllt. Dabei ist zu bedenken, dass es sich bei dem hier zugrunde gelegten Wandaufbau um einen äußerst niedrigen Dämmstandard handelt. Ein minimal besserer Dämmstandard würde ausreichen, um die zukünftigen Anforderungen der EnEV zu erfüllen.

Tabelle 4 Wärmedurchlasswiderstände des Wandaufbaus ohne und mit den unterschiedlichen Innendämmvarianten sowie daraus resultierender Wärmedurchgangskoeffizient.

Variante	Wärmedurchlasswiderstand	Wärmedurchgangskoeffiziente (U-Wert)
	[m²K/W]	[W/(m²K)]
ungedämmt	0,66	1,21
+ 50 mm CaSi	1,43	0,63
+ 100 mm CaSi	2,20	0,42
+ 24 mm CaSi + 52 mm Perlite + 24 mm CaSi	2,60	0,36
+ 24 mm CaSi + 52 mm Min.-schaum + 24 mm CaSi	2,60	0,36
+ 52 mm Perlite + 24 mm CaSi	2,22	0,42
+ 24 mm CaSi + 52 mm Perlite	2,22	0,42
+ 24 mm CaSi + 24 mm CaSi + 52 mm Perlite	2,60	0,36

6.2.8 Berechnungen zur Anbindung Innenwand/Innendecke

Eine nachträgliche Innendämmung führt bei niedrigen Außentemperaturen zu einer Absenkung der Temperatur der Außenwand. Da im Altbaubereich die Decken und Innenwände meist ohne thermische Trennung an diese Außenwand angebunden sind, ist damit in Außenwandnähe auch deren Temperatur zum Teil deutlich erniedrigt. In Bild 27 ist dies am Beispiel einer angrenzenden Innenwand veranschaulicht (stationäre Betrachtung). Die Innendämmung bewirkt eine Absenkung der Oberflächentemperatur auf der Innenseite des Mauerwerks. Da die Innenwandoberfläche über die Außenwand abgekühlt wird, könnte sich am Übergang zum gedämmten Bereich eine abgesenkte Temperatur mit der Folge von Schimmelpilzwachstum einstellen.

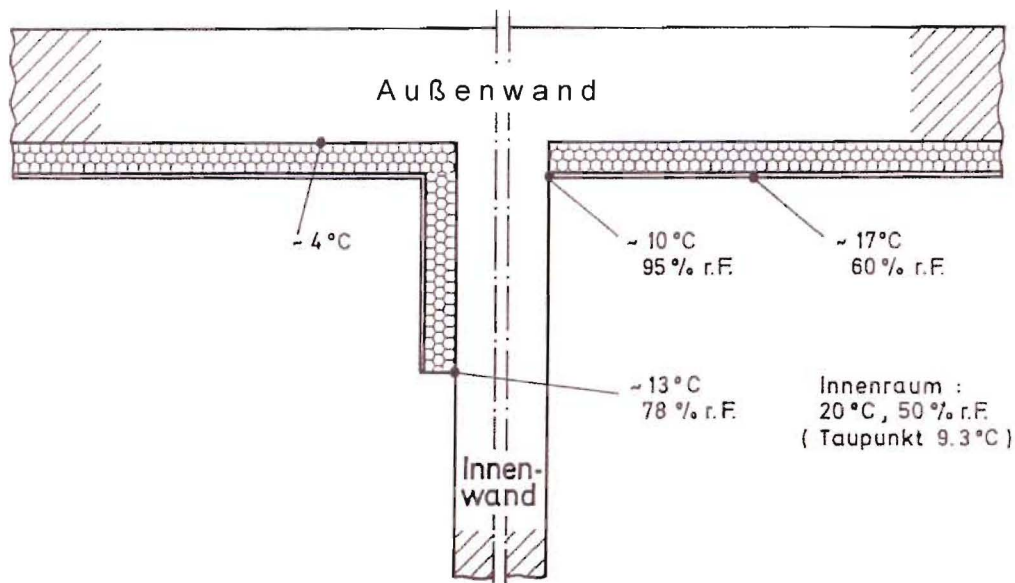
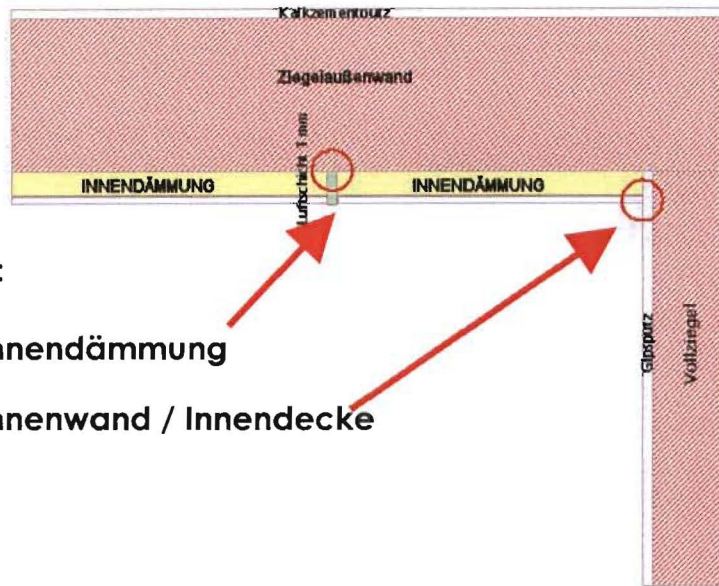


Bild 27 Schematische Darstellung der Wärmebrückenproblematik durch eine Innendämmung.

Bei den Berechnungen wird als Ausgangsvariante ein Wandaufbau mit einem Wärmedurchgangskoeffizienten entsprechend einem Altbau und eine typische Decken- bzw. Innenwandeinbindung zugrunde gelegt. Bild 28 zeigt den implementierten Wandaufbau mit einer Innenwand aus massiven Ziegeln. Die sich im Jahresverlauf an der Übergangsstelle zwischen dem Innenputz auf der Innendämmung und der einbindenden Wand ergebenden Verläufe der Oberflächenfeuchte sind für die drei Dämmstoffvarianten Perlite-komplett, Mineralschaum-komplett und CaSi-komplett (innenseitig einer CaSi-Platte mit einer Wärmeleitfähigkeit von 0,05 W/(mK)) in Bild 29 dargestellt. Man erkennt, dass die Wahl des Dämmstoffes keinen Einfluss auf das Ergebnis hat. Das ist nicht verwunderlich, da alle drei Varianten den gleichen Wärmewiderstand besitzen und hierbei nur dieser das Ergebnis beeinflusst. Für die weiteren derartigen Berechnungen wird deshalb der Dämmstoff nicht variiert. Es wird aus den drei Grafiken allerdings auch ersichtlich, dass bei dieser Konstruktion an dieser Stelle keinerlei Schimmelpilzrisiko vorliegt, da die Oberflächenfeuchten nur Maximalwerte von knapp über 60 % erreichen. Die höchsten Oberflächenfeuchten werden nicht im Winter sondern in den Sommermonaten erreicht.



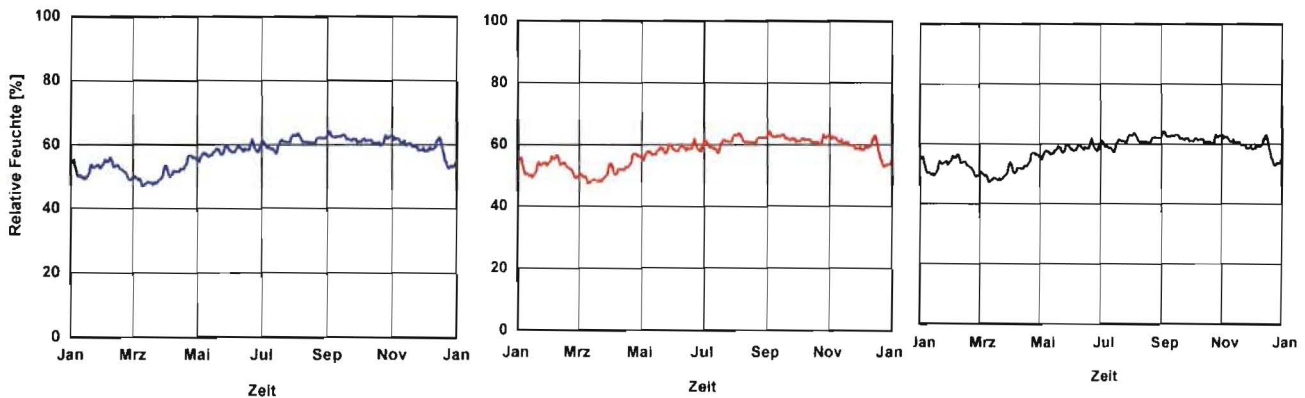
2 Problembereiche:

Fehlstelle in der Innendämmung

Anbindung Innenwand / Innendecke

Bild 28 Implementierter Wandaufbau mit einer Innenwand aus massivem Ziegel und Darstellung der Problembereiche bei Innendämmung.

Innenwand aus Ziegel



Perlite-Komplett

Mineralschaum-Komplett CaSi-10cm-innen 0,05 W/(mK)

Bild 29 Berechnete Oberflächenfeuchten an der Übergangsstelle zwischen dem Innenputz auf der Innendämmung und der einbindenden Wand für drei unterschiedliche Dämmstoffvarianten mit gleichem Wärmewiderstand, entsprechend der in Bild 28 abgebildeten Konstruktion.

Nachdem die einbindende Innenwand aus Ziegel in Bezug auf das Schimmelpilzrisiko unkritisch ist, wird als extremere Variante eine Betondecke implementiert, die 30 cm in die Außenwand einbindet (siehe implementierter Aufbau in Bild 30). Mit dieser Betondecke ergibt sich nur eine geringfügig höhere Oberflächenfeuchte, die ebenfalls völlig unkritisch ist (Bild 31).

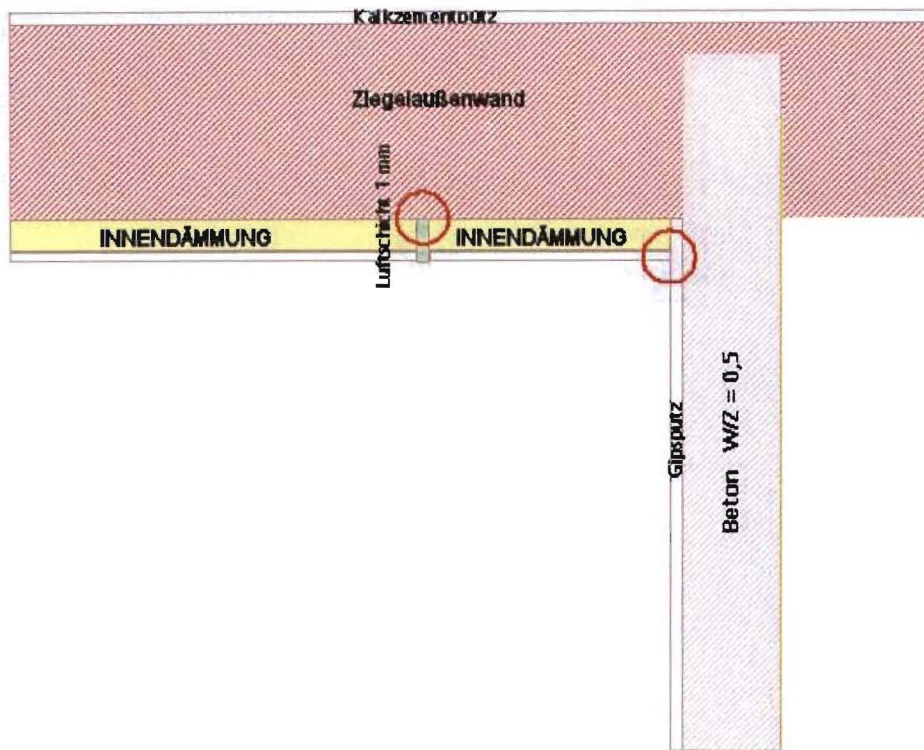


Bild 30 Implementierter Wandaufbau mit einer Betondecke, die 30 cm in die Außenwand einbindet.

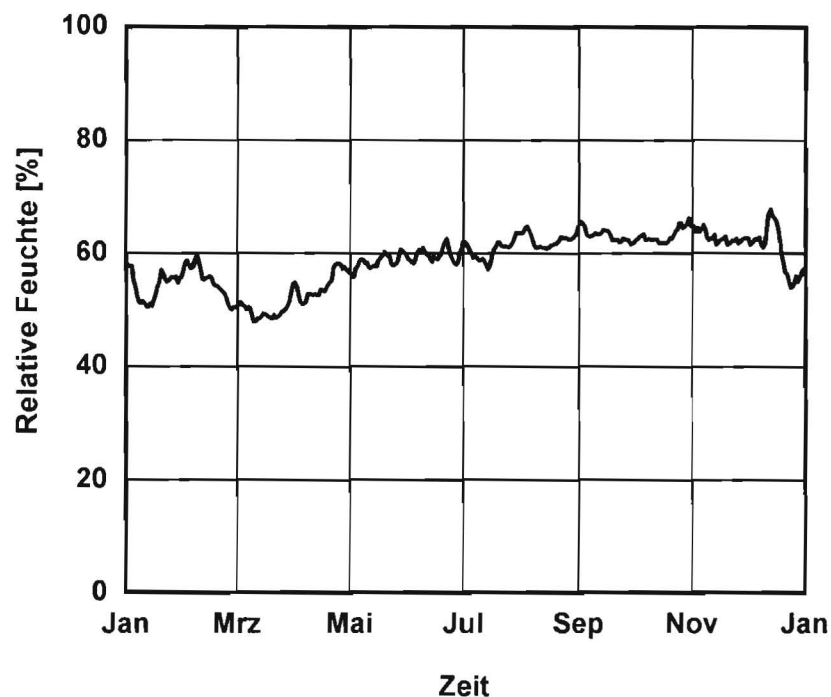


Bild 31 Berechnete Oberflächenfeuchten an der Übergangsstelle zwischen dem Innenputz auf der Innendämmung und der einbindenden Betondecke für die Konstruktion aus Bild 30.

Die Betondecke wirkt zwar als Wärmebrücke, aufgrund ihrer großen innen liegenden Oberfläche führt dies aber eher zu einer Erwärmung an der Grenze zwischen Dämmung und Decke. Dieser Effekt könnte aber durch eine oberseitige Estrichdämmung reduziert werden, die entsprechend dem in Bild 32 dargestellten Aufbau ebenfalls berechnet wurde. Der berechnete Verlauf der Oberflächenfeuchte wird durch die Innendämmung gemäß Bild 33 allerdings nur geringfügig erhöht. Der Grund liegt auch hierbei darin, dass die Innendecke eher zu einer Erwärmung im Übergangsbereich führt, wie anhand der für Mitte Februar berechneten und in Bild 34 dargestellten Temperaturverteilung ersichtlich wird.

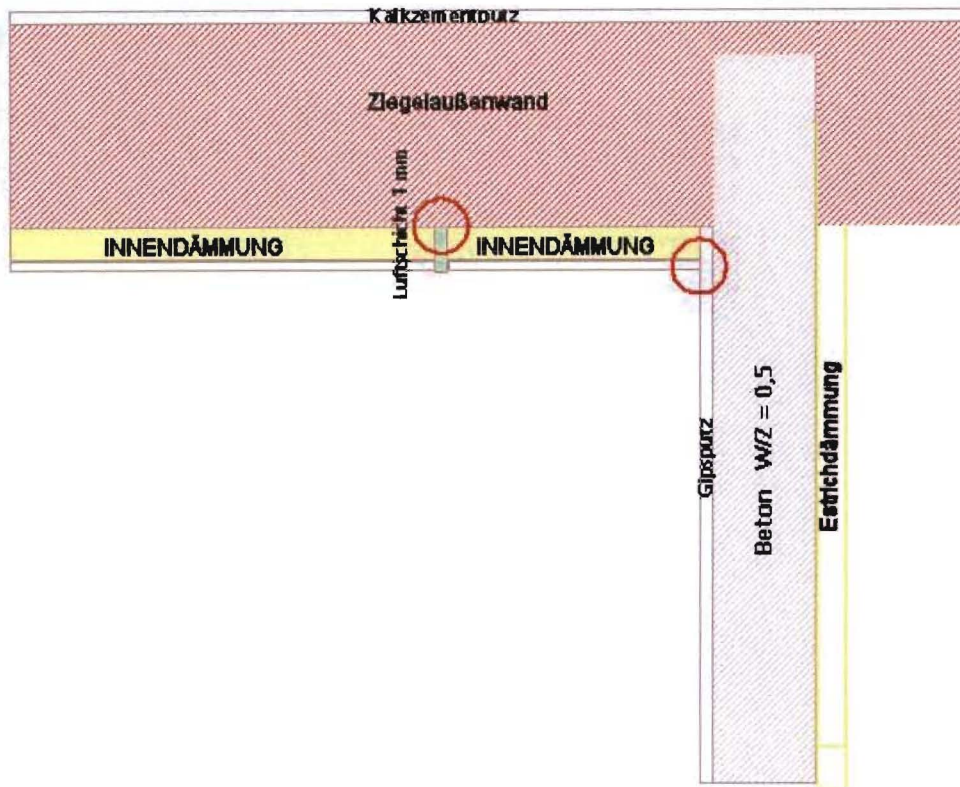


Bild 32 Implementierter Wandaufbau mit einer Betondecke, die oberseitig mit einer Estrichdämmung versehen ist.

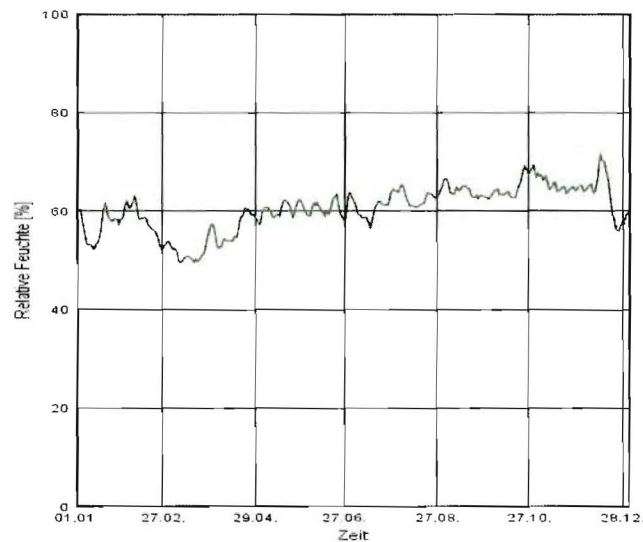


Bild 33 Berechnete Oberflächenfeuchten an der Übergangsstelle zwischen dem Innenputz auf der Innendämmung und der einbindenden Betondecke mit Estrichdämmung für die Konstruktion aus Bild 32.

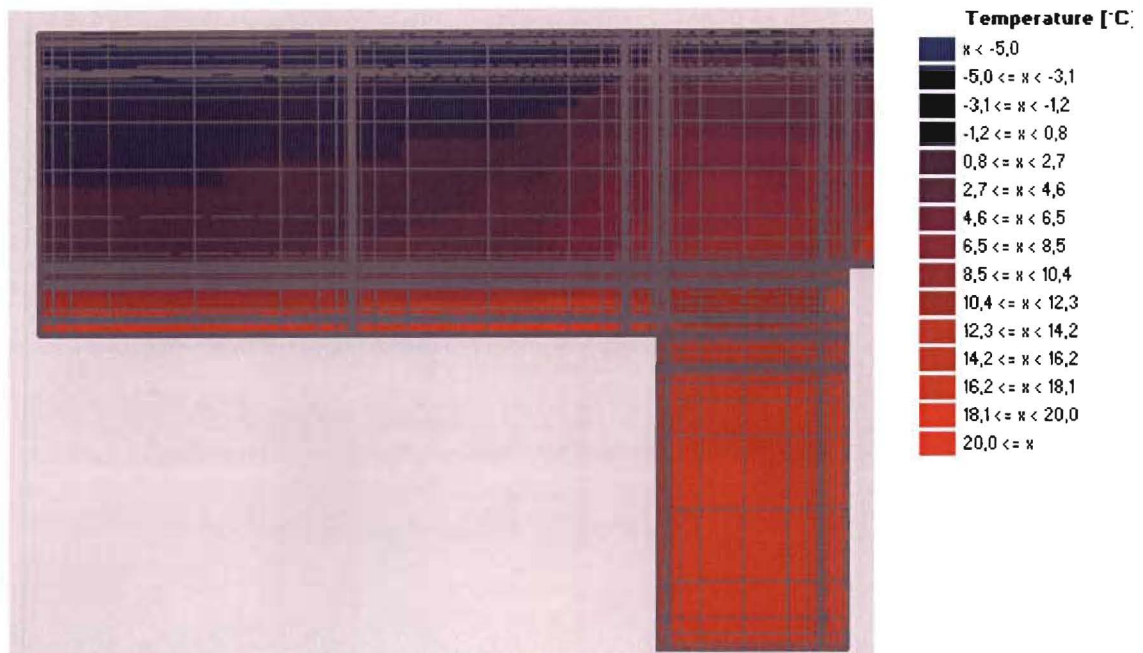


Bild 34 Temperaturverteilung in der Konstruktion aus Bild 32 für Mitte Februar.

Als letzter Fall wurde eine Version gerechnet, bei der zwischen Decke und Innendämmung durch eine unfachgemäße Anbringung ein Spalt mit 1 mm Dicke auftritt. Um die Situation noch extremer zu gestalten, wurde hierbei die Betonwand bis zum Außenputz durchgezogen (Bild 35).

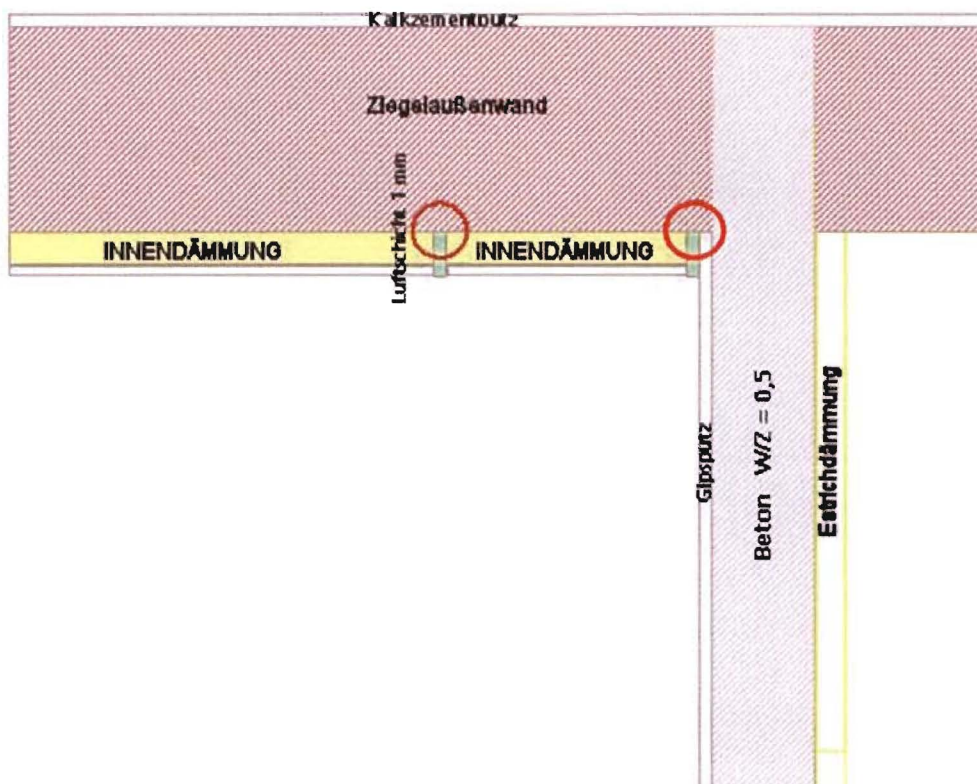


Bild 35 Implementierter Wandaufbau mit einer Betondecke, die oberseitig mit einer Estrichdämmung versehen ist und bei dem zwischen Decke und Innendämmung durch eine unfachgemäße Anbringung ein Luftspalt vorhanden ist.

Am Boden des Luftspaltes zwischen der Innendämmung und der einbindenden Betondecke mit Estrichdämmung werden nun Oberflächenfeuchten von zeitweise oberhalb 80 % erreicht, allerdings bei niedrigen Temperaturen von zum Teil unter 5 °C (Bild 37).

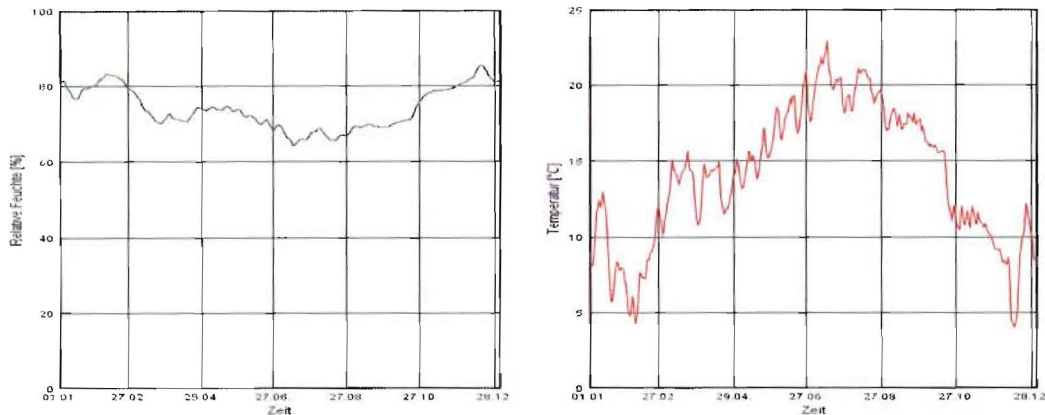


Bild 36 Berechnete Oberflächenfeuchten und -temperaturen am Boden des Luftspaltes zwischen der Innendämmung und der einbindenden Betondecke mit Estrichdämmung für die Konstruktion aus Bild 35.

Der Vergleich mit den berechneten Oberflächenfeuchten und -temperaturen in der Ecke zwischen Außenwand und der einbindenden Betondecke zeigt, dass durch die Innendämmung an dieser Stelle in den Wintermonaten die Oberflächentemperatur zum Teil um mehr als 5 °C niedriger liegt als ohne Dämmung. Dies führt zu etwas höheren Oberflächenfeuchten.

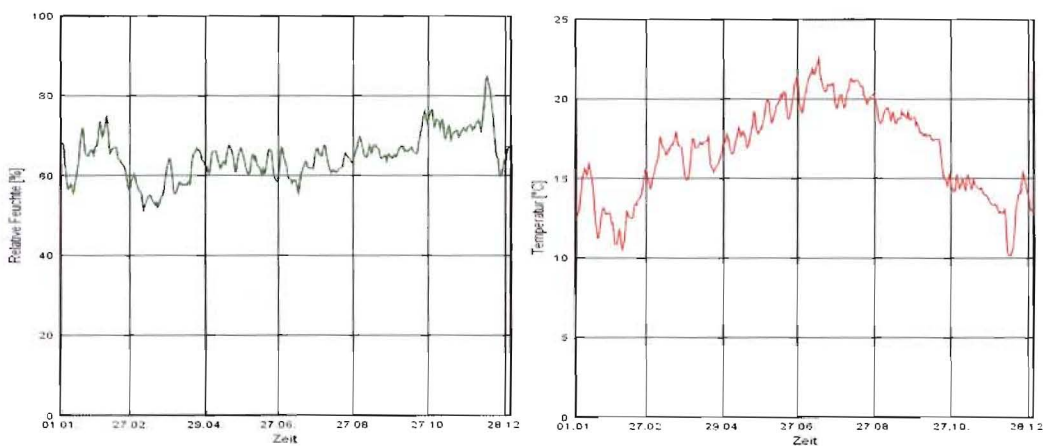


Bild 37 Berechnete Oberflächenfeuchten und -temperaturen in der Ecke zwischen Außenwand und der einbindenden Betondecke mit Estrichdämmung für die Konstruktion aus Bild 35 ohne Innendämmung.

Die Beurteilung der Gefahr eines Schimmelpilzbefalls ermöglicht ein am IBP entwickeltes Prognosetool, das anhand der in Bild 36 bzw. Bild 37 dargestellten hygrothermischer Berechnungsergebnisse das Risiko von Schimmelpilzwachstum besser abschätzbar macht. Die Bewertung einer möglichen Schimmelpilzbildung erfolgt dabei durch den Vergleich des instationär ermittelten Wassergehalts in einer Pilzspore mit dem Grenzwassergehalt, ab dem die Spore auszukeimen und zu wachsen vermag. Dies bedeutet, dass eine längerfristige Überschreitung dieses Grenzwassergehalts Schimmelpilzbildung anzeigt. Die Grundlage für dieses Modell bilden so genannte Isoplethensysteme, die die Abhängigkeit der Keimungszeit bzw. der Wachstumsgeschwindigkeit vom Feuchtezustand und der Temperatur darstellen (Bild 38).

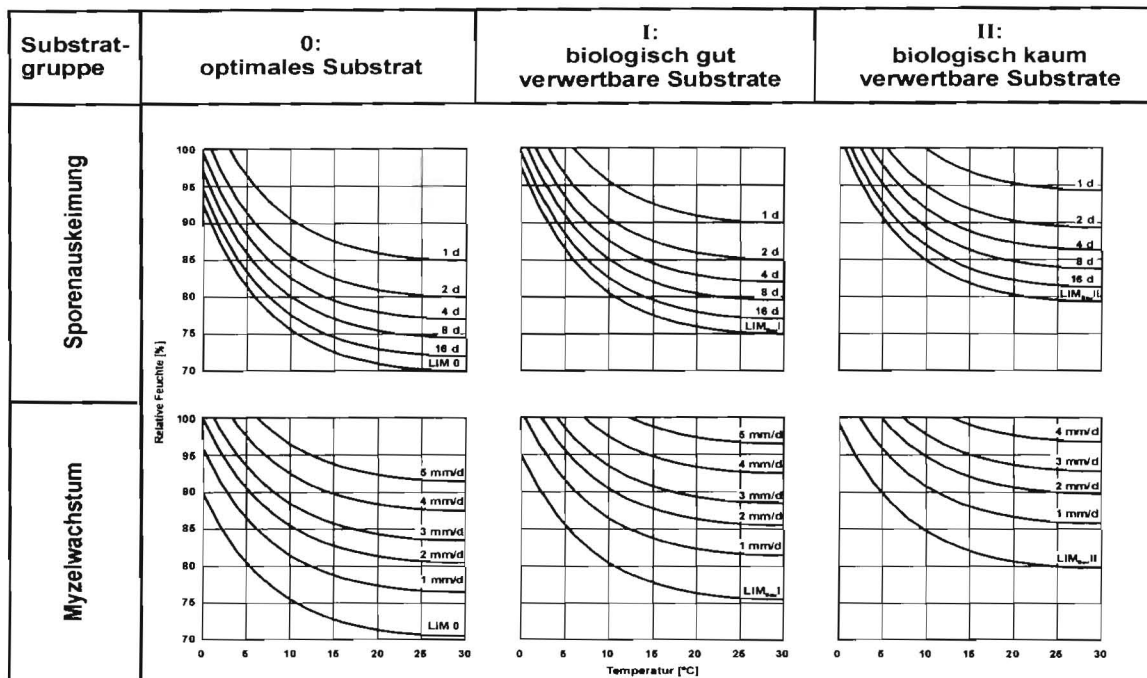


Bild 38 Verallgemeinertes Isoplethensystem für Sporenauskeimung (oben) bzw. für Myzelwachstum (unten) für alle im Bau auftretenden Schimmelpilze. Die Diagramme gelten links für optimales Substrat, Mitte für Substratgruppe I (leicht verwertbares Substrat, wie z.B. Rohfasertapete) und rechts für Substratgruppe II (nicht verwertbares Material). Die angegebenen Kurvenscharparameter charakterisieren die Sporenauskeimungszeit (oben) in Tagen und die Wachstumsrate in mm/d (unten).

ungedämmt Substratgruppe In der Deckenfuge

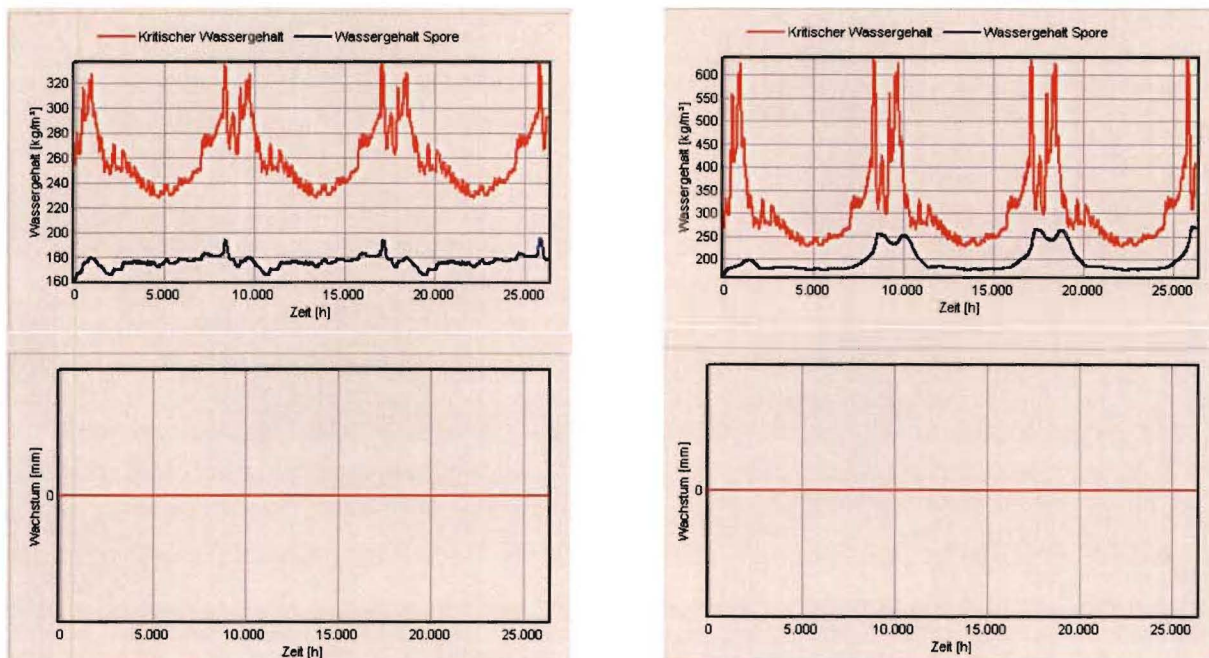


Bild 39 Ergebnis der Berechnungen mit WUFI-Bio für den Wandaufbau ohne (links) und mit Innendämmung (rechts) für die Substratgruppe II. Die oberen Abbildungen zeigen den Vergleich zwischen berechnetem Sporenwassergehalt (blaue Linie) und dem Grenzwassergehalt (rote Linie), bei dessen Überschreitung Schimmelpilzwachstum auftreten kann. Die unteren Abbildungen zeigen das berechnete Schimmelpilzwachstum.

Bild 39 zeigt das Ergebnis der Berechnungen mit WUFI-Bio. Bei diesen Berechnungen wurde die Substratgruppe II zugrunde gelegt, zu der der eingesetzte Innenputz zu zählen ist. Ohne Innendämmung ist hiernach keine Schimmelpilzbildung zu befürchten, da der Sporenwassergehalt stets deutlich unterhalb des Grenzwassergehaltes bleibt. Auch mit

Innendämmung wird dieser nie überschritten, der Abstand dazu ist allerdings etwas geringer.

Nach gängiger Lehrmeinung ist der Übergangsbereich der Innendämmung zur einbindenden Wand oder Decke kritisch, wobei als Argument die Wärmebrückenwirkung der durch die Innendämmung kälteren Wand auf diesen Bereich angeführt wird. Die vorgestellten Berechnungsergebnisse zeigen aber, dass hier kein besonderes Problem vorliegt, weil umgekehrt die einbindende Wand bzw. Decke durch ihre auf der warmen Seite liegenden großen Oberfläche an dieser Stelle eher für eine höhere Temperatur und damit geringere Feuchte sorgt. Selbst im Falle einer mangelhaften Anbindung der Innendämmung ist mit der dort entstehenden Fehlstelle kaum mit einem Schimmelpilzrisiko zu rechnen.

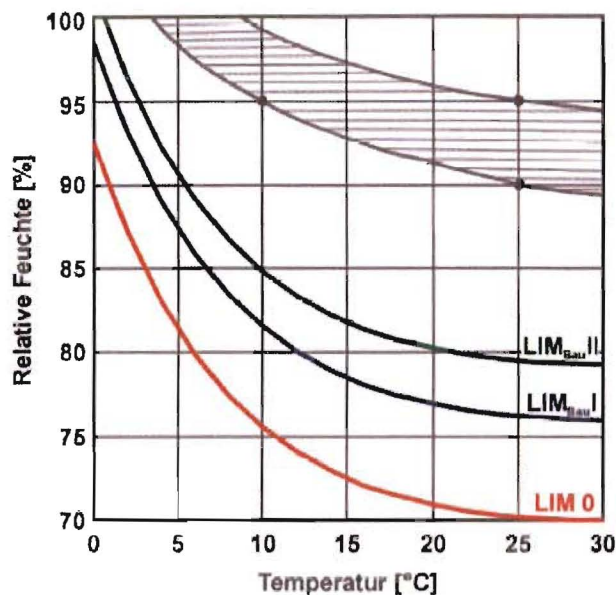
Sofern in dem Gebäude vor der Anbringung der Innendämmung im Übergangsbereich zur einbindenden Wand oder Decke keine Schimmelpilzprobleme aufgetreten sind, sind danach auch keine zu erwarten. Diese Aussage gilt allerdings nur unter der Voraussetzung, dass die sonstigen Randbedingungen unverändert bleiben. Liegt nach der thermischen Sanierung eine Nutzungsänderung mit höherer Feuchtelast oder ein verändertes Lüftungsverhalten (z.B. durch Einbau neuer dichter Fenster) vor, ist diese Fragestellung unter den neuen Randbedingungen zu überprüfen.

6.2.9 Bestimmung der Schimmelpilzanfälligkeit (Wachstumsisoplethen)

Für die Untersuchung wurden Prüfkörper aus älteren Calciumsilikatplatten hergestellt, um eine anfängliche fungizide Wirkung eines neuen Materials (z.B. durch anfänglich hohem pH-Wert) auszuschließen. Die mikrobiologischen Untersuchungen zur Ermittlung der Schimmelpilzresistenz unter definierten Randbedingungen (Temperatur, relative Luftfeuchte) der zu untersuchenden Materialien wurden mittels eines speziell am Fraunhofer-Institut für Bauphysik entwickelten Prüfstandes durchgeführt. Die Ergebnisse können in ein Isoplethenmodell zur Berechnung des Schimmelpilzwachstumsrisikos unter realen instationären Randbedingungen integriert werden.

Um für alle Proben/Prüfkörper eine möglichst gleiche Pilzbelastung aus der Umgebung zu simulieren, wurde eine gezielte Beimpfung mit bauteilrelevanten Pilzen der zuvor sterilisierten Prüfkörper durchgeführt. Die Auswahl der Pilze beinhaltet trockenheitstolerante Arten, häufige Luftkeime und Arten, die typisch für Feuchteschäden sind.

Anschließend wurden die beimpften Prüfkörper in einzelnen Inkubationseinheiten den kontrollierten Bedingungen ausgesetzt (12 verschiedene Klimasituationen). Die bei den unterschiedlichen Klimaten inkubierten Prüfkörper wurden anfangs täglich, später mit zunehmendem Abstand (mindestens wöchentlich) bis zum Untersuchungsende (100 Tage nach der Beimpfung) mittels mikroskopischer Methoden (Auflichtmikroskop) kontrolliert, dokumentiert und fotografiert. Im Anschluss an die Klima-Inkubation wurde kontrolliert, ob zusätzlich zu aufgeimpften Pilzarten eventuell weitere Pilzarten in Form von Fremdinfectionen aufgetreten sind, was nicht der Fall war.



Substratgruppen

- II biologisch kaum verwertbare Substrate (z.B. mineralische Baustoffe)
- I biologisch gut verwertbare Substrate (z.B. Tapeten, Verschmutzung)
- 0 optimales Substrat (biologische Vollmedien)

Bild 40 Integration der Versuchsergebnisse für die Calsitherm Calciumsilikatplatte in ein Isoplethenmodell. Die Grenzisoplethe für das geprüfte Material liegt innerhalb der schraffierten Fläche. Unterhalb der schraffierten Fläche ist während der gesamten Versuchsdauer keinerlei Schimmelpilzwachstum aufgetreten und daher auch im Realeinsatz nicht zu erwarten.

Das in Bild 40 dargestellte Ergebnis zeigt die hohe Schimmelpilzresistenz der untersuchten Calciumsilikatplatten. Erst oberhalb von einer Ausgleichsfeuchte entsprechend 90 % kann Schimmelpilzbildung auftreten.

6.2.10 Berechnungen zur Fehlstellenproblematik

Für die rechnerischen Untersuchungen des Einflusses einer bis auf die Außenwand durchgängigen Fehlstelle wurde jeweils eine 1 mm dicke Luftschicht implementiert, die auch durch den Innenputz geht. Betrachtet wird als kritischste Stelle jeweils die hygrothermische Situation am Ende des Luftspaltes. Im Gegensatz zur Problematik im Übergangsbereich Innenwand/Innendecke spielen hier nicht nur die Wärmeleitfähigkeit des Dämmstoffes, sondern auch seine hygri-schen Eigenschaften eine wesentliche Rolle. Aus diesem Grund muss hierbei für die Innendämmung die komplette Schichtenfolge berücksichtigt werden. Die Berechnungen werden über einen Zeitraum von drei Jahren durchgeführt.

Bild 41 zeigt den implementierten Wandaufbau mit dem CaSi-Perlite-CaSi-Sandwich als Dämmmaterial. Aufgrund der Innendämmung werden an der Innenseite der tragenden Wand im Winter zeitweise Temperaturen von unter 0 °C erreicht. Dementsprechend ergeben sich Oberflächenfeuchten von knapp über 95 %. Für die Beurteilung des Schimmelpilzrisikos wurde das Berechnungsmodell WUFI-Bio um eine spezielle Substratklasse k erweitert, bei der die für die Calciumsilikatplatte ermittelte und beschriebene Schimmelpilzgrenzisoplethe berücksichtigt wird (siehe Bild 43), die im Vergleich zur Substratklasse II deutlich höher liegt.

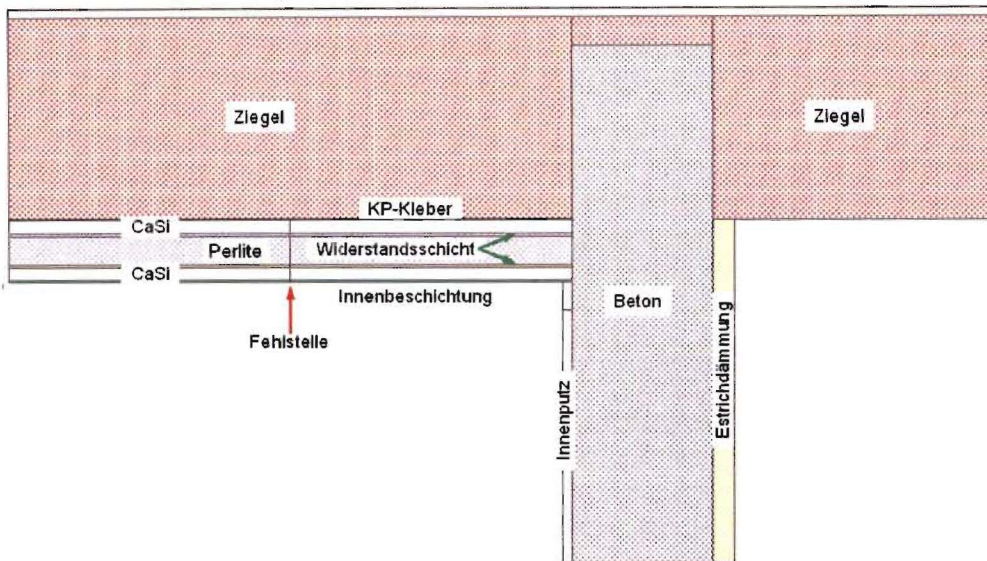


Bild 41 Implementierter Wandaufbau zur Untersuchung des Einflusses einer Fehlstelle (roter Pfeil) bei einer CaSi-Perlite-CaSi-Innendämmung.

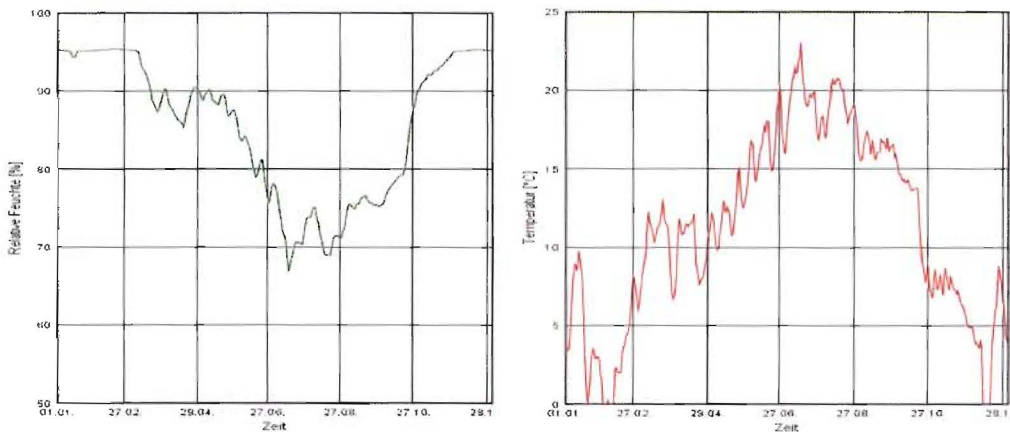


Bild 42 Berechnete Oberflächenfeuchten (links) und -temperaturen (rechts) am Boden der bis auf die Außenwand durchgängigen Fehlstelle bei einer CaSi-Perlite-CaSi-Innendämmung.

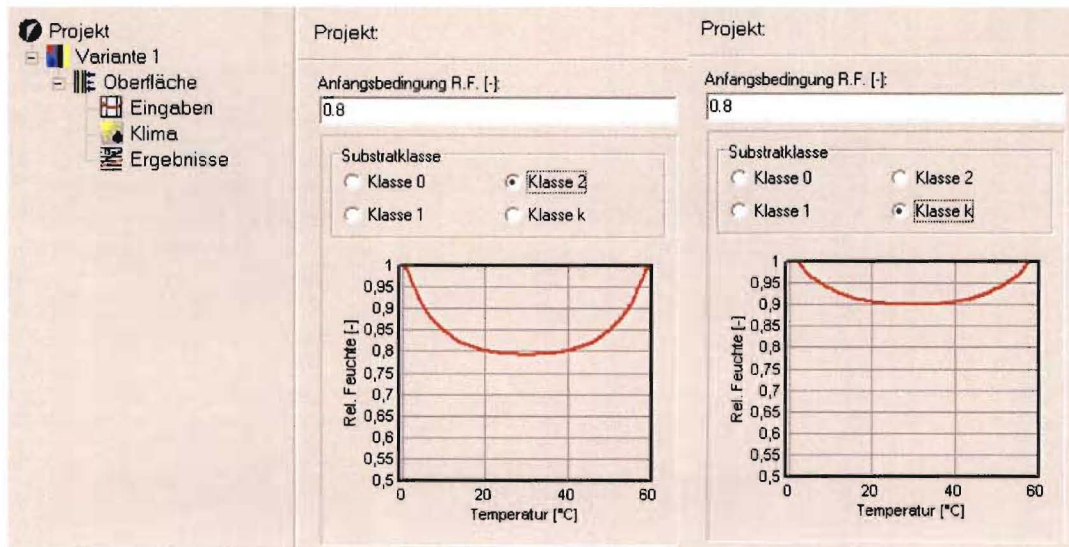


Bild 43 Erweiterung des Schimmelpilzberechnungsmodells WUFI-Bio um eine für die Calciumsilikatplatte gültige Substratklasse k mit im Vergleich zur Substratklasse 2 deutlich höherer Grenzisoplethe.

Legt man die Substratklasse II zugrunde, wird ein starkes Schimmelpilzwachstum von etwa 200 mm pro Jahr berechnet (linke Abbildung in Bild 44). Berücksichtigt man allerdings die schimmelwidrigen Eigenschaften des Calciumsilikats, reduziert sich das berechnete Schimmelpilzwachstum dagegen auf ca. 2 mm pro Jahr (rechte Abbildung), die angesichts der in WUFI-Bio eingebauten Sicherheiten in der Realität bedeutungslos sein werden. Für die CaSi-Mineralschaum-CaSi-Sandwichplatte ergeben sich bezüglich dieser Fragestellungen nahezu dieselben Ergebnisse. Auf eine gesonderte Darstellung wird deshalb verzichtet.

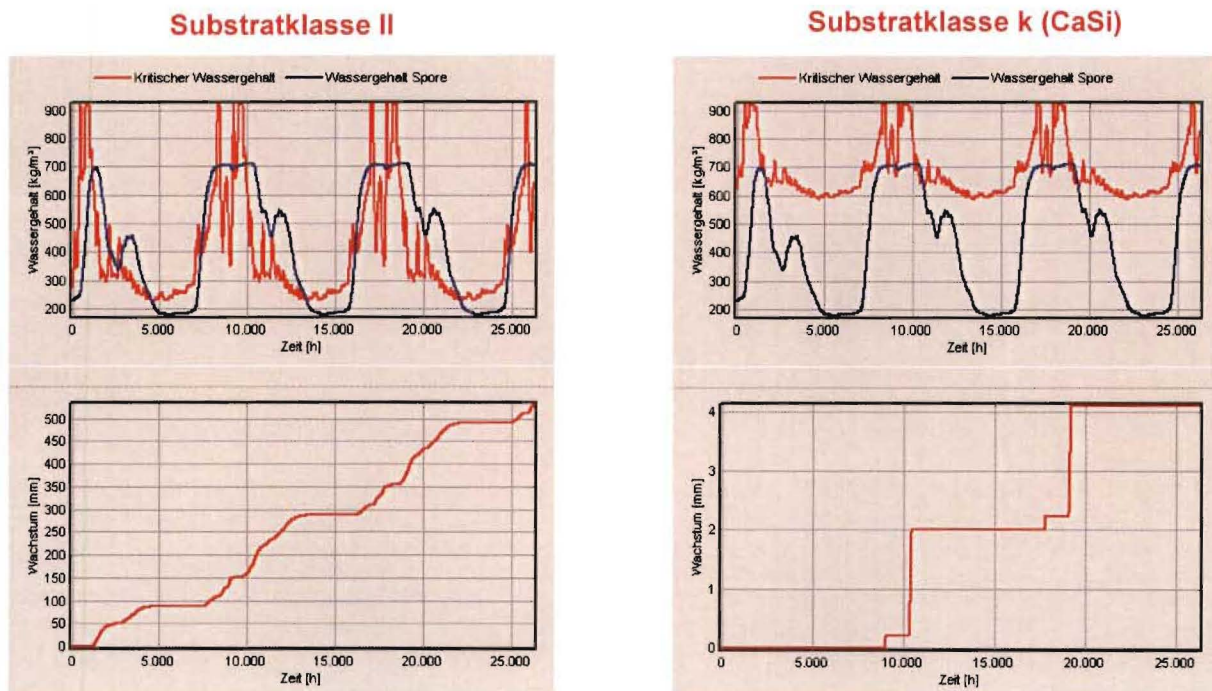


Bild 44 Ergebnis der Berechnungen mit WUFI-Bio für die Fehlstelle im Wandaufbau mit einer CaSi-Perlite-CaSi-Innendämmung; links für Substratklasse 2 und rechts für die Substratklasse k. Die oberen Abbildungen zeigen den Vergleich zwischen berechnetem Sporenwassergehalt (blaue Linie) und dem Grenzwassergehalt (rote Linie), bei dessen Überschreitung Schimmelpilzwachstum auftreten kann. Die unteren Abbildungen zeigen das berechnete Schimmelpilzwachstum.

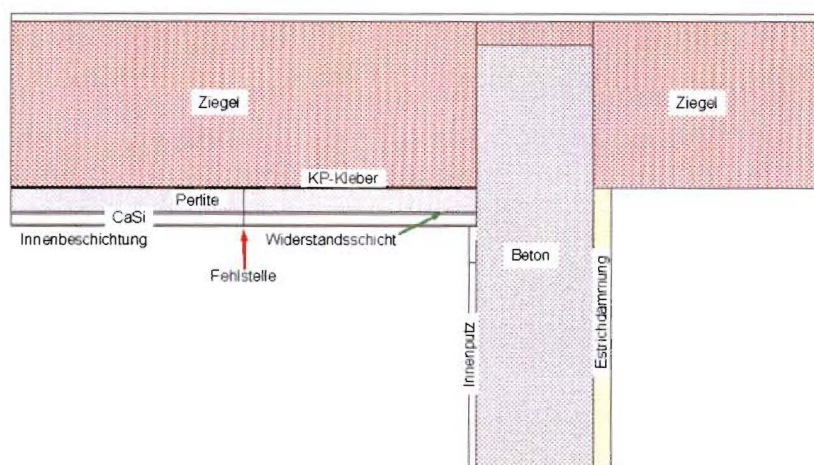


Bild 45 Implementierter Wandaufbau zur Untersuchung des Einflusses einer Fehlstelle (roter Pfeil) bei einer Perlite-CaSi-Innendämmung.

Wird nur eine zweischichtige Dämmplatte bestehend aus der Calciumsilikatplatte und der Perliteplatte eingesetzt, ist auch bei dieser Fragestellung die Orientierung der Innendämmung entscheidend. Liegt die Calciumsilikatplatte auf der Raumseite (Bild 45) ergeben sich die in Bild 46 dargestellten Temperatur- und Feuchteverläufe am Boden der Fehlstelle. Legt man die Substratklasse 2 zugrunde, wird ein noch stärkeres Schimmelpilzwachstum von etwa 270 mm pro Jahr prognostiziert (linke Abbildung in Bild 47). Der Ansatz der Substratklasse k kann hierbei nicht erfolgen.

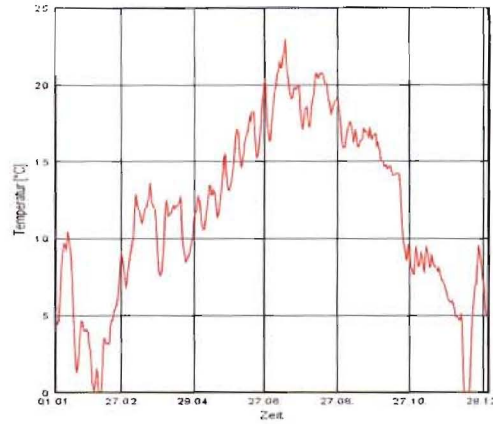
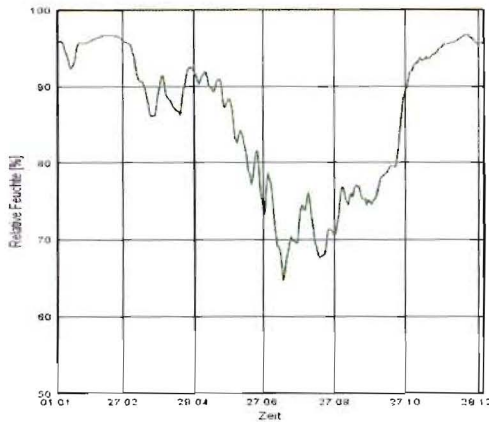
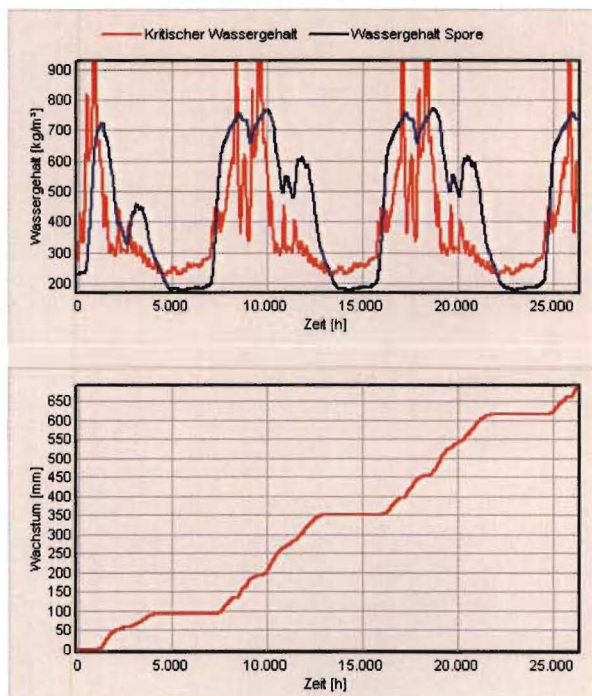


Bild 46 Berechnete Oberflächenfeuchten (links) und –temperaturen (rechts) am Boden der bis auf die Außenwand durchgängigen Fehlstelle bei einer Perlite-CaSi-Innendämmung.

Substratklasse II

Substratklasse k (CaSi)



**Nicht
ansetzbar !!**

Bild 47 Ergebnis der Berechnungen mit WUFI-Bio für die Fehlstelle im Wandaufbau mit einer Perlite-CaSi-Innendämmung; links für Substratklasse 2. Die Substratklasse k kann bei dieser Schichtung nicht angesetzt werden. Die obere Abbildung zeigt den Vergleich zwischen berechnetem Sporenwassergehalt (blaue Linie) und dem Grenzwassergehalt (rote Linie), bei dessen Überschreitung Schimmelpilzwachstum auftreten kann. Die untere Abbildung zeigt das berechnete Schimmelpilzwachstum.

Bei umgekehrter Reihenfolge (siehe Bild 48) reduziert sich die berechnete Schimmelpilzbildung wieder auf etwa 150 mm pro Jahr bei Substratklasse 2. Substratklasse k ergibt dagegen ein marginales Wachstum von lediglich 0,17 mm!

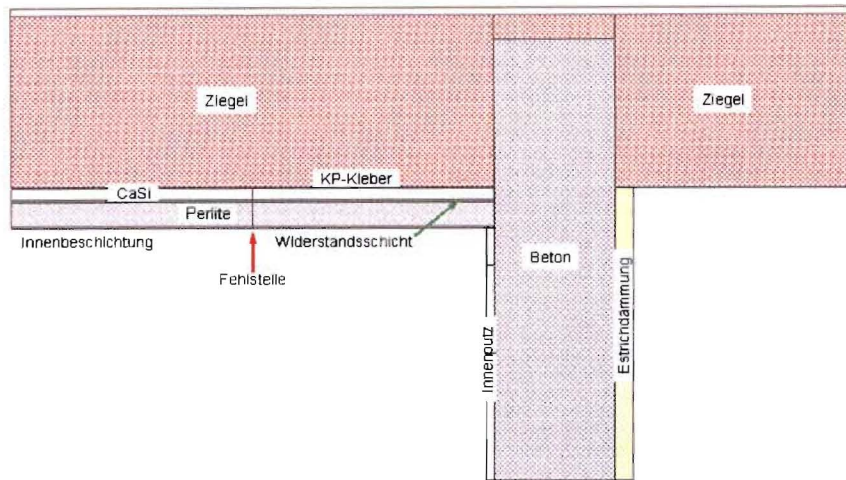


Bild 48 Implementierter Wandaufbau zur Untersuchung des Einflusses einer Fehlstelle (roter Pfeil) bei einer CaSi-Perlite-Innendämmung.

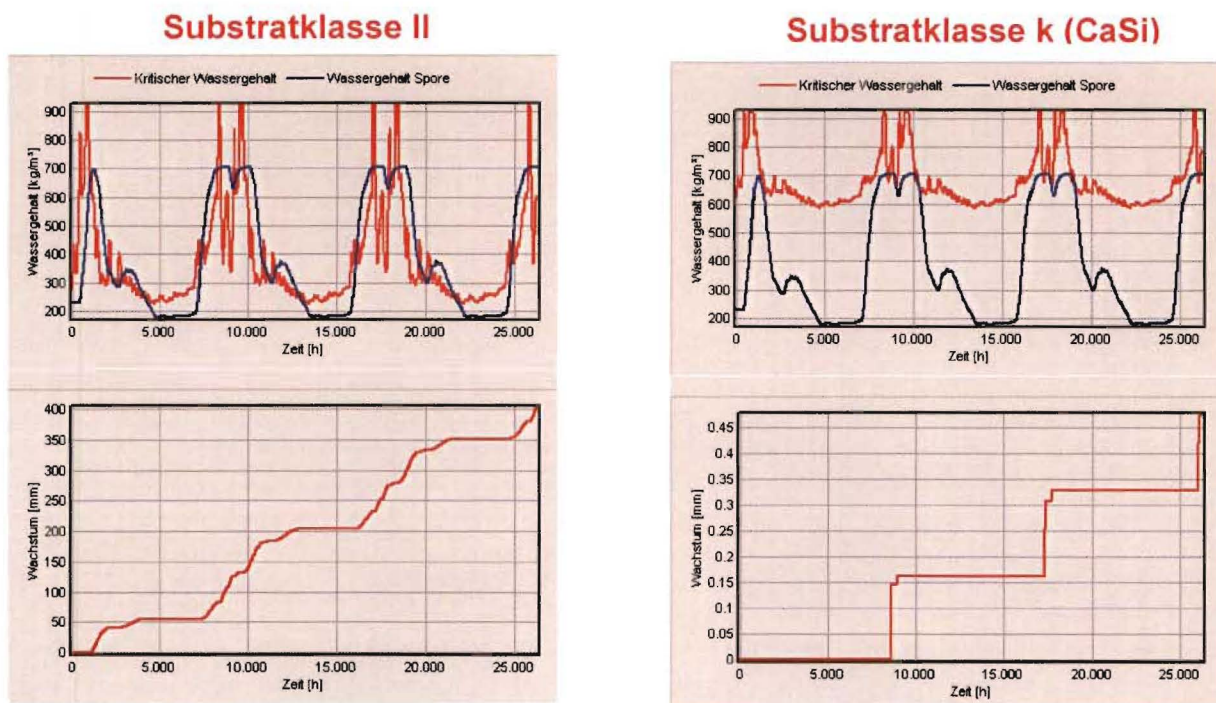


Bild 49 Ergebnis der Berechnungen mit WUFI-Bio für die Fehlstelle im Wandaufbau mit einer CaSi-Perlite-Innendämmung; links für Substratklasse 2 und rechts für die Substratklasse k. Die oberen Abbildungen zeigen den Vergleich zwischen berechnetem Sporenwassergehalt (blaue Linie) und dem Grenzwassergehalt (rote Linie), bei dessen Überschreitung Schimmelpilzwachstum auftreten kann. Die unteren Abbildungen zeigen das berechnete Schimmelpilzwachstum.

Bringt man von der Sandwichplatte beide Calciumsilikatplatten auf die Außenwandseite, wie in Bild 50 dargestellt, ergibt sich ein noch etwas günstigeres Bild. Die berechnete Schimmelpilzbildung bei Substratklasse 2 reduziert sich weiter auf etwa 120 mm pro Jahr. Substratklasse k ergibt dagegen keinerlei Wachstum mehr (Bild 51).

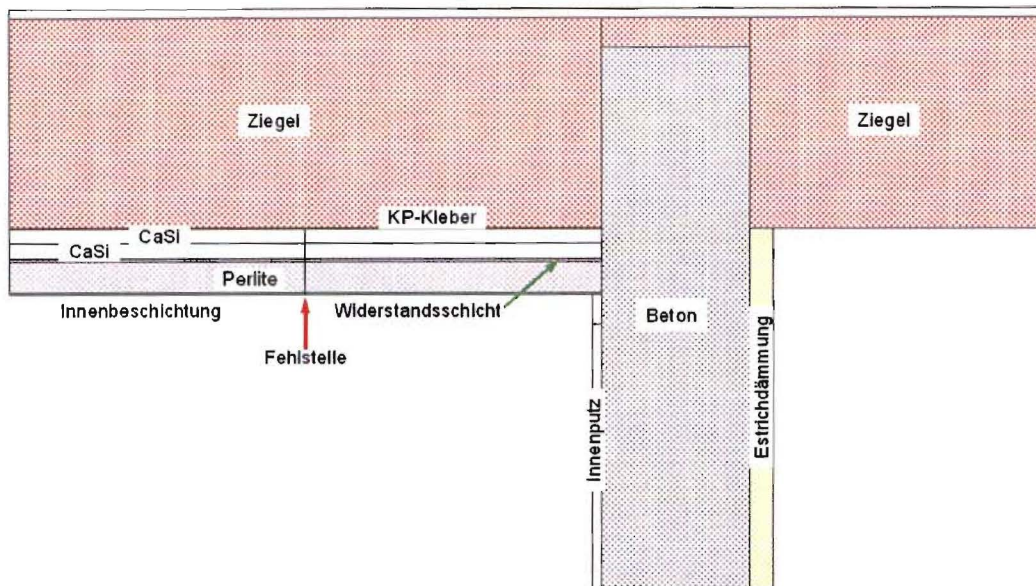
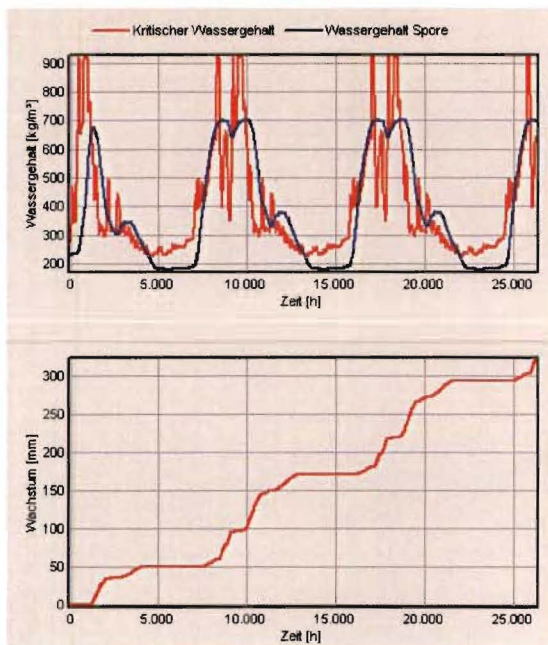


Bild 50 Implementierter Wandaufbau zur Untersuchung des Einflusses einer Fehlstelle (roter Pfeil) bei einer CaSi-CaSi-Perlite-Innendämmung.

Substratklasse II



Substratklasse k (CaSi)

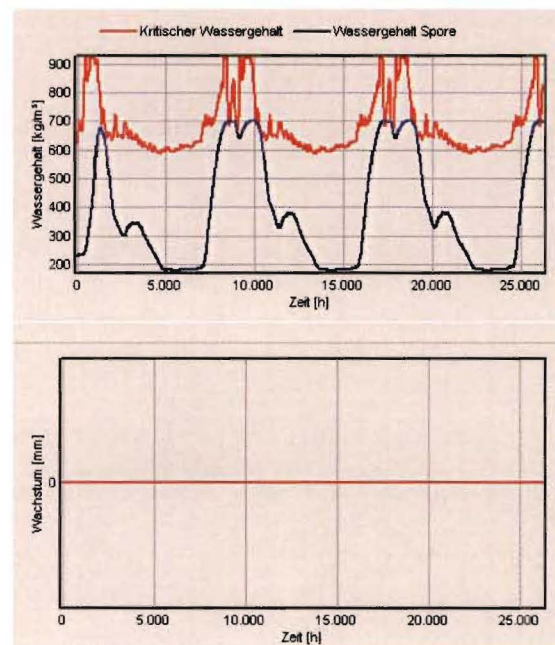


Bild 51 Ergebnis der Berechnungen mit WUFI-Bio für die Fehlstelle im Wandaufbau mit einer CaSi-Perlite-Innendämmung; links für Substratklasse II und rechts für die Substratklasse k. Die oberen Abbildungen zeigen den Vergleich zwischen berechnetem Sporenwassergehalt (blaue Linie) und dem Grenzwassergehalt (rote Linie), bei dessen Überschreitung Schimmelpilzwachstum auftreten kann. Die unteren Abbildungen zeigen das berechnete Schimmelpilzwachstum.

6.2.11 Akustische Untersuchungen

An drei Dämmstoffvarianten (50 mm Calciumsilikatplatte, 100 mm Calciumsilikatplatte und eine „Sandwichplatte“) wurde der Einfluss der Innendämmung auf das Schalldämmmaß der Wand nach DIN 4109 untersucht. Dazu wurde die Innendämmung auf eine Referenzwand aus verputztem 175 mm dicken Kalksandstein aufgebracht. Bild 52 zeigt Photos nach Aufbringen des Klebemörtels (links) und der anschließenden vollflächigen Verklebung der Innendämmung. Raumseitig wurde die Dämmplatte mit einer Kalkglätte versehen.

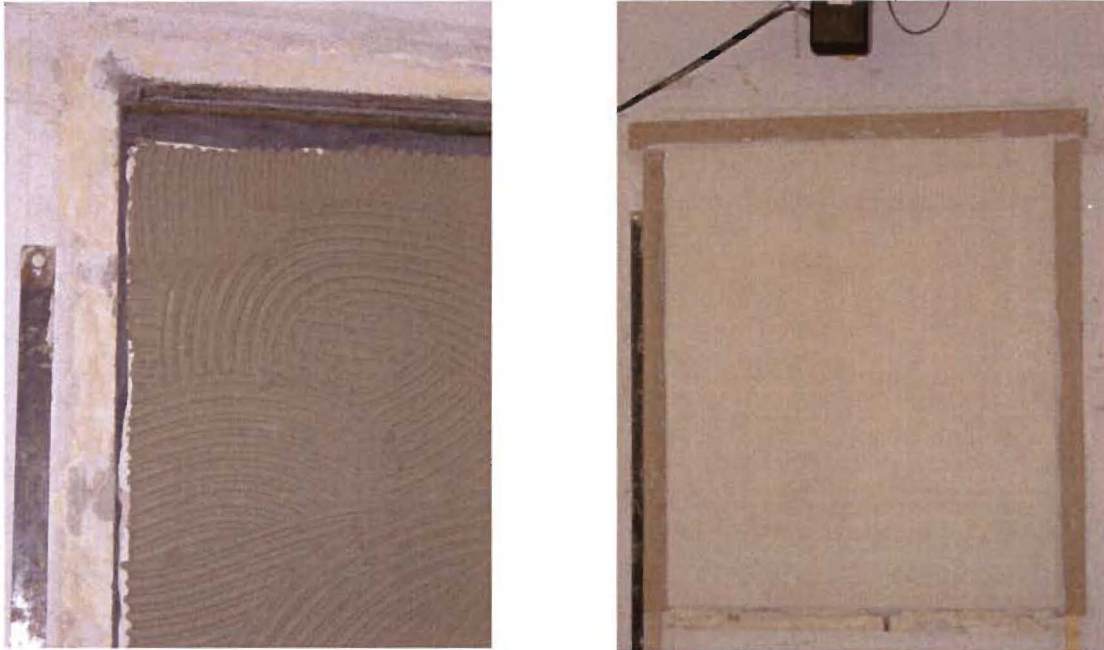


Bild 52 Photos der vollflächigen Verklebung der Innendämmung auf die Referenzwand aus 175 mm Kalksandstein für die Messung des Schalldämmmaßes.

In Bild 53 sind für die Referenzwand und für die drei untersuchten Varianten der Innendämmung die gemessenen frequenzabhängigen Schalldämmmaße dargestellt. Als gestrichelte Linie ist die verschobene Bezugskurve einer idealisierten Ziegelwand mit eingetragen. Zur normgerechten Bestimmung des bewerteten Schalldämmmaßes R_w wird diese Kurve in 1-dB-Schritten solange verschoben, bis die Summe der Unterschreitungen der unterhalb dieser Kurve befindlichen Messpunkte möglichst groß ist, aber den Wert von 32 dB nicht überschreitet. Das bewertete Schalldämmmaß R_w ergibt sich dann durch den Wert der verschobenen Bezugskurve bei der Frequenz von 500 Hz. Man erkennt, dass im Vergleich zur Referenzwand sich die Bezugskurve bei der Dämmung mit 50 mm Calciumsilikat leicht nach oben verschiebt und somit eine geringfügige Verbesserung gemessen wird. Bei 100 mm Calciumsilikat ergibt sich die gleiche verschobene Bezugskurve wie bei der Referenzwand und bei der „Sandwichprobe“ eine leichte Verschiebung nach unten. In Tabelle 5 sind für die drei Dämmstoffvarianten die gemessenen R_w -Werte verzeichnet. Mit aufgelistet sind die Delta- R_w -Werte, bei denen die nach Norm einzurechnenden Sicherheitsfaktoren berücksichtigt werden. Diese Sicherheitsfaktoren führen dazu, dass selbst bei der 50 mm Calciumsilikatdämmung trotz besserer Messergebnisse ein negativer Delta- R_w -Wert resultiert. Allerdings ist nach Aussage des Akustikers, der die Messungen durchgeführt hat, eine Differenz von 1 dB selbst von geschulten Personen nicht zu hören. Zur weiteren Einschätzung der Messergebnisse ist in Tabelle 5 zusätzlich ein typisches Ergebnis für eine Innendämmung aus 60 mm Polystyrol (PS) mit einer raumseitigen 10 mm starken Gipsfaserplatte (GFP) aufgeführt. Man erkennt, dass alle drei untersuchten Innendämmsysteme, aufgrund der größeren Masse und der höheren Biegesteifigkeit des Materials ein merklich besseres Ergebnis liefern.

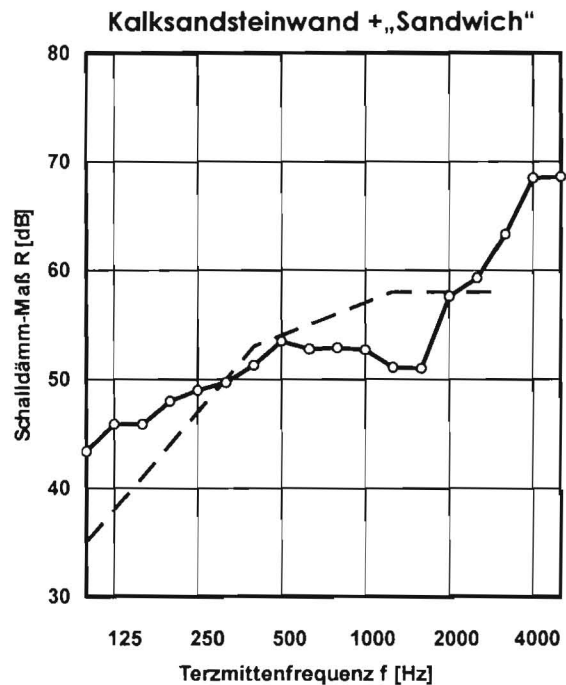
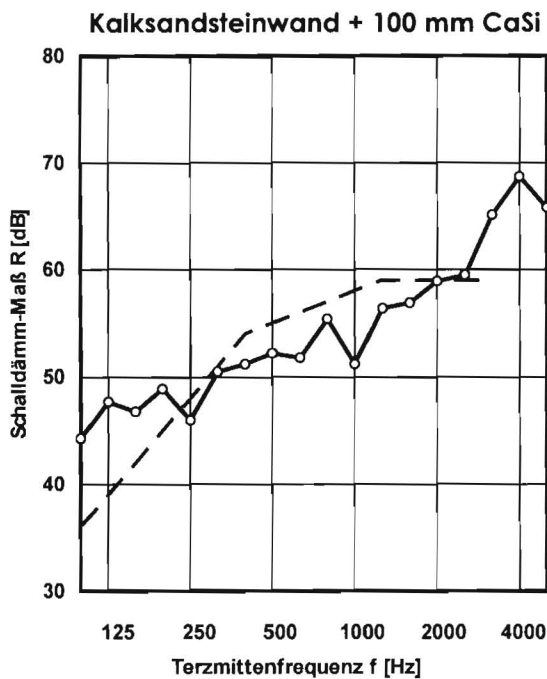
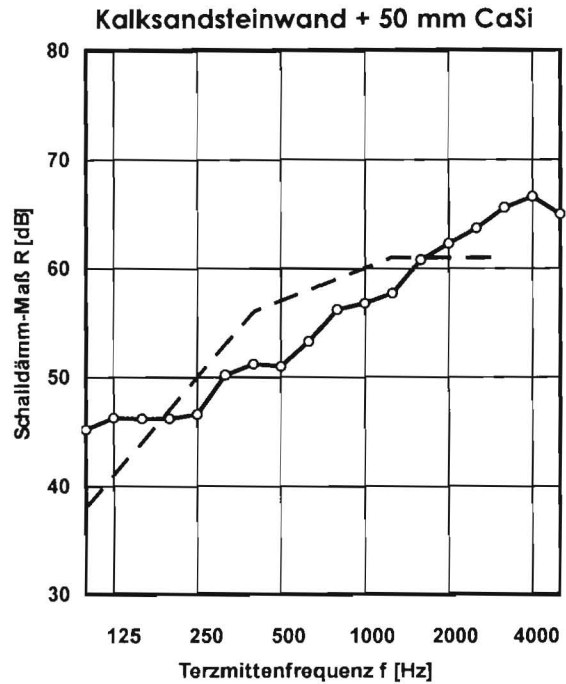
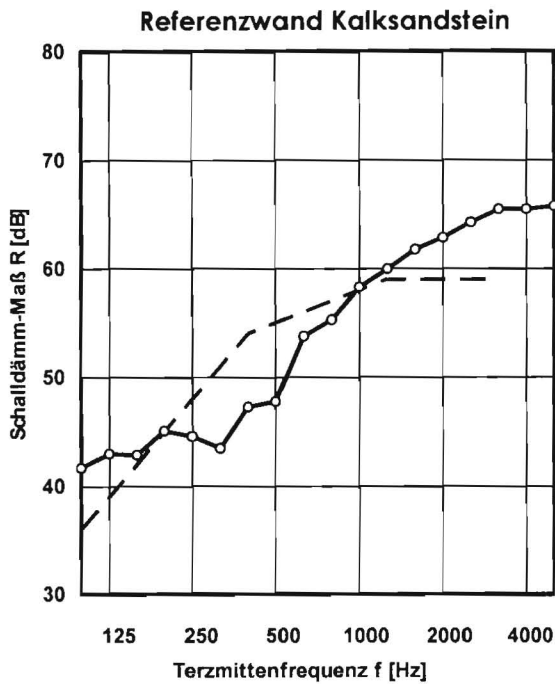


Bild 53 Frequenzabhängige Schalldämm-Maße R für die Referenzwand und für drei unterschiedliche Varianten der Innendämmung.

Tabelle 5 Vergleich von Schalldämm-Maß- R_w - und ΔR_w -Werten.

Variante	Gemessenes Schalldämm-Maß R_w [dB]	Veränderung des Schalldämmmaßes ΔR_w nach Norm [dB]
Referenzwand 175 mm Kalksandstein	55	-
Referenzwand+ 50 mm CaSi	57	-1
Referenzwand+ 100 mm CaSi	55	-2
Referenzwand+ „Sandwich“	54	-2
Referenzwand + 60 mm PS + 10 mm GFP	-	-7

6.3 Fazit

Die bauphysikalischen Untersuchungen zeigen, dass durch einen geschichteten Materialaufbau mit einem anderen mineralischen Dämmstoff niedrigerer Wärmeleitfähigkeit der Dämmwert deutlich verbessert werden kann. Im Anwendungsbeispiel werden mit den unterschiedlichen „Sandwichproben“ Wärmedurchgangskoeffizienten von $0,36 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ erzielt. Damit werden auch fast die zu erwartenden Anforderungen der EnEV 2009 (maximaler U-Wert von $0,35 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$) erfüllt. Dabei ist zu bedenken, dass es sich bei dem hier zugrunde gelegten Wandaufbau um einen äußerst niedrigen Dämmstandard (ungedämmte Wand im Altbau mit U-Wert $1,21 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$) handelt. Ein minimal geringfügig besserer Dämmstandard würde ausreichen, um die zukünftigen Anforderungen der EnEV zu erfüllen.

Die hygrothermischen Berechnungen zeigen, dass für den Feuchtehaushalt des Mauerwerks hinter der Innendämmung die Dicke der sehr kapillaraktiven Calciumsilikatplatte und deren Anordnung entscheidend sind. Der Calciumsilikatdämmstoff muss zur Außenwand hin angeordnet sein.

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

Die Berechnungen mit dem Schimmelpilzprognosemodell WUFI-Bio zeigen, dass aufgrund der messtechnisch ermittelten sehr hohen Schimmelpilzresistenz des Calciumsilikats, bei dem erst ab Oberflächenfeuchten oberhalb von $90 \% \text{ r. F.}$ Schimmelpilzwachstum auftritt, bei Vorhandensein einer bis auf das Mauerwerk durchgehenden Fehlstelle in der Innendämmung ein deutlich vermindertes Schimmelpilzrisiko vorliegt. Wesentlich dafür ist ebenfalls, dass das Calciumsilikat zur Außenwand hin angeordnet ist.

Die Optimierung des Fertigungsverfahrens mit der besonderen Zielstellung der Energieeinsparung durch Modifizierungen an den Autoklavierungs- sowie Trocknungsprozessen und einer Reduzierung der Fertigungskosten durch Modifizierungen am Entwässerungsverhalten sowie Pressverfahren konnten ohne Beeinträchtigungen der Materialkennwerte kostengünstiger gestaltet werden. Das Einsparpotential kann - je nach Pressdicke der Dämmplatten - bis zu einer 20% igen Energieeinsparung führen.

6.4 Öffentlichkeitsarbeit

Die wesentlichen Ergebnisse dieses Projektes werden zu Publikationen in Fachzeitschriften zusammengefasst und auf Fachvorträgen bei Tagungen und Kongressen dem Fachpublikum, vor allem den Bausachverständigen, Architekten und Vertretern der betroffenen Verbände vermittelt. Im Rahmen der Vertiefungsvorlesung „Feuchteschutz und Biohygrothermik“ an der Universität Stuttgart werden bereits die angehenden Ingenieure an dieses Thema herangeführt. Außerdem bringt das Institut für Bauphysik beim WTA-Merkblatt „Innendämmung“ über die Mitarbeit in dieser Arbeitsgruppe sein gesamtes Fachwissen ein.

7 Literaturverzeichnis

- Holm, A. und Künzel, H.M. (1998): Feuchte- und Temperaturbelastung von Mineralwollplatten in Wärmedämmverbundsystemen. wksb 43, H. 41, S. 2-6.
- Krus, M., Künzel, H.M. (1996): Vergleich experimenteller und rechnerischer Ergebnisse anhand des Austrocknungsverhaltens von Ziegelwänden. Internationales Symposium of CIB W67 Energy and Mass Flow in the Life Cycle of Buildings. Wien, 4.-10. August 1996, S. 493-498.
- Krus, M., Künzel, H.M., Kießl, K. (1996): Feuchtetransportvorgänge in Stein und Mauerwerk. Bauforschung für die Praxis, Band 25, IRB-Verlag Stuttgart.
- Künzel, H.M. (1999): Praktische Beurteilung des Feuchteverhaltens von Bauteilen durch moderne Rechenverfahren. WTA-Schriftenreihe, Heft 18, Aedificatio Verlag.
- Künzel, H.M., Krus, M. (1995): Beurteilung des Feuchteverhaltens von Natursteinfassaden durch Kombination von rechnerischen und experimentellen Untersuchungsmethoden. Internationale Zeitschrift für Bauinstandsetzen 1, H. 1, S. 5-19.
- Künzel, H.M., Kießl, K., Krus, M. (1995): Feuchtemigration und langfristige Feuchteverteilung in exponierten Natursteinmauern. Internationale Zeitschrift für Bauinstandsetzen 1, H. 4, S. 267-279
- Künzel, H.M. und Kießl, K. (1998): Feuchte- und Wärmeschutz von Sichtmauerwerk mit und ohne Fassadenhydrophobierung. Mauerwerksbau aktuell 98, S. D.50-D.56. Werner-Verlag, Düsseldorf 1998.
- Krus, M. (1995): Feuchtetransport- und Speicherkoeffizienten poröser mineralischer Baustoffe. Theoretische Grundlagen und neue Meßtechniken. Dissertation Universität Stuttgart 1995.
- Künzel H.M. (1994): Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten; Dissertation Universität Stuttgart 1994.
- Sedlbauer, K.: Vorhersage von Schimmelpilzbildung auf und in Bauteilen. Dissertation Universität Stuttgart (2001).
- Sedlbauer, K.; Krus, M.: Schimmelpilze in Gebäuden . biohygrothermische Berechnungen und Gegenmaßnahmen. Bauphysik-Kalender 2003, Ernst und Sohn Verlag, Berlin, S. 435-531.
- Holm, A. & Krus, M. (1998): Bestimmung des Transportkoeffizienten für die Weiterverteilung aus einfachen Trocknungsversuchen und regenerischer Anpassung Bauinstandsetzen 4, 1998, H. 1, pp. 33-52.