

## INMOB - GRUNDLAGENUNTERSUCHUNGEN ZUM HYGROTHERMISCHEN VERHALTEN HYGRISCH AKTIVER UND NICHT AKTIVER SCHICHTVERBÜNDE

Helena Burchard<sup>1</sup>, Christoph Nytsch-Geusen<sup>1</sup>, Werner Kaul-Gothe<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universität der Künste Berlin, Deutschland, E-Mail: [h.burchard@udk-berlin.de](mailto:h.burchard@udk-berlin.de)

### Kurzfassung

Baustoffe wie etwa Kalziumsilikat oder Lehm eignen sich auf Grund ihrer hygrothermischen Eigenschaften wie etwa der kapillaren Leitfähigkeit und der hohen Wasseraufnahmefähigkeit als hygrische Pufferelemente in kritischen feuchtebeaufschlagten Einbausituationen (Häupl et al., 2003). Hiervon ausgehend wird innerhalb des Forschungsprojekts InMoB in Simulations-Analysen analysiert und experimentell an einem Versuchstand untersucht, inwieweit preiswerte nicht-hygrische diffusionsoffene Dämmmaterialien, wie z.B. Holzfaserdämmplatten, zusammen mit hygrisch aktiven Pufferschichten und auch materialtrennenden Luftschichten bei entsprechender Anordnung sich zu kostengünstigen hygrisch unkritischen Innendämmsystemen kombinieren lassen. Hierzu wird eine Vielzahl von Materialkombinationen zunächst systematisch simulativ getestet, um danach die erfolgversprechendsten Varianten in einem wechselbaren Fassaden-Prüfstand unter realem Wettereinfluss und Raumnutzungen zu erproben.

### Abstract

Due to their hygrothermal properties such as capillary conductivity and high water absorption capacity, building materials such as calcium silicate or clay are suitable as hygric buffer elements in critical installation situations exposed to moisture. Based on this, the InMoB research project is using simulation analyses and experiments on a test bed to investigate the extent to which inexpensive non-hygric, diffusion-open insulation materials, such as wood fiber insulation boards, can be combined with hygroscopically active buffer layers and material-separating air layers to create cost-effective, hygroscopically uncritical interior insulation systems when arranged accordingly. For this purpose, a large number of material combinations are first systematically tested in simulations in order to then test the most promising variants in an interchangeable façade test bed under real room usages and weather conditions.

### Einführung

Die Auswirkungen der weltweiten klimatischen Veränderungen durch den zivilisationsbedingten Eintrag des Treibhausgases CO<sub>2</sub> in die Atmosphäre werden verstärkt sichtbar. In gemäßigten, kühleren Klimazonen entfällt ein erheblicher Anteil der anfallenden CO<sub>2</sub>-Emissionen auf den Gebäudesektor (dena, 2023).

In vielen Fällen ist es aufgrund von Denkmalschutzvorgaben oder aus anderen bautechnischen Gründen nicht möglich energetisch ineffiziente Bestandsgebäude von außen zu dämmen. Die einzige Möglichkeit der energetischen Sanierung besteht demnach nur in der Innendämmung der Bestandsfassaden. Dadurch entsteht allerdings ein höheres Risiko von Feuchteschäden durch eindringende Feuchte. Um dies zu verhindern, gibt es die Möglichkeit entweder die Innendämmung vor raumseitigen Feuchteinträgen zu schützen, indem die Konstruktion dampfdicht oder adaptiv dampfbremsend ausgeführt oder eine Innendämmung aus hygrisch aktivem Material verwendet wird. Das hygrisch aktive Material (z. B. Kalziumsilikat) hat eine hohe Wasseraufnahmefähigkeit und kann die Feuchtigkeit in Trocknungsperioden wieder abgeben, hat i. d. R. höhere Werte in der Wärmeleitfähigkeit und ist zudem deutlich teurer als andere gängige Dämmstoffe zur Innendämmung, wie z.B. Holzfaser-Dämmungen.

Nach bisherigem Kenntnisstand wurden hinsichtlich der Anwendung hygrisch aktiver Materialien im Baubereich in erster Linie homogene Innendämmungen untersucht und die hierfür notwendigen Nachweis- und Prüfverfahren etabliert (Plagge et al., 2006). Systematische Untersuchungen zu den feuchtepuffernden Eigenschaften dieser Materialien (Häupl et al., 2003) prädestinieren sie aber auch als feuchteregulierende Komponenten innerhalb komplexer Bauteilverbünde.

Im Projekt InMoB werden daher Kombinationen aus einer hygrisch aktiven Pufferschicht mit konventionellen, hygrisch passiven Dämmmaterialien

und optionalen materialtrennenden Luftschichten untersucht (vgl. Abbildung 1).

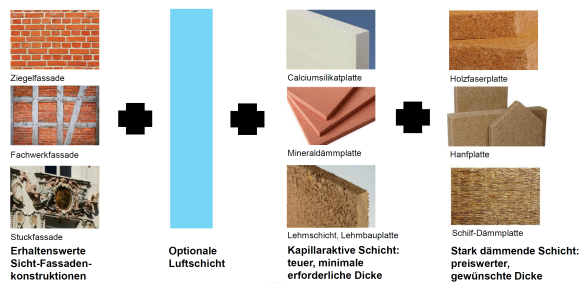


Abbildung 1: Forschungsansatz zu einem mehrschichtigen Innendämmsystem

Das Forschungsziel besteht darin, neue Möglichkeiten für mehrschichtige Innendämmsysteme aufzuzeigen, welche hygrothermisch einwandfrei funktionieren und zudem kostengünstiger und energieeffizienter sind als einschichtige hygrisch aktive Dämmsysteme.

### Bauphysikalische Messungen an Testfassaden

Die experimentellen Versuche zu den mehrschichtigen Innendämmsystemen werden an zwei Testfassaden des Rooftop-Gebäudes der UdK Berlin durchgeführt. Dieses Gebäude wurde seinerzeit für den internationalen Wettbewerb Solar Decathlon Europe 2014 in Versailles (Frankreich) von einem Team an Studierenden der UdK Berlin und der TU Berlin geplant und baulich realisiert. Im Jahr 2017 wurde das solare Forschungsgebäude auf dem Hochschulcampus Berlin-Charlottenburg wieder aufgebaut und wird seitdem als Seminarraum und Forschungslabor genutzt (Rooftop, 2023).

Zur Untermauerung der Forschungshypothese für das Forschungsvorhaben InMoB wurden mit Hilfe der beiden Testfassadenelemente in den Jahren 2020/2021 zwei typische Fassadenvarianten des Gebäudebestands mit Ziegelmauerwerk näher untersucht: zum einen ein Fassadenelement mit unverputztem Ziegelmauerwerk und zum anderen ein mit Ziegeln ausgemauertes Fachwerk. Für beide „Bestandskonstruktionen“ wurde eine bauphysikalisch kritische Dicke von nur 11,5 cm (einfache Ziegelbreite) gewählt. Diese zunächst nicht gedämmten Testfassadenelemente wurden mit zwei unterschiedlichen baukonstruktiven Varianten einer Innendämmung ergänzt und seit der Heizperiode 2020/2021 einem hygrothermischen Monitoring unterzogen. Die beiden Testfassaden sind je 1,10 m x 1,20 m groß und befinden sich auf der West-Nordwestseite und auf der Ost-Südostseite des Gebäudes.

Die beiden zu Beginn untersuchten Testfassaden waren wie folgt aufgebaut (Schichtabfolge von außen nach innen):

#### Fassade 1 – West-Nord-West-Fassade:

- Schicht 1: Ziegelmauerwerk 11,5 cm
- Schicht 2: Kalziumsilikatplatte 3 cm

- Schicht 3: Holzfaserdämmplatte 10 cm
- Schicht 4: Lehmputz 1,5 cm

#### Fassade 2 – Ost-Süd-Ost-Fassade:

- Schicht 1: Fachwerkmauerwerk 11,5 cm
- Schicht 2: Luftschicht 3 cm
- Schicht 3: Kalziumsilikatplatte 3 cm
- Schicht 4: Holzfaserdämmplatte 10 cm
- Schicht 5: Lehmputz 1,5 cm

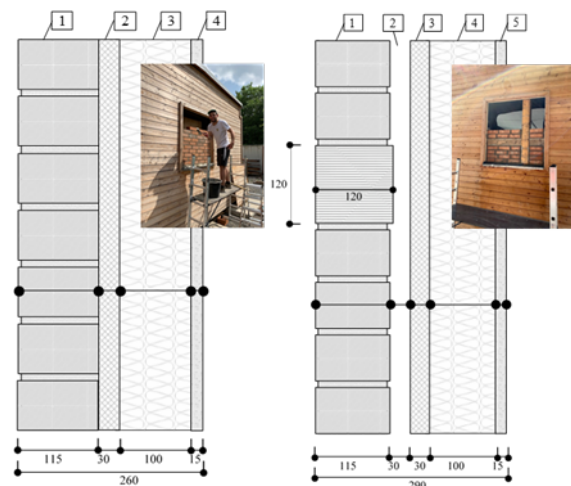


Abbildung 2: Querschnitt und Positionen der Temperatur- und Feuchtesensoren von Fassade 1 (links) und Fassade 2 (rechts)

Die Messungen wurden jeweils an der Außen- und Innenwand sowie an den Schichtübergängen mit hochpräzisen Temperatur- und Feuchtesensoren, die in einer röhrenförmigen Messeinrichtung integriert sind, durchgeführt. Die Messeinrichtung wurde über eine Kernbohrung in den Bauteilquerschnitt der Testfassaden eingebracht. Die Messpositionen können hierbei an die Schichtdicken unterschiedlicher Bauteilkonstruktionen angepasst werden. Die Messdatenerfassung erfolgt über einen Mikroprozessor, über welchen mittels des MQTT-Protokolls die Daten an eine Zeitreihendatenbank übertragen werden.

Die Untersuchungen der Heizperiode 2021/2022 haben bereits gezeigt, dass an der Ziegelfassade ohne Luftschicht zwischen Ziegel und Kalziumsilikat-Dämmung eine durchgehend hohe relative Feuchte von über 80% auftritt, die selbst beim Abtrocknen der Ziegelaußenseite im Bauteil verbleibt. Im Vergleich dazu liegt der Wert der relativen Feuchte zwischen Luftschicht und Kalziumsilikat-Dämmung an der gegenüberliegenden Fachwerkfassade deutlich unter 80%. Auch an der Kontaktfläche von Kalziumsilikat zur Holzfaserdämmung liegt der relative Feuchtegehalt ca. 10% unter dem der Ziegelfassade ohne Luftschicht (vgl. Abbildung 3 und Abbildung 4).

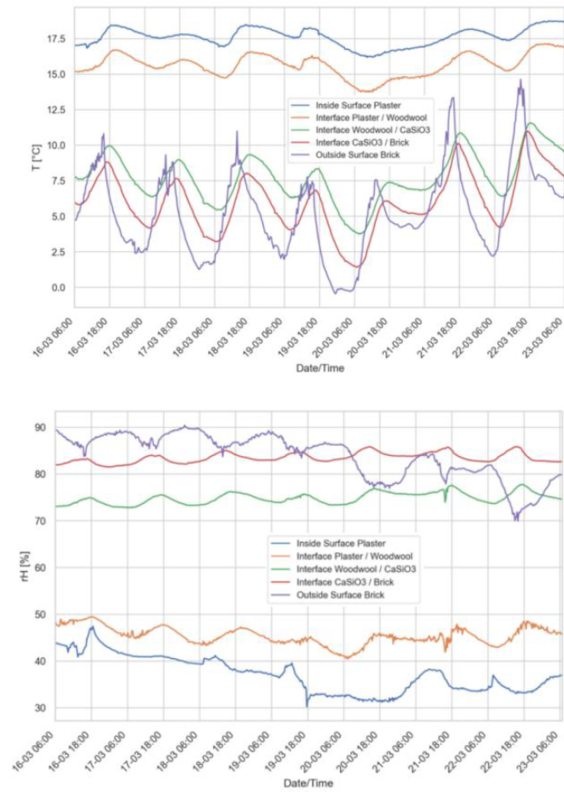


Abbildung 3: Gemessene Temperatur (oben) und relative Feuchte (unten) im Bauteilquerschnitt der Testfassade ohne Luftschicht im März 2022

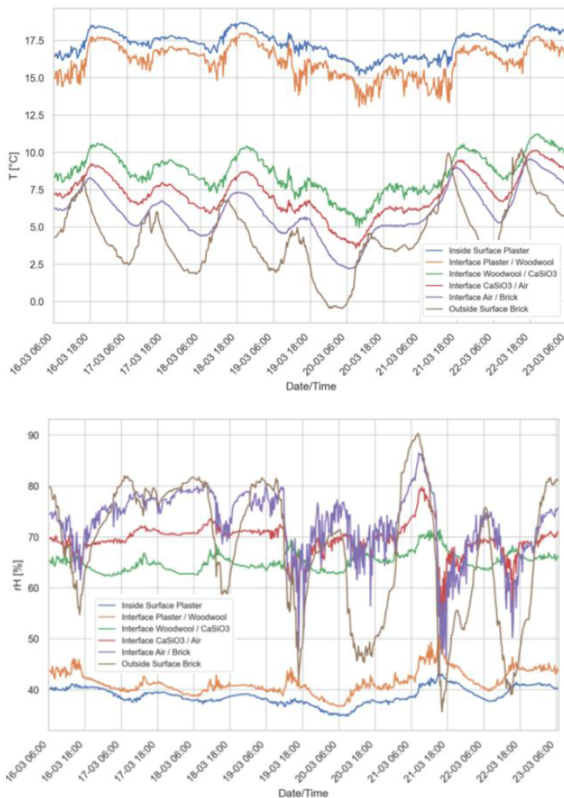


Abbildung 4: Gemessene Temperatur (oben) und relative Feuchte (unten) im Bauteilquerschnitt der Testfassade mit Luftschicht im März 2022

Der Verlauf der relativen Feuchte in Abbildung 4 zeigt, dass durch die physische Trennung der Bauteilschichten die ziegelseitige Feuchtebeaufschlagung der Pufferschicht deutlich reduziert werden kann. Insgesamt ist das Verhalten dadurch deutlich volatiler und zeigt regelmäßige Trocknungsphasen über alle Schichten.

## Simulationsanalysen

Die theoretischen Analysen für das hygrothermische Verhalten der mehrschichtigen Innendämmsysteme erfolgen mit dem Simulationswerkzeug DELPHIN der Bauklimatik Dresden Software GmbH (Bauklimatik Dresden, 2023). Dabei handelt es sich um eine Software zur Simulation des gekoppelten Wärme-, Feuchte- und Stofftransports in kapillarporösen Baustoffen.

Das Ziel der Simulationen bestand zunächst darin, herauszufinden, welche Material- und Schichtkombinationen aus hygriisch aktiven und konventionellen Innendämmstoffen am besten funktionieren und im weiteren Verlauf des Projektes in den beiden Fassadenprüfständen praktisch untersucht werden sollten. Um zu bewerten, ob eine Konstruktion „gut funktioniert“ gibt es verschiedene Benchmarks. Mit Hilfe dieser Kriterien lässt sich bestimmen, ob Schäden in der Konstruktion auftreten können. Nach der DIN 4108-3 (DIN 4108-3, 2023) „dürfen weder im Jahresverlauf noch langfristig Feuchtezustände innerhalb der Konstruktion auftreten, welche deren Funktion beeinträchtigen oder sie schädigen können.“

Hierfür erfolgte zunächst eine Reihe von Simulationen unter gleichen Bedingungen. Für die Ausrichtung wurde die Wetterseite gewählt, um den Worst-Case-Fall abzubilden. Die Schichtdicken orientierten sich an den Versuchsaufbauten der Voruntersuchung in der Heizperiode 2021/2022.

Im weiteren wurde eine Materialrecherche durchgeführt. Es wurden die vorhandenen hygriisch aktiven Dämmmaterialien aus der Materialdatenbank des Simulationsprogrammes DELPHIN mit den marktverfügbaren Materialien abgeglichen. Auf Basis dieser Materialrecherche wurden vier weitere hygriisch aktive Dämmmaterialien ausgewählt, die in Kombination mit der Holzfaserdämmung und dem Lehmputz auf der Rauminnenseite kombiniert wurden. Aufgrund der Vielzahl an möglichen Materialkombinationen und zur besseren Vergleichbarkeit wurde festgelegt, nur die hygriisch aktive Dämmung zu variieren und diese mit einer gleichbleibenden 10 cm dicken Holzfaser-Dämmschicht und 3 cm dicken Lehmputzschicht auf der Raumseite zu kombinieren. Für die simulative Untersuchung wurden folgende Materialien ausgewählt:

- Kalziumsilikat
- Mineralschaum



- PUR-Hartschaum kapillaraktiv
- Korkdämmlehm
- Wärmedämmlehm

Zunächst wurden Abkürzungen für eine eindeutige Bezeichnung der einzelnen Materialschichten festgelegt (siehe Tabelle 1).

Tabelle 1: Übersicht Materialien und Bezeichnungen

MATERIAL	BAUTEIL	BEZEICHNUNG
Ziegelmauerwerk	Fassade 1	F1
Fachwerk gemauert	Fassade 2	F2
Kalziumsilikat	Dämmung hygrysch	DH1
Mineralschaum	Dämmung hygrysch	DH2
Hartschaumplatte	Dämmung hygrysch	DH3
Kork-Dämm-Lehmplatte	Dämmung hygrysch	DH4
Wärmedämmlehm	Dämmung hygrysch	DH5
Holzfaserdämmplatte	Dämmung passiv	DP1
Lehmputz	Innenputz	P1
Luft	Luftschicht	L

Aufgrund der Vielzahl der durchzuführenden Simulationen wurde ein vereinfachtes Modell unter Vernachlässigung der dünnen Kleberschichten zwischen den Materialschichten verwendet. Als Klimastandort wurde Potsdam als nächstgelegener Standort aus der Datenbank gewählt, da zum aktuellen Zeitpunkt noch kein vollständiger lokaler Wetterdatensatz für den Prüfstand vorlag. Die Wetterdatenbank von DELPHIN enthält das Testreferenzjahr (TRY) 2010, das unter anderem auch Niederschlagsdaten zur Verfügung stellt und mit Blick auf die Relevanz von Schlagregenereignissen besonders geeignet erscheint. Um die Simulationsdauer zu begrenzen, wurde zunächst über einen Zeitraum von 3 Jahren gerechnet. Stellte sich in diesem Zeitraum kein eingeschwungener Zustand ein, so, wurde der Simulationszeitraum auf 10 Jahre erhöht.

Die Simulationen wurden mit einem Python-Skript automatisiert. Nach Abschluss der Simulationen wurde zunächst das Feuchtegehaltsintegral der gesamten Konstruktion und in den einzelnen Schichten bewertet.

Für die Basisvarianten wurde zunächst geprüft, ob sich ein eingeschwungener Zustand einstellt. Die Auswertung zeigt, dass der Feuchtegehalt der gesamten Konstruktion jeweils um weniger als 1,0% zum Vorjahr steigt. Abbildung 5 zeigt, dass sich der Feuchtegehalt der gesamten Konstruktion nicht aufschwingt und die Änderungen zu Vorjahr, abgesehen von der Anfangsfeuchte, immer unter 1,0

% bleiben. Nach diesem Kriterium sind alle Basisvarianten funktionsfähig. Die Auswertung weiterer Kriterien und Simulationsvarianten werden im weiteren Projektverlauf durchgeführt.

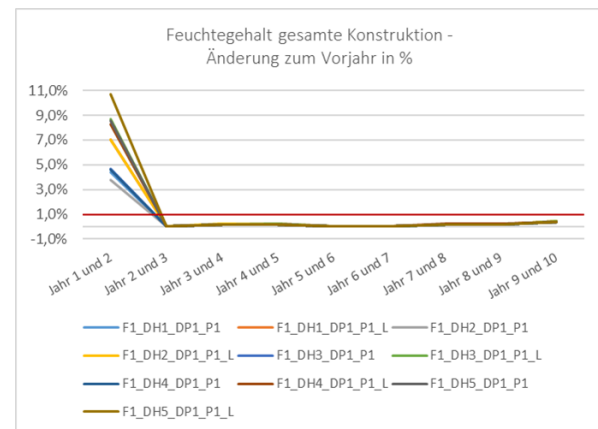


Abbildung 5: Simulierte Änderung des Feuchtegehalts in der gesamten Konstruktion im Vergleich zum Vorjahr

Zukünftig sollen die Bauteilmodelle der eingebauten Testfassaden aus DELPHIN mit den Messergebnissen des Fassadenprüfstands validiert werden. Für diesen Zweck wurden in diesem Jahr Sensoren (Solarstrahlung, Windgeschwindigkeit- und -richtung, Außenlufttemperatur und -feuchte) am Rooftop-Gebäude angebracht, sodass in Zukunft eine lokale Wetterstation vorort ist. Deren Daten zusammen mit den Messdaten im Fassadenquerschnitt kann dann für die Validierung der Simulationsmodelle verwendet werden. Die Simulation nach Standortbedingungen wird mit den realen Ausrichtungen der Testfassaden erfolgen. Um die Konstruktion im Simulationsprogramm so realitätsnah wie möglich abzubilden, werden zukünftig die Kleberschichten in ihrer verwendeten Dicke ebenfalls mit abgebildet.

### Neu konfigurierte Testfassaden

Auf Grund der durchgeführten Simulationsanalysen wurden folgende zwei neue mehrschichtige Innendämmsysteme konfiguriert und baulich für die beiden Testfassadenprüfplätze im Rooftop-Gebäude realisiert:

- System A: Cellco Korkdämmlehmplatte 30 mm plus 10 cm Holzfaserdämmung
- System B: Remmers iQ-Therm 30 mm plus 10 cm Holzfaserdämmung

Abbildung 6 zeigt den Aufbau der Variante A mit Korkdämmplatten, wobei eine Hälfte der Fassade mit Abstandhaltern versehen ist, um das unterschiedliche hygrothermische Verhalten der gleichen Schichtkombinationen mit und ohne Luftschicht im Experiment vergleichen zu können.



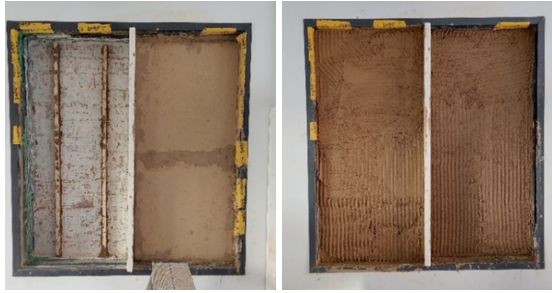


Abbildung 6: Testfassade mit Korkdämmlehmplatten ohne Luftschicht (rechte Hälfte) und mit Abstandshaltern für die Luftschicht (linke Hälfte)

Abbildung 7 zeigt die beiden neuen Testfassaden in der Ansicht und in den Bauteilquerschnitten mit den zugehörigen Positionen der Temperatur- und Feuchtesensoren.

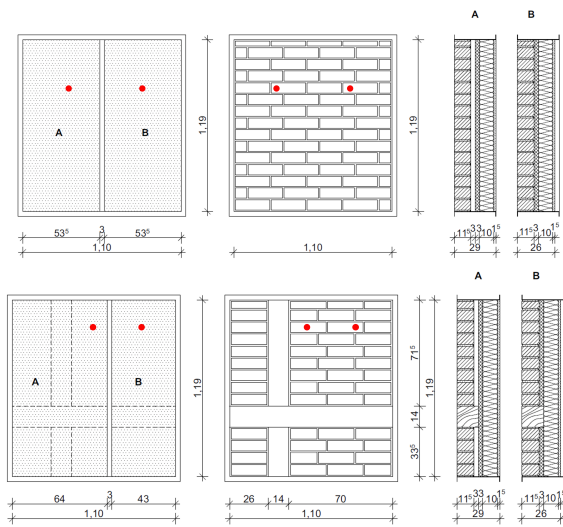


Abbildung 7: Baukonstruktiver Aufbau der beiden neuen Testfassaden und zugehöriger Sensorpositionen

Beide Testfassaden werden in der Heizperiode 2023/2024 kontinuierlich vermessen und sollen danach mit den Ergebnissen der ersten Fassadenvarianten der Heizperiode 2021/2022 verglichen werden.

## Ergebnisanalyse und Diskussion

Die Auswertung der Simulation mit gleicher Materialstärke, Ausrichtung nach Westen und mit den Wetterdaten des Testreferenzjahres 2010 aus Potsdam hat gezeigt, dass sich die Ergebnisse der verschiedenen hygrisch aktiven Materialien generell in einem ähnlichen Bereich mit wenig Abweichungen bewegen. Ein deutlicher Unterschied ist jedoch zwischen den Varianten mit Luftschicht und ohne Luftschicht festzustellen (vgl. Abbildung 8). Die Auswertung zeigt, dass die 3 cm breite Luftschicht zwischen Außenwand und hygrisch aktiver Dämmung einen Puffer bildet, der bewirkt, dass die Feuchtigkeit von Außen durch Schlagregen weniger in die passive Dämmung vordringt, als bei den Varianten ohne Luftschicht.

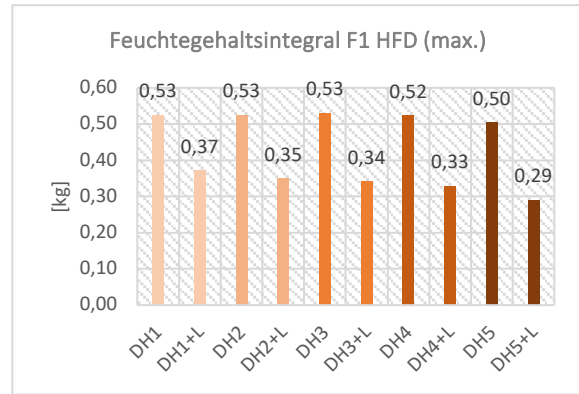
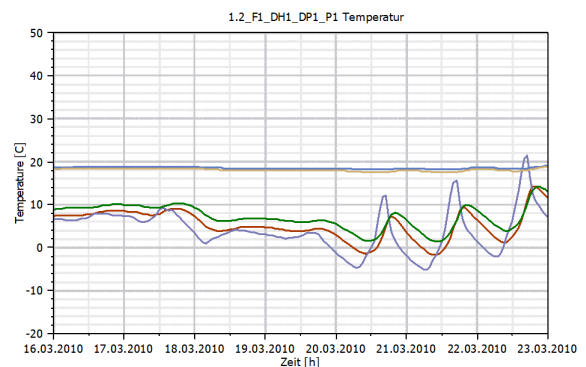
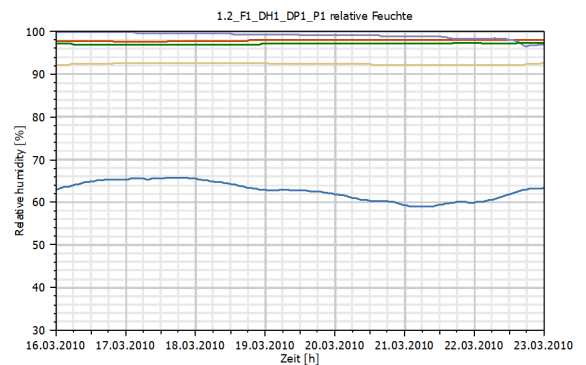


Abbildung 8: Vergleich des Feuchtegehaltsintegrals verschiedener hygrisch aktiver Dämmstoffe mit und ohne Luftschicht

Zudem trocknet die Fassade schneller. Beim Vergleich des maximalen Feuchtegehaltsintegrals der Holzfaserdämmung ist der maximale Feuchtegehalt der gesamten Konstruktion mit Luftschicht bei allen fünf Dämmvarianten insgesamt im Schnitt um 19 % niedriger.



1.2\_F1\_DH1\_DP1\_P1 Temperatur



1.2\_F1\_DH1\_DP1 relative Feuchte

Abbildung 9: Simulationsergebnisse der Variante mit Kalziumsilikat ohne Luftschicht (oben: Temperatur, unten: relative Feuchte)

Beim Vergleich der relativen Feuchte der Ziegelfassade mit Kalziumsilikat als hygrisch aktive Dämmschicht wurde der gleiche Zeitraum wie im Kapitel *Bauphysikalische Messungen an Testfassaden* gewählt. Die Ergebnisse zeigen ebenfalls, dass sich

die Luftschicht positiv auf den Feuchtegehalt in der Konstruktion auswirkt (vgl. Abbildung 9 und 10).

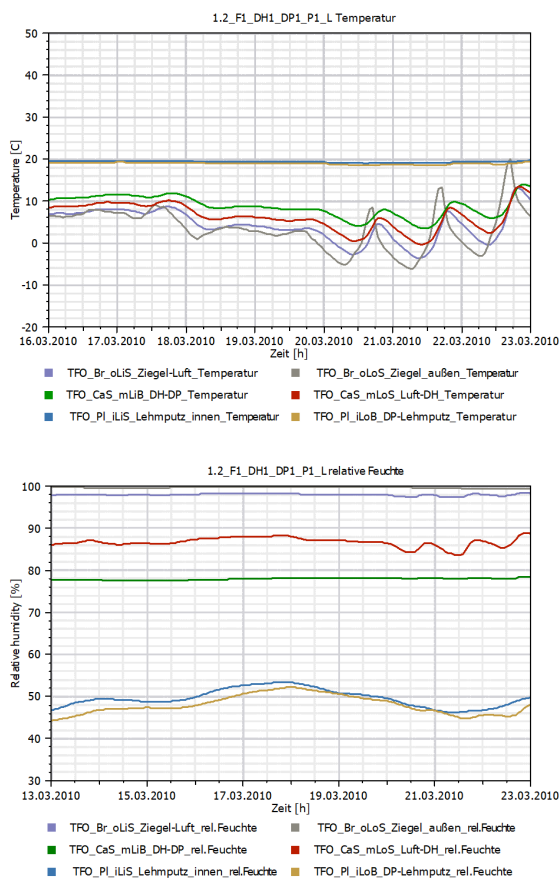


Abbildung 10: Simulationsergebnisse der Variante mit Kalziumsilikat mit Luftschicht  
(oben: Temperatur, unten: relative Feuchte)

Im Gegensatz zu den Messergebnissen weisen die Simulationsergebnisse insgesamt eine höhere relative Feuchte auf. Das ist auf die direkte Ausrichtung zur Wetterseite zurückzuführen. Daher sind die Ergebnisse nicht direkt miteinander vergleichbar. Qualitativ zeigen sie jedoch ein ähnliches Ergebnis wie die Messungen an den Testfassaden. Die relative Feuchte an der Innenseite der Wand ist bei der Variante mit Luftschicht um ca. 15% geringer als bei der Variante ohne Luftschicht. In der Schicht zwischen hygrysch aktiver Dämmung und Holzfaserdämmung ist die relative Feuchte um 19% geringer bei der Variante mit Luftschicht.

## Zusammenfassung

Die bisherigen simulativen und experimentellen Untersuchungen im Rahmen des Projektes InMoB legen nahe, dass sich Idee eines preisgünstigen mehrschichtigen energieeffizienten Innendämmsystems grundsätzlich realisieren lässt. Hierbei haben unterschiedliche hygrysch aktive Dämmstoffe bei gleicher Schichtdicke und gleicher Ausrichtung, in gleicher Einbausituation in Kombination mit einer nicht hygrysch aktiven Schicht, keine großen Auswirkungen auf das Feuchteniveau der

Konstruktion. Es zeigt sich anhand der Messergebnisse an den Testfassaden sowie an den Simulationsergebnissen jedoch, dass eine trennende Luftschicht zwischen Außenwand und hygrysch aktiver Dämmung wie eine Pufferschicht wirkt und der Feuchtegehalt der Konstruktion insgesamt niedriger ist, als bei den Varianten ohne Luftschicht. Im weiteren Projektverlauf sollen ausgewählte Material- und Schichtkombinationen in den Fassadenprüfständen untersucht und die entsprechenden Simulationsmodelle anhand der Messdaten validiert werden. Hierzu werden über den gesamten Messzeitraum lokale Wetterdaten erhoben. Von besonderem Interesse ist der direkte Vergleich der Messergebnisse der Varianten mit Luftschicht und ohne Luftschicht. Unter Anwendung der validierten Modelle sollen zudem weitere Simulationen mit unterschiedlichen Schichtdicken erfolgen, um die bestmöglichen Material- und Schichtkombinationen für das Innendämmsystem bzgl. seiner bauphysikalischen Funktion und Energieeffizienz, seiner Materialkosten, sowie seiner Ökobilanz zu bestimmen.

## Danksagung

Das Forschungsprojekt InMoB wird innerhalb des Förderprogramms Zukunft Bau des Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) gefördert.

## Literatur

- Bauklimatik Dresden 2023, Webpräsenz: [bauklimatik-dresden.de/delphin/](http://bauklimatik-dresden.de/delphin/).
- Deutsche Energie-Agentur (Hrsg.) (dena, 2023): DENA-GEBÄUDEREPORT 2024. Zahlen, Daten, Fakten zum Klimaschutz im Gebäudebestand.
- DIN 4108-3:2023-04 – Entwurf, 2023. Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz - Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung.
- Häupl, P., Petzold, H., Finkenstein, C. 2003. Feuchteschutztechnische und energetische Bewertung der Gebäudesanierung mit raumseitiger Wärmedämmung aus Calciumsilikat. Abschlußbericht, Fraunhofer IRB.
- Plagge, R., Funk, M., Scheffler, G., Grunewald, J. 2006. Experimentelle Bestimmung der hygrysch Sorptionsisotherme und des Feuchttransportes unter instationären Bedingungen. Bauphysik Volume 28, Issue 2, Pages 81-87.
- Rooftop, 2023. Webpräsenz des Rooftop-Gebäudes: <http://www.solar-rooftop.de>.