

InMoB – Grundlagenuntersuchungen zum hygrothermischen Verhalten hygrisch aktiver und nicht aktiver Schichtverbünde als Grundlage für kostengünstige und energieeffiziente Innendämmung

von

Helena Burchard
Christoph Nytsch-Geusen
Werner Kaul-Gothé
Tassilo Riemer

Grundlagenuntersuchungen zum hygrothermischen Verhalten hygriisch aktiver und nicht aktiver Schichtverbünde als Grundlage für kostengünstige und energieeffiziente Innendämmung

Inside insulation based on layer composites with moisture buffers
(InMoB)

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wohnen, Stadtentwicklung
und Bauwesen

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

ZUKUNFT BAU
FORSCHUNGSFÖRDERUNG

Dieses Projekt wurde gefördert vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Auftrag des Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) aus Mitteln des Innovationsprogramms Zukunft Bau.

Aktenzeichen: 10.08.18.7-22.31

Projektlaufzeit: 05.2023 bis 08.2025

IMPRESSUM

Herausgeber

Universität der Künste Berlin, Fachgebiet Versorgungsplanung und Versorgungstechnik
Einsteinufer 43-45, 10587 Berlin

Fachbetreuerin/Fachbetreuer

Dr.-Ing. Michael Brüggemann, Brüggemann Kisseler Ingenieure
im Auftrag des BBSR, Referat WB 3 „Forschung und Innovation im Bauwesen“
zb@bbr.bund.de

Autorinnen und Autoren

Universität der Künste, Berlin

Helena Burchard, M.Sc.
h.burchard@udk-berlin.de

Werner Kaul-Gothe, Dipl.-Ing. Architekt
we.kaul@udk-berlin.de

Prof. Dr.-Ing. Christoph Nytsch-Geusen (Projektleitung)
nytsch@udk-berlin.de

Tassilo Riemer, B.A.
Studentischer Mitarbeiter

Stand

August 2025

Bildnachweis

Titelbild: Helena Burchard, Fachgebiet VPT, UdK Berlin

Vervielfältigung

Alle Rechte vorbehalten

Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie für die Beachtung privater Rechte Dritter. Die geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit denen des Herausgebers übereinstimmen.

Zitierweise

Burchard, H.; Kaul-Gothe, W.; Nytsch-Geusen, C.; Riemer, T., 2025: InMoB - Grundlagenuntersuchungen zum hygrothermischen Verhalten hygrysch aktiver und nicht aktiver Schichtverbünde als Grundlage für kostengünstige und energieeffiziente Innendämmung. Forschungsbericht, Fachgebiet Versorgungsplanung und Versorgungstechnik, Institut für Architektur und Städtebau, Universität der Künste Berlin.

1 Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	6
Abstract	7
1 Einführung	8
1.1 Themenfeld und Untersuchungsgegenstand	8
1.2 Problemstellung	9
1.3 Stand der Forschung und Forschungslücke	10
1.4 Zielstellung	10
2 Methodik und Forschungsdesign	12
2.1 Arbeitshypothesen	12
2.2 Methodischer Ansatz	12
2.3 Projektstruktur und Arbeitspakete	13
3 Projektverlauf und Untersuchungsergebnisse	16
3.1 Vorlaufforschung	16
3.2 Hygrothermische Bauteilsimulationen	19
3.3 Materialanalyse (Simulation 1)	21
3.3.1 Randbedingungen für die Materialanalyse	22
3.3.2 Bauteilbestand	23
3.3.3 Basisvarianten	25
3.3.4 Schichtkombinationen	42
3.3.5 Bauteilanschlüsse (Wärme- und Feuchtebrücken)	59
3.3.6 Sommerlicher und winterlicher Wärmeschutz	61
3.3.7 Kostenanalyse	73
3.3.8 U-Wert-Analyse und Mindestanforderungen an den Wärmeschutz	74
3.4 Experimentelle Untersuchungen an Testfassaden	77
3.4.1 Hygrothermische Simulation der Testfassaden (Simulation 2)	78
3.4.2 Fassadenumbau	90
3.4.3 Messeinrichtung	93
3.4.4 Datenübertragung	94
3.5 Validierung der Simulationsmodelle mit Messdaten	95
3.5.1 Messdaten	95
3.5.2 Simulationsdaten	97
3.5.3 Vergleich von Simulations- und Messdaten	98
3.6 Evaluierung im realen Gebäudebetrieb	108
3.6.1 Hygrothermische Simulation des Bestandsgebäudes (Simulation 3)	109
3.6.2 Einbau der Testfassaden in einem denkmalgeschützten Gebäude	116
3.7 Thermische Raumsimulationen	121
3.7.1 Thermische Raumsimulation	123
3.8 Lebenszyklusanalyse	129
3.8.1 Graue Energie und Globales Erwärmungspotenzial	129
3.8.2 Lebenszyklusanalyse	133
4 Ergebnisse	139

4.1	Zusammenfassung der Simulationsanalysen	139
4.2	Bauteilkatalog	141
4.3	Bewertung und Diskussion	144
4.3.1	Bewertung der Arbeitshypothesen	144
4.3.2	Wissenschaftliche Anschlussfähigkeit	146
5	Fazit	148
6	Mitwirkende	149
7	Kurzbiographien	150
8	Literaturverzeichnis	151
9	Abbildungsverzeichnis	154
10	Tabellenverzeichnis	160
11	Anlagen	161
11.1	Anlage 1 - Simulationsanalysen	161
11.2	Anlage 2 – Thermische Raumsimulation	176
11.3	Anlage 3 – Bauteilkatalog (separates Dokument)	177

Kurzfassung

Vor dem Hintergrund steigender Anforderungen an Energieeffizienz und dem Erhalt historischer Bausubstanz untersucht das Forschungsprojekt InMoB neue Ansätze für die energetische Sanierung von Bestandsgebäuden mit erhaltenswerter oder denkmalgeschützter Fassade. Da eine Außendämmung hier oft nicht zulässig ist, liegt der Fokus auf der Entwicklung innovativer Innendämmsysteme, die bauphysikalisch sicher und ökologisch vertretbar sind.

Das Projekt verfolgte einen interdisziplinären Ansatz aus Simulation, experimenteller Validierung und Nachhaltigkeitsbewertung. Untersucht wurden mehrschichtige Wandaufbauten mit Kombinationen aus hygrysch aktiven (z.B. Kalziumsilikat, Korkdämmlehm) und einem passiven Dämmmaterial (Holzfaser). Grundlage bildeten umfangreiche hygrothermische Simulationen mit DELPHIN, ergänzt durch Raumklimasimulationen (IDA ICE) und experimentelle Messungen an Testfassaden sowie im realen Gebäudebetrieb.

Im Projektverlauf wurden über 150 Materialkombinationen unter einheitlichen Randbedingungen simuliert, um das Verhalten hinsichtlich Feuchteverteilung, Wärmedämmung und bauphysikalischer Robustheit zu bewerten. Die Ergebnisse zeigen, dass hygrothermisch aktive Schichten Feuchtespitzen effektiv puffern können und auch in einer Schichtkombination mit einer Holzfaserdämmung funktionieren. Konstruktionen mit zusätzlicher Luftschicht zwischen Außenwand und Dämmung reduzierten die Feuchtebelastung in der Dämmschicht, führten jedoch zu einer erhöhten Feuchtaufnahme in der Außenwand. Während sich diese bei dünneren Wänden (11,5 cm) im Jahresverlauf wieder abbauen konnte, blieb sie bei der massiven Gründerzeitwand (48 cm) dauerhaft erhöht. Dies unterstreicht den Forschungsbedarf zur Langzeitwirkung solcher Konstruktionen.

Schichtkombinationen mit 30–40 mm hygrysch aktiver Dämmung und 40–80 mm Holzfaser erwiesen sich als bauphysikalisch stabil und energetisch effizient. Eine weitere Erhöhung der Holzfaserdicke führte zu höheren Feuchtwerten. Größere Dicken der hygrysch aktiven Schicht boten hingegen kaum zusätzliche Vorteile, steigerten aber Kosten und Ressourcenverbrauch.

Begleitend wurde eine Lebenszyklusanalyse (LCA) mit dem Tool eLCA auf Basis der ÖKOBAUDAT-Datenbank durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass bei Nutzung fossiler Energie der Betriebsenergiebedarf den größten Einfluss auf das Treibhauspotenzial hat. Erst bei der Umstellung auf erneuerbare Energien wird die Wahl der Dämmmaterialien zu einem ausschlaggebenden Faktor für die ökologische Bewertung. Varianten mit natürlichen Materialien wie Holzfaser und Korkdämmlehm schnitten dabei insgesamt am besten ab.

Das Projekt InMoB leistet damit einen praxisnahen Beitrag zur Weiterentwicklung nachhaltiger und funktionaler Innendämm Lösungen für die energetische Sanierung im Bestand.

Abstract

Against the backdrop of increasing demands for energy efficiency and the preservation of historic buildings, the InMoB research project investigates new approaches to the energy retrofitting of existing buildings with valuable or listed façades. Since external insulation is often not permitted in such cases, the focus is on developing innovative internal insulation systems that are both suitable with regard to building physics and environmentally sustainable.

The project followed an interdisciplinary approach combining simulation, experimental validation, and sustainability assessment. It examined multilayer wall constructions using combinations of hygroscopically active materials (e.g., calcium silicate, cork-clay insulation) and a passive insulating material (wood fiber). The study was based on extensive hygrothermal simulations using DELPHIN, complemented by indoor climate simulations (IDA ICE) and experimental measurements on test façades and in a real building that is in regular use.

Over the course of the project, more than 150 material combinations were simulated under uniform boundary conditions to evaluate their behavior in terms of moisture distribution, thermal insulation, and robustness with regard to moisture. The results show that hygroscopically active layers can effectively buffer moisture peaks and also perform well in combination with wood fiber insulation. Constructions with an additional air layer between the external wall and the insulation reduced moisture loads in the insulation layer but led to increased moisture uptake in the outer wall. While this moisture dissipated over the year in thinner walls (11.5 cm), it remained permanently elevated in the massive late 19th-century brick wall (48 cm), highlighting the need for further research into the long-term effects of such constructions.

Layer combinations with 30–40 mm of hygroscopically active insulation and 40–80 mm of wood fiber proved to be suitable with regard to building physics and be energy efficient. Increasing the thickness of the wood fiber insulation led to higher moisture levels. Greater thicknesses of the hygroscopically active layer offered little additional benefit but increased costs and used more resources.

In parallel, a life cycle assessment (LCA) was conducted using the eLCA tool and the ÖKOBAUDAT database. The results showed that when fossil energy is used, operational energy demand has the greatest impact on global warming potential. Only when switching to renewable energy sources does the choice of insulation material become a decisive factor in the environmental assessment. Variants using natural materials such as wood fiber and cork-clay insulation performed best overall.

The InMoB project thus makes a practice-oriented contribution to the advancement of sustainable and functional internal insulation solutions for energy retrofitting in the existing building stock.

1 Einführung

1.1 Themenfeld und Untersuchungsgegenstand

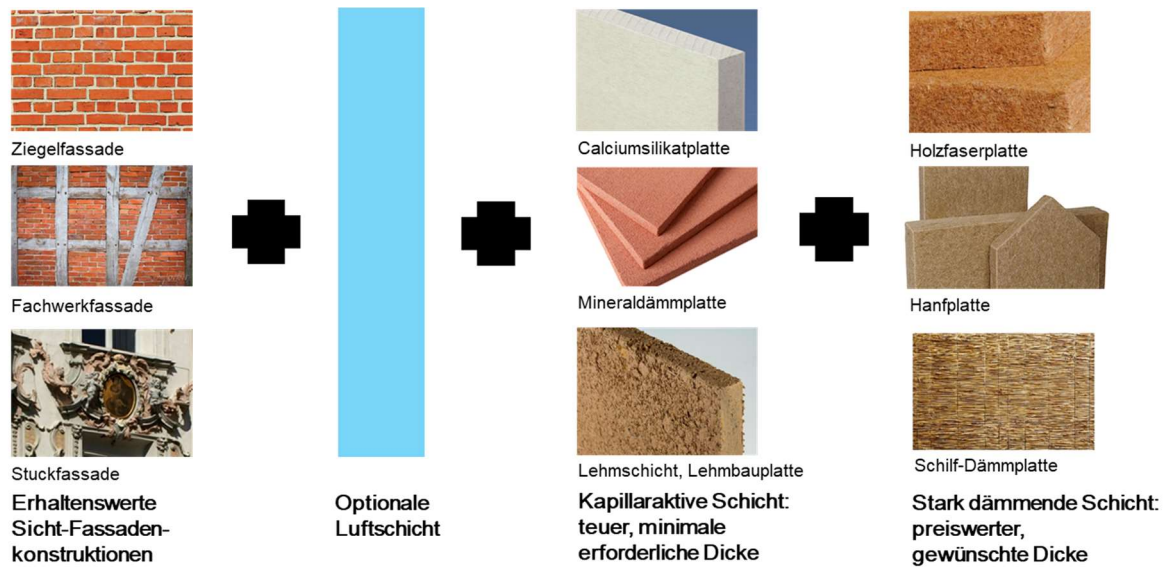
Der Klimawandel und die damit verbundenen Herausforderungen sind zunehmend spürbar. Besonders der Gebäudesektor trägt in kühleren, gemäßigten Klimazonen erheblich zu den globalen CO₂-Emissionen bei (dena, 2023). Eine effiziente energetische Sanierung bestehender Gebäude ist daher von zentraler Bedeutung, um den Energieverbrauch und die damit verbundenen Emissionen von Treibhausgasen zu reduzieren.

In vielen Fällen ist eine außenseitige Dämmung von Bestandsgebäuden aufgrund denkmalpflegerischer oder bautechnischer Restriktionen nicht umsetzbar, wodurch die Innendämmung zur einzigen realisierbaren Maßnahme wird. Diese birgt jedoch ein erhöhtes Risiko für Feuchteschäden, insbesondere durch von außen eindringende oder raumseitig anfallende Feuchtigkeit. Um dieses Problem zu minimieren, existieren unterschiedliche Herangehensweisen: Eine dampfdichte oder adaptiv dampfbremsende Konstruktion kann den Feuchteeintrag begrenzen, während der Einsatz hygrysch aktiver Materialien eine alternative Lösung bietet. Diese Materialien, wie beispielsweise Kalziumsilikat, sind in der Lage, Feuchtigkeit aufzunehmen und in Trockenperioden wieder abzugeben. Allerdings sind sie durchgehend kostenintensiver und besitzen eine höhere Wärmeleitfähigkeit als konventionelle Innendämmstoffe.

Bisherige Untersuchungen haben sich vornehmlich auf homogene Innendämmsysteme konzentriert, während systematische Forschungen zu mehrschichtigen Bauteillösungen mit feuchtepuffernden Komponenten nur begrenzt vorliegen (Plagge, et al., 2006), (Kautsch, et al., 2005). Das Forschungsprojekt InMoB setzt genau an diesem Punkt an und untersucht Kombinationen aus einer hygrysch aktiven Pufferschicht mit konventionellen, hygrysch passiven Dämmmaterialien sowie optionalen materialtrennenden Luftschichten. Auf diese Weise soll ein neuartiger Lösungsansatz für mehrschichtige Innendämmsysteme aufgezeigt werden, welcher bauphysikalisch unproblematisch funktioniert, eine hohe energetische Effizienz aufweist und sich im Vergleich zu einschichtigen hygrysch Dämmsystemen gleicher Schichtdicke, preiswerter realisieren lässt.

Die Forschungsidee für das Projekt ist eine Kombination unterschiedlicher Materialien, die typischerweise als Innendämmung verwendet werden, jedoch unterschiedliche bauphysikalische Eigenschaften aufweisen (siehe Abbildung 1). Daraus werden in einem ersten Schritt zunächst passende Materialien ausgewählt, die für Simulationsanalysen und in einem Testfassadenprüfstand untersucht werden. Um den Umfang der Analysen zu begrenzen wird als passive Dämmung eine Holzfaserdämmung ausgewählt sowie fünf verschiedene hygrysch aktive Materialien. Diese werden in verschiedenen Schichtdicken, jeweils mit und ohne eine zusätzliche Luftschicht, kombiniert und simulativ ausgewertet. Für die Grundlagenuntersuchungen werden die Materialkombinationen an einem Testfassadenprüfstand bestehend aus Ziegelmauerwerk und Fachwerk mit ausgemauerten Gefachen jeweils mit einfacher Ziegelbreite angebracht. Als erste Schicht folgt eine hygrysch aktive Dämmung, die mit einem stärker dämmenden nicht hygrysch aktiven dampfdiffusionsoffenen Dämmstoff kombiniert wird sowie je eine Variante mit einer trennenden Luftschicht zwischen Außenwand und hygrysch Dämmung. Von Innen wird die Dämmung mit einem Lehmputz versehen. Die Messergebnisse aus den Testfassadenprüfständen werden mit den Simulationsergebnissen der Testfassaden validiert. Zudem werden ausgewählte Varianten in thermischen und hygrothermischen Raumsimulationen sowie in einer Lebenszyklusanalyse bewertet.

Abbildung 1: Forschungsidee Projekt InMoB



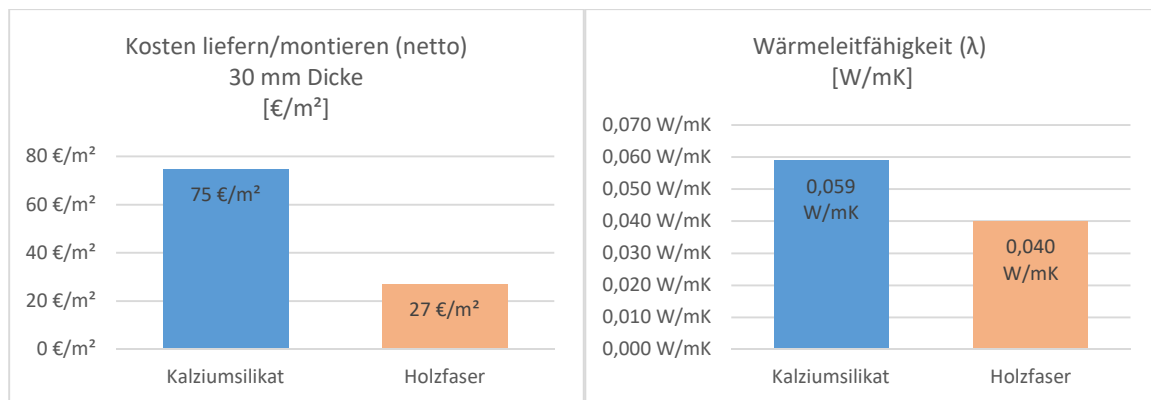
Eigene Darstellung

1.2 Problemstellung

Der Schutz historischer und erhaltenswerter Fassaden stellt eine besondere Herausforderung bei der energetischen Sanierung von Bestandsgebäuden dar. In vielen Fällen ist eine außenseitige Dämmung aufgrund denkmalpflegerischer oder gestalterischer Vorgaben nicht zulässig. Etwa 3 % der älteren Gebäude in Deutschland stehen unter Denkmalschutz, hinzu kommen weitere Fassadenarten, die kaum von außen gedämmt werden können, wie Klinker- oder stark strukturierte Fassaden. Schätzungen zufolge sind zwischen 10 % und 20 % der Wohngebäude schwer oder gar nicht außenseitig dämmbar. (Thamling, et al., 2022) In solchen Fällen bleibt als einzige Möglichkeit zur energetischen Verbesserung die Innendämmung. Allerdings birgt diese Maßnahme spezifische Herausforderungen, insbesondere in Bezug auf den Feuchteschutz. Aufgrund von Unsicherheiten bei der Planung und dem Wunsch nach einem minimalen Wohnflächenverlust werden Innendämmungen oft nur in geringer Materialstärke ausgeführt. Typische Ziel-U-Werte für Innendämmungen liegen zwischen 0,35 und 0,65 W/(m²·K). (Thamling, et al., 2022)

Zudem unterscheiden sich Innendämmsysteme nicht nur in ihrer bauphysikalischen Wirksamkeit, sondern auch deutlich in den Kosten. Während konventionelle Dämmstoffe wie Holzfaserplatten vergleichsweise kostengünstig sind, verursachen hygrysch aktive Materialien wie Kalziumsilikat in der Regel deutlich höhere Materialkosten (siehe Abbildung 2).

Abbildung 2: Vergleich der Kosten (links) und der Wärmeleitfähigkeit (rechts) von Kalziumsilikat und Holzfaserdämmplatten



Quelle: Eigene Darstellung, Kosten: Internetrecherche Stand Oktober 2023

1.3 Stand der Forschung und Forschungslücke

Die bisherige Forschung zur Anwendung hygrysch aktiver Materialien bei der Innendämmung von Gebäuden konzentrierten sich zunächst auf die Feststellung der hygrothermisch-dynamischen Eigenschaften (Krus, et al., 2005) (Häupl, et al., 2007). Im Weiteren wurden Kenngrößen und Methoden zur Prognose und zum Nachweis des dynamischen Verhaltens entwickelt und validiert (Plagge, et al., 2006). Daneben wurden zahlreiche Aspekte anwendungsbezogener Problemstellungen wie etwa das dynamische In-Situ-Verhalten der Materialien (Kautsch, et al., 2005) (Nackler, et al., 2015), aber auch der umliegenden Konstruktionen (Ruisinger, et al., 2011) untersucht.

Nach bisherigem Kenntnisstand wurde stets von homogenen Dämmschichten aus hygrysch aktiven Materialien ausgegangen. Die feuchtepuffernden Eigenschaften dieser Materialien prädestinieren sie aber auch als feuchteregulierende Komponenten innerhalb komplexer Bauteilverbünde. Hier besteht Forschungsbedarf, da sich hieraus neuartige Lösungen für feuchtekritische Einbausituationen ableiten ließen:

1. Hygrysch aktive Baustoffe wie etwa Kalziumsilikat- oder auch Lehmbauplatten sind relativ teuer und erreichen bei gleicher Schichtdicke nicht die gleiche Effizienz hygrysch passiver Dämmstoffe. Die Kombination aus hygrysch aktiven Pufferschichten und konventionellen Dämmmaterialien sowie materialtrennender Luftschichten können neue Lösungen für die Herstellung kostengünstiger, energieeffizienter und hygrysch unkritischer Innendämmungen aufzeigen.
2. Erhaltenswerte, aber konstruktiv nicht schlagregendicht sanierbare Fassaden wie etwa Fachwerke sind energetisch und bauphysikalisch bisher kaum zufriedenstellend zu ertüchtigen. Es wird erwartet, dass die regulierende Wirkung hygrysch aktiver Pufferelemente in Verbindung mit materialtrennenden Luftvolumen sich positiv auf das innenseitige Feuchtemileu auswirken.

1.4 Zielstellung

Das Forschungsprojekt InMoB untersucht die Kombination von hygrysch aktiven und konventionellen Dämmmaterialien in mehrschichtigen Innendämmverbünden. Ziel ist es, die Vorteile der hohen Wasseraufnahmefähigkeit hygrysch aktiver Materialien mit der verbesserten Wärmedämmleistung konventioneller Dämmstoffe zu verbinden. Dabei sollen auch die bauphysikalischen Effekte materialtrennender Luftschichten zwischen der Bestandswand und der Dämmung analysiert werden.

Konkret werden folgende Ziele verfolgt:

- Entwicklung und Evaluierung von mehrschichtigen Innendämmsystemen, die kostengünstig, energieeffizient und hygrisch unkritisch sind.
- Vergleichende Analyse der thermischen und hygrothermischen Eigenschaften verschiedener Materialkombinationen.
- Ermittlung der ökonomischen und ökologischen Auswirkungen der untersuchten Systeme, einschließlich ihrer Lebenszyklusbewertung.
- Untersuchung des Einflusses materialtrennender Luftschichten auf das Feuchtemanagement und die Dämmleistung.
- Validierung der Ergebnisse durch Simulationen und experimentelle Tests an zwei Testfassaden sowie an einem denkmalgeschützten Gebäude der UdK Berlin.

Die Forschung erfolgt sowohl theoretisch mittels numerischer Simulationen als auch experimentell an einem Versuchsstand, um eine praxisnahe Bewertung der entwickelten Dämmsysteme zu ermöglichen.

Das übergeordnete Ziel des Projekts ist die Entwicklung robuster, praxistauglicher und energieeffizienter Innendämmsysteme für erhaltenswerte und denkmalgeschützte Gebäude. Dabei soll die gesamte Prozesskette, von der theoretischen und experimentellen Grundlagenuntersuchung bis hin zur praktischen Erprobung mit Monitoring an einem realen Gebäude, durchlaufen werden. Durch eine systematische Untersuchung von Materialkombinationen in Testfassaden und Simulationsanalysen sollen die besten Lösungen hinsichtlich Energieeffizienz, Feuchteschutz, Robustheit, Kosten und Umweltverträglichkeit ermittelt werden.

Ein zentraler Beitrag des Projekts besteht in der praxisnahen Überprüfung der Umsetzbarkeit der entwickelten Innendämmsysteme. Dies erfolgt durch eine Evaluation in einem realen, denkmalgeschützten Gebäude der UdK Berlin. Das Projekt leistet somit einen Beitrag zur Entwicklung nachhaltiger Sanierungskonzepte für den Gebäudebestand und liefert fundierte Grundlagen für die Anwendung mehrschichtiger Innendämmsysteme in der Praxis.

2 Methodik und Forschungsdesign

2.1 Arbeitshypothesen

Um eine kostengünstige und gleichzeitig hygrothermisch optimierte Lösung zu entwickeln, wird in diesem Forschungsprojekt die Kombination aus hygrisch aktiven Pufferschichten, konventionellen Dämmmaterialien und materialtrennenden Luftschichten untersucht. Dabei stehen sowohl die energetische Effizienz als auch die feuchtebedingten Risiken im Fokus. Die folgenden Arbeitshypothesen leiten die Forschungsfragen und Untersuchungen dieses Projekts:

1. Die Kombination aus einer hygrisch aktiven Pufferschicht (z. B. Kalziumsilikat oder Lehm) mit einem konventionellen Dämmstoff (z. B. Holzfaser) führt zu einer verbesserten Dämmfunktion als eine rein hygrisch aktive Dämmung gleicher Dicke.
2. Die Einbindung materialtrennender Luftschichten zwischen der hygrisch aktiven Pufferschicht und der zu dämmenden Außenwand verbessert die Trocknungskapazität des Systems und reduziert Feuchterisiken im Vergleich zu homogenen Innendämmsystemen.
3. Mehrschichtige Innendämmungen mit einer hygrisch aktiven Pufferschicht können bei gleichem U-Wert kostengünstiger realisiert werden als reine hygrisch aktive Dämmstoffe.
4. Innendämmsysteme mit hygrisch aktiven Pufferschichten und materialtrennenden Luftvolumen reduzieren die relative Luftfeuchtigkeit in der passiven Dämmschicht und minimieren dadurch das Risiko von Feuchteschäden.
5. In nicht schlagregendichten Fassaden, wie Fachwerkkonstruktionen, verbessert die Integration einer hygrisch aktiven Pufferschicht die Feuchteverteilung und trägt zur langfristigen Bauwerkserhaltung bei.

2.2 Methodischer Ansatz

Die Untersuchungsmethodik des Forschungsvorhabens ist zusammenfassend in Abbildung 3 dargestellt. Am Beispiel von innengedämmten Außenwandkonstruktionen werden komplementär ergänzende simulative und experimentelle Untersuchungen durchgeführt. Zunächst erfolgt eine systematische hygrothermische Simulationsanalyse, bei der prototypische Testaufbauten an Außenwandkonstruktionen unterschiedlicher Materialität untersucht werden. Die Analyse erfolgt sowohl auf Bauteilebene mit dem Simulationswerkzeug DELPHIN (bauklimatik-dresden.de, 2025) als auch auf Raumebene mit IDA ICE (www.equa.se, kein Datum). Untersucht werden Kombinationen aus hygrisch aktiven und passiven Dämmmaterialien, Innenwandbekleidungen unterschiedlicher Materialität sowie Luftschichten. Das Ergebnis ist eine Material- und Konstruktionsmatrix geeigneter Schichtverbünde für Innenwanddämmungen in Bestandsgebäuden. Auf Grundlage dieser Material- und Konstruktionsmatrix werden zwei Beispielkonstruktionen einer Innendämmung ausgewählt, baulich umgesetzt und als Testfassaden am Rooftop-Experimentalgebäude (<http://www.solar-rooftop.de>) einem detaillierten bauphysikalischen Monitoring unterzogen. Zusätzlich wurden im Rahmen der Vorlauftforschung bereits Messungen an zwei Testfassaden durchgeführt. Daraus ergeben sich drei hygrisch aktive Materialien, die detaillierte Messergebnisse liefern. Die Messergebnisse ermöglichen eine Validierung der Modellumgebung sowie eine simulative Optimierung der Materialauswahl und Schichtdicken. Anschließend werden die simulativen Untersuchungen auf weitere Materialkombinationen von Schichtverbünden erweitert. Zudem wird eine Fallstudie vorbereitet, um die Evaluierung von Innendämmungen im realen Gebäudebetrieb durch entsprechende Bauteil- und Raumsimulationsanalysen durchzuführen. Für ein Langzeitmonitoring in einem denkmalgeschützten Gebäude der UdK Berlin werden drei ausgewählte Innendämmungen aus Schichtverbünden baulich

umgesetzt. Dadurch soll überprüft werden, ob die aufgestellten Forschungshypothesen zu Innendämmungen aus Schichtverbünden, insbesondere hinsichtlich hygrothermischer Optimierung, energetischem Einsparpotenzial sowie Investitions- und Betriebskostenreduzierung, auch in der Baupraxis bestätigt werden können.

Abbildung 3: Untersuchungsmethodik des Projektes InMoB



Quelle: Eigene Darstellung

2.3 Projektstruktur und Arbeitspakete

Das Team des Fachgebiets Versorgungsplanung und Versorgungstechnik (VPT) am Institut für Architektur und Städtebau der UdK Berlin verfügt personell und von der Ausstattung her über den theoretischen Hintergrund und die experimentelle Erfahrung das beschriebene Forschungsvorhaben erfolgreich zu bearbeiten. Dies umfasst langjährige Forschungs- und Entwicklungsarbeiten im Bereich der Bauteil-, Raumklima- und energetischen Gebäudesimulation, mehrjährige Erfahrungen im Bereich der energetischen Ertüchtigung von Bestandsgebäuden sowie dem Aufbau eines campusweiten energetischen und raumklimatischen Monitoring- Systems. Weiterhin wurde vom Fachgebiet VPT ein Prüfstand für bauphysikalische Untersuchungen von Testfassaden entwickelt, an welchem seit 2020 das thermische und hygrische Verhalten von Fassadensystemen unter realen Betriebsbedingungen des Außenklimas und der Gebäudenutzung untersucht wird.

Das Forschungsprojekt gliedert sich in folgende fünf Arbeitspakete:

AP 1: Simulative Untersuchungen

Im ersten Arbeitspaket wurde eine breite Palette an Material- und Schichtkombinationen untersucht, bestehend aus hygrisch aktiven und konventionellen Dämmstoffen, jeweils mit und ohne Luftschicht. Diese Konstruktionsvarianten wurden mit der Simulationssoftware DELPHIN (Bauklimatik Dresden Software GmbH) modelliert und auf ihre grundsätzliche Eignung hin überprüft. Die Ergebnisse flossen in eine Material- und Konstruktionsmatrix ein, aus der zwei besonders vielversprechende Varianten als Referenzkonstruktionen für die bauliche Umsetzung an den Testfassaden des Rooftop-Experimentalgebäudes ausgewählt wurden. Die Simulationsmodelle dieser experimentell getesteten Referenzkonstruktionen wurden unter realen, gemessenen Randbedingungen (Außenklima, Raumklima) erneut simuliert und mithilfe der Monitoringdaten (gemessene Temperatur- und Feuchteverläufe im Bauteilquerschnitt) validiert. Zusätzlich wurde ein weiteres Raummodell mit der Simulationssoftware IDA

ICE erstellt, um die Energieeffizienz der untersuchten Innendämmvarianten mit einer konventionellen Innendämmschicht zu vergleichen. Zudem wurden ausgewählte Schichtverbünde hinsichtlich ihrer Eignung unter sommerlichen und winterlichen Extremtemperaturen auf Bauteil- und Raumebene simulativ untersucht. Für die Fallstudie zur Anwendung von Innendämmungen im realen Gebäudebetrieb eines denkmalgeschützten Gebäudes der UdK Berlin wurden weitere Simulationsanalysen durchgeführt.

AP 2 Experimentelle Untersuchungen an Testfassaden

Die im ersten Arbeitspaket simulativ ermittelten Referenzkonstruktionen wurden in den zwei Fassadenprüfplätzen des Rooftop-Experimentalgebäudes des Fachgebiets VPT baulich umgesetzt und messtechnisch erfasst. Der Messzeitraum begann im Januar 2024 und umfasst die Heizperiode 2024/25.

AP 3 Experimentelle Untersuchungen an einem denkmalgeschützten Gebäude

Ausgehend von den gewonnenen theoretischen und experimentellen Erkenntnissen der Arbeitspakete 1 und 2 wurden an einer denkmalgeschützten Liegenschaft der UdK Berlin an einer ausgewählten Fassade drei verschiedene Innendämmvarianten baulich umgesetzt. Das bauphysikalische Verhalten dieser Erprobungsflächen soll im Feldversuch in einem bauphysikalischen Langzeitmonitoring ab März 2025 analysiert werden. Durch die Evaluierung der Schichtverbund-Innendämmsysteme in dem denkmalgeschützten Gebäude soll deren Praxistauglichkeit (handwerkliche Umsetzbarkeit im Realmaßstab, Nutzerzufriedenheit etc.) anhand einer konkreten Einbausituation (Bauteilanschlüsse, Wärme- und Feuchtebrücken etc.) erprobt werden. Hierzu gehören auch die Bestimmung der realen Sanierungskosten sowie die Abschätzung der energetischen Einsparpotentiale durch ein ganzjähriges Bauteilmonitoring.

AP 4 Nachhaltigkeit und Anwendungsgebiete

In diesem Arbeitspaket wurde anhand einer Literatur- und Datenbankrecherche zu den Umweltauswirkungen der betrachteten Baustoffe eine umfassende Bewertung der untersuchten Innendämmsysteme vorgenommen. Zudem wurde eine Ökobilanzierung für die untersuchten Schichtverbundkombinationen durchgeführt, in der die graue Energie sowie Treibhausgasemissionen, Lebensdauern und Energieverbräuche berücksichtigt werden. Zusammenfassend wurde eine theoretische Analyse durchgeführt, welche das Anwendungspotential für die untersuchten Innendämmsysteme im Gebäudebestand insgesamt (für alle Gebäude mit erhaltenswerten Sicht-Fassadenkonstruktionen, unabhängig vom Denkmalschutz-Status) abschätzen soll.

AP 5 Dokumentation und Veröffentlichung

Die simulativen und experimentellen Untersuchungen wurden über alle Arbeitspakete detailliert dokumentiert. Die während der Projektlaufzeit erlangten Erkenntnisse wurden in Fachbeiträgen auf Konferenzen (12. Bauphysiktag Weimar 2024 im März 2024, BauSim2024 in Wien im September 2024, 28. Projekttag der Bauforschung im November 2024) vorgestellt.

Tabelle 1: Zeitplan der Arbeitspakete

Zeit- planung	AP-Beschreibung	2023			2024				2025	
		15.5. bis 31.7.	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	1.4. bis 14.5.
AP 1	Simulative Untersuchungen									
AP 2	Experimentelle Untersuchungen und detailliertes Monitoring an Testfassaden									
AP 3	Experimentelle Untersuchungen an einem denk-malgeschützten Gebäude									
AP 4	Nachhaltigkeit und Anwendungsgebiete									
AP 5	Dokumentation und Veröffentlichung									
	Meilensteine			M1		M2			M3	M4

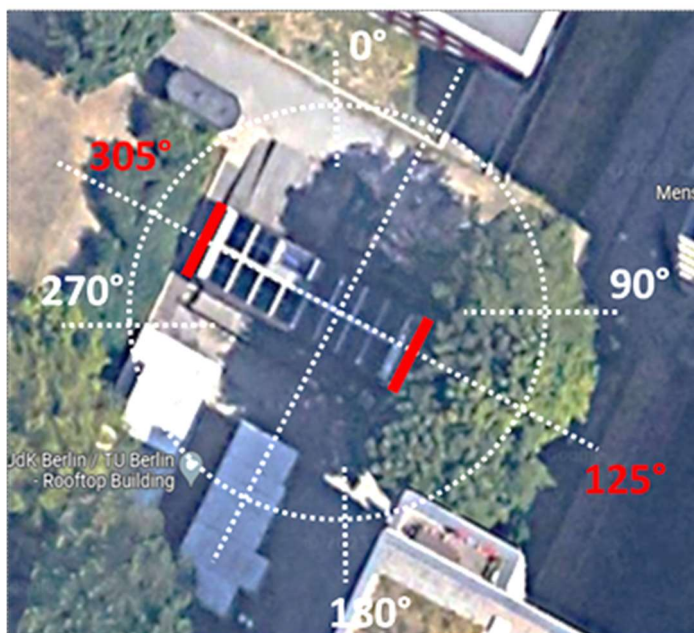
3 Projektverlauf und Untersuchungsergebnisse

3.1 Vorlaufforschung

Die Analysen an einem Versuchsstand wurden an zwei Testfassaden des Rooftop-Gebäudes der UdK Berlin durchgeführt. Dieses Gebäude wurde von einem Team an Studierenden der UdK Berlin und der TU Berlin für den internationalen Wettbewerb Solar Decathlon Europe 2014 in Versailles (Frankreich) geplant und baulich realisiert. Im Jahr 2017 wurde das solare Forschungsgebäude auf dem Hochschulcampus Berlin-Charlottenburg wiederaufgebaut und wird von der UdK Berlin und der TU Berlin als Seminarraum und Forschungslabor genutzt (Details siehe <http://www.solar-rooftop.de>).

Zur Untermauerung der Forschungshypothese für das Forschungsvorhaben wurden mit Hilfe der beiden Testfassadenelemente in den Jahren 2020/2021 zwei Fassadenvarianten des Gebäudebestands 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 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 (im nachfolgenden Text als Westseite bezeichnet) und auf der Ost-Südostseite (im nachfolgenden Text als Ostseite bezeichnet) des Gebäudes (Abbildung 4). Durch die unterschiedlichen Ausrichtungen können die Auswirkungen untersucht werden, die durch Schlagregen und mehr Sonneneinstrahlung auf der Westseite im Vergleich zur wetterabgewandten und verschatteten Ostseite entstehen.

Abbildung 4: Kartenausschnitt des Rooftop-Experimentalgebäudes von Oben. Links Testfassade West, rechts Testfassade Ost



Quelle: Google Maps sowie eigene Ergänzungen

Der Versuchsstand für die Voruntersuchungen bestand aus dem folgenden Aufbau:

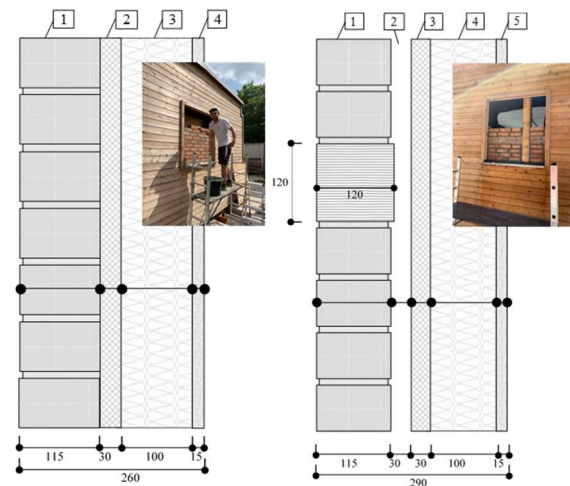
Fassade 1 – Testfassade West:

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

Fassade 2 – Testfassade Ost:

- 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 5:
Fassade 1 links, Fassade 2 rechts



Für die Durchführung von Messungen wurden Temperatur- und Feuchtesensoren zwischen den Materialschichten verbaut. Deren Positionen in den Bauteilquerschnitten ist in Abbildung 5 zu sehen. Die Bezeichnung der Sensoren erfolgte wie in Tabelle 1 aufgelistet. Die Testfassaden des Rooftop-Gebäudes und die digitale Messeinrichtung bilden die Grundlage zur Durchführung der experimentellen Untersuchungen.

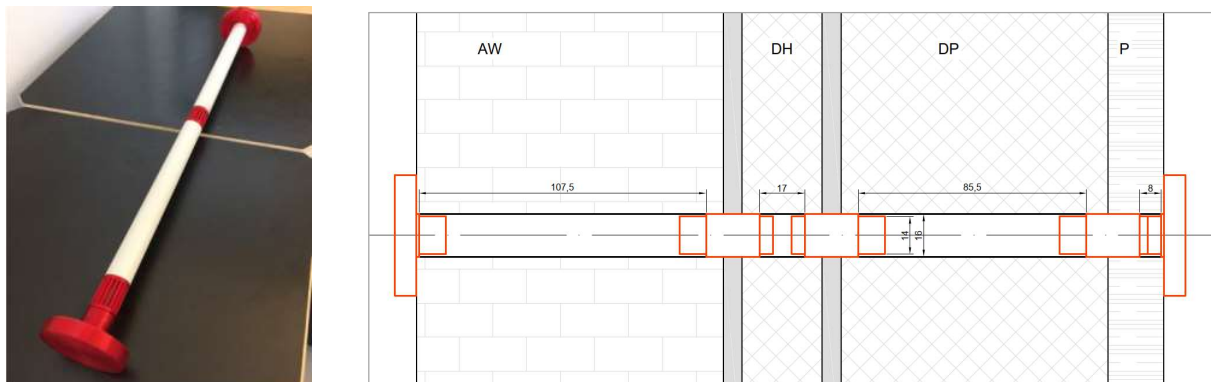
Tabelle 2: Bezeichnung und Lage der Temperatur- und Feuchtesensoren in der Westfassade

ID	Lage	Messpunkt Temperatur und relative Feuchte
TFW_Br_oLoS	Testfassade West	Ziegel, Außenschicht, Außenfläche (brick, outside layer, outside surface)
TFW_Br_oLiB	Testfassade West	Ziegel, äußere Schicht, innere Begrenzung (brick, outside layer, inside boundary)
TFW_CaS_mLiB	Testfassade West	Kalziumsilikat, Mittelschicht, Innenrand (calciumsilicate, middle layer, inside boundary)
TFW_PI_iLoB	Testfassade West	Putz, Innenschicht, Außenbegrenzung (laster, inside layer, outside boundary)
TFW_PI_iLiS	Testfassade West	Putz, Innenschicht, Innenfläche (plaster, inside layer, inside surface)

Tabelle 3: Bezeichnung und Lage der Temperatur- und Feuchtesensoren in der Ostfassade

ID	Lage	Messpunkt Temperatur und relative Feuchte
TFO_Br_oLoS	Testfassade Ost	Ziegel, Außenschicht, Außenfläche (brick, outside layer, outside surface)
TFO_Br_oLiS	Testfassade Ost	Ziegel, Außenschicht, Innenfläche (brick, outside layer, inside surface)
TFO_CaS_mLoS	Testfassade Ost	Kalziumsilikat, Mittelschicht, Außenfläche (calciumsilicate, middle layer, outside surface)
TFO_CaS_mLiB	Testfassade Ost	Kalziumsilikat, Mittelschicht, Innenrand (calciumsilicate, middle layer, inside boundary)
TFO_PI_iLoB	Testfassade Ost	Putz, Innenschicht, Außenbegrenzung (plaster, inside layer, outside boundary)
TFO_PI_iLiS	Testfassade Ost	Putz, Innenschicht, Innenfläche (plaster, inside layer, inside surface)

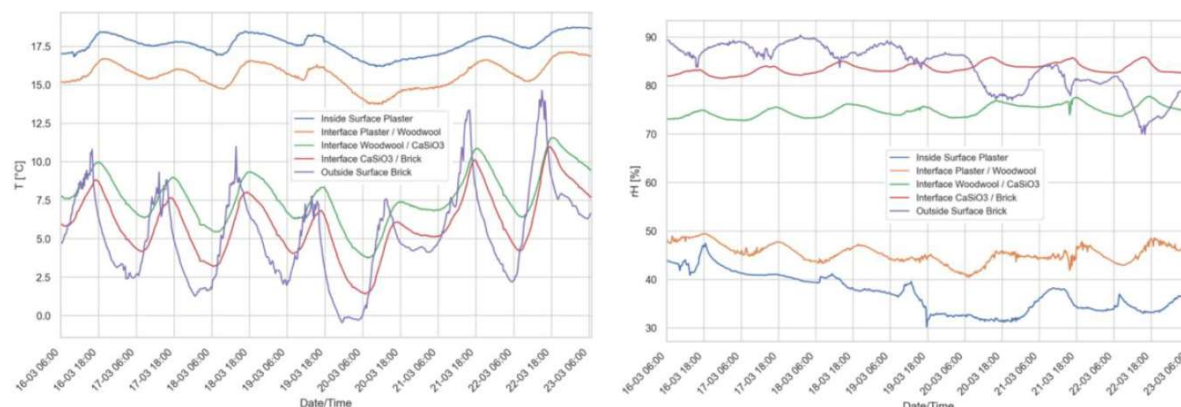
Abbildung 6: Messlanze für Temperatur- und Feuchtemessung (links), Detailzeichnung der Messlanze im Wandquerschnitt (rechts)



Die Messungen wurden jeweils an der Außen- und Innenwand sowie an den Schichtübergängen mit hochpräzisen Temperatur- und Feuchtesensoren des Typs SENSIRION SHT75, die in einer röhrenförmigen Messeinrichtung integriert sind (Abbildung 6), durchgeführt. Die Messgenauigkeit der SHT75-Sensoren liegt für die relative Feuchte bei 1,8 % und für die Temperatur bei 0,3 °C (Sensirion, kein Datum). Die Messeinrichtung wurde über eine Kernbohrung in den Bauteilquerschnitt der Testfassaden eingebracht. Die Messpositionen können an die Schichtdicken unterschiedlicher Bauteilkonstruktionen angepasst werden. Die Messdatenerfassung erfolgt über einen Mikrocontroller auf einer selbst entwickelten Platine, über welche mittels MQTT-Protokolls die Daten an eine Zeitreihen-Datenbank übertragen werden.

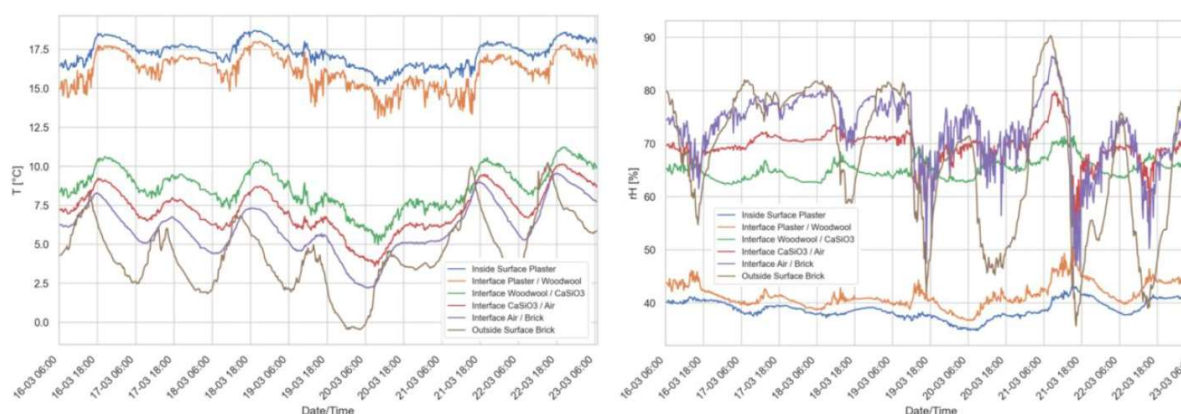
Die Messergebnisse der Voruntersuchungen haben gezeigt, dass an der Ziegelfassade ohne Luftschicht zwischen Ziegel und Kalziumsilikat-Dämmung eine durchgehend hohe relative Feuchte von über 80 % auftritt, die selbst beim Abtrocknen der Ziegelaußenseite im Bauteil verbleibt (vgl. Abbildung 7 und Abbildung 8).

Abbildung 7: Temperaturprofile (links) und Feuchteprofile (rechts) in der Testfassade West ohne Luftschicht (Messzeitraum: 16.03.2021 bis 23.03.2021)



Im Vergleich dazu liegt der Wert der relativen Feuchte zwischen Luftschicht und Kalziumsilikat-Dämmung an der gegenüberliegenden Fachwerkfassade im gleichen Zeitraum deutlich unter 80 %. Auch an der Kontaktfläche von Kalziumsilikat zur Holzfaserdämmung liegt der relative Feuchtegehalt ca. 10 % unter dem der Ziegelfassade ohne Luftschicht. Durch die physische Trennung der Bauteilschichten wird die ziegelseitige Feuchtebeaufschlagung der hygrischen Pufferschicht deutlich reduziert. Insgesamt ist das Verhalten dadurch deutlich volatiler und zeigt regelmäßige Trocknungsphasen über alle Schichten.

Abbildung 8: Temperaturprofile (links) und Feuchteprofile (rechts) in der Testfassade Ost mit Luftschicht zwischen Ziegel und Kalziumsilikatdämmschicht (Messzeitraum: 16.03.2021 bis 23.03.2021)



Zur Validierung der Messergebnisse aus der Vorlauftforschung werden die Testfassaden im Rahmen des Projektes in einem Simulationsmodell nachgebildet. Die Auswertung der Ergebnisse der Validierung erfolgt in *Kapitel 3.5 Validierung der Simulationsmodelle mit Messdaten*.

3.2 Hygrothermische Bauteilsimulationen

Im vorherigen Kapitel wurde erläutert, welche Voruntersuchungen vor Projektbeginn bereits durchgeführt wurden. In den folgenden Kapiteln werden die Methodik der hygrothermischen Simulationsanalysen sowie die Umsetzung der Testfassadenmessungen dargestellt.

Die Simulationsanalysen erfolgten mit der Simulationssoftware DELPHIN der Bauklimatik Dresden Software GmbH (bauklimatik-dresden.de, 2025). Dabei handelt es sich um eine Software zur räumlich diskretisierten Simulation für den gekoppelten Wärme-, Feuchte- und Stofftransport in kapillarporösen Baustoffen. Für die numerische Berechnung wird die Bauteilkonstruktion in viele kleine Bereiche

unterteilt (diskretisiert). Um die Anzahl der diskretisierten Elemente und somit die Simulationsdauer zu reduzieren, wurde nur ein Bereich modelliert, der ca. 15 % der realen Testfassade beträgt. Es handelt sich um die ungestörten Bereiche der beiden Testfassaden, in dem sich die Sensoren befinden und die nicht durch Randbereiche oder Wärmebrücken beeinflusst sind.

Die hygrothermischen Simulationsanalysen wurden aufgeteilt in drei verschiedene Kategorien (siehe Abbildung 9). Das Ziel der Simulationen bestand zunächst darin, herauszufinden, welche Material- und Schichtkombinationen aus hygrisch aktiven und konventionellen Innendämmstoffen am besten bauphysikalisch funktionieren und im weiteren Verlauf des Projektes in den beiden Fassadenprüfständen praktisch untersucht werden sollten. Außerdem wurde eine Vielzahl ausgewählter Materialien in verschiedenen Schichtdicken miteinander kombiniert, um die hygrisch und thermisch bestmöglichen Kombinationen zu ermitteln (Simulation 1). Im Anschluss wurden die Testfassaden aus der Vorlaufforschung und die neu gebauten Varianten realitätsgetreu in DELPHIN modelliert und simuliert. Das Ziel dieser Simulationen war eine Validierung mit den Messdaten der Testfassaden (Simulation 2). Als letztes wurden die für die Evaluation in einem realen Gebäude der UdK Berlin ausgewählten Varianten in DELPHIN modelliert und simulativ analysiert (Simulation 3).

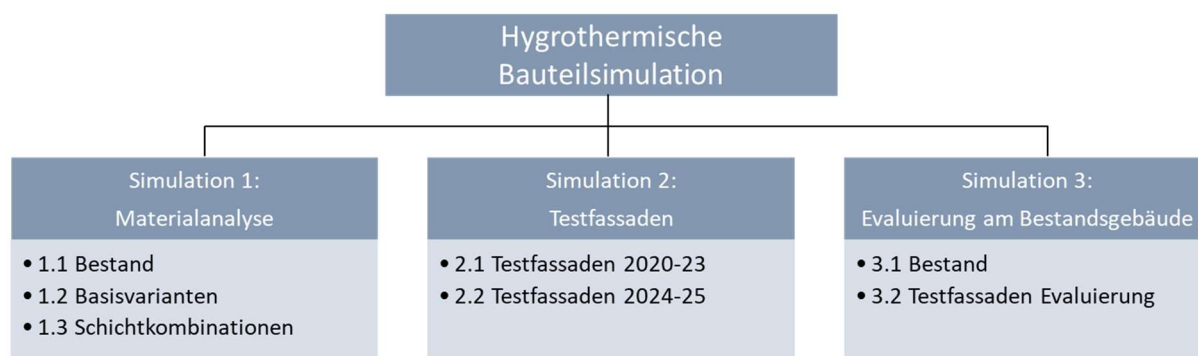


Abbildung 9: Übersicht der Simulationsvarianten

Bewertung der hygrothermischen Bauteilsimulationen

Bei der Bewertung von hygrothermischen Baukonstruktionen sind bestimmte Feuchtezustände besonders kritisch, da sie direkten Einfluss auf die Materialeigenschaften, die Schadensanfälligkeit und die langfristige Funktionstüchtigkeit der Konstruktion haben. Ein zentraler Aspekt ist die maximale relative Feuchte innerhalb der Konstruktion. Ein Überschreiten kritischer Feuchtwerte kann zu Kondensation führen, wodurch das Risiko für Schimmelbildung und Materialdegradation steigt. Besonders relevant ist das an Übergangsstellen zwischen diffusionshemmenden und sorptiven Schichten. Ebenfalls von Bedeutung ist der Feuchtegehalt in hygroskopischen Materialien, da diese Feuchtigkeit speichern und wieder abgeben können. Eine zu hohe Feuchtaufnahme kann jedoch die Wärmedämmfähigkeit mindern und die strukturelle Integrität von Materialien wie Holz oder Dämmstoffen beeinträchtigen. Zusätzlich werden Feuchtegradienten an Tagen mit extremen Wetterbedingungen untersucht, da sie Hinweise auf Feuchtebewegungen durch Kapillartransport oder Diffusion geben. Starke Gradienten können zu unerwünschten Feuchteakkumulationen und Materialspannungen führen.

Simulationsausgaben und Bewertungsparameter

Die hygrothermische Simulation mit DELPHIN liefert eine Vielzahl an Ausgaben, die eine detaillierte Analyse des Feuchte- und Wärmetransports in Bauteilen ermöglichen. Je nach Fragestellung können unterschiedliche Ausgabeparameter ausgewählt werden, die sowohl zeitlich als auch räumlich variieren. Für die im Projekt durchgeführten Simulationsanalysen wurden folgende Simulationsausgaben erzeugt:

- Temperaturprofil (Temperatur in °C)
- Luftfeuchteprofil (Relative Feuchte in %)
- Feuchtegehaltsprofil (Gesamtmasseendichte von flüssigem Wasser, Wasserdampf und Eis in kg/m³)
- Feuchtegehaltsintegral (Gesamtmasseendichte von flüssigem Wasser, Wasserdampf und Eis in kg/m³)
- Feuchtegehaltsintegral je Schicht (Gesamtmasseendichte von flüssigem Wasser, Wasserdampf und Eis in kg/m³)
- Relative Feuchte an den Messpunkten in den Schichtgrenzen sowie an den Außen- und Innenseiten (Relative Feuchte in %)
- Temperatur an den Messpunkten in den Schichtgrenzen sowie an den Außen- und Innenseiten (Temperatur in °C)

Für ausgewählte Konstruktionen wurden zusätzliche Ausgaben definiert, die eine detailliertere Bewertung ermöglichen.

Das Feuchtegehaltsintegral (Gesamtmasseendichte von flüssigem Wasser, Wasserdampf und Eis in kg/m³) und die relative Feuchte (Relative Feuchte in %) sind zwei zentrale Parameter zur Bewertung des Feuchteverhaltens von Dämmstoffen und Bauteilen. Während das Feuchtegehaltsintegral die absolute Feuchtemenge beschreibt, die ein Material über einen bestimmten Zeitraum aufgenommen hat, gibt die relative Feuchte das Verhältnis der vorhandenen Feuchtigkeit zur maximal möglichen Sättigung an und ist entscheidend für die Beurteilung von Schimmel- und Schadensrisiken. Der Schwerpunkt bei der Auswertung der untersuchten Konstruktionen lag auf der Ermittlung des eingeschwungenen Zustands, der mit Hilfe des Feuchtegehaltsintegrals geprüft wurde. Außerdem wurden die Temperaturen und die relativen Feuchten innerhalb der Schichtgrenzen untersucht. Weitere Auswertungen, insbesondere zur Holzfeuchte, wurden aufgrund der Anzahl an Simulationen nur für ausgewählte Varianten durchgeführt.

Weitere Festlegungen zur Bewertung von hygrothermischen Bauteilsimulationen enthalten die Merkblätter des WTA (Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V.) (www.wta-international.org, kein Datum). Die WTA-Merkblätter sind praxisorientierte Richtlinien, die sich mit verschiedenen Aspekten der Bauwerkserhaltung befassen. Im WTA-Merkblatt 6-5 wird zur Vermeidung von freiem Tauwasser in den Poren und zum Schutz vor Frostschäden ein Grenzwert von 95 % relativer Feuchte hinter der Dämmschicht angegeben (Künzel, et al., 2013). Zudem dient der Grenzwert dem Holzschutz, da holzerstörende Pilze erst oberhalb dieses Wertes aktiv werden. Da in Außenwänden häufig Holzbauteile vorkommen, bietet die Begrenzung der Feuchte eine zusätzliche Sicherheit. Für feuchteunempfindliche Baustoffe stellt der Wert eine konservative Sicherheitsgrenze dar. Eine kurzfristige Überschreitung bedeutet nicht direkt, dass die Konstruktion nicht funktioniert, solange eine erneute Trocknung gegeben ist und die Herstellerangaben zu den maximalen Wassergehalten nicht überschritten werden. Insbesondere kapillaraktive Dämmstoffe tragen dazu bei, Feuchtespitzen zu vermeiden und das Risiko von Schimmelbildung zu reduzieren, während bei nicht kapillaraktiven Materialien eine sorgfältige Planung der Feuchtesicherung notwendig ist. (Künzel, et al., 2013)

3.3 Materialanalyse (Simulation 1)

Auf Basis des Wandaufbaus der Testfassaden (einfache Ziegelbreite) wurden drei verschiedene Kategorien für die Simulationsanalysen definiert: Bestand, Basisvarianten und Schichtkombinationen. Mit den Bestandsanalysen sollte zunächst der Ist-Zustand abgebildet werden. Die Basisvarianten haben das Ziel geeignete Materialien für den Umbau des Testfassadenprüfstandes zu finden. Die Analyse verschiedener Schichtkombinationen ermöglicht eine breitgefächerte Untersuchung verschiedener Konstruktionsvarianten.

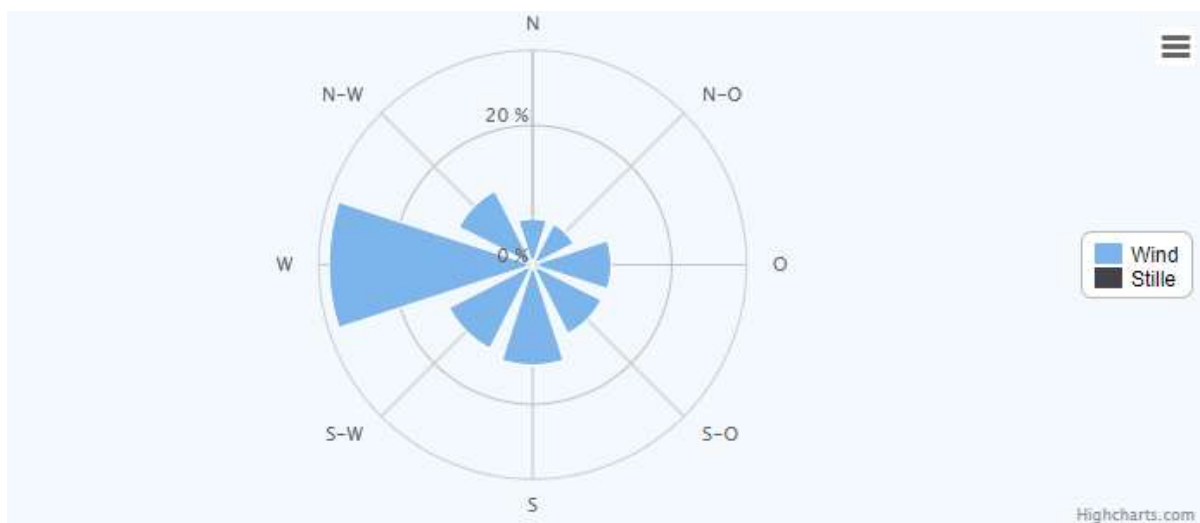
3.3.1 Randbedingungen für die Materialanalyse

Die Wahl der Randbedingungen für die hygrothermischen Bauteilsimulationen wurde entsprechend dem Zweck der Analysen definiert. Es wurden Simulationen durchgeführt, die dem Vergleich von Materialien und Schichtdicken dienen. Für diese Simulationen wurden die hygrothermischen Simulationsanalysen unter Berücksichtigung der in der DIN 4108-3, Anhang D (DIN 4108-3, 2023) festgelegten Randbedingungen durchgeführt. Diese Norm beschreibt die Anforderungen an die Simulation feuchtetechnischer Prozesse in mehrschichtigen Bauteilen unter natürlichen Klimabedingungen. Für die Simulationsanalysen, die zur Validierung der Simulationsmodelle mit den gemessenen Daten dienen, wurden Randbedingungen genutzt, die die klimatischen Bedingungen zum Zeitpunkt der Messung am besten abbilden.

Die Materialanalysen erfolgten unter definierten Standardbedingungen wie sie nach DIN 4108-3 (DIN 4108-3, 2023) vorgegeben sind. Durch die einheitlichen Randbedingungen soll eine Vergleichbarkeit der verschiedenen Varianten gewährleistet werden. Als Klimastandort für das Testreferenzjahr wurde Potsdam als nächstgelegener Standort relativ zum Standort in Berlin-Charlottenburg aus der DELPHIN Datenbank gewählt. Die Auswahl des Klimastandorts ist entscheidend für hygrothermische Simulationen in DELPHIN, da Temperatur, relative Luftfeuchte, Wind und Niederschlag das Feuchte- und Wärmeverhalten von Bauteilen maßgeblich beeinflussen. Diese Klimadatensätze basieren auf langjährigen Messreihen und beinhalten sowohl durchschnittliche als auch extreme Witterungsverläufe. Testreferenzjahre werden von meteorologischen Instituten, wie dem Deutschen Wetterdienst (DWD), bereitgestellt. Das Testreferenzjahr (TRY2011) aus der Datenbank beinhaltet unter anderem Temperatur, Luftfeuchte, Strahlung und Niederschlag und ist mit Blick auf die Relevanz von Schlagregenereignissen besonders geeignet für die hygrothermische Simulation.

Für die Ausrichtung der Außenseite der Bauteilmodelle wurde die Wetterseite gewählt, um in der Simulationsanalyse den Worst-Case-Fall abzubilden. Als Wetterseite wird die Seite eines Gebäudes bezeichnet, die Wind und Regen am häufigsten ausgesetzt ist. Dadurch ist diese Seite am Gebäude meist länger feuchtebeaufschlagt als die abgewandte Seite. In Deutschland kommen Schlechtwetterereignisse meist aus westlicher Richtung, daher wird die Westseite als Wetterseite bezeichnet (www.dwd.de, 2025). Das zeigt auch die Windrose vom Standort Berlin wie auf der Abbildung 10 zu sehen ist.

Abbildung 10: Windrose Berlin (Anon., 2025)

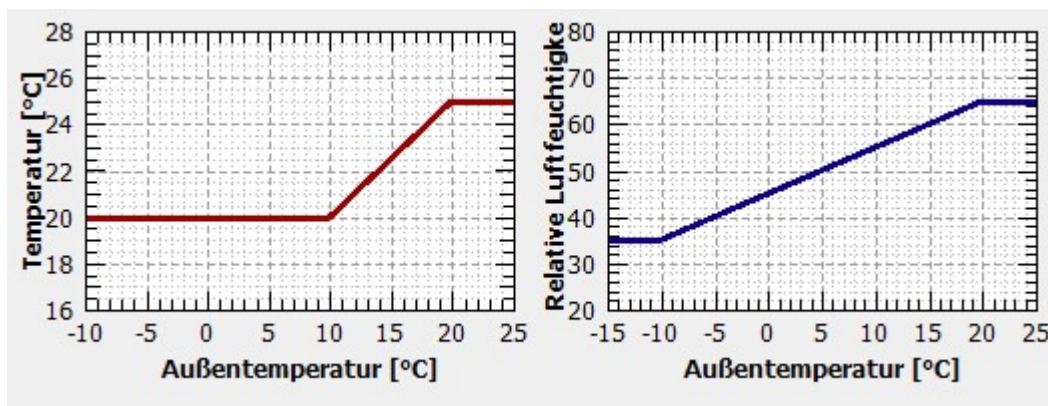


Quelle: world-weather.info

Die Anfangstemperatur wurde im Simulationsmodell mit 20 °C über die gesamte Bauteildicke festgelegt, während für die relative Anfangsfeuchte 80 % angenommen wurde. Für die Innenraumrandbedingung

wurde das adaptive Innenraumklima (DIN EN 15026, 2023) (WTA, 2014) für normale innere Feuchtelasten plus 5 % gewählt. Diese Bedingung basiert auf der WTA-Richtlinie 6-2, die sich mit hygrothermischen Simulationen für Bestandsgebäude befasst. Sie beschreibt typische Temperatur- und Feuchteverhältnisse in Innenräumen und berücksichtigt eine moderat erhöhte Feuchtebelastung, die in schlecht gelüfteten Räumen oder durch spezifische Nutzungen auftreten kann. Die Raumlufttemperatur folgt einem jahreszeitlichen Verlauf mit typischen Werten zwischen 20 °C im Winter und 23–25 °C im Sommer (siehe Abbildung 11), wobei zusätzliche Tag-Nacht-Schwankungen berücksichtigt werden. Die relative Luftfeuchte liegt im Bereich von 40 % im Winter bis 65 % (siehe Abbildung 11) im Sommer und wurde gegenüber der Standardvariante um 5 % erhöht, um leicht erhöhte Feuchtelasten durch Nutzungseinflüsse wie Kochen, Duschen oder reduzierte Lüftung zu simulieren. Zusätzlich beeinflusst diese Randbedingung die Feuchtebelastung der Bauteiloberflächen über einen Feuchteübergangskoeffizienten, der das Sorptionsverhalten des Materials berücksichtigt.

Abbildung 11: Innenraumbedingungen nach DIN EN 15026 und WTA 6-2, Darstellung aus DELPHIN

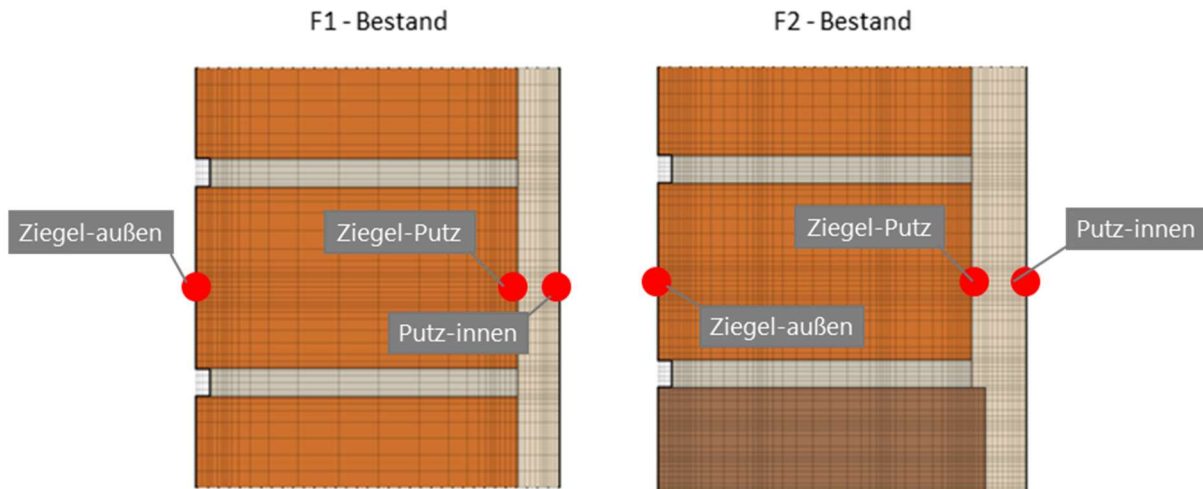


Die untersuchten Varianten der Simulation 1 basieren auf vereinfachten Modellen, bei denen die Kleberschichten zwischen den Materialschichten vernachlässigt wurden, die Mörtelschichten der Außenwand wurden jedoch berücksichtigt.

3.3.2 Bauteilbestand

Zur Bewertung der Auswirkungen der Innendämmung wurde zunächst eine Simulation des ungedämmten Bestands durchgeführt. Diese Referenzsimulation dient als Vergleichsbasis, um Änderungen im thermischen und hygrischen Verhalten des Bauteils durch die Dämmmaßnahme zu quantifizieren. Sie ermöglicht die Analyse der Temperatur- und Feuchteverläufe im Bestand und hilft, kritische Feuchteansammlungen oder Kondensationsrisiken bereits in der Ausgangssituation zu identifizieren. Die Innendämmung beeinflusst die Temperaturverteilung im Wandaufbau erheblich, wodurch sich auch die Feuchtedynamik verändert. Durch den Vergleich mit der ungedämmten Variante lässt sich beurteilen, inwieweit sich die Feuchteaufnahme und -abgabe im Mauerwerk verschieben und ob potenzielle Risiken wie Schimmelbildung oder Frostschäden entstehen könnten. Die Abbildung 12 zeigt die beiden Bestandswände der Testfassade 1 und Testfassade 2 als Simulationsmodell. Die Fassade F1 besteht aus einfachem Ziegelmauerwerk und einem Lehmputz auf der Innenseite. Die Fassade F2 besteht aus gemauertem Fachwerk mit Lehmputz auf der Innenseite.

Abbildung 12: Wandaufbau der beiden Testfassaden im Simulationsprogramm DELPHIN inklusive der Sensorpositionen

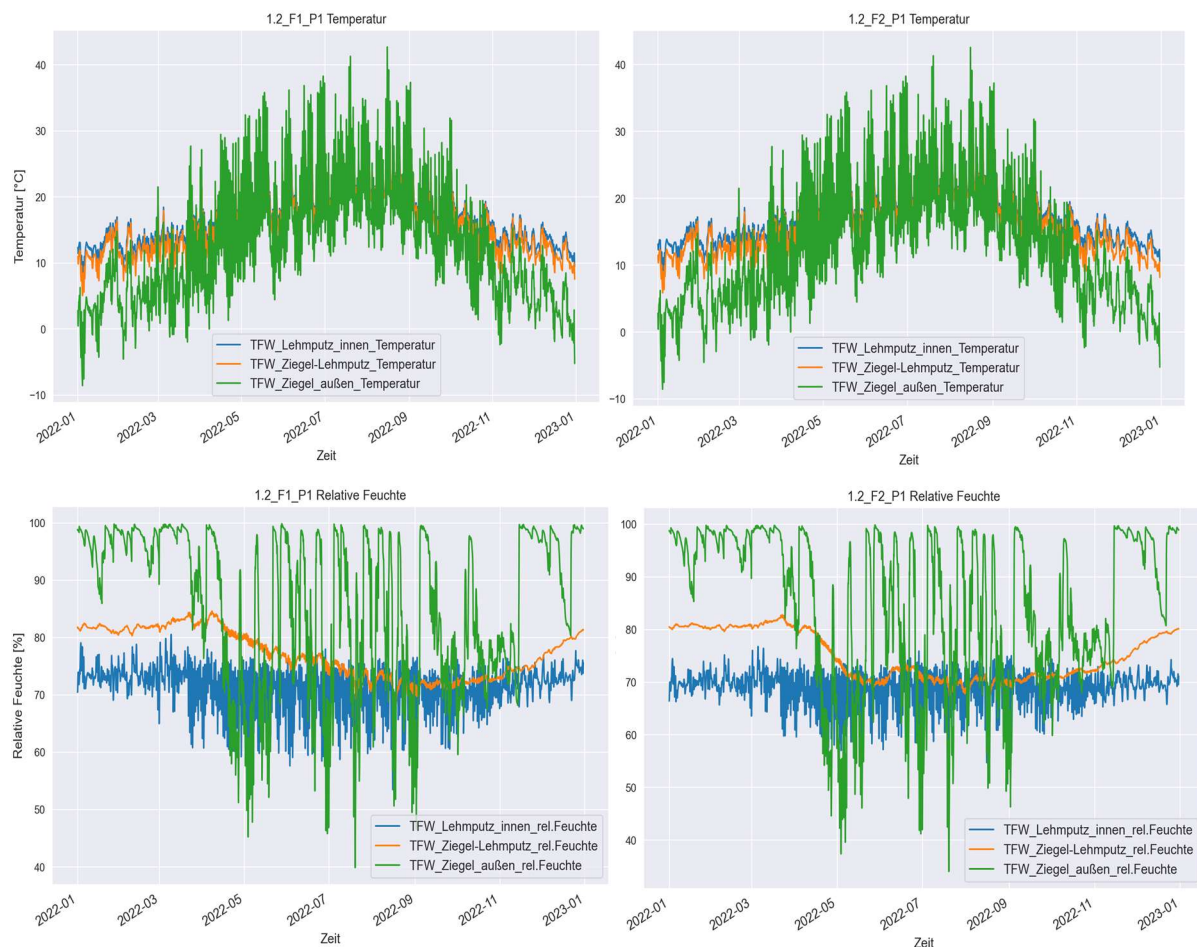


Die Abbildung 13 zeigt den Jahresverlauf der relativen Feuchten (unten) und der Temperaturen (oben) auf der inneren und äußeren Bauteiloberfläche und an der Kontaktstelle zwischen Ziegel und Lehm-Innenputz für beide Varianten: 1.1_F1_P1 (links) und 1.1_F2_P1 (rechts). Die Analyse der relativen Feuchte zeigt deutliche saisonale Schwankungen, insbesondere auf der Ziegelaußenseite, die im Winter regelmäßig Werte über 90 % erreicht. Während die Feuchtwerte im Sommer absinken, bleibt die mittlere Schicht (Ziegel-Lehmputz) über das Jahr hinweg relativ stabil, zeigt jedoch ebenfalls gewisse Schwankungen. Die innere Schicht (Lehmputz innen) weist hingegen konstante, niedrige Feuchtwerte auf, was darauf hindeutet, dass die Innenraumbedingungen nur geringfügig durch die äußeren Feuchteschwankungen beeinflusst werden.

Ein Vergleich der beiden Varianten zeigt, dass die Feuchtebelastung in der zweiten Variante (1.1_F2_P1) insgesamt geringer ausfällt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass es sich hierbei um eine Fachwerkwand handelt, während die erste Variante eine reine Mauerwerkswand ist. Durch das in der Konstruktion enthaltene Holz verändert sich die Feuchteverteilung, da Holz eine höhere Sorptionsfähigkeit besitzt und Feuchtigkeit anders speichert und abgibt als Mauerwerk. Dadurch entstehen weniger ausgeprägte Feuchteakkumulationen, was die insgesamt bessere Feuchteperformance der Fachwerkwand erklärt.

Die Temperaturverläufe zeigen eine typische saisonale Entwicklung mit hohen Werten im Sommer und niedrigen Temperaturen im Winter. Besonders auffällig ist, dass die Innenseite der Wand in beiden Varianten während der Wintermonate teilweise unter 15 °C fällt. Dies kann aus bauphysikalischer Sicht kritisch sein, da niedrigere Oberflächentemperaturen die Gefahr von Kondensationsprozessen an der Innenseite erhöhen können, insbesondere bei hoher Innenraumfeuchte. Während sich die Temperaturverläufe zwischen den beiden Varianten kaum unterscheiden, zeigt sich in der zweiten Variante eine verbesserte Feuchtereulierung.

Abbildung 13: Jahresverlauf der relativen Feuchten und Temperaturen der Bestandsfassaden



Einer der wesentlichen Vorteile einer Innendämmung ist die Erhöhung der Innentemperaturen, insbesondere im Winter. In den vorliegenden Simulationen zeigt sich, dass die Temperatur an der Innenseite der Wand teilweise unter 15 °C fällt, was die Gefahr von Wärmeverlusten und unbehaglichen Innenraumklimabedingungen erhöht. Durch eine Innendämmung wird die Wärme besser im Raum gehalten, wodurch sich die Oberflächentemperaturen erhöhen und das Risiko von Kondensatbildung an der Wandinnenseite reduziert werden kann. Gleichzeitig bringt eine Innendämmung jedoch hygrothermische Herausforderungen mit sich. Da die Außenwand durch die Dämmung kälter wird, verlagert sich der Taupunkt weiter in die Konstruktion, wodurch es zu einer erhöhten Feuchteakkumulation innerhalb der Wand kommen kann. In der Folge steigt das Risiko für Materialschäden durch anhaltend hohe Feuchteniveaus, insbesondere an den Grenzflächen zwischen Dämmung und Bestandsmauerwerk. Um diesen Problemen entgegenzuwirken, ist der Einsatz hygrothermisch aktiver Dämmstoffe, die Feuchtigkeit aufnehmen und wieder abgeben können besonders sinnvoll. In Verbindung mit der passiven Dämmschicht soll die Dämmwirkung zusätzlich verbessert werden.

3.3.3 Basisvarianten

Die Simulationsanalysen der Basisvarianten dienen der Auswahl einer geeigneten Materialkombination für die neuen Testfassadenprüfstände. Der untersuchte Wandaufbau entspricht dem Aufbau der Vorlaufforschung (11,5 cm Außenwand, 3 cm hygri-sche Dämmung, 10 cm Holzfaserdämmung, optional 3 cm Luftschicht). Dieses Vorgehen gewährleistet die Vergleichbarkeit mit den bisherigen Untersuchungen aus der Vorlaufforschung.

3.3.3.1 Materialauswahl

Für die Auswahl geeigneter Materialien erfolgte zunächst eine Materialrecherche. Es wurden die bauphysikalischen Eigenschaften gängiger marktverfügbarer hygrysch aktiver Dämmmaterialien mit den vorhandenen Dämmmaterialien aus der Materialdatenbank des Simulationsprogrammes DELPHIN abgeglichen. Auf Grundlage dieser Materialrecherche wurden neben dem bereits in den Testfassaden verbauten Kalziumsilikat vier weitere hygrysch aktive Dämmmaterialien ausgewählt. Es wurde bei der Auswahl darauf geachtet, dass die hygrysch Materialien möglichst unterschiedlich in Bezug auf ihre bauphysikalischen Eigenschaften und ihrer Materialität sind.

Die Holzfaserdämmung wurde für die Analysen gewählt, da sie mit einem Marktanteil von 58 % bei Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen (FNR, 2021) in der Baupraxis erprobt und ein gängiges Material für die Innendämmung darstellt. In der baupraktischen Anwendung wird für Innendämmung i. d. R. je nach Dämmmaterial 6–8 cm empfohlen, um kritische Feuchtezustände zu vermeiden. (Anon., 2025) Im Rahmen der Testfassadenprüfstände soll geprüft werden, ob die Kombination aus hygrysch Dämmung durch ihre feuchtepuffernde Eigenschaft eine höhere Dämmstärke erlaubt. Aus diesem Grund wurde eine Holzfaserdämmung von 10 cm für die Konstruktion der Basisvarianten in den Testfassaden gewählt.

Zur Eingrenzung der Anzahl an möglichen Materialkombinationen und zur besseren Vergleichbarkeit wurden insgesamt fünf verschiedene hygrysch aktive Materialien ausgewählt, die mit einem passiven Material kombiniert werden. Die fünf hygrysch aktiven Materialien werden in Kombination mit der Holzfaserdämmung zunächst in gleichbleibender und später in variierender Schichtstärke untersucht. Es wurden anhand der Materialrecherche folgende Materialien für die Analysen ausgewählt (vgl. Tabelle 4).

Tabelle 4: Übersicht der untersuchten Materialien für die hygrothermische Simulation mit DELPHIN

Material	Bezeichnung in DELPHIN
Wandkonstruktion	
Ziegel	Normziegel [507]
Mörtel	Kalkzementmörtel [143]
Holz	Fichte Radial [696]
Dämmung hygrysch aktiv (DH)	
Kalziumsilikat	Calsitherm Klimaplatte WF [707]
Mineralschaum	Redstone Mineralschaum Pura Innen [590]
PUR	iQ-Therm [438]
Kork+Lehm	Wärmedämmlehm Kork Platte [416]
Lehm	Wärmedämmlehm Kork BigPack [414]
Dämmung passiv (DP)	
Holzfaser	Holzfaserdämmplatte [693]
Putz innen	
Lehmputz	Lehmmörtel (historisch) [128]

Für eine einheitliche Bezeichnung der verschiedenen Varianten wurden spezifische Abkürzungen festgelegt. Diese ermöglichen eine klare und konsistente Kennzeichnung der Materialkombinationen und erleichtern die Vergleichbarkeit der Simulationsergebnisse. (siehe Tabelle 5).

Tabelle 5: Übersicht Materialien und Bezeichnungen

Bauteil	Material	Bezeichnung	Hersteller	Bezeichnung
Fassade 1	Ziegelmauerwerk	-	-	F1
Fassade 2	Fachwerk gemauert	-	-	F2
Dämmung hygrysch 1	Kalziumsilikat	Clima Redboard pro	Redstone	DH1
Dämmung hygrysch 2	Mineralschaum	Pura Innen	Redstone	DH2
Dämmung hygrysch 3	Hartschaumplatte	iQ-Therm	Remmers	DH3
Dämmung hygrysch 4	Kork-Dämm-Lehmplatte	KDL-Platte	Cellco	DH4
Dämmung hygrysch 5	Wärmedämmlehm	WDL	Cellco	DH5
Dämmung passiv	Holzfaserdämmplatte	Special Dry	Steico	DP1
Innenputz	Lehmputz	Lehmputz	-	P1
Luftschicht	Luft	-	-	L

Für die hygrothermischen Bauteilsimulationen der gewählten Materialien ergeben sich bei gleicher Schichtdicke wie in der Vorlauforschung folgende Basisvarianten:

Tabelle 6: Übersicht der untersuchten Basisvarianten für die hygrothermische Simulation mit DELPHIN

Nr.	Variante	115 mm	30 mm	30 mm	100 mm	15 mm
1	1.2_F1_DH1_DP1_P1	Mauerwerk	-	Kalziumsilikat	Holzfaser	Putz
2	1.2_F1_DH2_DP1_P1	Mauerwerk	-	Mineralschaum	Holzfaser	Putz
3	1.2_F1_DH3_DP1_P1	Mauerwerk	-	iQ-Term	Holzfaser	Putz
4	1.2_F1_DH4_DP1_P1	Mauerwerk	-	Korkdämmlehmplatte	Holzfaser	Putz
5	1.2_F1_DH5_DP1_P1	Mauerwerk	-	Wärmedämmlehm	Holzfaser	Putz
6	1.2_F1_L_DH1_DP1_P1	Mauerwerk	Luftschicht	Kalziumsilikat	Holzfaser	Putz
7	1.2_F1_L_DH2_DP1_P1	Mauerwerk	Luftschicht	Mineralschaum	Holzfaser	Putz
8	1.2_F1_L_DH3_DP1_P1	Mauerwerk	Luftschicht	iQ-Term	Holzfaser	Putz
9	1.2_F1_L_DH4_DP1_P1	Mauerwerk	Luftschicht	Korkdämmlehmplatte	Holzfaser	Putz
10	1.2_F1_L_DH5_DP1_P1	Mauerwerk	Luftschicht	Wärmedämmlehm	Holzfaser	Putz

Nr.	Variante	115 mm	30 mm	30 mm	100 mm	15 mm
11	1.2_F2_DH1_DP1_P1	Fachwerk	-	Kalziumsilikat	Holzfaser	Putz
12	1.2_F2_DH2_DP1_P1	Fachwerk	-	Mineralschaum	Holzfaser	Putz
13	1.2_F2_DH3_DP1_P1	Fachwerk	-	iQ-Term	Holzfaser	Putz
14	1.2_F2_DH4_DP1_P1	Fachwerk	-	Korkdämmlehmplatte	Holzfaser	Putz
15	1.2_F2_DH5_DP1_P1	Fachwerk	-	Wärmedämmlehm	Holzfaser	Putz
16	1.2_F2_L_DH1_DP1_P1	Fachwerk	Luftschicht	Kalziumsilikat	Holzfaser	Putz
17	1.2_F2_L_DH2_DP1_P1	Fachwerk	Luftschicht	Mineralschaum	Holzfaser	Putz
18	1.2_F2_L_DH3_DP1_P1	Fachwerk	Luftschicht	iQ-Term	Holzfaser	Putz
19	1.2_F2_L_DH4_DP1_P1	Fachwerk	Luftschicht	Korkdämmlehmplatte	Holzfaser	Putz
20	1.2_F2_L_DH5_DP1_P1	Fachwerk	Luftschicht	Wärmedämmlehm	Holzfaser	Putz

Für die Auswahl geeigneter Dämmmaterialien für die zwei Testfassadenprüfstände, wurden die Materialien hinsichtlich ihrer bauphysikalischen Parameter evaluiert. Die Materialparameter wurden aus der Materialdatenbank der Simulationssoftware DELPHIN entnommen (siehe Tabelle 7). Ziel war es, geeignete hygrysch aktive Materialien auszuwählen, deren Fähigkeit zur Feuchteregulierung, Wärmespeicherung und Dämmung unter realen Bedingungen während mindestens einer Heizperiode getestet werden können.

Tabelle 7: Bauphysikalische Parameter der betrachteten hygrysch aktiven Materialien in DELPHIN

	Kalziumsilikat (DH1)	Mineralschaum (DH2)	iQ-Therm (DH3)	Korkdämmlehmplatte (DH4)	Wärmedämmlehm (DH5)
Dichte [kg/m ³]	187	128	49	350	368
Porosität [m ³ /m ³]	0,930	0,949	0,982	0,868	0,861
μ-Wert [-]	3,6	4,5	27,0	28,0	7,7
Wärmekapazität [J/kgK]	1100	893	1400	1056	885
Wärmeleitfähigkeit trocken [W/mK]	0,059	0,047	0,037	0,077	0,074
Theta (effektiv) [m ³ /m ³]	0,916	0,422	0,093	0,418	0,860
A _w [kg/m ² s05]	0,76562	0,102228	0,0129213	0,0446362	0,0549029

Quelle: DELPHIN Materialdatenbank

Tabelle 7 enthält eine Übersicht über die verschiedenen Dämmmaterialien mit ihren thermischen und physikalischen Eigenschaften. Diese wurden wie folgt bewertet:

Dichte: Die Dichte variiert erheblich zwischen den Materialien, wobei die Korkdämmlehmplatte (DH4) mit 350 kg/m^3 und der Wärmedämmlehm (DH5) mit 368 kg/m^3 die höchsten Werte aufweisen. Das Material iQ-Therm (DH3) hat mit 49 kg/m^3 die niedrigste Dichte, was auf eine sehr leichte Struktur hinweist.

Porosität: Die Porosität beschreibt den Anteil des Porenraums am Gesamtvolumen des Materials. Alle Materialien weisen eine hohe Porosität auf, was auf eine gute Fähigkeit zur Speicherung von Wasser und Luft hinweist. Das Material iQ-Therm (DH3) hat mit 0,982 den höchsten Porositätswert, was möglicherweise zu einer besseren Wärmespeicherung führt, während die Korkdämmlehmplatte (DH4) und der Wärmedämmlehm (DH5) eine etwas niedrigere Porosität aufweisen (0,868 bzw. 0,861).

μ -Wert: Der μ -Wert beschreibt die Diffusionswiderstandszahl, die den Widerstand des Materials gegen Wasserdampfdiffusion angibt. Die Materialien iQ-Therm (DH3) und die Korkdämmlehmplatte (DH4) haben sehr hohe μ -Werte (27,0 bzw. 28,0), was eine eingeschränkte Dampfdurchlässigkeit beschreibt. Kalziumsilikat (DH1) hat mit 3,6 den niedrigsten μ -Wert, was eine gute Dampfdurchlässigkeit und damit eine höhere Feuchteregulierung ermöglicht.

Wärmekapazität: iQ-Therm (DH3) hat mit 1400 J/kgK die höchste Wärmekapazität, was bedeutet, dass es die größte Menge an Wärme aufnehmen kann, bevor sich die Temperatur merklich verändert. Dies macht es ideal für Anwendungen, bei denen eine hohe Wärmespeicherung gewünscht ist. Kalziumsilikat (DH1) und die Korkdämmlehmplatte (DH4) haben ebenfalls relativ hohe Wärmekapazitätswerte, was darauf hindeutet, dass sie gut Wärme speichern können.

Wärmeleitfähigkeit: iQ-Therm (DH3) hat mit $0,037 \text{ W/mK}$ die geringste Wärmeleitfähigkeit, was es zu einem hervorragenden Dämmmaterial macht. Kalziumsilikat (DH1) weist mit $0,059 \text{ W/mK}$ die höchste Wärmeleitfähigkeit unter den getesteten Materialien auf und dämmt damit weniger effektiv als die anderen Materialien.

Theta (effektiv): Der Wert Theta (effektiv) gibt das tatsächlich zur Verfügung stehende Porenvolumen für den Flüssigwassertransport an. Kalziumsilikat (DH1) und Wärmedämmlehm (DH5) haben mit 0,916 und 0,860 die höchsten Werte, was darauf hindeutet, dass diese Materialien besonders gut in der Lage sind, Feuchtigkeit zu speichern und abzugeben.

A_w (Feuchtespeichervermögen): Kalziumsilikat (DH1) hat mit $0,76562 \text{ kg/m}^2\text{s}^{0.5}$ das höchste Feuchtespeichervermögen, was bedeutet, dass es am besten in der Lage ist, Feuchtigkeit zu speichern und bei Bedarf wieder abzugeben.

Sorptionsverhalten der Materialien

Das Sorptionsverhalten beschreibt die Fähigkeit von Baustoffen, Feuchtigkeit aus der Umgebungsluft aufzunehmen und wieder abzugeben. Dieser Prozess spielt eine zentrale Rolle für das hygrothermische Verhalten von Bauteilen, da er die Feuchteverteilung innerhalb der Konstruktion beeinflusst und damit sowohl das Raumklima als auch die Bauschadensfreiheit maßgeblich bestimmt. Die Sorptionsfähigkeit eines Materials wird durch die Sorptionsisotherme beschrieben, welche den Feuchtegehalt im Material in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchtigkeit im Porenvolumen des Materials darstellt. Materialien mit hoher Sorptionskapazität können Feuchteschwankungen ausgleichen und das Risiko von Schimmelbildung oder Bauschäden reduzieren, während nicht sorptive Materialien kaum Feuchte speichern und stärker auf äußere Einflüsse reagieren.

Sorptionsisothermen werden in Form von Kurven dargestellt, die den Gleichgewichtsfeuchtegehalt eines Materials in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte bei konstanter Temperatur zeigen. Der Verlauf der Kurve gibt Aufschluss darüber, wie stark ein Material Feuchtigkeit aufnimmt und speichert. Während poröse, kapillaraktive Materialien eine steilere Sorptionsisotherme aufweisen, zeigen dichte Materialien mit geringer Porosität eine flachere Kurve. Es gibt drei Bereiche, die zu unterscheiden sind.

■ Sorptionsbereich (unter 90-98 % je nach Material):

In diesem Bereich erfolgt die Feuchtaufnahme und -abgabe überwiegend durch Sorptionsprozesse, bei denen Wassermoleküle an den inneren Oberflächen der Poren haften oder in die Gasphase übergehen. In diesem Feuchtebereich tritt kaum Feuchteanreicherung auf und das Risiko für Schimmelbildung ist gering. Temperaturänderungen im üblichen Bereich (5–70 °C) haben nur einen geringen Einfluss auf diesen Prozess. In diesem Bereich können Schäden durch übermäßige Feuchte nahezu ausgeschlossen werden.

■ Kapillarwasserbereich (ab 90-98% je nach Material):

Beginnt die Feuchte in den Poren als Tröpfchen vorzuliegen, so dominiert der kapillare Feuchtetransport. Die Feuchteakkumulation kann zur Durchfeuchtung des Baustoffs führen und dessen bauphysikalische Eigenschaften, wie Wärmedämmung und Festigkeit, negativ beeinflussen. Die freie Sättigung, also der Zustand, in dem alle kapillaren Poren mit Wasser gefüllt sind, stellt die obere Grenze dieses Bereichs dar. Die Wasseraufnahme ist hier stark vom Saugverhalten des Materials abhängig.

■ Übersättigungsbereich (> 100 % relative Luftfeuchte):

Sobald die freie Sättigung überschritten ist, kann das Material kein weiteres Wasser mehr in seinen Poren binden. In diesem Bereich liegt ungebundenes Wasser vor, das beispielsweise durch direkten Kontakt mit flüssigem Wasser, etwa bei Eintauchen in ein Wasserbad oder starkem Schlagregen, entsteht. Da diese Bedingungen in der Baupraxis selten auftreten, spielt dieser Bereich für die Beurteilung von Baustoffen eine untergeordnete Rolle. Allerdings kann stehendes Wasser in Bauteilen zu schweren Schäden, wie Frostabplatzungen oder biologischem Wachstum, führen.

Einfluss der Sorptionsisotherme auf die Bewertung

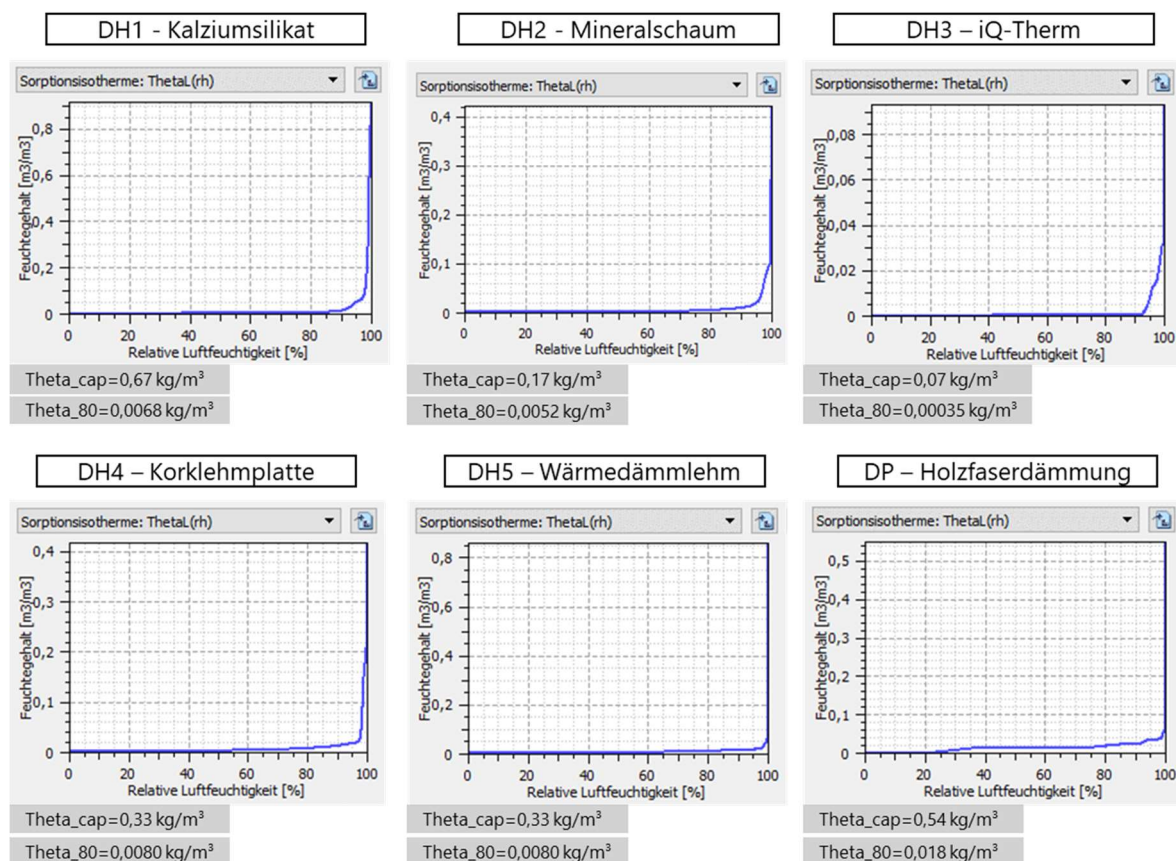
Die Sorptionsisotherme sind im Simulationsprogramm DELPHIN für alle Materialien in der Materialdatenbank enthalten. Sie zeigen, wie viel Wasser jedes Material in Abhängigkeit der Umgebungsfeuchte speichern kann. Für die Bewertung sind sie von Bedeutung, da sie wichtige Materialeigenschaften darstellen, die zur Interpretation der Ergebnisse relevant sind.

Die Abbildung 14 zeigt die Sorptionsisotherme der für die Simulationsanalysen ausgewählten Materialien. Zur Einordnung der Bewertung der Grafiken wird die Grenze der kapillar gesättigten Feuchte (Theta_cap) angegeben. Theta_cap gibt den maximalen Feuchtegehalt an, der durch Kapillarkräfte im Material gehalten werden kann. Wird die Grenze der kapillar gesättigten Feuchte (Theta_cap) überschritten, sind die Poren des Materials vollständig mit Wasser gefüllt, und es kommt zu freier Wassersättigung. In diesem Zustand kann das Material kein weiteres Wasser mehr durch Kapillarkräfte halten, und es entsteht freies Flüssigwasser, welches sich durch Schwerkraft oder äußeren Druck bewegt. Dies kann zu einem erhöhten Wassertransport durch Sickerwasser führen und das Trocknungsverhalten des Materials erheblich beeinflussen, da Verdunstung die einzige Möglichkeit zur Feuchteabgabe wird. Eine Überschreitung von Theta_cap kann zu Materialschäden wie Auswaschungen, Frostschäden oder mikrobiologischem Wachstum führen. Die relative Feuchte, bei der Theta_cap erreicht wird, markiert daher die obere Grenze der sicheren Nutzung.

Die Grenze der kapillar gesättigten Feuchte (Theta_cap) liegt bei den hygrothermischen Materialien sehr hoch zwischen 98% bis 100% relativer Feuchte. Das bedeutet, dass diese Materialien auch bei hoher relativer Feuchte noch funktionsfähig sind, solange sie wieder rücktrocknen können. In der Auswertung der Simulationsergebnisse wurde in Bezug auf den WTA-Planungsleitfaden für Innendämmung als oberer Grenzwert 95% r. F. angesetzt, da diese Grenze eine gewisse Sicherheit bietet. Hinsichtlich der maximalen Feuchtaufnahmefähigkeit zeigt sich, dass Kalziumsilikat ($\text{Theta}_{\text{cap}} = 0,67 \text{ kg/m}^3$) die höchste Sorptionskapazität unter den untersuchten Materialien aufweist. Im Gegensatz dazu kann iQ-Therm mit einem deutlich geringeren Theta_cap von $0,07 \text{ kg/m}^3$ nur vergleichsweise wenig Feuchte puffern, bevor es zu einer kapillaren Sättigung kommt. Das bedeutet, dass iQ-Therm bei hoher relativer

Feuchte schneller an seine Sättigungsgrenze gelangt und damit ein höheres Risiko für feuchtebedingte Schädigungen besteht.

Abbildung 14: Sorptionsisotherme der untersuchten Materialien



Quelle: DELPHIN

Bezogen auf die Analyse der Materialeigenschaften wurden folgende Materialien für den Einbau in die Testfassadenprüfstände gewählt:

iQ-Therm (DH3)

Das Material iQ-Therm zeichnet sich durch seine sehr gute Fähigkeit zur Wärmespeicherung aus. Mit einer Wärmekapazität von 1400 J/kgK und einer sehr niedrigen Wärmeleitfähigkeit von 0,037 W/mK bietet es sehr gute Dämmwerte. Diese Eigenschaften machen iQ-Therm zu einem passenden Material für Anwendungen, bei denen eine hohe Wärmespeicherung und -dämmung gefragt sind. Obwohl der μ -Wert von iQ-Therm mit 27,0 relativ hoch ist und somit die Dampfdurchlässigkeit des Materials eingeschränkt ist, kann es in trockeneren Umgebungen oder als Teil eines mehrschichtigen Systems eingesetzt werden, das die Feuchtere regulierung unterstützt. Aufgrund seiner sehr guten thermischen Eigenschaften wird iQ-Therm als eine vielversprechende Wahl für die Untersuchung in dem Testfassadenprüfstand gesehen.

Korkdämmlehmplatte (DH4)

Die Korkdämmlehmplatte stellt eine passende Wahl für Anwendungen dar, bei denen eine gute Verarbeitbarkeit und gleichzeitig eine effektive Feuchtespeicherung erforderlich sind. Mit einem moderaten μ -Wert von 28,0 hat die Korkdämmlehmplatte eine vergleichsweise geringe Dampfdurchlässigkeit, was sie für den Einsatz in gut belüfteten Umgebungen oder in Kombination mit anderen Materialien geeignet macht. Die Wärmekapazität von 1056 J/kgK ermöglicht eine solide

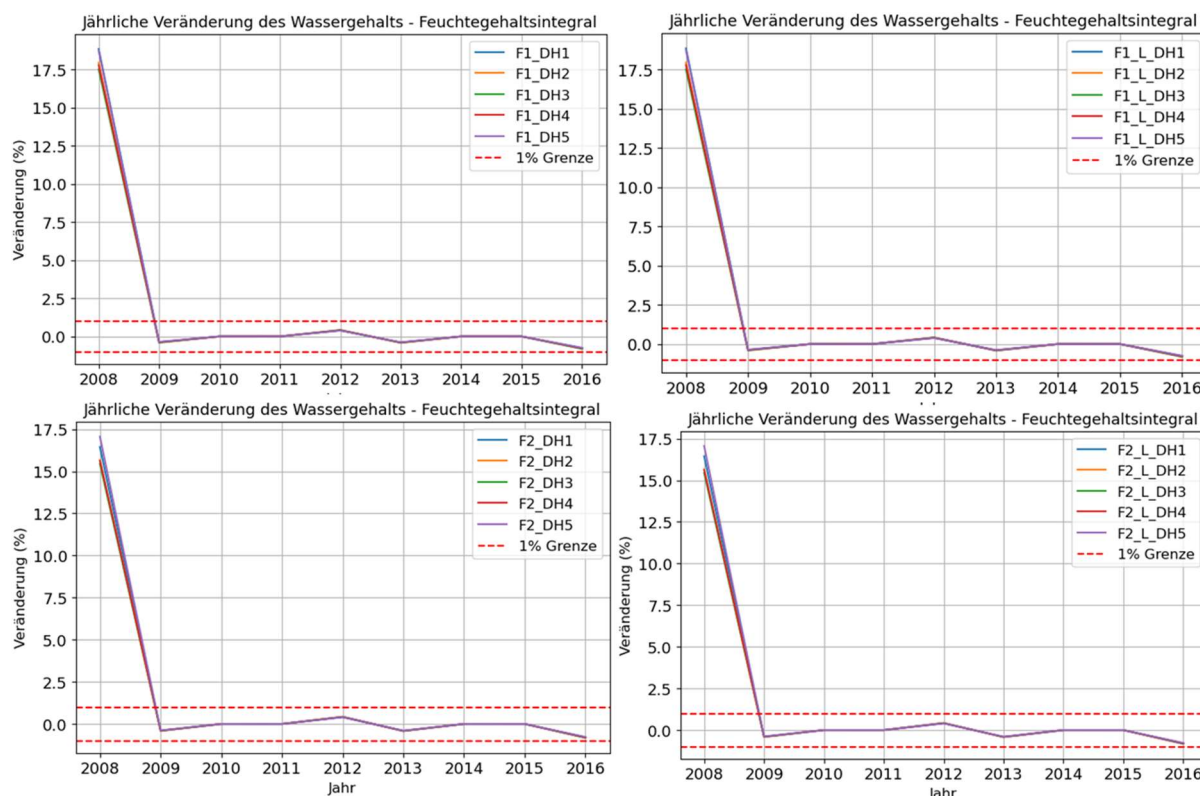
Wärmespeicherung, während die Wärmeleitfähigkeit von 0,077 W/mK im Vergleich zu den anderen Materialien den höchsten Wert aufweist. Der Theta-Wert von 0,418 und das Feuchtespeichervermögen von $0,0446362 \text{ kg/m}^2\text{s}^{0.5}$ zeigen jedoch, dass die Korkdämmlehmplatte Feuchtigkeit gut aufnehmen und wieder abgeben kann. Dieses Material zeichnet sich durch gute hygrische Eigenschaften aus und ist gleichzeitig gut zu verarbeiten, was es zu einer geeigneten Option für die Verwendung in dem Testfassadenprüfstand macht.

Die Auswahl der hygrisch aktiven Materialien für den Einsatz in den Testfassadenprüfständen basiert auf einer sorgfältigen Abwägung von Feuchteregulierung, Wärmespeicherung und Dämmwirkung. Kalziumsilikat (DH1) bietet sehr gute Feuchteregulierungseigenschaften und eine gute Dämmwirkung, was es zu einer bevorzugten Wahl für Anwendungen macht, bei denen Feuchtigkeit eine zentrale Rolle spielt. Daher wurde es für die Untersuchungen in der Vorlaufforschung ausgewählt. Die ausgewählten Materialien (DH3 und DH4) unterscheiden sich aufgrund ihrer spezifischen Eigenschaften erheblich von der Kalziumsilikatplatte. Die Hartschaumplatte bietet eine sehr gute Wärmedämmung und ist besonders gut für den Einsatz in Bereichen geeignet, in denen eine schnelle Feuchtigkeitsregulation erforderlich ist. Die Korkdämmlehmplatte hingegen hat die Fähigkeit, mehr Wasser zu speichern und dadurch eine bessere Langzeitfeuchteregulation zu gewährleisten, was sie zu einer passenden Wahl für feuchtere Klimazonen oder für Fassadenkonstruktionen macht, die eine hohe Feuchteresistenz benötigen. Daher wurde für die Testfassaden die Entscheidung getroffen, die kapillaraktive Hartschaumplatte (DH3) in der wetterabgewandten Seite in der Fachwerkfassade und die Korkdämmlehmplatte (DH4) in der Wetterseite in der Ziegelfassade zu verbauen.

3.3.3.2 Analyse der Simulationsergebnisse

Die Vielzahl der hygrothermischen Simulationen mit DELPHIN wurden mit einem Python-Skript automatisiert durchgeführt. Nach Abschluss der Simulationen wurde zunächst das Feuchtegehaltsintegral der gesamten Konstruktion und in den einzelnen Schichten bewertet. Für die Basisvarianten wurde geprüft, ob sich ein eingeschwungener Zustand einstellt. Abbildung 15 zeigt, dass sich der Feuchtegehalt der gesamten Konstruktion nicht aufschwingt und die Änderungen zum Vorjahr, abgesehen von der Anfangsfeuchte, immer unter 1,0 % bleiben. Nach diesem Kriterium sind alle Basisvarianten funktionsfähig.

Abbildung 15: Jährliche Veränderung des Feuchtegehaltsintegrals der Basisvarianten: F1 ohne Luftschicht (oben links), F1 mit Luftschicht (oben rechts), F2 ohne Luftschicht (unten links), F2 mit Luftschicht (unten rechts)



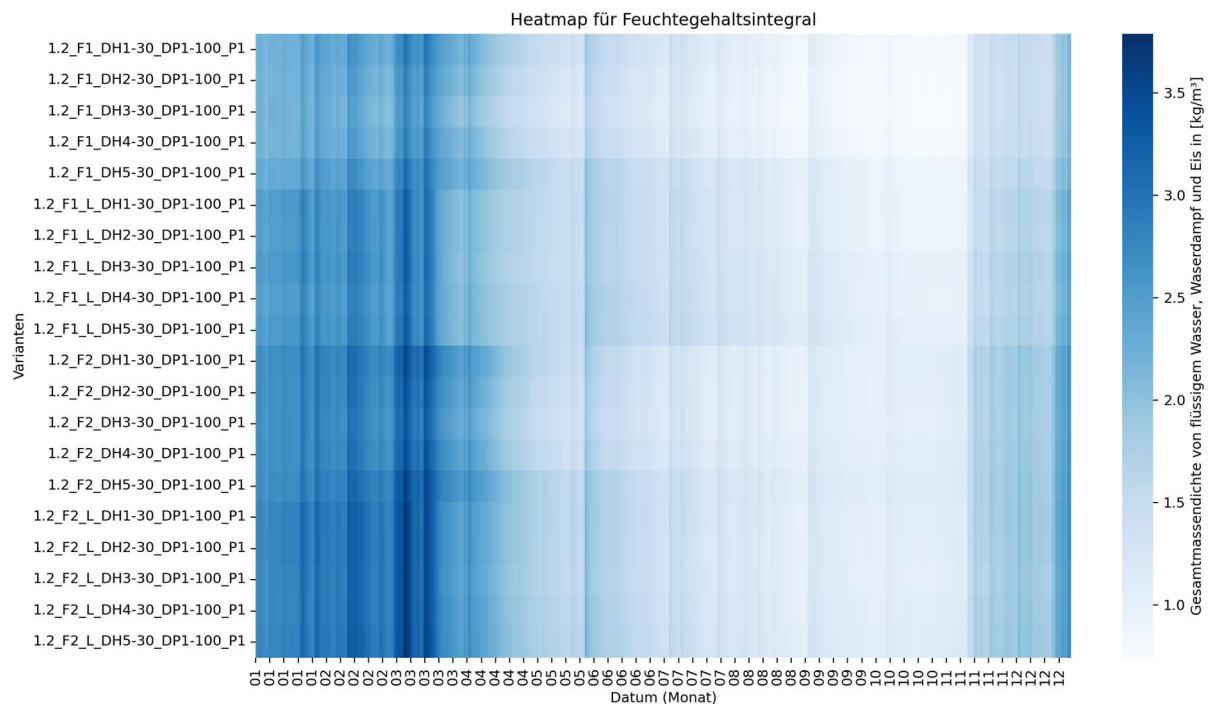
Da im Rahmen der Untersuchungen zahlreiche Simulationen durchgeführt wurden, aber nicht alle Auswertungen für jede Variante im Detail betrachtet werden konnten, war es erforderlich, eine geeignete Methode zur vergleichenden Analyse der Ergebnisse zu finden. Der Vergleich der Ergebnisse aus der hygrothermischen Simulation mittels einer Heatmap bietet eine effiziente Möglichkeit, große Datenmengen übersichtlich darzustellen und zu analysieren. Durch die farbliche Kodierung können Temperatur- und Feuchtezustände schnell erfasst und bewertet werden. Dies erleichtert die Identifikation kritischer Bereiche, in denen beispielsweise Feuchteakkumulationen auftreten oder Grenzwerte für Schimmelbildung und Materialschädigung überschritten werden. Ein wesentlicher Vorteil dieser Darstellungsweise liegt in der Möglichkeit, zeitliche und räumliche Zusammenhänge innerhalb der Konstruktion zu erkennen. Da hygrothermische Prozesse über längere Zeiträume hinweg verlaufen und sich in den verschiedenen Schichten des Bauteils unterschiedlich entwickeln, bietet eine Heatmap eine geeignete Visualisierung dieser Veränderungen. Besonders bei der Untersuchung der relativen Feuchte ermöglicht sie eine schnelle Einschätzung der Feuchtezustände in der Konstruktion und wie lange sie anhalten. Darüber hinaus eignet sich eine Heatmap gut für den Variantenvergleich.

Variantenvergleich des Feuchtegehalts

Die folgenden Grafiken zeigen den Vergleich des Feuchtegehaltsintegrals (Gesamtmasseendichte von flüssigem Wasser, Wasserdampf und Eis in kg/m^3) des letzten Simulationsjahres in der gesamten Konstruktion und in den Schichten DH und DP für alle Basisvarianten.

Die Auswertung des Feuchtegehaltsintegrals in Abbildung 16 verdeutlicht bei allen Varianten eine markante Erhöhung der Feuchtegehalte im März, was typisch ist zum Ende der Winterperiode. Anschließend setzt ein Rücktrocknungsprozess ein, der bis etwa Anfang November anhält. Ab Mitte November ist erneut ein Anstieg der Feuchtebelastung zu beobachten. Insgesamt zeigt sich somit ein zyklischer Verlauf mit winterlicher Durchfeuchtung und sommerlicher Austrocknung, was auf ein grundsätzlich funktionierendes Austrocknungsverhalten aller Konstruktionsvarianten hinweist.

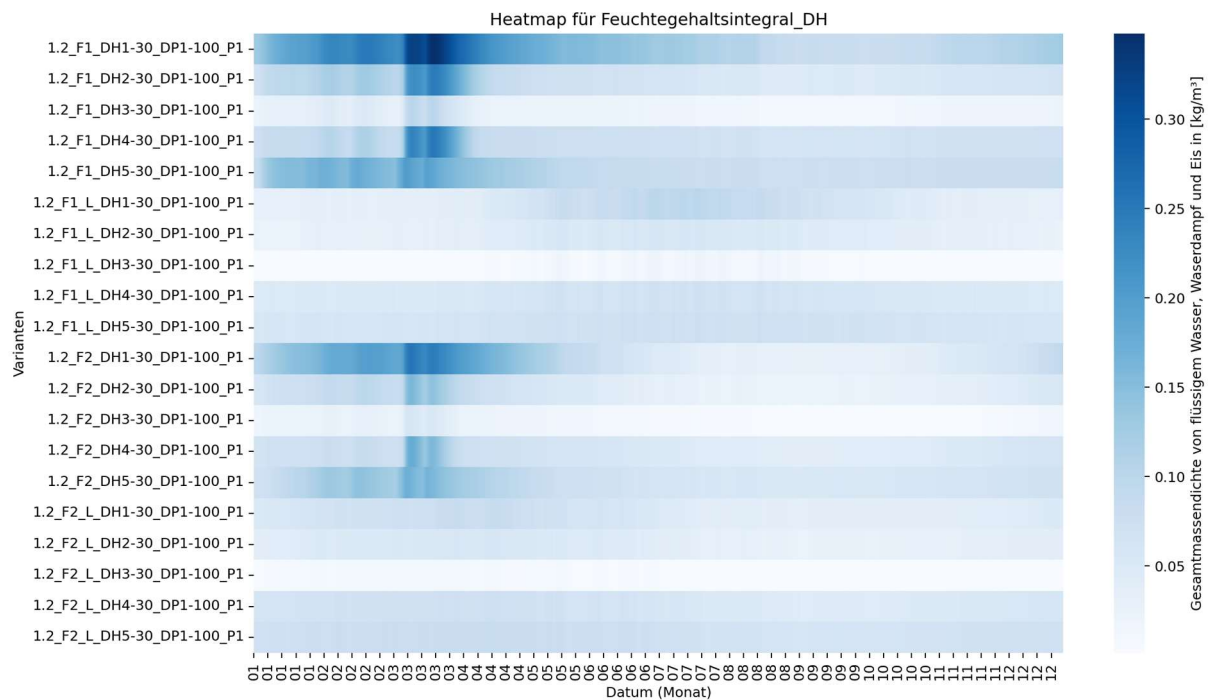
Abbildung 16: Heatmap Feuchtegehaltsintegral der gesamten Konstruktion der Basisvarianten



Feuchtegehalt in der Schicht DH

Der Vergleich der Feuchtegehaltsintegrale innerhalb der hygrischen Dämmschicht (siehe Abbildung 17) offenbart deutliche Unterschiede zwischen den untersuchten Varianten (die Skalierungen in den verschiedenen Grafiken unterscheiden sich, um die Unterschiede zwischen den Varianten besser hervorzuheben). Die höchste Feuchteanreicherung zeigt sich bei der Variante DH1 (Kalziumsilikat), sowohl in der Mauerwerkswand (F1) als auch in der Fachwerkwand (F2), gefolgt von DH5 (Wärmedämmlehm). Diese erhöhten Feuchtegehalte lassen sich auf das hohe Feuchtespeichervermögen dieser Materialien zurückführen, wodurch sie in der Lage sind, erhebliche Feuchtelasten aufzunehmen und im Jahresverlauf sukzessive wieder abzugeben. Im Gegensatz dazu weist die Variante DH3 (iQ-Therm) aufgrund ihrer geringeren Sorptionskapazität den niedrigsten Feuchtegehalt auf, was mit den materialtypischen Eigenschaften übereinstimmt.

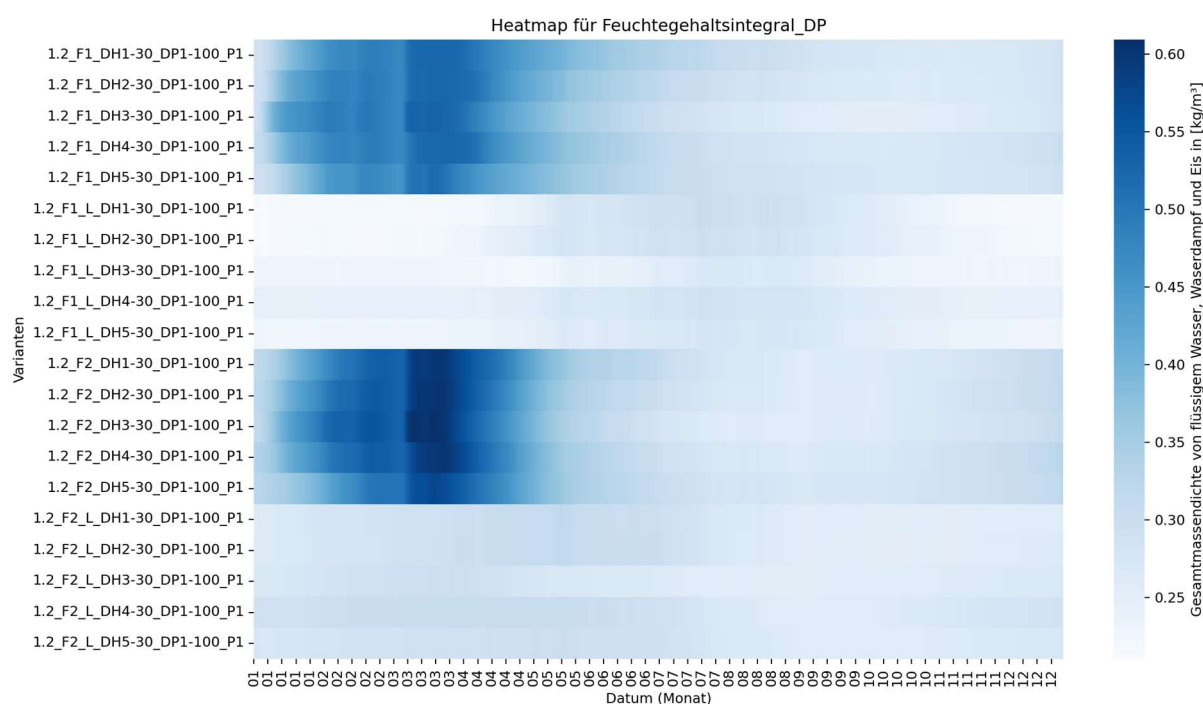
Abbildung 17: Heatmap Feuchtegehaltsintegral der Schicht DH der Basisvarianten



Feuchtegehalt in der Schicht DP

Der Feuchtegehalt in der Holzfaserdämmschicht (DP) (siehe Abbildung 18) liegt insgesamt deutlich höher als in den hygrysch aktiven Dämmstoffen. Das lässt sich unter anderem dadurch erklären, dass Holzfaserdämmplatten bereits ab etwa 30 % relativer Luftfeuchte Feuchtigkeit aufnehmen, wenngleich in geringem Maße. Mit steigender Luftfeuchtigkeit nimmt die Sorptionsfähigkeit deutlich zu, was insbesondere in den Wintermonaten zu einer erhöhten Materialdurchfeuchtung führen kann. Zudem zeigt der Vergleich einen deutlichen Unterschied zwischen Varianten mit und ohne Luftschicht. Konstruktionen ohne Luftschicht weisen zum Ende des Winters eine starke Feuchteanreicherung auf, die sich im Sommer zwar weitgehend zurückbildet, jedoch auf ein insgesamt höheres Feuchteniveau verweist. Varianten mit Luftschicht hingegen bleiben über das gesamte Jahr auf einem vergleichsweise niedrigen Feuchteniveau und zeigen lediglich einen moderaten Anstieg im Sommer. Dies unterstreicht die entfeuchtende Wirkung der Luftschicht und deren Beitrag zur hygrothermischen Entkopplung.

Abbildung 18: Heatmap Feuchtegehaltsintegral der Schicht DP der Basisvarianten



Analyse der relativen Feuchte

Die Darstellung der relativen Feuchte erfolgt für das letzte Simulationsjahr. Als oberer Grenzwert wurde bezogen auf die Empfehlung der WTA-Merkblätter 95 % r. F. festgelegt. In den Heatmap-Grafiken sind die relativen Feuchten in 5 %-Schritten, beginnend ab 45 % r. F. in verschiedenen Farbabstufungen angegeben. Für eine bessere Übersicht sind die Werte über 95 % in orange dargestellt.

Es werden im Folgenden die relevanten Schichten für alle Basisvarianten gezeigt, in denen kritische Feuchtwerte in den Materialzwischen-schichten auftreten können.

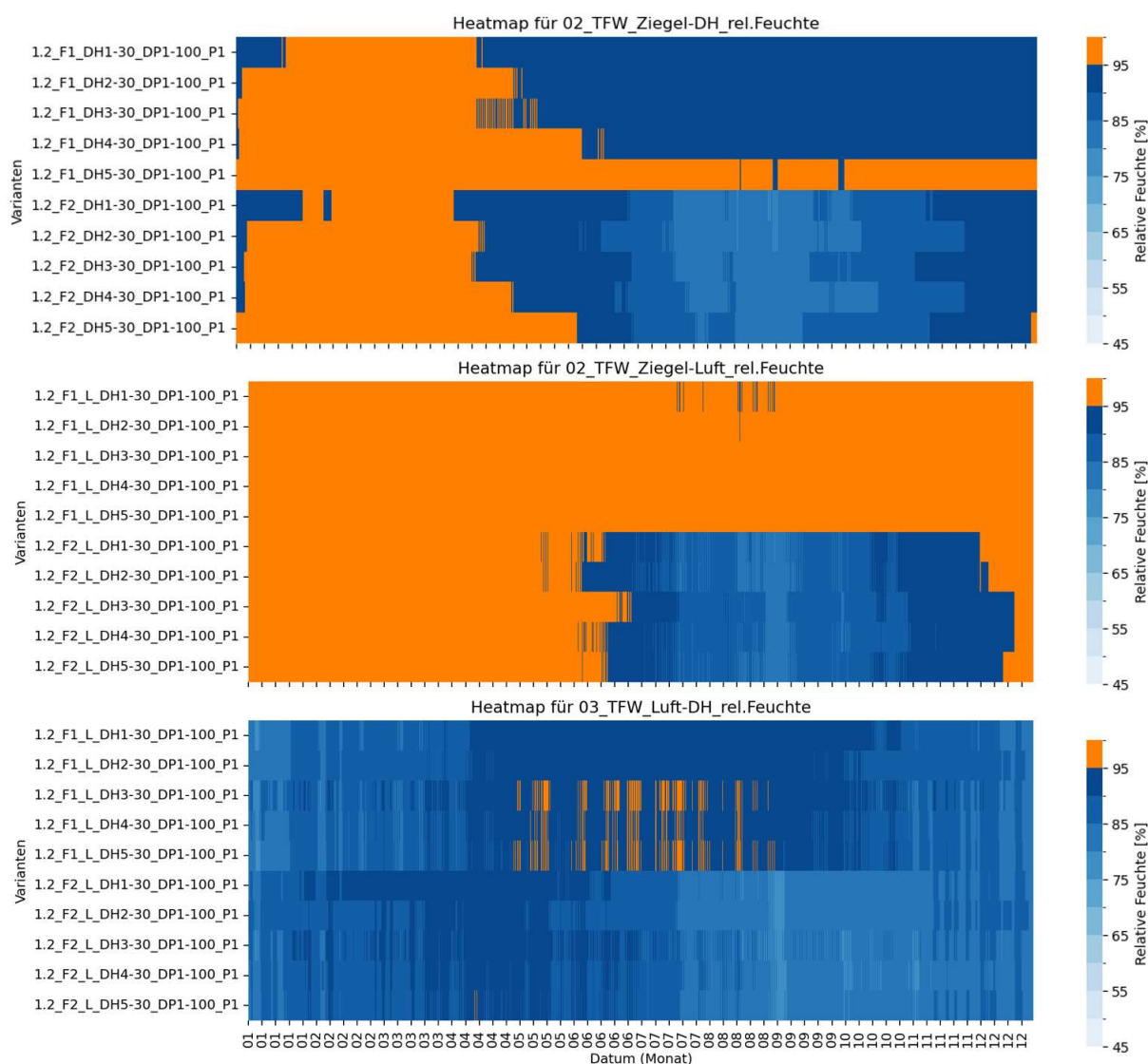
Relative Feuchte in den Schichtgrenzen Ziegel-DH, Ziegel-Luft und Luft-DH

Die Abbildung 19 stellt die Verläufe der relativen Luftfeuchte in den Schichtgrenzen Ziegel-DH, Ziegel-Luft und Luft-DH dar. Deutlich wird dabei zum einen, dass die Varianten der Fachwerkaußenwand (F2) infolge des höheren Holzanteils durchweg niedrigere Feuchtwerte aufweisen als die Mauerwerkswand (F1). Dadurch wird der kritische Schwellenwert von 95 % r. F. seltener überschritten. Dennoch ist bei allen Fachwerksvarianten trotz gelegentlicher Grenzwertüberschreitungen eine gute Rücktrocknung festzustellen.

Zum anderen ergeben sich materialabhängige Unterschiede in der Schichtgrenze Ziegel-DH: Hier treten beim Kalziumsilikat (DH1) die wenigsten Feuchteüberschreitungen auf, während der Wärmedämmlehm (DH5) die höchste Anzahl an kritischen Werten zeigt.

Ein weiteres auffälliges Muster ergibt sich bei den Varianten mit Luftschicht: In den Mauerwerkswänden liegt die relative Feuchte auf der Innenseite der Außenwand ganzjährig oberhalb von 95 % r. F. In der hygrischen Dämmschicht auf der gegenüberliegenden Seite (Innenseite der hygrischen Dämmung zur Außenwand) sinken die Feuchtwerte jedoch deutlich ab. Überschreitungen treten hier nur in kurzen Zeitfenstern auf, was auf die entkoppelnde und feuchtepuffernde Wirkung der Luftschicht hinweist. Zudem zeigt die Fachwerkwand F2 auch in diesen Schichtgrenzen ein besseres Trocknungsverhalten als die Mauerwerkswand F1.

Abbildung 19: Heatmap relative Feuchte der Schichtgrenze Ziegel-DH der Basisvarianten



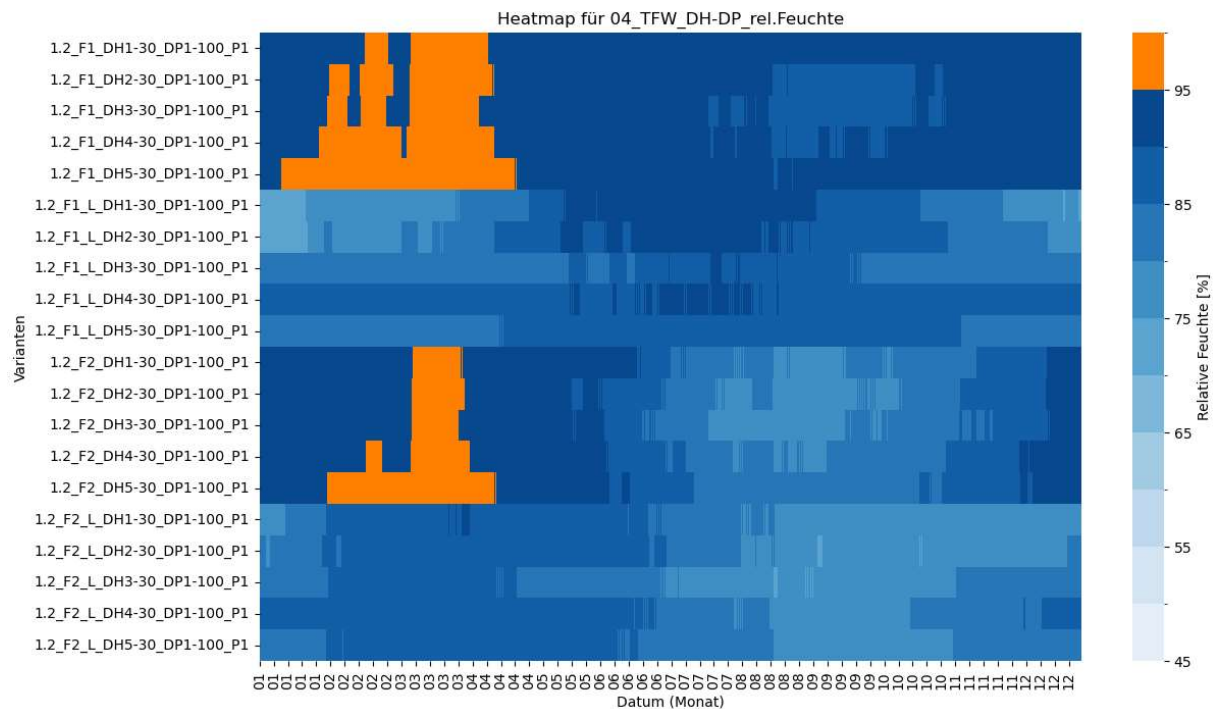
Relative Feuchte in der Schichtgrenze DH-DP

Diese Schichtgrenze wurde als kritisch eingestuft, da hier das hygriisch aktive Material direkt an die Holzfaserdämmung angrenzt.

Die Heatmap der relativen Feuchte in dieser Schichtgrenze (Abbildung 20) verdeutlicht, dass Varianten mit Luftschicht von einer deutlich besseren Rücktrocknung profitieren. In diesen Konstruktionen bleibt die relative Feuchte über das gesamte Jahr hinweg unter dem Grenzwert von 95 %. Damit bestätigt sich der positive Einfluss der Luftschicht, der sich bereits in der Analyse der äußeren Schichten angedeutet hat. Besonders auffällig ist der Unterschied zwischen den hygriischen Materialien. Die Variante 1.2_F1_DH1-30_DP1-100_P1 (Kalziumsilikat) weist die geringsten Überschreitungen auf, während bei 1.2_F1_DH5-30_DP1-100_P1 (Wärmedämmlehm) die meisten Überschreitungen auftreten. Diese Unterschiede lassen sich auf die unterschiedliche Feuchtepufferkapazität und das Sorptionsverhalten der hygriischen Materialien zurückführen.

Zudem zeigt sich erneut, dass die Fachwerkwand-Varianten (F2) im Vergleich zur Mauerwerksausführung (F1) insgesamt niedrigere Feuchten aufweisen und seltener den Schwellenwert überschreiten, was sich bereits in den äußeren Schichten beobachten ließ.

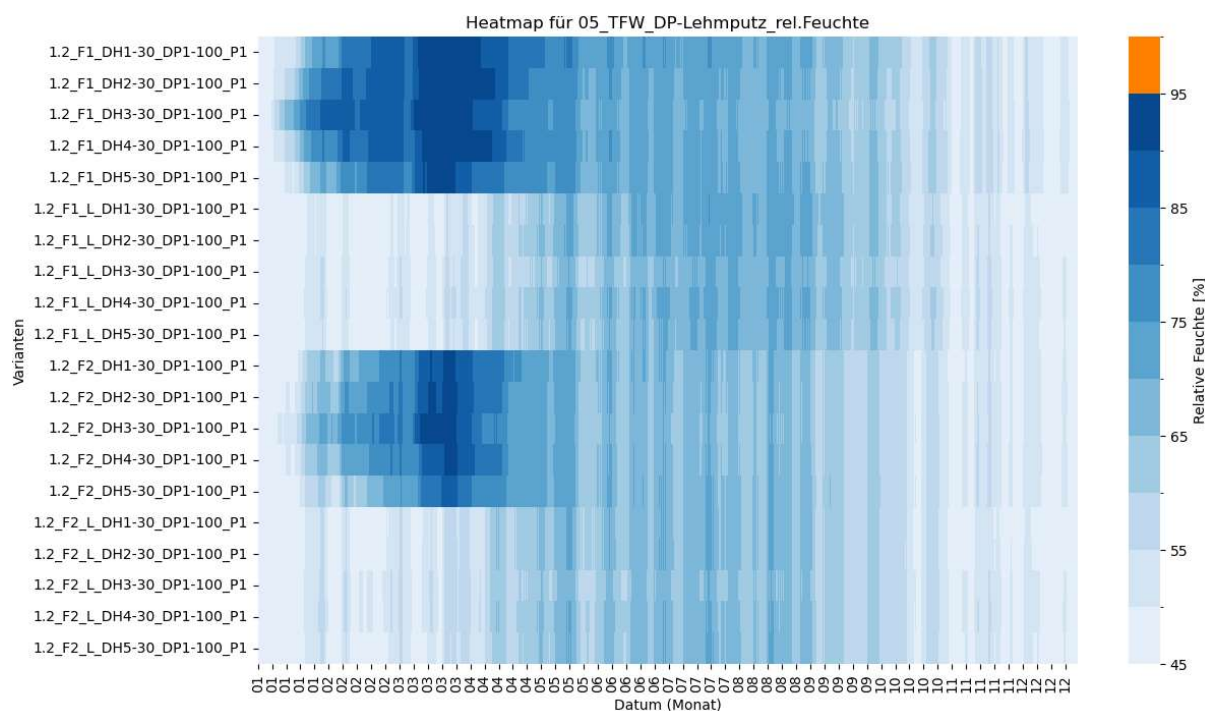
Abbildung 20: Heatmap relative Feuchte der Schichtgrenze DH-DP der Basisvarianten



Relative Feuchte in der Schichtgrenze DP-Lehmputz

In der angrenzenden Schichtgrenze zwischen Holzfaserdämmung und Lehmputz (Abbildung 21) zeigt sich bei allen Varianten ohne Luftschicht ein kurzfristiger Anstieg der relativen Feuchte auf Werte zwischen 90 % und 95 % zum Ende des Winters. Dieser kritische Feuchtebereich wird jedoch nur über einen begrenzten Zeitraum erreicht. Während der Sommermonate ist bei allen Varianten ein leichter Anstieg der relativen Feuchte zu beobachten, insbesondere in den Varianten ohne Luftschicht. Allerdings sinken die Feuchtwerte im weiteren Jahresverlauf wieder deutlich ab, sodass zum Jahresende eine weitgehende Austrocknung der Schichtgrenze erfolgt. Dies deutet darauf hin, dass trotz kurzfristiger Belastungen keine anhaltend kritischen Zustände auftreten.

Abbildung 21: Heatmap relative Feuchte der Schichtgrenze DP-Lehmputz der Basisvarianten



Relative Feuchte einzelner Varianten im Detail

Die im Folgenden dargestellten Ergebnisse zeigen die Auswertung für die Varianten, die auch in den Testfassaden untersucht wurden, im Detail.

DH1 – Kalziumsilikat

Die Darstellung der Abbildung 22 zeigt die relative Feuchte in stündlicher Auflösung im Jahresverlauf des letzten Simulationsjahres für die Varianten mit drei Zentimetern Kalziumsilikat-Dämmung und zehn Zentimetern Holzfaserdämmung jeweils mit und ohne Luftschicht (1.3_F1_DH1-30_DP1-100_P1 und 1.3_F1_L_DH1-30_DP1-100_P1). Auf der y-Achse sind die Schichtgrenzen abgebildet, in denen Temperatur und relative Feuchte ausgewertet werden. Von oben nach unten gelesen wird die relative Feuchte von der Außenseite der Außenwand bis zur Innenseite der Innenwand dargestellt und von links nach rechts der Jahresverlauf in stündlichen Werten. Die Skala reicht von 45 % bis 95 % relative Feuchte.

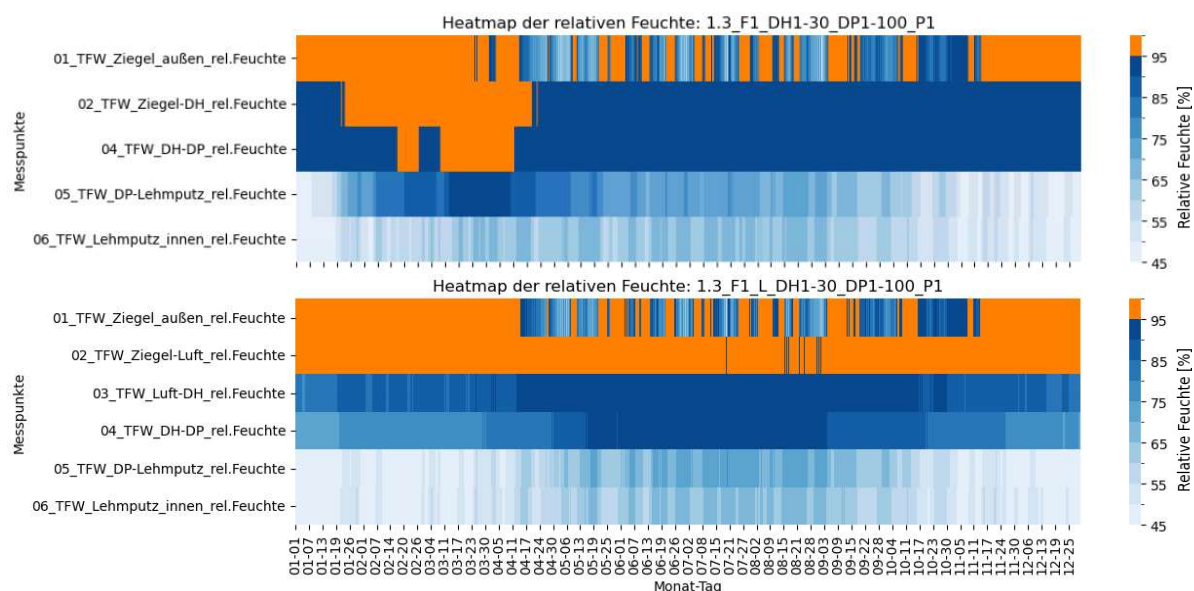
Bei der Variante ohne Luftschicht überschreitet die relative Feuchte in der äußeren Schichtgrenze der Konstruktion insbesondere während der Wintermonate häufig den kritischen Grenzwert von 95 %. Erst im Frühjahr setzt eine Rücktrocknung ein. Insgesamt liegen 59 % der simulierten Werte in diesem Bereich über dem Grenzwert.

In der direkt angrenzenden Schichtgrenze Ziegel–DH (Kalziumsilikat) verbleiben die Feuchtwerte über das gesamte Jahr hinweg auf einem konstant hohen Niveau oberhalb von 90 %, wobei 24 % der Werte den Grenzwert überschreiten. Auch in der kritischen Schichtgrenze DH–DP, dem Übergang zwischen Kalziumsilikat und Holzfaserdämmung, wird durchgängig eine hohe Feuchte (> 90 % r. F.) registriert. Hier liegt die Grenzwertüberschreitung bei 12 %. Im Gegensatz dazu weist die Holzfaserdämmung zur Lehmputzschicht hin lediglich im März kurzfristig erhöhte Feuchtwerte auf, die im weiteren Jahresverlauf deutlich absinken.

Im Vergleich zeigt die Variante mit einer drei Zentimeter breiten Luftschicht eine ähnlich hohe Überschreitung des Grenzwertes in der äußeren Schicht (62 % der Werte). Allerdings bleibt die relative Feuchte in der Schichtgrenze Ziegel–Luft ganzjährig auf einem sehr hohen Niveau über 95 %. Deutlich vorteilhafter ist hingegen das Feuchteverhalten auf der gegenüberliegenden Seite der Luftschicht: In der

Schichtgrenze Luft–DH (Kalziumsilikat) wird keine Grenzwertüberschreitung verzeichnet, und die Feuchtebelastung fällt insgesamt deutlich geringer aus. Besonders markant ist der Unterschied in der Schichtgrenze DH–DP: Hier treten zwar im Sommer temporär hohe Feuchtwerte über 90 % auf, eine Überschreitung des Grenzwertes bleibt jedoch aus.

Abbildung 22: Heatmap relativen Feuchten der Varianten 1.3_F1_DH1-30_DP1-100_P1 und 1.3_F1_L_DH1-30_DP1-100_P1



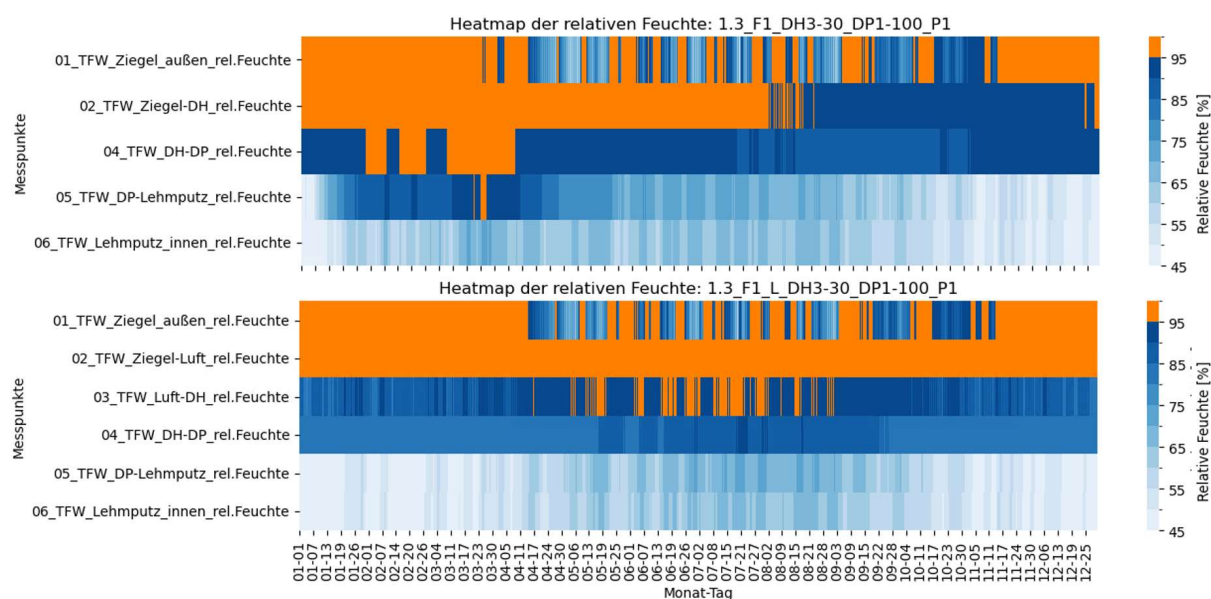
DH3 – iQ-Therm

Die nächste Grafik in Abbildung 23 zeigt die Heatmap der Varianten mit drei Zentimetern iQ-Therm-Dämmung und zehn Zentimetern Holzfaserdämmung jeweils mit und ohne Luftschicht (1.3_F1_DH3-30_DP1-100_P1 und 1.3_F1_L_DH3-30_DP1-100_P1).

Im Vergleich zur Kalziumsilikat-Variante weist iQ-Therm insgesamt eine höhere Anzahl an Grenzwertüberschreitungen auf. Besonders in der Schichtgrenze Ziegel-DH ist der Anteil an Grenzüberschreitungen deutlich höher, als bei Kalziumsilikat. Die Schichtgrenze DH-DP zeigt hingegen einen geringen Anstieg auf 14 % der simulierten Werte, die über dem Grenzwert von 95 % relativer Feuchte liegen. Jedoch kann auch in der Schichtgrenze DP-Lehmputz eine kurzzeitige Überschreitung festgestellt werden.

Die Einführung einer Luftschicht zwischen Ziegel und hygrischer Dämmung zeigt auch bei diesem Material eine über das Jahr hinweg konstante Überschreitung des Grenzwertes in der Schichtgrenze Ziegel-Luft. Jedoch wirkt sich die Luftschicht deutlich positiv auf das Feuchteniveau in der hygrisch aktiven und den angrenzenden Schichten aus. In der Variante mit Luftschicht wird der Grenzwert in der Schichtgrenze DH–DP vollständig eingehalten und die relative Feuchte bleibt über das gesamte Jahr hinweg unterhalb der kritischen Schwelle.

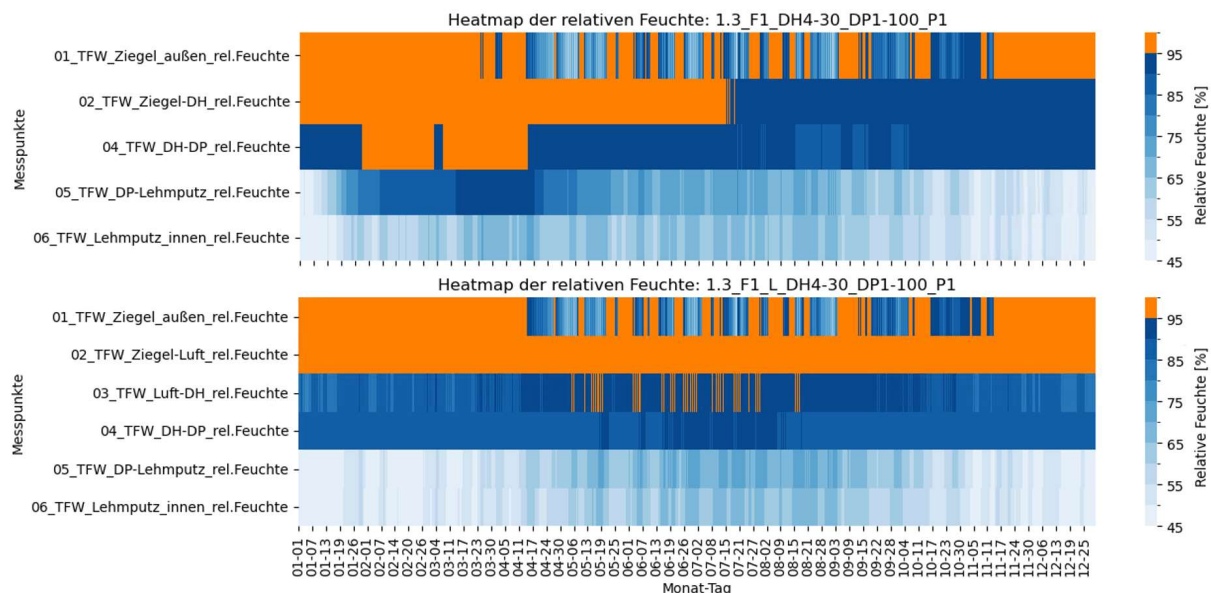
Abbildung 23: Heatmap relativen Feuchten der Varianten 1.3_F1_DH3-30_DP1-100_P1 und 1.3_F1_L_DH3-30_DP1-100_P1



DH4 – Korkdämmlehm

Die nächste Grafik zeigt die Heatmap der Varianten mit drei Zentimetern Kork-Lehm-Dämmung und zehn Zentimetern Holzfaserdämmung jeweils ohne Luftschicht (1.3_F1_DH4-30_DP1-100_P1 und mit Luftschicht 1.3_F1_L_DH4-30_DP1-100_P1).

Abbildung 24: Heatmap relativen Feuchten der Varianten 1.3_F1_DH4-30_DP1-100_P1 und 1.3_F1_L_DH4-30_DP1-100_P1



Im Vergleich zu den Varianten mit Kalziumsilikat und iQ-Therm zeigen bei der Korkdämmlehmplatte die beiden äußeren Schichten ähnlich hohe Anteile an Feuchtwerten über 95 % relativer Feuchte. In der kritischen Schichtgrenze DH–DP (Übergang zwischen Korkdämmlehm und Holzfaserdämmung) werden bei der Variante ohne Luftschicht 21 % der Werte über dem Grenzwert registriert und damit der höchste Anteil im Vergleich der drei untersuchten hygrischen Dämmstoffe. Diese hohe Überschreitungsrate lässt sich durch das ausgeprägte Sorptions- und Feuchtespeicherverhalten des Korkdämmlehms erklären, das

in feuchtebelasteten Bereichen zwar kurzfristig zur Pufferung beiträgt, jedoch gleichzeitig zu einer langanhaltenden Erhöhung der mittleren Feuchten führen kann.

Auch hier zeigt sich jedoch der positive Einfluss einer Luftschicht: In der Variante mit Luftschicht sinkt der Anteil an Grenzwertüberschreitungen in der Schichtgrenze DH–DP auf null. Die relative Feuchte bleibt ganzjährig unterhalb der kritischen Schwelle, wodurch eine deutlich verbesserte hygrische Entkopplung zur äußeren Wandkonstruktion erreicht wird.

3.3.3.3 Vergleichende Bewertung der Konstruktionen

Die Simulationsergebnisse der untersuchten Wandkonstruktionen zeigen deutliche Unterschiede im Feuchteverhalten der einzelnen Schichten und Schichtgrenzen. Konstruktionen ohne Luftschicht weisen eine höhere Feuchtelast der hygrischen Materialien in den Schichtgrenzen auf, insbesondere im Bereich zwischen der Bestandswand und der hygrisch aktiven Dämmschicht. In diesem Bereich liegt die relative Luftfeuchte zum Ende des Winters bei allen Konstruktionsvarianten über 95 % r. F. und fällt bei der Mauerwerkswand (F1) anschließend nicht mehr unter 90 %. Das erhöht insbesondere für das Material iQ-Therm langfristig das Risiko von Feuchteschäden und Materialdegradation, da es im Vergleich zu anderen hygrischen Materialien eine geringere Feuchtespeicherfähigkeit besitzt und somit schneller in kritische Sättigungsbereiche gelangt. Für Kalziumsilikatplatten ist dieser Feuchtezustand vergleichsweise unkritisch, da sie auch bei relativen Feuchten über 95 % noch zusätzliche Feuchte aufnehmen können, ohne dass die Kapillarporen vollständig gesättigt sind. Darüber hinaus verfügen sie über eine hohe spezifische Feuchtespeicherkapazität, was sie besonders geeignet für feuchtebeanspruchte Innendämmanwendungen macht.

Die Konstruktionen mit einer 3 cm breiten Luftschicht zwischen Bestandswand und hygrischer Dämmung reduzieren die Feuchtelast in der Innendämmung erheblich. Insbesondere im Bereich zwischen hygrischer Dämmung und Holzfaserdämmung (DH-DP) wird der Grenzwert nicht mehr überschritten. Gleichzeitig bleibt die Luftschicht selbst jedoch stark feuchtebelastet, was auf Kondensationsrisiken hindeutet.

Im Vergleich zur relativen Feuchte zeigen die Auswertungen des Feuchtegehaltsintegrals in der hygrischen Schicht (DH) eine Austrocknung über das Jahr hinweg. Das weist darauf hin, dass die Konstruktionen insgesamt eine Trocknungstendenz zeigen, da die gespeicherte Feuchtemenge im Material über die Zeit reduziert wird. Dennoch kann eine dauerhaft hohe relative Feuchte in bestimmten Schichtgrenzen darauf hindeuten, dass dort lokale Feuchtekonzentrationen bestehen, die das Material an seiner Sorptionsgrenze halten. Besonders in hygroskopischen oder kapillaraktiven Materialien kann dies auftreten, ohne dass es zu einer erheblichen Wasseranreicherung kommt. Kritisch wird es, wenn die relative Feuchte über längere Zeiträume 95 % r. F. überschreitet und nicht mehr rücktrocknet, da dies das Risiko für Materialschädigung erhöht, selbst wenn das Gesamtsystem langfristig austrocknet.

Die Ergebnisse zeigen, dass eine Innendämmung mit hygrischer Dämmung und Holzfaser grundsätzlich funktionieren kann, jedoch stark von der konstruktiven Ausbildung abhängt. Im Vergleich der hygrischen Materialien sticht der Wärmedämmlehm mit wesentlich längerer Überschreitung von Werten über 95 % r. F. heraus, insbesondere bei der Mauerwerkswand ohne Luftschicht. Der Vergleich der Wandkonstruktionen zeigt eine bessere Feuchteregulierung bei der Fachwerkswand mit insgesamt niedrigeren Feuchtwerten als die Mauerwerkswand. Die Einführung einer Luftschicht zwischen der Bestandswand und dem Kalziumsilikat kann die Feuchteproblematik in der Dämmung reduzieren, birgt jedoch das Risiko von Feuchteakkumulation in der Luftschicht. Eine kontrollierte Hinterlüftung könnte hier eine sinnvolle Optimierung darstellen.

3.3.4 Schichtkombinationen

Nachdem im Rahmen der Simulationsanalysen der Basisvarianten die Materialauswahl für den Testfassadenprüfstand festgelegt wurde, schlossen sich weiterführende Untersuchungen an, die sich auf

die Kombination unterschiedlicher Schichtstärken konzentrieren. Grundlage bildeten dabei die fünf in den Basisvarianten ausgewählten hygrischen Materialien, die jeweils mit Holzfaserdämmung kombiniert wurden. Um die Anzahl an Simulationen einzugrenzen, erfolgten die Simulationen mit der Bestandswand F1 (Mauerwerkswand), da diese sich als weniger feuchteregulierend gezeigt hat, als die Fachwerkswand. Dadurch können kritische Feuchtesituationen besser dargestellt werden.

Das Ziel dieser Simulationsanalysen war es, gängige Dämmstärken der ausgewählten Materialien in verschiedenen Kombinationen zu untersuchen und miteinander zu vergleichen, um die optimalen Kombinationen zu ermitteln. Die für diese Analyse untersuchten Varianten wurden in einem Bauteilkatalog erfasst und bewertet. Dieser liegt als Anlage dem Bericht bei. Für die hygrothermischen Simulationen der Schichtkombinationen wurden folgende Dämmstärken ausgewählt:

Tabelle 8: Übersicht der Dämmstärken der analysierten Schichtkombinationen

Material	Dämmstärke in mm
Kalziumsilikat (DH1)	30, 40, 80
Mineralschaum (DH2)	30, 40, 80
PUR-Hartschaumplatte (DH3)	30, 40, 80
Korkdämmlehmplatte (DH4)	30, 40, 80
Wärmedämmlehm (DH5)	30, 40, 80
Holzfaserdämmplatte (DP1)	40, 60, 80, 100
Lehmputz (P1)	15
Luft (L)	30

Aus diesen Schichtdicken ergeben sich bei Kombination aller hygrischer Materialien mit den Schichtdicken der Holzfaserdämmung und jeweils mit und ohne Luftschicht insgesamt 158 verschiedene Varianten. Die Bezeichnungsstruktur ist aufgebaut wie die der Basisvarianten. Die Mauerwerkswand mit 30 mm Kalziumsilikatdämmung und 100 mm Holzfaserdämmung wird demnach wie folgt bezeichnet: F1_DH1-30_DP1-100_P1.

Die Tabelle 9 enthält eine Übersicht über alle untersuchten Schichtkombinationen. Zusätzlich zu den mehrschichtigen Varianten wurden auch die einzelnen Dämmmaterialien als einschichtige Dämmung untersucht, um eine Vergleichbarkeit zu den Schichtkombinationen zu haben.

Tabelle 9: Variantenübersicht der Schichtkombinationen

DH1 - Kalziumsilikat	DH2 – Mineralschaum (Pura dur und Pura)	DH3 – iQ-Therm	DH4 - Korkdämmlehmplatten	DH5 – Wärmedämmlehm	DH	DP
1 DH1 30 DP 40	1 DH2 30 DP 40	1 DH3 30 DP 40	1 DH4 30 DP 40	1 DH5 30 DP 40	1 DH1 30	1 DP 40
2 DH1 30 DP 60	2 DH2 30 DP 60	2 DH3 30 DP 60	2 DH4 30 DP 60	2 DH5 30 DP 60	2 DH1 40	2 DP 60
3 DH1 30 DP 80	3 DH2 30 DP 80	3 DH3 30 DP 80	3 DH4 30 DP 80	3 DH5 30 DP 80	3 DH1 80	3 DP 80
4 DH2 30 DP 100	4 DH3 30 DP 100	4 DH4 30 DP 100	4 DH5 30 DP 100	4 DH6 30 DP 100	4 DH2 30	4 DP 100
5 DH1 40 DP 40	5 DH2 40 DP 40	5 DH3 40 DP 40	5 DH4 40 DP 40	5 DH5 40 DP 40	5 DH2 40	5 DP 40 L
6 DH1 40 DP 60	6 DH2 40 DP 60	6 DH3 40 DP 60	6 DH4 40 DP 60	6 DH5 40 DP 60	6 DH2 80	6 DP 60 L
7 DH1 40 DP 80	7 DH2 40 DP 80	7 DH3 40 DP 80	7 DH4 40 DP 80	7 DH5 40 DP 80	7 DH3 30	7 DP 80 L
8 DH2 40 DP 100	8 DH3 40 DP 100	8 DH4 40 DP 100	8 DH5 40 DP 100	8 DH6 40 DP 100	8 DH3 40	8 DP 100 L
9 DH1 80 DP 40	9 DH2 80 DP 40	9 DH3 80 DP 40	9 DH4 80 DP 40	9 DH5 80 DP 40	9 DH3 80	
10 DH1 80 DP 60	10 DH2 80 DP 60	10 DH3 80 DP 60	10 DH4 80 DP 60	10 DH5 80 DP 60	10 DH4 30	
11 DH1 80 DP 80	11 DH2 80 DP 80	11 DH3 80 DP 80	11 DH4 80 DP 80	11 DH5 80 DP 80	11 DH4 40	
12 DH2 80 DP 100	12 DH3 80 DP 100	12 DH4 80 DP 100	12 DH5 80 DP 100	12 DH6 80 DP 100	12 DH4 80	
13 DH1 30 DP 40 L	13 DH2 30 DP 40 L	13 DH3 30 DP 40 L	13 DH4 30 DP 40 L	13 DH5 30 DP 40 L	13 DH5 30	
14 DH1 30 DP 60 L	14 DH2 30 DP 60 L	14 DH3 30 DP 60 L	14 DH4 30 DP 60 L	14 DH5 30 DP 60 L	14 DH5 40	
15 DH1 30 DP 80 L	15 DH2 30 DP 80 L	15 DH3 30 DP 80 L	15 DH4 30 DP 80 L	15 DH5 30 DP 80 L	15 DH5 80	
16 DH1 30 DP 100 L	16 DH3 30 DP 100 L	16 DH3 30 DP 100 L	16 DH4 30 DP 100 L	16 DH5 30 DP 100 L	16 DH1 30 L	
17 DH1 40 DP 40 L	17 DH2 40 DP 40 L	17 DH3 40 DP 40 L	17 DH4 40 DP 40 L	17 DH5 40 DP 40 L	17 DH1 40 L	
18 DH1 40 DP 60 L	18 DH2 40 DP 60 L	18 DH3 40 DP 60 L	18 DH4 40 DP 60 L	18 DH5 40 DP 60 L	18 DH1 80 L	
19 DH1 40 DP 80 L	19 DH2 40 DP 80 L	19 DH3 40 DP 80 L	19 DH4 40 DP 80 L	19 DH5 40 DP 80 L	19 DH2 30 L	
20 DH2 40 DP 100 L	20 DH3 40 DP 100 L	20 DH4 40 DP 80 L	20 DH5 40 DP 100 L	20 DH6 40 DP 100 L	20 DH2 40 L	
21 DH1 80 DP 40 L	21 DH2 80 DP 40 L	21 DH3 80 DP 40 L	21 DH4 80 DP 40 L	21 DH5 80 DP 40 L	21 DH2 80 L	
22 DH1 80 DP 60 L	22 DH2 80 DP 60 L	22 DH3 80 DP 60 L	22 DH4 80 DP 60 L	22 DH5 80 DP 60 L	22 DH3 30 L	
23 DH1 80 DP 80 L	23 DH2 80 DP 80 L	23 DH3 80 DP 80 L	23 DH4 80 DP 80 L	23 DH5 80 DP 80 L	23 DH3 40 L	
24 DH2 80 DP 100 L	24 DH3 80 DP 100 L	24 DH4 80 DP 100 L	24 DH5 80 DP 100 L	24 DH6 80 DP 100 L	24 DH3 80 L	
					25 DH4 30 L	
					26 DH4 40 L	
					27 DH4 80 L	
					28 DH5 30 L	
					29 DH5 40 L	
					30 DH5 80 L	

Summe 158

Alle Randbedingungen für die hygrothermische Simulation entsprechen denen der Basisvarianten, um eine konsistente Vergleichbarkeit zu gewährleisten. Aufgrund der Vielzahl an Simulationen konzentrieren sich die Auswertungen auf den Vergleich des Feuchtegehaltsintegrals sowohl für die gesamte Konstruktion als auch für die einzelnen Schichten sowie auf die relative Feuchte an den definierten Messpunkten in den Schichtgrenzen. Dadurch können Varianten identifiziert und ausgeschlossen werden, die kritische Feuchteniveaus aufweisen. Besondere Aufmerksamkeit gilt der Schichtgrenze zwischen der Holzfaserdämmung und dem hygrisch aktiven Material, da hier überprüft werden kann, ob es zu einer erhöhten Feuchteaufnahme in der Holzfaserdämmung kommt. Eine Durchfeuchtung dieser Schicht könnte die Wärmedämmeigenschaften negativ beeinflussen und langfristig die Materialstabilität beeinträchtigen. In einem weiteren Schritt werden zusätzlich die U-Werte und Kosten der funktionsfähigen Varianten analysiert, um wirtschaftlich sinnvolle und gleichzeitig gut dämmende Lösungen auszuwählen.

3.3.4.1 Analyse der Simulationsergebnisse

Insgesamt wurden bei dieser Materialanalyse 158 Varianten untersucht und dabei über 2000 Ausgabedateien generiert. Da es bei den Schichtkombinationen vor allem um die Kombination verschiedener Dämmstärken geht, konzentrieren sich die Analysen in diesem Kapitel auf die der Kalziumsilikat-Varianten. Die Grafiken der anderen vier Materialien werden entweder zusammengefasst oder in den Anlagen dargestellt.

Variantenvergleich des Feuchtegehalts

Zunächst wurden die Simulationsergebnisse des Feuchtegehaltsintegrals analysiert, um zu überprüfen, ob für alle Schichtkombinationen ein eingeschwungener Zustand eintritt. Abbildung 25 zeigt das Feuchtegehaltsintegral der gesamten Konstruktion für die Kalziumsilikat-Varianten DH1 ohne Luftschicht (links) und DH1 mit Luftschicht (rechts). Das Diagramm zeigt, dass sich der Feuchtegehalt in

dem betrachteten Zeitraum nicht aufschwingt. Auch die Schichtkombinationen der anderen Materialien schwingen sich nicht auf, wie die Abbildung 26 zeigt.

Abbildung 25: Feuchtegehaltsintegral der gesamten Konstruktion aller Schichtkombinationen der DH1-Varianten

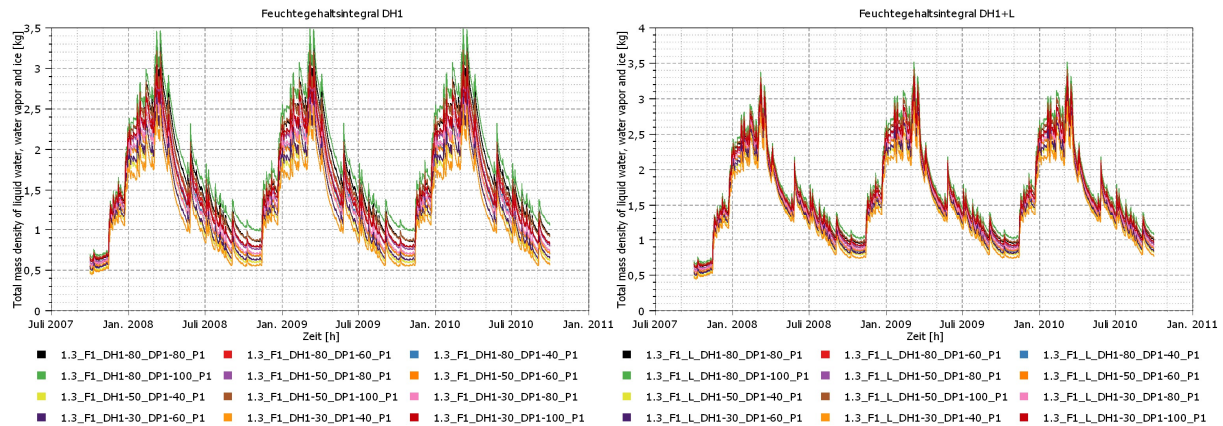
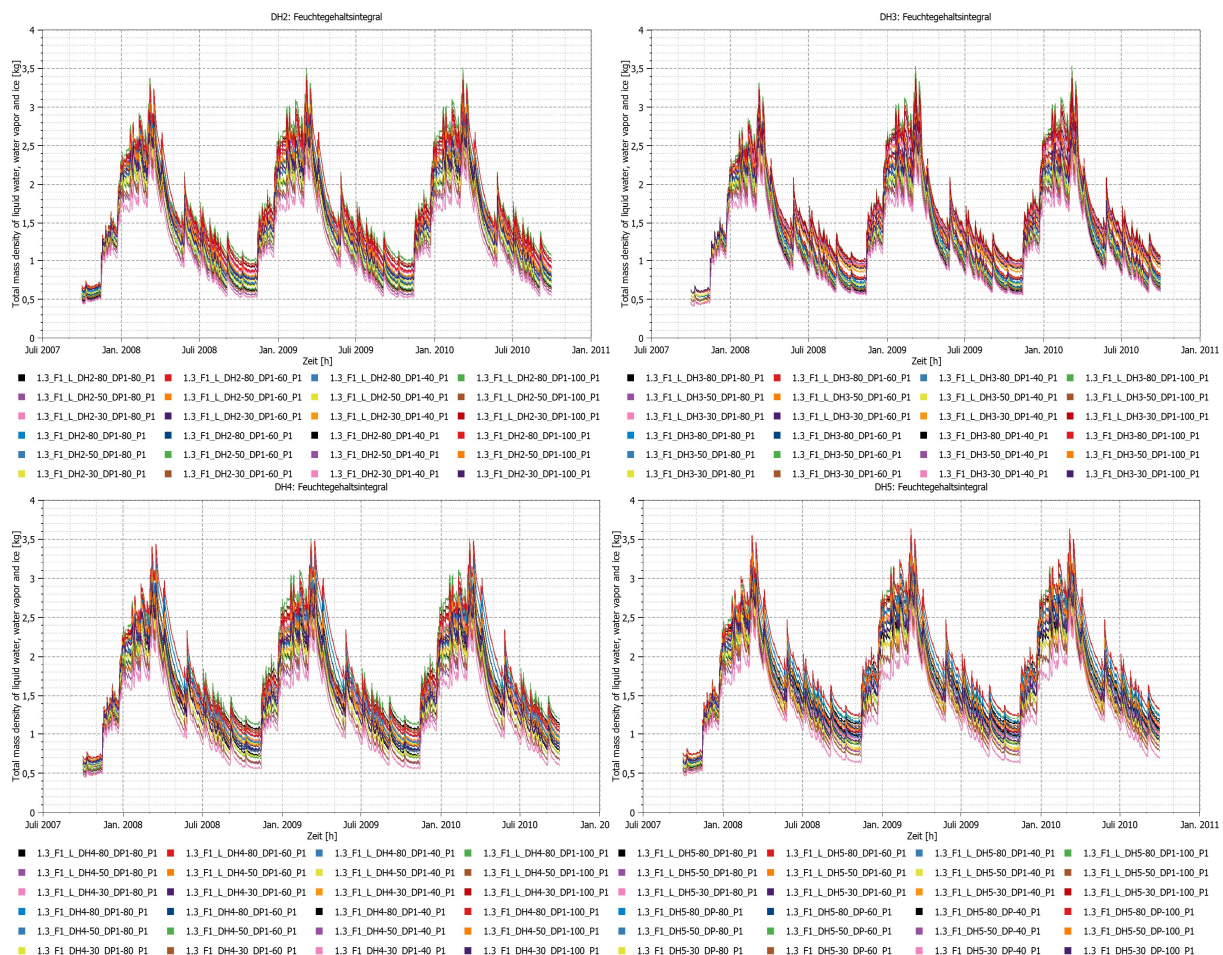


Abbildung 26: Feuchtegehaltsintegral der gesamten Konstruktion für die untersuchten Materialien DH2 (links oben), DH3 (rechts oben), DH4 (links unten) und DH5 (rechts unten)

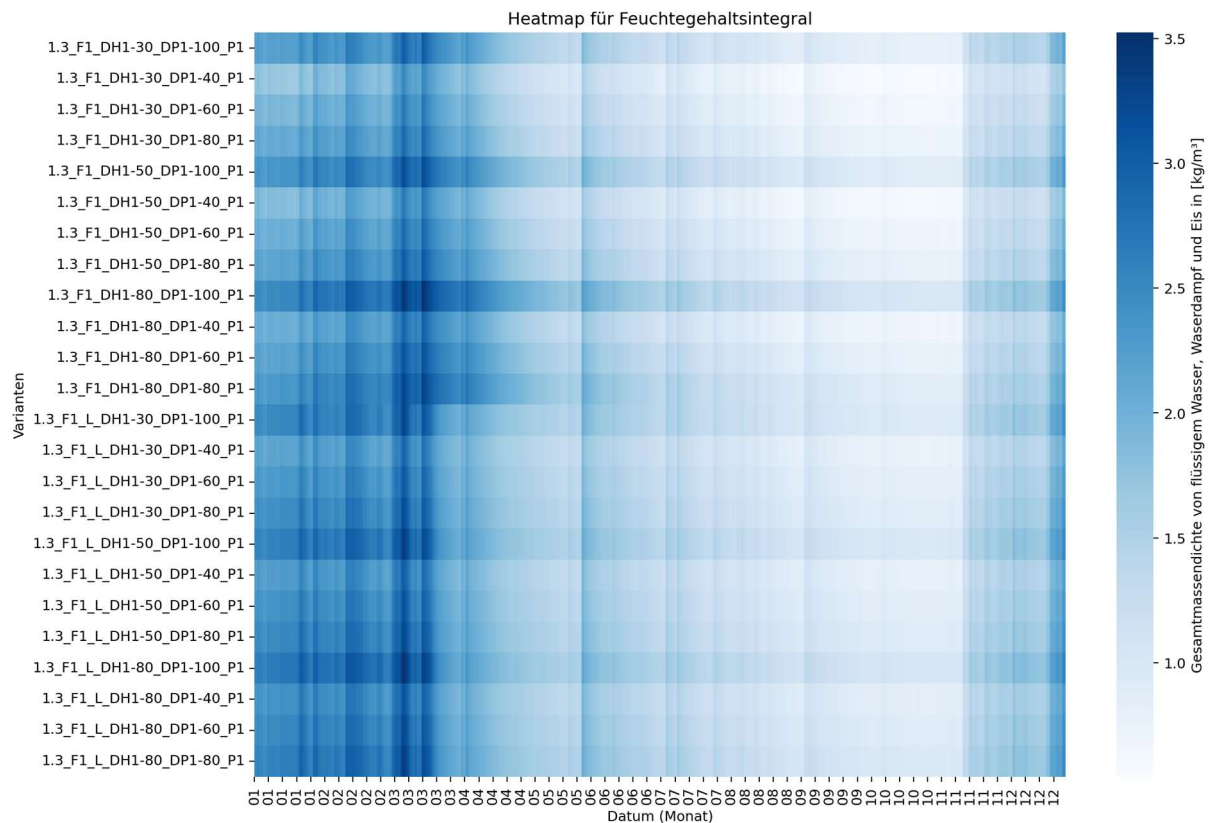


Die Heatmap des Feuchtegehaltsintegrals der gesamten Konstruktion (Abbildung 27) zeigt alle untersuchten Schichtkombinationen mit der hygrischen Dämmschicht DH1. Alle Varianten zeigen einen

charakteristischen Feuchteverlauf mit einem saisonalen Maximum im März und einem Minimum im Zeitraum zwischen Juli und Anfang November. Ab Mitte November steigt der Feuchtegehalt erneut an und erreicht zum Ende des Winters wieder höhere Werte.

Ein systematischer Vergleich der Varianten verdeutlicht, dass mit zunehmender Dicke sowohl der Holzfaserdämmung als auch der hygrischen Dämmschicht ein leichter Anstieg des gesamten Feuchtegehalts über das Jahr zu beobachten ist. Die höchsten Feuchtegehalte treten in den Varianten mit 100 mm Holzfaserdämmung auf, unabhängig von der Dicke der hygrischen Dämmschicht.

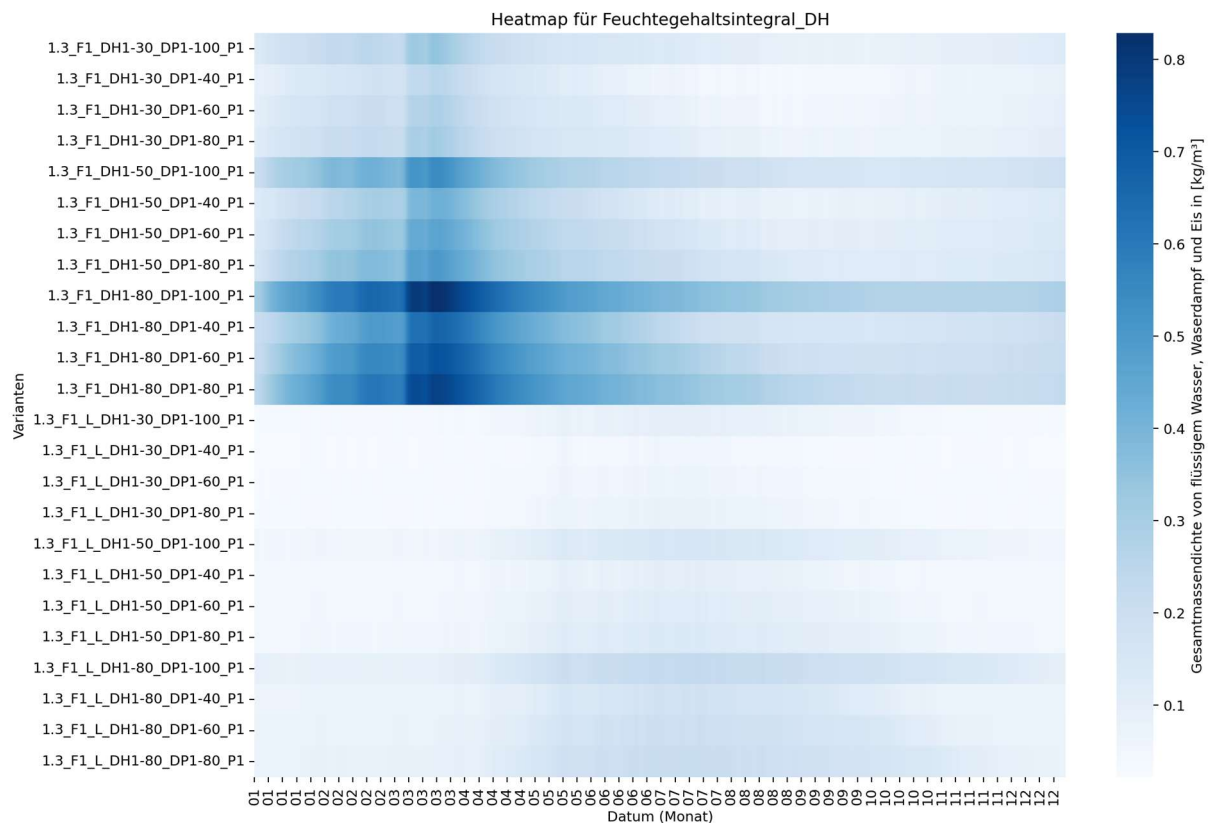
Abbildung 27: Heatmap Feuchtegehaltsintegral der gesamten Konstruktion der Schichtkombinationen für Kalziumsilikat (DH1)



Feuchtegehalt in der Schicht DH

Die Analyse der Feuchteverteilung in den verschiedenen Dämmvarianten der hygrisch aktiven Schicht DH (Abbildung 28) zeigt, dass bei steigender Schichtdicke der Kalziumsilikatdämmung auch ihr Feuchtegehalt in kg/m^3 zunimmt. Das ist darauf zurückzuführen, dass hygrisch aktive Materialien mit größerem Volumen auch mehr Feuchtigkeit aufnehmen und speichern können. Gleichzeitig bedeutet es jedoch, dass sich größere Wassermengen im Material anreichern können. Bei zunehmender Dicke kann es schwieriger werden, dass Feuchtigkeit nach innen oder außen abgeführt wird, insbesondere wenn der Feuchtetransport durch Diffusion dominiert wird und von einer Seite zusätzlich eine Holzfaserdämmung vorhanden ist. Das kann die Austrocknung verlangsamen und das Risiko langfristig erhöhter Feuchteniveaus steigern. Die Heatmap macht zudem deutlich, dass die Luftschicht in allen Varianten als Pufferschicht wirkt: Sie reduziert die Feuchtebelastung der angrenzenden Kalziumsilikatdämmung spürbar und trägt damit zu einem insgesamt günstigeren Feuchteverhalten bei.

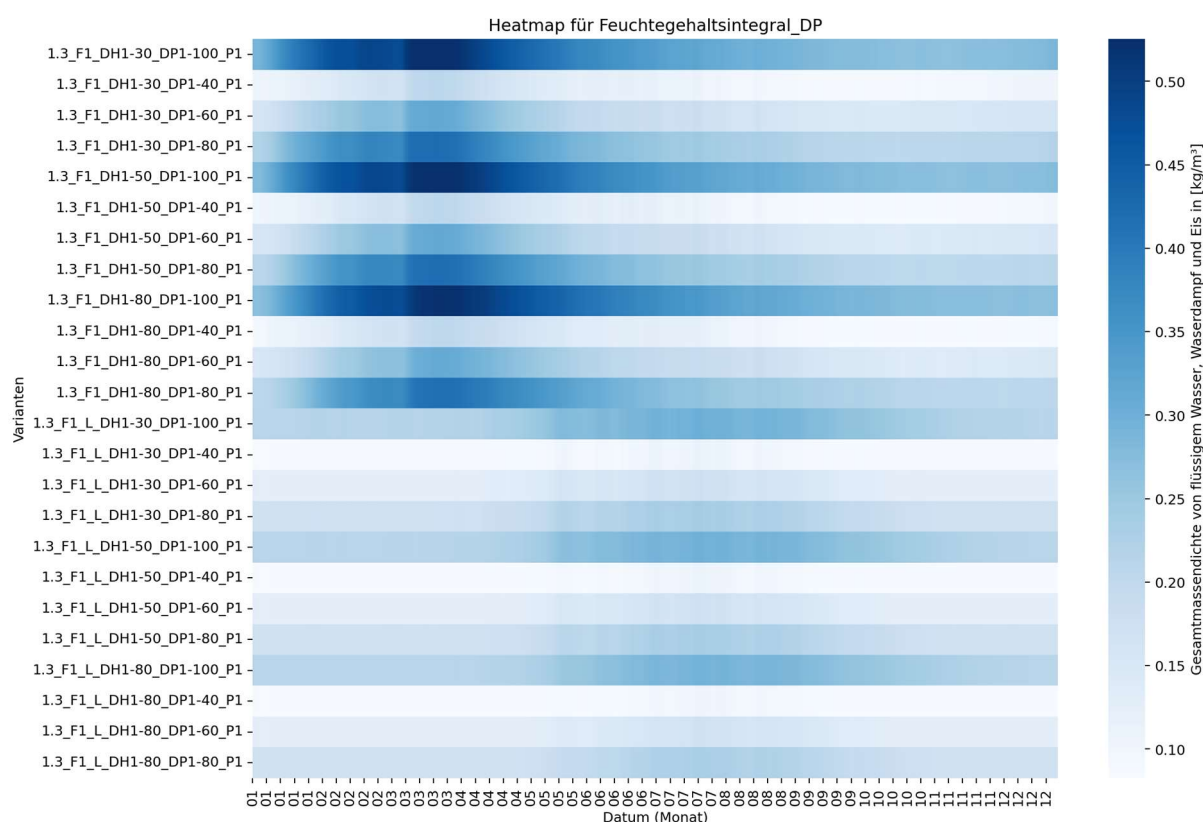
Abbildung 28: Heatmap Feuchtegehaltsintegral der Schicht DH der Schichtkombinationen für Kalziumsilikat (DH1)



Feuchtegehalt in der Schicht DP

Die Analyse des Feuchtegehalts der Holzfaserdämmung (DP) in Abbildung 29 zeigt, dass der Feuchtegehalt mit zunehmender Dicke der Holzfaserdämmung ansteigt, während eine Erhöhung der Kalziumsilikat-Schichtdicke nur einen geringen Einfluss darauf hat. Diese Beobachtung lässt sich durch die unterschiedlichen hygrischen Eigenschaften der beiden Materialien erklären. Kalziumsilikat ist hoch kapillaraktiv und kann Feuchtigkeit schnell aufnehmen und wieder abgeben. Holzfaserdämmung hingegen weist eine geringere kapillare Leitfähigkeit auf und speichert Feuchtigkeit über einen längeren Zeitraum. Mit zunehmender Dicke der Holzfaserdämmung steigt die Gesamtmenge an speicherbarer Feuchtigkeit an, während die Rücktrocknung langsamer erfolgt. Dadurch sammelt sich in dickeren Holzfaserdämmschichten mehr Feuchtigkeit an, was zu höheren Feuchtegehalten führt.

Abbildung 29: Heatmap Feuchtegehaltsintegral der Schicht DP in der Schichtkombination mit Kalziumsilikat (DH1)



Analyse der relativen Feuchte

Die Darstellung der relativen Feuchte erfolgt für das letzte Simulationsjahr. Als oberer Grenzwert wurde bezogen auf die Empfehlung der WTA-Merkblätter 95 % r. F. festgelegt. In den Heatmap-Grafiken sind die relativen Feuchten in 5 %-Schritten, beginnend ab 45 % r. F. in verschiedenen Farbabstufungen angegeben. Für eine bessere Übersicht sind die Werte über 95 % in orange dargestellt.

Die Abbildung 30 zeigt die zeitliche Entwicklung der relativen Feuchte in der Schichtgrenze zwischen Ziegelmauerwerk und hygrysch aktiver Dämmschicht (Ziegel-DH) für verschiedene Schichtdicken der Kalziumsilikat-Varianten. Auffällig ist, dass die Varianten mit einer geringeren Schichtdicke der Holzfaserdämmung (DP1-40) im Vergleich zu den dickeren Varianten (DP1-60, DP1-80, DP1-100) eine deutlich kürzere Dauer der hohen Feuchtebelastung über 95 % aufweisen. Besonders hervorzuheben ist die Variante mit der Kombination aus 30 mm Kalziumsilikat (DH1-30) und 40 mm Holzfaserdämmung (DP1-40). Sie ist die einzige Variante, bei der die relative Feuchte im Jahresverlauf zeitweise unter 90 % absinkt. In allen anderen Varianten bleibt die relative Feuchte in dieser Schichtgrenze dauerhaft über 90 % relative Feuchte.

Die Abbildung 31 zeigt die relative Feuchte in der Schichtgrenze Ziegel-DH der anderen vier Materialien. Es ist zu erkennen, dass im Vergleich zu Kalziumsilikat die Überschreitungen von 95 % r. F. deutlich häufiger auftreten, besonders bei DH5 (Wärmedämmlehm). Auch das Material iQ-Therm (DH3) zeigt in allen Schichtkombinationen sehr hohe Werte der relativen Feuchte. Die Materialien DH2 (Mineralschaum) und DH4 (Korkdämmlehmplatte) weisen ähnlich Werte auf, wobei DH2 etwas besser abschneidet. Der Einfluss der Schichtdicke der hygrysch Dämmung ist bei Kalziumsilikat (DH1) am geringsten und bei der Korkdämmlehmplatte (DH4) am deutlichsten. Die Schichtdicke der Holzfaserdämmung hat ebenfalls einen Einfluss auf die relative Feuchte. Hier sind dünnere Dämmschichten vorteilhafter.

Abbildung 30: Heatmap relative Feuchte der Schichtgrenze Ziegel-DH der Schichtkombinationen für Kalziumsilikat (DH1)

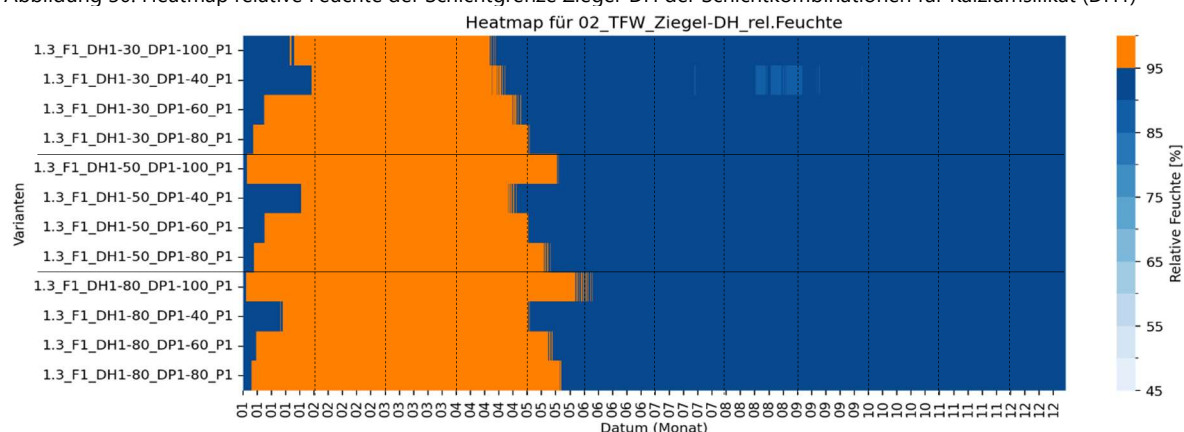
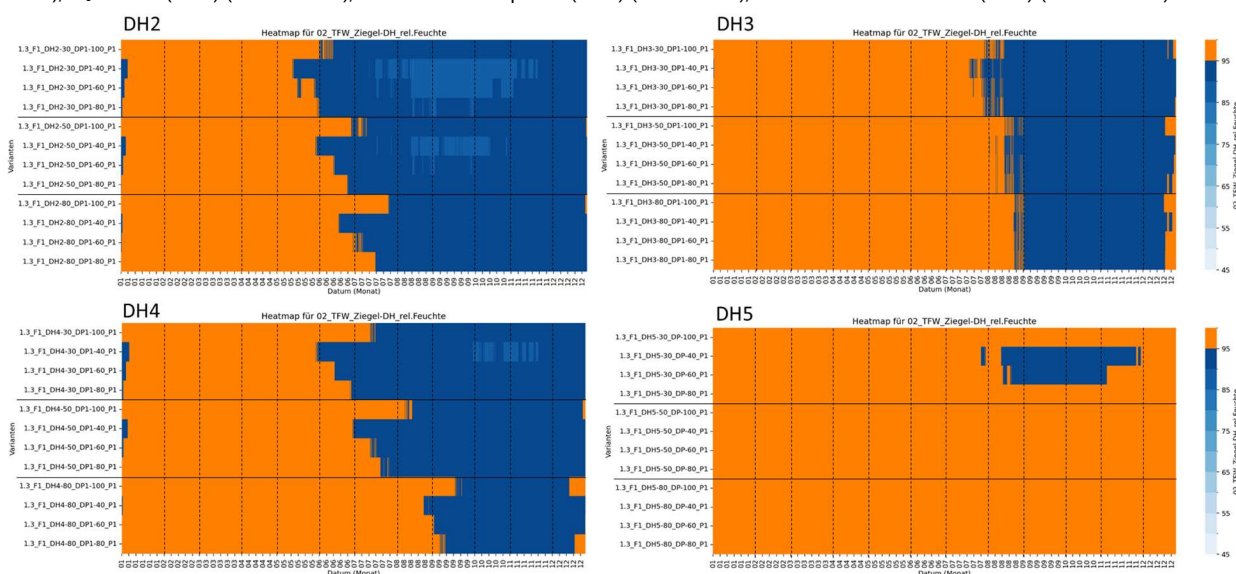
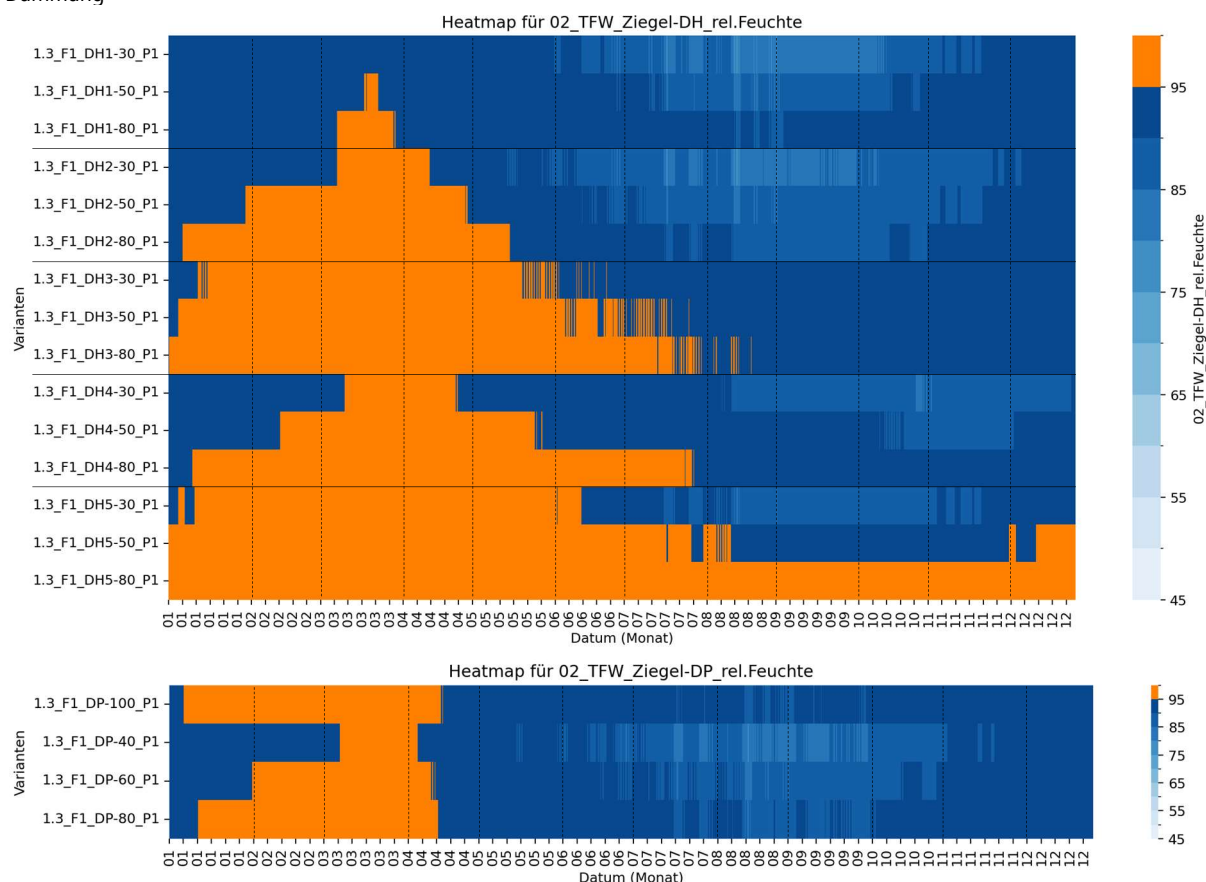


Abbildung 31: Heatmap relative Feuchte der Schichtgrenze Ziegel-DH der Schichtkombinationen für Mineralschaum (DH2) (links oben), iQ-Therm (DH3) (rechts oben), Korkdämmlehmplatte (DH4) (links unten), und Wärmedämmlehm (DH5) (rechts unten)



Im Vergleich zu den Schichtkombinationen zeigen auch die einschichtigen Varianten in Abbildung 32 teilweise häufige Überschreitungen des Grenzwertes in der analysierten Schichtgrenze, besonders das Material DH5. Die einschichtigen Varianten unterscheiden sich deutlich stärker hinsichtlich der Grenzwertüberschreitung bei dicker werdender Dämmstärke. Auch die einschichtige Holzfaserdämmung weist deutliche Unterschiede zwischen den Schichtstärken auf und zeigt, dass dünnere Schichtstärken weniger Feuchtebelastet sind.

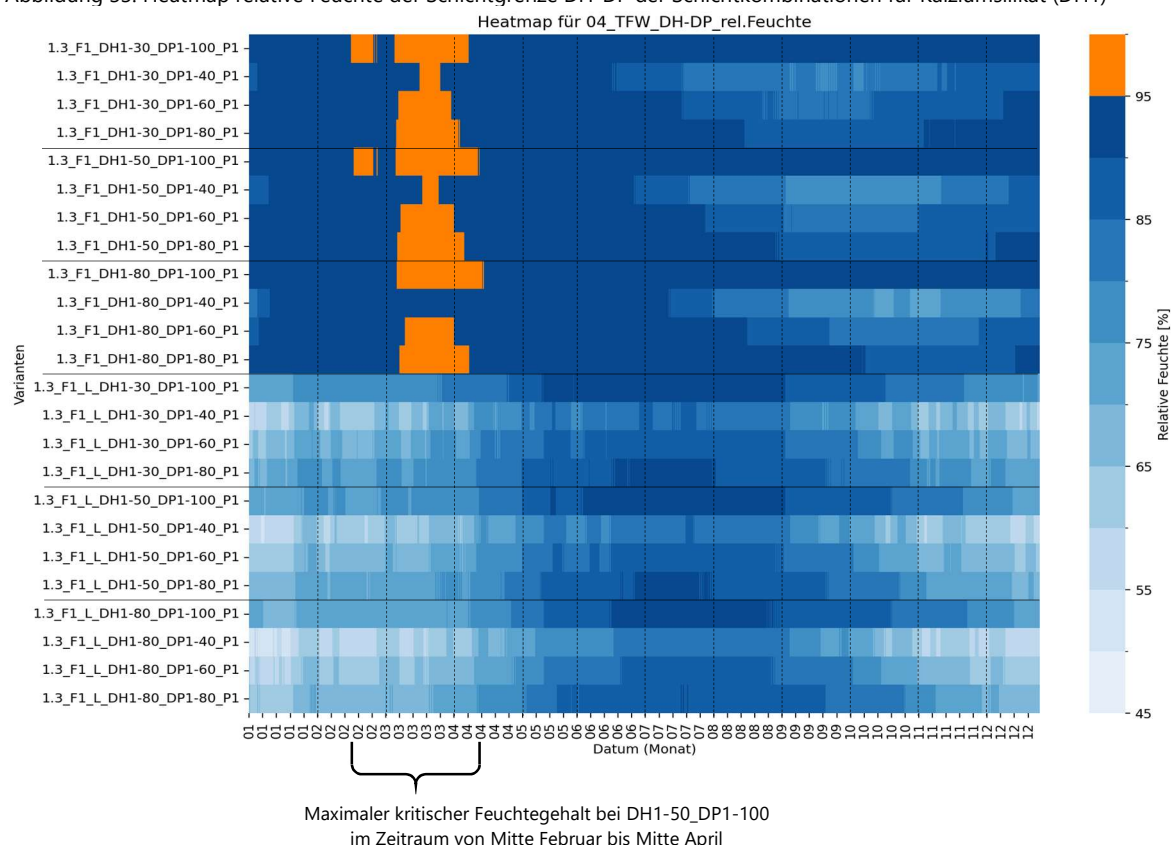
Abbildung 32: Heatmap relative Feuchte in der Schichtgrenze Ziegel-DH (oben) und Ziegel-DP (unten) der einschichtigen Dämmung



Ebenfalls zu erkennen ist, dass Varianten mit einer dünneren der Holzfaserdämmung ein besseres Trocknungsverhalten zeigen, insbesondere die Varianten mit 40 mm Holzfaserdämmung. Zudem zeigt die Grafik, dass die Dämmstärke des Kalziumsilikats einen geringeren Einfluss auf die relative Feuchte hat, als die Dämmstärke der Holzfaserdämmung. Die Varianten mit integrierter Luftschicht weisen signifikant niedrigere Feuchtwerte sowie stärkere jahreszeitliche Schwankungen auf, was auf ein verbessertes Austrocknungsverhalten und eine effektivere Feuchteableitung hinweist. Besonders bei geringeren Holzfaserdämmstärken (DP1-40 und DP1-60) bleibt die relative Feuchte in der DH-DP-Schichtgrenze durchgängig auf unkritischem Niveau. Das zeigt, dass die Integration einer Luftschicht einen entscheidenden Beitrag zur Reduktion der Feuchtebelastung in der passiven Dämmschicht leisten kann und damit das hygrothermische Verhalten der Konstruktion wesentlich verbessert.

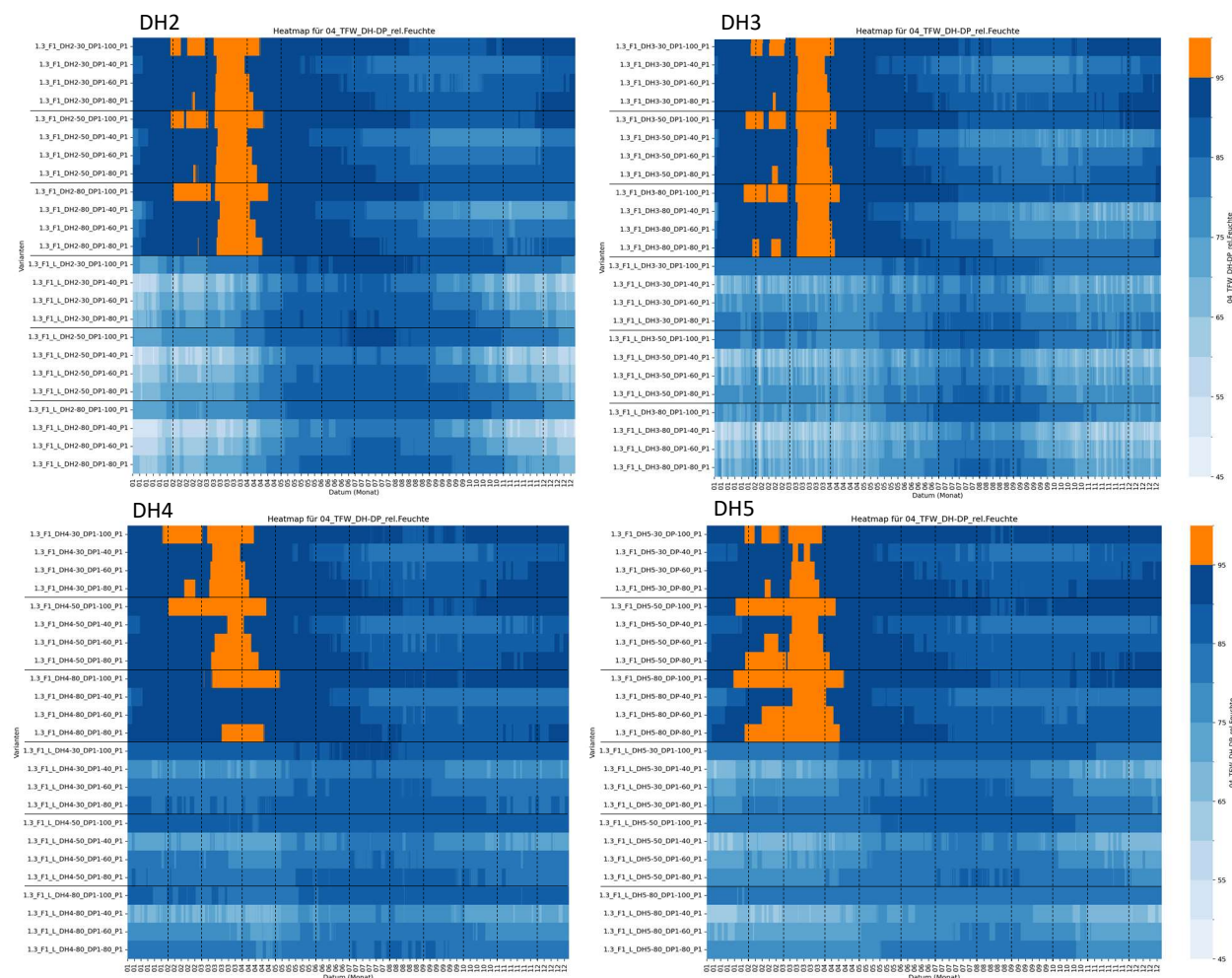
Abbildung 33 zeigt die relative Feuchte in der Schichtgrenze zwischen Kalziumsilikat und Holzfaserdämmung (DH-DP) über den Jahresverlauf für verschiedene Konstruktionsvarianten. Deutlich erkennbar ist, dass sich der maximale Zeitraum, in dem die relative Feuchte über dem Grenzwert liegt, im Vergleich zur einschichtigen Holzfaserdämmung, um etwa einen Monat verkürzt und es innerhalb dieses Zeitraums bereits Trocknungsphasen gibt. Das verdeutlicht die feuchtepuffernde Wirkung der hygrischen Dämmung, wodurch die Holzfaserdämmung einer geringeren Feuchtebelastung ausgesetzt ist.

Abbildung 33: Heatmap relative Feuchte der Schichtgrenze DH-DP der Schichtkombinationen für Kalziumsilikat (DH1)



In der Abbildung 34 ist zu sehen, dass die kritischen Feuchtwerte in der Schichtgrenze DH-DP bei allen Materialien und Schichtkombinationen zwar zeitweise über 95 % r. F. steigen, sie jedoch über das Jahr hinweg trocknen können. Das zeigt sich auch bei den Materialien, die in der Schichtgrenze Ziegel-DH über weite Teile des Jahres Feuchtwerte über 95 % r. F. aufweisen. Das deutet darauf hin, dass alle hygrischen Materialien eine gute Pufferschicht bilden und die Holzfaserdämmung vor übermäßiger Feuchtigkeit durch Schlagregen schützen können. Des Weiteren ist zu erkennen, dass bei den Materialien DH2 und DH3 der Einfluss der Schichtstärke der hygrischen Dämmung eher gering ist, im Vergleich zur Holzfaserdämmung. Bei DH1, DH4 und DH5 zeigen sich auch die Varianten mit einer Dämmstärke von 80 mm hygrischer Dämmung in Kombination mit 40 mm Holzfaserdämmung vorteilhaft für die relative Feuchte in der Schichtgrenze DH-DP. Insgesamt konnten die Analysen zeigen, dass alle hygrischen Materialien in allen Schichtkombinationen in der Lage sind, die Feuchtigkeit in der Schichtgrenze zur Holzfaserdämmung zu reduzieren, im Vergleich zu einer einschichtigen Holzfaserdämmung.

Abbildung 34: Heatmap relative Feuchte der Schichtgrenze DH-DP der Schichtkombinationen für DH2 (links oben), DH3 (rechts oben), DH4 (links unten), und DH5 (rechts unten)



Vergleich einschichtiger Dämmung zu Schichtkombination am Beispiel von Kalziumsilikat

Die Auswertung in Abbildung 35 zeigt, dass die einschichtige Kalziumsilikatdämmung mit einer Dicke von 30 mm im Vergleich zu den anderen Varianten die effektivste Feuchteregulierung aufweist. Im Gegensatz dazu erreicht die einschichtige Holzfaserdämmung in der Schichtgrenze Ziegel–Holzfaser (Ziegel–DP) insbesondere im März zeitweise die kritische Grenze von 95 % relativer Luftfeuchte. Bei der Kombination beider Materialien kommt es zwar in der Schichtgrenze zwischen Ziegel und Kalziumsilikat (Ziegel–DH) zu einer Zunahme der Zeitanteile mit relativer Feuchte über 95 %, jedoch sinkt die Feuchtebelastung an der inneren Schichtgrenze zwischen Kalziumsilikat und Holzfaser (DH–DP).

Abbildung 36 verdeutlicht das Verhalten der drei Dämmvarianten unter zusätzlicher Einbindung einer 30 mm breiten Luftschicht zwischen der Außenwand und der Dämmung. Diese führt zu einer erhöhten relativen Feuchte an der Innenseite der Außenwand, während die angrenzenden Dämmschichten insgesamt geringeren Feuchtebelastungen ausgesetzt sind.

Der Variantenvergleich zeigt, dass eine einschichtige Kalziumsilikatdämmung bezogen auf die Feuchteregulierung die besten Ergebnisse aufweist. Die Schichtkombination hingegen hat den Vorteil einer besseren Dämmwirkung und kann die Feuchtigkeit der Holzfaserdämmschicht reduzieren im Vergleich zu einer reinen Holzfaserdämmung. Die Luftschicht reduziert die Feuchtigkeit der innenliegenden Dämmschichten, erhöht sie jedoch in der Außenwand und der Grenze zur Luftschicht.

Abbildung 35: Vergleich der relativen Feuchte (Oben: einschichtige Dämmung aus Kalziumsilikat (DH1), Mitte: einschichtige Dämmung aus Holzfaserdämmung (DP), Unten: Schichtkombination aus Kalziumsilikat und Holzfaserdämmung ohne Luftschicht)

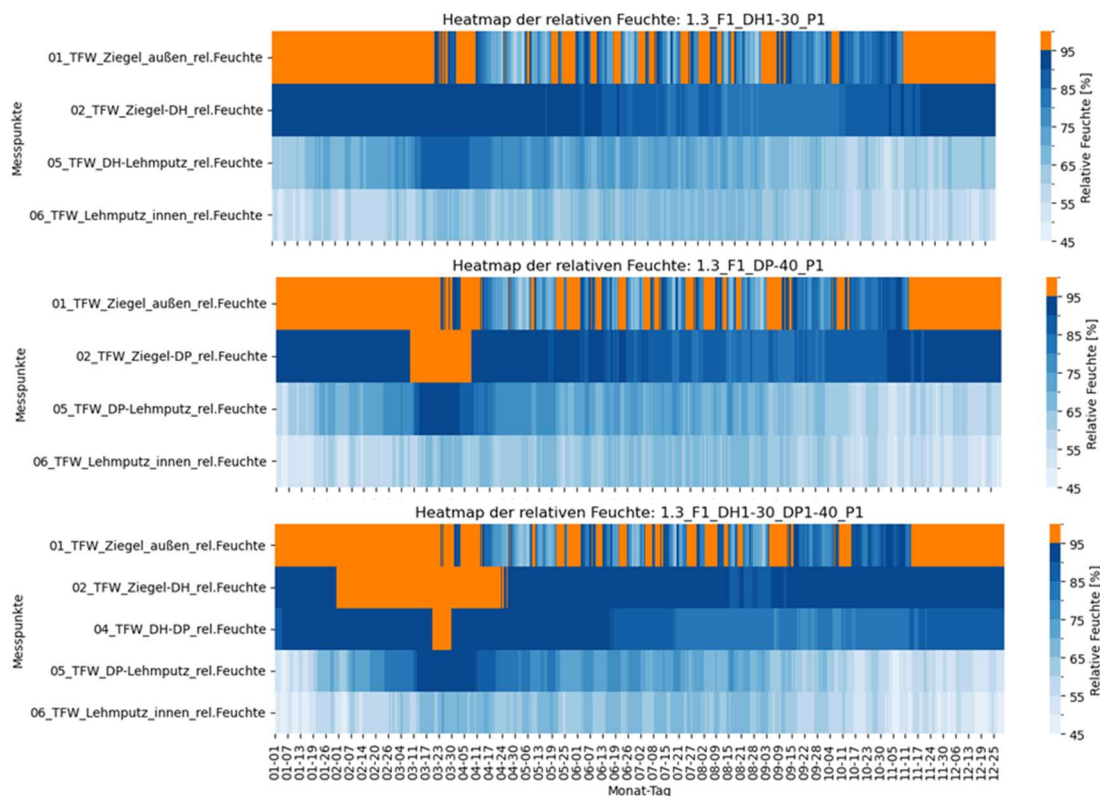
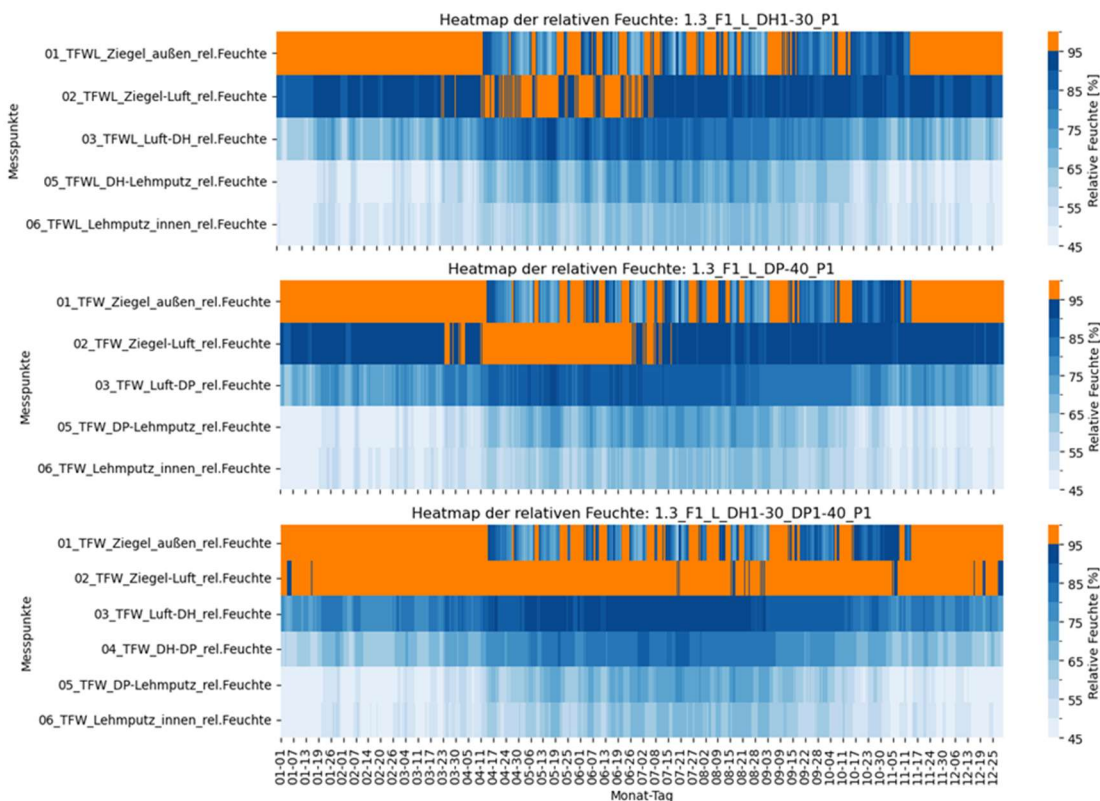


Abbildung 36: Vergleich der relativen Feuchte (Oben: einschichtige Dämmung aus Kalziumsilikat, Mitte: einschichtige Dämmung aus Holzfaserdämmung, Unten: Schichtkombination aus Kalziumsilikat und Holzfaserdämmung mit Luftschicht)



3.3.4.2 Vergleichende Bewertung der Konstruktionen

Aus den Analysen der Feuchtegehalte lässt sich ableiten, dass dünnere Dämmschichten in vielen Fällen die vorteilhaftere Wahl sind. Sie ermöglichen eine effiziente Feuchtaufnahme und -abgabe, ohne dass es zu einer übermäßigen Speicherung kommt. Dadurch bleibt das Material funktionsfähig und kann Feuchte aus der Raumluft oder angrenzenden Bauteilschichten regulieren, ohne ein Risiko für anhaltend hohe Feuchteniveaus darzustellen. Zudem können durch eine Reduzierung der Dämmstoffdicke Material und damit Kosten eingespart werden. Dennoch kann eine größere Schichtdicke in bestimmten Fällen sinnvoll sein, beispielsweise um den U-Wert zu verbessern oder wenn eine besonders hohe Feuchtaufnahmefähigkeit erforderlich ist und wenn durch eine geeignete Konstruktion eine ausreichende Rücktrocknung sichergestellt werden kann.

Die Analysen zeigen zudem, dass eine geringere Schichtstärke der Holzfaserdämmung in der Schichtkombination sowohl den Feuchtegehalt als auch die relative Feuchte innerhalb der Konstruktion reduziert. Dennoch konnte selbst bei maximaler Dämmstärke von 100 mm über den Jahresverlauf eine Trocknungstendenz des Feuchtegehalts festgestellt werden. Dies deutet darauf hin, dass Holzfaserdämmung trotz ihrer hohen Sorptionsfähigkeit in der Lage ist, Feuchtigkeit über längere Zeiträume auszugleichen.

Der Vergleich der relativen Luftfeuchte in den Schichtgrenzen zeigt, dass die einschichtige Variante mit Kalziumsilikat hinsichtlich der Feuchtebeanspruchung besonders vorteilhaft abschneidet. Im Gegensatz dazu weisen die Schichtkombinationen häufiger Überschreitungen kritischer Grenzwerte auf. Diese konnten im Jahresverlauf jedoch weitgehend durch Rücktrocknung kompensiert werden. Die Analyse der Holzfaserdämmung als einschichtige Variante im Vergleich zu den Schichtkombinationen verdeutlicht, dass alle untersuchten hygrisch aktiven Materialien in der Lage sind, die Feuchtebelastung an der Schichtgrenze zur Holzfaserdämmung signifikant zu reduzieren. Dies unterstreicht die feuchteregulierende Wirkung der kombinierten Schichtaufbauten.

Insgesamt zeigen die Analysen, dass geringere Dämmstärken bei allen Materialien einen besseren Feuchtausgleich ermöglichen. Außerdem lässt sich sagen, dass die Integration einer Luftschicht die Feuchtebelastung in den innenliegenden Schichten reduziert. Der Vergleich der Materialien zeigt zudem deutliche Unterschiede an der Schichtgrenze zur Außenwand. In dieser Schichtgrenze weisen die Materialien Kalziumsilikat (DH1), Mineralschaum (DH2) und Korkdämmlehm (DH4) insgesamt die bessere Feuchteregulierung auf, jedoch sind diese Unterschiede in der Schichtgrenze DH-DP kaum noch vorhanden.

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass sich die untersuchten hygrischen Materialien hinsichtlich ihres Feuchteverhaltens unterscheiden und daher in Abhängigkeit von den spezifischen Eigenschaften der Bestandskonstruktion ausgewählt werden sollten. Gleichzeitig zeigt sich, dass die Dämmstärke der Holzfaserdämmung einen stärkeren Einfluss auf die relative Luftfeuchte ausübt als die Materialwahl der hygrischen Schicht selbst.

3.3.4.3 Bewertung des Feuchtegehalts und Risiko der Holzerstörung

Nachdem die Feuchtebilanzen in den Schichten und Schichtgrenzen analysiert wurden, erfolgt als nächstes die Bewertung einzelner kritischer Positionen zur Vermeidung von Holzerstörung für ausgewählte Varianten. Dafür wurden die Varianten ausgewählt, die in den Testfassaden verbaut wurden (Kalziumsilikat, iQ-Therm und Korkdämmlehm). Die Analysen zur Holzerstörung wurden mit den Varianten der Fachwerkkonstruktion (F2) untersucht. Wenn nichts anderes angegeben ist, werden für die Auswertung der nachfolgend aufgeführten Kriterien ausschließlich der Ergebnisse des letzten Simulationsjahres verwendet. Die Feuchtebewertung von Holzbauteilen erfolgt nach den Vorgaben der DIN 4108-3 (DIN 4108-3, 2023), Abschnitt D.7.4, die ein mehrstufiges Verfahren zur Beurteilung der Gefahr durch holzerstörende Pilze vorsieht. Ein kritischer Schwellenwert liegt bei 20 Masseprozent (M-%) Holzfeuchte. Wird dieser Wert überschritten, besteht das Risiko eines mikrobiellen Abbaus durch

holzerstörende Pilze. In den ersten drei bis vier Jahren nach dem Einbau sind kurzzeitige Überschreitungen zulässig, jedoch nur für maximal drei Monate pro Episode. Zusätzlich kann eine erweiterte Bewertung nach WTA-Merkblatt 6.8 erfolgen, insbesondere wenn der Grenzwert überschritten wird.

Zur Überprüfung des Feuchteverlaufs in dem Holzbalken der Fachwerkkonstruktion wurde die zeitliche Entwicklung des Feuchtegehalts (Moisture Mass by Mass in kg/kg) in Relation zur Gesamtmasse des repräsentativen Volumens (REV) analysiert. Das Diagramm zeigt die Feuchtedaten für eine 10 mm breite Schicht im kritischen Bereich über mehrere Jahre hinweg. Der Feuchtegehalt ist in kg Wasser pro kg Holz angegeben (kg/kg). Daraus ergibt sich, dass 0,2 kg/kg einem Feuchtegehalt von 20 M-% entspricht.

Es wurden die folgenden Varianten analysiert:

- F2_DH1-30_DP1-100_P1
- F2_DH3-30_DP1-100_P1
- F2_DH4-30_DP1-100_P1
- F2_L_DH1-30_DP1-100_P1
- F2_L_DH3-30_DP1-100_P1
- F2_L_DH4-30_DP1-100_P1
- F2_DH1-30_DP1-40_P1
- F2_DH3-30_DP1-40_P1
- F2_DH4-30_DP1-40_P1
- F2_L_DH1-30_DP1-40_P1
- F2_L_DH3-30_DP1-40_P1
- F2_L_DH4-30_DP1-40_P1
- F2_DH1-30_P1
- F2_DP1-30_P1
- F2_DP1-100_P1

Abbildung 37 stellt den Feuchtegehalt des kritischen Bereichs in der Fachwerkwand dar. Das Diagramm umfasst sämtliche oben genannten Varianten. Im betrachteten Zeitraum sind wiederkehrende Feuchtespitzen erkennbar, insbesondere während der Wintermonate. Dabei wird deutlich, dass alle Varianten den Grenzwert von 20 M-% überschreiten, mit Ausnahme der folgenden:

- F2_L_DH1-30_DP1-100_P1 (30 mm Kalziumsilikat und 100 mm Holzfaser),
- F2_L_DH1-30_DP1-40_P1 (30 mm Kalziumsilikat und 40 mm Holzfaser),
- F2_DH1-30_P1 (30 mm Kalziumsilikat) und
- F2_DP1-30_P1 (30 mm Holzfaser)

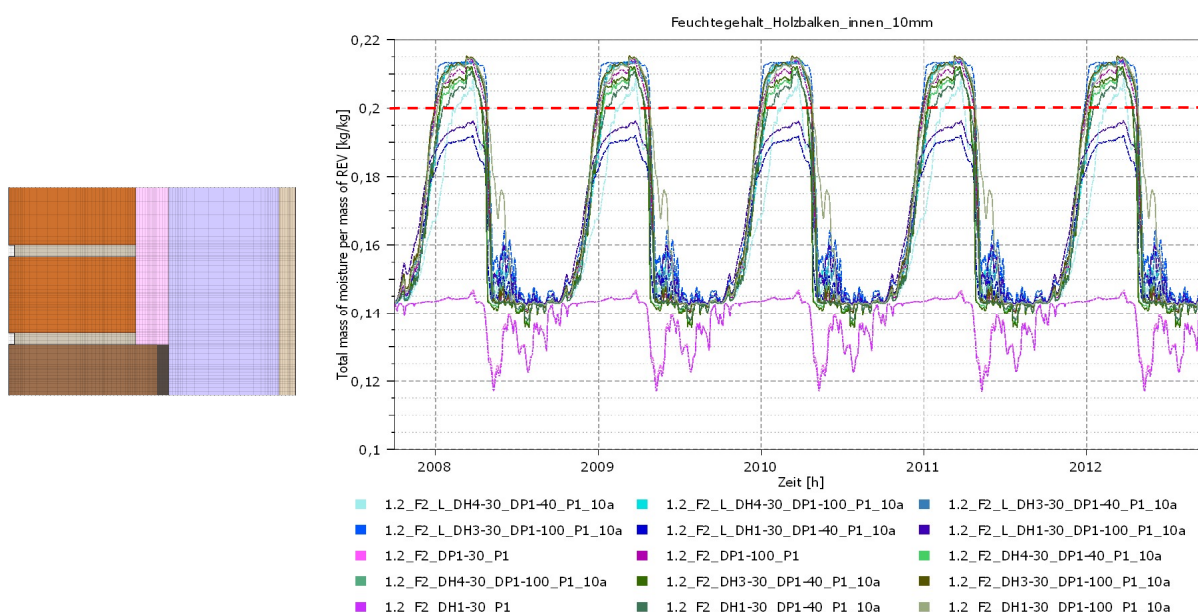
Die Ergebnisse verdeutlichen, dass eine Luftschicht auch bei einer Fachwerkwand vorteilhaft sein kann. Kalziumsilikat erweist sich durch seine sehr guten feuchteregulierenden Eigenschaften als leistungsfähigster hygri-scher Dämmstoff. Unter den untersuchten Schichtkombinationen hat die Variante mit einer 30 mm Kalziumsilikat-Dämmung und einer 40 mm Holzfaserdämmung den niedrigsten maximalen Feuchtegehalt. Das Diagramm veranschaulicht zudem die Unterschiede zu einschichtigen Dämmungen mit 30 mm Kalziumsilikat, 30 mm Holzfaserdämmung sowie 100 mm Holzfaserdämmung.

Die beiden Varianten mit einer Schichtdicke von 30 mm schneiden dabei am besten ab und bleiben mit einem maximalen Feuchtegehalt unter 0,15 kg/kg. Die 100 mm Holzfaserdämmung zeigt ähnliche Werte wie die anderen untersuchten Schichtkombinationen. Die regelmäßige Überschreitung des Grenzwertes birgt ein erhöhtes Risiko für holzerstörende Pilze. Da der Feuchtegehalt von 20 M-% über längere Zeiträume hinweg und wiederholt überschritten wird, ist eine detailliertere Bewertung sinnvoll.

Abbildung 37:

Abbildung der Wandkonstruktion aus DELPHIN (links)

Feuchtegehalt in kg/kg des kritischen Bereichs in der Fachwerkwand (rechts)



Eine erweiterte Analyse kann mit dem WTA-Merkblatt 6.8 erfolgen (Kehl, 2017). Hierzu wurde das „WTA Holzerstörungsmodell“ verwendet. Die rote Linie im Diagramm kennzeichnet den Grenzwert. Die blauen Punkte sind die Tagesmittelwerte von Temperatur und relativer Luftfeuchte am zu bewertenden Ort. Wenn alle Punkte unter der roten Linie liegen, besteht kein Risiko für Holzschädigung.

Laut WTA-Merkblatt 6.8 darf die relative Porenluftfeuchte im Massivholzprodukt die untere Grenzkurve aus Abbildung 38 nicht überschreiten. In begründeten Ausnahmefällen können einzelne kurzfristige Überschreitungen akzeptiert werden, jedoch sollte dies nicht zu häufig geschehen. Die Kurven beinhalten bereits eine gewisse Sicherheit, da nur Tagesmittelwerte herangezogen werden. In diesem Zusammenhang ist zu beachten, dass es keine explizite obere Grenzkurve und somit keine klare Begrenzung für zulässige Überschreitungen gibt. Liegen wenige Punkte über der roten Linie besteht eine Wahrscheinlichkeit für Holzerstörung und es sollten weitere Analysen durchgeführt werden.

Die Verteilung der Messpunkte zeigt, dass die relative Luftfeuchte zwischen 75 % und 98 % schwankt, wobei sich die Mehrheit der Werte im Bereich von 85 % bis 95 % bewegt. Die Temperaturen variieren zwischen -5 °C und etwa 25 °C, mit einer Hauptverteilung zwischen 5 °C und 20 °C. Ein Vergleich mit der Holzerstörungsgrenze zeigt, dass einige Werte über der roten Linie liegen, was auf Perioden mit einem erhöhten Risiko für Holzerstörung hindeutet. Insbesondere in Temperaturbereichen zwischen 5 °C und 15 °C in Kombination mit einer hohen relativen Luftfeuchte von über 90 % können sich günstige Bedingungen für holzerstörende Pilze ergeben. Gleichzeitig befinden sich jedoch viele Punkte unterhalb der Grenze, sodass über weite Teile des Untersuchungszeitraums kein erhöhtes Risiko für eine Schädigung des Holzes besteht.

Im direkten Vergleich zeigt sich, dass Kalziumsilikat am seltensten kritische Feuchtwerte überschreitet, wohingegen bei iQ-Therm die Anzahl der Überschreitungen am höchsten ist. Das liegt daran, dass Kalziumsilikat eine hohe kapillare Leitfähigkeit und Sorptionskapazität besitzt, wodurch Feuchtigkeit schnell aufgenommen, transportiert und wieder abgegeben wird. Dadurch bleibt die relative Luftfeuchte in angrenzenden Bauteilschichten, insbesondere im Holz, auf einem niedrigeren Niveau. Korkdämmlehm weist eine mittlere Feuchtespeicher- und Transportfähigkeit auf, sodass die Feuchteverhältnisse zwar reguliert, aber nicht so effizient ausgeglichen werden wie bei Kalziumsilikat. Im Gegensatz dazu hat iQ-Therm eine geringere kapillare Leitfähigkeit, wodurch aufgenommene Feuchte nur langsam abgeführt wird. Dies kann zu einer längeren Verweildauer erhöhter Feuchte in kritischen Bereichen führen.

Abbildung 38: Grenzkurve der relativen Porenluftfeuchte und Temperatur eines 10 mm x 10 mm Bereichs im kritischen Bereich des Holzbalkens für verschiedene Varianten mit Kalziumsilikat-Dämmung

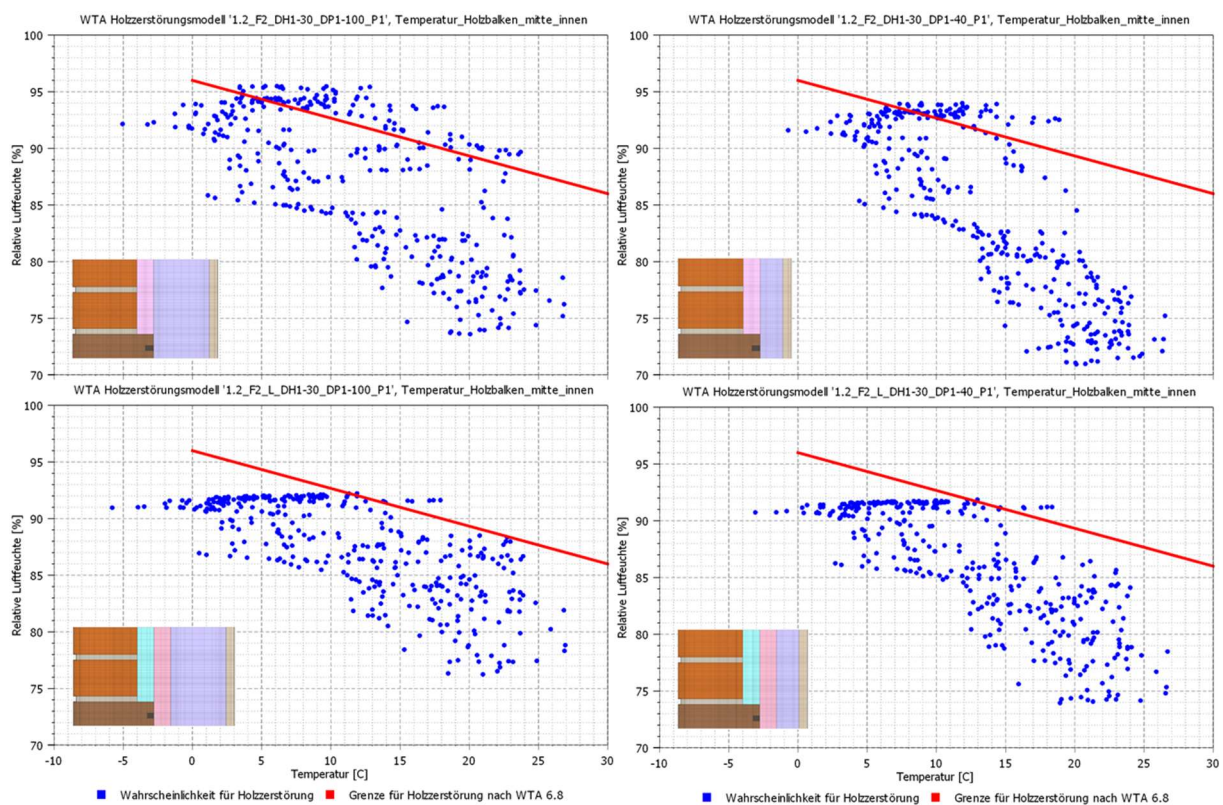


Abbildung 39: Grenzkurve der relativen Porenluftfeuchte und Temperatur eines 10 mm x 10 mm Bereichs im kritischen Bereich des Holzbalkens für verschiedene Varianten mit iQ-Therm-Dämmung

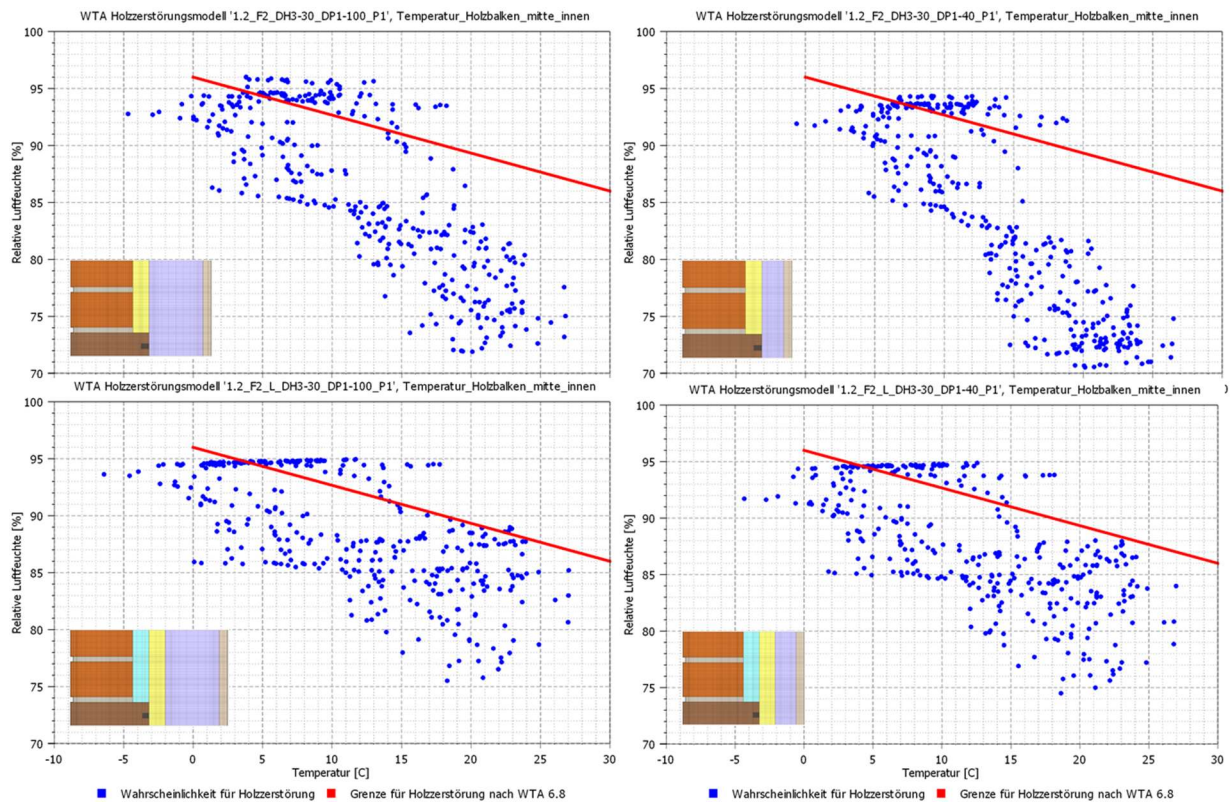
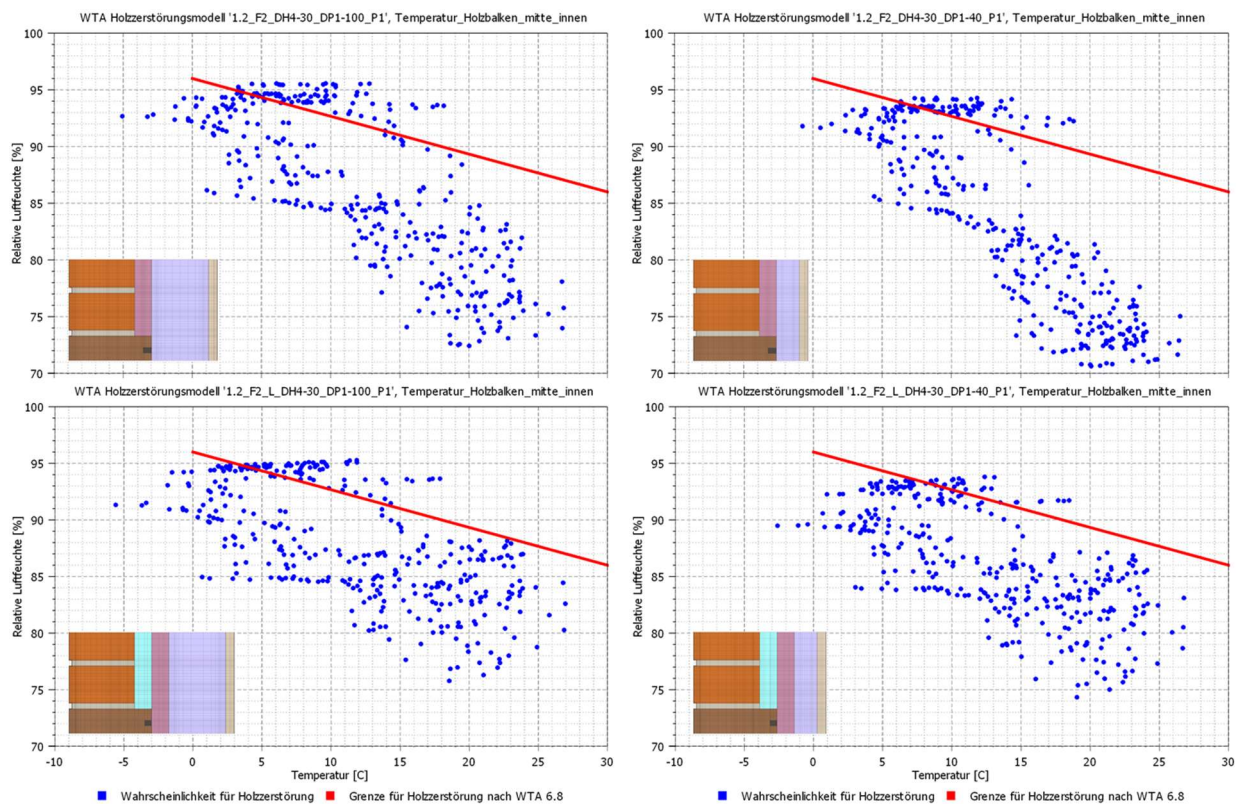


Abbildung 40: Grenzkurve der relativen Porenluftfeuchte und Temperatur eines 10 mm x 10 mm Bereichs im kritischen Bereich des Holzbalkens für verschiedene Varianten mit Korkdämmlehm-Dämmung



Fazit

Beide Auswertungen zur Bewertung der Holzzerstörung haben gezeigt, dass eine dünnere Dämmstärke oft ein geringeres Risiko für Holzzerstörung aufweist, als eine 100 mm dicke Dämmung, da sie eine bessere kapillare Rücktrocknung ermöglicht und die Feuchtigkeit schneller abgeführt wird. Zudem liegt der Temperaturverlauf bei einer dickeren Dämmung weiter innen, wodurch sich Feuchtigkeit stärker anreichern kann. Während Holzfaserdämmung eine hohe Sorptionskapazität besitzt und viel Wasser speichern kann, sorgt die hygri-sche Dämmung für eine schnelle Feuchteregulierung. In Kombination mit einer dünneren Holzfaserschicht führt dies zu geringeren maximalen Feuchtegehalten, da Verdunstung und Rücktrocknung effizienter ablaufen. Eine zu dicke Dämmung kann dagegen die Feuchteabgabe verlangsamen und zur Akkumulation von Feuchtigkeit führen.

Basierend auf dem Holzzerstörungsmodell des WTA-Merkblatts 6.8 können einige wenige Überschreitungen toleriert werden, während eine zu hohe Anzahl an Grenzwertüberschreitungen kritisch zu bewerten ist. Trotz der vorhandenen Sicherheitsreserven durch die Betrachtung der Tagesmittelwerte, sollten die wiederkehrenden Überschreitungen weiter analysiert werden. Perioden mit hoher Feuchte können auf eine unzureichende Austrocknung des Holzes hinweisen, was langfristig zu einer Schädigung führen kann. Falls sich ein dauerhaft erhöhtes Feuchteniveau zeigt, könnten Maßnahmen zur Reduktion der Feuchtebelastung erforderlich sein. Dazu gehören beispielsweise eine verbesserte Belüftung, konstruktive Anpassungen zum Schutz vor Schlagregen oder der Einsatz von feuchteresistenten Holzschutzmitteln.

Insgesamt liefern die Auswertungen wertvolle Hinweise auf potenzielle Feuchteprobleme, die gezielt untersucht und durch geeignete bauliche Maßnahmen reduziert werden sollten, um eine langfristige Holzzerstörung zu vermeiden.

3.3.5 Bauteilanschlüsse (Wärme- und Feuchtebrücken)

Bauteilanschlüsse stellen in der bauphysikalischen Analyse von Gebäuden eine besonders kritische Zone dar. An Übergängen zwischen unterschiedlichen Bauteilen kommt es häufig zu geometrischen oder materialbedingten Unregelmäßigkeiten, die sowohl den Wärme- als auch den Feuchtetransport beeinflussen. Die dadurch entstehenden Wärme- und Feuchtebrücken können nicht nur zu erhöhten Energieverlusten führen, sondern auch das Risiko für lokale Feuchteanreicherung und damit einhergehende Schäden erhöhen. Die Untersuchung von Bauteilanschlüssen ist daher ein wichtiger Bestandteil bei der Bewertung verschiedener Innendämmsysteme.

In diesem Abschnitt wird ein Deckenanschluss mit einer Holzbalkendecke für das Beispiel einer einschaligen Mauerwerkswand analysiert sowie ein Deckenanschluss aus Beton für das Beispiel der Bestandswand eines denkmalgeschützten Gebäudes.

Mauerwerkswand (F1)

Die Abbildung 41 zeigt die Temperatur- und Feuchteverteilungen bei verschiedenen Konstruktionsvarianten am Beispiel der Mauerwerkswand F1. Auf der linken Seite ist die Konstruktion im ungedämmten Zustand zu sehen, in der Mitte mit einer 30 mm Kalziumsilikatdämmung, 100 mm Holzfaserdämmung und 15 mm Lehmputz und auf der rechten Seite die gleiche Dämmvariante allerdings mit einer 30 mm breiten Luftschicht zwischen Außenwand und Dämmung. Die Analysen beziehen sich auf den 29. März, 00:00 Uhr, eine typische Übergangssituation mit niedrigen Außentemperaturen und noch nicht einsetzender Austrocknung durch solare Einstrahlung.

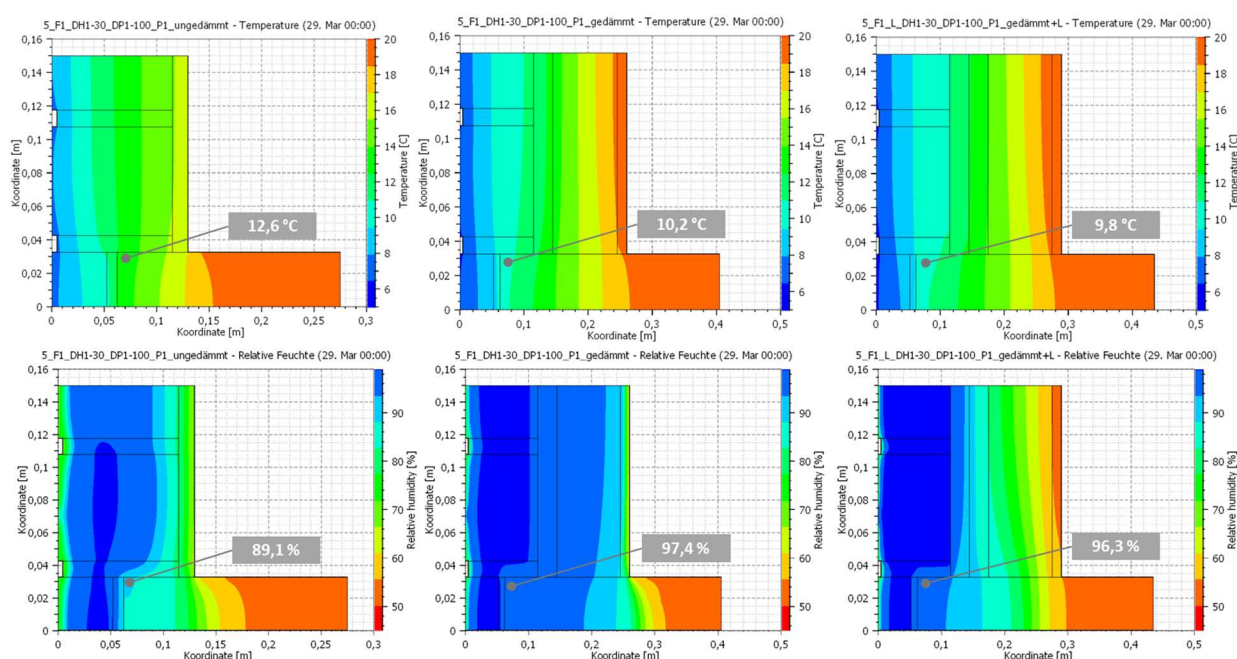
Mit zunehmender Dämmschicht und zusätzlicher Luftschicht verschiebt sich der Temperaturverlauf systematisch nach innen. Während bei der ungedämmten Variante noch relativ hohe Temperaturen im Wandkern und Anschlussbereich herrschen (12,6 °C), sinkt die Temperatur bei der gedämmten Variante auf 10,2 °C und bei zusätzlicher Luftschicht sogar auf 9,8 °C. Diese Absenkung der Bauteiltemperatur im

kritischen Anschlussbereich ist bauphysikalisch problematisch: Sie reduziert das Trocknungspotenzial und erhöht gleichzeitig das Risiko für Unterschreitung der Taupunkttemperatur.

Im Vergleich zur sinkenden Temperatur nimmt die relative Feuchte im Anschlussbereich deutlich zu. Bei der ungedämmten Wand liegt die maximale Feuchte bei 89,1 %, also unterhalb der kritischen Schwelle für Tauwasserbildung. In der gedämmten Variante steigt die relative Feuchte bereits auf 97,4 %, was auf Tauwasserausfall oder Feuchteakkumulation hinweist. Die Variante mit einer Luftschicht hingegen zeigt eine leicht geringere relative Feuchte und ein weniger tiefes Eindringen in den Deckenbalken, jedoch ist die Außenwand insgesamt höher feuchtebelastet.

Die Analysen zeigen, dass einbindende Balkenköpfe aus Holz bei Innendämmung besonders gefährdet für Feuchteschäden sind. Die nachträgliche Dämmung, insbesondere in Kombination mit einer Luftschicht, führt zu einer deutlichen Absenkung der Bauteiltemperaturen im Wand-Decken-Anschluss. Dies erhöht die Gefahr einer Feuchteanreicherung und somit das Risiko für Schimmelbildung oder Bauschäden. Um diesen Effekt entgegenzuwirken, sollte eine zusätzliche Keildämmung an der Unterseite der Decke angebracht werden, sowie eine Dämmung des Fußbodens erfolgen. Die ungedämmte Wand weist dagegen hohe Energieverluste auf, zeigt jedoch ein vergleichsweise geringeres Feuchteproblem.

Abbildung 41: Temperatur (oben) und relative Feuchte (unten) für den Bauteilanschluss einer Decke in der Mauerwerkswand (F1) an einem ausgewählten Tag am Ende des Winters, links: ungedämmt, Mitte: gedämmt, rechts: gedämmt mit Luftschicht

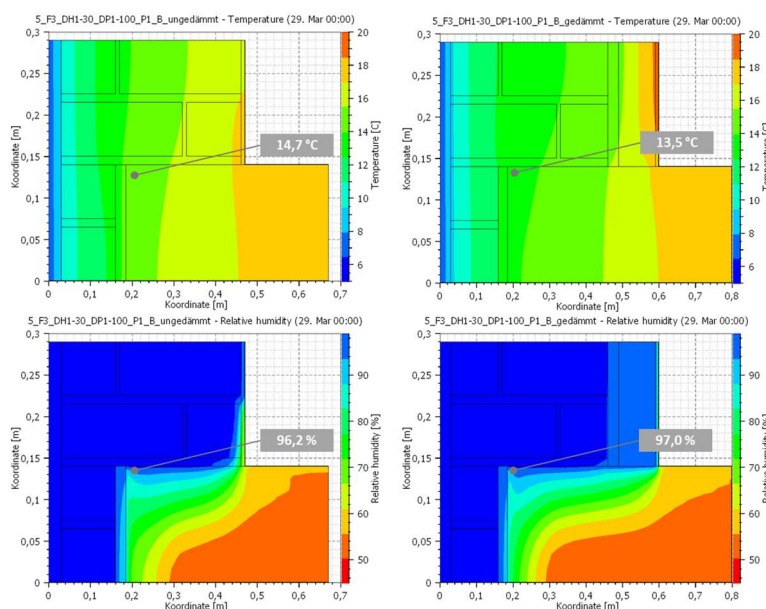


Bestandswand (F3)

Die Abbildung 42 zeigt die Temperatur- und Feuchteverteilungen für die Bestandswand eines denkmalgeschützten Gebäudes der UdK Berlin. Die einbindende Decke besteht aus Beton. Für die Analyse wurde ebenfalls die Variante mit 30 mm Kalziumsilikat, 100 mm Holzfaserdämmung und 15 mm Lehmputz gewählt. Der Zeitpunkt der Analyse ist der 29. März 00:00 Uhr.

Der Vergleich der Bestandswand F3 zeigt, dass die Variante mit Innendämmung eine deutlich höhere Temperatur an der raumseitigen Oberfläche der Innenwand aufweist. Am Auswertungspunkt in der Betondecke liegt die Temperatur etwa ein Grad unter dem Wert der ungedämmten Ausführung. Im Gegensatz zur einschaligen Mauerwerkswand fallen die Unterschiede in der Feuchteverteilung zwischen gedämmter und ungedämmter Variante geringer aus. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Betondecke Feuchtigkeit nur in begrenztem Maße aufnehmen kann. Die relative Feuchte am betrachteten Punkt liegt daher lediglich rund ein Prozent über dem Wert der ungedämmten Ausführung. Auffällig ist jedoch die insgesamt hohe Durchfeuchtung des Mauerwerks, die durch die Innendämmung zusätzlich verstärkt wird.

Abbildung 42: Temperatur (oben) und relative Feuchte (unten) für den Bauteilanschluss einer Decke in der Bestandswand (F3) an einem ausgewählten Tag am Ende des Winters, links: ungedämmt, rechts: gedämmt



3.3.6 Sommerlicher und winterlicher Wärmeschutz

Der Wärmeschutz von Gebäuden ist ein essenzieller Bestandteil der Bauphysik und dient sowohl dem Schutz vor Wärmeverlusten im Winter als auch der Überhitzung im Sommer. Die Anforderungen an den winterlichen und sommerlichen Wärmeschutz werden in Deutschland durch die DIN 4108 „Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden“ (DIN 4108-2, 2013) geregelt. Während der winterliche Wärmeschutz vor allem auf eine Minimierung des Heizwärmebedarfs abzielt, steht beim sommerlichen Wärmeschutz der Schutz vor hohen Innenraumtemperaturen im Fokus, um den Bedarf an aktiver Kühlung zu reduzieren.

Der winterliche Wärmeschutz basiert auf der Begrenzung von Wärmeverlusten durch die Gebäudehülle. Hierbei spielt der U-Wert (Wärmedurchgangskoeffizient) eine zentrale Rolle, da er die Wärmedurchlässigkeit von Bauteilen beschreibt. Ein niedriger U-Wert bedeutet eine gute Wärmedämmung und verringert die Transmissionswärmeverluste. Wichtige Aspekte des winterlichen Wärmeschutzes in Bezug auf die Dämmung sind:

- Effiziente Wärmedämmung durch den Einsatz geeigneter Dämmmaterialien mit niedriger Wärmeleitfähigkeit.
- Luftdichtheit und Vermeidung von Wärmebrücken, um unkontrollierte Wärmeverluste zu reduzieren.
- Wärmespeicherung in massiven Bauteilen, um solare Gewinne über den Tag zu speichern und nachts langsam abzugeben.

Die Berechnung des Mindestwärmeschutzes erfolgt gemäß DIN 4108-2, in der die Anforderungen definiert sind, um Bauschäden und hohe Energieverluste zu vermeiden.

Der sommerliche Wärmeschutz zielt darauf ab, eine Überhitzung von Innenräumen zu verhindern. Dies geschieht durch eine Kombination aus baulichen Maßnahmen und gezielter Nutzung passiver

Strategien. Der Wärmeeintrag durch die Gebäudehülle wird durch den Temperaturamplitudendämpfungsfaktor und die Phasenverschiebung von Wärmefluss in massiven Bauteilen beeinflusst. Wichtige Maßnahmen sind:

Sonnenschutzmaßnahmen wie außenliegende Jalousien, Markisen oder Verschattung durch Pflanzen.

- Reduzierung des solaren Wärmeeintrags durch Verglasungen mit niedrigem g-Wert.
- Einsatz von thermisch massiven Baustoffen, um die Wärmeaufnahme zu verzögern und Temperaturspitzen abzumildern.
- Natürliche Lüftungskonzepte, die in den kühleren Nachtstunden für den notwendigen Luftaustausch sorgen.

Die Anforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz sind ebenfalls in der DIN 4108-2 definiert. Der Nachweis erfolgt durch eine Berechnung des Sonneneintragskennwertes oder durch eine dynamische Gebäudesimulation, insbesondere bei nicht-klimatisierten Gebäuden.

3.3.6.1 Analyse des sommerlichen und winterlichen Wärmeschutzes

Die bauphysikalischen Eigenschaften der Dämmstoffe haben einen maßgeblichen Einfluss auf das Feuchte- und Temperaturverhalten der Schichtkombinationen. Neben der Wärmeleitfähigkeit und Wärmespeicherkapazität spielt auch das Feuchteverhalten der Schichtkonstruktionen eine Rolle. Feuchtigkeit kann die Wärmeleitfähigkeit der Materialien verändern, die Speichereigenschaft beeinflussen und langfristig die Bausubstanz gefährden. Die analysierten Materialien weisen deutliche Unterschiede in ihren Dichte-, Porositäts- und Feuchtespeicherwerten auf, was sich auch auf ihr thermisches Verhalten auswirkt. Die folgenden Daten beziehen sich auf die untersuchten Materialien aus den hygrothermischen Bauteilsimulationen mit DELPHIN.

Kalziumsilikat (DH1) hat eine relativ hohe Porosität (0,93) und eine sehr hohe effektive Feuchtespeicherung ($0,916 \text{ m}^3/\text{m}^3$), was bedeutet, dass es große Mengen an Wasser aufnehmen kann. Mit einem sehr hohen Wasseraufnahmekoeffizienten A_w von $0,76562 \text{ kg}/\text{m}^2\text{s}^{0,5}$ ist es extrem kapillaraktiv und kann Feuchtigkeit schnell transportieren. Die spezifische Wärmekapazität beträgt $1100 \text{ J}/\text{kgK}$, was eine moderate Wärmespeicherung ermöglicht. Aufgrund der relativ hohen Wärmeleitfähigkeit ($0,059 \text{ W}/\text{mK}$) ist die Dämmwirkung geringer als bei anderen Materialien.

Mineralschaum (DH2) ist leichter (Dichte $128 \text{ kg}/\text{m}^3$) und hat eine höhere Porosität (0,949) als Kalziumsilikat. Allerdings ist seine effektive Feuchtespeicherung mit $0,422 \text{ m}^3/\text{m}^3$ deutlich geringer. Der Wasseraufnahmekoeffizient (A_w $0,102228 \text{ kg}/\text{m}^2\text{s}^{0,5}$) zeigt, dass Feuchtigkeit nur langsam aufgenommen wird. Mit einer geringeren Wärmeleitfähigkeit von $0,047 \text{ W}/\text{mK}$ bietet Mineralschaum jedoch eine gute Wärmedämmleistung. Die Wärmekapazität ist mit $893 \text{ J}/\text{kgK}$ niedriger als die der anderen Materialien, was die Wärmespeicherung begrenzt.

iQ-Therm (DH3) weist mit einer Dichte von $49 \text{ kg}/\text{m}^3$ die geringste Masse auf und hat die höchste Porosität (0,982). Die Feuchtespeicherung ist mit $0,093 \text{ m}^3/\text{m}^3$ extrem niedrig, da das Material nur wenig Wasser aufnehmen kann. Der sehr hohe Wasserdampfdiffusionswiderstand (μ -Wert 27,0) weist darauf hin, dass Feuchtediffusion stark gehemmt wird. Aufgrund seiner geringen Wärmeleitfähigkeit ($0,037 \text{ W}/\text{mK}$) besitzt es eine hohe Dämmleistung. Die Wärmekapazität ist mit $1400 \text{ J}/\text{kgK}$ die höchste der untersuchten Materialien, was auf eine gute Wärmespeicherfähigkeit hindeutet.

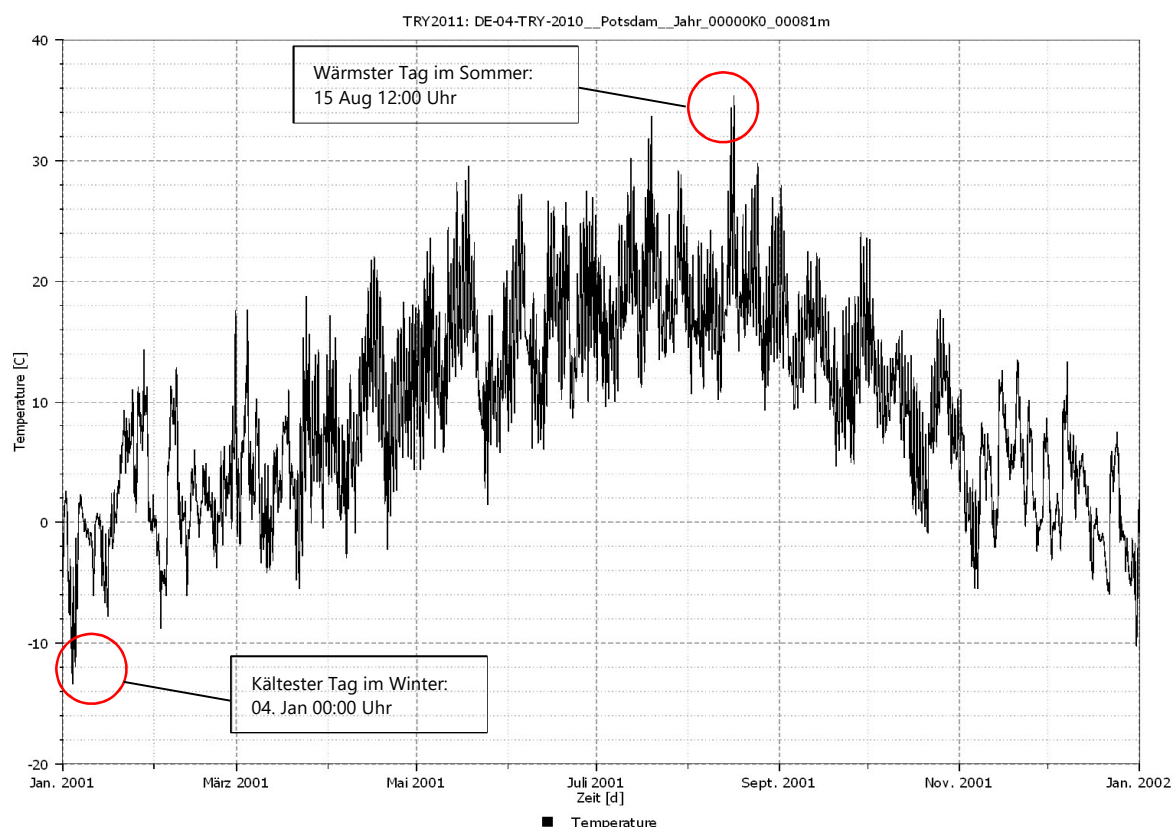
Die Korkdämmlehmplatte (DH4) ist mit $350 \text{ kg}/\text{m}^3$ vergleichsweise schwer und hat eine mittlere Porosität (0,868). Die effektive Feuchtespeicherung ($0,418 \text{ m}^3/\text{m}^3$) ist deutlich höher als bei iQ-Therm und vergleichbar mit Mineralschaum. Der Wasseraufnahmekoeffizient (A_w $0,0446362 \text{ kg}/\text{m}^2\text{s}^{0,5}$) zeigt, dass das Material Feuchtigkeit langsam, aber kontinuierlich aufnimmt. Die Wärmekapazität beträgt $1056 \text{ J}/\text{kgK}$, was eine mittlere Wärmespeicherung bedeutet. Aufgrund der relativ hohen Wärmeleitfähigkeit ($0,077 \text{ W}/\text{mK}$) ist die Dämmwirkung schlechter als bei Mineralschaum oder iQ-Therm.

Wärmedämmlehm (DH5) besitzt die höchste Dichte (368 kg/m^3) und eine hohe Feuchtespeicherung ($0,860 \text{ m}^3/\text{m}^3$), was sich positiv auf die Feuchtepufferung auswirkt. Der Wasseraufnahmekoeffizient (A_w $0,0549029 \text{ kg/m}^2\text{s}^{0.5}$) zeigt, dass es langsamer als Kalziumsilikat Feuchtigkeit aufnimmt. Die Wärmekapazität beträgt 885 J/kgK , was zwar die niedrigste im Vergleich darstellt, aber dennoch für eine effektive Wärmespeicherung ausreicht. Die Wärmeleitfähigkeit liegt mit $0,074 \text{ W/mK}$ im mittleren Bereich.

Bei der Feuchtespeicherung haben Kalziumsilikat und Wärmedämmlehm die höchste Feuchtespeicherfähigkeit, während iQ-Therm kaum Feuchtigkeit aufnimmt. Auch beim kapillaren Feuchtetransport hat Kalziumsilikat mit Abstand die höchste Kapillaraktivität, gefolgt von Mineralschaum. In Bezug auf die Wärmespeicherung hat iQ-Therm die höchste Wärmekapazität, gefolgt von Kalziumsilikat und der Korkdämmlehmplatte. Auch bei der Wärmedämmung bietet iQ-Therm aufgrund der niedrigen Wärmeleitfähigkeit die beste Dämmleistung, während die Korkdämmlehmplatte und der Wärmedämmlehm die schlechteste Dämmwirkung aufweisen.

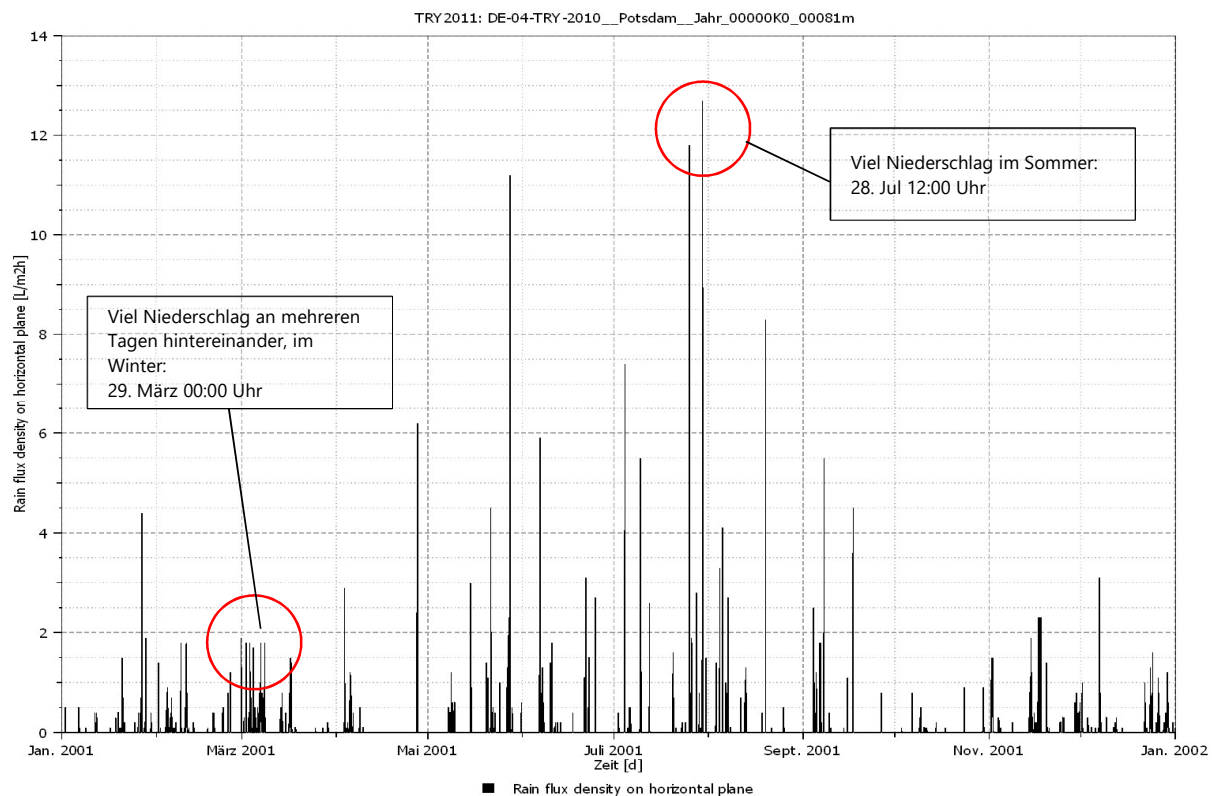
Für die Bewertung des sommerlichen und winterlichen Wärmeschutzes der untersuchten Schichtkombinationen wurden die Temperatur- und Feuchtegradienten in extremen Witterungslagen analysiert. Dafür wurde zunächst im Testreferenzjahr geprüft, an welchen Tagen es im Winter extrem kalt und im Sommer extrem warm ist (Abbildung 43).

Abbildung 43: Jahrestemperaturen des TRY2011 von Potsdam



Als nächstes wurde überprüft, zu welchem Zeitpunkt es im Testreferenzjahr viel Niederschlag gibt (Abbildung 44).

Abbildung 44: Relative Feuchte im TRY2011 in Potsdam



3.3.6.2 Temperatur- und Feuchtegradienten

Die Untersuchung von Feuchte- und Temperaturgradienten in einer Wandkonstruktion hilft dabei potenzielle Risiken wie Kondensation, Feuchteanreicherung und Schimmelbildung zu identifizieren. Besonders bei nachträglicher Innendämmung kann es zu kritischen Feuchtezonen kommen, da der Feuchtetransport nach außen reduziert wird. Eine unzureichende Austrocknung kann langfristig zu Schäden an der Bausubstanz führen.

Um den Umfang der Analysen zu begrenzen, wird nachfolgend die Basisvariante mit der Kalziumsilikatschicht (DH1) bewertet und anschließend mit den Varianten iQ-Therm (DH3) und Korkdämmlehmplatte (DH4) verglichen. Anschließend erfolgt die Auswertung der drei Varianten mit einer zusätzlichen Luftschicht.

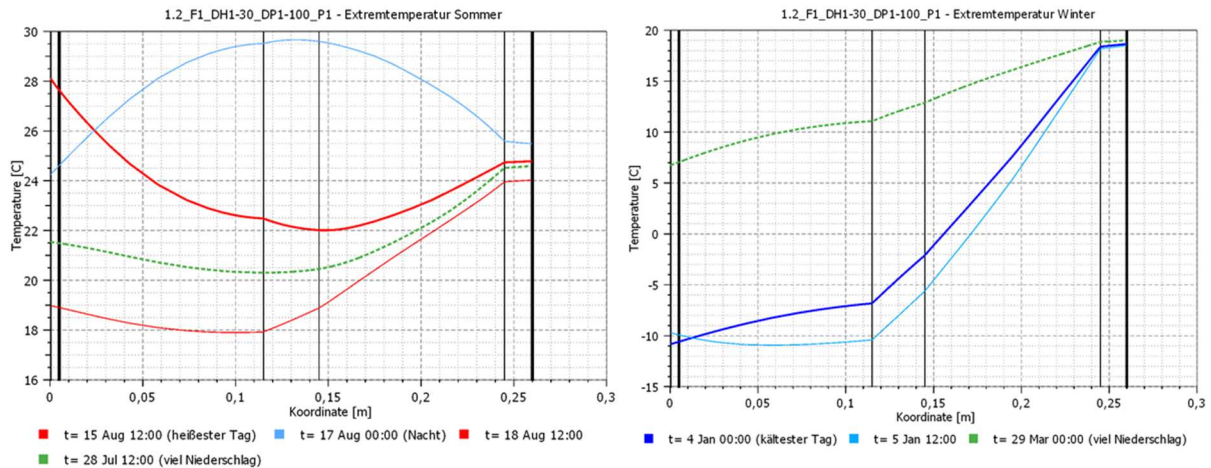
Die Diagramme (Abbildung 45) zeigen die Temperaturverläufe innerhalb der Wandkonstruktion an ausgewählten Sommer- und Wintertagen:

- heißester Tag (15. August, rot),
- eine Sommernacht (17. August, blau),
- ein weiterer heißer Tag (18. August, hellrot),
- ein Tag mit viel Niederschlag (28. Juli, grün gestrichelt),
- kältester Tag (04. Januar, dunkelblau),
- der darauffolgende Tag (5. Januar, hellblau),
- ein Tag nach vielen Tagen mit Niederschlag (29. März, grün gestrichelt)

Die Koordinate verläuft von außen (links) nach innen (rechts).

Temperaturverläufe im Sommer und Winter

Abbildung 45: Temperaturgradienten der Kalziumsilikat-Variante an ausgewählten Tagen im Sommer (links) und im Winter (rechts)



Sommerliche Bedingungen (obere linke Grafik)

Am heißesten Tag (15. August, rot) lässt sich ein relativ steiler Temperaturgradient über die Außenwand erkennen. Die Temperatur sinkt von etwa 28 °C an der Außenseite auf rund 22,5 °C, sinkt in der Kalziumsilikatschicht weiter auf 22 °C und steigt in der Holzfaserdämmung wieder auf rund 25 °C, die sich auch auf der Innenseite der Wand einstellen. Dieser Verlauf zeigt, dass die Holzfaserdämmung Wärme speichert und verzögert an den Innenraum weitergibt. Die Kalziumsilikatplatte wirkt dabei zwar als kurzzeitige Pufferschicht, vermag aber den Wärmeeintrag aus dem massiven Ziegel nicht wesentlich abzuschwächen.

In der Nacht (17. August, blau) ist die Temperaturverteilung nahezu umgekehrt. Der Innenraum bleibt mit etwa 25 °C etwas wärmer als die Außenseite, die auf 24 °C abkühlt. Innerhalb der Dämmschichten steigt die Temperatur jedoch auf bis zu 29,8 °C. Dieser Effekt kann bei dauerhaft heißen Perioden zur Akkumulation von Wärme im Wandaufbau und einer Überhitzung des Innenraumes führen.

Am Tag mit viel Niederschlag (28. Juli, grün gestrichelt) zeigen sich durchweg niedrigere Temperaturen. Die Kurve verläuft in der Außenwand und der Kalziumsilikatdämmung relativ flach und homogen, ein Hinweis auf reduzierte solare Einstrahlung und die kühlende Wirkung des Regens. In der Holzfaserdämmung steigt die Kurve wieder an und bleibt in der Lehmputzschicht relativ konstant bei einer Temperatur von etwa 24,5 °C. Auch an einem kühleren Tag bei einer Außentemperatur von unter 20 °C bleibt die Temperatur auf der Innenseite der Konstruktion mit 24 °C relativ warm. Das zeigt eine hohe Speicherfähigkeit der Holzfaserdämmung, die die Wärme nur langsam wieder abführt. An allen ausgewählten Tagen im Sommer beträgt die Wandinnentemperatur zwischen 24 °C und 25,5 °C. Die geringen Temperaturschwankungen zeigen, dass die Konstruktion einen gewissen sommerlichen Wärmeschutz bietet.

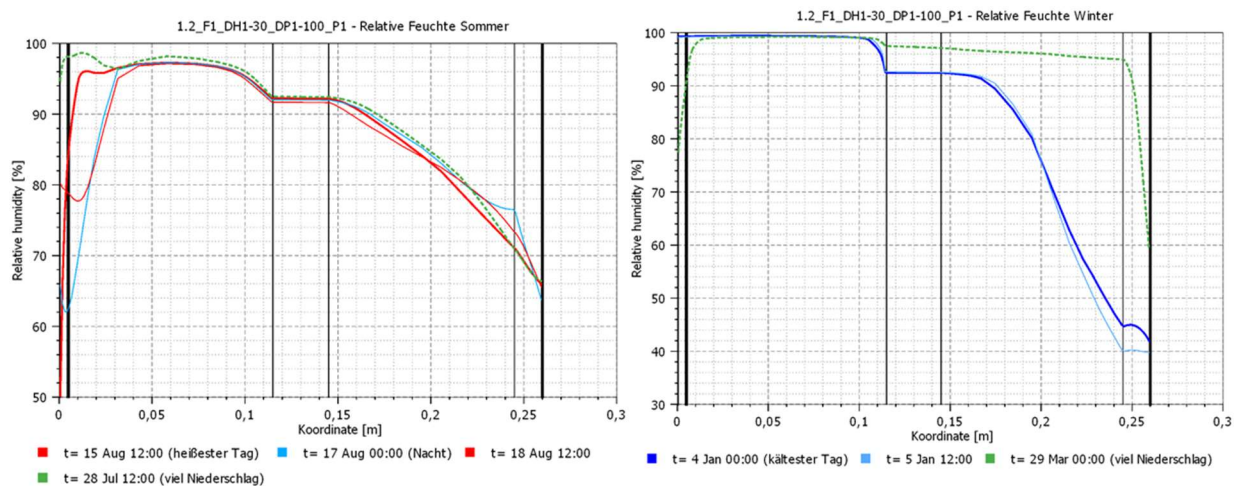
Winterliche Bedingungen (obere rechte Grafik)

Die Temperaturverläufe im Wandaufbau an unterschiedlichen Wintertagen zeigen ein deutliches Bild der wärmeschutztechnischen Eigenschaften der untersuchten Konstruktion. Am kältesten Tag (4. Januar) sinkt die Temperatur an der Außenseite des Ziegelmauerwerks auf -11 °C. Der Temperaturverlauf durch das Ziegelmauerwerk (11,5 cm) ist relativ flach, was auf die vergleichsweise hohe Wärmeleitfähigkeit des Materials hindeutet. Erst innerhalb der Kalziumsilikatplatte (3 cm) beginnt die Temperatur steiler anzusteigen und setzt sich in der Holzfaserdämmung (10 cm) mit einem ausgeprägten Temperaturgradienten fort. Zwischen Ziegelmauerwerk und Kalziumsilikat liegt die Temperatur bei etwa

-6,7°C, an der Grenzfläche zur Holzfaserdämmung bei rund -2°C. An der inneren Oberfläche der Wand, also im Bereich des Lehmputzes, stellt sich schließlich eine Temperatur von etwa 18,5°C ein. Diese Verteilung verdeutlicht die thermisch dämpfende Wirkung der inneren Dämmschichten, insbesondere der Holzfaserdämmung, die einen Großteil des Temperaturanstiegs übernimmt. Dadurch wird der Innenraum effektiv vor Wärmeverlust geschützt, was auf eine gute winterliche Wärmedämmung hinweist. Am darauffolgenden Tag (5. Januar, hellblaue Linie) ist eine Umkehrung zu beobachten. Während die Außentemperatur leicht auf -9°C ansteigt, ist die Temperatur innerhalb der Dämmschichten weiter gefallen. An einem Tag mit hoher Niederschlagsintensität (29. März, grüne Linie) zeigt sich eine vergleichsweise flache Temperaturverteilung über die gesamte Wanddicke. Diese gleichmäßigere Verteilung lässt sich möglicherweise auf erhöhte Feuchtegehalte zurückführen, die die Wärmeleitfähigkeit der Materialien verändern. In durchfeuchteten Bauteilen steigt die Wärmeleitfähigkeit typischerweise an, was zu einer insgesamt gleichmäßigeren, aber auch schnelleren Wärmeleitung führt und somit auch zu erhöhten Wärmeverlusten in feuchtem Zustand.

Feuchteverläufe im Sommer und Winter

Abbildung 46: Feuchtegradienten der Kalziumsilikatvariante an ausgewählten Tagen im Sommer (links) und im Winter (rechts)



Die Feuchteverteilungen zeigen kritische Feuchteansammlungen an bestimmten Wandabschnitten:

Sommerliche Bedingungen (untere linke Grafik)

Im äußeren Bereich des Wandaufbaus, also im Ziegelmauerwerk, lässt sich ein deutlicher Feuchteanstieg infolge des Niederschlagsereignisses beobachten. Während die relative Feuchte am 28. Juli nahezu 100% erreicht, liegen die Werte an den heißen Tagen des Augusts deutlich darunter. Dies zeigt die Fähigkeit des Ziegels zur Wasseraufnahme sowie zur anschließenden Trocknung. Am heißesten Tag (15. August) ist die Feuchte aufgrund erhöhter Verdunstung am geringsten.

In der Kalziumsilikatschicht bleibt die relative Feuchte über alle Szenarien hinweg weitgehend konstant bei etwa 92–95%. Dies belegt die kapillaraktive und ausgleichende Wirkung dieses Materials. Es puffert eindringende Feuchtigkeit und reduziert kurzfristige Schwankungen. Damit leistet diese Schicht einen wesentlichen Beitrag zur hygrischen Stabilität im Übergangsbereich zwischen Bestand und Dämmung.

In der Holzfaserdämmung ist ein deutlich abfallender Feuchtegradient zu erkennen, der von etwa 92% an der Kalziumsilikatoberfläche bis auf Werte zwischen 70 und 75% an der Grenze zum Lehmputz sinkt. Trotz ihrer geringen kapillaren Leitfähigkeit ermöglicht die Holzfaserplatte einen kontinuierlichen Feuchtetransport nach innen, ohne dass sich Feuchte in der Dämmung akkumuliert.

An der Innenoberfläche, im Bereich des Lehmputzes, bewegen sich die Feuchtwerte konstant unterhalb von 70%. Selbst bei Schlagregenereignissen und hohen Außentemperaturen bleibt die Feuchte an der

inneren Oberfläche unterhalb der kritischen Grenze von 80% relativer Luftfeuchte, wodurch aus hygrothermischer Sicht kein Risiko für Schimmelbildung nach DIN 4108-2 besteht.

Insgesamt zeigt die Auswertung ein ausgewogenes Feuchteverhalten der untersuchten Wandkonstruktion im Sommer. Die Kombination aus kapillaraktivem Kalziumsilikat und diffusionsoffener Holzfaserdämmung sorgt für einen effektiven Feuchtetransport ohne kritische Anreicherung. Die Feuchteinträge aus Schlagregen oder Luftfeuchteimpulsen werden gepuffert und kontrolliert abgeleitet, wodurch ein dauerhaft hygienisch unbedenklicher Zustand gewährleistet wird.

Winterliche Bedingungen (untere rechte Grafik)

Während der kalten Witterungsbedingungen bleibt die äußere Ziegelschicht (bis ca. 0,115 m) durchgehend feucht: Die relative Feuchte liegt an allen betrachteten Tagen nahe bei 100%. Dies ist vor allem durch die Kondensation von Luftfeuchtigkeit und die begrenzte Trocknungskapazität bei niedrigen Temperaturen erklärbar. Besonders auffällig ist, dass sich diese hohe Feuchte auch in der angrenzenden Kalziumsilikatschicht weiter fortsetzt, wobei die Werte hier leicht unterhalb von 95% verbleiben. Dies verdeutlicht erneut die hohe kapillare Leitfähigkeit und Pufferkapazität des Kalziumsilikats, das selbst bei winterlicher Durchfeuchtung eine gleichmäßige Feuchteverteilung ermöglicht.

Ab der Grenze zur Holzfaserdämmplatte (etwa bei 0,145 m) beginnt der Feuchtegehalt deutlich abzufallen. Besonders am kältesten Tag (4. Januar) zeigt sich ein starker Feuchtegradient innerhalb der Dämmung. Von etwa 93% fällt die relative Feuchte auf unter 45% im Bereich des Lehmputzes. Dieser steile Verlauf belegt einen funktionierenden Feuchtetransport von der Kalziumsilikatplatte in Richtung Rauminnenseite. Gleichzeitig zeigen die niedrigen Werte im Bereich des Innenputzes, dass keine kritischen Feuchtezustände im Rauminnen oder an der Innenoberfläche auftreten.

Am 29. März, dem Tag mit starkem Niederschlag, zeigt sich ein deutlich verändertes Feuchteprofil gegenüber den anderen Wintertagen. Die grüne gestrichelte Linie markiert einen durchgängig hohen Feuchtegehalt über nahezu die gesamte Bauteiltiefe hinweg. Von der äußeren Ziegelschale über das Kalziumsilikat bis weit in die Holzfaserdämmung hinein verbleibt die relative Luftfeuchte konstant oberhalb von 90%. Erst in der innersten Lehmputz-Schicht fällt die Feuchte ca. 60% relativer Feuchte auf der Innenseite ab. Dieses Profil deutet auf eine intensive Feuchtebelastung hin, bei der die äußeren und mittleren Schichten weitgehend durchfeuchtet sind. Der kapillare Feuchtetransport reicht an diesem Tag deutlich tiefer in die Konstruktion als an den trockeneren Wintertagen. Besonders auffällig ist, dass auch die Holzfaserdämmplatte, die sonst durch ihre poröse Struktur einen gewissen Schutz vor Durchfeuchtung bietet, an diesem Tag ein hohes Feuchteniveau aufweist. Dies spricht für eine gesättigte Feuchteaufnahme durch äußere Einwirkungen wie Schlagregen, hohe Umgebungsfeuchte oder reduzierte Verdunstung. Die hohe Feuchtebelastung an diesem Tag verdeutlicht, dass die Kombination aus diffusionsoffenen und kapillaraktiven Materialien zwar grundsätzlich in der Lage ist, Feuchte aufzunehmen und zwischenzuspeichern, jedoch unter außergewöhnlich feuchten Bedingungen an ihre Kapazitätsgrenzen gelangen kann. In derartigen Fällen ist ein funktionierendes Austrocknungsverhalten nach der Belastung entscheidend, um langfristige Materialschäden oder Risiken durch Schimmelbildung zu vermeiden.

Kritische Bewertung der Feuchte- und Temperaturverläufe im Winter

Die Auswertung der Temperaturverläufe zeigt, dass die Temperaturen in der Dämmebene, insbesondere an der Grenze zwischen Außenwand und Kalziumsilikatdämmung, an sehr kalten Tagen bis unter -10°C absinken können. Gleichzeitig belegen die Feuchteverläufe, dass in denselben Bereichen die relative Luftfeuchte über weite Strecken oberhalb von 90% liegt. Dieser Befund ist aus bauphysikalischer Sicht kritisch, da sich hohe relative Luftfeuchte bei Temperaturen unter dem Gefrierpunkt mit einem erhöhten Risiko für Tauwasserbildung und nachfolgende Eisbildung verbindet. Sobald die Temperatur im Bauteil unter den Taupunkt der enthaltenen Feuchte sinkt, kondensiert Wasserdampf zunächst zu flüssigem Wasser und gefriert dann zu Eis. Dieser Zustand kann zu Materialschäden führen. Besonders

problematisch ist, dass die hohen relativen Feuchten nicht an der kalten Außenseite, sondern innerhalb der Dämmebene auftreten. Dies weist auf eine verlagerte Taupunktlage innerhalb des Wandaufbaus hin, was ein typisches Risiko bei Innendämmungen ist.

Fazit

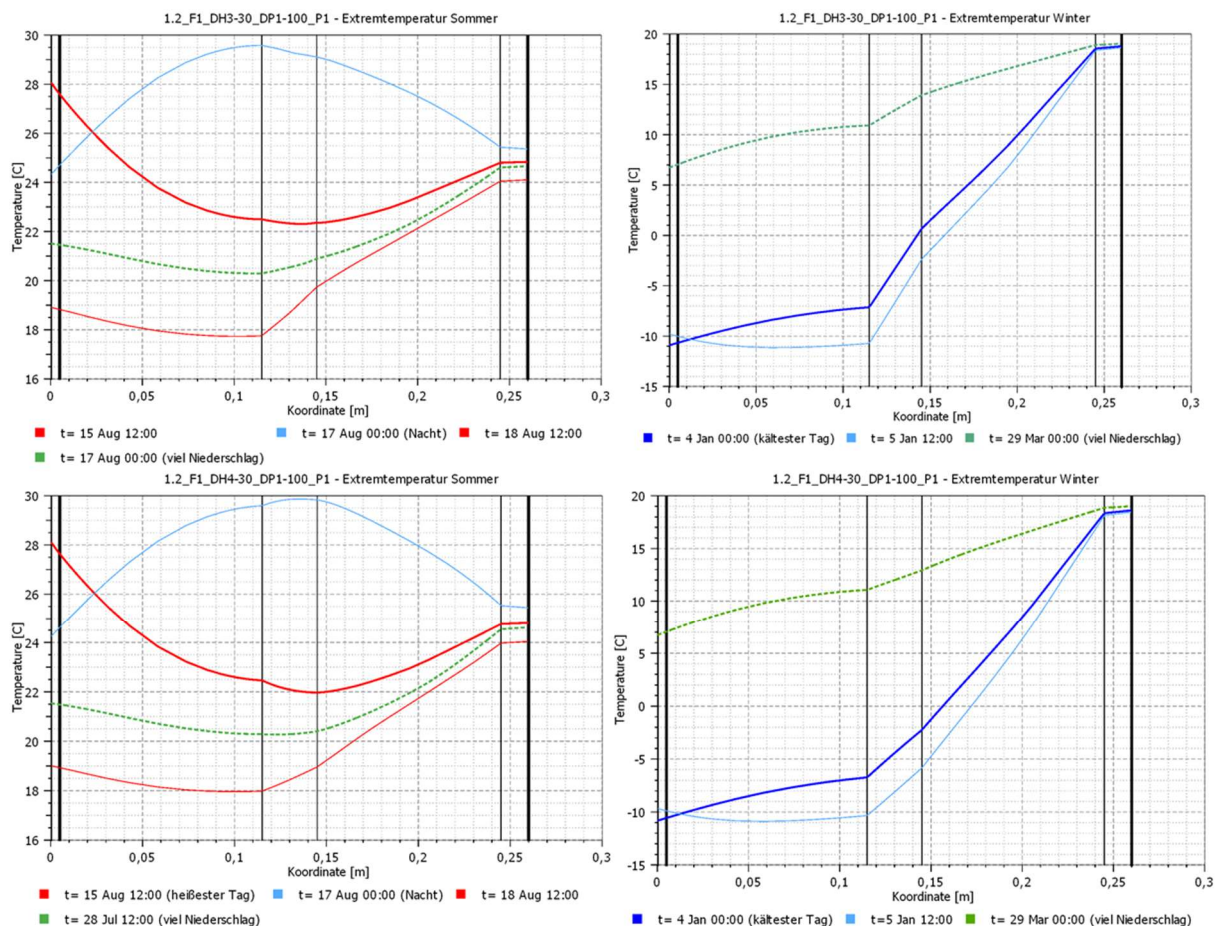
Die Wandkonstruktion mit Kalziumsilikat und Holzfaserdämmung bietet eine gute thermische Performance, zeigt jedoch im Winter potenzielle Feuchterisiken im Bereich der Bestandswand-Kalziumsilikat-Schnittstelle. Um Schäden durch Feuchteakkumulation zu vermeiden, sollten geeignete Maßnahmen zur Feuchtekontrolle und Außenschutzverbesserung in Betracht gezogen werden.

Temperaturgradienten DH3 und DH4

Die Abbildung 47 zeigt die Temperaturgradienten zu extremen Temperaturen an verschiedenen Tagen im Sommer und Winter. Die Grafik dient dem Vergleich der ausgewählten Materialien. Es ist zu erkennen, dass die Temperaturgradienten der iQ-Therm Dämmung (DH3) im Vergleich zu Kalziumsilikat (DH1) und Korkdämmlehm (DH4) einen deutlich steileren Temperaturverlauf aufweisen.

Dieser Unterschied zeigt, dass iQ-Therm einen größeren Teil des Temperaturabfalls bereits innerhalb der eigenen Materialdicke abfängt, was durch die geringe Wärmeleitfähigkeit zu erklären ist. Außerdem lässt sich erkennen, dass die Temperaturen an der Innenseite der Innenwand bei allen drei Varianten relativ ähnlich sind. Das zeigt, dass die Holzfaserdämmung unabhängig vom vorgelagerten Dämmmaterial zu einem Temperatursgleich beiträgt und das Temperaturniveau auf der Innenseite weitgehend stabil hält.

Abbildung 47: Temperaturgradienten der iQ-Therm-Variante oben und der Korkdämmlehm-Variante unten



Feuchtegradienten DH3 und DH4

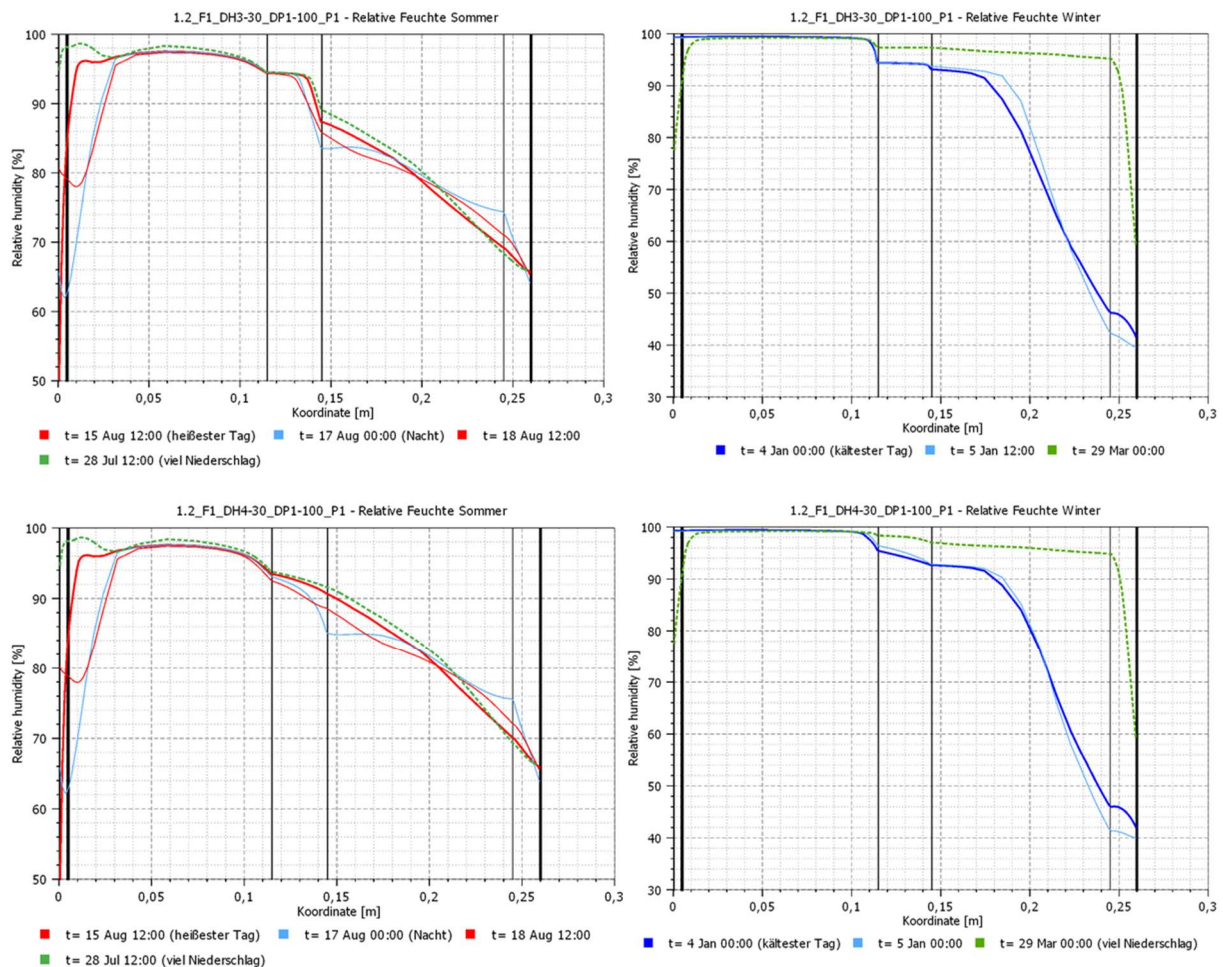
Der Vergleich der Feuchtegradienten in den hygrischen Materialien in Abbildung 48 zeigt deutliche Unterschiede im Feuchteverhalten der untersuchten Dämmstoffe. Während Kalziumsilikat durch einen fast waagerechten Gradienten gekennzeichnet ist, verlaufen die Feuchtekurven von iQ-Therm (DH3) und der Korkdämmlehmplatte sichtbar steiler, insbesondere im Sommer. Das weist darauf hin, dass sich die relative Luftfeuchte über die Materialdicke hinweg stark verändert. Das bedeutet, dass das Material entweder eine begrenzte Feuchtaufnahme aufweist oder dass es den Feuchtetransport nur eingeschränkt zulässt.

Im Fall von iQ-Therm lässt der besonders steile Abfall der Feuchtekurven darauf schließen, dass dieses Material eine eher diffusionshemmende oder kapillar inaktive Wirkung besitzt. Die Feuchte wird zwar an der Grenzfläche aufgenommen, aber nicht tief in das Material hinein verteilt. Dadurch besteht das Risiko, dass sich Feuchte an der Materialgrenze ansammelt, was insbesondere bei längerer Durchfeuchtung oder ungünstigen klimatischen Bedingungen kritisch werden kann.

Im Gegensatz dazu zeigt Kalziumsilikat einen flacheren Verlauf der Feuchtekurve, was auf ein kapillar aktives Verhalten schließen lässt. Die Feuchte wird gleichmäßiger über die gesamte Materialdicke verteilt, was eine puffernde Wirkung erzeugt. Diese gleichmäßige Verteilung begünstigt sowohl die kurzfristige Aufnahme als auch die nachfolgende Abgabe von Feuchtigkeit und trägt somit zur Stabilisierung des Feuchtehaushalts innerhalb der Konstruktion bei.

Insgesamt lässt sich feststellen, dass steile Feuchtegradienten auf eine eingeschränkte Feuchtereulation und potenzielle Feuchtestaus an den Schichtgrenzen hindeuten können, während flache Gradienten ein ausgeglicheneres und bauphysikalisch günstigeres Feuchteverhalten anzeigen.

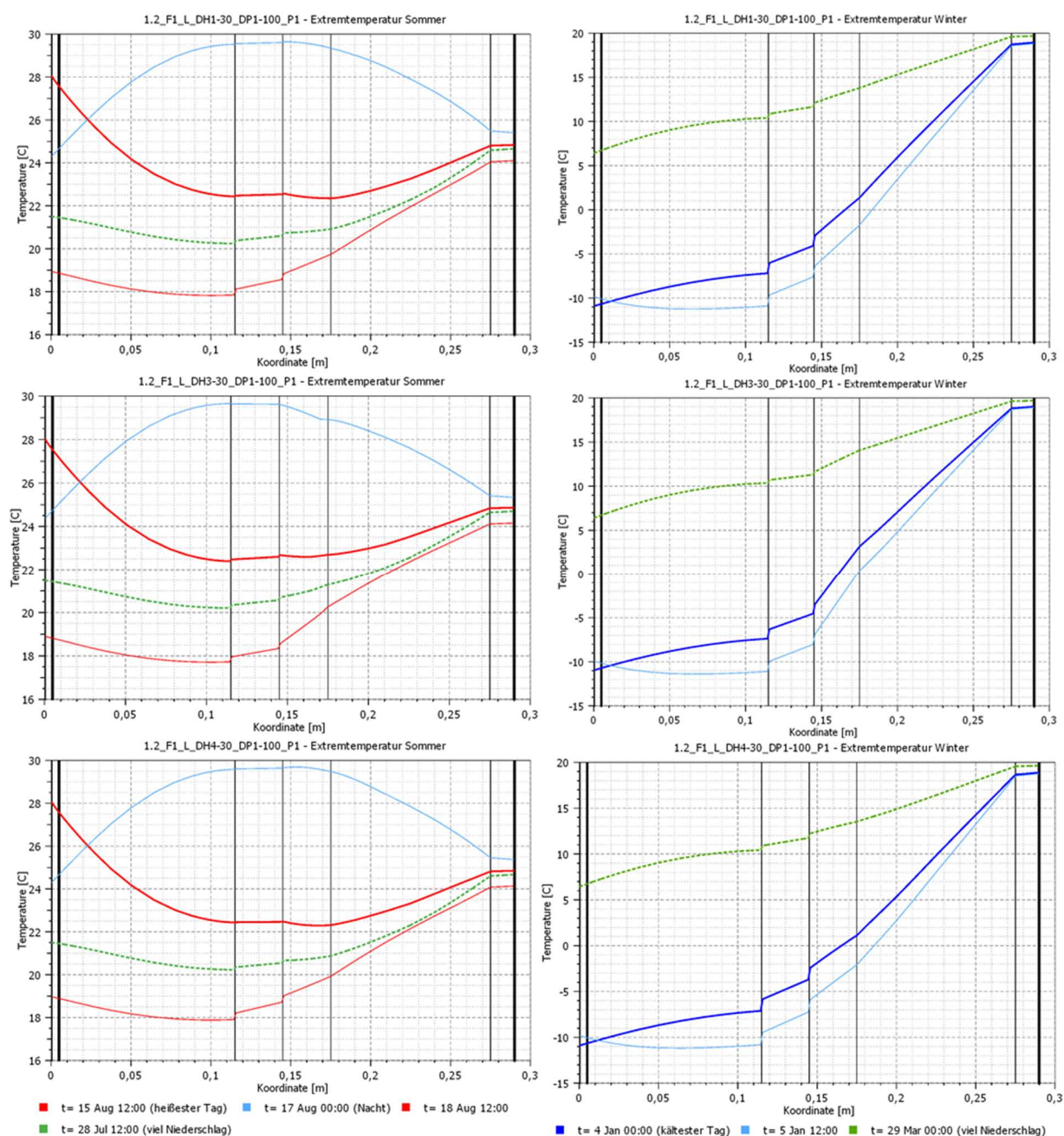
Abbildung 48: Feuchtgradienten der iQ-Therm-Variante oben und der Korkdämmlehm-Variante unten



Temperaturverläufe im Sommer und Winter mit Luftschicht

Die Abbildung 49 zeigt die Temperaturgradienten der drei ausgewählten Schichtkombinationen mit einer Luftschicht im Sommer und im Winter an verschiedenen Tagen mit extremen Temperaturen bzw. mit viel Niederschlag. Es ist zu erkennen, dass die Luftschicht zu einem leicht erhöhten Temperaturniveau in der Dämmebene zwischen der hygrysch aktiven Dämmschicht und der Holzfaserdämmung führt. Dieser Effekt tritt sowohl im Sommer als auch im Winter auf und deutet auf eine gewisse Verzögerung des Wärmetransports durch die Luftschicht hin. Auffällig ist jedoch, dass die Temperatur auf der Innenseite der Wandkonstruktion bei allen Varianten nahezu identisch ist. Das verdeutlicht die hohe Ausgleichs- und Dämpfungswirkung der nachfolgenden Holzfaserdämmung, welche die Temperaturunterschiede unabhängig von der Luftschicht ausgleicht.

Abbildung 49: Temperaturgradienten der drei ausgewählten Varianten mit Luftschicht

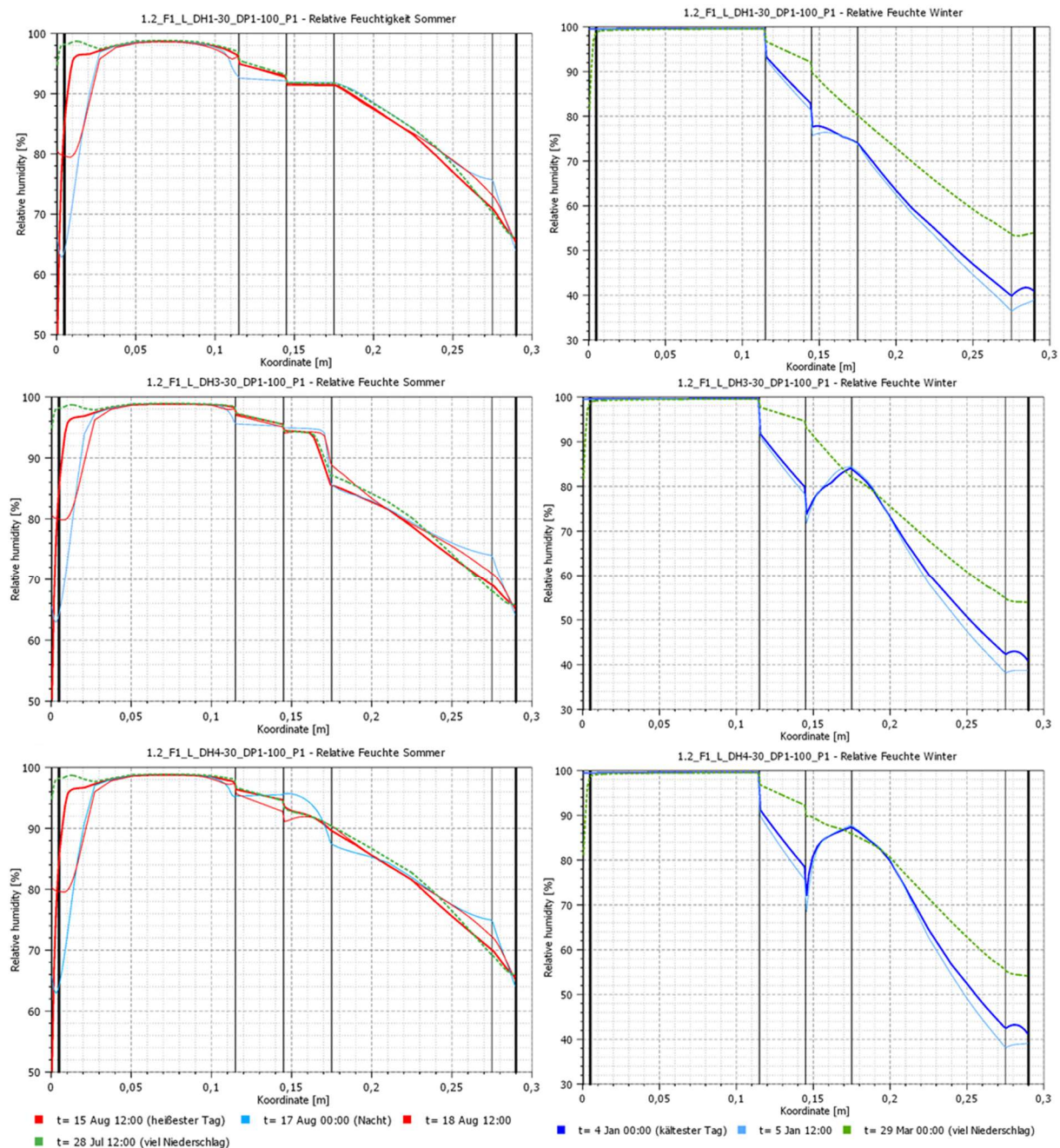


Feuchteverläufe im Sommer und Winter mit Luftschicht

Im Sommer zeigen die Wandaufbauten mit Luftschicht in Abbildung 50 einen ähnlichen Feuchteverlauf wie die Varianten ohne Luftschicht, wobei die relative Luftfeuchte geringfügig erhöht ist. Deutlichere Unterschiede treten hingegen im Winter auf. Hier ist in der Luftschicht ein starker Abfall der relativen Feuchte zu beobachten, gefolgt von einem raschen Anstieg in den angrenzenden hygrischen Materialien, insbesondere bei iQ-Therm und Korkdämmlehm. Das weist darauf hin, dass die Luftschicht als Trennebene wirkt und die kontinuierliche Feuchteaufnahme bzw. -verteilung unterbricht. Die hygrischen Materialien zeigen in diesem Fall eine eingeschränkte Fähigkeit zur Pufferspeicherung oder eine verzögerte Feuchtedurchleitung. Kalziumsilikat hingegen weist eine vergleichsweise flache Feuchtekurve auf. Dies deutet auf eine gleichmäßige und effektive Aufnahme und Verteilung der Feuchtigkeit im Material hin. Auch nach längerer Feuchtebelastung bleibt diese Eigenschaft erhalten, wie

an den grünen Kurvenverläufen zu erkennen ist. Auffällig ist jedoch, dass die Außenwand im Winter nahezu vollständig durchfeuchtet ist (r. F. nahe 100 %), was in Kombination mit sehr niedrigen Temperaturen ein erhöhtes Risiko für Frostschäden in der äußeren Schicht darstellt.

Abbildung 50: Feuchtgradienten der ausgewählten Varianten mit Luftschicht



Fazit

Die Integration einer Luftschicht beeinflusst die hygrothermische Performance der untersuchten Wandaufbauten. Während die Luftschicht thermisch eine leicht dämmende Wirkung zeigt, reduziert sie gleichzeitig den direkten Feuchteaustausch zwischen den hygrischen Materialien. Das kann, je nach Materialeigenschaft, zu unerwünschten Feuchteakkumulationen führen. Besonders in den Varianten mit iQ-Therm und Korkdämmlehm ist im Winter eine geringere Feuchteaufnahme zu beobachten, was auf eine eingeschränkte Dampfdurchlässigkeit zurückzuführen ist (μ -Werte: 27,0 bzw. 28,0). Kalziumsilikat

zeigt in diesem Zusammenhang eine deutlich bessere Dampfdurchlässigkeit (μ -Wert: 3,6). Die Außenwand bleibt jedoch unabhängig vom Dämmmaterial ein kritischer Bereich hinsichtlich Durchfeuchtung und Frostgefährdung.

3.3.7 Kostenanalyse

Neben der bauphysikalischen Eignung und der ökologischen Bewertung spielt die Wirtschaftlichkeit eine zentrale Rolle bei der Auswahl geeigneter Innendämmsysteme im Gebäudebestand. Im Rahmen der Kostenanalyse werden die untersuchten Materialkombinationen hinsichtlich ihrer Gesamtkosten (Materialkosten und Arbeitskosten) miteinander verglichen. Ziel ist es, herauszufinden, welche Varianten nicht nur funktional und nachhaltig, sondern auch wirtschaftlich tragfähig sind.

Im Rahmen der Kostenanalyse zeigt sich, dass sich die untersuchten Dämmmaterialien nicht nur in ihrer bauphysikalischen und ökologischen Wirkung unterscheiden, sondern auch deutliche Unterschiede in den Gesamtkosten, bestehend aus Material- und Arbeitskosten, aufweisen.

Die Materialkosten basieren auf Internetrecherchen in verschiedenen Baushops zum Stand Oktober 2023. Die dort in brutto angegebenen Kosten wurden auf den Nettopreis heruntergerechnet. Außerdem wurden die Arbeitskosten ergänzt. Dafür wurden 56 €/h netto, basierend auf Erfahrungswerten aus der Praxis, angenommen. Die Arbeitskosten wurden je nach Aufwand für die Anbringung der Dämmplatten zwischen 0,5 h/m² und 1,0 h/m² variiert. Für Kalziumsilikat wurden 0,5 h/m² gewählt, da die Plattengröße 1 m² beträgt, und die Anbringung daher weniger Arbeitsschritte pro Quadratmeter benötigt. Ebenso bei den Holzfaserdämmplatten. Diese haben ein großes Format, wodurch die Anbringung einfach und schnell geht. Für iQ-Therm wurde 0,8 h/m² angesetzt, da die Platten mit 0,15 m² pro Platte ein schmales und längliches Format haben, was mehr Handgriffe für die Anbringung bedeutet. Alle weiteren Materialien liegen im mittleren Bereich. Die Abbildung 51 zeigt beispielhaft die Materialien Korkdämmlehm (links), iQ-Therm (Mitte) und Kalziumsilikat (rechts) für einen etwa 1 m² großen Wandabschnitt.

Abbildung 51: Darstellung verschiedener Plattengrößen; links: Korkdämmlehm, mittig: iQ-Therm, rechts: Kalziumsilikat



Der Kostenvergleich in Abbildung 52 zeigt, dass Kalziumsilikatplatten, die bei zunehmender Schichtdicke stark an Materialkosten zulegen, am kostenintensivsten sind. So liegt der Materialpreis bei 30 mm bei 45 €/m², bei 80 mm sogar bei 115 €/m². Die Arbeitskosten bleiben niedrig, da die Platten mit 1 m² pro Platte eine schnelle Anbringung ermöglichen. Durch die hohen Materialkosten ergeben sich jedoch hohe Gesamtkosten, besonders bei dickeren Schichten.

Insgesamt am zweit teuersten ist das Material iQ-Therm. Durch die spezielle Form der Dämmplatten sind die Arbeitskosten im Vergleich etwas höher. Die Kombination aus Material- und Arbeitskosten führt zu einer vergleichsweise teuren Gesamtlösung.

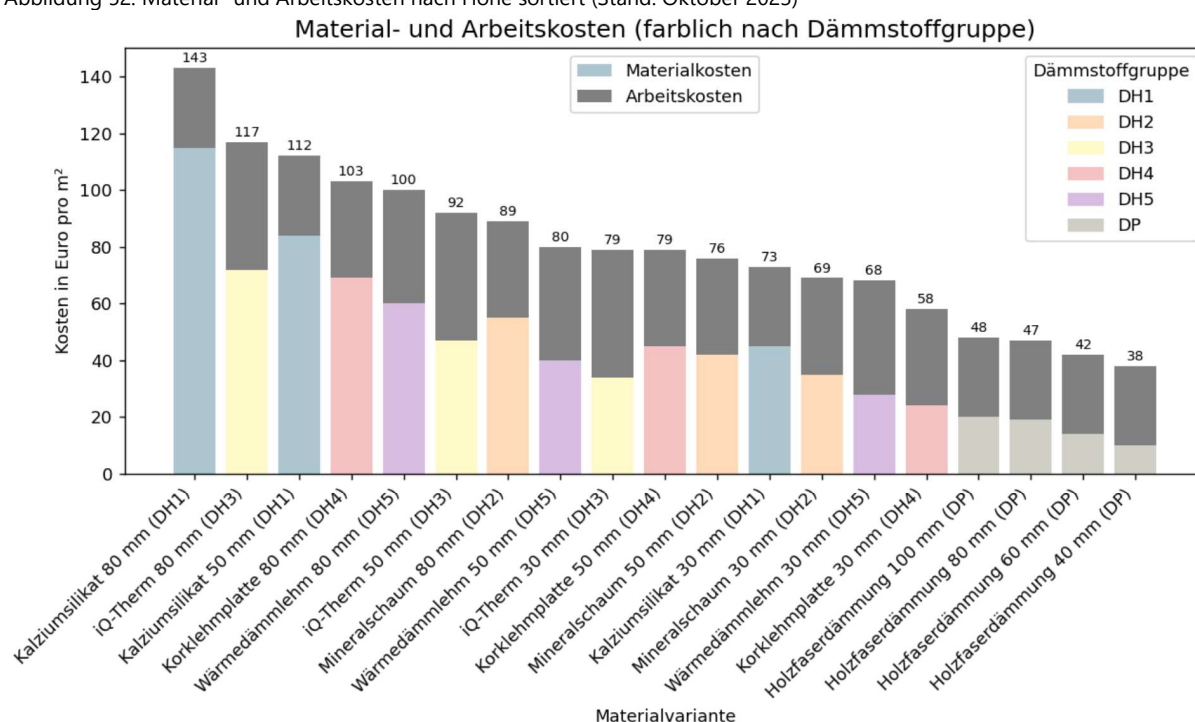
Korkdämmlehmplatten sind bei 30 mm Dämmstärke das günstigste hygrothermische Material, liegen jedoch bei größeren Dämmstärken im mittleren bis teuren Bereich. Damit zählt diese Variante bei 30 mm Schichtdicke zu den wirtschaftlich attraktiveren Lösungen.

Wärmedämmlehm liegt mit 28 €/m² bis 60 €/m² im mittleren Kostenbereich, verursacht aber durch eine aufwändigere Verarbeitung erhöhte Arbeitskosten. Die Gesamtkosten bleiben dennoch moderat.

Mineralschaumplatten bieten einen guten Kompromiss: Die Materialkosten liegen mit 35 €/m² bis 55 €/m² im mittleren Bereich und auch die Arbeitskosten sind im mittleren Bereich, was sie zu einer wirtschaftlich interessanten Option macht.

Holzfaserdämmplatten sind im Vergleich mit den hygrisch aktiven Dämmstoffen am günstigsten. Die Materialkosten steigen von 10 €/m² bei 40 mm auf maximal 20 €/m² bei 100 mm. Auch die Arbeitskosten sind durch ihre gute Verarbeitbarkeit in großformatigen Platten im Vergleich niedrig.

Abbildung 52: Material- und Arbeitskosten nach Höhe sortiert (Stand: Oktober 2023)



Insgesamt zeigt der Vergleich, dass sich durch die Wahl des Dämmmaterials erhebliche Unterschiede bei den Kosten ergeben. Materialien wie Kalziumsilikat und iQ-Therm sind funktional überzeugend, aber deutlich teurer in der Anschaffung und Verarbeitung. Varianten mit Korkdämmlehm oder Mineralschaum bieten hingegen ein günstigeres Kosten-Nutzen-Verhältnis. Der Vergleich zeigt auch, dass sich durch dünnere Schichtdicken der hygrisch aktiven Dämmung Einsparpotenziale ergeben. In Kombination mit der günstigen Holzfaserdämmung kann somit trotz geringer Schichtdicke der hygrischen Dämmung eine gute Dämmwirkung erzielt werden.

3.3.8 U-Wert-Analyse und Mindestanforderungen an den Wärmeschutz

Die energetische Qualität von Gebäuden unterliegt in Deutschland einer Vielzahl von Anforderungen, die sicherstellen sollen, dass Wärmeverluste minimiert und die Energieeffizienz von Bestandsbauten erhalten oder verbessert wird. Insbesondere das Gebäudeenergiegesetz (GEG) legt in den §§ 46 und 48 klare Vorgaben für den Wärmeschutz von Außenbauteilen bei Bestandsgebäuden fest. Während § 46 eine Verschlechterung der energetischen Qualität durch bauliche Veränderungen untersagt, fordert § 48,

dass erneuerte oder erstmalig eingebaute Außenbauteile die in Anlage 7 des GEG definierten Höchstwerte für den Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) nicht überschreiten. Für Außenwände liegt dieser Grenzwert derzeit bei $0,24 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Neben den gesetzlichen Anforderungen des GEG sind weitere normative und förderrechtliche Mindestanforderungen an den Wärmeschutz zu beachten. So fordert die DIN 4108-2 einen Mindestwärmeschutz mit einem U-Wert von maximal $0,73 \text{ W/m}^2\text{K}$ (R -Wert nach Tabelle 3 = $1,2 \text{ K/W}$ inklusive R_{si} und R_{se}), während die Bundesförderung für effiziente Gebäude (BEG) differenzierte Anforderungen stellt. Für sichtbares Fachwerk liegt der geforderte Mindest-U-Wert bei $0,65 \text{ W/m}^2\text{K}$, während für besonders erhaltenswerte Bausubstanz ein strengerer Wert von $0,45 \text{ W/m}^2\text{K}$ angesetzt wird (BMWK, 2023).

Im Denkmalschutz gibt es laut GEG § 105 Abs.1 für Baudenkmäler oder besonders geschützte Bausubstanz keine Anforderungen des GEG, die eingehalten werden müssen. Da sich dieses Projekt aber nicht nur auf denkmalgeschützte Gebäude bezieht, muss auch die Einhaltung von Mindestanforderungen geprüft werden.

Die Tabelle 10 gibt einen Überblick über die jeweiligen Schichtdicken der Dämmstoffe, die resultierenden U-Werte der gedämmten Wände sowie die geforderten Mindest-U-Werte gemäß den verschiedenen Richtlinien. Die Tabelle zeigt, dass kaum eine Variante die Mindestanforderung des GEG mit $0,24 \text{ W/m}^2\text{K}$ erreichen kann. Hier zeigt sich der Vorteil des Materials iQ-Therm, das aufgrund seiner gut dämmenden Materialeigenschaft, mit jeweils vier Schichtkombinationen die Anforderung des GEG erfüllt.

Die Mindestanforderung an erhaltenswerte Bausubstanz von $0,45 \text{ W/m}^2\text{K}$ erreichen wiederum die meisten Schichtkombinationen aller Materialien, abgesehen von den Varianten mit drei Zentimeter hygrischer Dämmung und vier Zentimeter Holzfaserdämmung. Lediglich iQ-Therm erreicht auch in diesen geringen Dicken den geforderten Wert.

Die Mindest-U-Werte nach BEG-Einzelmaßnahmen für erhaltenswertes Sichtfachwerk und den Mindestwärmeschutz nach DIN 4108-2 erreichen hingegen alle Schichtkombinationen. Hier zeigt sich der Vorteil der Schichtkombinationen im Vergleich zu einschichtiger Innendämmung. Im Vergleich dazu erreichen nur wenige Varianten mit einer einzelnen Dämmschicht die jeweiligen Mindestanforderungen.

Beim Vergleich der U-Werte innerhalb der einschichtigen hygrischen Dämmmaterialien schneiden insbesondere iQ-Therm und die Mineraldämmplatte am besten ab. Jedoch ist auch bei diesen Materialien eine minimale Dämmstärke von 50 mm erforderlich, um den Mindestwärmeschutz zu erreichen. Bei der einschichtigen Holzfaserdämmung wird der Mindestwärmeschutz in allen Dicken erfüllt, jedoch erreicht keine Variante die strengen Anforderungen des GEG.

3.3 Materialanalyse (Simulation 1)

Tabelle 10: Schichtdicken und U-Werte der untersuchten Schichtkombinationen

Variante	Kosten [€/m²]	Schichtdi- cke [cm]	U-Wert [W/(m²K)]	Mindest-U-Werte [W/(m²K)]			
				0,73	0,65	0,45	0,24
1.3_F1_DH1-30_DP1-40_P1	163,00 €	7,0	0,50	ok	ok	x	x
1.3_F1_DH1-30_DP1-60_P1	167,00 €	9,0	0,40	ok	ok	ok	x
1.3_F1_DH1-30_DP1-80_P1	172,00 €	11,0	0,33	ok	ok	ok	x
1.3_F1_DH1-30_DP1-100_P1	173,00 €	13,0	0,28	ok	ok	ok	x
1.3_F1_DH1-50_DP1-40_P1	202,00 €	9,0	0,42	ok	ok	ok	x
1.3_F1_DH1-50_DP1-60_P1	206,00 €	11,0	0,35	ok	ok	ok	x
1.3_F1_DH1-50_DP1-80_P1	211,00 €	13,0	0,30	ok	ok	ok	x
1.3_F1_DH1-50_DP1-100_P1	212,00 €	15,0	0,26	ok	ok	ok	x
1.3_F1_DH1-80_DP1-40_P1	233,00 €	12,0	0,35	ok	ok	ok	x
1.3_F1_DH1-80_DP1-60_P1	237,00 €	14,0	0,30	ok	ok	ok	x
1.3_F1_DH1-80_DP1-80_P1	242,00 €	16,0	0,26	ok	ok	ok	x
1.3_F1_DH1-80_DP1-100_P1	243,00 €	18,0	0,23	ok	ok	ok	ok
1.3_F1_LDH1-30_DP1-40_P1	168,00 €	10,0	0,46	ok	ok	x	x
1.3_F1_LDH1-30_DP1-60_P1	172,00 €	12,0	0,37	ok	ok	ok	x
1.3_F1_LDH1-30_DP1-80_P1	177,00 €	14,0	0,31	ok	ok	ok	x
1.3_F1_LDH1-30_DP1-100_P1	178,00 €	16,0	0,27	ok	ok	ok	x
1.3_F1_LDH1-50_DP1-40_P1	211,00 €	12,0	0,39	ok	ok	ok	x
1.3_F1_LDH1-50_DP1-60_P1	207,00 €	14,0	0,33	ok	ok	ok	x
1.3_F1_LDH1-50_DP1-80_P1	216,00 €	16,0	0,28	ok	ok	ok	x
1.3_F1_LDH1-50_DP1-100_P1	217,00 €	18,0	0,25	ok	ok	ok	x
1.3_F1_LDH1-80_DP1-40_P1	238,00 €	15,0	0,33	ok	ok	ok	x
1.3_F1_LDH1-80_DP1-60_P1	242,00 €	17,0	0,28	ok	ok	ok	x
1.3_F1_LDH1-80_DP1-80_P1	247,00 €	19,0	0,25	ok	ok	ok	x
1.3_F1_LDH1-80_DP1-100_P1	248,00 €	21,0	0,22	ok	ok	ok	ok
1.3_F1_DH2-30_DP1-40_P1	159,00 €	7,0	0,47	ok	ok	x	x
1.3_F1_DH2-30_DP1-60_P1	163,00 €	9,0	0,38	ok	ok	ok	x
1.3_F1_DH2-30_DP1-80_P1	168,00 €	11,0	0,32	ok	ok	ok	x
1.3_F1_DH2-30_DP1-100_P1	169,00 €	13,0	0,27	ok	ok	ok	x
1.3_F1_DH2-50_DP1-40_P1	166,00 €	9,0	0,39	ok	ok	ok	x
1.3_F1_DH2-50_DP1-60_P1	170,00 €	11,0	0,33	ok	ok	ok	x
1.3_F1_DH2-50_DP1-80_P1	175,00 €	13,0	0,28	ok	ok	ok	x
1.3_F1_DH2-50_DP1-100_P1	176,00 €	15,0	0,25	ok	ok	ok	x
1.3_F1_DH2-80_DP1-40_P1	179,00 €	12,0	0,31	ok	ok	ok	x
1.3_F1_DH2-80_DP1-60_P1	183,00 €	14,0	0,27	ok	ok	ok	x
1.3_F1_DH2-80_DP1-80_P1	188,00 €	16,0	0,24	ok	ok	ok	ok
1.3_F1_DH2-80_DP1-100_P1	189,00 €	18,0	0,21	ok	ok	ok	ok
1.3_F1_LDH2-30_DP1-40_P1	164,00 €	10,0	0,43	ok	ok	ok	x
1.3_F1_LDH2-30_DP1-60_P1	168,00 €	12,0	0,35	ok	ok	ok	x
1.3_F1_LDH2-30_DP1-80_P1	173,00 €	14,0	0,30	ok	ok	ok	x
1.3_F1_LDH2-30_DP1-100_P1	174,00 €	16,0	0,26	ok	ok	ok	x
1.3_F1_LDH2-50_DP1-40_P1	171,00 €	12,0	0,36	ok	ok	ok	x
1.3_F1_LDH2-50_DP1-60_P1	175,00 €	14,0	0,31	ok	ok	ok	x
1.3_F1_LDH2-50_DP1-80_P1	180,00 €	16,0	0,27	ok	ok	ok	x
1.3_F1_LDH2-50_DP1-100_P1	181,00 €	18,0	0,24	ok	ok	ok	ok
1.3_F1_LDH2-80_DP1-40_P1	184,00 €	15,0	0,29	ok	ok	ok	x
1.3_F1_LDH2-80_DP1-60_P1	188,00 €	17,0	0,26	ok	ok	ok	x
1.3_F1_LDH2-80_DP1-80_P1	193,00 €	19,0	0,23	ok	ok	ok	ok
1.3_F1_LDH2-80_DP1-100_P1	194,00 €	21,0	0,20	ok	ok	ok	ok

Variante	Kosten [€/m²]	Schichtdi- cke [cm]	U-Wert [W/(m²K)]	Mindest-U-Werte [W/(m²K)]			
				0,73	0,65	0,45	0,24
1.3_F1_DH3-30_DP1-40_P1	169,00 €	7,0	0,43	ok	ok	ok	x
1.3_F1_DH3-30_DP1-60_P1	173,00 €	9,0	0,35	ok	ok	ok	x
1.3_F1_DH3-30_DP1-80_P1	178,00 €	11,0	0,30	ok	ok	ok	x
1.3_F1_DH3-30_DP1-100_P1	179,00 €	13,0	0,26	ok	ok	ok	x
1.3_F1_DH3-50_DP1-40_P1	182,00 €	9,0	0,35	ok	ok	ok	x
1.3_F1_DH3-50_DP1-60_P1	186,00 €	11,0	0,30	ok	ok	ok	x
1.3_F1_DH3-50_DP1-80_P1	191,00 €	13,0	0,26	ok	ok	ok	x
1.3_F1_DH3-50_DP1-100_P1	192,00 €	15,0	0,23	ok	ok	ok	ok
1.3_F1_LDH3-80_DP1-40_P1	207,00 €	12,0	0,27	ok	ok	ok	x
1.3_F1_LDH3-80_DP1-60_P1	211,00 €	14,0	0,24	ok	ok	ok	ok
1.3_F1_LDH3-80_DP1-80_P1	216,00 €	16,0	0,21	ok	ok	ok	ok
1.3_F1_LDH3-80_DP1-100_P1	217,00 €	18,0	0,19	ok	ok	ok	ok
1.3_F1_LDH3-30_DP1-40_P1	174,00 €	10,0	0,40	ok	ok	ok	x
1.3_F1_LDH3-30_DP1-60_P1	178,00 €	12,0	0,33	ok	ok	ok	x
1.3_F1_LDH3-30_DP1-80_P1	183,00 €	14,0	0,29	ok	ok	ok	x
1.3_F1_LDH3-30_DP1-100_P1	184,00 €	16,0	0,25	ok	ok	ok	x
1.3_F1_LDH3-50_DP1-40_P1	187,00 €	12,0	0,33	ok	ok	ok	x
1.3_F1_LDH3-50_DP1-60_P1	191,00 €	14,0	0,28	ok	ok	ok	x
1.3_F1_LDH3-50_DP1-80_P1	196,00 €	16,0	0,25	ok	ok	ok	x
1.3_F1_LDH3-50_DP1-100_P1	197,00 €	18,0	0,22	ok	ok	ok	ok
1.3_F1_LDH3-80_DP1-40_P1	212,00 €	15,0	0,26	ok	ok	ok	x
1.3_F1_LDH3-80_DP1-60_P1	216,00 €	17,0	0,23	ok	ok	ok	ok
1.3_F1_LDH3-80_DP1-80_P1	221,00 €	19,0	0,21	ok	ok	ok	ok
1.3_F1_LDH3-80_DP1-100_P1	222,00 €	21,0	0,19	ok	ok	ok	ok
1.3_F1_DH4-30_DP1-40_P1	148,00 €	7,0	0,53	ok	ok	x	x
1.3_F1_DH4-30_DP1-60_P1	152,00 €	9,0	0,42	ok	ok	ok	x
1.3_F1_DH4-30_DP1-80_P1	157,00 €	11,0	0,35	ok	ok	ok	x
1.3_F1_DH4-30_DP1-100_P1	158,00 €	13,0	0,29	ok	ok	ok	x
1.3_F1_LDH4-50_DP1-40_P1	169,00 €	9,0	0,46	ok	ok	x	x
1.3_F1_LDH4-50_DP1-60_P1	173,00 €	11,0	0,38	ok	ok	ok	x
1.3_F1_LDH4-50_DP1-80_P1	178,00 €	13,0	0,32	ok	ok	ok	x
1.3_F1_LDH4-50_DP1-100_P1	179,00 €	15,0	0,27	ok	ok	ok	x
1.3_F1_LDH4-80_DP1-40_P1	193,00 €	12,0	0,39	ok	ok	ok	x
1.3_F1_LDH4-80_DP1-60_P1	197,00 €	14,0	0,33	ok	ok	ok	x
1.3_F1_LDH4-80_DP1-80_P1	202,00 €	16,0	0,28	ok	ok	ok	x
1.3_F1_LDH4-80_DP1-100_P1	203,00 €	18,0	0,25	ok	ok	ok	x
1.3_F1_LDH4-30_DP1-40_P1	153,00 €	10,0	0,48	ok	ok	x	x
1.3_F1_LDH4-30_DP1-60_P1	157,00 €	12,0	0,39	ok	ok	ok	x
1.3_F1_LDH4-30_DP1-80_P1	162,00 €	14,0	0,32	ok	ok	ok	x
1.3_F1_LDH4-30_DP1-100_P1	163,00 €	16,0	0,28	ok	ok	ok	x
1.3_F1_LDH4-50_DP1-40_P1	174,00 €	12,0	0,43	ok	ok	ok	x
1.3_F1_LDH4-50_DP1-60_P1	178,00 €	14,0	0,35	ok	ok	ok	x
1.3_F1_LDH4-50_DP1-80_P1	183,00 €	16,0	0,30	ok	ok	ok	x
1.3_F1_LDH4-50_DP1-100_P1	184,00 €	18,0	0,26	ok	ok	ok	x
1.3_F1_LDH4-80_DP1-40_P1	198,00 €	15,0	0,37	ok	ok	ok	x
1.3_F1_LDH4-80_DP1-60_P1	202,00 €	17,0	0,31	ok	ok	ok	x
1.3_F1_LDH4-80_DP1-80_P1	207,00 €	19,0	0,27	ok	ok	ok	x
1.3_F1_LDH4-80_DP1-100_P1	208,00 €	21,0	0,24	ok	ok	ok	ok

Variante	Kosten [€/m²]	Schichtdi- cke [cm]	U-Wert [W/(m²K)]	Mindest-U-Werte [W/(m²K)]			
				0,73	0,65	0,45	0,24
1.3_F1_DH5-30_DP1-40_P1	158,00 €	7,0	0,52	ok	ok	x	x
1.3_F1_DH5-30_DP1-60_P1	162,00 €	9,0	0,41	ok	ok	ok	x
1.3_F1_DH5-30_DP1-80_P1	167,00 €	11,0	0,34	ok	ok	ok	x
1.3_F1_DH5-30_DP1-100_P1	168,00 €	13,0	0,29	ok	ok	ok	x
1.3_F1_DH5-50_DP1-40_P1	170,00 €	9,0	0,46	ok	ok	x	x
1.3_F1_DH5-50_DP1-60_P1	174,00 €	11,0	0,37	ok	ok	ok	x
1.3_F1_DH5-50_DP1-80_P1	179,00 €	13,0	0,31	ok	ok	ok	x
1.3_F1_DH5-50_DP1-100_P1	180,00 €	15,0	0,27	ok	ok	ok	x
1.3_F1_LDH5-80_DP1-40_P1	190,00 €	12,0	0,39	ok	ok	ok	x
1.3_F1_LDH5-80_DP1-60_P1	194,00 €	14,0	0,32	ok	ok	ok	x
1.3_F1_LDH5-80_DP1-80_P1	199,00 €	16,0	0,28	ok	ok	ok	x
1.3_F1_LDH5-80_DP1-100_P1	200,00 €	18,0	0,24	ok	ok	ok	x
1.3_F1_LDH5-30_DP1-40_P1	163,00 €	10,0	0,48	ok	ok	x	x
1.3_F1_LDH5-30_DP1-60_P1	167,00 €	12,0	0,39	ok	ok	ok	x
1.3_F1_LDH5-30_DP1-80_P1	172,00 €	14,0	0,32	ok	ok	ok	x
1.3_F1_LDH5-30_DP1-100_P1	173,00 €	16,0	0,28	ok	ok	ok	x
1.3_F1_LDH5-50_DP1-40_P1	175,00 €	12,0	0,42	ok	ok	ok	x
1.3_F1_LDH5-50_DP1-60_P1	179,00 €	14,0	0,35	ok	ok	ok	x
1.3_F1_LDH5-50_DP1-80_P1	184,00 €	16,0	0,30	ok	ok	ok	x
1.3_F1_LDH5-50_DP1-100_P1	185,00 €	18,0	0,26	ok	ok	ok	x
1.3_F1_LDH5-80_DP1-40_P1	195,00 €	15,0	0,36	ok	ok	ok	x
1.3_F1_LDH5-80_DP1-60_P1	199,00 €	17,0	0,31	ok	ok	ok	x
1.3_F1_LDH5-80_DP1-80_P1	204,00 €	19,0	0,27	ok	ok	ok	x
1.3_F1_LDH5-80_DP1-100_P1	205,00 €	21,0	0,23	ok	ok	ok	ok

Variante	Kosten [€/m²]	Schichtdi- cke [cm]	U-Wert [W/(m²K)]	Mindest-U-Werte [W/(m²K)]			
				0,73	0,65	0,45	0,24
1.3_F1_DH1-30_P1	125,00 €	3,0	0,98	x	x	x	x
1.3_F1_DH1-50_P1	164,00 €	5,0	0,74	x	x	x	x
1.3_F1_DH1-80_P1	195,00 €	8,0	0,54	ok	ok	x	x
1.3_F1_DH2-30_P1	121,00 €	3,0	0,87	x	x	x	x
1.3_F1_DH2-50_P1	128,00 €	5,0	0,64	ok	ok	x	x
1.3_F1_DH2-80_P1	141,00 €	8,0	0,45	ok	ok	x	x
1.3_F1_DH3-30_P1	131,00 €	3,0	0,76	x	x	x	x
1.3_F1_DH3-50_P1	144,00 €	5,0	0,54	ok	ok	x	x
1.3_F1_DH3-80_P1	169,00 €	8,0	0,37	ok	ok	ok	x
1.3_F1_DH4-30_P1	110,00 €	3,0	1,12	x	x	x	x
1.3_F1_DH4-50_P1	131,00 €	5,0	0,87	x	x	x	x
1.3_F1_DH4-80_P1	155,00 €	8,0	0,65	ok	ok	x	x
1.3_F1_DH5-30_P1	120,00 €	3,0	1,10	x	x	x	x
1.3_F1_DH5-50_P1	132,00 €	5,0	0,85	x	x	x	x
1.3_F1_DH5-80_P1	152,00 €	8,0	0,63	ok	ok	x	x
1.3_F1_DP1-40_P1	90,00 €	4,0	0,66	ok	x	x	x
1.3_F1_DP1-60_P1	94,00 €	6,0	0,50	ok	ok	x	x
1.3_F1_DP1-80_P1	99,00 €	8,0	0,40	ok	ok	ok	x
1.3_F1_DP1-100_P1	100,00 €	10,0	0,33	ok	ok	ok	x

Tabelle 10 verdeutlicht, dass alle Schichtkombinationen den Anforderungswert des Mindestwärmeschutzes mit einem U-Wert von $0,73 \text{ W/m}^2\text{K}$ sowie den Anforderungswert für sichtbares Fachwerk nach BEG von $0,65 \text{ W/m}^2\text{K}$ erreichen. Dagegen ist bei einer einschichtigen Dämmung je nach Material eine Dicke von mindestens 50 bis 80 mm erforderlich, um den Mindestwärmeschutz zu gewährleisten. Den Anforderungswert von $0,24 \text{ W/m}^2\text{K}$ nach GEG würden nur wenige Schichtkombinationen mit hohen Dämmstärken erreichen.

Der Vergleich gemäß Tabelle 11 verdeutlicht die Vorteile des mehrschichtigen Aufbaus. Beide Varianten von DH1 (Kalziumsilikatplatte) erfüllen die Anforderungswerte an den Mindestwärmeschutz und für Sichtfachwerk, jedoch weist die Schichtkombination einen niedrigeren U-Wert auf, ermöglicht eine geringere Gesamtdicke des Bauteils und erfordert aufgrund des reduzierten Anteils an Kalziumsilikat niedrigere Kosten. Dieser Vorteil zeigt sich auch bei DH4 (Korkdämmlehmplatte). Bei dieser Variante kann der U-Wert durch die Schichtkombination deutlich verbessert werden und auch die Kosten sind niedriger. Bei DH2 (Mineralschaum) sind die Kosten der U-Wert für die einschichtige Variante geringer. Bei DH3 (iQ-Therm) sind die Kosten gleich, der U-Wert der einschichtigen Variante jedoch besser und bei DH5 (Wärmedämmlehm) ist der U-Wert der Schichtkombination besser, diese Variante ist jedoch teurer als die einschichtige.

Tabelle 11: Vergleich der U-Werte von Schichtkombinationen mit einschichtiger Dämmung

Variante	Kosten [€/m ²]	Schicht dicke [mm]	Mindest-U-Werte				
			U-Wert	0,73	0,65	0,45	0,24
1.3_F1_DH1-30_DP1-40_P1	163,00 €	7,0	0,50	ok	ok	x	x
1.3_F1_DH1-80_P1	195,00 €	8,0	0,54	ok	ok	x	x
1.3_F1_DH2-30_DP1-40_P1	159,00 €	7,0	0,47	ok	ok	x	x
1.3_F1_DH2-80_P1	141,00 €	8,0	0,45	ok	ok	x	x
1.3_F1_DH3-30_DP1-40_P1	169,00 €	7,0	0,43	ok	ok	ok	x
1.3_F1_DH3-80_P1	169,00 €	8,0	0,37	ok	ok	ok	x
1.3_F1_DH4-30_DP1-40_P1	148,00 €	7,0	0,53	ok	ok	x	x
1.3_F1_DH4-80_P1	155,00 €	8,0	0,65	ok	ok	x	x
1.3_F1_DH5-30_DP1-40_P1	158,00 €	7,0	0,52	ok	ok	x	x
1.3_F1_DH5-80_P1	152,00 €	8,0	0,63	ok	ok	x	x

Die Ergebnisse der Analyse belegen, dass kombinierte Schichtaufbauten im Vergleich zu einschichtigen Lösungen sowohl hinsichtlich der thermischen Effizienz als auch in Bezug auf Materialeinsatz und Wirtschaftlichkeit Vorteile bieten können. Zwar können energetische Anforderungen auch mit einschichtigen, rein hygrischen Dämmstoffen erfüllt werden, hierfür sind jedoch oft größere Dämmstärken erforderlich und je nach Material auch höhere Kosten.

Die maximale Auslegung der Dämmstärke bei Innendämmungen wird maßgeblich von bauphysikalischen, räumlichen und wirtschaftlichen Faktoren bestimmt. Besonders das Feuchteverhalten stellt eine zentrale Herausforderung dar, da bei unzureichender Planung Bauschäden entstehen können. Damit wird deutlich, dass die Planung von Innendämmsystemen stets eine differenzierte Betrachtung des Gesamtsystems erfordert. Pauschale Aussagen zur optimalen Dämmstärke sind nicht möglich. Vielmehr ist eine individuelle, objektbezogene Auslegung notwendig, bei der bauphysikalische Sicherheit, gestalterische Anforderungen und wirtschaftliche Effizienz in Einklang gebracht werden.

3.4 Experimentelle Untersuchungen an Testfassaden

Die bisherigen Testfassadenprüfstände aus der Vorlaufforschung wurden durch neue Konstruktionen ersetzt. In diesen weiterentwickelten Prüfständen wurden zwei zusätzliche hygrische

Materialkombinationen messtechnisch untersucht, um deren Verhalten unter realen klimatischen Bedingungen zu erfassen. Die gewonnenen Messdaten dienen darüber hinaus der Validierung der zuvor erstellten Simulationsmodelle.

3.4.1 Hygrothermische Simulation der Testfassaden (Simulation 2)

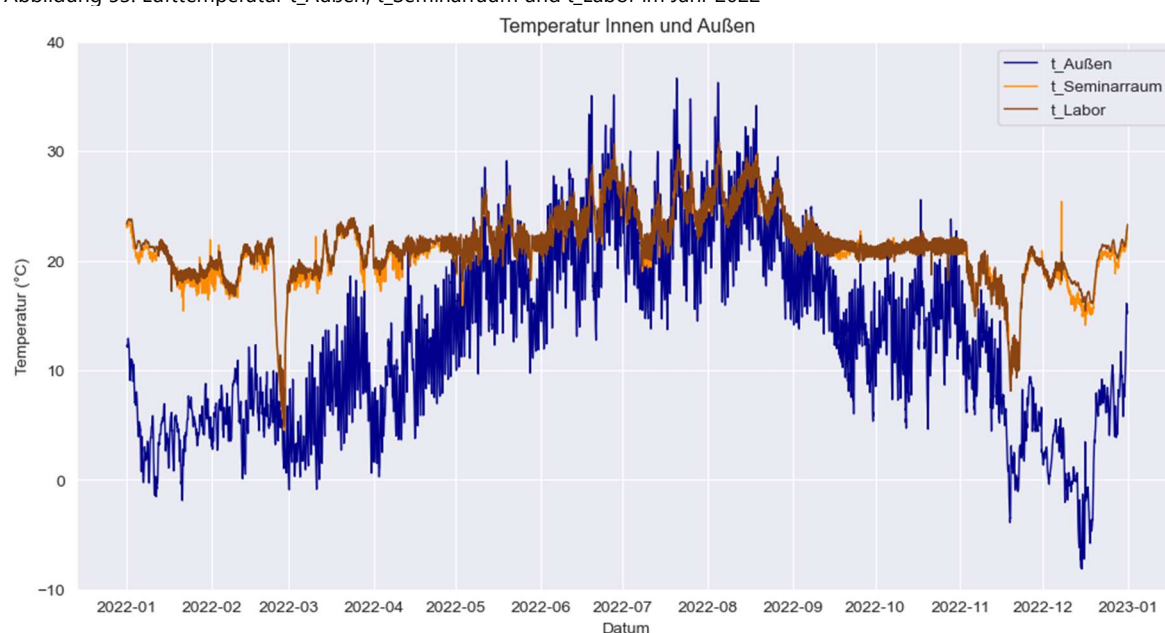
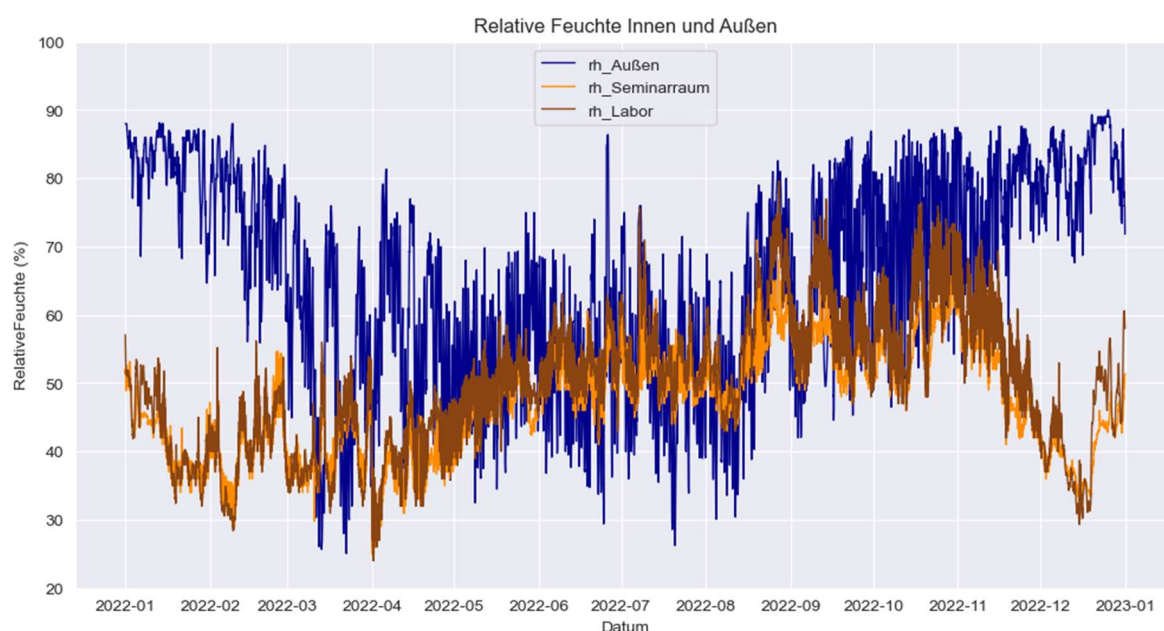
Die Testfassadenprüfstände aus dem Rooftop-Gebäude wurden mit dem Simulationsprogramm DELPHIN analysiert. Das Hauptziel dieser Simulationen auf Bauteilebene ist die Validierung der Simulationsmodelle anhand der gemessenen Daten. Dafür wurden sowohl die Modellparametrierung als auch die Randbedingungen so realitätsnah wie möglich gewählt. Die Simulation erfolgte für insgesamt sechs Varianten (zwei Testfassaden aus dem Jahr 2022 und vier Testfassaden ab Januar 2024).

3.4.1.1 Randbedingungen für die Simulation der Testfassaden

Die Simulation der eingebauten Testfassaden (2.1 Testfassade 2020-23, 2.2 Testfassade 2024-25) dient der Validierung anhand der Messergebnisse der Testfassadenprüfstände des Rooftop-Gebäudes. Für eine zuverlässige Validierung ist es essenziell, dass die in der Simulation verwendeten Wetterdaten mit den realen Wetterbedingungen während der Messzeitpunkte übereinstimmen. Daher wurden eigene Klimadateien erstellt. Zum Zeitpunkt der Vorlauftforschung lagen die vor Ort gemessenen Wetterdaten jedoch noch nicht vollständig vor. In dem Messzeitraum der ersten Untersuchung von Januar 2021 bis November 2023 standen folgende Messdaten am Rooftop-Gebäude zur Verfügung:

- Außenklima: Lufttemperatur und relative Feuchte außerhalb des Rooftop-Gebäudes in stündlicher Auflösung
- Innenklima: Lufttemperatur und relative Feuchte für die beiden Innenräume des Rooftop-Gebäudes mit den Testfassaden in stündlicher Auflösung

Die erhobenen Messdaten wurden zunächst überprüft. Um fehlende Wetterdaten zu ersetzen, wurden Werte aus dem gleichen Zeitraum früherer Jahre sowie von einer nahegelegenen Wetterstation verwendet. Auf diese Weise konnte eine plausible Annäherung an die tatsächlichen Bedingungen erreicht werden. Für die Validierung der Vorlauftforschung wurde das Jahr 2022 ausgewählt, da in diesem Zeitraum die vollständigsten Datensätze vorlagen. Abbildung 53 und Abbildung 54 zeigen die Lufttemperatur- und relativen Feuchtemesswerte des Jahres 2022 für die Messpunkte $t_{\text{Außen}}$, $t_{\text{Seminarraum}}$ (Ostfassade) und t_{Labor} (Westfassade). Das Rooftop-Gebäude wurde in diesem Zeitraum lediglich stundenweise für Besprechungen und Seminare genutzt. Dadurch lagen die Raumlufttemperaturen im Winter teilweise unter 20 °C. Die relative Luftfeuchte lag ebenfalls auf vergleichsweise niedrigem Niveau, insbesondere im Winter, da typische Feuchtelasten, wie sie in Wohngebäuden durch Duschen oder Kochen entstehen, hier weitgehend fehlten.

Abbildung 53: Lufttemperatur $t_{\text{Außen}}$, $t_{\text{Seminarraum}}$ und t_{Labor} im Jahr 2022Abbildung 54: Relative Feuchte $rh_{\text{Außen}}$, $rh_{\text{Seminarraum}}$, rh_{Labor} im Jahr 2022

Für die Simulation mit DELPHIN werden jedoch weitere meteorologische Wetterdaten benötigt. Dazu gehören stündliche Werte für Niederschlag, Luftdruck, Windgeschwindigkeit, Windrichtung, Globalstrahlung, Langwellenstrahlung und diffuse Strahlung. Für die fehlenden Wetterdaten des Jahres 2022 wurden zunächst die der nächstgelegenen Wetterstation des Deutschen Wetterdienstes (Berlin-Tempelhof) verwendet, die Luftlinie ca. 7,7 km entfernt liegt. Da dieser Datensatz keine Solarstrahlungswerte enthielt, wurden diese durch die Daten der Wetterstation Potsdam (ca. 23,7 km Luftlinie entfernt) ergänzt, da diese vollständig verfügbar sind.

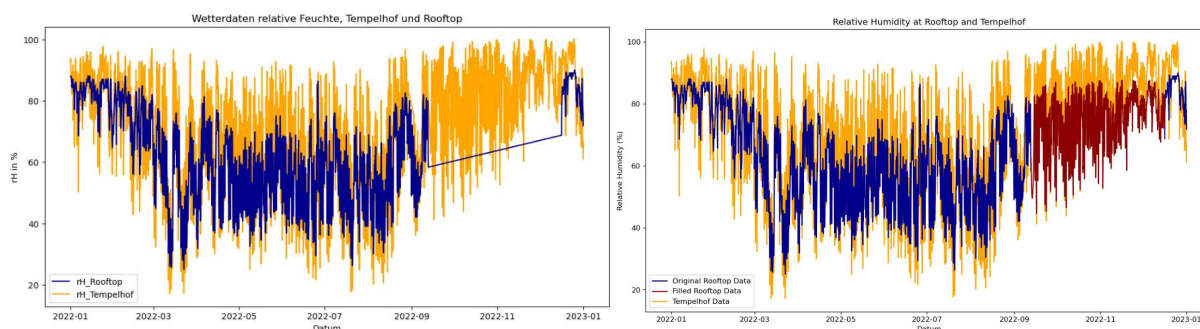
Für die neuen Testfassaden wurde das Jahr 2024 von 01.02.2024 bis 31.01.2025 gewählt, da in diesem Zeitraum vollständige Messdaten der Fassadenprüfstände zur Verfügung standen. Für die neuen Testfassaden wurden außerdem weitere Sensoren zur Erfassung des Wetters auf den Außenfassaden und dem Dach des Rooftop-Gebäudes installiert, um die Genauigkeit der Randbedingungen für die

Simulationsanalysen und die Auswertung der Messungen an den Testfassaden zu erhöhen. Somit konnten ab Juli 2023 zusätzlich zu Lufttemperatur und relativer Feuchte auch Niederschlag, Windgeschwindigkeit, Windrichtung sowie Solargesamtstrahlung in Fassadenebene als auch die Globalstrahlung vor Ort am Rooftop-Gebäude gemessen werden.

Zur Aufbereitung der Wetterdaten für die Simulation wurden sie zunächst auf Vollständigkeit geprüft. Da in den vor Ort am Rooftop-Gebäude gemessenen Wetterdaten Datenlücken vorhanden waren, wurden verschiedene Methoden zur Interpolation untersucht. Die besten Ergebnisse lieferte das lineare Regressionsmodell (Backhaus, et al., 2016). Alle am Rooftop-Gebäude gemessenen Wetterdaten des Jahres 2022 und 2024 wurden mit dieser Methode interpoliert. Das folgende Beispiel beschreibt die Anwendung dieser Methode am Beispiel der relativen Feuchte für das Jahr 2022:

Für die Vervollständigung fehlender Daten wurden als Referenz die vollständigen Daten des Deutschen Wetterdienstes verwendet. Zur Untersuchung der Beziehungen zwischen den relativen Feuchten der Standorte der Wetterstation Tempelhof und der Messung am Rooftop-Gebäude wurde ein lineares Regressionsmodell verwendet. Dieses Modell beschreibt den Zusammenhang zwischen einer abhängigen Variable (hier: die relative Feuchte am Standort Rooftop-Gebäude) und einer unabhängigen Variable (hier: die relative Feuchte am Standort Tempelhof). Die lineare Regression ist eine statistische Methode, die eine optimale Gerade durch die Punktwolke der Daten legt und dabei die Summe der quadrierten Abweichungen minimiert. In diesem Kontext wurde das Modell genutzt, um fehlende Werte in der Messreihe der relativen Außenluftfeuchte am Standort Rooftop-Gebäude zu rekonstruieren. Das Regressionsmodell wurde mit Daten vom Standort Tempelhof kalibriert, die keine fehlenden Werte enthielten. Die Vorhersage basiert auf dem beobachteten linearen Zusammenhang zwischen den beiden Variablen in den vorhandenen Daten. Die Auswahl der linearen Regression erfolgte aufgrund ihrer Einfachheit, Recheneffizienz und der Möglichkeit, direkte Interpretationen der Beziehung zwischen den Variablen abzuleiten.

Abbildung 55: Beispiel Anwendung des Regressionsmodells zur Interpolation fehlender Daten (links: gemessene relative Außenluftfeuchte mit Datenlücken, rechts ergänzte relative Außenluftfeuchte über Regressionsmodell)



Die Überprüfung der Daten und die Interpolation fehlender Daten erfolgte für alle vor Ort gemessenen Wetterdaten für das Außen- und Innenraumklima für die Jahre 2022 (erste Untersuchung der Testfassaden) und 2024 (zweite Untersuchung der Testfassaden). Diese Vorarbeit war entscheidend für die Verwendung der Daten in den Simulationsmodellen, da für die Simulation ein vollständiger Datensatz vorhanden sein muss.

Nach der Datenaufbereitung wurde der CCM-Editor der Bauklimatik Dresden Software GmbH verwendet, um die Wetterdaten in ein für das Simulationsprogramm DELPHIN lesbares Datenformat zu konvertieren. Die Daten für das Innenraumklima mussten ebenfalls aufbereitet werden und in einem für DELPHIN lesbaren Format gespeichert werden. Die Konvertierung der Innenraumklimadaten als ccd-Datei erfolgte mit Hilfe von Python-Skripten.

Die simulierten Testfassaden wurden entsprechend ihrer realen Ausrichtung parametrisiert. Um die Konstruktion im Simulationsprogramm möglichst realitätsnah abzubilden, wurden auch die Kleberschichten in ihrer tatsächlichen Dicke berücksichtigt. Zudem wurden die Anfangsbedingungen in den Simulationsmodellen an die zum Startzeitpunkt der Simulation gemessenen Messwerte angepasst. Es wurde für jede Schicht eine Anfangsbedingung für Temperatur und relative Feuchte definiert und die realen Messwerte dort eingetragen.

3.4.1.2 Testfassade Messzeitraum 2020-23 (Vorlaufforschung)

Der Aufbau des Simulationsmodells des ersten Testfassadenprüfstandes entspricht den Wandaufbauten der beiden Testfassaden (siehe Tabelle 12). Fassade 1 bildet die West-Fassade ab und Fassade 2 die Ost-Fassade. Der Aufbau ist wie folgt:

Tabelle 12: Aufbau der Testfassadensimulationsmodelle (Vorlaufforschung)

West-Fassade (Mauerwerk einfache Ziegelbreite)	Ost-Fassade (Fachwerkfassade einfache Ziegelbreite)
Schicht 1: Ziegelmauerwerk 11,5 cm Schicht 2: Kalziumsilikatplatte 3 cm Schicht 3: Holzfaserdämmplatte 10 cm Schicht 4: Lehmputz 1,5 cm	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

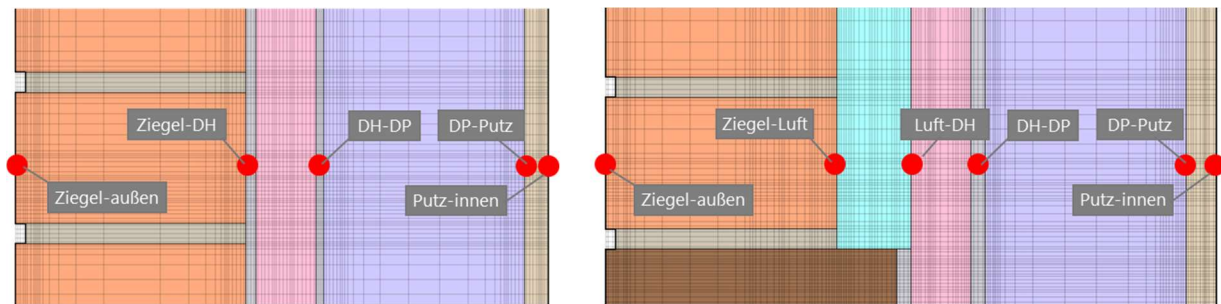
Es wurde darauf geachtet, dass die bauphysikalischen Eigenschaften der in der DELPHIN-Datenbank hinterlegten Materialien möglichst genau den Eigenschaften der real verbauten Materialien entsprechen. Es wurden folgende Materialien für die Simulationsanalysen ausgewählt:

Tabelle 13: Übersicht der Materialien für die Simulation der Testfassaden aus der Vorlaufforschung

Material	Bezeichnung in DELPHIN
Ziegel	Vollziegel Joens [34]
Mörtel	Kalkzementmörtel [143]
Holz (nur auf der Ostseite)	Fichte Radial [696]
Kalziumsilikat	Calsitherm Klimaplatte WF [707]
Holzfaser	Holzfaserdämmplatte [693]
Kleber	Calsitherm KP-Kleber [705]
Lehmputz	Lehmmörtel (historisch) [128]

Zusätzlich zu den Standardausgabedateien von DELPHIN wurden die Sensor-Messpunkte für relative Feuchte und Temperatur im Simulationsmodell nachgebildet (Position der Messpunkte im Simulationsmodell siehe Abbildung 56). Diese befinden sich sowohl an der Innen- und Außenwand als auch zwischen den einzelnen Materialschichten, um eine direkte Vergleichbarkeit mit den Messdaten zu ermöglichen.

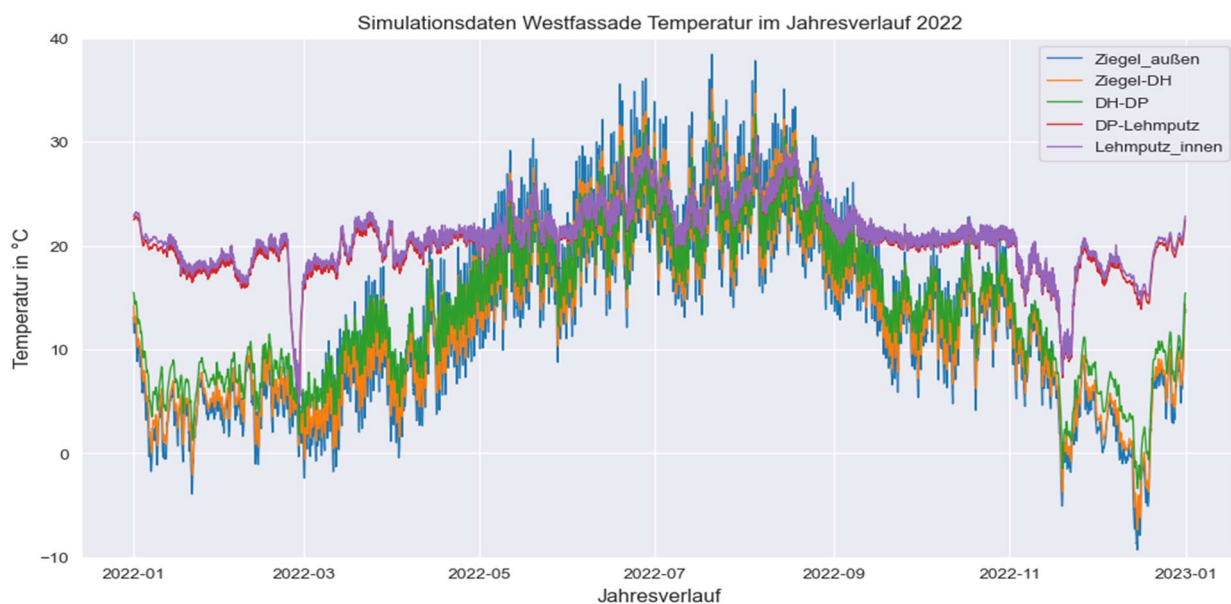
Abbildung 56: Fassadenaufbau der Ost-Seite (links) und West-Seite (rechts) in DELPHIN mit Position und Bezeichnung der Messpunkte



Es wurde das Jahr 2022 für die Auswertung gewählt, da für dieses Jahr fast vollständige Messdaten vorhanden sind. Die Jahre 2021 und 2023 enthalten größere Datenlücken und waren deswegen nicht für die Validierung geeignet. Die Simulationsdauer für das Jahr 2022 wurde auf drei Jahre (immer mit derselben Klimadatei) festgelegt, um den Einschwingvorgang zu berücksichtigen. Für die Auswertung wurde das letzte Jahr der Simulation genutzt.

Die Abbildung 57 zeigt den simulierten Temperaturverlauf der Westfassade für die einzelnen Zwischenschichten. Ziegel-außen (blau) zeigt die stärksten Temperaturschwankungen (Tagesdifferenzen von 10-15°C), was auf den direkten Einfluss der Außenklimabedingungen zurückzuführen ist. Ziegel-DH (orange) und DH-DP (grün) zeigen einen ähnlichen Kurvenverlauf wie die äußere Schicht, jedoch um wenige Grad wärmer. Die innere Schichtgrenze DP-Lehmputz (rot) und die Innenseite Lehmputz-innen (lila) weisen die geringsten tageszeitlichen Temperaturschwankungen auf.

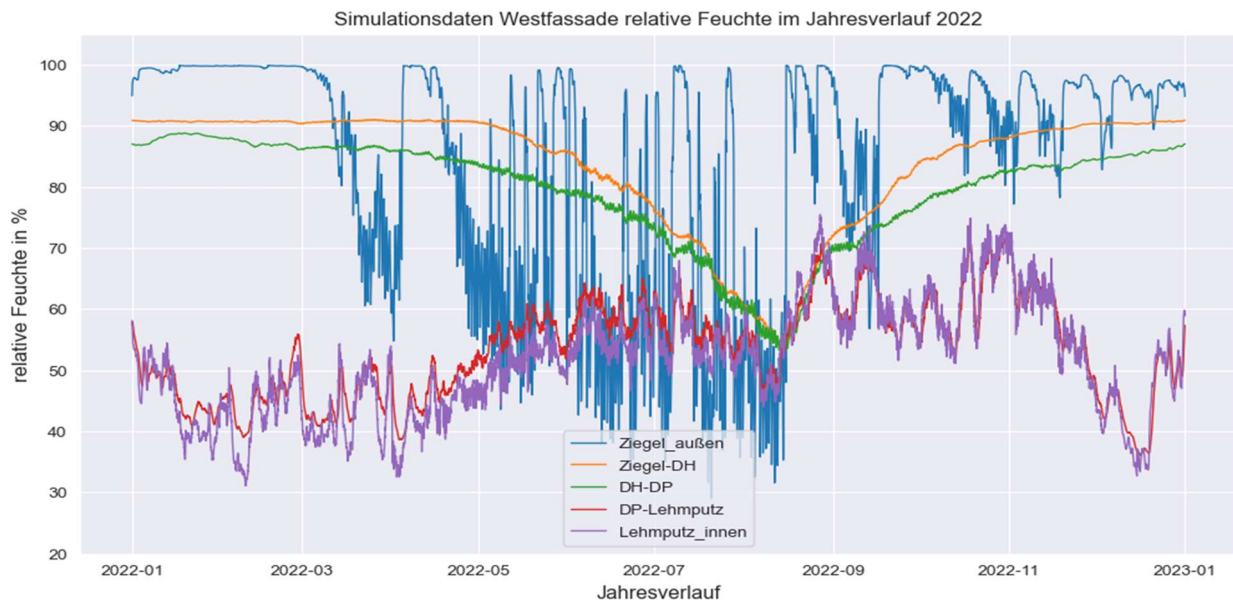
Abbildung 57: Simulationsergebnisse des Temperaturverlaufs der Westfassade im Jahr 2022 (Vorlauftforschung)



Die Abbildung 58 zeigt den Jahresverlauf der simulierten relativen Feuchte der Westfassade der einzelnen Zwischenschichten. Ziegel außen (blau) weist über das Jahr hinweg starke Schwankungen der relativen Feuchte auf. Vor allem in den kälteren Monaten liegt die relative Feuchte häufig nahe 100%. In den Sommermonaten sind starke Schwankungen erkennbar, die durch Schlagregenereignisse entstehen. Ziegel-DH (orange) weist im Vergleich zu den äußeren Schichten eine noch gleichmäßigere Feuchteverteilung auf. Die Feuchte bleibt im Jahresverlauf auf einem relativ konstanten Niveau und zeigt eine allmähliche Abnahme im Sommer. DH-DP (grün) zeigt einen ähnlichen Verlauf wie Ziegel-DH, jedoch ist diese Schicht in den Wintermonaten etwas trockener und gleicht sich im Sommer dem Verlauf

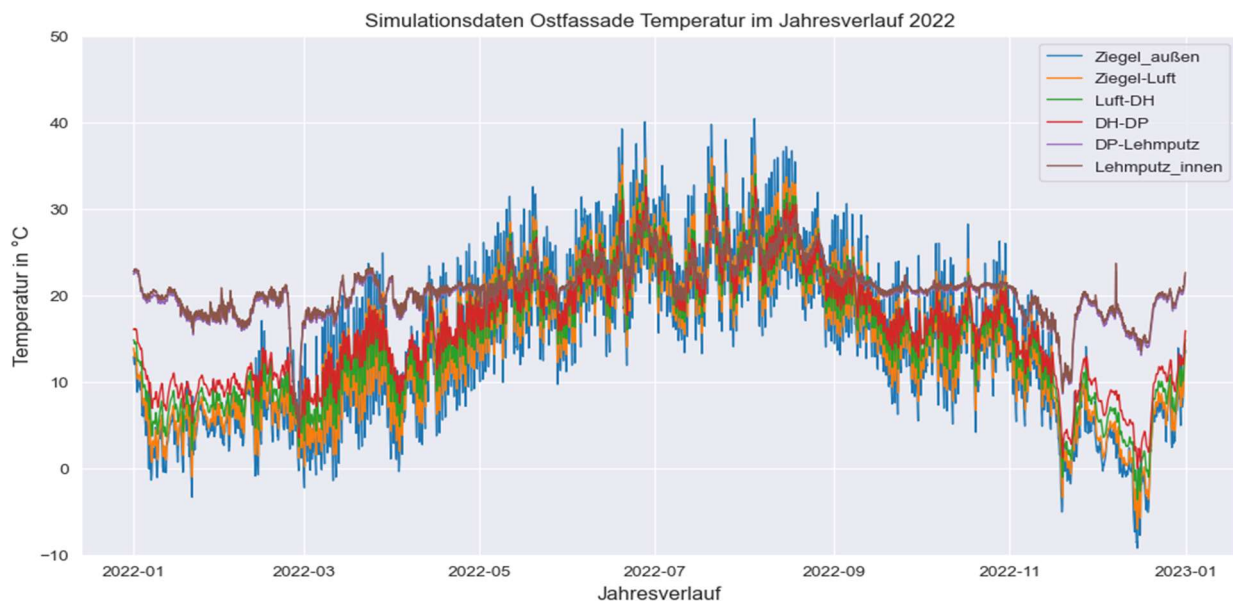
von Ziegel-DH an. DP-Lehmputz (rot) und Lehmputz-innen (lila) zeigen die geringsten Feuchteschwankungen im Jahresverlauf. Im Winter ist die relative Feuchte aufgrund der trockenen Luft am niedrigsten.

Abbildung 58: Simulationsergebnisse der relativen Feuchte der Westfassade im Jahr 2022 (Vorlauftforschung)



Die Abbildung 59 zeigt den simulierten Temperaturverlauf der Ostfassade für die einzelnen Zwischenschichten. Der Temperaturverlauf ist ähnlich wie auf der Westseite, allerdings sind die Temperaturspitzen im Sommer etwas höher. Zudem gibt es in dieser Variante eine Luftschicht zwischen Außenwand und Kalziumsilikatdämmung. Dadurch sind die Temperaturen der inneren Schichten leicht erhöht im Vergleich zur Westfassade.

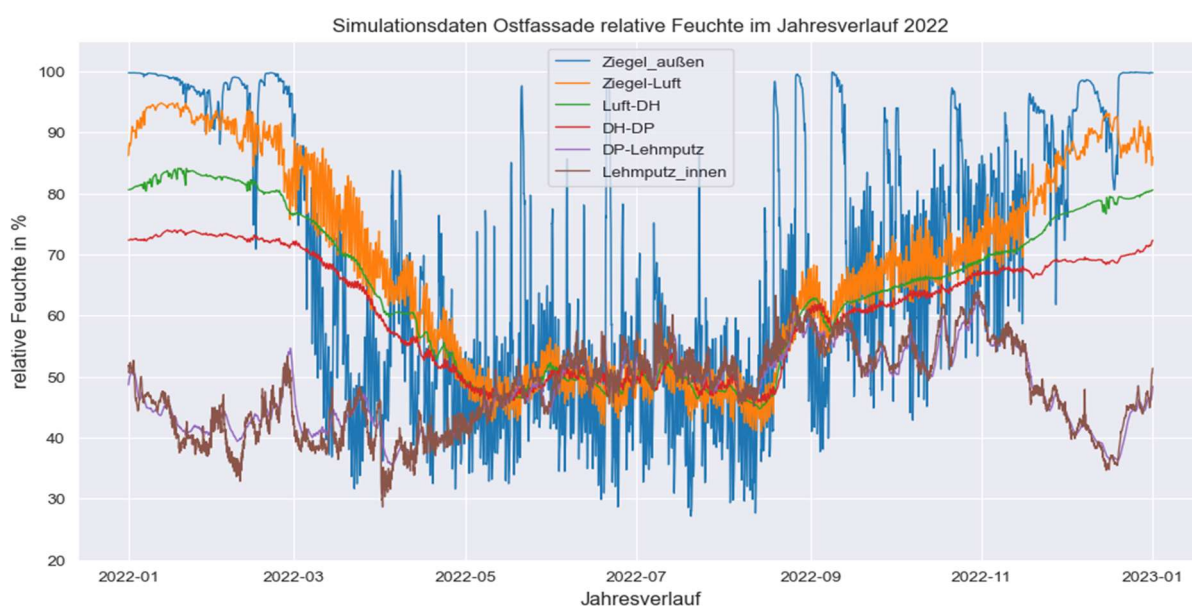
Abbildung 59: Simulationsergebnisse des Temperaturverlaufs der Ostfassade im Jahr 2022 (Vorlauftforschung)



Die Abbildung 60 zeigt den Jahresverlauf der simulierten relativen Feuchte der Ostfassade der einzelnen Zwischenschichten. Der wesentliche Unterschied zwischen der Ostfassade und dem der Westfassade liegt in den feuchtedynamischen Prozessen innerhalb der Konstruktion, die durch unterschiedliche Ausrichtung der Fassaden beeinflusst werden.

Die blaue Linie (Ziegel_außen) zeigt, dass die relative Feuchte an der Ostfassade im Vergleich zur Westfassade tendenziell etwas niedriger ist. Dies kann durch eine geringere direkte Schlagregenbelastung erklärt werden (wetterabgewandte Seite). Im Vergleich zur Westfassade ist in der Ostfassade eine zusätzliche Luftschicht enthalten (Ziegel-Luft), die deutliche Feuchteschwankungen aufweist. Dies deutet darauf hin, dass hier Feuchte aufgenommen und wieder abgegeben wird, was eine Pufferwirkung auf die dahinterliegenden Schichten hat. Die relative Feuchte in den Schichten Luft-DH (grün) und DH-DP (rot) bleibt über das Jahr hinweg niedriger als bei der Westfassade. Besonders die Schicht DH-DP steigt im Winter nur auf fast 75%, wohingegen die gleiche Schicht auf der Westfassade zur gleichen Zeit im Februar bei fast 90% liegt. Dies liegt zum einen daran, dass die Luftschicht wie ein Feuchtepuffer wirkt und zum anderen daran, dass die Ostfassade die wetterabgewandte Seite ist und weniger Schlagregen von außen auftritt. Durch die unterschiedliche Ausrichtung können die beiden Fassaden nicht direkt miteinander verglichen werden. Die Linien für DP-Lehmputz (lila) und Lehmputz_innen (braun) zeigen wie bei der Westfassade eine vergleichsweise stabile Feuchteentwicklung, unabhängig von der Fassadenausrichtung, mit niedrigen Feuchtwerten im Winter und höheren Werten zum Ende des Sommers und im Herbst.

Abbildung 60: Simulationsergebnisse der relativen Feuchte der Ostfassade im Jahr 2022 (Vorlauftforschung)



Während die Westfassade im Sommer stärkere Trocknungseffekte durch längere Sonnenexposition zeigt, weist die Ostfassade eine geringere Feuchteverteilung auf, insbesondere in den Sommermonaten. Die zusätzliche Luftschicht hat eine Pufferwirkung, sorgt jedoch auch für Feuchteschwankungen. Die Analyse zeigt, dass die Exposition einer Fassade einen entscheidenden Einfluss auf die Feuchtedynamik hat.

3.4.1.3 Testfassade Messzeitraum 2024-25

Nach dem Umbau der Testfassadenprüfstände im November 2023 wurden die neuen Konstruktionen für die Validierung ebenfalls in DELPHIN abgebildet. Für die zweite Untersuchung wurden zwei

verschiedene Materialien ausgewählt, die in den Testfassadenprüfständen untersucht wurden (siehe Kapitel 3.3.3 Basisvarianten).

Die Annahme war, dass die kapillaraktive Hartschaumplatte iQ-Therm sich besser eignet für die wetterabgewandte Seite, da sie zwar Feuchtigkeit aufnehmen und weiterleiten kann, jedoch im Vergleich zur Korkdämmlehmplatte eine geringere Sorptionskapazität besitzt. Da die wetterabgewandte Seite einer Fassade in der Regel weniger direkter Witterungseinwirkung wie Schlagregen ausgesetzt ist, steht hier vor allem die Regulierung der Raumluftfeuchte im Vordergrund. Auf der Wetterseite hingegen ist eine höhere Widerstandsfähigkeit gegenüber Feuchtebelastungen erforderlich, weshalb hier die Korkdämmlehmplatte zum Einsatz kommt. Die höhere kapillare Leitfähigkeit sorgt für eine schnelle Verteilung und Verdunstung von Feuchtigkeit, wodurch das Risiko von Feuchteanreicherungen und möglichen Schäden minimiert wird. Beide Varianten wurden sowohl mit als auch ohne eine Luftschicht verbaut. Die Konstruktion der beiden Testfassaden für die zweite Untersuchung ist wie folgt aufgebaut:

Tabelle 14: Aufbau der Testfassadensimulationsmodelle (neue Testfassaden)

Westfassade (Mauerwerk einfache Ziegelbreite)	Ostfassade (Fachwerkfassade einfache Ziegelbreite)
<i>Variante 1:</i> Schicht 1: Ziegelmauerwerk 11,5 cm Schicht 2: Kork-Lehmplatte 3 cm Schicht 3: Holzfaserdämmplatte 10 cm Schicht 4: Lehmputz 1,5 cm	<i>Variante 1:</i> Schicht 1: Fachwerkmauerwerk 11,5 cm Schicht 2: iQ-Therm 3 cm Schicht 3: Holzfaserdämmplatte 10 cm Schicht 4: Lehmputz 1,5 cm
<i>Variante 2:</i> Schicht 1: Ziegelmauerwerk 11,5 cm Schicht 2: Luftschicht 3 cm Schicht 3: Kork-Lehmplatte 3 cm Schicht 4: Holzfaserdämmplatte 10 cm Schicht 5: Lehmputz 1,5 cm	<i>Variante 2:</i> Schicht 1: Fachwerkmauerwerk 11,5 cm Schicht 2: Luftschicht 3 cm Schicht 3: Kork-Lehmplatte 3 cm Schicht 4: Holzfaserdämmplatte 10 cm Schicht 5: Lehmputz 1,5 cm

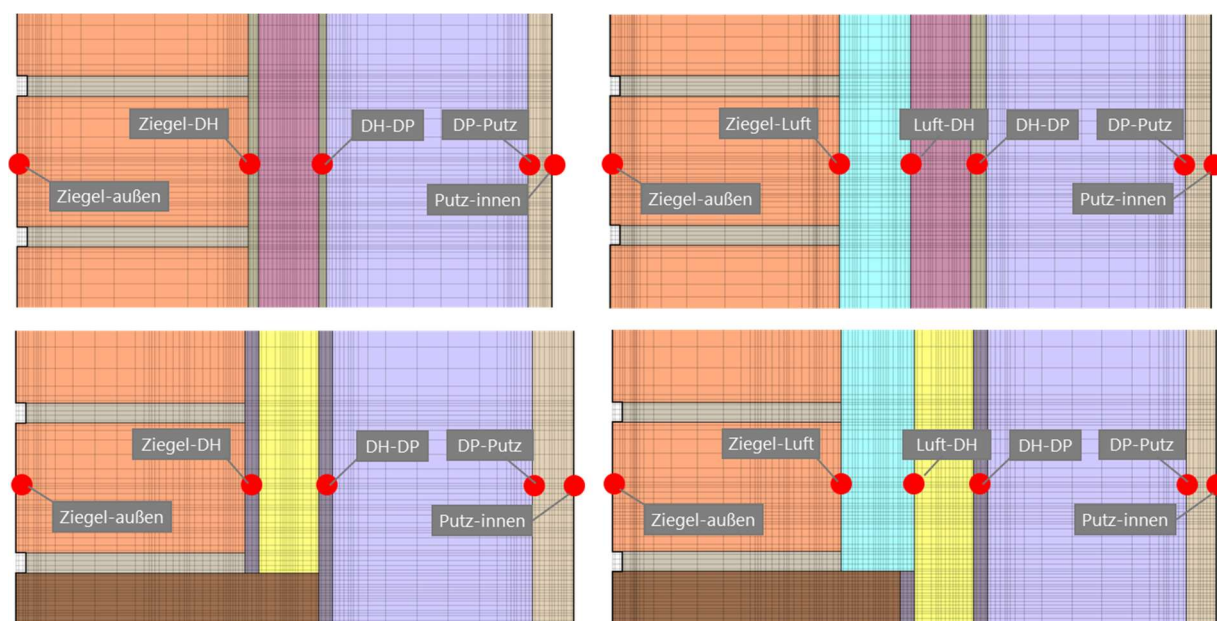
Es wurden folgende Materialien aus der DELPHIN-Materialdatenbank für die Simulationsanalysen ausgewählt:

Tabelle 15: Übersicht der Materialien für die Simulation der neuen Testfassaden

Material	Bezeichnung in DELPHIN
Ziegel	Vollziegel Joens [34]
Mörtel	Kalkzementmörtel [143]
Holz (nur auf der Ostseite)	Fichte Radial [696]
iQ-Therm	Calsitherm Klimaplatte WF [707]
Korkdämmlehmplatte	Wärmedämmlehm-Kork-Platte [416]
Holzfaser	Holzfaserdämmplatte [693]
Kleber iQ-Therm	iQ-Top [439]
Kleber Korkdämmlehmplatte	Wärmedämmlehm-Kork Klebemörtel [415]
Lehmputz	Lehmmörtel (historisch) [128]

Die Messpunkte für Temperatur und relative Feuchte sind den realen Messpunkten nachempfunden. Diese befinden sich sowohl an der Innen- und Außenwand als auch zwischen den einzelnen Materialschichten, um eine direkte Vergleichbarkeit mit den Messdaten zu ermöglichen. Die vier Varianten wurden den gemessenen Schichtdicken angepasst, daher haben die Modelle teilweise unterschiedliche Putzstärken. Die Abbildung 61 zeigt oben die Westseite mit der Korkdämmlehmplatte ohne Luftschicht und mit Luftschicht und unten die Ostseite (mit und ohne Luftschicht) mit iQ-Therm als hygrische Dämmschicht.

Abbildung 61: Simulationsmodelle der neuen Testfassaden,
oben: Variante mit Korkdämmlehmplatte ohne Luftschicht (links) und mit Luftschicht (rechts);
unten: Variante mit iQ-Therm ohne Luftschicht (links) und mit Luftschicht (rechts)



Die Simulationsdauer beträgt ein Jahr. Da die Messungen an den Testfassadenprüfständen erst Ende Januar 2024 starten konnte, reicht der Simulationszeitraum vom 01.02.2024 bis zum 31.01.2025. Die Simulation startet mit den gemessenen Anfangsbedingungen in den jeweiligen Schichtgrenzen.

Gemessene Anfangsbedingungen am 01.02.2024 00:00:00:

Tabelle 16: gemessene Anfangsbedingungen der neuen Testfassaden

	Temperatur Westfassade + Luft	Temperatur Ostfassade + Luft	Relative Feuchte Westfassade + Luft	Relative Feuchte Ostfassade + Luft
Ziegel_außen	5,40	5,50	76,70	71,20
Ziegel-Luft	6,80	7,00	96,80	78,90
Luft-DH	8,70	9,00	89,40	72,70
DH-DP	10,40	12,60	88,60	61,30
DP-Lehmputz	19,80	21,00	51,40	39,10
Lehmputz_innen	20,20	21,30	46,60	42,00

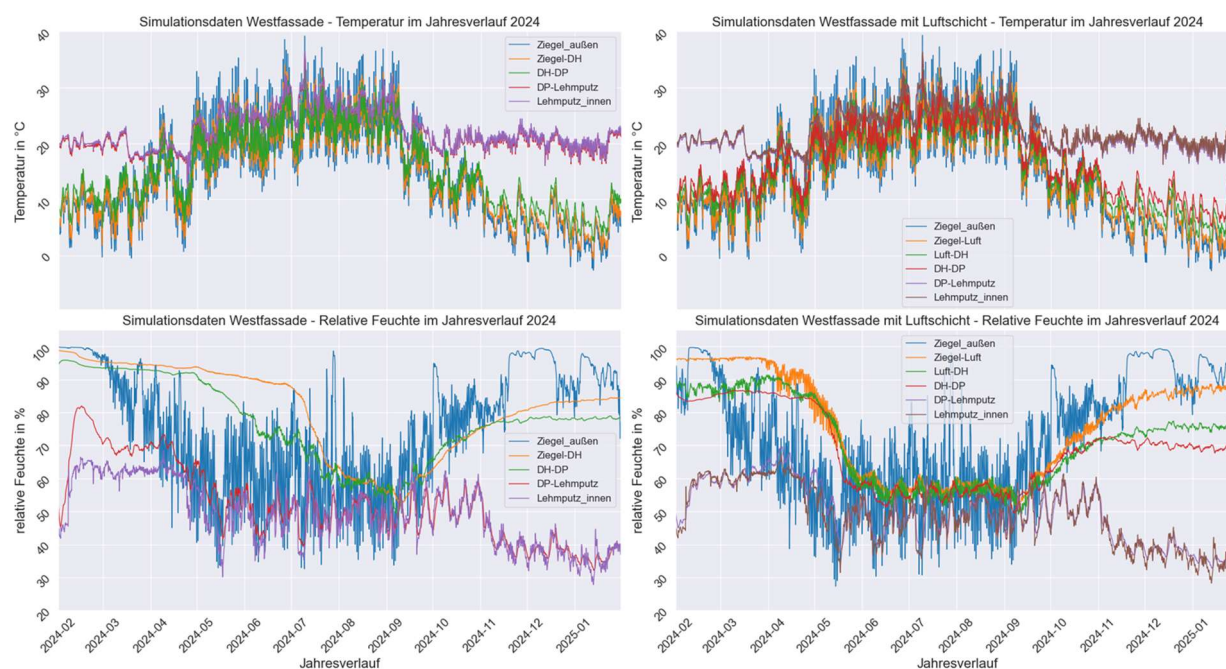
	Temperatur Westfassade	Temperatur Ostfassade	Relative Feuchte Westfassade	Relative Feuchte Ostfassade
Ziegel_außen	5,50	5,60	100,00	71,20
Ziegel-DH	9,90	7,20	99,00	81,50
DH-DP	9,90	10,80	97,10	75,90
DP-Lehmputz	17,60	20,90	54,50	39,90
Lehmputz_innen	18,80	21,20	45,70	42,70

Die Abbildung 62 zeigt die Temperatur- und Feuchteverläufe für die Westfassade ohne Luftschicht (links) und mit Luftschicht (rechts). In beiden Fällen ist der Temperaturverlauf der äußeren Schicht (Ziegel_außen) durch starke Schwankungen geprägt, die die direkten Umwelteinflüsse widerspiegeln. Im Inneren der Konstruktion sind die Schwankungen zwischen Sommer und Winter durch die Dämmschichten weniger stark ausgeprägt. Zwischen den beiden Varianten mit und ohne Luftschicht zeigen sich im Temperaturverlauf keine signifikanten Unterschiede.

Die Feuchteverläufe zeigen, wie sich die relative Feuchte in den verschiedenen Schichten über das Jahr verändert. Die äußere Schicht (Ziegel_außen) ist durch ihre Ausrichtung zur Wetterseite starken Feuchtebelastungen ausgesetzt, wodurch die relative Feuchte besonders in der Jahresmitte stark schwankt. Die untere linke Grafik (ohne Luftschicht) zeigt in den inneren Schichtgrenzen (Ziegel-DH und DH-DP) deutlich weniger Schwankungen. Die Feuchtebewegung erfolgt durch direkten kapillaren Transport und Diffusion innerhalb der massiven Materialien. Dadurch sind die Übergänge zwischen den Schichten gleichmäßiger. Die Schichtgrenzen DP-Lehmputz und Lehmputz_innen zeigen wieder größere Schwankungen, allerdings ist die Amplitude deutlich kleiner als in der äußeren Schicht, da diese Schichten nur geringen Feuchteschwankungen ausgesetzt sind.

Die untere rechte Grafik (mit Luftschicht) zeigt einen deutlich früheren Abfall der relativen Feuchte in den Schichtgrenzen Ziegel-Luft, Luft-DH und DH-DP. Während die relative Feuchte der inneren Schichtgrenzen auf der Seite ohne Luftschicht erst im Mai bzw. Juli absinkt, fängt die relative Feuchte der Variante mit Luftschicht in diesen Schichtgrenzen bereits im April an zu sinken und bleibt den Sommer über auf einem Niveau zwischen 50% und 60% relativer Feuchte. Bei beiden Varianten beginnt die relative Feuchte der inneren Schichtgrenzen im September wieder anzusteigen, erreicht aber nicht mehr die Höchstwerte des vorherigen Winters. Das ist damit zu erklären, dass zum einen die Anfangsfeuchte des Einbaus im Laufe des Jahres gesunken ist und zum anderen, dass die Luftfeuchte der Innenräume zum Ende des Jahres deutlich niedriger ist als zu Jahresbeginn. Die Luftfeuchte der inneren Schichtgrenzen war zu Jahresbeginn bei ca. 60%, da die Innenräume in dem Zeitraum von Februar bis April mit Luftbefeuchtern befeuchtet wurden. Der hohe Ausschlag der Schichtgrenze DP-Lehmputz Ende Februar ist vermutlich die Folge der hohen relativen Feuchte als Anfangsbedingung in der Schichtgrenze DH-DP von 97%. Was außerdem auffällt im Vergleich der Varianten mit und ohne Luftschicht ist, dass die Schichten, die an die Luftschicht angrenzen viel mehr schwanken als bei der Variante ohne Luftschicht, da hier weniger kapillarer Transport erfolgt.

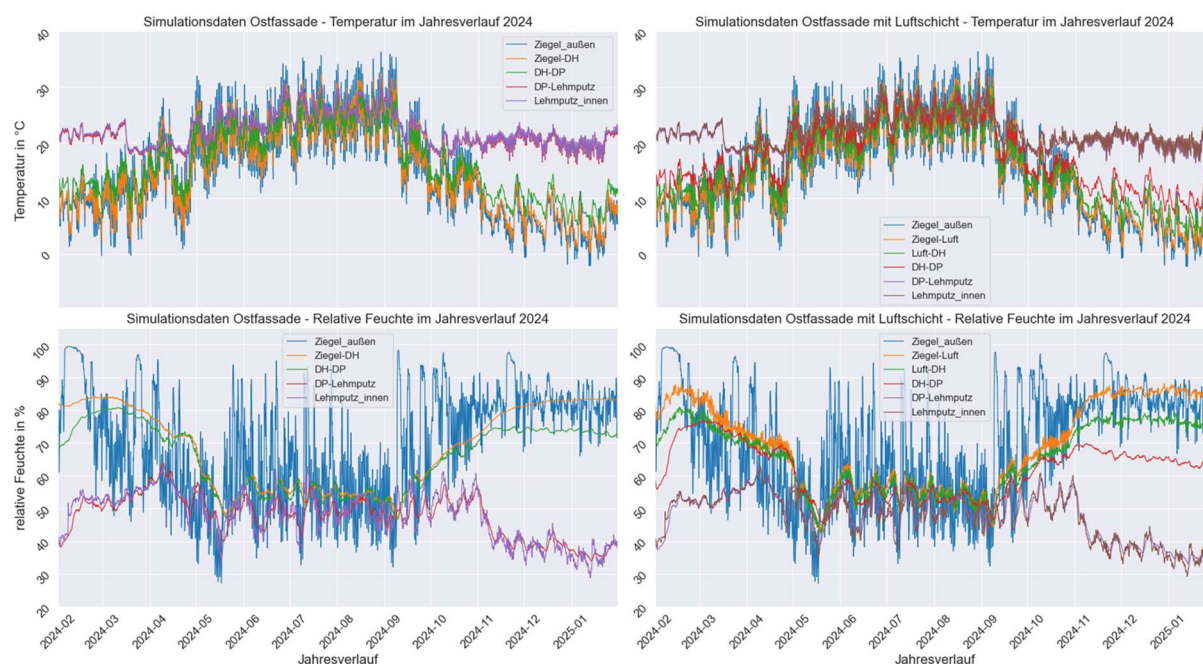
Abbildung 62: Simulationsergebnisse der Temperatur- und Feuchteverläufe der Westfassade ohne Luftschicht (links) und mit Luftschicht (rechts)



Die Abbildung 63 zeigt die Temperatur- und Feuchteverläufe für die Ostfassade ohne Luftschicht (links) und mit Luftschicht (rechts). Im Vergleich zur Westfassade sind die Temperaturamplituden der äußeren Schicht (Ziegel_außen) geringer, da die Fassade von den umliegenden Gebäuden mehr verschattet wird und daher weniger von der Sonne erwärmt wird. Auf der Westfassade sind die Spitzenwerte der Temperaturen höher, da sie mittags und nachmittags von der Sonne erwärmt wird. Innerhalb der Konstruktion gibt es keine signifikanten Unterschiede. Auch zwischen den Varianten ohne Luftschicht und mit Luftschicht der Ostseite gibt es keine großen Unterschiede im Temperaturverlauf.

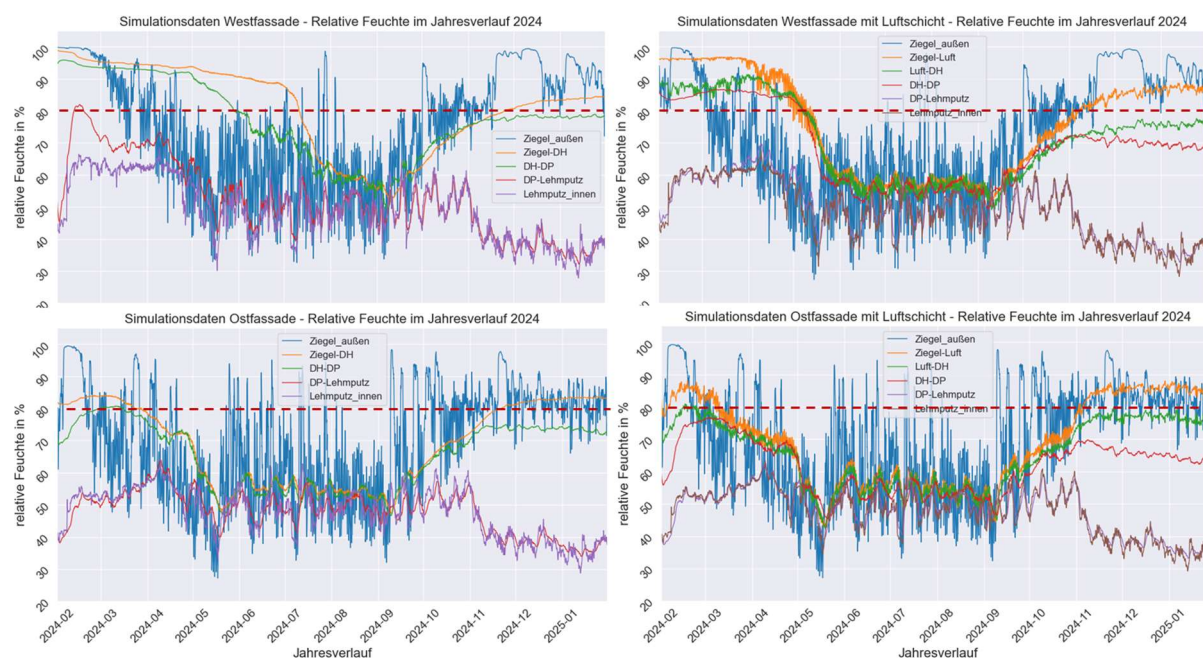
Der Vergleich der relativen Feuchte der Varianten mit und ohne Luftschicht zeigt ein ähnliches Bild wie bei der Westfassade. Die inneren Schichtgrenzen Ziegel-DH und DH-DP weisen einen wesentlich glatteren Kurvenverlauf auf, als die gleichen Schichtgrenzen auf der Westseite. Die Schichtgrenzen DP-Lehmputz und Lehmputz_innen zeigen einen ähnlichen Verlauf wie auf der Westseite und unterscheiden sich auch durch eine zusätzliche Luftschicht kaum voneinander.

Abbildung 63: Simulationsergebnisse der Temperatur- und Feuchteverläufe der Ostfassade ohne Luftschicht (links) und mit Luftschicht (rechts)



Die Abbildung 64 zeigt die relative Feuchte der vier Varianten im Vergleich. Zur besseren Übersicht ist bei 80% relativer Feuchte eine Vergleichslinie dargestellt. Die relative Feuchte ist an der Ostseite tendenziell höher, vor allem in den äußeren Schichten. Dies kann auf morgendliche Taubildung und geringere Austrocknung durch Sonneneinstrahlung zurückzuführen sein. Vor allem im Sommer zeigt die Westfassade eine stärkere Abtrocknung, während die Ostfassade häufiger Werte über 80% relative Feuchte aufweist. Die inneren Schichtgrenzen sowohl mit als auch ohne Luftschicht zeigen auf der Ostseite einen früheren Abfall der relativen Feuchte, der bereits im März beginnt und ab Mai steil absinkt, bis sie im September wieder anfängt zu steigen. Das ist vermutlich auf die geringere Schlagregenbelastung auf der Ostseite zurückzuführen.

Abbildung 64: Simulationsergebnisse der Feuchteverläufe der West- und Ostfassade ohne Luftschicht (links) und mit Luftschicht (rechts) im Vergleich



Zusammenfassend zeigt die Ostfassade tendenziell höhere Feuchtwerte auf, während die Westfassade stärkere Temperaturschwankungen zeigt. Die Luftschicht reduziert die Feuchtigkeit in der Schichtgrenze DH-DP, erhöht aber die Schwankungen in der Luftschicht selbst. Ohne Luftschicht ist die relative Feuchte der Schichtgrenze DH-DP höher, jedoch gibt es sehr viel weniger Schwankungen im Jahresverlauf.

3.4.2 Fassadenumbau

Der Abriss der alten Testfassaden und der Einbau der neuen Fassaden wurde im November 2023 begonnen und dauerte insgesamt 2 Wochen (siehe Abbildung 65).

Beim Abschlagen des Lehmputzes wurde darauf geachtet, dass der Putz wiederverwendet werden kann. Das ist bei Lehmputz möglich, indem er erneut mit Wasser angerührt wird. So konnte ein Teil des alten Lehmputzes erneut verwendet werden. Der Abriss der Dämmplatten war teilweise schwierig, da die Holzfaserdämmung mit der Kalziumsilikatdämmung fest verklebt war. Ein zerstörungsfreier Ausbau sowie die Trennung der Materialien sind so nur schlecht möglich. Für die Entsorgung bedeutet das, dass die Holzfaserdämmung nicht thermisch verwertet werden kann, wenn sie fest mit der Kalziumsilikatschicht verklebt ist.

Zum Zeitpunkt des Abrisses waren die Testfassaden der Vorlaufforschung etwa drei Jahre im Einsatz. Es konnten optisch keine Schäden an der Bestandswand festgestellt werden, die durch die Innendämmung entstanden sind.

Abbildung 65: Abriss der alten Testfassaden (links), Fachwerkfassade nach dem Entfernen der alten Dämmschicht (Mitte), Ziegelfassade in der Mitte getrennt mit Abstandshaltern für die Luftschicht links und der Kork-Lehm-Plattendämmung rechts



Anbringung der neuen Materialien

In der Materialanalyse in Kapitel 3.3.3 *Basisvarianten* wurden die Materialien iQ-Therm und Korkdämmlehmplatte für den Einbau in die neuen Testfassaden ausgewählt. Die Materialien sollten sich in ihren Eigenschaften von Kalziumsilikat unterscheiden. iQ-Therm sticht durch eine vergleichsweise gute Wärmedämmung hervor und die Korkdämmlehmplatte ist umweltfreundlich, leicht zu verarbeiten und weist eine gute Feuchtespeicherfähigkeit auf.

Nachdem in der Materialanalyse die Auswahl der Materialien für die neuen Testfassaden getroffen war, wurden die Materialien bestellt. Dafür wurde direkt Kontakt mit den jeweiligen Herstellern aufgenommen. Der Dämmstoff iQ-Therm (DH3) wurde dem Projekt als Materialprobe zur Verfügung gestellt. Die Korkdämmlehmplatten wurden ebenfalls direkt vom Hersteller bezogen. Alle weiteren Materialien, die zum Bau der Fassaden benötigt wurden, wurden über Onlinehändler und Baustoffhändler bestellt.

Der Wandaufbau der beiden Testfassaden entspricht dem gleichen, wie in der Vorlauforschung, um eine Vergleichbarkeit zu der Variante mit Kalziumsilikat zu ermöglichen. Tabelle 17 zeigt die einzelnen Schichten der neuen Fassaden.

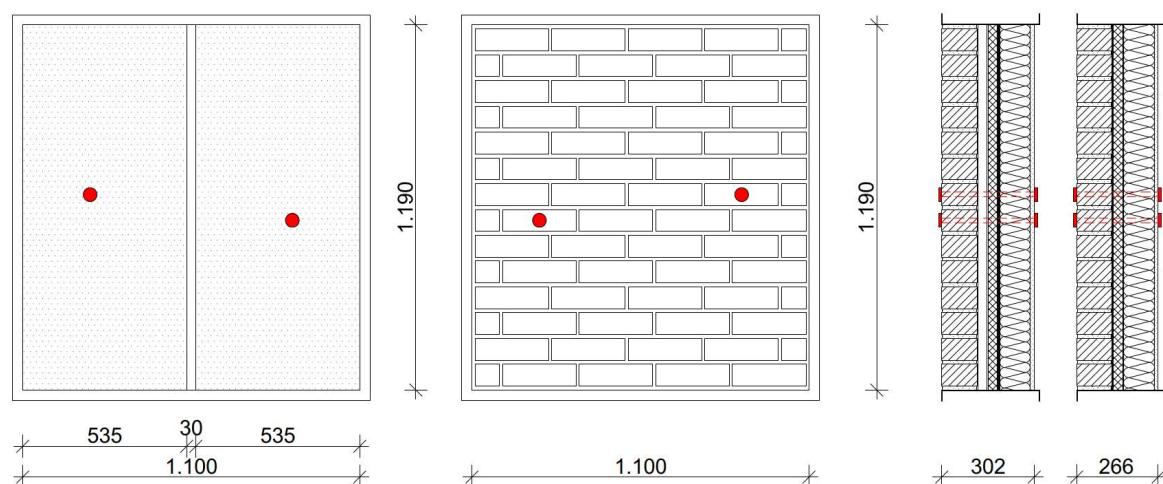
Da sowohl die Ergebnisse der Voruntersuchung als auch die durchgeführten Simulationen gezeigt haben, dass sich eine Luftschicht positiv auf den Feuchtegehalt der innenliegenden Schichten auswirkt, wurden für den zweiten Versuchsstandaufbau die Fassaden geteilt. In jeder Fassade wurde eine Variante mit und eine Variante ohne Luftschicht verbaut. Die Trennung zwischen den beiden Schichten erfolgt mit einer 3 cm dicken XPS-Platte (siehe Abbildung 66 und Abbildung 67).

Tabelle 17: Aufbau der neuen Testfassaden im Rooftop-Gebäude

Westfassade (Mauerwerk einfache Ziegelbreite)	Ostfassade (Fachwerkfassade einfache Ziegelbreite)
Variante 1: Schicht 1: Ziegelmauerwerk 11,5 cm Schicht 2: Kork-Lehmplatte 3 cm Schicht 3: Holzfaserdämmplatte 10 cm Schicht 4: Lehmputz 1,5 cm	Variante 1: Schicht 1: Fachwerkmauerwerk 11,5 cm Schicht 2: iQ-Therm 3 cm Schicht 3: Holzfaserdämmplatte 10 cm Schicht 4: Lehmputz 1,5 cm

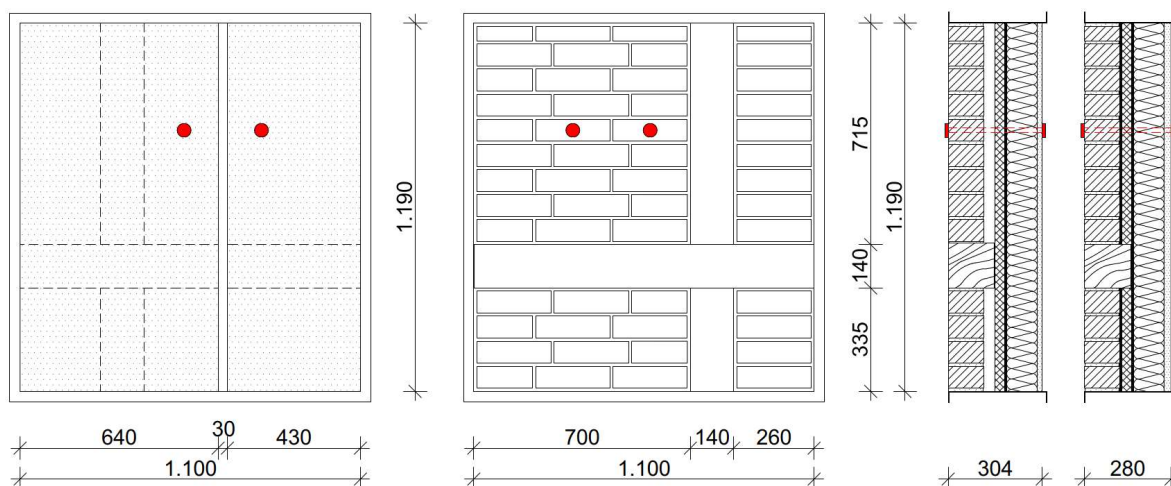
Variante 2: Schicht 1: Ziegelmauerwerk 11,5 cm Schicht 2: Luftschicht 3 cm Schicht 3: Kork-Lehmplatte 3 cm Schicht 4: Holzfaserdämmplatte 10 cm Schicht 5: Lehmputz 1,5 cm	Variante 2: Schicht 1: Fachwerkmauerwerk 11,5 cm Schicht 2: Luftschicht 3 cm Schicht 3: Kork-Lehmplatte 3 cm Schicht 4: Holzfaserdämmplatte 10 cm Schicht 5: Lehmputz 1,5 cm
--	--

Abbildung 66: Ansicht und Schnitt Testfassade Ziegelmauerwerk (F1) mit Trennschicht und Sensorposition



Da die Fachwerkfassade aufgrund der Balkenanordnung nicht in der Mitte getrennt werden konnte, wurde die Trennung so gewählt, dass die Ziegelbreite symmetrisch zum vertikalen Balken ist.

Abbildung 67: Ansicht und Schnitt Testfassade Fachwerk (F2) mit Trennschicht und Sensorposition in rot

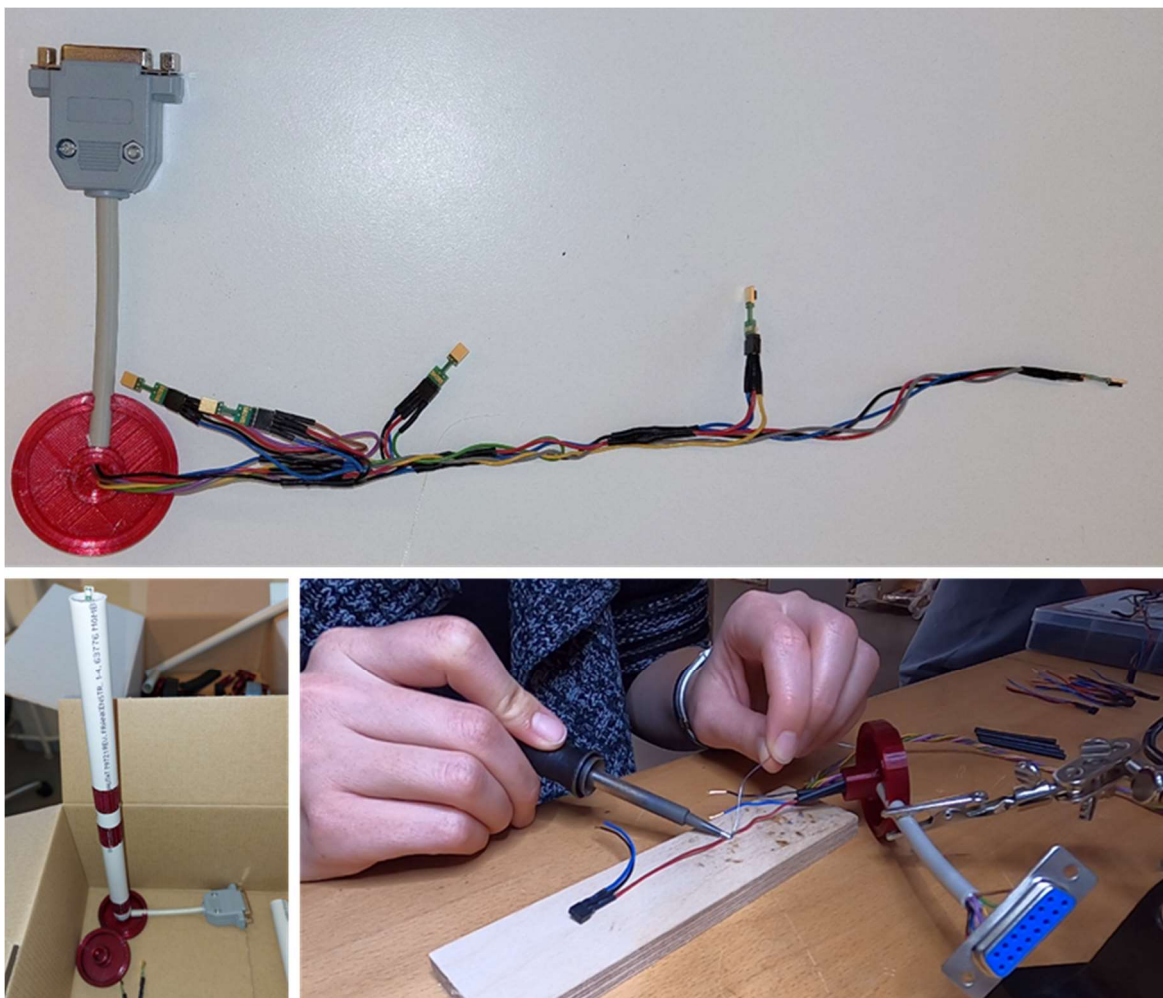


3.4.3 Messeinrichtung

Um die hygrothermischen Vorgänge innerhalb der Testfassaden präzise erfassen zu können, wurde bereits im Rahmen der Vorlaufforschung eine geeignete Messeinrichtung entwickelt und erprobt. Dabei kamen speziell konzipierte Messlanzen zum Einsatz, mit denen Temperatur- und Feuchtwerte in den einzelnen Schichtgrenzen zuverlässig erfasst werden können. Die Messlanzen bestehen aus Leerrohrmaterial und individuell 3D-gedruckten Zwischenstücken, in die die Sensoren positioniert werden. Die Sensoren befinden sich jeweils in den relevanten Schichtgrenzen, während die Zuleitungen durch das Leerrohr geführt werden. Dieses ist mit Schaumstoff ausgefüllt, um eine thermische und hygri sche Trennung der Sensoren sicherzustellen und Luftzirkulation innerhalb der Messlanze zu vermeiden. 3D-gedruckte Endkappen an den Innen- und Außenanschlüssen sowie eine silikonbasierte Abdichtung an der Einbaustelle verhindern den Luftaustausch zwischen Innen- und Außenraum über die Messeinrichtung. Diese Lösung bildet die Grundlage für die messtechnische Untersuchung des Materialverhaltens unter realen Klimabedingungen.

Für die zweite Untersuchung der Testfassaden wurden vier neue Messlanzen gebaut. Im Vergleich zur ersten Version aus der Vorlaufforschung wurden Verbesserungen an den Sensoranschlüssen und Kabelverbindungen vorgenommen. Zudem wurde für die zweite Untersuchung das neuere Sensormodell (Sensirion SHT85) verwendet. Abbildung 68 zeigt den Herstellungsprozess der Messlanzen.

Abbildung 68: Bau der Sensorlanzen für die Feuchte- und Temperaturmessung in den Testfassaden



Die für die Datenerfassung und -übertragung erforderlichen Mikroprozessor-Boards wurden neu aufgebaut und individuell programmiert. Die dazugehörigen Gehäuse sowie die Steckverbindungen zwischen den Messlanzen und den Boards wurden in Eigenleistung gefertigt. Aufgrund des größeren Aufwands für die Herstellung von vier vollständigen Messeinheiten, inklusive Kabel, Boards und Sensorik, verzögerte sich der Abschluss der Arbeiten, sodass der ursprünglich für Oktober 2023 vorgesehene Einbau der Messtechnik erst im Januar 2024 erfolgen konnte. Dafür wurden neue Bohrungen in die Testfassaden eingebracht. Die zuvor genutzten Öffnungen wurden mit Holzfaserdämmung verfüllt und mittels neu gedruckter Abdeckkappen luftdicht verschlossen. Anschließend erfolgte die Platzierung der Messlanzen in den neuen Bohrungen, die beidseitig sorgfältig mit Silikon abgedichtet wurden, um eine luftdichte Einbindung in die Konstruktion zu gewährleisten.

Für die Messung von Temperatur und Luftfeuchtigkeit wurden die Sensirion-Sensoren SHT75 (2021 bis 2023) und SHT85 (ab 2024) eingesetzt. Diese hochpräzisen Sensoren sind für ihre Zuverlässigkeit und Genauigkeit bekannt und werden häufig in Anwendungen eingesetzt, die präzise Messdaten erfordern.

Sensirion SHT75

Der SHT75 bietet eine typische Messgenauigkeit von $\pm 1,8$ % relativer Feuchte im Bereich von 10 % bis 90 % und $\pm 0,3$ °C für die Temperaturmessung im Bereich von -40 °C bis +123,8 °C. Die Sensoren sind mit einer langlebigen Schutzschicht ausgestattet, die sie vor Umwelteinflüssen schützt und eine langfristige Stabilität gewährleistet.

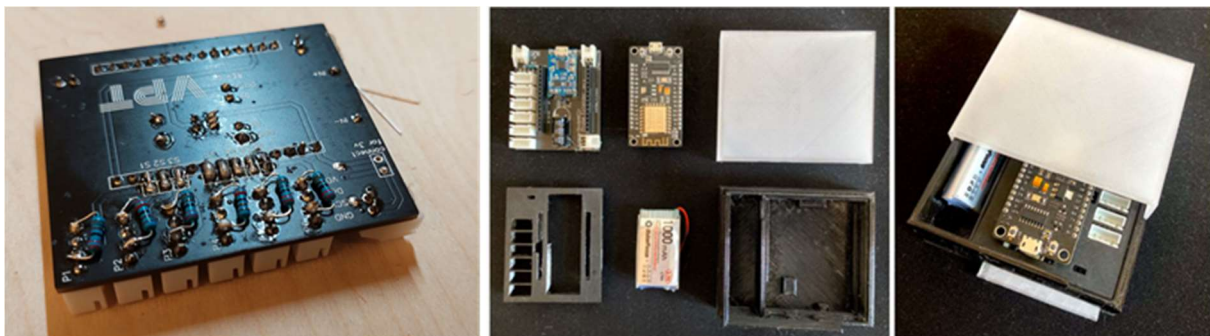
Sensirion SHT85

Der SHT85 ist eine verbesserte Version des SHT75 und zeichnet sich durch eine höhere Messgenauigkeit und robustere Bauweise aus. Die Feuchtemessgenauigkeit beträgt $\pm 1,5$ %RH im Bereich von 10 % bis 90 %, während die Temperaturgenauigkeit bei $\pm 0,1$ °C bis $\pm 0,2$ °C (je nach Temperaturbereich) liegt. Der Sensor verfügt über ein hydrophobes Schutzfilterelement, das ihn besonders widerstandsfähig gegenüber Staub und Feuchtigkeit macht. Beide Sensormodelle bieten eine hohe Präzision. Aufgrund von Alterungsprozessen, Extrembedingungen oder Installationsfehlern kann es trotzdem zu Fehlerwerten kommen.

3.4.4 Datenübertragung

Die Messdaten werden über das lokale WLAN des Rooftop-Experimentalgebäudes über MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) an eine Influx-Datenbank übermittelt. MQTT ist ein leichtgewichtiges, offenes Netzwerkprotokoll, das speziell für die Machine-to-Machine-Kommunikation (M2M) entwickelt wurde. Es ermöglicht die effiziente Übertragung von Nachrichten zwischen Geräten, selbst in Netzwerken mit hoher Latenz oder begrenzter Bandbreite.

Abbildung 69: Platine zur Messwerterfassung im 3D-gedruckten Gehäuse



Nachdem alle vorbereitenden Arbeiten abgeschlossen waren, konnte die Datenübertragung an die Influx-Zeitreihendatenbank am 25.01.2023 um 19:00 Uhr starten.

Die InfluxDB ist eine speziell für Zeitreihendaten entwickelte Open-Source-Datenbank, die große Mengen an Daten effizient verarbeitet und analysiert. Messdaten werden in der InfluxDB in einer strukturierten Form gespeichert, bei der jede Messung aus einem Zeitstempel, einem Messwert sowie optionalen Tags (Metadaten) besteht. Tags dienen dazu, Daten zu kategorisieren und eine schnelle Abfrage zu ermöglichen. Die Daten werden in sogenannten "Measurements" (Messungen) organisiert, die sich als Tabellen analog zu relationalen Datenbanken verstehen lassen.

Die Messdaten der Testfassadenprüfstände sowie die Wetter- und Innenraumklimadaten werden viertelstündlich bzw. stündlich erfasst. Jede Messung enthält einen Zeitstempel (z.B. 2024-12-16T12:00:00Z), den Messwert (z.B. 22.5 °C) und Tags wie den Sensornamen (z. B. Ziegel_aussen) oder den Standort (z. B. TestfassadeWest).

3.5 Validierung der Simulationsmodelle mit Messdaten

Die Validierung der Mess- und Simulationsergebnisse soll die Zuverlässigkeit und Aussagekraft der Untersuchungen sicherstellen. Insbesondere in Bereichen, in denen numerische Simulationen zur Modellierung physikalischer Prozesse eingesetzt werden, ist der Abgleich zwischen simulierten und gemessenen Daten entscheidend, um die Qualität und Genauigkeit der entwickelten Modelle zu bewerten. Durch den Vergleich der Simulationsergebnisse mit den experimentellen Messergebnissen kann geprüft werden, ob das Simulationsmodell die realen physikalischen Gegebenheiten korrekt abbildet. Eine erfolgreiche Validierung erhöht zudem das Vertrauen in die Simulation und erlaubt eine zuverlässige Anwendung des Simulationsmodells zur Vorhersage von komplexem Systemverhalten.

Das Ziel der Validierung ist es, die Abweichungen zwischen den Simulationsmodellen und der Messungen zu ermitteln, um die Genauigkeit des Modells zu überprüfen.

3.5.1 Messdaten

Die Messdaten werden automatisch viertelstündlich in der InfluxDB-Datenbank erfasst. Um die Daten für die Validierung nutzen zu können, wurden sie mit Hilfe von Python-Skripten analysiert und für die Weiterverarbeitung aufbereitet.

Bei der Messdatenerfassung in den Testfassadenprüfständen kam es aus verschiedenen Gründen zu Messfehlern und Datenausfällen. Starke Temperaturschwankungen, Feuchtigkeitseinlagerungen, Störungen in der Stromversorgung oder Datenübertragung führten hin und wieder zu Messfehlern oder Datenlücken. Werden derartige Messfehler nicht erkannt und behoben, so sind die aufgezeichneten Daten nur begrenzt valide und beeinträchtigen somit die Genauigkeit und Aussagekraft der Analysen.

Bei der Analyse der Messdaten aus der Vorlaufforschung zeigte sich, dass die Datensätze aus dem Jahr 2022 die höchste Qualität aufweisen. Aus diesem Grund wurde dieses Jahr für die Validierung der Simulationsmodelle herangezogen. Trotz der vergleichsweise guten Datenqualität traten auch in diesem Zeitraum einzelne Ausreißer sowie Datenlücken auf. Um ausschließlich reale Messwerte für die Validierung zu verwenden, wurde bewusst auf eine Interpolation verzichtet. Daher war ein möglichst vollständiger und konsistenter Datensatz entscheidend. Offensichtliche Messfehler wurden im Rahmen der Datenaufbereitung jedoch bereinigt.

Eine bewährte Methode zur Erkennung und Bereinigung von Ausreißern ist die Verwendung des z-Scores. Der z-Score misst, wie stark ein Datenpunkt von der mittleren Messung abweicht, relativ zur Standardabweichung der Daten. Werte mit einem z-Score oberhalb eines definierten Schwellenwerts (z. B. ± 3) gelten als Ausreißer und können als potenzielle Messfehler identifiziert werden.

Die Datenbereinigung mit der z-Score-Methode umfasst die folgenden Schritte:

1. Berechnung des Mittelwerts und der Standardabweichung der erfassten Daten.
2. Ermittlung des z-Scores für jeden Datenpunkt anhand der Formel:

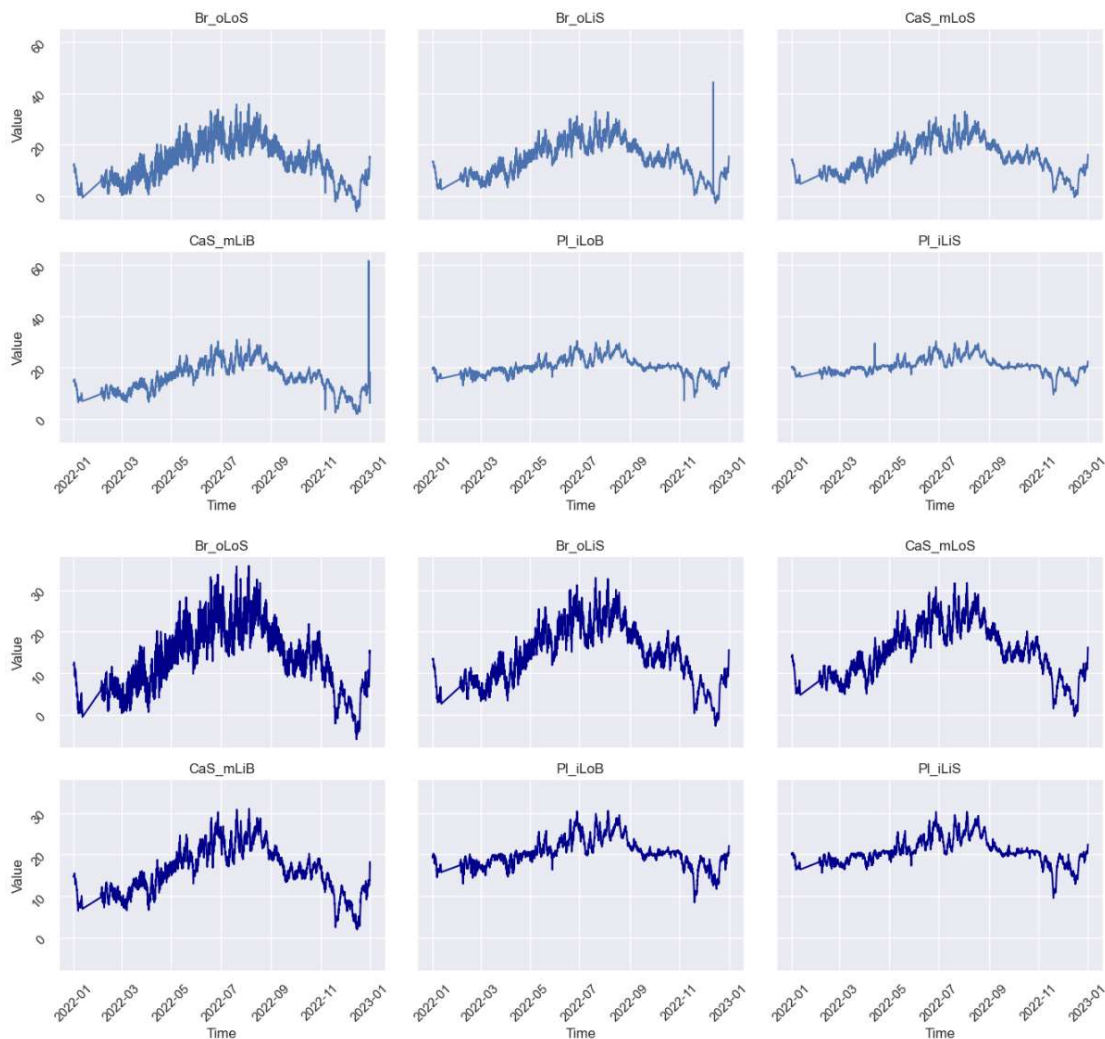
$$z = \frac{x - \mu}{\sigma}$$

wobei x der Messwert, μ der Mittelwert und σ die Standardabweichung ist.

3. Identifikation und Entfernung von Ausreißern, bei denen der z-Score außerhalb des festgelegten Schwellenwerts liegt.

Die Abbildung 70 zeigt die Datenbereinigung der Temperaturmessung aus der Vorlaufforschung für das Jahr 2022. Durch diese Methode können stark abweichende Messwerte effektiv entfernt werden, ohne die Integrität der verbleibenden Daten zu beeinträchtigen. Eine regelmäßige Überprüfung der Sensoren und die Anwendung solcher Bereinigungsverfahren gewährleisten eine hohe Datenqualität und erhöhen die Zuverlässigkeit der Analysen.

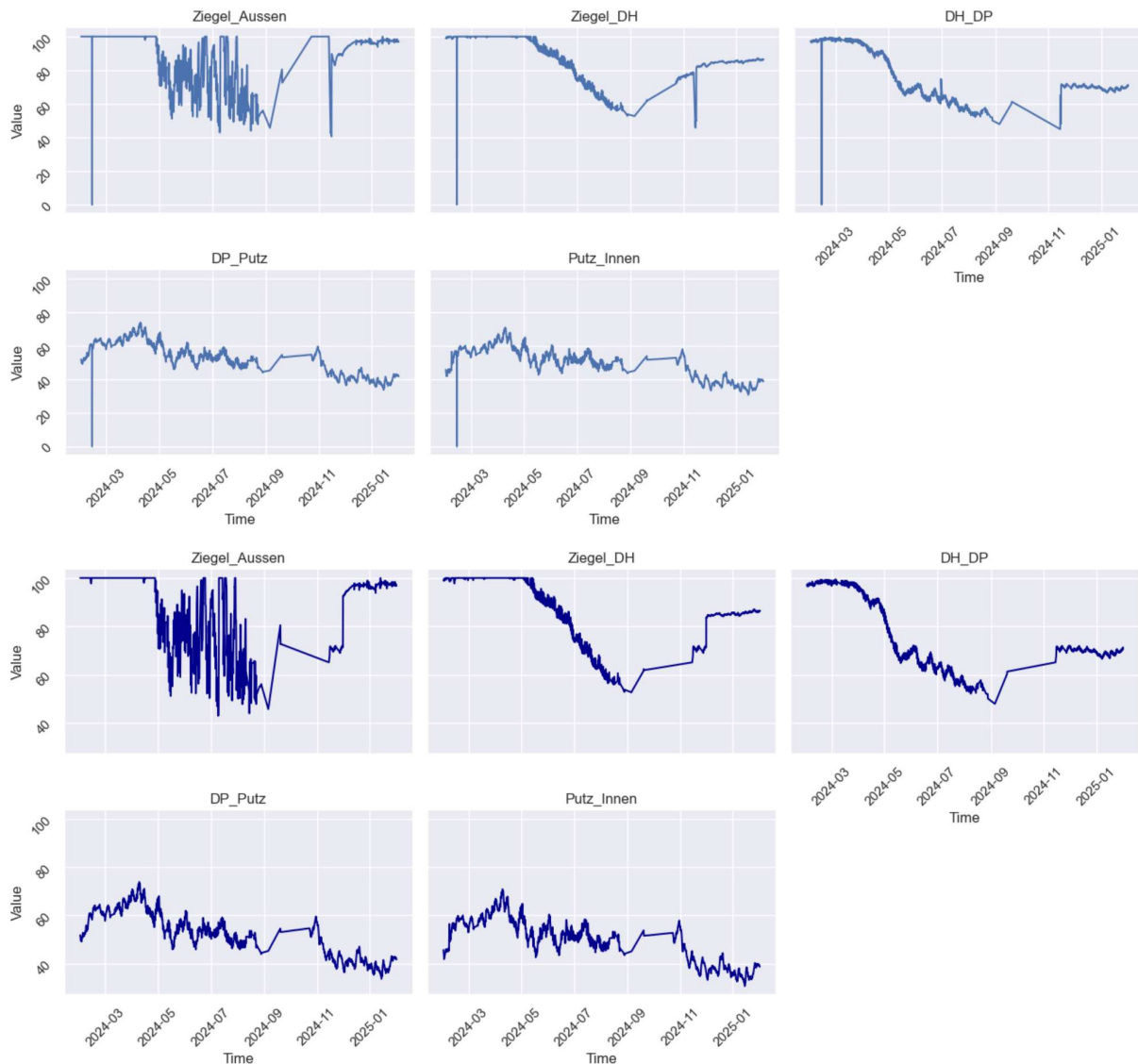
Abbildung 70: Datenbereinigung mit der z-Score Methode am Beispiel der Temperaturmessung im Jahr 2022: das obere Diagramm zeigt die Daten mit Ausreißern, das untere Diagramm zeigt die bereinigten Daten



Auch die Messdaten der neuen Testfassaden aus dem Jahr 2024 wiesen teilweise Datenlücken und Ausreißer auf, die bereinigt werden mussten. Dafür wurde die gleiche Methode wie oben beschrieben

angewendet. Zu besonders häufigen Datenausfällen kam es bei den Messungen in der Westfassade ohne Luftschicht. Die Abbildung 71 zeigt die Messung der relativen Feuchte in den Schichtgrenzen. Ende August gab es einen größeren Datenausfall, der zunächst eine Fehlersuche erforderte. Es wurde das Board zur Datenübertragung überprüft und Verbindungen neu verlötet. Zudem wurde die Messlanze ausgebaut und der äußere Sensor an der Ziegelaußenwand wurde getauscht, da dieser häufig fehlerhafte Werte sendete. Nachdem alles überprüft wurde, konnten ab Oktober wieder fehlerfrei Messdaten gesendet werden.

Abbildung 71: Datenbereinigung mit der z-Score Methode am Beispiel der Feuchtemessung im Jahr 2024: das obere Diagramm zeigt die Daten mit Ausreißern, das untere Diagramm zeigt die bereinigten Daten



3.5.2 Simulationsdaten

Für die Validierung wurden die Ergebnisse der Simulation 2 (Kapitel 3.4.1 Hygrothermische Simulation der Testfassaden (Simulation 2)) benötigt. Die Auswertung erfolgt für insgesamt sechs Varianten: zwei Testfassaden aus dem Jahr 2022 und vier Testfassaden ab Januar 2024.

Bei der Simulation der Varianten aus der Vorlaufforschung musste berücksichtigt werden, dass die zugehörigen Messungen bereits seit über einem Jahr liefen. Um vergleichbare Randbedingungen zu

schaffen und mögliche Einflüsse durch den Einschwingvorgang zu minimieren, wurde die Simulationsdauer auf drei Jahre festgelegt. Für alle drei Jahre wurde die gleiche Klimadatendatei aus dem Jahr 2022 verwendet. Das letzte Simulationsjahr diente anschließend als Grundlage für die Validierung.

Die Datenerfassung der neuen Testfassaden startete Ende Januar 2024. Um ein vollständiges Jahr abbilden zu können, erfolgte die Simulation der neuen Testfassadenprüfstände für den Zeitraum vom 01.02.2024 bis zum 31.01.2025. Zur Berücksichtigung der Anfangsfeuchten und -temperaturen, wurden in den jeweiligen Schichten im Simulationsmodell die zum Startzeitpunkt gemessenen Anfangsbedingungen eingesetzt. Ziel war es, die realen Bedingungen so gut wie möglich in der Simulation nachzubilden. Um die realen Anfangsbedingungen berücksichtigen zu können, musste das erste Simulationsjahr für die Auswertung verwendet werden. Daher kann eine Abweichung in den ersten Monaten durch den Einschwingvorgang der Simulation nicht ausgeschlossen werden, wird jedoch durch die realen Anfangsbedingungen leicht abgemindert.

3.5.3 Vergleich von Simulations- und Messdaten

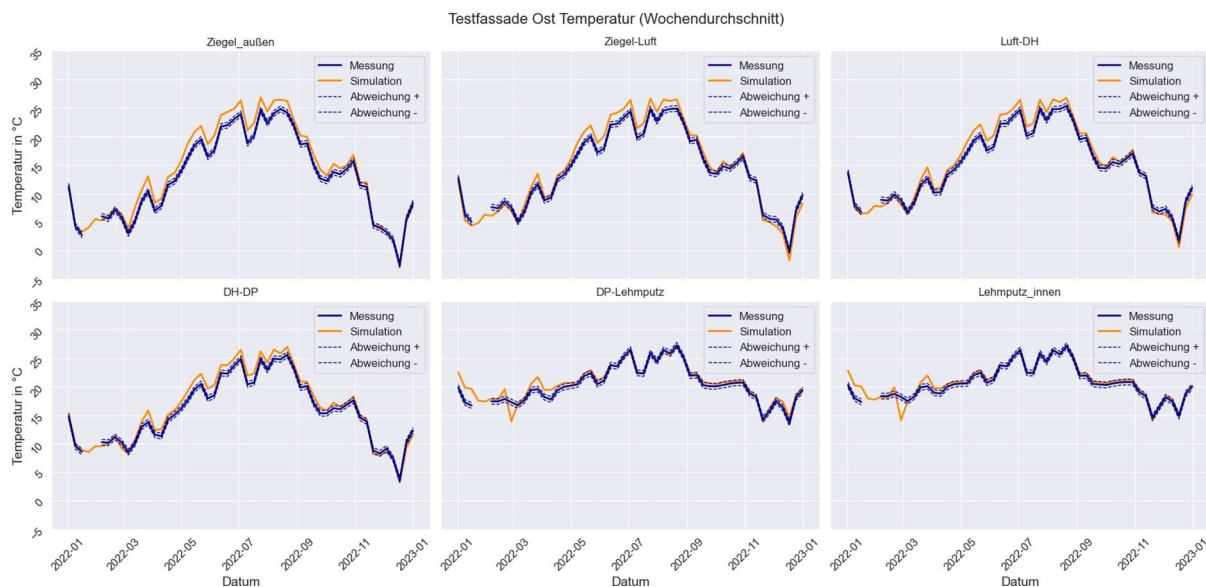
Für die Validierung der Simulationsmodelle wurden die Simulationsergebnisse und die Messdaten der Sensorpunkte in den Zwischenschichten verglichen. Alle aufbereiteten Daten wurden mit Hilfe eines Python-Skriptes zusammengeführt und als Grafik ausgegeben, in der jeder Messpunkt einzeln dargestellt wird. Für eine übersichtlichere Darstellung wurden die stündlichen Daten gemittelt und als wöchentliche Daten dargestellt. Zudem enthalten die Grafiken die vom Hersteller der Sensoren angegebenen Messabweichungen.

3.5.3.1 Validierung der Testfassaden der Vorlaufforschung für das Jahr 2022

Temperatur Ostfassade 2022

In der Abbildung 72 wird der Jahrestemperaturverlauf der Messdaten (blaue Linie) und der Simulationsdaten (gelbe Linie) aus dem Jahr 2022 im wöchentlichen Durchschnitt für die jeweiligen Sensorpunkte dargestellt. Die Temperaturen im Wochendurchschnitt zeigen eine sehr gute Übereinstimmung des Kurvenverlaufs von Messung und Simulation. In den äußeren und mittleren Schichten sind die Simulationswerte im Sommer etwas höher als die Messwerte. Das kann an der Verschattungssituation vor Ort liegen. Zudem stammen die Wetterdaten für die Simulation von verschiedenen Standorten: Temperatur und relative Feuchte vom Rooftop-Gebäude; Wind, Regen, Luftdruck von der nächstgelegenen Wetterstation Tempelhof; Strahlungsdaten von der Wetterstation Potsdam (vgl. Kapitel 3.4.1.1 Randbedingungen für die Simulation der Testfassaden).

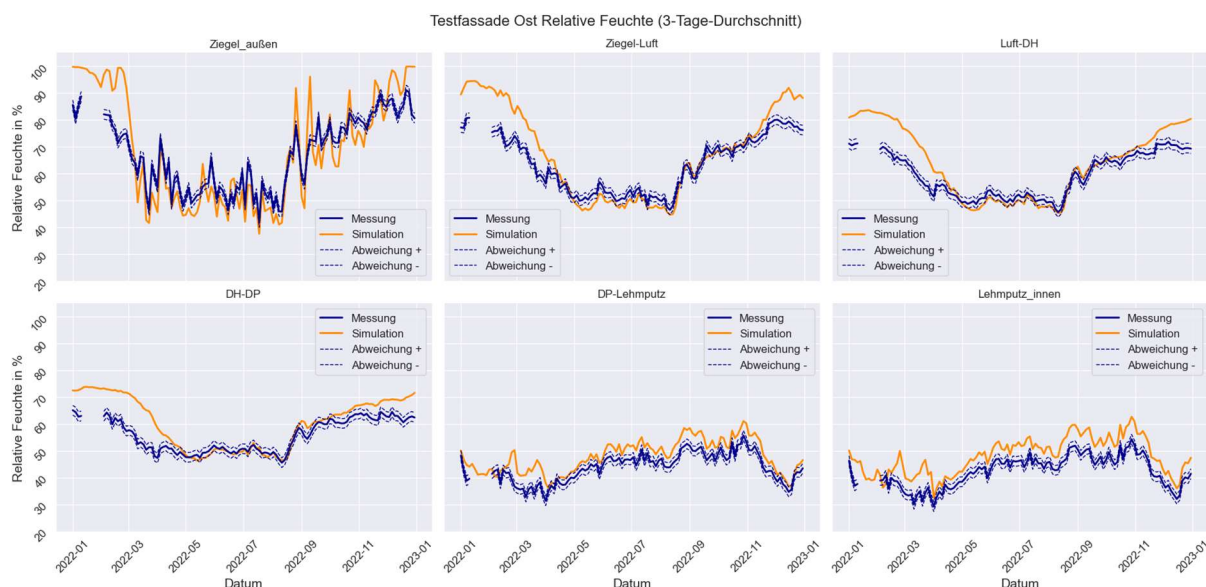
Abbildung 72: Modellvergleich Testfassade Ost – Temperatur im Wochendurchschnitt in der Messperiode 2022



Relative Feuchte Ostfassade 2022

Der Vergleich der Wochendurchschnitte von Messung und Simulation der relativen Feuchten in Abbildung 73 zeigt eine gute Übereinstimmung des Kurvenverlaufs. Die Simulationsergebnisse der inneren Schichtgrenzen liegen teilweise etwas über den Messergebnissen, in den mittleren Schichtgrenzen gleichen sie sich im Sommer sehr gut an. Im Winter zeigen die Simulationsergebnisse eine höhere relative Feuchte als die gemessenen Werte und auch in der äußeren Schichtgrenzen sind die Simulationsergebnisse im Winter höher als die Messergebnisse. Die Abweichungen können zum einen daraus resultieren, dass für diesen Messzeitraum hauptsächlich die Wetterdaten der Wetterstation des Deutschen Wetterdienstes verwendet wurden, da nicht ausreichend lokale Wetterdaten vorlagen (vgl. Kapitel 3.4.1.1 Randbedingungen für die Simulation der Testfassaden). Zum anderen wurden die Räume im Messzeitraum kaum bis gar nicht genutzt. Dadurch können die Messungen keine realistischen Werte eines Gebäudes im Betrieb abbilden. In der Grafik ist außerdem zu erkennen, dass die Messergebnisse der Schichtgrenze Ziegel_außen und Ziegel-Luft niedriger sind, als die Simulationsergebnisse und anders als in den Simulationen deutlich unter einem kritischen Wert von 90% r. F. bleiben.

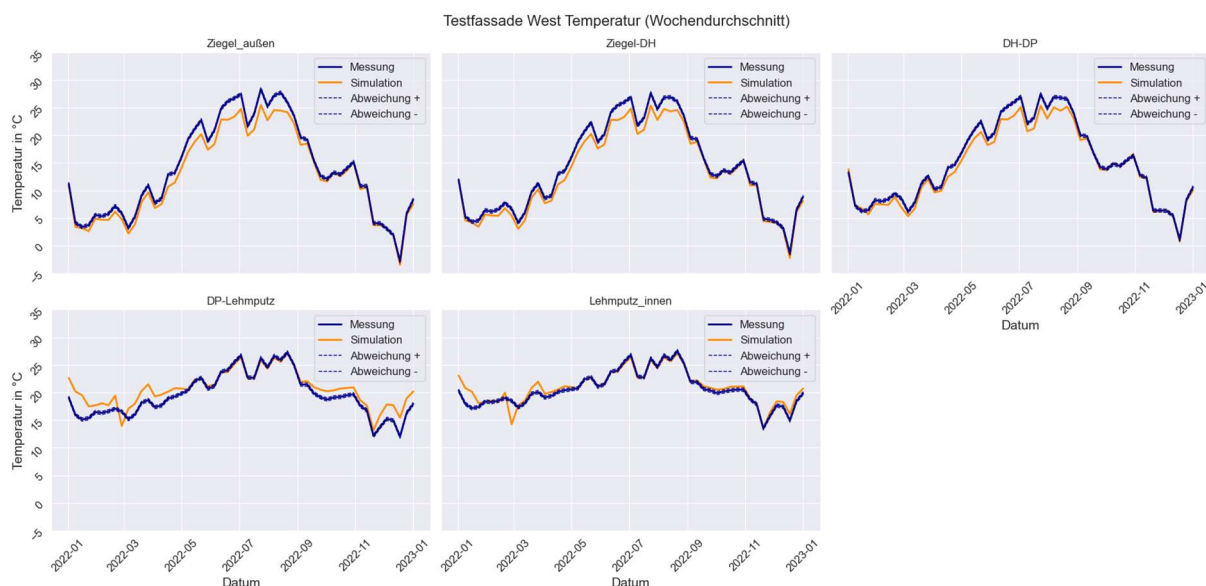
Abbildung 73: Modellvergleich Testfassade Ost – Relative Feuchte im Wochendurchschnitt in der Messperiode 2022



Temperatur Westfassade 2022

Die Temperaturkurven der Westfassade in der Abbildung 74 passen besonders in den inneren Schichtgrenzen sehr gut übereinander. In den äußeren und mittleren Schichtgrenzen sind die gemessenen Temperaturen im Sommer höher als die Simulationsergebnisse. Das liegt vermutlich daran, dass die reale Sonneneinstrahlung vor Ort höher war, als die der Klimadaten aus Potsdam. Die nach Westen ausgerichtete Fassade wird im Sommer über den ganzen Nachmittag von der Sonne angestrahlt, wodurch sich hohe gemessene Außentemperaturen ergeben. Trotz der Abweichungen in der Höhe der Temperaturen ist festzustellen, dass die Amplituden von Messung und Simulation gut übereinstimmen.

Abbildung 74: Modellvergleich Testfassade West – Temperatur im Wochendurchschnitt in der Messperiode 2022

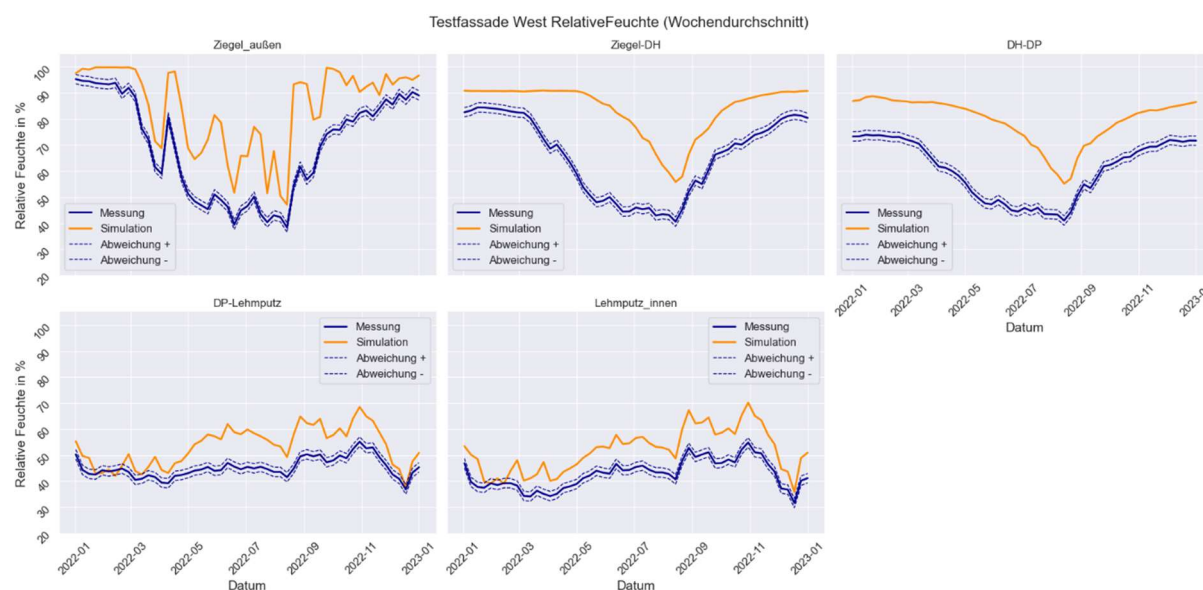


Relative Feuchte Westfassade 2022

Im Vergleich zur Ostfassade sind die Abweichungen (Abbildung 75) zwischen Messung und Simulation auf der Westseite deutlich größer. Die höheren Feuchtigkeitswerte der Simulationsergebnisse sind

vermutlich darauf zurückzuführen, dass ein Großteil der Wetterdaten von anderen Standorten stammen. Insbesondere Niederschlag, Windrichtung und Windgeschwindigkeit weichen von den Bedingungen vor Ort deutlich ab. Das Rooftop-Gebäude steht in einem Innenhof und ist von anderen hohen Gebäuden und Bäumen umgeben. Die Wetterstation am ehemaligen Flughafen Tempelhof befindet sich dagegen auf einer großen Freifläche. Dadurch ist der Einfluss von Wind und Schlagregen in der Simulation größer, als vor Ort, weshalb die Messergebnisse besonders in den äußeren und mittleren Schichtgrenzen niedriger sind als die Simulationsergebnisse. Bis auf einen kurzen Zeitraum im Winter, bleiben auch auf der Westseite die Messwerte unter 90% r. F. und somit in einem unkritischen Bereich.

Abbildung 75: Modellvergleich Testfassade West – Relative Feuchte im Wochendurchschnitt in der Messperiode 2022



Fazit

Insgesamt zeigt der Vergleich der Messdaten und Simulationsergebnisse für das Jahr 2022 eine gute Übereinstimmung. Zu Abweichungen kommt es vermutlich aufgrund von unterschiedlichen Klimabedingungen und durch abweichende Materialparameter. Außerdem ist festzustellen, dass die Luftschicht keine negativen Auswirkungen auf die Dämmschichten hat. Die Luftschicht wirkt wie ein Puffer zwischen Außenwand und Dämmung, wodurch die Dämmschicht einer geringeren Feuchtebelastung durch eindringende Feuchtigkeit von außen ausgesetzt ist. Es zeigt sich, dass diese Konstruktion bei undichten Fassaden mit geringer Wandstärke, wie es bei Fachwerkfassaden der Fall ist, von Vorteil sein kann.

3.5.3.2 Validierung der neuen Testfassaden für das Jahr 2024

Temperatur Ostfassade 2024

Die Auswertung der Mess- und Simulationsdaten von 2024 umfassen den Zeitraum vom 01.02.2024 bis zum 31.01.2025. Die Simulation erfolgte mit den vorhandenen, vor Ort gemessenen Wetter- und Innenraumklimadaten. Zu den nicht vor Ort gemessenen Wetterdaten zählen Solarstrahlungsdaten und Luftdruck. Diese Daten wurden von den Wetterstationen Tempelhof (Luftdruck) und Potsdam (Solarstrahlung) des Deutschen Wetterdienstes genutzt.

Die Raumluft im Rooftop-Gebäude wurde im Winter mit Luftbefeuchtern auf 55-60% relative Feuchte befeuchtet, was üblichen Nutzungsbedingungen in Wohnräumen während der Heizperiode entspricht. Für die neuen Testfassaden ist die Untersuchung der Auswirkungen der Luftschicht deutlich

aussagekräftiger, da in beiden Testfassaden jeweils eine Variante mit Luftschicht und eine Variante ohne Luftschicht verbaut wurde.

Die Kurvenverläufe der Temperaturen von Messung und Simulation in Abbildung 76 und Abbildung 77 stimmen sehr gut überein. Die simulierten Temperaturen sind etwas höher als die gemessenen Temperaturen. Das könnte daran liegen, dass die Solarstrahlungsdaten für die Simulation von einem anderen Standort verwendet wurden. Zudem ist die Ostseite des Rooftop-Gebäudes teilweise verschattet, was in der Simulation nicht berücksichtigt wird. Eine andere Ursache könnten abweichende Materialeigenschaften sein. Des Weiteren sind keine wesentlichen Unterschiede zwischen den Varianten mit Luftschicht und ohne Luftschicht festzustellen.

Abbildung 76: Modellvergleich Testfassade Ost ohne Luftschicht – Temperatur im Wochendurchschnitt in der Messperiode 2024

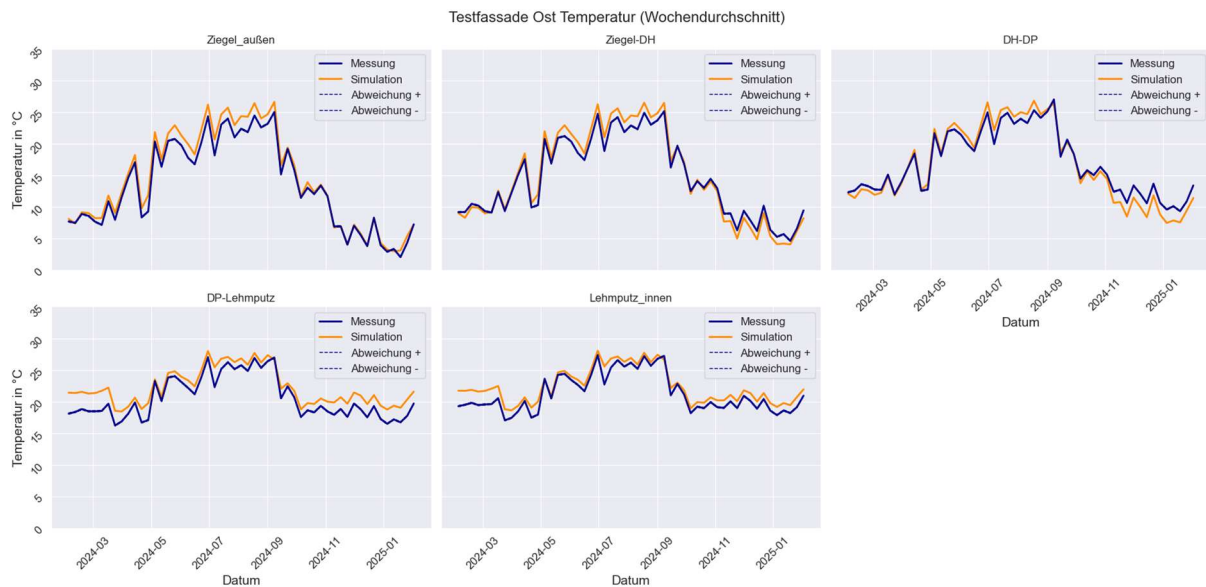
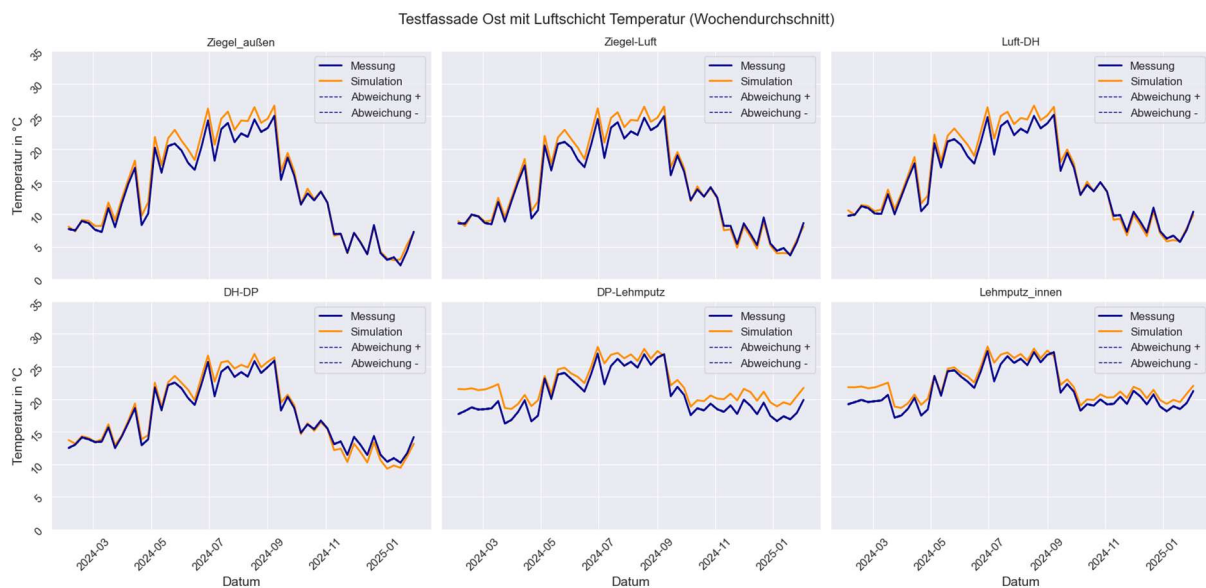


Abbildung 77: Modellvergleich Testfassade Ost mit Luftschicht – Temperatur im Wochendurchschnitt in der Messperiode 2024



Relative Feuchte Ostfassade 2024

In Abbildung 78 und Abbildung 79 sind die relativen Feuchten ohne Luftschicht (obere Grafik) sowie mit Luftschicht (untere Grafik) in den einzelnen Schichtgrenzen dargestellt. Die Übereinstimmung des Kurvenverlaufs in den inneren Schichtgrenzen ist sehr gut. Abweichungen sind vor allem in der äußeren Schichtgrenzen (Ziegel_außen) und der angrenzenden Schichtgrenze (Ziegel_DH bzw. Ziegel_Luft und Luft_DH) festzustellen. Die Abweichungen sind wahrscheinlich darauf zurückzuführen, dass sich die Materialeigenschaften des verbauten Ziegels und des im Simulationsprogramm gewählten Ziegels unterscheiden. Zudem kann es sein, dass die höhere gemessene relative Feuchte auf die Einbaufeuchte zurückzuführen ist. Die Fassaden wurden im November eingebaut und konnten über den Winter nicht richtig trocknen. Für die Simulation wurden als Anfangsbedingung die gemessenen Temperaturen und relativen Feuchten der einzelnen Schichtgrenzen eingestellt, trotzdem gibt es einen Einschwingvorgang in der Simulation, der ebenfalls Einfluss hat auf den Vergleich. Es zeigt sich, dass auch hier die Luftschicht einen positiven Effekt auf die relative Feuchte in den Bauteilschichten hat.

Abbildung 78: Modellvergleich Testfassade Ost ohne Luftschicht – Relative Feuchte im Wochendurchschnitt in der Messperiode 2024

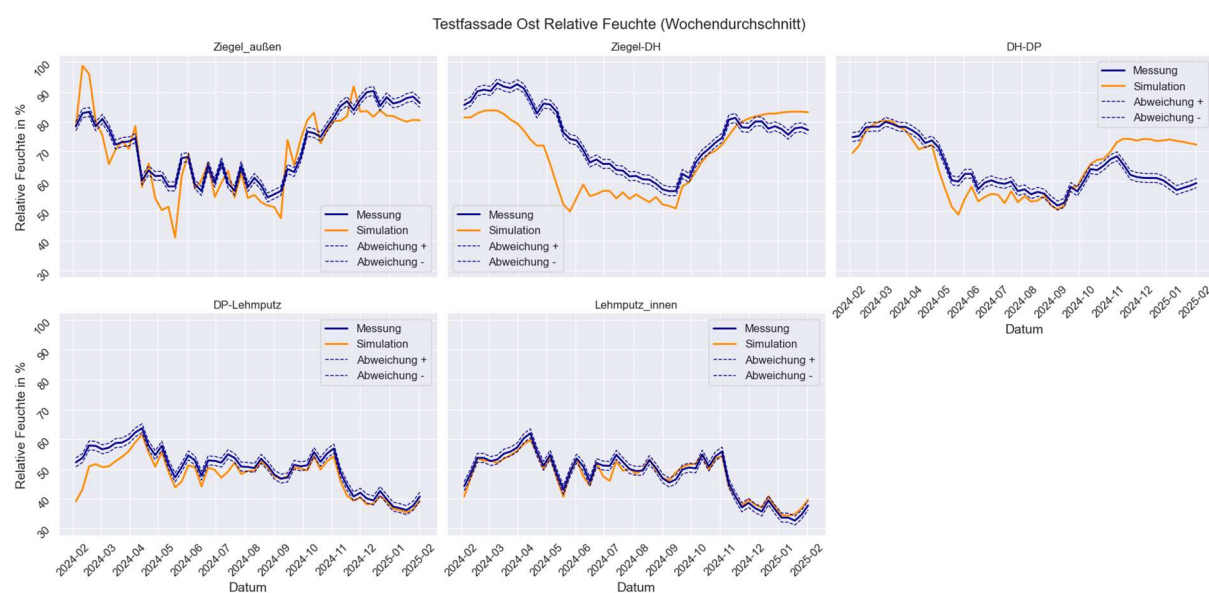
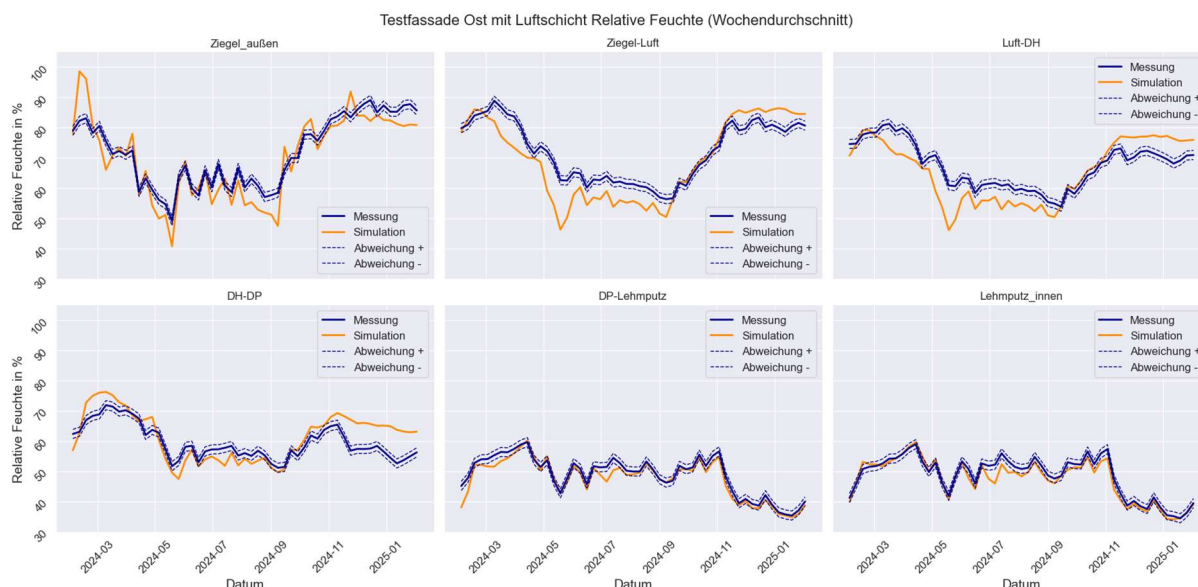


Abbildung 79: Modellvergleich Testfassade Ost mit Luftschicht – Relative Feuchte im Wochendurchschnitt in der Messperiode 2024



Temperatur Westfassade 2024

Abbildung 80 und Abbildung 81 zeigt die Jahrestemperaturverläufe der Westfassade. Leider kam es bei der Datenaufzeichnung dieser Testfassade zu Ausfällen, weshalb ein großer Teil der Messungen im Spätsommer und Herbst fehlt. Im Zuge der Fehlersuche wurde die Messlanze ausgebaut und überprüft. Es wurde festgestellt, dass der Sensor der Außenseite (Ziegel_außen) die relative Feuchte nicht mehr korrekt misst und dauerhaft Werte von 100% anzeigt. Dieser wurde ersetzt und die Sensorlanze wieder eingebaut. Zudem wurde das Mikroprozessor-Board überprüft. Dabei wurde festgestellt, dass eine Steckverbindung einen Wackelkontakt hatte. Nach Erneuerung der fehlerhaften Komponenten, konnten die Daten weiter erfasst werden.

Im Vergleich zur Ostfassade sind die gemessenen Temperaturen in den äußeren Schichtgrenzen leicht höher als die der Simulation. Das liegt vermutlich an der intensiven solaren Einstrahlung auf die Westseite und unterschiedlichen Materialparametern. In den mittleren Schichtgrenzen gibt es eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation. Die inneren Schichtgrenzen weichen in ihrer Höhe leicht voneinander ab, jedoch stimmt der Kurvenverlauf überein.

Abbildung 80: Modellvergleich Testfassade West ohne Luftschicht – Temperatur im Wochendurchschnitt in der Messperiode 2024

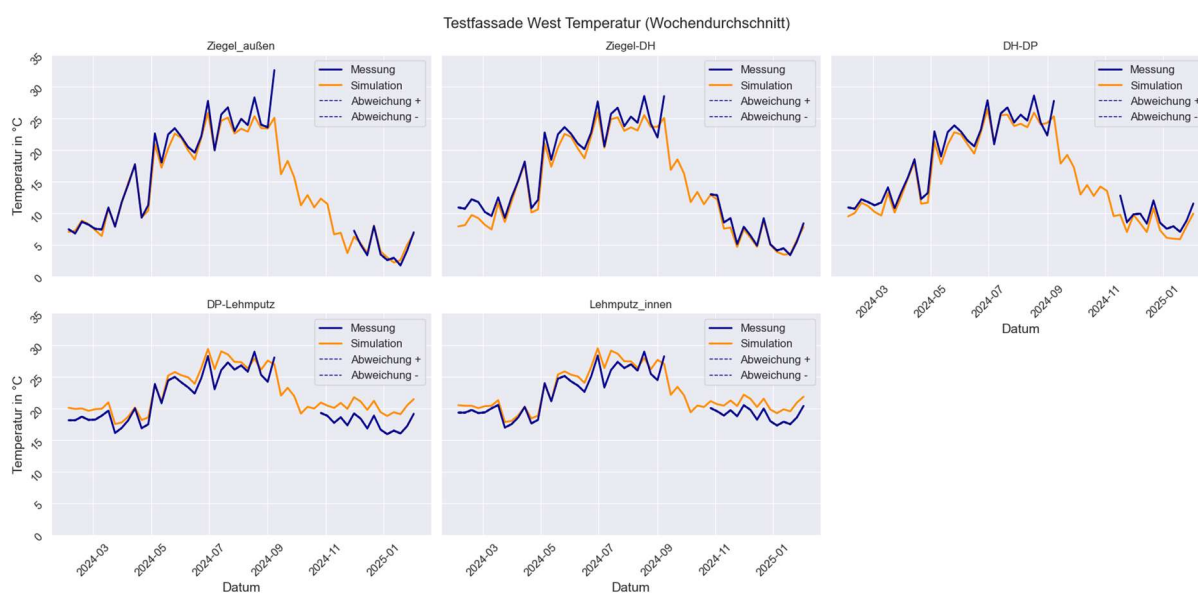
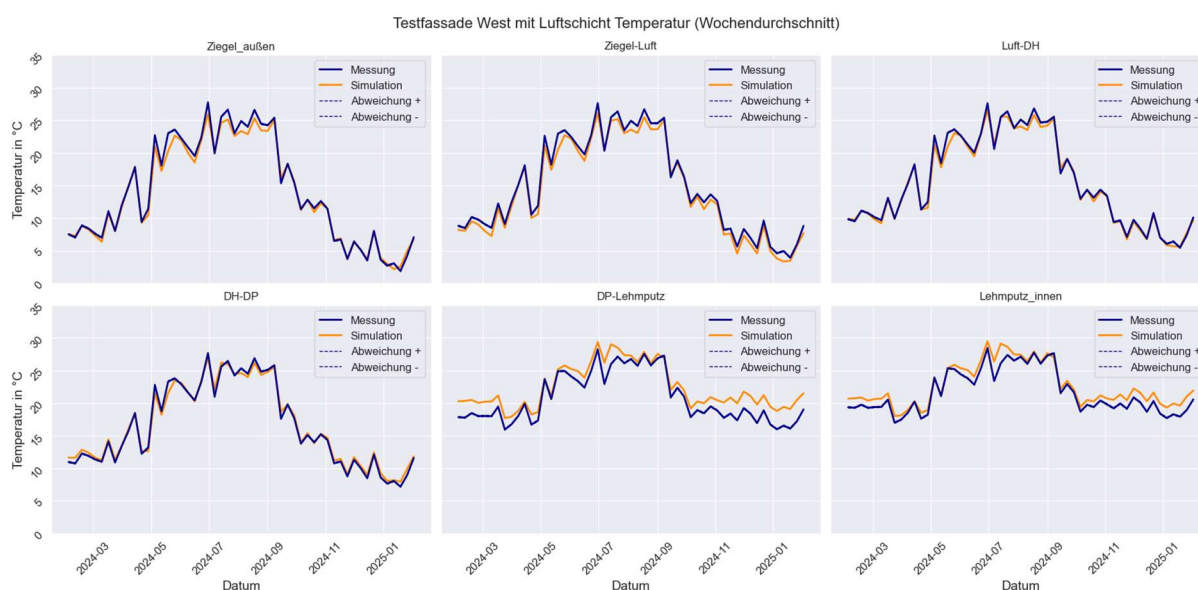


Abbildung 81: Modellvergleich Testfassade West mit Luftschicht – Temperatur im Wochendurchschnitt in der Messperiode 2024



Relative Feuchte Westfassade 2024

Die Abbildung 82 und Abbildung 83 zeigen die Mess- und Simulationsdaten der relativen Feuchte der Westfassade in den einzelnen Schichtgrenzen. Im Vergleich zum Jahr 2022 sind die Abweichungen zwischen Messung und Simulation deutlich geringer. Das deutet darauf hin, dass die hohe Abweichung in 2022 tatsächlich auf den Klimastandort zurückzuführen ist. Auffällig ist, dass die Abweichungen der Ziegelaußenseite am größten sind. Das könnte durch unterschiedliche Materialparameter der Ziegel zu erklären sein. Die sehr hohe relative Feuchte der Variante ohne Luftschicht am Außenziegel könnte mit dem fehlerhaften Sensor zusammenhängen, der möglicherweise bereits kurz nach dem Einbau falsche Werte gesendet hat. Die zu Beginn der Messung sehr hohen relativen Feuchten in den Schichtgrenzen zu DH sind durch die hohe Baufeuchte nach dem Einbau zu erklären. Nach den Sommermonaten, in denen die Materialien trocknen konnten, steigen die Feuchtwerte nicht mehr auf ein so hohes Niveau

wie zu Beginn der Messung. Die inneren Schichtgrenzen, vor allem die Innenseite des Lehmputz der Variante mit Luftschicht zeigen eine sehr gute Übereinstimmung von Messung und Simulation.

Abbildung 82: Modellvergleich Testfassade Ost ohne Luftschicht – Relative Feuchte im Wochendurchschnitt in der Messperiode 2024

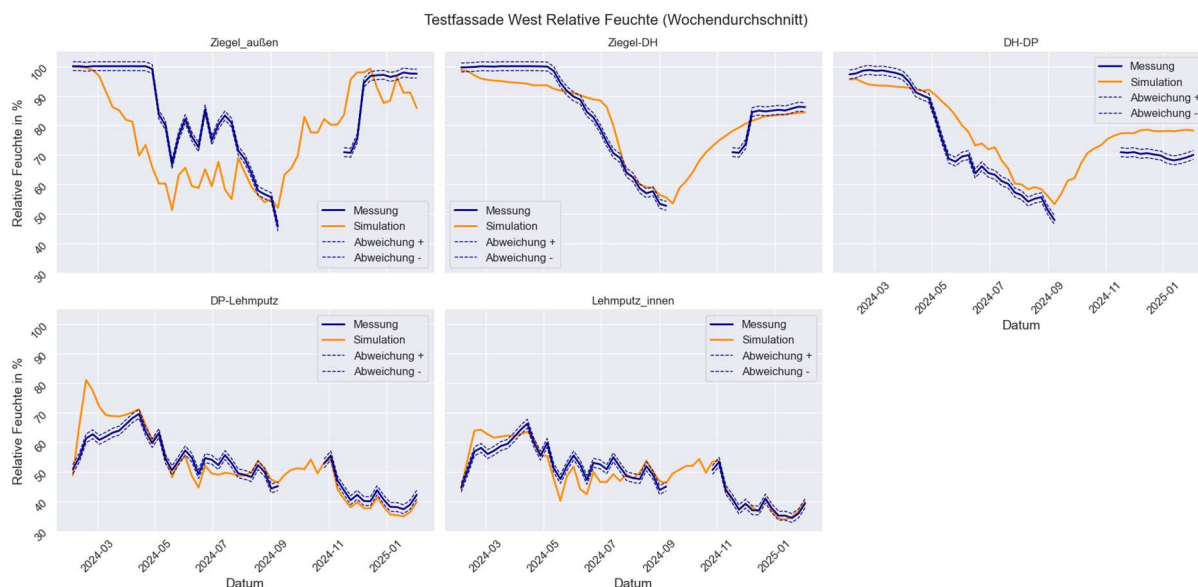
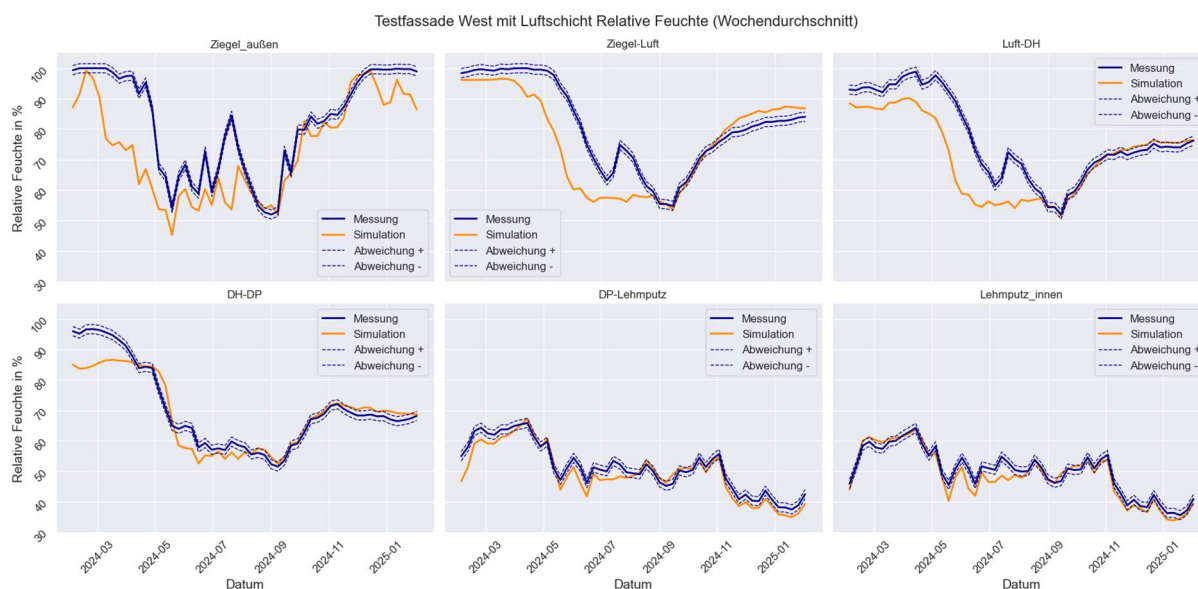


Abbildung 83: Modellvergleich Testfassade Ost mit Luftschicht – Relative Feuchte im Wochendurchschnitt in der Messperiode 2024



Fazit

Der Vergleich der Mess- und Simulationsergebnisse aus dem Jahr 2024 zeigt eine gute Übereinstimmung von Messdaten und Simulation, vor allem in den inneren Schichtgrenzen und der Innenseite der Innenwand.

In den äußeren Schichtgrenzen gibt es zum Teil größere Abweichungen. Es wird vermutet, dass dies durch die Baufeuchte nach dem Neubau der Testfassaden verursacht wird und an unterschiedlichen Materialparametern der in der Simulation ausgewählten Materialien liegen könnte.

3.5.3.3 Analyse der Ergebnisse

Insgesamt weisen die Vergleiche darauf hin, dass die Simulationen die Realität sehr gut abbilden können, sofern die Klima- und Innenraumbedingungen den realen Bedingungen entsprechen und die Materialparameter gut mit den realen Materialdaten übereinstimmen.

Die Temperaturen zeigen generell bei allen Varianten eine gute Übereinstimmung. Die relativen Feuchten nur zum Teil. Die Analyse der Vorlaufforschung hat ergeben, dass die Klimadaten vor allem auf der Wetterseite einen großen Einfluss darauf haben, ob die Simulation den real gemessenen Werten entspricht, wohingegen die Übereinstimmung der wetterabgewandten Ostseite gut war. Das zeigen auch die Vergleiche der neuen Testfassaden für das Jahr 2024. Für diese Simulationen wurden hauptsächlich vor Ort gemessene Wetterdaten verwendet. Alle vier Varianten zeigen eine gute Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation. Abweichungen sind wahrscheinlich aufgrund unterschiedlicher Materialparameter, durch die hohen Baufeuchten zu Beginn sowie den Einschwingvorgang der Simulation zu erklären. Daher wäre es interessant, ob die Übereinstimmung im zweiten Messjahr noch genauer wird. Die Messungen laufen auch nach Projektende weiter und werden im Zuge des hygrothermischen Monitorings auch in Zukunft weiter ausgewertet. Die Veröffentlichung der Daten erfolgt auf der Website des Fachgebiets: <https://www.udk-berlin.de/studium/architektur/fachgebiete/versorgungsplanung-und-versorgungstechnik/>

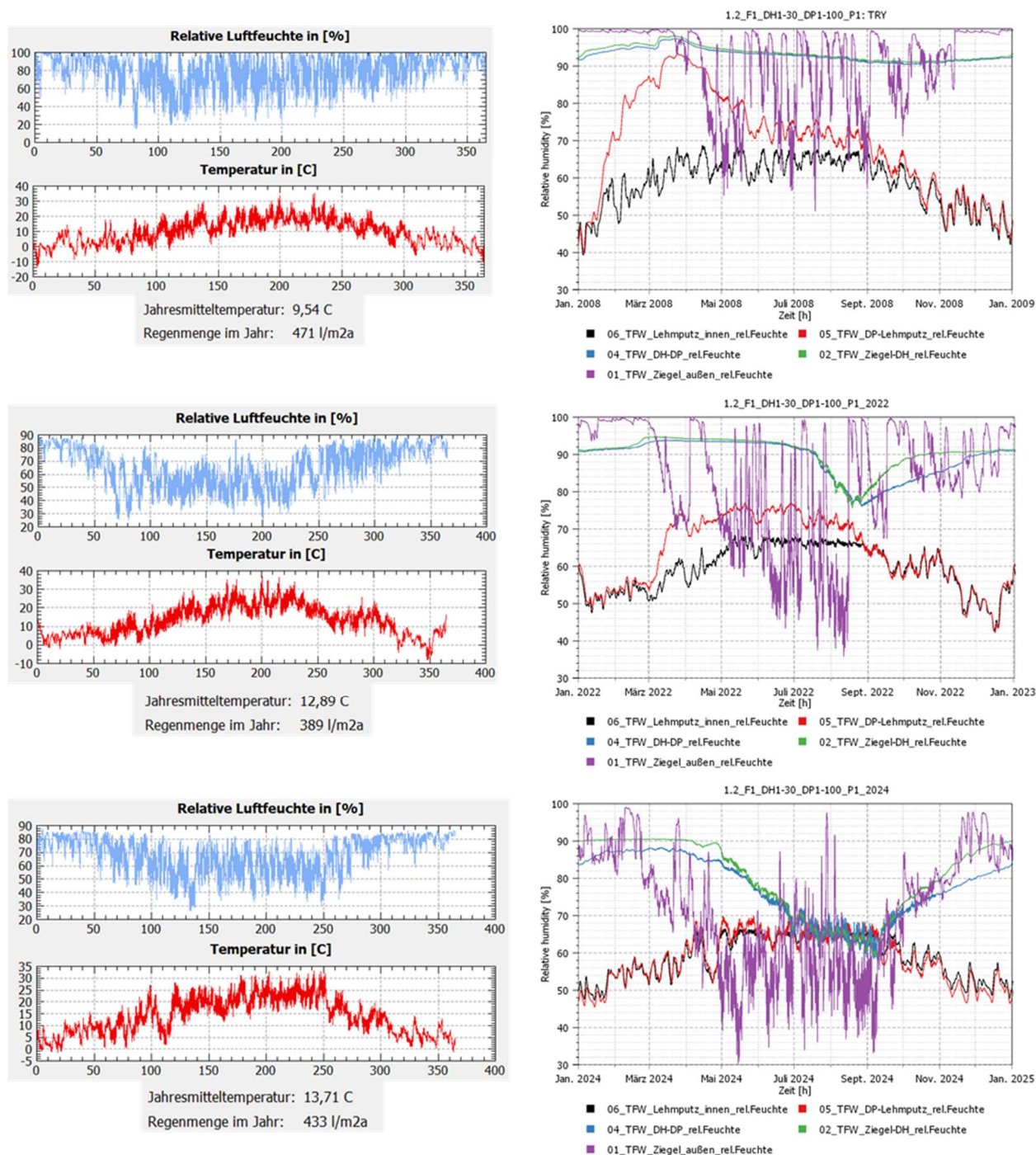
Einordnung der Ergebnisse im Vergleich zu normierten Klimadaten (TRY2011):

Ein Vergleich zwischen den gemessenen Daten der Jahre 2022 und 2024 und den Simulationsergebnissen mit dem normierten Testreferenzjahr (TRY2011) zeigt, dass kritische Feuchtwerte im realen Messbetrieb deutlich seltener auftraten. Dies liegt vor allem daran, dass das TRY2011 ein synthetischer Datensatz ist, der aus statistischen Mittelwerten und typischen Wetterverläufen eines älteren Zeitraums (1988–2007) (Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR), Climate & Environment Consulting Potsdam GmbH, Deutscher Wetterdienst (DWD), 2014) generiert wurde. Dabei ergeben sich signifikante Unterschiede zu den tatsächlichen Wetterbedingungen der letzten Jahre: Die Jahresmitteltemperaturen in den Jahren 2022 und 2024 lagen im Mittel um 3,35 °C bzw. 4,17 °C höher als im TRY2011. Gleichzeitig war die relative Luftfeuchte in den aktuellen Jahren deutlich geringer. Dieser Unterschied verdeutlicht einen allgemeinen Klimatrend: wärmere, tendenziell trockenere Jahre. Daraus folgt, dass Simulationen mit dem TRY2011 eher konservative Ergebnisse liefern, da sie ein feuchteres und kühleres Klima abbilden. In der Realität treten unter aktuellen klimatischen Bedingungen offenbar seltener kritische Feuchtebelastungen auf – eine Erkenntnis, die für die Bewertung von Innendämmsystemen von großer Bedeutung ist.

Fazit:

Die Validierung der Simulationsmodelle anhand gemessener Daten zeigt, dass verlässliche Prognosen möglich sind, insbesondere dann, wenn reale Klimadaten und angepasste Materialkennwerte verwendet werden. Die Ergebnisse belegen, dass konservative Ansätze wie das TRY2011 bei aktuellen Neubewertungen potenziell zu ungünstigere Szenarien führen können als in der Praxis tatsächlich auftreten.

Abbildung 84: Vergleich der relativen Feuchte in den Schichtgrenzen mit verschiedenen Wetterdatensätzen am Beispiel der Basisvariante mit Kalziumsilikatdämmung als hygrische Dämmung (oben: Testreferenzjahr, Mitte: 2022, unten: 2024)



3.6 Evaluierung im realen Gebäudebetrieb

Im Anschluss an die Untersuchungen an Testfassaden und der Simulationsuntersuchungen soll die Praxistauglichkeit ausgewählter Materialkombinationen unter realen Bedingungen überprüft werden. Ziel der Evaluierung im realen Gebäudebetrieb ist es, die hygrothermischen Eigenschaften sowie das Verhalten der Materialien hinsichtlich Feuchtepufferung, Trocknungspotenzial und bauphysikalischer

Stabilität im Bestand zu analysieren. Die gewonnenen Daten liefern wichtige Erkenntnisse zur Eignung der untersuchten Dämmschichten für die Anwendung in der Altbausanierung.

3.6.1 Hygrothermische Simulation des Bestandsgebäudes (Simulation 3)

Randbedingungen für die Evaluierung am Bestandsgebäude

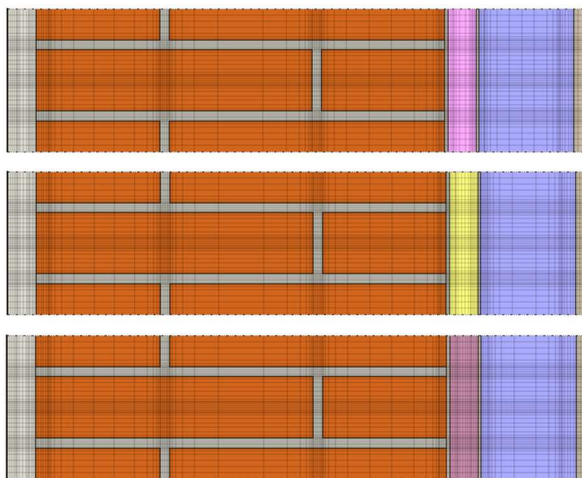
Für die Evaluierung ausgewählter Materialien an einem realen Gebäude der UdK Berlin wurden diese zunächst mit DELPHIN simuliert. Als Randbedingungen wurden die reale Ausrichtung der Fassade gewählt, die Klimadaten aus der Datenbank mit dem Standort Potsdam und als Innenraumklima die WTA-Innenraumklimabedingungen +5%. Das Simulationsmodell entspricht dem angenommenen Wandaufbau des Gebäudes und wird inklusive Mörtel- und Klebeschichten simuliert. Für die Materialien des Bestandsgebäudes wurden Ziegel sowie Putz- und Mörtel aus der DELPHIN Datenbank ausgewählt, die den Materialien entsprechen, die zu dieser Zeit typischerweise verbaut wurden.

Simulation des Bestandsgebäudes der UdK Berlin

Nachdem ausgewählte Materialien in den Testfassadenprüfständen getestet wurden, sollen sie in einem Raum eines denkmalgeschützten Bestandsgebäudes der UdK Berlin getestet werden. Dafür wurden zunächst Simulationen durchgeführt. Für die Innendämmung wurden die gleichen Materialien ausgewählt, die zuvor in den Testfassadenprüfständen verbaut wurden, um eine Vergleichbarkeit der Materialien in Bezug auf verschiedene Außenwandstärken zu haben. Das ausgewählte Gebäude der UdK Berlin befindet sich in der Grunewaldstraße 2-5 und wurde in den Jahren 1906-1920 erbaut.

Die Abbildung 85 zeigt die Simulationsmodelle des Wandaufbaus der untersuchten Varianten.

Abbildung 85: Simulationsmodelle der Testfassaden eines denkmalgeschützten Gebäudes der UdK Berlin



Die Materialien aus der DELPHIN-Materialdatenbank für die Dämmung entsprechen den gleichen Materialien wie in den vorherigen Kapiteln beschrieben. Für die Außenwand wurden Kalkzementputz (Material-ID in DELPHIN: [145]) als Außenputz sowie folgender Ziegel ausgewählt:

Tabelle 18: Materialeigenschaften aus DELPHIN für den in der Simulation verwendeten Ziegel

	Altbauziegel Rote Kaserne Potsdam (Außenziegel 2) [541]
Dichte [kg/m ³]	1854
Porosität [m ³ /m ³]	0,300
μ-Wert [-]	42,5
Wärmekapazität [J/kgK]	7880
Wärmeleitfähigkeit trocken [W/mK]	0,722
Theta (effektiv) [m ³ /m ³]	0,220
Aw [kg/m ² s05]	0,0546755

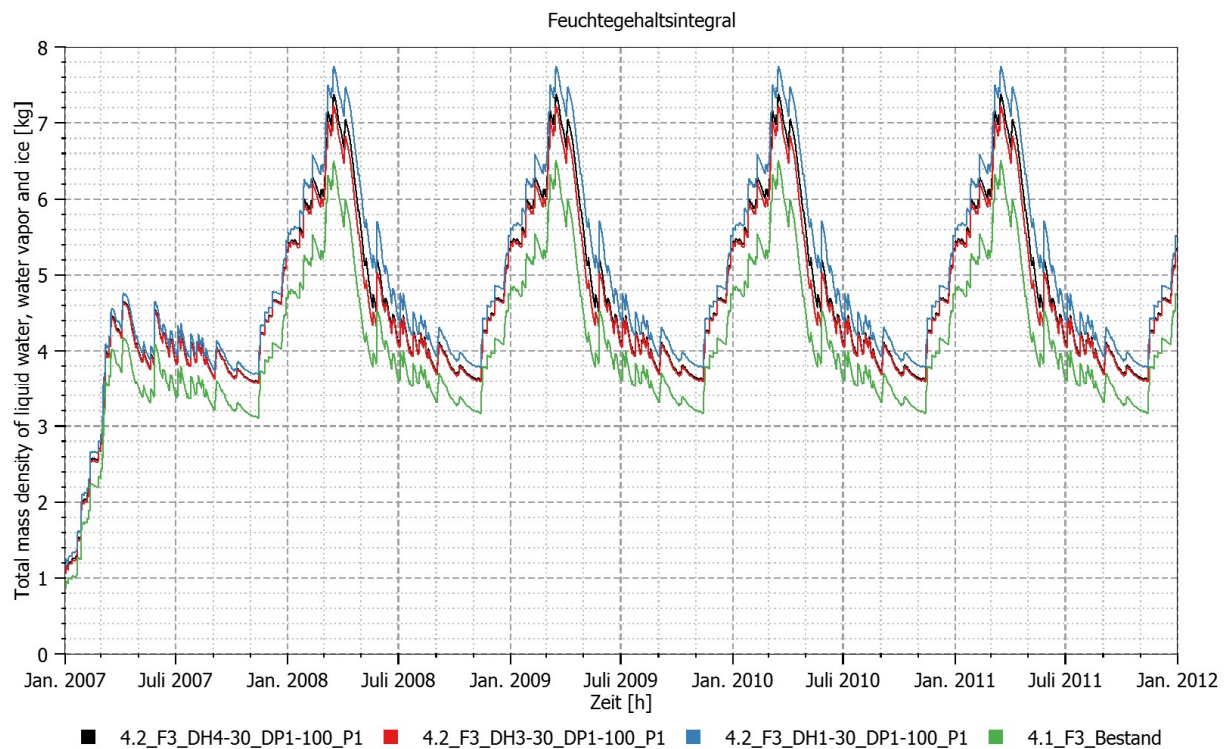
Für die Bauteilsimulation des Gebäudes der UdK Berlin ist anzumerken, dass keine Materialproben genommen wurden. Die Materialien für die Simulation wurden anhand von Erfahrungswerten für Materialien aus dieser Bauzeit aus der DELPHIN-Materialdatenbank ausgewählt. Um die Genauigkeit der Simulationen zu überprüfen, ist eine Validierung mit den Messergebnissen erforderlich. Da die Messungen erst zu Projektende starten, ist die Validierung dieser Simulationen nicht mehr Gegenstand dieses Berichtes. Die ausgewerteten Daten sind später auf der Website des Fachgebietes einsehbar.¹

Feuchtegehaltsintegral Variantenvergleich

Zunächst wurden die Simulationsergebnisse des Feuchtegehaltsintegrals analysiert, um zu überprüfen, ob ein eingeschwungener Zustand eintritt. Abbildung 86 zeigt das Feuchtegehaltsintegral der gesamten Konstruktion für die drei Dämmvarianten und für den Bestand. Es ist zu erkennen, dass im ersten Simulationsjahr der Gesamtfeuchtegehalt deutlich ansteigt, sich dann aber auf dem gleichen Niveau einpendelt und sich Perioden von hohem Feuchtegehalt und niedrigerem Feuchtegehalt abwechseln.

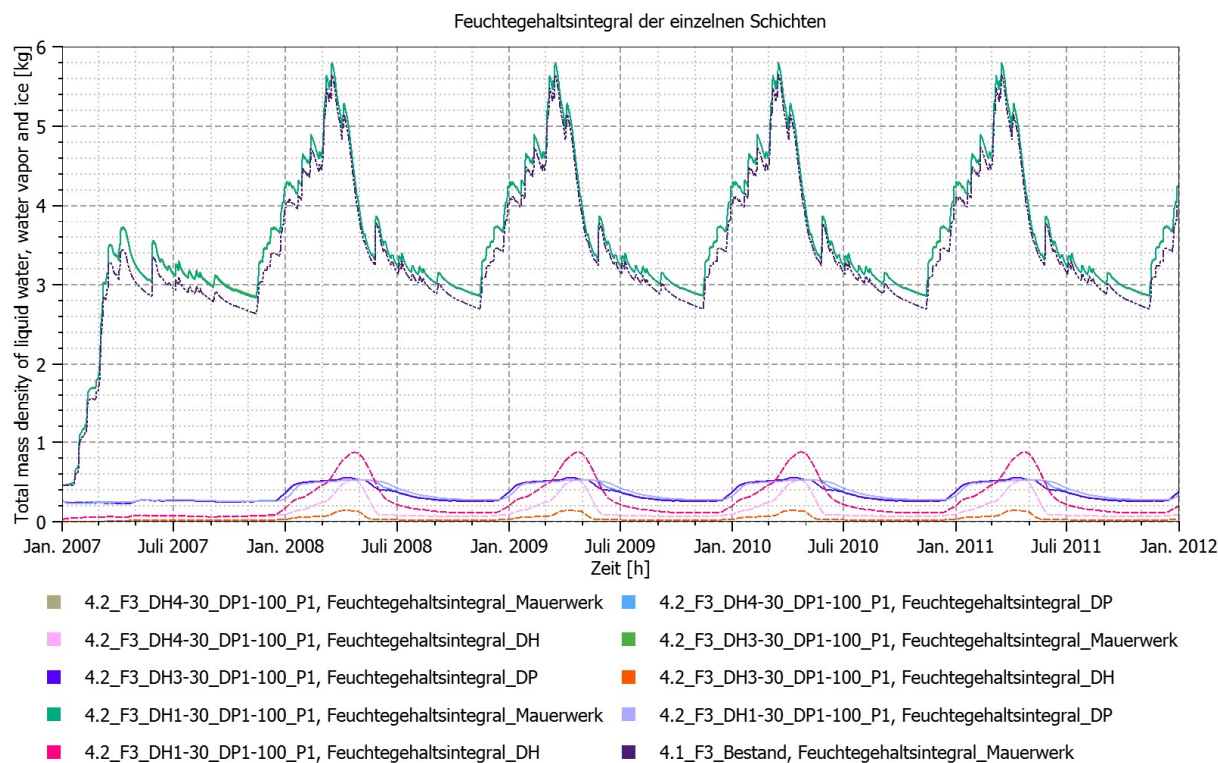
¹ <https://www.udk-berlin.de/studium/architektur/fachgebiete/versorgungsplanung-und-versorgungstechnik/>

Abbildung 86: Feuchtegehaltsintegral Variantenvergleich der Testfassaden eines denkmalgeschützten Gebäudes der UdK Berlin



Die Analyse des Feuchtegehaltsintegrals der einzelnen Schichten in Abbildung 87 zeigt, dass das Mauerwerk den höchsten Gesamtfeuchtegehalt aufweist. Dies ist darauf zurückzuführen, dass es eine hohe Sorptionsfähigkeit besitzt und Feuchtigkeit langfristig speichert. Typischerweise nehmen massive Ziegelwände Feuchte auf und geben sie nur langsam wieder ab. Das zeigt auch der Vergleich mit der Bestandswand. Der Feuchtegehalt des Bestandsmauerwerks liegt geringfügig unter dem der gedämmten Varianten. Das zeigt, dass die Innendämmung den Gesamtfeuchtegehalt zwar erhöht, der Unterschied zur Bestandswand aber gering ist.

Abbildung 87: Feuchtegehaltsintegral der einzelnen Schichten im Variantenvergleich der Testfassaden eines denkmalgeschützten Gebäudes der UdK Berlin

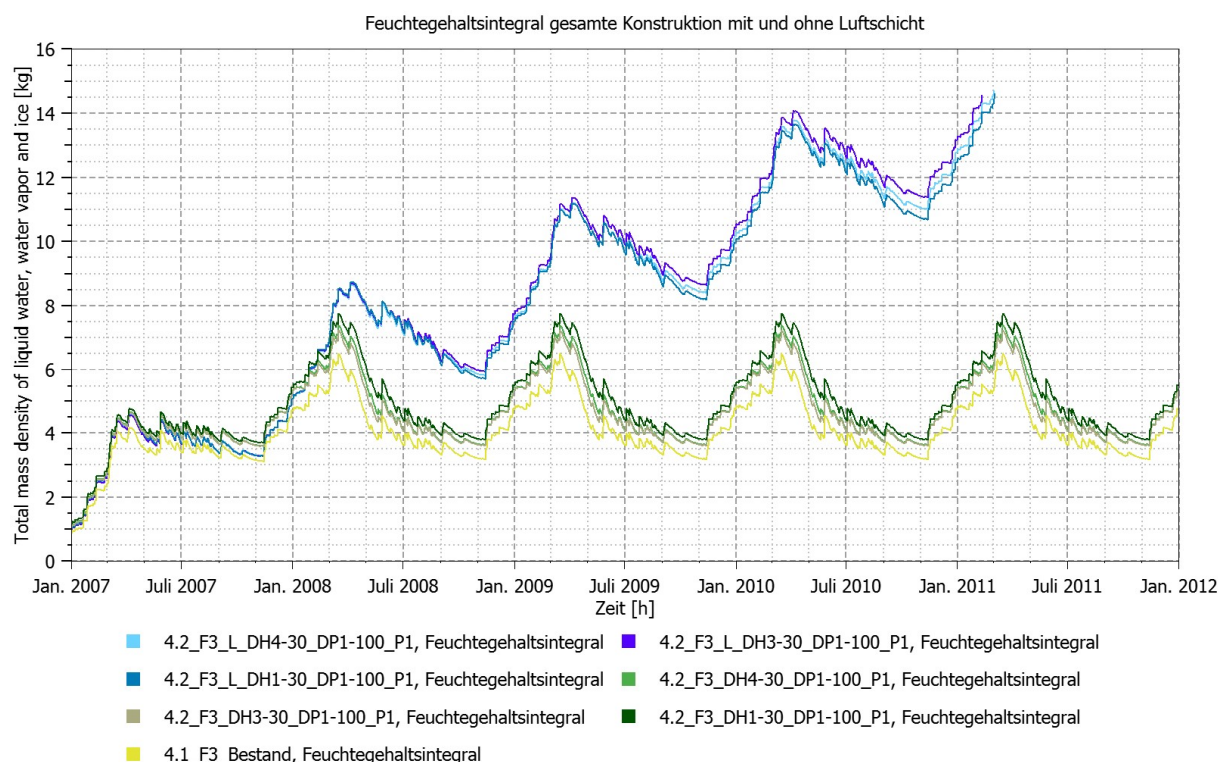


Die untersuchten hygrischen Dämmmaterialien unterscheiden sich deutlich in ihrem Feuchtespeichervermögen. Die Kalziumsilikatplatte (DH1) zeigt die höchsten Feuchtespitzen, insbesondere im Frühjahr. Dies liegt an ihrer stark kapillaren Leitfähigkeit, die eine schnelle Feuchtaufnahme ermöglicht, während gleichzeitig eine gute Rücktrocknung erfolgt. Die Korkdämmlehmplatte (DH4) weist eine geringere Feuchtaufnahme auf als Kalziumsilikat, jedoch eine ausgeglichene Feuchteverteilung über das Jahr. Das deutet auf eine moderate kapillare Leitfähigkeit hin, die Feuchte speichert, aber nicht so stark auf saisonale Schwankungen reagiert. Im Gegensatz dazu nimmt die iQ-Therm-Platte (DH3) nur sehr wenig Feuchtigkeit auf, was auf ihre geringe Sorptionsfähigkeit und ihr spezifisches kapillares Verhalten zurückzuführen ist, wodurch sie weitgehend trocken bleibt.

Die Ergebnisse zeigen, dass Kalziumsilikat große Mengen an Feuchte puffern kann. Allerdings muss sichergestellt werden, dass eine ausreichende Rücktrocknung gewährleistet ist. Korkdämmlehm stellt eine ausgewogene Lösung dar, da er sowohl eine moderate Feuchtaufnahme als auch gute Dämmeigenschaften bietet. Die iQ-Therm-Platte hingegen hat eine geringere Feuchtaufnahme, wodurch sie in weniger feuchtebelasteten Bereichen gut eingesetzt werden kann. Trotz der Unterschiede der Feuchtaufnahme der hygrischen Materialien, unterscheiden sich die Feuchtegehalte der Holzfaserdämmung (DP) in den Varianten nur geringfügig. Das zeigt, dass alle hygrischen Materialien die Feuchtigkeit puffern können, sodass die Holzfaserdämmung nicht so stark belastet wird.

Die Analyse des Feuchtegehaltsintegrals der drei Dämmvarianten mit und ohne Luftschicht in Abbildung 88 zeigt deutlich, dass der Feuchtegehalt der Luftschicht-Varianten von Jahr zu Jahr ansteigt. Bei diesen Varianten kann die Außenwand nicht ausreichend trocknen und wird von Jahr zu Jahr mehr durchfeuchtet.

Abbildung 88: Feuchtegehaltsintegral mit und ohne Luftschicht im Variantenvergleich der Testfassaden eines denkmalgeschützten Gebäudes der UdK Berlin



Die Heatmaps des Feuchtegehaltsintegrals in Abbildung 89 zeigen die Feuchteverteilung und -dynamik über das Jahr hinweg in den einzelnen Schichten der Wandkonstruktionen. In der obersten Heatmap („Mauerwerk“) fällt auf, dass Varianten mit Luftschicht tendenziell höhere Feuchtegehalte im Mauerwerk aufweisen als Varianten ohne Luftschicht oder der Bestandsfall. Besonders im letzten Jahresdrittel akkumuliert sich dort Feuchtigkeit, was auf eine eingeschränkte Rücktrocknung zur Außenseite hindeutet.

In der Schicht DH wird deutlich, dass Kalziumsilikat (DH1) am meisten Feuchtigkeit aufnimmt, jedoch vor allem im Sommerhalbjahr auch wieder signifikant abgibt. Der Feuchtegehalt ist über das Jahr hinweg dynamisch und spiegelt die sorptive Kapazität des Materials gut wider. Die Korkdämmlehmplatte zeigt ein ähnliches Verhalten mit leicht geringeren Werten. Die iQ-Therm-Variante fällt durch sehr niedrige Feuchtegehalte in dieser Schicht auf, was deren geringere hygrische Aktivität bestätigt.

Die Holzfaserdämmung (DP) zeigt eine typische saisonale Feuchteaufnahme. Im Winter werden höhere Feuchtegehalte erreicht, die im Sommer wieder sinken. Besonders bei Konstruktionen mit geringerer Schichtdicke (z.B. DP1-40) ist dieser Effekt deutlicher ausgeprägt. Varianten mit Luftschicht zeigen tendenziell geringere Feuchtegehalte, was auf eine geringere hygrische Belastung der Holzfaser durch die Pufferschicht hinweist.

Im Lehmputz sind die Unterschiede zwischen den Varianten insgesamt geringer. Die Feuchtegehalte bleiben über das Jahr hinweg weitgehend konstant und relativ niedrig. Auch hier zeigt sich jedoch eine leicht erhöhte Feuchteaufnahme im Winterhalbjahr, gefolgt von einer leichten Austrocknung im Sommer. Jedoch zeigt sich, dass im Bestand der Feuchtegehalt wesentlich höher ist, als bei den Varianten mit einer Innendämmung.

Auffällig ist über alle Heatmaps hinweg, dass Varianten mit Luftschicht die Feuchteaufnahme in den inneren Schichten abpuffern, insbesondere in der hygrischen Dämmschicht (DH) und der

Holzfaserdämmung (DP). Gleichzeitig behindert die Luftschicht aber die Rücktrocknung des Mauerwerks, was sich in deutlich erhöhten Feuchtegehalten dort äußert und ein potenzielles Risiko für langfristige Materialschädigung birgt.

Abbildung 89: Heatmap des Feuchtegehaltsintegral der Bauteilschichten im Variantenvergleich der Testfassaden eines denkmalgeschützten Gebäudes der UdK Berlin



Analyse der relativen Feuchte

Die zweite Heatmap-Grafik in Abbildung 90 zeigt die zeitliche Verteilung der relativen Luftfeuchte in den verschiedenen Materialien der untersuchten Wandaufbauten über das Jahr hinweg. Dabei lassen sich kritische Feuchtebereiche ($>95\%$ relative Feuchte) sowie mögliche Austrocknungs- und Feuchtespitzen zeitlich und schichtbezogen identifizieren.

In der äußeren Putzschicht sowie an der Grenzschicht (01_TFW_Putz-außen und 02_TFW_Putz-Ziegel) treten über weite Zeiträume hinweg sehr hohe relative Feuchten auf, die teilweise 100% erreichen. Diese Werte sind typisch für witterungsbeanspruchte Bereiche, da sie direkt Niederschlag und Tauwasser ausgesetzt sind. In den Sommermonaten ist jedoch in der äußeren Schicht eine phasenweise Rücktrocknung erkennbar, was auf die Verdunstung durch erhöhte Temperaturen und Luftwechsel hindeutet.

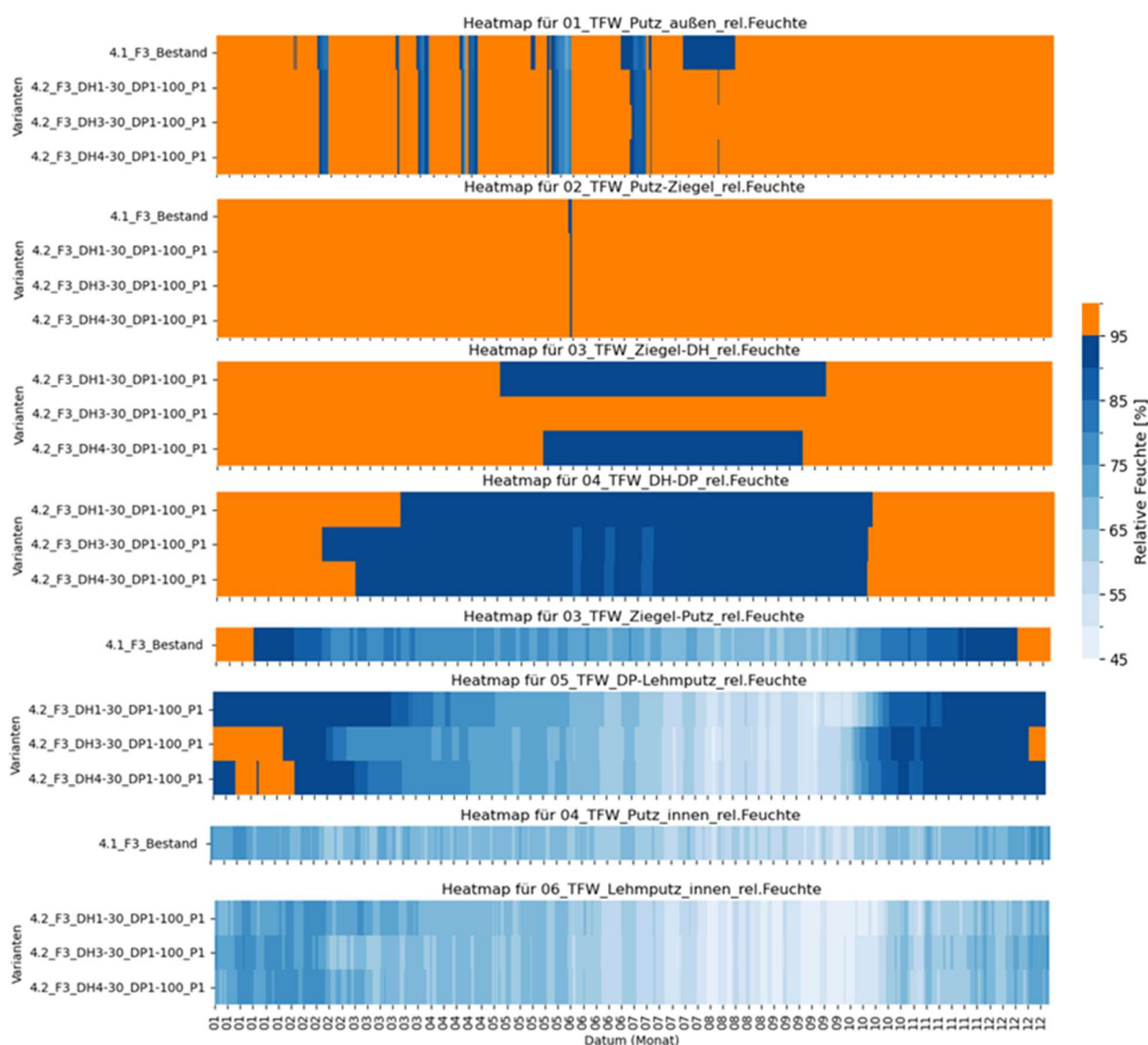
Die Schichtgrenzen Ziegel-DH und DH-DP zeigen ebenfalls durchgehend hohe relative Feuchtwerte. Besonders auffällig ist eine saisonale Abhängigkeit. Im Winter steigt die relative Feuchte stark an, häufig über 95%, und sinkt im Sommer wieder leicht ab. Dies weist darauf hin, dass sich im Winter Feuchte im Bauteil ansammelt und erst bei höheren Temperaturen im Sommer wieder verdunstet. Die DH-DP-Schichtgrenze ist dabei besonders kritisch, da hier teilweise über längere Zeiträume hinweg Feuchteniveaus oberhalb des Grenzwertes bestehen bleiben.

In der Schichtgrenze DP-Lehmputz zeigen sich ausgeprägte jahreszeitliche Schwankungen. Die relative Feuchte steigt gegen Ende des Winters deutlich an und sinkt im Sommer rapide wieder ab. Diese Dynamik zeigt, dass der Dämmstoff gut rüctrocknen kann, jedoch temporär stark durchfeuchtet ist, was seine Dämmwirkung beeinträchtigen kann.

Die Innenseite der Innenwand Lehmputz_innen weist ebenfalls Feuchteschwankungen auf. Die Werte steigen im Januar und Februar kurzzeitig auf bis zu 75 % relativer Feuchte. Zu diesen Zeiten besteht ein Risiko für mikrobielles Wachstum.

Zum Vergleich: die Innenraumbedingungen nach DIN EN 15026 und WTA 6-2 weisen eine innere relative Luftfeuchte von etwa 36% bis ca. 65% auf (vgl. Abbildung 11 in Kapitel 3.3.1).

Abbildung 90: Heatmap der relativen Feuchte der Bauteilschichten im Variantenvergleich der Testfassaden eines denkmalgeschützten Gebäudes der UdK Berlin



Zusammenfassend lässt sich feststellen:

Die äußeren Schichtgrenzen (Putz und Putz-Ziegel) sind durch direkte Witterungseinflüsse stark feuchtebelastet, zeigen jedoch auch Rücktrocknungspotenzial.

Die mittleren Schichtgrenzen (Ziegel-DH und DH-DP) weisen über lange Zeiträume hinweg kritisch hohe Feuchteniveaus über 90 % auf – mit geringem Rücktrochnungsvermögen.

Die inneren Dämm- und Putzschichtgrenzen zeigen starke saisonale Schwankungen mit einer guten Austrocknung im Sommer, jedoch auch kurzzeitigen Spitzenwerten über 95 %, was auf temporäre Risiken hindeutet.

Begründung zur Wahl der Dämmvarianten

Die Analyse hygrothermischer Verhältnisse in gedämmten Bestandsbauteilen zeigt in einzelnen Fällen das Auftreten kritischer Feuchtwerte in bestimmten Schichtgrenzen der Konstruktion. Dennoch ist die Untersuchung solcher Varianten unter realistischen Randbedingungen von großer Relevanz für die baupraktische Planung und Bewertung energetischer Sanierungsmaßnahmen. Zum einen sind in vielen Bestandsgebäuden konstruktive und gestalterische Rahmenbedingungen vorhanden, die eine nachträgliche Außendämmung ausschließen, beispielsweise aufgrund denkmalpflegerischer Anforderungen oder begrenzter Platzverhältnisse. In diesen Fällen stellt die innenseitige Dämmung mit kapillaraktiven, diffusionsoffenen Materialien häufig die einzig umsetzbare Maßnahme zur energetischen Verbesserung dar, selbst wenn diese mit einer erhöhten Feuchtebeanspruchung einzelner Bauteilschichten einhergeht. Des Weiteren ist das temporäre Erreichen kritischer relativer Feuchtwerte nicht zwangsläufig mit der Entstehung von Bauschäden gleichzusetzen. Entscheidend für die Schadensrelevanz ist insbesondere die Dauer der Feuchtebelastung, deren Lage innerhalb des Bauteils sowie die Rücktrochnungsfähigkeit des jeweiligen Materials. In der Regel können kurzzeitige Feuchtespitzen durch sommerliche Rücktrochnung kompensiert werden, insbesondere bei Verwendung kapillaraktiver Materialien mit hoher Sorptionsfähigkeit. Die Simulation potenziell feuchtebelasteter Varianten ermöglicht eine realitätsnahe Risikobewertung und dient der Identifikation von Schwachstellen innerhalb der Konstruktion. Jedoch können Abweichungen in den Materialparametern und den Klimadaten zu anderen Ergebnissen führen. Daher sollen die Konstruktionen durch ein hygrothermisches Monitoring begleitet und validiert werden.

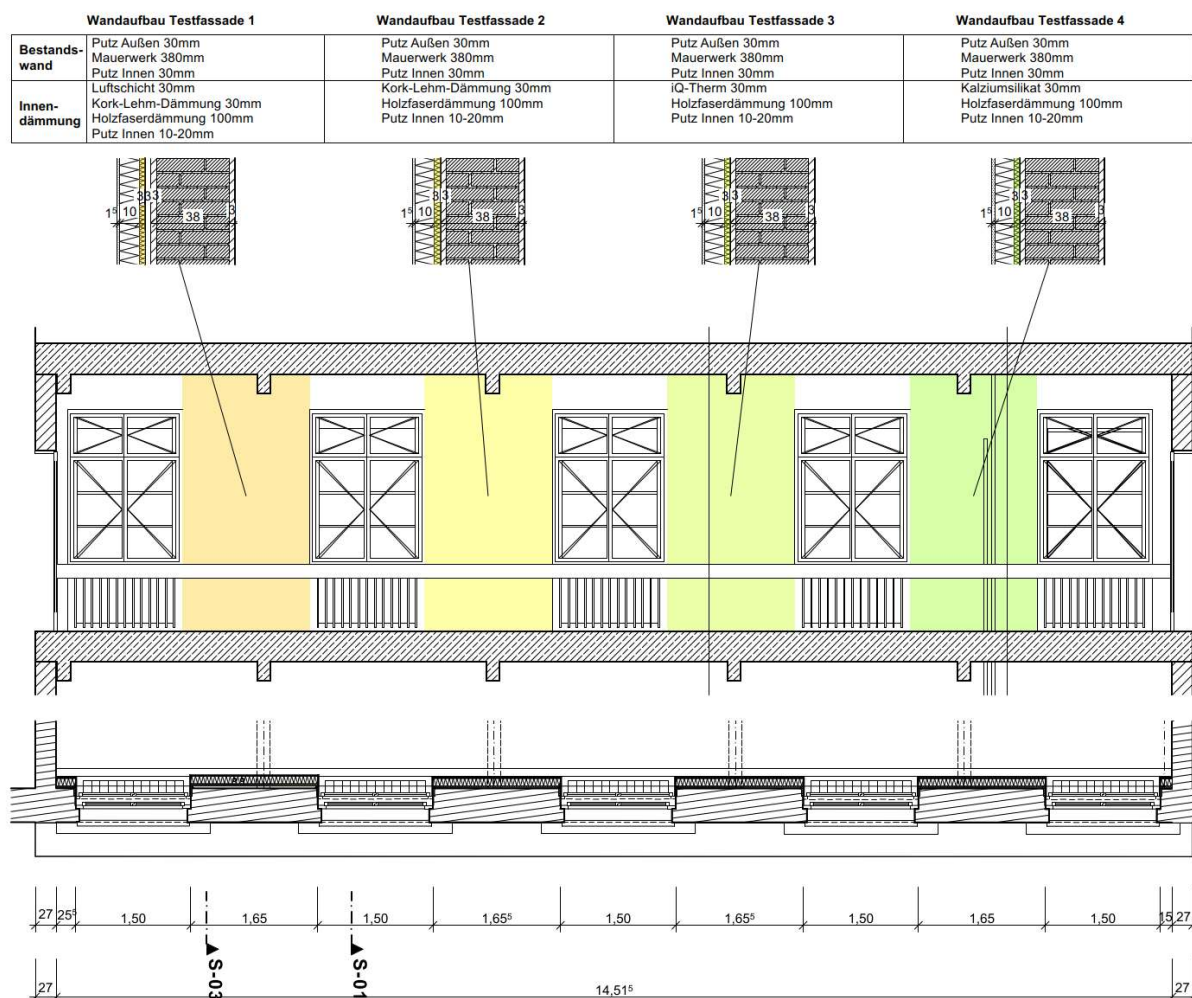
3.6.2 Einbau der Testfassaden in einem denkmalgeschützten Gebäude

Nach der Durchführung der Simulationen und der experimentellen Untersuchungen im Testfassadenprüfstand erfolgt der Einbau der getesteten Materialien in einem Raum eines denkmalgeschützten Gebäudes der UdK Berlin. In diesem Raum werden dieselben drei Materialkombinationen verbaut, die zuvor bereits im Rooftop-Gebäude untersucht wurden. Dies ermöglicht einen direkten Vergleich des hygrothermischen Verhaltens unter realen Nutzungsbedingungen und bei abweichenden Wandstärken der Bestandskonstruktion.

Die Vorbereitung der Baumaßnahme erfolgte in enger Abstimmung mit der Bauabteilung der UdK Berlin. Zunächst wurde gemeinsam nach einem geeigneten Raum gesucht. Nachdem ein passender Raum in dem Gebäude an der Straße des 17. Juni gefunden wurde, wurde ein Leistungsverzeichnis erstellt und Angebote eingeholt. Die Abbildung 91 zeigt die ursprüngliche Planung der Innendämmung in dem ausgewählten Raum. Es sollten drei verschiedene hygrische Materialien in Kombination mit Holzfaserdämmung getestet werden und eine Variante mit einer zusätzlichen Luftschicht. Jedoch kam es bei der Planung zu einigen Schwierigkeiten. Ursprünglich war geplant, die Innendämmung in der vorlesungsfreien Zeit des Sommersemesters 2024 einzubauen. Aufgrund eines unvorhersehbaren, längeren Ausfalls des zuständigen Mitarbeiters in der Bauabteilung hat sich die Planung mehrere Wochen verzögert. Da der ausgewählte Raum außerhalb der Semesterferien dringend gebraucht wurde, konnte der Umbau nicht mehr in dem vorgesehenen Zeitraum umgesetzt werden. Es wurde anschließend abgestimmt, den Umbau in der nächsten vorlesungsfreien Zeit im Februar und März 2025 umzusetzen. Daraufhin erfolgte die Ausschreibung. Die Auswertung der Angebote hatte ergeben, dass die vorbereitenden Maßnahmen (Kabelkanal, Deckenleuchten und Heizkörper versetzen) in dem ausgewählten Raum sowie die aufwendige Ausführung der Dämmmaßnahmen in den

Heizkörpernischen und Fensterlaibungen die Kosten enorm gesteigert haben, sodass diese mit rund 18.500 Euro netto weit oberhalb des festgelegten Budgets von 9.000 Euro lagen.

Abbildung 91: Ursprüngliche Planung für die Innendämmung eines ausgewählten Raumes eines denkmalgeschützten Gebäudes der UdK Berlin.



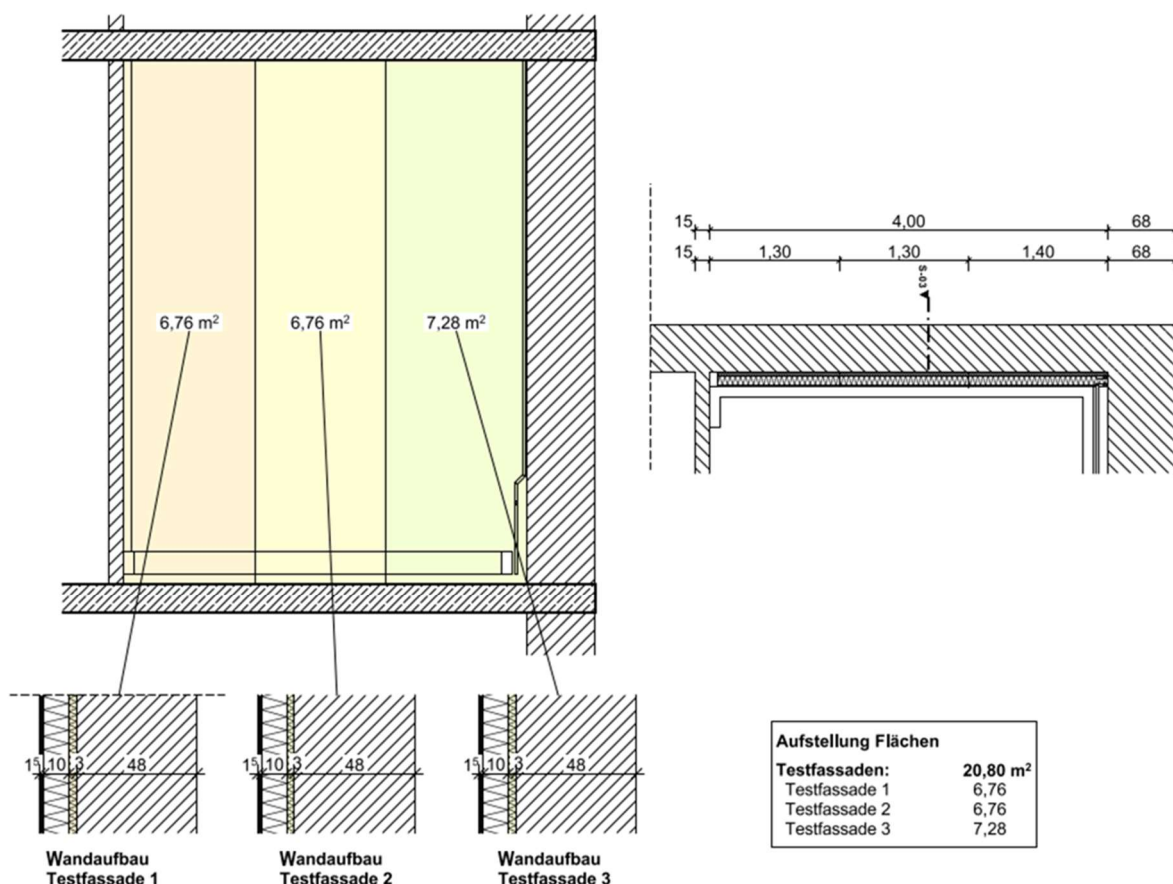
Zudem wurde Ende des Jahres 2024 bekannt, dass aufgrund von Sparmaßnahmen des Berliner Senats Mittel für die Universitäten enorm gekürzt werden. Daraus resultierte ein Ausgabenstopp für alle Fakultäten der UdK Berlin. Die Umsetzung der Innendämmung in dem ursprünglich ausgewählten Raum war somit nicht mehr möglich und es wurden alternative Lösungen gesucht. Nachdem weitere Räume besichtigt wurden, wurde eine kostengünstigere Lösung gefunden, die in dem geplanten Zeitraum umsetzbar war.

Der Alternativraum befindet sich in einem anderen denkmalgeschützten Gebäude der UdK Berlin in der Grunewaldstraße 2-5. Dieser Raum hat eine Außenwand ohne Fenster und ohne Heizkörpernischen, was ein einfacheres und kostengünstigeres Anbringen der Innendämmung ermöglicht. Es erfolgte daraufhin so schnell wie möglich eine neue Planung. Die folgende Zeichnung zeigt den geplanten Wandaufbau in dem ausgewählten Raum. Das Angebot für den alternativen Raum war mit rund 10.600 Euro netto etwa 8.000 Euro günstiger.

Der ausgesuchte Raum wird von Studierenden zum Arbeiten genutzt. Er ist ca. 24 Quadratmeter groß mit einer Deckenhöhe von 5,52 m. Die ausgewählte Wand ist nach Westen ausgerichtet, 48 mm dick und hat keine Fenster oder Heizkörpernischen. Auf der 4 m langen Wand sollen die drei Material-

kombinationen mit Kalziumsilikat, iQ-Therm und Korkdämmlehmplatte mit jeweils 30 mm Dicke und 100 mm Holzfaserdämmung mit Lehmputz auf der Innenseite untersucht werden (siehe Abbildung 92).

Abbildung 92: Ansicht und Schnitt der Testfassaden für den Einbau in ein denkmalgeschütztes Gebäude der UdK Berlin



Der Einbau wurde in den Semesterferien im Februar 2025 umgesetzt. Die Baufirma, die mit der Umsetzung des mehrschichtigen Innendämmsystems im Testraum des Bestandsgebäudes beauftragt war, wurde nach Abschluss der Arbeiten zu ihren Erfahrungen befragt. Üblicherweise verarbeitet das Unternehmen Kalziumsilikatplatten mit einer Dämmstärke von 60 mm bei der Ausführung von Innendämmmaßnahmen.

Im direkten Vergleich zum üblichen Vorgehen ergaben sich beim Einbau des mehrschichtigen Systems einige Unterschiede. Hinsichtlich der Verarbeitung der Materialien, wie dem Zuschnitt und der Anbringung an der Wand, zeigte sich kein wesentlicher Unterschied. Allerdings war aufgrund der variierenden Plattengrößen eine unterschiedliche Anzahl von Handgriffen erforderlich, um einen Quadratmeter Wandfläche zu dämmen. Der Zeitaufwand für den Einbau des mehrschichtigen Systems fiel insgesamt höher aus, was auf die Notwendigkeit zurückzuführen ist, zwei separate Dämmschichten zu montieren.

Die praktische Umsetzbarkeit des mehrschichtigen Aufbaus wurde differenziert beurteilt: Insbesondere in Bereichen mit Fensterlaibungen und Heizkörpernischen würden die zusätzlichen Zuschnitte einen erhöhten zeitlichen Aufwand bedeuten.

Auch bei der Verarbeitung der drei verschiedenen hygrothermischen Materialien gab es Unterschiede. Hier wurde ebenfalls auf die variierenden Plattengrößen verwiesen, die sich direkt auf den

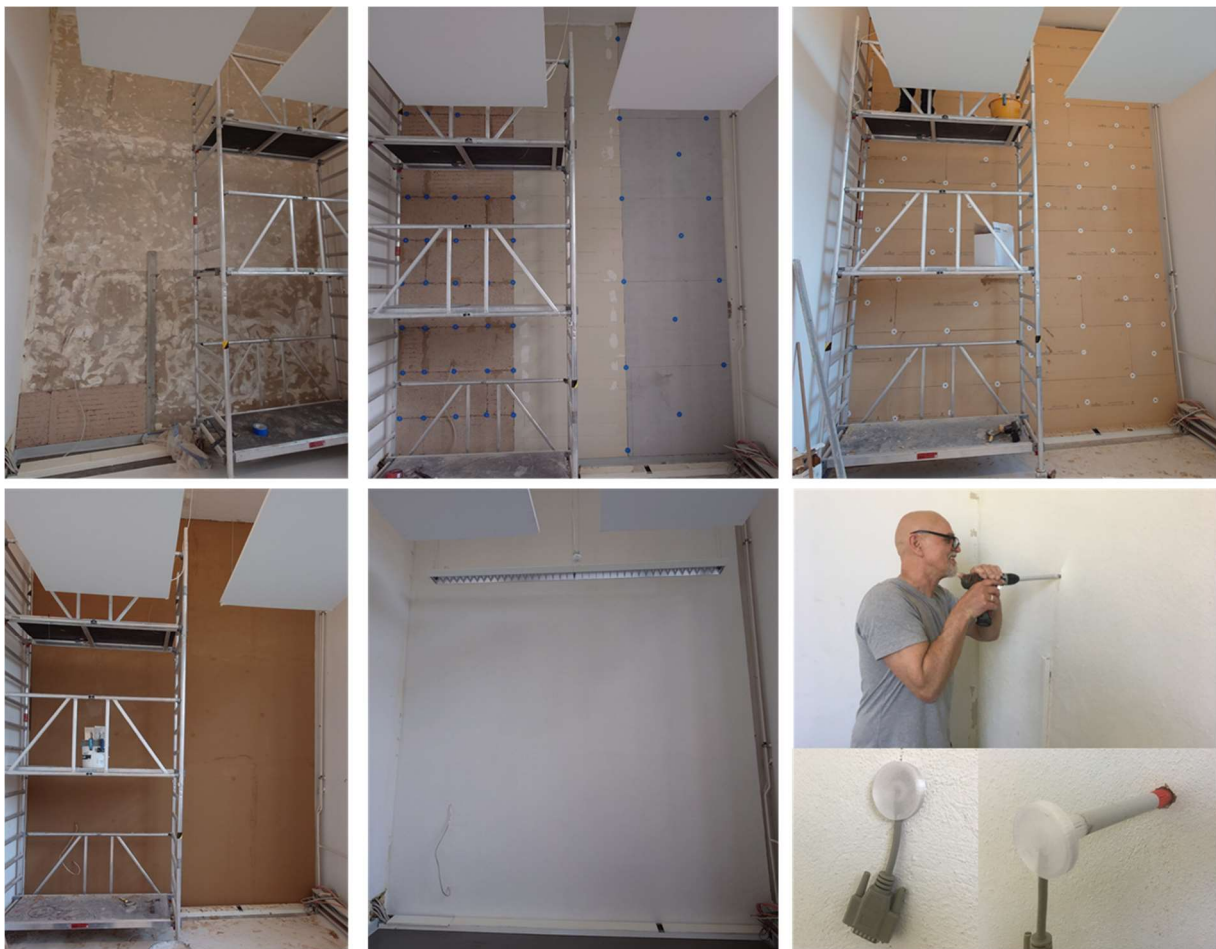
Montageaufwand auswirken. Für größere Flächen seien großformatige Platten vorteilhaft – vorausgesetzt, der Untergrund ist eben und erfordert keinen zusätzlichen Ausgleich.

Insgesamt verlief der Einbau jedoch problemlos, und es traten keine Schwierigkeiten beim Anbringen des Dämmsystems auf.

Vorbereitung für das Langzeitmonitoring

Für das Langzeitmonitoring wurden drei neue Messlanzen hergestellt. Der Einbau erfolgte im April 2025. Abbildung 93 zeigt den Verlauf der Arbeiten, vom Abschleifen der Bestandsinnenwand (oben rechts) bis zur fertig verputzten, gedämmten Innenwand (unten links).

Abbildung 93: Dokumentation des Einbaus der Innendämmung und der Sensorik in einem denkmalgeschützten Gebäude der UdK Berlin



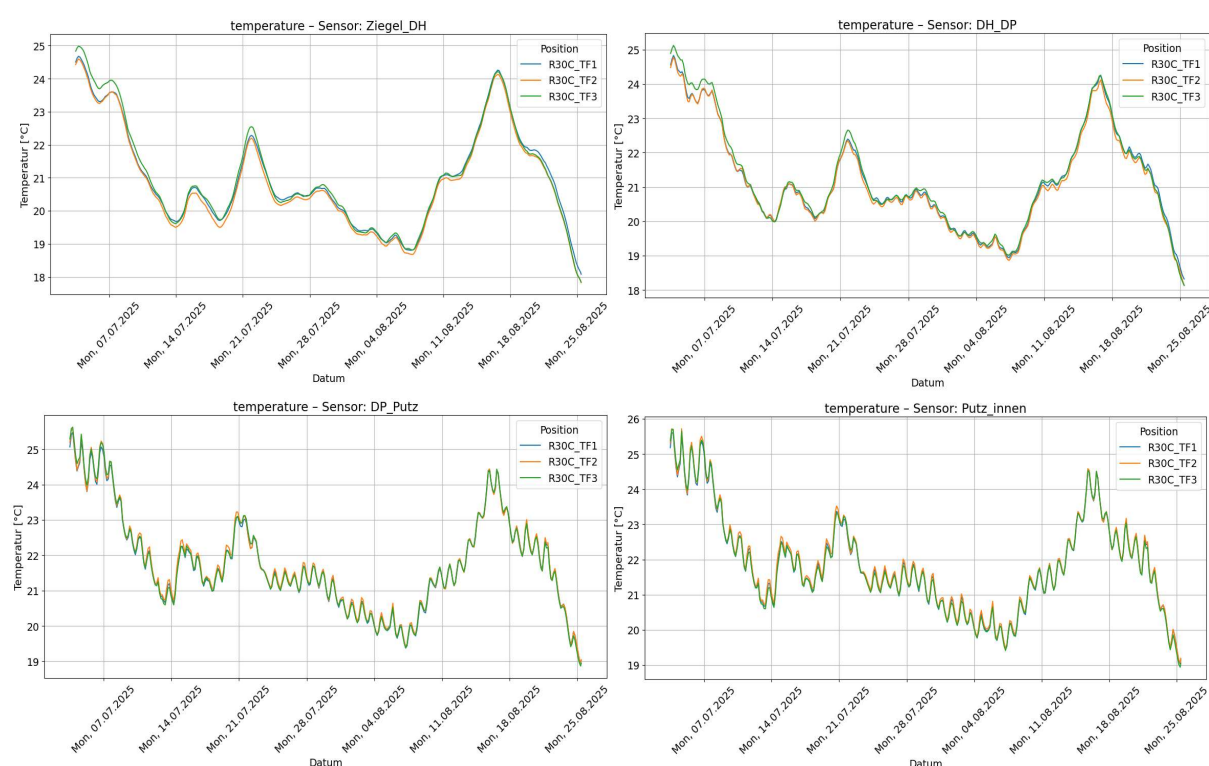
Erste Messergebnisse

Die ersten Messergebnisse liegen seit Anfang Juli vor. Abbildung 94 und Abbildung 95 zeigen die Temperaturverläufe in den relevanten Schichtgrenzen während der Messperiode vom 03.07. bis 25.08.2025. Erfasst wurden die Übergänge: Innenseite der Außenwand zur hygrischen Dämmung (Ziegel–DH), hygrische Dämmung zur Holzfaserdämmung (DH–DP), Holzfaserdämmung zum Putz (DP–Putz) sowie die Innenseite der Innenwand (Putz_innen). Die untersuchten Varianten bestehen aus folgenden Schichten:

- R30C_TF1: Korkdämmlehmplatte (3 cm), Holzfaserdämmung (10 cm), Lehminnenputz
- R30C_TF2: iQ-Therm (3 cm), Holzfaserdämmung (10 cm), Lehminnenputz
- R30C_TF3: Kalziumsilikatplatten (3 cm), Holzfaserdämmung (10 cm), Lehminnenputz

In Abbildung 94 wird deutlich, dass sich die schwankenden Raumtemperaturen vor allem an den beiden inneren Schichtgrenzen (Putz_innen und DP-Putz) widerspiegeln. Im Übergang zwischen hygrischer Dämmung und Holzfaser (DH-DP) sind die tageszeitlichen Schwankungen bereits spürbar abgeschwächt, und an der Außenseite (Ziegel-DH) kaum noch erkennbar. Diese Ergebnisse bestätigen die dämpfende Wirkung der Holzfaserdämmung auf kurzfristige Temperaturänderungen. Zwischen den Varianten selbst zeigen sich hingegen in allen Schichtgrenzen nur sehr geringe Unterschiede.

Abbildung 94: Temperaturmessung in den einzelnen Schichtgrenzen (03.07. bis 25.08.2025): Ziegel-DH (links oben), DH-DP (rechts oben), DP-Putz (links unten), Putz innen (rechts unten). R30C_TF1 = Variante mit Korkdämmlehmplatte, R30C_TF2 = Variante mit iQ-Therm, R30C_TF3 = Variante mit Kalziumsilikat

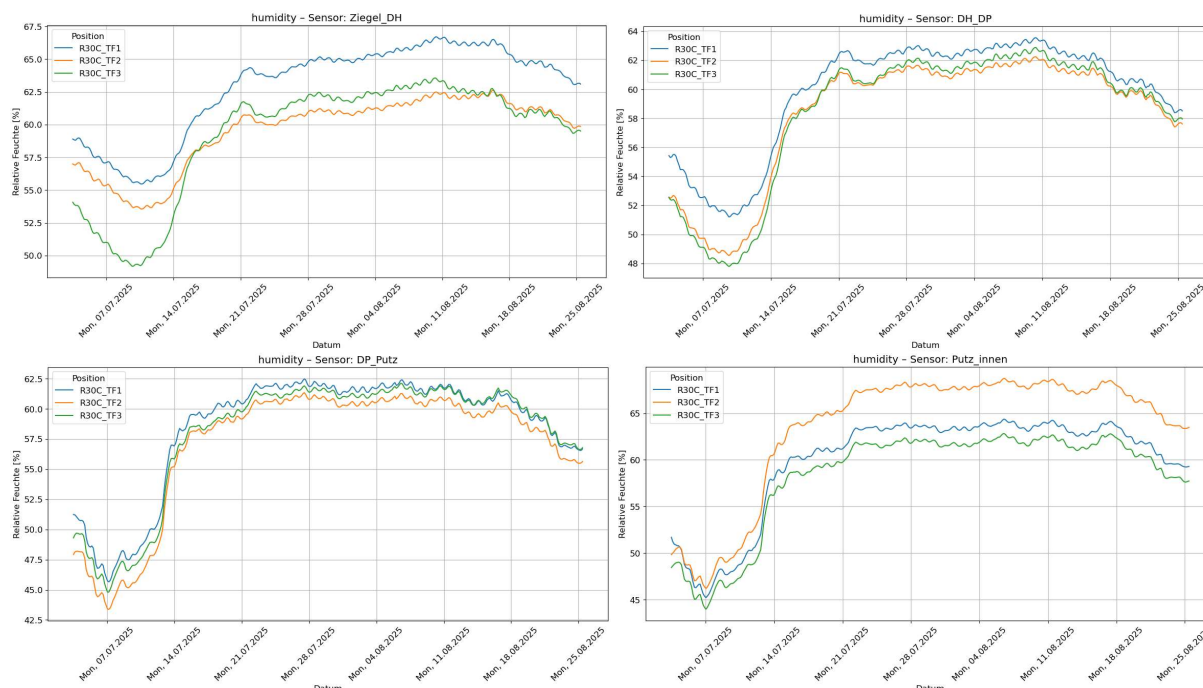


Die Abbildung 95 zeigt den Verlauf der relativen Luftfeuchte an den vier Messpositionen Ziegel_DH, DH_DP, DP_Putz und Putz_innen. Die größten Unterschiede in der relativen Feuchte zwischen den Varianten treten an der Position Ziegel-DH auf. Variante TF1 (Korkdämmlehmplatte) zeigt hier die höchsten Feuchtwerte, was auf die Aufnahme und das langsamere Abtrocknen von Bau- bzw. Restfeuchte im Lehmanteil zurückgeführt werden kann. Im Vergleich dazu nehmen Kalziumsilikatplatten Baufeuchte schneller auf und geben sie zügiger wieder ab, während iQ-Therm-Systeme die eingebrachte Feuchtigkeit nur eingeschränkt in die Platte leiten und dadurch ein anderes Trocknungsverhalten aufweisen.

In den Schichtgrenzen DH-DP und DP-Putz nähern sich die Feuchtwerte der verschiedenen Varianten einander an. In der kritischen Schichtgrenze DH-DP liegen alle Varianten unter einer relativen Feuchte von 64 % und befinden sich damit in einem unkritischen Bereich. Auffällig ist, dass die relative Feuchte an der Innenwand (Putz_innen) bei R30C_TF2 (iQ-Therm) höher ist als bei den beiden anderen Varianten. Dies ist darauf zurückzuführen, dass iQ-Therm als PUR-basierte Dämmung im Vergleich weniger

Feuchtigkeit aufnehmen kann. Feuchtigkeit wird daher weniger in die Dämmung eingelagert, wodurch sie an der Wandoberfläche akkumuliert. Bei den Varianten mit hygroskopischen Materialien wie Kalziumsilikat oder Korkdämmlehm wird die Feuchtigkeit hingegen stärker aufgenommen und verteilt, wodurch die relative Feuchte an der Innenwand niedriger ausfällt.

Abbildung 95: Feuchtemessung in den einzelnen Schichtgrenzen (03.07. bis 25.08.2025): Ziegel-DH (links oben), DH-DP (rechts oben), DP-Putz (links unten), Putz innen (rechts unten)



3.7 Thermische Raumsimulationen

Zur energetischen und raumklimatischen Bewertung des neu entwickelten mehrschichtigen Innendämmsystems als Teilkomponente von Innenräumen wurden thermische Raumsimulationen durchgeführt, welche auch eine Bewertung der thermischen Behaglichkeit für sommerliche und winterliche Extremsituationen miteinschließen.

Thermische Raumsimulationen stellen wichtige Methoden zur Analyse des bauphysikalischen Gebäude- bzw. Raumverhaltens unter verschiedenen klimatischen und betrieblichen Bedingungen dar.

Die *thermische Raumsimulation* betrachtet hauptsächlich die Temperaturverläufe innerhalb von Baukonstruktionen und der Raumluft sowie die Energiebilanz einzelner Räume eines Gebäudes. Diese zusätzlichen Aspekte sind insbesondere bei der Untersuchung der energetischen Effizienz und der thermischen Behaglichkeit von Räumen mit unterschiedlichen Varianten von Innendämmsystemen unter Einzug der Raumnutzung von Bedeutung. Für die thermischen Raumsimulationen wurde die Software IDA ICE (www.equa.se, kein Datum) verwendet, die umfangreiche Möglichkeiten zur Modellierung von Gebäuden sowie energietechnischen Anlagen unter Einbeziehung des Nutzungsverhaltens bietet.

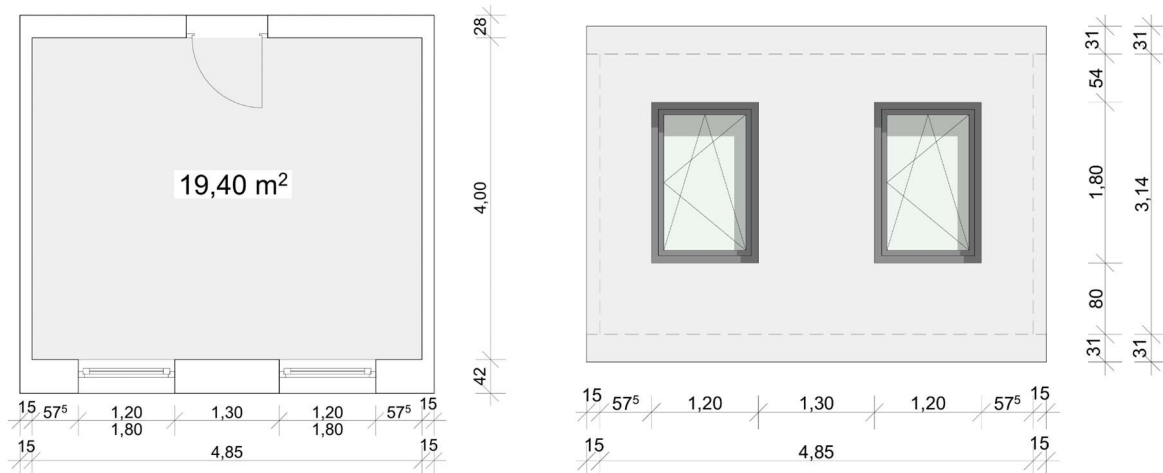
Standardraum

Für die Raumsimulationen wurde zunächst ein Standardraum für den Vergleich unterschiedlicher Fassadenvarianten definiert. Der Standardraum entspricht einem Wohnraum eines Bestandsgebäudes mit erhaltenswerten Fassaden aus der Gründerzeit. Es wurde sich hierbei an den Maßen und der üblichen Baukonstruktion eines Wohnraums von einem Berliner Altbau orientiert, da dieser einen für den

Anwendungsfall Innendämmung wahrscheinlichen Gebäudetyp darstellt, der einen relevanten Anteil der Gebäudesubstanz ausmacht. Die Wandstärken, Raumabmessungen wurden hierzu aus der Literatur (Rönsch, 2011) (Geist & Kürvers, 1984) entnommen. Es wurde davon ausgegangen, dass bereits im Vorfeld ein Austausch, der für den Berliner Altbau typischen Holzkastenfenstern gegen Fenster mit einer Wärmeschutzverglasung stattgefunden hat, darüber hinaus aber keine anderen Maßnahmen zur energetischen Sanierung der Außenfassade stattgefunden haben.

Abbildung 96 zeigt den Grundriss des knapp 20 m² großen und 3,14 m hohen (lichte Raumhöhe) Standardraums sowie die Außenansicht seiner Außenfassade mit zwei Außenfenstern. Für die Simulationsanalysen wurde angenommen, dass sowohl über die Innenwände zu den benachbarten Innenräumen als auch über den Boden und die Decke zu den darüber und darunterliegenden Geschossen kein Wärmeaustausch stattfindet. Es wird ein Nutzerverhalten angenommen, dass zwei Personen den Wohnraum nutzen, welche während der Woche arbeiten und am Wochenende zu Hause sind. Die angenommene Wandstärke der Außenfassade von 42 cm entspricht der Dicke der Außenfassade in einem mittleren Geschöß eines Gründerzeitaltbau. Die Übersicht aller Randbedingungen ist in den Anlagen dargestellt.

Abbildung 96: Grundriss und Fassadenansicht des Standardraums



In Abbildung 97 sind die für den Standardraum angenommenen Wandaufbauten für die Außenfassade im ungedämmten Zustand (links), sowie mit Innendämmung in den Varianten ohne (Mitte) und mit Luftschicht (rechts) beschrieben.

Abbildung 97: Aufbau der Außenfassaden des Standardraums

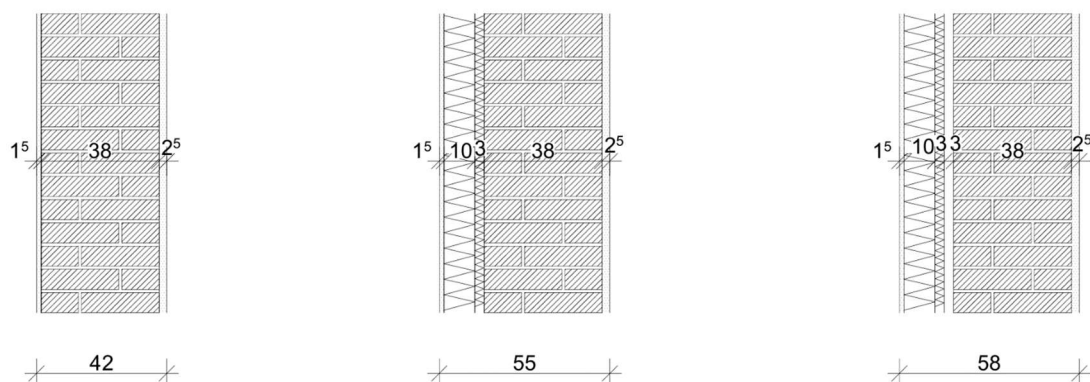


Tabelle 18 enthält die angenommenen Materialien für die einzelnen Fassadenvarianten.

Tabelle 19: Angenommene Materialien und Schichtdicken für die Außenfassade des Standardraums

Ungedämmt (Bestand):	420 mm	Material
	25 mm	Außenputz
	380 mm	Ziegel
	15 mm	Innenputz

Gedämmt:	550 mm	Material
	25 mm	Außenputz
	380 mm	Ziegel
	30 mm	Kalziumsilikat/iQ-Therm/Redstone/Wärmedämmlehm
	100 mm	Holzfaserdämmplatte
	15 mm	Innenputz

Die Beschreibung der konstruktiven Aufbauten der Innenwände, der Zwischengeschoßdecke und der Außenfenster befindet sich in der Anlage.

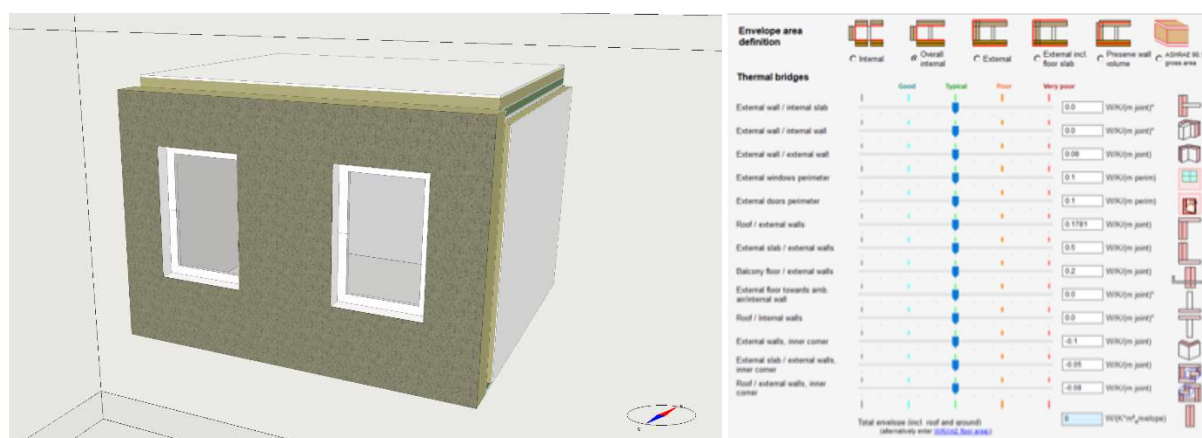
Als Randbedingungen aller Simulationsanalysen wurden die Wetterdaten vom Standort Berlin-Tempelhof gewählt.

3.7.1 Thermische Raumsimulation

Raummodell in IDA ICE

Das thermische Raummodell des Standardraums wurde in IDA ICE mit den entsprechenden Maßen und Materialien erstellt (Abbildung 98 links). Für die Bauteilanschlüsse der Außenfassade wurden für das Wärmebrückenmodell in IDA ICE mit der Einstellung „Typical“ durchschnittliche Wärmebrückenverluste angenommen (Abbildung 98 rechts).

Abbildung 98: IDA ICE Raum-Modell des Standardraums und Annahmen zu den Wärmebrücken der Bauteilanschlüsse



Zur Abbildung der unterschiedlichen Varianten der Innenfassadendämmung wurden folgende Baustoffe thermische Materialparameter aus der DELPHIN-Materialdatenbank nach IDA ICE übertragen (Tabelle 20):

Tabelle 20: genutzte Materialien und bauphysikalischen Parameter aus DELPHIN in IDA ICE

Material	Name in der DELPHIN-Materialdatenbank	Dichte [kg/m ³]	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	spez. Wärmekapazität [J/kgK]
Ziegel	"Normal Brick"	1786	0,801	1000
Innenputz Bestand	"Lime Cement Mortar"	1570	0,700	1000
Innenputz	"Clay Mortar (historical)"	1568	0,582	488
Holzfaserdämmplatte	"Wood Fibre Insulation Board"	161	0,039	1662
Kalziumsilikat	"Calsitherm Climate Board WF"	187	0,059	1100
iQ-Therm	"iQ-Therm"	49	0,037	1400
Korkdämmlehmplatte	"Insulation Loam-Cork Board (F)"	350	0,077	1056

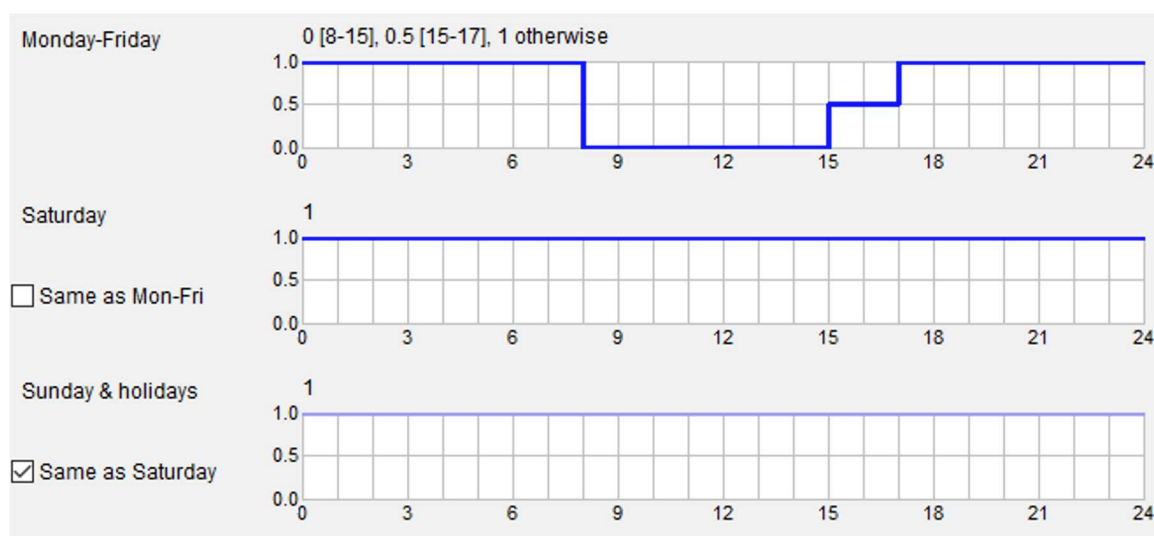
Für die übrigen Wandkonstruktionen des Standardraums wurden folgende Materialparameter aus der IDA ICE-Datenbank übernommen (Tabelle 21):

Tabelle 21: Materialien und bauphysikalischen Parameter aus der IDA ICE-Materialdatenbank

Material	Name in der IDA ICE-Datenbank	Dichte [kg/m ³]	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	spez. Wärmekapazität [J/kgK]
Außenputz sowie Innenputz der Innenwände	"Render"	1800	0,800	790
Holz(-dielen)	"Wood (example)"	500	0,140	2300
Schüttung	"Sand (example)"	1500	0,330	800
Luftschicht	"Air"	1,23	0,025	1008

Für das Nutzerverhalten wurde eine Anwesenheit in dem Wohnraum von 2 Personen während der Woche und am Wochenende entsprechend Abbildung 99 angenommen.

Abbildung 99: Annahmen zur Anwesenheit von zwei Personen im Standardraum



Simulationsanalyse

Mit dem beschriebenen Raummodell wurden sechs verschiedene Varianten entsprechend Tabelle 22 untersucht, wobei die ungedämmte Bestandsfassade, eine Innendämmung mit 30 mm Kalziumsilikat, eine Innendämmung von 100 mm Holzfaser sowie drei unterschiedliche Innendämm-Schichtverbundsysteme mit jeweils 30 mm hygrysch aktiver Dämmung und 100 mm Holzfaserdämmung betrachtet wurden.

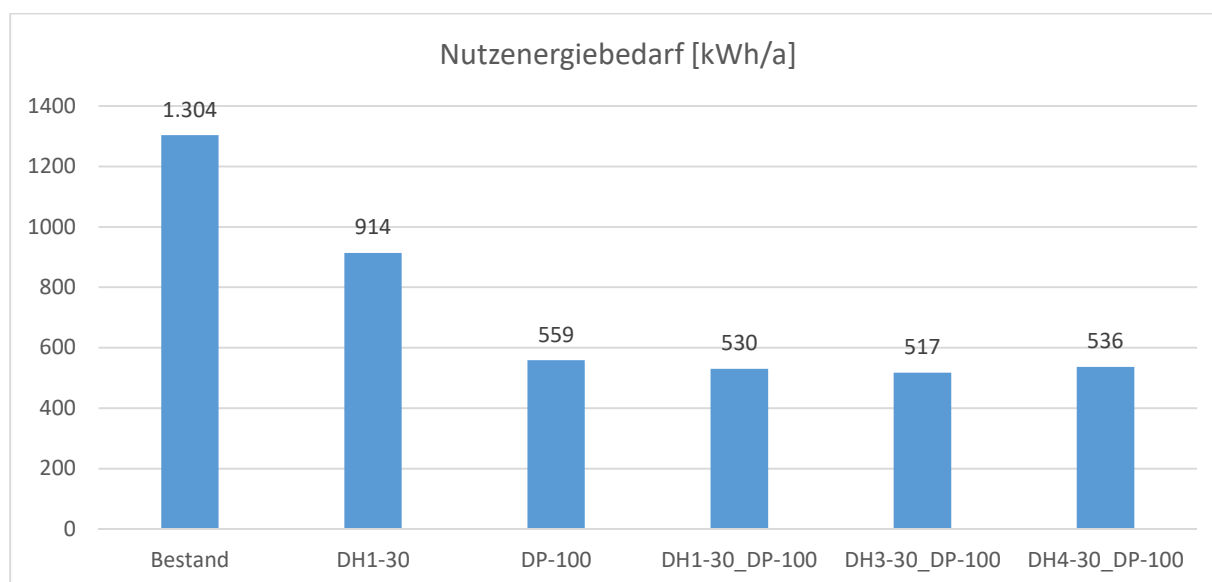
Tabelle 22: Simulationsvarianten der thermischen Raumsimulation

Bezeichnung	Schichtdicken	Wandaufbau
Bestand	420 mm	Ziegelmauerwerk
DH1-30	420 mm 30 mm	Ziegelmauerwerk Kalziumsilikat
DP-100	420 mm 100 mm	Ziegelmauerwerk Holzfaserdämmplatte
DH1-30_DP-100	420 mm 30 mm 100 mm	Ziegelmauerwerk Kalziumsilikat Holzfaserdämmplatte
DH3-30_DP-100	420 mm 30 mm 100 mm	Ziegelmauerwerk iQ-Therm Holzfaserdämmplatte
DH4-30_DP-100	420 mm 30 mm 100 mm	Ziegelmauerwerk Korkdämmlehmplatte Holzfaserdämmplatte

Energetische Bewertung:

Die Ergebnisse aus der Simulation des Standardraums in IDA ICE in Abbildung 100 zeigen, dass bereits mit einer alleinigen Innendämmschicht aus Kalziumsilikat mit einer Dicke von 30 mm jährlich knapp 30% der Nutzenergie für das Heizen gegenüber der ungedämmten Bestandsfassade eingespart werden kann. Eine alleinige Holzfaserdämmung von 100 mm würde 57% der Nutzenergie einsparen, könnte jedoch aufgrund der fehlenden hygrisch-aktiven Schicht bei entsprechend niedrigen Außentemperaturen zu bauphysikalisch problematischen Zuständen (Taupunkt-Unterschreitung in der Holzfaserschicht) führen.

Abbildung 100: Jährlicher Nutzenergiebedarf für den Standardraum für die untersuchten Varianten



Eine Kombination aus Kalziumsilikatplatte (30 mm) und Holzfaserdämmung (100 mm) erhöht die Einsparung nur wenig auf etwa 59 %, stellt aber eine bauphysikalisch funktionierende Lösung dar.

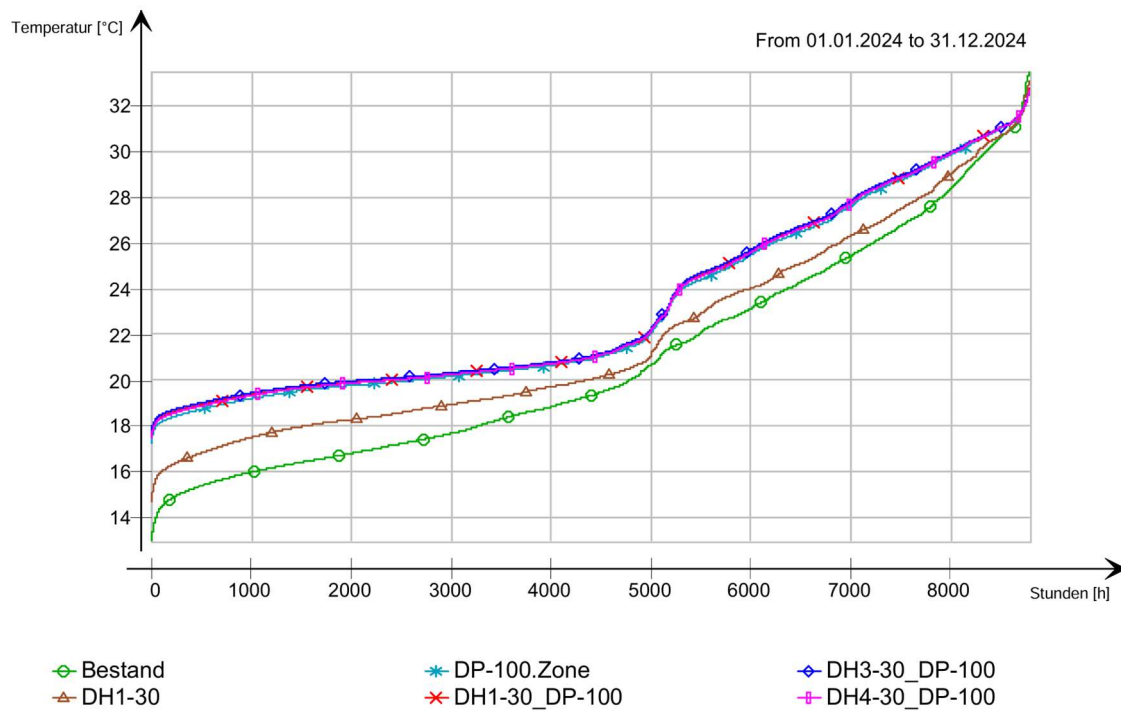
Ersetzt man die Kalziumsilikatplatte mit einer der anderen betrachteten kapillaraktiven Dämmungen in gleicher Stärke, ergeben sich trotz der etwas unterschiedlichen U-Werte aufgrund der geringen Schichtdicke von 30mm nur geringfügige Unterschiede bezüglich der Einsparung.

Bei dem untersuchten Aufbau mit der Kombination aus 30 mm kapillaraktivem Dämmstoff und 100 mm Holzfaserdämmplatte ist die Wahl des kapillaraktiven Dämmstoffs für die Energiebilanz in der Nutzung wenig ausschlaggebend. Alle diese Varianten erzielen eine ähnliche Einsparung von etwa 60% Nutzenergie gegenüber der Bestandswand.

Bewertung des Raumklimas

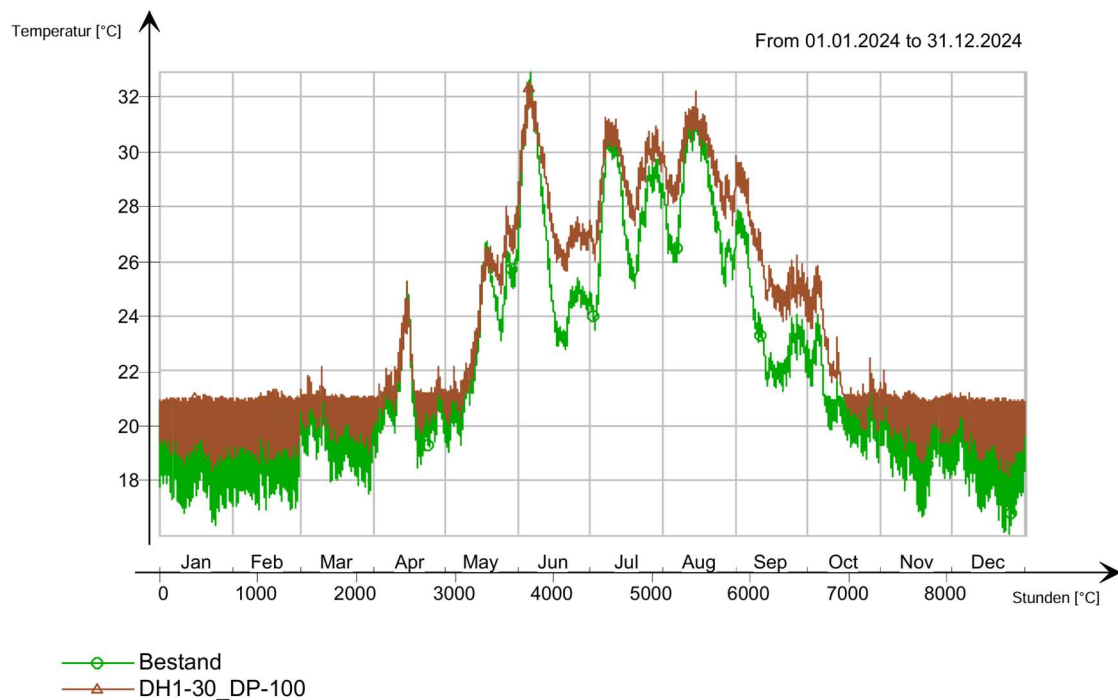
Abbildung 101 zeigt die Jahresdauerlinie der Innenoberflächentemperaturen der Außenfassade für alle sechs untersuchten Varianten inklusive außenliegender Sonnenschutz. Bei allen Innendämmverbundsystemen ist ein deutlicher Temperaturanstieg sowohl während der Heizperiode (vorwiegend Stunden im linken Teil der Grafik) als auch während der heißen Sommerperioden (vorwiegend Stunden im rechten Teil der Grafik) von bis zu 4 K zu erkennen. Die Variante mit nur 30 mm Kalziumsilikat liegt etwas dazwischen. Die Innenoberflächentemperatur stellt ein Teil der mittleren Strahlungstemperatur des Innenraums dar und beeinflusst hierdurch sowohl die operative („empfundene“) Raumtemperatur (in erster Näherung der Mittelwert der mittleren Strahlungstemperatur und der Raumlufttemperatur) als auch die thermische Behaglichkeit des Innenraums.

Abbildung 101 Jahresdauerlinie der Innenoberflächentemperaturen der Außenfassade der untersuchten Varianten mit außenliegendem Sonnenschutz



Durch alle Varianten der Innendämmung erhöht sich die operative Raumtemperatur über das ganze Jahr. In Abbildung 102 ist dieser Effekt am Beispiel der ungedämmten Außenfassade und des Innendämmverbundsystems DH1-30_DP-100 (Kalziumsilikat plus Holzfaserdämmplatte) dargestellt.

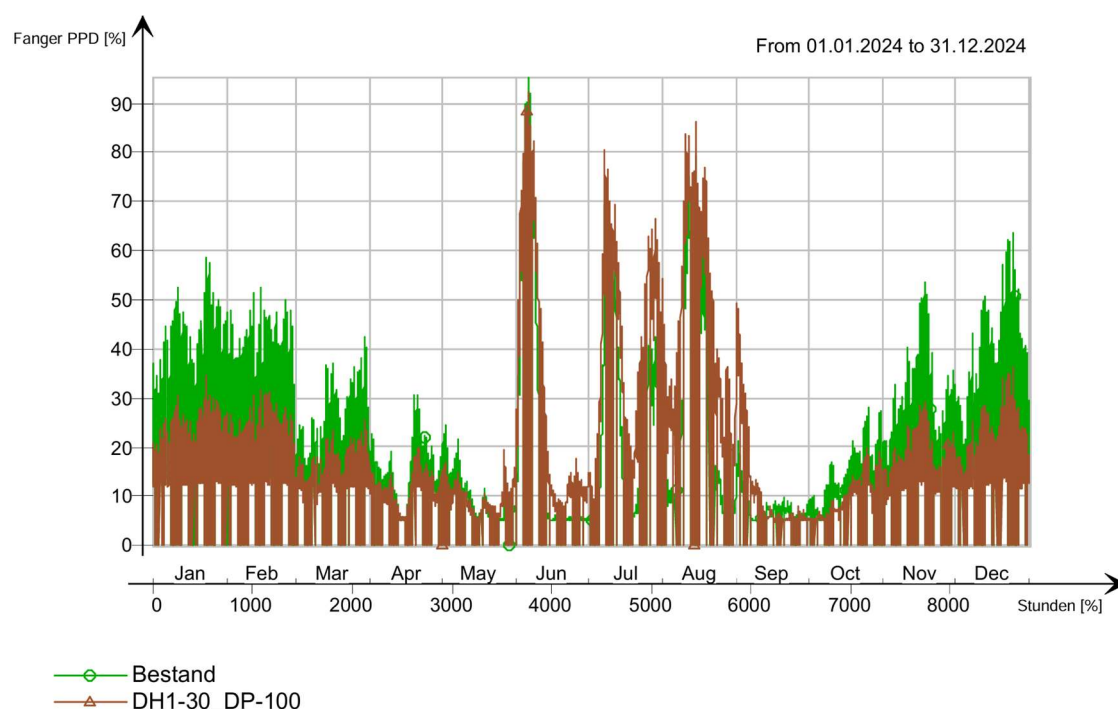
Abbildung 102: Jahresverlauf der operativen Temperatur für den Standardraum mit Bestandsfassade und dem Innendämmverbundsystems DH1.30 DP-100 mit außenliegenden Sonnenschutz



In den Sommermonaten heizt sich der Raum deutlich stärker auf, da die passiven solaren Gewinne (Fenster Südausrichtung) auf Grund der Innendämmung vermehrt im Raum verbleiben und die thermische Masse der Außenwand nicht mehr aktiviert werden kann. Um eine Überhitzung zu vermeiden, sollte daher unbedingt bei Innendämmmaßnahme südlich ausgerichteter Fassaden mit größerem Verglasungsanteil gleichzeitig ein passender Sonnenschutz mit eingeplant werden.

Abbildung 103 zeigt jahreszeitlich gegenläufigen Effekt bei der Veränderung der thermischen Behaglichkeit, dargestellt durch den Prozentsatz Unzufriedener nach Fanger. Auf Grund der kälteren Innenoberflächentemperatur der ungedämmten Bestandsfassade liegt der Anteil unzufriedener während der Heizperiode etwa doppelt so hoch als bei der Innendämmvariante DH1-30_DP-100, während der heißen Sommermonate kehrt sich der Effekt auf Grund des nicht vorhandenen Sonnenschutzes um.

Abbildung 103: Jahresverlauf des Prozentsatzes Unzufriedener nach Fanger für den Standardraum mit Bestandsfassade und dem Innendämmverbundsystems DH1.30 DP-100 mit außenliegenden Sonnenschutz



3.8 Lebenszyklusanalyse

Die Innendämmung hat nicht nur Einfluss auf die thermischen und bautechnischen Eigenschaften eines Gebäudes, sondern auch auf dessen ökologische Bilanz über die gesamte Nutzungsdauer hinweg. Eine Lebenszyklusanalyse (LCA) erlaubt es, Materialien anhand ihrer Lebensdauer, ihrem CO₂-Fußabdruck und ihrer Grauen Energie umfassend zu bewerten. Dies ermöglicht eine Entscheidungsgrundlage für eine nachhaltige Materialwahl.

Die Lebensdauer eines Dämmmaterials bestimmt, wie lange es ohne signifikanten Leistungsverlust genutzt werden kann. Materialien wie Holzfaserdämmplatten oder Kalziumsilikatplatten zeichnen sich durch eine hohe Langlebigkeit und Stabilität aus, während synthetische Alternativen wie PUR-Hartschaumplatten oft durch ihre Resistenz gegen Feuchtigkeit und Schädlinge punkten. Dämmstoffe wie Korkdämmlehmplatten und Wärmedämmlehm kombinieren organische und mineralische Komponenten, was zu einer robusten und nachhaltigen Materialstruktur beiträgt.

3.8.1 Graue Energie und Globales Erwärmungspotenzial

Die Graue Energie umfasst die Energie, die während des gesamten Lebenszyklus eines Materials benötigt wird – von der Rohstoffgewinnung über die Produktion und den Transport bis zur Entsorgung. Materialien wie Holzfaserdämmplatten und Korkdämmlehmplatten sind aus nachwachsenden Rohstoffen gefertigt und weisen in der Regel eine geringere Graue Energie auf. Mineralschaumplatten und Kalziumsilikatplatten, die auf mineralischen Rohstoffen basieren, haben hingegen einen höheren Energiebedarf in der Produktion, bieten jedoch eine hohe Langlebigkeit. Synthetische Materialien wie PUR-Hartschaumplatten haben oft eine besonders hohe Graue Energie, können jedoch durch ihre hohe Dämmleistung über die Nutzungsdauer hinweg Energieeinsparungen ermöglichen.

Durch die Betrachtung der Lebensdauer und der Grauen Energie kann eine ganzheitliche Bewertung der Materialien erfolgen, die sowohl ökologische als auch ökonomische Aspekte einbezieht. Im Fokus dieser Analyse stehen die folgenden Materialien:

- Holzfaserdämmplatten
- Kalziumsilikatplatten
- Kork
- Lehm
- Mineralschaumplatten
- PUR-Hartschaumplatten

Um die Dämmstoffe hinsichtlich ihrer ökologischen Qualität bewerten zu können, bedarf es eines einheitlichen Bewertungssystems, anhand dessen die Einflüsse auf die Umwelt der einzelnen Materialien quantifiziert und verglichen werden können. Solche Umweltproduktdeklarationen, engl. Environmental Product Declarations (EPD), sind genormte Datenblätter, in denen die relevanten Ökobilanzdaten angegeben sind. In Deutschland wurde im Jahr 2012 die DIN EN 15804: Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umweltproduktdeklarationen – Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte als Standard für Bauprodukte eingeführt. Diese DIN-Norm regelt den Inhalt und Aufbau der Umweltproduktdeklarationen. Die Ökobilanzdaten werden entlang des Lebenszyklus der Produkte in Modulen (sog. Lebenswegmodulen) angegeben (DIN EN 15804, 2022). Tabelle 23 zeigt die Übersicht der einzelnen Module.

Tabelle 23: Übersicht der Lebenswegmodule aus der DIN EN 15804

Modul	Bezeichnung	Inhalt
A1–A3	Produktphase	Rohstoffgewinnung, Transport, Herstellung
A1	Rohstoffgewinnung	Abbau und Gewinnung der Rohstoffe
A2	Transport	Transport der Rohstoffe zum Hersteller
A3	Herstellung	Energie- und Materialeinsatz in der Produktion
A4–A5	Bauphase	Transport zur Baustelle, Einbau
A4	Transport	Lieferung der Produkte zur Baustelle
A5	Einbau	Verarbeitung und Montage auf der Baustelle
B1–B7	Nutzungsphase	Nutzung, Wartung, Instandhaltung, Energiebedarf, Wasserverbrauch
B1	Nutzung	Auswirkungen während der Nutzung (z. B. Emissionen)
B2	Wartung	Regelmäßige Wartungsmaßnahmen
B3	Reparatur	Austausch oder Reparatur beschädigter Teile
B4	Erneuerung	Regelmäßiger Austausch von Bauteilen
B5	Instandsetzung	Wiederherstellung der Funktionsfähigkeit
B6	Betriebsenergie	Energiebedarf im Betrieb (z. B. Heizenergie, Strom)
B7	Betriebswasser	Wasserverbrauch während der Nutzung
C1–C4	End-of-Life-Phase	Rückbau, Transport, Verwertung, Entsorgung

C1	Rückbau	Demontage oder Abbruch
C2	Transport	Transport zu Verwertungs- oder Entsorgungsstellen
C3	Verwertung	Recyclingprozesse
C4	Entsorgung	Deponierung oder thermische Behandlung
D	Potenzial außerhalb des Systems	Gutschriften durch Recycling oder Energiegewinnung außerhalb des Gebäudes

Die Graue Energie bezieht sich auf die Energie, die für die Herstellung, den Transport und die Errichtung eines Produkts aufgewendet wird. Daher sind die Module A1-A3 am aussagekräftigsten. Das Modul D kann durch Gutschriften die Graue Energie mindern und wird daher ebenfalls miteinbezogen. Bei der Betrachtung der Grauen Energie liegt der Fokus in der Auswertung auf dem Globalen Treibhauspotenzial (GWP) und der Total nicht-erneuerbaren Primärenergie (PENRT). Das GWP ist ein kritischer Indikator, um die Klimawirkung eines Produktes oder Systems zu bewerten. Mit der Betrachtung dieser beider Indikatoren können die Auswirkungen auf den Klimawandel und den übermäßigen Verbrauch von Ressourcen der untersuchten Materialien bewertet werden.

Die o. g. Materialien werden beispielhaft für die Innendämmmaterialien, die im InMoB-Projekt untersucht wurden, ausgewertet, da es nicht für jedes untersuchte Material eine Umweltproduktdeklaration gibt. Die iQ-Therm Dämmplatten basieren auf PUR-Hartschaumplatten mit mineralischen Bestandteilen für die Kapillaraktivität. Ebenso gibt es keine Umweltproduktdeklaration für Korkdämmlehmplatten, weshalb die Materialien expandierter Kork und Lehm einzeln aufgelistet sind. Die Grafiken in Abbildung 9 und Abbildung 10 zeigen demnach eine Annäherung an die im Projekt untersuchten Materialien, bilden diese aber nicht exakt ab.

Für Kalziumsilikat wurden zwei verschiedene EPD's von unterschiedlichen Quellen ausgewertet. Bei der Betrachtung zeigt sich, dass Kalziumsilikat bei beiden Indikatoren die höchsten Werte in der Summe aus Rohstoffversorgung, Transport und Herstellung aufweist. Kalziumsilikat ist ein anorganisches Material, das hauptsächlich aus Kalk und Quarzsand besteht. Der Kalk wird aus Kalkstein gewonnen, wobei beim Brennen CO₂-Emissionen entstehen. Quarzsand hingegen ist ein natürlich vorkommendes Material mit relativ geringem Energieaufwand bei der Gewinnung. Kalziumsilikat entsteht durch Mischen und Autoklavieren (Dampfhärtung) der Rohstoffe. Das Autoklavieren benötigt einen hohen Energieverbrauch und verursacht die Hauptumweltbelastung in der Produktion. Kalziumsilikatplatten sind jedoch äußerst langlebig, da sie verrottungsfest, alterungsbeständig und durch den basischen pH-Wert fäulnisresistent sind. Ist ihre Nutzungszeit zu Ende, können sie problemlos getrennt erfasst und wiederverwendet werden. Andernfalls werden sie zermahlen und als Füllstoff verwendet oder werden auf der Deponie entsorgt (IBU, 2024).

Den zweithöchsten Anteil der total nicht-erneuerbaren Primärenergie hat PUR-Hartschaum. Die Hauptbestandteile dieses Materials werden aus Erdöl gewonnen. Zudem werden Stabilisatoren, Katalysatoren und Flammschutzmittel zugesetzt. Der hohe Anteil fossiler Rohstoffe führt zu einem hohen Primärenergiebedarf. Die Herstellung ist energieintensiv und verursacht Treibhausgasemissionen, insbesondere durch die chemischen Prozesse. PUR-Hartschaumplatten sind jedoch langlebig und haben eine sehr gute Wärmedämmleistung, weshalb weniger Material benötigt wird, um die gleiche Dämmwirkung zu erzielen im Vergleich zu den anderen untersuchten Materialien. Das Recycling ist nach der Nutzung nur begrenzt möglich, weshalb es meist thermisch verwertet oder auf einer Deponie entsorgt wird (IBU, 2022).

Die Ökobilanz von expandiertem Kork zeigt, dass dieser Dämmstoff zu den umweltfreundlichsten und nachhaltigsten Materialien gehört. Kork wird aus der Rinde der Korkeiche gewonnen, die sich regelmäßig erneuert, ohne dass der Baum gefällt werden muss. Das macht ihn zu einem nachwachsenden,

natürlichen Rohstoff mit zahlreichen ökologischen Vorteilen. Die Korkgranulate werden durch Erhitzen auf über 300°C expandiert. Durch die Erhitzung wird das natürliche Bindemittel Suberin freigesetzt, das die Granulate miteinander verbindet. Der Produktionsprozess ist energiearm und frei von synthetischen Zusätzen. Der gesamte Prozess hat einen vergleichsweise geringen CO₂-Fußabdruck. Nach der Nutzungsdauer können die Korkabfälle thermisch verwertet werden (Kaiser, et al., 2020).

Lehmputz gehört zu den nachhaltigsten Baustoffen, da es ein natürlich vorkommender, unbehandelter Rohstoff, der regional verfügbar, wiederverwendbar und vollständig recycelbar ist. Er wird seit Jahrtausenden als Baustoff genutzt und ist besonders umweltfreundlich. Lehm besteht hauptsächlich aus Ton, Sand und Schluff. Diese Rohstoffe sind in vielen Regionen lokal verfügbar und benötigen kaum energieintensive Aufbereitung (Lemke, 2024).

Holzfaserdämmplatten sind umweltfreundliche und nachhaltige Dämmstofflösungen, die vor allem durch ihre biogene Herkunft und die geringe Umweltbelastung während des Lebenszyklus punkten. Holzfaserdämmplatten werden hauptsächlich aus Holzresten (z. B. Hackschnitzel oder Sägespänen) hergestellt. Holz ist ein CO₂-neutraler Baustoff, da das während des Wachstums gebundene CO₂ die Emissionen aus Herstellung und Transport oft ausgleicht. Bei der Herstellung werden zwei Verfahren unterschieden. Beim Trockenverfahren werden die Holzfasern mit Bindemitteln wie Polyurethanharzen verklebt, wohingegen beim Nassverfahren die Holzfasern ohne synthetische Bindemittel verpresst werden. Der Energieaufwand in der Herstellung ist hoch, aber die Nutzung von Holzresten (z. B. als Biomasse) kompensiert dies teilweise, woraus sich die Gutschriften ergeben (IBU, 2020).

Abbildung 104: Globales Erwärmungspotenzial (GWP) der untersuchten Materialien

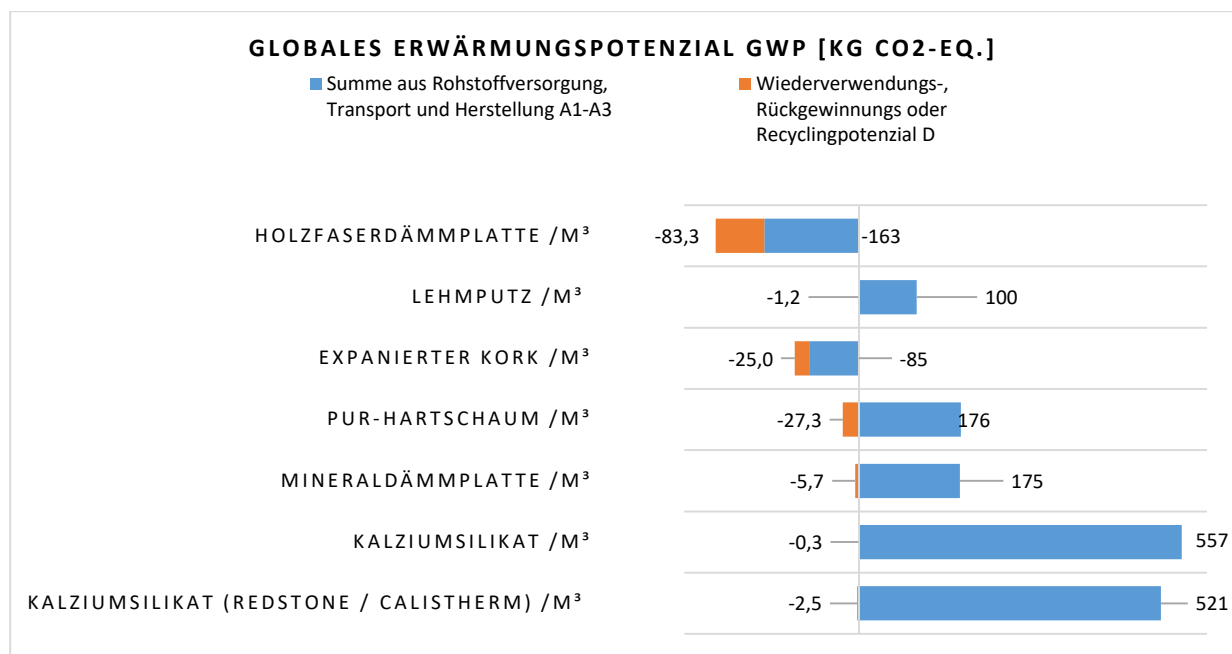
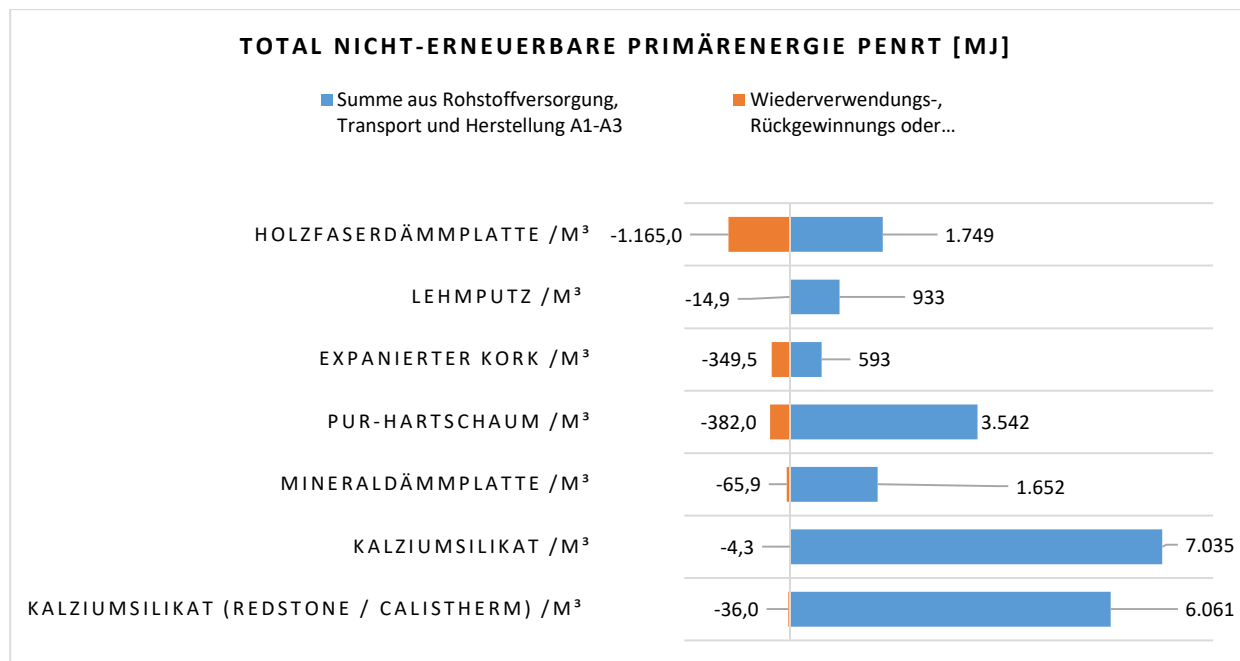


Abbildung 105: Total nicht-erneuerbare Primärenergie (PENRT) der untersuchten Materialien



Die Auswertung der Ökobilanz zeigt am Beispiel der untersuchten Materialien, dass Kork, Lehm und Holzfaserdämmplatten die geringsten umweltschädlichen Auswirkungen aufweisen. Kork, Lehm und Holzfaserdämmplatten zeichnen sich durch eine positive Ökobilanz aus, da sie aus natürlichen, erneuerbaren Rohstoffen bestehen und CO₂ während ihres Wachstums speichern (Kork und Holz). Ihre Herstellung erfordert nur geringen Energieaufwand, und sie sind vollständig recycelbar oder biologisch abbaubar. Im Vergleich zu konventionellen Dämmstoffen, die häufig auf fossilen Rohstoffen basieren, bieten diese Materialien eine umweltfreundliche Alternative mit niedrigeren Treibhausgasemissionen und geringem Primärenergieverbrauch.

3.8.2 Lebenszyklusanalyse

Um die Umweltauswirkungen der in dieser Arbeit untersuchten Innendämmsysteme ganzheitlich bewerten zu können, wurde eine Lebenszyklusanalyse (LCA) durchgeführt. Dabei kam das Online-Tool eLCA zum Einsatz, das vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) in Zusammenarbeit mit dem Öko-Institut e.V. entwickelt wurde. eLCA ermöglicht die ökobilanzielle Bewertung von Baukonstruktionen nach den Methoden und Vorgaben der DIN EN 15978. Grundlage sind die in der Ökobaudat hinterlegten Umweltinformationen, die auf standardisierten Lebenszyklusphasen beruhen – von der Rohstoffgewinnung über die Herstellung, Nutzung und Entsorgung bis hin zum Recyclingpotenzial (Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR), 2025).

Im Rahmen dieser Arbeit wurden mit eLCA verschiedene Innendämmmaterialien, darunter Kalziumsilikatplatten, Mineralschaumplatten, PUR-basierte Systeme (iQ-Therm), Korkdämmlehmplatten, Lehmplatten sowie Holzfaserdämmplatten, hinsichtlich ihres Umweltprofils analysiert. Ziel war es, über die hygrothermische Bewertung hinaus auch die ökologische Qualität der Materialien in die Bewertung einzubeziehen. Für die Analyse in eLCA wurden die Daten des in Kapitel 3.6.1 definierten Standardraumes verwendet.

Randbedingungen

Zunächst wurden die Ergebnisse der Simulation des Endenergieverbrauchs aus IDA ICE in eLCA übertragen. Als Energieträger wurde Gas gewählt, da es in Deutschland noch immer einer der meistgenutzten Energieträger für die Beheizung von Bestandswohngebäuden darstellt (dena, 2023).

Im Online-Tool eLCA wird standardmäßig eine Nutzungsdauer von 50 Jahren für Gebäude angesetzt. Bauteile mit einer kürzeren Lebensdauer werden dabei automatisch mehrfach berücksichtigt. Die Materialien, die innerhalb des Betrachtungszeitraums erneuert werden müssen, fließen entsprechend häufiger in die Bilanz ein. Die Nutzungsdauer für Mineralschaumdämmplatten und Kalziumsilikatplatten als Innenwandbekleidung beträgt nach „Nutzungsdauern von Bauteilen für Lebenszyklusanalysen nach Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB)“ mehr als 50 Jahre. Die Nutzungsdauer für Holzfaserdämmplatten beträgt 40 Jahre. Die Holzfaserdämmplatte, sowie alle damit verbundenen Materialien (auch die hygrische Dämmung in den Schichtverbünden) werden in der Lebenszyklusanalyse demnach innerhalb der berechneten Nutzungszeit von 50 Jahren einmal ausgetauscht.

Die für die Berechnung erforderlichen Ökobilanzdaten der Baustoffe stammen aus der Datenbank ÖKOBAUDAT in der Version 2024-I, welche auch im Tool eLCA hinterlegt ist. Da jedoch nicht alle in dieser Arbeit untersuchten Materialien in der ÖKOBAUDAT enthalten sind, mussten für die Berechnungen geeignete Ersatzdatensätze verwendet werden. Das betrifft insbesondere die Materialien iQ-Therm sowie die Korkdämmlehmplatte. Für iQ-Therm wurde ein allgemeiner Datensatz für PUR-Hartschaum herangezogen. Die Korkdämmlehmplatte wurde durch eine Kombination aus den Datensätzen für Kork (85 %) und Lehmputz (15 %) abgebildet, die anteilig in die Berechnung eingeflossen sind.

Die zugrunde gelegten Maße entsprechen dem in der Analyse verwendeten Standardraum. Als Bezugsgröße wurde die Innenfläche der Außenwand gewählt, die für die Innendämmung eine Fläche von 10,909 m² ergibt.

Es wurden insgesamt sechs unterschiedliche Varianten untersucht:

- Bestand: Vormauerziegel, Kalkzementmörtel, Kalkzementputz, Lehmputz
- DH1-30: Vormauerziegel, Kalkzementmörtel, Kalkzementputz, 30 mm Kalziumsilikatplatte, Lehmputz
- DP-100: Vormauerziegel, Kalkzementmörtel, Kalkzementputz, 100 mm Holzfaserdämmplatte, Lehmputz
- DH1-30_DP-100: Vormauerziegel, Kalkzementmörtel, Kalkzementputz, 30 mm Kalziumsilikatplatte, 100 mm Holzfaserdämmplatte, Lehmputz
- DH3-30_DP-100: Vormauerziegel, Kalkzementmörtel, Kalkzementputz, 30 mm iQ-Therm (Datensatz: PUR-Hartschaumplatte), 100 mm Holzfaserdämmplatte, Lehmputz
- DH4-30_DP-100: Vormauerziegel, Kalkzementmörtel, Kalkzementputz, 30 mm Korkdämmlehmplatte (Datensätze: Kork und Lehmputz), 100 mm Holzfaserdämmplatte, Lehmputz

Ergebnisse

Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt für ausgewählte Indikatoren. In der Lebenszyklusanalyse von Gebäuden werden bestimmte Umweltindikatoren besonders hervorgehoben, da sie zentrale ökologische Auswirkungen des Bauens und Nutzens eines Gebäudes abbilden. Zu den wichtigsten zählen das Treibhauspotenzial (GWP total), das angibt, wie stark ein Gebäude zum Klimawandel beiträgt. Es wird gemessen in CO₂-Äquivalenten über den gesamten Lebenszyklus hinweg. Dieser Indikator steht im Mittelpunkt vieler Nachhaltigkeitsbewertungen, da die Reduktion klimaschädlicher Emissionen eines der wichtigsten globalen Umweltziele ist.

Ein weiterer zentraler Indikator ist der nicht erneuerbare Primärenergiebedarf (PENRT). Er beschreibt die Menge an Energie, die für Herstellung, Nutzung und Entsorgung von Baustoffen aufgewendet werden muss, wobei insbesondere der Einsatz fossiler Energieträger im Fokus steht. Die Betrachtung dieses Indikators liefert wichtige Informationen zur Ressourcenintensität eines Bauvorhabens.

Das Versauerungspotenzial (AP) beschreibt die Bildung von sauren Substanzen wie Schwefel- oder Stickstoffverbindungen, die durch Emissionen aus der Baustoffproduktion entstehen können. Diese Substanzen belasten Böden, Gewässer und Ökosysteme.

Das Ozonabbaupotenzial (ODP) gibt an, wie stark verwendete Materialien und Prozesse zur Zerstörung der stratosphärischen Ozonschicht beitragen. Auch wenn viele ozonabbauende Stoffe mittlerweile reguliert sind, bleibt der ODP ein relevanter Indikator, um verbleibende Umweltrisiken zu erfassen.

Der Frischwasserverbrauch (FW) ist ein Maß für die Inanspruchnahme natürlicher Wasserressourcen. Er wird herangezogen, um potenzielle Auswirkungen auf die lokale und globale Wasserversorgung zu bewerten, insbesondere in Zeiten zunehmender Wasserknappheit. Ergänzend dazu bewertet das Wasserknappheitspotenzial (WDP) die spezifischen Auswirkungen der Wassernutzung auf die Verfügbarkeit von Wasserressourcen in unterschiedlichen Regionen. Der Indikator bezieht sich nicht nur auf die Menge des verbrauchten Wassers, sondern gewichtet sie entsprechend der regionalen Wasserverfügbarkeit. So lassen sich die ökologischen Belastungen durch Wasserentnahmen differenzierter beurteilen.

Die Auswahl dieser Indikatoren basiert auf ihrer Relevanz für zentrale Umweltwirkungen im Bauwesen. Sie ermöglichen die Bewertung der ökologischen Auswirkungen über alle Lebenszyklusphasen eines Gebäudes hinweg und werden deshalb auch von Zertifizierungssystemen wie BNB, DGNB oder QNG ausgewertet.

Die Indikatoren enthalten die Daten der für den Vergleich relevanten Lebenswegmodule. Grundsätzlich können nach DIN EN 15804 drei Typen von Umweltproduktdeklarationen unterschieden werden (Figl, et al., 2017):

- Von der Wiege bis zum Werktor („cradle to gate“): Modul A1-A3
- Von der Wiege bis zum Werktor mit Optionen („cradle to gate with options“): Modul A1-A3 + z. B. C1-C4)
- Von der Wiege bis zur Bahre („cradle to grave“): Module: A1-C4

Zusätzlich kann das Recyclingpotenzial (Modul D) angegeben werden, das durch Wiederverwertung, Rückgewinnung und Recycling meist negative Werte aufweist. Dadurch verringern sich die Bilanzen der anderen Module. Für eine transparente Darstellung wird das Modul D nicht verrechnet, sondern als separater Wert angegeben.

Ein wesentlicher Bestandteil der Lebenszyklusanalyse ist das Modul B6, das die Betriebsenergie während der Nutzungsphase eines Gebäudes erfasst. In eLCA wird hierbei der klimarelevante Einfluss des Heizenergiebedarfs über den gesamten Betrachtungszeitraum quantifiziert. Das GWP (Global Warming Potential) für dieses Modul wird in kg CO₂-Äquivalent angegeben und stellt einen wichtigen Vergleichsmaßstab zur Klimawirkung der eingesetzten Materialien dar.

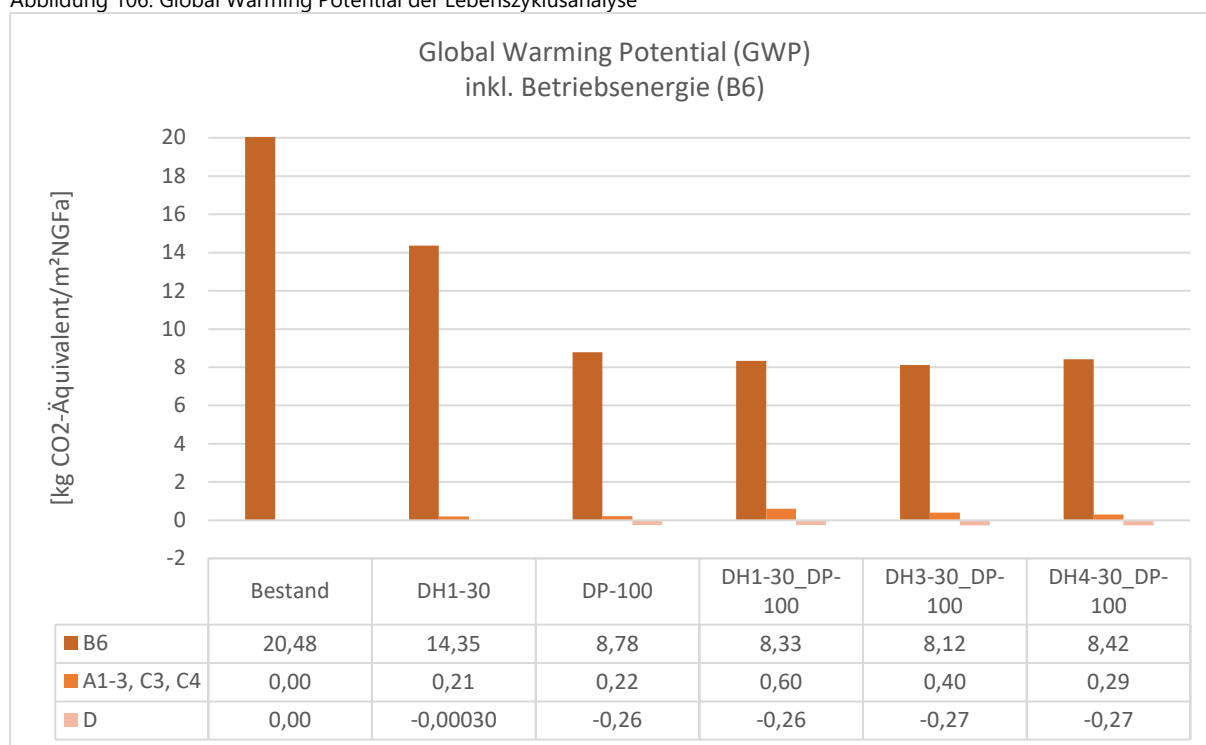
Im Diagramm in Abbildung 106 wird das GWP für die Module A1-A3, C3 und C4 angegeben („cradle to gate with options“). Zusätzlich werden das Modul D und die Betriebsenergie (Modul B6) dargestellt. Dabei zeigt sich deutlich, dass der Bestand mit 20,48 kg CO₂-eq den höchsten Emissionswert im Betriebsenergiebedarf aufweist, da keine energetische Verbesserung durch Dämmmaßnahmen vorgenommen wurde. Im Vergleich dazu erreichen alle Varianten mit Innendämmung deutlich geringere Werte für B6. Das GWP der Betriebsenergie konnte durch die Dämmmaßnahmen deutlich gesenkt werden. Für die Varianten mit 100 mm Holzfaserdämmung sogar um mehr als die Hälfte.

Das GWP für die Module A1-A3, C3 und C4 der eingesetzten Materialien für die Dämmung schwankt hingegen deutlich stärker zwischen den Varianten: Während die einschichtigen Varianten DH1-30 und DP-100 mit 0,21 und 0,22 kg CO₂-eq einen vergleichsweise geringen Wert aufweisen, ist das GWP für die mehrschichtigen Varianten, insbesondere der Kalziumsilikat-Variante (DH1-30_DP-100) mit 0,60 kg CO₂-eq, deutlich höher. Das ist zum einen auf die vergleichsweise hohen Werte der Grauen Energie für Kalziumsilikat zurückzuführen und zum anderen auf die Erneuerung der Innendämmung nach einer Nutzungsdauer von 40 Jahren.

Das GWP des Recyclingpotenzials (D) lässt sich hauptsächlich auf die Holzfaserdämmung zurückführen. Zu berücksichtigen ist allerdings, dass die Schichtkombinationen nur schwer getrennt entsorgt werden können, wenn sie fest miteinander verklebt sind. Für die Varianten mit einer hygrischen Dämmung, die auf der Deponie entsorgt wird, bedeutet das, dass die Holzfaserdämmung ebenfalls auf der Deponie entsorgt werden muss, anstatt sie thermisch verwerten zu können.

Diese Ergebnisse verdeutlichen, dass zwar der Einsatz zusätzlicher Dämmmaterialien zunächst höhere Emissionen (Modul A1-3, C3, C4) verursachen kann, jedoch über die Nutzungsdauer hinweg durch signifikante Einsparungen bei der Betriebsenergie kompensiert wird. Modul B6 ist somit entscheidend für die ganzheitliche Bewertung der Klimawirkung von Sanierungsmaßnahmen.

Abbildung 106: Global Warming Potential der Lebenszyklusanalyse



Die Auswertung des nicht erneuerbaren Primärenergiebedarfs (PENRT) in Abbildung 107 verdeutlicht, dass der Betrieb des Gebäudes (Modul B6) den mit Abstand größten Anteil an der Gesamtbilanz einnimmt, insbesondere im Bestandsfall ohne zusätzliche Dämmung. Durch den Einsatz der Innendämmsysteme lässt sich dieser Wert deutlich reduzieren.

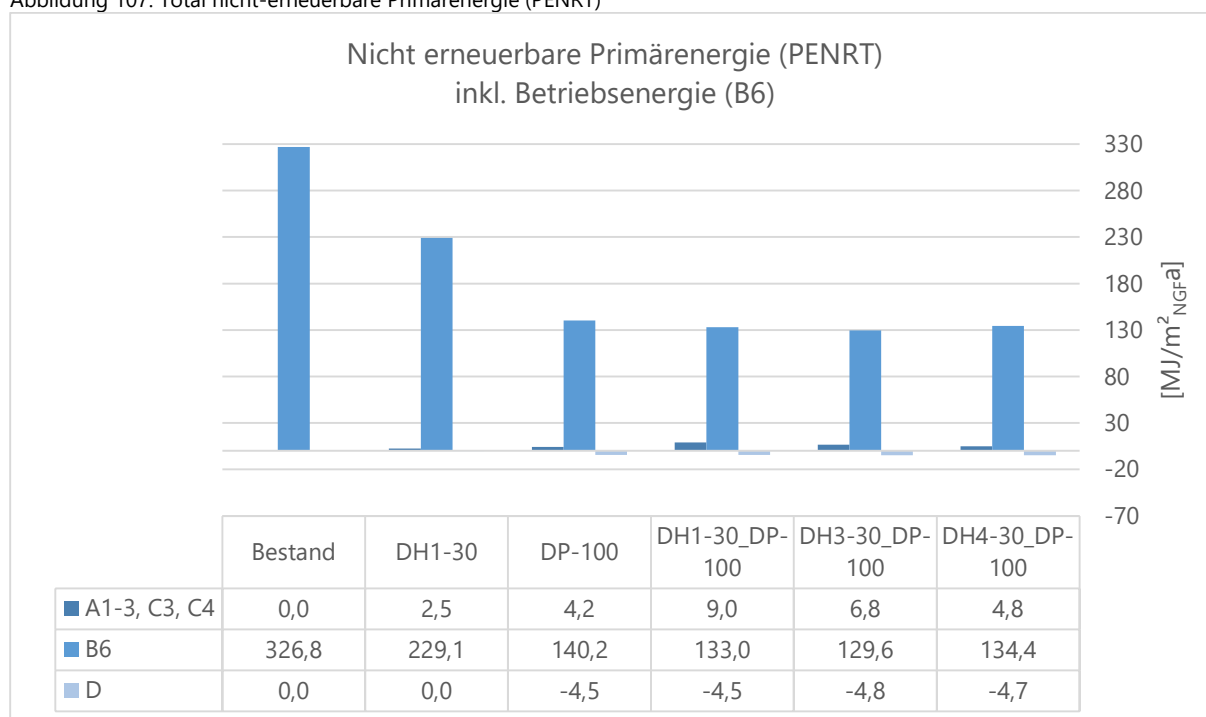
Die Varianten mit Holzfaserdämmung (DP-100) sowie die verschiedenen Schichtkombinationen (z. B. DH1-30_DP-100 und DH3-30_DP-100) verringern den Betriebsenergiebedarf um über 50%, wobei der niedrigste Wert bei der Variante mit iQ-Therm und Holzfaserdämmung (DH3-30_DP-100) erreicht wird.

Der Beitrag der Herstellung, Entsorgung und weiteren Module (A1–A3, C3, C4) ist dabei im Vergleich gering, liegt aber bei den Varianten mit zusätzlichem Kalziumsilikat deutlich höher. Im Vergleich dazu

weisen einschichtige Systeme geringere Herstellungsaufwände auf. Bei den mehrschichtigen Systemen hat die Variante mit der Korkdämmlehmplatte und Holzfaserdämmung (DH4-30_DP-100) den geringsten nicht erneuerbaren Primärenergieeinsatz.

Die Gutschriften aus dem Modul D (z. B. durch energetische Verwertung oder Recyclingpotenziale) sind in allen Varianten nahezu identisch, wodurch sie in der Gesamtbilanz keinen entscheidenden Einfluss auf die Bewertung der Varianten haben.

Abbildung 107: Total nicht-erneuerbare Primärenergie (PENRT)



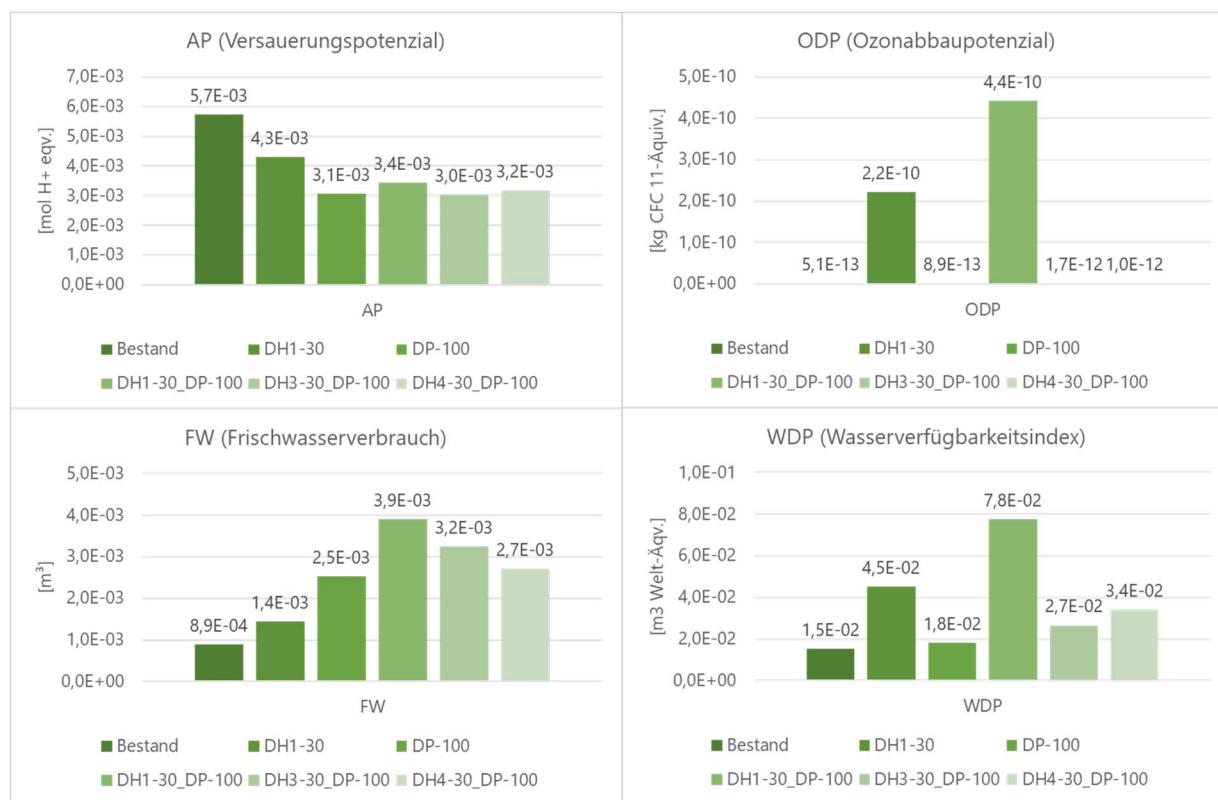
Weitere Indikatoren

Versauerungspotenzial (AP): Das Bestandsgebäude weist den höchsten Wert auf. Dies zeigt, dass durch die Nutzung des Bestands ohne zusätzliche Maßnahmen ein relativ hoher Beitrag zur Versauerung von Böden und Gewässern entsteht. Bei allen gedämmten Varianten verringert sich der Wert und ist bei der einschichtigen Holzfaserdämmung am geringsten.

Ozonabbaupotenzial (ODP): Die Varianten mit Kalziumsilikat haben den höchsten ODP-Wert unter den sanierten Varianten. Das lässt sich darauf zurückführen, dass in der Herstellung potenziell ozonabbauende Substanzen entstehen.

Frischwasserverbrauch (FW): Beim Frischwasserverbrauch weist der Bestand die geringste Umweltbelastung auf. Die Dämmvarianten liegen alle darüber, wobei DH1-30_DP-100 den höchsten Wasserbedarf hat. Dies ist vermutlich auf einen wasserintensiven Herstellungsprozess des Kalziumsilikats zurückzuführen.

Wasserverfügbarkeitsindex (WDP): Der Wasserverfügbarkeitsindex gibt Aufschluss über die Auswirkungen auf die regionale Wasserknappheit. Der Bestandsbau erreicht hier erneut den niedrigsten Wert, gefolgt von der einschichtigen Holzfaserdämmung. Auch hier schneidet die Variante mit Kalziumsilikat am schlechtesten ab.



Fazit

Die Auswertung der Umweltindikatoren im Rahmen der Lebenszyklusanalyse zeigt, dass die Betriebsenergie (B6) den größten Anteil des GWP und der nicht erneuerbaren Primärenergie innerhalb der Nutzungsdauer von 50 Jahren ausmacht. Jedoch wird deutlich, dass der Einsatz einer Innendämmung den Anteil der Betriebsenergie teilweise um mehr als 50% im Vergleich zum Bestand ohne Dämmung senken kann. Der Anteil der Dämmmaterialien ist im Vergleich zur Betriebsenergie so gering, dass die Wahl der Dämmvariante nebensächlich erscheint. Diese Schlussfolgerung gilt jedoch in diesem Fall für die Nutzung von Erdgas als Energieträger. Je größer der Einsatz erneuerbarer Energien ist, desto geringer wird die Umweltbelastung durch die Betriebsenergie und desto größer der Einfluss des gewählten Dämmmaterials.

Bei den weiteren Umweltindikatoren ODP, WDP sowie AP schneiden die gedämmten Varianten teilweise schlechter ab, als der Bestand, da der Herstellungs- und Entsorgungsprozess Auswirkungen auf die Umwelt und den Wasserverbrauch hat - Effekte, die im ungedämmten Zustand nicht oder nur in geringerem Maße auftreten würden. Auffällig ist, dass auch hier die Kalziumsilikat-Varianten durchweg schlechter abschneiden.

Insgesamt lässt sich festhalten, dass die Wahl des Dämmmaterials einen Einfluss auf die ökologische Gesamtbilanz hat, diese im Vergleich zur Umweltbelastung durch die Betriebsenergie jedoch gering ist, wenn das Gebäude mit fossiler Energie betrieben wird. Daher ist es wichtig den Bestand durch geeignete Dämmmaßnahmen energetisch zu sanieren, um die Umweltbelastung zu verringern. Dabei bieten die Kombinationen aus natürlichen und ressourcenschonenden Materialien, wie bei der Korkdämmlehmplatte mit Holzfaser, im Lebenszyklus zusätzliche Vorteile für die Umwelt.

4 Ergebnisse

4.1 Zusammenfassung der Simulationsanalysen

Im Rahmen der durchgeführten hygrothermischen Simulationsanalysen wurden verschiedene Schichtkombinationen auf ihr Feuchteverhalten, ihr Schadenspotenzial, ihre thermische Leistungsfähigkeit, wirtschaftliche Aspekte sowie ihre Umweltwirkungen hin untersucht. Die Analysen umfassten insgesamt folgende Konstruktionen:

Wandkonstruktionen:

- F1 (Mauerwerkswand, 11,5 cm),
- F2 (Fachwerkswand, 11,5 cm),
- F3 (Mauerwerkswand, 48 cm).

Hygrisch aktive Materialien:

- DH1 (Kalziumsilikat),
- DH2 (Mineralschaum),
- DH3 (iQ-Therm),
- DH4 (Korkdämmlehm),
- DH5 (Wärmedämmlehm)

Passive Dämmung für die zweite, stärker dämmende Schicht:

- DP (Holzfaserdämmung)

Alle Varianten enthalten einen Lehmputz auf der Innenseite der Wand, sind nicht vor Schlagregen geschützt und wurden mit Standardbedingungen für den Standort Potsdam mit dem TRY2011 simuliert.

Feuchteverhalten

Bei allen Varianten treten erhöhte Feuchtegehalte zum Ende des Winters auf, die jedoch im Jahresverlauf wieder rücktrocknen. Die passive Dämmschicht (Holzfaser) weist steigende Feuchtwerte auf, je größer die Schichtstärke wird. Zwischen den hygrisch aktiven Dämmmaterialien zeigen sich in dieser Hinsicht nur geringe Unterschiede. Als konservative Vergleichsbasis wurde die nach Westen ausgerichtete einschalige Mauerwerkswand F1 gewählt.

Bezogen auf die relative Feuchte zeigt Kalziumsilikat (DH1) die besten feuchteregulierenden Eigenschaften, insbesondere an den Schichtgrenzen Ziegel-DH und DH-DP. Auch DH2 (Mineralschaum) und DH4 (Korkdämmlehm) schneiden gut ab, wobei DH2 aufgrund besserer Rücktrocknung leicht im Vorteil ist. iQ-Therm (DH3) und Wärmedämmlehm (DH5) weisen in der Schichtgrenze Ziegel-DH deutlich erhöhte Feuchtwerte auf, was sich in der Schicht DH-DP jedoch ausgleicht.

Luftschichten verbessern die Rücktrocknung der inneren Schichten deutlich und verhindern kritische Feuchtwerte über 95 % r. F. In Varianten ohne Luftschicht wird dieser Wert im Winter überschritten, sinkt jedoch im weiteren Jahresverlauf wieder ab. Mit zunehmender Schichtdicke der Holzfaserdämmung steigt die relative Feuchte bei allen Varianten. Dieser Effekt ist bei zunehmender Schichtdicke der hygrischen Dämmung weniger stark ausgeprägt.

Insgesamt zeigen die Analysen, dass geringere Dämmstärken bei allen Materialien einen besseren Feuchteausgleich ermöglichen. Höhere Dämmstärken können dennoch sinnvoll sein, wenn z. B. ein besserer U-Wert erzielt werden soll. Außerdem zeigte sich, dass unter bestimmten Voraussetzungen die Integration einer Luftschicht die Feuchtebelastung in den innenliegenden Schichten reduziert.

Der Vergleich der Materialien zeigt zudem deutliche Unterschiede an der Schichtgrenze zur Außenwand. In dieser Schichtgrenze weisen die Materialien Kalziumsilikat (DH1), Mineralschaum (DH2) und Korkdämmlehm (DH4) insgesamt die bessere Feuchteregulierung auf, als die Materialien iQ-Therm (DH3) und Wärmedämmlehm (DH5). Jedoch sind diese Unterschiede in der Schichtgrenze DH-DP kaum noch vorhanden. Das zeigt, dass es durchaus Unterschiede in den hygrischen Materialien gibt und diese passend zur jeweiligen Bestandskonstruktion gewählt werden sollten. Jedoch hat die Wahl der Dämmstärke der Holzfaserdämmung mehr Einfluss auf die relative Feuchte in der Schichtgrenze zwischen hygrischen Material und Holzfaserdämmung, als das hygrische Material an sich.

Risiko der Holzerstörung

Die Analyse des Risikos der Holzerstörung hat gezeigt, dass insgesamt nur vier Varianten den kritischen Feuchtegehalt für die Gefahr von Holzerstörung durchgehend unterschreiten:

- F2_L_DH1-30_DP1-100_P1 (30 mm Kalziumsilikat, 100 mm Holzfaser mit Luftschicht),
- F2_L_DH1-30_DP1-40_P1 (30 mm Kalziumsilikat, 40 mm Holzfaser mit Luftschicht),
- F2_DH1-30_P1 (30 mm Kalziumsilikat),
- F2_DP1-30_P1 (30 mm Holzfaser).

Für alle übrigen untersuchten Schichtkombinationen besteht potenziell ein Risiko der Holzerstörung. In welchem Maß eine temporäre Überschreitung der Grenzlinie noch akzeptabel ist, sollte im Einzelfall durch eine Fachperson beurteilt werden. Ohne zusätzliche konstruktive Maßnahmen, wie z.B. Schlagregenschutz, kann aktuell keine dieser Varianten für den Einsatz an Fachwerkfassaden uneingeschränkt empfohlen werden.

Wirtschaftlichkeit

Hinsichtlich der Materialkosten sind Kalziumsilikat (DH1) und iQ-Therm (DH3) in größeren Schichtdicken am teuersten. Korkdämmlehm (DH4) ist bei hohen Dämmstärken ebenfalls kostenintensiv, zeigt sich jedoch bei geringeren Stärken als kostengünstigste Lösung, gefolgt von Wärmedämmlehm (DH5) und Mineralschaum (DH2), die ebenfalls im günstigen bis mittleren Bereich liegen.

Wärmeschutz (U-Wert)

Alle untersuchten Schichtkombinationen erreichen sowohl den Mindestwärmeschutz nach DIN 4108 ($0,73 \text{ W/m}^2\text{K}$) als auch die Anforderungen für sichtbares Fachwerk gemäß BEG ($0,65 \text{ W/m}^2\text{K}$). Dabei erreichen die Varianten mit iQ-Therm (DH3) aufgrund seiner sehr guten Wärmedämmeigenschaften die niedrigsten U-Werte. Die Ergebnisse der Analyse belegen, dass kombinierte Schichtaufbauten im Vergleich zu einschichtigen Lösungen sowohl hinsichtlich der thermischen Effizienz als auch in Bezug auf Materialeinsatz und Wirtschaftlichkeit Vorteile bieten können. Zwar können energetische Anforderungen auch mit einschichtigen, rein hygrischen Dämmstoffen erfüllt werden, hierfür sind jedoch oft größere Dämmstärken erforderlich und je nach Material auch höhere Kosten.

Welche Variante in welchem Fall sinnvoll ist, hängt stark von den baulichen Gegebenheiten und Anforderungen ab. Pauschale Aussagen zur optimalen Dämmstärke sind nicht möglich. Vielmehr ist eine individuelle, objektbezogene Auslegung notwendig, bei der bauphysikalische Sicherheit, gestalterische Anforderungen und wirtschaftliche Effizienz in Einklang gebracht werden.

Ökobilanz

In der Lebenszyklusanalyse weisen Holzfaserdämmung, Lehm und Korkdämmlehm die besten Umweltbilanzen auf sowohl hinsichtlich des Treibhauspotenzials (GWP) als auch in Bezug auf den Einsatz nicht erneuerbarer Primärenergie. Mineralschaum liegt im Mittelfeld, gefolgt von PUR-Hartschaum. Die schlechteste Ökobilanz zeigt Kalziumsilikat. Die Lebenszyklusanalyse hat ergeben, dass bei einem hohen Anteil fossiler Energie an der Betriebsenergie der Einfluss der Dämmmaterialien auf die Gesamtbilanz

gering ist. Entscheidend ist in diesem Fall, dass überhaupt eine Dämmmaßnahme erfolgt, um die Betriebsenergie zu senken. Wird hingegen der Gebäudebetrieb durch erneuerbare Energien abgedeckt, gewinnen die ökologischen Eigenschaften der Dämmstoffe deutlich an Relevanz. Unter diesen Bedingungen sind die Korkdämmlehmplatte (DH4) sowie der Wärmedämmlehm (DH5) die umweltfreundlichste Lösung, während Kalziumsilikat (DH1) am schlechtesten abschneidet und iQ-Therm (DH3) und Mineralschaum (DH2) im mittleren Bereich einzuordnen sind.

4.2 Bauteilkatalog

Alle simulativ untersuchten Schichtkombinationen wurden in einem Bauteilkatalog zusammengeführt. Dieser dokumentiert für jede Variante die Bezeichnung, den Materialaufbau mit DELPHIN-Darstellung, die Schichtdicken, bauphysikalische Kenngrößen, U-Werte, Kosten sowie die Graue Energie. Neben der Darstellung aller Kenndaten enthält der Katalog auch eine vergleichende Bewertung. So kann mit Hilfe des Katalogs vorab eine Auswahl möglicher passender Dämmvarianten getätigt werden. Die Tabelle 24 zeigt einen Ausschnitt aus dem Katalog. Der gesamte Bauteilkatalog befindet sich in der Anlage 11.3, die als separates Dokument veröffentlicht wird.

Zur vergleichenden Beurteilung wurden verschiedene Varianten anhand mehrerer quantitativer Kriterien systematisch bewertet, um ihre Leistungsfähigkeit hinsichtlich ökologischer, bauphysikalischer und ökonomischer Aspekte vergleichend einordnen zu können. Die Bewertung erfolgte für jede Variante anhand der zentralen Kenngrößen. Die folgenden Kriterien wurden berücksichtigt:

- Gesamt-Kosten [€/m²]
- U-Wert [W/m²K]
- Global Warming Potential A1-A3 [kg CO₂-Äquivalent/m²]
- Nicht-erneuerbare Primärenergie A1-A3 [MJ/m²]
- Anteil der Werte aus den Simulationsanalysen, die innerhalb eines Jahres die Grenze von 95% relative Feuchte überschreiten für ausgewählte Schichtgrenzen

Tabelle 24: Ausschnitt aus dem Bauteilkatalog*

*Stand der Kostenrecherche: Oktober 2023

Nr.	Bezeichnung	Bewertung	Gesamtkosten* [€/m²]	U-Wert [W/m²·K]	Wandaufbau	Schicht	Dicke [mm]	Lambda λ [W/mK]	R-Wert [m²·K/W]	Dichte [kg/m³]	Masse [kg/m²]	Gesamtkosten netto [€/m²]
1	1.3.F1.DH1-30.P1		125,00 €	0,98		Ziegelmauerwerk: Kalziumsilikat (DH1): Lehmputz (P1): Kleber:	115 30 15 5	0,369 0,059 0,582 0,600	0,312 0,508 0,026 0,008	1786,25 186,77 1567,77 -	205,4 5,6 23,5 -	- 73,00 €/m² 52,00 €/m² -
	Kosten	↕										
	Wärmeschutz	↕										
	Treibhauspotenzial	↕										
	Nicht erneuerbare	↕										
	Anteile r. F. > 95% (Ziegel-DH)	↕										
	Gesamt:						165	-	1,025	-	234,5	125,00 €/m²
2	1.3.F1.DH1-50.P1		164,00 €	0,73		Ziegelmauerwerk: Kalziumsilikat (DH1): Lehmputz (P1): Kleber:	115 50 15 5	0,369 0,059 0,582 0,600	0,312 0,847 0,026 0,008	1786,25 186,77 1567,77 -	205,4 9,3 23,5 -	- 112,00 €/m² 52,00 €/m² -
	Kosten	↕										
	Wärmeschutz	↕										
	Treibhauspotenzial	↕										
	Nicht erneuerbare	↕										
	Anteile r. F. > 95% (Ziegel-DH)	↕										
	Gesamt:						185	-	1,364	-	238,3	164,00 €/m²
3	1.3.F1.DH1-80.P1		195,00 €	0,53		Ziegelmauerwerk: Kalziumsilikat (DH1): Lehmputz (P1): Kleber:	115 80 15 5	0,369 0,059 0,582 0,600	0,312 1,356 0,026 0,008	1786,25 186,77 1567,77 -	205,4 14,9 23,5 -	- 143,00 €/m² 52,00 €/m² -
	Kosten	↕										
	Wärmeschutz	↕										
	Treibhauspotenzial	↕										
	Nicht erneuerbare	↕										
	Anteile r. F. > 95% (Ziegel-DH)	↕										
	Gesamt:						215	-	1,872	-	243,9	195,00 €/m²
4	1.3.F1.DH1-30.DP1-40.P1		163,00 €	0,49		Ziegelmauerwerk: Kalziumsilikat (DH1): Holzfaserdämmung (DP): Lehmputz (P1): Kleber:	115 30 40 15 10	0,369 0,059 0,040 0,582 0,600	0,312 0,508 1,000 0,026 0,017	1786,25 186,77 160,84 1567,77 -	205,4 5,6 6,4 23,5 -	- 73,00 €/m² 38,00 €/m² 52,00 €/m² -
	Kosten	↕										
	Wärmeschutz	↕										
	Treibhauspotenzial	↕										
	Nicht erneuerbare	↕										
	Anteile r. F. > 95% (Ziegel-DH)	↕										
	Anteile r. F. > 95% (DH-DP)	↕										
	Gesamt:						210	-	2,033	-	241,0	163,00 €/m²
5	1.3.F1.DH1-30.DP1-60.P1		167,00 €	0,39		Ziegelmauerwerk: Kalziumsilikat (DH1): Holzfaserdämmung (DP): Lehmputz (P1): Kleber:	115 30 60 15 10	0,369 0,059 0,040 0,582 0,600	0,312 0,508 1,500 0,026 0,017	1786,25 186,77 160,84 1567,77 -	205,4 5,6 9,7 23,5 -	- 73,00 €/m² 42,00 €/m² 52,00 €/m² -
	Kosten	↕										
	Wärmeschutz	↕										
	Treibhauspotenzial	↕										
	Nicht erneuerbare	↕										
	Anteile r. F. > 95% (Ziegel-DH)	↕										
	Anteile r. F. > 95% (DH-DP)	↕										
	Gesamt:						230	-	2,533	-	244,2	167,00 €/m²
6	1.3.F1.DH1-30.DP1-80.P1		172,00 €	0,33		Ziegelmauerwerk: Kalziumsilikat (DH1): Holzfaserdämmung (DP): Lehmputz (P1): Kleber:	115 30 80 15 10	0,369 0,059 0,040 0,582 0,600	0,312 0,508 2,000 0,026 0,017	1786,25 186,77 160,84 1567,77 -	205,4 5,6 12,9 23,5 -	- 73,00 €/m² 47,00 €/m² 52,00 €/m² -
	Kosten	↕										
	Wärmeschutz	↕										
	Treibhauspotenzial	↕										
	Nicht erneuerbare	↕										
	Anteile r. F. > 95% (Ziegel-DH)	↕										
	Anteile r. F. > 95% (DH-DP)	↕										
	Gesamt:						250	-	3,033	-	247,4	172,00 €/m²
7	1.3.F1.DH1-30.DP1-100.P1		173,00 €	0,28		Ziegelmauerwerk: Kalziumsilikat (DH1): Holzfaserdämmung (DP): Lehmputz (P1): Kleber:	115 30 100 15 10	0,369 0,059 0,040 0,582 0,600	0,312 0,508 2,500 0,026 0,017	1786,25 186,77 160,84 1567,77 -	205,4 5,6 16,1 23,5 -	- 73,00 €/m² 48,00 €/m² 52,00 €/m² -
	Kosten	↕										
	Wärmeschutz	↕										
	Treibhauspotenzial	↕										
	Nicht erneuerbare	↕										
	Anteile r. F. > 95% (Ziegel-DH)	↕										
	Anteile r. F. > 95% (DH-DP)	↕										
	Gesamt:						270	-	3,533	-	250,6	173,00 €/m²

*Die Bezeichnung der Varianten erfolgt nach dem Bezeichnungsschema, das in Tabelle 5 in Kapitel 3.3.3 erläutert wird bzw. in Tabelle 8 in Kapitel 3.3.4.

Beispiel 1: Mauerwerkswand mit 30 mm Kalziumsilikatdämmung und 100 mm Holzfaserdämmung: F1_DH1-30_DP1-100_P1.

Beispiel 2: Mauerwerkswand mit 40 mm Mineralschaum und 80 mm Holzfaserdämmung: F1_DH2-40_DP1-80_P1.

Bewertungssystem zur Einordnung der Daten

Kosten

Die Bewertung der Gesamtkosten (Material- und Arbeitskosten) pro Quadratmeter erfolgte auf Basis des empirisch vorliegenden Wertebereichs von 90 bis 248 €/m². Da keine allgemein anerkannten ökonomischen Schwellen für Innenausbau- oder Sanierungskosten existieren, wurde eine Einteilung in fünf Bewertungsstufen anhand der statistischen Verteilung (Quantil) der Daten vorgenommen. Dadurch ergibt sich eine relative Bewertung der Wirtschaftlichkeit der Varianten. Materialien mit besonders niedrigen Kosten erhalten dabei die Bewertung "sehr günstig", während besonders kostenintensive Varianten in Kategorie "sehr teuer" eingeordnet werden.

U-Wert

Die Bewertung der Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Werte) der untersuchten Wandaufbauten erfolgte auf Basis bauphysikalischer Standards und technischer Richtwerte aus der DIN 4108-2 (DIN 4108-2, 2013), dem Gebäudeenergiegesetz (GEG) (GEG, 2025) sowie etablierten energetischen Gebäudestandards (z. B. Passivhaus, Effizienzhaus). Der betrachtete Wertebereich reichte von 0,19 bis 1,06 W/m²·K. Die Einteilung erfolgte in fünf Kategorien, wobei besonders niedrige U-Werte ($\leq 0,24$ W/m²·K) als „sehr gut“, hohe U-Werte ($> 0,75$ W/m²·K) als „sehr schlecht“ eingestuft wurden. Diese

Bewertung ermöglicht eine bauphysikalisch nachvollziehbare Einordnung der Dämmwirkung der jeweiligen Konstruktionen.

Global Warming Potential (GWP)

Für die vergleichende Bewertung der untersuchten Baustoffe hinsichtlich ihres Beitrags zum Klimawandel wurde das Global Warming Potential (GWP) herangezogen. Das GWP gibt die über einen Zeitraum von 100 Jahren wirksame Treibhausgasemission eines Materials in kg CO₂-Äquivalent pro kg Material an (GWP100) und stellt damit eine zentrale Kenngröße in der Ökobilanzierung dar.

Da die GWP-Werte der betrachteten Materialien in einem breiten Spektrum von –12,5 bis +32,7 kg CO₂-eq./kg liegen, wurde zur besseren Vergleichbarkeit und Bewertung ein kategoriespezifisches Punktesystem entwickelt. Dabei wurde bewusst auf eine lineare Einteilung verzichtet, um die ökologisch relevante Unterscheidung zwischen klimafreundlichen und klimaschädlichen Materialien angemessen abzubilden.

Die Einteilung erfolgt in fünf Bewertungsstufen von 5 (sehr gut) bis 1 (sehr schlecht). Die Kategorien basieren auf etablierten Referenzwerten aus Umweltproduktdeklarationen (EPDs), Ökobau.dat und Literaturangaben zu typischen Emissionswerten verschiedener Baustoffgruppen. Insbesondere wurde berücksichtigt, dass negative GWP-Werte auf eine Netto-Speicherung von CO₂ im Material hinweisen und daher besonders positiv zu bewerten sind.

Durch diese Einteilung kann die klimapolitische Relevanz unterschiedlicher Baustoffe transparent und differenziert dargestellt werden. Materialien mit negativer Klimabilanz (z. B. durch CO₂-Bindung während des Wachstums biogener Rohstoffe) werden gegenüber emissionsintensiven Produkten entsprechend hervorgehoben.

Nicht-erneuerbare Primärenergie (PENRT)

Da es im Gegensatz zum Global Warming Potential (GWP) für die nicht erneuerbare Primärenergie (PENRT) keine etablierten ökologischen Schwellenwerte oder normativen Grenzbereiche gibt, wurde eine statistische Einordnung über Quantile vorgenommen. Die PENRT-Werte der betrachteten Materialien lagen im Bereich von 4,4 bis 631,9 MJ/kg. Die Einteilung in fünf Kategorien (von 5 = sehr gut bis 1 = sehr schlecht) erfolgte auf Basis der empirischen Verteilung dieser Werte. Dadurch wird eine relativ gewichtete Bewertung ermöglicht, die die Unterschiede innerhalb der untersuchten Stoffgruppe sachgerecht abbildet.

Relative Feuchte – Anteile über 95%

Die Bewertung des Feuchteverhaltens erfolgte anhand des Anteils der Jahresstunden, in denen in einer definierten Bauteilschicht eine relative Luftfeuchte von über 95 % auftrat. Dieser Wert wird in der Fachliteratur und in technischen Richtlinien (z.B. WTA 6.3, DIN EN 15026) als kritische Schwelle angesehen, bei deren Überschreitung Risiken für Schimmelbildung, Materialabbau oder Korrosion bestehen können.

Der betrachtete Wertebereich reicht von 0 % bis 100 % der Jahresstunden. Für die Bewertung wurde eine fünfstufige Skala verwendet:

■ Kategorie	Anteil > 95 % r. F.	Bewertung
■ 5	< 10 %	Sehr gut
■ 4	> 10 %	Gut
■ 3	> 15 %	Mittel
■ 2	> 20 %	Schlecht
■ 1	> 25 %	Sehr schlecht

Hygrisch aktive Materialien, wie z.B. Lehm oder Kalziumsilikat, können zeitweise hohe Feuchtegehalte tolerieren, sofern eine Rücktrocknung möglich ist. In solchen Fällen stellt eine kurzzeitige Überschreitung der 95 %-Schwelle nicht zwangsläufig ein bautechnisches Problem dar. Dennoch sollte eine dauerhaft hohe Feuchtebelastung vermieden werden, um Langzeitschäden und Funktionsbeeinträchtigungen auszuschließen.

Zudem ist die Lage der kritischen Schicht innerhalb des Bauteils zu berücksichtigen: An der Grenze zwischen Außenwand und hygrisch aktiver Dämmung ist eine temporäre Feuchteerhöhung oft weniger problematisch, da hier noch ein gewisser Puffer zur Außenseite besteht.

An der Grenze zwischen hygrischer Dämmung und Holzfaserdämmung ist eine anhaltende Feuchtebelastung dagegen kritischer zu bewerten, da hier die feuchteempfindlichere Holzfaserdämmung durch das hygrische Material geschützt werden soll. Ein Feuchteübertritt in diese Schicht kann das thermische und hygrische Verhalten der Konstruktion deutlich beeinträchtigen.

Diese differenzierte Betrachtung ermöglicht eine praxisgerechte und materialangemessene Bewertung des hygrischen Verhaltens unterschiedlicher Konstruktionsvarianten.

4.3 Bewertung und Diskussion

Das Forschungsprojekt InMoB hat das Ziel gehabt, praxistaugliche und gleichzeitig bauphysikalisch sowie ökologisch optimierte Innendämmsysteme für den Gebäudebestand zu identifizieren. Durch die systematische Kombination von hygrothermischer Simulation, experimenteller Untersuchung und Lebenszyklusanalyse konnte dieses Ziel in weiten Teilen erreicht werden.

Die umfangreichen Simulationen haben gezeigt, dass insbesondere Kombinationen aus hygrisch aktiven Schichten mit einer hohen Feuchteaufnahmefähigkeit (z.B. 30 mm Kalziumsilikat (DH1) oder Korkdämmlehm (DH4)) mit Holzfaserdämmplatten mit geringer bis mittlerer Schichtdicke hinsichtlich Feuchteverhalten und Wärmeschutz gut funktionieren. Trotz der größeren Schichtstärke von 100 mm bei der Holzfaserdämmung in den Testfassadenprüfständen, konnten die Messungen und Simulationen zeigen, dass auch diese in der Realität funktionieren.

Im wissenschaftlichen Kontext schließen die Ergebnisse eine Lücke zwischen bisherigen Forschungsschwerpunkten zu homogenen, hygrisch aktiven Innendämmungen und der baupraktischen Realität, in der oft wirtschaftlichere und materialeffizientere Kombinationslösungen benötigt werden. Die Erkenntnisse erweitern bestehende Studien zum Feuchteverhalten von Innendämmungen um vergleichende Aussagen zu mehrschichtigen Systemen.

Die Lebenszyklusanalyse bestätigte darüber hinaus die hohe Relevanz der Betriebsenergie (Modul B6) für die ökologische Gesamtbewertung. Dies unterstreicht die Notwendigkeit, Dämmwirkung und Feuchtesicherheit gemeinsam zu betrachten. Mit dem zunehmenden Einsatz erneuerbarer Energien wird die Materialwahl künftig einen noch stärkeren Einfluss auf Umweltkennwerte haben – hier zeigen natürliche Materialien wie Korkdämmlehm und Holzfaser klare Vorteile.

Insgesamt leistet das Projekt einen wertvollen Beitrag zur wissenschaftlichen Diskussion rund um nachhaltiges Bauen im Bestand, insbesondere unter denkmalpflegerischen Rahmenbedingungen. Die entwickelte Methodik und die abgeleiteten Empfehlungen bieten eine Grundlage für weitere Forschungsarbeiten im Bereich hygrothermisch wirksamer Innendämmsysteme.

4.3.1 Bewertung der Arbeitshypothesen

Hypothese 1: Die Kombination aus einer hygrisch aktiven Pufferschicht (z. B. Kalziumsilikat oder Lehm) mit einem konventionellen Dämmstoff (z. B. Holzfaser) führt zu einer verbesserten Dämmfunktion als eine rein hygrisch aktive Dämmung gleicher Dicke.

Diese Hypothese konnte mit der U-Wert-Analyse in *Kapitel 3.3.8* bestätigt werden. Der Vergleich der Dämmvarianten einer einschaligen Mauerwerkswand mit der Materialkombination aus einer 30 mm Kalziumsilikatdämmung und 40 mm Holzfaserdämmung (Dämmstärke gesamt = 70 mm) ergibt einen U-Wert von 0,5 W/m²K. Im Vergleich dazu steht eine Innendämmung aus Kalziumsilikat mit 80 mm Schichtdicke. Diese erreicht einen U-Wert von 0,54 W/m²K (vgl. Tabelle 11). Ein ähnliches Ergebnis erzielten die Materialkombinationen aus Korkdämmlehmplatte und Holzfaserdämmung sowie aus Wärmedämmlehm und Holzfaserdämmung.

Dieser Vergleich zeigt, dass die Innendämmung mit einer Materialkombination bei geringerer Dämmstärke einen besseren U-Wert und damit eine bessere Dämmfunktion ermöglichen kann.

Hypothese 2: Die Einbindung materialtrennender Luftschichten zwischen der hygrisch aktiven Pufferschicht und der zu dämmenden Außenwand verbessert die Trocknungskapazität des Systems und reduziert Feuchterisiken im Vergleich zu homogenen Innendämmsystemen.

Diese Hypothese kann zum Teil bestätigt werden. Wie die Simulationsanalysen des *Kapitels 3.3* gezeigt haben, kann eine materialtrennende Luftschicht zwischen hygrischer Dämmung und Außenwand die Trocknungskapazität des Systems nach innen hin verbessern. Jedoch steigt gleichzeitig die relative Feuchte in der Außenwand und an der Schichtgrenze von Ziegel-Luft deutlich an. Daher ist diese Konstruktion nur bedingt geeignet und bedarf einer ausführlichen Analyse und Planung.

Hypothese 3: Mehrschichtige Innendämmungen mit einer hygrisch aktiven Pufferschicht können bei gleichem U-Wert kostengünstiger realisiert werden als reine hygrisch aktive Dämmstoffe.

Diese Hypothese kann zum Teil bestätigt werden. Der Vergleich der U-Werte einer Schichtkombination mit einer einschichtigen Dämmung in *Tabelle 11* in *Kapitel 3.3.8 U-Wert-Analyse* zeigt, dass es möglich ist, mit einer Schichtkombination einen besseren U-Wert bei geringerer Schichtdicke und geringeren Kosten zu erzielen. Es kommt jedoch stark darauf an, um welches hygrische Dämmmaterial es sich handelt. Die Tabelle in *Abbildung 108* stellt verschiedene Varianten von einschichtiger hygrischer Dämmung (rot) und mehrschichtiger Dämmung mit gleichen bzw. sehr ähnlichen U-Werten gegenüber. Sie enthält alle mehrschichtigen Varianten mit einem gleichen oder ähnlichen U-Wert im Vergleich zu den einschichtigen rein hygrischen Dämmungen ohne Luftschicht.

Die mehrschichtigen Varianten mit einem U-Wert von 0,37 W/m²K sind teurer als die rein hygrische Variante mit iQ-Therm (DH3). Jedoch ist die Differenz bei der Variante mit 50 mm Dämmlehm und 60 mm Holzfaserdämmung sehr gering. Die Variante mit 30 mm Kalziumsilikat und 60 mm Holzfaserdämmung ist ebenfalls geringfügig teurer. Die teuerste Variante mit dem U-Wert von 0,37 W/m²K ist die mit 80 mm Korkdämmlehmplatte und 40 mm Holzfaserdämmung. Auch der nächste Vergleich mit U-Werten von 0,45 und 0,46 W/m²K zeigt, dass die Schichtkombination aus 30 mm Kalziumsilikat und 40 mm Holzfaserdämmung teurer ist, als die einschichtige Varianten aus 80 mm Mineralschaum. Beim letzten Vergleich mit U-Werten von 0,53 bis 0,54 W/m²K ist die Schichtkombination günstiger als die 80 mm Kalziumsilikatdämmung und geringfügig teurer als die Dämmung mit einer 50 mm Schicht iQ-Therm und hat einen leicht besseren U-Wert.

Es kommt demnach stark darauf an, welche Dämmmaterialien ausgewählt werden. Die Kosten spiegeln zudem nur einen Momentanwert eines bestimmten Datums wieder und sind stark Hersteller- und Mengenabhängig. Die Kosten wurden im Internet recherchiert und enthalten die Materialkosten und die Arbeitskosten pro Quadratmeter.

Abbildung 108: Vergleich mehrschichtiger Innendämmung (schwarze Varianten) mit einschichtiger hygrischer Innendämmung (rote Varianten) mit gleichem U-Wert*

Variante	Kosten [€/m ²]	Schicht dicke [cm]	U-Wert [W/m ² K]	Mindest-U-Werte [W/(m ² K)]			
				0,73	0,65	0,45	0,24
1.3_F1_L_DH4-80_DP1-40_P1	198,00 €	15,0	0,37	ok	ok	ok	x
1.3_F1_L_DH1-30_DP1-60_P1	172,00 €	12,0	0,37	ok	ok	ok	x
1.3_F1_DH5-50_DP1-60_P1	174,00 €	11,0	0,37	ok	ok	ok	x
1.3_F1_DH3-80_P1	169,00 €	8,0	0,37	ok	ok	ok	x
1.3_F1_DH2-80_P1	141,00 €	8,0	0,45	ok	ok	ok	x
1.3_F1_L_DH1-30_DP1-40_P1	168,00 €	10,0	0,46	ok	ok	x	x
1.3_F1_DH5-50_DP1-40_P1	170,00 €	9,0	0,46	ok	ok	x	x
1.3_F1_DH4-50_DP1-40_P1	169,00 €	9,0	0,46	ok	ok	x	x
1.3_F1_DH4-30_DP1-40_P1	148,00 €	7,0	0,53	ok	ok	x	x
1.3_F1_DH1-80_P1	195,00 €	8,0	0,54	ok	ok	x	x
1.3_F1_DH3-50_P1	144,00 €	5,0	0,54	ok	ok	x	x

*Die Bezeichnung der Varianten erfolgt nach dem Bezeichnungsschema, das in Tabelle 5 in Kapitel 3.3.3 erläutert wird bzw. in Tabelle 8 in Kapitel 3.3.4.

Beispiel 1: Mauerwerkswand mit 30 mm Kalziumsilikatdämmung und 100 mm Holzfaserdämmung: F1_DH1-30_DP1-100_P1.

Beispiel 2: Mauerwerkswand mit 40 mm Mineralschaum und 80 mm Holzfaserdämmung: F1_DH2-40_DP1-80_P1.

Hypothese 4: Innendämmsysteme mit hygrisch aktiven Pufferschichten und materialtrennenden Luftvolumen reduzieren die relative Luftfeuchtigkeit in der passiven Dämmschicht und minimieren dadurch das Risiko von Feuchteschäden.

Diese Hypothese lässt sich bestätigen. Die Analysen aus dem Kapitel 3.3.4 Schichtkombinationen hat gezeigt, dass die relative Feuchte in den Schichtgrenzen DH-DP, DP-Lehmputz und Lehmputz_innen deutlich niedriger ist, als bei den Varianten ohne Luftschicht. Allerdings erhöht die Luftschicht die Feuchtebelastung in der Außenwand, wodurch bei dieser Variante im Detail geprüft werden muss, ob sie Schäden an der Außenwand bedingen könnte.

Hypothese 5: In nicht schlagregendichten Fassaden, wie Fachwerkkonstruktionen, verbessert die Integration einer hygrisch aktiven Pufferschicht die Feuchteverteilung und trägt zur langfristigen Bauwerkserhaltung bei.

Diese Hypothese lässt sich bestätigen. Die Analysen aus den Kapiteln 3.3 Materialanalyse (Simulation 1) und 3.4.1 Hygrothermische Simulation der Testfassaden (Simulation 2) haben gezeigt, dass eine Innendämmung aus hygriischem Material große Mengen an Feuchtigkeit aufnehmen, speichern und wieder abgeben kann. Dabei sind sie zum Teil selbst bei hoher relativer Feuchte über 95% noch funktionsfähig ohne Schaden zu nehmen. Diese Eigenschaften wirken insbesondere bei feuchtebelasteten Konstruktionen regulierend und tragen zur Reduktion von Schadensrisiken bei.

Auch die hygrothermischen Simulationen und Messungen der Testfassaden unter realitätsnahen Klimabedingungen macht deutlich, dass durch die hygrothermischen Pufferschichten Feuchtebelastungen effizient abgeführt werden können. Dies bestätigt die Funktion solcher Schichten als Pufferzonen, die Feuchtespitzen temporär aufnehmen und in feuchteärmeren Phasen wieder abgeben.

4.3.2 Wissenschaftliche Anschlussfähigkeit

Aufbauend auf den im Projekt InMoB gewonnenen Erkenntnissen eröffnen sich mehrere Ansatzpunkte für vertiefende Forschung. So könnten in einem nächsten Schritt ausgewählte, vielversprechende Materialkombinationen detaillierter untersucht werden – etwa durch feinere Variation der Schichtdicken, weiterführende hygrothermische Analysen oder Langzeitmonitoring über mehrere Jahre. Während sich

die Kombination mit Holzfaserdämmplatten in dieser Untersuchung als besonders effizient erwiesen hat, wäre es zudem sinnvoll, alternative Materialien, beispielsweise Hanf, Zellulose oder Schilf, in vergleichbaren Schichtaufbauten zu untersuchen, um weitere praxistaugliche Alternativen zu identifizieren.

Auch das realisierte Praxisbeispiel im denkmalgeschützten Gebäude der UdK Berlin bietet Potenzial für eine langfristige Beobachtung im Rahmen eines erweiterten Monitoringprogramms. Die dort gewonnenen Daten könnten dazu beitragen, die Prognosequalität der Simulationen weiter zu verbessern und die Robustheit der Konstruktionen unter unterschiedlichen Nutzungsbedingungen zu verifizieren.

Schließlich eröffnet sich mit Blick auf die Umsetzung im Bestand ein weiterer Forschungsbedarf im Bereich der Wirtschaftlichkeitsbewertung. Eine vergleichende Untersuchung der Investitions- und Betriebskosten an verschiedenen Gebäudetypen und Nutzungsszenarien, insbesondere im Kontext von Förderinstrumenten oder CO₂-Bepreisung, könnte wichtige Impulse für die praktische Umsetzung und politische Entscheidungsfindung liefern.

5 Fazit

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung konnte gezeigt werden, dass die Wirksamkeit kapillaraktiver Innendämmsysteme in Schichtverbünden grundsätzlich bestätigt werden kann. Eine pauschale Aussage darüber, welches Materialsystem für ein bestimmtes Gebäude am besten geeignet ist, ist jedoch nicht möglich. Vielmehr bedarf es einer objektspezifischen Betrachtung, bei der sowohl die bauphysikalischen als auch die konstruktiven Rahmenbedingungen berücksichtigt werden müssen. Die Auswahl geeigneter Dämmstoffe sowie deren optimale Schichtdicke muss in jedem Einzelfall individuell erfolgen.

Zwar lassen sich die eingesetzten Materialien auf Grundlage ihrer spezifischen Eigenschaften bewerten, jedoch variiert die Reihenfolge einer solchen Bewertung erheblich in Abhängigkeit von den gesetzten Prioritäten. Steht beispielsweise die Fähigkeit zur Feuchteregulierung im Vordergrund, unabhängig von ökologischen oder wirtschaftlichen Aspekten, so ist Kalziumsilikat klar im Vorteil. Wird hingegen eine möglichst ökologische und kostengünstige Lösung angestrebt, schneidet die Korkdämmlehmplatte besonders gut ab. Für Anwendungen mit Fokus auf eine hohe Dämmwirkung erweist sich iQ-Therm als besonders leistungsfähig. Eine ausgewogene Lösung, die in allen bewerteten Kategorien gute Ergebnisse erzielt, stellt die Mineralschaumplatte dar.

Die Analyse an drei exemplarischen Fassadentypen hat gezeigt, dass eine Kombination der untersuchten Materialien in verschiedenen Konfigurationen grundsätzlich funktionsfähig ist. Besonders bei der Verwendung von Holzfaserdämmstoffen haben sich geringere Schichtdicken in Bezug auf Feuchtesicherheit als vorteilhaft erwiesen. Im Gegensatz dazu zeigte die Variation der Schichtdicke bei feuchteregulierenden Dämmstoffen nur geringe Auswirkungen auf das hygrothermische Verhalten. Hier kann unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten eine geringere Dicke bevorzugt werden. Die Integration einer materialtrennenden Luftschicht kann in bestimmten Fällen zusätzliche Vorteile bringen, ist jedoch stark abhängig von der vorhandenen Bausubstanz und den spezifischen Anforderungen des jeweiligen Objekts.

Insgesamt zeigt sich ein großes Potenzial für den weiteren Einsatz kombinierter Innendämmsysteme. Um deren Anwendung in der baupraktischen Umsetzung zu fördern, sind jedoch weiterführende Untersuchungen erforderlich, insbesondere zur Standardisierung, Langzeitbeständigkeit und Verarbeitungssicherheit unter realen Bedingungen.

6 Mitwirkende

Autorinnen und Autoren

Helena Burchard, M.Sc. (Universität der Künste Berlin, Institut für Architektur und Städtebau Fachgebiet VPT)

Dipl.-Ing. Werner Kaul-Gothe (Universität der Künste Berlin, Institut für Architektur und Städtebau Fachgebiet VPT)

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christoph Nytsch-Geusen (Universität der Künste Berlin, Institut für Architektur und Städtebau Fachgebiet VPT)

Tassilo Riemer, B.A. (Universität der Künste Berlin, Institut für Architektur und Städtebau Fachgebiet VPT)

Fachliche Betreuung

Brüggemann Kisseler Ingenieure i. A. des Bundesministeriums für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)

im Bundesamt für Bauwesen und Raumforschung (BBR)

Michael Brüggemann

7 Kurzbiographien



Univ. Prof. Dr.-Ing. Christoph Nytsch-Geusen

Leitet seit 2007 das Fachgebiet Versorgungsplanung und Versorgungstechnik an der Universität der Künste Berlin am Institut für Architektur und Städtebau. Er forscht im Bereich Bauteil-, Raumklima- und Gebäude-Energiemonitoring und entwickelt interaktive Simulation- und Planungsmethoden für klimaresiliente Gebäudeenergiesysteme und Stadtquartiere.



Dipl.-Ing. Architekt Werner Kaul-Gothe

Ist seit 2013 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Versorgungsplanung und Versorgungstechnik an der Universität der Künste Berlin am Institut für Architektur und Städtebau. Er hat Architektur studiert und sich langjährig mit Fragen der energetischen Gebäudesanierung und des Raumklima- und Bauteil-Monitorings beschäftigt.



Helena Burchard, M.Sc.

Ist seit 2023 wissenschaftliche Mitarbeiterin für das Projekt InMoB am Fachgebiet Versorgungsplanung und Versorgungstechnik an der Universität der Künste Berlin am Institut für Architektur und Städtebau. Sie hat Facility Management und Planung nachhaltiger Gebäude studiert und als Projektingenieurin und Projektplanerin gearbeitet.



Tassilo Riemer, B.A.

Hat seinen Bachelor in Architektur an der TUM in München gemacht. Zurzeit studiert er Historische Bauforschung und Denkmalpflege im Master an der TU Berlin. Seit 2023 unterstützt er das Projekt InMoB als studentischer Mitarbeiter.

8 Literaturverzeichnis

- Anon., 2025. *energie-experten.org*. [Online]
Available at: <https://www.energie-experten.org/bauen-und-sanieren/daemmung/innendaemmung/innenwanddaemmung#:~:text=Zur%20Vorbeugung%20von%20Feuchte%2D%20und%20Schimmelsch%C3%A4den%20sind,sowie%20eine%20sorgf%C3%A4ltige%20Planung%20und%20Ausf%C3%BChrung%20entscheidend.>
[Zugriff am 2025].
- Anon., 2025. *World Weather*. [Online]
Available at: <https://world-weather.info/archive/germany/berlin/#t2>
[Zugriff am 03 04 2025].
- Backhaus, K., Erichson, B., Plinke, W. & Weiber, R., 2016. *Multivariate Analysemethoden*. Wiesbaden: Springer Gabler.
- bauklimatik-dresden.de, 2025. *bauklimatik-dresden.de*. [Online]
Available at: <https://bauklimatik-dresden.de/>
[Zugriff am 04 03 2025].
- BMWK, B. f. W. u. K., 2023. *Richtlinie für die Bundesförderung für effiziente Gebäude – Einzelmaßnahmen (BEG EM)*, s.l.: Bundesanzeiger Verlag.
- Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR), Climate & Environment Consulting Potsdam GmbH, Deutscher Wetterdienst (DWD), 2014. *Handbuch: Testreferenzjahre von Deutschland für mittlere, extreme und zukünftige Witterungsverhältnisse*, Offenbach: s.n.
- Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR), 2025. *bauteileditor.de*. [Online]
Available at: <https://www.bauteileditor.de/>
[Zugriff am 04 2025].
- dena, 2023. *DENA GEBÄUDEREPORT 2024. Zahlen, Daten, Fakten zum Klimaschutz im Gebäudebestand*, s.l.: Deutsche EnergieAgentur (Hrsg.).
- DIN 4108-2, 2., 2013. *DIN 4108-2:2013-02: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz*, Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN 4108-3, 2., 2023. *DIN 4108-3:2023-04, Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz – Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung*, Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN EN 15026, 2., 2023. *DIN EN 15026:2023-12: Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen - Bewertung der Feuchteübertragung durch numerische Simulation*, Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN EN 15804, 2., 2022. *DIN EN 15804:2022-03: Nachhaltigkeit von Bauwerken - Umweltproduktdeklarationen - Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte*, Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- Figl, H. et al., 2017. *Zukunft Bauen, Forschung für die Baupraxis: Ökobaudat - Grundlage für die Gebäudeökobilanzierung*, s.l.: Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR).
- FNR, 2021. *FNR - Fachagentur Nachwachsender Rohstoffe*. [Online]
Available at: https://news.fnr.de/fnr-pressemitteilung/marktanteil-von-nawaro-daemmstoffen-waechst?utm_source=chatgpt.com
[Zugriff am 28 04 2025].

- GEG, 2025. *gesetze-im-internet (Gesetz zur Einsparung von Energie und zur Nutzung erneuerbarer Energien zur Wärme- und Kälteerzeugung in Gebäuden)*. [Online]
Available at: <https://www.gesetze-im-internet.de/geg/>
- Geist, J. F. & Kürvers, K., 1984. *Das Berliner Mietshaus 1862-1945*. München: Prestel-Verlag .
- Häupl, P., Plagge, R. & Scheffler, G., 2007. Hygrische Materialmodellierung und ihre Abhängigkeit vom Prozess und der Prozessdynamik. *Bauphysik*, Juli, pp. 29(3): 164-177.
- IBU, 2020. *Umweltproduktdeklaration: Holzfaserdämmplatten aus Trockenverfahren, SETEICO SE*, Berlin: Institut für Bauen und Umwelt e. V. (IBU).
- IBU, 2022. *Umweltproduktdeklaration: PU-Dämmplatten aus Blockschaum, IVPU Industrieverband Polyurethan-Hartschaum e.V.*, Berlin: Institut für Bauen und Umwelt e. V. (IBU).
- IBU, 2024. *Umweltproduktdeklaration: Mikroporöse Calciumsilikat-Wärmedämmstoffe CALSITHERM Silikatbaustoffe GmbH*, Berlin: Institut für Bauen und Umwelt e. V. (IBU).
- Kaiser, C. et al., 2020. Naturbaustoffe. *Marktübersicht - Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen*, pp. 48-49.
- Kautsch, P. et al., 2005. *Zellulose-Innendämmung ohne Dampfsperre*, Graz: Berichte aus Energie- und Umweltforschung 84/2006.
- Kehl, D., 2017. WTA-Merkblatt 6-8: Feuchtetechnische Bewertung von Holzbauteilen - Vereinfachte Nachweise und Simulation. *Bausubstanz*, pp. 50-51.
- Krus, M., Sedlbauer, K. P. & Künzel, H., 2005. *Innendämmung aus Bauphysikalischer Sicht*. Münster: s.n.
- Künzel, H., Binder, A. & Zirkelbach, D., 2013. Feuchtetechnische Auslegung - Beurteilung von Innendämmsystemen. *Leitfaden Innendämmung (ID)*, pp. 10-13.
- Lemke, M., 2024. *Umweltproduktdeklaration: Egginger Naturbaustoffe Lehmputzmörtel nach DIN 18947*, Weimar: Dachverband Lehm e. V. .
- Nackler, J., Pascha, K. S., Fadaei, A. & Winter, W., 2015. *Whole House In-Situ Carbon & Emission Reduction Solution*, s.l.: Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie Wien.
- Plagge, R., Funk, M., Scheffler, G. & Grunewald, J., 2006. Experimentelle Bestimmung der hygrischen Sorptionsisotherme und des Feuchtetransportes unter instationären Bedingungen. *Bauphysik*, April, pp. 28(2):81-87.
- Rönsch, S., 2011. *Modell einer energetischen Sanierung von Gründerzeit-Mietshäusern in Berlin im 21. Jahrhundert*, Berlin: s.n.
- Ruisinger, U., Kautsch, P. & Plagge, R., 2011. *Balkenköpfe und Innendämmung*. Hanseatische Sanierungstage vom 3. bis 5. November 2011 im Ostseebad Heringsdorf/Usedom: Beuth Verlag.
- Sensirion, kein Datum *SENSIRION*. [Online]
Available at: <https://sensirion.com/de/produkte/katalog/SHT75>
[Zugriff am 28.04.2025].
- Thamling, N. et al., 2022. *Hintergrundpapier zur Gebäudestrategie Klimaneutralität 2045*, Berlin, Basel, München, Freiburg, Heidelberg, Dresden: s.n.
- WTA, 2014. *WTA Merkblatt 6-2: Simulation wärme- und feuchtetechnischer Prozesse*, s.l.: WTA, Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V. .
- www.dwd.de, 2025. *Deutscher Wetterdienst*. [Online]
Available at: https://www.dwd.de/DE/Home/home_node.html
[Zugriff am 03.04.2025].

www.equa.se, kein Datum *EQUA Solution AG*. [Online]

Available at: <https://www.equa.se/de/>

[Zugriff am 04 2025].

www.wta-international.org, kein Datum *www.wta-international.org/de/referate/bauphysik/*. [Online]

Available at: <https://www.wta-international.org/de/referate/bauphysik/>

[Zugriff am 2025].

9 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Forschungsidee Projekt InMoB	9
Abbildung 2: Vergleich der Kosten (links) und der Wärmeleitfähigkeit (rechts) von Kalziumsilikat und Holzfaserdämmplatten	10
Abbildung 3: Untersuchungsmethodik des Projektes InMoB	13
Abbildung 4: Kartenausschnitt des Rooftop-Experimentalgebäudes von Oben. Links Testfassade West, rechts Testfassade Ost	16
Abbildung 5: Fassade 1 links, Fassade 2 rechts	17
Abbildung 6: Messlanze für Temperatur- und Feuchtemessung (links), Detailzeichnung der Messlanze im Wandquerschnitt (rechts)	18
Abbildung 7: Temperaturprofile (links) und Feuchteprofile (rechts) in der Testfassade West ohne Luftschicht (Messzeitraum: 16.03.2021 bis 23.03.2021)	19
Abbildung 8: Temperaturprofile (links) und Feuchteprofile (rechts) in der Testfassade Ost mit Luftschicht zwischen Ziegel und Kalziumsilikatdämmschicht (Messzeitraum: 16.03.2021 bis 23.03.2021)	19
Abbildung 9: Übersicht der Simulationsvarianten	20
Abbildung 10: Windrose Berlin (Anon., 2025)	22
Abbildung 11: Innenraumbedingungen nach DIN EN 15026 und WTA 6-2, Darstellung aus DELPHIN	23
Abbildung 12: Wandaufbau der beiden Testfassaden im Simulationsprogramm DELPHIN inklusive der Sensorpositionen	24
Abbildung 13: Jahresverlauf der relativen Feuchten und Temperaturen der Bestandsfassaden	25
Abbildung 14: Sorptionsisotherme der untersuchten Materialien	31
Abbildung 15: Jährliche Veränderung des Feuchtegehaltsintegrals der Basisvarianten: F1 ohne Luftschicht (oben links), F1 mit Luftschicht (oben rechts), F2 ohne Luftschicht (unten links), F2 mit Luftschicht (unten rechts)	33
Abbildung 16: Heatmap Feuchtegehaltsintegral der gesamten Konstruktion der Basisvarianten	34
Abbildung 17: Heatmap Feuchtegehaltsintegral der Schicht DH der Basisvarianten	35
Abbildung 18: Heatmap Feuchtegehaltsintegral der Schicht DP der Basisvarianten	36
Abbildung 19: Heatmap relative Feuchte der Schichtgrenze Ziegel-DH der Basisvarianten	37
Abbildung 20: Heatmap relative Feuchte der Schichtgrenze DH-DP der Basisvarianten	38
Abbildung 21: Heatmap relative Feuchte der Schichtgrenze DP-Lehmputz der Basisvarianten	39
Abbildung 22: Heatmap relativen Feuchten der Varianten 1.3_F1_DH1-30_DP1-100_P1 und 1.3_F1_L_DH1-30_DP1-100_P1	40
Abbildung 23: Heatmap relativen Feuchten der Varianten 1.3_F1_DH3-30_DP1-100_P1 und 1.3_F1_L_DH3-30_DP1-100_P1	41
Abbildung 24: Heatmap relativen Feuchten der Varianten 1.3_F1_DH4-30_DP1-100_P1 und 1.3_F1_L_DH4-30_DP1-100_P1	41

Abbildung 25: Feuchtegehaltsintegral der gesamten Konstruktion aller Schichtkombinationen der DH1-Varianten	45
Abbildung 26: Feuchtegehaltsintegral der gesamten Konstruktion für die untersuchten Materialien DH2 (links oben), DH3 (rechts oben), DH4 (links unten) und DH5 (rechts unten)	45
Abbildung 27: Heatmap Feuchtegehaltsintegral der gesamten Konstruktion der Schichtkombinationen für Kalziumsilikat (DH1)	46
Abbildung 28: Heatmap Feuchtegehaltsintegral der Schicht DH der Schichtkombinationen für Kalziumsilikat (DH1)	47
Abbildung 29: Heatmap Feuchtegehaltsintegral der Schicht DP in der Schichtkombination mit Kalziumsilikat (DH1)	48
Abbildung 30: Heatmap relative Feuchte der Schichtgrenze Ziegel-DH der Schichtkombinationen für Kalziumsilikat (DH1)	49
Abbildung 31: Heatmap relative Feuchte der Schichtgrenze Ziegel-DH der Schichtkombinationen für Mineralschaum (DH2) (links oben), iQ-Therm (DH3) (rechts oben), Korkdämmlehmplatte (DH4) (links unten), und Wärmedämmlehm (DH5) (rechts unten)	49
Abbildung 32: Heatmap relative Feuchte in der Schichtgrenze Ziegel-DH (oben) und Ziegel-DP (unten) der einschichtigen Dämmung	50
Abbildung 33: Heatmap relative Feuchte der Schichtgrenze DH-DP der Schichtkombinationen für Kalziumsilikat (DH1)	51
Abbildung 34: Heatmap relative Feuchte der Schichtgrenze DH-DP der Schichtkombinationen für DH2 (links oben), DH3 (rechts oben), DH4 (links unten), und DH5 (rechts unten)	52
Abbildung 35: Vergleich der relativen Feuchte (Oben: einschichtige Dämmung aus Kalziumsilikat (DH1), Mitte: einschichtige Dämmung aus Holzfaserdämmung (DP), Unten: Schichtkombination aus Kalziumsilikat und Holzfaserdämmung ohne Luftschicht)	53
Abbildung 36: Vergleich der relativen Feuchte (Oben: einschichtige Dämmung aus Kalziumsilikat, Mitte: einschichtige Dämmung aus Holzfaserdämmung, Unten: Schichtkombination aus Kalziumsilikat und Holzfaserdämmung mit Luftschicht)	53
Abbildung 37: Abbildung der Wandkonstruktion aus DELPHIN (links) Feuchtegehalt in kg/kg des kritischen Bereichs in der Fachwerkwand (rechts)	56
Abbildung 38: Grenzkurve der relativen Porenluftfeuchte und Temperatur eines 10 mm x 10 mm Bereichs im kritischen Bereich des Holzbalkens für verschiedene Varianten mit Kalziumsilikat-Dämmung	57
Abbildung 39: Grenzkurve der relativen Porenluftfeuchte und Temperatur eines 10 mm x 10 mm Bereichs im kritischen Bereich des Holzbalkens für verschiedene Varianten mit iQ-Therm-Dämmung	58
Abbildung 40: Grenzkurve der relativen Porenluftfeuchte und Temperatur eines 10 mm x 10 mm Bereichs im kritischen Bereich des Holzbalkens für verschiedene Varianten mit Korkdämmlehm-Dämmung	58
Abbildung 41: Temperatur (oben) und relative Feuchte (unten) für den Bauteilanschluss einer Decke in der Mauerwerkwand (F1) an einem ausgewählten Tag am Ende des Winters, links: ungedämmt, Mitte: gedämmt, rechts: gedämmt mit Luftschicht	60
Abbildung 42: Temperatur (oben) und relative Feuchte (unten) für den Bauteilanschluss einer Decke in der Bestandswand (F3) an einem ausgewählten Tag am Ende des Winters, links: ungedämmt, rechts: gedämmt	61
Abbildung 43: Jahrestemperaturen des TRY2011 von Potsdam	63

Abbildung 44: Relative Feuchte im TRY2011 in Potsdam	64
Abbildung 45: Temperaturgradienten der Kalziumsilikat-Variante an ausgewählten Tagen im Sommer (links) und im Winter (rechts)	65
Abbildung 46: Feuchtegradienten der Kalziumsilikatvariante an ausgewählten Tagen im Sommer (links) und im Winter (rechts)	66
Abbildung 47: Temperaturgradienten der iQ-Therm-Variante oben und der Korkdämmlehm-Variante unten	68
Abbildung 48: Feuchtegradienten der iQ-Therm-Variante oben und der Korkdämmlehm-Variante unten	70
Abbildung 49: Temperaturgradienten der drei ausgewählten Varianten mit Luftschicht	71
Abbildung 50: Feuchtegradienten der ausgewählten Varianten mit Luftschicht	72
Abbildung 51: Darstellung verschiedener Plattengrößen; links: Korkdämmlehm, mittig: iQ-Therm, rechts: Kalziumsilikat	73
Abbildung 52: Material- und Arbeitskosten nach Höhe sortiert (Stand: Oktober 2023)	74
Abbildung 53: Lufttemperatur $t_{\text{Außen}}$, $t_{\text{Seminarraum}}$ und t_{Labor} im Jahr 2022	79
Abbildung 54: Relative Feuchte $rh_{\text{Außen}}$, $rh_{\text{Seminarraum}}$, rh_{Labor} im Jahr 2022	79
Abbildung 55: Beispiel Anwendung des Regressionsmodells zur Interpolation fehlender Daten (links: gemessene relative Außenluftfeuchte mit Datenlücken, rechts ergänzte relative Außenluftfeuchte über Regressionsmodell)	80
Abbildung 56: Fassadenaufbau der Ost-Seite (links) und West-Seite (rechts) in DELPHIN mit Position und Bezeichnung der Messpunkte	82
Abbildung 57: Simulationsergebnisse des Temperaturverlaufs der Westfassade im Jahr 2022 (Vorlaufforschung)	82
Abbildung 58: Simulationsergebnisse der relativen Feuchte der Westfassade im Jahr 2022 (Vorlaufforschung)	83
Abbildung 59: Simulationsergebnisse des Temperaturverlaufs der Ostfassade im Jahr 2022 (Vorlaufforschung)	83
Abbildung 60: Simulationsergebnisse der relativen Feuchte der Ostfassade im Jahr 2022 (Vorlaufforschung)	84
Abbildung 61: Simulationsmodelle der neuen Testfassaden, oben: Variante mit Korkdämmlehmplatte ohne Luftschicht (links) und mit Luftschicht (rechts); unten: Variante mit iQ-Therm ohne Luftschicht (links) und mit Luftschicht (rechts)	86
Abbildung 62: Simulationsergebnisse der Temperatur- und Feuchteverläufe der Westfassade ohne Luftschicht (links) und mit Luftschicht (rechts)	88
Abbildung 63: Simulationsergebnisse der Temperatur- und Feuchteverläufe der Ostfassade ohne Luftschicht (links) und mit Luftschicht (rechts)	89
Abbildung 64: Simulationsergebnisse der Feuchteverläufe der West- und Ostfassade ohne Luftschicht (links) und mit Luftschicht (rechts) im Vergleich	90
Abbildung 65: Abriss der alten Testfassaden (links), Fachwerkfassade nach dem Entfernen der alten Dämmschicht (Mitte), Ziegelfassade in der Mitte getrennt mit Abstandshaltern für die Luftschicht links und der Kork-Lehm-Plattendämmung rechts	91

Abbildung 66: Ansicht und Schnitt Testfassade Ziegelmauerwerk (F1) mit Trennschicht und Sensorposition	92
Abbildung 67: Ansicht und Schnitt Testfassade Fachwerk (F2) mit Trennschicht und Sensorposition in rot	92
Abbildung 68: Bau der Sensorlanzen für die Feuchte- und Temperaturmessung in den Testfassaden	93
Abbildung 69: Platine zur Messwerterfassung im 3D-gedruckten Gehäuse	94
Abbildung 70: Datenbereinigung mit der z-Score Methode am Beispiel der Temperaturmessung im Jahr 2022: das obere Diagramm zeigt die Daten mit Ausreißern, das untere Diagramm zeigt die bereinigten Daten	96
Abbildung 71: Datenbereinigung mit der z-Score Methode am Beispiel der Feuchtemessung im Jahr 2024: das obere Diagramm zeigt die Daten mit Ausreißern, das untere Diagramm zeigt die bereinigten Daten	97
Abbildung 72: Modellvergleich Testfassade Ost – Temperatur im Wochendurchschnitt in der Messperiode 2022	99
Abbildung 73: Modellvergleich Testfassade Ost – Relative Feuchte im Wochendurchschnitt in der Messperiode 2022	100
Abbildung 74: Modellvergleich Testfassade West – Temperatur im Wochendurchschnitt in der Messperiode 2022	100
Abbildung 75: Modellvergleich Testfassade West – Relative Feuchte im Wochendurchschnitt in der Messperiode 2022	101
Abbildung 76: Modellvergleich Testfassade Ost ohne Luftschicht – Temperatur im Wochendurchschnitt in der Messperiode 2024	102
Abbildung 77: Modellvergleich Testfassade Ost mit Luftschicht – Temperatur im Wochendurchschnitt in der Messperiode 2024	102
Abbildung 78: Modellvergleich Testfassade Ost ohne Luftschicht – Relative Feuchte im Wochendurchschnitt in der Messperiode 2024	103
Abbildung 79: Modellvergleich Testfassade Ost mit Luftschicht – Relative Feuchte im Wochendurchschnitt in der Messperiode 2024	104
Abbildung 80: Modellvergleich Testfassade West ohne Luftschicht – Temperatur im Wochendurchschnitt in der Messperiode 2024	105
Abbildung 81: Modellvergleich Testfassade West mit Luftschicht – Temperatur im Wochendurchschnitt in der Messperiode 2024	105
Abbildung 82: Modellvergleich Testfassade Ost ohne Luftschicht – Relative Feuchte im Wochendurchschnitt in der Messperiode 2024	106
Abbildung 83: Modellvergleich Testfassade Ost mit Luftschicht – Relative Feuchte im Wochendurchschnitt in der Messperiode 2024	106
Abbildung 84: Vergleich der relativen Feuchte in den Schichtgrenzen mit verschiedenen Wetterdatensätzen am Beispiel der Basisvariante mit Kalziumsilikatdämmung als hygrische Dämmung (oben: Testreferenzjahr, Mitte: 2022, unten: 2024)	108
Abbildung 85: Simulationsmodelle der Testfassaden eines denkmalgeschützten Gebäudes der UdK Berlin	109

Abbildung 86: Feuchtegehaltsintegral Variantenvergleich der Testfassaden eines denkmalgeschützten Gebäudes der UdK Berlin	111
Abbildung 87: Feuchtegehaltsintegral der einzelnen Schichten im Variantenvergleich der Testfassaden eines denkmalgeschützten Gebäudes der UdK Berlin	112
Abbildung 88: Feuchtegehaltsintegral mit und ohne Luftschicht im Variantenvergleich der Testfassaden eines denkmalgeschützten Gebäudes der UdK Berlin	113
Abbildung 89: Heatmap des Feuchtegehaltsintegral der Bauteilschichten im Variantenvergleich der Testfassaden eines denkmalgeschützten Gebäudes der UdK Berlin	114
Abbildung 90: Heatmap der relativen Feuchte der Bauteilschichten im Variantenvergleich der Testfassaden eines denkmalgeschützten Gebäudes der UdK Berlin	115
Abbildung 91: Ursprüngliche Planung für die Innendämmung eines ausgewählten Raumes eines denkmalgeschützten Gebäudes der UdK Berlin.	117
Abbildung 92: Ansicht und Schnitt der Testfassaden für den Einbau in ein denkmalgeschütztes Gebäude der UdK Berlin	118
Abbildung 93: Dokumentation des Einbaus der Innendämmung und der Sensorik in einem denkmalgeschützten Gebäude der UdK Berlin	119
Abbildung 94: Temperaturmessung in den einzelnen Schichtgrenzen (03.07. bis 25.08.2025): Ziegel-DH (links oben), DH-DP (rechts oben), DP-Putz (links unten), Putz innen (rechts unten). R30C_TF1 = Variante mit Korkdämmlehmplatte, R30C_TF2 = Variante mit iQ-Therm, R30C_TF3 = Variante mit Kalziumsilikat	120
Abbildung 95: Feuchtemessung in den einzelnen Schichtgrenzen (03.07. bis 25.08.2025): Ziegel-DH (links oben), DH-DP (rechts oben), DP-Putz (links unten), Putz innen (rechts unten)	121
Abbildung 96: Grundriss und Fassadenansicht des Standardraums	122
Abbildung 97: Aufbau der Außenfassaden des Standardraums	122
Abbildung 98: IDA ICE Raum-Modell des Standardraums und Annahmen zu den Wärmebrücken der Bauteilanschlüsse	123
Abbildung 99: Annahmen zur Anwesenheit von zwei Personen im Standardraum	125
Abbildung 100: Jährlicher Nutzenergiebedarf für den Standardraum für die untersuchten Varianten	126
Abbildung 101: Jahresdauerlinie der Innenoberflächentemperaturen der Außenfassade der untersuchten Varianten mit außenliegendem Sonnenschutz	127
Abbildung 102: Jahresverlauf der operativen Temperatur für den Standardraum mit Bestandsfassade und dem Innendämmverbundsystems DH1.30 DP-100 mit außenliegenden Sonnenschutz	128
Abbildung 103: Jahresverlauf des Prozentsatzes Unzufriedener nach Fanger für den Standardraum mit Bestandsfassade und dem Innendämmverbundsystems DH1.30 DP-100 mit außenliegenden Sonnenschutz	129
Abbildung 104: Globales Erwärmungspotenzial (GWP) der untersuchten Materialien	132
Abbildung 105: Total nicht-erneuerbare Primärenergie (PENRT) der untersuchten Materialien	133
Abbildung 106: Global Warming Potential der Lebenszyklusanalyse	136
Abbildung 107: Total nicht-erneuerbare Primärenergie (PENRT)	137

Abbildung 108: Vergleich mehrschichtiger Innendämmung (schwarze Varianten) mit einschichtiger hygrischer Innendämmung (rote Varianten) mit gleichem U-Wert*	146
Abbildung 109: Heatmap Feuchtegehaltsintegral der gesamten Konstruktion der Schichtkombinationen für Mineralschaum (DH2)	161
Abbildung 110: Heatmap Feuchtegehaltsintegral der gesamten Konstruktion der Schichtkombinationen für iQ-Therm (DH3)	162
Abbildung 111: Heatmap Feuchtegehaltsintegral der gesamten Konstruktion der Schichtkombinationen für Korkdämmlehm (DH4)	162
Abbildung 112: Heatmap Feuchtegehaltsintegral der gesamten Konstruktion der Schichtkombinationen für Wärmedämmlehm (DH5)	163
Abbildung 113: Heatmap Feuchtegehaltsintegral der Schicht DH der Schichtkombinationen für Mineralschaum (DH2)	163
Abbildung 114: Heatmap Feuchtegehaltsintegral der Schicht DH der Schichtkombinationen für iQ-Therm (DH3)	164
Abbildung 115: Heatmap Feuchtegehaltsintegral der Schicht DH der Schichtkombinationen für Korkdämmlehm (DH4)	164
Abbildung 116: Heatmap Feuchtegehaltsintegral der Schicht DH der Schichtkombinationen für Wärmedämmlehm (DH5)	165
Abbildung 117: Heatmap Feuchtegehaltsintegral der Schicht DP in der Schichtkombination mit Mineralschaum (DH2)	165
Abbildung 118: Heatmap Feuchtegehaltsintegral der Schicht DP in der Schichtkombination mit iQ-Therm (DH3)	166
Abbildung 119: Heatmap Feuchtegehaltsintegral der Schicht DP in der Schichtkombination mit Korkdämmlehm (DH4)	166
Abbildung 120: Heatmap Feuchtegehaltsintegral der Schicht DP in der Schichtkombination mit Wärmedämmlehm (DH5)	167
Abbildung 121: Jahresverlauf der relativen Feuchte aller Varianten in der Schichtgrenze Ziegel-DH	168
Abbildung 122: Jahresverlauf der relativen Feuchte aller Varianten in der Schichtgrenze Ziegel-DP	168
Abbildung 123: Jahresverlauf der relativen Feuchte aller Varianten in der Schichtgrenze Ziegel-Luft	169
Abbildung 124: Jahresverlauf der relativen Feuchte aller Varianten in der Schichtgrenze Luft-DH	170
Abbildung 125: Jahresverlauf der relativen Feuchte aller Varianten in der Schichtgrenze Luft-DP	170
Abbildung 126: Jahresverlauf der relativen Feuchte aller Varianten in der Schichtgrenze DH-DP	171
Abbildung 127: Jahresverlauf der relativen Feuchte aller Varianten in der Schichtgrenze DP-Lehmputz	172
Abbildung 128: Jahresverlauf der relativen Feuchte aller Varianten in der Schichtgrenze DH-Lehmputz	173
Abbildung 129: Jahresverlauf der relativen Feuchte aller Varianten in der Schichtgrenze Lehmputz innen	174
Abbildung 130: Jahresverlauf der relativen Feuchte aller Varianten in der Schichtgrenze Lehmputz innen	175

10 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zeitplan der Arbeitspakete	15
Tabelle 2: Bezeichnung und Lage der Temperatur- und Feuchtesensoren in der Westfassade	17
Tabelle 3: Bezeichnung und Lage der Temperatur- und Feuchtesensoren in der Ostfassade	18
Tabelle 4: Übersicht der untersuchten Materialien für die hygrothermische Simulation mit DELPHIN	26
Tabelle 5: Übersicht Materialien und Bezeichnungen	27
Tabelle 6: Übersicht der untersuchten Basisvarianten für die hygrothermische Simulation mit DELPHIN	27
Tabelle 7: Bauphysikalische Parameter der betrachteten hygrysch aktiven Materialien in DELPHIN	28
Tabelle 8: Übersicht der Dämmstärken der analysierten Schichtkombinationen	43
Tabelle 9: Variantenübersicht der Schichtkombinationen	44
Tabelle 10: Schichtdicken und U-Werte der untersuchten Schichtkombinationen	76
Tabelle 11: Vergleich der U-Werte von Schichtkombinationen mit einschichtiger Dämmung	77
Tabelle 12: Aufbau der Testfassadensimulationsmodelle (Vorlaufforschung)	81
Tabelle 13: Übersicht der Materialien für die Simulation der Testfassaden aus der Vorlaufforschung	81
Tabelle 14: Aufbau der Testfassadensimulationsmodelle (neue Testfassaden)	85
Tabelle 15: Übersicht der Materialien für die Simulation der neuen Testfassaden	85
Tabelle 16: gemessene Anfangsbedingungen der neuen Testfassaden	86
Tabelle 17: Aufbau der neuen Testfassaden im Rooftop-Gebäude	91
Tabelle 18: Materialeigenschaften aus DELPHIN für den in der Simulation verwendeten Ziegel	110
Tabelle 19: Angenommene Materialien und Schichtdicken für die Außenfassade des Standardraums	123
Tabelle 20: genutzte Materialien und bauphysikalischen Parameter aus DELPHIN in IDA ICE	124
Tabelle 21: Materialien und bauphysikalischen Parameter aus der IDA ICE-Materialdatenbank	124
Tabelle 22: Simulationsvarianten der thermischen Raumsimulation	125
Tabelle 23: Übersicht der Lebenswegmodule aus der DIN EN 15804	130
Tabelle 24: Ausschnitt aus dem Bauteilkatalog*	142

11 Anlagen

11.1 Anlage 1 - Simulationsanalysen

Ergänzung zu Abschnitt 3.3.4

Abbildung 109: Heatmap Feuchtegehaltsintegral der gesamten Konstruktion der Schichtkombinationen für Mineralschaum (DH2)

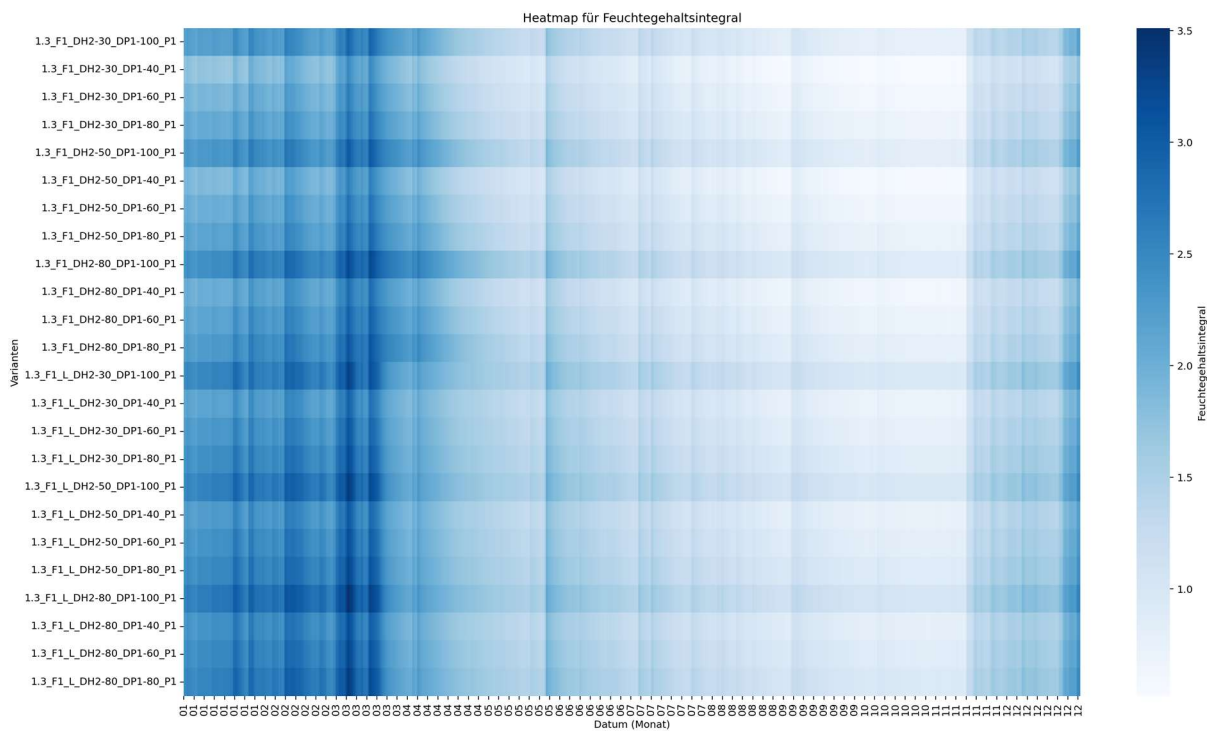


Abbildung 110: Heatmap Feuchtegehaltsintegral der gesamten Konstruktion der Schichtkombinationen für iQ-Therm (DH3)

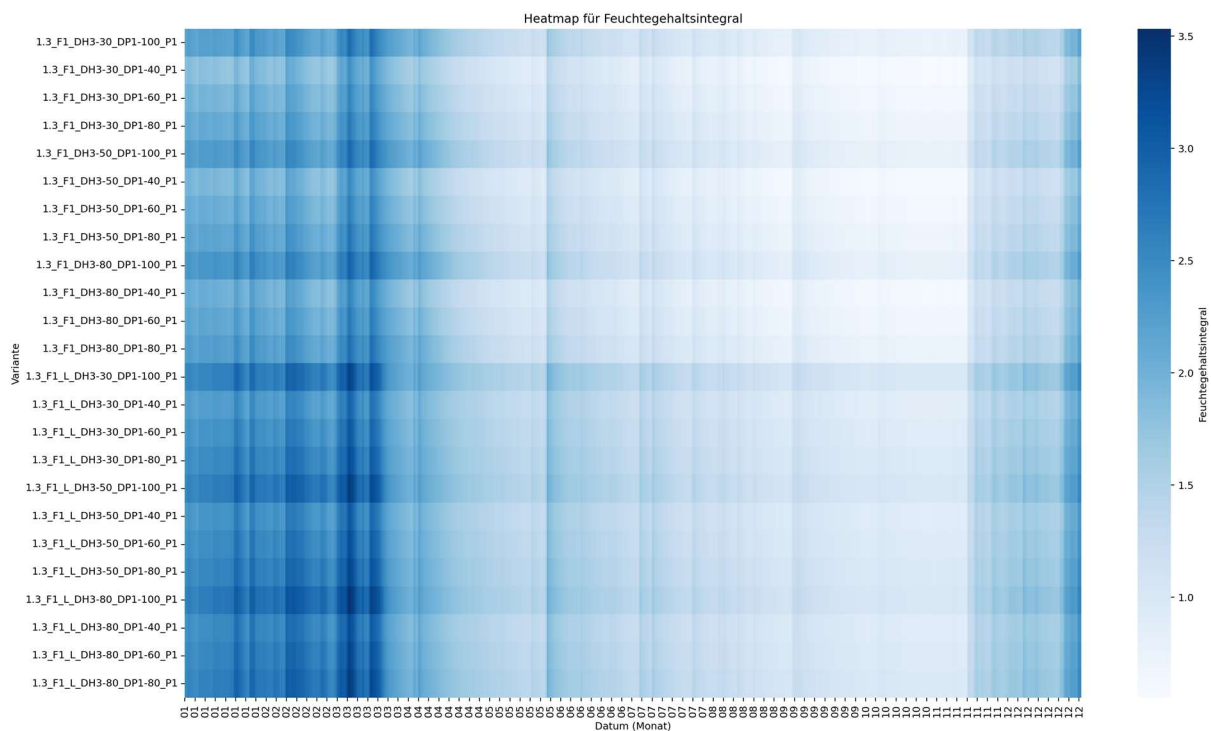


Abbildung 111: Heatmap Feuchtegehaltsintegral der gesamten Konstruktion der Schichtkombinationen für Korkdämmlehm (DH4)

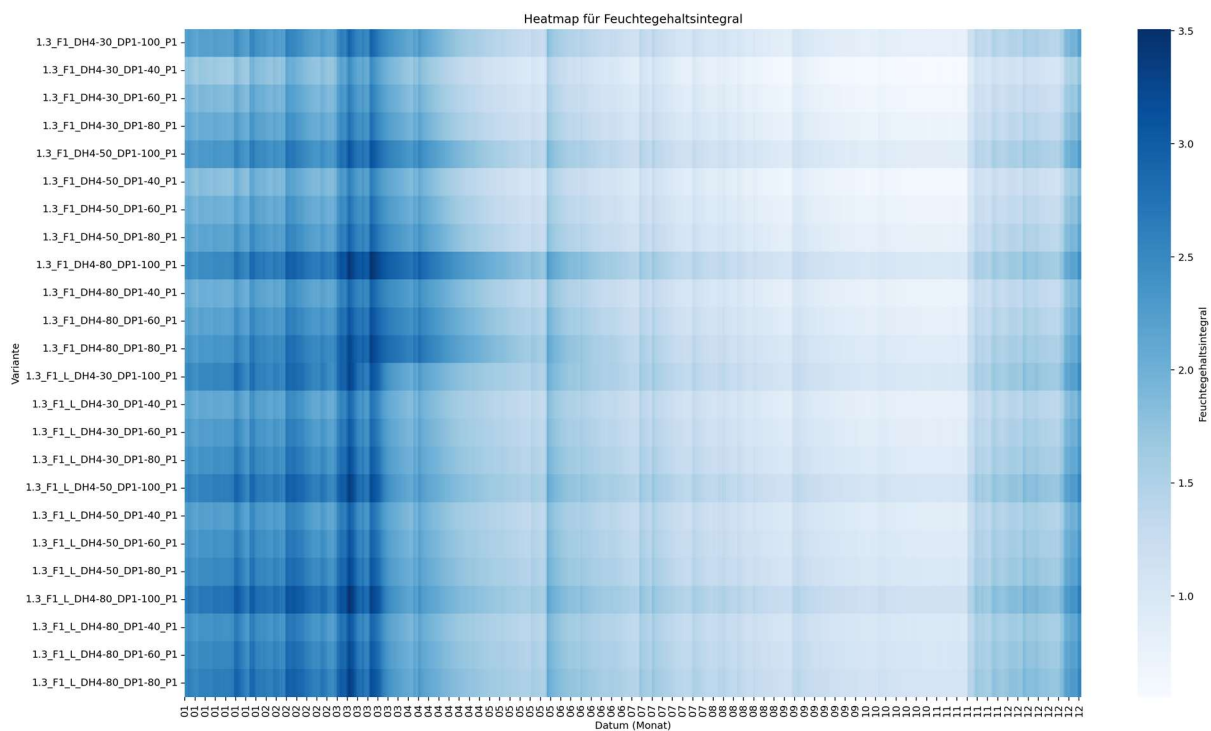


Abbildung 112: Heatmap Feuchtegehaltsintegral der gesamten Konstruktion der Schichtkombinationen für Wärmedämmlehm (DH5)

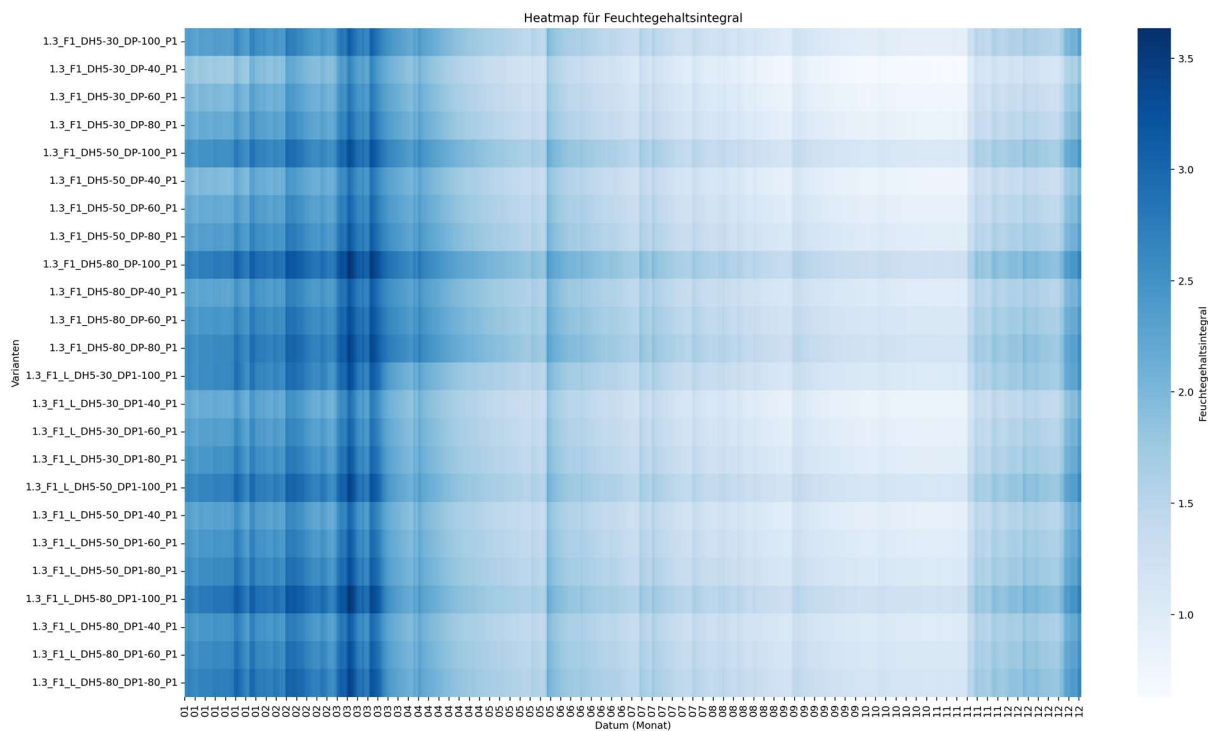


Abbildung 113: Heatmap Feuchtegehaltsintegral der Schicht DH der Schichtkombinationen für Mineralschaum (DH2)

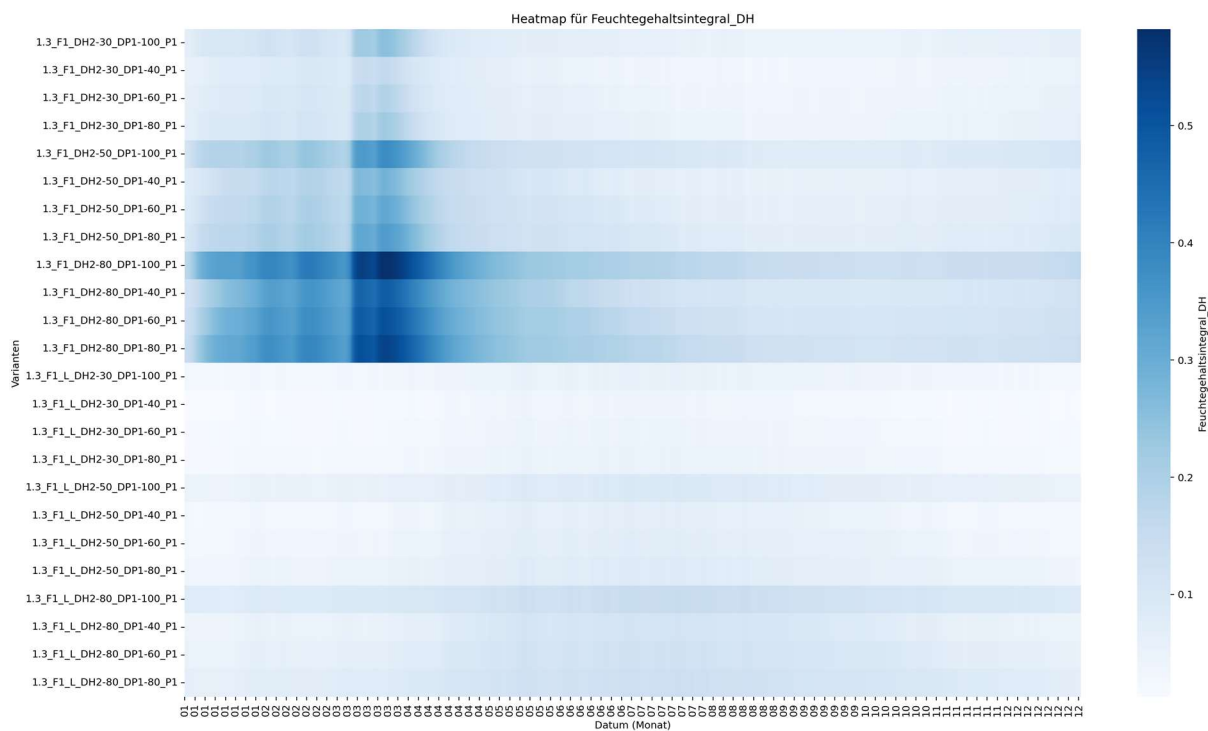


Abbildung 114: Heatmap Feuchtegehaltsintegral der Schicht DH der Schichtkombinationen für iQ-Therm (DH3)

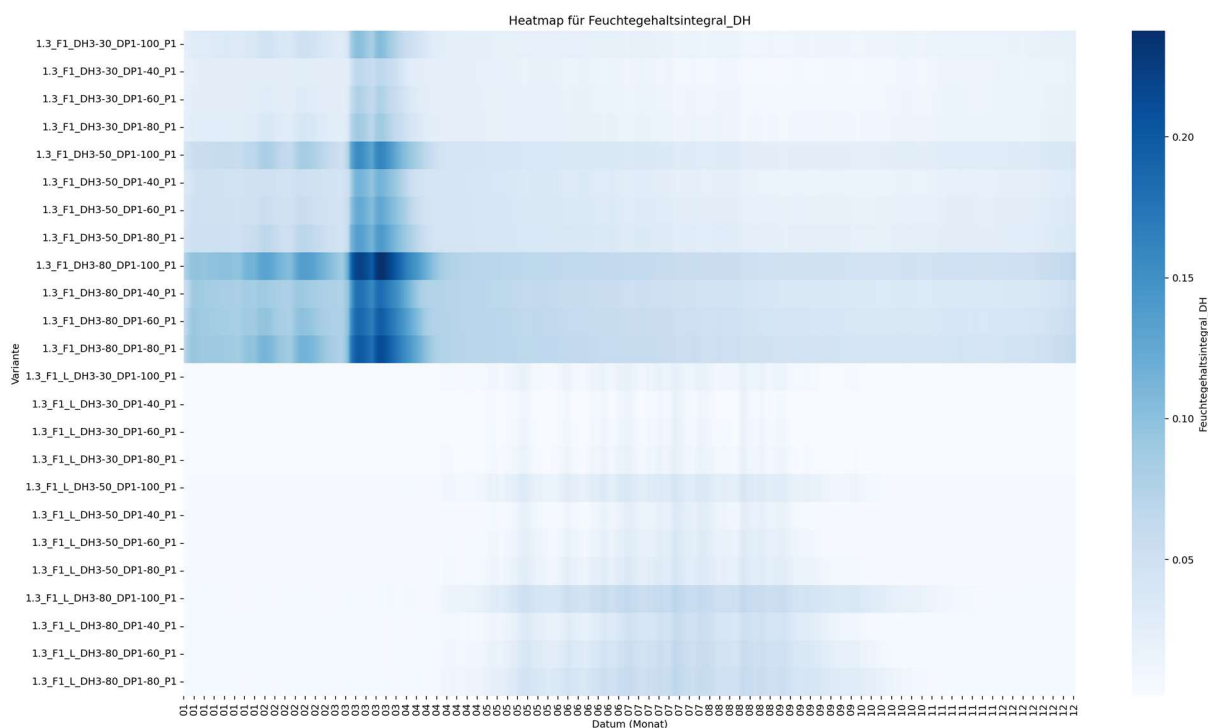


Abbildung 115: Heatmap Feuchtegehaltsintegral der Schicht DH der Schichtkombinationen für Korkdämmlehm (DH4)

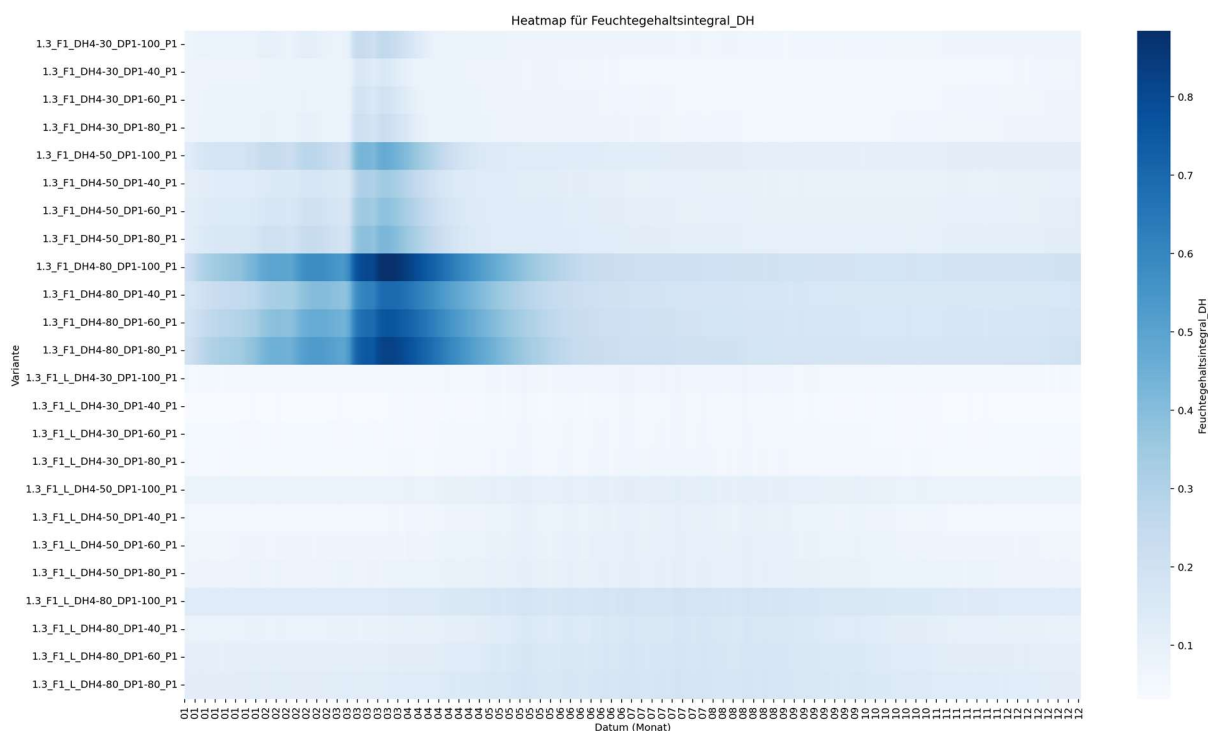


Abbildung 116: Heatmap Feuchtegehaltsintegral der Schicht DH der Schichtkombinationen für Wärmedämmlehm (DH5)

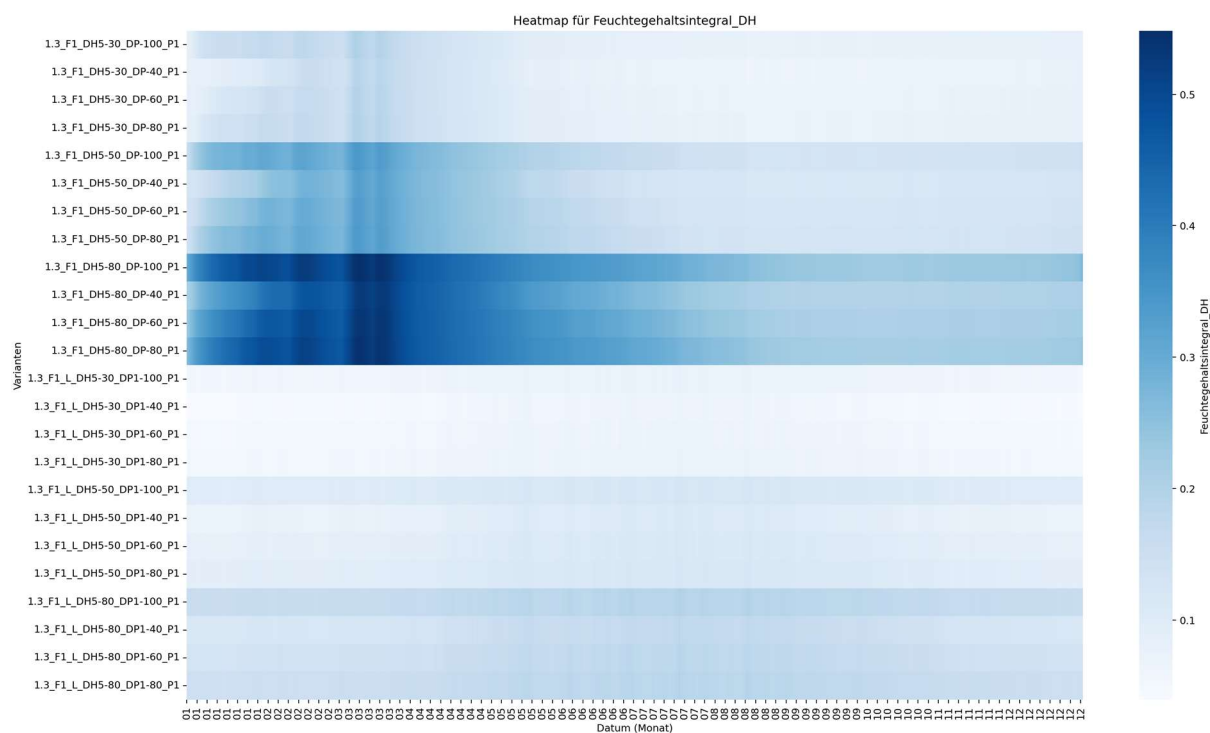


Abbildung 117: Heatmap Feuchtegehaltsintegral der Schicht DP in der Schichtkombination mit Mineralschaum (DH2)

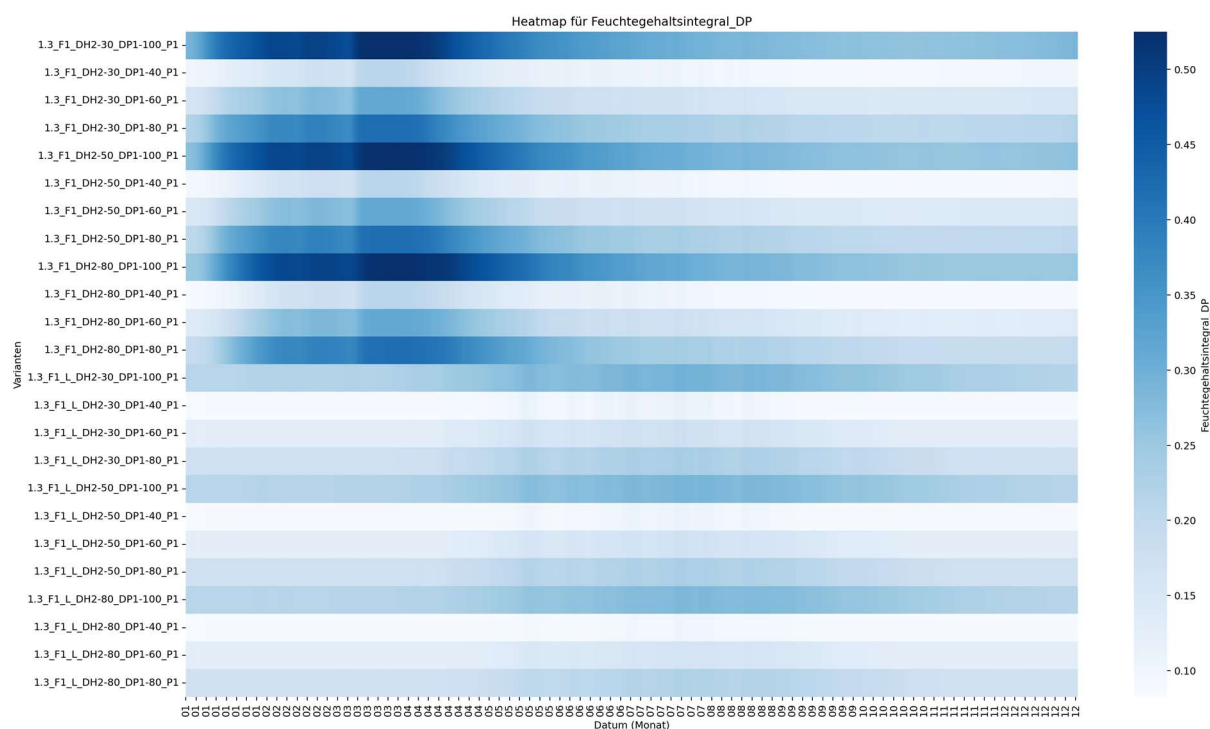


Abbildung 118: Heatmap Feuchtegehaltsintegral der Schicht DP in der Schichtkombination mit iQ-Therm (DH3)

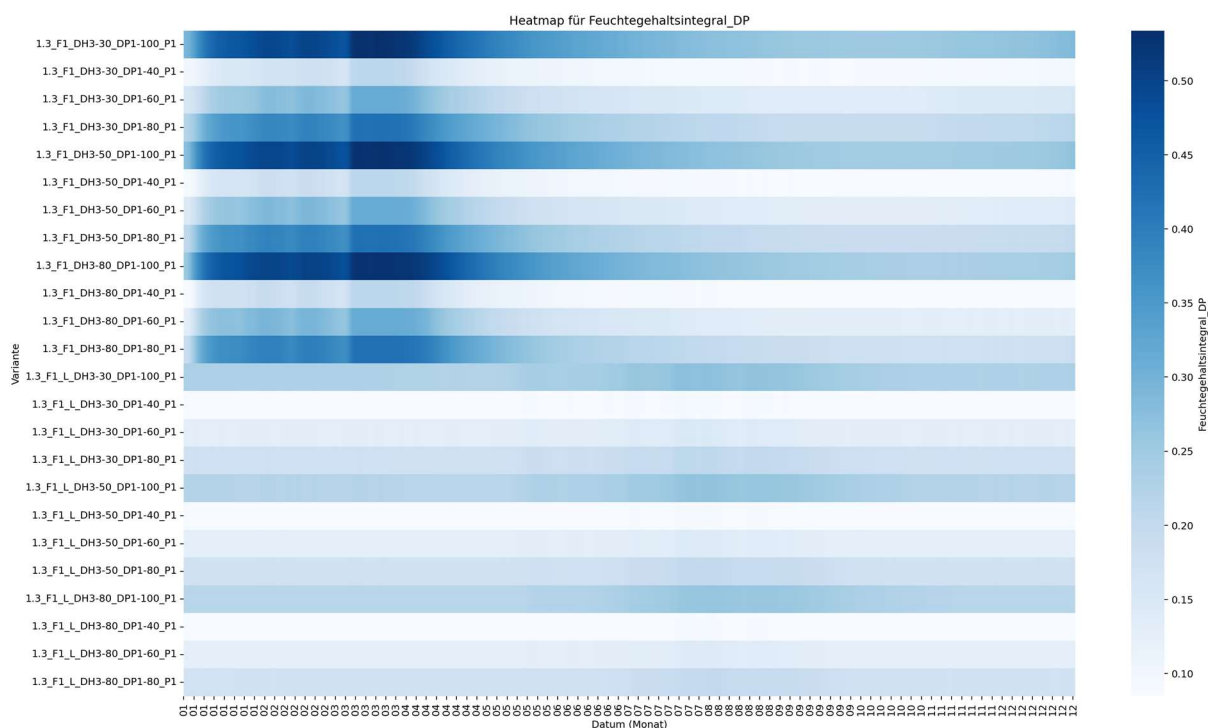


Abbildung 119: Heatmap Feuchtegehaltsintegral der Schicht DP in der Schichtkombination mit Korkdämmlehm (DH4)

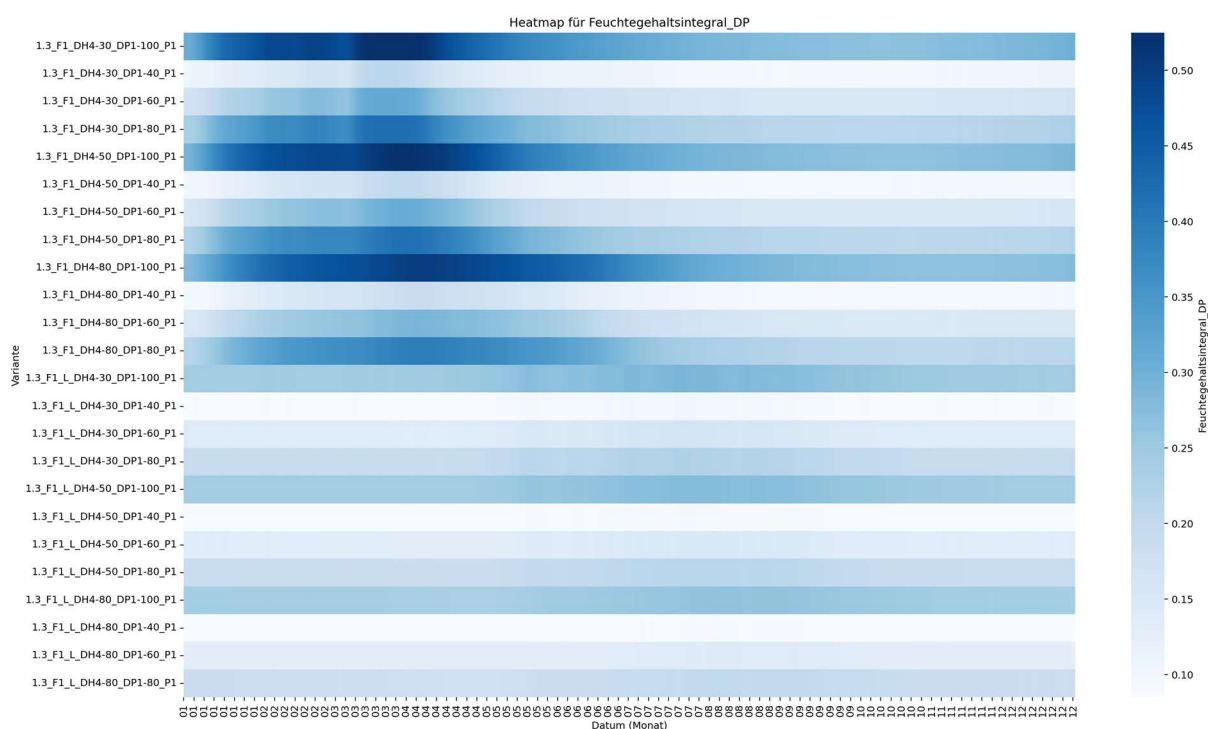


Abbildung 120: Heatmap Feuchtegehaltsintegral der Schicht DP in der Schichtkombination mit Wärmedämmlehm (DH5)

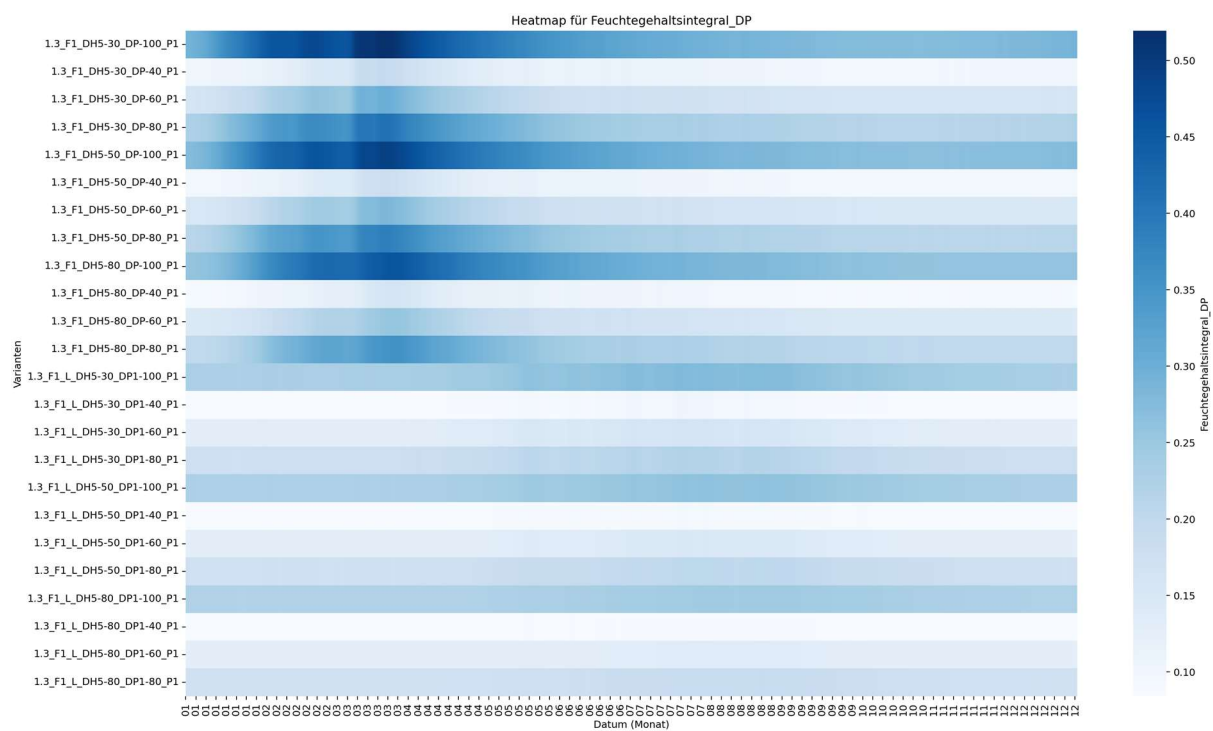


Abbildung 121: Jahresverlauf der relativen Feuchte aller Varianten in der Schichtgrenze Ziegel-DH

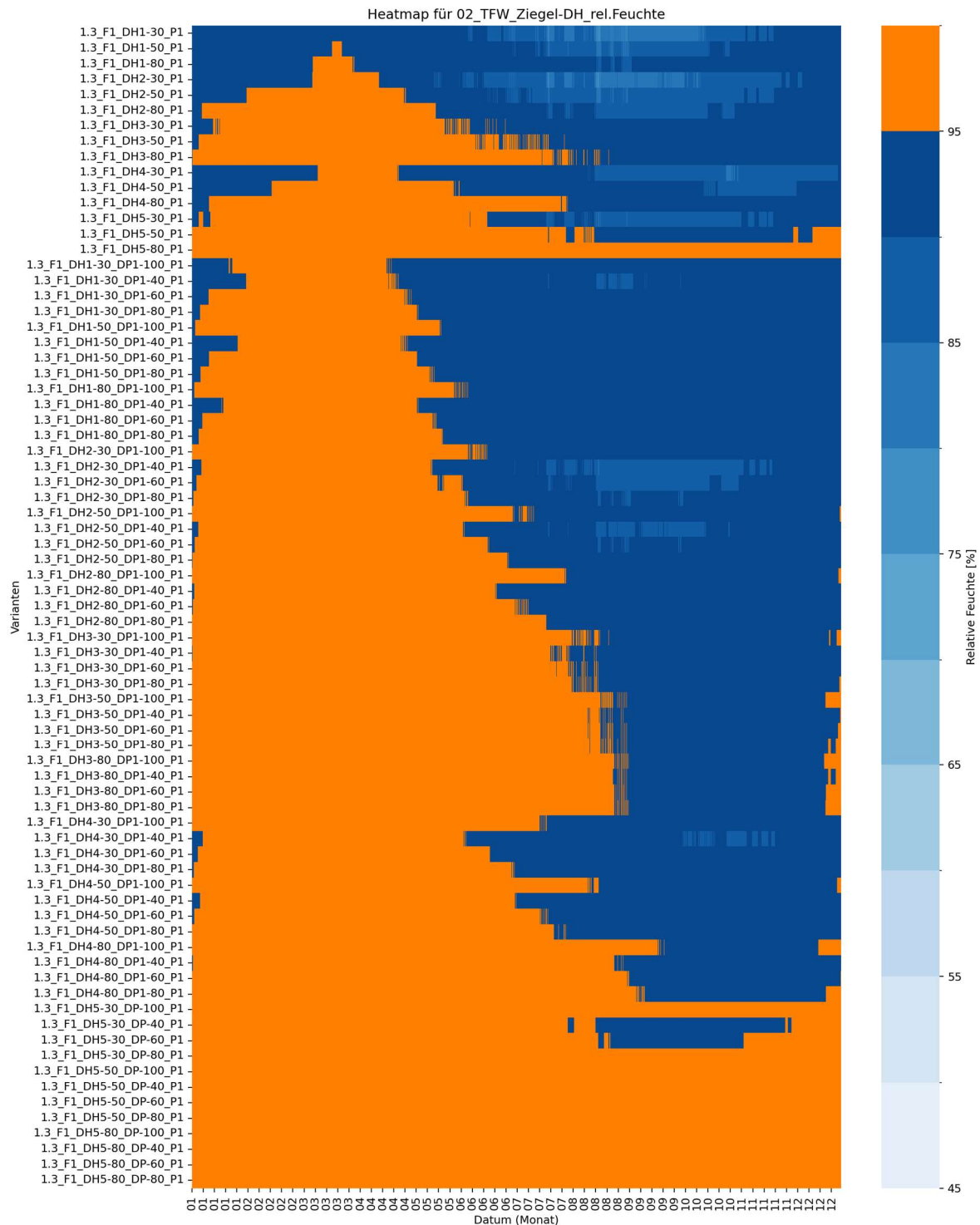


Abbildung 122: Jahresverlauf der relativen Feuchte aller Varianten in der Schichtgrenze Ziegel-DP

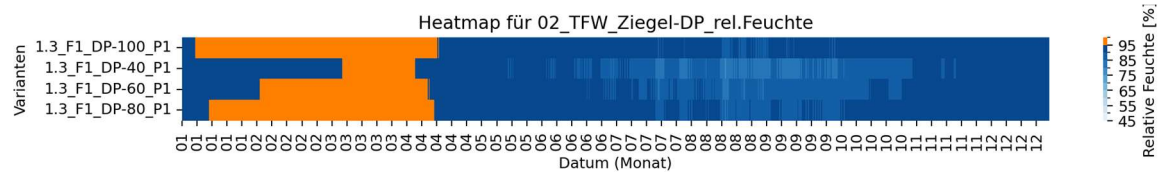


Abbildung 123: Jahresverlauf der relativen Feuchte aller Varianten in der Schichtgrenze Ziegel-Luft

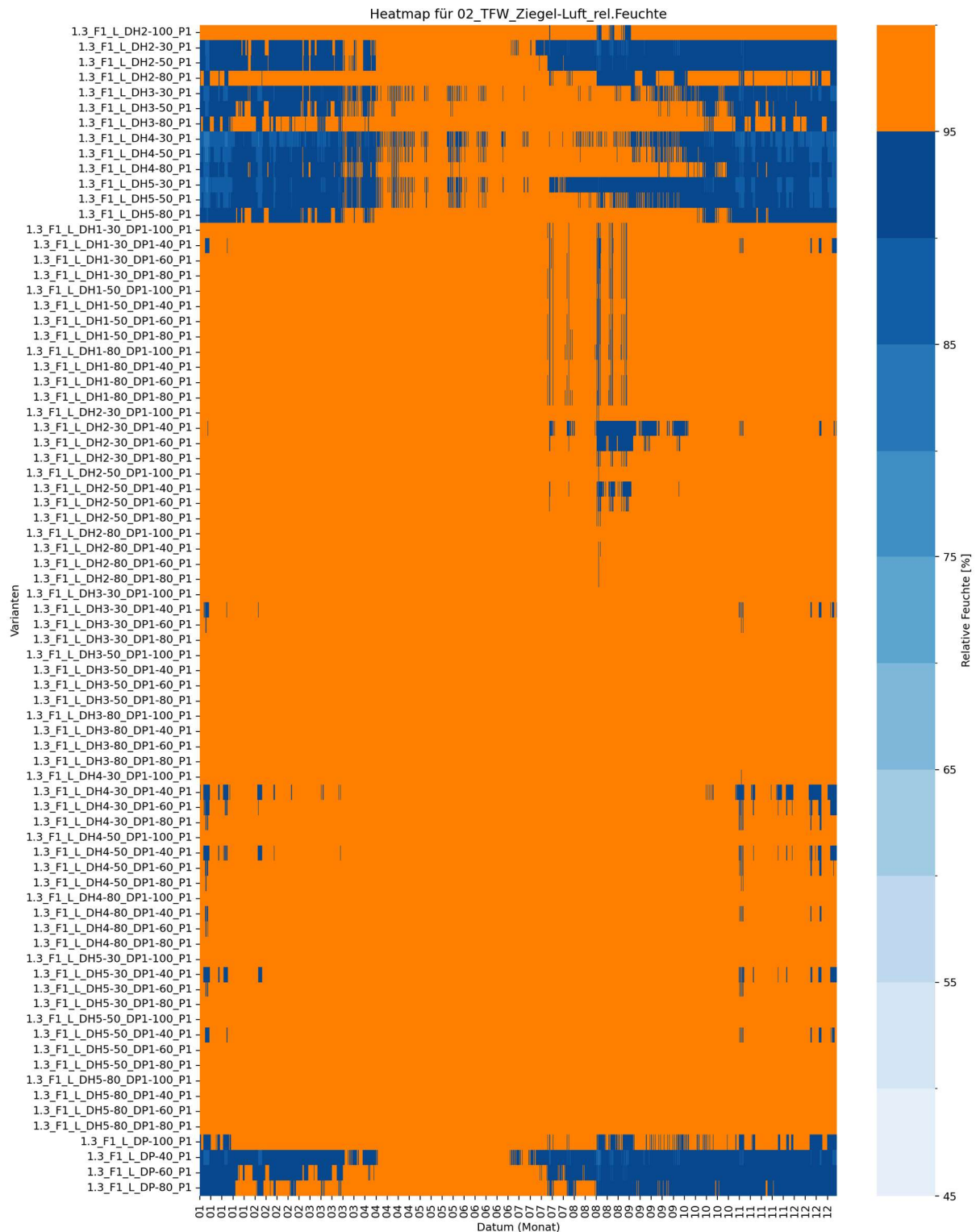


Abbildung 124: Jahresverlauf der relativen Feuchte aller Varianten in der Schichtgrenze Luft-DH

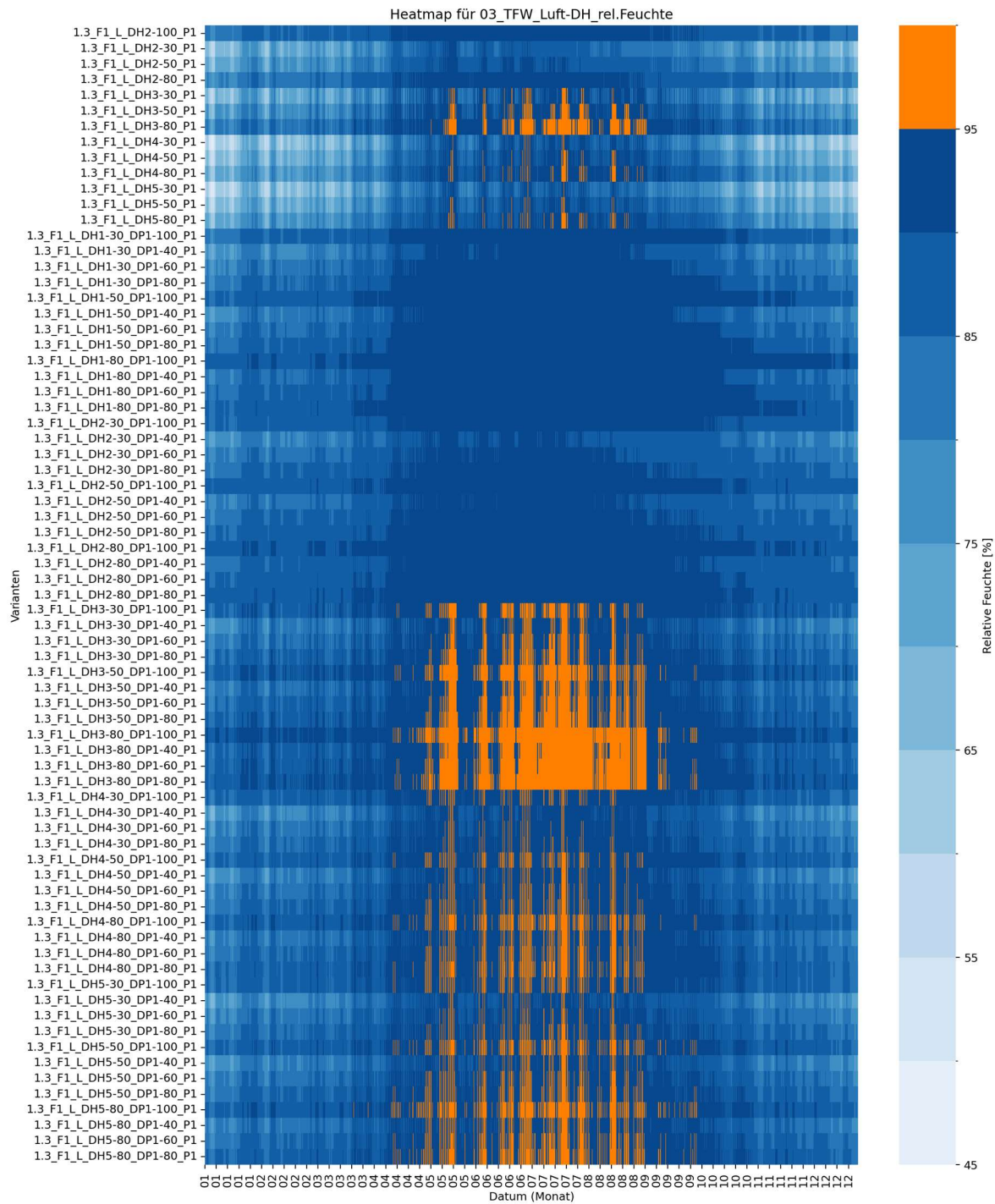


Abbildung 125: Jahresverlauf der relativen Feuchte aller Varianten in der Schichtgrenze Luft-DP

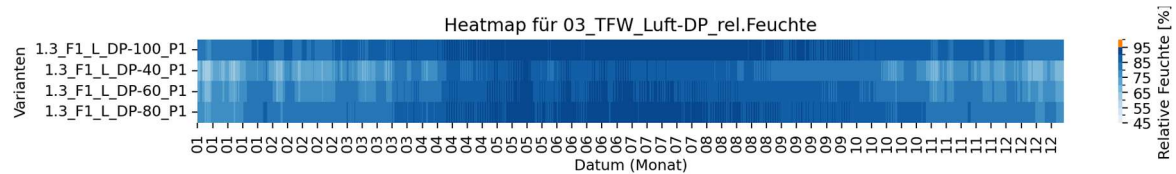
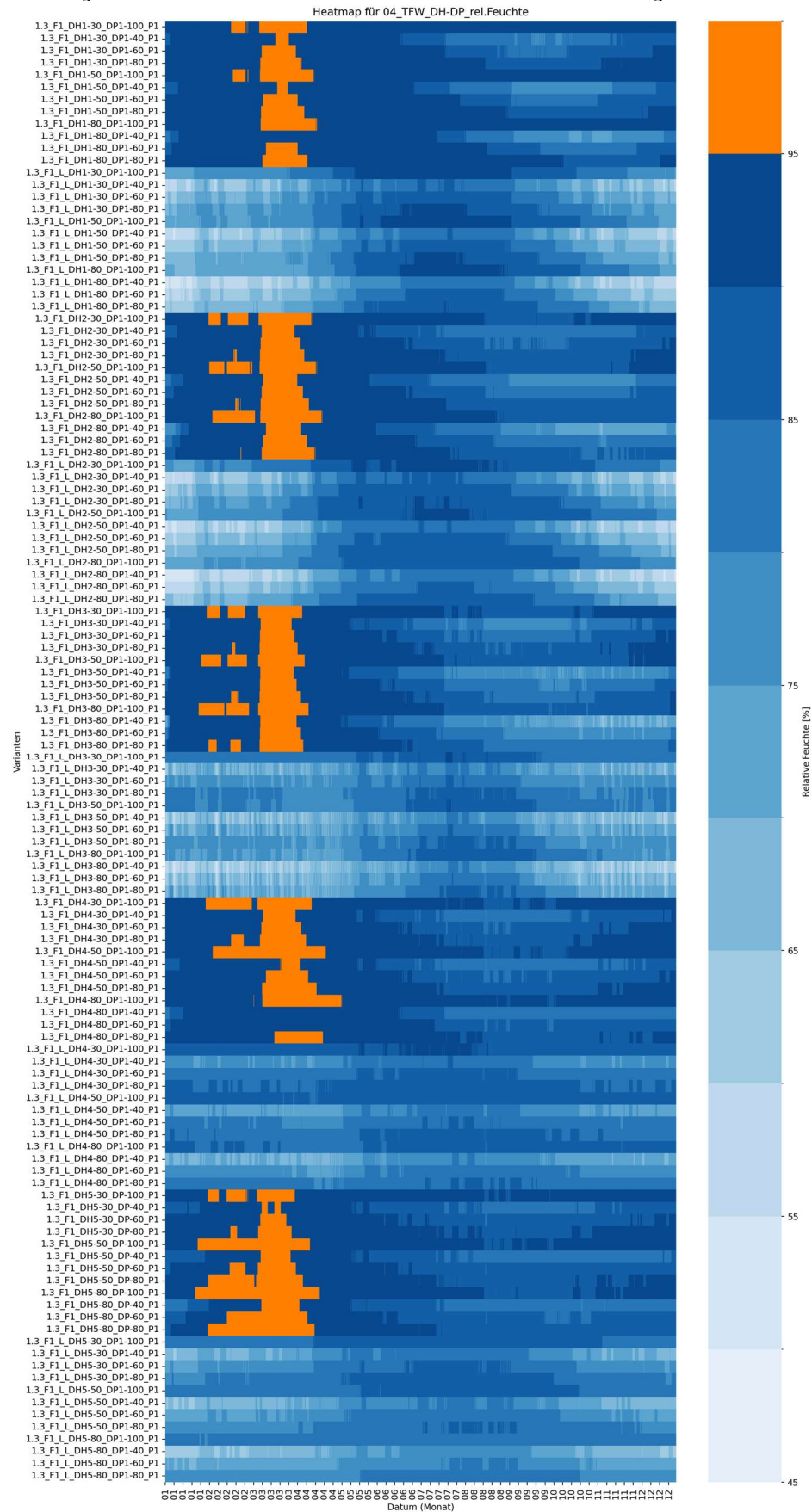


Abbildung 126: Jahresverlauf der relativen Feuchte aller Varianten in der Schichtgrenze DH-DP



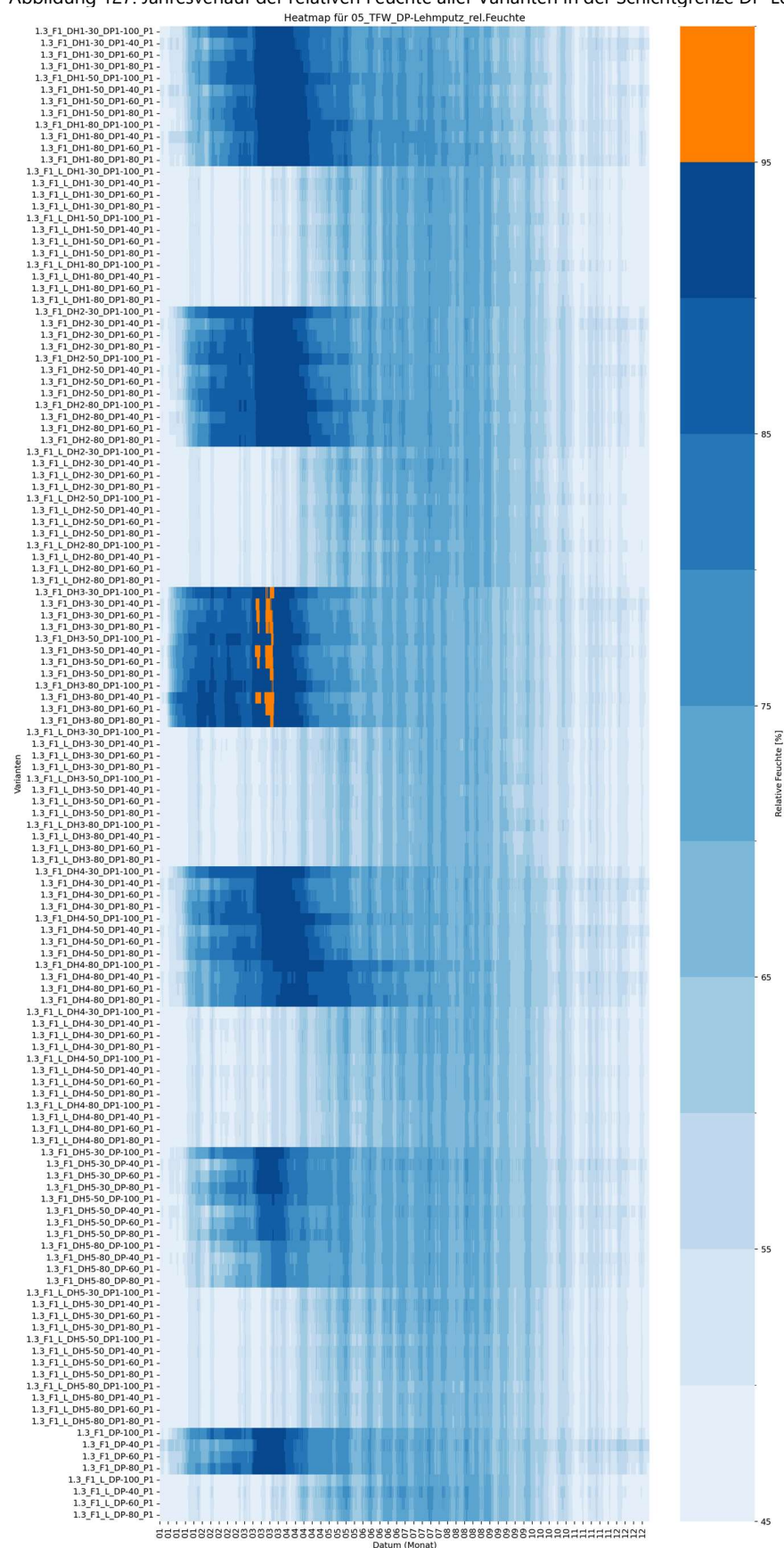


Abbildung 128: Jahresverlauf der relativen Feuchte aller Varianten in der Schichtgrenze DH-Lehmputz

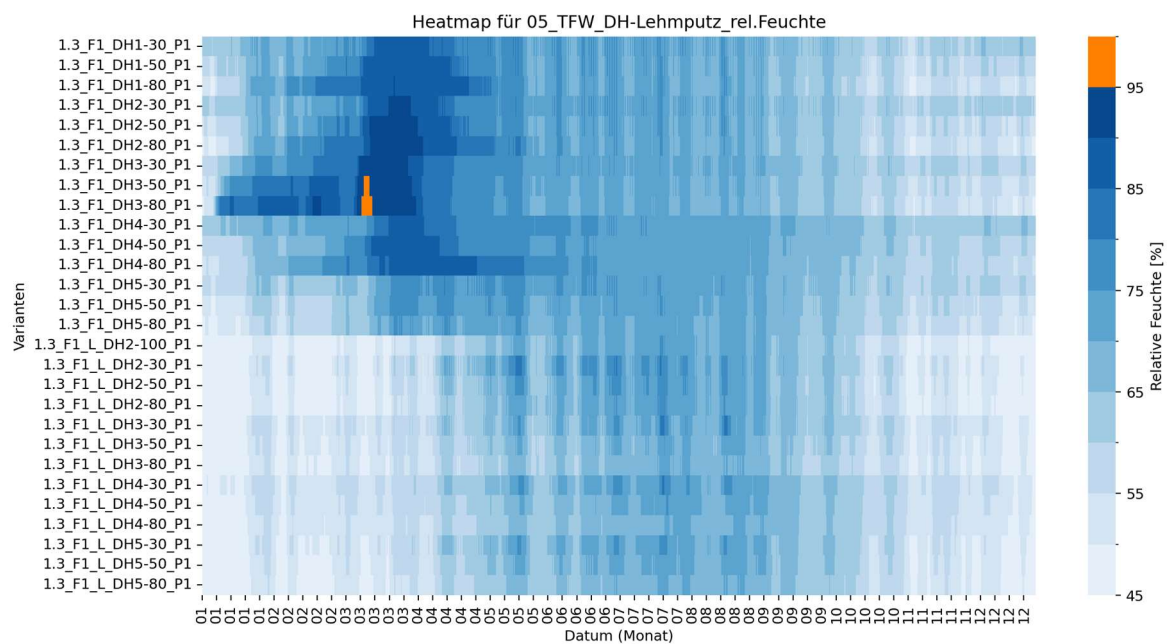


Abbildung 129: Jahresverlauf der relativen Feuchte aller Varianten in der Schichtgrenze Lehmputz innen

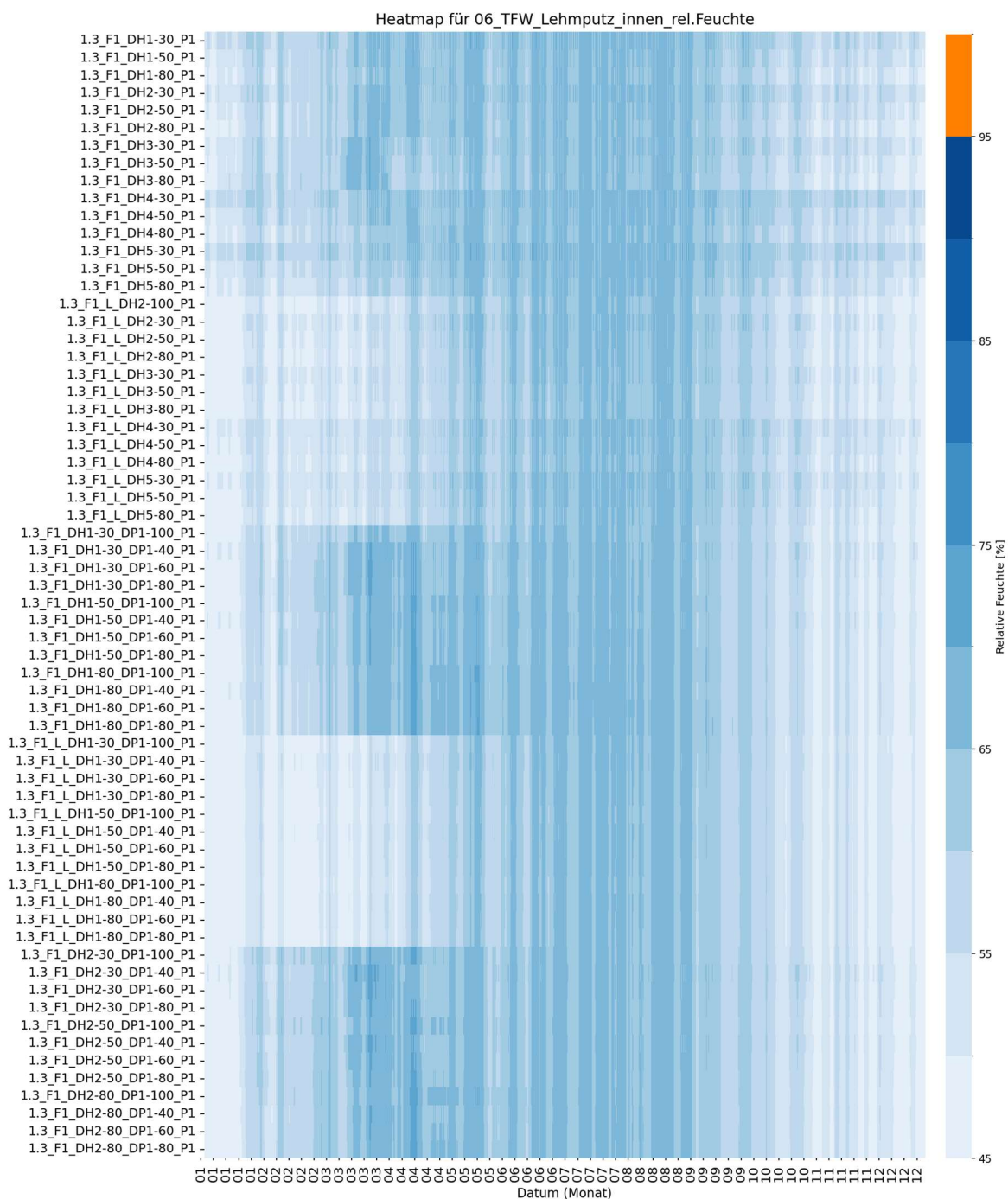
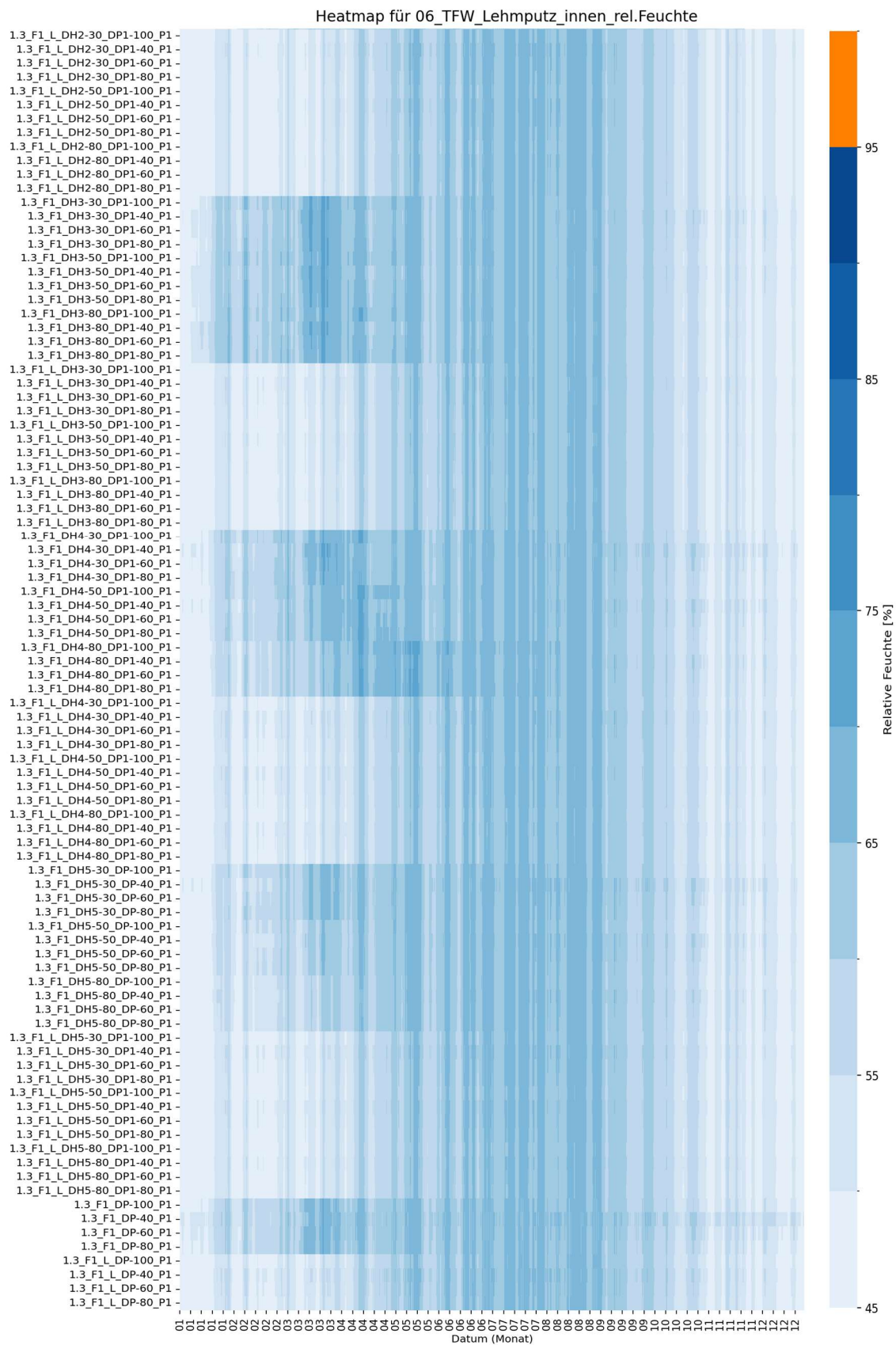


Abbildung 130: Jahresverlauf der relativen Feuchte aller Varianten in der Schichtgrenze Lehmputz innen



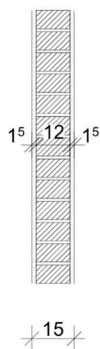
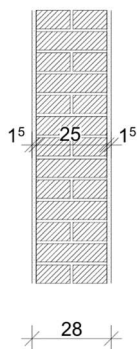
11.2 Anlage 2 – Thermische Raumsimulation

Ergänzung zu Abschnitt 3.7

Folgende weitere Annahmen wurden für den Standardraum angenommen:

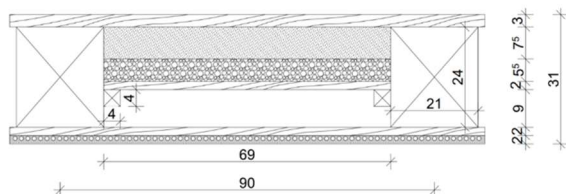
Die Innenwände und Zwischengeschoßdecken gehen als thermische Speichermasse in die Berechnung ein, ein Wärmeaustausch mit den Nachbarräumen findet nicht statt.

Wandaufbauten Innenwände



Zwischenwand	150 mm	Material
	15 mm	Innenputz
	120 mm	Ziegel
	15 mm	Innenputz
Mittelwand	280 mm	Material
	15 mm	Innenputz
	250 mm	Ziegel
	15 mm	Innenputz

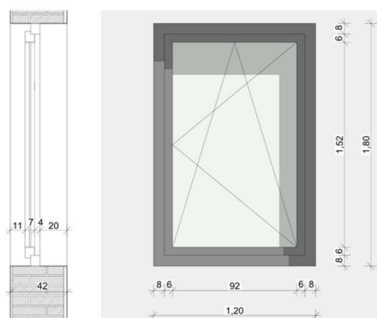
Deckenaufbau



In Balkenlage	310 mm	Material
	30 mm	Holzdielen
	240 mm	Holzbalken
	20 mm	Holz
	20 mm	Innenputz auf Putzträger

Balkenzwischenraum	310 mm	Material
	30 mm	Holzdielen
	130 mm	Schüttung (Sand)
	20 mm	Holz
	90 mm	Luftschicht
	20 mm	Holz

Fensteraufbau



In der Simulation soll nur die Qualität der Dämmung der Wand hinsichtlich Wärmedämmeigenschaften und Umweltfaktoren betrachtet werden. Daher wird angenommen, dass die ursprünglichen Doppelkassenfenster bereits in einer vorangegangenen Sanierungsmaßnahme gegen moderne Fenster einer mit Zwei-Scheiben-Wärmeschutzverglasung (U-Wert Verglasung 1,1 W/m²K; U-Wert Rahmen 2,0 W/m²K; Rahmenanteil 30 %; g-Wert 0,62) ausgetauscht wurden sind. Damit bleiben die Fenster in allen untersuchten Varianten gleich.

In IDA ICE wurde für das Fensterglas aus der programminternen Datenbank mit folgenden Eigenschaften ausgewählt. Dabei handelt es sich um eine Zweischeiben- Wärmeschutzverglasung mit Argon-Gas-Füllung im Scheibenzwischenraum. Der Glasanteil vom Gesamtfenster beträgt 70%. Für den Rahmenanteil wird ein U-Wert von 2,0 W/m²K angenommen.

11.3 Anlage 3 – Bauteilkatalog (separates Dokument)