



Hans Hafellner, Baumeister Dipl.-Ing.

Instationäres, hygrothermisches Verhalten von erdnahen Bauteilanschlüssen insbesondere mit Innendämmung

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der technischen Wissenschaften

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Univ.-Prof. DDr. Peter Kautsch

Institut für Bauphysik, Gebäudetechnik und Hochbau – Technische Universität Graz

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Harald Garrecht

Institut für Werkstoffe im Bauwesen – Universität Stuttgart

Graz, Jänner 2021

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Dissertation identisch.

Datum, Unterschrift

Danksagung

Nichts lässt sich vollkommen alleine umsetzen und in meinem Leben bekam ich jederzeit Unterstützung von sehr vielen Seiten. Es ist unmöglich in wenigen Sätzen allen Dank auszusprechen, denen gegenüber ich große Dankbarkeit verspüre. Somit lassen sich hier nur einige besonders hervorheben, die mir in den letzten Jahren und besonders gegen Ende der Fertigstellung unterstützend zur Seite standen.

Ich bedanke mich bei meinem Betreuer Prof. Peter Kautsch, der stets sein Vertrauen in mich setzte und mir Motivation und Hilfestellung bot. Ein herzliches Dankeschön geht auch an meinen Zweitgutachter Prof. Harald Garrecht. Weiter bedanke ich mich bei Prof. Christina Hopfe, die mir die Möglichkeit gab die Arbeit fertigzustellen. Ebenso bedanke ich mich bei meinen Kollegen von der TU Graz, die unabhängig vom Institut oder der Fakultät jederzeit hilfsbereit waren und somit auch interdisziplinären Input gaben.

Vielen Dank auch an meine Kollegen der Firma bm3 GmbH, die mir in der arbeitsintensiven Zeit den Rücken freihielten und mir auch freundschaftlich jederzeit zur Seite standen. Durch die Zeichensaalgemeinschaften, die sportlichen Aktivitäten, die unterschiedlichsten Freizeitaktivitäten und die ausgeprägte Grazer Wirtshauskultur darf ich mich bei vielen Freunden und Bekannten bedanken, die so oft mit Rat und Tat zur Seite standen. Ich bedanke mich bei Joe, der jederzeit ein offenes Ohr hat und Unterstützung bietet, wie selten ein anderer.

Größter Dank gilt meinen Eltern, meinen Geschwistern samt Familien, meiner gesamten Großfamilie und Julia, die gemeinsam das Fundament meines Lebens sind.

Kurzfassung

Die Prognosen der Bevölkerungsveränderung zeigen eine Zunahme bis 2030 in den Ballungsräumen um bis zu 20 % gegenüber 2014. Diese Menschen benötigen Wohnraum und eine nachhaltige effiziente Lösung ist die Nutzung vorhandener Gebäude; demzufolge ist eine ressourcenschonende Nachverdichtung notwendig.

Im Grazer Altstadterhaltungsgesetz sind sechs Schutzzonen für Bestandsgebäude deklariert, wobei Zone III, die den Hauptteil der Gründerzeitgebäude enthält, für sich bereits ca. 3.900 Gebäude umfasst. In Wien deklariert das gleichartige Gesetz 135 Schutzzonen, womit ca. 15.000 Gebäude betroffen sind. In Graz und Wien sind somit jeweils ca. 9 % der Gebäude Gründerzeithäuser, die mit Innendämmung von ca. 27,3 Millionen Quadratmeter ausgestattet werden könnten.

Innendämmungen sind zwar nicht der Regelfall, werden durch denkmalgeschützte Bauwerke, erhaltenswerte Fassaden, schmale Außentreppen, Balkone, Gassen, Passagen, Durchfahrten oder bei Grenzbebauungen und deren thermischer Sanierung jedoch immer mehr zur Notwendigkeit.

Die vorliegende Dissertation behandelt den Sockelbereich, in dem geometrisch-, material- und oftmals auch umgebungsbedingte Wärmebrücken zu Kondensation und Schimmelbildung führen können. Dieser Bereich ist als besonders kritisch einzustufen, da Dampfdiffusion aus verschiedenen Innenbereichen, Schlagregen, Erdfeuchte und Spritzwasser aufeinandertreffen.

In einem Gründerzeitgebäude aus dem Jahr 1850 wurden im Erdgeschoß zwei verschiedene diffusionsoffene, kapillaraktive Innendämmsysteme appliziert sowie 25 Feuchte- und Temperatursensoren montiert. Über einen Zeitraum von drei Jahren wurden das Innenklima des Erd- und Kellergeschoßes, das Außenklima, die Feuchtigkeit und die Temperatur in den betroffenen Bauteilen gemessen. In der durch aufsteigende Feuchtigkeit belasteten Sockelzone konnte ein Austrocknungsverhalten in den Wintermonaten gemessen werden. Über entnommene Materialproben wurden die erforderlichen hygrothermischen Parameter bestimmt, die für Simulationen notwendig sind. Mit Hilfe von zwei gängigen Programmen für instationäre, hygrothermische Simulationen konnten Modellbildungsmöglichkeiten aufgezeigt werden. Außerdem wurden Auswertungen hinsichtlich der feuchte- und temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeit der Bestands- und Sanierungsmaterialien durchgeführt.

Abstract

The prognoses of the population change show an increase by 2030 in the metropolitan areas by up to 20 % compared to the values of 2014. These people need a living space and a sustainable efficient solution is to utilize existing buildings, therefore a resource-saving redensification is necessary.

In the Graz Old Town Conservation Act, six protection zones are declared for existing buildings, with Zone III, which contains the main part of the Wilhelminian style buildings, already comprising around 3.900 buildings. In Vienna there is also a law that declares 135 protection zones, which affects around 15.000 buildings. In Graz and Vienna, around 9 % of the buildings are Wilhelminian style houses that could be equipped with interior insulation of around 27.3 million square meters.

Interior insulation is not the norm, but is becoming more and more a necessity due to listed buildings, facades worth preserving, narrow external staircases, balconies, alleys, passages, drive-throughs or border developments and their thermal renovation

The research concerns the base area in which geometrical, material and often also environmental thermal bridges can lead to condensation and mold formation. This area is to be seen as particularly critical because this is where vapor diffusion from different interior areas, driving rain, soil moisture and splash water come together.

In a Wilhelminian style building from 1850, two different diffusion-open and capillary-active interior insulation systems on the ground floor as well as 25 humidity and temperature sensors were installed. Over a period of three years, the indoor climate of the ground floor and basement, the outdoor climate, the humidity and the temperature in the affected components were measured. In the base zone, which is stressed by rising damp, it was possible to measure drying behavior in the winter months. With taken material samples, hygrothermal parameters could be determined, which are necessary for simulations. With the help of two common programs for unsteady hygrothermal simulations, modeling possibilities could be demonstrated. Furthermore, evaluations were carried out with regard to the moisture and temperature-dependent thermal conductivity of the existing and renovation materials.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung.....	III
Kurzfassung.....	V
Abstract	V
Inhaltsverzeichnis.....	VII
1 Einleitung.....	1
1.1 Ausgangssituation.....	1
1.2 Begründung der Forschungsthematik	2
1.3 Ziele und Vorgaben	3
1.4 Geltungsbereich und Einschränkungen.....	4
1.5 Übersicht der Dissertation.....	5
2 Stand der Wissenschaft.....	6
2.1 Normen und Richtlinien	6
2.1.1 ÖNORM B 3355 Trockenlegung von feuchtem Mauerwerk.....	6
2.1.2 ÖNORM B 8110-2 Wärmeschutz im Hochbau	6
2.1.3 ÖNORM EN 15026 Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen	7
2.1.4 ÖNORM EN ISO 10211 Wärmebrücken im Hochbau	7
2.1.5 ÖNORM EN ISO 13370 Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden.....	7
2.1.6 ÖNORM EN ISO 13788 Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen	7
2.1.7 DIN 4108-3 Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden.....	8
2.1.8 WTA Merkblätter	8
2.2 Rechenmodelle von DELPHIN und WUFI.....	9
2.2.1 DELPHIN.....	9
2.2.2 WUFI.....	10
2.2.3 Gegenüberstellung maßgeblicher Programmunterschiede von DELPHIN und WUFI	11
2.3 Grundlagen zum untersuchten Detailbereich	13
3 Hochbautechnischer Gesamtüberblick	18
3.1 Energieeinsparungspotential bei Gründerzeithäusern.....	18
3.2 Behaglichkeit (Oberflächentemperatur).....	24
3.3 Kosten und Wirtschaftlichkeit	26
3.3.1 Montagekosten.....	26
3.3.2 Mietentgang	27
3.3.3 Heizkosteneinsparung	28
3.4 Sommerliche Überwärmung	29
3.5 Schallschutz und Akustik	31
3.6 Ziegeltragfähigkeit bei erhöhtem Wassergehalt.....	31
4 Forschungsgebäude	32
4.1 Örtlichkeit und Versuchsgebäude	32
4.2 Verwendete Innendämmsysteme	37
4.3 Messtechnik	38
4.4 Klima und örtliche Randbedingungen.....	40
4.4.1 Temperatur und relative Luftfeuchte	40
4.4.2 Niederschlag	42
4.4.3 Strahlung.....	43
4.4.4 Windgeschwindigkeit und Windrichtung	45
4.4.5 Erdreich und Grundwasser	47
4.4.6 Klimadatenzusammenfassung	49
4.5 Materialparameter	50

4.6	Bauteil-Temperatur und -Feuchtigkeit.....	54
4.6.1	EG Wand Fläche (1D Bereich).....	55
4.6.2	EG Fußbodenaufbau (2D Bereich)	57
4.6.3	UG Gewölbe Fläche und Kante (1D und 2D Bereich)	59
4.6.4	Vergleiche im Vertikalschnitt (1D und 2D Bereich)	61
4.7	Salzgehaltsuntersuchungen.....	63
4.8	Energieverbrauch.....	67
5	Modellbildung und Simulation	68
5.1	Klima	68
5.2	Wärme- und Wasserdampfübergangskoeffizient.....	71
5.3	Materialdatensätze Bestandskonstruktion.....	73
5.3.1	Einschränkung der Datensätze.....	73
5.3.2	Feuchtespeicher- und Flüssigwassertransportfunktion.....	74
5.3.3	Temperatur- und feuchteabhängige Wärmeleitfähigkeit	76
5.3.4	Ausgewählte Materialparameter.....	81
5.4	Materialdatensätze Innendämmsysteme	81
5.4.1	Feuchtespeicher- und Flüssigwassertransportfunktion.....	82
5.4.2	Temperatur- und feuchteabhängige Wärmeleitfähigkeit	84
5.5	Modellaufteilung	85
5.6	Erdreich (Teilbereich A)	86
5.7	Untergeschoß (Teilbereich B).....	87
5.8	Erdgeschoß (Teilbereich C).....	89
5.8.1	Außenwand (1D).....	89
5.8.2	Gewölbe und Fußbodenaufbau (1D)	91
6	Simulationsanalysen und Ergebnisse.....	93
6.1	Homogene bzw. inhomogene Mauerwerksmodellierung.....	93
6.2	Klimavarianten (1D).....	94
6.3	Ziegelvarianten (1D)	97
6.4	Vergleich Messung und Simulation (1D und 2D).....	99
6.4.1	EG Wand Fläche (1D Bereich).....	100
6.4.2	EG Fußbodenaufbau (2D Bereich)	102
6.4.3	UG Gewölbe Fläche und Kante (1D und 2D Bereich)	104
6.5	Analyse der Simulationen mit temperatur- und feuchteabhängigen Wärmeleitfähigkeiten (1D und 2D)	107
6.5.1	Erdgeschoß Außenwand (1D)	107
6.5.2	Sockeldetail (2D)	114
6.6	Energieverbrauch.....	120
7	Zusammenfassung, Diskussion und Ausblick.....	122
7.1	Ergebnisse aus hochbautechnischer Gesamtsicht	122
7.2	Messergebnisse	123
7.3	Simulationsergebnisse.....	124
7.4	Diskussion	126
7.5	Ausblick.....	126
	Literaturverzeichnis	128
	Abbildungsverzeichnis	132
	Abkürzungsverzeichnis	134
	Formelverzeichnis.....	136
	Tabellenverzeichnis.....	136

1 Einleitung

Es wird die Ausgangssituation, die den Anstoß der Dissertation gegeben hat, beschrieben und begründet. In weiterer Folge wird die Forschungsthematik dargestellt und die eingesetzte Methodik erörtert. Abschließend erfolgt eine kurze Übersicht über die nachfolgende Dokumentation und die Beschreibung welche Zielgruppen davon profitieren können.

1.1 Ausgangssituation

Die Prognosen der Bevölkerungsveränderung zeigen eine Zunahme der Bevölkerung bis 2030 in den Ballungsräumen um bis zu 20 % gegenüber den Werten von 2014. Für Wien wird von einer Zunahme um 15 %, ca. 270.000 Menschen, ausgegangen [1]. Um diese Zahl zu verdeutlichen, kann man sich vorstellen, dass alle Bewohner von Graz nach Wien siedeln. Für Graz ist eine Zunahme von 20 % prognostiziert. Dies bedeutet 54.000 Personen mehr in nur 16 Jahren [2].

Diese Menschen benötigen Wohnraum und eine nachhaltige, effiziente Lösung ist die Nutzung der vorhandenen Gebäude. Demzufolge ist eine ressourcenschonende Nachverdichtung notwendig. Die thermische Sanierung der bestehenden Gebäude stellt nicht nur einen wichtigen Beitrag zur wirkungsvollen Reduktion der CO₂ – Emission dar [3], sondern auch eine notwendige Maßnahme für die Schaffung von adäquatem Wohnraum.

Die Anforderungen an Energieeinsparung und Wärmeschutz steigen permanent. So wurden beispielsweise die Anforderungen der OIB Richtlinie 6 [4] in jeder neuen Version und bei Förderungen angehoben. Nicht nur in Österreich, sondern in ganz Europa werden diese Ziele für Neu-, Zu- und Umbauten verschärft [5]. Um die bereitgestellte Energie effizient zu nutzen, sind wärmedämmende Maßnahmen nicht nur bei Neubauten, sondern besonders bei den Bestandshäusern notwendig. Die Zahl der Neuerrichtungen von Gebäuden geht stetig zurück und die Förderungen für Renovierungen wurden stark angehoben, um diese zu forcieren. Die OIB Richtlinie versteht unter einer „größeren Renovierung“, dass 25 % der Oberfläche der Gebäudehülle renoviert wird, und auch zur Erlangung der Förderungen von Bund und Land werden energiesparende und ökologische Maßnahmen gefordert [6]. Statt Einzelmaßnahmen soll ein Bündel an thermisch relevanten Maßnahmen getroffen werden, um möglichst nahe an einen Neubaustandard heranzureichen. Die Sanierungsrate (= Verhältnis von in einem Jahr thermisch instandgesetzten Wohneinheiten in Bezug auf den Gesamtbestand) liegt in Österreich bei rund 1 %. Dies bedeutet, dass erst in 100 Jahren der Gebäudebestand komplett saniert wäre [7]. Es liegt auf der Hand, dass diese Rate angehoben werden muss, um die oben genannten Anforderungen schnellstmöglich umzusetzen.

Im Jahr 2011 gab es in ganz Österreich 1.973.979 Wohngebäude und davon wurden 47 % vor 1980 gebaut (siehe Abbildung 1). Die Wohnungsanzahl in Österreich im Jahr 2011 betrug 4.441.408, wovon 66 % vor 1980 errichtet wurden [8].

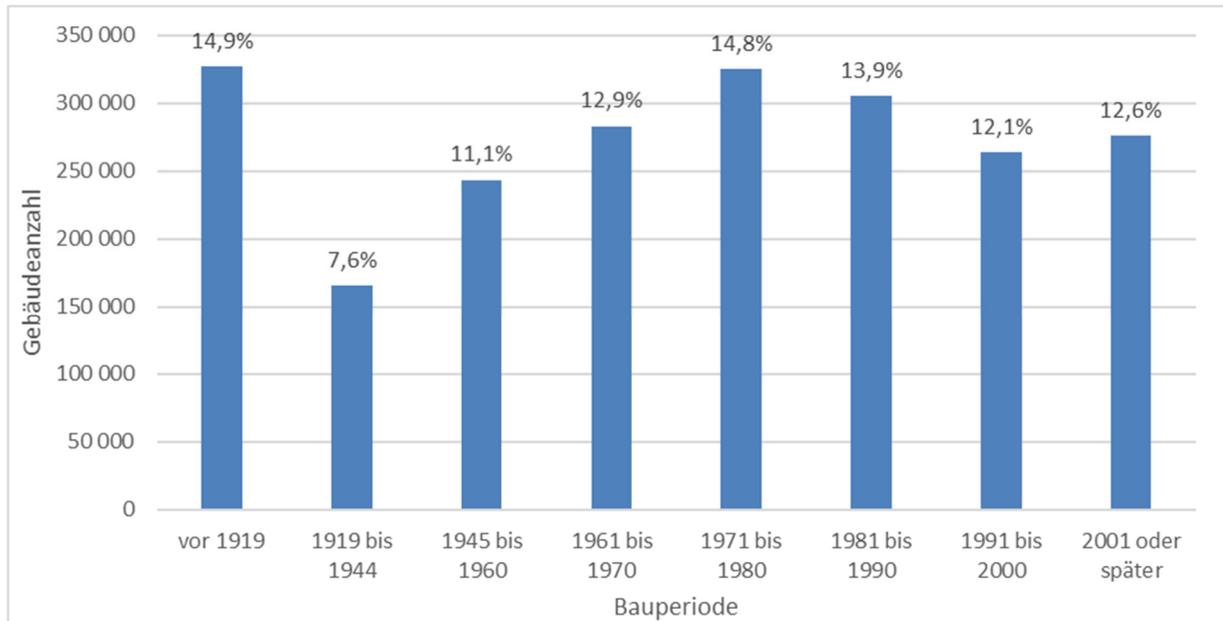


Abbildung 1 Gebäude in Österreich nach dem Errichtungsjahr (Stand 2011)) [8]

Bei der Datenerhebung im Jahr 2014 standen in Österreich 22.471 Profanbauten unter Denkmalschutz [9]. Bei diesen denkmalgeschützten Gebäuden, bei erhaltenswerten Fassaden, schmalen Außentreppen, Balkonen, Gassen, Passagen, Durchfahrten oder bei Grenzbebauungen sind Dämmmaßnahmen an der Außenseite nicht möglich. Die gesamtheitliche Betrachtung einer thermischen Sanierungsmaßnahme zeigt jedoch, dass Mehrfamilienwohnhäuser, die vor 1980 erbaut wurden, ein Einsparungspotenzial von 66 % bis 76 % aufweisen [10] (siehe Kapitel 3.1).

1.2 Begründung der Forschungsthematik

Das oben beschriebene Einsparungspotential soll nicht ungenutzt bleiben und somit sind Innendämmungen die einzige effiziente und ressourcenschonende, thermische Sanierungsmaßnahme für Gebäude mit diesen hohen Ansprüchen.

Im Sockelbereich führen jedoch geometrisch-, material- und oftmals auch umgebungsbedingte Wärmebrücken (Einfluss durch Möbel, Vorhänge, abgehangene Decken etc.) zu Kondensation und Schimmelbildung. Innenraumdämmungen können auf Grund von vorhandenen Innenwänden, Zwischendecken und Fundamentplatten nicht wärmebrückenfrei angebracht werden, sodass die Sanierungsmaßnahmen sorgfältig geplant werden müssen, um Bauschäden zu vermeiden.

Durch die Verschiebung des Taupunktes in die Bauteilkonstruktion und die damit einhergehende Gefahr von auftretenden Schäden, ist es notwendig, die Systematiken der Montage von Innendämmungen so gut wie möglich zu erfassen und möglichst kostengünstige Planungsmethoden zu entwickeln. Gründerzeithäuser wurden ohne Abdichtungen ausgeführt und sind daher Sonderfälle für geplante Innendämmvarianten. Im WTA Merkblatt 6-2 [11], dem einzigen Regelwerk, das detaillierter auf die Beurteilung von Innendämmungen und instationäre, hygrothermische Simulationen eingeht, ist festgehalten, dass die Wassergehalte der einzelnen Bauteilschichten mit Grenzwassergehalten verglichen werden sollten. Jedoch gibt es keine genormten oder sonstig geregelten Grenzwassergehalte für das Ziegelmauerwerk oder die

Innendämmungen. Somit ist auf Erfahrungswerte bzw. auf bereits erfolgte Forschungsarbeiten zurückzugreifen. Da es für den Sonderfall der kapillaraktiven, diffusionsoffenen Innendämmung des Sockelbereichs bei Gründerzeithäusern keine Erkenntnisse in Hinsicht auf die Auswirkung der Innendämmmaßnahmen auf den veränderten Wassergehalt, die instationäre, hygrothermische, zweidimensionale Simulationsmethodik und die Beeinflussung der feuchte- und temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeiten gibt, wurden diese Untersuchungen durchgeführt. Bei vorangegangenen Forschungsarbeiten wurde das Softwareprodukt DELPHIN oder WUFI für die Simulationen herangezogen. In dieser Arbeit konnte durch die Messung wichtiger Materialparameter eine Implementierung in beiden der am deutschsprachigen Markt gebräuchlichsten Programme durchgeführt werden. Das ermöglicht zusätzlich zu den Messungen eine Validierung der Ergebnisse.

Die ÖNORM B 3355 [12] schreibt bei Durchfeuchtungsgraden ab 20 % flankierende Maßnahmen, wie Abdichtungen oder Reduzierung von Salzgehalten, vor. Das WTA Merkblatt 6-5 [13] schlägt prinzipiell Individualprüfungen vor und in Hinsicht auf die Frostbeständigkeit einen Sättigungsgrad von maximal 30 %. Diese Sättigungsgrade wurden bei den Simulationen und auch bei den Messungen überschritten. Aus diesem Grund sind weitere Forschungen notwendig, um die Auswirkungen der hohen Wassergehalte beurteilen zu können.

Die erforderlichen instationären, hygrothermischen Simulationen sind sehr zeit- und kostenintensiv und sollten nur von Fachleuten durchgeführt werden, die über ein hohes Detailwissen verfügen, um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten.

Durch die Untersuchung der Sockelzone von Gründerzeitgebäuden, die den kritischsten Bereich darstellt, werden maßgebliche Erkenntnisse für die Verarbeitung von Innendämmungen erzielt. Die in dieser Dissertation gewonnenen Erfahrungen können auf viele künftige Sanierungsmaßnahmen angewendet und die notwendigen hochpreisigen Simulationen reduziert werden.

1.3 Ziele und Vorgaben

Die zur Anwendung kommenden Innendämmsysteme sind kapillaraktiv und diffusionsoffen. Es handelt sich einerseits um einen hochmodernen Innendämmputz aus Aerogel, der in Österreich erst im Jahr 2013 seine Markteinführung hatte. Andererseits wird eine ökologische Aufsprühzellulose verwendet, die bereits in vorangegangenen Forschungsprojekten [14] [15] [16] gute Ergebnisse lieferte und somit für die notwendigen Vergleichszwecke sehr gut geeignet ist.

Die Anwendung von Innendämmsystemen in Kombination mit hohen Wassergehalten und auch deren Simulation stellt die Anwender, die Dämmungshersteller und auch die Planer vor große Herausforderungen. Die Normen und Richtlinien berücksichtigen nur eindimensionale Problemstellungen. Weiter fordern sie entweder die Unterbindung der Feuchtezufuhr durch flankierende Maßnahmen wie Abdichtungen oder stellen Grenzwerte in Hinsicht auf maximale Feuchtegehalte auf, die bei vielen Sockelbereichen von Gründerzeithäusern nicht eingehalten werden.

Somit galt es mit Hilfe der vorliegenden Untersuchungen die praktische Anwendbarkeit der oben genannten Innendämmsysteme in einem Gründerzeithaus zu untersuchen. Es sollte das Verhalten am Objekt untersucht werden und auch die praktische Anwendung, sodass

Schäden am Objekt vermieden werden. Die bestmöglichen Anwendungsmöglichkeiten, aber im Gegenzug auch die zu vermeidenden Anwendungsbereiche sollten untersucht werden. Durch die Gewissheit der schadensfreien Anwendung durch Messung in Kombination mit Simulationen sollte mehr Verlässlichkeit und Sicherheit geboten werden.

In Bezug auf die Planung und somit auf die Simulationen sollten die Möglichkeiten und Grenzen der Modellierung und der Interpretation der Ergebnisse in Hinsicht auf den sehr hohen Wassergehalt und dessen Auswirkungen aufgezeigt werden. Damit zusammenhängend sollte besonders die feuchte- und temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit untersucht werden. Die Relation des Einflusses vom Feuchtegehalt zur Temperatur, aber auch deren Auswirkung auf die Bestandskonstruktion und die Sanierungsmaßnahmen mittels Innendämmsystemen gelten als Zielvorgabe.

Im Sinne einer hochbautechnischen Gesamtbetrachtung sollten nicht nur bauphysikalische Detailanalysen erfolgen. Auch die Auswirkungen der Innendämmmaßnahmen auf das Gesamtgebäude in Hinsicht auf Wirtschaftlichkeit, energetische Gesamtanalysen, das sich verändernde Innenraumklima und weitere hochbautechnisch relevante Themenbereiche in Zusammenhang mit den Dämmmaßnahmen sollten dargestellt werden.

1.4 Geltungsbereich und Einschränkungen

Die Untersuchungen der Dissertation wurden an einem Gründerzeitgebäude aus dem Jahr 1850 durchgeführt. Die Randbedingungen und Materialparameter wurden sehr sorgfältig und detailliert gemessen, analysiert und in zwei verschiedene Simulationsprogramme implementiert. Da sich bereits innerhalb des untersuchten Gebäudes verschiedenste Variationen der gleichen Materialparameter für das gleiche vorgefundene Material (z.B. Ziegel) vorfinden, sind die Ergebnisse nicht bedenkenlos auf alle Gründerzeitgebäude anwendbar.

Das Standortklima stellt im Vergleich mit anderen Klimaregionen kein Extremklima dar. Daher sind die Resultate dieser Dissertation an den jeweiligen Standort anzupassen.

Zur Anwendung kamen zwei kapillaraktive, diffusionsoffene Dämmstoffe, die durch die Art der Aufbringung am Bestandsgebäude und deren Materialparameter sehr individuelle Verhaltensmuster aufzeigen. Durch die diffusionsoffenen Materialien und deren gute Feuchtetransporteigenschaften wird die Austrocknung auch nach innen forciert. Das wäre bei diffusionsdichten Innendämmsystemen nicht der Fall und daher können nicht alle Ergebnisse für anderwärtige Systeme, ohne Adaptierung, angewendet werden.

Die Analysen erfolgen ein- und zweidimensional, womit dreidimensional beeinflusste Bereiche nicht berücksichtigt werden.

Jedes Gebäude ist einzigartig. Die Einzigartigkeit spiegelt sich beispielsweise in der Höhe des fertigen Fußbodens über dem angrenzenden Gelände wider. Dies wirkt sich auf den Einflussbereich der aufsteigenden Feuchtigkeit im Sockelbereich aus. Die Einflüsse von Fenstern, Heizkörpernischen, haustechnischen Einbauten etc. müssen ebenfalls bei der Anwendung der Resultate berücksichtigt werden.

1.5 Übersicht der Dissertation

Der Fokus dieser Dissertation liegt auf dem bauphysikalischen Verhalten des Anschlussbereiches im Sockel bei Sanierungsmaßnahmen mittels kapillaraktiver, diffusionsoffener Innendämmung.

In Kapitle 2 wird eine Übersicht zum derzeitigen Stand der Wissenschaft gegeben. Relevante Normen und Richtlinien und die darin enthaltenen Nachweisverfahren sowie die Lücken zum gegenständlichen Forschungsthema werden aufgezeigt. Die theoretischen Grundlagen zur Simulationsberechnung werden anhand zweier gängiger deutschsprachiger Programme vorgestellt. Daraufhin werden die Besonderheiten des hier betrachteten Detailbereiches durch die Lage der Sanierungsmaßnahmen am Gebäude und die Bauweise der Gründerzeithäuser beschrieben.

Um einen gesamtheitlichen, hochbautechnischen Blick auf die Problematik der Ausführung zu erhalten, wurden in Kapitel 3 Analysen und Ergebnisse zum allgemeinen Einsparungspotential von Gründerzeitgebäuden und zur Behaglichkeit dargestellt. In weiterer Folge werden die Montagekosten, der Mietentgang durch die verlorene Nutzfläche und die möglichen Heizkostensparnisse für die Innendämmungen beschrieben. Der allgemeine Überblick wird abgeschlossen mit Analysen in Hinsicht auf die Auswirkungen der Sanierungsmaßnahmen auf die sommerliche Überwärmung, den Schallschutz und die Akustik sowie die Auswirkungen von erhöhtem Wassergehalt in Ziegelmauerwerk auf die Tragfähigkeit.

Anhand eines ca. 170 Jahre alten Gebäudes wurden im nachfolgenden Kapitel 4 die theoretischen Vorgehensweisen anhand der Montage eines Aerogel und eines Zellulose Innendämmsystems untersucht. Es wurden die Außen- und Innenklimabedingungen, die Materialparameter, die Salzgehalte, der Energieverbrauch sowie die Temperatur- und Feuchtigkeitsverläufe in den ein- und zweidimensionalen Bereichen der Sockelzone gemessen, aufbereitet und analysiert.

Anhand der Ergebnisse aus den Insitu-Versuchen konnten Modellbildungen für vergleichende Simulationen in Kapitel 5 durchgeführt werden. Dazu wurden die Messungen aus Kapitel 4 in die bereits vorgestellten Programme aus Kapitel 2 implementiert. Durch die Simulationen konnten auch weitere Untersuchungen durchgeführt werden, welche auf Grund der notwendigen zerstörerischen Maßnahmen am Gebäude durch Messungen nicht möglich waren.

Die erstellten Modelle samt Rand- und Übergangsbedingungen wurden in Kapitel 6 Sensitivitätsanalysen und Variantenstudien unterzogen. Die dadurch erhaltenen Ergebnisse werden in diesem Kapitel dargestellt und auf die in Kapitel 3 allgemein beschriebenen Einsparungspotentiale, die Behaglichkeit und den Wassergehalt im Ziegelmauerwerk bezogen. Somit wird der Bogen von den allgemeinen Betrachtungen, zu den Detailuntersuchungen und vice versa gespannt.

Als Abschluss erfolgt in Kapitel 7 die Zusammenfassung der Arbeit samt Diskussion und Ausblick.

2 Stand der Wissenschaft

Viele Normen und Richtlinien regeln hygrothermische Nachweisführungen. Aber komplexe, mehrdimensionale, instationäre, hygrothermische Bauteilsimulationen lassen sich erst durch leistungsfähige Computer umsetzen. Einige Bereiche der Simulationen sind noch sehr jung. Daher gibt es Lücken in der Normierung, Differenzen bei den Simulationsprogrammen, die mit unterschiedliche Modellansätzen arbeiten und gänzlich oder ungenügend erforschte Bereiche des Themengebietetes. Daher wird in diesem Kapitel eine Übersicht zum momentanen Stand der Wissenschaft geschaffen.

2.1 Normen und Richtlinien

In Österreich stehen ca. 2.600 gültige nationale Normen für die Bauplanung und -ausführung und weitere 2.500 gültige nationale Normen für die Regelung von Bauprodukten zur Verfügung. Zusätzlich gibt es internationale Normen, Merkblätter und Richtlinien. Daher kann an dieser Stelle nur eine Auswahl der zur Verfügung stehenden Unterlagen, die die Dissertation betreffen, dargestellt werden. Im nachfolgenden Kapitel wird der Fokus bewusst auf die nicht normativ erfüllten Angaben zur Problemstellung der vorliegenden Dissertation gelegt. Damit wird aufgezeigt, wo Lücken von bestehenden Regelungen vorhanden sind, inwiefern auf vorangegangene Forschungsarbeiten zurückgegriffen werden musste und wo die Erkenntnisse der Dissertation einfließen können.

2.1.1 ÖNORM B 3355 Trockenlegung von feuchtem Mauerwerk

Die ÖNORM B 3355 [12] behandelt allgemein anerkannte Verfahren zur Diagnose, Planung und Überwachung der Trockenlegung von feuchtem Mauerwerk. Flankierende Maßnahmen werden ebenfalls beschrieben, sodass erneute Durchfeuchtungen nach der Trockenlegung begrenzt oder verhindert werden können. Bei Durchfeuchtungsgraden ab 20 % werden flankierende Maßnahmen wie Abdichtungen oder Reduzierung von Salzgehalten vorgeschrieben. In der Norm werden Kategorien der bauschädlichen Salze, zugehörige Grenzwerte, Bewertungsstufen zur Risikoeinschätzung und empfohlene flankierende Maßnahmen bei zu hoher Salzbelastung behandelt.

2.1.2 ÖNORM B 8110-2 Wärmeschutz im Hochbau

In der ÖNORM B 8110-2 [17] werden Nachweise für ebenflächige Bauteilaufbauten geregelt, womit mehrdimensionale Nachweise (2D und 3D) ausgeschlossen sind. Es werden nachweisfreie Aufbauten dargestellt, wobei nur Innendämmungen in Kombination mit Außendämmungen angeführt werden. Der Wärmedurchlasswiderstand der Innendämmung samt Mauerwerk darf bei einer massiven Außenwand maximal 20 % des Gesamtwärmedurchlasswiderstandes betragen. Es wird auch ein vereinfachter Nachweis in Anlehnung an die ÖNORM EN ISO 13788 [18] angeführt, der jedoch nur für Holzriegelbauten zu verwenden ist. In weiterer Folge gibt es Angaben für ein detailliertes Rechenverfahren, wobei jedoch auf die ÖNORM EN 15026 [19] verwiesen wird und nur einzelne Randbedingungen wie Wärmeübergangswiderstände (siehe Kapitel 5.2) beschrieben werden. Für die Berücksichtigung des Erdkörpers oder die Beurteilungskriterien wird auf weitere Normen bzw. Fachliteratur verwiesen.

Für das vereinfachte Verfahren darf das anfallende Tauwasser bei nicht wasseraufnahmefähigen Schichten, beispielsweise zwischen Schwerbeton und Luft, 500 g/m² nicht überschreiten.

Ein relevantes Beurteilungskriterium in Hinsicht auf den Feuchtezustand ist die Vermeidung des mittleren Wärmestroms im Winter um mehr als 10 %.

2.1.3 ÖNORM EN 15026 Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen

Die ÖNORM EN 15026 [19] regelt das Simulationsverfahren für instationäre Wärme- und Feuchteübertragung im eindimensionalen Bereich. Es werden Konvektionen durch Öffnungen und Risse, zweidimensionale Effekte wie beispielsweise aufsteigende Feuchte, Wärmebrückeneffekte oder Schwerkrafteinflüsse, hydraulische, osmotische und elektrophoretische Kräfte sowie mittlere Tagestemperaturen im Bauteil über 50 °C explizit ausgeschlossen. Trotz dieser Beschränkungen wird die Norm im deutschsprachigen Bereich auch für Simulationen im mehrdimensionalen Bereich herangezogen. In der Norm sind viele notwendigen Kriterien wie Randbedingungen, Übergangskoeffizienten und Berechnungsangaben enthalten. Jedoch werden keine konkreten Angaben für die bautechnische und bauphysikalische Bewertung gemacht. Diese Norm dient somit mehr dem Hintergrundwissen und den Programmierern von Software Produkten, als dem praktischen Anwender zur konkreten Lösung von instationären, hygrothermischen Problemstellungen.

2.1.4 ÖNORM EN ISO 10211 Wärmebrücken im Hochbau

In der ÖNORM EN ISO 10211 [20] werden mehrdimensionale Wärmebrücken behandelt, jedoch sind hygrische Randbedingungen und Effekte nicht berücksichtigt. Die Angaben zur Berechnung betreffen rein thermische Aspekte. Dennoch werden nicht nur Angaben zur Berechnung daraus genutzt, sondern auch Abmessungen in Hinsicht auf die einzubeziehenden Bauteildimensionen. Bewertungsvorgaben in Hinsicht auf anwendbare Grenzwerte bei hohen Wassergehalten oder bei der Anwendung von Innendämmung sind keine enthalten.

2.1.5 ÖNORM EN ISO 13370 Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden

Mit Hilfe der Angaben in der ÖNORM EN ISO 13370 [21] können thermische Problemstellungen für erdberührte Bauteile gelöst werden. Die Norm zielt auf die Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden ab. Instationäre, hygrothermische, mehrdimensionale Simulationen werden nicht behandelt.

2.1.6 ÖNORM EN ISO 13788 Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen

Bei dem vereinfachten stationären, hygrothermischen Berechnungsverfahren der ÖNORM EN ISO 13788 [18] bleiben feuchtegehaltsbedingte Schwankungen der Materialparameter, Feuchtespeicher- und Feuchtetransportmechanismen, Konvektion und hygroskopisches

Verhalten unberücksichtigt. Außerdem werden keine zusätzlichen Feuchtequellen wie Grundwasser oder die Einwirkung des Niederschlags in das Bauteil in die Berechnung einbezogen. Es werden vereinfachte Randbedingungen, Übergangswiderstände und Beurteilungskriterien für den eindimensionalen, stationären Zustand angeführt. Instationäre Simulationsmethoden für die Beurteilung und Bewertung mehrdimensionaler Problemstellungen werden nicht behandelt.

Bezüglich der Tauwasserbildung gibt es eine Anmerkung, dass bei 200 g/m^2 ein Abfließen bei nicht absorbierenden Flüssigkeiten sehr wahrscheinlich ist. Dies ist Hinsicht auf die Tauwasserbildung bei Verwendung von Innendämmungen für diese Arbeit relevant.

2.1.7 DIN 4108-3 Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden

In dieser deutschen Norm [22] wird analog der ÖNORM EN ISO 13788 [18] ein stationäres Verfahren erläutert sowie Angaben zu Rand-, Übergangs- und Anfangsbedingungen gemacht.

Die maximale Tauwassermenge für allgemeine außenluftberührte Bauteile beträgt 1.000 g/m^2 und 500 g/m^2 bei nicht kapillar aufnahmefähigen Berührungsflächen.

2.1.8 WTA Merkblätter

Die WTA Merkblätter (Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V.) bilden zum derzeitigen Wissensstand das einzige normativ vergleichbare, deutschsprachige Regelwerk, das auf hygrothermische Simulationen im Detail eingeht. Hier ist insbesondere das Referat 6 Bauphysik hervorzuheben.

Im ersten Teil wird ein grober Leitfaden für instationäre, hygrothermische Problemstellungen beschrieben. Es wird jedoch auch darauf hingewiesen, dass jedes Problem einzigartig ist und somit kein allgemeingültiges Lösungsverfahren bestimmt werden kann. Der zweite Teil beschäftigt sich mit den theoretischen Grundlagen, den Materialparametern, den Rand- und Anfangsbedingungen, der Vereinfachung von Problemstellungen und der Beurteilung der Rechenergebnisse. Es werden mehrdimensionale Modelle behandelt und auf konkrete Grenzwerte sowie weiterführende WTA Merkblätter für detaillierte Ergebnisinterpretationen verwiesen. Jedoch werden bei den Wassergehalten in den einzelnen Schichten nur die Grenzwassergehalte erwähnt, die nicht zwingend vorhanden sein müssen. Somit bleibt die Beurteilung der in dieser Dissertation thematisierten Problemstellung offen.

Im vierten Teil des Regelwerks wird speziell auf Innendämmungen eingegangen. Jedoch treffen die dort beschriebenen Nachweisverfahren weder auf kapillaraktive, diffusionsoffene Innendämmsysteme, noch auf Bereiche, die zusätzliche Feuchtequellen wie aufsteigende Feuchtigkeit besitzen, zu. Somit wird auf den fünften Teil verwiesen, der diese Aspekte miteinbezieht. Es wird darauf hingewiesen, dass die beschriebenen Nachweissysteme von instationären, hygrothermische Simulationen keine exakte Nachbildung der Realität sind, sondern ein auf der Sicherheit der Beurteilung liegendes System bilden. Die Simulationen dienen der Varianten- und Sensitivitätsanalyse und sollten auch bei komplexen Problemstellungen mit einfachen Aufgaben begonnen und mit wachsender Erkenntnis gesteigert werden. Zusätzlich wird empfohlen, die

Bestandskonstruktionen zu analysieren und erst in weiterer Folge die Sanierungsmaßnahmen mittels Innendämmung zu simulieren. Die Bestandskonstruktion sollte gesondert in Hinsicht auf aufsteigende Feuchtigkeit und Salzbelastungen untersucht werden. Weiter weist das Merkblatt Bewertungskriterien für Frostbeständigkeit, Gleichgewichtsfeuchte bei gipshaltigen Untergründen und Porenfeuchte in Holzeinbauteilen aus. Jedoch gibt es keine Angaben in Hinsicht auf Grenzwerte der Wassergehalte der einzelnen Bauteilschichten.

2.2 Rechenmodelle von DELPHIN und WUFI

2.2.1 DELPHIN

Das Simulationsprogramm DELPHIN wird für verknüpfte Problemstellungen von Wärme-, Feuchte- und Stofftransporten in kapillarporösen Baustoffen verwendet. Es wurde an der TU Dresden [23] entwickelt und wird stetig erweitert. Gegenüber anderen Programmen bietet es den großen Vorteil, dass beinahe alle verwendeten Parameter einfach veränderbar sind und dies den Einsatz in Forschungsprojekten sehr erleichtert. Im nachfolgenden ist das theoretische Rechenmodell der Software DELPHIN [23, 24] aufgezeigt, welche unter anderem mit den Bilanzgleichungen aus Formel 1 und Formel 2 arbeiten, die in dieser Forschungsarbeit einen wesentlichen Bestandteil bilden.

Formel 1 Interne Wärmebilanzgleichung

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho_{REV}^U = \frac{\partial}{\partial x} (j_{diff}^Q + u_l * j_{conv}^{ml} + u_g * j_{conv}^{mg} + h_v * j_{conv}^{mv}) + \sigma_u^Q$$

ρ_{REV}^U	innere Energiedichte [W/m ³]
j_{diff}^Q	Wärmefluss, Wärmeleitung & Wärmestrahlung & Konvektion [W/m ²]
u_l	spezifische Energieinhalt, flüssig [J/m ³]
j_{conv}^{ml}	konvektiver Wärmestrom, flüssig [kg/m ² *s]
u_g	spezifische Energieinhalt, gasförmig [J/m ³]
j_{conv}^{mg}	konvektiver Wärmestrom, gasförmig [kg/m ² *s]
h_v	spezifische Enthalpie, Dampf [J/kg]
j_{diff}^{mv}	Wasserdampfdiffusion, Dampf [kg/m ² *s]
σ_u^Q	Wärmequellen und -senken [J/m ³]

Formel 2 Feuchtemassenbilanzgleichung

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho_{REV}^{ml+v+i} = \frac{\partial}{\partial x} (j_{diff}^{ml} + j_{conv}^{mv} + j_{diff}^{mv}) + \sigma_{REV}^{mw+v+i}$$

ρ_{REV}^{ml+v+i}	Feuchtemasse [kg/m ³]
j_{conv}^{ml}	kapillarer bzw. konvektiver Flüssigwassertransport, flüssig [kg/m ² *s]
j_{diff}^{mv}	Wasserdampfdiffusion, Dampf [kg/m ² *s]
j_{conv}^{mv}	konvektiver Wasserdampftransport, Dampf [kg/m ² *s]
σ_{REV}^{mw+v+i}	Feuchtequellen und -senken [kg/m ³]

Die entscheidende Komponente für den kapillaren Flüssigwassertransport j_{conv}^{ml} ist detailliert herauszuheben. Hier wird das Kapillardruckgefälle als treibendes Potential und zusätzlich eine Gravitationskomponente $\rho_l * g$ berücksichtigt. Somit kann in DELPHIN auch die Schwerkraft berücksichtigt werden.

Formel 3 kapillarer Flüssigwassertransport

$$j_{conv}^{ml} = -Kl(w) \left(\frac{\partial p_c}{\partial x} + \rho_l * g \right)$$

j_{conv}^{ml}	kapillarer bzw. konvektiver Flüssigwassertransport, flüssig [kg/m ² *s]
$Kl(w)$	Flüssigwasserleitfähigkeit [s]
∂p_c	Kapillardruckgefälle [Pa]
ρ_l	Dichte von Wasser [kg/m ³]
g	Erdbeschleunigung [m/s ²]

2.2.2 WUFI

Mit Hilfe der Software *Wärme und Feuchte Instationär* (WUFI) [25, 26] können ebenfalls instationäre, hygrothermische ein- und mehrdimensionale Simulationen durchgeführt werden. Das Programm wurde am *Fraunhofer Institut* entwickelt, ist in der Praxisanwendung weit verbreitet und wird über Forschungsprojekte sukzessive weiterentwickelt. Das Programm ist äußerst bedienerfreundlich, lässt jedoch nicht so viele Eingriffe in die Parametrierung zu, wie die Software DELPHIN. Nachstehend werden in Formel 4 und Formel 5 die Bilanzgleichungen [27] beschrieben.

Formel 4 Wärmebilanzgleichung

$$\frac{dH}{d\vartheta} * \frac{\partial \vartheta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial \vartheta}{\partial x} \right) + h_V \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\delta}{\mu} * \frac{\partial p_D}{\partial x} \right) + S_h \quad [J/(m^3s)]$$

Formel 5 Feuchtebilanzgleichung

$$\rho_w \frac{\partial u}{\partial \varphi} * \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho_w D_w \frac{\partial u}{\partial \varphi} * \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\delta}{\mu} * \frac{\partial p_D}{\partial x} \right) + S_w \quad [kg/(m^3s)]$$

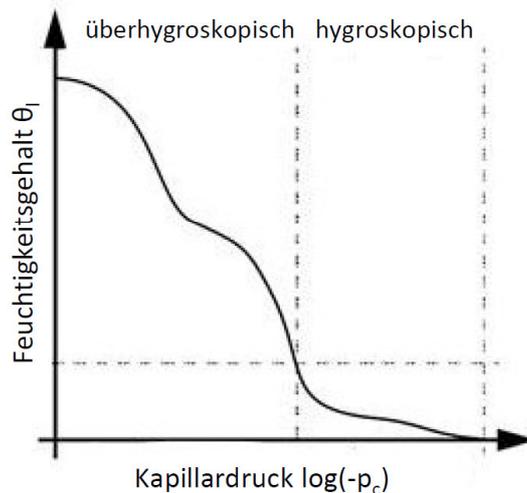
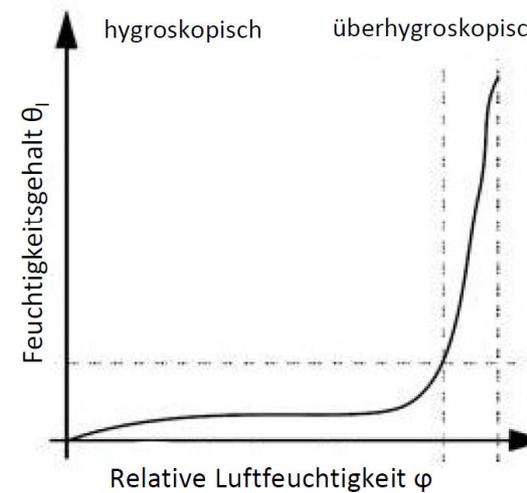
$\frac{dH}{d\vartheta}$	Wärmekapazität des feuchten Baustoffs [J/m ³ K]
$\frac{\partial \vartheta}{\partial t}$	Zeitliche Änderung der Temperatur [K/s]
H	Enthalpie des feuchten Baustoffs [J/m ³]
ϑ	Temperatur [°C]
λ	Wärmeleitfähigkeit des feuchten Materials [W/(mK)]
h_V	Verdunstungsenthalpie des Wassers [J/kg]
δ	Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizient in Luft [kg/msPa]
p_D	Wasserdampfpartialdruck [Pa]
μ	Dampfdiffusionswiderstandszahl des trockenen Baustoffs [-]
S_h	Zusätzliche Wärmequellendichte [W/m ³]
ρ_w	Dichte des Wassers [kg/m ³]
$\frac{du}{d\varphi}$	Feuchtespeicherfähigkeit des Materials [kg/m ³]
$\frac{\partial \varphi}{\partial t}$	Zeitliche Änderung der relativen Luftfeuchte [1/s]
u	Wassergehalt [m ³ /m ³]
φ	relative Luftfeuchte [-]
D_w	Flüssigtransportkoeffizient [m ² /s]
S_w	Zusätzliche Feuchtequellendichte [W/m ³]

2.2.3 Gegenüberstellung maßgeblicher Programmunterschiede von DELPHIN und WUFI

Da im Zuge der Forschungsarbeit beide Programme zum Einsatz kamen und deren Ergebnisse auch verglichen wurden, sind maßgebliche Unterschiede in Tabelle 1 aufgelistet.

Tabelle 1 Vergleich maßgeblicher Bereiche der Programme DELPHIN und WUFI Pro

DELPHIN	WUFI
Mathematische Modellierung:	
Finite-Differenzen-Methode [24]	Finite-Volumen-Methode [26]
Es wird vorausgesetzt, dass ein diskretisiertes Strömungsfeld mit orthogonalem Gittern vorhanden ist. Dieses ersetzt die Differentialquotienten der Grundgleichungen mit entsprechenden Differenzenquotienten. Somit erfordert die FDM eine aufwendige Transformation von komplexen Konfigurationen in rechteckige Gitternetze.	Bei der FVM kann von aufwendigeren Transformationen abgesehen werden. Bei dieser Methode werden die diskreten Erhaltungssätze für jedes Volumenelement im Strömungsfeld erfüllt.
Dimension der hygrothermischen Bauteilsimulation:	
ein-, zwei- und dreidimensional	ein- und zweidimensional
Feuchtegehaltsparemeter:	
<p>Θ_{Por} [m^3/m^3]: Ist die Porosität des Materials und muss größer oder gleich Θ_{eff} sein. Er wird nur für die Kontrolle von Dampf- und Lufttransportfunktionen verwendet. Der Einfluss auf das Simulationsergebnis ist gering.</p> <p>Θ_{eff} (Langzeit) [m^3/m^3]: Wird in der Simulation als Endpunkt der Feuchtespeicherfunktion verwendet und durch Unterwasserlagerung gemessen.</p> <p>Θ_{80} [m^3/m^3]: Damit wird die hygroskopische Feuchtigkeit bei 80 % relativer Luftfeuchte bezeichnet. In der Simulation wird der Wert nicht verwendet, aber er ist dennoch in den Materialparametern der Datensätze gespeichert.</p> <p>Θ_{cap} (Kurzzeit) [m^3/m^3]: Dieser Wert wird als kapillare Sättigung bezeichnet und hat ebenfalls keine Verwendung in der Simulation, ist aber trotzdem im Programm gespeichert.</p> <p>A_w-Wert [$kg/m^2\sqrt{s}$]: Der Wasseraufnahmekoeffizient wird nicht direkt in der Simulation</p>	<p>w_{max} [kg/m^3]: Ist der maximale Wassergehalt im Übersättigungsbereich und ist größer oder gleich w_f. Da die relative Luftfeuchte immer 100 % ist, ist im Übersättigungsbereich kein eindeutiger funktionaler Zusammenhang möglich.</p> <p>w_f [kg/m^3]: Ist die freie Wassersättigung und entspricht der Feuchtespeicherfunktion bei 100 % relativer Luftfeuchte. Kapillaraktive Materialien nehmen bei Wasserkontakt bis zu diesem Grenzwert saugend Feuchtigkeit auf.</p> <p>w_{80} [kg/m^3]: Wird als Bezugsfeuchtegehalt bezeichnet und ähnlich zu DELPHIN entspricht er dem Sorptionsfeuchtegehalt des Materials bei relativer Luftfeuchte von 80 %. Er dient der Erstellung der Feuchtespeicher- und Feuchtetransportfunktion.</p> <p>A_w-Wert [$kg/m^2\sqrt{s}$]: Der Wasseraufnahmekoeffizient wird zur Generierung des Flüssigtransportkoeffizienten benötigt, sofern dieser nicht vorhanden ist.</p>

verwendet, sondern zur Skalierung der Flüssigkeitsleitfähigkeitsfunktion benutzt.	
Feuchtespeicherfunktion (vgl. Kapitel 5.3.2):	
In DELPHIN wird der Kapillardruck [Pa] verwendet. Die Sättigung beim Wert 0 Pa entspricht 100 % relativer Luftfeuchtigkeit.	In WUFI wird die relative Luftfeuchtigkeit [%] herangezogen.
<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>Feuchtigkeitsbereich:</p>  <p>Feuchtigkeitsgehalt θ_l</p> <p>Kapillardruck $\log(-p_c)$</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>Feuchtigkeitsbereich:</p>  <p>Feuchtigkeitsgehalt θ_l</p> <p>Relative Luftfeuchtigkeit φ</p> </div> </div> <p>Abbildung 2 Feuchtigkeits-speicherfunktionen: links in Abhängigkeit vom Kapillardruck und rechts von der relativen Luftfeuchtigkeit [28]</p>	
Verwendeter Gradient beim Flüssigwassertransport lt. WTA 6-2 [11]:	
Es wird der Kapillardruckgradient verwendet. Dieser kann verwendet werden, wenn der Gasdruck konstant ist und keine anderen äußeren Druckbedingungen (z.B. drückendes Grundwasser) vorliegen.	Der Gradient der relativen Luftfeuchte wird genutzt. Er kann verwendet werden, wenn die Temperaturabhängigkeit keine Rolle spielt, keine Schwerkraftwirkung vorhanden ist und die Feuchteprozesse hauptsächlich im hygroskopischen Bereich stattfinden.
Temperatur- und Feuchteabhängige Wärmeleitfähigkeit:	
Die Berechnung der einzelnen Wärmeleitfähigkeitszuschläge erfolgt über unterschiedliche Modelle. Eine detaillierte Beschreibung ist in Kapitel 5.3.3 dargestellt.	
Schimmelindexberechnung:	
Die Ermittlung des Schimmelpotentials erfolgt mittels Temperatur und relativer Luftfeuchte nach dem VTT-Modell [29].	Die Berechnung der Schimmelbildung erfolgt mittels Temperatur und relativer Luftfeuchte nach dem Isoplethen Modell [30].
Schlagregen (vgl. Kapitel 5.1)	
In DELPHIN 6.1 ist ein Modell nach DIN EN ISO 15927-3 [31] und ein Abminderungskoeffizient für den Schlagregen implementiert. Es werden jedoch Geländeunebenheitsfaktor, Topographiefaktor, Hindernisfaktor und Wandfaktor nicht explizit eingegeben,	In der Software WUFI ist einerseits ein Modell mit Schlagregenkoeffizienten und andererseits ein Modell aus dem ASHRAE Standard 160 - Criteria for Moisture-Control Design Analysis in Buildings [32] verfügbar [33].

sondern sind vom Programmhersteller vorgegeben.	
Wärme- und Wasserdampfübergangskoeffizient (vgl. Kapitel 5.2)	
Die Übergangskoeffizienten können individuell eingestellt werden.	Die Wärmeübergangswiderstände können individuell verändert werden, aber die Wasserdampfübergangskoeffizienten werden von der Software in Abhängigkeit von den Wärmeübergangskoeffizienten selbstständig berechnet.
Schwerkraft	
Einfluss der Schwerkraft kann berücksichtigt werden (siehe Formel 3).	Keine Berücksichtigung des Schwerkraftanteils.

Die unterschiedlichen Modelle und umgesetzten Programmierungen der beiden angeführten Programme werden in den nachfolgenden Kapiteln miteinander verglichen. Damit werden der Übereinstimmungsgrad und die Vor- und Nachteile der Software aufgezeigt.

2.3 Grundlagen zum untersuchten Detailbereich

Innendämmungen sind zwar nicht der Regelfall, werden durch denkmalgeschützte Bauwerke, erhaltenswerte Fassaden, schmale Außentreppen, Balkone, Gassen, Passagen, Durchfahrten oder bei Grenzbebauungen und deren thermische Sanierung immer mehr zur Notwendigkeit. (vgl. Kapitel 3.1) Die thermischer Sanierung erhöht nicht nur die Energie- und Ressourceneffizienz, sondern liefert auch einen wirksamen Beitrag die Wohnraumhygiene zu steigern. Die innere Oberflächentemperatur der Außenwand wird erhöht und somit können Oberflächenkondensationen und Schimmelbildungen vermieden und gleichzeitig die Behaglichkeit verbessert werden. (vgl. Kapitel 3.2) Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass die Räume durch die Dämmung im Innenbereich schneller aufgeheizt werden.

Der vermeintliche Nachteil, dass sich Innendämmmaßnahmen in Hinblick auf den sommerlichen Wärmeschutz negativ auswirken, da wirksame thermische Speicherfähigkeit reduziert wird, ist in Kapitel 3.4 thematisiert. Im Allgemeinen sind Innendämmungen in Hinsicht auf die Kondensation im Bauteilinneren kritischer zu betrachten als Außendämmungen (z.B. WDVS). In der Natur wird immer ein physikalisches Gleichgewicht angestrebt und so bewirkt das Zusammenspiel von Temperatur und Dampfdruck bzw. der relativen Luftfeuchtigkeit einen Dampfdiffusionsstrom in das Bauteil. Grundsätzlich werden drei unterschiedliche Verhaltensweisen der Innendämmsysteme lt. WTA 6-4 [34] unterschieden:

- diffusionsoffener Dämmstoff, ohne Feuchtigkeitsaufnahmemöglichkeit
- diffusionsoffener Dämmstoff, mit Feuchtigkeitsaufnahmemöglichkeit
- Dämmstoff mit ausreichendem Diffusionswiderstand

Durch die Dämmung an der Innenseite der Außenwand wird die Temperatur der Bestandskonstruktion verringert und das kann einen Kondensat-Ausfall im Bauteil hervorrufen. In weiterer Folge kann dieses Flüssigwasser abtropfen und Bauschäden bei angrenzenden Bauteilen verursachen. Es könnte auch gefrieren, wodurch Schäden an der Bausubstanz zu erwarten sind. Der Wassergehalt im Bauteil könnte auch die

Wärmeleitfähigkeit soweit erhöhen, dass diese den eigentlichen Zweck der Wärmedämmung nur mehr eingeschränkt oder gar nicht mehr erfüllt.

Um Innendämmsysteme instationär und mit realen Randbedingungen analysieren zu können, sind hygrothermische Simulationsberechnungen notwendig. Diese sind sehr zeit- und kostenintensiv und sollten nur von Fachleuten durchgeführt werden, die über ein hohes Detailwissen verfügen, um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten.

Um eine instationäre, hygrothermische Simulation durchführen zu können, werden die Außenklimabedingungen des Standortes benötigt. Diese sollten folgende Parameter umfassen [11]:

1. Temperatur [$^{\circ}\text{C}$]
2. relative Luftfeuchtigkeit [%]
3. Niederschlag [l/m^2]
4. Direktstrahlung auf die horizontale Fläche [W/m^2]
5. Diffusstrahlung auf die horizontale Fläche [W/m^2]
6. Langwellige Abstrahlung des Himmels [W/m^2]
7. Windrichtung [$^{\circ}$]
8. Windgeschwindigkeit [m/s]

Um die zur Verfügung gestellten Daten im Simulationsprogramm verwenden zu können, müssen diese auch noch dementsprechend aufbereitet werden. Auf Grund des Umfangs der notwendigen Daten für eine realistische Simulation und um diese aktuell zu halten, entstehen hohe Kosten für Anwender.

Die Innenklimabedingungen werden entweder als konstante Randbedingungen angenommen, von den zur Verfügung stehenden Außenklimabedingungen abhängig gemacht oder mittels Sensortechnik tatsächlich gemessen, was in der Praxis die Ausnahme darstellt. Hierzu werden die Temperatur und die relative Luftfeuchte der Innenräume benötigt. Um die Realität in den Simulationen abbilden zu können, sind die vorherrschenden Innenklimabedingungen anzuwenden, da unterschiedliche Raumnutzungen (Büro, Wohnraum, Schlafzimmer, Badezimmer...) auch unterschiedlichste Simulationsergebnisse hervorrufen.

Im Sockelbereich treffen jedoch noch weitere Randbedingungen auf das zweidimensionale Detail. Bei einer Unterkellerung unterscheidet sich das Klima des Untergeschoßes vom Klima des warmen Erdgeschoßes. Die normativen Innenklimabedingungen gehen von warmen, wohnraumähnlich genutzten Räumen aus. Da die Bedingungen für ungenutzte oder kühlere Räume weit streuen können, werden hierzu keine Angaben gemacht. Eine weitere Komponente bildet das angrenzende Erdreich. In den Gründerzeitgebäuden wurden keine Abdichtungen eingebaut und das eindringende Wasser hatte meist genug Zeit, um auch Salze in das Bestandsmauerwerk einzubringen. Zusätzlich ist in der Sockelzone der Spritzwasserbereich, welcher eine erhöhte Feuchtigkeit in den ersten 30 cm der Außenwand ab Geländeoberkante verursacht, zu berücksichtigen.

Die Randbedingungen bei erdnahen, erdberührten bzw. unterkellerten Aufenthaltsräumen verursachen durch gleichzeitige Einwirkung von Schlagregen, aufsteigender Feuchtigkeit, Spritzwasser und Wasserdampfdiffusion hohe Feuchtigkeitsbelastungen in den angrenzenden Bauteilen. Zusätzlich führen geometrisch-, material- und oftmals auch umgebungsbedingte Wärmebrücken zu Kondensation und Schimmelbildung im Sockelbereich. Die Randbedingungen der Sockelzone von Gründerzeitgebäuden sind somit

als äußerst feuchtebelastet und herausfordernd für die Modellierung von Simulationen einzustufen.

Durch vorangegangene Forschungsarbeiten sind zahlreiche Innendämmprojekte bekannt. Diese befassen sich jedoch selten mit der – besonders kritischen – Situation des erdnahen Bereichs. Ein Auszug der in der Literaturrecherche analysierten Projekte ist in Tabelle 2 dargestellt, wobei eine Kombination mehrdimensionaler, hygrothermischer, instationärer Simulation des Sockelbereichs für Gründerzeitgebäude ohne Abdichtungen und der daraus abgeleiteten feuchte- und temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeit bei keinem Projekt durchgeführt wurde.

Tabelle 2 Auszug der Literaturrecherche von Innendämmprojekten [35] [36] [37] [38] [39] [40] [41] [42] [43] [44]

Nr.	Projekt	Nutzung	Baujahr	Sanierung
1	Alte Spinnerei Felixdorf	Wohngebäude	1869	2011
2	Bauteil Z, Kabelwerk	Wohngebäude	Wiederaufbau nach WK II	2006
3	Donaufelder Straße	Wohngebäude	2012	-
4	Haus Gächter - Irving	Wohngebäude	2011	-
5	Landesarchiv Bregenz	Archiv	1931	2003
5	Landesmuseum Bregenz	Museum	1905	2012
6	Stadtvilla	Wohngebäude	1901	
7	Wohnhaus Stieldorf	Wohngebäude	1913	2006
8	Wohnhaus Wegerer	Wohngebäude	spätes 19. Jhd.	2010
9	Privatwohnung R. Schild	Wohngebäude	1960	2010
10	Makartvilla	Büro	-	2014
11	Workers residential home	Arbeiter Unterkunft	Vorkriegsbau	2014
12	OEKO-ID	Kindergarten	-	2013
13	Gründerzeithaus in Dresden	Wohngebäude	1895	1996
14	Fachwerkhaus in Niedersachsen	Wohngebäude	-	2002
15	Herrenschießhaus in Nürnberg	Büro	1583	2002
16	Bahnmeisterei in Senftenberg	-	-	-
18	Haus des Handwerks in Görlitz	-	1525 Wiederaufbau 1726	2004
19	ehemalige Salamander AG	Wohn-, Geschäfts- und Dienstleistungsimmobilie	1885	2009
20	Zöllnerviertel Weimar	Wohngebäude	~1923	2016
21	Landratsamt in Annaberg-Buchholz	Verwaltungsgebäude	-	2015

22	Rote Kaserne Frankfurt/Oder	Wohngebäude	1888	2011
23	Jugendzentrum Homburg/Efze	Jugendzentrum	1904	2014
24	Zollhäuser Leipzig	Wohngebäude	Ende 19. Jhd.	2012
25	The Metropolitan Gardens	Wohngebäude	1936	2015
26	Remensniderhaus 1521 in Herford	Wohn- und Geschäftshaus	1521	2001
27	Vierständler- Fachwerkhaus von 1750	Wohngebäude	1750	2000
28	Stadthaus von 1914	Wohngebäude	1914	2003
29	Stadtvilla in Bielefeld	Wohngebäude	-	2007
30	Samariterhaus Heidelberg	Wohn- und Geschäftshaus	1906	2008
31	Altbau in Duisburg Hochfeld	Wohn- und Bürogebäude	-	2010
32	Lange Gasse 7 in Quedlinburg	Wohngebäude	~1780	2004
33	Wasserturm Flensburg	Wohngebäude	1910	2011
34	KA 7 Kaiserstraße	Wohngebäude	1904	2013
35	Kellerinnendämmung 70er-Jahre Wohngebäude	Wohngebäude	~1975	2014
36	Bauernhaus Bayern Altötting	Wohngebäude	~1860	2011

Bei erhöhten Feuchtebelastungen, wie es bei der Sockelzone der Fall ist, werden kapillaraktive, diffusionsoffene Innendämmsysteme empfohlen [34]. Sie sind durch sehr gute Feuchte-transport- und Feuchtespeicherfunktionen für diesen Bereich geeignet. Eine diffusionsdichte Ausführung würde das zusätzliche Austrocknungspotential in den Innenraum verhindern.

Die in dieser Dissertation zur Anwendung gekommenen Dämmstoffe Aerogel Wärmedämmputz und Aufsprüzzellulose unterscheiden sich in vielen Bereichen voneinander.

Aerogel ist im Vergleich mit anderen marktüblichen Dämmstoffen ein sehr junges Produkt und wurde aus der Raumfahrt entwickelt. Durch die hohe Porosität (Luftanteil von 90 % bis 98 %) hat es eine hohe wärmedämmende Eigenschaft. Die Dämmplatte bzw. das Vlies besitzt eine Wärmeleitfähigkeit ab 0,015 W/mK. Das Aerogel kann auch in einer Vakuumdämmung genutzt werden mit einer Wärmeleitfähigkeit ab 0,007 W/mK. Als Zuschlagsstoff angewendet, entsteht ein Hochleistungsdämmputz, der unter anderem in dieser Dissertation zur Anwendung kam. Der auf Kalkbasis aufgebaute Putz ist für den Innen- und Außenbereich geeignet. Der diffusionsoffene und nicht brennbare Dämmputz wird seit 2013 in Österreich vertrieben, wobei die Anwendung hauptsächlich im Außenbereich stattfindet. Durch die niedrige Wärmeleitfähigkeit ($\lambda = 0,027$ W/mK) bietet sich eine Verwendung im Innenbereich besonders an, da geringere Dämmstoffdicken notwendig sind, um den gleichen thermischen Sanierungserfolg wie mit anderen Dämmstoffen zu erzielen und trotzdem wenig Nutzfläche verloren geht. Besonders für den

Leibungsbereich von Fenstern oder in Heizkörpernischen sind schmale Dämmungen vorteilhaft. In Hinsicht auf das Recycling und die Entsorgung des Wärmedämmputzes aus Aerogel bestehen noch keine Langzeiterfahrungen.

Die Zellulose ist im Gegensatz zum Aerogel Wärmedämmputz ein organischer, ökologischer „Lowtech“-Baustoff. Mit dem Zellulose Dämmstoff wurde schon in vorangegangenen Forschungsprojekten gearbeitet und somit konnten Erfahrungen gesammelt werden. In drei geförderten Vorgängerprojekten [14–16] wurden die nach wie vor hauptsächlich als Einblasdämmstoff verwendeten Altpapierflocken zu einem aufspritz- und verputzbaren (Innen-)Dämmsystem weiterentwickelt, das seit 2008 unter dem Markennamen Renocell insbesondere im Zuge von thermischen Sanierungen denkmalgeschützter Objekte zum Einsatz kommt [45]. Die Wärmeleitfähigkeit beträgt bei der Aufsprühzellulose 0,067 W/mK und ist somit ca. 2,5-mal höher als jene des Aerogel Dämmputzes. Die Erforschung des Verhaltens mit dem hohen Feuchtegehalt im Sockelbereich wird mit dieser Dissertation abgedeckt.

Der starke Kontrast der beiden Dämmstoffe zwischen dem hochdämmenden neuen Hightech-Produkt (Aerogel) und einem bewährten, gut erforschten und ökologisch unbedenklichen Lowtech-Produkt (Zellulose) war unter anderem der Anlass zur Auswahl dieser Innendämmsysteme. Außerdem sind diese Produkte durch die Art der Aufbringung in Gründerzeithäusern sehr empfehlenswert. Die äußerst starken Unebenheiten der gemauerten Außenwände und auch die runde Gewölbeform im Untergeschoß erfordern flexible Produktmontagen. Plattenförmige Dämmstoffe und Innendämmsysteme mit Unterkonstruktionen sind durch den zeitaufwändigen Einbau nicht empfehlenswert. Außerdem werden bei den beiden zur Anwendung kommenden Innendämmsystemen optimale hygrische Kontaktflächen geschaffen, die für die Austrocknung der durch Feuchtigkeit hochbelasteten Sockelzone notwendig sind.

Die Auswahl der Innendämmsysteme für die sehr hohen Ansprüche des Projektes war somit äußerst eingeschränkt, ergab damit aber auch zwei hochwertige und dennoch stark divergierende Produkte.

3 Hochbautechnischer Gesamtüberblick

In dem nachfolgenden Kapitel wird ein Überblick über maßgebliche hochbautechnische Bereiche und deren Beeinflussung durch Innendämmung gegeben. Zuerst wird das allgemeine Energieeinsparungspotential bei unsanierten Gründerzeithäusern aufgezeigt. In weiterer Folge wird detailliert auf die Sanierungsmöglichkeit mittels Innendämmung und deren spezielle Anforderungen, Vorteile und Potentiale hingewiesen. Die Bandbreite reicht von den Kosten der Sanierung, zur Behaglichkeit, über den Einfluss der Innendämmsysteme auf die sommerliche Überwärmung, den Schallschutz, bis hin zur Auswirkung des verursachten erhöhten Wassergehalts auf die Tragfähigkeit der Ziegel.

3.1 Energieeinsparungspotential bei Gründerzeithäusern

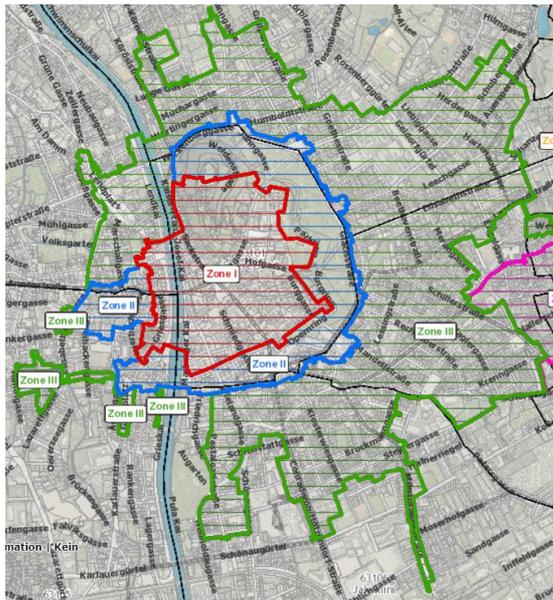
Durch die thermische Sanierung von Bestandsgebäuden steigt die Lebensqualität durch die Behaglichkeit [46] auf Grund der Erhöhung der Oberflächentemperaturen der Außenwände von Wohngebäuden. Zusätzlich werden die bestehenden Bauwerke durch die Sanierungsmaßnahmen energieeffizienter. Bestandsgebäude mit Baujahren vor 1980 können durch thermische Sanierungen eine Einsparung von bis zu 76 % erfahren (vgl. Tabelle 3).

Eine der anspruchsvollsten Bauwerksgruppen auf Grund der Bauweise, der sogenannte „Worst Case“ der zu sanierenden Wohngebäude, ist auch zugleich jene mit dem höchsten Potential an Energieeinsparung. Hierbei handelt es sich um Gebäude aus der Bauperiode von 1900 bis 1945. Dies entspricht ca. 23 % der Wohngebäude und ca. 25 % der darin befindlichen Wohnungen des Gesamtbestandes in Österreich (siehe Abbildung 1).

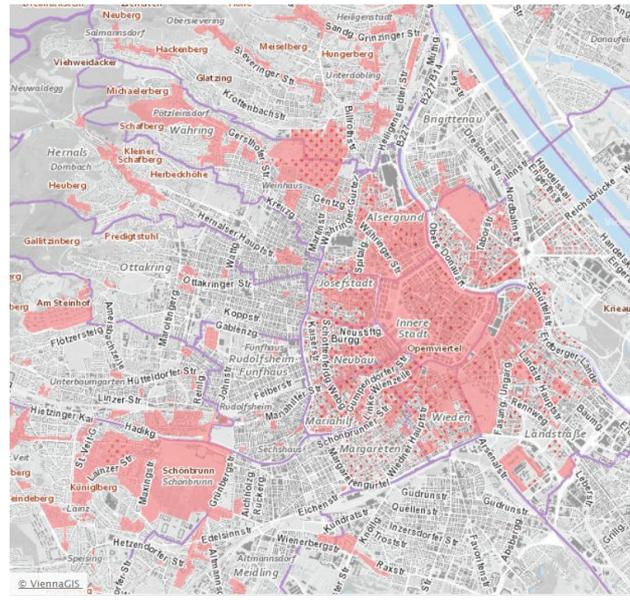
Tabelle 3 Gemittelter Energiebedarf nach Bauperiode und gemittelttes Energieeinsparungspotential des Gebäudebestandes durch thermische Sanierung [10]

Bauperiode	Gemittelter HWB ohne Sanierung [kWh/m ² a]	Gemittelte Einsparung durch thermische Sanierung [%]
vor 1900	125	66
1900 – 1945	178	76
1945 – 1960	154	73
1961 – 1980	155	73
> 1980	92	54

In Graz regelt das Grazer Altstadterhaltungsgesetz 2008 (GAEG 2008) sechs Schutzzonen, wobei die Zone IV aus 13 und die Zone VI aus zwei kleineren Teilzonen besteht. Die Zone I Historische Kernstadt, Zone II Pufferzone für das UNESCO Welterbe Graz und die Zone III Stadtbereich der gründerzeitlichen Stadterweiterung umfassen gemeinsam ca. 6,5 km². Die Zone III, die den Hauptteil der Gründerzeitgebäude umfasst, besitzt alleine bereits 4,7 km² mit einer mittleren Bebauungsdichte von ca. 1,33 (siehe Abbildung 3 und Abbildung 4) [47, 48].



**Abbildung 3 Altstadtsschutzzone
Ausschnitt Innere Stadt Graz**



**Abbildung 4 Altstadtsschutzzone Ausschnitt
Stadt Wien**

In den Altstadtsschutzzone von Graz ist die Gebäudeanzahl folgendermaßen verteilt [49]:

- Altstadtsschutzzone 1: 730 (± 11 %)
- Altstadtsschutzzone 2: 638 (± 10 %)
- Altstadtsschutzzone 3: 3904 (± 60 %)
- Altstadtsschutzzone 4: 1007 (± 15 %)
- Altstadtsschutzzone 5: 287 (± 4 %)

Der Gebäudebestand der Stadt Graz wächst in 10 Jahren statistisch gesehen um ca. 11 %. Somit kann für das Jahresende von 2021 ein Gebäudebestand von 44.298 Gebäuden vorhergesagt werden. Die Gebäude der Schutzzone umfassen somit ca. 15 % des Grazer Gebäudebestandes bzw. ca. 9 %, wenn nur die Schutzzone mit den Gründerzeitgebäuden betrachtet wird [8].

In Wien gibt es ein ähnliches Gesetz das 135 Schutzzone umfasst. Dies betrifft ca. 15.000 Gebäude und umfasst ca. 8 bis 9 % der gesamten Wiener Bausubstanz [50].

Bei der Ermittlung der potentiell montierbaren Innendämmung für Bestandsgebäude vor 1945 wird von einer mittleren Innenwandfläche von ca. 645 m² pro Gebäude ausgegangen. Dazu wurden sieben typische Gründerzeitgebäude in Graz vermessen und der Mittelwert gebildet (Mandellstraße 5 / 9 / 11 / 13 / 15 und Lessingstraße 27 / 32). Aufgerechnet auf den Gebäudebestand bedeutet das, dass für ganz Österreich ca. 292,3 Millionen, für Wien ca. 22,0 Millionen und für Graz ca. 5,3 Millionen Quadratmeter potentielle Innendämmfläche bei Bestandsgebäuden besteht. Bereits sanierte Gebäude sind hier nicht abgezogen, jedoch sind Innendämmungen auch bei Gebäuden, welche nach 1945 erbaut wurden, möglich. Detaillierte Aufschlüsselungen zur Massenermittlung sind in [51] dargestellt.

Die Kellerdecke eines Hauses, das bis 1945 erbaut wurde, hat einen mittleren U-Wert von 1,10 W/m²K [4]. Somit liegt dieser Wert um das Vierfache höher als die derzeitige

Anforderung bei Sanierungen mittels Einzelmaßnahmen von $0,304 \text{ W/m}^2\text{K}$ [4]. Noch gravierender ist der Unterschied bei den Außenwänden eines Gebäudes, welches bis zum Jahr 1945 errichtet wurde, mit einem mittleren U-Wert von $1,45 \text{ W/m}^2\text{K}$ der dem fünfeinhalbfachen der geforderten $0,266 \text{ W/m}^2\text{K}$ [4] entspricht (siehe Tabelle 4).

Mit wenigen Zentimetern Innendämmung (siehe Tabelle 4) kann bei diesen Gebäuden ein thermischer Neubaustandard erreicht werden und ganze Stadtteile (siehe Abbildung 3 und Abbildung 4) saniert werden, die für die Schaffung von angemessenem Wohnraum in der Nachverdichtung unbedingt erforderlich sind. Das garantiert eine ressourcenschonende Wohnbedarfserfüllung, da keine Neubauten notwendig sind und trotzdem ein Neubaustandard erreicht werden kann. In Tabelle 4 und Tabelle 5 sind die mittleren U-Werte der vorhandenen Bausubstanz nach Bauperiode aus dem OIB 6 Leitfaden bzw. dem Handbuch für Energieberater dargestellt. Weiters sind die Anforderungen nach dem Neubau- und dem Sanierungsstandard mittels Einzelmaßnahmen beschrieben. Es kommt hier deutlich die um 24 % höhere Anforderung an den maximalen Wärmedurchgangskoeffizienten bei einer Renovierung mit Einzelmaßnahmen hervor. Diese könnte nach OIB 6 [52] mit Hilfe eines Sanierungskonzeptes zur Erreichung des Endenergiebedarfs nach Neubauanforderung entfallen. Bei der ausschließlichen Dämmung der Außenwände mittels Innendämmung ist dies jedoch erfahrungsgemäß äußerst schwierig zu erreichen. In den untenstehenden Tabellen sind als Ergebnis die erforderlichen Innendämmdicken (gerundet auf ganze Zentimeter) sowie die Verbesserungsfaktoren gegenüber dem Bestand bei den oben genannten Anforderungen angeführt. Bei den Bestandsgebäuden bis 1945 ergibt sich für die Kellerdeckendämmung eine maximale Dämmdicke von 10 cm mit einem mittleren Verbesserungsfaktor von 3,7 für die Einzelmaßnahme bei Renovierungen. Mit dieser Dämmdicke wäre das Bauteil gleichzeitig um 24 % höherwertiger in Hinsicht auf Transmissionswärmeverluste, als die Kellerdecke eines Neubaus mit einem U-Wert von $0,40 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Tabelle 4 erforderliche Dämmdicken zur Erreichung der U-Wert Anforderungen bei Kellerdecken

Bauperiode		vor 1900		ab 1900		ab 1945		ab 1960 bis 1980	
Standard		Neubau- standard	Einzel- maßnahme	Neubau- standard	Einzel- maßnahme	Neubau- standard	Einzel- maßnahme	Neubau- standard	Einzel- maßnahme
U-Wert Anforderung	[W/m ² K]	0,400	0,304	0,400	0,304	0,400	0,304	0,400	0,304
vorh. U-Wert lt. OIB 6	[W/m ² K]	1,250		1,200		1,100		1,350	
erf. Innendämmung ($\lambda = 0,04$)	[cm]	7	10	7	10	6	10	7	10
Verbesserungsfaktor	[-]	3,1	4,1	3,0	3,9	2,8	3,6	3,4	4,4
vorh. U-Wert lt. HfE	[W/m ² K]	1,000		1,000		1,450		1,350	
erf. Innendämmung ($\lambda = 0,04$)	[cm]	6	9	6	9	7	10	7	10
Verbesserungsfaktor	[-]	2,5	3,3	2,5	3,3	3,6	4,8	3,4	4,4
gemittelter Verbesserungsfaktor	[-]	2,8	3,7	2,8	3,6	3,2	4,2	3,4	4,4

Für die Außenwand ergibt sich in der Bauperiode bis 1945 eine maximale Innendämmdicke von 13 cm bei Sanierungen mittels Einzelmaßnahmen. Mit nur ca. 9 cm Innendämmung erhält man einen U-Wert von $0,35 \text{ W/m}^2\text{K}$. Dies bedeutet eine viereinhalbfache Verbesserung gegenüber dem Bestand.

Tabelle 5 erforderliche Dämmdicken zur Erreichung der U-Wert Anforderungen bei Außenwänden

Bauperiode		vor 1900		ab 1900		ab 1945		ab 1960 bis 1980	
Standard		Neubau- standard	Einzel- maßnahme	Neubau- standard	Einzel- maßnahme	Neubau- standard	Einzel- maßnahme	Neubau- standard	Einzel- maßnahme
U-Wert Anforderung	[W/m ² K]	0,350	0,266	0,350	0,266	0,350	0,266	0,350	0,266
vorh. U-Wert lt. OIB 6	[W/m ² K]	1,550		1,500		1,300		1,200	
erf. Innendämmung ($\lambda = 0,04$)	[cm]	9	12	9	12	8	12	8	12
Verbesserungsfaktor	[-]	4,4	5,8	4,3	5,6	3,7	4,9	3,4	4,5
vorh. U-Wert lt. HfE	[W/m ² K]	1,650		1,400		1,350		1,150	
erf. Innendämmung ($\lambda = 0,04$)	[cm]	9	13	9	12	8	12	8	12
Verbesserungsfaktor	[-]	4,7	6,2	4,0	5,3	3,9	5,1	3,3	4,3
gemittelter Verbesserungsfaktor	[-]	4,6	6,0	4,1	5,5	3,8	5,0	3,4	4,4

Vorangegangene Forschungen [53] haben ergeben, dass bei Wärmeleitfähigkeiten von 0,035 W/mK bis 0,04 W/mK eine Dicke der Innendämmung von 4 bis 10 cm anzustreben ist, um wirtschaftlich zu sein (siehe Abbildung 5). Der Heizwärmebedarf wird bei diesen Dämmdicken um 57 % bis 75 % gesenkt. Geringere Dämmdicken sind bei dieser Wärmeleitfähigkeit wegen dem Grundaufwand der Montage nicht sinnvoll und höhere Dicken ergeben keine maßgeblichen Verbesserungen. Die Nutzfläche im Rauminnen würde sinken und das Risiko für Feuchteschäden steigt [34].

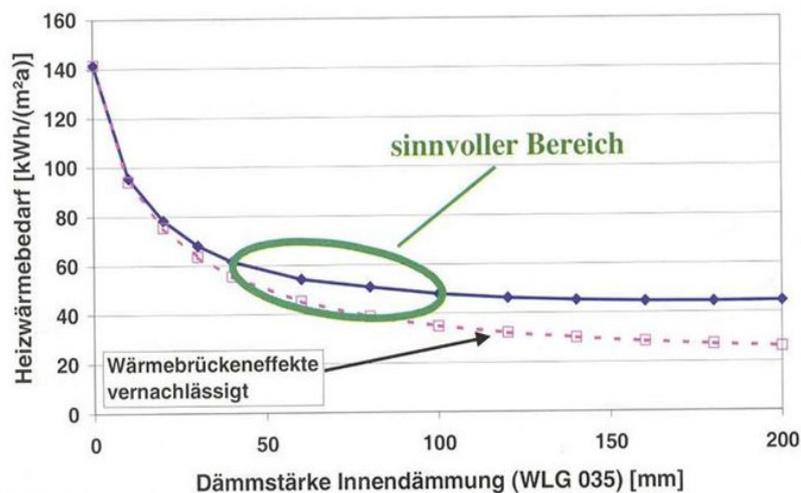


Abbildung 5 Die Abhängigkeit des Heizwärmebedarfs von Dämmstärke [53]

Die Erhöhung des Wärmedurchgangswiderstandes über 1,0 m²K/W erfordert lt. WTA Merkblatt 6-4 [34] bereits einen vereinfachten Nachweis und über 2,0 m²K/W eine hygrothermische Simulation (vgl. Kapitel 2.1). Das ergibt für die Anbringung einer Dämmung mit einer Wärmeleitfähigkeit von 0,04 W/mK eine Dicke von max. 4 cm bzw. 8 cm. Die Einsparungen betreffen bei einer Sanierung mittels Innendämmung der gesamten Außenwände, wie oben beschrieben, nicht nur das Bauteil oder den sanierten Raum, sondern das gesamte Gebäude. Bei der Verbesserung um 1,0 m²K/W wird lt. Abbildung 6 ein HWB von ca. 70 kWh/m²a erreicht und bei einer Sanierung mit 2,0 m²K/W ergibt das ca. 40 kWh/m²a.

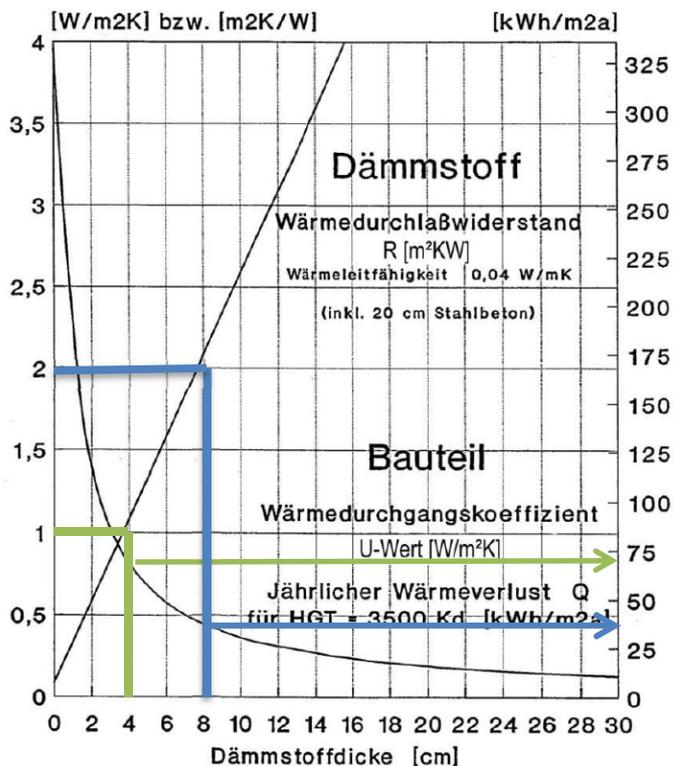


Abbildung 6 Zusammenhang zwischen Dicke der Dämmung und Energieverbrauch [54]

Vergleicht man das nun mit den mittleren HWB Werten aus Tabelle 3 so sind hier Steigerungen bei Gebäuden mit Baujahren vor 1900 von 44 % bis 68 % nur durch die Innendämmung möglich, für die Gebäude mit Baujahr zwischen 1900 und 1940 sind es 61 % bis 78 %.

Diese vereinfachte Abschätzung wurde anhand von vier der sieben Gründerzeithäusern aus Kapitel 3.1, einschließlich des Testgebäudes in dem die Untersuchungen der vorliegenden Dissertation stattfanden, in Hinsicht auf Innendämmungen überprüft. Erbaut wurden die Gebäude im Zeitraum zwischen 1850 und 1866, weisen sehr ähnliche Gebäudetypologien auf und werden als Bürogebäude genutzt. Die Berechnungsmethode der Energieausweise erfolgte mit dem Verfahren der OIB 6 [4], samt den zugehörigen Normen und Leitfäden, in der Version 2019. Als Ausgangswert für die U-Werte der Bestandsbauteile wurden vier verschiedene Quellen herangezogen:

- OIB 6 - Energieeinsparung und Wärmeschutz (OIB6) [4]
- ÖNORM B 8110 - Wärmeschutz im Hochbau (ÖN 8110) [17]
- Handbuch für Energieberater (HfE) [55]
- detaillierte Schichtenaufbauten lt. Untersuchungen am Gebäude der Mandellstraße 9 (Schichtenaufbau)

Die fiktiven Sanierungsmaßnahmen betrafen ausschließlich die Außenwände, welche um einen Wärmeübergangswiderstand von $1,0 \text{ m}^2\text{K/W}$ bzw. $2,0 \text{ m}^2\text{K/W}$ erhöht wurden. Es wurden keine anderen Bauteilkennwerte (Kellerdecke, Dachbodendecke etc.), Fenstereigenschaften oder Eingaben bei der Haustechnik verändert. Durch die fiktive Sanierung an der Innenseite konnte auch die Außengeometrie gleich gelassen werden und so veränderte sich das A/V-Verhältnis nicht.

Die beschriebenen Maßnahmen ergaben pro Gebäude 4 Bestandsvarianten und 8 Sanierungsvarianten, also insgesamt 12 Berechnungsvarianten pro Gebäude. Die Ergebnisse der Bestandsvarianten wurden zusätzlich mit den Energieverbräuchen der tatsächlichen Abrechnungen verglichen. Da dies für die Sanierungsvarianten nicht möglich war, wurden die Ergebnisse dieser Varianten im Verhältnis der errechneten Abweichung der realen Bestandsverbräuche zu den errechneten Bestandsverbräuchen aufgerechnet. Somit wurden 60 Variationen aus 20 Energieverbräuchen für die Bestandsgebäude und 40 prognostizierte Energieverbräuche für die fiktiv sanierten Gebäude errechnet. In Abbildung 7 sind Mittelwerte der Ergebnisse der vier Gebäude und der vier verschiedenen U-Wert Annahmen für den Bestand dargestellt. Außerdem kann das Verhältnis der Verbesserung der Energieausweisergebnisse durch die Erhöhung der Wärmedurchgangswiderstände der Außenwände abgelesen werden. Der Heizwärmebedarf verringert sich um 20,44 % bzw. um 25,83 % bei den Sanierungsmaßnahmen gegenüber den Bestandsergebnissen. Der Endenergieverbrauch ist mit den tatsächlichen Abrechnungen am besten vergleichbar, da hier der Heizwärme-, der Warmwasser-, der Haushaltstrom- und Hilfsenergiebedarf sowie Verluste bei der Haustechnik berücksichtigt werden. Der Endenergieverbrauch wird auch als Lieferenergiebedarf bezeichnet. Die Abweichung des errechneten Endenergiebedarfs zum tatsächlichen Abrechnungsmittelwert über drei Jahre des Bestandes beträgt 284,13 %. Der errechnete Endenergiebedarf ist also viel zu hoch gegenüber den tatsächlichen Verbräuchen. Werden die prozentuellen Mittelwerte der berechneten Sanierungsmaßnahmen bei den realen Verbräuchen angewendet, dann würde sich eine Verbesserung um 12,96 % bzw. 16,86 % ergeben. Umfassende Ergebnisse dieser Studie sind [56] zu entnehmen.

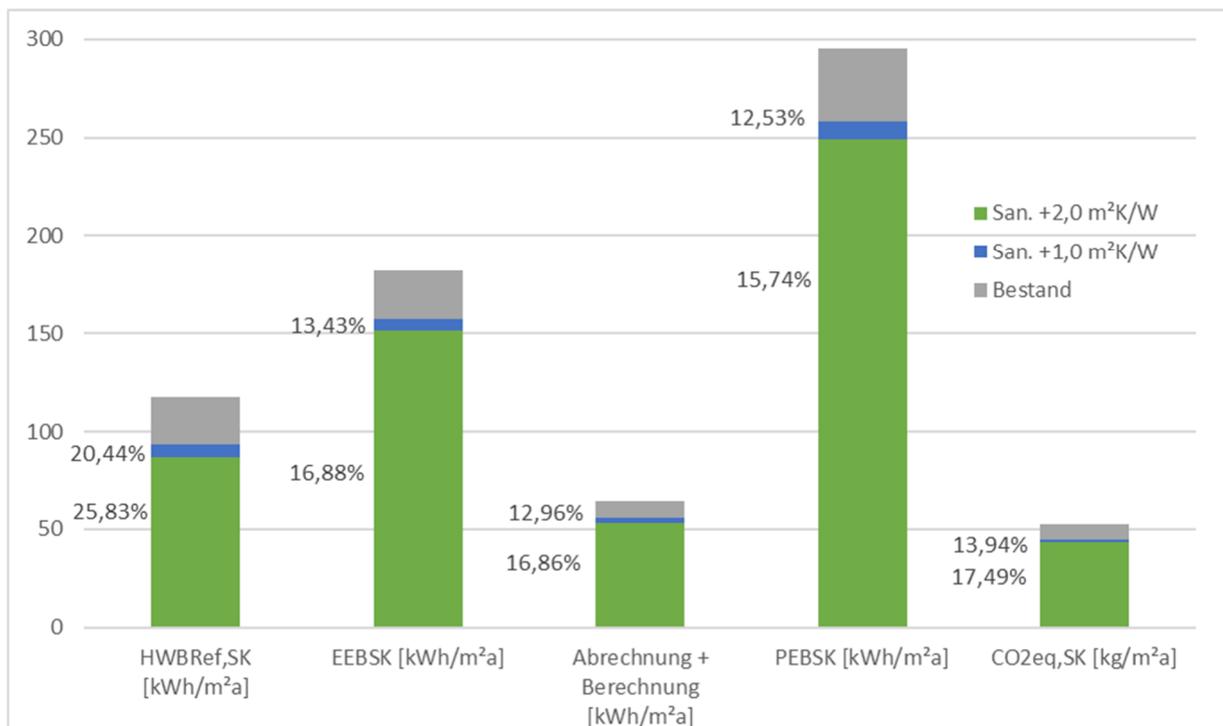


Abbildung 7 Mittelwerte der Berechnungsergebnisse der betrachteten Gebäude und verschiedenen U-Wert Annahmen

Auch andere Forschungsarbeiten zeigten bereits, dass die Abweichungen der errechneten Kennwerte gegenüber den tatsächlichen Energieverbräuchen stark streuen können und somit schwer vergleichbar sind [57]. In Abbildung 8 sind die Abweichungen der

berechneten Endenergieverbräuche zum realen Energieverbrauch aller vier Bestandsgebäude nach den unterschiedlichen U-Wert Quellen dargestellt. Die Abweichungen streuen von ca. 114 % bis ca. 336 % und sind im Mittel ca. 188 % zu hoch.

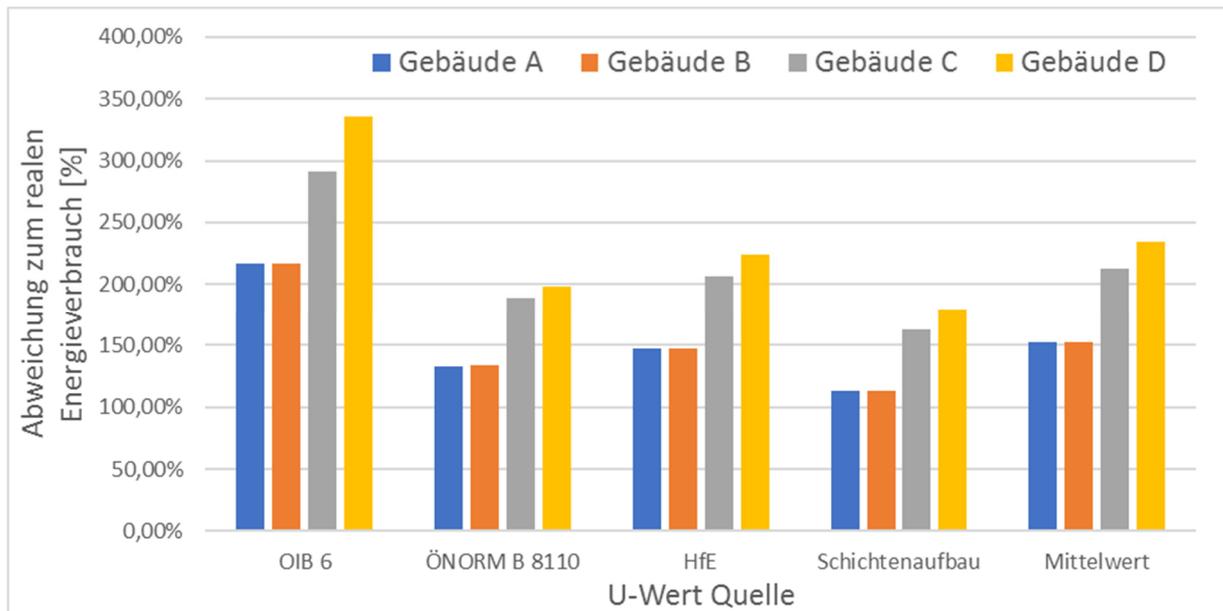


Abbildung 8 Abweichung der berechneten Endenergieverbräuche zum realen Energieverbrauch

Die Ergebnisse der Vergleiche zwischen der vereinfachten Abschätzung nach Tabelle 3 bzw. Abbildung 6 und den detaillierten errechneten Energieverbräuchen müssen auch dahingehend relativiert werden, dass keine Gesamtsanierung aller Bauteile betrachtet wurde. Eine umfassende Sanierung bei der auch Kellerdecken- und Dachbodendämmungen sowie ein Fenstertausch durchgeführt werden, mindern den Energieverbrauch noch weiter. Die Dämmdicken mit 4 bzw. 8 cm könnte ebenfalls erhöht oder eine Dämmung mit geringerer Wärmeleitfähigkeit verwendet werden. Wobei dies hygrothermische Probleme hervorrufen kann und auch die Nutzfläche weiter reduzieren würde und somit negative wirtschaftliche Auswirkungen haben kann. (vgl. Kapitel 3.2 und 3.3)

Aber aktuelle Forschungen zeigen, dass unter bestimmten Voraussetzungen auch höhere Innendämmdicken möglich sind. Im Detail wurde bei einem Forschungsprojekt mit Vakuum-Isolationspaneelen (2,4 cm), EPS (20 cm), Mineralwolle (16 cm) und Mineralschaum (18 cm) festgestellt, dass kein schadensverursachendes Kondensat entsteht. Jedoch ist zu beachten, dass ausreichender Schlagregenschutz sowie moderne Abdichtungsstandards und somit keine aufsteigende Feuchtigkeit vorhanden waren und die Dämmsysteme keiner maßgeblichen Feuchte, verursacht durch die Einbauarbeiten, ausgesetzt waren [58].

3.2 Behaglichkeit (Oberflächentemperatur)

Mit Hilfe einer CFD Simulation wurde der Einflussbereich der Oberflächentemperatur auf den Innenraum analysiert. Die CFD Simulation wurde mit dem Programm Ansys in 3D durchgeführt. Dazu wurde ein Raum mit 3,90 m Breite, 6,60 m Länge und 3,33 m Höhe modelliert. Zwei der vier Wände wurden als Außenwände mit einem U-Wert von 1,30 W/m²K und einer inneren Oberflächentemperatur von 16,6 °C konstruiert, bei einer

mittleren Monatsaußenlufttemperatur im Jänner am Standort Graz von $-2,57\text{ °C}$. Der U-Wert wurde als Mittelwert für ein Normalformatziegelmauerwerk gewählt [55]. Die beiden anderen Wände und die Decke wurden so modelliert, dass sie als Abschluss zu anderen beheizten Räumen dienen. Sie erhielten eine Oberflächentemperatur von 20 °C . Der Fußboden besitzt einen U-Wert von $1,0\text{ W/m}^2\text{K}$ und eine Oberflächentemperatur von $19,4\text{ °C}$, da hier die Annahme getroffen wurde, dass sich darunter ein Pufferraum mit einer mittleren Monatsinnenlufttemperatur im Jänner von $16,5\text{ °C}$ befindet. Eine sehr niedrige Oberflächentemperatur des Fußbodens wurde absichtlich vermieden, damit die Ergebnisse auch für Geschoße mit warmen Zwischendecken herangezogen werden können und die Außenwände die maßgebliche Komponente bleiben.

Das Ergebnis der Simulation war, dass sich durch die kalte Oberfläche der Wand ein Kaltluftsee im Bereich von ca. 20 bis 50 cm über der Fußbodenoberkante bildet (siehe Abbildung 9). Durch die dreidimensionale Ausbreitung im Raum verschiebt sich die Wurzel des beeinflussten Bereichs in der Höhe stetig, ist im Mittel jedoch bei ca. 30 cm. Im eindimensionalen Bereich, ohne Einfluss der Ecke bzw. der Kante der beiden Außenmauern, erstreckt sich die 18 °C Isolinie von ca. 25 cm bis 30 cm vor der Innenoberfläche der Außenwand in den Innenraum. Im zweidimensionalen Bereich bei der Ecke ist dieser Einflussbereich bis zu 2,40 m groß.

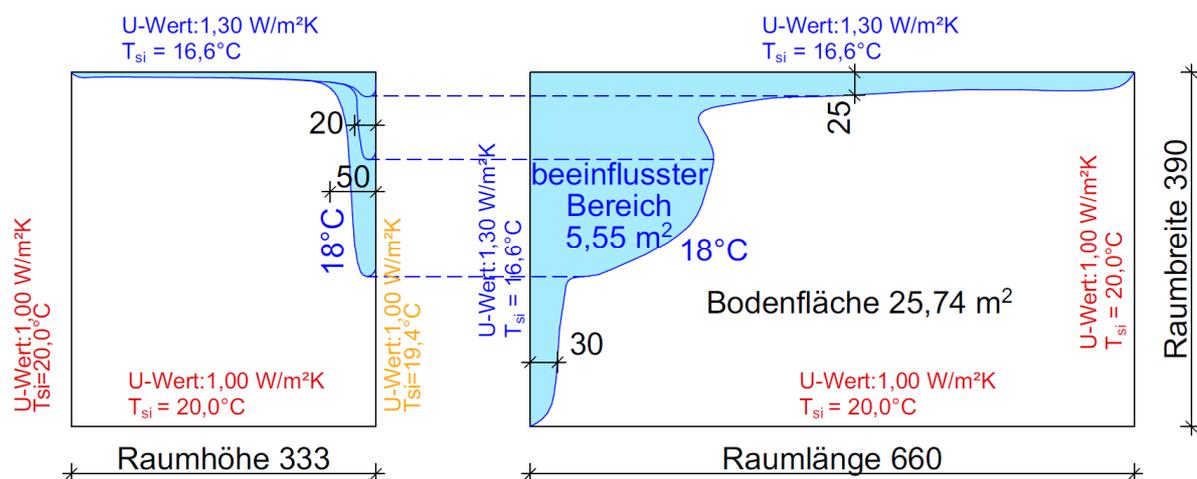


Abbildung 9 Schnitt (links) und Grundriss (rechts) mit beeinflusster Fläche durch verringerte Oberflächentemperatur der Außenwände

Für sieben Gründerzeitgebäude in Graz (siehe Kapitel 3.1) wurde die betroffene Bodenfläche errechnet. Für Räume mit einer Außenwand sind ca. 3,0 % und bei zwei Außenwänden ca. 21,5 % der Bodenfläche betroffen. In den untersuchten Gebäuden ergibt das im Durchschnitt eine betroffene Fläche von 8,6 % pro Raum.

Die Auswirkung der verminderten Temperatur sind der ÖNORM EN ISO 7730 [46] zu entnehmen. Der Prozentsatz der unzufriedenen Personen steigt demnach von ca. 8,5 % bei 20 °C auf ca. 12 % bei 18 °C . Es ist anzumerken, dass bei einer Temperatur von $23,5\text{ °C}$ ca. 5 % an Unzufriedenen verbleiben und bei einer Temperaturschwankung von $18,5\text{ °C}$ ein Maximum von 60 % an Unzufriedenen erreicht wird.

Dabei ist zu bedenken, dass die Zahl an unzufriedenen Personen noch viel höher wird, wenn keine Mittelwerte gebildet werden. Dies betrifft die Innenoberflächentemperaturen und auch die Monatsmittelwerte der Außenlufttemperatur. Instationäre Simulationen

würden hier weiter ins Detail gehen und diese Effekte berücksichtigen. Die Oberflächentemperaturen zu den Kanten und Ecken hin wären noch geringer. (vgl. Kapitel 6.4.2) Unsanierete Fenster oder Türen bei Gründerzeitgebäuden würden die Oberflächentemperaturen ebenfalls noch weiter verringern. Es sollte an dieser Stelle jedoch nur ein Überblick zum Einfluss der Außenwandoberflächentemperatur gegeben werden, der allgemein angewendet werden kann. Die vereinfachte Darstellung in Abbildung 9 spiegelt dies am besten wider.

Durch Innendämmungen werden die Oberflächentemperaturen stark angehoben. Je nach Jahreszeit, Ausführung und betrachtetem Bereich ist dies beinahe bis zur Raumtemperatur möglich. Detaillierte Untersuchungen sind in Kapitel 6.4.2 dargestellt. Somit steigert die Innendämmung die Behaglichkeit messbar und kann die Nutzbarkeit von manchen Räumen stark erhöhen. Damit können auch die Randbereiche der Räume bei hoher Behaglichkeit genutzt werden.

3.3 Kosten und Wirtschaftlichkeit

3.3.1 Montagekosten

Die Montage der Innendämmung hängt vom Material, aber auch vom Zustand des zu sanierenden Gebäudes ab. Zwischen Untergeschoß und Erdgeschoß wurden bei Gründerzeithäusern im Normalfall gemauerte Gewölbe eingebaut. In den Obergeschoßen befinden sich meist Tramdecken und im letzten Geschoß zum unausgebauten Dachboden eine Dippelbaumdecke. Ist auf Grund von umfangreichen Umbauarbeiten das Gebäude wieder im Zustand des Rohbaus, sodass Fußbodenaufbauten, Innentüren etc. entfernt wurden, dann ist im Erdgeschoß eine Dämmung bis zur Oberkante des Gewölbes und in den Obergeschoßen eine Dämmung rund um die Träme möglich. Wird jedoch nur oberflächlich saniert, dann kann die Innendämmung ohne starke Eingriffe nur bis zur Oberkante des Estrichs bzw. bis zur Deckenunterkante geführt werden. Wie sich die Dämmung innerhalb des Fußbodenaufbaus auswirkt, wird in den nachfolgenden Kapiteln beschrieben. An dieser Stelle wird aufgezeigt, welche Kosten für die unterschiedlichen Ausbaustufen anfallen. Für die Kalkulationen wurden drei Fälle unterschieden:

1. Dämmung bis zur Massivdeckenkonstruktion – Abbruch Fußbodenaufbau im Randbereich
2. Dämmung bis zur Massivdeckenkonstruktion – Abbruch gesamter Fußbodenaufbau
3. Dämmung bis zur Estrichoberkante – kein Abbruch des Fußbodenaufbaus

Alle drei Varianten wurden für drei Innendämmsysteme kalkuliert. Für alle drei Systeme wurden sämtliche notwendige Kosten erhoben und eingerechnet. So sind z.B. Schutzmaßnahmen während der Bauarbeiten, Material- und Montagekosten bis hin zu notwendigen Heizkörperverlegungen im Zuge der Sanierung eingerechnet. Als Innendämmungen wurden aus den am Markt erhältlichen Dämmungen drei ausgewählt. Die Auswahl erfolgte nach einem Mittelwert und einem oberen und unteren mittleren Grenzwert:

- a) Aerogel Dämmung ($\lambda = 0,017 \text{ W/mK}$)
- b) Minerale Dämmplatte aus Porenbeton ($\lambda = 0,040 \text{ W/mK}$)
- c) Kalziumsilikatplatte ($\lambda = 0,065 \text{ W/mK}$)

Die unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten ermöglichen verschiedene Dicken der Ausführung bei gleichbleibendem U-Wert. Die Annahme des U-Wertes wurde auf Grund der in Abbildung 5 dargestellten maximalen sinnvollen Dicke von 10 cm berechnet. Bei der Bestandsvariante wurde von einem mittleren U-Wert von $1,30 \text{ W/m}^2\text{K}$ für ein Normalformatziegelmauerwerk ausgegangen. Mit den oben angeführten drei Wärmedämmvarianten konnten drei U-Werte für die Sanierungsvarianten gebildet werden, wobei der geringste mit $0,147 \text{ W/m}^2\text{K}$ nicht weiter betrachtet wurde, da das bauphysikalische Risiko für Feuchteschäden zu groß ist (siehe Kapitel 3.1). Somit wurden die U-Werte mit $0,290 \text{ W/m}^2\text{K}$ und $0,403 \text{ W/m}^2\text{K}$ weiterverwendet und die Kosten lt. Tabelle 6 konnten ermittelt werden.

Es zeigt sich, dass die Materialkosten der Aerogel Innendämmung um bis zu fünfmal höher sind, als jene der Mineraldämmplatten aus Porenbeton und um bis zu 2,8-mal höher als für die Kalziumsilikatplatten, obwohl viel weniger Material benötigt wird. Die Nutzflächenverluste sind im nachfolgenden Kapitel beschrieben, jedoch kann festgehalten werden, dass die stark erhöhten Kosten des Materials in keiner Relation zur Nutzflächendifferenz der Innendämmsysteme stehen. Detaillierte Aufschlüsselungen zur Kalkulation sind in [51] zu finden.

Tabelle 6 Montagekosten nach Ausbaustufen je Gebäude, Nutzfläche und Bruttogrundfläche

Ausbaustufe	Innendämmungs dicke	gemittelte Kosten je Gebäude	Euro pro Nutzfläche	Euro pro Bruttogrundfläche
	[cm]			
U - WERT: $0,403 \text{ W/m}^2\text{K}$				
Abbruch Randbereich	2,5	385 902,66	459,96	340,35
	6,0	95 079,12	113,32	122,14
	10,0	138 489,81	165,07	122,14
Abbruch Fußbodenaufbau	2,5	503 559,91	600,19	444,12
	6,0	214 254,31	255,37	188,97
	10,0	257 665,00	307,11	227,25
kein Abbruch	2,5	345 482,09	411,78	304,70
	6,0	70 051,13	83,49	61,78
	10,0	111 394,64	132,77	98,25
U - WERT: $0,290 \text{ W/m}^2\text{K}$				
Abbruch Randbereich	4,0	340 198,54	405,48	300,04
	10,0	103 654,59	123,55	91,42
	16,0	170 701,07	203,46	150,55
Abbruch Fußbodenaufbau	4,0	453 721,09	540,79	400,17
	10,0	218 695,08	260,66	192,88
	16,0	285 741,56	340,57	252,01
kein Abbruch	4,0	303 752,33	362,04	267,90
	10,0	80 016,21	95,37	70,57
	16,0	143 870,01	171,48	126,89

3.3.2 Mietentgang

Sieben Gründerzeitgebäude in Graz (siehe Kapitel 3.1) wurden vermessen und über diese Daten konnten die Nutzflächenverluste für verschiedene Innendämmdicken kalkuliert werden. Die durchschnittliche Nutzfläche der Gebäude beträgt 1.140 m^2 mit einer mittleren Bruttogeschoßfläche von 1.500 m^2 . Mit Hilfe eines durchschnittlichen Mietpreises für die Steiermark von $8,02 \text{ €/m}^2$ Netto lt. Richtwertgesetz [59] für Wohnungen erbaut vor

1945 lt. Mietrechtsgesetz [60] konnte der Mietentgang für die Gebäude ermittelt werden. Die gemittelten Ergebnisse sind in Tabelle 7 dargestellt.

Tabelle 7 gemittelter Mietflächenverlust und Mietentgang durch Innendämmungen

Innendämmdicke [cm]	Mietflächenverlust je Gebäude [m ²]	Mietflächenverlust je Gebäude [%]		jährlicher Mietentgang je Gebäude [€]
		NF	BGF	
2,5	4,10	0,36	0,27	474
4,0	6,57	0,58	0,44	758
6,0	9,90	0,87	0,66	953
10,0	16,47	1,44	1,10	1.143
16,0	26,78	2,35	1,79	3.092

3.3.3 Heizkosteneinsparung

Die durchschnittliche Bruttogrundfläche der betrachteten Gebäude beträgt rund 1.500 m² der beheizten Geschoße. Aus Tabelle 8 kann das Einsparungspotential in kWh pro Quadratmeter Bruttogrundfläche im Jahr abgelesen werden. Es wurden noch weitere Gebäude betrachtet und auch verschiedene Dämmdicken. Durch eine thermische Sanierung mittels Innendämmung werden je nach Dämmdicke und Wärmeleitfähigkeit zwischen 10.500 kWh und 52.500 kWh pro Jahr eingespart. Der geringste U-Wert mit dem gerechnet wurde beträgt 0,29 W/m²K. Mithilfe des Brennstoffpreises [ct/kWh] [61] konnte somit das Einsparungspotential berechnet werden (siehe Tabelle 8).

Tabelle 8 Einsparungspotential durch Sanierung mittels Innendämmung

Brennstoff	Brennstoffpreis [ct/kWh]	jährliches Einsparungspotential [€]	
		von (10.500 kWh)	bis (52.500 kWh)
Heizöl	6,42	674,10	3.370,50
Erdgas	5,45	572,25	2.861,25
Pellets	4,69	492,45	2.462,25
Stückholz	5,19	544,95	2.724,75
Hackschnitzel	5,23	549,15	2.745,75
Strom direkt (NT)	11,82	1.241,10	6.205,50
Strom Wärmepumpe JAZ 3	12,60	1.323,00	6.615,00

Jährlich können somit je nach Ausführungsvariante und Brennstoff zwischen rund 500 und 6.600 Euro bei einer Sanierung eines Gründerzeithauses mittels Innendämmung eingespart werden.

3.4 Sommerliche Überwärmung

Im WTA Markblatt 6-4 [34] ist bereits angemerkt, dass die Innendämmung zwar den Beitrag zur wirksamen, thermischen Speicherfähigkeit reduziert, jedoch auch, dass die Auswirkungen gering sind, da die maßgebenden Parameter die Fensterflächen und die zugehörige Verschattung sind.

Für die vorliegende Dissertation wurde das gesamte Gebäude (siehe Abbildung 10) in der Software IDA ICE modelliert und mit den untenstehenden Innendämmsystemen die sommerliche Überwärmung berechnet [62, 63]:

- iQ-Therm
- Mineralwolle mit Gipskartonplatten
- Calsitherm
- Multipor Minerale Dämmplatten
- Aerogel Dämmputzsystem
- Renocell Innendämmsystem

Die Kastenfenster wurden mit einem U_g -Wert von $2,90 \text{ W/m}^2\text{K}$, einem Energiedurchlassgrad g -Wert von $0,65$ und einem Holzrahmen mit einem U_f -Wert von $2,20 \text{ W/m}^2\text{K}$ angenommen. Die Innentüren wurden mit einem U -Wert von $1,90 \text{ W/m}^2\text{K}$ und die Beleuchtung wurde mit LED-Lichtkörpern mit 15 Watt und 1350 lm modelliert. Es wurden in weiterer Folge eine Wohnnutzung mit Nachtlüftung und eine Büronutzung mit Lüftungsvariationen zwischen $06:00 \text{ Uhr}$ und $10:00 \text{ Uhr}$ am Vormittag eingegeben. Eine Variante der Büronutzung wurde auch ohne Lüftung simuliert. Die inneren Lasten bestanden bei der Wohnnutzung aus den Bewohnern und bei der Büronutzung zusätzlich zu den Angestellten auch noch aus den Computern. Somit ergaben sich im Mittel $4,5 \text{ W/m}^2$ bzw. $243,42 \text{ W/m}^2$.

In der Wohnnutzung wurde eine maximale operative Temperatur von $24,1 \text{ °C}$ im kritischsten Raum erreicht, unabhängig welche Dämmung verwendet wurde bzw. auch ohne Dämmung, für die Bestandsvariante. Für die Büronutzung wurde eine maximale operative Temperatur von $31,8 \text{ °C}$ bis $38,5 \text{ °C}$ erreicht, wobei die Differenzen der Ergebnisse der Sanierungsvarianten zum Bestand von ca. $0,5 \text{ °C}$ bis $3,9 \text{ °C}$ reichten. Diese Bandbreite wurde durch die oben genannten Lüftungsvariationen von 0 bis 4 Stunden Öffnungszeit der Fenster erreicht (siehe Abbildung 10).

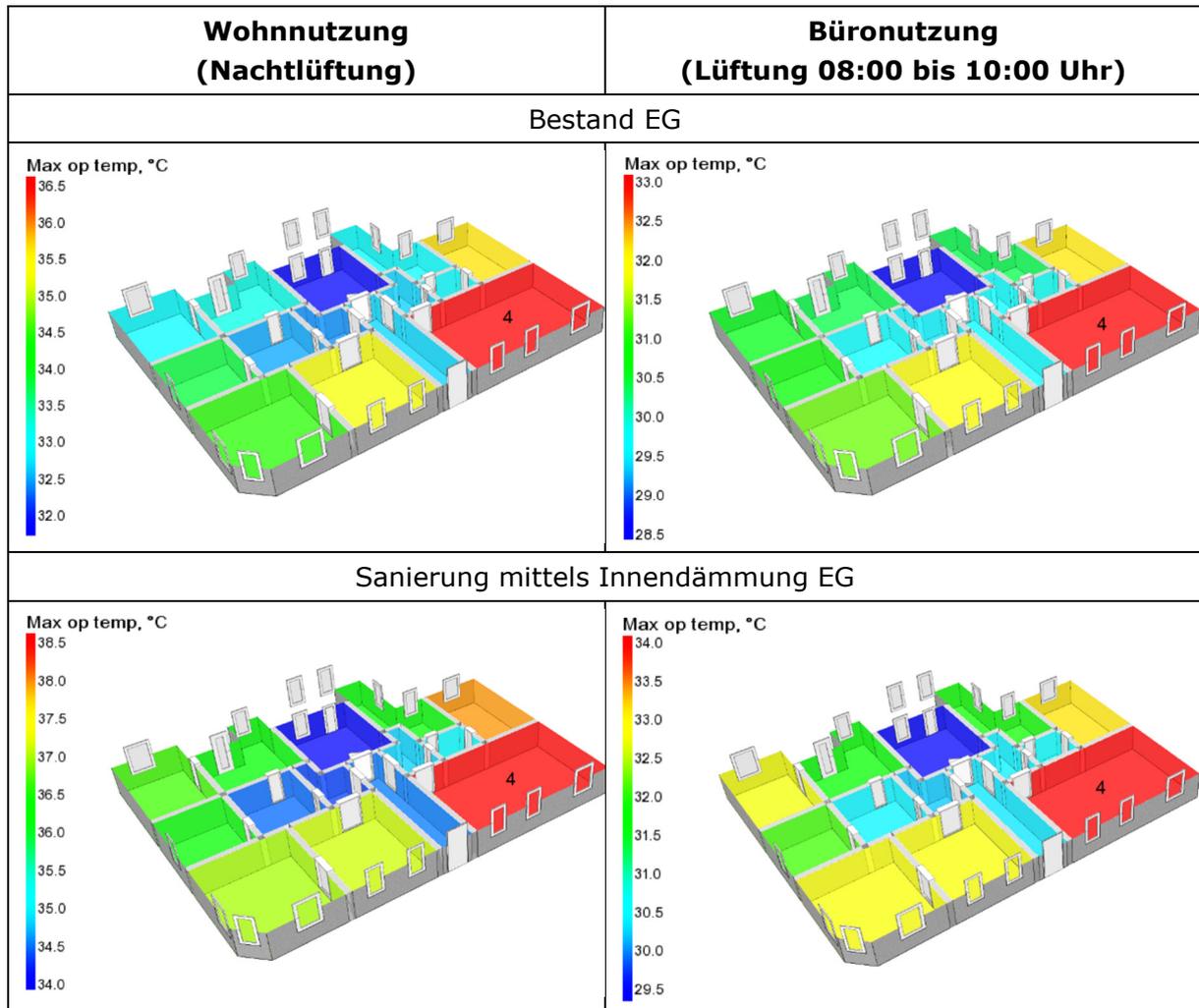


Abbildung 10 maximale operative Temperaturen bei Wohn- und Büronutzung vor und nach der Sanierung

Die Ergebnisse zeigen somit, dass bei einer Nachtlüftung, wie es bei einer Nutzung als Wohngebäude möglich ist, die Innendämmmaßnahmen keinen Einfluss auf die sommerliche Überwärmung haben. Sind die Lüftungszeiten in den kühlen Stunden durch die Nutzung als Büro nicht möglich, dann wirkt sich die Innendämmung negativ aus. Es ist jedoch anzumerken, dass die operative Temperatur, bei diesen Varianten mit geringer Fensterlüftung, auch bei der Bestandsvariante viel zu hoch ist, um den Normnachweis zu erfüllen. Eine Alternative wäre eine automatische Lüftungsanlage für die Lüftung bei Nacht. Detaillierte Angaben und Ergebnisse sind in [63] und [62] zu finden.

3.5 Schallschutz und Akustik

Die Auswirkungen der Innendämmmaßnahmen auf den Schallschutz gegenüber Außenlärmbelastung sind lt. WTA Merkblatt 6-4 [34] gering.

Die in dieser Dissertation verwendeten Innendämmungen stehen durch das Aufspritzen auf das Bestandsmauerwerk in direktem Verbund mit diesem. Bei vorgesetzten Innendämmungen oder bei Vormauerungen aus z.B. mit Perlite gefüllten Ziegeln ist das nicht zwingend der Fall. Somit bilden die verwendeten kapillaraktiven, diffusionsoffenen Innendämmungen mit der Bestandswand eine zusammenhängende Einheit. Die meist mit Normalformatziegeln gemauerten Wände weisen übliche Dicken von 50 cm bis über 100 cm auf. Die Masse der Bestandswand ist somit sehr groß und wird durch die Innendämmung beinahe nicht beeinflusst. Bei den oben genannten Mauerdicken ergeben sich bewertete Schalldämmmaße von 70 dB bis 79 dB ohne Innendämmung. Rechnet man die Innendämmungskonstruktion mit, dann verändern sich diese Werte um maximal 1 dB. Die höchste Anforderung lt. OIB 5 [64] liegt bei 58 dB bei einem maßgeblichen Außenlärmpegel von ≥ 80 dB am Tag bzw. ≥ 70 dB bei Nacht. Somit werden die Anschlüsse der Fenster und die Durchdringungen zum maßgeblichen Kriterium des Schallschutzes der Außenwände.

Im Zuge eines vorangegangenen Forschungsprojektes wurde die aufgespritzte Zellulose verputzt und als Kompaktabsorber verwendet [16]. Der ca. 1,5 bis 1,8 cm dicke diffusionsoffene Innenputz auf der ca. 6 cm dicken Innendämmung wurde in Abdeckungsweiten von ca. 40,0 cm bis 50,0 cm aufgebracht und dazwischen wurden Schlitzbreiten von ca. 3,0 cm bis 5,0 cm freigelassen. Diese Schlitzbreiten, mit der porösen Oberfläche der Zellulose, wurden im nachfolgenden Arbeitsgang mit einer ca. 2 mm bis 3 mm dicken, schalloffenen Endbeschichtung aus einem hochporösen, dispersionsgebundenen Einkornputz verschlossen. Das Absorptionsmaximum kann anhand der Schlitzbreite an den jeweiligen Bedarf angepasst werden. Mit dieser Technik wirkt die diffusionsoffene, kapillaraktive Innendämmung nicht nur hygrothermisch, sondern kann auch Schall aus mittleren und tiefen Frequenzen sehr gut absorbieren [16].

3.6 Ziegeltragfähigkeit bei erhöhtem Wassergehalt

In der ÖNORM EN 772-1 [65] wird je nach Konditionierung bei der Prüfung der Steindruckfestigkeit f_b der Mauersteine ein Umrechnungsfaktor angegeben. Dieser beträgt für lufttrockene bzw. feuchte Mauersteine bis 6 M% einen Wert von 1,0. Bei Lagerung in Wasser wird dieser jedoch mit 1,2 angegeben. Mit Hilfe des Umrechnungsfaktors wird die gemessene Steindruckfestigkeit auf eine äquivalente Steindruckfestigkeit für den lufttrockenen Zustand umgerechnet. Somit zeigt der Umrechnungsfaktor nach Norm, dass angenommen werden kann, dass bei freier Wassersättigung die Steindruckfestigkeit des Ziegels um 20 % geringer ist als bei einem lufttrockenen bzw. feuchten Ziegel bis 6 M%.

Laut ÖNORM B 4008-1 [66] würde bei einer Mörteldruckfestigkeit f_m von 0,5 bis 1,0 N/mm² die Reduzierung der Steindruckfestigkeit des Ziegels um 20 %, die charakteristische Mauerwerksdruckfestigkeit f_k von Vollziegelmauerwerk, um ca. 11 bis 23 % verringern.

4 Forschungsgebäude

4.1 Örtlichkeit und Versuchsgebäude

Das Gebäude, anhand dessen die Forschungsarbeiten zur Dissertation durchgeführt wurden, befindet sich in der Mandellstraße 9 ($47^{\circ}04'05.5''N$, $15^{\circ}26'56.2''E$) in Graz und ist ein im Jahr 1850 erbautes Gründerzeitgebäude (siehe Abbildung 11). Es ist im Besitz der *Bundesimmobiliengesellschaft* BIG und befindet sich am Campus *Alte Technik* der *Technischen Universität Graz* und wird auch von dieser benutzt. Das Gelände rund um das Gebäude liegt im Mittel auf einer Meereshöhe von ca. 356,20 m.ü.A., womit das Niveau der fertigen Fußbodenoberkante auf ca. 356,97 m.ü.A. liegt. Es umfasst ein nicht ausgebautes Kellergeschoß, ein Erdgeschoß, zwei Obergeschoße und ein ebenfalls nicht ausgebautes Dachgeschoß. Die Nutzung ist überwiegend büroähnlich, jedoch wurden die Messungen und die Montage der Innendämmungen im Aufenthaltsraum des „*Beton- und Holzbauzeichensaals*“ durchgeführt. Ein Zeichensaal wird von den ca. 25 bis 30 Mitgliedern, die Studierende des Bauingenieurwesens sind, für Lern- und Aufenthaltszwecke genutzt. Die Nutzung des Aufenthaltsraumes sind sehr weit gestreut, da darin gegessen, ferngesehen, gelernt und auch gefeiert wird. Somit sind die Temperatur und die relative Luftfeuchte des Innenklimas starken Schwankungen mit hohen Minimal- und Maximalwerten ausgesetzt, was sich für die Untersuchungen dieser Dissertation als äußerst dienlich erweist, da viele Grenzfälle dokumentiert werden können.

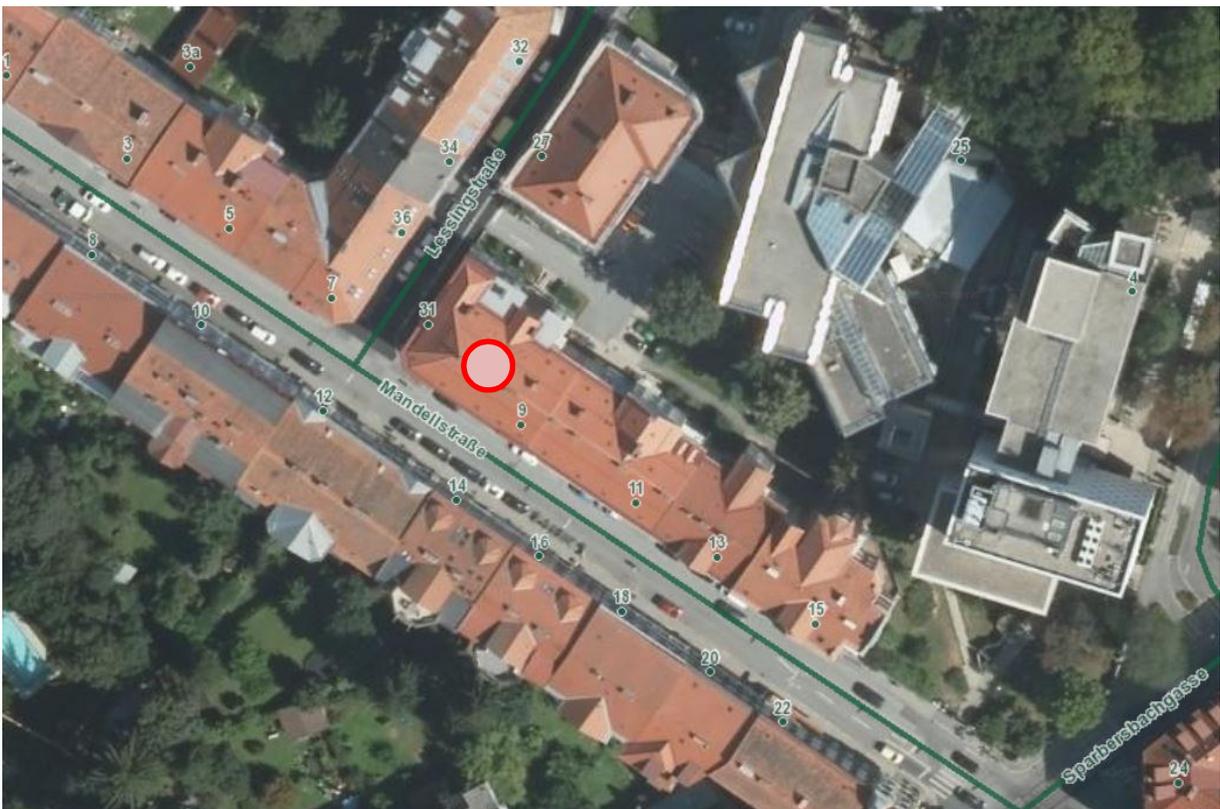


Abbildung 11 Lage des Forschungsgebäudes in der Mandellstraße 9 [48]

In der Abbildung 12 bis Abbildung 14 sind die Grundrisse und der Schnitt des Gebäudes dargestellt. Die Fußbodenoberkante des Erdgeschoßes liegt im Mittel ca. 77 cm über dem angrenzenden Gehsteig. Die ersten drei Ziegelscharen, die das Auflager des Gewölbes

bilden, wurden im Hochformat eingebaut und deren Oberkante liegt im Mittel bei ca. 30 cm über dem Gehsteig. Dieses Maß ist für die Montage und den Einfluss des Sockelbereiches auf die Innendämmung wichtig. Die Dicken der Außenmauern variieren in dem Gebäude stark und im Bereich des Aufenthaltsraumes sind die Mauern ca. 90 cm bzw. 100 cm dick. Die Fassade, an deren Innenseite die Dämmmaßnahmen und der Einbau der Sensoren stattfanden, ist nach Nordwesten ausgerichtet. Das ergibt eine starke Schlagregenbeanspruchung und eine geringe Sonneneinstrahlung und führt somit ebenfalls zu Maximalwerten in Hinsicht auf die Feuchtigkeitsbeanspruchung.

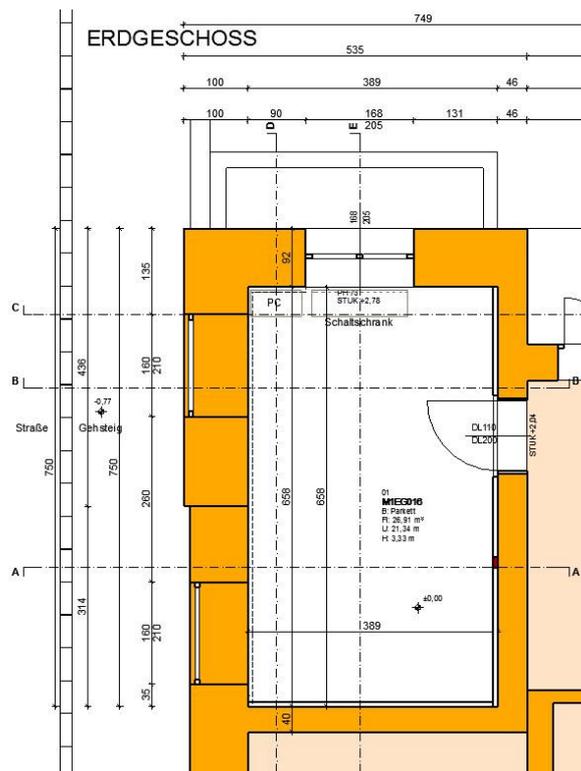


Abbildung 12 Grundriss Erdgeschoß

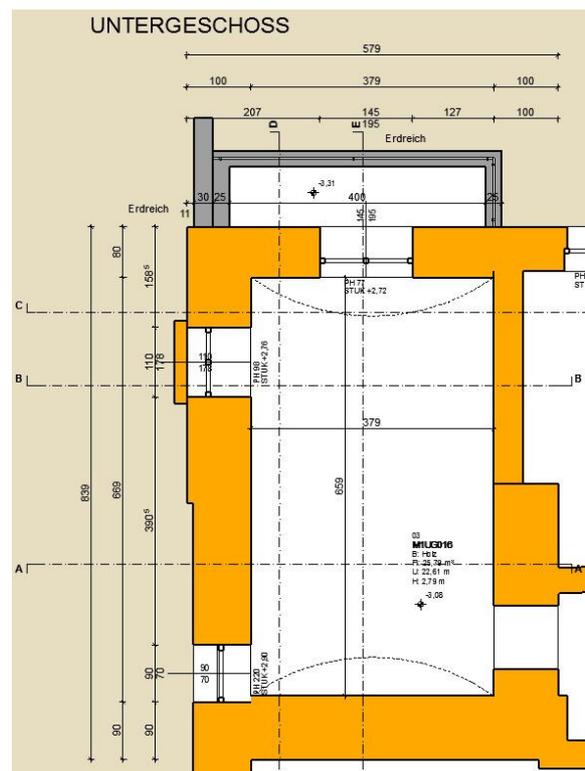


Abbildung 13 Grundriss Untergeschoß

Der Fußbodenaufbau zwischen Unter- und Erdgeschoß besteht aus 2 cm Bodenbelag aus Eichenparkett, ca. 8 cm Zementstrich, Hochofenschlacke als Ausgleichsschüttung mit einer Dicke von ca. 9 cm bis 49 cm über dem gemauerten Gewölbe und einem Innenputz von ca. 4 cm. Der erdberührte Fußboden im Untergeschoß ist Großteils stark beschädigt. Es befindet sich darin ein 3 cm dicker Holzbelag auf Kanthölzern, die in einem ca. 7 cm dicken Sandbett liegen und darunter steht bereits der gewachsene Boden an. Die Außenwände sind mit Vollziegelmauersteinen ausgeführt und außen und innen ca. 3 cm dick verputzt. Im Sockelbereich befindet sich an der Außenseite eine Natursteinverkleidung. Eine Abdichtung ist an keiner Stelle anzufinden, weder horizontal noch vertikal.

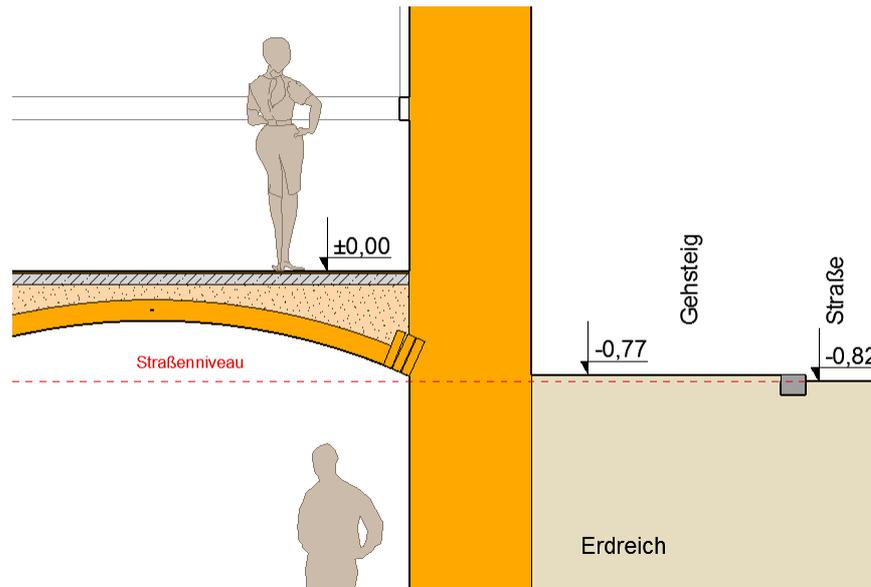


Abbildung 14 Vertikalschnitt durch das Versuchsgebäude

An der Nordostfassade wurde ein Kellerschacht betoniert, damit Tageslicht in den untenliegenden Kellerraum gelangen kann. Der angrenzende Gehsteigaufbau bei der Nordwestfassade konnte über die *Holding Graz* [67] ermittelt werden und ist folgendermaßen aufgebaut:

- 3 cm Asphaltbeton
- 10 cm Bituminöse Tragschichte
- 10 cm Ungebundene obere Tragschicht
- 40 cm ungebundene untere Tragschicht
- Unterbauplanum

Im Grundriss des Erdgeschoßes (Abbildung 12) und an der Nordwestfassade mit einer Ausrichtung von 315° (Abbildung 15) sind zwei Fenster eingezeichnet bzw. sind weiße geschlossene Fensterläden montiert. In diesen Bereichen waren Fenster eingebaut, die jedoch später zugemauert wurden und daher sind die Fensterläden nur aus optischen Gründen relevant. Wann die Fenster zugemauert wurden und welches Material verwendet wurde, konnte nicht eruiert werden. Mit Hilfe von Thermografieaufnahmen (siehe Abbildung 16 und Abbildung 17) konnte festgestellt werden, dass die zugemauerten Fenster keine Wärmebrücke darstellen, sondern vergleichbar mit der restlichen Außenmauer sind.



Abbildung 15 links die Nordost- und rechts die Nordwestfassade des Versuchsgebäudes

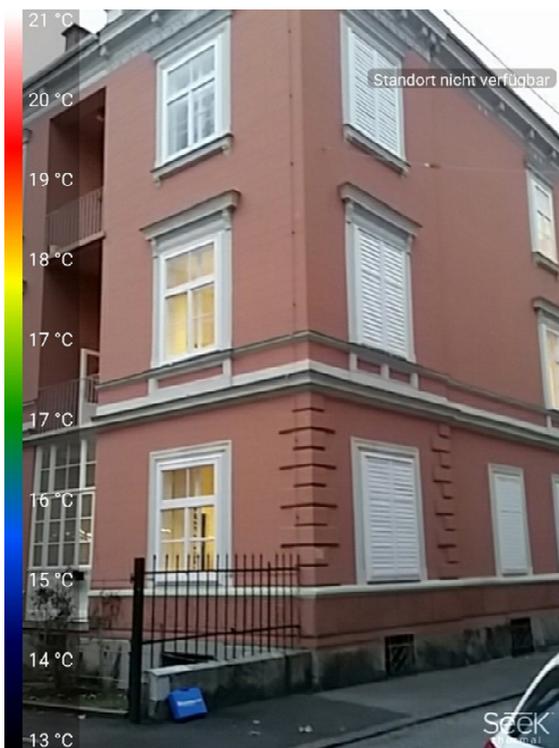


Abbildung 16 Thermografieaufnahme originale Ansicht

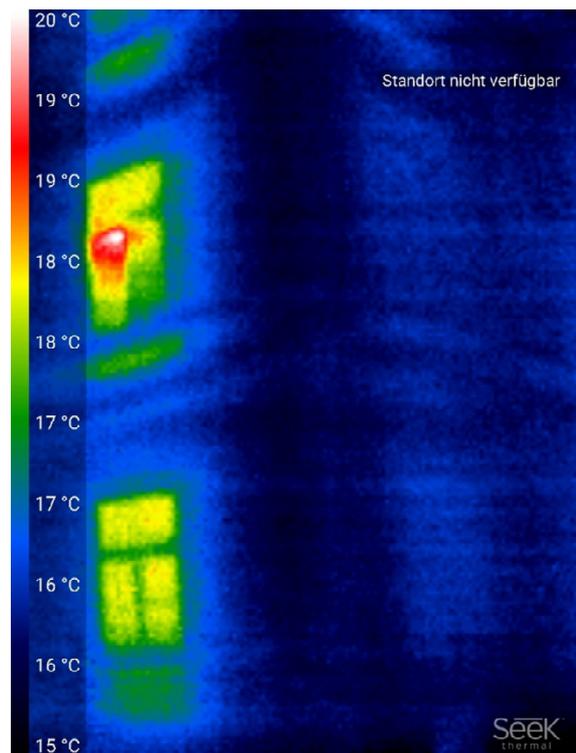


Abbildung 17 Thermografieaufnahme mit Falschfarbendarstellung

Die Innenbereiche sind in der Abbildung 18 und Abbildung 19 dargestellt. Das Untergeschoß wird als Abstellfläche genutzt und wies schon vor der Versuchsdurchführung starke Feuchte- und Schimmelschäden sowie Salzausblühungen auf. Die „Sanierungsmaßnahme“ der Betreiber bestand darin, sämtliche Fenster permanent geöffnet zu halten, wodurch ein starker Luftzug im Keller entstand und ein weiteres

Fortschreiten der Beschädigungen eingedämmt werden sollte. Dass diese Maßnahme in den Sommermonaten negative Auswirkungen haben kann, wurde offensichtlich toleriert. Um ein kritischeres Innenklima im Untergeschoß zu erzeugen, wurden die Fenster geschlossen, wobei jedoch durch das Monitoring kritische Zustände, die dauerhaften Schaden anrichten würden, sofort erkannt werden und Gegenmaßnahmen gesetzt werden können.



Abbildung 18 Innenbereich Erdgeschoß



Abbildung 19 Innenbereich Untergeschoß

4.2 Verwendete Innendämmsysteme

Bevor die kapillaraktiven, diffusionsoffenen Innendämmsysteme an der Innenoberfläche der Erdgeschoßaußenwand montiert werden konnten, wurde der Innenputz entfernt, wie in [34] empfohlen. Das ermöglicht einen guten hygrothermischen Verbund zwischen Bestandsmauerwerk und Innendämmsystem. Wie in den meisten Gründerzeitgebäuden ist das Mauerwerk äußerst uneben, was mit dem Innenputz teilweise ausgeglichen werden kann. Um vergleichbare Dicken bei den Innendämmungen zu erhalten wurde das Mauerwerk für die gegenständliche Untersuchung mit Mauermörtel und Normalformatziegelstücken aus dem gleichen Gebäude ausgeglichen und erst danach die Innendämmsysteme montiert.

Wie in Kapitel 1.3 und 2.3 beschrieben wurde die Auswahl der Dämmsysteme auf Grund der hohen Feuchtebeanspruchung im Sockelbereich auf diffusionsoffene, kapillaraktive, feuchteunempfindliche Dämmsysteme eingeschränkt. Diese ermöglichen, im Gegensatz zu diffusionshemmenden Konstruktionen, auch eine Austrocknung in den Innenbereich. Der Aerogel Dämmputz ist auf Grund seiner chemischen Zusammensetzung nicht feuchteempfindlich und die zum Einsatz gekommene Aufsprühzellulosedämmung zeigte in vorangegangenen Forschungsprojekten [15, 16, 37, 68] ein sehr gutes Austrocknungsverhalten.

Beide Systeme konnten ohne Schwierigkeiten auf die raue Oberfläche aufgebracht werden. Auf Grund der unterschiedlichen Dämmeigenschaften wurde die Aerogel Innendämmung ($\lambda = 0,027 \text{ W/mK}$) mit ca. 5 cm und die Zellulose Innendämmung ($\lambda = 0,067 \text{ W/mK}$) mit ca. 10 cm dicke aufgebracht. Das Aerogel Dämmsystem hat eine Rohdichte von 220 kg/m^3 und eine Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl von ca. 4,5. Die Zellulose hat eine höhere Rohdichte von 268 kg/m^3 und auch eine höhere Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl von 10,0. Auf die beiden Dämmsysteme wurde zur besseren Vergleichbarkeit eine einheitliche Deckschichtdicke von jeweils ca. 3 mm samt Gewebe aufgetragen. Diese Putzschicht hat beim Aerogel Dämmsystem eine Wärmeleitfähigkeit von $0,368 \text{ W/mK}$, eine Rohdichte von 1200 kg/m^3 und eine Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl von ca. 7,00. Die Wärmeleitfähigkeit des Deckputzes bei der Zellulose Innendämmung beträgt $0,377 \text{ W/mK}$, die Rohdichte 1245 kg/m^3 und die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl ca. 8,00. Die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahlen gelten für den trockenen und feuchten Zustand, da die Feuchteabhängigkeiten weitere Untersuchungen erfordern und nicht in den Simulationen berücksichtigt wurden. Die weiteren Materialeigenschaften sind im Kapitel 5.4 detailliert beschrieben.

Im Untergeschoß wurde im Bereich des Zelluloseinnendämmsystems ebenfalls eine 10 cm dicke Zellulosedämmung an der Gewölbeunterseite aufgebracht. Um einen zusätzlichen Vergleich mit einer ungedämmten Kellerdecke zu erhalten, wurde auf die Dämmung im Bereich des Aerogel Innendämmsystems verzichtet. Somit konnten einerseits Ergebnisse für eine umfassende Sanierungsvariante mit Innendämmung im Erdgeschoß und Kellerdeckendämmung im Untergeschoß und andererseits eine Teilsanierungsvariante mittels Innendämmung, beispielsweise bei Einzelwohnungen, erzielt werden. Die Dämmdicke im Untergeschoß wurde ebenfalls mit 10 cm ausgeführt.

Die Zellulose ist im Gegensatz zum Aerogel Wärmedämmputz ein organischer, ökologischer „Lowtech“-Baustoff. Der Aerogel Dämmputz wurde hingegen erst im Jahr 2013 am österreichischen Markt eingeführt, wodurch keine Langzeiterfahrungen vorhanden sind. Weiter sind die Materialkosten vom Aerogel System erheblich teurer, jedoch kann damit

auch Nutzfläche eingespart werden (siehe Kapitel 3.3). Diese unterschiedlichen Eigenschaften und die dennoch gleichwertige, sehr gute Eignung für den hochanspruchsvollen Einsatzbereich gaben den Anlass zur Materialauswahl.

4.3 Messtechnik

Im Zuge der Untersuchungen wurden das Außenklima, das Innenklima und die Bauteilaufbauten selbst dokumentiert und folgende Parameter gemessen:

Tabelle 9 Messwertparameter vom Innen- und Außenlima

Messwert	Messbereich	Genauigkeit
Außenklima		
Lufttemperatur [°C]	-20 °C bis +60 °C	+/- 0,6 °C
relative Luftfeuchtigkeit [%]	0 % bis 100 %	+/- 3 %
Niederschlag [l/m ²]	-	0,1 mm
Globalstrahlung [W/m ²] (horizontale Fläche)	300 nm bis 1100 nm	maximal 5 % typisch 3 %
Windrichtung [°]	0 ° bis 360 °	+/- 5 %
Windgeschwindigkeit [m/s]	0,5 m/s bis 50 m/s	+/- 3 %
Innenklima (Erdgeschoß und Untergeschoß)		
Lufttemperatur [°C]	-10 °C bis +60 °C	+/- 0,4 °C
relative Luftfeuchtigkeit [%]	0 % bis 100 %	+/- 1,5 %
Materialsensoren		
Temperatur [°C]	-20 °C bis +60 °C	+/- 0,5 °C
relative Luftfeuchtigkeit [%]	0 % bis 100 %	+/- 2,0 %

Es wurden insgesamt 25 Sensoren in die Materialien verbaut, die Temperatur und Feuchtigkeit messen. Die Sensoren wurden einerseits in der Mauerwerksfläche bzw. der Gewölbefläche montiert, sodass keine geometrischen Wärmebrücken wie Kanten oder Ecken Einfluss haben. Andererseits wurden die Sensoren beim Übergang zwischen Gewölbeziegeloberkante und Außenmauer eingebaut, um den Einfluss der geometrischen Wärmebrücke als zweidimensionale Kante erfassen zu können. Alle Sensoren wurden redundant eingebaut. In Abbildung 20 ist eine Übersichtsskizze der Sensoreneinbaupositionen dargestellt. In der Wand- bzw. Gewölbefläche wurden die kalte Seite der Innendämmung und auch das Mauerwerk gemessen. Im Fußbodenaufbau wurde zusätzlich die warme Seite der Dämmung gemessen. Durch die Verwendung von zwei verschiedenen Dämmstoffen und die Doppelung ergaben sich für die Wand 20 Sensoren. Beim Gewölbe wurde nur einseitig eine Dämmung aufgebracht, damit eine Vergleichbarkeit zu einer nicht gedämmten Ausführung gegeben ist. Im Gewölbe wurden insgesamt fünf Sensoren verbaut.

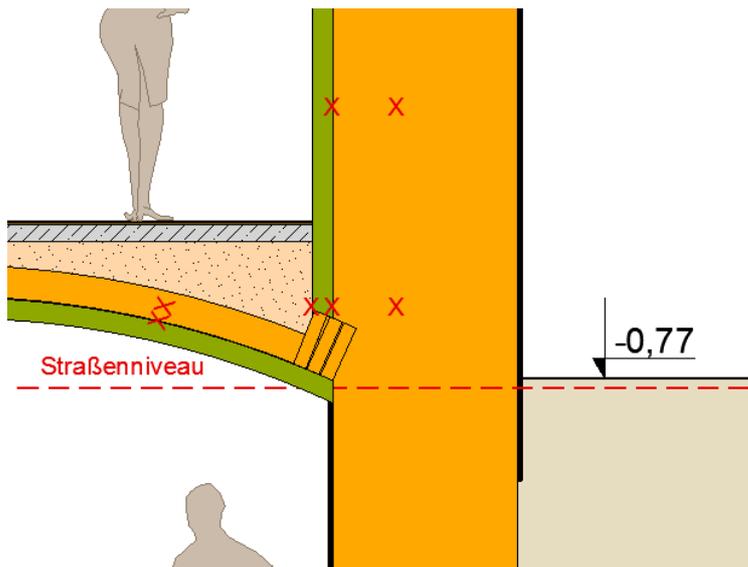


Abbildung 20 Übersichtsskizze der Sensoreinbaupositionen

Das Außenklima und die beiden Innenklimata im Erd- und Untergeschoß wurden beginnend mit dem 26.01.2018 ein Jahr lang gemessen, ohne eine Innendämmungsmontage vorzunehmen, um den Bestandszustand zu dokumentieren. Nach erfolgreichem Entfernen des Innenputzes bzw. des Gewölbeputzes wurden die beiden Innendämmungen und in einem Feld die Gewölbedämmung aufgebracht. Die eingebauten Sensoren haben ab dem 08.02.2019 zu messen begonnen und sind in Abbildung 21 dargestellt.

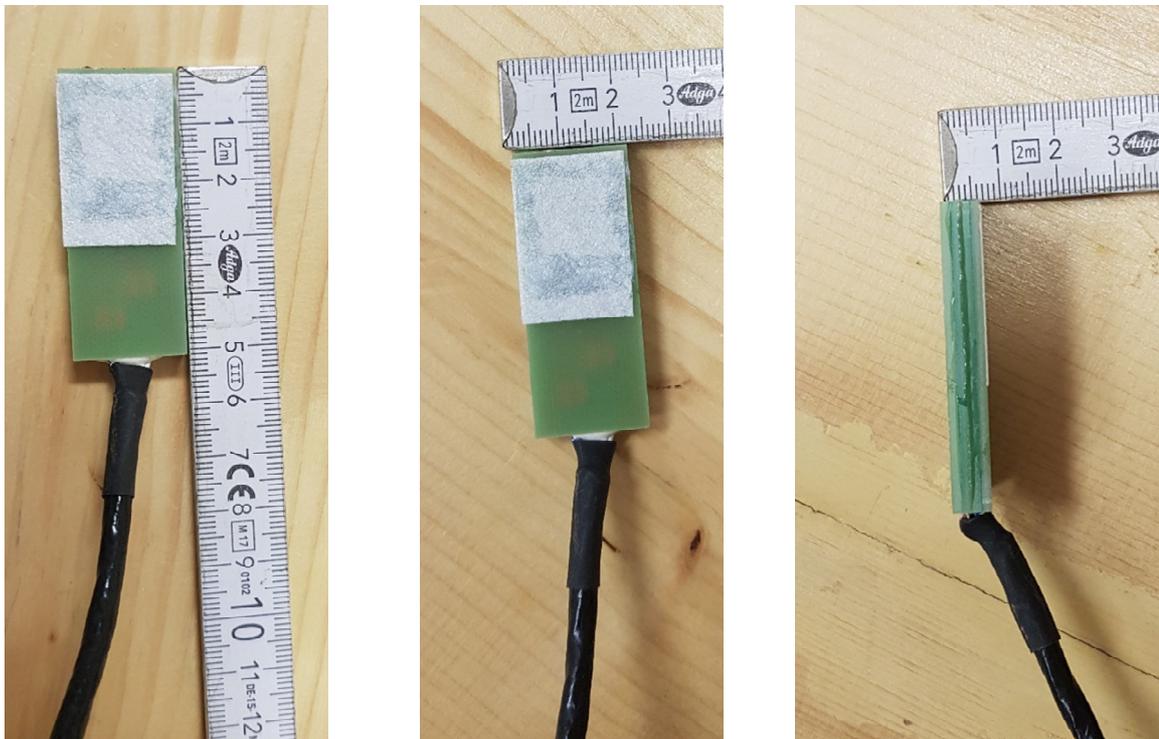


Abbildung 21 Sensoren zur Messung der Temperatur und relativen Luftfeuchte im Material

4.4 Klima und örtliche Randbedingungen

Die Klimadaten wurden, wie in Kapitel 4.3 beschrieben, vor Ort gemessen und zusätzlich wurden Klimadaten für den gleichen Zeitraum von der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) zugekauft. Die Messstation der ZAMG befindet sich bei der Karl-Franzens-Universität (47°04'47"N, 15°26'22"O, Seehöhe 366 m), welche nur ca. 1 km Luftlinie vom Versuchsgebäude entfernt ist und weniger als 10 m absoluten Höhenunterschied aufweist. Daher sind die gemessenen Daten des Versuchsgebäudes und die gemessenen Daten der ZAMG sehr gut vergleichbar. Es ist notwendig zu betonen, dass die Messung der ZAMG nach der ÖNORM Reihe M 9490 [69] erfolgt und die Messdaten am Versuchsgebäude das Mikroklima widerspiegeln sollen und somit nicht genormt sind.

Sämtliche Messwerte sind im Kapitel 6.4 detailliert abgebildet.

4.4.1 Temperatur und relative Luftfeuchte

In Abbildung 22 sind die Temperatur und die relative Luftfeuchte vom Außenbereich der gemessenen Werte des Testgebäudes und der Wetterstation der ZAMG dargestellt. Zu beachten ist, dass Monatsmittelwerte aufgetragen sind, da durch diese Darstellung eine bessere Vergleichbarkeit der Daten entsteht. Die Außenlufttemperatur schwankt im Mittel um 0,35°C, was eine sehr gute Übereinstimmung darstellt. Die relative Luftfeuchte der Messstation des Testgebäudes ist im ersten Jahr um ca. 7 %, im zweiten Jahr um ca. 15 % und im dritten Jahr um ca. 20 % geringer als jene der Messwerte der ZAMG. Die Spreizung deutet eher auf einen kontinuierlich größer werdenden Messfehler hin, als auf einen nachvollziehbaren Unterschied zwischen genormter Messung und Mikroklimamessung.

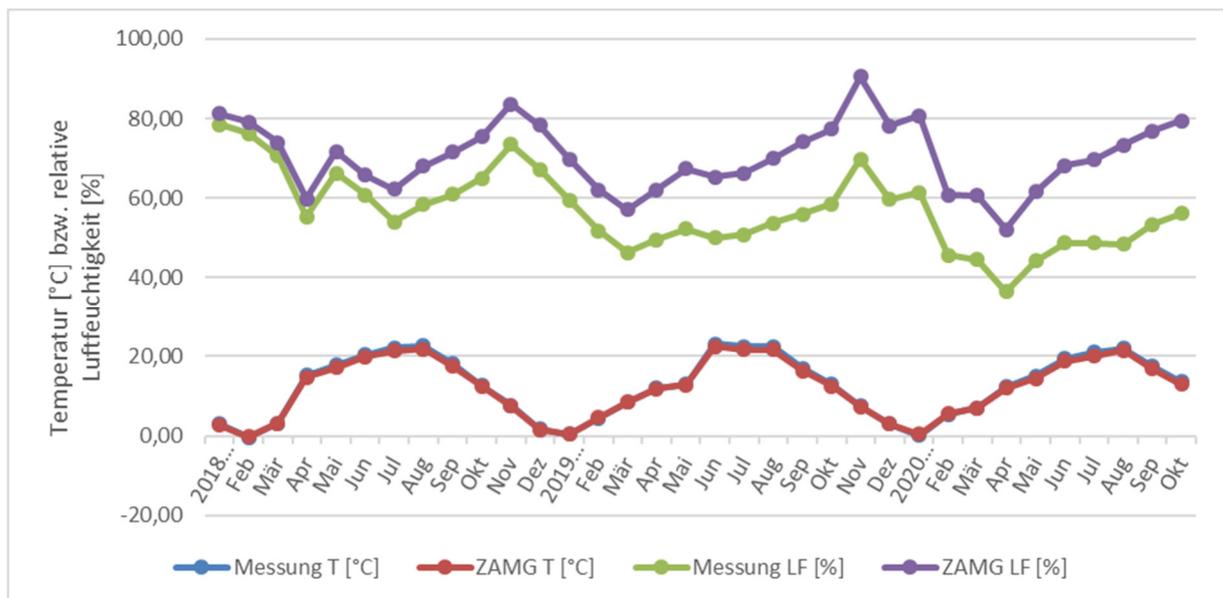


Abbildung 22 Monatsmittelwerte der Temperatur und relativen Luftfeuchte im Außenbereich

Werden die drei Jahre von 2018 bis 2020 übereinander abgebildet (siehe Abbildung 23), dann sieht man, dass die Jahresverläufe nicht stark differieren und dies ist für die Auswirkung auf die Innenklimabedingungen und die Innendämmsysteme entscheidend. In dieser Abbildung sind auch die monatlichen Mittelwerte der Jahre 1971 bis 2000 der

gleichen Messstelle der ZAMG eingetragen, um einen langfristigen Vergleich darstellen zu können.

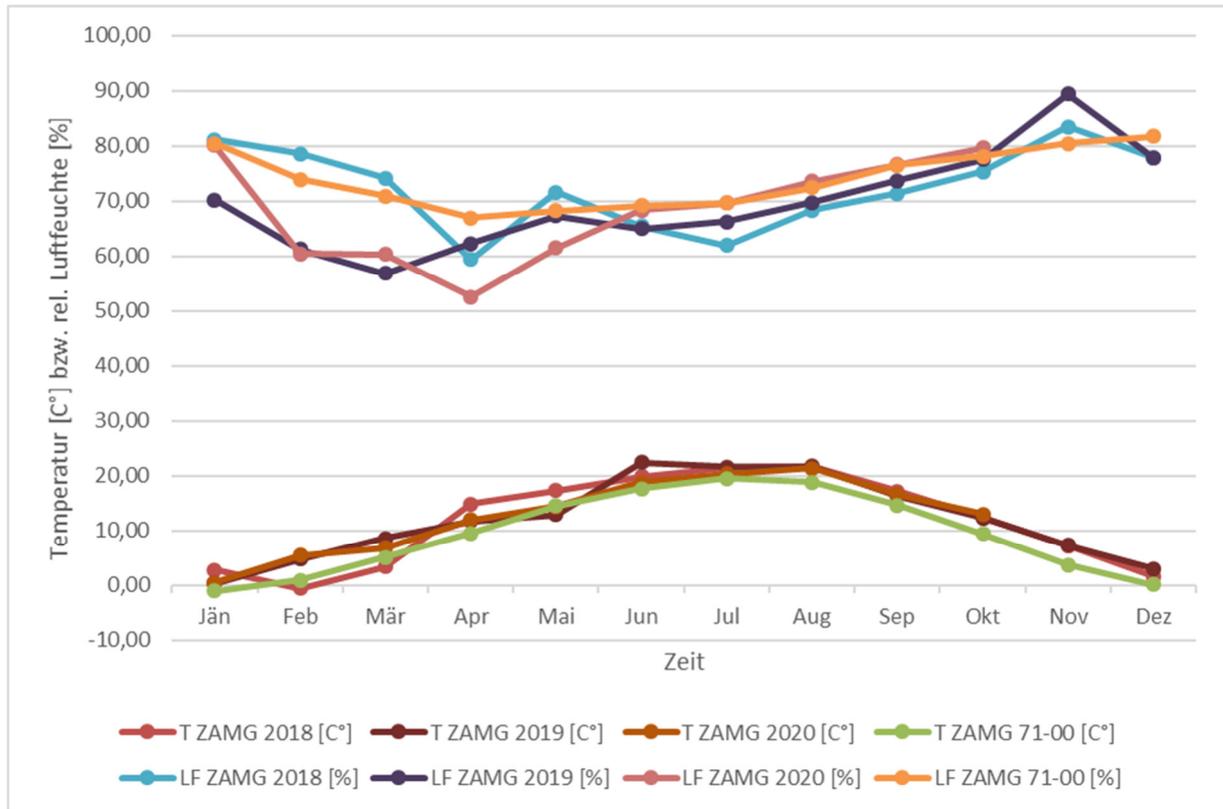


Abbildung 23 Monatsmittelwerte der Temperatur und relativen Luftfeuchte im Außenbereich (ZAMG)

Für den Innenbereich wurden ebenfalls die Temperaturen und relativen Luftfeuchten gemessen und sind als Monatsmittelwerte in Abbildung 24 dargestellt. Es ergeben sich im Erdgeschoß Mittelwerte von 21,5 °C und 47 %. Hier muss angemerkt werden, dass im Jahr 2020 die Schutzmaßnahmen der TU Graz bezüglich der COVID-19-Pandemie einen erheblichen Einfluss auf die Messdaten haben. Die Zeichensäle wurden teilweise vollkommen gesperrt bzw. nur für eine begrenzte Mitgliederzahl geöffnet. Da diese Maßnahmen ab Mitte März 2020 vollzogen wurden, ist die Erdgeschoß Innentemperatur um 4,2° C kühler und die relative Luftfeuchte um ca. 14 % geringer als in den beiden Vorjahren. Betrachtet man die Mittelwerte aus den Jahren 2018 und 2019, dann erhält man eine Rauminnentemperatur von 22,9 °C und eine relative Luftfeuchte von ca. 52 %.

Für das Untergeschoß ergeben sich Mittelwerte über die drei Jahre von 15,4 °C und ca. 61 % relativer Luftfeuchte. Die Auswirkung der COVID-19-Pandemie ist durch das Abkühlen der darüber liegenden Räume ebenfalls in den Messdaten abzulesen. Die Raumluftinnentemperatur des Untergeschoßes aus 2020 ist den beiden Vorjahren gegenüber um 2,05 °C und die relative Luftfeuchte um ca. 18 % geringer. Vergleicht man die Außenklimawerte, so können die Abweichungen nicht auf einen stark differenzierenden Verlauf zurückgeführt werden (siehe Abbildung 24).

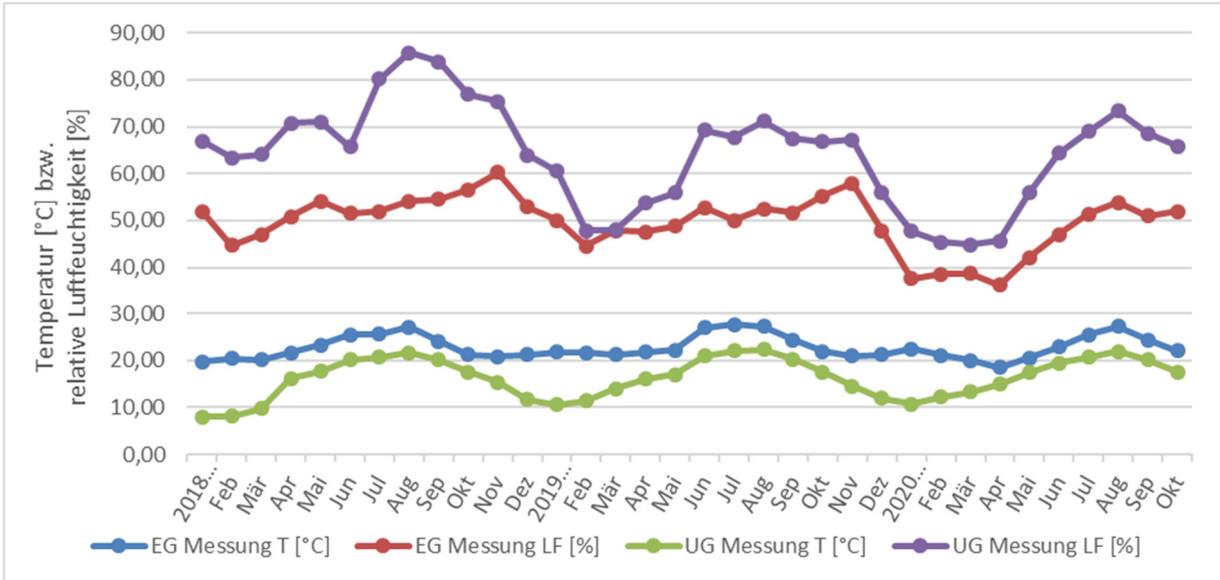


Abbildung 24 Monatsmittelwerte der Temperatur und relativen Luftfeuchte im Innenbereich

4.4.2 Niederschlag

Für die Niederschlagsmessung wurde ein Wippensystem mit einer maximalen Intensität von 11 mm/min und einer Auflösung von 0,1 mm Niederschlag pro Wippenschlag verwendet. Die Umrechnung der Wippenschläge wurde jedoch über lange Zeit nicht korrekt durchgeführt und so konnten die Werte nicht genutzt werden. Nach der Kalibrierung des Sensors stimmten die gemessenen Daten sehr gut mit den Daten der ZAMG überein. Durch den Messausfall und den nachträglichen Abgleich der Daten wurden für den Niederschlag die Datenreihe der ZAMG aus den Messjahren 2018 bis 2020 verwendet. Zusätzlich sind die langjährigen Mittelwerte der ZAMG Messdaten eingefügt (siehe Abbildung 25).

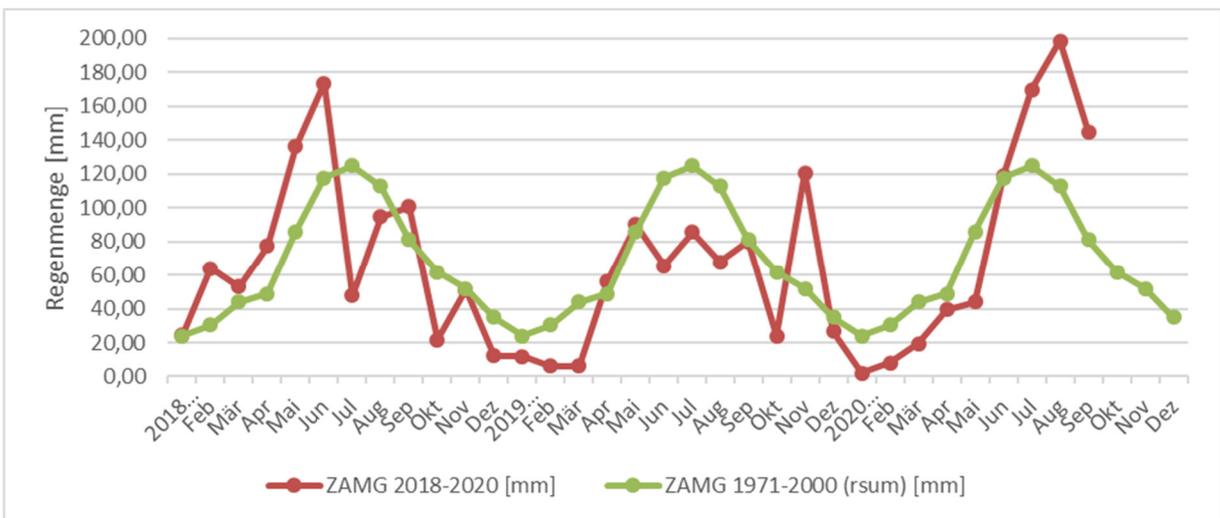


Abbildung 25 Regenmengen je Monat im Vergleich von 1971-2000 und 2018-2020 der ZAMG

Die Niederschlagsdaten sind allgemein für Innenwanddämmsysteme an Wänden und deren hygrothermische Simulationen wichtig, da sich daraus und in Kombination mit den Winddaten meist die maßgebliche Feuchtebelastung durch den Schlagregen ergibt. Die

monatlichen Mittelwerte über die drei Messjahre ergeben 66,94 mm. Dies liegt 1,3 mm unter dem monatlichen Mittelwert der ZAMG Messungen aus den Jahren 1971 bis 2000.

4.4.3 Strahlung

Die Anwendung der Strahlung zeigte sich in vorangegangenen Forschungsarbeiten als schwierig bzw. ungenau, wodurch auf gemessene Oberflächentemperaturen zurückgegriffen wurde. In dieser Dissertation sollen einerseits die gängigen Vorgehensweisen für Simulationen überprüft und bewertet werden und andererseits wurden in der oben genannten Forschungsarbeit zwei Verfahren verworfen. Die Verwendung von diffuser und direkter Strahlung von gemessenen Daten einer örtlichen Wetterstation konnten auf Grund von Verschattungen durch einen Baum und von Messausfällen nicht angewendet werden. Weiter wurde die Umrechnung der horizontalen Globalstrahlung auf die diffuse und direkte Strahlung nicht weiter angewendet, da die Änderung der Neigung des Pyranometers verändert wurde und Testsimulationen keine gute Übereinstimmung erbrachten [68].

Durch die große Dicke der Außenwände von 100 cm hat die Strahlung ohnehin nur sehr geringen Einfluss auf das Verhalten der Innendämmsysteme für die vorliegenden Untersuchungen. In Abbildung 26 sind die Mittelwerte der monatlichen Globalstrahlung der Messwerte und der ZAMG, dargestellt. Die detailliertere Aufgliederung der direkten und diffusen Anteile der Globalstrahlung der Messwerte und der ZAMG sind in Abbildung 27 abgebildet. Der Anteil der kurzwelligen Direktstrahlung an der gemessenen Globalstrahlung wurde über den prozentuellen Anteil der kurzwelligen Direktstrahlung der ZAMG an der Globalstrahlung der ZAMG ermittelt. Durch den Abzug der Direktstrahlung von der Globalstrahlung konnte die kurzwellige diffuse Strahlung ermittelt werden. Beide Abbildungen zeigen den starken Einfluss der Nachbarbebauung und der Ausrichtung der Außenwand nach Nordwesten, sodass die gemessenen Werte der Globalstrahlung im Mittel um ca. 72.600 W/m² der Monatssumme beim Versuchshaus geringer sind, als bei der normierten Wetterstation.

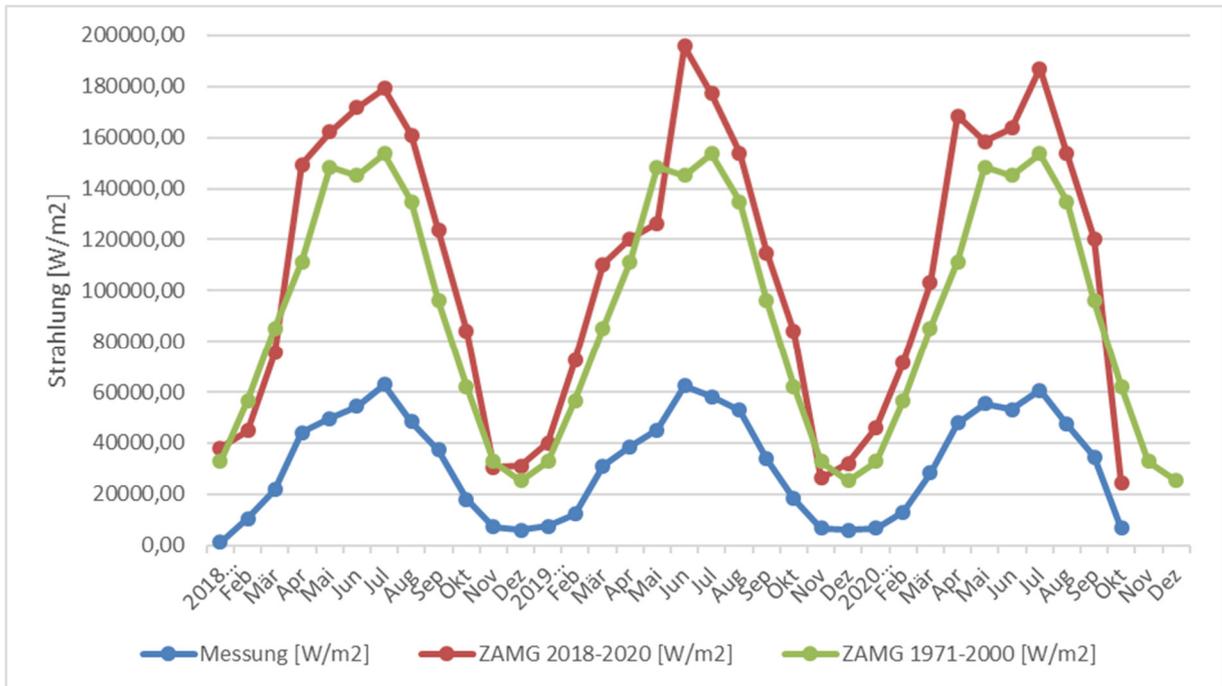


Abbildung 26 Summen der monatlichen Globalstrahlung von Messung und ZAMG

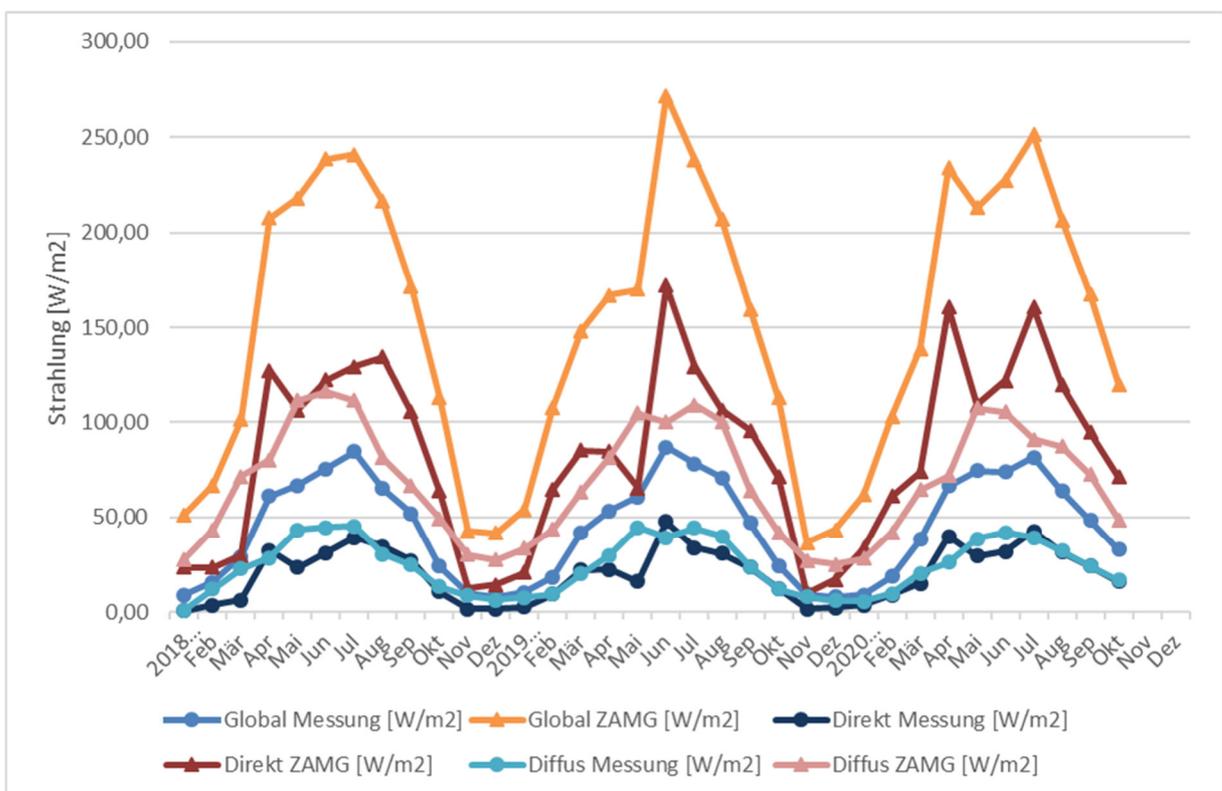


Abbildung 27 Stündliche Mittelwerte je Monat der Globalstrahlung und der diffusen und direkten Strahlungsanteile von Messung und ZAMG

Mit Hilfe der Software *Meteonorm* konnte zusätzlich die langwellige Strahlung des Himmels aus den ZAMG Daten generiert werden, da diese weder am Versuchsgebäude noch bei der Wetterstation der ZAMG gemessen wurde (siehe Abbildung 28).

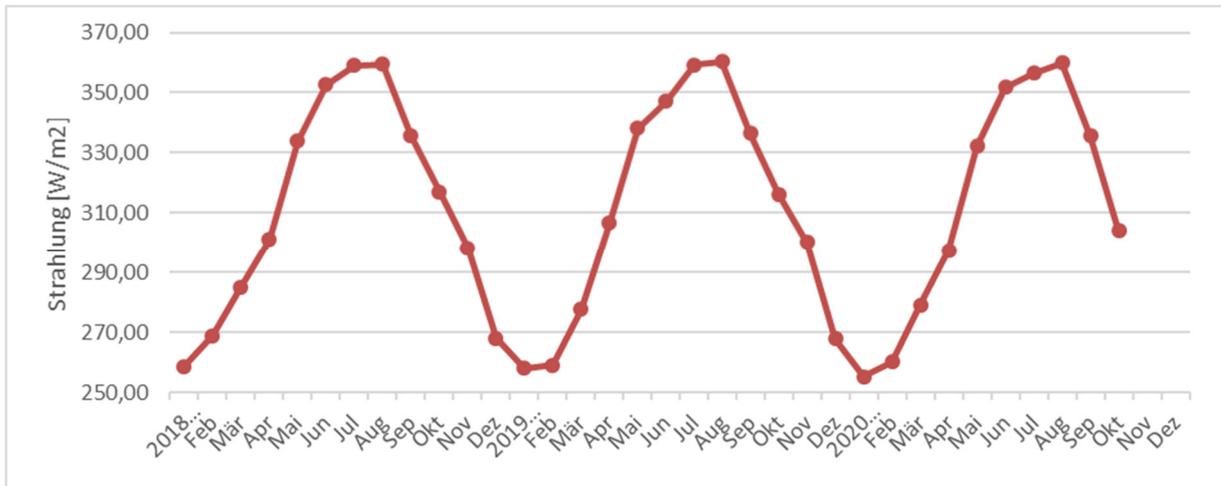


Abbildung 28 langwellige Strahlung generiert aus den Daten der ZAMG von der Software METEONORM

4.4.4 Windgeschwindigkeit und Windrichtung

Die Unterschiede der gemessenen Windgeschwindigkeit und Windrichtung beim Testgebäude sind, wie auch die Strahlungsdaten, äußerst stark beeinflusst durch die Umgebungsbedingungen und die nicht normgemäße Messung. Laut ÖNORM M 9490-6 [69] sind die Windrichtungen folgendermaßen vorgeschrieben:

- 360° = Nord (N)
- 90° = Ost (E)
- 180° = Süd (S)
- 270° = West (W)
- 0° = bei einer Windgeschwindigkeit von 0,0 m/s

Die Höhe des Sensors lt. Normmessung von Windrichtung und -geschwindigkeit muss 10 m über dem ungestörten Gelände erfolgen und darf nicht durch Bebauungen beeinflusst werden. Vergleicht man nun die Messung am Testgebäude so wurden Windrichtung und -geschwindigkeit in ca. 3,70 m Höhe an der Nordostfassade gemessen. Die Messung spiegelt die örtliche Situation mit den zugehörigen Gassen, umgebenden Gebäuden und dem angrenzenden Innenhof wider. Somit sind diese Messdaten nur schwer mit den Daten der ZAMG vergleichbar.

Die monatlichen Mittelwerte der Windgeschwindigkeiten zeigen einen gemäßigten Verlauf, mit einer mittleren Abweichung der Messdaten am Versuchsobjekt von 0,77 m/s (\pm 2,77 km/h) gegenüber den Werten der ZAMG. Die tatsächlichen Messwerte zeigen Maximalwerte von 5,67 m/s (\pm 20,41 km/h) beim Versuchsgebäude bzw. 8,00 m/s (\pm 28,8 km/h) in den ZAMG Daten. In der Abbildung 29 sind auch die monatlichen Mittelwerte der Jahre 1971 bis 2000 der gleichen Messstelle der ZAMG in den drei Jahren eingetragen, um einen langfristigen Vergleich zu bekommen.

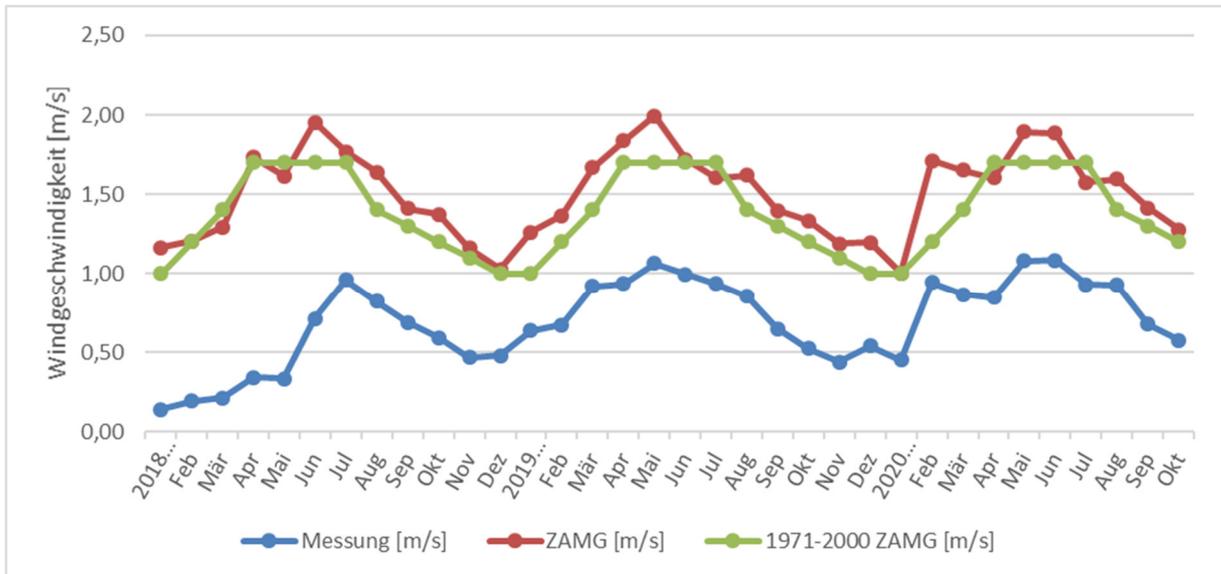


Abbildung 29 Monatsmittelwerte der Windgeschwindigkeit

Der prozentuelle Anteil der gemessenen Windrichtung am Versuchsgebäude unterscheidet sich sehr stark von den Messdaten der ZAMG. Wie oben beschrieben, zum Teil bedingt durch die Umgebung. Die Aufzeichnungen des 30-jährigen Mittels der ZAMG zeigen, dass der Wind sehr häufig von Nordwesten oder Südosten kommt (siehe Abbildung 30).

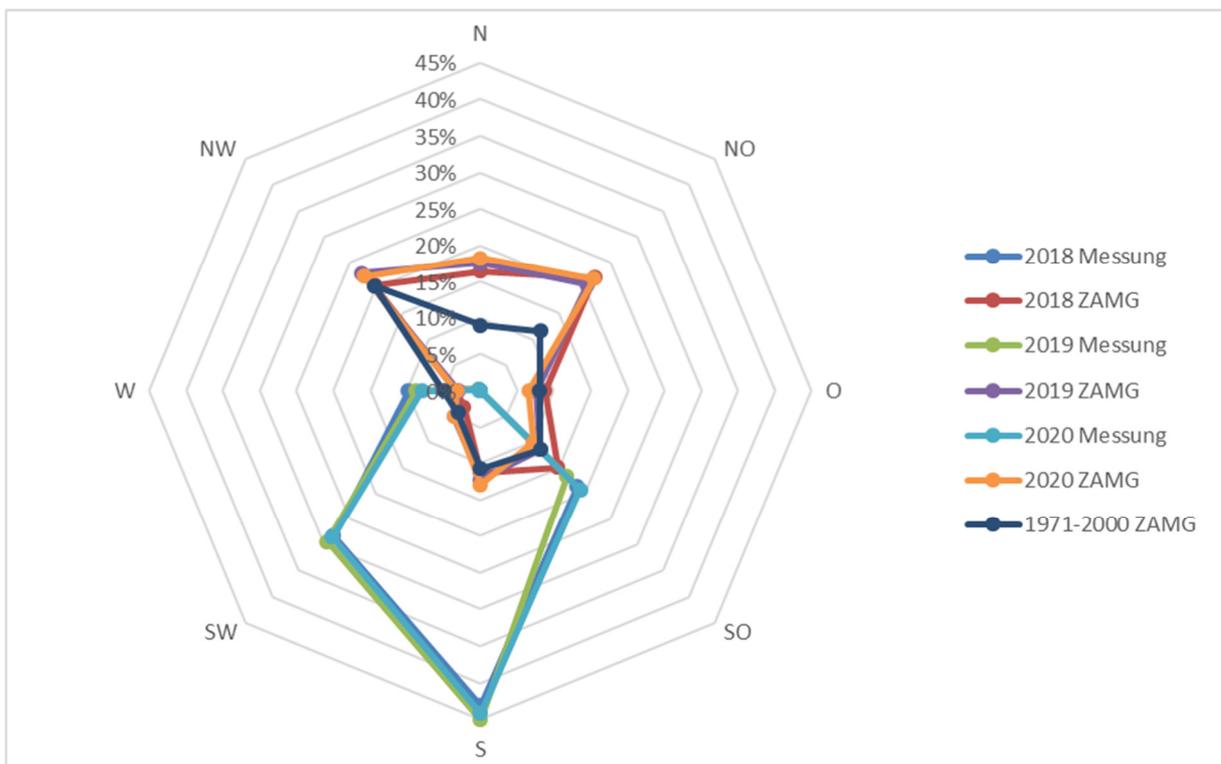


Abbildung 30 Prozentueller Anteil nach Windrichtung

Die aufgezeichneten Häufigkeiten der Windrichtung von der ZAMG können nun auf die Lage des Versuchsgebäudes übertragen werden (siehe Abbildung 31).

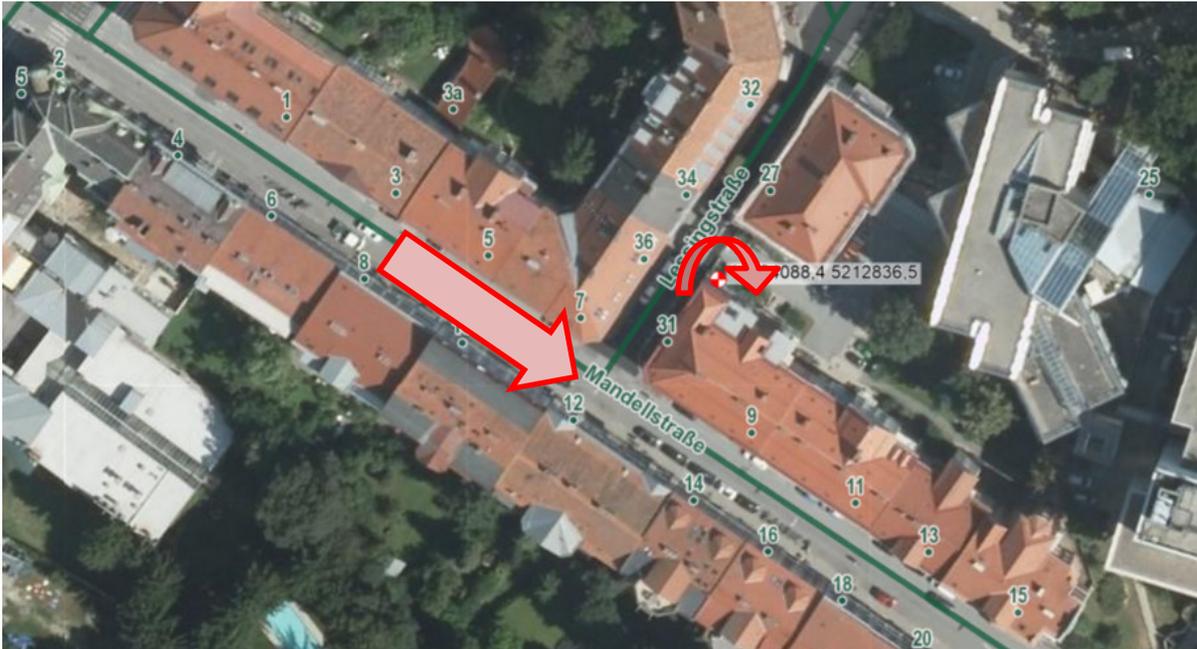


Abbildung 31 Verdeutlichung der Windführung im Bereich des Versuchsgebäudes [48]

Trifft nun der Nordwestwind auf das Versuchsgebäude in der Mandellstraße 9, so entstehen an der nördlichsten Hausecke Verwirbelungen, die einen Sog erzeugen (siehe Abbildung 32). Diese spiegeln sich in der Messung wider, sodass ein hoher Anteil an Süd- bzw. Südwest- und Südostwind gemessen wird.

Strömung

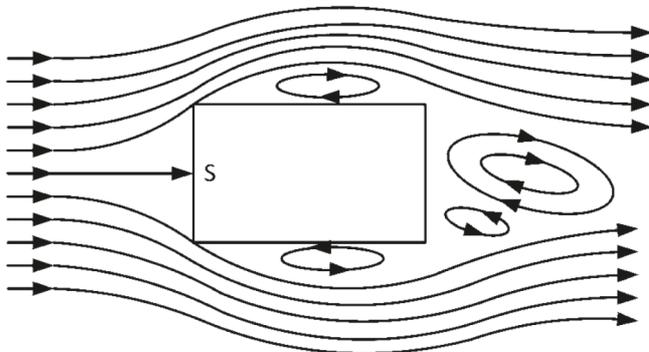


Abbildung 32 Umströmung eines Baukörpers [70]

4.4.5 Erdreich und Grundwasser

Von einer nahegelegenen Baustelle, bei der Bodenuntersuchungen mittels Bohrungen durchgeführt wurden, konnte eine detaillierte Schichtung des Bodenaufbaus mit Materialkennndaten ermittelt werden (siehe Abbildung 33). Auf Grund der vertraulich zu behandelnden Quelle wird auf einen Verweis verzichtet.

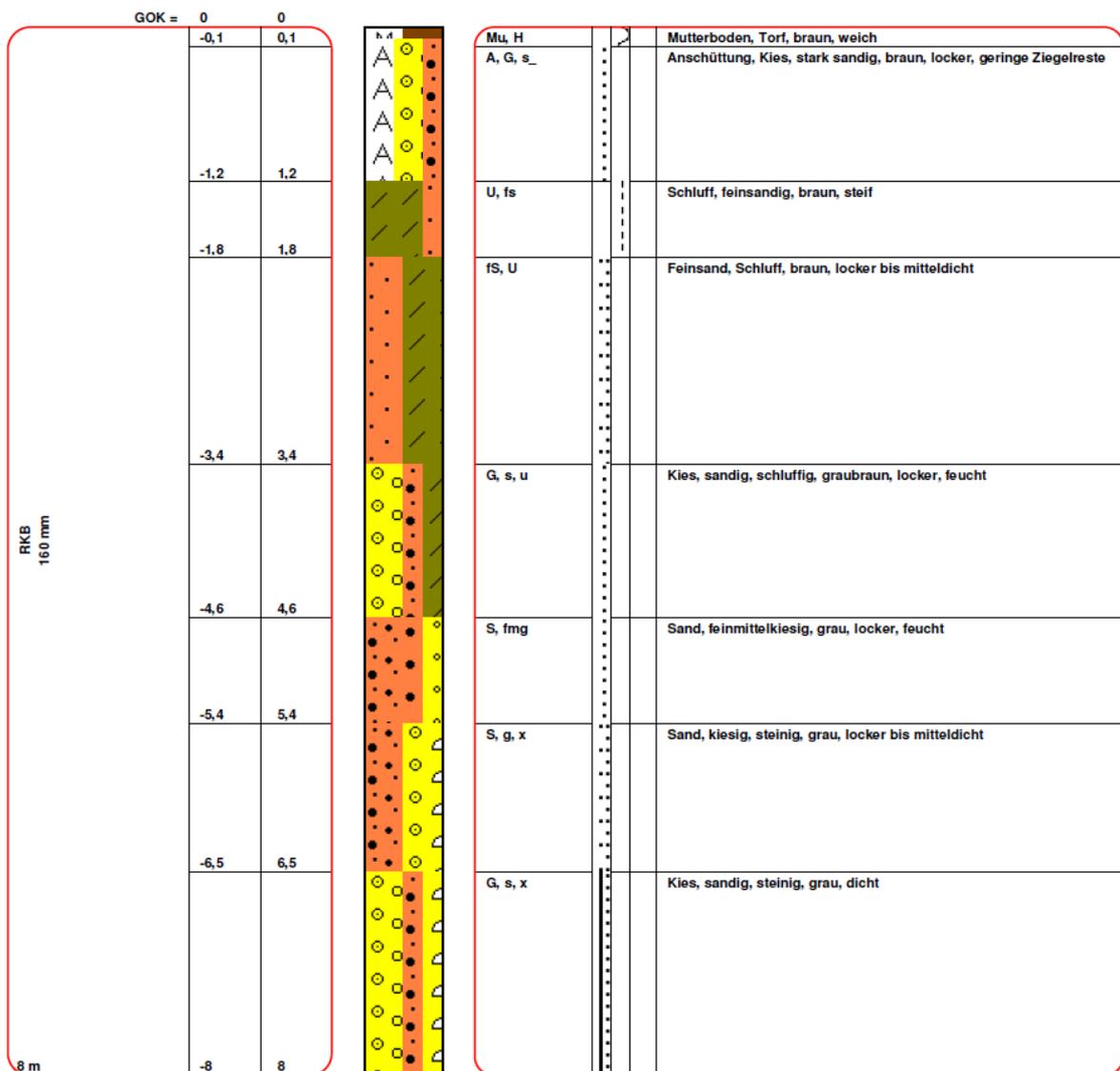


Abbildung 33 Bodenschichten angrenzendes Erdreich

Für die Randbedingungen des Wassers im Erdreich konnte eine nahegelegene Grundwassermessstelle [71] herangezogen werden, deren Abstand vom Testgebäude lediglich ca. 300 m beträgt und anhand derer seit 01.05.1985 Aufzeichnungen zur Verfügung stehen. Die aufgezeichneten Daten sind die Jahresmaxima, -minima und Monatsmittelstände sowie die Grundwassertemperatur im Monatsmittel. Der Wasserspiegel schwankt zwischen ca. 11,0 und 11,9 m unter der Geländeoberkante. Das Maximum ergab sich im Jahr 1997 bei 11,03 m und das Minimum im Jahr 2008 mit 11,86 m Tiefe des Grundwasserspiegels unter der Geländeoberkante. Der Mittelwert stellt sich somit bei 11,53 m ein. Die Messdaten der Grundwassertemperatur sind ab Dezember 2005 vorhanden und schwanken zwischen 12,4 °C und 13,1 °C, womit ein Mittelwert bei 12,85 °C abgeleitet werden kann (siehe Abbildung 34).

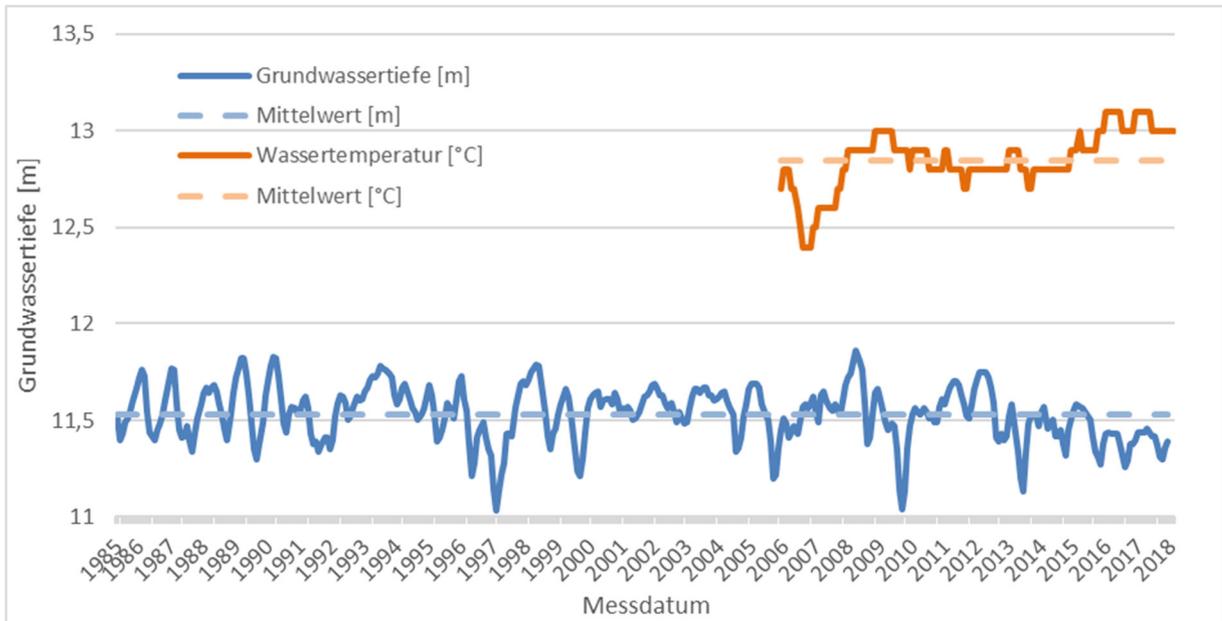


Abbildung 34 Monatsmittelwerte der Grundwassertiefe und -temperatur

4.4.6 Klimadatenzusammenfassung

In Tabelle 10 sind zusammengefasste Messdaten und Daten der ZAMG dargestellt, um einen übersichtlichen Vergleich zu erhalten. Auf Grund der Temperaturen lässt sich erkennen, dass das Klima in den Jahren 2018 bis 2020 gegenüber den Messdaten der ZAMG von 1971 bis 2000 viel wärmer ist. Die Strahlungssumme am Messgebäude ist jedoch geringer, aber das liegt nur daran, dass an der Nordwestfassade gemessen wurde und somit ein großer Teil der Sonnenstrahlung absichtlich nicht erfasst wurde, um das Mikroklima des Testbereiches zu erfassen. Auch die Niederschlagswerte der ZAMG Messdaten im Beobachtungszeitraum sind am Messgebäude vergleichsweise gering. Durch die Messausfälle des Regensensors ergeben die Messergebnisse beim Testgebäude keine vergleichbaren Daten.

Tabelle 10 Klimadatenübersicht

2018 bis 2020	Klimamessung Testgebäude	ZAMG
Mittlere Lufttemperatur [C°]	12,8	12,2
ZAMG 1971 bis 2000 [C°]	9,4	
Eistage [n] ($T_{\max} < 0^{\circ}\text{C}$)	6,3	6,7
Frosttage [n] ($T_{\min} < 0^{\circ}\text{C}$ und $T_{\max} \geq 0^{\circ}\text{C}$)	55,7	68,0
Sommertage [n] (T_{\max} zw. 25 und 30 °C)	94,3	80,0
heiße Tage [n] ($T_{\max} \geq 30^{\circ}\text{C}$)	30,0	17,7
Strahlungssumme [kWh/m ²]	362	1.234
ZAMG 1971 bis 2000 [kWh/m ²]	1.085	
Regensumme [mm]	816*	753
ZAMG 1971 bis 2000 [mm]	819	
*Summe aus Oktober 2019 bis inklusive September 2020		

4.5 Materialparameter

Um instationäre, hygrothermische Simulationen für Bestandsbauten möglichst realistisch durchführen zu können, sind die Kenntnisse über die vorhandenen Materialparameter von essenzieller Bedeutung. Für die Erfassung aller notwendigen Materialeigenschaften als neuen Datensatz samt Implementierung in eine Datenbank einer Simulationssoftware sind die untenstehenden Parameter erforderlich. Weiter ist es auch notwendig, die bestehenden Feuchtegehalte der Materialien zu messen und zu dokumentieren. Die Untersuchungen der Salzgehalte der einzelnen Proben werden in Kapitel 4.7 beschrieben.

- Trockenrohddichte ρ [kg/m³]
- Porosität Θ_{por} [m³/m³]
- Spezifische Wärmespeicherkapazität c [J/kgK]
- Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK]
- Wasseraufsaugexperiment (Wasseraufnahmekoeffizient) A_w [kg/m²s^{0,5}]
- Wasserdampfdiffusionswiderstand (wet-cup) μ [-]
- Feuchtespeicherung im hygroskopischen und überhygroskopischen Bereich
 Θ_{eff} effektive Sättigung [m³/m³]
- kapillare Feuchteleitfähigkeit K_{leff} - Flüssigwasserleitfähigkeit bei effektiver Sättigung [s]
- Trocknungsverlauf

Die labortechnische Erfassung und Einarbeitung in die Software jedes einzelnen Materials kostet ca. 7.000 Euro (Stand Oktober 2017), wobei darauf hingewiesen werden muss, dass die vorkommenden Materialien auf den ersten Blick ähnlich erscheinen, sich aber im Detail stark unterscheiden können. Vergleicht man die Normalformatziegel, die in der erdberührten Außenwand vom Untergeschoß, in der Gewölbeausbildung und in der Außenwand des Erdgeschoßes zur Anwendung kamen, so wurden völlig unterschiedliche Materialparameter festgestellt (vgl. Tabelle 11).

Tabelle 11 ausgewählte gemessene Materialparameter der verbauten Normalformatziegel [72]

Bauteil	Trockendichte	Δ	Porosität	Δ	Wärmeleitfähigkeit	Δ
	kg/m ³	%	m ³ /m ³	%	W/mK	%
EG-Wand	1726,33		0,36		0,576	
UG-Wand	1928,50	+11,7	0,28	-22,2	0,983	+70,7
UG-Gewölbe	1965,00	+13,8	0,30	-16,7	nicht gemessen	

Die dargestellten Werte sind Mittelwerte, da die Messungen eine äußerst breite Streuung ergaben. Die Rohdichte der Ziegel ergab Werte zwischen 1554 kg/m³ und 2138 kg/m³, die Sättigungsgrade lagen zwischen 1,50 % bis 47,50 % und die Porosität zwischen 0,20 m³/m³ und 0,42 m³/m³.

In der Praxis sind oft nicht die Zeit bzw. die monetären Mittel gegeben, um alle Materialparameter labortechnisch aufbereiten zu lassen und so werden einzelne Parameter gemessen und mit bekannten Datensätzen verglichen. Die detaillierten Vergleiche der verwendeten Datensätze für DELPHIN und WUFI sind in Kapitel 5 dargestellt.

Durch die extremen Randbedingungen in Hinsicht auf die Feuchtigkeitsbelastung im Sockelbereich rückt die temperatur- und feuchteabhängige Wärmeleitfähigkeit besonders in den Vordergrund. Die unsanierten Gründerzeitgebäude ohne Abdichtungen stellen die höchsten zugelassenen Feuchtebeanspruchungen im Wohnbau dar. In Kombination mit Innendämmungen wird hier die Wärmezufuhr aus dem Innenraum stark vermindert, sodass die Austrocknung der Wände noch schwieriger wird. Der Innenputz stellt diesbezüglich kein Problem dar, da die Feuchtebelastung sehr gering ist und die Temperaturen durch das Innenraumklima hoch sind. Der Außenputz ist für die hohen Anforderungen ausgelegt, da er nicht nur die Funktion eines optischen Abschlusses, sondern auch das Abhalten des Schlagregens innehat. Der Innen- und Außenputz stellen in Hinsicht auf den Wärmeschutz eine vernachlässigbare Rolle dar und somit stehen hier die Innendämmung und auch das Mauerwerk aus Vollziegeln im Fokus.

Die feuchte- und temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeiten der Normalformatziegel wurden gemessen und sind in [73] dargestellt. In Abbildung 35 sind die Wärmeleitfähigkeiten der Ziegel aus dem Untergeschoß und dem Erdgeschoß von trockenem Zustand bis zur maximalen Sättigung bei zwei unterschiedlichen Messtemperaturen aufgetragen. Erwartungsgemäß steigt bei zunehmender Feuchtigkeit die Wärmeleitfähigkeit an, jedoch lässt sich auch erkennen, dass die Verläufe - gemessen bei unterschiedlichen Material- und Lufttemperaturen - in einigen Teilbereichen der Feuchtigkeitsstufen weit auseinandergehen. Der Ziegel aus dem Erdgeschoß hat bei einem Wassergehalt von ca. 10 M% eine Wärmeleitfähigkeit von 0,870 W/mK bei 20 °C und 0,661 W/mK bei 5 °C. Das entspricht einer Abweichung von 0,209 W/mK (ca. 24 %) bei einem Wassergehalt von ca. 172 kg/m³. Der gemessene Sättigungsgrad beim Ziegel im Erdgeschoß betrug zwischen 1,50 und 10,50 %.

Betrachtet man den Ziegel des Untergeschoßes, so wurde ein mittlerer Wassergehalt von 9,90 M% gemessen. In diesem Bereich liegt die Wärmeleitfähigkeit gemessen bei ca. 23°C bei 1,331 W/m K und bei 5 °C bei 1,222 W/mK. Dies ergibt eine Differenz von 0,109 W/mK (ca. 9 %). An dieser Stelle wird angemerkt, dass die Probenentnahmen der Ziegel an der Mauerinnenseite bis maximal 30 cm in die Tiefe erfolgte, da andernfalls zu große Zerstörungen am Bestandsmauerwerk notwendig geworden wären. Durch die Dicke der

Wand bis zu 100 cm, muss davon ausgegangen werden, dass die Wassergehalte der Ziegel stark ansteigen, da an der Außenseite stärkere Wasserbelastungen durch das Erdreich bzw. den Schlagregen erfolgen. Außerdem trägt das Innenklima zur Austrocknung der raumseitigen Ziegel bei. Auf Grund dieser Tatsachen sind die Spreizungen der Wärmeleitfähigkeitskurven, gemessen bei unterschiedlichen Temperaturen, in den höheren Wassergehaltsbereichen für die Dissertation durchaus maßgeblich.

Durch Abbildung 35 wird auch verdeutlicht, dass die Ziegel aus dem Untergeschoß viel schneller gesättigt sind, als die Ziegel des Erdgeschoßes. Das ist denkbar schlecht, da im erdberührten Bereich des Untergeschoßes die Wasserbelastung viel höher ist als im erdnahen Bereich des Erdgeschoßes und somit steigt die Wärmeleitfähigkeit bei voller Sättigung des Ziegels bis zum 1,7-fachen gegenüber dem trockenen Zustand.

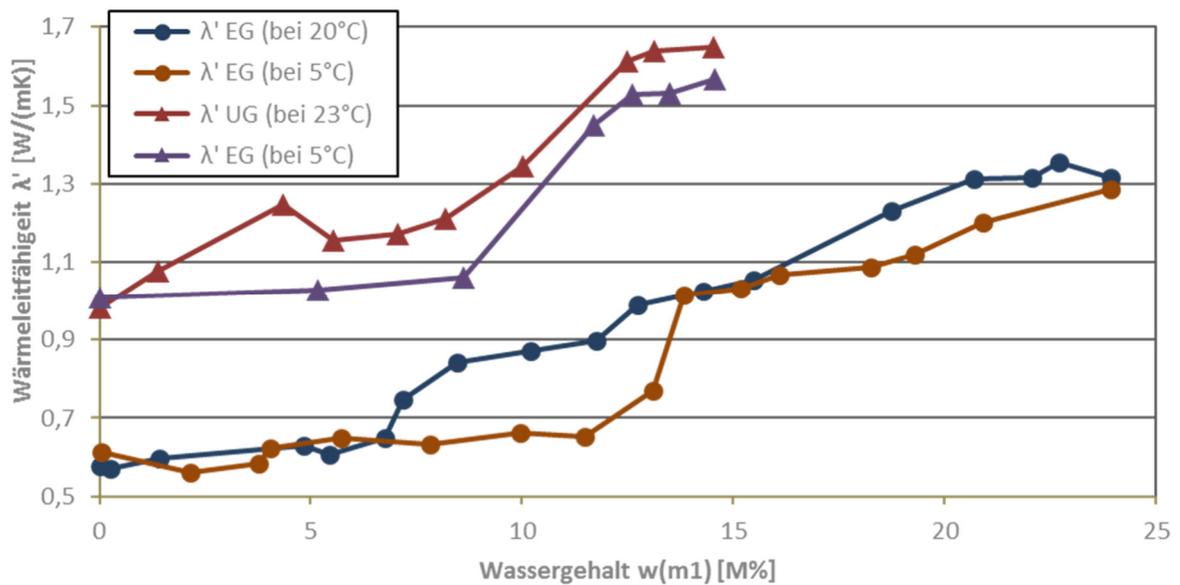


Abbildung 35 Wärmeleitfähigkeit λ' in Abhängigkeit des Wassergehaltes $w(m1)$

In Abbildung 36 sind die gemessenen feuchteabhängigen Wärmeleitfähigkeiten der Ziegel, verglichen mit Verläufen bei unterschiedlichen Temperaturen sowie mit den Mittelwerten der für die Simulation in Frage kommenden Datensätze aus den Programmen DELPHIN und WUFI, ersichtlich. Die Auswahl der Datensätze ist in Kapitel 5 detailliert beschrieben. Die beiden dargestellten Geraden sollten eigentlich die gleichen Datensätze darstellen. Es lässt sich jedoch erkennen, dass für die Datensätze aus DELPHIN die simulationstechnisch relevanten Bereiche des Erdgeschoßziegels gut abgebildet werden, die Spreizung zum Ziegel aus dem Untergeschoß jedoch sehr groß ist. Der Mittelwert der Datensätze aus WUFI deckt sich weder mit den gemessenen Datensätzen des Ziegels aus dem Untergeschoß, noch mit jenen aus dem Erdgeschoß. Die gemittelten Datensätze aus DELPHIN passen jedoch sehr gut mit der Wärmeleitfähigkeit der Messung bei niedrigeren Feuchtegehalten des Erdgeschoß Ziegels überein.

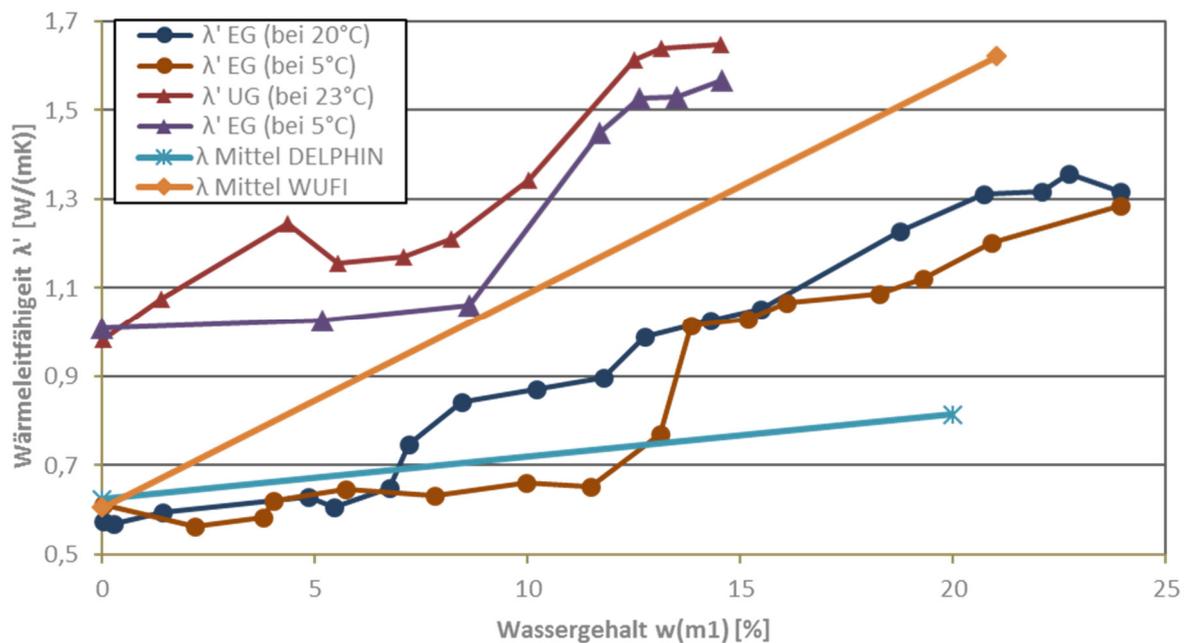


Abbildung 36 gemessene Wärmeleitfähigkeit λ' und gemittelte Datensätze in Abhängigkeit des Wassergehaltes $w(m1)$

Wird statt dem Wassergehalt der Durchfeuchtungsgrad auf der Abszisse aufgetragen, wie in Abbildung 37, dann lassen sich die gemessenen feuchteabhängigen Wärmeleitfähigkeiten besser miteinander vergleichen. Man kann erkennen, dass sich die Messkurven ähnlich zueinander verhalten, aber jene des Ziegels aus dem Untergeschoß im Mittel eine um 0,35 W/mK höhere feuchteabhängige Wärmeleitfähigkeit darstellt als die des Ziegels aus dem Erdgeschoß.

Die dargestellten Differenzen zwischen den Kennwerten der gemessenen Materialparameter der Ziegel und jenen aus den Datenbanken der Simulationsprogramme lassen sich auch auf die weiteren Materialien der Sockelanschlussdetails übertragen. Dies wären:

- Bodenbelag (Eichenparkett)
- Estrich
- Ausgleichsschüttung (Hochofenschlacke)
- Innenputz
- Außenputz

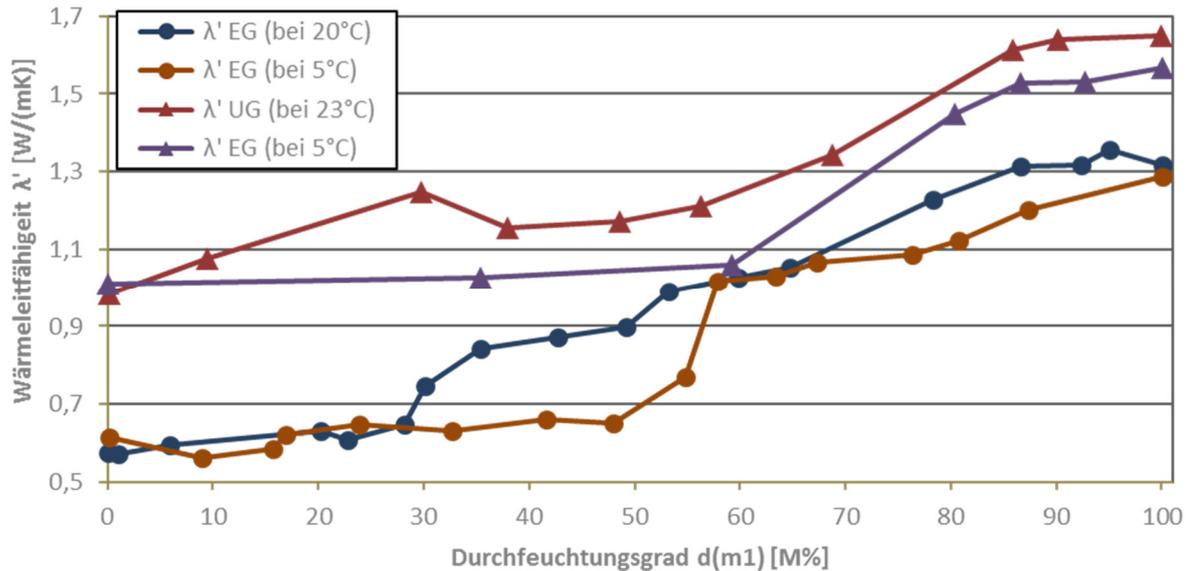


Abbildung 37 Wärmeleitfähigkeit λ' in Abhängigkeit des Durchfeuchtungsgrades $d(m1)$

Die Materialparameter der Innendämmung sind durch Messungen bekannt und teilweise in die Software DELPHIN bzw. WUFI implementiert. Die Daten des Aerogel Dämmputzes namens *Fixit* von *Röfix* wurden vom *Fraunhofer Institut* gemessen und vom Hersteller dahingehend vertraulich übermittelt, sodass nicht alle Auswertungen der Materialparameter der Datensätze in dieser Arbeit dargestellt werden können. Die in Tabelle 12 dargestellten Daten von *Fixit 222* sind jene aus veröffentlichten Datenblättern und mit den unveröffentlichten Daten vergleichbar. Die Daten von *Fixit 223* stammen aus dem verfügbaren Datensatz von WUFI Pro 6 und sind mit den unveröffentlichten Daten vergleichbar. Die Daten der Aufspritzzellulose des Produzenten *Zellulosedämmstoffproduktion CPH* sind vollständig in der DELPHIN Datenbank enthalten. Alle Dämmsysteme konnten somit in DELPHIN und WUFI implementiert und die Simulationen mit den gemessenen Daten ausgeführt werden.

Tabelle 12 Materialparameter der Innendämmsysteme für DELPHIN und WUFI

Nr.	Material	ρ	c	λ	μ	W_{sat}	W_{80}	A_w	K_{leff}
		[kg/m ³]	[J/kgK]	[W/mK]	[-]	kg/m ³	kg/m ³	[kg/m ² s ^{0,5}]	[s]
EG Wand Innendämmsysteme									
579	CPH Cellulose-Dämmputz	268,1	1500,00	0,067	9,97	826,6	14,7	1,20	4,6E-09
681	Kalkinnenputz	1245,3	1026,00	0,377	8,36	283,4	54,2	0,05	3,9E-11
-	Aerogel Fixit 222 (lt. Datenblatt)	220,0	1000,00	0,028	4,50	-	-	-	-
-	Aerogel Fixit 223 (lt. Datenblatt)	1200,0	900,00	0,368	7,00	481,7	46,8	0,23	-

4.6 Bauteil-Temperatur und -Feuchtigkeit

In diesem Kapitel werden die Messergebnisse, aufgeteilt in die Bereiche des Erd- und Untergeschoßes mit den jeweils zugehörigen 1D und 2D Bereichen, dargestellt. Da für jeden Sensor auch ein zweiter Sensor als Absicherung eingebaut wurde, wurden die Ergebnisse zur besseren Übersicht gemittelt. Detaillierte Ergebnisse im Vergleich mit den Simulationsvarianten sind in Kapitel 6.4 dargestellt. Zu den Messdaten wurden auch die Innenklimadaten eingefügt, um den Einfluss der Randbedingung durch die Nutzung zu verdeutlichen. Nach den Messergebnissen sind auch die Differenzen von vergleichbaren

Bereichen abgebildet. Diese Darstellungen geben einen guten Überblick der Unterschiede über die verschiedenen Dämm Ausführungen bzw. zwischen den eindimensionalen und zweidimensionalen Bereichen.

Die Messkurven aus dem Bereich mit der Aerogel Innendämmung sind in strichlierten und jene der Zellulose Innendämmung in durchgezogenen Kurven dargestellt. Im unteren Bereich der Diagramme sind die Temperaturen und darüber die relativen Luftfeuchten eingefügt. (siehe Abbildung 39 bis Abbildung 46)

Um die Auswertungen übersichtlicher darstellen zu können, ist in Abbildung 38 eine vereinfachte Skizze der Einbausituation der Sensoren samt Bezeichnung des Bereiches abgebildet. Da nur ein Teilbereich im Untergeschoß gedämmt ist, ist die Gewölbedämmung strichliert eingezeichnet. Die Bereichsbezeichnungen ändern sich jedoch nicht.

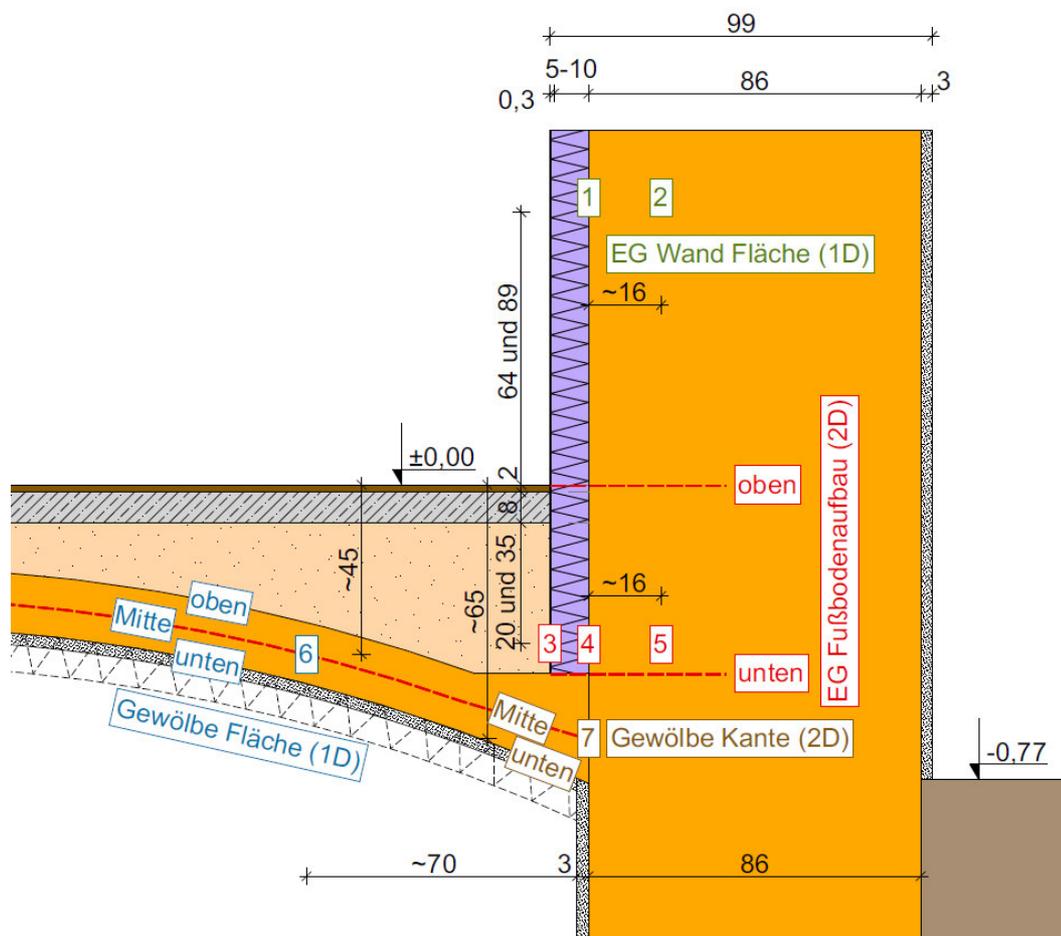


Abbildung 38 Übersicht der Sensorenpositionen

4.6.1 EG Wand Fläche (1D Bereich)

Da sich die Temperaturen in diesem Bereich hinter der Innendämmung nicht maßgeblich unterscheiden, ist hier der Mittelwert beider Dämmvarianten für 1 und 2 dargestellt (siehe Abbildung 39). Besonders in den Wintermonaten unterscheidet sich der Verlauf von der Temperatur des Innenraumklimas. Die Differenz beträgt hier im Mittelwert bis zu 12 °C, wobei keine der gemessenen Temperaturen hinter der Dämmung unter 10,5 °C fällt. Durch

die Einbaufeuchte der Innendämmsysteme zeigen alle Sensoren Werte bis zu 100 % relativer Luftfeuchte. Die Zellulosedämmung baut diese in 1 am schnellsten ab und ist bereits sechs Monate nach dem Einbau unter 80 %. Die Aerogel Dämmvariante erreicht nur Werte knapp über 90 % nach 14 Monaten und benötigt somit wesentlich länger für die Austrocknung und das bei der halben Dämmdicke. Bei beiden Dämmvarianten ist der Feuchtegehalt im Mauerwerk in 2 höher als in 1, aber auch hier zeigt sich, dass die Austrocknung der Zellulose deutlich schneller vorangeht als beim Aerogel.

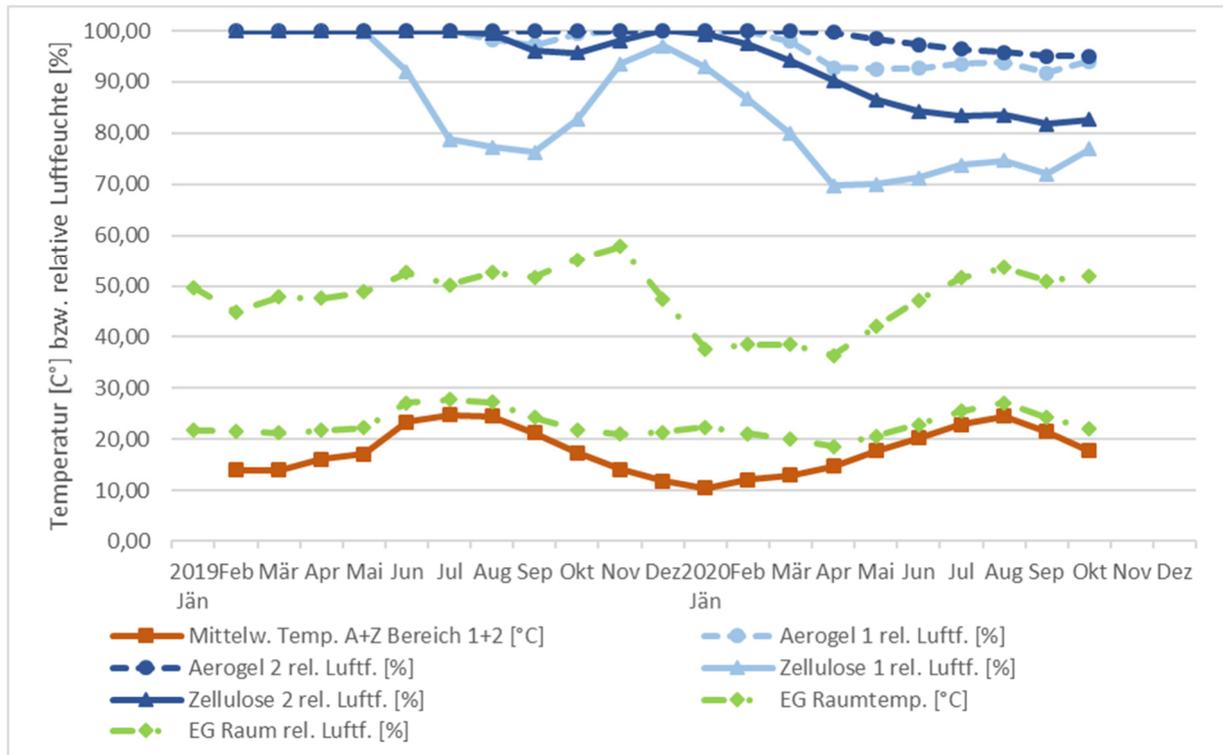


Abbildung 39 Monatsmittelwerte Temperatur und relative Luftfeuchte von Aerogel und Zellulose Sensoren (1 & 2)

Bei den Differenzen der Temperaturen zwischen den beiden Dämmvarianten zeigen sich im Mittelwert nur Unterschiede bis 0,6 °C und sind somit als beinahe gleichwertig zu sehen (siehe Abbildung 40). Die Differenzen sind einerseits auf die unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten der Innendämmungen zurückzuführen, aber auch Inhomogenität des Mauerwerks durch Fugen (siehe Kapitel 5.7), Materialparameter und Unebenheiten lassen sich nicht ausschließen. Vor der Montage der Sensoren und der Innendämmungen wurden die Unebenheiten des Mauerwerks so gut wie möglich ausgeglichen, jedoch bleiben immer Schwankungen bei der Verarbeitung. Die Materialparameter der Ziegel des Bestandsmauerwerks weisen Unterschiede auf, welche sich in den Messwerten widerspiegeln. Exakt gleiche Messkurven werden bei Bestandsmauerwerk aus dieser Epoche daher nur selten auftreten.

Die Differenzen in den relativen Luftfeuchten zeigen ebenfalls das deutlich raschere Austrocknen der Zellulose gegenüber der Aerogel Innendämmung mit Unterschieden bis zu 23 % in 1 bzw. ca. 13 % in 2.

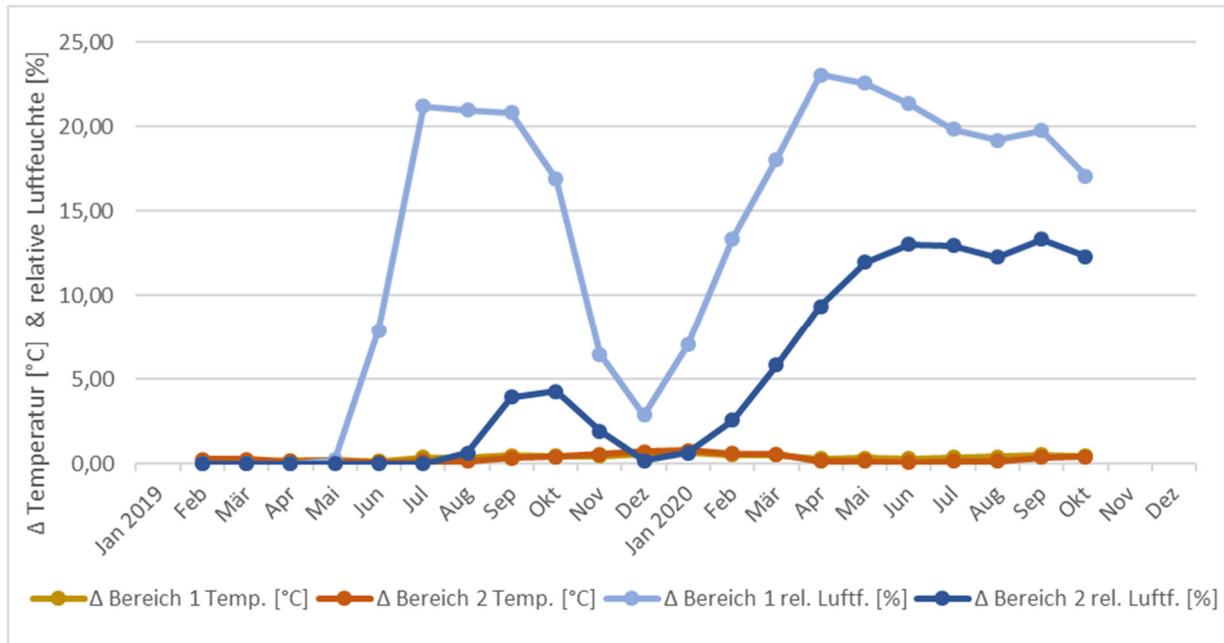


Abbildung 40 Differenzen der Monatsmittelwerte Temperatur und relative Luftfeuchte von Aerogel und Zellulose Sensoren (1 & 2)

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass im 1D Bereich die Dämmwirkung beider Dämmungen als gleichwertig zu sehen sind, die Austrocknung der Zellulose jedoch viel rascher vor sich geht, als bei der Aerogel Innendämmung.

4.6.2 EG Fußbodenaufbau (2D Bereich)

Der Kantenbereich im Fußbodenaufbau wird durch die Randbedingungen des Erd- und des Untergeschoßes beeinflusst. Die Temperaturen an der Innenseite der Innendämmung in 3 sind im Mittel um bis zu 7,5 °C höher als dahinter in 4 und 5 (siehe Abbildung 41). Das Minimum in 3 liegt bei ca. 13,6 °C und pendelt sich in den Wintermonaten im Mittel bei 14,7 °C ein. Ähnlich zum 1D Bereich sind die Temperaturverläufe von 4 und 5 beinahe ident und weisen ein Minimum in den Wintermonaten auf, welches bei ca. 6,3 °C liegt. Die Verläufe der relativen Luftfeuchtigkeit zeigen in 4 und 5 permanent 100 % an. Nur in 3 sind bei den Mittelwerten Austrocknungsverläufe in den Wintermonaten zu verzeichnen. Da alle vier Randbedingungen der zwei Innenräume, des Außenklimas und des Erdreichs auf diesen Bereich einwirken wird das Austrocknungsverhalten stark davon beeinflusst. Die relative Luftfeuchtigkeit in den Innenräumen sinkt in den Wintermonaten und auch der Niederschlag im Außenbereich ist stark verringert. In den sechs Monaten von Mai bis inklusive Oktober wird ca. 2,5 Mal so viel Niederschlag (ca. 98 mm) verzeichnet wie im restlichen Halbjahr (ca. 39 mm). Das beeinflusst die Regenbelastung der gesamten Fassade, des Spritzwasserbereiches und auch der Feuchtebelastung des Erdreichs. Dadurch herrschen in den Wintermonaten im 2D Bereich geringere Belastungen, als in den Sommermonaten. Ähnlich zum vorangegangenen Kapitel gilt auch hier, dass die Zellulose ein rascheres und intensiveres Austrocknungsverhalten zeigt, als die Aerogel Innendämmung.

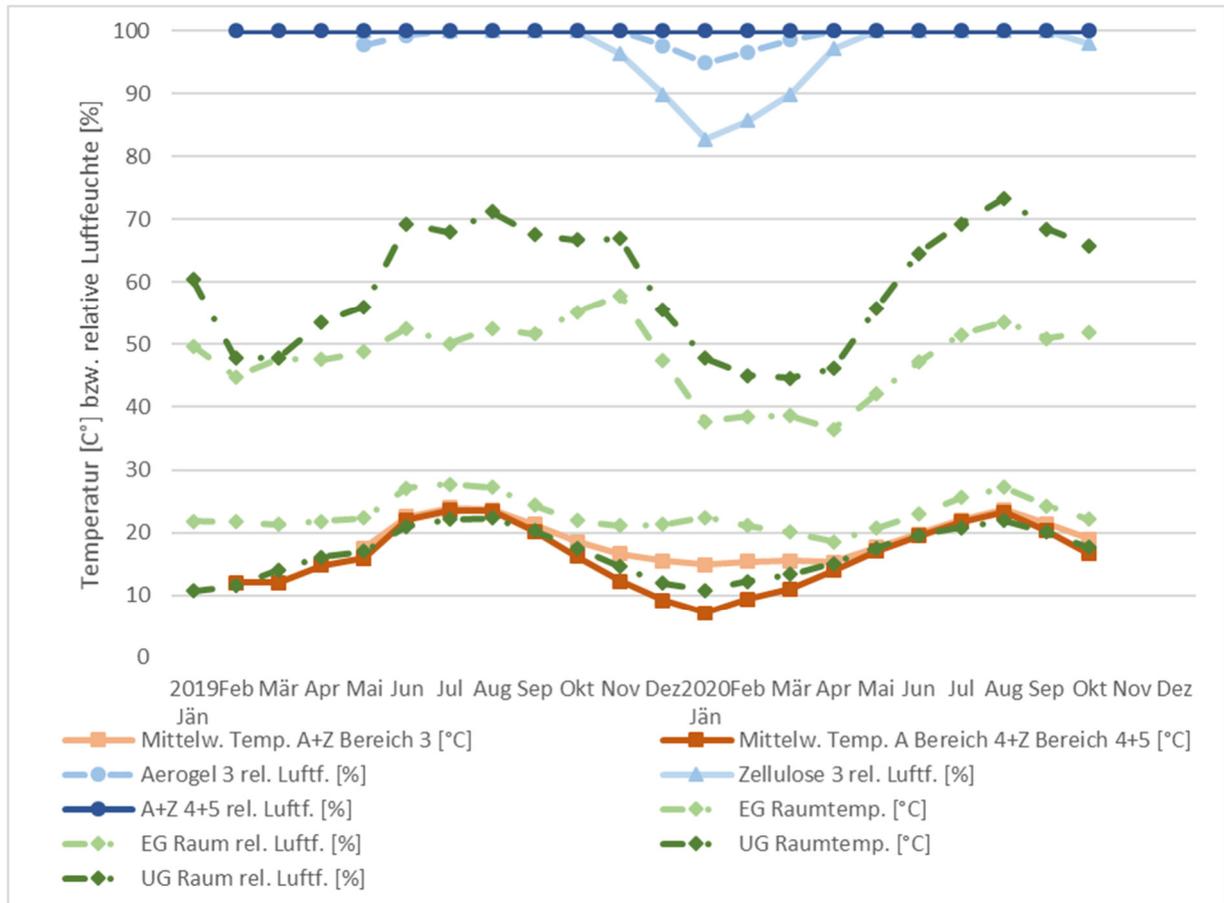


Abbildung 41 Monatsmittelwerte Temperatur und relative Luftfeuchte von Aerogel und Zellulose Sensoren (3 & 4 & 5)

Die Temperaturunterschiede zwischen den Dämmvarianten in den unterschiedlichen Bereichen sind vernachlässigbar gering und somit ist die Systematik ähnlich zum 1D Bereich zu sehen (siehe Abbildung 42). Durch einen Messausfall beider Sensoren im Mauerwerk bei der Aerogel Innendämmvariante kann kein Temperaturvergleich für 5 gemacht werden. Es ist anzunehmen, dass - wie in den anderen Bereichen auch - hier die Temperatur in 5 beinahe gleich zur Temperatur in 4 ist und somit ist der Sensoren Ausfall nicht maßgeblich für die Interpretationen der Messungen. Da nur Ausfälle in diesem Bereich zu verzeichnen sind, deutet dies auf einen permanent sehr hohen Feuchtegehalt hin. Es gibt nur Unterschiede bei der relativen Luftfeuchte in 3 zu verzeichnen, wobei auch hier die Zellulose Innendämmung geringere Feuchtegehalte als die Aerogel Innendämmung aufweist.

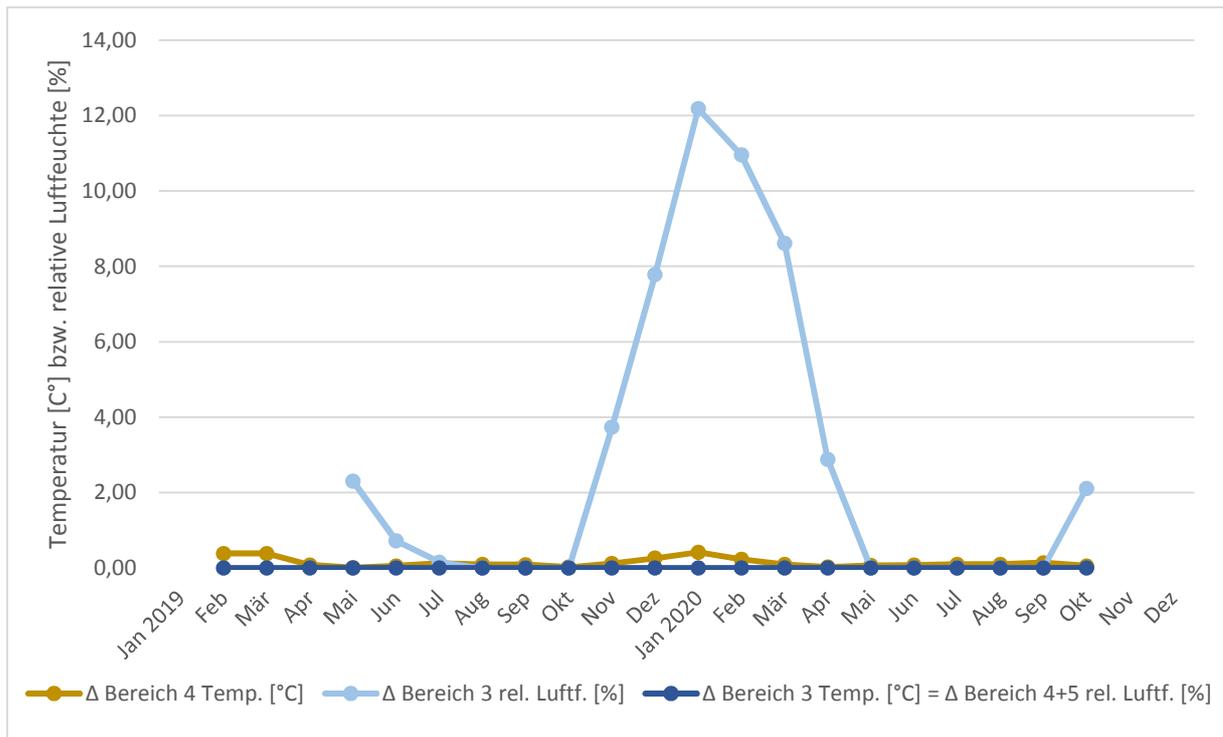


Abbildung 42 Differenzen der Monatsmittelwerte Temperatur und relative Luftfeuchte von Aerogel und Zellulose Sensoren (3 & 4 & 5)

Der Feuchtegehalt im Kantenbereich des Fußbodenaufbaus in 4 und 5 im kalten Bereich der Innendämmung bzw. im Mauerwerk ist als äußerst hoch einzustufen. In 3, der warmen Seite der Innendämmung im Fußbodenbereich, sind in den Wintermonaten Austrocknungsverläufe zu erkennen. Auf Grund der Baufeuchte sind jedoch die weiteren Entwicklungen über die nächsten Jahre abzuwarten.

4.6.3 UG Gewölbe Fläche und Kante (1D und 2D Bereich)

Auf der Unterseite des Gewölbemauerwerks wurde im Bereich der Zellulose Innendämmung der Erdgeschoß Außenwand eine 10 cm dicke Dämmung aus der gleichen Aufsprüzzellulose wie im Erdgeschoß angebracht. Bei der Variante mit Aerogel wurde das Gewölbe wie im Bestand belassen. Die Temperaturverläufe der Messungen zeigen (siehe Abbildung 43), dass die Sommermonate in 6 und 7 sehr ähnlich verlaufen. In den Wintermonaten jedoch die Temperaturen im 1D Bereich um bis zu 4,5 °C höher sind als in der Kante des 2D Bereiches. Die Temperatur in 6 der ungedämmten Variante verläuft ähnlich der Raumtemperatur innerhalb des minimalen und maximalen Temperaturverlaufes und ist aus Übersichtsgründen nicht gesondert dargestellt.

Die relative Luftfeuchte in 6 ist in der Mitte des Gewölbemauerwerks geringfügig höher als zwischen Dämmung und Mauerwerk. Die Zellulose zeigt somit auch hier ein sehr gutes Austrocknungsverhalten. Dies ist nicht nur auf die Materialparameter, sondern auch auf die kalte, trockene Luft im Innenraum des Untergeschoßes zurückzuführen, wodurch ein rasches Austrocknen gefördert wird. Die Dämmung verursacht einen Anstieg der Temperatur und verhindert den Wärmeverlust, somit ist auch die erhöhte relative Luftfeuchte im Bereich der ungedämmten Variante nachvollziehbar. Der Kantenbereich 7

besitzt auch im Gewölbe eine stark erhöhte relative Luftfeuchtigkeit und weist einen Verlauf bei 100 % auf.

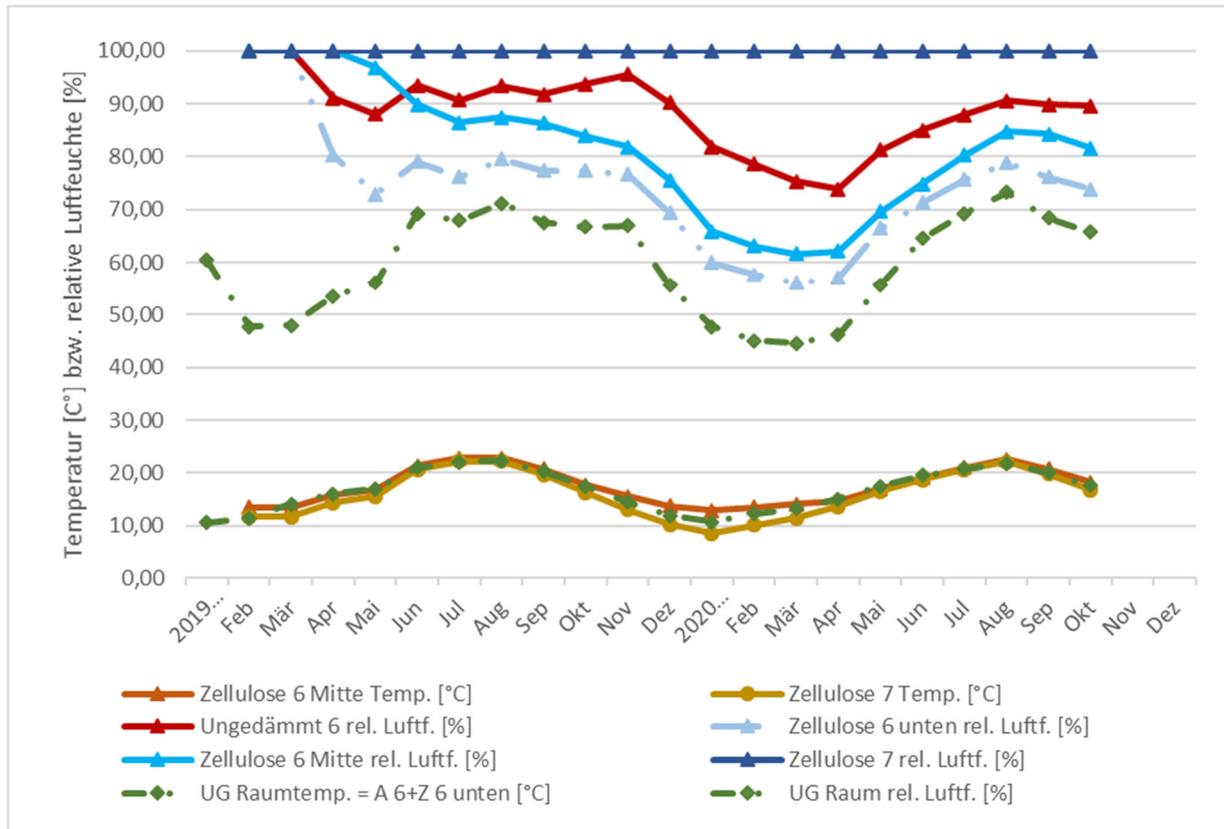


Abbildung 43 Monatsmittelwerte Temperatur und relative Luftfeuchte mit und ohne Zellulose Sensoren (6 & 7)

Abbildung 44 zeigt die Differenzen zwischen 6 der gedämmten bzw. der ungedämmten Varianten und die Unterschiede zwischen 6 und 7, um die 1D bzw. 2D Ergebnisse der gedämmten Variante aufzuzeigen.

Die Temperatur im Gewölbemauerwerk unterscheidet sich bei der gedämmten Variante in den Wintermonaten im Mittel um maximal 1,2 °C zur ungedämmten Variante, wobei diese die kühleren Temperaturen aufweist. Da der Einfluss der Randbedingung vom Erdgeschoß hier maßgeblich ist, ist das auch nachvollziehbar. Die mittlere Raumlufttemperatur im Untergeschoß beträgt 10,7 °C. Die relative Luftfeuchte weist einen Unterschied von bis zu 16 % zwischen dem ungedämmten und dem gedämmten Bereich auf. Die relative Luftfeuchte wurde im zweidimensionalen Bereich 7 bei der ungedämmten Variante nicht gemessen, daher kann hier auch kein Vergleich erfolgen.

Die Temperaturen in 6 sind insgesamt höher als in 7. Die Ebene zwischen Dämmung und Gewölbemauerwerk ist im eindimensionalen Bereich im Mittel maximal um 2,7 °C höher als im zweidimensionalen Bereich. Für die Ebene in der Mitte des Gewölbemauerwerks wird ein maximaler Temperaturunterschied bei den Mittelwerten von 3,9 °C erreicht. Im Kantenbereich haben die Temperaturen also weniger Spreizung, als im eindimensionalen Bereich 6, da die Auskühlung durch das Einwirken der Randbedingungen aus dem Untergeschoß und dem Außenklima beidseitig erfolgt. Dies ist weiter zur Raummitte nicht der Fall. Die Differenzen der relativen Luftfeuchten für den eindimensionalen Bereich 6 und den zweidimensionalen Bereich 7 verlaufen wie die Temperaturen in den unterschiedlichen

Tiefen ähnlich. Das Ergebnis ist natürlich auch darauf zurückzuführen, dass im Kantenbereich in beiden Ebenen 100 % relative Luftfeuchte herrscht und somit die Differenz rein von der gemessenen Feuchte in 6 abhängt.

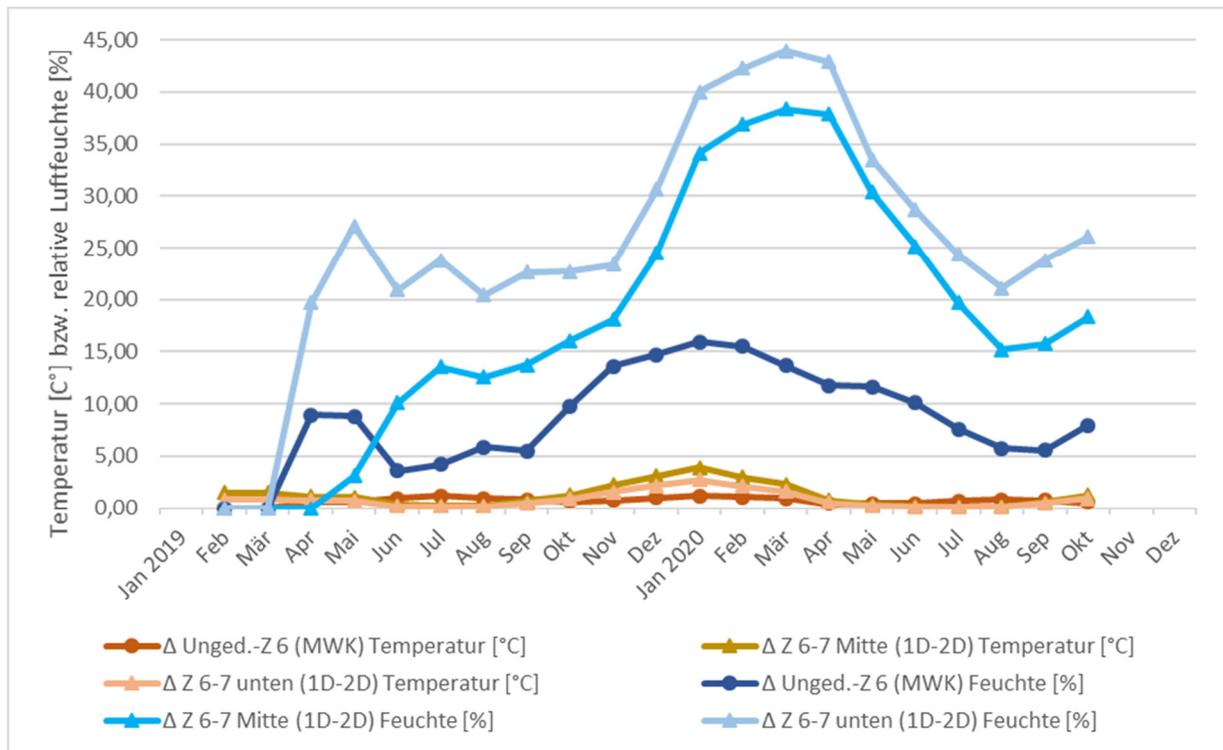


Abbildung 44 Differenzen der Monatsmittelwerte Temperatur und relative Luftfeuchte mit und ohne Zellulose Sensoren (6 & 7)

Im Gewölbe haben sich im eindimensionalen Bereich 6 sehr rasch unbedenkliche relative Luftfeuchten eingestellt und auch die Dämmmaßnahmen zeigen Wirkung. Im zweidimensionalen Kantenbereich gelten jedoch die gleichen Erkenntnisse wie für das Mauerwerk im Erdgeschoß, wo sehr hohe Feuchtegehalte gemessen wurden.

4.6.4 Vergleiche im Vertikalschnitt (1D und 2D Bereich)

In Abbildung 45 und Abbildung 46 sind die Differenzen im gesamten vertikalen Bereich der gemessenen Außenwand im Erdgeschoß bis zum Anschlussbereich des Gewölbes im Untergeschoß dargestellt.

Die maximale Temperaturdifferenz der Aerogel Innendämmvariante vom eindimensionalen Bereich 1 zum zweidimensionalen Bereich 4 beträgt ca. 2 °C, und ist im Mittel somit um 1 °C geringer als jene für die Zellulose Innendämmung. Durch den Sensorausfall des Hauptsensors und des Sicherheitssensors im zweidimensionalen Bereich 5 der Aerogel Innendämmvariante kann an dieser Stelle kein Vergleich mit der gemessenen Temperatur im eindimensionalen Bereich 2 gemacht werden (siehe Kapitel 4.6.2).

In den Wintermonaten wird die maximale Differenz der Mittelwerte von bis zu ca. 4 °C bei der Variante mit Zellulose Innendämmung für den Vergleich der Messung des ein- bzw. zweidimensionalen Bereichs im Mauerwerk erreicht.

Im Bereich der Zellulose Variante konnte auch ein Vergleich zwischen 1 im Erdgeschoß und 7 im Untergeschoß gemacht werden. Dieser Vergleich entfällt bei der Aerogel Dämmvariante, da kein Sensor in diesem Bereich verbaut wurde. Auf Grund der ungedämmten Wand im Untergeschoß erfolgt eine raschere Anpassung an die Randbedingung des Untergeschoßes im Kantenbereich. Dadurch entstehen häufiger Abweichungen der Temperaturverläufe in 1 und 7.

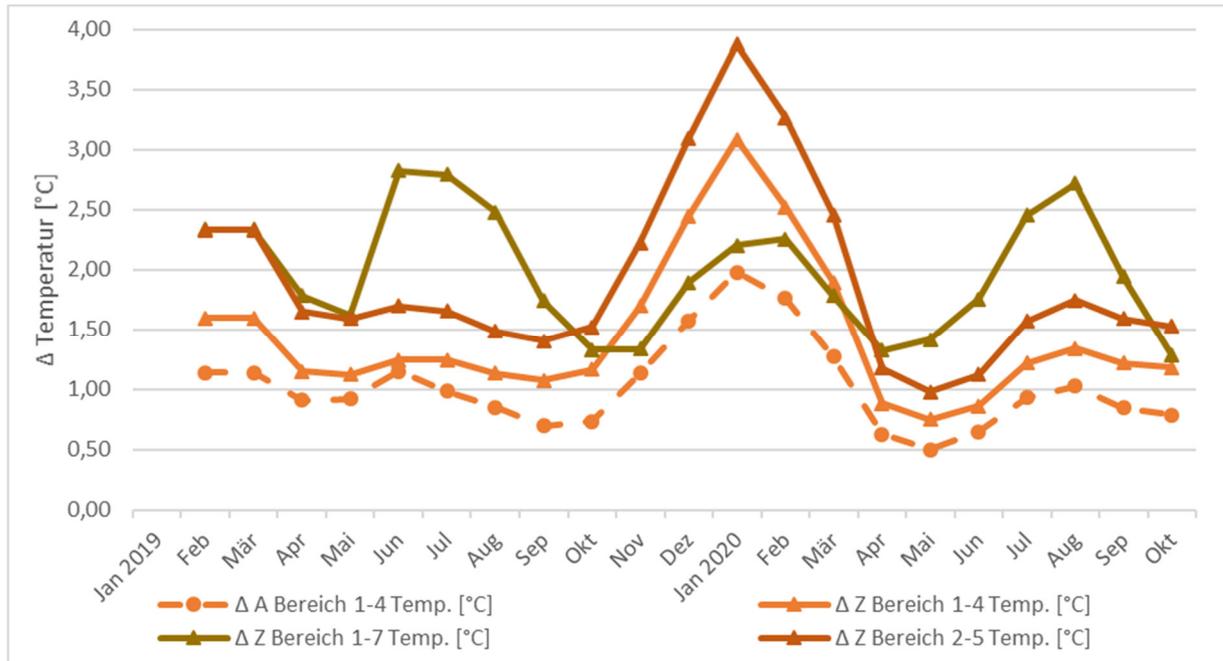


Abbildung 45 Differenzen der Monatsmittelwerte Temperatur im Vertikalschnitt (1, 2, 4, 5 & 7)

Die Differenzen der relativen Luftfeuchtigkeit sind durch das günstigere Austrocknungsverhalten der Zellulose für alle Bereiche höher. In der Ebene 1 bis 4 bei der Variante mit Aerogel bzw. Ebene 1 bis 7 bei der Zellulosevariante sind die relativen Luftfeuchten geringer als in der Ebene 2 bis 5, die im zweidimensionalen Bereich noch auf 100 % sind. Durch den Feuchtegehalt von 100 % im Kantenbereich des Fußbodenaufbaus ergibt sich auch kein Unterschied im Vergleich von 1 mit 4 bzw. 1 mit 7.

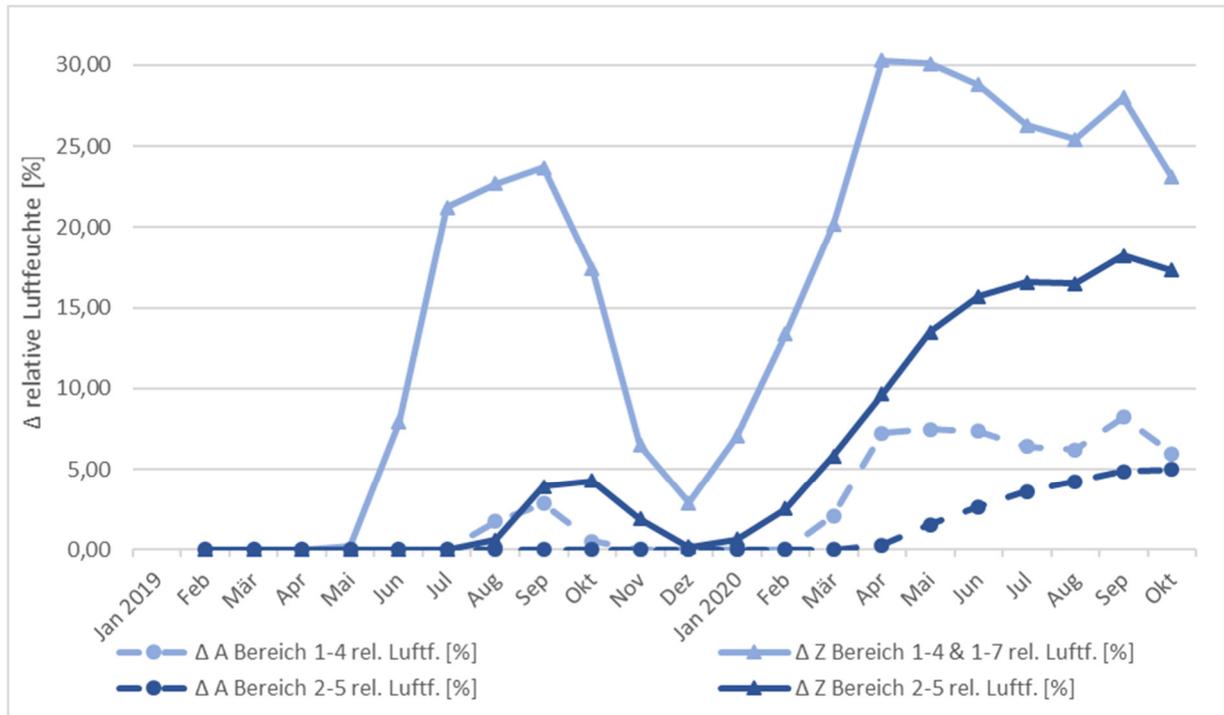


Abbildung 46 Differenzen der Monatsmittelwerte relative Luftfeuchte im Vertikalschnitt (1, 2, 4, 5 & 7)

Es lässt sich festhalten, dass der Feuchtegehalt im zweidimensionalen Bereich gegenüber dem eindimensionalen stark erhöht ist und die Temperatur erwartungsgemäß mit der Nähe zum Untergeschoß sinkt. Die Innendämmung schützt sehr gut vor den Transmissionswärmeverlusten und somit sind die Unterschiede in den kalten Bereichen des Mauerwerks nicht sehr groß.

4.7 Salzgehaltsuntersuchungen

Da es sich bei dem untersuchten Objekt um ein 1850 erbautes Gründerzeitgebäude ohne Abdichtungsmaßnahmen der erdberührten Bauteile handelt, stand genügend Zeit zur Verfügung, damit die Salze sich über den kapillaren Transport im Bestandsmauerwerk festsetzen. Zusätzlich wird am angrenzenden Gehsteig und auf der Straße im Winter Streusalz verteilt, wodurch die Salzbelastung besonders im Spritzwasserbereich ansteigt. Die vorhandenen Salzausblühungen, welche auf Grund der Verdunstung an der Oberfläche sichtbar werden und die dadurch verursachten Beschädigungen am Innenputz im Untergeschoß sind deutlich zu erkennen (siehe Abbildung 47).



Abbildung 47 Salzausblühungen im Untergeschoß des Forschungsgebäudes

Das salzbelastete Mauerwerk nimmt mehr Feuchte auf und trocknet dadurch langsamer aus. Die Salze im Mauerwerk verursachen ein erhöhtes Aufsteigen der Feuchtigkeit im Mauerwerk. Es wird auch der Gefrierpunkt unter 0°C verschoben, was sich auf die Frost-Tau-Wechsel auswirkt.

Die bauschädlichen Salze sind lt. ÖNORM B 3355 [12] Chloride, Nitrate und Sulfate, wobei besonders Chloride und Nitrate bereits bei geringer Feuchte wirksam werden. In Tabelle 13 sind die Bewertungen der Anionenkonzentration nach ÖNORM B 3355 [12] abgebildet. Grundsätzlich wird bei der Reduktion von Salzen zwischen Salz Entfernung, Salzreduktion, Salzbeibehaltung bzw. Salzkaschierung unterschieden [12].

Tabelle 13 Wertung der Anionenkonzentration in Prozent der Masse nach ÖNORM B 3355 [12]

Bereich	Stufe 1: ■ gering	Stufe 2: ■ mittel	Stufe 3: ■ hoch
Chloride	unter 0,03	0,03 bis 0,10	über 0,10
Nitrate	unter 0,05	0,05 bis 0,15	über 0,15
Sulfate	unter 0,10	0,10 bis 0,25	über 0,25
Flankierende Maßnahmen	Keine Maßnahmen erforderlich	Maßnahmen im Einzelfall zu entscheiden	Maßnahmen erforderlich

Flankierende Maßnahmen können z.B. Abdichtungsmaßnahmen oder die Entfernung von Material sein. In dieser Dissertation wären das beispielsweise die Entfernung des schadhafte Innenputzes, die Einbringung einer Abdichtung und der Auftrag eines Opferputzes zur Salzreduktion.

Zur Analyse des Bestandes wurden insgesamt 12 Proben entnommen und jeweils auf deren Gehalt für die folgenden 10 chemischen Elemente untersucht, wobei bei 4 Elementen bzw. Verbindungen ein vernachlässigbar geringer Anteil gemessen wurde:

1. **NO₃ - Nitrate**
2. **SO₄ – Sulfate**
3. **Cl – Chlor (Chloride)**
4. Na – Natrium
5. K – Kalium
6. Ca – Calcium
7. Mg – Magnesium: vernachlässigbarer Anteil (<0,02 M%)
8. F – Fluor: vernachlässigbarer Anteil (<0,2 mg/l)
9. Br – Brom: vernachlässigbarer Anteil (<0,1 mg/l)
10. PO₄ – Phosphat: vernachlässigbarer Anteil (<0,1 mg/l)

Die Probenentnahmestellen sind in Abbildung 48 dargestellt. Es wurde wie bei den anderen Messungen auch darauf Wert gelegt, dass eine Differenzierung zwischen ein- und zweidimensionalem Bereich erfolgen kann. Weiter wurde auch in unterschiedlichen Tiefen der Mauer gemessen, jedoch musste darauf geachtet werden, dass keine zu großen Zerstörungsmaßnahmen am Bauwerk vollzogen werden. Dadurch konnten bei der 100 cm dicken Außenwand keine Proben aus dem äußersten Bereich zum Erdreich hin entnommen werden.

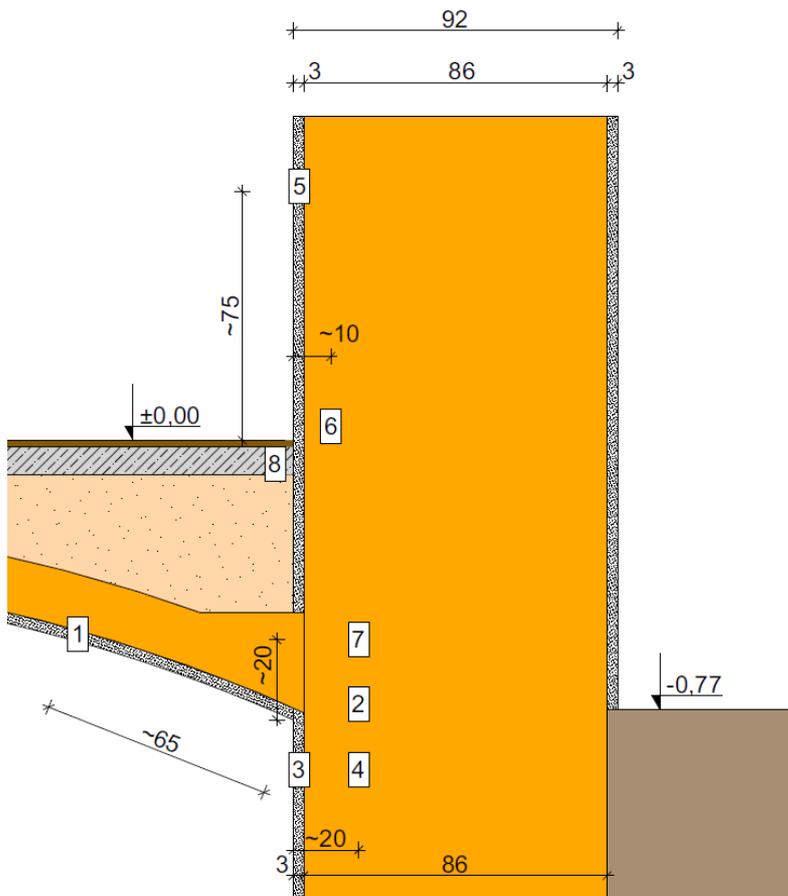


Abbildung 48 Probenentnahmestellen zur Salzgehaltsuntersuchung

In der Tabelle 14 und in der Abbildung 49 sind die Ergebnisse der Messungen dargestellt. Die farbliche Gestaltung der Elemente aus Tabelle 14 entsprechen jenen aus Abbildung 49 wodurch ein rascher Vergleich möglich ist. Zusätzlich sind in Tabelle 14 die Gefährdungstufen der ÖNORM B 3355 [12] aus Tabelle 13 eingetragen.

Tabelle 14 Ergebnis der Salzgehaltsuntersuchung in Masseprozent

Probe	Na [M%]	K [M%]	Ca [M%]	Cl [M%]	NO3 [M%]	SO4 [M%]
1	0,24	0,25	0,12	0,18	0,03	0,38
2	0,62	1,59	0,06	0,14	0,05	0,29
3	0,81	1,65	0,26	0,30	0,49	0,72
4	0,32	0,96	0,04	0,05	0,04	0,14
5	0,09	0,01	0,18	0,02	0,04	0,46
6	0,83	2,43	0,16	0,18	0,06	0,69
7	0,72	2,22	0,16	0,06	0,15	0,61
8	0,65	1,96	0,02	0,06	0,53	0,16

Allgemein lässt sich erkennen, dass erwartungsgemäß sehr hohe Salzkonzentrationen im Bestandsmauerwerk vorliegen. Jedoch sind die eindimensionalen Bereiche 1 und 5 geringer belastet, was auch auf einen geringeren Feuchtegehalt hinweist. Die Entnahmestelle 8 entspricht der Probenentnahme im Estrich, welcher in zwei von drei Fällen im gelben Gefährdungsbereich und bei den Nitraten im roten ist. Für den zweidimensionalen Bereich gilt: Je weiter die Probe aus der Mitte der Mauer entnommen wurde, desto höher die Salzbelastung. Detailliertere Ergebnisanalysen sind in [74] zu finden.

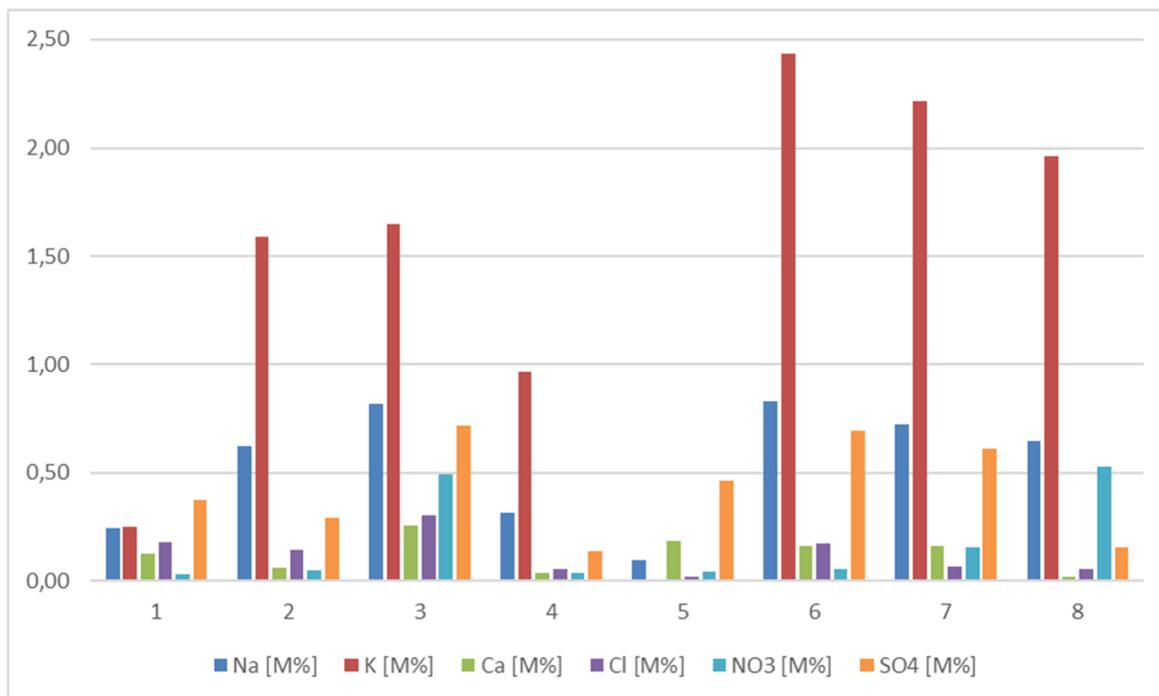


Abbildung 49 Ergebnis der Salzgehaltsuntersuchung in Masseprozent

Auf Grund der Untersuchungen in Hinsicht auf den Salzgehalt wären normgemäß jedenfalls Maßnahmen zur Reduktion vorgesehen. Bevor eine Reduktion im Bestandsmauerwerk durchgeführt wird, muss jedoch immer zuvor die Feuchtezufuhr verhindert werden. In der vorliegenden Dissertation wäre auf jeden Fall eine horizontale Feuchtigkeitssperre vorzusehen, um das Erdgeschoß vor weiterer Feuchtezufuhr aus dem angrenzenden

Erdreich zu schützen. Sollte auch das Untergeschoß trockengelegt werden, dann müsste entweder eine äußere Abdichtung mit vorausgehender Aufgrabung und eine horizontale Abdichtung am Mauerfuß durchgeführt werden. Oder eine andere Möglichkeit wäre eine Negativabdichtung an der Innenseite. Die verschiedenen zur Verfügung stehenden Möglichkeiten sind in der ÖNORM B 3355 [12] und in [75] beschrieben. Da bei der Dissertation keine Maßnahmen dahingehend erfolgen, um den weiteren Verlauf der Entwicklungen im Erdgeschoß messen und analysieren zu können, wird hier nicht näher darauf eingegangen.

4.8 Energieverbrauch

Für das Forschungsgebäude wurden die realen Energieverbräuche aus den Jahren 2017, 2018 und 2019 mit dem berechneten Endenergiebedarf aus dem Energieausweis verglichen. Sämtliche Materialparameter der Messungen wurden für die Berechnung des Energieausweises herangezogen. Der mittlere Bedarf des Forschungsgebäudes liegt bei 71,80 kWh/m²a. Für die Berechnung wurde ein Heizwärmebedarf von 99 kWh/m²a und ein Endenergiebedarf von 155,8 kWh/m²a kalkuliert. Somit liegt die Berechnung ca. 117 % über dem realen Verbrauch.

Für die Sanierungen mittels Innendämmung wurde für die Aerogel Variante ein Endenergiebedarf von 132,6 kWh/m²a (-14,9 %) und für jene mit Zellulose 134,4 kWh/m²a (-13,7 %) berechnet. Der Unterschied von 0,8 % der beiden Sanierungsvarianten ergibt sich durch eine Differenz der U-Werte der Außenwände von 0,095 W/m²K.

5 Modellbildung und Simulation

Nachfolgend wird die Vorgehensweise bei den Simulationen anhand der Wahl der Randbedingungen, Übergangskoeffizienten und Materialdatensätze erläutert. Weiters wird das Konzept der Modellbildung durch Aufteilung des Gesamtmodells in Teilbereiche mit Übergabeparametern beschrieben.

5.1 Klima

Laut WTA 6-2 [11] sollte zur Beurteilung der Klimasensitivität mit einem kritischen Datensatz eine vergleichende Simulation durchgeführt werden. In WTA 6-5 [13] sind die in Tabelle 15 angeführten Orte der jeweiligen Schlagregenbelastung nach DIN 4108-3 [22] angeführt. Weiter wurden vergleichbare Datensätze für die Software DELPHIN und WUFI angeführt, welche auch zur Verwendung bereitstehen. Aus Tabelle 10 lässt sich erkennen, dass Graz auf Grund der Niederschlagsdaten der ZAMG von 1971 bis 2000 nach DIN 4108-3 [22] in die Beanspruchungsgruppe III – starke Schlagregenbeanspruchung mit Jahresniederschlagsmengen über 800 mm einzuordnen ist. Somit kann für Klimasensitivitätsanalysen in DELPHIN das TRY Klima *Mühdorf am Inn* aus 2010 und in WUFI das Feuchtereferenzjahr *Holzkirchen* aus 2005 / 06 herangezogen werden. Für den Betrachtungszeitraum von 2018 bis 2020 ergibt sich ein Mittelwert von 753 mm pro Jahr. Dies ergäbe eine Zuordnung zur Beanspruchungsgruppe II. Da ein kritischer Datensatz gewählt werden sollte, wurden auch noch weitere Klimadatensätze für die Sensitivitätsanalyse herangezogen. In WUFI steht ein implementierter, halbsynthetischer, langjähriger Klimadatensatz für Graz zur Verfügung. In DELPHIN wurden die TRY Klimadatensätze der von *Bremerhaven* und *München* aus der Schlagregengruppe III gewählt. Zusätzlich wurde *Potsdam* zum Vergleich herangezogen, um den Unterschied zur geringsten Belastungsgruppe (Schlagregengruppe I) zu erhalten.

Tabelle 15 Übersicht vergleichbarer Klimadatensätze aus WTA 6-5 [13], DELPHIN und WUFI für Klimasensitivitätsanalysen

WTA 6-5	DELPHIN	WUFI
Niedrige Schlagregenbelastung (Schlagregengruppe I): Klimadatensatz von Potsdam (Jahresmitteltemperatur 9,5 °C, Normalregen 470 mm, max. Schlagregenmenge ~300 mm).	TRY Klima Potsdam 2010	Hygrothermisches Referenzjahr (HRY) Potsdam zur Beurteilung des Langzeitverhaltens von Konstruktionen. Sie basieren auf Messdaten der Jahre 2003 bis 2010. Mittlere Lufttemperatur 9,8 °C, Regensumme 552 mm/a und Strahlungssumme (horizontal) 1160 kWh/m ² a.
Mittlere Schlagregenbelastung (Schlagregengruppe II): Klimadatensatz von Dresden (Jahresmitteltemperatur	TRY Klima Chemnitz 2010; Längengrad: 12,87 Deg, Breitengrad: 50,80 Deg, Höhe: 418 m	Hygrothermisches Referenzjahr (HRY) Chemnitz zur Beurteilung des Langzeitverhaltens von Konstruktionen. Sie basieren auf Messdaten der

11,0 °C, Normalregen 600 mm, max. Schlagregenmenge ~350 mm).	Thüringer Becken und Sächsisches Hügelland; Thüringer Becken und angrenzende Randgebirge; Sächsisches Hügelland; Oberlausitzer Bergland	Jahre 2003 bis 2010. Mittlere Lufttemperatur 7,8 °C, Regensumme 873 mm/a und Strahlungssumme (horizontal) 1133 kWh/m ² a.
Hohe Schlagregenbelastung, maritimes Klima, (küstennahe Regionen der Schlagregengruppe III): Klimadatenatz von Bremerhaven (Jahresmitteltemperatur 8,7 °C, Normalregen 794 mm, max. Schlagregenmenge ~700 mm).	TRY Klima Bremerhaven 2010; Längengrad: 8,58 Deg, Breitengrad: 53,53 Deg, Höhe: 7 m Nordseeküste; Nordseeinseln; Schleswig- Holsteinische Marsch; Untereibeniederung; Weser-Ems-Marsch	Die Klimadatei basiert auf dem Testreferenzjahr Bremerhaven des Deutschen Wetterdienstes; BMFT-FB-T 86-051; 1986.
Hohe Schlagregenbelastung, kontinentales Klima (küstenferne Regionen der Schlagregengruppe III): Klimadatenatz von Holzkirchen (Jahresmitteltemperatur 6,6 °C, Normalregen 1185 mm, max. Schlagregenmenge ~600 mm).	TRY Klima Mühldorf am Inn 2010 Längengrad: 12,52 Deg, Breitengrad: 48,25 Deg, Höhe: 409 m Gebiete an Tauber; Jagst; Kocher; Murr und Rems; Oberpfalz (ohne Oberpfälzer Wald); Donauniederungen; Oberschwaben; Bodenseegebiet; Alpenvorland (bis 700 m)	IBP Feuchtereferenzjahr Holzkirchen , kombiniert aus 1. Halbjahr aus 2006 gefolgt von 2. Halbjahr 2005. Mittlere Lufttemperatur 6.6 °C, entspricht langjährigem Mittel (6.8 °C). Strahlungssumme 1223 kWh/m ² , Regensumme 1185 mm. 66 Eistage (max. < 0 °C), 68 Frosttage (min < 0 °C, max. >= 0 °C), 23 Sommertage (25 °C <= max. < 30 °C), 2 heiße Tage (max. >= 30 °C).

Aus den gemessenen Werten des Außen- und Innenklimas sowie aus den zugekauften ZAMG Daten für das Außenklima wurden verschiedene Klimadatenätze erstellt, die für unterschiedliche Variantenstudien zum Einsatz kamen:

1. Jahresklimadatenätze aus den Messwerten für das Innen- und Außenklima, die einzeln oder auch hintereinandergeschaltet werden konnten, um die reale Situation so gut wie möglich validieren zu können.
2. Zyklische Jahresmittelwerte für das Innen- und Außenklima aus den gemessenen Daten für Variantenstudien.
3. Zyklische Jahresmittelwerte für das Außenklima aus den ZAMG Daten für Variantenstudien.
4. Zyklische Jahresextremwerte für das Innen- und Außenklima aus den gemessenen Daten für Variantenstudien. Hier wurden aus allen gemessenen Daten die stündlichen Extremwerte verwendet, um kritische Randbedingungen zu erhalten.

5. Zyklische Jahresextremwerte für das Außenklima aus den ZAMG Daten für Variantenstudien. Wie bei den gemessenen Werten wurden auch hier nur die Extremwerte der Daten für den betrachteten Zeitraum gewählt.

Wie in Kapitel 4.4.4 beschrieben, entstehen an der nördlichsten Hausecke Verwirbelungen, die einen Sog erzeugen (siehe Abbildung 32). Diese spiegeln sich in der Messung wider, sodass ein hoher Anteil an Süd- bzw. Südwest- und Südostwind gemessen wird.

Der Ansatz des Schlagregens, der durch die Kombination der normgerecht gemessenen Windrichtung und des Niederschlags entsteht, kann somit für Teilbereiche des Gebäudes (Ecken und Kanten) zu hoch oder zu niedrig ausfallen. Die innerstädtischen Umgebungsbedingungen (Nachbarbebauung) beeinflussen die Windrichtung ebenfalls sehr stark, was zu ähnlichen Fehlannahmen der Schlagregenmenge führen kann.

In DELPHIN 6.1 ist ein Modell nach DIN EN ISO 15927-3 [31] und ein Abminderungskoeffizient für den Schlagregen implementiert. Es werden jedoch Geländeunebenheitsfaktor, Topographiefaktor, Hindernisfaktor und Wandfaktor nicht explizit eingegeben, sondern sind vom Programmhersteller vorgegeben.

In der Software WUFI ist einerseits ein Modell mit Schlagregenkoeffizienten und andererseits ein Modell aus dem ASHRAE Standard 160 - Criteria for Moisture-Control Design Analysis in Buildings [32] verfügbar [33].

Sämtliche Modelle sind somit eher überschlägige Annahmen zur Berücksichtigung des tatsächlich anhaftenden Schlagregenanteils für betrachtete Detailabbildungen. Erfahrungswerte für die Anhaftung des tatsächlichen Wasseranteils im Spritzwasserbereich, also die ersten 30 cm über der Geländeoberkante, sind nicht gegeben. Somit ist weitere Forschung mit Messungen der tatsächlich anhaftenden Schlagregenmenge an verschiedenen Stellen des Gebäudes notwendig.

Ein möglicher Ansatz zur korrekten Annahme der Schlagregenbelastung für die unterschiedlichen Gebäudebereiche wäre - wie dies bei der Berechnung des Heizwärme- bzw. des Kühlbedarfs lt. ÖNORM B 8110-6-1 [76] erfolgt - mittels Gewichtungsfaktoren auch die Umgebung samt Bepflanzung (hohe Bäume) bzw. Gebäuden einzubeziehen.

Der Schlagregenkoeffizient wurde dem WTA-Merkblatt 6-5-14 [13] folgend mit 0,7 festgesetzt. Eine Besonderheit stellt hier der Spritzwasserbereich mit 30 cm über Geländeoberkante dar. Hier wurde der Schlagregenkoeffizient auf 1,0 erhöht, um die verstärkte Belastung zu berücksichtigen.

Die Sensitivitätsanalysen in Hinsicht auf den anhaftenden Schlagregenanteil zwischen 0 und 1 ergaben, dass bei Erhöhung der Schlagregenbelastung im Außenputz kurzfristig ein Anstieg des Wassergehalts zu verzeichnen ist, diese Wassermengen jedoch bereits am nächsten Tag wieder abgebaut werden. Durch die Dicke von 86 cm bis 96 cm der Mauerungen und die ohnehin hohe aufsteigende Feuchtigkeit hat dies aber keinen Einfluss auf das Verhalten im maßgeblichen Bereich der kalten Seite der Innendämmung. Wäre kein ausreichender Schlagregenschutz durch den Außenputz gegeben, sondern beispielsweise ein Sichtmauerwerk aus Normalformatziegel, dann wäre der Einfluss voraussichtlich nicht zu vernachlässigen. Da diese Erkenntnisse aber bereits als Stand der Technik in den Normen wiederzufinden sind, wird hier nicht näher darauf eingegangen. Auch die Ausrichtung der Wand wurde näher untersucht. Die tatsächliche Ausrichtung beträgt 315° , somit Nordwesten und ist 90° geneigt. Diese Exposition ist am kritischsten zu sehen und somit lassen sich die Erkenntnisse jedenfalls der maßgeblichen Seite

zuordnen. Veränderungen zur Ausrichtung ergeben geringere Wassergehalte für die Schlagregenereignisse, jedoch betrifft dies wieder nur jene Tage einem Regenereignis und den darauffolgenden Tag zur Austrocknung.

Weiter wurden auch die kurzwellige Strahlung und der Absorptionskoeffizient sowie die langwellige Strahlung und der Emissionskoeffizient variiert. Im Bereich zwischen 0,4 und 0,8 beim Absorptionskoeffizienten ergaben sich Unterschiede von bis zu 20 °C an der Außenoberfläche. Es folgte eine Verringerung des Wassergehaltes an Sommertagen bis zu 2 kg/m³, was einer Reduktion von ca. 40 % entspricht. In den Nachtstunden waren die Wassergehaltswerte jedoch für den gesamten Variationsbereich ident. Somit sind die Auswirkungen ausschließlich auf den Zeitraum mit Sonnenscheindauer und nur auf den Außenputz zu beziehen. Ähnlich wurde auch der Emissionskoeffizient variiert. Das Ergebnis für einen Bereich von 0,04 bis 0,90 zeigte, dass die Auswirkungen noch geringer als bei der kurzwelligen Strahlung waren. Auf den Bereich der Innenoberfläche, der Innendämmung oder den inneren Bereich der Ziegelmauer hatten diese Sensitivitätsanalysen keine Auswirkungen. Detaillierte Ergebnisse sind in [77] und [78] zu finden.

Das Innenklima wurde für die Klimasensitivitätsanalysen vom Außenklima nach ÖNORM EN 15026 [19] bzw. WTA 6-2 [11] abgeleitet. Ausgenommen hiervon sind die Außenklimata der Messungen und der ZAMG. Hier wurden die Messwertdaten für das Innenklima verwendet.

Für die Simulationen wurde der Absorptionskoeffizient der kurzwelligen Strahlung auf 0,8 und der Emissionskoeffizient der langwelligen Strahlung auf 0,9 gesetzt. Als anhaftender Regen wurden 70 % an der Fassade und 100 % im Spritzwasserbereich auf den ersten 30 cm über der Gehsteigoberkante gewählt. Der Startzeitpunkt wurde, wie in allen zutreffenden Normen empfohlen, auf den 1. Oktober gesetzt und eine Anfangstemperatur von 20°C sowie eine Anfangsluftfeuchte von 80 % gewählt. Die Simulationsdauern waren unterschiedlich. Darauf wird in den folgenden Kapiteln näher eingegangen.

5.2 Wärme- und Wasserdampfübergangskoeffizient

Für die Wärme- und Wasserdampfübergangskoeffizienten gibt es viele Normen, Richtlinien und Forschungen, die unterschiedliche Angaben machen. In DELPHIN können die Übergangskoeffizienten individuell eingestellt werden. Standardmäßig folgen diese dem WTA Merkblatt 6-2 [11] bzw. der DIN 4108-3 [22], da diese die gleichen Werte beinhalten. In WUFI hingegen können die Wärmeübergangswiderstände ebenso nach dem WTA Merkblatt 6-2 [11] bzw. der DIN 4108-3 [22] oder auch individuell verändert werden. Die Wasserdampfübergangskoeffizienten errechnen sich hingegen selbstständig in Abhängigkeit von den Wärmeübergangskoeffizienten (siehe Tabelle 16 und Tabelle 17).

Tabelle 16 Auswahl äquivalenter Dampfdiffusionsdicken bzw. Wasserdampfübergangskoeffizienten

	außen	innen		
		aufwärts	horizontal	abwärts
	β [kg/m ² sPa] = [s/m]			
ÖNORM EN ISO 13788 [18]	als vernachlässigbar angesehen			
ÖNORM EN 15026 [19]	als s_d -Wert in [m] für $v = 4$ m/s			
	0,002	0,004	0,008	0,030
WTA 6-2 [11]	7,50E-08	2,50E-08		
WUFI Pro 6.1 [26]	mit $R_{se} = 0,0588$ und $R_{si} = 0,125$			
	7,35E-08	2,45E-08		
DIN 4108-3 [22]	7,50E-08	2,50E-08		

Tabelle 17 Auswahl Wärmeübergangswiderstände

	außen	innen		
		aufwärts	horizontal	abwärts
	m^2K/W			
ÖNORM EN ISO 13788 [18]				
opake Oberflächen	0,040	0,250		
Bauteilinneres bzw. Fenster und Türen		0,100	0,130	0,170
ÖNORM EN 15026 [19]				
außen: $h_{c,se} + h_{r,se}$ bzw. innen: $h_{c,si} + h_{r,si}$	0,050	0,099	0,131	0,172
WTA 6-2 [11]				
	0,0588	0,125		
DIN 4108-3 [22]				
vereinfachtes Verfahren (Anhang A)	0,040	0,250		
hygrothermische Simulation (Anhang D) Konvektion und langwellige Strahlung h	0,0588	0,125		
ÖNORM B 8110-2 [17]				
Innenbereich je nach Umgebungssituation	0,040	0,25 / 0,50 / 1,00		

In einem Instituts-Forschungsprojekt [37] wurde das Gebäude der Schönbrunngrasse 30, das weniger als 2,5 km entfernt vom Forschungsgebäude dieses Projektes situiert ist und circa zur gleichen Zeit (1885) errichtet wurde, untersucht. Die Bauweise ist umfangreich vergleichbar und auch die Materialdaten der Bestandsmaterialien sind sehr ähnlich. Erkenntnisse dieses Projekts können somit auf die vorliegende Dissertation umgelegt werden. Die Werte des inneren Wärmeübergangskoeffizienten h_{si} wurden zwischen 7 W/m²K und 14 W/m²K, jene der Wasserdampfübergangskoeffizienten von β_{si} und β_{se} in

den Bereichen $1 \cdot 10^{-8}$ und $9 \cdot 10^{-7}$ s/m und zusätzliche Widerstände für den Flüssigwasser- ($1 \cdot 10^{13}$ bis $1 \cdot 10^{14}$ m/s) oder Dampfdruck ($s_d = 0,5$ m) variiert und analysiert. Der Einfluss auf die Simulationsergebnisse der Parameter war gering und so konnte von Labor-Messwerten, Standardprogrammeinstellungen und Richtlinienwerten ausgegangen werden. Auf die Werte der kalten Seite der Innendämmung hatten Veränderungen des Mauerwerks in Hinsicht auf den Wasserdampfdiffusionswiderstand und den Wasseraufnahmekoeffizient sowie innere hygrische Übergangswiderstände nur sehr geringen Einfluss [68].

Für die Simulationen wurden die in der ÖNORM B 8110-2 [17] vorgeschlagenen Wärmeübergangswiderstände $R_{si} = 0,25$ m²K/W und $R_{se} = 0,04$ m²K/W bzw. $R_{se} = 0,00$ m²K/W für das Erdreich angesetzt. Die Wasserdampfübergangskoeffizienten wurden in Anlehnung an das WTA Merkblatt 6-2 [11] bzw. der DIN 4108-3 [22] in DELPHIN auf $\beta_{si} = 2,5 \cdot 10^{-8}$ m/s und $\beta_{se} = 7,5 \cdot 10^{-8}$ m/s eingestellt und in WUFI erfolgte die automatisierte Berechnung, wie oben beschrieben.

5.3 Materialdatensätze Bestandskonstruktion

5.3.1 Einschränkung der Datensätze

In der Praxis sind oft nicht die Zeit bzw. die monetären Mittel gegeben, um alle Materialparameter labortechnisch aufbereiten zu lassen wie in Kapitel 4.5. In der Datenbank von DELPHIN stehen Datensätze zu ca. 100 und bei WUFI ca. 75 verschiedenen Ziegeln zur Verfügung. Schränkt man die Auswahl auf jene Datensätze ein, die thermische Transport-, Dampfdiffusion- und Flüssigwassertransportdaten hinterlegt haben, dann verbleiben noch immer ca. 60 unterschiedliche Ziegel-Datensätze bei DELPHIN zur Auswahl. In Tabelle 18 sind Datensätze für die Ziegel der Erdgeschoß Wand abgebildet, die mit den Messdaten annähernd vergleichbar sind, wobei die grün markierten Zellen jene Parameter wiedergeben, nach denen die Auswahl getroffen wurde.

Tabelle 18 Messdaten EG Ziegel und Auswahl an vergleichbaren Datensätzen aus DELPHIN

Index	Name	Rohdichte		Öpor		λ		cp	μ	Wsat	W80	Aw
		kg/m ³	Delta	m ³ /m ³	Delta	W/mK	Delta					
-	EG Ziegel Messergebnis	1726,3	-	0,3583	-	0,576	-	-	-	324,0	-	-
493	Altbauziegel Dresden ZE	1657,2	-69,13	0,3747	0,0163	0,574	0,00	907	12,82	357,0	4,9	0,22
499	Altbauziegel Dresden ZK	1734,1	7,77	0,3456	-0,0127	0,656	0,08	919	24,50	324,0	14,8	0,11
501	Altbauziegel Dresden ZM	1719,6	-6,73	0,3511	-0,0072	0,642	0,07	917	19,09	338,9	4,1	0,12
512	Normziegel	1786,3	59,97	0,3535	-0,0048	0,548	-0,03	889	18,01	319,4	13,4	0,20
838	Altbauziegel Bolonga 3enCult	1731,2	4,87	0,3467	-0,0116	0,624	0,05	1092	24,62	318,4	8,5	0,14

Einerseits sind die Abweichungen der Materialparameter zu den Messdaten eindeutig zu erkennen und andererseits sind die Datensätze untereinander völlig unterschiedlich, auch wenn einzelne Parameter mit den labortechnischen Auswertungen übereinstimmen. Die Schwankungsbreite der Rohdichte beträgt nur ca. 4 %. Obwohl die Wärmeleitfähigkeit in zwei von fünf Fällen ein Auswahlkriterium darstellte, beträgt die Schwankungsbreite ca. 9 %. Die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahlen weichen bei den fünf Datensätzen um bis zu 35 % und bei den Wasseraufnahmekoeffizienten um bis zu 40 % vom Mittelwert ab.

Drei Datensätze der Vorauswahl sind auf Grund des gemeinsamen Ursprunges eines Forschungsprojektes in der Software DELPHIN und auch in WUFI zu finden. Es handelt sich hierbei um folgende Ziegel:

Bezeichnung in DELPHIN:

- 493 Altbauziegel Dresden ZE
- 499 Altbauziegel Dresden ZK
- 501 Altbauziegel Dresden ZM

Bezeichnung in WUFI:

- Vollziegel ZE
- Vollziegel ZK
- Vollziegel ZM

Diese Datensätze finden sich in der Materialdatensammlung für energetische Altbausanierung MASEA-ENSAN [79] wieder. In den Materialinformationen der Materialdatenbank der Software WUFI ist der Hinweis „Messdaten TU Dresden“ zu finden. Nun sollte davon ausgegangen werden, dass diese Datensätze übereinstimmen und bei Auswahl dieser Materialien auch ähnliche Ergebnisse der Simulationen erzielt werden können, wenn die weiteren Randbedingungen ebenfalls gleich eingegeben werden. Vergleicht man aber die Daten in den beiden Programmen miteinander, dann lassen sich selbst bei diesen Datensätzen Abweichungen erkennen.

Alle ausgewählten Materialparameter sind in Kapitel 5.3.4 dargestellt.

5.3.2 Feuchtespeicher- und Flüssigwassertransportfunktion

In Abbildung 50 und Abbildung 51 sind die Feuchtespeicher- und die Flüssigwassertransportfunktionen der Vorauswahl der Datensätze von DELPHIN dargestellt. Die Abbildungen verdeutlichen die Varianz der auf den ersten Blick gut zutreffenden Auswahl der Materialien aus den Datenbanken. In diesen Graphiken sind alle fünf geeigneten Ziegeldatensätze dargestellt, um die breite Streuung aufzuzeigen, der man bei der Auswahl in der Praxis ausgesetzt ist.

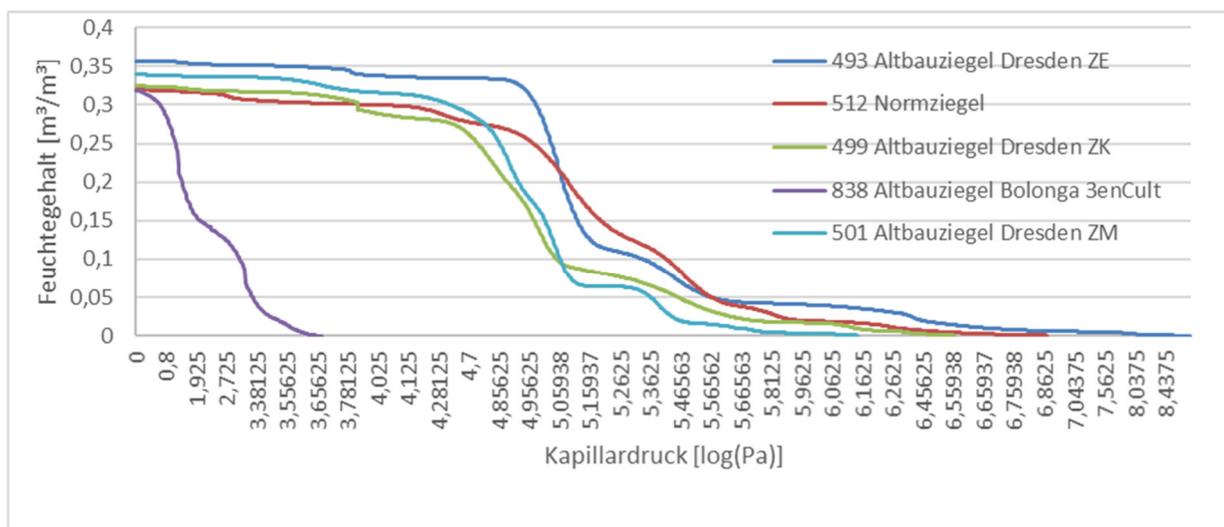


Abbildung 50 Feuchtespeicherfunktionen der Datensatzauswahl aus DELPHIN

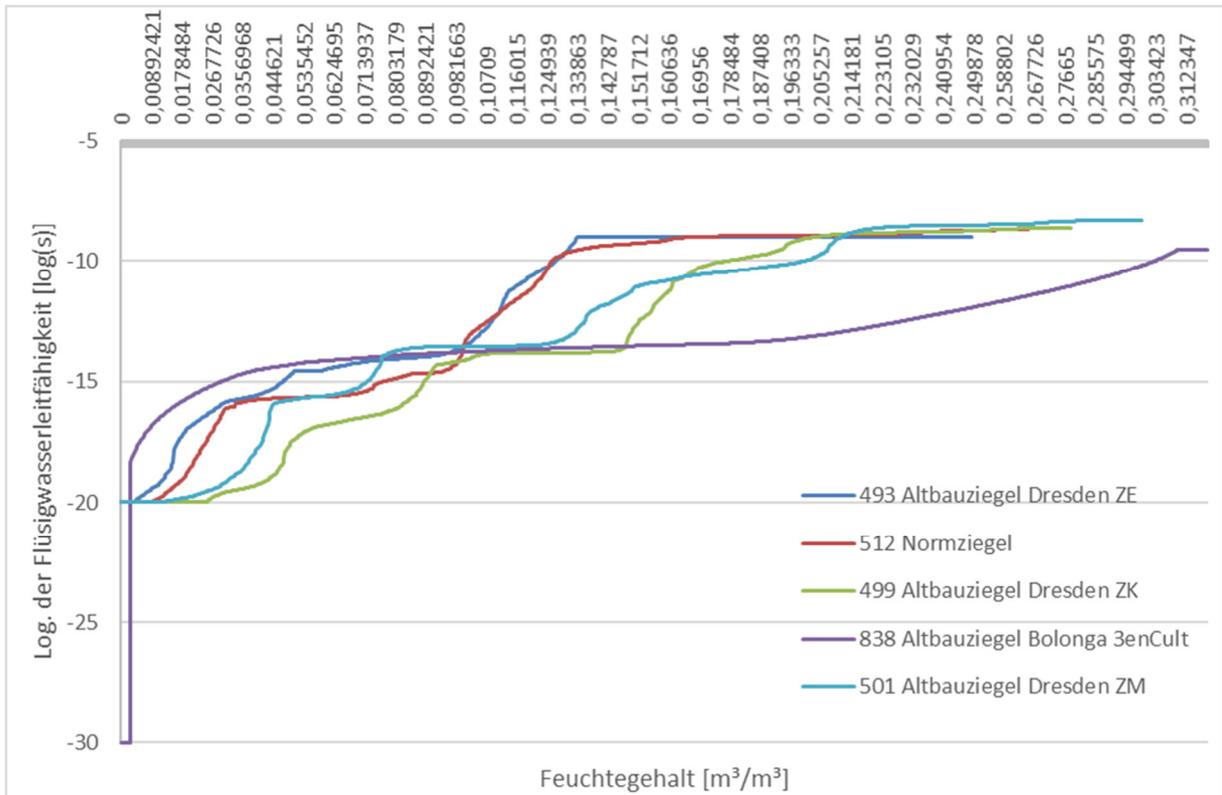


Abbildung 51 Flüssigwassertransportfunktionen der Datensatzauswahl aus DELPHIN

Die in Abbildung 50 dargestellte Feuchtespeicherung wird in DELPHIN über den Kapillardruck angegeben. In WUFI hingegen wird diese über die relative Luftfeuchtigkeit definiert (siehe Abbildung 52).

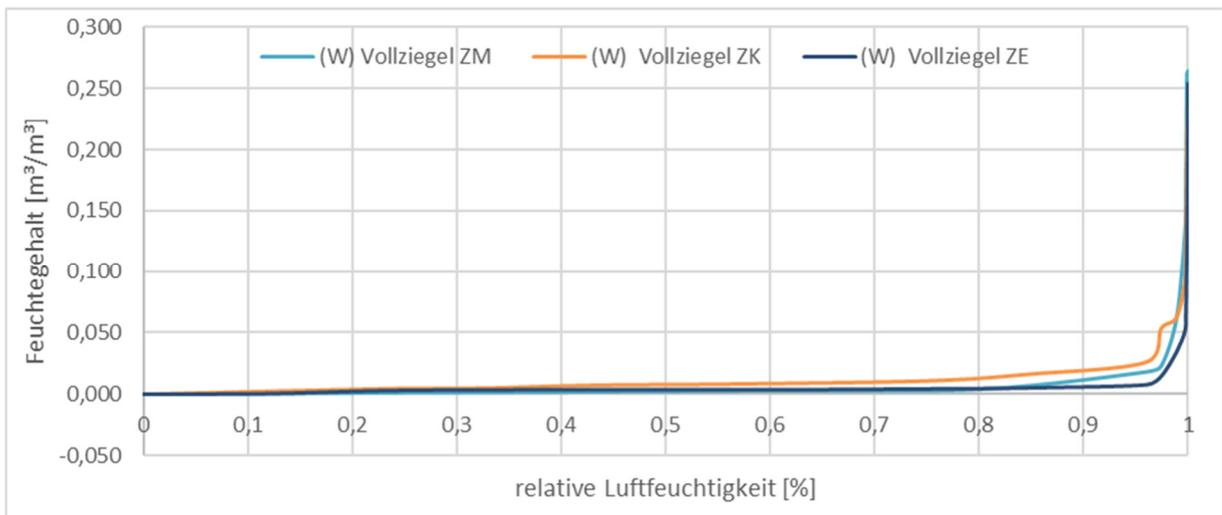


Abbildung 52 Feuchtespeicherfunktion der Ziegeldatensatzauswahl aus WUFI

Der Zusammenhang zwischen relativer Luftfeuchtigkeit und Kapillardruck wird über die Kelvin-Gleichung hergestellt, siehe Formel 6.

Formel 6 Kelvin-Gleichung

$$\varphi = e^{\frac{-p}{R_w^* T}}$$

φ	relative Luftfeuchtigkeit [%]
p_c	Kapillardruck [Pa]
ρ_w	Rohdichte Wasser [kg/m ³]
R_v	spezifische Gaskonstante für Wasserdampf 461,52 [J/kgK]
T	Temperatur 293,15 K Thermodynamische Temperatur bei 20 °C [K]

Die Vergleichbarkeit der Feuchtespeicherfunktionen und der unterschiedlichen Berechnungsarten zwischen den beiden Programmen ist somit möglich, aber schwer darstellbar und wirkt sich in weiterer Folge auch stark auf die Simulationsergebnisse aus.

5.3.3 Temperatur- und feuchteabhängige Wärmeleitfähigkeit

Wie in Kapitel 4.5 beschrieben sind die maßgeblichen Schichten für die temperatur- und feuchteabhängige Wärmeleitfähigkeit die Innendämmung und das Ziegelmauerwerk. Die Innendämmung wird im Kapitel 4.2 und 5.4.2 näher beschrieben. Die Außenwand hat eine Dicke von 92 cm und daher hat die Wärmeleitfähigkeit des Ziegelmauerwerks entscheidenden Einfluss auf die Transmissionswärmeverluste von Gründerzeitgebäuden. Betrachtet man die bestmögliche Datensatzauswahl aus DELPHIN und WUFI aus Kapitel 5.3.1, dann ergibt sich bereits eine Schwankung des U-Wertes zwischen 0,551 W/m²K und 0,675 W/m²K ohne Berücksichtigung der Temperatur- und Feuchteabhängigkeit. Somit weicht der höchste U-Wert um 23 % vom geringsten ab. Das wirkt sich im Detail und auch für das gesamte Gebäude aus. Die Innenoberflächentemperatur differiert hier bei eindimensionalen Betrachtungen um einen halben Grad und auf das gesamte Gebäude gerechnet ergeben die Unterschiede beim HWB-Wert ca. 9 % (89,2 kWh/m²a bis 97,23 kWh/m²a) bzw. beim EEB von 6 % (143,2 kWh/m²a bis 151,3 kWh/m²a) Differenz.

In DELPHIN ist ein lineares feuchteabhängiges Modell verfügbar. Ausgehend von λ_{dry} geht die Gerade bis zur effektiven Sättigung Θ_{eff} mit einem Anstieg der Wärmeleitfähigkeit von Wasser (siehe Formel 7) [24] einher.

Formel 7 linearer Anstieg in Abhängigkeit vom Wassergehalt in DELPHIN

$$\lambda = \lambda_{dry} + 0,56 \text{ W/mK} * \theta_l$$

Zusätzlich können feuchte- und temperaturabhängige Daten eingegeben werden. Die Auswertung bei Anwendung beider Abhängigkeiten wird nach Formel 8 durchgeführt:

Formel 8 Effektive Wärmeleitfähigkeit in DELPHIN

$$\lambda_{eff} = \lambda(Ol) * \lambda(T) / \lambda_{dry}$$

Dies stellt einen vereinfachten Zusammenhang dar, da hier die wechselseitige Abhängigkeit bei Veränderung der Temperatur und Feuchtigkeit nicht gegeben ist.

Wie in Abbildung 53 ersichtlich, verhält sich die Entwicklung der Wärmeleitfähigkeit bei unterschiedlichen Temperaturkurven nicht linear. Die Kombination von feuchte- und temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeiten ist bei wenigen Materialien für die gesamte Bandbreite der im Bauwesen vorkommenden Temperaturen und Feuchtigkeitsgraden erforscht [80].

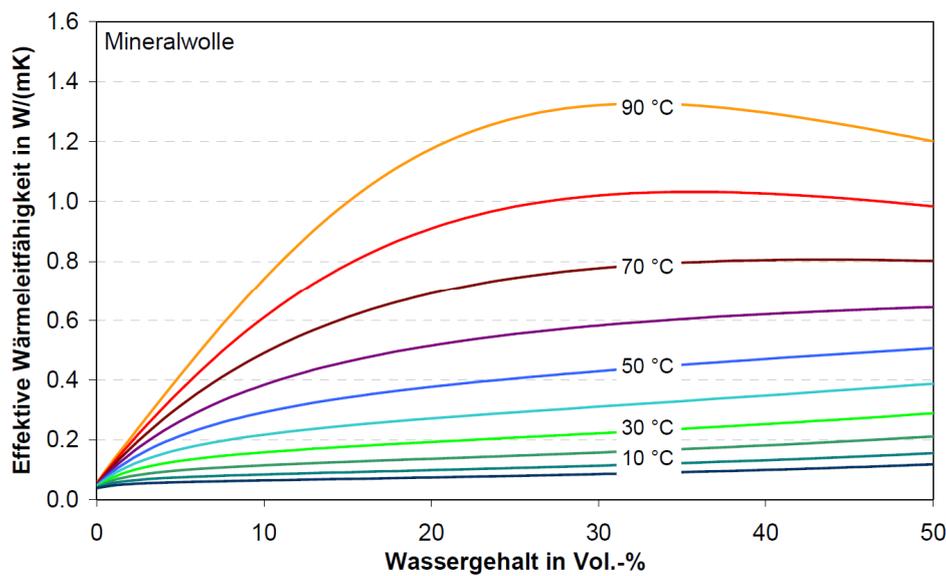


Abbildung 53 Wärmeleitfähigkeit nach dem Porositäts-Modell [81]

In WUFI ist ebenfalls meist standardmäßig ein lineares temperaturabhängiges Wärmeleitfähigkeitsmodell hinterlegt, das ausgehend von λ_{dry} bei 10 °C zwei zusätzliche Wärmeleitfähigkeitswerte bei -20 °C und 80 °C erzeugt. Diese haben meist eine Differenz von 0,02 W/mK.

Der temperaturbedingten Wärmeleitfähigkeitszuschlag wird, wie in Formel 9 dargestellt, berechnet.

Formel 9 Temperaturbedingter Wärmeleitfähigkeitszuschlag in WUFI

$$\lambda(\vartheta) = \lambda_{10} + a * (\vartheta - 10 \text{ }^{\circ}\text{C})$$

- $\lambda(\vartheta)$ Wärmeleitfähigkeit des Baustoffes bei der Temperatur ϑ [W/(mK)]
- λ_{10} Wärmeleitfähigkeit des Baustoffes bei der Temperatur 10 °C [W/mK]
- a temperaturbedingter Zuschlag zur Wärmeleitfähigkeit [W/(mK²)]
- ϑ Temperatur [°C]

Der feuchtebedingte Wärmeleitfähigkeitszuschlag in WUFI ist in Formel 10 beschrieben:

Formel 10 Feuchtebedingter Wärmeleitfähigkeitszuschlag in WUFI

$$\lambda(w) = \lambda_{trocken} \cdot (1 + b \cdot w / \rho_s)$$

$\lambda(w)$	Wärmeleitfähigkeit des feuchten Baustoffes [W/mK]
$\lambda_{trocken}$	Wärmeleitfähigkeit des trockenen Baustoffes [W/mK]
b	Feuchtezuschlag zur Wärmeleitfähigkeit [%/M%]
w	Wassergehalt [kg/m ³]
ρ_s	Rohdichte des trockenen Baustoffes [kg/m ³]

Werden beide Abhängigkeiten gemeinsam angewendet, dann addiert das Programm zur trockenen Wärmeleitfähigkeit (Grundkennwert) beide Zuschläge hinzu [26].

Mit Hilfe der gemessenen Wärmeleitfähigkeiten in Abhängigkeit von Temperatur und Feuchtigkeit der Ziegel (siehe Kapitel 4.5) konnte eine Variantenstudie durchgeführt werden. Hier wurde die Auswirkung im Gegensatz zu den linearen Modellen, die standardmäßig in DELPHIN und WUFI hinterlegt sind, analysiert (siehe Kapitel 6.5). Es ist auch anzumerken, dass in WUFI Pro die Wärmeleitfähigkeiten der einzelnen Schichten nicht automatisiert ausgegeben werden. Daher erfolgte eine Berechnung mit Hilfe der Wassergehalte, Temperaturen, Messkurven und der oben dargestellten Formel 9 und Formel 10.

In Abbildung 54 sind die Wärmetransportfunktionen der Vorauswahl der Datensätze von DELPHIN dargestellt. Die Wärmeleitfähigkeit unterscheidet sich zwischen den Programmdatensätzen um bis zu 15 % bei den Einzelwerten und der Wassersättigung um bis zu 29 %.

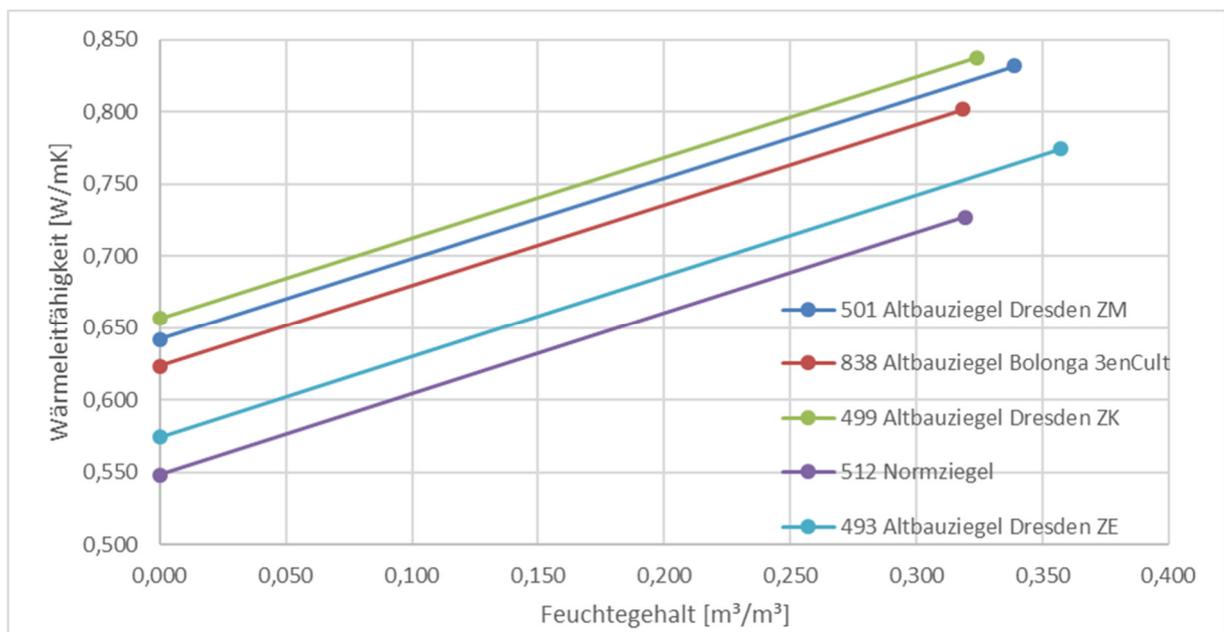


Abbildung 54 Wärmetransportfunktionen der Datensatzauswahl aus DELPHIN

Laut ÖNORM EN ISO 10456 [80] sind wärmeschutztechnische Werte für Berechnungen folgendermaßen umzurechnen:

Formel 11 Umrechnung der Wärmeleitfähigkeit nach ÖNORM EN ISO 10456 [80]

$$\lambda_2 = \lambda_1 * F_T * F_m * F_a$$

λ	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]
F_T	Umrechnungsfaktor für die Temperatur [-]
F_m	Umrechnungsfaktor für den Feuchtegehalt [-]
F_a	Umrechnungsfaktor infolge Alterung [-]

Für die meisten Materialien gibt es jedoch keine Umrechnungsfaktoren für die Alterung, und viele Produktnormen für Dämmstoffe berücksichtigen auch keine Umrechnungsfaktoren für die Feuchtigkeit (siehe Tabelle 19).

Tabelle 19 Überblick über die Berechnung der Wärmeleitfähigkeit ausgewählter Dämmstoffe [82, 83]

Dämmstoffe	F_T	F_a	F_m	λ_F	Material-Norm
Expandierter Polystyrol-Hartschaum (EPS)	J 1,047912	N 1	J 1	0,036677	EN 13163 - 2017
Extrudierter Polystyrol-Hartschaum (XPS)	J 1,046551	K.A. 1	J 1	0,036629	EN 13164
Gebundene Mineralwolle (MW)	J 1,061624	N 1	J 1	0,037157	EN 13162 - 2015
Schaumglas (CG)	J 1,057492	N 1	J 1	0,062392	EN 13167 - 2015
Holzwohle Leichtbauplatten	J 1,054746	N 1	J 1,005415	0,148464	EN 13168 - 2015
Holzfaserdämmplatten	J 1,043834	N 1	J 1	0,053236	EN 13171 - 2015
Holz-Polymer-Werkstoffe (WPC) / Hanf	J 1,067159	K.A. 1	J 1	0,053358	EN 15534 - 1
Zellulosefasern	J 1,138828	K.A. 1	J 1,03562	0,083737	EN 15101 - 1

Legende:	J	Wert steht in der Norm
	N	Wert hat keinen Einfluss auf Wärmeleitfähigkeit
	K.A.	Keine Auskunft in der Norm

Für instationäre, hygrothermische Simulationen existieren ebenfalls keine Mess- oder Erfahrungswerte für die Alterung der Materialien. In dieser Arbeit liegt der Fokus nicht auf den altersbedingten Veränderungen der Wärmeleitfähigkeit von Materialien, da im Sockelbereich die Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von der Feuchtigkeit und der Temperatur maßgeblich ist. In DELPHIN und WUFI ist die feuchte- und temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit bei einigen Materialdatensätzen implementiert (siehe Abbildung 54). Für DELPHIN sind jedoch meist nur die feuchteabhängigen Wärmeleitfähigkeiten vorhanden. Das bedeutet, dass die Wärmetransportsimulationen, in Hinsicht auf die Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit, ohne Berücksichtigung der Temperaturentwicklung im Material ablaufen, wenn keine individuelle Anpassung des Nutzers erfolgt.

Werden die abgespeicherten Graphen der feuchteabhängigen Wärmeleitfähigkeiten der oben genannten Vollziegeldatensätze aus DELPHIN und WUFI, die eigentlich dieselben Messwerte beinhalten sollten, in Relation gesetzt (siehe Abbildung 55), so lassen sich eklatante Unterschiede feststellen.

WUFI gibt die Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit des Feuchtegehalts in kg/m³ an, daher wurde diese zur Vergleichbarkeit mit den Datensätzen von DELPHIN in m³/m³ umgerechnet.

Die Wärmeleitfähigkeitswerte weichen bei trockenem Zustand bis zu 15 % und bei den zugehörigen vergleichbaren Maximalfeuchten bis zu 107 % ab.

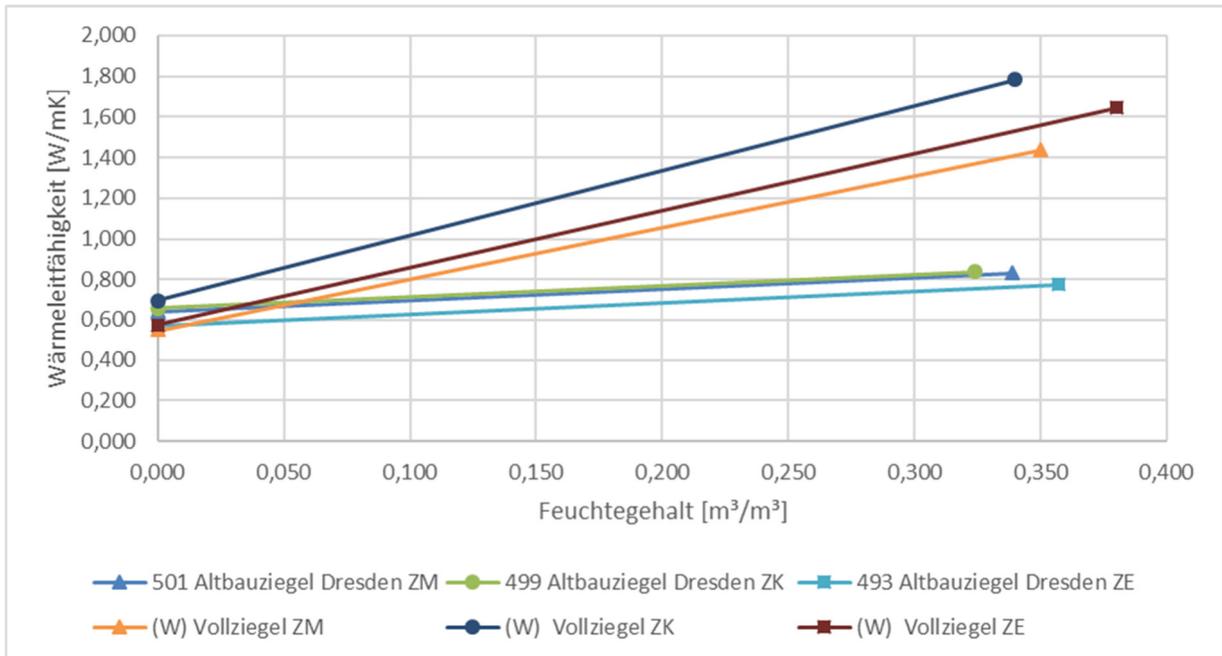


Abbildung 55 feuchteabhängige Wärmeleitfähigkeit aus DELPHIN und WUFI für drei Ziegeldatensätze

In Abbildung 56 sind die temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeiten der genannten Ziegel aus WUFI dargestellt. Bei allen drei Ziegeln ist kein relevanter Einfluss der Temperatur auf die Wärmeleitfähigkeit zu erkennen und somit werden sich bei der Auswahl dieser Datensätze auch bei den Simulationsergebnissen keine nennenswerten Veränderungen der Wärmeströme mit vorhandenen Temperaturschwankungen ergeben. Das betrifft jedoch nur die automatisch generierten temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeiten. Messungen zeigen einen deutlich größeren Einfluss (siehe Kapitel 4.5).

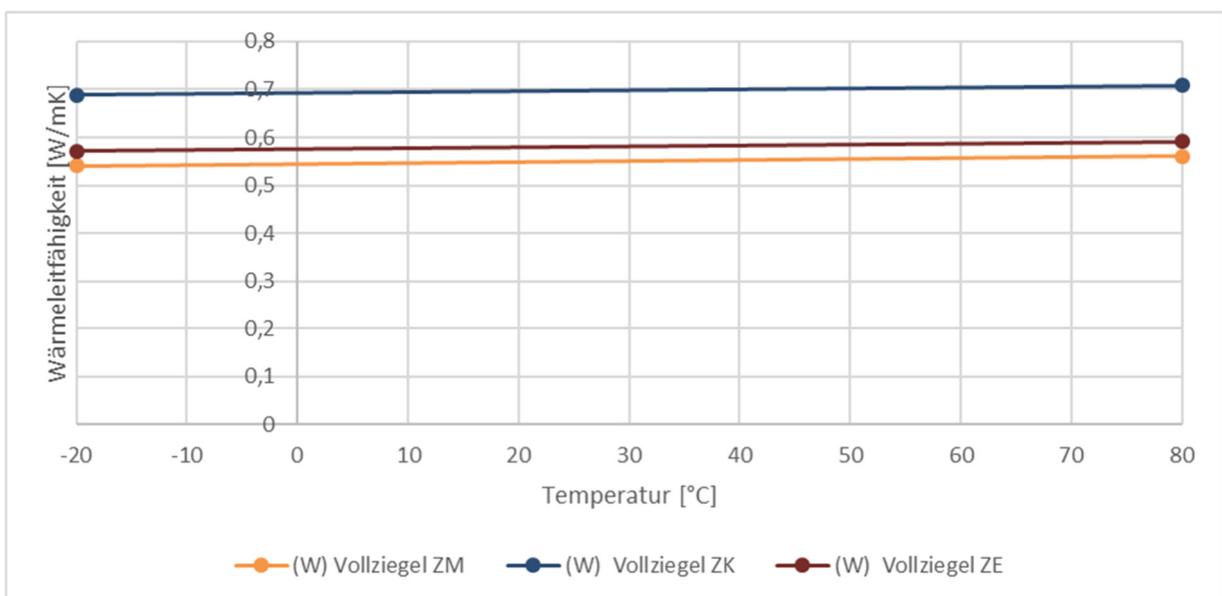


Abbildung 56 temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit aus WUFI für drei Ziegeldatensätze

5.3.4 Ausgewählte Materialparameter

Die Materialparameter der Ziegel wurden einerseits aus den jeweiligen Datenbanken entnommen und für Vergleichbarkeitsrechnungen der beiden Programme nicht verändert. Andererseits wurden zusätzliche Varianten mit abgeänderten Materialparametern nach den Messungen durchgeführt. Ausführliche Analysen und Vergleiche der Ziegel wurden bereits in Kapitel 4.5 beschrieben.

Für die Simulationen der Bestandskonstruktionen wurden die in Tabelle 20 abgebildeten Parameter in DELPHIN verwendet.

Tabelle 20 Materialparameter Bestandskonstruktionen DELPHIN

Index	Nr.	Material	ρ	c	λ	μ	W_{sat}	W_{80}	A_w	K_{eff}
			[kg/m ³]	[J/kgK]	[W/mK]	[-]	kg/m ³	kg/m ³	[kg/m ² s ^{0,5}]	[s]
1	UG Wand									
2	513	Keramischer Ziegel Belgien	1952,2	863,00	0,961	19,37	239,0	1,2	0,14	3,2E-08
3	145	Kalkzementputz	1270,0	960,00	0,550	12,00	450,0	59,6	0,01	2,7E-05
4	UG Gewölbe bzw. EG Boden									
5	708	Eiche longitudinal (aus Sachsen)	580,7	1683,00	0,166	8,31	683,6	86,2	0,01	1,1E-09
6	834	Zement-Fließestrich	2040,2	689,00	0,940	95,55	249,8	15,1	0,09	-
7	602	Schüttung	485,0	894,00	0,140	8,50	650,0	3,7	0,10	1,1E-09
8	513	Keramischer Ziegel Belgien	1952,2	863,00	0,961	19,37	239,0	1,2	0,14	3,2E-08
9	529	Altbauziegel Am Weinberg Berlin	1966,5	879,00	0,928	26,48	240,1	1,0	0,06	1,0E-09
10	148	Kalkputz (historisch)	1800,0	850,00	0,820	12,00	285,0	11,1	0,13	2,8E-09
11	EG Wand									
12	148	Kalkputz (historisch)	1800,0	850,00	0,820	12,00	285,0	11,1	0,13	2,8E-09
13	493	Altbauziegel Dresden ZE	1657,2	907,00	0,574	12,82	357,0	4,9	0,22	8,8E-10
14	499	Altbauziegel Dresden ZK	1734,1	919,00	0,656	24,50	324,0	14,8	0,11	2,5E-09
15	501	Altbauziegel Dresden ZM	1719,6	917,00	0,642	19,09	338,9	4,1	0,12	5,2E-09
16	512	Normziegel	1786,3	889,00	0,548	18,01	319,4	13,4	0,20	2,0E-09
17	838	Altbauziegel Bolonga 3enCult	1731,2	1092,00	0,624	24,62	318,4	8,5	0,14	-

Für die Simulationen in WUFI wurden die angegebenen Materialparameter in Tabelle 21 verwendet, wobei der Kalkputz wie auch die Aufsprühzellulose durch Umrechnungen implementiert werden konnten (siehe Kapitel 5.4).

Tabelle 21 Materialparameter Bestandskonstruktionen WUFI

Material	ρ	c	λ	μ	W_{sat}	W_{80}	A_w
	[kg/m ³]	[J/kgK]	[W/mK]	[-]	kg/m ³	kg/m ³	[kg/m ² s ^{0,5}]
EG Wand							
Kalkputz (historisch)	1800,0	850,00	0,820	12,00	285,0	11,1	0,13
Vollziegel ZE	1642,0	899,00	0,577	13,00	254,0	4,7	0,22
Vollziegel ZK	1737,0	916,00	0,695	25,00	250,0	14,0	0,11
Vollziegel ZM	1720,0	937,00	0,547	19,00	264,0	5,0	0,12

5.4 Materialdatensätze Innendämmsysteme

Die Materialparameter der Innendämmung sind, wie in Kapitel 4.5 beschrieben, durch Messungen bekannt und teilweise in die Software DELPHIN bzw. WUFI implementiert. In DELPHIN sind die Materialdaten der Aufsprühzellulose implementiert, jedoch nicht der Aerogel Dämmputz. In der Datenbank von WUFI sind Zellulosedämmungen enthalten,

jedoch entsprechen sie nicht exakt der verwendeten Aufsprühzellulose der Dissertation. Die übermittelten Daten des Aerogel Dämmputzes wurden am *Fraunhofer Institut* gemessen und vertraulich übermittelt, welche jedoch nicht im Detail dargestellt werden dürfen. Durch die vollständige Implementierung der verwendeten Datensätze in beide Programme mussten keine Datensätze aus den Datenbanken adaptiert werden. Durch die verschiedenen Rechenverfahren der Programme, war es jedoch erforderlich, einige Parameter umzurechnen.

5.4.1 Feuchtespeicher- und Flüssigwassertransportfunktion

Anhand der Feuchtespeicherfunktion der Aufsprühzellulose wird die Umrechnung des Feuchtegehalts in Abhängigkeit zum Kapillardruck (DELPHIN) in die Abhängigkeit zur relativen Luftfeuchte (WUFI) veranschaulicht (siehe Abbildung 57 bis Abbildung 59). Die Umrechnung erfolgte mit Hilfe der Kelvin Gleichung (siehe Kapitel 5.3.2). Die gleiche Vorgehensweise wurde auch mit dem Kalkputz durchgeführt, damit die Materialparameter vergleichbar sind.

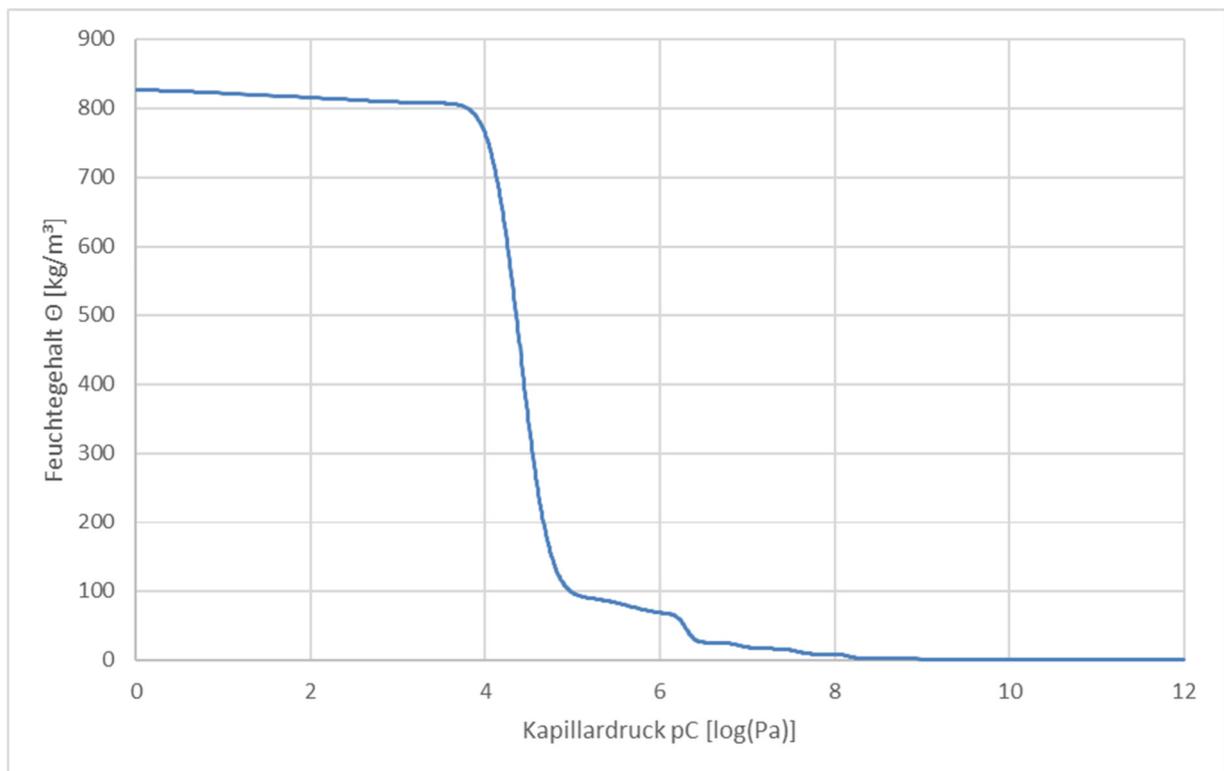


Abbildung 57 Feuchtespeicherfunktion für die Aufsprühzellulose in DELPHIN

Die Sorptionsisotherme, die in Abhängigkeit vom Wassergehalt und der relativen Luftfeuchte ermittelt wird, spiegelt jedoch den hochfeuchten (überhygroskopischen) Bereich nicht gut wider. Daher wird für diesen Bereich die Saugspannungsmessung und somit der Wassergehalt in Abhängigkeit vom Kapillardruck angewendet [11]. Da WUFI jedoch für die Feuchtespeicherfunktion die relative Luftfeuchte anwendet, ist dies als nicht unproblematisch zu sehen, wenn vom Material größere Feuchtemengen aufgenommen werden müssen.

Diese Tatsache spiegelt sich in den Ergebnissen der Simulationen der verschiedenen Programme wider. In Abbildung 59 ist erkennbar, dass der überhygroskopische Bereich

und somit das Flüssigwasser, sehr ungenau abgebildet wird durch einen sprunghaften Anstieg.

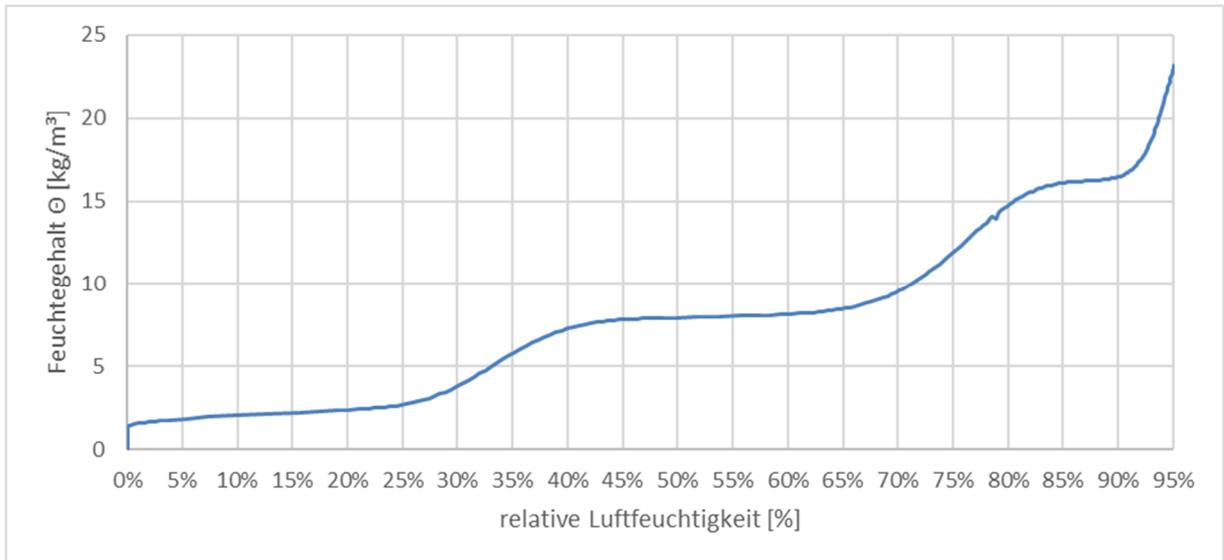


Abbildung 58 Feuchtespeicherfunktion für die Aufsprühzellulose in WUFI (0 bis 95 %)

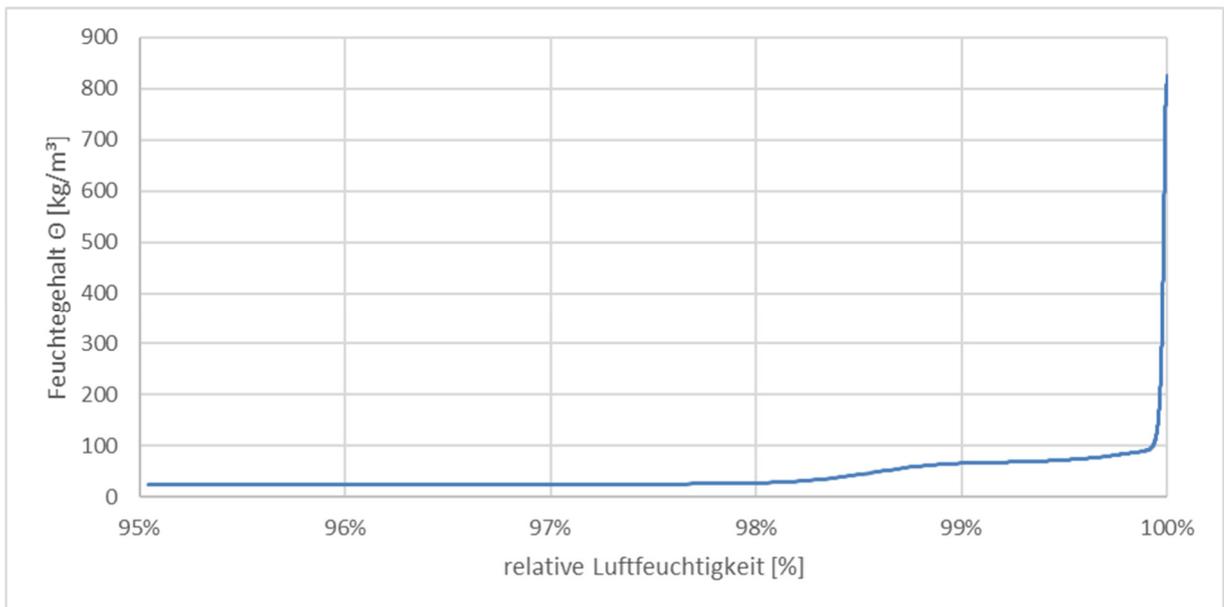


Abbildung 59 Feuchtespeicherfunktion für die Aufsprühzellulose in WUFI (95 bis 100 %)

Für die Implementierung des Aerogel Datensatzes in DELPHIN musste keine Umrechnung für die Feuchtespeicherfunktion vorgenommen werden, da in diesem Programm die Sorptionsisotherme direkt eingegeben werden kann.

Die Flüssigwassertransportfunktion der Aufsprühzellulose und des Kalkputzes für Saugen (siehe Formel 12) und Weiterleitung / -verteilung wurden in WUFI über den eingegebenen Wasseraufnahmekoeffizienten generiert. Die Funktion für das Saugen wird für die

vollständige Benetzung der Oberfläche (Bsp. Regen) und die Funktion für die Weiterverteilung für die Umschichtung des Wassers nach der Benetzung verwendet.

Formel 12 Flüssigtransportkoeffizient für den Saugvorgang [26]

$$D_{ws}(w) = 3,8 * \left(\frac{A_w}{w_f}\right)^2 * 1000\left(\frac{w}{w_f}\right)^{-1}$$

D_{ws}	Flüssigtransportkoeffizient für den Saugvorgang [m^2/s]
A_w	Wasseraufnahmekoeffizient [$kg/m^2s^{0,5}$]
w	Wassergehalt [kg/m^3]
w_f	freie Wassersättigung [kg/m^3]

Das Ergebnis der Generierung ist in Tabelle 22 dargestellt [26].

Tabelle 22 Ergebnis einer generierten Feuchtetransporttabelle

w [kg/m³]	D_{ws} [m²/s]		w [kg/m³]	D_{ww} [m²/s]
0	0		0	0
w_{80}	$D_{ws}(w_{80})$		w_{80}	$D_{ws}(w_{80})$
w_f	$D_{ws}(w_f)$		w_f	$D_{ws}(w_f)/10$

Für die Einarbeitung des Aerogel Datensatzes in DELPHIN musste die Flüssigtransportfunktion umgerechnet werden. Auf eine detaillierte Darstellung muss auf Grund der vertraulich zu behandelnden Daten verzichtet werden.

5.4.2 Temperatur- und feuchteabhängige Wärmeleitfähigkeit

Die Modelle der temperatur- und feuchteabhängigen Wärmeleitfähigkeiten sind gleich wie für die Materialien der Bestandskonstruktionen. Der Datensatz des Aerogel Dämmsystems wurde für die Implementierung in WUFI konzeptioniert. Diese Daten konnten für die Einarbeitung in DELPHIN herangezogen werden. Genau umgekehrt stellte sich die Situation für den Datensatz der Aufsprühzellulose dar, da dieser ohne temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit in DELPHIN zur Verfügung steht und nur diese Daten für die Einarbeitung in WUFI genutzt wurden. Auf Grund der Vertraulichkeit der Daten für Aerogel können die Graphen hier nicht abgebildet werden.

Wie in Kapitel 2.1 beschrieben, gibt es keine einheitlichen Feuchtigkeits-Normgrenzwerte für zweidimensionale, instationäre, hygrothermische Simulationen. Für die Dämmstoffschichten sind die in Tabelle 23 aufgelisteten Normauszüge am ehesten zutreffend. Da die Beurteilung der individuellen Problemstellungen Erfahrung voraussetzt und der Sockelbereich mit Innendämmungen eine besondere Herausforderung darstellt, sollten diese vorzugsweise als grobe Richtlinie gesehen werden.

Tabelle 23 Grenzwerte aus Normen in Hinsicht auf Wärmeverluste auf Grund von Feuchtigkeit im Bauteil

ÖNORM B 8110-2 (2003) [84]	Trotz Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit (λ [W/mK]) der betroffenen Baustoffschicht, muss die Erhöhung des Wärmedurchlasswiderstandes vom Bauteil (R [m ² K/W]) ≤ 10 % sein.
ÖNORM B 8110-2 (2020) [17]	Mittlere Wärmestromerhöhung Q [W] muss im Winter ≤ 10 % sein
DIN 4108-2 [85]	WUFI Pro Anwendung: $R_1 = 1.2$ m ² K/W, nach DIN 4108-2(2003) und $R_2 = 0.55$ m ² K/W, nach DIN 4108-2(1981). Mit $R_{si} = 0,13$ m ² K/W und $R_{se} = 0,04$ m ² K/W folgen die Grenzwerte von $U_1 = 0.73$ W/m ² K und $U_2 = 1.39$ W/m ² K.

5.5 Modellaufteilung

Mit den derzeit am Markt üblichen Rechenleistungen ist ein 2D Modell des gesamten Sockelbereiches samt Kellerwand und Fundament und dem lt. ÖNORM EN ISO 10211 [20] notwendigen Erdreich nicht möglich. Die Abmessungen, die nach Norm gefordert sind, hängen von den Gebäudeabmessungen ab und benötigen die 2,5-fache Breite bzw. Tiefe des Erdreichs. Im vorliegenden Projekt müsste ein Erdreich von rund 53 m Breite und gleicher Tiefe mitberechnet werden. Es wird darauf hingewiesen, dass im innerstädtischen Bereich auf Grund der Nachbarbebauung, welche im gegenständlichen Fall 10 m bzw. 13 m entfernt ist, die Abmessungen geringer gewählt werden können. Hier wären bereits die ähnlichen Randbedingungen wie im Kellergeschoß des Testgebäudes anzufinden, da die Nachbargebäude ebenfalls unterkellerte Gründerzeitgebäude sind. Also wurde das Erdreich unabhängig vom restlichen Gebäude simuliert. Würden die Randbedingungen des Erdreiches auf das Kellerfundament und die -mauer übertragen werden und nur eine Modellbildung der Keller- und Erdgeschoßbauteile samt Randbedingungen erfolgen, wäre das Modell immer noch zu umfangreich, um durchgerechnet zu werden. Somit war eine weitere Aufteilung zwischen Kellergeschoß und Erdgeschoß notwendig. Dies führte zur endgültigen Modellaufteilung in drei Teilbereiche nach Abbildung 60, welche mit DELPHIN berechnet wurden.

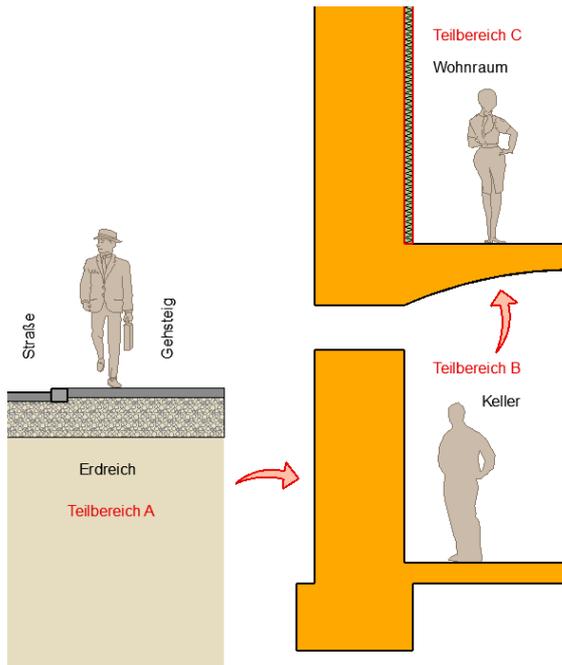


Abbildung 60 Aufteilung in drei Teilbereiche für die Modellbildung [86]

5.6 Erdreich (Teilbereich A)

Der Aufbau des Erdreichmodells nach Schichten sowie die Randbedingungen für das Außenklima bzw. das Grundwasser sind in Kapitel 4.4.5 beschrieben. In Abbildung 61 ist auf der linken Seite das gesamte Erdreichmodell abgebildet und auf der rechten der detaillierte Aufbau bis zur Fundamentunterkante des Forschungsgebäudes. Hier ist die Schichtung der notwendigen Ausgabeparameter zur Übergabe auf das Kellermodell (Teilbereich B) ersichtlich. Nach den ersten 20 cm, welche die größte Abhängigkeit in Verbindung mit der Außenklimabedingung besitzen, wurden in 50 cm Bereichen die Temperatur, die relative Luftfeuchtigkeit und der Kapillardruck ausgegeben.

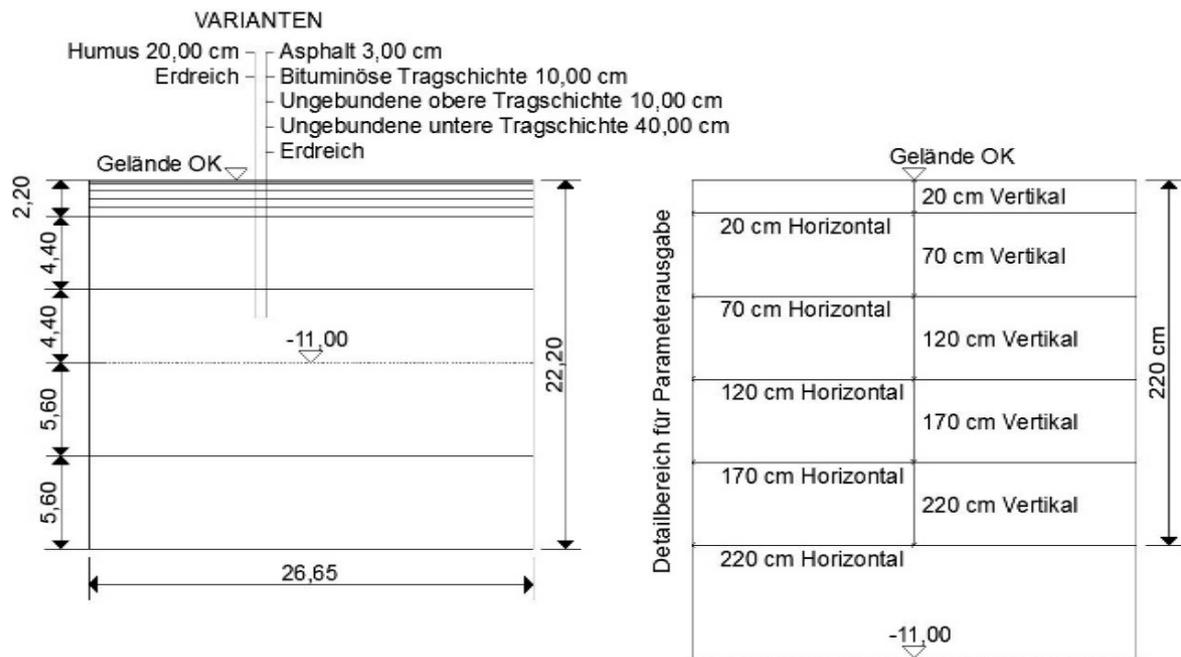


Abbildung 61 Erdreichschichtung (links) und Ausgabeparameter (rechts) [86, 87]

Die Ergebnisse der Simulation in Schichtungen zeigten, dass die Temperatur mit zunehmender Erdreichtiefe immer weniger Schwankungsbreite aufweist. Die relative Luftfeuchtigkeit und der Kapillardruck änderten sich hingegen nicht maßgeblich mit zunehmender Tiefe des Kelleraußenbereiches. Die relative Luftfeuchtigkeit bleibt konstant bei ca. 100 % und der Kapillardruck schwankt im Mittel zwischen 1914 Pa und 1917 Pa. Umgerechnet in Meter Wassersäule bzw. die Druckhöhe ergibt es ca. 0,20 m. Vorarbeiten mit zusätzlichen Variantenanalysen finden sich in [86] und [87].

5.7 Untergeschoß (Teilbereich B)

Mit Hilfe der Modellbildung und der Ausgaben aus Kapitel 5.6 konnten die Temperaturen und der zugehörige Wassergehalt jeder Schicht auf das Kellermodell (Teilbereich B) übertragen werden.

Als Randbedingung an der erdberührten Seite wurde in DELPHIN der Wasserkontakt mittels Oberflächenwert angewendet. Hierzu musste die Ausgabe des Kapillardrucks [Pa] des Erdreichmodells in Meter Wassersäule [mWS] bzw. in die Druckhöhe [m] umgerechnet werden [24]. Danach konnte eine Klimadatei für den Wasserdruck erstellt werden, welche von der Temperatur und dem umgerechneten Druck des Vormodells abhängig war. In Formel 13 ist das angewendete Modell von DELPHIN dargestellt.

Formel 13 Angewendetes Randbedingungsmodell des Wasserkontaktes in DELPHIN [24]

$$j_{conv}^{mw} = - \left(K_i(w_{eff}^{elem}) + K_i(w_i^{elem}) \right) * \frac{p_i^{bound} - p_i^{elem}}{x^{elem}}$$

j_{conv}^{mw} Maximaler Wasserfluss in das Element [kg/m²s]

$K_i(w)$ Flüssigwasserleitfähigkeit [s]

w_{eff}^{elem} effektiver Sättigungswassergehalt [kg/m³]

w_i^{elem} aktueller Wassergehalt [kg/m³]

$p_i^{bound} = \rho_w * g * h^{bound}$ Wasserdruck als Randbedingung (angegeben als Klimabedingung der Druckhöhe) [Pa]

ρ_w Dichte des Wassers [kg/m³]

G Erdbeschleunigung [m/s²]

h^{bound} Druckhöhe [m]

p_i^{elem} Aktueller Kapillardruck im Element [Pa]

x^{elem} Dicke des Elements (in Transportrichtung) [m]

Wird eine positive Druckhöhe angegeben, kann Grundwasser modelliert werden. Im vorliegenden Fall ist das Grundwasser jedoch ca. 9 m unter der Fundamentunterkante. Wird eine negative Druckhöhe angegeben, dann wird eine ungesättigte Umgebung simuliert, wie es bei erdberührten Bauteilen der Fall ist. In Tabelle 24 sind als Überblick Vergleichswerte von relativer Luftfeuchte, Kapillardruck und Meter Wassersäule dargestellt. Hier lässt sich auch die in Kapitel 5.4.1 beschriebene Problematik mit der Darstellung der Sorptionsisotherme erkennen, da der überhygroskopische Bereich und vor allem die Werte über 100 % mit der relativen Luftfeuchte nur schwer bis gar nicht darstellbar sind. In DELPHIN wird bei Entwässerung des Materials der Kapillardruck somit größer und erhält ein negatives Vorzeichen.

Tabelle 24 Vergleichswerte von relativer Luftfeuchte, Kapillardruck und Meter Wassersäule

relative Luftfeuchte	Kapillardruck	Meter Wassersäule
[%]	[Pa]	[mWS]
40,00	-123.966.490,95	-12.641,06
60,00	-69.110.444,82	-7.047,30
80,00	-30.189.460,69	-3.078,47
90,00	-14.254.398,69	-1.453,54
95,00	-6.939.554,77	-707,64
98,00	-2.733.257,74	-278,71
99,50	-678.155,09	-69,15
99,99	-135.29,84	-1,38
99,999999	-1,35292	-0,00014
100,00	0,00	0,00

An der Innenseite wurde das Untergeschoß Innenklima mit Temperatur und relativer Luftfeuchte angesetzt.

Grundsätzlich ist hier noch anzumerken, dass eine Porenfüllung im Übersättigungsbereich durch die sehr lange Einwirkungszeit (Baujahr 1850) erreicht werden kann. Bei kurzzeitiger Einwirkung bleibt die eingeschlossene Luft in den Poren enthalten. Durch Diffusion der Luft in das Porenwasser können bei Langzeiteinwirkungen die Poren vollständig gefüllt werden [88].

In der Schnittstelle des Mauerwerks zwischen Untergeschoß und Erdgeschoß wurden Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit und Kapillardruck ausgegeben. Der Außenputz wurde als eigene Ausgabe definiert und das Mauerwerk wurde in vier gleichmäßige Teilbereiche gegliedert. Die weitere Vorgehensweise von Ausgabe, Umrechnung und Übergabe auf das nächste Modell ist äquivalent zu jener zwischen Erdreich und Kelleraußenbereich.

Es konnte gezeigt werden, dass die Reduzierung des Modells aus dem Untergeschoß für die Übergabebereiche auf die erdberührte Wand beschränkt werden kann und der erdberührte Fußboden nicht mitmodelliert werden muss.

Bei der Analyse von Schimmelbildung bzw. Oberflächenkondensation stellte sich anhand der vorliegenden Daten dar, dass an der Innenseite der Kelleraußenwand eine Schimmelpilzbildung sowie Oberflächenkondensat auftreten können. Die Auswertung der Datenlage deckt sich auch mit den Beobachtungen im Bestand. Jedoch kann eine tatsächliche Schimmelbildung durch Lüftungsmaßnahmen unterbunden werden, wie es auch vor der Nutzung des Gebäudes für Forschungszwecke gehandhabt wurde. Dies wird in Kapitel 4.1 beschrieben.

5.8 Erdgeschoß (Teilbereich C)

5.8.1 Außenwand (1D)

In Abbildung 62 ist die umgerechnete Druckhöhe aus dem Kapillardruck der Schnittstelle im Mauerwerk zwischen dem Untergeschoß und dem Erdgeschoß dargestellt. Diese wurde als Randbedingung beim unteren Ende der Simulationen angesetzt. Die Druckhöhe ist im Innenbereich im Mittel um 20 % höher als im Außenbereich, da das Wasser nach außen hin entweicht. Wird die Druckhöhe in die relative Luftfeuchte umgerechnet, so ergeben sich Zahlenwerte von 99,9339 % bis 99,9505 %.

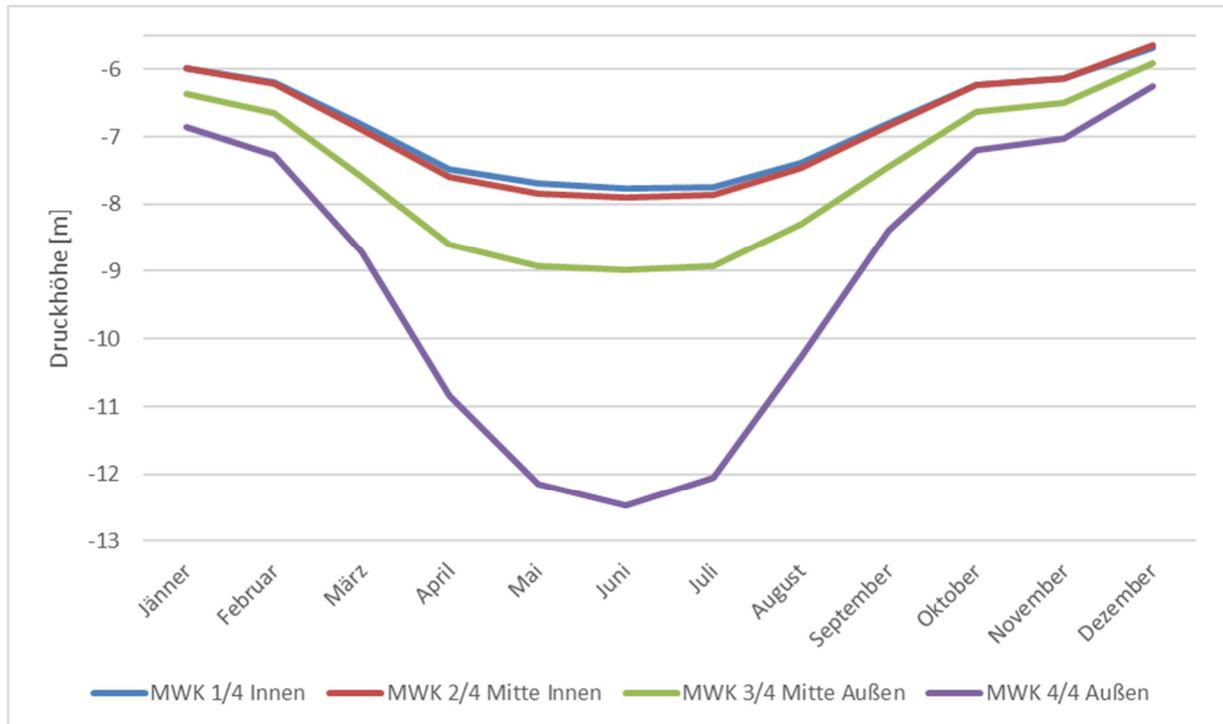


Abbildung 62 Monatsmittelwerte der Druckhöhe - Übergang UG zu EG im Mauerwerk

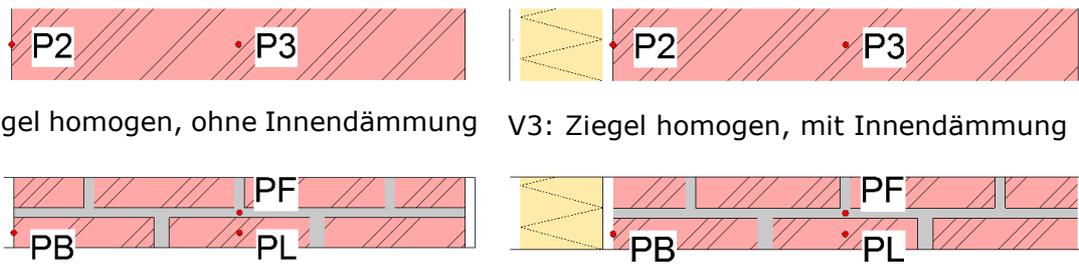
Die Modelle im Erdgeschoß wurden auch mit der Randbedingung der relativen Luftfeuchte getestet, führten jedoch zu keinen nennenswerten Ergebnissen, die mit den realen Messbedingungen übereinstimmen würden.

An der Innenseite wurde das Innenklima des Erdgeschoßes und an der Außenseite das Außenklima angesetzt, wie in Kapitel 5.1 beschrieben.

In DELPHIN ist es möglich, bei vorhandenen Flüssigleitfähigkeitsdaten der Materialparameter auch Schwerkrafteffekte einzubeziehen. Da in den verwendeten Materialdatensätzen darauf geachtet wurde, dass diese Messkurven implementiert sind, konnte eine Analyse zur Auswirkung dieses Effekts durchgeführt werden. Durch die Randbedingungen mit dem hohen Wassergehalt durch den Kapillardruck stellten sich die Differenzen nur gering dar. In den Höhenschichten von ca. 0,2 m bis 1,20 m waren die Wassergehalte um max. 1,5 % höher, wenn der Schwerkrafteffekt nicht berücksichtigt wurde. Bei Höhen über 1,20 m waren keine Differenzen zwischen den Wassergehalten der Varianten vorhanden, da ab dieser Höhe überwiegend die relative Luftfeuchte und nicht mehr die aufsteigende Feuchtigkeit maßgeblich ist.

Es stellte sich jedoch auch die Frage der Mauerwerksmodellierung. Da diese keine homogene Schicht darstellt, sondern horizontale und vertikale Mörtelfugen zwischen den Normalformatziegeln aufweist. Es wurden Variantenstudien mit und ohne Fugen für den Bestand und die Sanierungsvarianten mit Innendämmung erstellt (siehe Abbildung 63). Bei diesen Studien zur Modellierungsmöglichkeit wurde die aufsteigende Feuchtigkeit zunächst vernachlässigt. Die Ergebnisse mit Berücksichtigung der aufsteigenden Feuchtigkeit sind in Kapitel 6.1 dargestellt.

Die Vorgehensweise zur Modellierung gilt für das Erdgeschoßmauerwerk und das Gewölbe. Durch die hohe Wasserbelastung der nicht abgedichteten erdberührten Kelleraußenwand ist dies im Untergeschoß nicht maßgeblich, da die Fuge sowie die Ziegel gesättigt sind.



V1: Ziegel homogen, ohne Innendämmung

V3: Ziegel homogen, mit Innendämmung

V2: Ziegel + Fugen, ohne Innendämmung

V4: Ziegel + Fugen, mit Innendämmung

Abbildung 63 Variantenstudie zur Modellbildung des Mauerwerks [86, 87]

Für die Bestandsvarianten zeigte sich, dass keine relevanten Unterschiede für die Temperatur, relative Luftfeuchte oder den Wassergehalt an der Mauerwerksinnenseite entstanden. In der Mauerwerksmitte ergab die Modellierung mit Fugen ca. 1°C höhere Minimaltemperaturen in der Fuge und im Ziegel und einen ca. 4,4 % höheren Wassergehalt in der Fuge gegenüber der homogenen Mauerwerksmodellierung. Für die Sanierungsvarianten waren die Unterschiede noch geringer, da die Innendämmungen die Verhältnisse im Mauerwerkinneren angleichen. Lediglich in der Fuge wurde ein ca. 4,7 % höherer Wassergehalt festgestellt. Die Erkenntnisse dieser Dissertation erweitern die Erkenntnisse von [89], worin bereits darauf hingewiesen wurde, dass bei aufsteigender Feuchtigkeit die Ergebnisse abweichen könnten und die Mörtelfugen Einfluss haben könnten. Ohne zusätzliche Feuchtequelle ergab sich kein nennenswerter Einfluss der Ergebnisse bei Modellierung ohne Fugen.

Es wurden auch Variantenanalysen mit der relativen Luftfeuchte als Randbedingung durchgeführt, jedoch lieferten diese Simulationen keine Ergebnisse, die mit den realen Messungen auch nur ansatzweise übereinstimmten, da der Feuchtegehalt in den Simulationen viel zu gering war. Die Feuchtebelastung durch eine Randbedingung mit relativer Luftfeuchte baut sich im Material viel zu schnell ab und erzeugt somit keine mit der Realität vergleichbaren Bedingungen, wie es mit dem angesetzten Wasserdruck der Fall ist.

Die Ergebnisse aus dem 1D Modell mit horizontalen Mörtelfugen und der ermittelten Randbedingung für den Feuchtigkeitsgehalt aus dem Untergeschoß sind in Kapitel 6.1 dargestellt.

Laut WTA 6-5 [13] sollten bei fehlenden detaillierteren Analysen der Materialeigenschaften, in Hinsicht auf das thermische und hygrische Verhalten, rechnerische Sensitivitätsanalysen bezüglich der wesentlichen Materialparameter durchgeführt werden [13]. Da nicht bei allen Datensätzen sämtliche Parameter gemessen wurden, wurden diesbezüglich mehrere Analysen durchgeführt (siehe Kapitel 5.8.2 und 6).

Vorarbeiten mit zusätzlichen Variantenanalysen finden sich in [86], [87], [77] und [78].

5.8.2 Gewölbe und Fußbodenaufbau (1D)

Das Gewölbe konnte in den Modellen nicht als Rundung dargestellt werden und wurde auf ein vereinfachtes horizontales Modell umgerechnet. Die Schüttungshöhe im Fußbodenaufbau schwankt zwischen ca. 9 cm im Gewölbescheitel bis 49 cm am Gewölbeauflager an der Außenwandinnenseite. Von der sanierten Außenwandinnenoberfläche aus gemessen wurden 1,50 m des Fußbodenaufbaus

modelliert und für diesen Bereich ergibt sich eine vereinfachte Schüttungshöhe von 32 cm (siehe Abbildung 64).

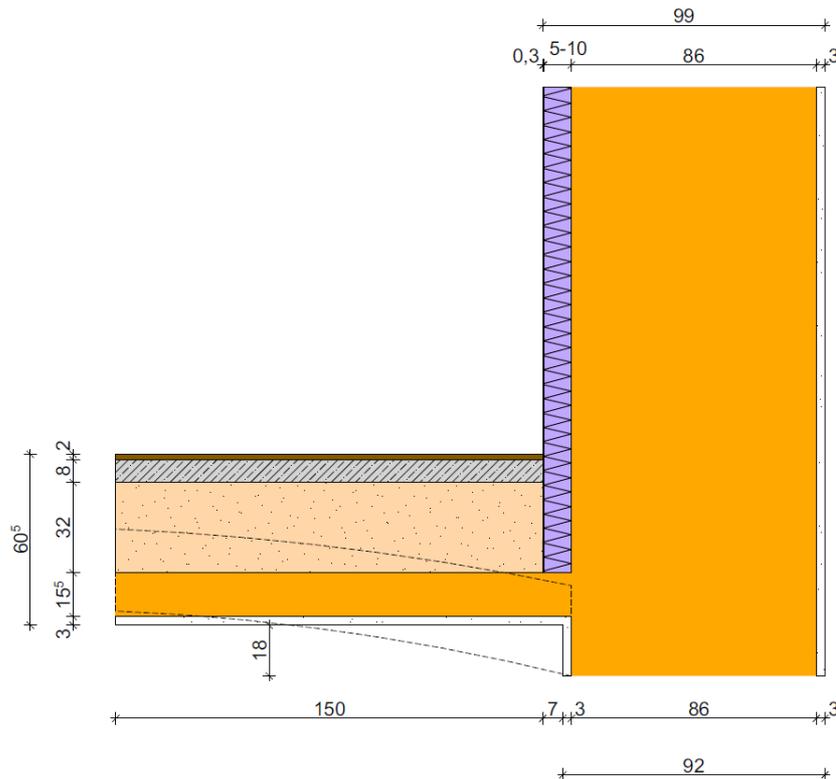


Abbildung 64 Vereinfachte Modellbildung des Gewölbes samt angepasstem Fußbodenaufbau

Für das Schüttungsmaterial stand in den Datenbanken kein vergleichbarer Datensatz zur Verfügung. Somit wurde eine Sensitivitätsanalyse mit verschiedenen Materialien durchgeführt und zusätzlich wurden bestehende Forschungsarbeiten [68] verglichen. Als Ergebnis der Variantenstudien bleibt festzuhalten, dass die ungebundene, wasserunempfindliche Schüttung einen geringen Einfluss auf die maßgeblichen Bereiche des Sockelanschlusses hat [77]. In den horizontalen Schichten des Fußbodenaufbaus wurde keine Innendämmung angebracht. Einerseits wurde im Bereich der Aerogel Innendämmung an der Außenwand keine Veränderung des Bauteilaufbaus des Fußbodens durchgeführt. Und andererseits wurde bei der Zelluloseinnendämmung eine Dämmung an der Gewölbeunterseite angebracht. Die Materialien der Schüttung (Hochofenschlacke) und des Estrichs sind vollkommen wasserunempfindlich. Der Einfluss des Wassergehalts im Ziegel und in der Dämmung aus dem Sockelbereich werden erfasst. Würde sich Flüssigwasser im Fußbodenaufbau bilden, dann kann auch das durch die Messung im Ziegelgewölbe, in der Dämmung bzw. durch die Sensoren in der Kante des Fußbodenaufbaus an der Mauerwerksinnenseite erfasst werden. Damit können Rückschlüsse auf die Genauigkeit der Modellierung gemacht werden. Der Fußbodenbelag aus Holz wird in den 2D Simulationen in der Innenkante berücksichtigt und die Gefahr zur Bildung von Oberflächenkondensat bzw. Schimmel werden simuliert und ausgewertet. Im Bestand ist dieser Bereich auch einsehbar und somit kontrollierbar.

6 Simulationsanalysen und Ergebnisse

Grundsätzlich ist zu sagen, dass durch den hohen Wassergehalt in der Konstruktion sehr viele Parameter und Randbedingungen nebensächlich werden. Dies zeigten bereits die beschriebenen Sensitivitätsanalysen der vorangegangenen Kapitel und das spiegelt sich auch in den hier dargestellten Ergebnissen und Analysen wider.

Auch wurde bei den Sanierungsvarianten mittels Innendämmung im Erdgeschoß in keiner Variante eine Gefährdung durch Schimmel oder Oberflächenkondensat berechnet wurde. Der Schimmelindex wurde mittels Temperatur und relativer Luftfeuchte nach VTT-Modell [29] in DELPHIN bzw. nach dem Isoplethen Modell in WUFI [30] berechnet. Die Ergebnisse decken sich auch mit den Beobachtungen vor Ort, da hier weder Schimmel noch Kondensat entstanden sind. Jedoch ist die Vorhersage von Schimmelbildung auch vom Nährboden und von den Innenklimabedingungen der Nutzer abhängig. Besonders das Lüftungsverhalten der Benutzer spielt hier eine große Rolle, da es maßgeblich das Innenraumklima verändert.

6.1 Homogene bzw. inhomogene Mauerwerksmodellierung

Mit Hilfe der ermittelten Randbedingung für den Feuchtigkeitsgehalt aus dem Untergeschoß (aufsteigende Feuchte) konnte eine Analyse in Hinsicht auf die Modellierung des Mauerwerks mit und ohne horizontale Mörtelfugen durchgeführt werden. Die relative Luftfeuchtigkeit liegt bei allen Varianten dauerhaft bei 100 %. Die Temperatur liegt bei der Modellierung ohne Fugen im Mittel bei 14,3 °C und mit Fugen bei 16,4 °C (Abweichung um ca. 13 %). Der Gesamtwassergehalt weicht in allen Bereichen gleichmäßig um ca. 15 % ab. Für das Mauerwerk liegt der Wassergehalt beim homogenen Modell bei ca. 169 kg/m³ und bei der inhomogenen Variante bei ca. 200 kg/m³ (Abweichung ca. 15,6 %). Die temperatur- und feuchtabhängige Wärmeleitfähigkeit ergibt ohne Fugenmodellierung 0,895 W/mK und mit Fugen 0,917 W/mK was einer Abweichung von nur 2,4 % entspricht. Betrachtet man diese Werte in Relation zur trockenen Wärmeleitfähigkeit von 0,576 W/mK, dann ergibt sich eine mittlere Differenz von 57 %. Für eine homogene Mauerwerksmodellierung ergibt sich mit Berücksichtigung der temperatur- und feuchtabhängigen Wärmeleitfähigkeit ein U-Wert von 0,831 W/m²K (+ 44 %) und für die inhomogene Modellierung 0,847 W/m²K (+ 47 %) gegenüber dem Ausgangswert von 0,576 W/m²K. Die Modellabweichung zueinander beträgt somit weniger als 2 %.

Es ist jedoch anzumerken, dass dieser U-Wert ohne Berücksichtigung des Einflusses des Fußbodenaufbaus ermittelt wurde und es sich um einen Mittelwert für eine Höhe von ca. 1,50 m handelt. Bei einer Raumhöhe von 3,30 m ist somit der Einfluss geringer. Eine detaillierte Aufbereitung samt einem mittleren U-Wert für die gesamte Außenwand aus dem Erdgeschoß ist in Kapitel 6.5 dargestellt.

Die Modellierung mit Mörtelfugen ist sehr aufwendig und erfordert enorme Rechenkapazitäten. Die Ergebnisse für die Wassergehalte und die Temperaturen im Mauerwerk unterscheiden sich im Bestandsmauerwerk durchaus maßgeblich. Bei Anbringung eines Innendämmsystems wird die Temperatur jedoch relativiert. Die temperatur- und feuchteabhängigen Wärmeleitfähigkeiten, die für die Auswertungen maßgeblich sind, unterscheiden sich in der Variantenbildung nur sehr gering. Somit kann bei den Schlussfolgerungen aus Kapitel 5.7 angeschlossen werden und eine homogene Modellierung erfolgen.

6.2 Klimavarianten (1D)

Die Analysen in Hinsicht auf das Außen- und Innenklima wurden anhand von 1D Aufbauten durchgeführt. Der zusätzliche Einfluss der aufsteigenden Feuchtigkeit aus dem Untergeschoß wurde bei dieser Studie nicht angesetzt, da die Auswirkungen der viel niedrigeren, relativen Luftfeuchten und des Schlagregens andernfalls nicht so deutlich zum Vorschein kämen. In Tabelle 25 sind die untersuchten Varianten samt Randbedingungen und Gesamtwassergehalt, aufgeteilt auf die zwei Varianten mit Aerogel und Zellulose sowie der Bestand (in grau) ohne Innendämmsystem, dargestellt. Die Messklimadatensätze vom Testgebäude wurden in beide Programme implementiert und in der Simulation angewendet. Das Extremwertklima ist in Grün dargestellt und das Mittelwertklima in Rot.

Tabelle 25 Klimavarianten samt Randbedingungen und Gesamtwassergehalt

Software	Außenklima	Innenklima	Gesamtwassergehalt [kg/m ³]	
			ID Aerogel	ID Zellulose
DELPHIN	Bremerhaven	WTA 6.2 (+ 5 %)	12,33	12,81
	Graz Messung Extremwerte	Messung Extremwerte	6,82	6,82
	Graz Messung Mittelwerte	Messung Mittelwerte	5,59	5,71
	Graz ZAMG Extremwerte	Messung Extremwerte	6,91	6,99
	Graz ZAMG Mittelwerte	Messung Mittelwerte	5,03	5,20
	Mühldorf am Inn	WTA 6.2 (+ 5 %)	9,77	10,04
	München	WTA 6.2 (+ 5 %)	21,42	21,78
	Potsdam	WTA 6.2 (+ 5 %)	7,87	7,98
	Graz Messung Extremwerte	Messung Extremwerte	Bestand 5,34	
WUFI	Graz Messung Extremwerte	Messung Extremwerte	16,49	14,95
	Graz Messung Mittelwerte	Messung Mittelwerte	13,27	12,16
	Graz aus WUFI	WTA 6.2 (+ 5 %)	16,28	15,39
	Holzkirchen	WTA 6.2 (+ 5 %)	17,26	15,95
	Graz Messung Extremwerte	Messung Extremwerte	Bestand 14,14	
Δ Diff.	Graz Messung Extremwerte	Messung Extremwerte	141,9 %	119,2 %
	Graz Messung Mittelwerte	Messung Mittelwerte	137,4 %	112,9 %
	Graz Messung Extremwerte	Messung Extremwerte	164,8 %	

Vergleicht man die Varianten in DELPHIN so lässt sich erkennen, dass das Grazer Klima den niedrigsten Gesamtwassergehalt verursacht und somit auf ein mildes Klima bzw. eine geringere Schlagregengruppe hinweist. Weiter hat lediglich die Variante mit der Aerogel Innendämmung einen geringeren Gesamtwassergehalt als jene der Bestandskonstruktion. Alle anderen Varianten verursachen einen Anstieg des Wassergehaltes. Verglichen mit den Varianten aus WUFI sind die Gesamtwassergehalte viel niedriger, obwohl so weit wie möglich die gleichen Materialparameter und Randbedingungen verwendet wurden. Das in

WUFI eingespeicherte Grazer Klima bringt ähnliche Ergebnisse wie das gemessene bzw. jenes der ZAMG Daten.

In Tabelle 26 sind weitere Ergebnisse maßgeblicher Kennwerte der Simulationsvarianten als Mittelwerte der Varianten mit Aerogel und Zellulose dargestellt. Ausgenommen ist die Wärmeleitfähigkeit der Dämmschicht, welche separat für den jeweiligen Dämmstoff dargestellt wurde. Im Gegensatz zum Gesamtwassergehalt stimmen die Wassergehalte in den Schichten der Innendämmung zwischen den beiden Softwareprodukten gut überein. Die Wassergehalte des Mauerwerks haben für die Sanierungsvarianten eine Abweichung bis zu 12,4 % und im Bestand sogar bis zu 22,7 %. Dadurch besteht auch ein großer Unterschied bei der Wärmeleitfähigkeit der Bestandsvariante. Die restlichen Ergebnisse der Temperaturen, relativen Luftfeuchten und der Wärmeleitfähigkeiten stimmen gut überein.

Tabelle 26 Jahresmittelwerte maßgeblicher Kennwerte der Klimavariantsimulationen

Software	Außenklima	Schicht 2						Schicht 3				
		Dämmung						Mauerwerk				
		Ww	λ-A	λ-Z	T	φ	Sättig.	Ww	λ	T	φ	Sättig.
	[kg/m ³]	[W/mK]	[W/mK]	[°C]	[%]	[%]	[kg/m ³]	[W/mK]	[°C]	[%]	[%]	
DELPHIN	Bremerhaven	8,67	0,029	0,073	18,9	69,20	1,27	26,76	0,619	13,39	95,08	8,26
	Graz M. E.	8,39	0,030	0,072	20,7	66,04	1,28	14,38	0,600	16,2	79,88	4,44
	Graz M. M.	7,15	0,029	0,072	19,3	61,87	1,06	12,03	0,600	14,3	75,85	3,71
	Graz ZAMG E.	7,93	0,030	0,072	20,9	65,29	1,20	14,68	0,599	16,7	81,25	4,53
	Graz ZAMG M.	7,02	0,029	0,072	19,5	61,12	1,04	10,83	0,597	14,8	74,18	3,34
	Mühdorf	8,15	0,029	0,073	17,6	67,21	1,21	20,85	0,615	12,0	92,03	6,43
	München	9,37	0,029	0,074	17,2	70,55	1,38	46,95	0,639	10,9	97,65	14,49
	Potsdam	7,79	0,029	0,072	18,2	66,09	1,16	16,76	0,608	12,9	86,50	5,17
WUFI	Bestand GME	-	-	-	-	-	-	11,64	0,592	18,1	74,90	3,59
	Graz M. E.	7,91	0,030	0,072	20,7	66,14	1,18	16,17	0,596	16,2	83,65	4,99
	Graz M. M.	7,14	0,029	0,072	19,3	61,74	1,06	13,17	0,598	14,2	78,57	4,07
	Graz WUFI	8,13	0,029	0,073	18,1	67,63	1,21	16,40	0,606	13,0	84,19	5,06
	Holzkirchen	8,16	0,029	0,073	16,8	67,17	1,21	17,18	0,613	10,7	85,24	5,30
Δ (Diff.)	Bestand GME	-	-	-	-	-	-	14,28	0,664	18,0	79,71	4,41
	Graz M. E.	5,7%	2,1%	0,1%	0,3%	0,2%	7,6%	12,4%	0,5%	0,0%	4,7%	12,4%
	Graz M. M.	0,1%	0,1%	0,0%	0,2%	0,2%	0,4%	9,5%	0,2%	0,2%	3,6%	9,5%
	Bestand GME	-	-	-	-	-	-	22,7%	12,1%	0,6%	6,4%	22,7%

In Abbildung 65 ist die Wärmeleitfähigkeit der Zellulose im Jahresverlauf mit Anwendung der unterschiedlichen Klimadaten als Randbedingung in DELPHIN dargestellt. Ohne zusätzlichen Einfluss durch die aufsteigende Feuchtigkeit schwankt die Wärmeleitfähigkeit der Zellulose von 0,072 W/mK bis 0,074 W/mK. Das ergibt eine Erhöhung von 7 % bis 10 %, je nach angesetztem Klimadatensatz. Bei den Grazer Klimadatensätzen steigt die zugehörige Wärmeleitfähigkeit besonders in den Wintermonaten in denen die guten Dämmeigenschaften besonders notwendig wären. Der Datensatz für das Münchner Klima hingegen erhöht die Wärmeleitfähigkeit in den wärmeren Monaten von April bis September, aber durch diesen Datensatz ist das Niveau der Wärmeleitfähigkeit ganzjährig nach oben gesetzt.

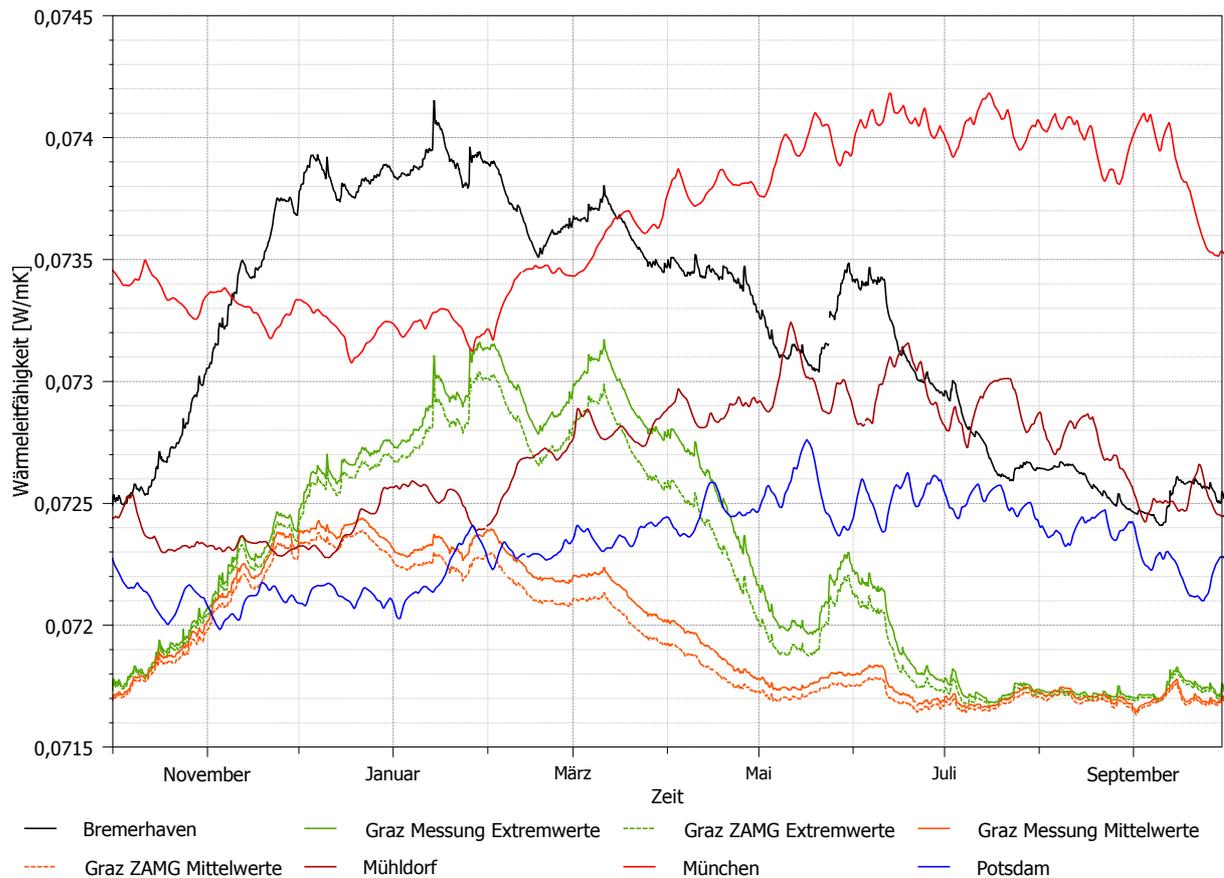


Abbildung 65 Wärmeleitfähigkeit der Zellulose im Jahresverlauf mit unterschiedlichen Klimadaten in DELPHIN

Da die Ergebnisse des gemessenen Grazer Klimas, des ZAMG Datensatzes und auch des implementierten Grazer WUFI Klimadatensatzes sehr ähnlich sind, kann davon ausgegangen werden, dass die Klimadaten korrekt gemessen und implementiert wurden. Die Vergleichbarkeit der Klimadatensätze durch die Einordnung auf Grund des Niederschlages nach DIN 4108-3 [22] bzw. WTA 6-5 [13] kann nicht bestätigt werden. Das vorhandene milde Klima liefert trotz des hohen Niederschlages hohe Temperaturen und eine geringe Feuchtigkeit im Bauteil.

Die Bemessungswerte der Wärmeleitfähigkeit aus der ÖNORM B 8110-7 [90] liegen für den Normalformatziegel samt Mauermörtel im Bereich von 0,620 bis 0,690 W/mK, für die Aufsprühzellulose bei 0,062 W/mK und Werte für den Aerogel Dämmputz sind nicht vorhanden. Vergleicht man die Ergebnisse der Wärmeleitfähigkeitsentwicklung aus der Abbildung 65 mit dem Bemessungswert der ÖNORM B 8110-7 oder mit der gemessenen Wärmeleitfähigkeit ($\lambda = 0,067 \text{ W/mK}$), dann werden diese Werte ganzjährig überschritten. Die Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von Feuchtigkeit und Temperatur ist somit maßgeblich für die wärmetechnischen Eigenschaften von Bauteilen.

6.3 Ziegelvarianten (1D)

In weiterer Folge wurden die drei Datensätze, die am besten mit den Materialparametern der Messungen der Ziegel übereinstimmen und in beiden Programmen implementiert sind, analysiert. Wie in Kapitel 5.3.1 beschrieben, sollten diese eigentlich vollkommen gleich sein, da sie aus demselben Forschungsprojekt stammen und in der öffentlich zugänglichen Datenbank „Materialdatensammlung für die energetische Altbausanierung“ (MASEA-ENSAN) abgespeichert sind. Als Klima wurde das gemessene Grazer Klima mit den jahreszyklischen Extremwerten herangezogen, da das gemessene Grazer Mittelwertklima im Vergleich zu anderen Klimadatensätzen (siehe 6.2) als äußerst mild eingestuft werden kann und somit die Simulationsergebnisse zu weniger aussagekräftigen Analysen führen würden. Es wurde auch hier kein zusätzlicher Einfluss durch aufsteigende Feuchtigkeit eingegeben, damit die Ergebnisse nur in Hinsicht auf die Auswirkung der unterschiedlichen Materialparameter analysiert werden können. Bei zu hohen Feuchtelasten als Randbedingung beliefen sich beispielsweise die relativen Luftfeuchten aller Varianten auf 100 % und die Erkenntnisse für ein unbelastetes Mauerwerk würden verloren gehen.

In der Tabelle 27 und Tabelle 28 werden die Jahresmittelwerte von maßgeblichen Kennwerten der Ziegelvariantensimulationen für die Variante mittels Aerogel bzw. Zellulose Innendämmung dargestellt. Außerdem sind die Differenzen der Ergebnisse zwischen den beiden Programmen dargestellt, um einen direkten Vergleich der Abweichungen zu erhalten. Die Gesamtwassergehalte weichen wie bei den Klimavarianten in Kapitel 6.2 stark voneinander ab. Der Wassergehalt in den einzelnen Schichten hat in den meisten Fällen eine deutlich bessere Übereinstimmung, ebenso wie die Temperaturen, die relativen Luftfeuchten und auch die Wärmeleitfähigkeiten. Für beide Dämmvarianten zeigt der Datensatz „ZE“ Abweichungen bis zu 17,1 % bei der Wärmeleitfähigkeit.

Tabelle 27 Jahresmittelwerte maßgeblicher Kennwerte der Ziegelvariantensimulationen mit Aerogel

Software	Ziegeldatensatz	Ww Gesamt [kg/m³]	Schicht 2 Aerogel (5 cm)					Schicht 3 Mauerwerk (86 cm)				
			Ww	λ	T	φ	Sättig.	Ww	λ	T	φ	Sättig.
			[kg/m³]	[W/mK]	[°C]	[%]	[%]	[kg/m³]	[W/mK]	[°C]	[%]	[%]
DELPHIN	Altbauziegel Dresden ZE	2,57	7,68	0,030	20,6	66,66	1,46	4,84	0,577	16,2	80,47	1,36
	Altbauziegel Dresden ZK	6,91	8,31	0,031	20,4	67,38	1,58	14,91	0,665	16,1	80,69	4,60
	Altbauziegel Dresden ZM	2,84	7,71	0,030	20,5	67,16	1,47	5,47	0,645	16,1	81,44	1,61
	Ziegel Messdaten	6,82	7,61	0,030	20,6	66,89	1,45	14,73	0,600	16,2	80,41	4,54
WUFI	Vollziegel ZE	5,31	8,24	0,030	19,9	69,64	1,57	6,73	0,668	14,4	80,93	2,08
	Vollziegel ZK	17,08	7,60	0,030	20,3	67,99	1,44	4,87	0,676	15,9	85,60	1,50
	Vollziegel ZM	7,20	6,57	0,030	20,7	66,40	1,25	17,47	0,681	16,2	82,84	5,39
	Ziegel Messdaten	16,49	6,47	0,030	20,6	66,53	1,23	16,89	0,598	16,1	84,79	5,21
Δ (Diff.)	Ziegel Daten ZE	107,1%	7,4%	1,6%	3,8%	4,5%	7,4%	39,0%	15,8%	11,5%	0,6%	53,2%
	Ziegel Daten ZK	147,1%	8,6%	2,8%	0,9%	0,9%	8,6%	67,3%	1,7%	1,3%	6,1%	67,3%
	Ziegel Daten ZM	154,0%	14,8%	2,2%	0,9%	1,1%	14,8%	219,6%	5,6%	0,4%	1,7%	234,3%
	Ziegel Messdaten	141,9%	15,0%	2,1%	0,3%	0,5%	15,0%	14,7%	0,4%	0,2%	5,4%	14,7%

Die Ergebnisse der Variante mit Zellulosedämmung zeigen, dass die Implementierung des Datensatzes von DELPHIN in WUFI gut funktioniert. Gleiches kann über den Klimadatensatz gesagt werden, da die Temperaturen und relativen Luftfeuchten des Mauerwerks andernfalls stark differieren würden. Weiters wurden die Oberflächentemperaturen und relativen Luftfeuchten an der Außenseite (Mittelwerte: 13,9 °C und 80 %) sowie auf der

Innenseite (Mittelwerte: 22,9 °C und 57 %) verglichen. Die Abweichungen betragen weniger als 1 %.

Tabelle 28 Jahresmittelwerte maßgeblicher Kennwerte der Ziegelvariantensimulationen mit Zellulose

Software	Ziegeldatensatz	Ww Gesamt [kg/m³]	Schicht 2 Zellulose (10 cm)					Schicht 3 Mauerwerk (86 cm)				
			Ww	λ	T	φ	Sättig.	Ww	λ	T	φ	Sättig.
			[kg/m³]	[W/mK]	[°C]	[%]	[%]	[kg/m³]	[W/mK]	[°C]	[%]	[%]
DELPHIN	Altbauziegel Dresden ZE	2,82	9,20	0,072	20,8	65,00	1,11	4,75	0,577	16,4	78,54	1,33
	Altbauziegel Dresden ZK	6,88	9,27	0,072	20,6	65,58	1,12	14,16	0,664	16,2	79,50	4,37
	Altbauziegel Dresden ZM	2,83	9,41	0,072	20,7	65,62	1,14	4,73	0,645	16,3	79,27	1,40
	Ziegel Messdaten	6,82	9,16	0,072	20,7	65,19	1,11	14,04	0,599	16,3	79,35	4,33
WUFI	Vollziegel ZE	5,74	9,27	0,072	20,8	65,18	1,12	4,84	0,675	16,3	80,05	1,49
	Vollziegel ZK	15,00	9,61	0,073	20,5	66,65	1,16	15,47	0,679	16,1	82,60	4,78
	Vollziegel ZM	6,32	9,25	0,072	20,9	64,93	1,12	5,52	0,674	16,4	79,98	1,70
	Ziegel Messdaten	14,95	9,35	0,072	20,8	65,75	1,13	15,45	0,595	16,3	82,52	4,77
Δ (Diff.)	Ziegeldaten ZE	103,2%	0,7%	0,0%	0,2%	0,3%	0,7%	1,9%	17,1%	0,3%	1,9%	12,3%
	Ziegeldaten ZK	118,1%	3,7%	0,3%	0,9%	1,6%	3,7%	9,2%	2,2%	1,0%	3,9%	9,2%
	Ziegeldaten ZM	123,8%	1,6%	0,1%	0,9%	1,1%	1,6%	16,6%	4,6%	0,7%	0,9%	22,0%
	Ziegel Messdaten	119,2%	2,0%	0,1%	0,3%	0,9%	2,0%	10,0%	0,7%	0,2%	4,0%	10,0%

Zusätzlich zu jenen Datensätzen, deren Parameter nicht an die Messdaten angepasst wurden, sind die Simulationsergebnisse enthalten, welche mit den Messdaten des Erdgeschoß-Ziegels erzielt wurden. An den Differenzen kann man erkennen, dass die Varianten mit den gemessenen Parametern zwischen den Simulationen mit den unveränderten Daten aus DELPHIN und WUFI liegen.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass trotz der Auswahl der am besten geeigneten Datensätze, welche durch Messdaten eruiert wurden und die detaillierte und zeitaufwendige Implementierung in zwei verschiedene Programme, die Abweichungen in einigen Bereichen sehr groß sind. Das betrifft einerseits die Abweichungen der Ergebnisse innerhalb eines Programms mit plausibel gewählten Datensätzen aus den Messungen. Andererseits sind dies auch die Differenzen der zwei verwendeten Programme zueinander, bei den gleichen Datensätzen der jeweiligen Datenbanken.

Die Erkenntnisse decken sich teilweise mit einer vorangegangenen Forschung, bei der die Ergebnisse für die Parameter Temperatur, relative Luftfeuchte und den Wassergehalt von drei Materialien gemessen und anschließend mit DELPHIN (Version 5) und WUFI Pro 4.2 vergleichende, eindimensionale Simulationen durchgeführt wurden. Die Ergebnisse der Temperaturen und relativen Luftfeuchten passten bei der Untersuchung sehr gut. Der Wassergehalt der Simulation in DELPHIN war jedoch maßgeblich höher als bei WUFI, und beide Simulationsprogramme zeigten höhere Gesamtwassergehalte an, als die Messung ergab [91].

Die Differenzen wurden auf die Flüssigkeitstransportformeln zurückgeführt, da bei DELPHIN eine zusätzliche Gravitationskomponente enthalten ist, welche WUFI nicht implementiert hat (siehe Formel 3) [92].

Da in der gängigen Praxis meist nur wenige Parameter tatsächlich gemessen werden, ist die Varianz der Ergebnisse sehr hoch. Es bleibt noch anzumerken, dass die hier dargestellten Ergebnisse noch nicht in Relation zu den realen Messergebnissen gestellt wurden. Dies erfolgt in Kapitel 6.4. Wie in Kapitel 4.5 dargestellt, unterschieden sich die

drei Ziegel des Untergeschoß-, des Erdgeschoß- und des Gewölbemauerwerks maßgeblich. Würden also in der Praxis beispielsweise die Parameter des Ziegels von nur einem Bereich gemessen werden, dann wäre die Wahrscheinlichkeit, dass die Auswahl dieses Datensatzes zu maßgeblich falschen Ergebnissen führt, sehr hoch.

6.4 Vergleich Messung und Simulation (1D und 2D)

Mit Hilfe der Festlegungen und Erkenntnisse aus den vorangegangenen Kapiteln konnten die Simulationen für die maßgeblichen Bereiche des Erdgeschoßes durchgeführt werden.

Durch das wechselnde Klima alternieren die Temperaturen und relativen Luftfeuchten ohnehin von Jahr zu Jahr. Für die Interpretationen der weiteren Simulationen ist hier daher die Plausibilität und die Qualität der Modellierung zu prüfen. In dieser Dissertation wird diese Überprüfung aber nicht nur durch den Vergleich der Daten von Messung zu Simulation gemacht, sondern kann auch teilweise durch die Gegenüberstellung der Ergebnisse aus den beiden Simulationsprogrammen erfolgen. Es ist zu bedenken, dass das Bestandmauerwerk starke Inhomogenität in Hinsicht auf die Materialparameter und Besonderheiten wie zugemauerte Fenster oder Vor- und Rücksprünge im Außenbereich durch Gesimse bzw. den Einfluss von Kellerfenstern hat. Somit zeigen auch die Messergebnisse von zwei nebeneinander eingebauten Sensoren oft Abweichungen. Weiters ergeben sich durch die zweidimensionalen Einflüsse viele unterschiedliche Bereiche und es sollen hier nur einzelne ausgewählte Ergebnisse dargestellt werden.

Die Simulationsergebnisse sind in strichlierten und die Messergebnisse in durchgezogenen Kurven dargestellt. Im unteren Bereich der Diagramme sind die Temperaturen und darüber die relativen Luftfeuchten eingefügt (siehe Abbildung 67 bis Abbildung 73).

Wie in Kapitel 4.3 beschrieben wurde für alle Sensoren ein zusätzlicher Sicherungssensor verbaut um etwaigen Datenverlusten bei Sensorausfällen vorzubeugen. Wenn die Messergebnisse der beiden gleichwertigen Sensoren sich maßgeblich unterscheiden, dann werden diese gesondert in den Diagrammen dargestellt. Sie erhalten zusätzlich zur Nummer der Bereichsbezeichnung den Buchstaben „a“ bzw. „b“.

Um die Auswertungen übersichtlicher darstellen zu können, ist in Abbildung 66 eine vereinfachte Skizze der Einbausituation der Sensoren samt Bezeichnung des Bereiches abgebildet.

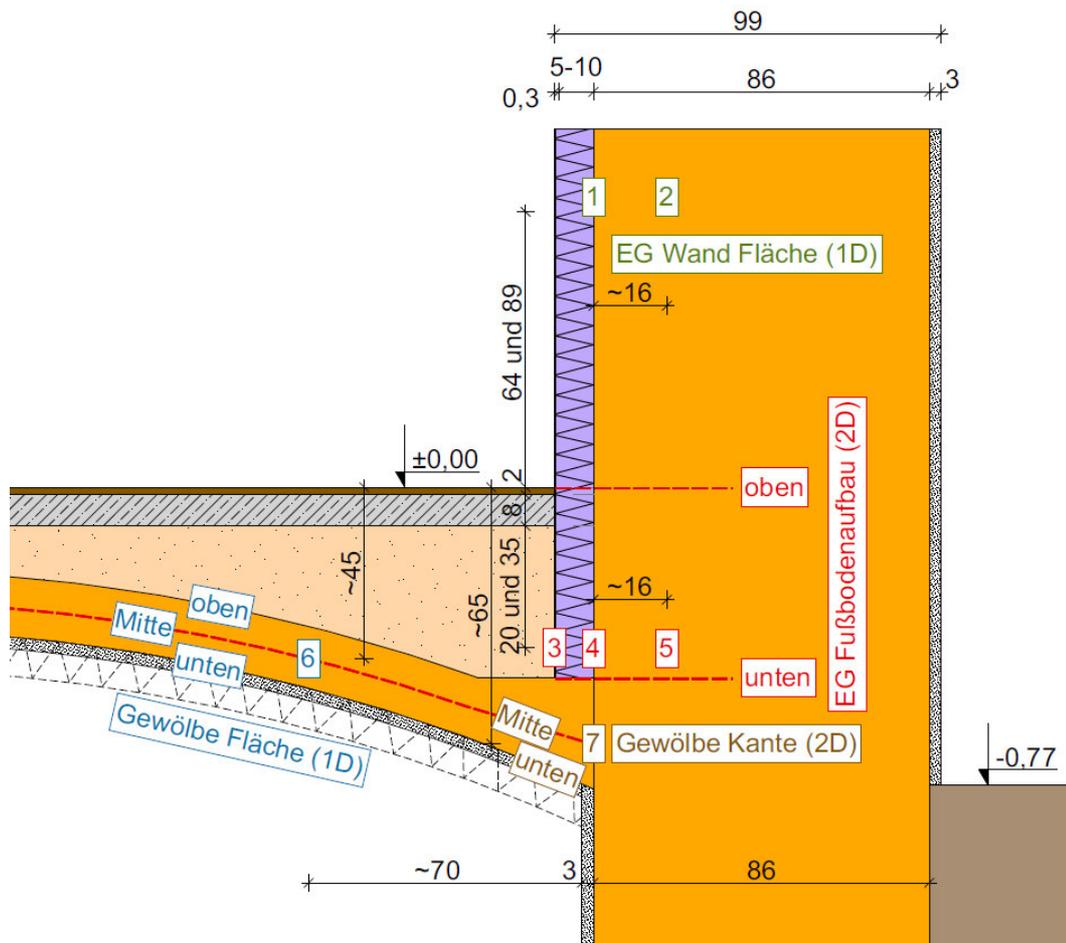


Abbildung 66 Übersicht der Sensorenpositionen

6.4.1 EG Wand Fläche (1D Bereich)

Die Temperatur im Bereich von ca. 64 cm bis 89 cm über der fertigen Fußbodenoberkante, in dem die Sensoren für den 1D Bereich verbaut wurden, ist für 1 und 2 sehr ähnlich. In Abbildung 67 wurde daher nur eine Messreihe und ein Ergebnis der Simulation dargestellt. Die Ergebnisse zwischen Simulation und Messung stimmen besonders in den kalten Monaten sehr gut überein.

Die Sensoren zeigen nach der Einbauphase eine relative Luftfeuchte von 100 % auf Grund der Einbaufeuchte des Innendämmsystems. In Abbildung 67 kann an den Messergebnissen abgelesen werden, dass eine Austrocknung erfolgt. Zum Vergleich wurde daher die Simulationskurve für den eingeschwungenen Zustand in der Ebene zwischen Innendämmung und Mauerwerk (Bereich 1) eingefügt. Hier kann man erkennen, dass sich die Messkurve bereits der niedrigeren Luftfeuchte der Simulation annähert. Die Auswertung der relativen Luftfeuchte im Mauerwerk (Bereich 2) zeigt ein ähnliches, aber abgeschwächtes Verhalten. Die Austrocknungsphase setzt in der Ebene 2 somit später ein. Um in weiterer Folge Aussagen zur Übereinstimmung des Austrocknungsverhaltens von Messung und Simulation machen zu können, muss für die Aerogel Innendämmung noch die künftige Entwicklung abgewartet werden, da die Baufeuchtigkeit zum momentanen Zeitpunkt noch großen Einfluss zeigt.

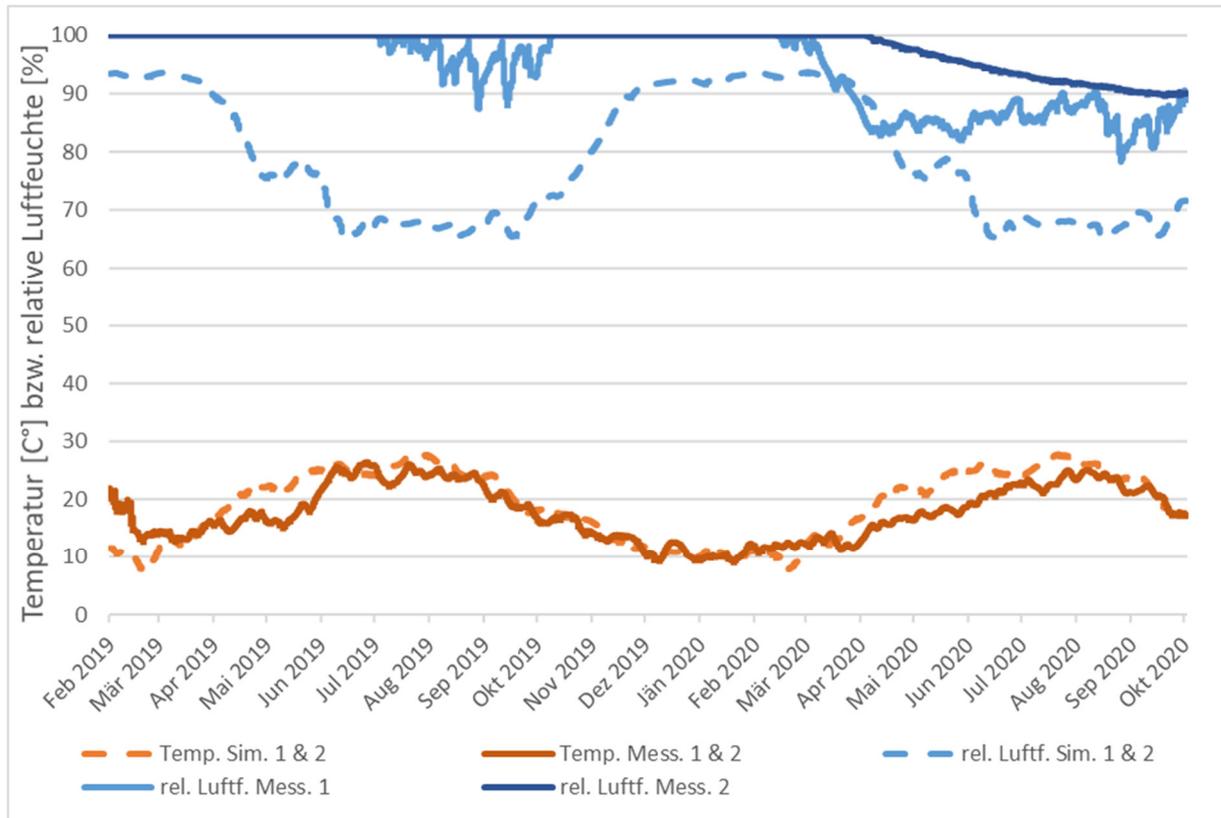


Abbildung 67 Variante Aerogel EG Fläche (1D Bereich)

In Abbildung 68 sind die Verläufe der Zellulose Variante der Simulationen und Messungen von Temperatur und relativer Luftfeuchte dargestellt. Im Gegensatz zum Aerogel sind die Werte der relativen Luftfeuchte der Zellulose wesentlich geringer. In 1 und 2 erfolgen noch Austrocknungsvorgänge, aber es lässt sich bereits erkennen, dass sich die Verläufe der relativen Luftfeuchtigkeit den Simulationsergebnissen angleichen.

Die Temperaturen sind ähnlich wie bei der Variante mit Aerogel und weisen gute Übereinstimmungen zwischen Simulation und Messung auf.

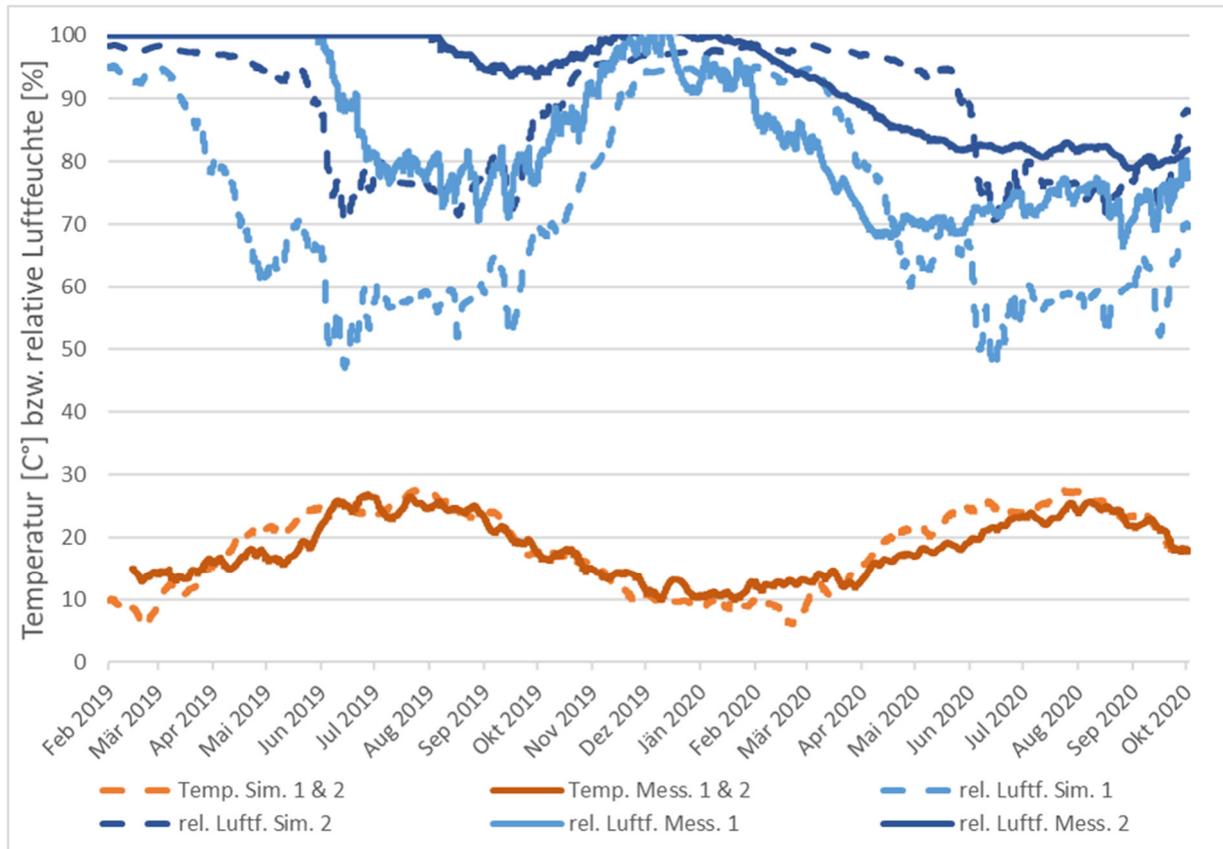


Abbildung 68 Variante Zellulose EG Fläche (1D Bereich)

6.4.2 EG Fußbodenaufbau (2D Bereich)

Im Kantenbereich des Fußbodenaufbaus der Innendämmung spiegelt sich ein breiter, kritischer Bereich von der Fußbodenoberkante bis zur Gewölbeoberkante wider. In Abbildung 69 wurden einerseits die Grenzen der Simulationsergebnisse für den gesamten Bereich des Fußbodenaufbaus (Fußbodenoberkante bis Gewölbeoberkante) in 3 auf der warmen Seite der Aerogel Innendämmung und andererseits in 4 zwischen Innendämmung und Mauerwerk dargestellt. Die Messergebnisse verlaufen genau innerhalb dieser Grenzen. Dies spricht für sehr gute Simulationsergebnisse, da die Sensoren ca. im mittleren Bereich des Fußbodenaufbaus montiert wurden.

Sämtliche gemessenen, relativen Luftfeuchten belaufen sich auf 100 %, ebenso wie in den Simulationen. Die einzige Ausnahme stellt der Sensor 3a dar, der in den Wintermonaten auf bis zu 90 % abfällt. Diese Bereiche werden in den Simulationen in der Ebene 3 nur sehr nahe der Fußbodenoberkante erreicht, jedoch nicht im mittleren Bereich oder am tiefsten Punkt der Innendämmung über dem Gewölbe. Der Sicherheitssensor 3b im gleichen Bereich misst, wie die anderen Sensoren, eine relative Luftfeuchte von 100 %. Um den Ausschlag detaillierter beurteilen zu können, sind noch weitere Messjahre notwendig. Erst dann kann gesagt werden, ob auch die anderen Sensoren ein Austrocknungsverhalten der Dämmung aufzeigen oder ob der Sensor 3a als einzige Ausnahme niedrigere Werte misst und somit einen „Ausreißer“ darstellt.

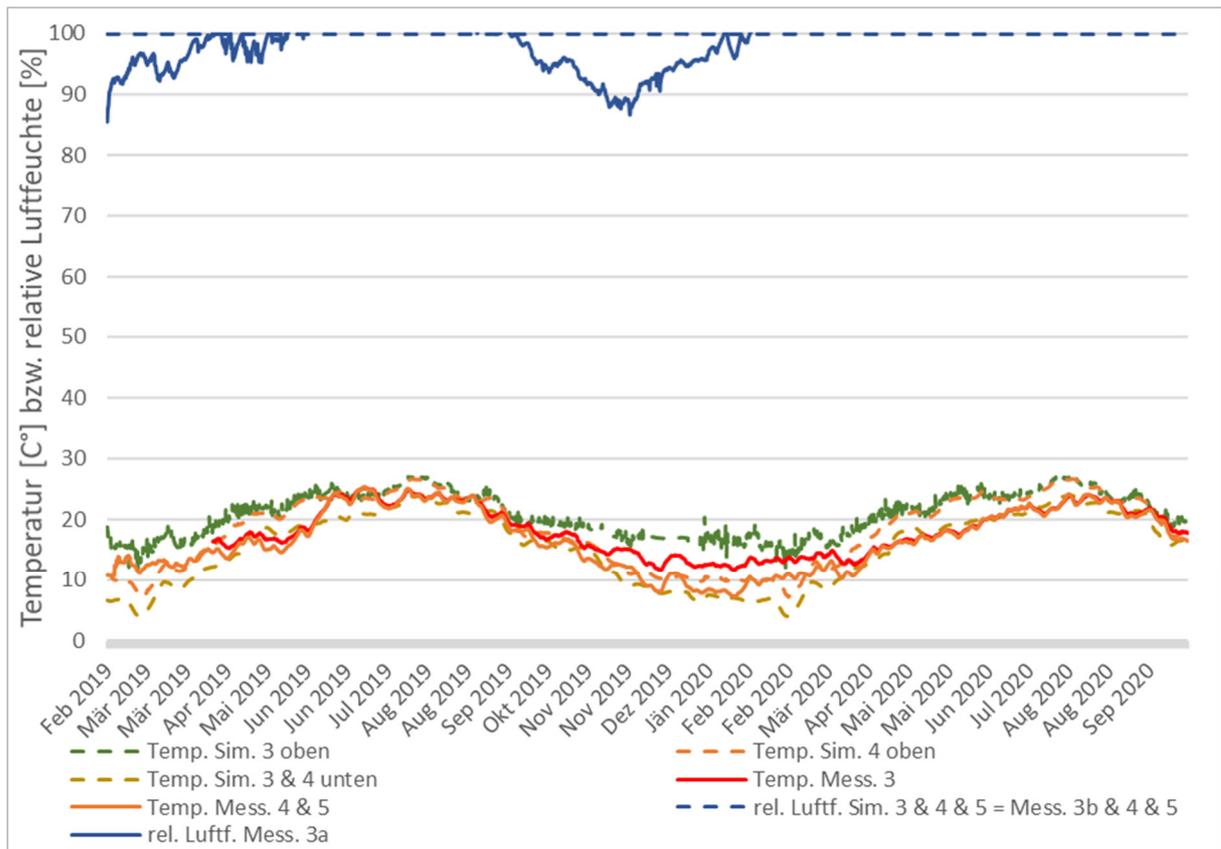


Abbildung 69 Variante Aerogel EG Fußbodenaufbau (2D Bereich)

Die Ergebnisse für die Temperaturen der Zellulose Innendämmung verhalten sich genauso, wie jene für die Aerogel Innendämmung (siehe Abbildung 70). Bei der relativen Luftfeuchte stehen sämtliche Sensoren auf 100 % bis auf jene beiden an der Innendämmungsinenseite in 3, welche in den Wintermonaten ein Austrocknungsverhalten der Dämmung anzeigen. Es sind beide Sensoren (3a und 3b) des Bereiches separat dargestellt, da sie eine maximale Abweichung von ca. 12 % messen. Die Differenzen zwischen der Messung und der Simulation lassen sich so erklären, dass die Sensoren durch den notwendigen Fertigungsprozess der Innendämmungen an der Innenoberfläche der Innendämmung montiert wurden und diese nicht im Randbereich des Materials eingebettet werden konnten. Somit kann nicht gänzlich ausgeschlossen werden, dass Luft aus dem Schüttungsmaterial mitgemessen wird, wenn sich der Sensor nachträglich bewegt. Dies kann durch Erschütterungen aus dem Fußbodenbereich zustande kommen. Das Schüttungsmaterial aus Hochofenschlacke und Luftporen ist kein Bestandteil der angewendeten Software und musste für das Projekt erzeugt werden (siehe Kapitel 4.5). Die Sensitivitätsanalysen ergaben sehr gute Ergebnisse. Geringe Differenzen gegenüber einer Messung können dabei allerdings nicht ausgeschlossen werden. Die Simulationsergebnisse sind jedenfalls auf der sicheren Seite und die weiteren Messjahre werden Aufschluss geben, ob dieser Bereich noch weiter austrocknet.

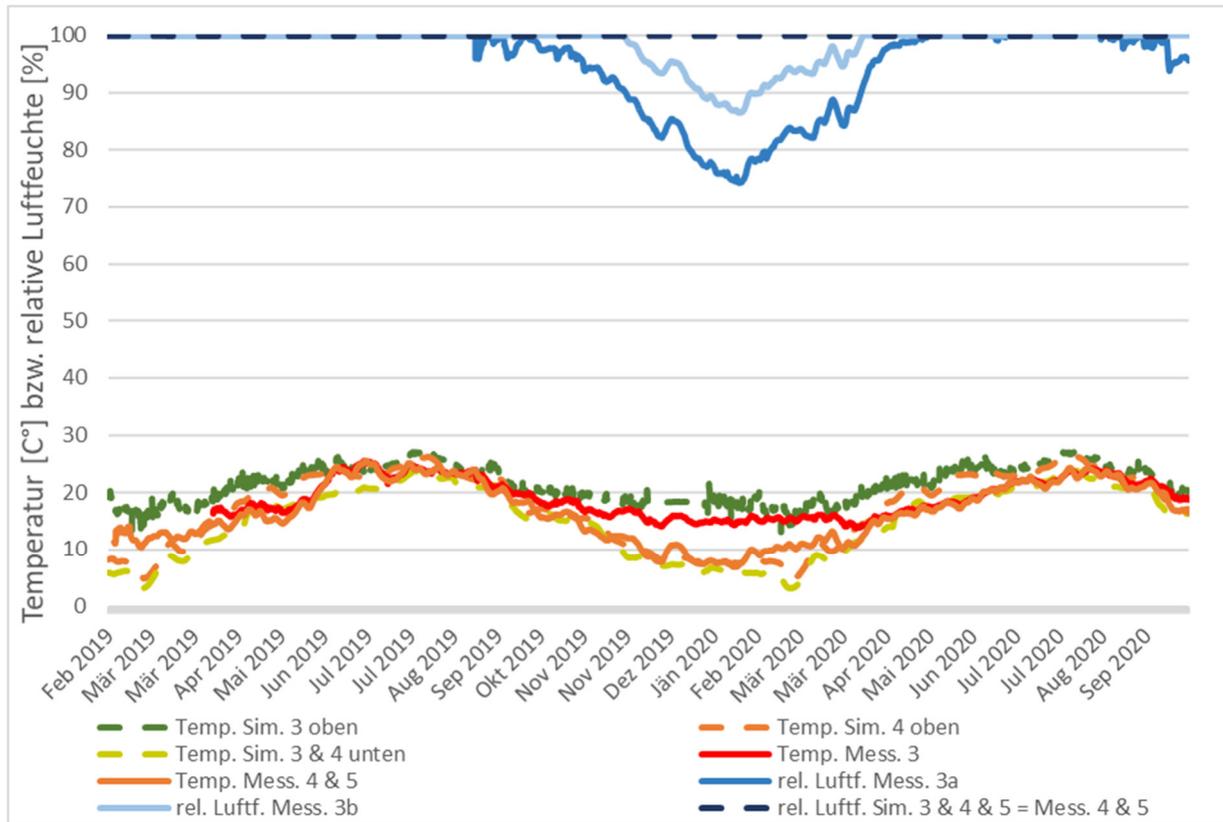


Abbildung 70 Variante Zellulose EG Fußbodenaufbau (2D Bereich)

6.4.3 UG Gewölbe Fläche und Kante (1D und 2D Bereich)

Im Gewölbebereich der Aerogel Innendämmvariante wurde keine Dämmung an der Gewölbeunterseite angebracht. Die Temperaturen von Messung und Simulation in 6 stimmen sehr gut überein, wie Abbildung 71 zeigt. Der Sensor wurde in das Mauerwerk eingemauert und daher ist noch eine erhöhte Feuchte des Mörtels enthalten. Es zeigt sich jedoch, dass sich die Messkurve der relativen Luftfeuchte immer weiter der Simulationskurve annähert. Es wurde hier zwischen der Ober- und Unterseite des Gewölbemauerwerks unterschieden (siehe Abbildung 66). Die Ergebnisse der Oberseite spiegeln das Material der Schüttung an der Grenze zum Ziegel wider. Daraus ergibt sich ein Vergleich zum relativen Luftfeuchtegehalt der Schüttung an der Grenzfläche, wie in Kapitel 6.4.2. Es stellt sich hier ein fast konstanter Wert ein, der keine Schwankungen durch die Klima- bzw. Feuchtebedingungen erfährt. Da das Gewölbe vereinfacht dargestellt werden musste und keine Rundung modelliert werden konnte (siehe Kapitel 5.8.2), sind Abweichungen hier nachvollziehbar. Die Schüttungshöhe würde sich bei einer Modellierung mit Rundung von 32 cm auf bis zu 15 cm verjüngen und dadurch wäre der Einfluss der Klimabedingungen viel stärker und würde sich in den Simulationskurven durch stärkere Ausschläge abzeichnen.

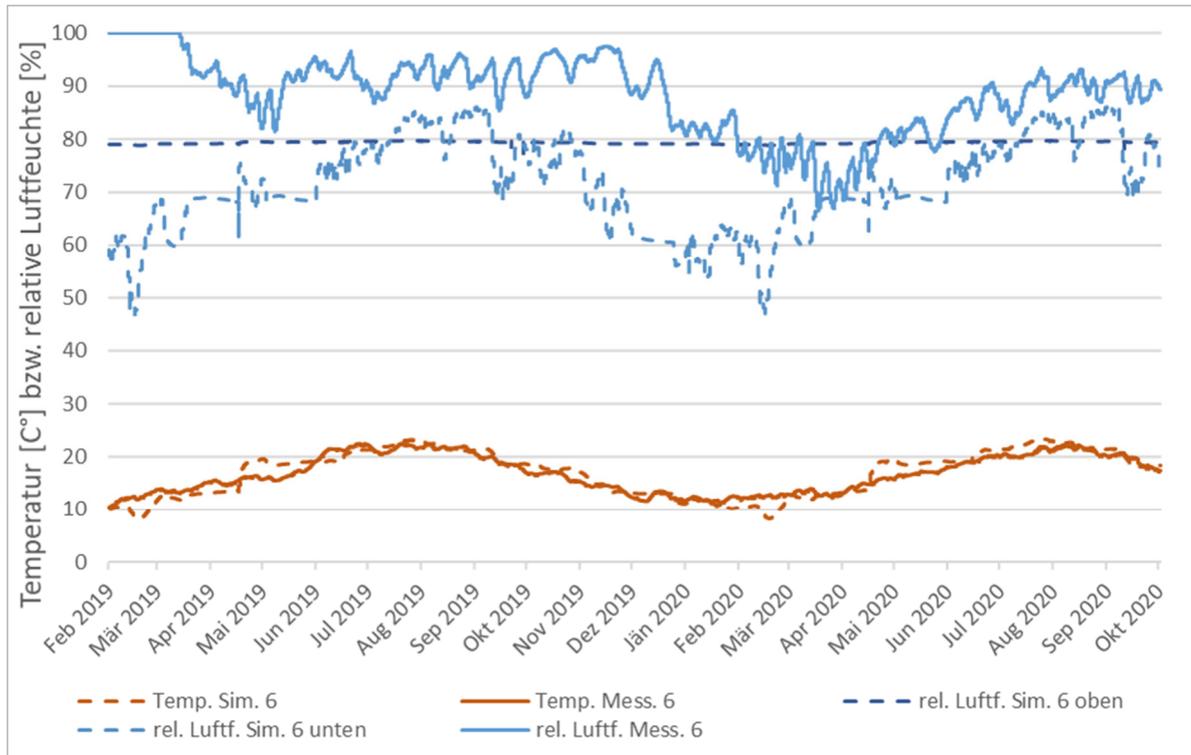


Abbildung 71 Variante Aerogel UG Fläche (1D Bereich)

Im Bereich 6 des Gewölbes mit der Zellulose Innendämmung wurde an der Gewölbeunterseite eine 10 cm dicke Zellulose Dämmung angebracht. Durch die geringeren Wärmeverluste trocknet die Baufeuchte der Sensoren- und Dämmungsmontage rascher aus und die Verläufe von Simulation und Messung stimmen sehr gut überein (siehe Abbildung 72).

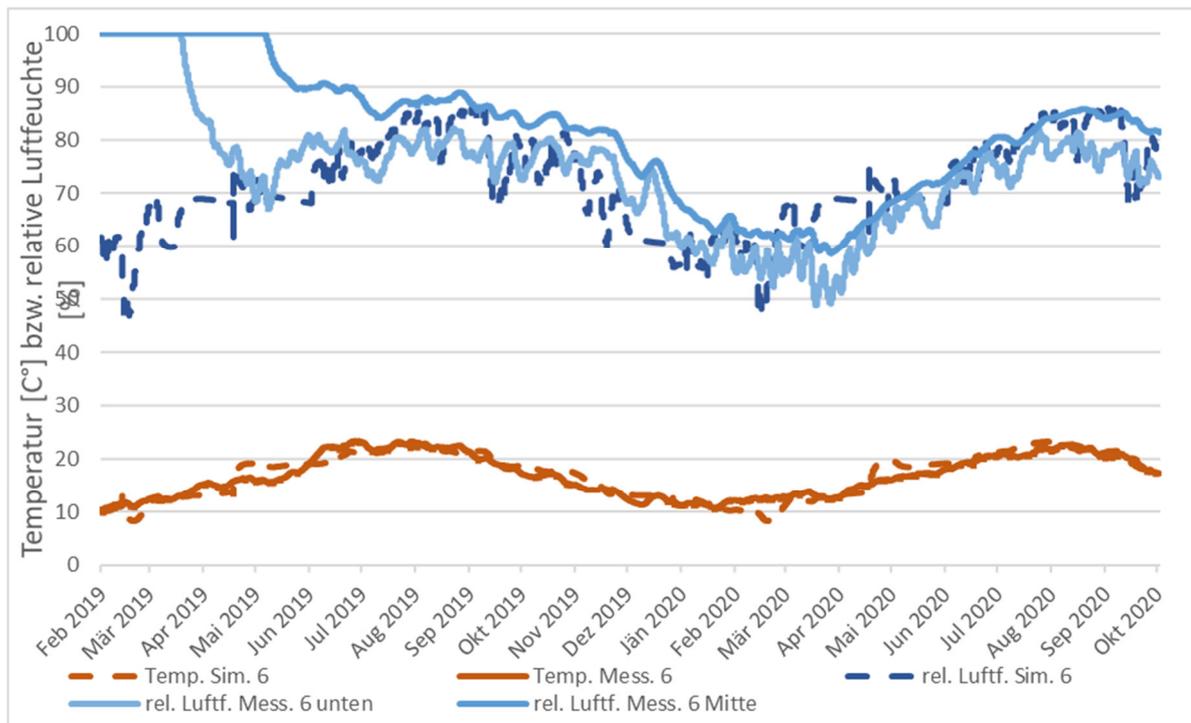


Abbildung 72 Variante Zellulose UG Fläche (1D Bereich)

Im 2D Bereich der Kante des Gewölbes zeigt die Messung und die Simulation das gleiche Ergebnis, aber durch die permanent hohe relative Luftfeuchtigkeit sind hier nur Werte von 100 % zu verzeichnen (siehe Abbildung 73).

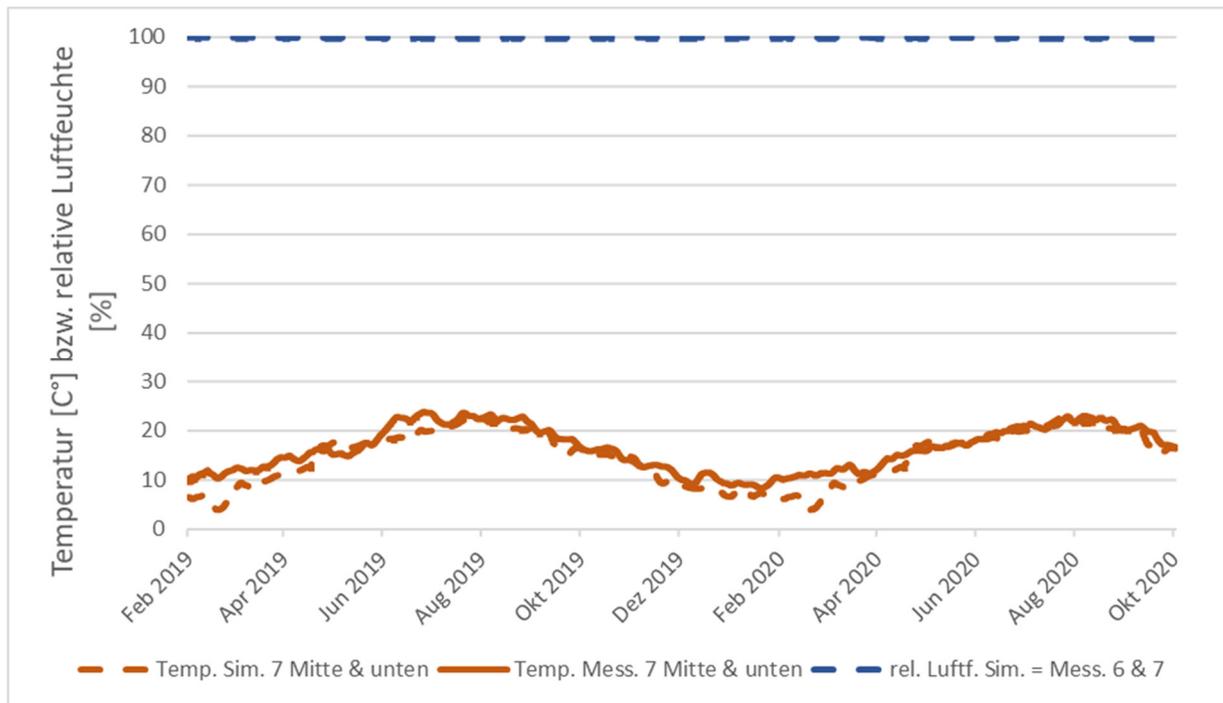


Abbildung 73 Variante Zellulose UG Kante (2D Bereich)

Abschließend kann festgehalten werden, dass die Simulationen trotz der Komplexität in der Modellierung und der zahlreichen Randbedingungen mit den Messdaten sehr gut korrelieren. Es sind jedoch immer Bereiche und nicht nur einzelne Punkte zu vergleichen. Durch die Wasserbelastung im Sockelbereich können jedoch wenige konkrete Aussagen zu dem Übergangsbereich zwischen Gewölbe und Außenwand gemacht werden. Die relative Luftfeuchte sagt bei so stark belasteten Bereichen nur mehr sehr wenig aus. Mit Hilfe der Ergebnisse der Simulationen kann dies im nachfolgenden Kapitel jedoch geschehen. Messungen in größerer Tiefe der Außenwand wären nur durch starke Eingriffe bzw. Zerstörung der bestehenden Strukturen möglich. Da sich die maßgeblichen Auswirkungen - auch die der aufsteigenden Feuchtigkeit - an den Bauteiloberflächen widerspiegeln, sind die vorgenommenen Messungen repräsentativ und die Simulationsergebnisse können mit guter Übereinstimmung angenommen werden.

6.5 Analyse der Simulationen mit temperatur- und feuchteabhängigen Wärmeleitfähigkeiten (1D und 2D)

6.5.1 Erdgeschoß Außenwand (1D)

Für die 1D Untersuchungen wurde, wie in den Kapiteln 6.2 und 6.3, kein zusätzlicher Einfluss durch die aufsteigende Feuchtigkeit eingegeben, damit die Sensibilität der angewendeten Modelle analysiert werden kann.

In der Analyse wurden nachfolgende Materialeinstellungen unterschieden:

1. feuchteabhängige lineare Wärmeleitfähigkeit
2. feuchteabhängige Wärmeleitfähigkeit nach Messung
3. temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit nach Messung
4. feuchte- und temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit nach Messung

Der erste Punkt ergibt sich aus dem Softwaremodell, da die feuchteabhängige lineare Wärmeleitfähigkeit eine Standardeinstellung im Programm DELPHIN ist. Dieses Modell kommt bei der gängigen Vorgehensweise einer Simulation, ohne Messung der feuchte- und temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeit, zum Einsatz. Alle vier oben genannten Varianten wurden für die Sanierungsmaßnahme mit Aerogel und Zellulose in DELPHIN simuliert und zusätzlich wurde die Bestandsausführung betrachtet. Die Einstellung mit feuchte- und temperaturabhängiger Wärmeleitfähigkeit (Punkt 4) für die beiden Innendämmungsvarianten und den Bestand wurden zusätzlich in WUFI simuliert.

Die Standardeinstellung für die feuchteabhängige lineare Wärmeleitfähigkeit (Punkt 1) in DELPHIN wurde dem Datensatz „*Altbauziegel Dresden ZK*“ entnommen, da dieser die beste Übereinstimmung mit den Messdaten aufweist.

In DELPHIN kann zwar scheinbar eine temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit erzeugt werden, jedoch wird lediglich das λ_{dry} als konstanter Wert von -40 °C bis $+80\text{ °C}$ eingesetzt. Standardmäßig sind meist keine temperaturabhängigen Daten hinterlegt. Werden die eingegebenen Grenzwerte in DELPHIN unter- oder überschritten, dann wird mit dem letzten Datenwert als Konstante weitergerechnet. Dies führt bei der Nutzung eines temperaturabhängigen Wärmeleitmodells mit zu geringen Grenzwertspektren zu einer plateauartigen Ausbildung der Wärmeleitfähigkeit (siehe Abbildung 74).

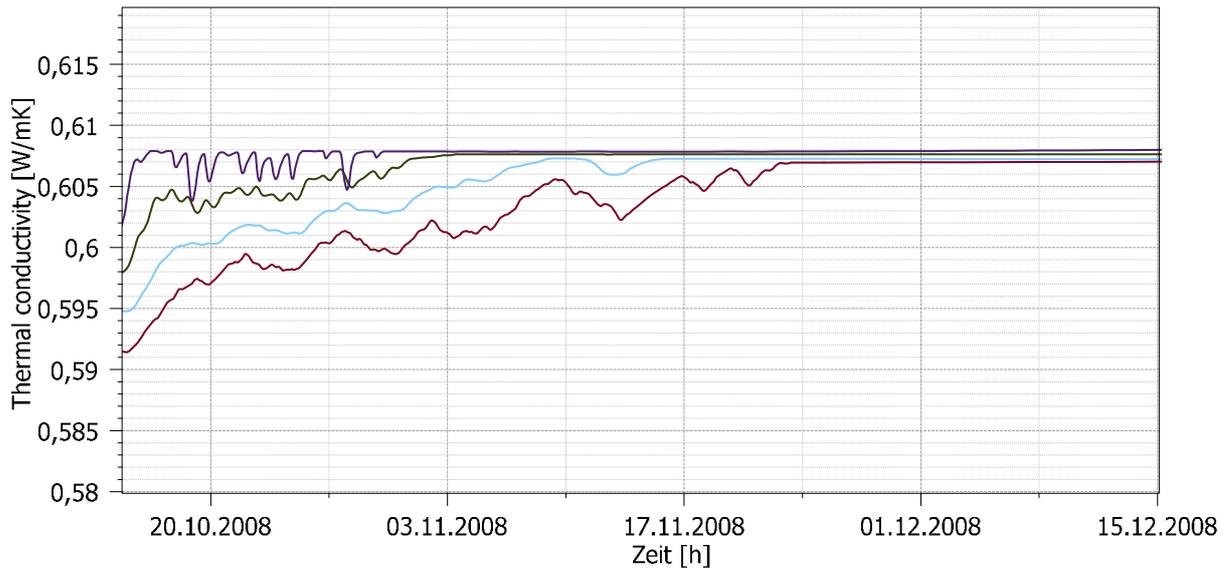


Abbildung 74 Beispiel eines temperaturabhängigen Wärmeleitmodells mit zu geringen Grenzwertspektren

In Tabelle 29 sind maßgebliche Kennwerte der verschiedenen Varianten der feuchte- und temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeiten dargestellt. Mit der Veränderung der Wärmeleitfähigkeit verändern sich auch Wassergehalt, Temperatur, relative Luftfeuchte und der Sättigungsgrad, da eine schnellere bzw. langsamere Austrocknung stattfindet. Auf den ersten Blick scheint es, als würden die unterschiedlichen Modelle alle zum gleichen Ergebnis bei der Wärmeleitfähigkeit führen. Da die dargestellten Werte jedoch Jahresmittelwerte sind, ist eine Analyse des Jahresverlaufs notwendig. An den Werten aus Tabelle 29 lässt sich aber schon feststellen, dass alle Wärmeleitfähigkeiten aus den Datenblättern bzw. nach der üblichen Angabe der trockenen Wärmeleitfähigkeit bei Messungen überschritten wurden, obwohl die aufsteigende Feuchtigkeit des Sockelbereichs noch nicht angesetzt wurde. Für die Aerogel Innendämmung bedeutet das eine Überschreitung von ca. 11 % ($\lambda = 0,027 \rightarrow 0,030$ W/mK), für Zellulose ca. 7,5 % ($\lambda = 0,067 \rightarrow 0,072$ W/mK) und für den Ziegel bis zu 15 % ($\lambda = 0,576 \rightarrow 0,664$ W/mK).

Die Abweichungen zwischen den Ergebnissen von DELPHIN und WUFI betreffen hauptsächlich die Wassergehalte und somit auch die Wärmeleitfähigkeiten und den Sättigungsgrad. Die Temperaturen und relativen Luftfeuchten stimmen sehr gut überein.

Tabelle 29 Jahresmittelwerte maßgeblicher Kennwerte der Wärmeleitfähigkeitsvariantensimulationen

Software	Außenklima	Ww Gesamt [kg/m³]	Schicht 2 Dämmung						Schicht 3 Mauerwerk				
			Ww	λ -A	λ -Z	T	ϕ	Sättig.	Ww	λ	T	ϕ	Sättig.
			[kg/m³]	[W/mK]	[W/mK]	[°C]	[%]	[%]	[kg/m³]	[W/mK]	[°C]	[%]	[%]
DELPHIN	gem. Temperaturabh.	6,80	8,32	0,030	0,072	20,7	65,97	1,27	14,35	0,592	16,3	79,83	4,43
	lineares Modell	6,76	8,11	0,030	0,072	20,7	65,76	1,23	14,27	0,584	16,3	79,71	4,40
	gemessene Feuchteabh.	6,76	8,11	0,030	0,072	20,7	65,75	1,23	14,27	0,583	16,3	79,71	4,40
	gem. Feuchte- + Tempabh.	6,82	8,39	0,030	0,072	20,7	66,04	1,28	14,38	0,600	16,2	79,88	4,44
	Bestand gem. F + T	5,34	-	-	-	-	-	-	11,64	0,592	18,1	74,90	3,59
WUFI	gem. Feuchte- + Tempabh.	15,72	7,91	0,030	0,072	20,7	66,14	1,18	16,17	0,596	16,2	83,65	4,99
	Bestand gem. F + T	14,14	-	-	-	-	-	-	14,28	0,664	18,0	79,71	4,41
Δ	gem. Feuchte- + Tempabh.	130,6%	5,7%	2,1%	0,1%	0,3%	0,2%	7,6%	12,4%	0,5%	0,0%	4,7%	12,4%
	gem. Feuchte- + Tempabh.	164,5%	-	-	-	-	-	-	22,7%	12,1%	0,6%	6,4%	22,7%

In Abbildung 75 sind die Jahresverläufe der Aerogel Innendämmungsschicht der unterschiedlichen Varianten in Abhängigkeit von Feuchte und Temperatur aus DELPHIN dargestellt. In den Wintermonaten von Dezember bis April ist eine deutlich höhere Wärmeleitfähigkeit zu verzeichnen. Das betrifft genau jene Monate, in denen die Wärmedämmung am meisten benötigt wird. Die beiden Varianten ohne die Abhängigkeit der Temperatur haben einen ähnlichen Verlauf wie jene mit der Feuchteabhängigkeit, jedoch sind die Werte nicht gleich hoch. Zu keinem Zeitpunkt im Jahresverlauf entspricht die Wärmeleitfähigkeit dem angegebenen Wert im Datenblatt mit 0,027 W/mK.

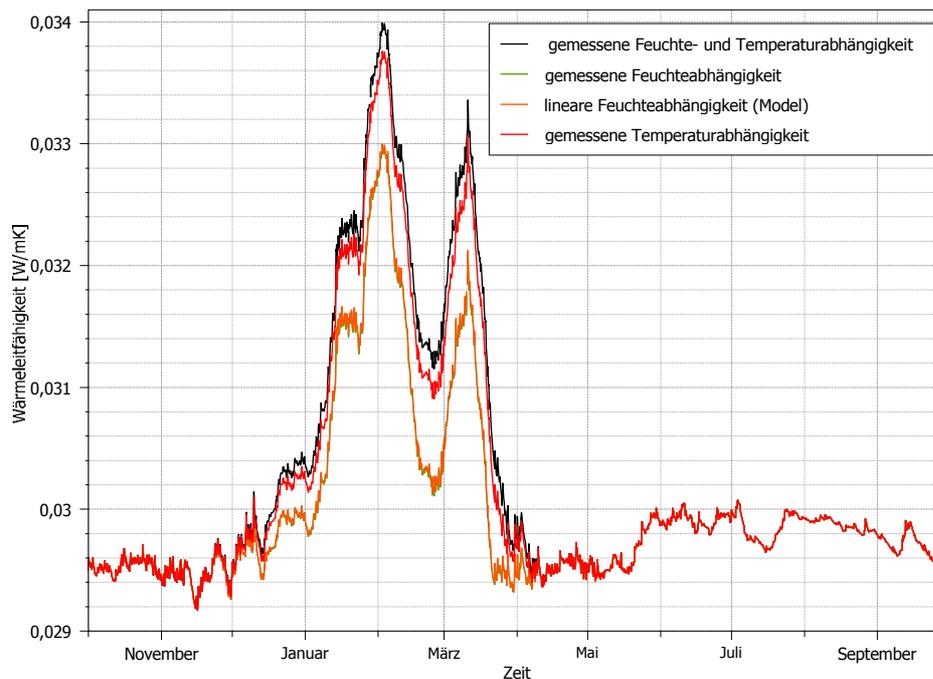


Abbildung 75 Jahresverlauf der Wärmeleitfähigkeit von Aerogel mit verschiedenen Abhängigkeiten

In Abbildung 76 sind die Wärmeleitfähigkeit und auch der Wassergehalt in verschiedenen Schichten der Aerogel Dämmung aus der feuchte- und temperaturabhängigen Variante dargestellt. Zusätzlich ist in roter Farbe der Wassergehalt und die Wärmeleitfähigkeit der gesamten Dämmung eingezeichnet. Es ist deutlich zu sehen, dass der Feuchtegehalt maßgeblichen Einfluss auf die erhöhte Wärmeleitfähigkeit in der Aerogel Innendämmung hat. Des Weiteren ist zu erkennen, dass hauptsächlich 0,50 cm der Dämmung für die Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit verantwortlich sind. Da die Aerogel Dämmung nur 5 cm dick ist, ergeben sich daraus jedoch 10 %, welche maßgeblich die Transmissionswärmeverluste bestimmen. Die ersten 4 cm der warmen Seite haben eine durchschnittliche Wärmeleitfähigkeit von 0,030 W/mK. In den 5 Monaten von Dezember bis April ergibt sich ein Wert von 0,029 W/mK. Das bedeutet, dass die ersten 4 cm in den Wintermonaten besser dämmen als im restlichen Jahresverlauf. Dies ist auf den trockenen Zustand durch das warme Innenklima dieses Bereiches zurückzuführen. Im vorletzten halben Zentimeter ergibt sich eine durchschnittliche Wärmeleitfähigkeit von 0,030 W/mK und in den Wintermonaten 0,031 W/mK. Die bereits angesprochenen letzten 0,50 cm haben einen Jahresdurchschnittswert von 0,035 W/mK. In den Wintermonaten erhöht sich dieser auf 0,042 W/mK. Die Veränderung der Wärmeleitfähigkeit Ende Februar und Anfang März ist auf eine maßgebliche Veränderung der Außentemperatur zurückzuführen, welche hier absinkt.

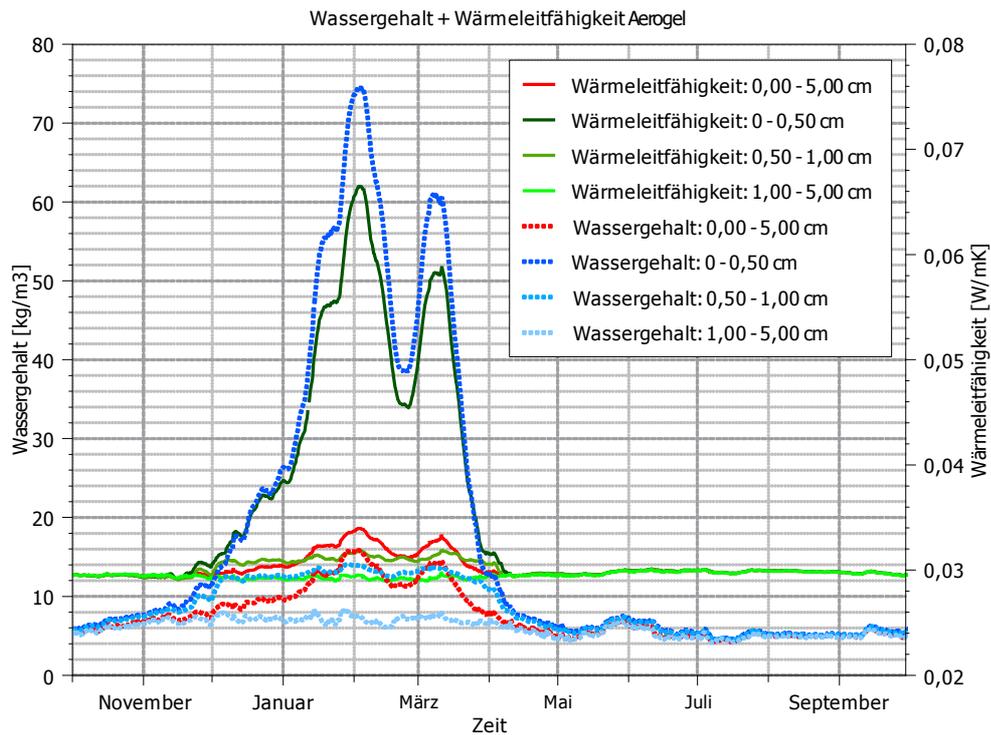


Abbildung 76 Wassergehalt und Wärmeleitfähigkeit der Aerogel Dämmung in verschiedenen Schichttiefen

Eine vergleichbare Auswertung kann auch für die Zellulose Innendämmung durchgeführt werden (siehe Abbildung 77). Die letzten beiden Schichten mit einer jeweiligen Dicke von 0,50 cm zeigen sehr ähnliche Werte. Im Mittel hat der letzte Zentimeter Dämmung vor dem Mauerwerk eine Wärmeleitfähigkeit im Jahresmittel von 0,074 W/mK und in den Wintermonaten 0,076 W/mK. Die restlichen 9 cm weisen einen Jahresmittelwert von 0,072 W/m bzw. 0,073 W/mK in den Wintermonaten auf. Die prozentuelle Verteilung der wasserreicheren Schicht ist wie bei der Aerogel Dämmung 10 %, jedoch ist die Erhöhung vom Ausgangswert (0,067 W/mK) mit max. 13 % wesentlich geringer als bei der Aerogel Dämmung mit bis zu 56 % in der mit Wasser angereicherten Schicht.

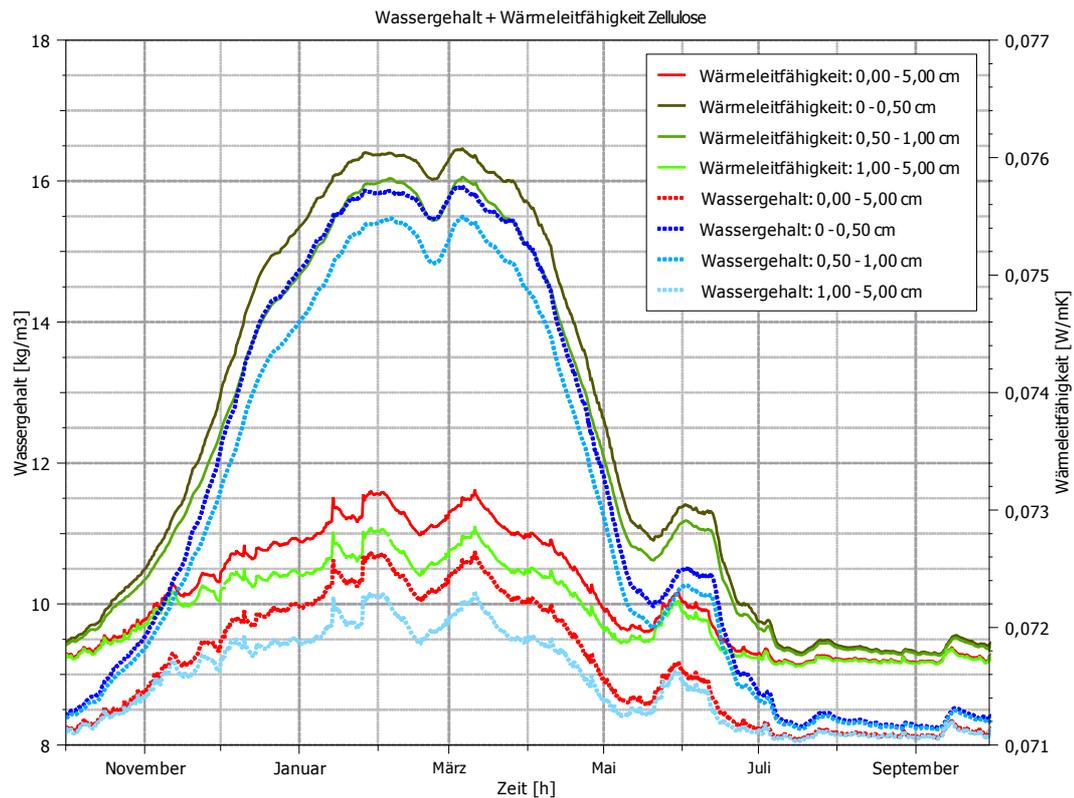


Abbildung 77 Wassergehalt und Wärmeleitfähigkeit der Zellulose Dämmung in verschiedenen Schichttiefen

Die Wärmeleitfähigkeitsverläufe des Ziegelmauerwerks sind in Abbildung 78 dargestellt, wobei hier beispielhaft die Variante mit Zellulose Innendämmung gewählt wurde, aber die Bestandsvariante und auch die Aerogel Variante vergleichbar sind. Es ist zu erkennen, dass die Abhängigkeiten zur Temperatur im Mauerwerk ohne zusätzlichen Einfluss wie eine aufsteigende Feuchtigkeit maßgeblich sind. Das Modell der linearen Feuchtigkeit und die Variante mit der gemessenen, feuchteabhängigen Wärmeleitfähigkeit verändern sich im Jahresverlauf nur unwesentlich. Hingegen schwanken die beiden Varianten mit der temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeit über den Jahresverlauf vom Ausgangswert 0,576 W/mK bis 0,620 W/mK. Die zu Beginn dieses Kapitels angesprochene Plateaubildung ist hier erkennbar, da zu wenige Messpunkte für die niedrigeren und höheren Temperaturen vorhanden sind. Somit wird der letztgültige Wert der Wärmeleitfähigkeit verwendet. WUFI setzt, wie in Kapitel 5.3.3 beschrieben, ein lineares temperaturabhängiges Wärmeleitfähigkeitsmodell von -20 °C bis +80 °C ein, um diese unnatürlichen Verläufe zu vermeiden.

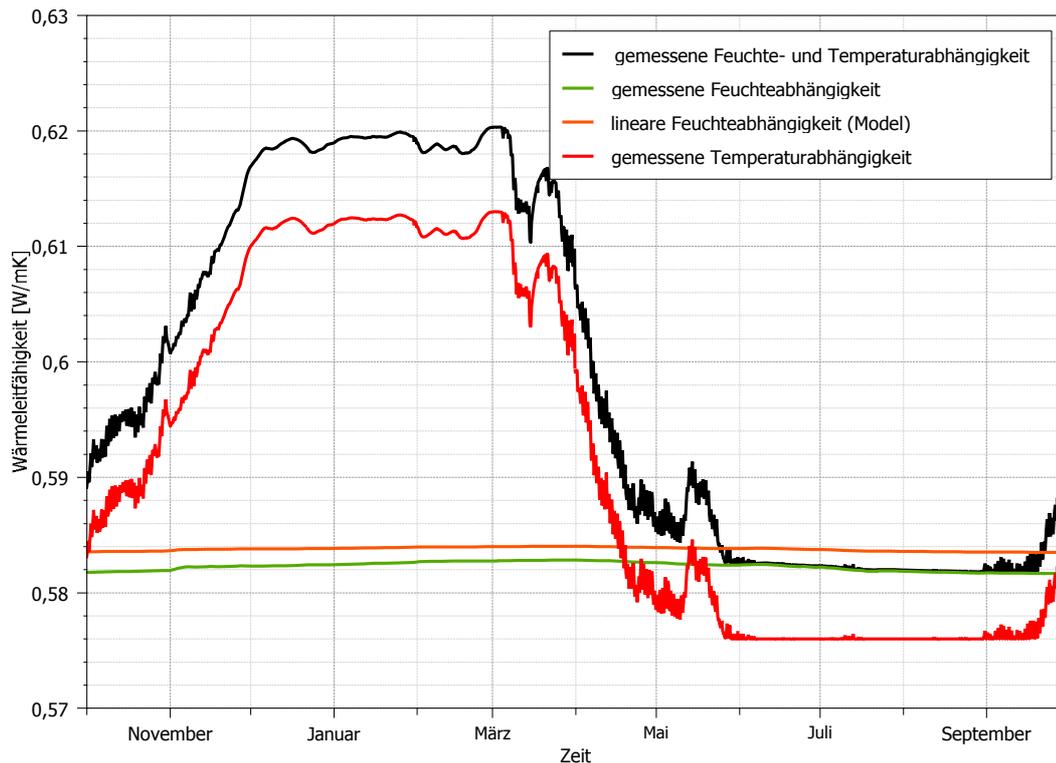


Abbildung 78 Jahresverlauf der Wärmeleitfähigkeit vom Ziegelmauerwerk mit verschiedenen Abhängigkeiten

Zusammenfassend sind die Ergebnisse für den Bestand, die Aerogel und die Zellulose Dämmvariante der gemessenen feuchte- und temperaturabhängigen Modelle in Tabelle 30 dargestellt. Die Wärmeleitfähigkeiten der maßgeblichen Schichten 2 und 3, zur Verhinderung von Transmissionswärmeverlusten, werden über den Jahresverlauf um bis zu 12 % angehoben.

Tabelle 30 Jahresmittelwerte und Differenzen der Wärmeleitfähigkeit je Bauteilschicht aus DELPHIN

Wärmeleitfähigkeit [W/mK]		1	2	3	4
		Innenputz	Dämmung	Mauerwerk	Außenputz
Dicke	[cm]	3	5/10	86	3
Bestand	Jahresmittel	0,823	-	0,592	0,830
	Δ zu λ_{dry}	0,39%	-	2,78%	1,16%
Aerogel	Jahresmittel	0,409	0,030	0,600	0,830
	Δ zu λ_{dry}	50,16%	12,07%	4,18%	1,23%
Zellulose	Jahresmittel	0,402	0,072	0,599	0,830
	Δ zu λ_{dry}	50,96%	7,89%	3,97%	1,23%

Die Gesamtschichten wurden in kleinere Teilabschnitte unterteilt, um Erkenntnisse gewinnen zu können, welche Bereiche maßgeblich für die Transmissionswärmeverluste verantwortlich sind. Wie oben beschrieben, wird die Innendämmungen in drei Teilbereiche unterteilt. Ausgehend von der kalten Seite der Innendämmung wurden zwei 0,50 cm dicke Schichten und danach der jeweilige Rest der Innendämmung unterteilt. Das Mauerwerk wurde zu beiden Seiten in 1,00 cm und 10,0 cm dicke Teilbereiche eingeteilt. Der Rest wurde ungefähr geviertelt, wobei durch die Diskretisierung in DELPHIN die Teilbereiche nicht exakt gleich groß sind, was aber vernachlässigbare Auswirkungen hat. In Tabelle 31 sind die Ergebnisse dargestellt. Die Teilbereiche der Innendämmung wurden weiter oben in diesem Kapitel bereits beschrieben. Die Anstiege der Wärmeleitfähigkeit des Mauerwerks

betragen maximal 4,84 %. Durch die Teilbereiche kann man erkennen, dass das Mauerwerk der Bestandskonstruktion auf der Innenseite höhere Temperaturen und einen trockenen Zustand aufweist und zum Außenbereich hin die Wärmeleitfähigkeit durch die Randbedingung des Außenklimas zunimmt. Bei den Varianten mit Innendämmung wird die Wärmeleitfähigkeit bereits an der warmen Seite des Mauerwerks erhöht.

Tabelle 31 Jahresmittelwerte und Differenzen der Wärmeleitfähigkeit je Teilschicht aus DELPHIN

Wärmeleitfähigkeit [W/mK]		1	2			3								4
Dicke [cm]		3	c	b	a	a	b	c	d	e	f	g	h	3
Bestand	Jahresmittel	0,823	-	-	-	0,576	0,577	0,582	0,589	0,597	0,602	0,603	0,603	0,830
	Δ zu λ_{dry}	0,39%	-	-	-	0,00%	0,24%	0,96%	2,29%	3,72%	4,46%	4,70%	4,71%	1,16%
Aerogel	Jahresmittel	0,409	0,030	0,030	0,035	0,594	0,594	0,597	0,600	0,602	0,603	0,604	0,604	0,830
	Δ zu λ_{dry}	50,16%	9,36%	11,74%	31,08%	3,18%	3,07%	3,58%	4,15%	4,50%	4,73%	4,83%	4,84%	1,23%
Zellulose	Jahresmittel	0,402	0,072	0,073	0,074	0,591	0,590	0,594	0,599	0,601	0,603	0,604	0,604	0,830
	Δ zu λ_{dry}	50,96%	7,68%	9,65%	9,93%	2,57%	2,48%	3,17%	3,96%	4,42%	4,70%	4,82%	4,83%	1,23%

Wird aus den instationären Wärmeleitfähigkeiten der U-Wert berechnet, dann steigt dieser gegenüber dem stationären U-Wert für das gesamte Jahr um 2,4 % (0,576 → 0,590 W/m²K) und für die Wintermonate von November bis April um 4,0 % (0,576 → 0,599 W/m²K). In Abbildung 79 sind die instationären U-Werte der Dämmvarianten dargestellt. Einerseits wurde eine monatliche Mittelwertbildung aus den Gesamtschichten aus Tabelle 30 und andererseits aus den Teilschichten aus Tabelle 31 durchgeführt. In beiden Fällen sind die U-Werte ganzjährig über dem stationär berechneten U-Wert und steigen in den Wintermonaten an. Die Aerogel Dämmvariante überschreitet diesen je nach Schichtenaufteilung im Jahresmittel um 6,5 % (0,279 → 0,297 W/m²K) bis 9,3 % (0,279 → 0,305 W/m²K) und die Zellulose Dämmvariante um 4,2 % (0,310 → 0,323 W/m²K) bis 5,5 % (0,310 → 0,327 W/m²K). In den Wintermonaten von November bis April werden bei der Aerogel Variante Erhöhungen von 8,2 % (0,279 → 0,302 W/m²K) bzw. 10,8 % (0,279 → 0,323 W/m²K) errechnet und bei der Variante mit Zellulose 5,5 % (0,310 → 0,327 W/m²K) bzw. 6,8 % (0,310 → 0,331 W/m²K).

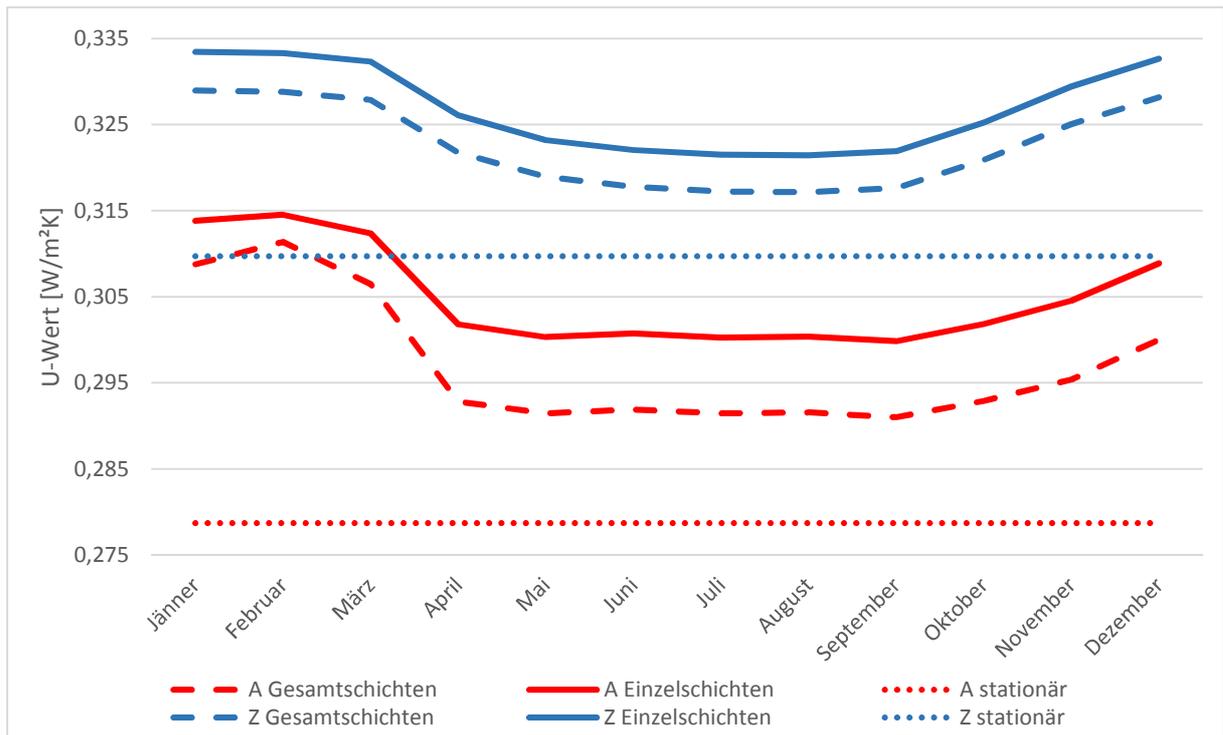


Abbildung 79 Monatsmittelwerte der U-Werte aus Gesamtschichten, Teilschichten und stationärer Berechnung

6.5.2 Sockeldetail (2D)

Die Ergebnisse der feuchte- und temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeiten der 2D Simulationen für den Sockelbereich der Bestands- und Dämmvarianten wurden in Abbildung 80 als Jahresmittelwerte dargestellt. Zusätzlich sind die Abweichungen zu den trockenen Lambdawerten angegeben. Es spiegeln sich hier deutlich die Feuchtegehalte wider und die Unterschiede zu den Ergebnissen aus Kapitel 6.5.1, ohne zusätzliche Feuchtigkeit durch den Sockelbereich, sind eklatant. Der Einfluss der Temperatur und auch die Schlagregenbelastung spielen im Sockelbereich nur eine untergeordnete Rolle.

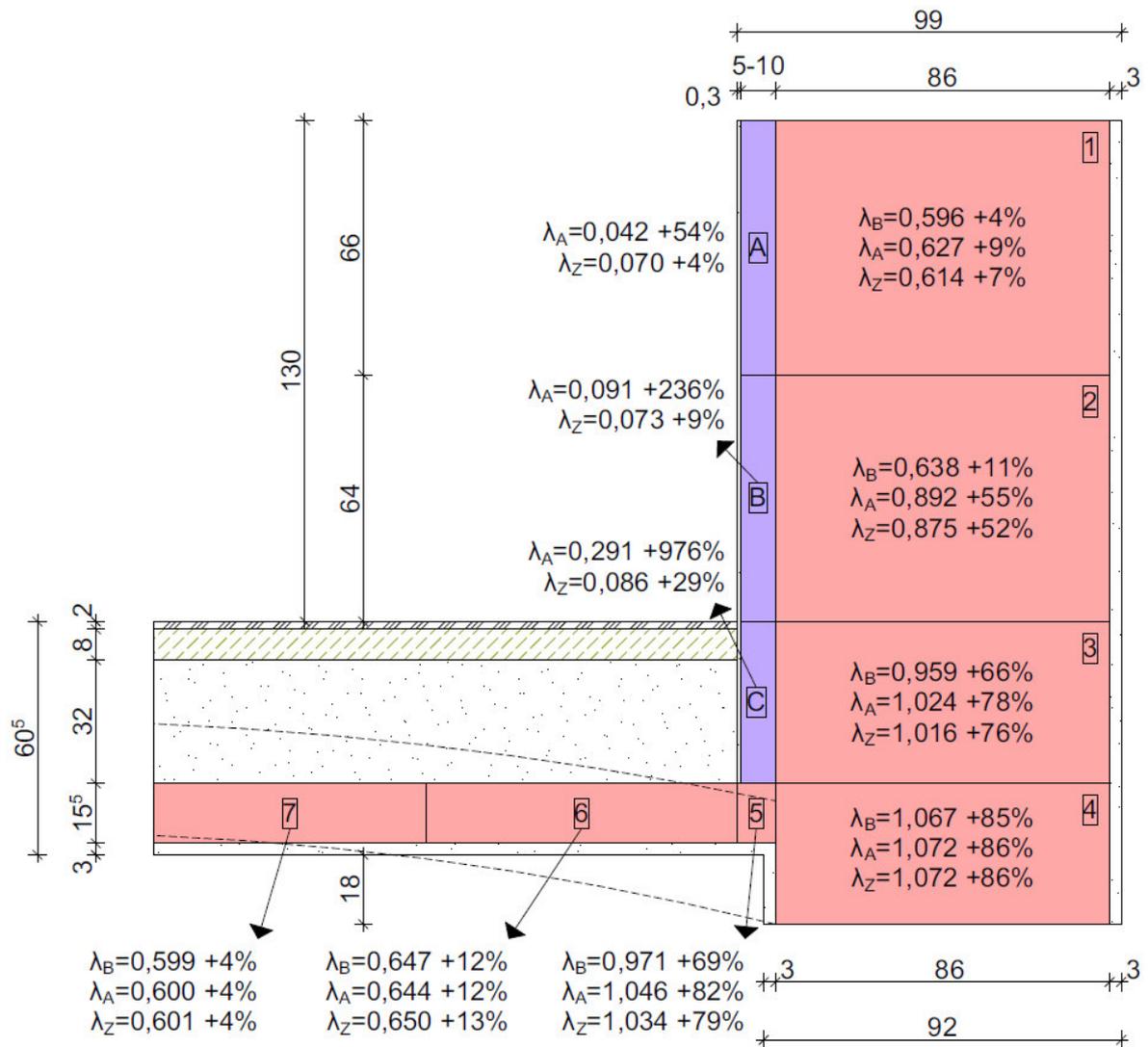


Abbildung 80 feuchte- und temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeiten des Sockeldetails

In Abbildung 81 ist der maximale Wassergehalt des Sockeldetails für die Bestandsvariante dargestellt. Die aufsteigende Feuchtigkeit verteilt sich auch in die Gewölbemauerung, die Schüttung und den Innenputz.

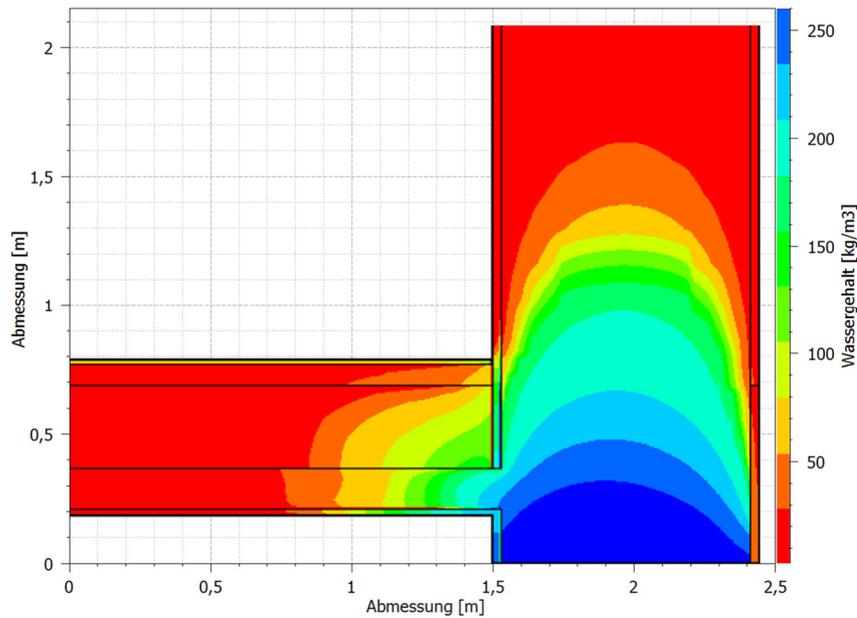


Abbildung 81 Maximaler Wassergehalt im Sockeldetail der Bestandsvariante

In Abbildung 82 ist der maximale Wassergehalt mit der Aerogel Innendämmung dargestellt. Die Legende ist auf die maximalen Wassergehalte des Mauerwerks eingestellt, die Bereiche der Wärmedämmung werden in weiterer Folge separat analysiert. Durch die Dämmmaßnahmen sind die Feuchtegehalte nicht mehr gleichmäßig verlagert, was sich auch schon in den Teilbereichen der 1D Betrachtungen abgezeichnet hat (siehe Kapitel 6.5.1). Die Feuchtigkeit kann durch die Innendämmmaßnahmen schlechter austrocknen und damit wird die Feuchtigkeit auch höher nach oben transportiert.

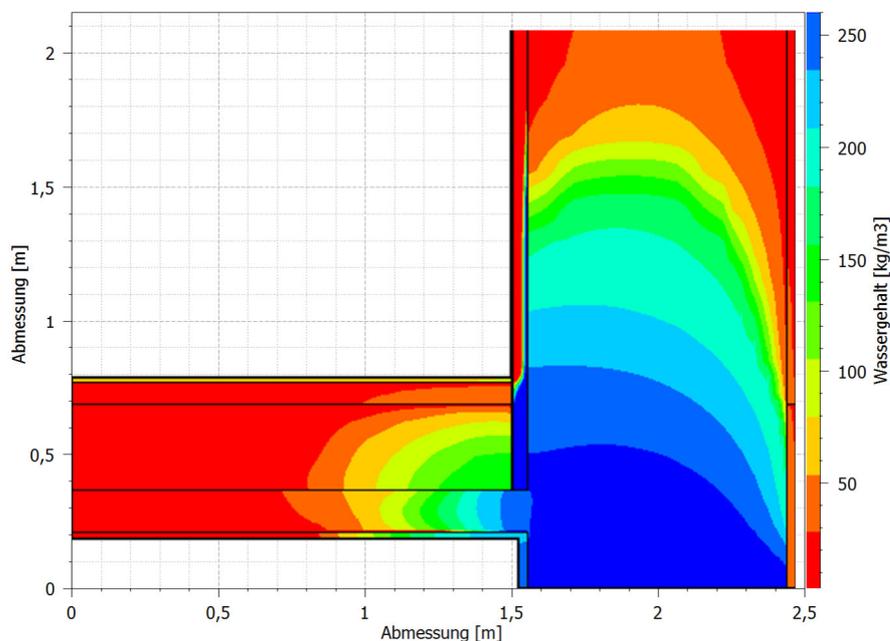


Abbildung 82 Maximaler Wassergehalt im Sockeldetail der Aerogel Variante

In Tabelle 32 sind die Wassergehalte, die Temperaturen, die relativen Luftfeuchten und die Sättigung der Teilbereiche der Sockeldetails lt. Abbildung 80 für den Bestand, die Aerogel und die Zellulose Dämmvariante als Jahresmittelwerte dargestellt. Die Teilbereiche 2 bis 6 enthalten große Wassermengen und daher ist die relative Luftfeuchte auch nicht mehr

aussagekräftig. Durch den Wassergehalt lässt sich erkennen, dass die Montage der Innendämmungen einen Anstieg des Feuchtegehalts verursacht. Jene Bereiche, die bereits im Bestand hohe Feuchtegehalte aufweisen, verändern sich nicht maßgeblich. Aber besonders der Bereich 1, welcher vorab die größten Ähnlichkeiten mit einem eindimensionalen, unbeeinflussten Bauteilaufbau aufweist, hat eine geringere Temperatur und ein Austrocknen der aufsteigenden Feuchtigkeit ist nicht mehr so leicht möglich, wie in der Bestandskonstruktion. Die Innendämmung hat wenig Einfluss auf den Teilbereich 7. In den Teilbereichen A bis C der Dämmung ist der Bereich C im Fußbodenbereich sehr hohen Feuchtebelastungen der aufsteigenden Feuchtigkeit ausgesetzt. Besonders auffällig ist der Sättigungsgrad der Aerogel Innendämmung mit ca. 86 % und einem Wassergehalt von ca. 452 kg/m³.

Tabelle 32 Jahresmittelwerte und Differenzen zur Bestandsvariante maßgeblicher Kennwerte der 2D Sockeldetails

Jahresmittelwerte (2D)			Teilbereiche									
			1	2	3	4	5	6	7	A	B	C
Bestand	Ww	[kg/m ³]	17,5	104,2	208,6	254,4	208,3	83,2	14,6	-	-	-
	T	[°C]	18,3	17,5	15,9	14,6	14,1	14,3	16,0	-	-	-
	φ	[%]	83,2	98,1	99,9	99,9	99,9	98,5	81,3	-	-	-
	Sättig.	[%]	5,4	32,2	64,4	78,5	64,3	25,7	4,5	-	-	-
Aerogelgedämmt	Ww	[kg/m ³]	54,9	178,1	228,2	257,0	236,8	101,9	14,9	25,6	111,2	451,9
	ΔWw	[%]	213,4%	70,9%	9,4%	1,0%	13,7%	22,4%	2,3%	-	-	-
	T	[°C]	16,6	16,3	15,4	14,4	14,0	14,2	16,0	19,8	19,1	16,4
	ΔT	[%]	9,1%	6,8%	2,7%	1,3%	0,9%	0,5%	0,0%	-	-	-
	φ	[%]	96,2	99,5	99,9	99,9	99,9	98,7	82,0	74,0	84,1	99,2
	Δφ	[%]	15,7%	1,5%	0,0%	0,0%	0,0%	0,2%	0,9%	-	-	-
	Sättig.	[%]	16,9	55,0	70,4	79,3	73,1	31,4	4,6	4,9	21,1	85,9
	ΔSättig.	[%]	213,4%	70,9%	9,4%	1,0%	13,7%	22,4%	2,3%	-	-	-
Zellulosegedämmt	Ww	[kg/m ³]	33,4	159,6	225,4	256,8	231,5	104,9	16,1	5,0	10,7	34,2
	ΔWw	[%]	90,7%	53,1%	8,1%	1,0%	11,1%	26,1%	10,4%	-	-	-
	T	[°C]	16,3	15,8	15,0	14,2	13,6	14,0	15,9	19,8	19,0	16,1
	ΔT	[%]	10,9%	9,6%	5,1%	2,6%	3,2%	1,8%	0,3%	-	-	-
	φ	[%]	93,8	99,4	99,9	99,9	99,9	99,1	83,4	66,4	80,2	99,4
	Δφ	[%]	12,7%	1,3%	0,0%	0,0%	0,0%	0,6%	2,6%	-	-	-
	Sättig.	[%]	10,3	49,3	69,6	79,3	71,4	32,4	5,0	0,6	1,3	4,1
	ΔSättig.	[%]	90,7%	53,1%	8,1%	1,0%	11,1%	26,1%	10,4%	-	-	-

In Abbildung 83 ist das Detail der Aerogel Innendämmung im Fußbodenaufbau mit dem maximalen Wassergehalt dargestellt. Dieser nimmt Werte bis zu 515 kg/m³ an. Bei einer Dicke von 5 cm ergibt das bis zu 25,75 kg/m². Die vorhandenen Grenzwerte für eindimensionale Simulationen aus der ÖNORM oder der DIN, die zwar nichtzutreffend sind (siehe Kapitel 2.1), aber als vergleichender Ansatz herangezogen werden können, sind hier weit überschritten. Die Wärmeleitfähigkeit in diesem Bereich (siehe Abbildung 80) überschreitet die Normgrenzen ebenfalls um ein Vielfaches. Somit ist nicht nur eine bauphysikalische und hochbautechnische Bedenklichkeit gegeben, sondern die Sinnhaftigkeit der Innendämmung in diesem Bereich in Frage zu stellen. Die Innendämmung sollte somit nur bis zur Estrichoberkante geführt werden, weil die Innendämmung dadurch nicht so hohen Feuchtegehalten ausgesetzt ist und der

Kantenbereich im Fußbodenaufbau auch besser austrocknen kann, da die Innenraumtemperatur nicht abgeschirmt wird. Diese Ausführung stellt zwar eine Wärmebrücke dar, jedoch sind die Verluste vergleichsweise gering und langfristige Schäden am Bauwerk werden verhindert.

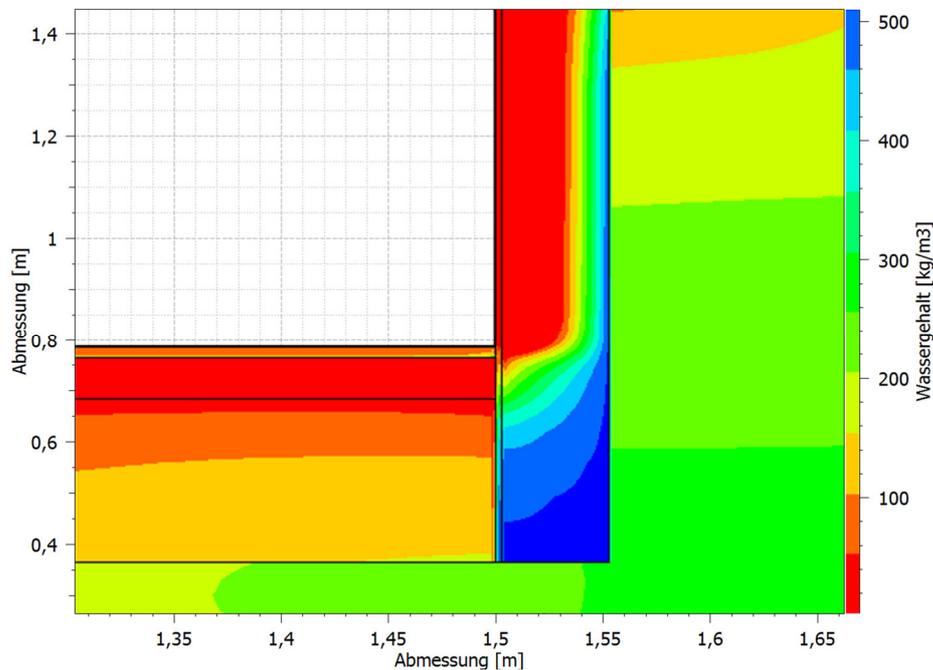


Abbildung 83 Maximaler Wassergehalt der Aerogel Innendämmung im Fußbodenbereich

Die hier dargestellten Ergebnisse korrelieren auch mit den Ergebnissen eines vorangegangenen Forschungsprojektes [93]. Dabei wurden die U-Werte von Ziegel- und Betonwänden mit Außenputzen aus Aerogel und einem Perlit basierten Tri-O-Therm Putz in einer Klimakammer untersucht. Die Bewitterung ergab, dass sich die U-Werte der Bauteile mit dem Aerogel Dämmputz auf Grund des Wassergehaltes verdoppelt bzw. je nach Ausführung auch mehr als verdreifacht haben.

Die Oberflächentemperatur in 1,30 m Höhe über der Fußbodenfläche beträgt bei der gegenständlichen Dissertation im Bestand in den Wintermonaten im Mittel 18,1 °C, wobei in kurzen Zeitphasen auch Temperaturen bis ca. 15 °C entstehen können. In der Kante zwischen Außenwandinnenoberfläche und fertigem Fußbodenbelag weist die Bestandskonstruktion einen Durchschnittswert in den Wintermonaten von 13,6 °C aus. Solche niedrigen Temperaturen der Innenoberfläche können eine hohe Unbehaglichkeit verursachen, noch kritischer als in Kapitel 3.2, das mit $T_{oi} = 16,6$ °C gerechnet wurde. Der Kantenbereich ist auch besonders anfällig für Schimmel und Oberflächenkondensat.

Die Innendämmungen erhöhen die Oberflächentemperatur auf ca. 19,6 °C und verhindern das Abkühlen auf sehr niedrige Oberflächentemperaturen wie es im Bestand der Fall ist. Durch die Innendämmung mittels Aerogel kann diese auf 16,5 °C bzw. mit Zellulose auf 17,8 °C gehoben werden.

Aus den Simulationen zur feuchte- und temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeit konnten mittlere λ -Werte für die gesamte Erdgeschoß Außenwand berechnet werden, welche auch die Höhe der aufsteigenden Feuchtigkeit berücksichtigen. Für eine Raumhöhe von 3,30 m erhält man somit folgende Wärmeleitfähigkeiten im Jahresmittel samt Differenzen zum trockenen Wert:

- λ -Ziegel ($\lambda_{\text{dry}} = 0,576 \text{ W/mK}$):
 - Bestandsvariante: $0,602 \text{ W/mK}$ ($\Delta +4,5 \%$)
 - Aerogel Variante: $0,662 \text{ W/mK}$ ($\Delta +14,9 \%$)
 - Zellulose Variante: $0,655 \text{ W/mK}$ ($\Delta +13,8 \%$)
- λ -Aerogel ($\lambda_{\text{dry}} = 0,027 \text{ W/mK}$): $0,044 \text{ W/mK}$ ($\Delta +64,4 \%$)
- λ -Zellulose ($\lambda_{\text{dry}} = 0,067 \text{ W/mK}$): $0,072 \text{ W/mK}$ ($\Delta +7,4 \%$)

Wie in Kapitel 2.1.2 beschrieben, ist lt. ÖNORM B 8110-2 [17] beim detaillierten Nachweisverfahren unter anderem auch der Wärmestrom zu untersuchen. Dieser darf sich im Winter um nicht mehr als 10 % erhöhen.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Umrechnung für den eindimensionalen Bereich mit zusätzlichem Einfluss durch aufsteigende Feuchtigkeit und Berücksichtigung der feuchte- und temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeit der U-Wert im Bestand um 3,8 % ($0,576 \rightarrow 0,598 \text{ W/m}^2\text{K}$), bei der Aerogel Dämmvariante um 29,4 % ($0,279 \rightarrow 0,361 \text{ W/m}^2\text{K}$) und bei der Zellulose Dämmvariante um 8,1 % ($0,310 \rightarrow 0,335 \text{ W/m}^2\text{K}$) im Jahresmittel steigt.

Da die ÖNORM 8110-2 für eindimensionale Bauteilbetrachtungen ausgelegt ist, kann angenommen werden, dass der Wärmestrom ausschließlich im eindimensionalen Bereich betrachtet werden sollte. Jedoch ist zu definieren, was die Ausgangslage in Hinsicht auf die Erhöhung darstellt. Da das Beurteilungskriterium für das detaillierte Verfahren gilt, sollte die feuchte- und temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit berücksichtigt werden. Die trockene Wärmeleitfähigkeit bei Normmesstemperatur im Labor wird praktisch nie eingehalten. Wäre also der Wärmestrom, berechnet mittels Bemessungswerten lt. Datenblättern, die Ausgangslage zur Beurteilung, dann würde die Simulation mittels feuchte- und temperaturabhängiger Wärmeleitfähigkeit den Nachweis erschweren, ohne dass Veränderungen an der Bestandskonstruktion vorgenommen worden wären.

Mit Hilfe der ermittelten Lambdawerte konnte eine thermische Berechnung durchgeführt werden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 33 dargestellt. Betrachtet wurden einerseits der Bestand und andererseits auch die Innendämmvarianten. Es wurde zwischen den Wärmeleitfähigkeiten lt. den Datenblättern bzw. beim Ziegel lt. trockener Wärmeleitfähigkeit bei $20 \text{ }^\circ\text{C}$ und den feuchte- und temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeiten für die Bereiche lt. Abbildung 80 unterschieden. Als Randbedingung dienten die Mittelwerte aus dem Februar 2018, da diese Werte ähnlich dem Normklima sind und damit die Ergebnisse gut vergleichbar sind. Die Außentemperatur beträgt $-0,8 \text{ }^\circ\text{C}$ bei 76 % relativer Luftfeuchte, für das Untergeschoß beträgt die Innenraumtemperatur $7,7 \text{ }^\circ\text{C}$ bei 63 % und für das Erdgeschoß $20,4 \text{ }^\circ\text{C}$ und 45 %. Die niedrigste Innenoberflächentemperatur, bei der stationären Betrachtung, liegt bei $16,1 \text{ }^\circ\text{C}$ bei der Variante mit der Aerogel Innendämmung. Somit ist diese um $0,7 \text{ }^\circ\text{C}$ niedriger als die Bestandsvariante. Der hohe Wassergehalt in der Dämmung des Fußbodenaufbaus bewirkt die sehr hohe Wärmeleitfähigkeit. Damit verschlechtert sich die Situation im zweidimensionalen Kantenbereich des Fußbodenaufbaus, verglichen mit der feuchteunempfindlichen Schüttung des Bestandes, bei der keine Dämmung montiert ist.

Anhand der Wärmestromdichte lässt sich erkennen, dass bei allen Varianten eine Verbesserung gegenüber dem Bestand stattfindet. Jedoch verschlechtern sich die Ergebnisse der Wärmebrückenberechnung für jene Varianten, welche die feuchte- und temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeiten berücksichtigen. Die Differenz bei der Variante mit der Aerogel Dämmung beträgt ca. 30 % ($\Delta = -40,8 \% \rightarrow -10,7 \%$) und bei der Variante mit Zellulose ca. 7 % ($\Delta = -37,1 \% \rightarrow -30,1 \%$). Die feuchte- und temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeiten wirken sich bei so stark feuchtebelasteten Bereichen also maßgeblich aus.

Tabelle 33 Innenoberflächentemperaturen und Wärmestromdichte im Sockelbereich

	Minimum der Innen- oberflächentemperatur	Wärmestrom- dichte	Δ zu Bestand
	[°C]	[W/m ²]	[%]
Bestand	16,8	26,184	-
Aerogel: λ lt. Datenblatt	18,7	15,494	-40,8
Aerogel: λ lt. Simulation	16,1	23,382	-10,7
Zellulose: λ lt. Datenblatt	18,5	16,471	-37,1
Zellulose: λ lt. Simulation	18,1	18,311	-30,1

6.6 Energieverbrauch

Mit Hilfe der Simulationen zur feuchte- und temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeit (siehe Kapitel 6.5) konnten mittlere U-Werte für die Erdgeschoß-Außenwand mit einer Innenabmessung von 3,30 m Höhe und somit auch die Differenz gegenüber dem stationären U-Wert erstellt werden. Für die Bestandswand ergibt sich somit ein U-Wert von 0,598 W/m²K (0,576 W/m²K \rightarrow +3,8 %), für die Aerogel Variante wurden 0,361 W/m²K (0,279 W/m²K \rightarrow +29,4 %) und für die Zellulose Variante 0,335 W/m²K (0,310 W/m²K \rightarrow +8,1 %) errechnet. Diese U-Werte stellen nur Mittelwerte dar, und werden nur die Wintermonate (November bis April) betrachtet, dann ergeben sich noch höhere U-Werte. Für die Bestandswand ergibt sich ein U-Wert von 0,609 W/m²K (0,576 W/m²K \rightarrow +5,8 %), für die Aerogel Variante wurden 0,369 W/m²K (0,279 W/m²K \rightarrow +32,4 %) und für die Zellulose Variante 0,340 W/m²K (0,310 W/m²K \rightarrow +9,6 %) errechnet. Weiter befindet sich der betrachtete Sockelbereich mit der fertigen Fußbodenoberkante im Innenbereich ca. 77 cm oberhalb der Gehsteigkante. Wenn sich diese Höhe vermindert, dann steigt die Feuchtigkeit höher auf und die Wärmeleitfähigkeit des Außenwandbereiches wird erhöht und umgekehrt. Diese U-Wert Angaben sind natürlich auch maßgeblich von den Materialparametern abhängig und können stark variieren. Somit bleibt festzuhalten, dass die Ergebnisse immer in Relation zur vorliegenden Aufgabenstellung adaptiert werden müssen.

Mit den angepassten Parametern aus den Simulationen wurden Energieausweise für sämtliche Varianten mit und ohne Berücksichtigung der feuchte- und temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeiten erstellt. Für die Erdgeschoßaußenwand wurde die mittlere Wärmeleitfähigkeit aus Kapitel 6.5.2 und für die Wände der Obergeschoße jene für den eindimensionalen Bereich aus Kapitel 6.5.1 verwendet. Die Ergebnisse samt Differenzen sind in Tabelle 34 dargestellt.

Tabelle 34 Energieausweisergebnisse im Vergleich bei Anwendung unterschiedlicher Wärmeleitfähigkeiten

Energieausweise	HWB _{Ref,SK}		EEB _{SK}		PEB _{SK}		CO _{2eq,SK}		f _{GEE, SK}	
	[kWh/m ² a]		[kWh/m ² a]		[kWh/m ² a]		[kWh/m ² a]		[-]	
Abrechnung	-		58,28		-		-		-	
Bestand λ_{trocken}	99,4	C	155,8	240,7	D	44,4	D	1,28	C	
Bestand λ_{f+t abhängig}	100,7	D	157,1	242,7	D	44,8	D	1,29	C	
Δ λ_{trocken} zu λ_{f+t abhängig}	1,31%	-	0,83%	0,83%	-	0,90%	-	0,78%	-	
Aerogel λ_{trocken}	75,8	C	132,6	205,7	C	37,3	C	1,09	C	
Aerogel λ_{f+t abhängig}	79,7	C	136,3	211,3	C	38,4	C	1,12	C	
Δ λ_{trocken} zu λ_{f+t abhängig}	5,15%	-	2,79%	2,72%	-	2,95%	-	2,75%	-	
Zellulose λ_{trocken}	77,7	C	134,4	208,6	C	37,8	C	1,10	C	
Zellulose λ_{f+t abhängig}	79,3	C	136,0	210,9	C	38,3	C	1,11	C	
Δ λ_{trocken} zu λ_{f+t abhängig}	2,06%	-	1,19%	1,10%	-	1,32%	-	0,91%	-	

Allgemein sind die Differenzen sehr gering, obwohl die Außenwandfläche des Erdgeschoßes ca. 19 % der gesamten Gebäudehüllfläche ausmacht. Jedoch sind die Transmissionswärmeverluste beim Energieausweis nur ein Teil der Berechnung und somit wird der Anteil wieder relativiert. Der größte Unterschied besteht bei der Variante mit Aerogel Innendämmung mit über 5 %, wodurch sie auch einen höheren Energiebedarf als die Zellulose Variante hat. Die Ergebnisse sämtlicher Energieausweise befinden sich in den Klassen C und D lt. OIB 6 [52].

Wie in Kapitel 3.1 beschrieben, ist jedoch die große Abweichung von ca. 188 % im Mittel der errechneten Energieausweiskennzahlen zum tatsächlichen Verbrauch zu berücksichtigen und somit sind die Zahlen in Frage zu stellen. Daher wurde mit Hilfe des Verhältnisses vom Bestandsenergieausweis zu den Sanierungsvarianten die Verbesserung des realen Verbrauchs errechnet. Ohne Berücksichtigung der feuchte- und temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeit erhält man für den Endenergiebedarf der Aerogel Sanierungsvariante 49,60 kWh/m²a und für die Zellulose Version 50,27 kWh/m²a. Mit Berücksichtigung der adaptierten Wärmeleitfähigkeiten ergeben sich 50,56 kWh/m²a (+1,94 %) und 50,45 kWh/m²a (+0,35 %). Durch den geringeren realen Verbrauch werden auch die Auswirkungen noch geringer.

7 Zusammenfassung, Diskussion und Ausblick

Gründerzeitgebäude ohne Abdichtungsmaßnahmen machen zwischen 8 % und 9 % des Gebäudebestandes in den zwei größten Städten Österreichs aus. Mittels weniger Zentimeter Innendämmung können sogar bessere U-Werte erreicht werden, als es beim gültigen Neubaustandard in Österreich gefordert wird. Die Erforschung der Auswirkungen des Wassergehaltes in der Sockelbereichszone auf die Bestands- und Sanierungsmaterialien, die diesbezügliche Abhängigkeit der feuchte- und temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeiten der Materialien und die Möglichkeiten und Grenzen der mehrdimensionalen, instationären, hygrothermischen Simulation stellen das Ziel der gegenständlichen Dissertation dar.

7.1 Ergebnisse aus hochbautechnischer Gesamtsicht

Anhand von statistischen Erhebungen wurde das große Sanierungspotential des Gebäudebestandes aus den Baujahren vor 1945 aufgezeigt. Es konnte gezeigt werden, dass Dämmmaßnahmen, deren Erhöhung des Wärmedurchgangswiderstandes unter $2,0 \text{ m}^2\text{K/W}$ bleiben und somit keine hygrothermische Simulation, sondern nur einen vereinfachten Nachweis erfordern, meist vollkommen ausreichend sind. Die Oberflächentemperatur wird dahingehend angehoben, dass Schimmel- und Oberflächenkondensationsprobleme verhindert werden und dennoch keine hygrothermischen Probleme im Bauteilinneren entstehen. Gleichzeitig konnte nachgewiesen werden, dass der Einflussbereich von ungedämmten Außenwänden mit niedrigen Oberflächentemperaturen über 20 % der Nutzfläche betragen kann. Beispielsweise können Inneneckbereiche von zwei Außenmauern Kälteseen im Fußbodenbereich verursachen und die Nutzung des Innenraumes einschränken. Die Innendämmung hebt die Oberflächentemperatur auf knapp unter 20 °C und somit sind die Räume vielseitiger nutzbar und gleichmäßig behaglich.

Die Materialkosten von Innendämmungen mit geringen Wärmeleitfähigkeiten ($\lambda \leq 0,025 \text{ W/mK}$) sind bis zu 5-mal höher und somit unverhältnismäßig gegenüber jenen, mit mittleren und höheren Wärmeleitfähigkeiten. Der Verlust der Nutzfläche durch die Montage der Innendämmsysteme wurde errechnet und ergibt für ein gesamtes Gebäude $4,1 \text{ m}^2$ bis $16,5 \text{ m}^2$ bei Dämmdicken bis maximal 10 cm. Für eine durchschnittliche Nutzfläche von ca. 1140 m^2 bleiben die Flächenverluste somit unter 1,5 %. Das jährliche Einsparungspotential der Heizkosten ist stark von den vorgenommenen Sanierungsmaßnahmen und der vorhandenen Heizungsart und den damit verbundenen Kosten abhängig. Die Einsparungen pro Gebäude und Jahr reichen von ca. 500 Euro bis 6.600 Euro jährlich.

Im Zusammenhang mit dem Verlust auf speicherwirksame Masse im Innenbereich und der damit verbundenen sommerlichen Überwärmung sind die Auswirkungen der Innendämmmaßnahmen ohne Belüftungsmaßnahmen in den kühleren Nachtstunden als äußerst negativ anzusehen. Da die Überhitzung jedoch ohne Belüftungsmaßnahmen auch ohne die Innendämmmaßnahmen zu Temperaturen jenseits der 30 °C Grenze reichen, ist dieser Vergleich nicht maßgeblich. Bei Berücksichtigung der Belüftungsmaßnahmen ergeben sich keine maßgeblichen Unterschiede für Wohngebäude mit Nachtlüftung. Für Bürogebäude ist es stark vom korrekten Lüftungsverhalten der Nutzer abhängig, jedoch nicht von den Sanierungsmaßnahmen mit Innendämmungen.

Innendämmungen in Gründerzeitgebäuden, welche meist Außenwände aus Normalformatziegelmauerwerk mit Dicken von 50 cm bis über 100 cm aufweisen, haben keine negativen Auswirkungen auf den Schallschutz. Sie können jedoch für akustische Verbesserungsmaßnahmen herangezogen werden.

7.2 Messergebnisse

In einem 1850 erbauten Gründerzeitgebäude wurden zwei verschiedene diffusionsoffene, kapillaraktive Innendämmsysteme im Erdgeschoß sowie 25 Feuchte- und Temperatursensoren montiert. Zusätzlich wurde ein Teil des gemauerten Gewölbes an der Unterseite zwischen Erd- und Untergeschoß mit einer Dämmung versehen. Über einen Zeitraum von drei Jahren wurden das Innenklima vom Erd- und Kellergeschoß, das Außenklima, die Feuchtigkeit und die Temperatur in den betroffenen Bauteilen gemessen. Über entnommene Materialproben konnten die erforderlichen hygrothermischen Parameter bestimmt werden, die für Simulationen notwendig sind. Die Messungen der Materialparameter, insbesondere der feuchte- und temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeit der Ziegel, zeigten große Abweichungen in Abhängigkeit von den vorgefundenen Ziegeln auf nur wenigen Metern. Die Messungen der Ziegel aus dem Untergeschoß ergaben im Mittel eine um $0,35 \text{ W/mK}$ höhere feuchteabhängige Wärmeleitfähigkeit als jene aus dem Erdgeschoß. Die Rohdichte der Ziegel streute zwischen 1554 kg/m^3 und 2138 kg/m^3 , die Sättigungsgrade zwischen $1,50 \%$ bis $47,50 \%$ und die Porosität zwischen $0,20 \text{ m}^3/\text{m}^3$ und $0,42 \text{ m}^3/\text{m}^3$. Die Ziegelmauerwerke der Gründerzeitgebäude sind durch die nicht maschinelle Herstellung der Baustoffe somit als äußerst inhomogen anzusehen.

Die beiden angebrachten Innendämmsysteme sind einerseits eine Aerogel Innendämmung mit einer Dicke von 5 cm und einer Wärmeleitfähigkeit von $\lambda = 0,027 \text{ W/mK}$ und andererseits eine Aufsprühzellulose Innendämmung mit einer Dicke von 10 cm und einer Wärmeleitfähigkeit von $\lambda = 0,067 \text{ W/mK}$. Die Gewölbeunterseitendämmung wurde im Teilbereich der Zellulose Innendämmung im Erdgeschoß ebenfalls mit 10 cm Aufsprühzellulose ausgestattet. Die eingebauten Sensoren lieferten Messergebnisse für den eindimensionalen Bereich im Mauerwerk und im Gewölbe und für den zweidimensionalen Bereich in der Kante beim Gewölbeauflager. Diese Zone wird durch die Dampfdiffusion aus Unter- und Erdgeschoß, die aufsteigende Feuchtigkeit aus dem Erdreich, den Schlagregen und den zusätzlichen Spritzwasserbereich besonders stark belastet.

Die Messergebnisse zeigten ein wesentlich besseres Austrocknungsverhalten bei der Zellulose als bei der Aerogel Innendämmung. Auf Grund der gemessenen Temperaturen weisen aber beide Varianten eine gute Dämmwirkung auf. Für den zweidimensionalen Kantenbereich des Fußbodenaufbaus wurde auf der kalten Seite der Innendämmung und im Mauerwerk eine relative Luftfeuchte von 100 % festgestellt. Auf der warmen Seite der Innendämmung wurde ein unübliches Austrocknungsverhalten in den Wintermonaten gemessen. Das konnte auf die verringerte relative Luftfeuchtigkeit in den Innenräumen und auf den geringeren Niederschlag in dieser Zeit im Außenbereich zurückgeführt werden. Somit wird die gesamte Fassade, der Spritzwasserbereich und auch die Feuchtebelastung des Erdreichs weniger durchfeuchtet und die aufsteigende Feuchtebelastung verringert sich, wodurch ein Austrocknen ermöglicht wird.

Die vorgenommenen Salzgehaltsuntersuchungen ergaben, dass durch die jahrelange hohe Feuchtebelastung besonders im zweidimensionalen Bereich stark bedenkliche Belastungen vorhanden sind. Die Ergebnisse der eindimensionalen Bereiche der Erdgeschoßmauer und des Gewölbes korrelieren mit den Ergebnissen der Feuchtemessungen und sind weniger feuchtigkeitsbelastet.

7.3 Simulationsergebnisse

Parallel zu den Messauswertungen wurden insbesondere die instationären, hygrothermischen Simulationen ein- und zweidimensional mit dem Programm DELPHIN 6.1 durchgeführt, sowie eindimensionale Simulationen mit WUFI Pro 6.4. Es zeigte sich, dass die Auswahl der bestmöglich übereinstimmenden Datensätze aus Messung und Programmdatenbanken ohne Adaptierungen zu sehr großen Abweichungen führen. So können zwar die zur Auswahl bestimmten Parameter sehr gut übereinstimmen, jedoch weichen dann die restlichen Parameter weit voneinander ab. Verdeutlicht wurde das im Zusammenhang mit der feuchte- und temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeit der Ziegel. Bei gut übereinstimmender Rohdichte, Porosität und trockener Wärmeleitfähigkeit, streuten die Modelle der feuchte- und temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeit der Simulationsprogramme weit.

Es wurde auch festgestellt, dass drei ausgewählte Datensätze für Ziegel, welche auf Grund ihres gemeinsamen Ursprunges in einem Forschungsprojekt sowohl in der Software DELPHIN als auch in WUFI zu finden sind, dennoch nicht die gleichen Daten verwenden. Somit ergeben sich bei der Auswahl des gleichen, gemessenen Ziegels je nach Programm unterschiedliche Simulationsergebnisse. Die Unterschiede zwischen der Feuchtespeicher- und Flüssigwassertransportfunktion, welche in DELPHIN vom Kapillardruck und in WUFI von der relativen Luftfeuchte abhängen, wurden aufgezeigt. Diese Unterschiede wirkten sich auf den Wassergehalt und in weiterer Folge auf die feuchte- und temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit aus. Diesbezüglich sind aber auch die Vorgehensweisen der Ermittlung der Wärmeleitfähigkeiten der Programme unterschiedlich. Sie haben verschiedene Formeln und auch Modelle zur standardmäßigen Ermittlung der abhängigen Wärmeleitfähigkeit hinterlegt. Die beiden Simulationsprogramme stimmen in den Ergebnissen der Temperatur und der relativen Luftfeuchte gut miteinander überein. Die Gesamtwassergehalte weichen jedoch weit voneinander ab und auch die Wassergehalte in den einzelnen Schichten, die damit verbundene Sättigung und auch die feuchteabhängige Wärmeleitfähigkeit weisen maßgebliche Differenzen auf.

Bereits in den eindimensionalen Simulationen, ohne aufsteigende Feuchtigkeit, stellte sich heraus, dass unter Berücksichtigung der Abhängigkeit von Feuchtigkeit und Temperatur die berechnete Wärmeleitfähigkeit der einzelnen Materialien um bis zu 12 % ansteigt.

Die Bemessungswerte der Wärmeleitfähigkeit aus der ÖNORM B 8110-7 [90] wurden mit den Messergebnissen und der Wärmeleitfähigkeitsentwicklung aus den Simulationen verglichen. Es zeigte sich, dass die Normwerte ganzjährig überschritten werden. Die Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von Feuchtigkeit und Temperatur ist somit maßgeblich für die wärmetechnischen Eigenschaften von Bauteilen.

Für die zweidimensionale Simulation des Sockelbereiches mit allen Randparametern wurde eine Modellbildung in drei Teilbereichen entwickelt. Als erster Schritt wurde das Erdreich modelliert, danach der Untergeschoßbereich und schlussendlich der Sockelbereich samt drei verschiedener Klimarandbedingungen und der aufsteigenden Feuchtigkeit aus den

vorangegangenen Teilbereichen. Um den Feuchtegehalt aus dem Erdreichmodell in das Erdgeschoßmodell implementieren zu können, wurde der ausgegebene Kapillardruck in den Schnittbereichen in das darauffolgende Modell als Randbedingung übergeben. Dabei stellte sich heraus, dass die relative Luftfeuchte hierbei als nicht geeignet anzusehen ist und die Modellierung nur über den Kapillardruck funktioniert, da der Wassergehalt sonst nicht realitätsgetreu abgebildet werden kann.

Die Ergebnisse aus den Modellierungen des Erdreichmodells ergaben, dass für instationäre, hygrothermische Simulationen die Abmessungen nach ÖNORM EN ISO 10211 [20] viel zu groß sind. Die Aufteilung in den separaten Teilbereich des Erdreiches ermöglichte eine eindimensionale Breitenmodellierung. Die Tiefenmodellierung erfolgte nach jeweiligem Erfordernis, unabhängig von der Breite. Im gegenständlichen Projekt konnte damit eine Tiefe über 22 m berechnet werden. Für den Untergeschoßbereich sind jedoch nur die ersten 2,5 m tatsächlich maßgeblich.

Die Untersuchungen der Modellierung des Ziegelmauerwerks mit und ohne Fugen ergab, dass die Erstellung der Simulationen mit einem homogenen Ziegelmaterial ohne Fugenmodellierung, zu vergleichbaren Ergebnissen führt und dabei große Rechenkapazitäten einspart.

Um die Abmessung der zu simulierenden Modellhöhe ermitteln zu können, wird eine vereinfachte eindimensionale Vorsimulation empfohlen. Dadurch kann abgeschätzt werden, wie hoch die Feuchtigkeit im umfangreichen, zweidimensionalen Modell aufsteigen wird.

Die Auswertungen der Simulationsergebnisse zeigte, dass durch den hohen Wassergehalt in der Konstruktion sehr viele Parameter und Randbedingungen nebensächlich werden. In keiner Variante der Simulationen wurde eine Gefährdung durch Schimmel oder Oberflächenkondensat ermittelt und das deckt sich auch mit den Messungen am realen Forschungsobjekt. Es zeigte sich auch, dass durch die hohe Feuchtigkeit im kalten Bereich der Innendämmung im Fußbodenbereich die Dämmung nicht als sinnvoll anzusehen ist. Einerseits sprechen die enorm hohen Kosten gegen eine nachträgliche Einbringung in den Fußbodenaufbau. Andererseits ist es aus bauphysikalischer Sicht auch nicht ratsam. Die Wärmeleitfähigkeit des Ziegels steigt je nach Bereich um bis zu 86 %. Oberhalb der Fußbodenkonstruktion steigt die Wärmeleitfähigkeit der Aerogel Innendämmung von 0,027 W/mK auf bis zu 0,091 W/mK und jene der Zellulose von 0,067 W/mK auf 0,073 W/mK. Die Dämmwirkung ist trotz der Durchfeuchtung auch im Fußbodenbereich vorhanden. Dies belegen die gemessenen Temperaturen. Jedoch können die erhöhten Feuchtegehalte zu dauerhaften Schäden führen. Das Feuchtespeichervermögen des Bestandsziegelmauerwerks ist sehr hoch, was auch die Messungen im Untergeschoß zeigen. Aber durch die Montage der Innendämmungen erfolgt eine Verminderung der Temperatur und durch die verminderte Austrocknung auch ein Anstieg der Feuchtigkeit hinter der Dämmung im Mauerwerk. Dies kann in weiterer Folge auch einen Anstieg der Salzbelastung verursachen und ebenfalls zu Schäden führen. Diesbezüglich müssen jedenfalls die langfristigen Auswirkungen weiter erforscht werden.

Ein erhöhter Wassergehalt in den letzten 0,50 cm auf der kalten Seite der Innendämmungen führt zu stark erhöhten Wärmeleitfähigkeiten. Bei der dünnen Aerogel Variante macht dies 10 % der Dämmung aus, sodass die Wärmeleitfähigkeit prozentuell gesehen stark angehoben wird. Insgesamt zeigt diese dennoch einen besseren Schutz vor Transmissionswärmeverlusten als die Zellulose Dämmung.

Bei Umrechnung der Ergebnisse auf eine eindimensionale Betrachtung erhöhte sich der U-Wert im Bestand um 3,8 %, bei der Aerogel Dämmvariante um 29,4 % und bei der Zellulose Dämmvariante um 8,1 % im Jahresmittel. Für die Wintermonate November bis April errechnete sich die Erhöhung des U-Wertes für den Bestand auf 5,8 %, bei der Aerogel Dämmvariante auf 32,4 % und bei der Zellulose Dämmvariante auf 9,6 %.

Die Berücksichtigung der feuchte- und temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeiten zeigte für den stark feuchtebelasteten Sockelbereich, besonders in Hinsicht auf eine Wärmebrückenberechnung eine Differenz von bis zu 30 % bei den Ergebnissen der Wärmestromdichte. Hingegen sind die Auswirkungen bei der Berechnung des Endenergiebedarfs sehr gering und bleiben unter 3 %.

7.4 Diskussion

Die Ergebnisse von dieser Dissertation sowie vorangegangener Forschungsarbeiten zeigen, dass für instationäre, hygrothermische Simulationen von alltäglichen, hochbautechnischen und bauphysikalischen Problemstellungen ein sehr hoher finanzieller und zeitlicher Aufwand erbracht werden muss, um den tatsächlichen Messergebnissen entsprechende Simulationsergebnisse zu erhalten. Die Vielfalt der Einflüsse und der Möglichkeiten zur Einstellung in den Simulationsprogrammen, deren unterschiedliche Rechenarten und die daraus folgenden Ergebnisse zeigen, dass die Simulationen nur von ausgebildeten Fachleuten durchgeführt werden sollten.

Die Abschätzungen mittels vereinfachten Modellen, wie sie in der ÖNORM 8110-2:2003 [84] oder in der ÖNORM EN ISO 13788 [18] dargestellt sind, sollten für die Praxis beibehalten werden. Die immer benutzerfreundlicheren Programme und die damit verbundene Entwicklung zur leichtfertigen Anwendung von Simulationen, ist als äußerst kritisch zu sehen. Die Praxis zeigt, dass verstärkt Bauteilaufbauten, die mit den vereinfachten Modellen nicht nachweisbar sind, mittels einer eindimensionalen, instationären, hygrothermischen Simulation nachgewiesen werden. Jedoch kann das Ergebnis, auf Grund von fehlendem Fachwissen bei der Bedienung des Programmes oder der Ergebnisinterpretation falsch ausgelegt werden.

Im Gegensatz zu den vereinfachten, standardisierten Rechenmodellen können Sicherheitsfaktoren bei den Simulationen durch den Benutzer entfernt werden und dies sogar unbeabsichtigt. Problemstellungen werden mittels eindimensionaler Simulation nachgewiesen und die zwei- und dreidimensionalen Bereiche, die als noch kritischer zu sehen sind, werden nicht berücksichtigt. Mehrdimensionale, instationäre, hygrothermische Simulationen sind jedoch so rechenintensiv, dass diese meist nicht zur Anwendung kommen. Die gegenständliche Dissertation zeigt, dass die Ergebnisse aus eindimensionalen Bereichen weit von jenen in mehrdimensionalen Bereichen abweichen können. Die Modellierungen stellen meist auch eine idealisierte Realität dar, sodass sich Ausführungsfehler in der Praxis verstärkt negativ auswirken.

7.5 Ausblick

Die Schlagregenmodelle der Simulationsprogramme sind überschlägige Annahmen zur Berücksichtigung des tatsächlichen, anhaftenden Schlagregenanteils für betrachtete Detailabbildungen. Erfahrungswerte für die Anhaftung des tatsächlichen Wasseranteils im Spritzwasserbereich, also den ersten 30 cm über der Geländeoberkante, sind nicht

gegeben. Somit ist weitere Forschung mit Messungen der tatsächlich, anhaftenden Schlagregenmenge an verschiedenen Stellen des Gebäudes notwendig. Ein möglicher Ansatz zur korrekten Annahme der Schlagregenbelastung für die unterschiedlichen Gebäudebereiche wäre, wie bei der Berechnung des Heizwärme- bzw. des Kühlbedarfs lt. ÖNORM B 8110-6-1 [76], mittels Gewichtungsfaktoren auch die Umgebung samt Bepflanzung (hohe Bäume) bzw. Gebäuden einzubeziehen.

Die Salzgehaltsuntersuchungen sollten nach einigen Jahren, wenn ein eingeschwungener Zustand erreicht ist, wiederholt werden, um die Differenzen zum Zustand vor der Innendämmungsmontage beurteilen zu können.

Der Bereich der Innendämmung im Fußbodenaufbau könnte unter Verwendung von feuchteunempfindlichen Materialien (z.B. Schaumglas) untersucht werden. Dabei sollte die Auswirkung der verdrängten Feuchtigkeit gemessen werden. Aus der Praxis ist bekannt, dass z.B. durch die Anbringung von Fliesen und einer darunterliegenden Abdichtung die Feuchtigkeit über mehrere Meter nach oben [94] verdrängt werden kann. Wie oben beschrieben, wäre diese Variante aber nur wirtschaftlich, wenn der Fußbodenaufbau durch den bautechnischen Ablauf ohnehin entfernt wird und/oder der Kellerbereich ebenfalls mit einer feuchteunempfindlichen Innendämmung ausgestattet wird.

Da die Ergebnisse dieser Dissertation mit bestimmten Rand-, Übergangsbedingungen und Materialparametern erzielt wurden, können diese nur bedingt auf andere Innendämmungsvarianten übertragen werden. Daher sind Forschungen mit anderen Materialien notwendig.

Die Betrachtungen sollten auf den dreidimensionalen Bereich ausgeweitet werden. Hier werden noch höhere Wassergehalte auf Grund der geometrischen Wärmebrücke und der höheren Wasserbelastung vom Außenbereich bei geringerer, warmer Innenoberfläche erwartet.

Die feuchte- und temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeiten sollten für die Verwendung von Materialien in instationären, hygrothermischen Simulationen immer angewendet werden, da die Berechnungsergebnisse andernfalls nicht repräsentativ sind. Für vereinfachte Berechnungen sollten die Umrechnungsfaktoren in Anlehnung an die ÖNORM EN ISO 10456 [80] für höhere Feuchten ermittelt werden. Somit kann ein vereinfachtes Modell geschaffen werden, mit dem eine schnellere und realistischere Abschätzung der tatsächlichen Dämmwirkung erfolgen kann.

Die Kombination von feuchte- und temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeiten ist bei wenigen Materialien für die gesamte Bandbreite der im Bauwesen vorkommenden Temperaturen und Feuchtigkeiten erforscht. Ein möglicher Lösungsvorschlag wäre die Messung relevanter Materialien bei gleichbleibender Temperatur und veränderlicher Feuchtigkeit und vice versa. Die Implementierung der Messkurven in die Programme würde die tatsächliche Wärmeleitfähigkeit besser widerspiegeln.

Die Beurteilung der Erhöhung des Wärmestroms nach ÖNORM B 8110-2 [17] sollte exakter definiert werden. Es ist zu beschreiben, was die Ausgangslage in Hinsicht auf die Erhöhung des Wärmestroms darstellt. Da das Beurteilungskriterium für das detaillierte Verfahren gilt, sollte die feuchte- und temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit berücksichtigt werden. Die trockene Wärmeleitfähigkeit bei Messtemperatur im Labor wird praktisch nie eingehalten.

Literaturverzeichnis

- [1] Stadt Wien: Bevölkerungsprognose - Statistiken, <https://www.wien.gv.at/statistik/bevoelkerung/prognose> [Zugriff am: 08.02.2017].
- [2] Stadt Graz: Bevölkerungsprognose 2015–2034 für die Landeshauptstadt Graz, Graz 2015.
- [3] Deutsche Handelskammer in Österreich: Zielmarktanalyse Energieeffizienz in der Altbausanierung Österreich – Mit Profilen der Marktakteure, Wien 2013.
- [4] OIB-Leitfaden OIB-Richtlinie 6 Energietechnisches Verhalten von Gebäuden. 2019.
- [5] Richtlinie 2010/31/EU des Europäischen Parlaments und des Rates über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden, 2010.
- [6] Land Steiermark: Die Zukunft des Wohnens 2016.
- [7] *Oberhuber, A.; Denk, D.*: Zahlen, Daten, Fakten zu Wohnungspolitik und Wohnungswirtschaft in Österreich – Endbericht, Wien 2014.
- [8] Statistik Austria: Bestand an Gebäuden und Wohnungen, http://www.statistik.at/web_de/statistiken/menschen_und_gesellschaft/wohnen/wohnungs_und_gebaeudebestand/index.html [Zugriff am: 09.01.2021].
- [9] Statistik Austria: Baukulturelles Erbe, http://www.statistik.at/web_de/statistiken/menschen_und_gesellschaft/bildung_und_kultur/kultur/baukulturelles_erbe/020659.html [Zugriff am: 08.02.2017].
- [10] *Kettner, C.; Fritz, O.; Köppl, A.*: Volkswirtschaftliche Effekte von Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz und des Anteils erneuerbarer Energien in den österreichischen Klima- und Energiemodellregionen 2012.
- [11] WTA-Merkblatt 6-2-14:2014 Simulation wärme- und feuchtetechnischer Prozesse. 2014.
- [12] ÖNORM B 3355 Trockenlegung von feuchtem Mauerwerk - Bauwerksdiagnose, Planungsgrundlagen, Ausführungen und Überwachung. 03.2017.
- [13] WTA-Merkblatt 6-5-14:2014 Innendämmung nach WTA II - Nachweis von Innendämmsystemen mittels numerischer Berechnungsverfahren. 2014.
- [14] *Mandl, M.; Stuhlbacher, A.; Koinigg, M. et al.*: Grundlegende Untersuchungen zu aufgespritzten Zellulosedämmschichten für Außenfassaden. BMVIT, Graz 2001.
- [15] *Kautsch, P.; Hengsberger, H.; Lackner, W.*: Zellulose-Innendämmung ohne Dampfsperre 2006.
- [16] *Kautsch, P.; Häupl, P.; Hengsberger, H. et al.*: Aufgespritzte und verputzte Zellulose-Kompaktabsorber – Untersuchungen zur grundsätzlichen Eignung aufgespritzter und verputzter, hygrothermisch aktiver Zellulose-Schallabsorber, Graz 2006.
- [17] ÖNORM B 8110-2 Wärmeschutz im Hochbau - Teil 2: Wasserdampfdiffusion, -konvektion und Kondensationsschutz. 01.2020.
- [18] ÖNORM EN ISO 13788 Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen - Raumseitige Oberflächentemperatur zur Vermeidung kritischer Oberflächenfeuchte und Tauwasserbildung im Bauteilinneren - Berechnungsverfahren. 04.2013.
- [19] ÖNORM EN 15026 Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen - Bewertung der Feuchteübertragung durch numerische Simulation. 06.2007.
- [20] ÖNORM EN ISO 10211 Wärmebrücken im Hochbau - Wärmeströme und Oberflächentemperaturen - Detaillierte Berechnungen. 02.2018.
- [21] ÖNORM EN ISO 13370 Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden - Wärmeübertragung über das Erdreich - Berechnungsverfahren. 02.2018.
- [22] DIN 4108-3 Wärmeschutz und Energie-Einsparung - Klimabedingter Feuchteschutz. 10.2018.
- [23] *Grunewald, J.* Prof.-Dr. Ing.: Diffusiver und konvektiver Stoff- und Energietransport in kapillarporösen Baustoffen. Dresden, Technische Universität Dresden, Dissertation, 1997.
- [24] Bauklimatik Dresden Software GmbH: Delphin Hilfe 2016.

- [25] *Künzel, H.M.*: Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten. Stuttgart, Stuttgart, Dissertation, 1994.
- [26] Das Fraunhofer Institut für Bauphysik IBP: WUFI Hilfe 2021.
- [27] *Sedlbauer, K.; Künzel, H.M.*: Feuchteschutzbeurteilung durch hygrothermische Bauteilsimulation 2015.
- [28] *Scheffler, G.*: Validation of hygrothermal material modelling under consideration of the hysteresis of moisture storage – Vailidierung hygrothermischer Materialmodellierung unter Berücksichtigung der Hysterese der Feuchtespeicherung. Dresden, Technische Universität Dresden, Dissertation, 2008.
- [29] *Viitanen, H.; Ritschkoff, A.-C.*: Mould growth in pine and spruce sapwood in relation to air humidity and temperature, Rapport / Institutionen för Virkeslära Heft 221, Sveriges Lantbruksuniversitet, Uppsala, 1991.
- [30] *Sedlbauer, K.*: Vorhersage von Schimmelpilzbildung auf und in Bauteilen. Stuttgart, Stuttgart, Dissertation, 2001.
- [31] ÖNORM EN ISO 15927-3 Wärme- und feuchteschutztechnisches Verhalten von Gebäuden - Berechnung und Darstellung von Klimadaten - Teil 3: Berechnung des Schlagregenindexes für senkrechte Oberflächen aus stündlichen Wind- und Regendaten (ISO 15927-3:2009). 07.2009.
- [32] ASHRAE Standard: ASHRAE Standard 160 - Criteria for Moisture-Control Design Analysis in Buildings. ASHRAE Standard 2016.
- [33] *Karagiozis, A.; Hadjisophocleous, G.; Cao, S.*: Wind-driven rain distributions on two buildings. In: Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 67-68 (1997), S. 559-572.
- [34] WTA-Merkblatt 6-4-16:2016 Innendämmung nach WTA I Planungsleitfaden. 2016.
- [35] Die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG: 4. COIN-Ausschreibung „Kooperation und Netzwerke“ – IDkonkret - Ganzheitliche Umsetzung des vorhandenen Wissens von Innendämmsystemen in die Praxis und deren gezielte Optimierung, 2010, https://www.ffg.at/sites/default/files/allgemeine_downloads/strukturprogramme/programmdokumente/coinnet4as_idkonkret.pdf [Zugriff am: 05.08.2018].
- [36] *Wegerer, P.; Nackler, J.N.; Bednar, T.*: Measuring the Hygrothermal Performance of an Interior Insulation Made of Woodfibre Boards. In: Energy Procedia 78 (2015), S. 1478-1483.
- [37] *Kautsch, P.; Hengsberger, H.; Ruisinger, U.*: OEKO-ID - Innendämmungen zur thermischen Gebäudeertüchtigung – Untersuchung der Möglichkeiten und Grenzen ökologischer, diffusionsoffener Dämmsysteme, Graz 2013.
- [38] *Ruisinger, U.; Petzold, H.; Grunewald, J. Prof.-Dr. Ing. et al.*: Energetische Bewertung von Gebäuden mit raumseitiger Wärmedämmung aus Calciumsilikat 2010.
- [39] DBZ Redaktion: Leitfaden Innendämmung 2.0, Gütersloh, 2 2015.
- [40] *Geburtig, G. (Hrsg.)*: Innendämmung im Bestand. Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e. V. Fraunhofer IRB-Verl., Stuttgart, 2010.
- [41] Fachverband Innendämmung e. V.: Praxis-Handbuch Innendämmung – Planung - Konstruktion - Details - Beispiele, 2016.
- [42] *Trimmel, G.; Bruckner, N.; Smole, K.*: KA 7 – Kaiserstraße: Innovative Sanierung eines denkmalgeschützten Gründerzeitgebäudes mit Innendämmung, Wien 2014.
- [43] T. Steiner, V. Huemer-Kals, C. Thurner, F. Heisinger, A. Galosi, B. Lipp: IDSolutions – Lösungen für die Sanierung mit Innendämmung im mehrgeschoßigen Gebäudebestand auf Ebene der Nutzungseinheit 2016.
- [44] *Gärtner, G.; Meißner, F.; Söhnchen, A.*: Gebäudemonitoring bei Anwendung von Innendämmung aus mikroporöser Dämmung und Kalziumsilikat. In: Bauphysik 41 (2019), Heft 3, S. 178-184.

- [45] Isocell Presseinformation: Wehrturm aus Zellulose, <https://www.yumpu.com/de/document/read/701178/wehrturm-aus-zellulose-isocell> [Zugriff am: 09.01.2021].
- [46] ÖNORM EN ISO 7730 Ergonomie der thermischen Umgebung - Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit (ISO 7730:2005). 05.2006.
- [47] Grazer Altstadterhaltungsgesetz 2008 – GAEG, 2008.
- [48] Land Steiermark - Amt der Steiermärkischen Landesregierung: Digitaler Atlas Steiermark, <https://www.landesentwicklung.steiermark.at/cms/ziel/141979637/DE/> [Zugriff am: 05.01.2021].
- [49] Stadtvermessungsamt: Altstadtschutzzonen Graz, <https://www.graz.at/cms/ziel/8044336/DE> [Zugriff am: 08.01.2021].
- [50] Hecht, C.: Bauphysikalische Bewertung ausgewählter Sanierungsvarianten unter besonderer Berücksichtigung von Paraffinen und kapillar leitfähigen Dämmstoffen. Wien, Technische Universität Wien, Dissertation, 2001.
- [51] Senemann, L.: Potentialermittlung der Sanierung von Gründerzeitgebäuden mittels Innendämmung. Graz, TU Graz, Masterarbeit, 2021.
- [52] OIB-Richtlinie 6 Energieeinsparung und Wärmeschutz. 2019.
- [53] Passivhaus Institut Darmstadt: Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser Phase III, Protokollband 32: Faktor 4 auch bei sensiblen Altbauten: Passivhauskomponenten + Innendämmung, Darmstadt 2005.
- [54] Kautsch, P.: Bauphysik 1 – Wärmeschutz & Feuchteschutz. TU Graz 2019.
- [55] Institut für Energieforschung: Handbuch für Energieberatung. Institut für Energieforschung, Graz 1994.
- [56] Weber, J.: Energieausweisberechnungsvergleich von Gründerzeitgebäuden mit realen Verbräuchen und fiktiven Sanierungsmaßnahmen. Graz, TU Graz, Bachelorprojekt, 2021. (nicht veröffentlichte Studienarbeit)
- [57] Pitscheider, A.; Hafellner, H.: Vergleich unterschiedlicher Energieausweis - Berechnungsarten mit den realen Verbrauchswerten. In: Bauphysik 43 (2021), Heft 2.
- [58] Worch, A.; Stelzmann, M.: Feuchtetechnisches Verhalten von Innendämmsystemen mit hohen Dämmstoffdicken. In: Bauphysik 41 (2019), Heft 4, S. 193-198.
- [59] Bundesgesetz über die Festsetzung des Richtwertes für die mietrechtliche Normwohnung (Richtwertgesetz - RichtWG), Wien, 2016.
- [60] Bundesgesetz über das Mietrecht (Mietrechtsgesetz – MRG), Wien, 2018.
- [61] Energieinstitut Vorarlberg: Energiepreise im Vergleich. Energieinstitut Vorarlberg, <https://www.energieinstitut.at/buerger/haustechnik-energieversorgung/energiepreise-im-vergleich/> [Zugriff am: 09.01.2021].
- [62] Živković, B.: Sommerliche Überwärmung in Bestandsgebäuden und deren Sanierung (mit Innendämmung). Graz, TU Graz, Masterarbeit, 2019.
- [63] Živković, B.; Hafellner, H.: Sommerliche Überwärmung in Bestandsgebäuden und deren Sanierung mit Innendämmung. TU Wien, Wien Oktober 2019.
- [64] OIB-Richtlinie 5 Schallschutz. 2019.
- [65] ÖNORM EN 772-1 Prüfverfahren für Mauersteine - Teil 1: Bestimmung der Druckfestigkeit. 12.2015.
- [66] ÖNORM B 4008-1 Bewertung der Tragfähigkeit bestehender Tragwerke - Teil 1: Hochbau. 10.2018.
- [67] Holding Graz Services - Straße: Anlagenverzeichnis – Untergeordnete Straße – Stadt Graz Verkehrswegeaufbauten, Graz 2007.
- [68] Ruisinger, U.: Das hygrothermische Verhalten von Balkenköpfen bei innen gedämmten Gebäuden. Graz, TU Graz, Dissertation, 2019.
- [69] ÖNORM M 9490-1 Meteorologische Messungen für Fragen der Luftreinhaltung - Teil 1: Grundlagen zur Durchführung und Auswertung meteorologischer Messungen. 11.2009.

- [70] *Schmidt, P.*: Lastannahmen - Einwirkungen auf Tragwerke – Grundlagen und Anwendung nach EC 1. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2019.
- [71] Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus: Grundwasser Aktuell, <https://ehyd.gv.at> [Zugriff am: 09.01.2021].
- [72] *Muzslay, M.; Oguah, B.*: Bestimmung von Materialparametern bei Gründerzeitgebäuden. Graz, TU Graz, Bachelorprojekt, 2020. (nicht veröffentlichte Studienarbeit)
- [73] *Stindl, F.*: Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit des Wassergehaltes bei verschiedenen Temperaturen. Graz, TU Graz, Bachelorprojekt, 2020. (nicht veröffentlichte Studienarbeit)
- [74] *Jukic, A.*: Salzgehalt im Mauerwerk. Graz, TU Graz, Bachelorprojekt, 2020. (nicht veröffentlichte Studienarbeit)
- [75] *Garrecht, H.*: Feuchtehaushalt von Mauerwerk. In: Mauerwerk-Kalender 2009 34 (2009), 574-615.
- [76] ÖNORM B 8110-6-1 Wärmeschutz im Hochbau - Teil 6-1: Grundlagen und Nachweisverfahren - Heizwärmebedarf und Kühlbedarf. 01.2019.
- [77] *Stöckl, R.*: Hygrothermische instationäre Simulationen einer Aerogel-Innendämmung. Graz, TU Graz, Masterarbeit, 2020.
- [78] *Vorderegger, T.*: Hygrothermische instationäre Simulationen einer Zellulose-Innendämmung. Graz, TU Graz, Masterarbeit, 2020.
- [79] Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie: Materialdatensammlung für die energetische Altbausanierung, www.masea-ensan.de [Zugriff am: 09.01.2021].
- [80] ÖNORM EN ISO 10456 Baustoffe und Bauprodukte - Wärme- und feuchtetechnische Eigenschaften - Tabellierte Bemessungswerte und Verfahren zur Bestimmung der wärmeschutztechnischen Nenn- und Bemessungswerte. 02.2010.
- [81] *Ochs; Stumpp; Mangold et al.*: Bestimmung der feuchte- und temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeit von Dämmstoffen. In: 14. Symposium Thermische Solarenergie (2004).
- [82] *Krus, M.; Kilian, R.; Bichlmair, S. et al.*: Schadensdiagnostik und Bewertung in historischen Gebäuden. In: *Fouad, N.A.* (Hrsg.): Bauphysik Kalender 2012. Wiley InterScience (Online service), Gebäuediagnostik. Ernst & Sohn Verlag, Berlin, 2012, S. 505-558.
- [83] *Edl, L.*: Wärmeleitfähigkeit von Wärmedämmstoffen in Abhängigkeit von Temperatur, Feuchtigkeit und Alterung. Graz, TU Graz, Bachelorprojekt, 2020. (nicht veröffentlichte Studienarbeit)
- [84] ÖNORM B 8110-2 Wärmeschutz im Hochbau - Teil 2: Wasserdampfdiffusion und Kondensationsschutz. 07.2003.
- [85] DIN 4108-2 Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz. 02.2013.
- [86] *Graf, K.*: BauSIM2018 - 7. Deutsch-Österreichische IBPSA-Konferenz : 26.-28. September 2018, Karlsruhe, Germany ; Tagungsband 2018.
- [87] *Dragic, M.*: Modellbildung hygrothermisch, instationärer Simulationen von erdnahen, innengedämmten Bauteilen. Graz, TU Graz, Masterarbeit, 2018.
- [88] *Willems, W.M.; Dinter, S.; Schild, K.*: Vieweg Handbuch Bauphysik Teil 1 – Wärme- und Feuchteschutz, Behaglichkeit, Lüftung. Friedr.Vieweg & Sohn Verlag | GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, Wiesbaden, 2006.
- [89] *Vereecken, E.; Roels, S.*: A comparison of the hygric performance of interior insulation systems – A hot box-cold box experiment. In: *Energy and Buildings* 80 (2014), S. 37-44.
- [90] ÖNORM B 8110-7 Wärmeschutz im Hochbau - Teil 7: Tabellierte wärmeschutztechnische Bemessungswerte. 03.2013.
- [91] *Hejazi, B.; Rodrigues Marques Sakiyama, N.; Frick, J. et al.*: Hygrothermal Simulations Comparative Study: Assessment of Different Materials Using WUFI and DELPHIN Software. In: *Corrado, V.; Fabrizio, E.; Gasparella, A. et al.* (Hrsg.): Proceedings of Building Simulation 2019: 16th Conference of IBPSA, Building Simulation Conference proceedings. IBPSA, Rome, Italy, 2020, S. 4674-4681.

- [92] *Carbonez, K.; Van Den Bossche, N.; Ge, H. et al.*: Comparison between uniform rain loads and point sources to simulate rainwater leakage with commercial HAM-models 2015.
- [93] *Sakiyama, N.; Frick, J.; Garrecht, H.*: Determination of U-values of render systems supposed to weathering. University of Stuttgart 2019.
- [94] *Pittino, P.; Hafellner, H.*: Untersuchung und Sanierung eines feuchten Kellermauerwerks. In: Mauerwerk 23 (2019), Heft 4, S. 232-245.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Gebäude in Österreich nach dem Errichtungsjahr (Stand 2011)) [8].....	2
Abbildung 2 Feuchtigkeitsspeicherfunktionen: links in Abhängigkeit vom Kapillardruck und rechts von der relativen Luftfeuchtigkeit [28]	12
Abbildung 3 Altstadtscutzzonen Ausschnitt Innere Stadt Graz	19
Abbildung 4 Altstadtscutzzonen Ausschnitt Stadt Wien.....	19
Abbildung 5 Die Abhängigkeit des Heizwärmebedarfs von Dämmstärke [53]	21
Abbildung 6 Zusammenhang zwischen Dicke der Dämmung und Energieverbrauch [54]	22
Abbildung 7 Mittelwerte der Berechnungsergebnisse der betrachteten Gebäude und verschiedenen U-Wert Annahmen	23
Abbildung 8 Abweichung der berechneten Endenergieverbräuche zum realen Energieverbrauch	24
Abbildung 9 Schnitt (links) und Grundriss (rechts) mit beeinflusster Fläche durch verringerte Oberflächentemperatur der Außenwände	25
Abbildung 10 maximale operative Temperaturen bei Wohn- und Büronutzung vor und nach der Sanierung.....	30
Abbildung 11 Lage des Forschungsgebäudes in der Mandellstraße 9 [48]	32
Abbildung 12 Grundriss Erdgeschoß	33
Abbildung 13 Grundriss Untergeschoß	33
Abbildung 14 Vertikalschnitt durch das Versuchsgebäude.....	34
Abbildung 15 links die Nordost- und rechts die Nordwestfassade des Versuchsgebäudes ..	35
Abbildung 16 Thermografieaufnahme originale Ansicht	35
Abbildung 17 Thermografieaufnahme mit Falschfarbendarstellung.....	35
Abbildung 18 Innenbereich Erdgeschoß	36
Abbildung 19 Innenbereich Untergeschoß	36
Abbildung 20 Übersichtsskizze der Sensoreinbaupositionen	39
Abbildung 21 Sensoren zur Messung der Temperatur und relativen Luftfeuchte im Material	39
Abbildung 22 Monatsmittelwerte der Temperatur und relativen Luftfeuchte im Außenbereich	40
Abbildung 23 Monatsmittelwerte der Temperatur und relativen Luftfeuchte im Außenbereich (ZAMG).....	41
Abbildung 24 Monatsmittelwerte der Temperatur und relativen Luftfeuchte im Innenbereich	42
Abbildung 25 Regenmengen je Monat im Vergleich von 1971-2000 und 2018-2020 der ZAMG	42
Abbildung 26 Summen der monatlichen Globalstrahlung von Messung und ZAMG	44
Abbildung 27 Stündliche Mittelwerte je Monat der Globalstrahlung und der diffusen und direkten Strahlungsanteile von Messung und ZAMG	44
Abbildung 28 langwellige Strahlung generiert aus den Daten der ZAMG von der Software METEONORM.....	45
Abbildung 29 Monatsmittelwerte der Windgeschwindigkeit	46
Abbildung 30 Prozentueller Anteil nach Windrichtung	46
Abbildung 31 Verdeutlichung der Windführung im Bereich des Versuchsgebäudes [48].....	47
Abbildung 32 Umströmung eines Baukörpers [70]	47
Abbildung 33 Bodenschichten angrenzendes Erdreich	48

Abbildung 34 Monatsmittelwerte der Grundwassertiefe und -temperatur	49
Abbildung 35 Wärmeleitfähigkeit λ' in Abhängigkeit des Wassergehaltes $w(m1)$	52
Abbildung 36 gemessene Wärmeleitfähigkeit λ' und gemittelte Datensätze in Abhängigkeit des Wassergehaltes $w(m1)$	53
Abbildung 37 Wärmeleitfähigkeit λ' in Abhängigkeit des Durchfeuchtungsgrades $d(m1)$	54
Abbildung 38 Übersicht der Sensorenpositionen.....	55
Abbildung 39 Monatsmittelwerte Temperatur und relative Luftfeuchte von Aerogel und Zellulose Sensoren (1 & 2)	56
Abbildung 40 Differenzen der Monatsmittelwerte Temperatur und relative Luftfeuchte von Aerogel und Zellulose Sensoren (1 & 2)	57
Abbildung 41 Monatsmittelwerte Temperatur und relative Luftfeuchte von Aerogel und Zellulose Sensoren (3 & 4 & 5)	58
Abbildung 42 Differenzen der Monatsmittelwerte Temperatur und relative Luftfeuchte von Aerogel und Zellulose Sensoren (3 & 4 & 5)	59
Abbildung 43 Monatsmittelwerte Temperatur und relative Luftfeuchte mit und ohne Zellulose Sensoren (6 & 7)	60
Abbildung 44 Differenzen der Monatsmittelwerte Temperatur und relative Luftfeuchte mit und ohne Zellulose Sensoren (6 & 7).....	61
Abbildung 45 Differenzen der Monatsmittelwerte Temperatur im Vertikalschnitt (1, 2, 4, 5 & 7)	62
Abbildung 46 Differenzen der Monatsmittelwerte relative Luftfeuchte im Vertikalschnitt (1, 2, 4, 5 & 7).....	63
Abbildung 47 Salzausblühungen im Untergeschoß des Forschungsgebäudes	64
Abbildung 48 Probeentnahmestellen zur Salzgehaltsuntersuchung	65
Abbildung 49 Ergebnis der Salzgehaltsuntersuchung in Masseprozent	66
Abbildung 50 Feuchtespeicherfunktionen der Datensatzauswahl aus DELPHIN.....	74
Abbildung 51 Flüssigwassertransportfunktionen der Datensatzauswahl aus DELPHIN	75
Abbildung 52 Feuchtespeicherfunktion der Ziegeldatensatzauswahl aus WUFI.....	75
Abbildung 53 Wärmeleitfähigkeit nach dem Porositäts-Modell [81]	77
Abbildung 54 Wärmetransportfunktionen der Datensatzauswahl aus DELPHIN	78
Abbildung 55 feuchteabhängige Wärmeleitfähigkeit aus DELPHIN und WUFI für drei Ziegeldatensätze	80
Abbildung 56 temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit aus WUFI für drei Ziegeldatensätze	80
Abbildung 57 Feuchtespeicherfunktion für die Aufsprühhzellulose in DELPHIN.....	82
Abbildung 58 Feuchtespeicherfunktion für die Aufsprühhzellulose in WUFI (0 bis 95 %)	83
Abbildung 59 Feuchtespeicherfunktion für die Aufsprühhzellulose in WUFI (95 bis 100 %) ...	83
Abbildung 60 Aufteilung in drei Teilbereiche für die Modellbildung [86].....	86
Abbildung 61 Erdreichschichtung (links) und Ausgabeparameter (rechts) [86, 87].....	87
Abbildung 62 Monatsmittelwerte der Druckhöhe - Übergang UG zu EG im Mauerwerk	90
Abbildung 63 Variantenstudie zur Modellbildung des Mauerwerks [86, 87]	91
Abbildung 64 Vereinfachte Modellbildung des Gewölbes samt angepasstem Fußbodenaufbau	92
Abbildung 65 Wärmeleitfähigkeit der Zellulose im Jahresverlauf mit unterschiedlichen Klimadaten in DELPHIN	96
Abbildung 66 Übersicht der Sensorenpositionen.....	100
Abbildung 67 Variante Aerogel EG Fläche (1D Bereich)	101
Abbildung 68 Variante Zellulose EG Fläche (1D Bereich)	102
Abbildung 69 Variante Aerogel EG Fußbodenaufbau (2D Bereich).....	103
Abbildung 70 Variante Zellulose EG Fußbodenaufbau (2D Bereich).....	104
Abbildung 71 Variante Aerogel UG Fläche (1D Bereich).....	105
Abbildung 72 Variante Zellulose UG Fläche (1D Bereich).....	105
Abbildung 73 Variante Zellulose UG Kante (2D Bereich)	106

Abbildung 74 Beispiel eines temperaturabhängigen Wärmeleitmodells mit zu geringen Grenzwertspektren	108
Abbildung 75 Jahresverlauf der Wärmeleitfähigkeit von Aerogel mit verschiedenen Abhängigkeiten.....	109
Abbildung 76 Wassergehalt und Wärmeleitfähigkeit der Aerogel Dämmung in verschiedenen Schichttiefen.....	110
Abbildung 77 Wassergehalt und Wärmeleitfähigkeit der Zellulose Dämmung in verschiedenen Schichttiefen.....	111
Abbildung 78 Jahresverlauf der Wärmeleitfähigkeit vom Ziegelmauerwerk mit verschiedenen Abhängigkeiten.....	112
Abbildung 79 Monatsmittelwerte der U-Werte aus Gesamtschichten, Teilschichten und stationärer Berechnung	114
Abbildung 80 feuchte- und temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeiten des Sockeldetails	115
Abbildung 81 Maximaler Wassergehalt im Sockeldetail der Bestandsvariante.....	116
Abbildung 82 Maximaler Wassergehalt im Sockeldetail der Aerogel Variante.....	116
Abbildung 83 Maximaler Wassergehalt der Aerogel Innendämmung im Fußbodenbereich	118

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Beschreibung
1D	eindimensional
2D	zweidimensional
A/V-Verhältnis	Oberfläche zu Volumen Verhältnis
A+Z Bereich	Aerogel und Zellulose Bereich
BIG	Bundesimmobiliengesellschaft
Br	Brom
Ca	Calcium
CFD-Simulation	Computational Fluid Dynamics
CL	Chlor, Chloride
COVID 19	Corona Virus Disease 2019
DIN	Deutsches Institut für Normung
EEB	Endenergiebedarf
EG	Erdgeschoss
F	Fluor
FDM	Finite-Differenzen-Methode
FVM	Finite-Volumen-Methode
Gelände OK	Geländeoberkante
gem. Temperaturabh.	gemessene Temperaturabhängigkeit
Graz M. E.	Graz Messung Extremwerte
Graz M. M.	Graz Messung Mittelwerte

HfE	Handbuch für Energieberater
HWB	Heizwärmebedarf
ID	Innendämmung
JAZ	Jahresarbeitszahl
K	Kalium
LF	Luftfeuchte
m.ü.A.	Meter über Adria
MASEA-ENSAN	Materialdatensammlung für die energetische Altbausanierung
Max op temp.	Maximale operative Temperatur
Mg	Magnesium
MWK	Mauerwerk
Na	Natrium
NO3	Nitrate
NT	Nachtstrom
OIB	Österreichisches Institut für Bautechnik
PO4	Phosphat
rel. Luftf.	relative Luftfeuchtigkeit
rel. Luftf. Mess.	relative Luftfeuchtigkeit Messung
rel. Luftf. Sim.	relative Luftfeuchtigkeit Simulation
SO4	Sulfate
T	Temperatur
Temp. Mess.	Temperatur Messung
Temp. Sim	Temperatur Simulation
UG	Untergeschoss
U-Wert	Wärmedurchgangskoeffizient
VTT-Modell	Viitanen Schimmel Wachstumsmodell
WDVS	Wärmedämmverbundsystem
WTA	Wissenschaftliche-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V.
ZAMG	Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik

Formelverzeichnis

Formel 1 Interne Wärmebilanzgleichung.....	9
Formel 2 Feuchtemassenbilanzgleichung.....	9
Formel 3 kapillarer Flüssigwassertransport.....	10
Formel 4 Wärmebilanzgleichung.....	10
Formel 5 Feuchtebilanzgleichung.....	10
Formel 6 Kelvin-Gleichung.....	75
Formel 7 linearer Anstieg in Abhängigkeit vom Wassergehalt in DELPHIN.....	76
Formel 8 Effektive Wärmeleitfähigkeit in DELPHIN.....	76
Formel 9 Temperaturbedingter Wärmeleitfähigkeitszuschlag in WUFI.....	77
Formel 10 Feuchtebedingter Wärmeleitfähigkeitszuschlag in WUFI.....	78
Formel 11 Umrechnung der Wärmeleitfähigkeit nach ÖNORM EN ISO 10456 [80].....	79
Formel 12 Flüssigtransportkoeffizient für den Saugvorgang [26].....	84
Formel 13 Angewendetes Randbedingungsmodell des Wasserkontaktes in DELPHIN [24].	88

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Vergleich maßgeblicher Bereiche der Programme DELPHIN und WUFI Pro	11
Tabelle 2 Auszug der Literaturrecherche von Innendämmprojekten [35] [36] [37] [38] [39] [40] [41] [42] [43] [44].....	15
Tabelle 3 Gemittelter Energiebedarf nach Bauperiode und gemittelt Energieeinsparungspotential des Gebäudebestandes durch thermische Sanierung [10]	18
Tabelle 4 erforderliche Dämmdicken zur Erreichung der U-Wert Anforderungen bei Kellerdecken.....	20
Tabelle 5 erforderliche Dämmdicken zur Erreichung der U-Wert Anforderungen bei Außenwänden	21
Tabelle 6 Montagekosten nach Ausbaustufen je Gebäude, Nutzfläche und Bruttogrundfläche	27
Tabelle 7 gemittelter Mietflächenverlust und Mietentgang durch Innendämmungen.....	28
Tabelle 8 Einsparungspotential durch Sanierung mittels Innendämmung.....	28
Tabelle 9 Messwertparameter vom Innen- und Außenlima.....	38
Tabelle 10 Klimadatenübersicht	50
Tabelle 11 ausgewählte gemessene Materialparameter der verbauten Normalformatziegel [72]	51
Tabelle 12 Materialparameter der Innendämmsysteme für DELPHIN und WUFI	54
Tabelle 13 Wertung der Anionenkonzentration in Prozent der Masse nach ÖNORM B 3355 [12]	64
Tabelle 14 Ergebnis der Salzgehaltsuntersuchung in Masseprozent.....	66
Tabelle 15 Übersicht vergleichbarer Klimadatensätze aus WTA 6-5 [13], DELPHIN und WUFI für Klimasensitivitätsanalysen.....	68
Tabelle 16 Auswahl äquivalenter Dampfdiffusionsdicken bzw. Wasserdampfübergangskoeffizienten.....	72
Tabelle 17 Auswahl Wärmeübergangswiderstände.....	72
Tabelle 18 Messdaten EG Ziegel und Auswahl an vergleichbaren Datensätzen aus DELPHIN	73
Tabelle 19 Überblick über die Berechnung der Wärmeleitfähigkeit ausgewählter Dämmstoffe [82, 83]	79
Tabelle 20 Materialparameter Bestandskonstruktionen DELPHIN.....	81
Tabelle 21 Materialparameter Bestandskonstruktionen WUFI.....	81

Tabelle 22	Ergebnis einer generierten Feuchtetransporttabelle.....	84
Tabelle 23	Grenzwerte aus Normen in Hinsicht auf Wärmeverluste auf Grund von Feuchtigkeit im Bauteil.....	85
Tabelle 24	Vergleichswerte von relativer Luftfeuchte, Kapillardruck und Meter Wassersäule	88
Tabelle 25	Klimavarianten samt Randbedingungen und Gesamtwassergehalt	94
Tabelle 26	Jahresmittelwerte maßgeblicher Kennwerte der Klimavariantsimulationen	95
Tabelle 27	Jahresmittelwerte maßgeblicher Kennwerte der Ziegelvariantensimulationen mit Aerogel.....	97
Tabelle 28	Jahresmittelwerte maßgeblicher Kennwerte der Ziegelvariantensimulationen mit Zellulose	98
Tabelle 29	Jahresmittelwerte maßgeblicher Kennwerte der Wärmeleitfähigkeitsvariantensimulationen	108
Tabelle 30	Jahresmittelwerte und Differenzen der Wärmeleitfähigkeit je Bauteilschicht aus DELPHIN.....	112
Tabelle 31	Jahresmittelwerte und Differenzen der Wärmeleitfähigkeit je Teilschicht aus DELPHIN.....	113
Tabelle 32	Jahresmittelwerte und Differenzen zur Bestandsvariante maßgeblicher Kennwerte der 2D Sockeldetails.....	117
Tabelle 33	Innenoberflächentemperaturen und Wärmestromdichte im Sockelbereich.....	120
Tabelle 34	Energieausweisergebnisse im Vergleich bei Anwendung unterschiedlicher Wärmeleitfähigkeiten	121