

Vergleichende Untersuchung der Wärme- und Feuchteigenschaften ausgewählter ökologischer Baustoffe

Ein Vergleich ökologischer Innendämmsysteme

Comparative investigation of the heat and moisture properties of selected ecological building materials

A comparison of common interior insulations

Bachelorarbeit

Zur Erlangung des akademischen Grades

Bachelor of Science in Engineering (BSc)

der Fachhochschule FH Campus Wien

Bachelorstudiengang: Architektur – Green Building

Vorgelegt von:

Marcel Rene Plattner

Personenkennzeichen

1810733044

Erstbegutachter:

Dipl.-Ing. Tobias Steiner

Eingereicht am:

17. 07. 2020

Erklärung:

Ich erkläre, dass die vorliegende Bachelorarbeit von mir selbst verfasst wurde und ich keine anderen als die angeführten Behelfe verwendet bzw. mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfe bedient habe.

Ich versichere, dass ich dieses Bachelorarbeitsthema bisher weder im In- noch im Ausland (einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe.

Weiters versichere ich, dass die von mir eingereichten Exemplare (ausgedruckt und elektronisch) identisch sind.

Datum:

Unterschrift:

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich allen danken, die durch ihre fachliche und persönliche Unterstützung zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Dazu gehören unter anderem alle engagierten Professoren und Vortragenden, die auf Exkursionen und in interessanten Vorlesungen mein Interesse für unterschiedlichste Themen aus dem Bauwesen geweckt und vertieft haben.

Ich bedanke mich bei meinem Betreuer Herr Dipl.-Ing. Tobias Steiner für seine Unterstützung.

Ebenso möchte ich mich bei meiner Familie für den Beistand bedanken, den sie mir immer entgegenbringt, und die Hilfe in allen Lebenslagen.

Ein besonderer Dank gilt all den Studienkollegen meines Jahrgangs, mit denen ich viel Zeit beim Lernen, Modell bauen, Plan zeichnen, aber natürlich auch außerhalb des Studiums verbracht habe.

Weiter will ich mich noch bei jenen bedanken, die diese Bachelorarbeit Korrektur gelesen haben.

Kurzfassung

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Sanierung einer Bestands-Ziegelkonstruktion. Da es oft nicht möglich ist, bei derartigen Konstruktionen aus verschiedenen Gründen auf der Außenseite ein Wärmedämmverbundsystem aufzubringen, ist es nötig, eine Innendämmung vorzusehen.

In dieser Arbeit werden vorerst die bekannten bauphysikalischen und ökologischen Aspekte von verschiedenen Dämmsystemen und -materialien aufgezeigt. Es werden fünf ökologische Dämmstoffe ausgewählt, und für diese Dämmstoffe typische Aufbauten zugewiesen.

Anschließend werden diese ökologischen Innendämmsysteme auf ihre wärme- und feuchtetechnischen Eigenschaften überprüft und mithilfe der Programme Thesim3D und Delphin 6.0 in typischen Szenarien simuliert.

Diese Ergebnisse werden dann mit dem derzeit gültigen Wissen verglichen.

Abstract

This Thesis deals with the renovation of an existing brick construction. Because of various reasons it is often not possible to apply a thermal insulation composite system on the outside, so it is necessary to provide internal insulation.

In this thesis some known building-physical and ecological aspects of common insulation systems and materials will be shown. Five ecological insulations will be selected and for those insulations typical structures will be assigned.

Subsequently, those ecological insulation systems will be compared regarding their heat and moisture properties and they will be simulated within the programs Thesim3D and Delphin 6.0 in some common use cases.

Those results will be compared to the currently valid knowledge.

Abkürzungsverzeichnis

EPD	Umweltproduktdeklaration (Environmental Product Declaration)
Hygroth.	Hygrothermisch
Massebez.	Massebezogen
WDVS	Wärmedämmverbundsystem
WDDWZ	Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl

Schlüsselbegriffe

Calciumsilikatplatten	Calcium silicate boards
Delphin 6.0	Delphin 6.0
Holzfaserdämmstoffe	Wood fibre insulation materials
Hygrothermisches Verhalten	Hygrothermal behavior
Innendämmsysteme	Interior insulation systems
Innendämmung	Interior Insulation
Lehmputz	Clay plaster
Mineraldämmplatten	Mineral insulation boards
Parameterstudien	Parameter studies
Simulation	Simulation
Sommertauglichkeit	Summer suitability
Thesim3D	Thesim3D
Wärmdämmlehm	Thermal insulation clay

Inhaltsverzeichnis

DANKSAGUNG	III
KURZFASSUNG	IV
ABSTRACT	V
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	VI
SCHLÜSSELBEGRIFFE.....	VII
INHALTSVERZEICHNIS	VIII
1. BAUTECHNISCHER GRUNDLAGENTEIL	1
1.1. Bauphysik der Innendämmung	1
1.1.1. Feuchtebeanspruchung von dem Innenraum	2
1.1.2. Feuchtebeanspruchung von dem Außenraum	7
1.1.3. Feuchteeintrag durch erhöhte Anfangsfeuchte	9
1.1.4. Trocknungsverhalten	10
1.2. Ökologische Aspekte des Dämmens	10
1.3. Vergleich Außen-, Kern- und Innendämmung.....	13
1.3.1. Außendämmung	14
1.3.2. Kerndämmung	15
1.3.3. Innendämmung.....	15
2. BAUSTOFFEIGENSCHAFTEN INKL. WÄRME- UND FEUCHTE- TECHNISCHE KENNWERTE FÜR DIE SIMULATION	17
2.1. Mineraldämmplatten.....	17
2.1.1. Baustoffeigenschaften	18
2.1.2. Wärme- und feuchtetechnische Kennwerte	19
2.2. Calciumsilikatplatten.....	20
2.2.1. Baustoffeigenschaften	21
2.2.2. Wärme- und feuchtetechnische Kennwerte	22
2.3. Holzfaserdämmstoffe	22
2.3.1. Baustoffeigenschaften	23
2.3.2. Wärme- und feuchtetechnische Kennwerte	24
2.4. Schilfrohrplatten	25
2.4.1. Baustoffeigenschaften	25
2.4.2. Wärme- und feuchtetechnische Kennwerte	27
2.5. Wärmedämmlehm und Lehmputz	28
2.5.1. Baustoffeigenschaften	29

2.5.2.	Wärme- und feuchtetechnische Kennwerte	30
3.	METHODE	33
3.1.	Beschreibung Simulationsprogramme.....	33
3.1.1.	Thesim3D	34
3.1.2.	Delphin 6.0.....	35
3.1.3.	Vergleich Glaser-Verfahren	37
3.2.	Beschreibung Parameter für die Simulation	38
3.2.1.	Parameter für die Überprüfung der sommerlichen Überwärmung...	42
3.2.2.	Parameter für die hygrothermische Simulation	43
4.	PARAMETERSTUDIEN.....	45
4.1.	Simulation der Sommertauglichkeit eines Modellraums	45
4.1.1.	Dokumentation der Simulation	45
4.1.2.	Ergebnisse	46
4.2.	Simulation des hygroth. Verhaltens einer Wandkonstruktion.....	48
4.2.1.	Dokumentation der Simulation	48
4.2.2.	Ergebnisse	51
5.	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	54
	QUELLENVERZEICHNIS	56
	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	59
	TABELLENVERZEICHNIS	62
	ANHANG	64

1. Bautechnischer Grundlagenteil

Vor wenigen Jahren noch war die Innendämmung ein wenig verwendetes Produkt, das eher nur einen Nischenmarkt füllte und nur in geringer Dämmdicke besaß. Dies hat sich jedoch inzwischen bereits stark weiterentwickelt. Es können inzwischen bereits nahezu gleiche Dämmdicken wie bei einer Außendämmung zur Anwendung kommen. Durch die inzwischen weite Verbreitung von Innendämmungen und die weite Verfügbarkeit bei nahezu jedem gängigen Hersteller ist die Innendämmung nicht nur für die Sanierungspraxis ein wichtiger Faktor, sondern nimmt generell im Handel und der Produktion von Bauprodukten einen hohen Stellenwert ein.¹

1.1. Bauphysik der Innendämmung

Auf Außenwände im Nachhinein angebrachte Innendämmungen haben eine besondere Auswirkung auf das bauphysikalische Verhalten der bestehenden Konstruktion. Insbesondere muss man auf die Wasserdampfdiffusion vom Innenraum mit hoher relativer Luftfeuchte zum Außenraum mit niedriger relativer Luftfeuchte achten. Man muss auf mögliche Tauwasserbildung an der vorherigen Innenoberfläche der Wand (und damit verbundener möglicher Schimmelbildung) achten und darauf, dass das Austrocknungspotenzial möglicherweise nur noch eingeschränkt gegeben ist.²

Da heutzutage die Bestrebungen zur Energieeinsparung insbesondere in unseren Breitengraden immer höhere Bedeutung beigemessen werden, ist die thermische Verbesserung bestehender Bausubstanz wichtiger denn je. Die Innendämmung bringt hier die Möglichkeit, den U-Wert von Bestandsbauteilen deutlich zu verbessern, möglichst ohne das Risiko von Schimmelpilzbefall zu vergrößern oder gegebenenfalls sogar zu minimieren. Seit langem sind bereits Konstruktionen im Einsatz, welche durch innenliegende Dampfbremsen oder dampfdichte Schichten,

¹ Scheffler, Gregor: Bauphysik der Innendämmung. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2016. S. 5

² WTA-Merkblatt 6-4. 10.2016. Kurzfassung.

die durch den Nutzer entstehenden Wasserdämpfe im Innenraum halten. Es kommen jedoch auch vermehrt Dämmstoffe zum Einsatz, welche diffusionsoffen sind und durch ihre Feuchtespeicherwirkung den Auftritt von Schimmelpilzen vermindern. Dies kann von Vorteil für die ökologische Unbedenklichkeit der Systeme sein, wird jedoch auch oft abgetan, da die langfristige Wirksamkeit von manchen in Frage gestellt wird.³

1.1.1. Feuchtebeanspruchung von dem Innenraum

Der Feuchtetransport durch Bauteile kann einerseits durch Dampftransport oder durch Flüssigwassertransport stattfinden. Im Gegensatz zur Außenseite der Wand kann auf der Innenseite der Eintrag von flüssigem Wasser vernachlässigt werden. Bei der Feuchtebeanspruchung von innen muss zwischen Dampfkonnektion und Dampfdiffusion unterschieden werden, welche wichtige Faktoren für die Dimensionierung und Ausführung sein können, da sie über einen längeren Zeitraum zu Schäden führen können.⁴

Dampfdiffusion

Die Bewegung von Wasserdampf durch Baustoffe hindurch wird Wasserdampfdiffusion genannt. Die Auslöser hierfür sind die unterschiedlichen Wasserdampfdrücke an den beiden Seiten dieses Bauteils. Es wird immer ein Ausgleich der Luftfeuchten angestrebt, das heißt, der Wasserdampfdruck wandert immer von der Seite mit dem höheren Wasserdampfdruck zu der Seite mit dem niedrigeren. Der Wasserdampfdruck ist einerseits von der relativen Luftfeuchte und andererseits von der Temperatur abhängig. Baustoffe setzen dieser Diffusion einen unterschiedlichen Widerstand entgegen, der vom Porengefüge des Stoffes abhängt. Dieser Widerstand wird Wasserdampfdiffusionswiderstand genannt, und

³ Kautsch, Peter/Ruisinger, Ulrich/Hengsberger Herwig u.a.: OEKO-ID – Innendämmungen zur thermischen Gebäudeertüchtigung. Untersuchung der Möglichkeiten und Grenzen ökologischer, diffusionsoffener Dämmsysteme. Graz: TU Graz 2013. S.4.

⁴ Wegerer, Paul: Beurteilung von Innendämmsystemen. Langzeitmessung und hygrothermische Simulation am Beispiel einer Innendämmung aus Schilfdämmplatten. Wien: Technische Universität, Fakultät für Bauingenieurwesen. Diplomarbeit 2010. S.23.

wird in der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ angegeben. Diese Zahl gibt die diffusionswiderstands-äquivalente Luftschichtdicke an.

In der folgenden Grafik ist der allgemeine Zusammenhang zwischen der relativen und absoluten Luftfeuchte und der Temperatur dargestellt.

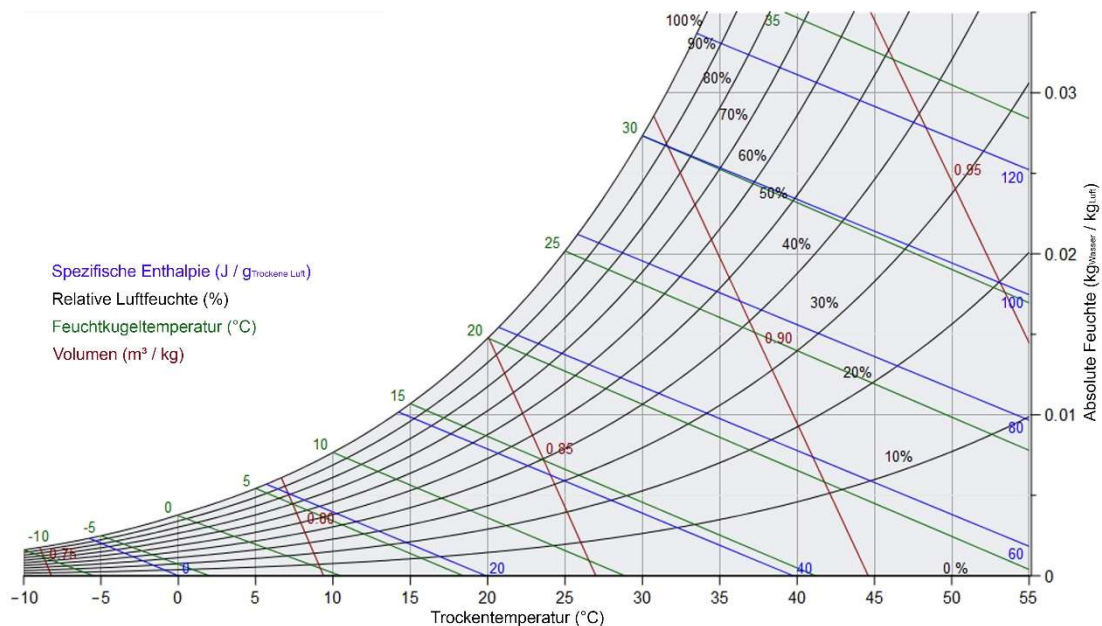


Abbildung 1: Psychrometrisches Diagramm

Aus dem Psychrometrischen Diagramm kann man unter anderem herauslesen, dass die Angabe der relativen Feuchte meist mit der Angabe der Temperatur einhergeht und sinnvoll ist, da die Kenngröße der relativen Feuchte von der Temperatur abhängig ist. Beispielsweise ist eine relative Feuchte von 100 % bei 20 $^{\circ}\text{C}$ in etwa äquivalent einer relativen Luftfeuchte von 55 % bei 30 $^{\circ}\text{C}$. Beide Wasserdampfmenngen betragen etwa 0.015 $\text{kg}_{\text{Wasser}} / \text{kg}_{\text{Luft}}$. Allerdings kann die Angabe der relativen Feuchte allein auch wichtig sein, da der Mensch auf die relative Feuchte sensitiv ist, und auch beispielsweise Schimmelpilzwachstum stark von der relativen Feuchte abhängt.

Dies erklärt auch den Wassertransport in Abbildung 2:

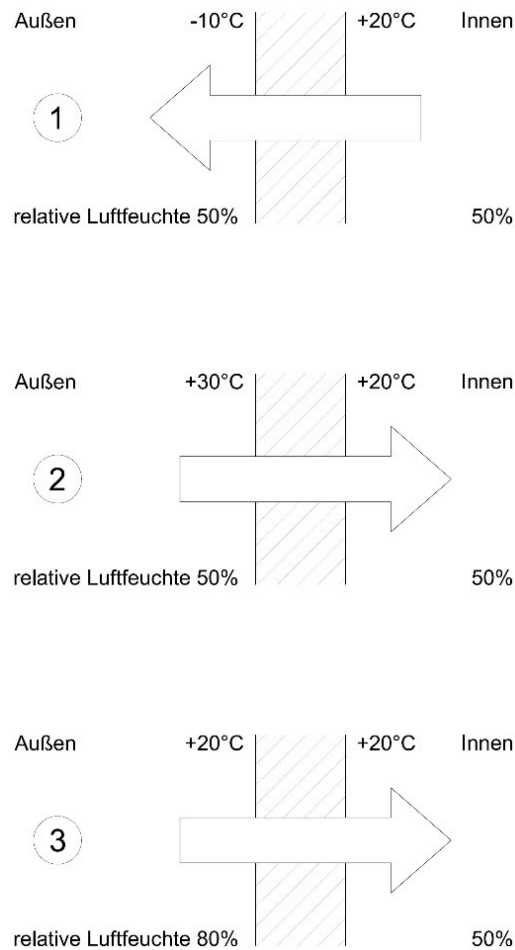


Abbildung 2: Wasserdampftransport in verschiedenen Lufttemperatur- und Luftfeuchtesituationen

Abbildung 2 zeigt den Stofftransport des Wasserdampfs in Abhängigkeit der Lufttemperatur und Luftfeuchte. Im ersten Bild sieht man die Wintersituation, bei der die Außentemperatur deutlich niedriger ist als die Innentemperatur. Obwohl beide relative Luftfeuchten prozentual gleichwertig sind, enthält die Außenluft aufgrund der niedrigeren Temperatur eine kleinere Menge an Wasserdampf. Um dieses Ungleichgewicht auszugleichen, diffundiert das Wasser von innen nach außen.

Das zweite Bild zeigt eine mögliche Sommersituation. Hier sieht man den umgekehrten Effekt zur Winterlage, es findet eine Dampfdiffusion vom Innenraum in Richtung Außenraum statt.

Wie im Bild 3 ersichtlich, ist es – bei unterschiedlichen relativen Luftfeuchten – auch möglich, dass bei gleichen Temperaturen ein Dampfdruckausgleich stattfindet.

Dampfkonvektion

Ebenso gehört zur vom Innenraum kommenden Feuchte auch die Konvektion. Unter diesem Begriff versteht man die Luftbewegung und damit einhergehendem Transport von Energie und Masse (Luft und Wasserdampf). Die Konvektion tritt auf durch Druckunterschiede zwischen Innen- und Außenraum. Dies zum Beispiel aufgrund von Unterschieden in der relativen Luftfeuchtigkeit, Temperaturunterschieden oder der natürlichen Luftbewegung geschehen. Das kann zu Problemen führen, wenn feuchtwarme Luft in einen kälteren Bereich vordringt, und dort an kalten Oberflächen zu Schimmelbildung oder sogar zu Kondensat führt.⁵

Die Dampfkonvektion führt zu einem besonders hohen Befeuchtungsrisiko. Es wurde bereits 1989 durch eine Laboruntersuchung des Fraunhofer-Instituts nachgewiesen, dass Leckagen in Dampfsperren auf der Rauminnenseite ein weit höheres Befeuchtungsrisiko darstellen als eine reine Diffusion.⁶

⁵ Scheffler, Gregor: Bauphysik der Innendämmung. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2016. S. 20f

⁶ Borsch-Laaks, Robert: Feuchtetransport via Luftstrom.

In: <https://www.proholz.at/zuschnitt/47/feuchtetransport-via-luftstrom> (letzter Zugriff: 18.03.2020)

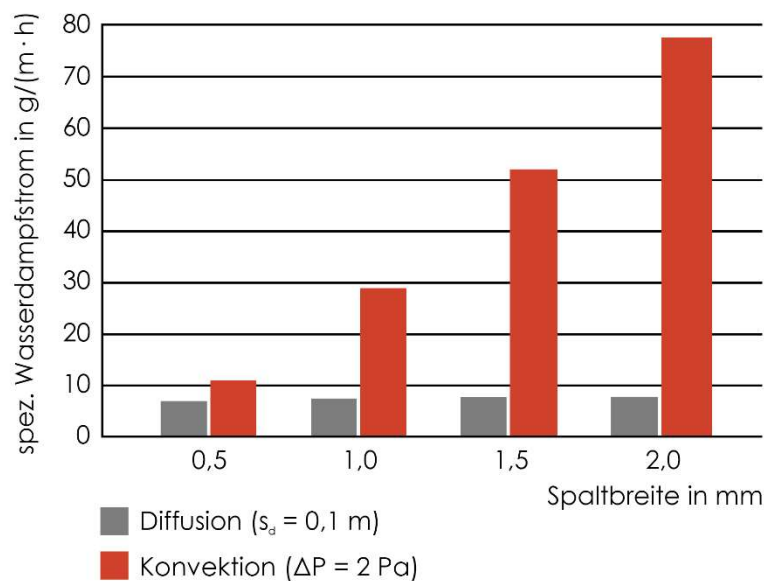


Abbildung 3: Gegenüberstellung des Wasserdampfstroms aufgrund von Diffusion (20 °C / 50 % und -10 °C / 80 %) und von Konvektion bei variierenden Spaltbreiten durch ein 1m breites Material mit einem s_d -Wert von 0,1 m

In Abbildung 3 ist ein Vergleich der beiden Transportmechanismen dargestellt. Es wird untersucht, wie viel Feuchtigkeit bei einem mit Gipskartonplatten vergleichbaren Material einerseits durch Diffusion (grau) und durch Konvektion (rot) pro Meter und pro Stunde hindurchkommt. Der Diffusionswert bleibt hierbei konstant, der Konvektionswert wird mit verschiedenen Spaltbreiten von 0,5 bis 2,0 mm gerechnet. Es herrschen 20 °C auf der warmen Seite des Materials mit 50 % relativer Luftfeuchte. Auf der kalten Seite sind es -10 °C und 80 % relative Feuchte. Die Druckdifferenz zwischen den beiden Seiten beträgt 2 Pascal. Die Ergebnisse zeigen, dass durch die Wasserdampfkongvektion größere Mengen Feuchte transportiert werden können als bei der Wasserdampfdiffusion. Folglich ist es von großer Wichtigkeit, dass ein derartiger Feuchtetransport vermieden wird. Dies ist einerseits möglich durch eine sehr gute Luftdichtheit der Hülle oder durch Bauteile, die eine gewisse Fehlertoleranz zulassen, sodass es auch bei einem gewissen Eintrag von Feuchte durch Konvektion zu keinem Schaden kommt..⁷

⁷ Nusser, Bernd/ Eppe, Martin u.a.: Praxis-Handbuch Innendämmung. Planung – Konstruktion – Details – Beispiele. Hrsg.: Fachverband Innendämmung e.V. Köln: Verlagsgesellschaft Rudolf Müller GmbH & Co. KG 2016. S.49.

In der folgenden Abbildung 4 wird der Weg des Wassers im Bezug der Wasserdampfkonvektion am Beispiel eines innengedämmten Wand-Decken-Anschlusses gezeigt. Die warme Raumluft bringt Feuchte in kalte Teile der Konstruktion und ruft dadurch potenziell ein Feuchte- oder Schimmelproblem hervor.

Diese Konvektionsbegünstigung kann unter anderem geschehen durch:

- Eine unebene Bestandswand, auf die ein steifer Dämmstoff aufgebracht wird.
- Durchdringungen der Luftdichtheitsebene (Steckdosen, Installationen etc.)
- Bauteilanschlüsse (Wände, Decken etc.)⁸

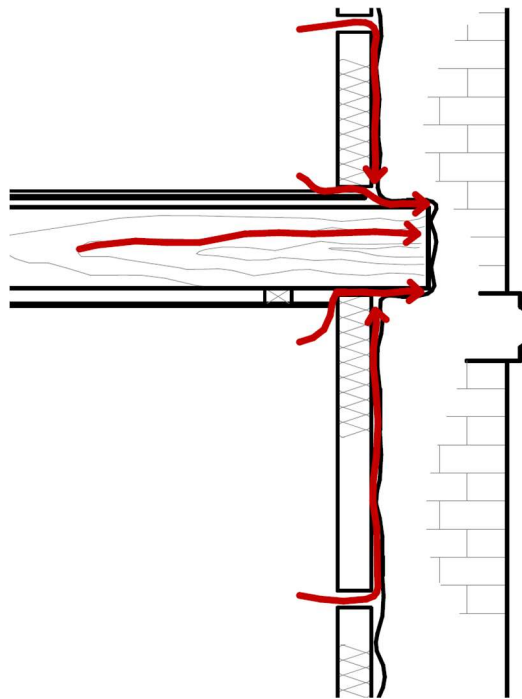


Abbildung 4: Wasserdampfkonvektion in einem Wand-Decken-Anschluss

1.1.2. Feuchtebeanspruchung von dem Außenraum

Der Schutz von Konstruktionen vor äußeren Einflüssen nimmt einen essenziellen Teil der Sanierung ein. Außeneinflüsse wie Sonne, Wind und Regen können

⁸ Scheffler, Gregor: Bauphysik der Innendämmung. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2016. S. 20

Belastungen auf eine Fassade sein. Diese Einflüsse sind abhängig vom jeweiligen Klima, der Orientierung und der Position der Fassade. Dementsprechend kann auch die Ausbildung eines Schutzes der Außeneinflüsse sehr unterschiedlicher Ausführung sein.⁹

Schlagregenbeanspruchung

Nahezu 100 % der Feuchtebeanspruchung auf eine Fassade von außen kann auf die Schlagregenbeanspruchung zurückgeführt werden. Als Schlagregen wird Regen bezeichnet, welcher nicht lotrecht fällt, sondern durch den Wind auch auf senkrechte Flächen trifft. Dies kann zu Problemen an Bauwerken führen, welche nicht hierfür ausgelegt sind. Meist treten hierbei Frostschäden, Schimmelbefall oder auch Ausblühungen auf. Insbesondere kann dies zum Beispiel bei Holzoberflächen oder bei unverputztem Mauerwerk der Fall sein. Bei diesen Materialien kann die Feuchtigkeit in Fugen eintreten und trocknet nur langsam wieder aus. Besonders betroffen sind Gebäudeecken, Mauerwerksvorsprünge und hoch gelegene Flächen. Ebenso sind alle Arten von Wandsystemen, welche offene Fugen in Richtung des Außenraums aufweisen, beispielsweise außenseitig sichtbare Fachwerke. Diese weisen Fugen auf, welche den gesamten Wandquerschnitt durchziehen, zum Beispiel beim Zusammentreffen von Diagonalstreben an der Fußschwelle, oder auch beim Übergang von Holz auf Außenputz. Eine Möglichkeit ist es hier, auf der Innenseite eine komplett durchgängige Innenputzschicht auszuführen.¹⁰

All dies ist bei Außenwänden mit einer Innendämmung besonders zu berücksichtigen. Bei einer Wand mit einer außenliegenden Dämmung durch deren Schutz die Feuchtigkeitsbelastung von außen verringert wird, ist das Risiko einer Beanspruchung durch Niederschläge gering. Bei einer Außenwand mit innenliegender Dämmung hingegen können hier Probleme auftreten, da eine

⁹ Scheffler, Gregor: Bauphysik der Innendämmung. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2016. S. 21

¹⁰ Wegerer, Paul: Beurteilung von Innendämmsystemen. Langzeitmessung und hygrothermische Simulation am Beispiel einer Innendämmung aus Schilfdämmplatten. Wien: Technische Universität, Fakultät für Bauingenieurwesen. Diplomarbeit 2010. S.18.

Innendämmung mit Dampfbremse den Feuchtigkeitsaustausch mit der Rauminnen-seite verhindert. Dieses Risiko wird durch Winddruck an der Fassadenseite noch erhöht, da dieser den Feuchtigkeitseinzug weiter begünstigt. Dies kann zu einem Aufschaukeln der Feuchtigkeit innerhalb des Bauteils führen, was zu Schädigungen führt. Daher ist bei Bestandsbauten im Rahmen der Bestandsanalyse eine Untersuchung des vorhandenen Schlagregenschutzes erforderlich.¹¹

1.1.3. Feuchteintrag durch erhöhte Anfangsfeuchte

Im Bauwesen kann man zwischen der Nass- und der Trockenbauweise unterscheiden. Diese Unterscheidung kann genauso bei Innendämmungen angewendet werden. Eine typische Art der Trockenbauweise für ein Innendämmsystem ist beispielsweise eine Vorsatzschale mit Mineralwolledämmung, ein Beispiel für die Nassbauweise ist das Ansprühverfahren. Durch die Wasserzugabe während der Dämmstoffaufbringung, welche bei der Nassbauweise erfolgt, wird die Holzfeuchte der Holzsteher in der Dämmebene erhöht. Wenn diese Holzfeuchte anschließend keine Möglichkeit hat, wieder auszutrocknen, so kann dies zu Schäden führen. Es ist also nach dem Aufbringen einer feuchten Innendämmung eine gewisse Austrocknungszeit einzuplanen. Diese Austrocknungszeit sollte idealerweise vor dem Innenausbau, spätestens jedoch vor dem Bezug der Wohnung abgeschlossen sein. Diese Austrocknungszeit ist abhängig von dem Vorhandensein einer Dampfbremse oder auch dem Umgebungsklima. Eine weitere hohe Feuchtebelastung im Zuge des Einbaus stellt der Einsatz von Lehmdämmstoffen und Lehmputzen dar.¹²

¹¹ Geburtig, Gerd/Großmantel, Jürgen: Innendämmung in der Praxis. Energetische Sanierung von innen: Handbuch für die sichere Planung und Ausführung. Geislingen: C. Maurer Druck und Verlag 2013. S. 28f.

¹² Wegerer, Paul: Beurteilung von Innendämmsystemen. Langzeitmessung und hygrothermische Simulation am Beispiel einer Innendämmung aus Schilfdämmplatten. Wien: Technische Universität, Fakultät für Bauingenieurwesen. Diplomarbeit 2010. S.28ff.

1.1.4. Trocknungsverhalten

Eine Innendämmung hat einen großen Einfluss auf das Austrocknungsverhalten eines Bauteils. Bei einer ungedämmten Wand kann die Feuchtigkeit sowohl in Richtung des Innenraums als auch nach außen austrocknen. Im Gegensatz dazu ist bei der Aufbringung einer Innendämmung, die oft bereits selbst diffusionshemmend ist bzw. mit einer Dampfbremse im System aufgebracht wird, die Austrocknung nach innen reduziert. Dadurch, dass die Temperaturabsenkung der Außenwand weiter innen stattfindet (siehe Abbildung 5), ist die durchschnittliche Wandtemperatur niedriger, was die Austrocknung zusätzlich verlangsamt. Es ist allerdings essenziell, auf ein ausreichendes Trocknungspotenzial zu achten, insbesondere bei einem nicht ausreichenden Schlagregenschutz. Aus diesem Grund sind diffusionsoffene Konstruktionen einer diffusionsdichten Konstruktion vorzuziehen.¹³

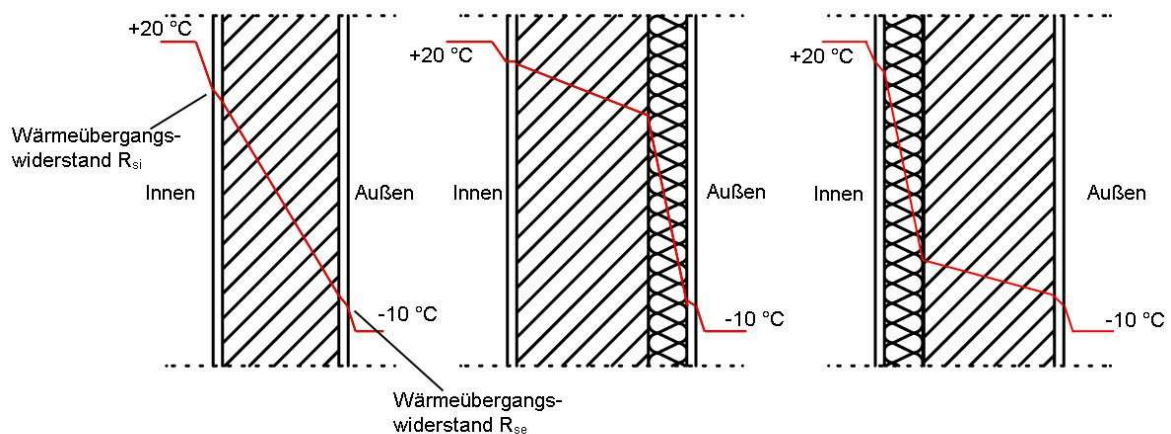


Abbildung 5: Dämmsysteme und deren Wirkung

1.2. Ökologische Aspekte des Dämmens

Die „ökologische Amortisation“ ist ein Begriff, der im Bereich der Sanierung gleichzeitig mit der „wirtschaftlichen Amortisation“ eingeführt wurde. Im Hintergrund dieser Einführung liegt eine ökologisch und wirtschaftlich unvorteilhafte

¹³ WTA-Merkblatt 6-4. 10.2016. S. 8.

Ausgangssituation: Undichte, schlecht gedämmte Gebäude in kalten Klimata verbrauchen hohe Mengen an Heizenergie, welche meistens aus nicht erneuerbaren Energiequellen gewonnen wird. Insbesondere im Hochwinter ist dieser Energieverbrauch am Jahresmaximum, obwohl hier erneuerbare Energien (Sonne, Wasser, Umgebungswärme) ein Jahresminimum an Verfügbarkeit erleben. Dies führt weiter dazu, dass der Ausbau von nicht erneuerbaren Heizsystemen bis zum heutigen Tag weiter voranschreitet. Ebenso sind allerdings auch die Herstellung und Instandhaltung von Dämmungen unweigerlich mit Energie- und Ressourcenverbrauch verbunden.¹⁴

Wenn man von der ökologischen Amortisation spricht, so gilt es immer, die sogenannte „graue Energie“ zu berücksichtigen. Graue Energie beschreibt jene Energie, die für Transport, Herstellung, Lagerung, Verkauf und abschließend für die Entsorgung eines Baustoffes benötigt wird. Die Frage, die sich nun jedoch vielen stellt, ist, ob und ab wann sich bei einer Sanierung die Dämmung „rechnet“.

Die energetische und ökologische Amortisierung der Dämmstoffe bei Niedrigstenergiehäusern beträgt in der Regel wenige Monate bis zu drei Jahre. Sogar bei einer sehr kritischen Bilanzierung sind durch ein hocheffizientes Gebäude zumindest 30 kWh pro m² und Jahr an Heizenergie einzusparen. Idealerweise ist eine Dämmung nach ihrer Nutzung wiederzuverwenden oder dem Recycling zurückzuführen. Dies ist bei vielen Dämmstoffen möglich und es sind bereits einige Unternehmen dabei, an technischen Lösungen zu arbeiten. Ebenso ist die ökonomische Amortisation bei Sanierungen ein wichtiges Thema. Laut einer Studie des FIW München sind die gesamten Sanierungskosten der betrachteten Fallbeispiele nach etwa 16 Jahren wieder amortisiert.¹⁵

¹⁴ Zelger, Thomas/Figl, Hildegund u.a.: Passivhaus-Bauteilkatalog: Sanierung. Ökologisch bewertete Konstruktionen. Basel: Birkhäuser Verlag GmbH 2017. S. 12.

¹⁵ Schnedl, Hartmut: Wann lohnt sich eine thermische Sanierung? In: <https://www.dihag.at/images/ftp/TSAN.pdf> (letzter Zugriff: 03.04.2020)

Laut dem Klimagipfel COP21 in Paris 2015 ist eine maximale Erderwärmung von 2 °C bezogen auf die vorindustrielle Zeit festgelegt. Um diese Grenze zu erreichen, muss bis 2050 die CO₂-Neutralität gegeben sein. Im Bausektor ist diese durch die Einhaltung mehrerer essenzieller Punkte erreichbar:

- Sehr hohen Wärmeschutz – 30 bis 50 cm - Passivhausstandard und besser
- Dämmsysteme, die einen möglichst geringen Aufwand mit sich bringen – sowohl in der Herstellung als auch in der Instandhaltung und Entsorgung
- Langfristige Speicherung von biogenem Kohlenstoff – bevorzugt soll biogener Kohlenstoff in bauphysikalisch sicheren Konstruktionen und langlebigen Bauteilschichten zum Einsatz kommen
- Der Einsatz von fossilen Kohlenwasserstoffen in Konstruktionen und zur Beheizung soll vermieden werden¹⁶

Bei der Beurteilung von Bauprodukten muss man zwischen den bautechnischen und bauphysikalischen Aspekten und den bauökologischen und gesundheitlich relevanten Eigenschaften des Produktes unterscheiden. Grundsätzlich werden die bautechnischen und bauökologischen Qualitäten oft durch Normen und Verordnungen geregelt. Die Auswirkungen auf die Gesundheit und die Natur werden zum Teil gesetzlich geregelt (siehe EU-Bauproduktenverordnung) oder auch in freiwilligen Umweltkennzeichnungen (Der Blaue Engel, Österreichisches Umweltzeichen, natureplus-Qualitätszeichen etc.). Wenn es für die Anwendung relevant ist, muss für Produkte, welche im Innenraum eingesetzt werden (wie z.B. bei Innendämmungen) nachgewiesen werden, dass sie wenige Emissionen an den Innenraum abgeben und nach Möglichkeit sich sogar positiv auf das Raumklima auswirken, wie das zum Beispiel bei Lehmputzen der Fall ist. Ökologische Dämmstoffe sind bei Neubau- oder Sanierungsmaßnahmen nicht unbedingt gesetzlich bindend, jedoch sind sie oft für eine Förderung wichtig oder werden in

¹⁶ Zelger, Thomas/Figl, Hildegund u.a.: Passivhaus-Bauteilkatalog: Sanierung. Ökologisch bewertete Konstruktionen. Basel: Birkhäuser Verlag GmbH 2017. S. 12.

bestimmten Ausschreibungen als Muss-Kriterium angegeben. Einige dieser Produktklassifizierungen sind auch in diversen Gebäudebewertungssystemen wie TQB – Total Quality Building oder klimaaktiv-Zertifizierungen für Gebäude vorhanden. Diese Klassifizierungen gewinnen immer mehr an Bedeutung, da in den Köpfen der Menschen das Bewusstsein für die Nachhaltigkeit immer stärker wird. Diese Bewertungssysteme beschäftigen sich mit den Themen der ökologischen, ökonomischen, soziokulturellen, technischen Prozess- und Standortqualität.¹⁷

1.3. Vergleich Außen-, Kern- und Innendämmung

Die Maßnahme, eine Innendämmung in einem Bestandsgebäude auszuführen, ist meist keine Schwarz-Weiß-Entscheidung. Durch die vielfältigen Methoden der Ausführung und der Materialität entstehen fallbezogene Vor- und Nachteile. Allerdings sollte nie auf eine Verbesserung des Wärmeschutzes der Fassade verzichtet werden, und da es mehr als genug Außenwandflächen in unseren Breitengraden gibt, die aus verschiedenen Gründen außen nicht gedämmt werden können, bietet eine Innendämmung oft eine geeignete Lösung. Grundsätzlich ist aus bauphysikalischer Sicht die Außendämmung der Innendämmung vorzuziehen ist. Meist ist die Ausführung mit einer Außendämmung mit weniger Risiken verbunden.

Wenn ein Altbau saniert wird, sind grundsätzlich die Richtlinien und Normen hinsichtlich Energieeffizienz und Normen einzuhalten. Da dies jedoch oft im Konflikt zu wirtschaftlichen Zwängen oder Forderungen des Denkmalschutzes widerspricht, ist oft ein Kompromiss zu finden. Eine Innendämmung kann einige dieser Konflikte lösen. Jedoch erfordert Innendämmung, wie im vorigen Teil des Kapitels erwähnt besondere Sorgfalt.¹⁸

¹⁷ Steiner, Tobias: Ökologie und Ökonomie des Dämmens. Analyse und Bewertung von Dämmmaßnahmen in der Altbausanierung. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2018. S.59ff.

¹⁸ Krus, Martin/Sedlbauer, Klaus/Künzel, Hartwig: Innendämmung aus bauphysikalischer Sicht. In: <http://www.krubitzer.de/download/Innendaemmung.pdf> (letzter Zugriff: 03.04.2020)

Nachfolgend werden in drei Tabellen die Vor- und Nachteile von Außen-, Kern-, und Innendämmungen aufgezeigt.

1.3.1. Außendämmung

+	Thermische Belastung
+	Sommerlicher Wärmeschutz
+	Wärmebrücken
+	Größere Schichtdicken
-	Wetterschutz der Dämmstoffe
-	Fluchtlinie
-	Kosten
-	Städtebauliches Bild
-	Außen mehr Tauwasser

Tabelle 1: Vor- und Nachteile der Außendämmung

Der Wetterschutz von Außendämmstoffen wird meist durch den Außenputz ausreichend gewährleistet. Der Negativpunkt „städtebauliches Bild“ ist derartig zu verstehen, dass es bei einer nachträglich aufgetragenen Außendämmung, auch wenn beispielsweise ein bestehendes Gebäude keine denkmalschutz-Anforderungen aufweist, dennoch durch die umliegenden Gebäude oft ein gewisses Bild von einem Gebäude erwartet wird (Beispielsweise Stuckverzierungen, „alter“ Charakter eines Gebäudes, etc.).

1.3.2. Kerndämmung

+	Bauphysikalisch optimal
+	Nutzung vorhandener Schichten
-	Durchfeuchtung
-	Gefahr Umkehrdiffusion
-	Kosten
-	Kaum nachträglich machbar

Tabelle 2: Vor- und Nachteile der Kerndämmung

Durch ihre bauphysikalischen Vorteile wird die Kerndämmung gerne gesehen, und auch im Verlauf dieser Arbeit wird sich zeigen, dass manche Aufbauten mit einer Innendämmung versuchen, beispielsweise durch eine dicke Lehmputzschicht die Vorteile der Kerndämmung in den Bereich der Innendämmung zu übertragen.

1.3.3. Innendämmung

+	Kurze Anheizphasen
+	Komfortable Montage
+	Geringe Kosten
+	Witterungsunabhängig
+	Schimmelpilzprävention
+	Verbesserte Behaglichkeit
-	Wohnfläche
-	Eventuell entstehende Wärmebrücken
-	Trocknungsverzögerung

Tabelle 3: Vor- und Nachteile der Innendämmung

Abgesehen von der Heizenergie-Einsparung können Innendämmsysteme auch Lösungen zur Vermeidung von Schimmelpilzen und zur Steigerung der Behaglichkeit bieten. Die äußere Gestaltung eines Bauwerkes wird hierdurch nicht verändert. Das Orts- und/oder Straßenbild bleibt bestehen, so wie es ist. Eine denkmalgeschützte oder erhaltenswerte Fassade kann bestehen bleiben. Ebenso wird vor eventuellen Folgen durch Eingriffe in die in der Bauordnung geregelten Abstandsbestimmungen bewahrt. Ebenso ist die komfortable Montage ein Pluspunkt. Gerade für Räume, die nur temporär aufgrund ihrer Nutzungsart geheizt werden müssen, wie zum Beispiel Tagungsräume bieten sich energetisch für eine Innendämmmaßnahme an. Wenn es zum Beispiel darum geht, dass ein Gebäude nur kurz beheizt werden muss und eine kurze Zeit in Verwendung ist, dann ist die Innendämmung energetisch sinnvoller, da sich der Raum um einiges schneller aufheizt.¹⁹

¹⁹ Nusser, Bernd/ Epple, Martin u.a.: Praxis-Handbuch Innendämmung. Planung – Konstruktion – Details – Beispiele. Hrsg.: Fachverband Innendämmung e.V. Köln: Verlagsgesellschaft Rudolf Müller GmbH & Co. KG 2016. S.23f.

2. Baustoffeigenschaften inkl. wärme- und feuchtetechnische Kennwerte für die Simulation

Um ein Bauwerk zu dämmen, gibt es verschiedene Möglichkeiten. Einerseits ist die Entscheidung wichtig, auf welcher Bauteilseite die Dämmung aufgebracht werden soll, andererseits welches Dämmmaterial für die jeweilige Anwendung am besten den Anforderungen entspricht. Die Vielfalt an Produkten gibt dem Planer die Möglichkeit, eine optimal für sein Gebäude und seine Situation passende Dämmung auszuwählen.

Im folgenden Kapitel werden einige ökologische Dämmstoffe herangezogen und ihre Baustoffeigenschaften sowie die wärme- und feuchtetechnischen Kennwerte aufgezeigt.

2.1. Mineraldämmplatten

Die Mineraldämmplatte ist ein Dämmstoff, der sehr häufig in Innendämmungen zum Einsatz kommt, aus dem Grund, dass Mineraldämmplatten für ihre Feuchteunempfindlichkeit bekannt sind. Mineraldämmplatten bestehen zum größten Teil aus Sand, Kalk, Zement und Wasser. Diese mineralischen Grundbaustoffe werden geschäumt, was sehr viel Luft in den Dämmstoff bringt, wodurch die Mineraldämmplatte ihre gute Dämmwirkung erhält. In einigen Produkten kommt auch Lehm zum Einsatz, was den guten Eigenschaften der Mineraldämmplatte weiter zum Vorzug kommt. Die Platten, die dem Porenbeton optisch ähneln, fallen in die Kategorie der kapillaraktiven Innendämmungen. Das heißt, dass sie nicht nur Wasserdampf aufnehmen, sondern auch speichern können.²⁰

²⁰ Grimm, Roland: Was sind Mineraldämmplatten? In:
<https://www.baustoffwissen.de/baustoffe/baustoffknowhow/daemmstoffe/was-sind-mineraldaemmplatten-innendaemmung/> (letzter Zugriff: 04.04.2020)



Abbildung 6: Mineraldämmplatte

2.1.1. Baustoffeigenschaften

Die Feuchteunempfindlichkeit der Mineraldämmplatte erleichtert die Montage des Innendämmsystems immens, da das aufwendige Verlegen einer Dampfbremse so entfällt. Die Kapillaraktivität der Mineraldämmplatte hat zur Folge, dass die Feuchtigkeit des Raumes zwischengespeichert werden kann, ohne dass Schimmel oder Feuchteschäden drohen. Das Wasser wird bei geeigneten Raumklimakonditionen wieder an den Innenraum abgegeben. Bei einer Mineraldämmplatte fällt dieses Risiko weg. Ein weiterer Vorteil davon ist, dass Feuchtigkeit, die sich aus verschiedenen Gründen innerhalb der kalten Monate im Bauteil sammelt, in den warmen Monaten nicht nur die Möglichkeit hat, nach außen auszutrocknen, sondern ebenso, ihre Feuchtigkeit in den Innenraum abzugeben.²¹

Bei einer speziellen Form der Mineralschaumplatte, der Calciumsilikatplatte, kommt eine zusätzliche hohe Alkalität dazu, die die Platte sehr resistent gegen Schimmelbildung macht. Durch diese Eigenschaft wird sie für Innendämmungen sehr interessant. Die Calciumsilikatplatte wird im nächsten Unterkapitel genauer erklärt. Sowohl die Mineralschaum- als auch die Calcium-Silikat-Platte werden in der

²¹ Grimm, Roland: Was sind Mineraldämmplatten? In:
<https://www.baustoffwissen.de/baustoffe/baustoffknowhow/daemmstoffe/was-sind-mineraldaemmplatten-innendaemmung/> (letzter Zugriff: 04.04.2020)

Baubiologie als unbedenklich eingestuft, sind druckfest, formstabil und unbrennbar. Neben Innendämmungen werden sie auch oft als Außenwanddämmung in WDVS, für vorgehängte Fassaden oder auch für die Dachdämmung gerne verwendet. Ebenso haben sie sehr gutes Brandverhalten, da sie weder Rauch noch toxische Gase verursachen und in die Brandschutzklasse A1 eingestuft werden. Die Platten haben wenig Gewicht, sind handlich, und leicht zuzuschneiden, wodurch sich eine sehr leichte Verarbeitbarkeit ergibt. Die Platten sind für fast alle Untergründe (Kalk- oder Zementputz, Lehm, Mauerwerk) geeignet. Sie werden geschraubt, gedübelt oder vollflächig mit Leichtmörtel verklebt.²²

2.1.2. Wärme- und feuchtetechnische Kennwerte

Die genaue Bezeichnung des hier betrachteten Dämmstoffes lautet Multipor Mineraldämmplatte 2014, und wird von Xella International produziert. Eine EPD ist vorhanden. Die wärme- und feuchtetechnischen Kennwerte wurden aus dem Programm Delphin 6.0 herausgelesen und auf diese Art in das Programm Thesim3D eingegeben, um eine möglichst gute Einheitlichkeit der beiden Simulationen zu erzielen.

Symbol - Eigenschaft	Einheit	Größe und Beschreibung
ρ - Rohdichte	kg/m ³	99
Φ - Porosität	m ³ /m ³	0,963
μ - Wert (WDDWZ)		3,0
s - Luftdurchlässigkeit	s	
c – Spez. Wärmekapazität	J/kgK	1331
λ – Wärmeleitfähigkeit (trocken)	W/mK	0,044
θ – Massebez. Feuchtegehalt	m ³ /m ³	0,128
w - Wasseraufnahmekoeffizient	kg/m ² √h	0,00599115

Tabelle 4: Wärme- und feuchtetechnische Kennwerte - Mineraldämmplatten

²² Boos, Markus: Mineraldämmplatten - Innendämmung leicht gemacht. In: <https://www.oekologisch-bauen.info/baustoffe/naturdaemmstoffe/mineraldaemmplatten.html> (letzter Zugriff: 05.04.2020)

2.2. Calciumsilikatplatten

Eine spezielle Form der Mineraldämmplatten wird Calciumsilikatplatte (auch Kalziumsilikatplatte) genannt. Dieser mineralische, naturnahe Baustoff besteht zum Großteil aus Calciumoxyd, Siliziumoxyd, Flugasche, Wasserglas und wenigen Prozent Zellulose. Wie die Mineraldämmplatten ist die Herstellung ähnlich der Herstellung von Porenbeton oder Kalksandstein.²³

Werden die mineralischen Bestandteile mit Wasser aufgeschlämmt und vermischt entsteht Calciumsilikathydrat. Mithilfe des zugesetzten Zellstoffs werden die Kantenstabilität und Flexibilität erhöht. Wie es auch beim Porenbeton geschieht, wird bei der Aushärtung auf ein Wasserdampf-Druck-Verfahren gesetzt. Durch diesen Prozess bildet sich ein feinporiger, offenzelliger und harter Schaum, der geschnitten und hydrophobiert wird, wodurch die Calciumsilikatplatten einsatzbereit gemacht werden. Der Stoff ist in Plattenform und auch als Schüttung erhältlich, wobei die Plattenform um einiges weiter gebräuchlich ist. Die Platten werden meist in Dicken zwischen 20 und 120mm vertrieben, die problemlos gefräst, gebohrt oder geschnitten werden können.²⁴

²³ Boos, Markus: Mineraldämmplatten - Innendämmung leicht gemacht. In: <https://www.oekologisch-bauen.info/baustoffe/naturdaemmstoffe/mineraldaemmplatten.html> (letzter Zugriff: 05.04.2020)

²⁴ Nusser, Bernd/ Eppe, Martin u.a.: Praxis-Handbuch Innendämmung. Planung – Konstruktion – Details – Beispiele. Hrsg.: Fachverband Innendämmung e.V. Köln: Verlagsgesellschaft Rudolf Müller GmbH & Co. KG 2016. S.95.

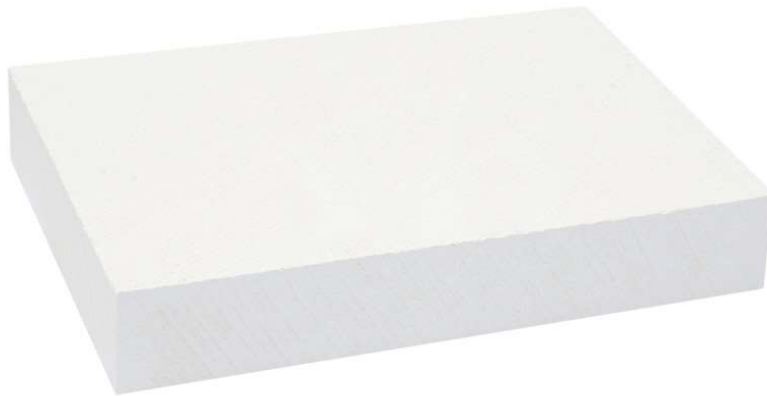


Abbildung 7: Calciumsilikatplatte

2.2.1. Baustoffeigenschaften

Die besondere Eigenschaft einer Calciumsilikatplatte, welche sie mit einer Mineralschaumplatte teilt, ist ihre ausgesprochen gute Diffusionsoffenheit. Sie kann eine noch größere Wassermenge speichern als die herkömmlichen Mineraldämmplatten. Durch ihre hohe Alkalität sind die Platten sehr wenig anfällig für Schimmelpilze, was sie für Innendämmungen sehr interessant macht. Im Vergleich zu den herkömmlichen Mineraldämmplatten ist jedoch ihre Wärmeleitfähigkeit größer, wodurch sie eine entsprechend größere Dicke braucht, um die gleiche Dämmwirkung zu erzielen.²⁵

Klimaplatten werden heutzutage hauptsächlich zur Bekämpfung von Schimmelpilzen eingesetzt. Ein Vorteil der Calciumsilikatplatte ist weiterhin, dass sie sich ökokorrekt recyceln lassen.²⁶

²⁵ Boos, Markus: Mineraldämmplatten - Innendämmung leicht gemacht. In: <https://www.oekologisch-bauen.info/baustoffe/naturdaemmstoffe/mineraldaemmplatten.html> (letzter Zugriff: 05.04.2020)

²⁶ Nusser, Bernd/ Eppe, Martin u.a.: Praxis-Handbuch Innendämmung. Planung – Konstruktion – Details – Beispiele. Hrsg.: Fachverband Innendämmung e.V. Köln: Verlagsgesellschaft Rudolf Müller GmbH & Co. KG 2016. S.95.

2.2.2. Wärme- und feuchtetechnische Kennwerte

Die genaue Bezeichnung des hier verwendeten Dämmstoffes lautet Calsitherm Klimaplatte F und wird von Calsitherm Silikatbaustoffe GmbH produziert. Eine EPD ist vorhanden. Die wärme- und feuchtetechnischen Kennwerte wurden aus dem Programm Delphin 6.0 herausgelesen und auf diese Art in das Programm Thesim3D eingegeben, um eine möglichst gute Einheitlichkeit der beiden Simulationen zu erzielen.

Symbol - Eigenschaft	Einheit	Größe und Beschreibung
ρ – Rohdichte	kg/m ³	267
Φ – Porosität	m ³ /m ³	0,899
μ - Wert (WDDWZ)		6,6
s - Luftdurchlässigkeit	s	
c – Spez. Wärmekapazität	J/kgK	1150
λ – Wärmeleitfähigkeit (trocken)	W/mK	0,074
θ – Massebez. Feuchtegehalt	m ³ /m ³	0,881
w - Wasseraufnahmekoeffizient	kg/m ² √h	0,848704

Tabelle 5: Wärme- und feuchtetechnische Kennwerte - Calciumsilikatplatte

2.3. Holzfaserdämmstoffe

Holzfaserdämmstoffe bestehen grundsätzlich aus Schwachholz und aus Koppelprodukten der Säge- und Hobelwerksindustrie. Diese werden als Hackschnitzel für den Faseraufschluss aufbereitet. Die Hackschnitzel werden mithilfe eines Kochprozesses weich gemacht und die Fasern werden herausgezogen. Als Rohstoff werden meist Nadelhölzer verwendet, da sie längere Fasern bieten. Man unterscheidet grundsätzlich zwei Arten des folgenden Herstellprozesses. Einerseits gibt es den Trockenprozess, bei dem die Fasern mit Klebstoff versetzt, getrocknet und zu Matten geformt und gepresst werden. Um die Matten flexibel zu halten, werden die Fasern mit synthetischer Stützfaser vermischt, auf ein Band gestreut und mittels Heißluft erwärmt. Andererseits ist es möglich, Holzfaserdämmstoffe mithilfe des Nassverfahrens herzustellen. Bei diesem werden dem Faserbrei kleine Mengen an

Additiven beigemischt, und die Mattenbildung wird in einem wässrigen Medium über ein Langsieb durchgeführt. Anschließend werden die Matten getrocknet und mit Brandschutzmittel behandelt.²⁷

Holzfaserdämmungen gibt es für fast alle Dämmmaßnahmen. Sie können mehr oder weniger flexibel sein, druckfest oder weniger druckfest. Zwischen Sparren oder Riegeln ist ein flexibler Dämmstoff nötig, bei Flach- oder Aufsparrendämmungen ein druckbelastbarer Dämmstoff. Es ist ebenso möglich, eine Holzfaserdämmung als eine Trittschalldämmung auszuführen.



Abbildung 8: Holzfaserdämmplatte

2.3.1. Baustoffeigenschaften

Die wichtigsten Eigenschaften einer Dämmung sind es, vor Temperatur und störenden Schallquellen zu schützen. Wenn die Dämmung ökologisch sein soll, sind die Holzfasern eine mögliche Lösung. Obwohl Holz ein brennbarer Stoff ist, kann mit einer Holzfaserdämmung eine Brandwiderstandsklasse von REI90 erreicht

²⁷ Nusser, Bernd/ Eppe, Martin u.a.: Praxis-Handbuch Innendämmung. Planung – Konstruktion – Details – Beispiele. Hrsg.: Fachverband Innendämmung e.V. Köln: Verlagsgesellschaft Rudolf Müller GmbH & Co. KG 2016. S.103.

werden. Die Dämmwirkung von Holzfaserplatten ist in etwa dem Mittelfeld der Dämmstoffe zuzuordnen.²⁸

2.3.2. Wärme- und feuchtetechnische Kennwerte

Die genaue Bezeichnung des hier näher untersuchten Dämmstoffes lautet Holzfaserdämmplatte, und wird von STEICO SE produziert. Eine EPD ist vorhanden. Die wärme- und feuchtetechnischen Kennwerte wurden aus dem Programm Delphin 6.0 herausgelesen, und auf diese Art in das Programm Thesim3D eingegeben, um eine möglichst gute Einheitlichkeit der beiden Simulationen zu erzielen.

Symbol - Eigenschaft	Einheit	Größe und Beschreibung
ρ – Rohdichte	kg/m ³	161
Φ – Porosität	m ³ /m ³	0,893
μ - Wert (WDDWZ)		3,4
s - Luftdurchlässigkeit	s	
c – Spez. Wärmekapazität	J/kgK	1662
λ – Wärmeleitfähigkeit (trocken)	W/mK	0,039
θ – Massebez. Feuchtegehalt	m ³ /m ³	0,550
w - Wasseraufnahmekoeffizient	kg/m ² √h	0,00288593

Tabelle 6: Wärme- und Feuchtetechnische Kennwerte - Holzfaserdämmplatte

²⁸ Hochwarth, Dominik: Holzfaserdämmstoffe – Eigenschaften, Vorteile und Nachteile. In: <https://www.bauredakteur.de/holzfaserdaemmstoffe-eigenschaften-vorteile-und-nachteile/> (letzter Zugriff: 05.04.2020)

2.4. Schilfrohrplatten

Schilf als Dachdeckung beziehungsweise als Putzträger hat in vielen Kulturen und Regionen der Welt Tradition. Die getrockneten Schilfhalm werden gepresst und mit Drähten oder Kunststoffschnüren zusammengebunden, um Matten oder Dämpakete zu bilden. Die Wärmebrückenwirkung der Drähte ist meist schon im Wärmeleitkoeffizienten des Komplettelementes enthalten. Zumeist wird in Schilfdämmstoffen kein chemisches Bindemittel eingesetzt. Je dicker die Matten, umso ähnlicher sind sie den klassischen steifen Dämmplatten. Die Dämmplatten sind in verschiedenen Dicken von ca. 20 bis 120 mm und Größen von bis zu 2,0 m Breite und 2,5m Höhe erhältlich. Die Platten sind mit Kreis- oder Stichsägen bearbeitbar. Der Einbau erfolgt mit herkömmlichen Dämmstoffdübeln. Sie können sowohl liegend als auch stehend eingebaut werden.²⁹



Abbildung 9: Schilfrohrdämmplatte

2.4.1. Baustoffeigenschaften

Mit einer Wärmeleitfähigkeit von etwa 0,055 bis 0,065 W/mK ist der Dämmstoff in der unteren Dämmklasse einzuordnen. Folglich muss man bei einer Schilfdämmung mit einer höheren Dämmdicke rechnen, um denselben Dämmwert als mit anderen

²⁹ Nusser, Bernd/ Eppe, Martin u.a.: Praxis-Handbuch Innendämmung. Planung – Konstruktion – Details – Beispiele. Hrsg.: Fachverband Innendämmung e.V. Köln: Verlagsgesellschaft Rudolf Müller GmbH & Co. KG 2016. S.107.

handelsüblichen Produkten zu erzielen. Ein großer Vorteil der Schilfdämmung ist jedoch, dass sie ohne weitere Vorarbeit als Putzträger verwendet werden kann. Schilfdämmung hat eine feuchtigkeitsregulierende Wirkung. Durch ihre durchschnittliche Wärmespeicherkapazität kann die Schilfdämmung jedoch nur wenig Wärme speichern. Die Schilfdämmplatten fallen unter die Kategorie B2 „normal entflammbar“ und sind somit den meisten Dämmstoffen gleichwertig. Die Schilfdämmplatten sind schimmelresistent und lassen sich gut mit Lehmputzen, Kalkputzen und Wandheizungen kombinieren.³⁰

³⁰ Rösler, Sascha: Naturdämmstoff: Schilfmatten. In:
<https://www.naturanum.de/baustoffe/daemmung/schilf/> (letzter Zugriff: 07.04.2020)

2.4.2. Wärme- und feuchtetechnische Kennwerte

Der hier verwendete Dämmstoff ist Schilf, jedoch aufgrund der fehlenden Materialfunktionen des Dämmstoffes im Delphin 6.0 wurden die Simulationen mit dem Dämmstoff Stroh durchgeführt, welcher in einem anderen Kontext bereits entwickelt wurde. Es wurde angenommen, dass die entstehenden Ungenauigkeiten vernachlässigbar gering sind, da Schilf, ähnlich wie Stroh, aus einzelnen Röhren besteht, welche allerdings nicht direkt in Richtung Außenseite – Innenseite angeordnet sind, was bei beiden Arten zu relativ niedrigen Feuchteübertragungsraten führen sollte. Dies ist der Fall, da die Schilfrohrplatten aus vielen verschiedenen Rohrelementen bestehen, die nicht direkt miteinander verbunden sind, sondern immer einen kleinen Luftraum dazwischen haben. Es werden nachfolgend den wärme- und feuchtetechnischen Kennwerten sowohl von der Schilfplatte, welche im Delphin ohne Materialfunktionen vorhanden ist, als auch von dem Stroh, welcher für die Simulation verwendet wurde, angeführt. Eine EPD von Schilfdämmplatten ist grundsätzlich möglich und bei vielen Produkten vorhanden. Die wärme- und feuchtetechnischen Kennwerte wurden aus dem Programm Delphin 6.0 herausgelesen, und auf diese Art in das Programm Thesim3D eingegeben, um eine möglichst gute Einheitlichkeit der beiden Simulationen zu erzielen.

Symbol - Eigenschaft	Einheit	Größe und Beschreibung
ρ – Rohdichte	kg/m ³	80 / 110
Φ – Porosität	m ³ /m ³	0,970 / 0,981
μ - Wert (WDDWZ)		1,5 / 3,0
s - Luftdurchlässigkeit	s	
c – Spez. Wärmekapazität	J/kgK	1000 / 2000
λ – Wärmeleitfähigkeit (trocken)	W/mK	0,068 / 0,045
θ – Massebez. Feuchtegehalt	m ³ /m ³	0,970 / 0,600
w - Wasseraufnahmekoeffizient	kg/m ² √h	0,005 / 0

Tabelle 7: Wärme- und Feuchtetechnische Kennwerte - Schilfdämmplatten

2.5. Wärmedämmlehm und Lehmputz

Lehm mit gewissen Zuschlagsstoffen wie Holzfasern, Stroh, Kork, Hackschnitzel, Blähton, Perlite oder Zellulose wird Wärmedämmlehm oder Leichtlehm genannt. In Anlehnung an traditionelle Baustoffe wurde an den Lehmdämmstoffen weiter geforscht und dadurch neue Zusammensetzungen entwickelt.

Wärmedämmlehm kann auf der Baustelle oder auch werksmäßig in Plattenform hergestellt werden. Der Wärmedämmlehm kann direkt wie ein Lehmputz auf die Wand aufgebracht werden, oder er wird eingestampft zwischen einer Vorsatzschale aus Holz und der Bestandswand. Daher kann der Wärmedämmlehm sehr gut zur Dämmung von schiefen und unebenen Bauteilen verwendet werden. Um bei einer direkten Verwendung des Wärmedämmlehms größere Dämmstoffdicken zu ermöglichen, werden meist Distanzhölzer angebracht. Zur Armierung werden dann Schilfrohmatten verwendet.³¹



Abbildung 10: Wärmedämmlehm in Plattenform

³¹ Nusser, Bernd/ Eppe, Martin u.a.: Praxis-Handbuch Innendämmung. Planung – Konstruktion – Details – Beispiele. Hrsg.: Fachverband Innendämmung e.V. Köln: Verlagsgesellschaft Rudolf Müller GmbH & Co. KG 2016. S.111.

Lehmputze werden nicht primär zur Verbesserung des U-Wertes und damit des Wärmedurchlasses der Wand verwendet. Sie sind ein Mittel, um das Wohlbefinden und die Gestaltung des Raumes zu verbessern und seinen Wünschen anzupassen. Auch die Denkmalpflege mag ein Interesse für die Wahl eines Lehmputzes rechtfertigen. Einflussgröße für das Raumklima ist die Offenporigkeit des Lehmputzes, welcher direkten Einfluss auf dessen Fähigkeit zur Wasseraufnahme und -abgabe nimmt. Ebenso kann dies einen Einfluss auf die Geruchsverbreitung in dem Raum nehmen.

Lehmputze kommen in mehreren Festigkeitsklassen vor, wobei meistens die höhere bevorzugt werden sollte. Lehmputze sind zwar gut geeignet für Nassräume im Wohnbereich, jedoch bei einer sehr lang andauernden Feuchtigkeitsbelastung, wie sie evtl. in Schwimmbädern vorkommen, ist er nicht geeignet.³²



Abbildung 11: Lehmputz getrocknet

2.5.1. Baustoffeigenschaften

Wärmedämmlehm kann, je nach Herstellung und Material, viele verschiedene Wärmeleitzahlen haben und auch der Wärmedurchlasswiderstand variiert stark. Da jedoch ein nennenswerter Anteil an massivem Lehm im Baustoff vorhanden ist, kommt er nicht an andere Dämmsysteme, die einen wesentlich höheren Luft-zu-Masse-Anteil besitzen wie Mineralwolle etc., heran. Dadurch erhöht sich jedoch

³² Röhlen, Ulrich/Ziegert, Christof: Lehm-bau-Praxis: Planung und Ausführung. 2., vollständig überarbeitete Auflage. Berlin: Beuth Verlag GmbH 2014. S. 43ff.

auch die speicherwirksame Masse des Leichtlehms. Lehm ist dafür bekannt, dass er hervorragend Feuchte speichern und anschließend wieder in den Raum abgeben kann. Sogar bei einer künstlichen Dauerfeuchte von 80 % kann der Lehmputz durch seine niedrige Gleichgewichtsfeuchte von 0,7 Volumenprozent punkten. Die Fähigkeit dieses Baustoffes, Feuchte als flüssiges Wasser aufzunehmen, ist weitgehend durch seine Porenstruktur bestimmt. Wenn Wandoberflächen kälter sind als die Taupunkttemperatur der Luft können sich leicht Wasseransammlungen an den betroffenen Oberflächen bilden. Jedoch auch, wenn die Temperatur der Oberfläche nicht so niedrig ist, kann eine Wasserbildung innerhalb der Konstruktion auf lange Sicht zu Schimmel und anderen Problemen führen. Hier hilft die Wasserspeicherung des Lehms stark. Die Ausführung von Dampfbremsen bei derartigen kapillar leitfähigen Systemen ist also in diesem Zusammenhang nicht nur wirkungslos, sondern sogar der Wirkungsweise der Konstruktion kontraproduktiv, da die Austrocknung in Richtung des Innenraums so gestoppt wird. Lehm verhält sich passiv bei einer Feuereinwirkung, was bedeutet, dass er nicht zur Brandausbreitung beiträgt. Da der Lehm auf der Seite des Brandes „gebrannt“ wird, ist er dadurch noch feuerbeständiger, was zur Folge hat, dass je nach Zuschlagsstoff die Klassifizierung zwischen „Schwerentflammbar“ und „Nichtbrennbar“ schwankt.³³

2.5.2. Wärme- und feuchtetechnische Kennwerte

Die genaue Bezeichnung des hier verwendeten Dämmstoffes lautet Wärmedämmlehm Blähton, und wird von HAACKE Energie-Effizienz GmbH produziert. Eine EPD ist vorhanden. Die wärme- und feuchtetechnischen Kennwerte wurden aus dem Programm Delphin 6.0 herausgelesen und auf diese Art in das Programm Thesim3D eingegeben, um eine möglichst gute Einheitlichkeit der beiden Simulationen zu erzielen.

³³ Vollhard, Franz: Bauen mit Leichtlehm: Handbuch für das Bauen mit Holz und Lehm. 8., neubearbeitete und ergänzte Auflage. Basel: Birkhäuser Verlag GmbH 2016. S. 199ff.

Symbol - Eigenschaft	Einheit	Größe und Beschreibung
ρ – Rohdichte	kg/m ³	300
Φ – Porosität	m ³ /m ³	0,887
μ - Wert (WDDWZ)		6,5
s - Luftdurchlässigkeit	s	
c – Spez. Wärmekapazität	J/kgK	1419
λ – Wärmeleitfähigkeit (trocken)	W/mK	0,094
θ – Massebez. Feuchtegehalt	m ³ /m ³	0,637
w - Wasseraufnahmekoeffizient	kg/m ² √h	0,113212

Tabelle 8: Wärme- und Feuchtetechnische Kennwerte - Wärmedämmlehm

Die genaue Bezeichnung des hier verwendeten Materials lautet Lehmputz. Das Material wurde anhand vergleichbarer Putze und anderer Lehmbaustoffe erstellt. Dies wurde gemacht, da der Lehmputz, welcher bereits im Programm eingespeichert ist, keine Materialfunktionen (Dampfleitfähigkeit, Feuchtespeicherfunktion etc.) enthält, und dies für einen Baustoff wie Lehmputz, der stark von seinen feuchtespeichernden Eigenschaften abhängig ist, von großer Bedeutung ist. Eine EPD von Lehmputzen ist grundsätzlich möglich und öfters vorhanden. Die wärme- und feuchtetechnischen Kennwerte wurden aus dem Programm Delphin 6.0 herausgelesen, und auf diese Art in das Programm Thesim3D eingegeben, um eine möglichst gute Einheitlichkeit der beiden Simulationen zu erzielen.

2. Baustoffeigenschaften inkl. wärme- und feuchtetechnische Kennwerte für die Simulation

Symbol - Eigenschaft	Einheit	Größe und Beschreibung
ρ – Rohdichte	kg/m ³	1514
Φ – Porosität	m ³ /m ³	0,424
μ - Wert (WDDWZ)		11,4
s - Luftdurchlässigkeit	s	
c – Spez. Wärmekapazität	J/kgK	1000
λ – Wärmeleitfähigkeit (trocken)	W/mK	0,650
θ – Massebez. Feuchtegehalt	m ³ /m ³	0,405
w - Wasseraufnahmekoeffizient	kg/m ² √h	0,175662

Tabelle 9: Wärme- und Feuchtetechnische Kennwerte - Lehmputz

3. Methode

3.1. Beschreibung Simulationsprogramme

Die Anwendung von Simulationsprogrammen in der Bautechnik gewinnt immer mehr an Bedeutung. Die Simulation ist eine Vorhersage des nicht konstanten Temperatur- und Feuchteverhaltens einer mehrschichtigen Konstruktion unter natürlichen Klimabedingungen. Im Gegensatz dazu gibt es noch die stationäre Beurteilung wie sie zum Beispiel bei der Berechnung einer Tauwassergefahr in Wand- oder Dachbauteilen mithilfe des Glaser-Verfahrens zum Einsatz kommt. Diese stationäre Beurteilung ist beispielsweise in vielen Energieausweis-Berechnungs-Programmen prävalent, obwohl diese Berechnungsart weniger genau und weniger detailliert rechnet. Die Simulation berücksichtigt Wärme- und Feuchtespeichereffekte, den Wärmetransport durch Dampfdiffusion und auch Flüssigtransportphänomene im Baustoff. Die Erfahrungen, die mit instationären Simulationsverfahren gemacht wurden, sind durch ihre Genauigkeit und Reproduzierbarkeit als gut zu bezeichnen. Die Ergebnisse von validierten Berechnungen hängen stärker von der Wahl der klimatischen Parameter und den verwendeten Materialien ab als von dem verwendeten Simulationsprogramm.³⁴

Für eine zuverlässige Simulation sind geeignete Materialkennwerte unerlässlich. Solche müssen neben den für das Glaser-Verfahren nötigen Kennwerte auch noch Parameter für den Flüssigwassertransport, die Feuchtespeicherung, das Austrocknungsverhalten, die Feuchteabhängigkeit von anderen Daten wie der Wärmeleitfähigkeit und des Wasserdampfdiffusionswiderstands beinhalten. Es sind außerdem repräsentative Daten in Bezugnahme auf das Außenklima des Simulationsstandorts wesentlich. Zunächst wird der Wandaufbau mit den nötigen Kennwerten (die bei den meisten Programmen bereits in Datenbanken vorhanden sind) und den Schichtdicken. Es ist auch oft möglich, eigene Materialdaten auf Basis von Datenblättern und Kennwerten in das Programm einzuspielen. Anschließend werden den

³⁴ WTA-Merkblatt 6-2. Simulation wärme- und feuchtetechnischer Prozesse. 12.2014. Hrsg.: WTA, Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V. S. 4ff.

Bauteilen ihre jeweilige Ausrichtung, ihren Bezug zum Außenklima und ihr Standort angegeben. Für das Innenraumklima gibt es zahlreiche Datensätze für normierte Klimata von Wohn-, Büro- und sonstigen Gebäuden. Zu Beginn der Berechnung werden typische Baufeuchten oder auch rechnerisch ermittelte Feuchteprofile eingegeben. Mehrdimensionale Einflüsse wie Hinterlüftungen, Schlagregenleckagen oder ähnliches werden vereinfacht in der Berechnung berücksichtigt. Der Start- und Endzeitpunkt der Simulation wird vom Nutzer festgelegt. Dies kann entscheidend sein, da einige Konstruktionen (insbesondere durch eine Dampfbremse diffusionsdicht ausgeführte Systeme) erst nach einer verhältnismäßig langen Zeit ihren sogenannten „eingeschwungenen“ Zustand erreichen. Das bedeutet, dass sie erst nach einer gewissen Zeit die Feuchteverhältnisse nur noch jahreszeitenbedingt, aber nicht mehr von Jahr zu Jahr unterschiedlich verändern. Die Handhabung einer solchen Software ist also essenziell, um realistische Ergebnisse erreichen zu können.³⁵

3.1.1. Thesim3D

Thesim3D ist eine Online-Berechnungssoftware, die von Herrn Univ.-Lekt. Dipl.-Ing. Dipl.-Ing. (FH) Dr.techn. Joachim Nackler und Herrn Ao. Univ.-Prof. i. R. Dipl.-Ing. Dr.techn. Klaus Kreč entwickelt wurde. Sie wurde entwickelt, um es für ArchitektInnen und PlanerInnen einfacher zu machen, Entscheidungen bezüglich der sommerlichen Überwärmung zu treffen. Thesim3D ist ein Online-Simulations-Tool, welches durch ihre thermisch dynamische Berechnung eine weit höhere Genauigkeit als eine statische Simulation als das in Österreich überwiegend eingesetzte Normverfahren aus der ÖNORM B8110-3 besitzt.³⁶

Da viele Planungsentscheidungen, welche bereits in sehr frühen Phasen getroffen werden, einen hohen Einfluss auf die sommerliche Überwärmung der Räume eines

³⁵ Zirkelbach, Daniel: Hygrothermische Simulation – Anwendungsmöglichkeiten für Planer und Sachverständige. In: <https://wufi.de/literatur/Zirkelbach%20-%20Hygrothermische%20Simulation.pdf> (letzter Zugriff: 10.04.2020)

³⁶ Nackler, Joachim/Kreč Klaus: Thesim 3D. Was? Warum? Wie? In: <http://www.thesim.at/> (letzter Zugriff: 20.04.2020)

Bauprojektes haben, wurde das Tool Thesim3D entwickelt. Es sollen entsprechende Überlegungen zur Sommertauglichkeit bereits in der Entwurfsphase in Betracht gezogen werden. Aus diesem Grund wurde das Tool gestaltet, um selbsterklärend und einfach zu bedienen zu sein. Es soll dadurch den ArchitektInnen und PlanerInnen ermöglicht werden, einen hinsichtlich der sommerlichen Überwärmung optimierten Gebäudeentwurf zu finden.³⁷

3.1.2. Delphin 6.0

Delphin ist eine Simulationssoftware für den gekoppelten Luft-, Feuchte-, Wärme- und Salztransport in Baustoffen. Die Delphin-Software zeichnet sich durch verschiedene Punkte in der Fachwissenschaft aus:

- Eine benutzerfreundliche Oberfläche, welche die Anpassung und Bewertung von fast allen Modellparametern erlaubt
- Eine Programmstruktur, welche eine leichte Integration von neuen physikalischen Modellen und Komponenten ermöglicht
- Ein komplexes, physikalisches und thermodynamisch fundiertes Modell mit einer leicht erweiterbaren mathematischen Formulierung
- Eine akkurate Beschreibung des Salztransports, welche mit dem Feuchte-transport gekoppelt ist

Das Programm wird sowohl in der Lehre wie auch in der Wirtschaft für Gutachten und Materialforschung verwendet. Der Vorläufer des Programms Delphin wurde im Jahr 1987 im Rahmen einer Diplomarbeit von dem Autor John Grunewald entwickelt. Es durchlief weitere Entwicklungszyklen und wurde von 2003 bis 2007

³⁷ Nackler, Joachim: Sommerlicher Wärmeschutz. Vergleich von Berechnungsansätzen und Entwicklung eines Planungsinstrumentes für Entwurfsfindung und Nachweis. Wien: Technische Universität, Fakultät für Architektur und Raumplanung. Dissertation 2017.

von Andreas Nikolai basierend auf den Algorithmen und Konzepten des Basisprogrammes neu geschrieben. Die Versionen Delphin 5 und Delphin 6 sind heutzutage weit verbreitet.³⁸

³⁸ Delphin (Software). In: [https://de.wikipedia.org/wiki/Delphin_\(Software\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Delphin_(Software)) (letzter Zugriff: 21.04.2020)

3.1.3. Vergleich Glaser-Verfahren

Die herkömmliche Berechnung des Wasserdampfgehalts einer Konstruktion erfolgt nach dem sogenannten Glaser-Verfahren. Dieses Verfahren wird oft im Verlauf der Erstellung von Energieausweisen etc. verwendet.

Bei diesem Verfahren werden auf der X-Achse des Diagramms die im Verhältnis zur wasserdampfüquivalenten Schichtdicken s_d gesetzten Baustoffdicken eingetragen. Auf der Ordinate des Diagramms wird der vorhandene Wasserdampfpartialdruck und der aufgrund der Temperatur ermittelte Sättigungsdampfdruck aufgetragen. Schneiden sich diese beiden Linien in irgendeinem Punkt, so würde der Wasserdampfpartialdruck theoretisch größer sein als der Wasserdampfsättigungsdruck. Da dies jedoch aus physikalischen Gründen nicht möglich ist, dass an der Schnittstelle Tauwasser auftritt. Mittels des Glaser-Berechnungsverfahrens kann sowohl die im Winter ausfallende Tauwassermasse als auch die im Sommer durch Verdunstung abführbare Wassermasse berechnet werden.³⁹

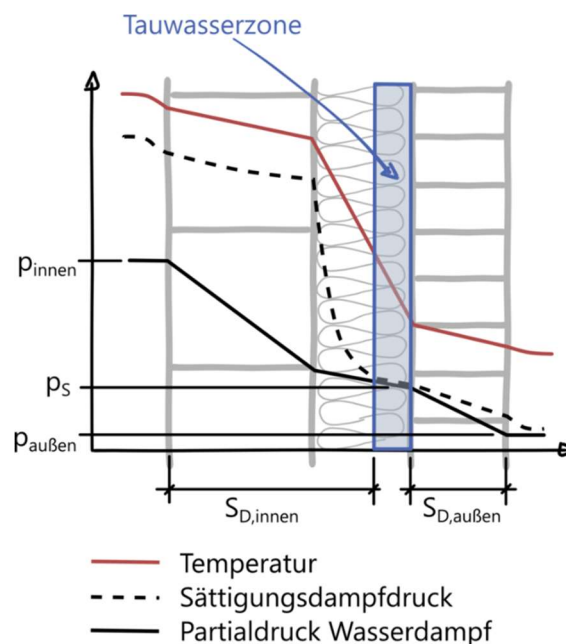


Abbildung 12: Beispiel Glaser-Diagramm

³⁹ Vismann, Ulrich: Wendeorst – Bautechnische Zahlentafeln. 35. Auflage. Wiesbaden: Springer Verlag 2015. S.132.

3.2. Beschreibung Parameter für die Simulation

In Simulationsprogrammen wie Delphin und Thesim3D gehen viele Parameter in die Berechnung ein, von geometrischen Parametern wie Länge, Breite und Tiefe zu positions- und orientierungsbezogenen wie Lage, Außeneinflüsse und Orientierung bis hin zu materialspezifischen Kennwerten, welche im Kapitel 2 schon genauer erwähnt wurden. Auch die simulierte Zeit kann eine große Rolle spielen.

Einerseits muss die Untersuchung nach einem bestimmten Ziel erfolgen. Es muss von Anfang an klar sein, wonach in der Simulation gesucht wird und dadurch muss eine konkrete Fragestellung formuliert werden. Weiter muss auf einen spezifischen Fall, sei es die wirkliche geplante Ausführung eines speziellen Projektes oder auch ein Worst-Case-Szenario für ein Element, konkretisiert werden. Es muss dann das typische Verhalten eines Stoffes abgeschätzt werden. Der nächste Schritt besteht darin, die Simulation so zu gestalten, dass sich am Schluss nicht irgendwelche detaillierten Verhaltensweisen des Stoffes in Bezug auf die Zeit herauslesen lassen, sondern dass eine klare Fragestellung – beispielsweise: ist das Bauteil für eine Sanierung geeignet oder nicht? – beantwortet wird. Es ist außerdem essenziell, die untersuchte Konstruktion genau festzulegen und die benötigten hygrothermischen Kenndaten zu untersuchen und auszuwählen. Die verwendeten Randbedingungen sind ebenso festzulegen und zu dokumentieren.⁴⁰

⁴⁰ WTA-Merkblatt 6-1-01/D. Leitfaden für hygrothermische Simulationsberechnungen. 05.2002. Hrsg.: WTA, Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V. S. 3ff.

Es wurden folgende Aufbauten für die Simulationen verwendet:

- Ungedämmte Bestandskonstruktion

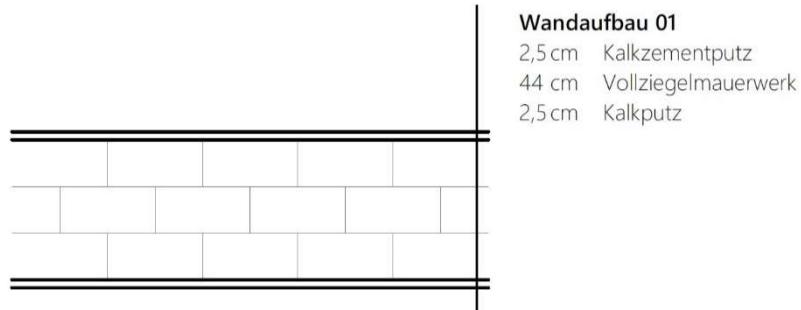


Abbildung 13: Wandaufbau 01

- Konstruktion mit Mineraldämmplatten und Innenputz

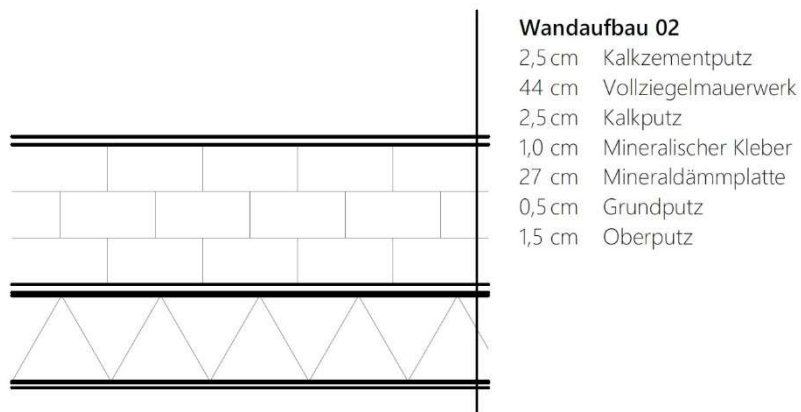


Abbildung 14: Wandaufbau 02

- Konstruktion mit Calciumsilikatplatten und Innenputz

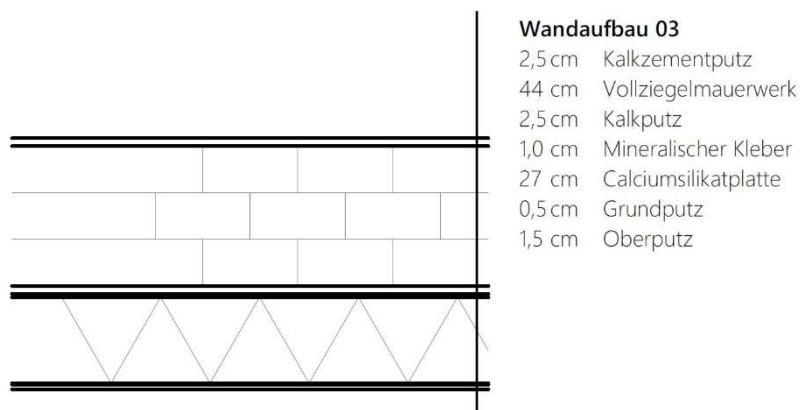


Abbildung 15: Wandaufbau 03

- Konstruktion mit Holzfaserdämmplatten und Lehmputz

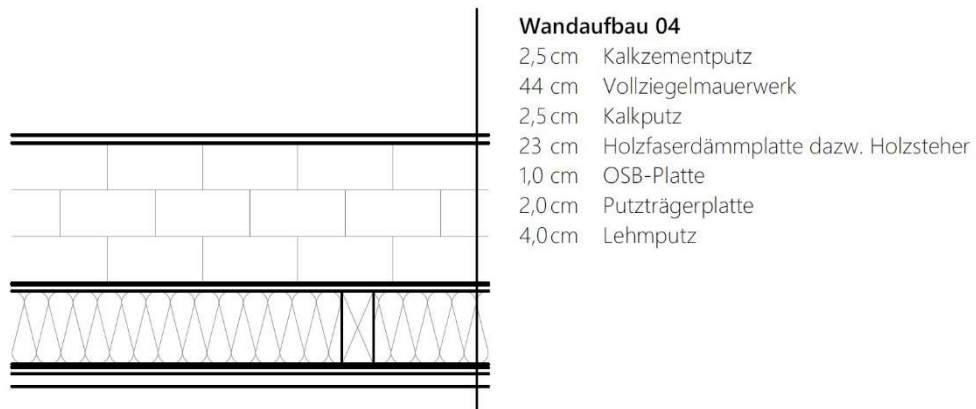


Abbildung 16: Wandaufbau 04

- Konstruktion mit Schilfrohrdämmplatten und Lehmputz

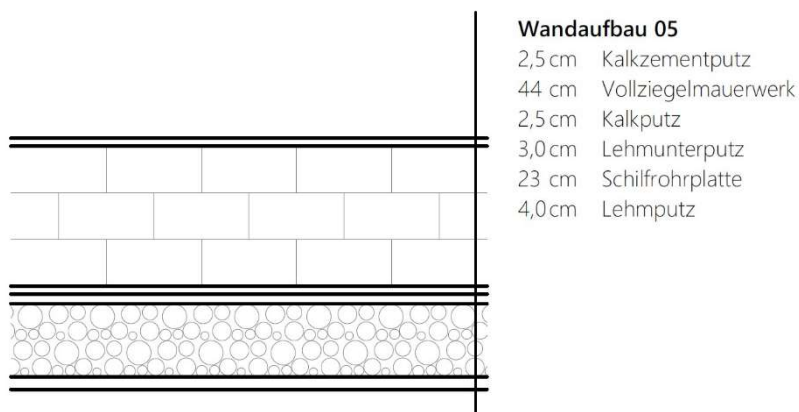


Abbildung 17: Wandaufbau 05

- Konstruktion mit Wärmedämmlehm und Lehmputz

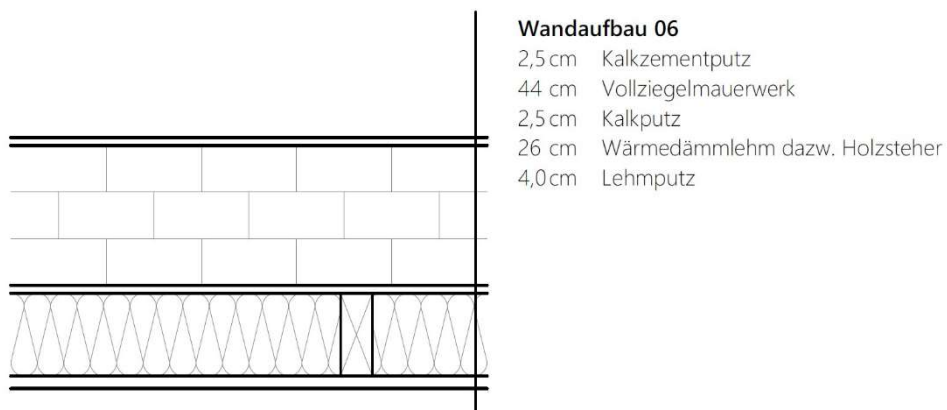


Abbildung 18: Wandaufbau 06

Auf Grund der unterschiedlichen Konstruktionsarten variiert der U-Wert. Neben der Betrachtung einer einheitlichen Dämmdicke wäre es möglich, Konstruktionen mit gleichem Gesamt-U-Wert zu untersuchen, worauf hier aber verzichtet wird. Es wurden folgende U-Werte der Konstruktionen festgestellt:

- Wandaufbau 01 (Ungedämmte Wand): $U = 1,259 \text{ W/m}^2\text{K}$
- Wandaufbau 02 (Mineraldämmplatten): $U = 0,143 \text{ W/m}^2\text{K}$
- Wandaufbau 03 (Calciumsilikatplatten): $U = 0,223 \text{ W/m}^2\text{K}$
- Wandaufbau 04 (Holzfaserdämmung): $U = 0,164 \text{ W/m}^2\text{K}$
- Wandaufbau 05 (Schilfrohrdämmung): $U = 0,233 \text{ W/m}^2\text{K}$
- Wandaufbau 06 (Wärmedämmlehm): $U = 0,283 \text{ W/m}^2\text{K}$

Die U-Werte wurden mit dem Programm ArchiPhysik ermittelt, mithilfe der Lambda-Werte, welche von den verwendeten Materialien im Delphin herausgelesen wurden. Wie man sehen kann, bringen alle fünf gedämmten Systeme eine wesentliche Verbesserung mit sich, was den Wärmedurchgangskoeffizienten betrifft. Auffallend ist hierbei, welche Bandbreiten sich ergeben.

Die Mineraldämmplatten ergeben einen sehr guten U-Wert, obwohl sie nicht den besten Lambda-Wert der betrachteten Dämmstoffe haben. Dies ergibt sich dadurch, dass eine solche Konstruktion sehr einfach ist, und dadurch ist bei einer festgelegten Gesamtdicke eine größere Stärke der tatsächlich dämmenden Schicht zu erreichen. Die Calciumsilikatplatten verhalten sich ähnlich, haben jedoch einen schlechteren Lambda-Wert, was zu einer Verschlechterung des Wärmedurchgangskoeffizienten führt. Argumentierbar ist der Einbau einer solchen Mineraldämmplatte also evtl. nur durch die Alkalität der Calciumsilikatplatte, welche ein Schimmelpilzwachstum im Innenraum auf ein Minimum reduziert. Die Holzfaserdämmung hat von den hier erwähnten ökologischen Innendämmungen die niedrigste Wärmeleitfähigkeit, was natürlich zu einem sehr guten U-Wert führt. Jedoch wie vorhin erwähnt, zeigt sich durch die kompliziertere Konstruktion mit dem Lehmputz ein vergleichsweise niedrigerer Wert, als unter Umständen sonst von dieser Dämmungsart zu erwarten wäre. Die Schilfrohrplatten ordnen sich relativ

ausgeglichen ein, da der Konstruktionsaufwand nicht allzu hoch ist, die Platten selbst jedoch auch nicht den niedrigsten Lambda-Wert aufweisen. Schlussendlich kann man noch bei dem Wärmedämmlehm den großen Einfluss des „Bindemittels“ Lehm sehen. Auch wenn der hier gewählte Zuschlagsstoff Blähton für sich eine sehr niedrige Wärmeleitfähigkeit hätte, wird viel von dieser Dämmwirkung dadurch verschlechtert, dass zwischen den einzelnen Blähtonkugeln Lehm als Verbindung ist. Auch wenn dies unter Umständen einen stark positiven Einfluss auf das Raumklima haben kann, so führt er in diesem Kontext dazu, dass der U-Wert im Vergleich zu den anderen Saniermaßnahmen den schlechtesten Wert darstellt.

3.2.1. Parameter für die Überprüfung der sommerlichen Überwärmung

Für die Berechnung der sommerlichen Überwärmung sind folgende Parameter von großer Bedeutung:

- Standort
- Lüftung
- Verschattung
- Nutzung
- Modellgebäude
- Verwendete Materialien

Der fundierte Beispielraum, welcher für diese Arbeit genutzt wird, liegt in Wien, im ersten Bezirk (Innere Stadt). Er liegt auf einer Meereshöhe von 170 m. Er hat eine Breite von 435 cm, eine Tiefe von 446 cm und eine Höhe von 310 cm (Maße von der Südseite gesehen). Die Maße wurden gewählt, um der Geometrie eines Altbaus in der städtischen Lage möglichst aussagekräftig zu entsprechen. Die Materialien wurden bereits im vorigen Kapitel 2 angegeben. Es wird angenommen, dass eine Vergrößerung der Konstruktion von nicht mehr als 30 cm (inklusive Innenputz und eventuellen Klebschichten) erwünscht ist, da der Platz in derartigen Bauten von großer Wichtigkeit oft ist, da die Quadratmeteranzahl stark die Miet- und Kaufpreise beeinflussen.

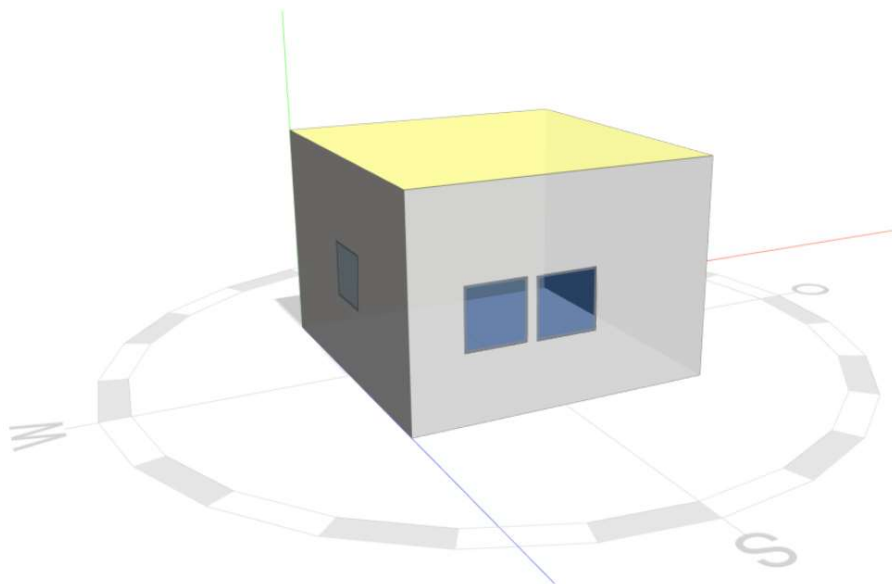


Abbildung 19: Modellraum Thesim3D

3.2.2. Parameter für die hygrothermische Simulation

Die hygrothermische Simulation, welche im Rahmen dieser Bachelorarbeit durchgeführt wird, bezieht sich auf den Einbau einer Innendämmung in ein Bestandsgebäude in Ziegelbauweise. Hierbei wird untersucht, an welcher Stelle der neuen Außenwand sich am ehesten Wasserdampf (also relative Luftfeuchte) nach einigen Jahren der Benützung des sanierten Gebäudes sammelt, anschließend wird an diesem Punkt berechnet, wie wahrscheinlich ein Schimmelpilzwachstum ist.

Dieser Wert wird von den verschiedenen Innendämmsystemen mit dem Bestandswert der Konstruktion (ungedämmt) verglichen. Folgende Parameter haben einen sehr starken Einfluss auf diese Simulation:

- Außenklima
- Innenraumklima
- Verwendete Materialien und deren hygrothermische Kennwerte
- Dauer der Simulation
- Luftfeuchtigkeit
- Temperatur

Es wurde mithilfe des Simulationsprogramms Delphin 6.0 eine Wandecke modelliert (siehe Abbildung 13), ein Ort, welcher bekannt dafür ist, dass er eine starke Schimmelgefahr birgt. Die Außen- und Innenraum-Klimata wurden anhand von statistischen Daten übernommen, wobei das Außenraumklima vom Standort Wien ausgeht. Die Materialien wurden bereits im Kapitel 2 genauer beschrieben. Die Dauer wurde auf 5 Jahre festgelegt. Die Luftfeuchtigkeit beträgt zum Start der Simulation außen 80 % und innen 50 %, die Temperatur außen -10 °C und innen 20 °C, sind jedoch von den veränderlichen Wetterdaten abhängig.

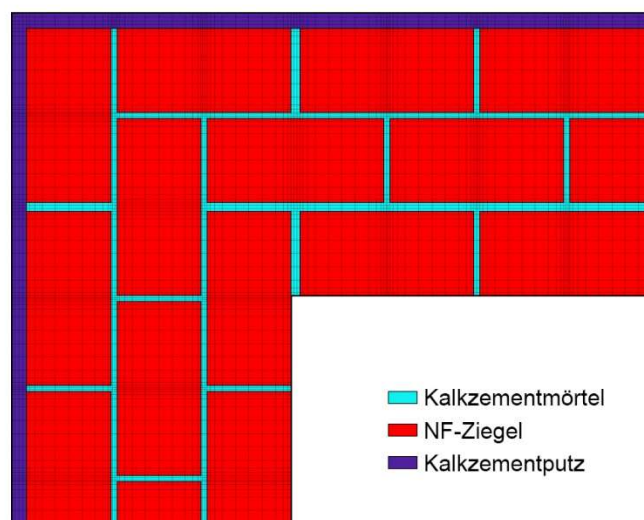


Abbildung 20: Wandecke Bestand Modell Delphin 6.0

4. Parameterstudien

4.1. Simulation der Sommertauglichkeit eines Modellraums

Wie im vorigen Kapitel erwähnt, wurde die sommerliche Überwärmung eines Modellraums mit verschiedenen Innendämmsystemen simuliert. Es wurden zuerst die Rahmenbedingungen festgelegt, anschließend wurde der Modellraum angepasst. Danach wurden die Bauteile festgelegt und die Simulationen für jede Art von Bauteil einmal durchgespielt.

4.1.1. Dokumentation der Simulation

Die detaillierten Rahmenbedingungen schauen wie folgt aus:

Standort	Wien, innere Stadt
Seehöhe	170 m.ü.A.
Farbe äußere Oberfläche Bauteile	Mittel
Fugenluftwechsel	0,1 h ⁻¹
Obergrenze Temperatur	27 °C
Tagesschwankung Außentemperatur	14 K
Bodentemperatur	20 °C
Trübungsfaktor nach Linke	4,5
Diffusstrahlungsfaktor nach Reitz	0,333
Reflexionszahl Umgebung (Albedo)	0,2
Absorbierter Strahlungsanteil durch Schmutz	5 %
Wärmekapazität Luft	1,2 kJm ⁻³ K ⁻¹

Tabelle 10: Rahmenbedingungen Thesim3D

Der Modellraum wurde, wie im Kapitel 3.2.1 erwähnt, aufgrund von fundierten Bestandsraum-Daten festgelegt. Die Bauteilaufbauten wurden wie im Kapitel 3.2 ersichtlich eingetragen. Die genauere Dokumentation der Simulation befindet sich im Anhang.

4.1.2. Ergebnisse

Die Ergebnisse der Simulation der operativen Temperatur zur Beurteilung der Sommertauglichkeit zeigt Abbildung 21:

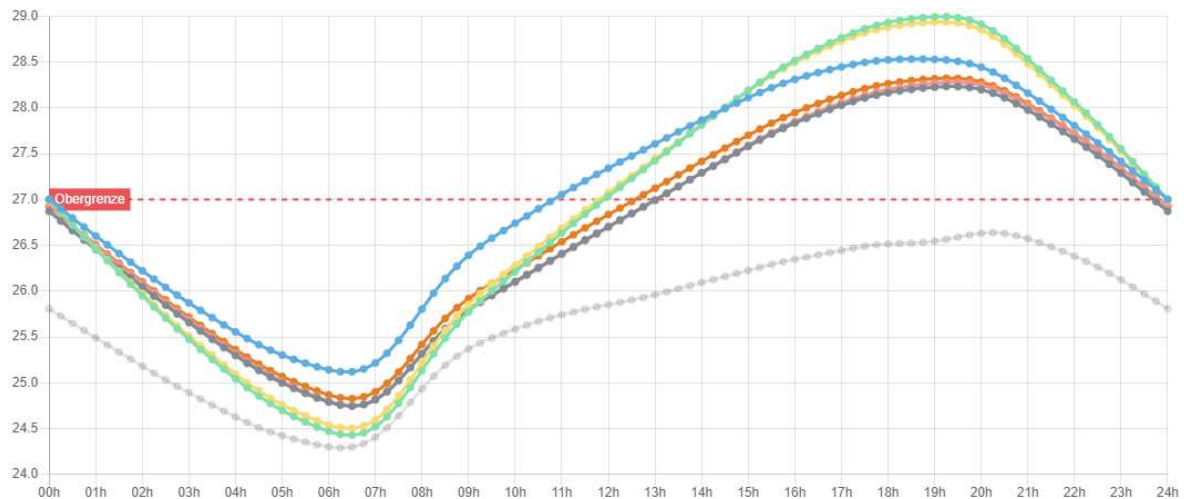


Abbildung 21: Operative Temperatur im Tagesverlauf, Thesim3D - Diagramm

Variante	Bezeichnung	$\Theta_{op,avg}$ [°C]	$\Theta_{op,max}$ [°C]
●	Ungedämmte Wand	27,1	28,5
●	Mineraldämmplatte	26,9	29,0
●	Calciumsilikatplatte	26,9	28,9
●	Holzfaserdämmplatte	26,7	28,2
●	Schilfrohrplatte	26,7	28,3
●	Wärmedämmlehm	26,8	28,3
●	Ungedämmte Wand mit Verschattung	25,7	26,6

Tabelle 11: Temperaturvergleich Thesim3D

Man erkennt in Blau den Referenzwert der ungedämmten Konstruktion. Durch ihre hohe thermische Masse sind die Tag-Nacht-Schwankungen hier relativ gering, was allerdings, dadurch dass die nicht vorhandene Dämmung die Hitze stärker von der

Wandaußenseite als eine gedämmte Wand durchstrahlen lässt, zu höheren Durchschnittstemperaturen führt. Dies kann je nach Nutzer als starkes Problem angesehen werden, da am Tag der Nutzer möglicherweise nicht zuhause ist und dadurch eine hohe Temperatur zu diesen Zeiten als weniger schlimm angesehen wird, jedoch sind in der Nacht die Temperaturen umso höher.

Ersichtlich ist, dass die Konstruktionen mit der Calciumsilikatplatte und der Mineraldämmplatte zu niedrigen nächtlichen und hohen Temperaturen am Tag führen. Dies rührt daher, dass diese Dämmungen zwar schon vor der Aufheizung von außen schützen, aber dadurch dass sie nur eine dünne Putzschicht haben, nur eine kleine thermische Masse mit sich bringen, welche durch die Nachtlüftung an Wärme verlieren könnte und so am Tag zu niedrigeren Temperaturen führen würde.

Alle drei Systeme, welche einen Lehmputz verwenden, zeigen ähnliche Ergebnisse auf. Dies liegt daran, dass es grundsätzlich für die sommerliche Überwärmung am sinnvollsten ist, eine wärmedämmende Schicht weiter außen zu haben als die Speicherschicht. Durch dieses System, welches eine größere Speichermasse bietet als die Mineraldämmplatte und die Calciumsilikatplatte kann die Kühle der Nacht bei Weitem besser an den Innenraum am Tag abgegeben werden als es sonst möglich wäre, was hier zu den niedrigeren Tag- und niedrigeren Nachttemperaturen als der Referenztemperaturkurve führt.

Weiters wurde noch die ungedämmte Wand überprüft, allerdings wurden in dieser Variante die Fenster des Versuchsraums mit einer Jalousie versehen. Dies führt zu den niedrigsten Temperaturen der ganzen Simulation und zu der einzigen Temperaturkurve, die konstant unter der Obergrenze der menschlichen Behaglichkeit liegt.

4.2. Simulation des hygroth. Verhaltens einer Wandkonstruktion

Die Simulation wurde so festgelegt, dass bei den verschiedenen Konstruktionsarten überprüft wird, ob nach einem Zeitraum von 5 Jahren Schimmel auftritt. Es wurde ebenso wie bei der Überprüfung der sommerlichen Überwärmung festgelegt, dass auf die bestehende Ziegelwand ein zusätzliches Innendämmsystem mit einer Gesamtstärke von 30cm aufgebracht wird.

4.2.1. Dokumentation der Simulation

Eine genauere Beschreibung des Vorganges befindet sich im Anhang.

Für die Simulation des hygrothermischen Verhaltens und des Schimmelprognosemodells musste vorerst die relative Feuchte im Bauteil überprüft werden. Dafür wurde die Konstruktion im Delphin eingetragen, anschließend wurden die Randbedingungen eingegeben. Es wurde auf einen Zeitraum von 5 Jahren simuliert, anschließend wurde aufgrund der Ergebnisse festgelegt, welcher der schimmelgefährdetste Punkt innerhalb des Wandsystems ist (in der Abbildung unten ist die Feuchte, die sich im Bauteil ohne Dämmmaßnahme gebildet hat, ersichtlich.)

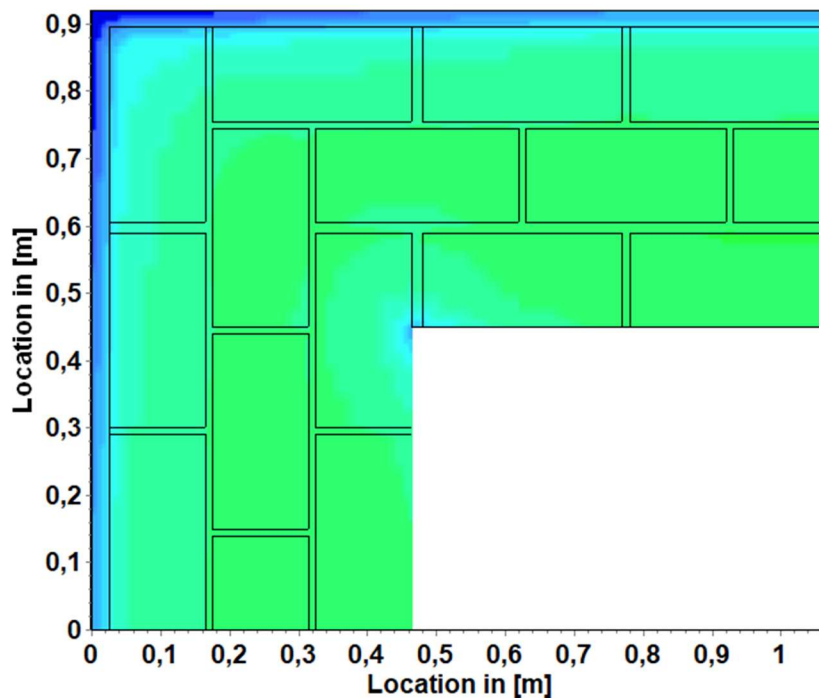


Abbildung 22: Relative Feuchte im ungedämmten Bauteil

Wie man hier erkennen kann, ist die relative Feuchte im Außenbereich sehr hoch, was allerdings durch die niedrigen Temperaturen im Winter zu erklären ist. Problematisch wäre hier die Innenecke, welche ebenso eine hohe relative Feuchte aufweist. Aus diesem Grund wird bei dieser Konstruktion dieser innerste Punkt simuliert. Zusätzlich zu diesem Punkt wurde auch die Innenseite der Wand in weiterer Entfernung der Wandecke simuliert. Dies wurde ebenso bei den anderen Aufbauten durchgeführt. Es wurde die relative Feuchte und die Temperatur in diesen Punkten nachgewiesen und mithilfe des „VTT Mould Models“ innerhalb des Post-Processings von Delphin 6.0 betrachtet. Es wurden nur die Punkte an der Wandinnenseite betrachtet, da innerhalb der Konstruktion teilweise schon Schimmelpilzwachstum rechnerisch entstehen kann, jedoch wird dies dadurch, dass durch die vollflächige Verklebung keine Hinterströmung der Baustoffe möglich ist, als sehr unwahrscheinlich angesehen.

Die folgende Abbildung zeigt den relativen Feuchtegehalt im Verlauf des Bauteils am Schluss der simulierten 5-Jahres-Periode. Wie man sehen kann, ist die Konstruktion der ungedämmten Bestandswand in dem beobachteten Inneneckpunkt am stärksten mit Feuchte gesättigt. Die gedämmten Konstruktionen sind durch ihre hohe Dicke, welche die Temperatur an der Rauminnenseite verhältnismäßig weit nach oben treibt. Dies sorgt wiederum dafür, dass die relative Feuchte an der Rauminnenseite niedrig ist, was einem Schimmelpilzwachstum grundsätzlich entgegenwirkt.

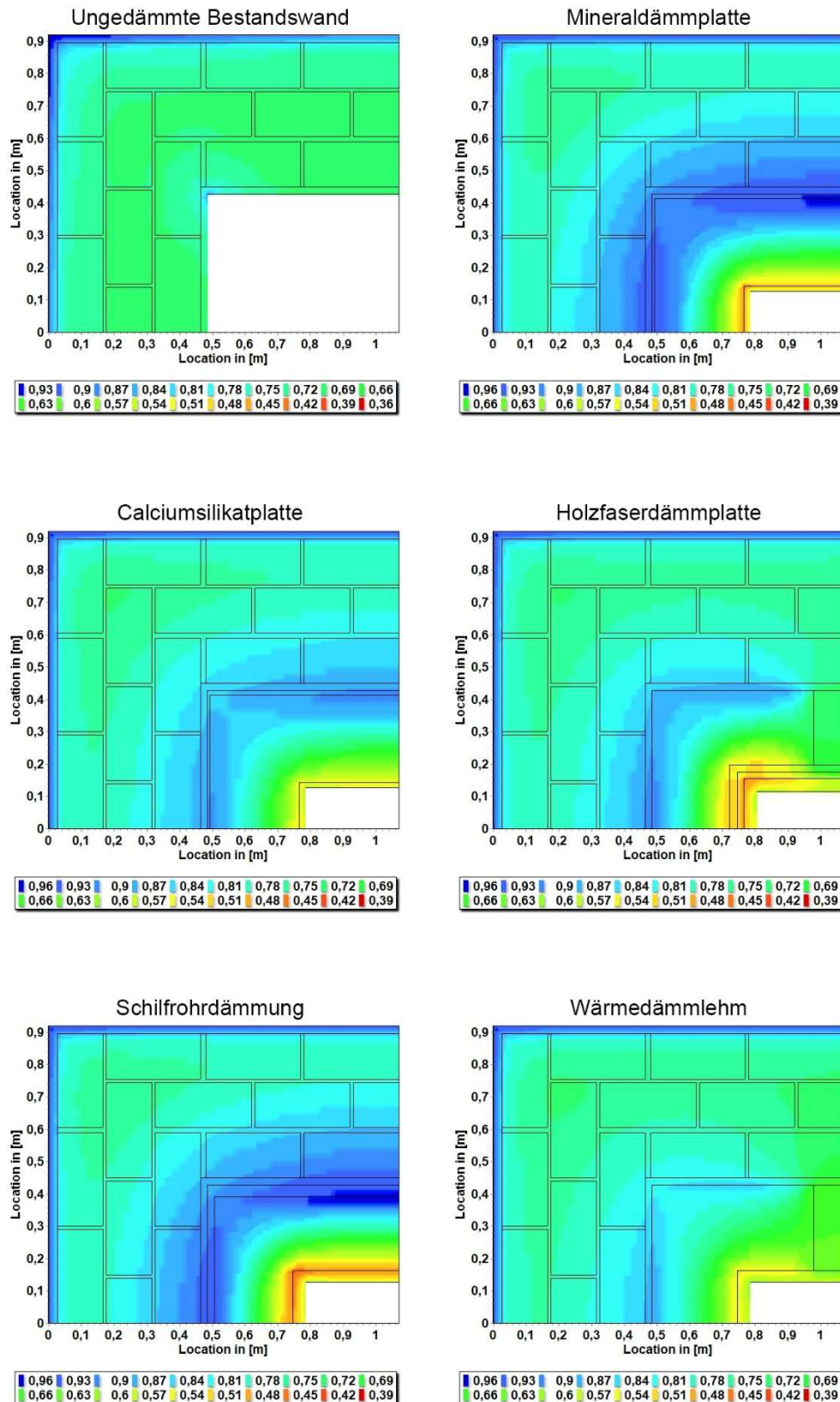


Abbildung 23: Relative Feuchte in den verschiedenen Bauteilen

4.2.2. Ergebnisse

Es wurden folgende Ergebnisse bezüglich dem Schimmelwachstum in der inneren Kante der Konstruktion festgestellt (siehe Abbildung).

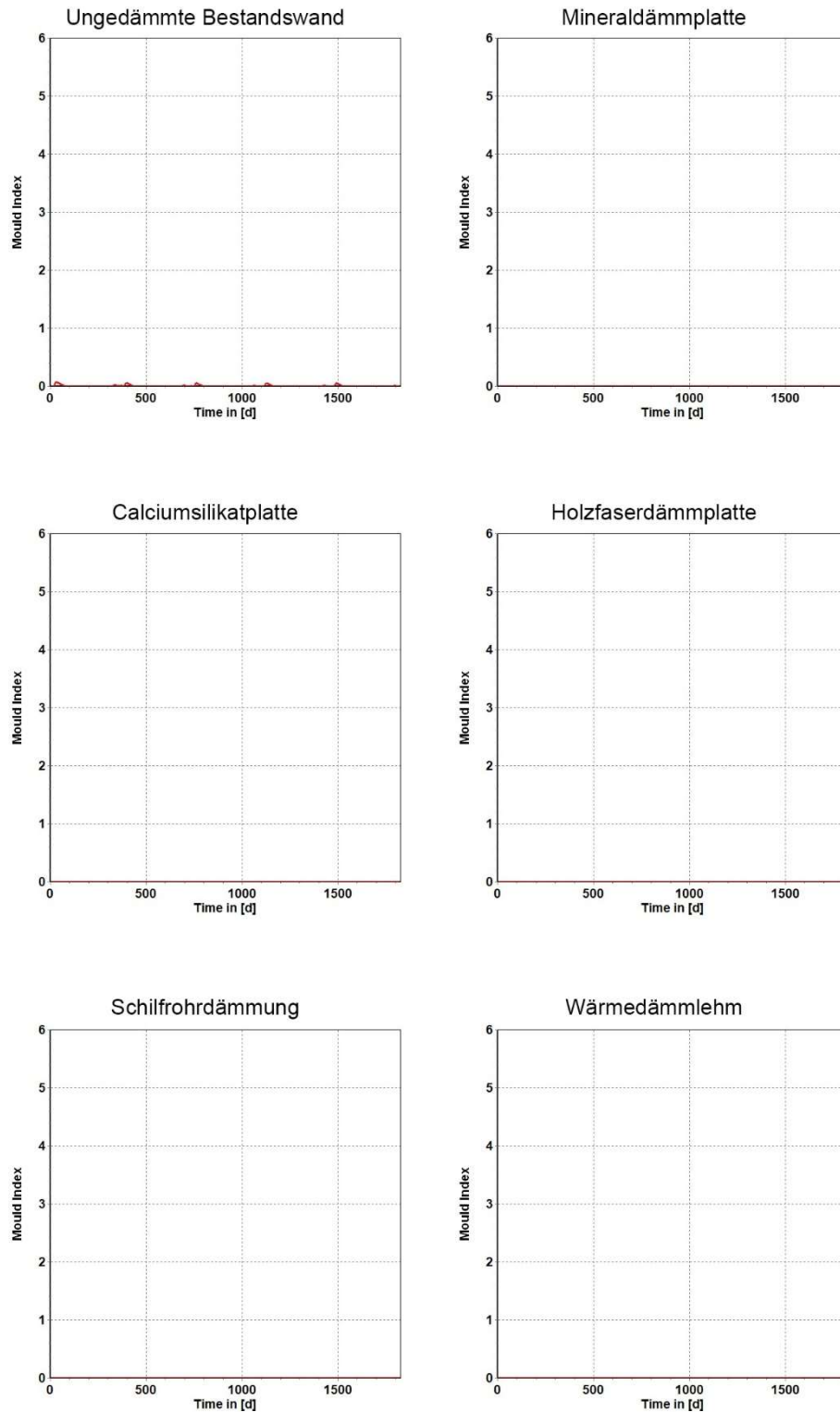


Abbildung 24: Schimmelpilzwachstum in der Innenkante des Bauteils

Es wurden folgende Ergebnisse bezüglich Schimmelpilzwachstum auf der geraden Fläche des Bauteils festgestellt (siehe Abbildung).

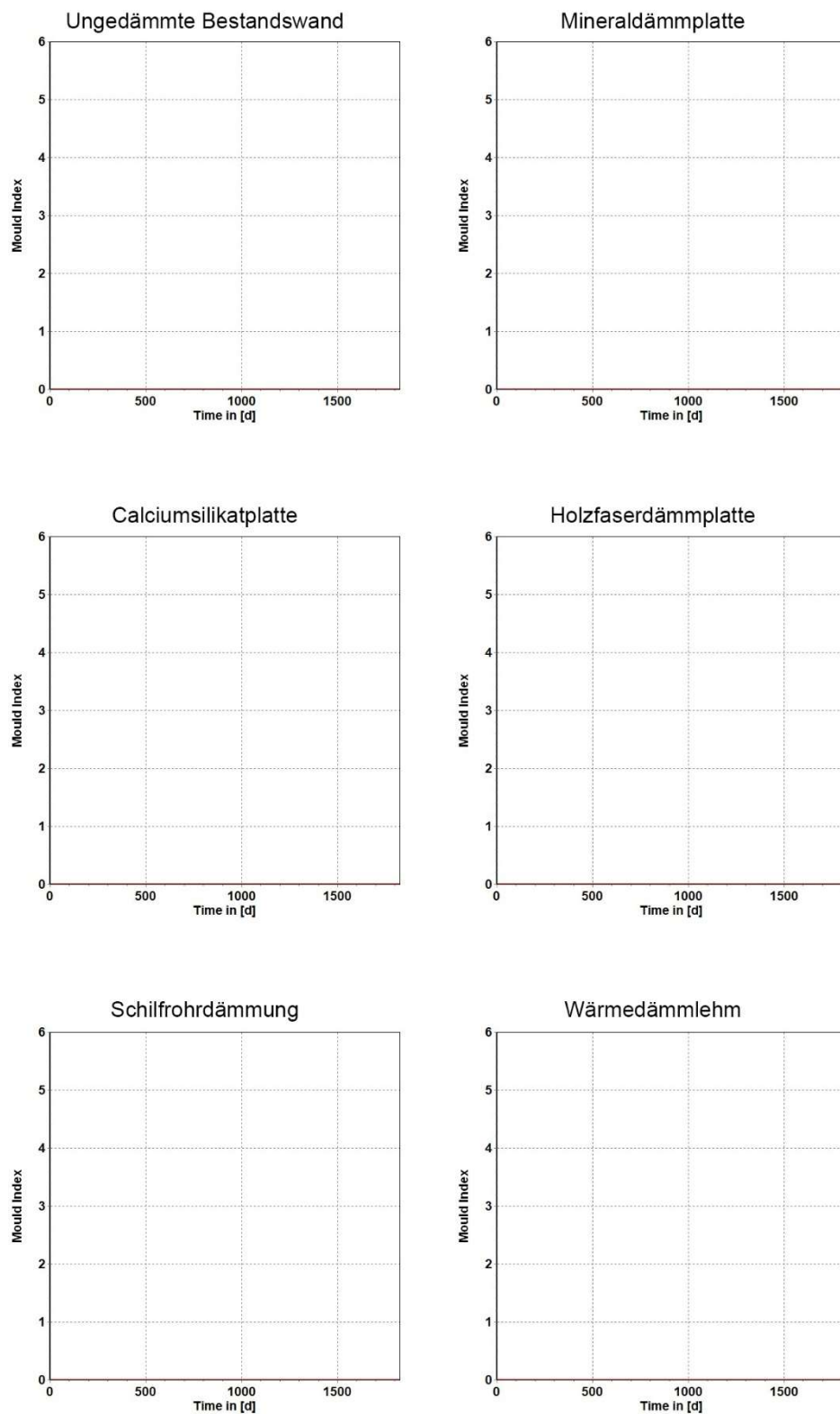


Abbildung 25: Schimmelpilzwachstum auf der Fläche des Bauteils

Wie man hier erkennen kann, ergibt sich bei allen untersuchten Dämmsystemen eine verhältnismäßig geringe Schimmelpilzgefahr. Die ungedämmte Konstruktion zeigte noch ein Wachstum in den Kaltperioden, welches aber durch die Austrocknung der Wand im Sommer jedes Jahr wieder unterbunden wurde.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Durch die Simulation im Thesim3D hat sich herauskristallisiert, dass die Innendämmung auf die sommerliche Überwärmung verhältnismäßig wenig Einfluss hat. Obwohl einige der Innendämmsysteme (Holzfaserdämmplatte, Schilfrohrdämmung und Wärmedämmlehm) sehr wohl zu geringeren operativen Temperaturen führten als bei der Konstruktion ohne Dämmmaßnahme, so ist dies wohl mehr auf den in diesen Konstruktionen verwendeten Lehmputz zurückzuführen, der eine hohe Speichermasse auf die Rauminnenseite brachte. Außerdem hat der Lehmputz die Fähigkeit, Feuchte zu speichern und wieder an die Rauminnenseite abzugeben, was in dieser Simulation wohl ebenso zu einem etwas kühlenden Effekt geführt hat. Allerdings wird empfohlen, wenn rein aus Gründen der sommerlichen Überwärmung irgendwelche Saniermaßnahmen in Betracht gezogen werden, anstatt auf eine Innendämmung zu setzen, eine gute Verschattungsanlage in Betracht zu ziehen, da dies einen wesentlich höheren Einfluss auf die Raumtemperatur nimmt. Wenn grundsätzlich eine Saniermaßnahme zur Verbesserung des Raumklimas und als Zusatzeffekt ein kleiner zusätzlicher Kühleffekt des Raumes erwünscht sind, so ist eine Dämmung mit einem Lehmputz eine gute Variante, um dieses Ziel zu erreichen. Ebenso, wenn es aus verschiedenen Gründen nicht möglich ist, eine Verschattung nachträglich zu ergänzen, so kann der feuchtespeichernde Lehmputz eine kleine Kühlungswirkung mit sich bringen.

Wie man durch die Simulation im Delphin 6.0 sehen kann, ist bei den hier analysierten Bauteilen ein Schimmelpilzwachstum unwahrscheinlich. Natürlich wäre es im Rahmen von weiterführenden Untersuchungen interessant, wenn man hier diese und mehrere Bauteile in variierenden Dicken analysiert und diese Ergebnisse aufzeigt. Außerdem haben noch einige andere Faktoren auf dieses Verhalten eine Auswirkung. Wie man im Verlauf der relativen Feuchte der Bauteile erkennen kann, ist oft die relative Feuchte eines Bauteils nicht auf der Innenseite am höchsten, sondern irgendwo in der Dämmung bzw. im Übergang Innendämmung-Tragkonstruktion. Im Verlauf dieser Simulation wurde angenommen, dass dort die Gefahr eines Schimmelbewuchses gering ist, dadurch, dass mit einer richtigen Bauausführung eine Hinterströmung des Bauteils durch Luft verhindert wird. Sollte

dies jedoch durch eine schlechte Ausführung dennoch zustande kommen, so kann dies zum Problem werden.

Die ungedämmte Konstruktion zeigte noch ein Wachstum in den Kaltperioden, welches aber durch die Austrocknung der Wand im Sommer jedes Jahr wieder unterbunden wurde. Dies ist bei derartigen Bestandskonstruktionen typisch und auch der Grund, warum viele Innendämmsysteme schief gehen, da die Trocknungswirkung bei Einbau einer Dampfbremse unterbunden wird. Wenn dies geschieht, und aber an kleineren Schadstellen der Dampfbremse trotzdem Feuchtigkeit in die Wand kommt, so kann dies leicht zu Schadensfällen führen, da diese Feuchtigkeit nicht mehr ordnungsgemäß austrocknet.

Ebenso war zu erwarten, dass Probleme eher an der Innenecke auftreten, da hier im Vergleich zu den anderen Stellen der Wand geometrisch eine größere kalte Außenwandfläche zu einer kleineren Innenfläche zugewiesen ist, was zu niedrigeren Temperaturen und so zu einer höheren relativen Luftfeuchte führt.

Quellenverzeichnis

Selbstständig erschienene Publikationen:

Geburtig, Gerd/Großmantel, Jürgen: Innendämmung in der Praxis. Energetische Sanierung von innen: Handbuch für die sichere Planung und Ausführung. Geislingen: C. Maurer Druck und Verlag 2013.

Kautsch, Peter/Ruisinger, Ulrich/Hengsberger Herwig u.a.: OEKO-ID – Innendämmungen zur thermischen Gebäudeertüchtigung. Untersuchung der Möglichkeiten und Grenzen ökologischer, diffusionsoffener Dämmsysteme - Endbericht. Graz: TU Graz, 2013.

Nusser, Bernd/ Epple, Martin u.a.: Praxis-Handbuch Innendämmung. Planung – Konstruktion – Details – Beispiele. Hrsg.: Fachverband Innendämmung e.V. Köln: Verlagsgesellschaft Rudolf Müller GmbH & Co. KG 2016.

Röhlen, Ulrich/Ziegert, Christof: Lehm-bau-Praxis: Planung und Ausführung. 2., vollständig überarbeitete Auflage. Berlin: Beuth Verlag GmbH 2014.

Scheffler, Gregor: Bauphysik der Innendämmung. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2016.

Steiner, Tobias: Ökologie und Ökonomie des Dämmens. Analyse und Bewertung von Dämmmaßnahmen in der Altbausanierung. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2018.

Vismann, Ulrich: Wendehorst – Bautechnische Zahlentafeln. 35. Auflage. Wiesbaden: Springer Verlag 2015.

Vollhard, Franz: Bauen mit Leichtlehm: Handbuch für das Bauen mit Holz und Lehm. 8., neubearbeitete und ergänzte Auflage. Basel: Birkhäuser Verlag GmbH 2016.

Zelger, Thomas/Figl, Hildegund u.a.: Passivhaus-Bauteilkatalog: Sanierung. Ökologisch bewertete Konstruktionen. Basel: Birkhäuser Verlag GmbH 2017.

Diplomarbeiten:

Nackler, Joachim: Sommerlicher Wärmeschutz. Vergleich von Berechnungsansätzen und Entwicklung eines Planungsinstrumentes für Entwurfsfindung und Nachweis. Wien: Technische Universität, Fakultät für Architektur und Raumplanung. Dissertation 2017.

Wegerer, Paul: Beurteilung von Innendämmsystemen. Langzeitmessung und hygrothermische Simulation am Beispiel einer Innendämmung aus Schilfdämmplatten. Wien: Technische Universität, Fakultät für Bauingenieurwesen. Diplomarbeit 2010.

Normen:

WTA-Merkblatt 6-1-01/D. Leitfaden für hygrothermische Simulationsberechnungen. 05.2002. Hrsg.: WTA, Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V.

WTA-Merkblatt 6-2. Simulation wärme- und feuchtetechnischer Prozesse. 12.2014. Hrsg.: WTA, Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V.

WTA-Merkblatt 6-4. Innendämmung nach WTA I: Planungsleitfaden. 10.2016. Hrsg.: WTA, Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V.

Texte aus dem Internet:

Boos, Markus: Mineraldämmplatten - Innendämmung leicht gemacht.

In: <https://www.oekologisch-bauen.info/baustoffe/naturdaemmstoffe/mineraldaemmplatten.html> (letzter Zugriff: 05.04.2020)

Borsch-Laaks, Robert: Feuchtetransport via Luftstrom.

In: <https://www.proholz.at/zuschnitt/47/feuchtetransport-via-luftstrom> (letzter Zugriff: 18.03.2020)

Delphin (Software).

In: [https://de.wikipedia.org/wiki/Delphin_\(Software\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Delphin_(Software)) (letzter Zugriff: 21.04.2020)

Grimm, Roland: Was sind Mineraldämmplatten?

In: <https://www.baustoffwissen.de/baustoffe/baustoffknowhow/daemmstoffe/was-sind-mineraldaemmplatten-innendaemmung/> (letzter Zugriff: 04.04.2020)

Hochwarth, Dominik: Holzfaserdämmstoffe – Eigenschaften, Vorteile und Nachteile.

In: <https://www.bauredakteur.de/holzfaserdaemmstoffe-eigenschaften-vorteile-und-nachteile/> (letzter Zugriff: 05.04.2020)

Krus, Martin/Sedlbauer, Klaus/Künzel, Hartwig: Innendämmung aus bauphysikalischer Sicht.

In: <http://www.krubitzer.de/download/Innendaemmung.pdf> (letzter Zugriff: 03.04.2020)

Nackler, Joachim/Kreč Klaus: Thesim 3D. Was? Warum? Wie?

In: <http://www.thesim.at/> (letzter Zugriff: 20.04.2020)

Rösler, Sascha: Naturdämmstoff: Schilfmatten.

In: <https://www.naturanum.de/baustoffe/daemmung/schilf/> (letzter Zugriff: 07.04.2020)

Schnedl, Hartmut: Wann lohnt sich eine thermische Sanierung?

In: <https://www.dihag.at/images/ftp/TSAN.pdf> (letzter Zugriff: 03.04.2020)

Zirkelbach, Daniel: Hygrothermische Simulation – Anwendungsmöglichkeiten für Planer und Sachverständige.

In: <https://wufi.de/literatur/Zirkelbach%20-%20Hygrothermische%20Simulation.pdf> (letzter Zugriff: 10.04.2020)

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Psychrometrisches Diagramm.....	3
--	---

(Quelle: Übersetzt von:

In: <https://de.maplesoft.com/applications/view.aspx?sid=154124&view=html> [letzter Zugriff: 16.03.2020])

Abbildung 2: Wasserdampftransport in verschiedenen Lufttemperatur- und Luftfeuchtesituationen	4
---	---

(Quelle: In Anlehnung an:

In: <http://www.schulungsstelle-traunstein.de/Energieberatung/background/5304029665089601f/53040296680763883/5304029668078c59c/index.html> [letzter Zugriff: 16.03.2020])

Abbildung 3: Gegenüberstellung des Wasserdampfstroms aufgrund von Diffusion (20 °C / 50 % und -10 °C / 80 %) und von Konvektion bei variierender Spaltbreite durch ein 1 m breites Material mit einem s_d -Wert von 0,1 m	6
---	---

(Quelle: In Anlehnung an: Nusser, Bernd/ Epple, Martin u.a.: Praxis-Handbuch Innendämmung. Planung – Konstruktion – Details – Beispiele. Hrsg.: Fachverband Innendämmung e.V. Köln: Verlagsgesellschaft Rudolf Müller GmbH & Co. KG 2016. Abb. 3.6)

Abbildung 4: Wasserdampfkongvektion in einem Wand-Decken-Anschluss.....	7
---	---

(Quelle: In Anlehnung an: Scheffler, Gregor: Bauphysik der Innendämmung. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2016. Bild 7.)

Abbildung 5: Dämmsysteme und deren Wirkung	10
--	----

(Quelle: In:

<https://www.baunetzwissen.de/bauphysik/fachwissen/waermeschutz/daemmungssysteme-und-deren-wirkung-4365103> [letzter Zugriff: 01.04.2020])

Abbildung 6: Mineraldämmplatte	18
--------------------------------------	----

(Quelle: In: <https://www.heim-baustoffe.de/Innenausbau/Innenwanddaemmung/Mineraldaemmplatten/Multipor-Mineraldaemmplatten-WLG-042/Multipor-Mineraldaemmplatte-WI-160-mm.html> [letzter Zugriff: 03.04.2020])

Abbildung 7: Calciumsilikatplatte.....	21
--	----

(Quelle: In: <https://www.silca-online.de/hochtemperatur-isolation/schweres-calciumsilicat/silcapan-845-850.html> [letzter Zugriff: 03.04.2020])

Abbildung 8: Holzfaserdämmplatte.....	23
(Quelle: In: https://www.obl.de/mineralfaser-daemmstoffe/steico-flex-holzfaserdaemmplatte-wls-038-40-mm/p/3514114 [letzter Zugriff: 04.04.2020])	
Abbildung 9: Schilfrohrdämmplatte.....	25
(Quelle: In: https://www.lehm-laden.de/conluto-schilfrohr-leichtbauplatte [letzter Zugriff: 07.04.2020])	
Abbildung 10: Wärmedämmlehm in Plattenform	28
(Quelle: In: https://www.baunetzwissen.de/nachhaltig-bauen/tipps/news-archiv/lehmbauplatte-fuer-den-innenausbau-3494773 [letzter Zugriff: 07.04.2020])	
Abbildung 11: Lehmputz getrocknet.....	29
(Quelle: In: https://www.naturanum.de/claytec/ [letzter Zugriff: 07.04.2020])	
Abbildung 12: Beispiel Glaser-Diagramm.....	37
(Quelle: In: https://www.ingenieure.immo/wiki/bauphysik/feuchteschutz/ [letzter Zugriff: 06.05.2020])	
Abbildung 13: Wandaufbau 01	39
(Quelle: In Anlehnung an: https://www.baunetzwissen.de/altbau/fachwissen/aussenwand-konstruktion/einschalige-aussenwaende-aus-mauerwerk-148296 [letzter Zugriff: 05.05.2020])	
Abbildung 14: Wandaufbau 02	39
(Quelle: In Anlehnung an: https://www.multipor.de/3671.php [letzter Zugriff: 05.05.2020])	
Abbildung 15: Wandaufbau 03	39
(Quelle: In Anlehnung an: https://www.multipor.de/3671.php [letzter Zugriff: 05.05.2020])	
Abbildung 16: Wandaufbau 04	40
(Quelle: In Anlehnung an: Steico Newsletter. Planungsheft Innendämmung. Hrsg. von Steico SE. Oktober 2019. S. 15.)	
Abbildung 17: Wandaufbau 05	40
(Quelle: In Anlehnung an: https://www.hiss-reet.de/baustoffe-aus-schilf/waermedaemmung/innendaemmung/innendaemmung/ [letzter Zugriff: 05.05.2020])	
Abbildung 18: Wandaufbau 06	40
(Quelle: In Anlehnung an: Haacke. Produktvorstellung Cellco Wärmedämmlehm. Hrsg. von HAACKE Energie-Effizienz GmbH + Co. KG. Februar 2011. S.2.)	

Abbildung 19: Modellraum Thesim3D	43
(Quelle: Simuliert im Thesim3D: http://www.thesim.at/3d/thesim.html?v=1.00 [letzter Zugriff: 01.05.2020])	
Abbildung 20: Wandecke Bestand Modell Delphin 6.0	44
(Quelle: Im Simulationsprogramm Delphin 6.0 modelliert.)	
Abbildung 21: Operative Temperatur im Tagesverlauf, Thesim3D - Diagramm ...	46
(Quelle: Ausgabediagramm Delphin 6.0)	
Abbildung 22: Relative Feuchte im ungedämmten Bauteil	48
(Quelle: Ausgabediagramm Delphin 6.0)	
Abbildung 23: Relative Feuchte in den verschiedenen Bauteilen.....	50
(Quelle: Ausgabediagramm Delphin 6.0)	
Abbildung 24: Schimmelpilzwachstum in der Innenkante des Bauteils	51
(Quelle: Ausgabediagramm Delphin 6.0)	
Abbildung 25: Schimmelpilzwachstum auf der Fläche des Bauteils	52
(Quelle: Ausgabediagramm Delphin 6.0)	

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vor- und Nachteile der Außendämmung	14
--	----

(Quelle: In Anlehnung an: Nusser, Bernd/ Eppe, Martin u.a.: Praxis-Handbuch Innendämmung. Planung – Konstruktion – Details – Beispiele. Hrsg.: Fachverband Innendämmung e.V. Köln: Verlagsgesellschaft Rudolf Müller GmbH & Co. KG 2016. Abb. 1.9)

Tabelle 2: Vor- und Nachteile der Kerndämmung	15
---	----

(Quelle: In Anlehnung an: Nusser, Bernd/ Eppe, Martin u.a.: Praxis-Handbuch Innendämmung. Planung – Konstruktion – Details – Beispiele. Hrsg.: Fachverband Innendämmung e.V. Köln: Verlagsgesellschaft Rudolf Müller GmbH & Co. KG 2016. Abb. 1.9)

Tabelle 3: Vor- und Nachteile der Innendämmung	15
--	----

(Quelle: In Anlehnung an: Nusser, Bernd/ Eppe, Martin u.a.: Praxis-Handbuch Innendämmung. Planung – Konstruktion – Details – Beispiele. Hrsg.: Fachverband Innendämmung e.V. Köln: Verlagsgesellschaft Rudolf Müller GmbH & Co. KG 2016. Abb. 1.9)

Tabelle 4: Wärme- und feuchtetechnische Kennwerte - Mineralewämmplatten	19
---	----

(Quelle: Aus Programm Delphin 6.0 herausgelesen.)

Tabelle 5: Wärme- und feuchtetechnische Kennwerte - Calciumsilikatplatte	22
--	----

(Quelle: Aus Programm Delphin 6.0 herausgelesen.)

Tabelle 6: Wärme- und Feuchtetechnische Kennwerte - Holzfaserewämmplatte ...	24
--	----

(Quelle: Aus Programm Delphin 6.0 herausgelesen.)

Tabelle 7: Wärme- und Feuchtetechnische Kennwerte - Schilfewämmplatten	27
--	----

(Quelle: Mithilfe von Basisparametern von Herrn Dipl.-Ing. Tobias Steiner entwickelt)

Tabelle 8: Wärme- und Feuchtetechnische Kennwerte - Wärmedämmlehm.....	31
--	----

(Quelle: Aus Programm Delphin 6.0 herausgelesen.)

Tabelle 9: Wärme- und Feuchtetechnische Kennwerte - Lehmputz	32
--	----

(Quelle: Mithilfe von Basisparametern von Herrn Dipl.-Ing. Tobias Steiner entwickelt.)

Tabelle 10: Rahmenbedingungen Thesim3D	45
--	----

(Quelle: Simuliert im Thesim3D: <http://www.thesim.at/3d/thesim.html?v=1.00> [letzter Zugriff: 01.05.2020])

Tabelle 11: Temperaturvergleich Thesim3D..... 46

(Quelle: Simuliert im Thesim3D: <http://www.thesim.at/3d/thesim.html?v=1.00> [letzter Zugriff: 01.05.2020])

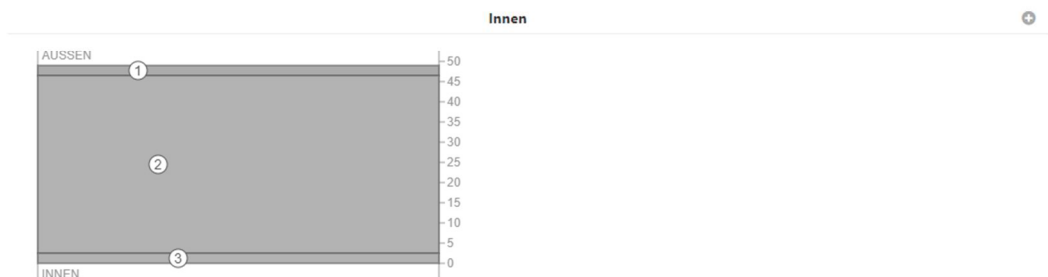
Anhang

Thesim3D

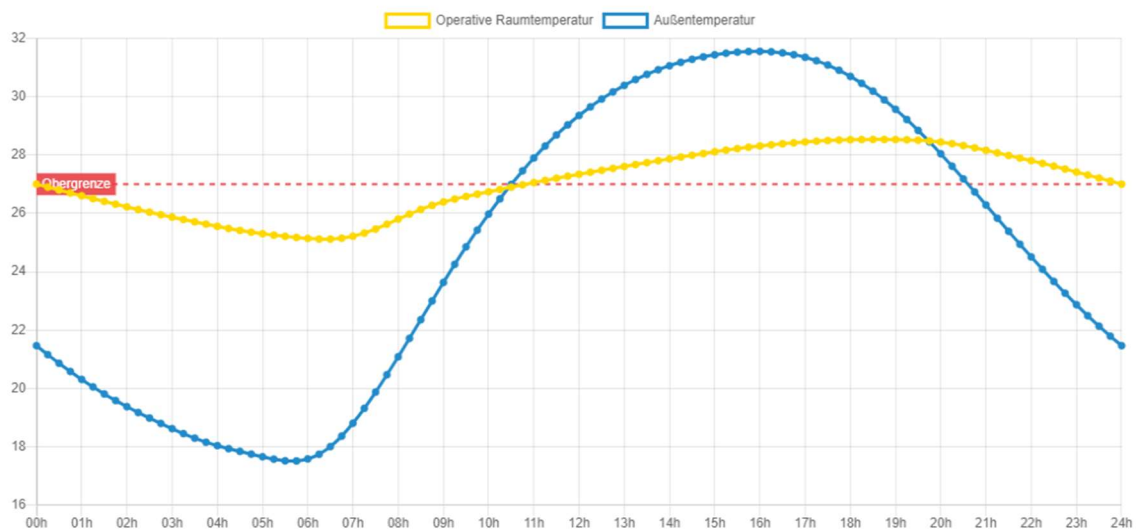
Hier wird eine genauere Dokumentation der Simulation der sommerlichen Überwärmung angehängt.

Ungedämmte Wandkonstruktion:

	Baustoff	Dicke [cm]	λ [W/(m·K)]	ρ [kg/m³]	c [kJ/kg·K]	
①	Kalkzementputz	2,5	0,800	1800	1,100	
②	Vollziegelmauerwerk	44,0	0,700	1600	0,900	
③	Kalkputz	2,5	0,700	1400	1,130	



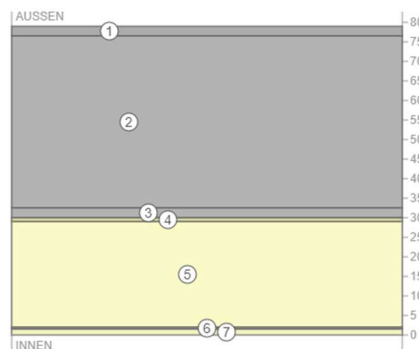
20200504_Thesim3D: Operative Raum- und Außentemperatur [°C], 15. Juli, W - Innere Stadt



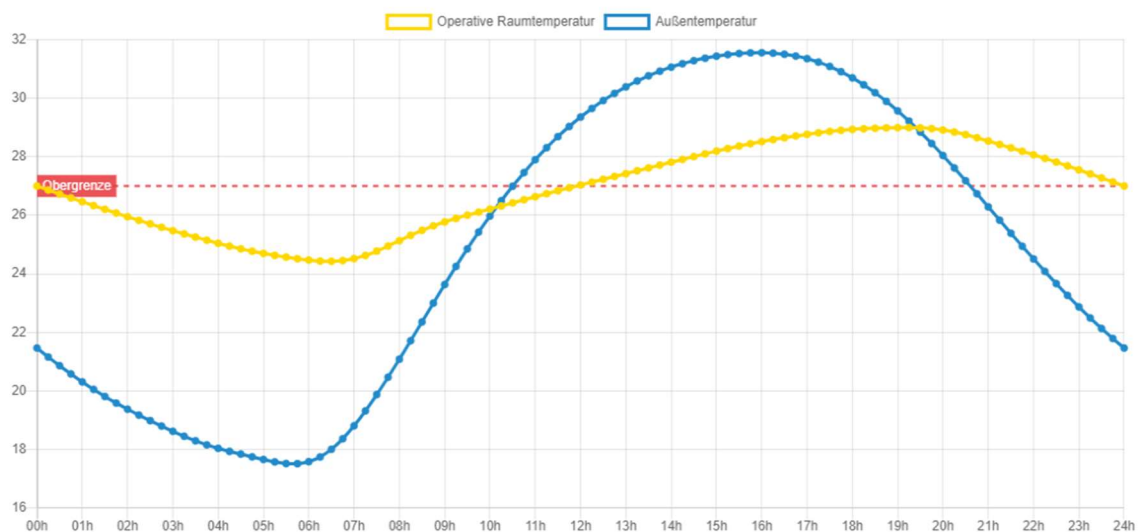
t [h]	Θ_e [°C]	Θ_{op} [°C]	t [h]	Θ_e [°C]	Θ_{op} [°C]
0:00	21,5	27,0	12:00	29,4	27,3
1:00	20,3	26,6	13:00	30,4	27,6
2:00	19,4	26,2	14:00	31,1	27,9
3:00	18,6	25,9	15:00	31,4	28,1
4:00	18,0	25,6	16:00	31,6	28,3
5:00	17,7	25,3	17:00	31,3	28,4
6:00	17,6	25,1	18:00	30,7	28,5
7:00	18,8	25,2	19:00	29,6	28,5
8:00	21,1	25,8	20:00	28,0	28,4
9:00	23,6	26,4	21:00	26,3	28,2
10:00	26,0	26,7	22:00	24,5	27,8
11:00	27,9	27,1	23:00	22,9	27,4

Minerale Dämmplatte:

Außen					
Baustoff	Dicke [cm]	λ [W/(m·K)]	ρ [kg/m³]	c [kJ/kg·K]	
① Kalkzementputz	2,5	0,800	1800	1,100	
② Vollziegelmauerwerk	44,0	0,700	1600	0,900	
③ Kalkputz	2,5	0,700	1400	1,130	
④ Mineralischer Kleber	1,0	0,289	1164	1,461	
⑤ Minerale Dämmplatte	27,0	0,044	99	1,331	
⑥ Grundputz	0,5	0,700	1600	0,900	
⑦ Oberputz	1,5	0,097	500	1,200	



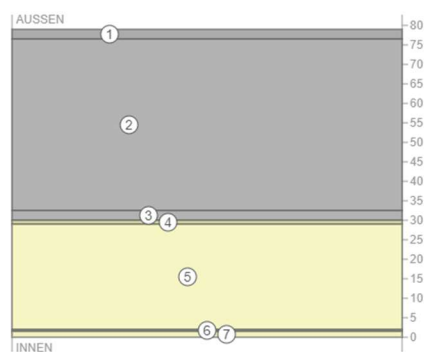
20200504_Thesim3D: Operative Raum- und Außentemperatur [°C], 15. Juli, W - Innere Stadt



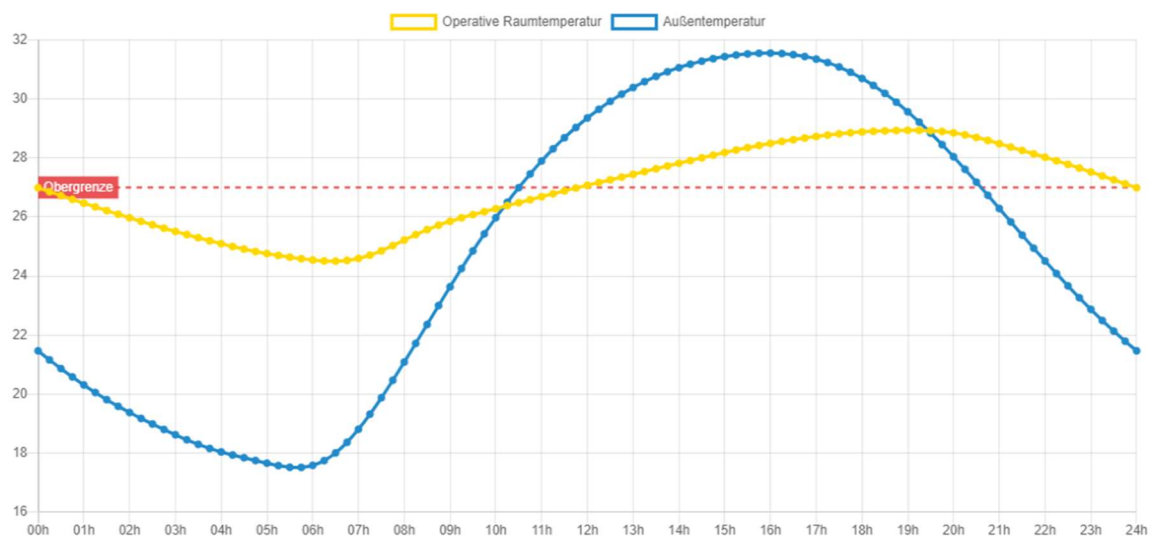
t [h]	Θ_e [°C]	Θ_{op} [°C]	t [h]	Θ_e [°C]	Θ_{op} [°C]
0:00	21,5	27,0	12:00	29,4	27,0
1:00	20,3	26,5	13:00	30,4	27,4
2:00	19,4	26,0	14:00	31,1	27,8
3:00	18,6	25,5	15:00	31,4	28,2
4:00	18,0	25,0	16:00	31,6	28,5
5:00	17,7	24,7	17:00	31,3	28,8
6:00	17,6	24,5	18:00	30,7	28,9
7:00	18,8	24,5	19:00	29,6	29,0
8:00	21,1	25,1	20:00	28,0	28,9
9:00	23,6	25,8	21:00	26,3	28,5
10:00	26,0	26,2	22:00	24,5	28,1
11:00	27,9	26,6	23:00	22,9	27,6

Calciumsilikatplatte:

Außen						
Baustoff	Dicke [cm]	λ [W/(m·K)]	ρ [kg/m³]	c [kJ/kg·K]		
① Kalkzementputz	2,5	0,800	1800	1,100	↔	⊕
② Vollziegelmauerwerk	44,0	0,700	1600	0,900	↔	⊕
③ Kalkputz	2,5	0,700	1400	1,130	↔	⊕
④ Mineralischer Kleber	1,0	0,289	1164	1,461	↔	⊕
⑤ Calciumsilikatplatte	27,0	0,074	267	1,150	↔	⊕
⑥ Grundputz	0,5	0,700	1600	0,900	↔	⊕
⑦ Oberputz	1,5	0,097	500	1,200	↔	⊕



20200504_Thesim3D: Operative Raum- und Außentemperatur [°C], 15.Juli, W - Innere Stadt



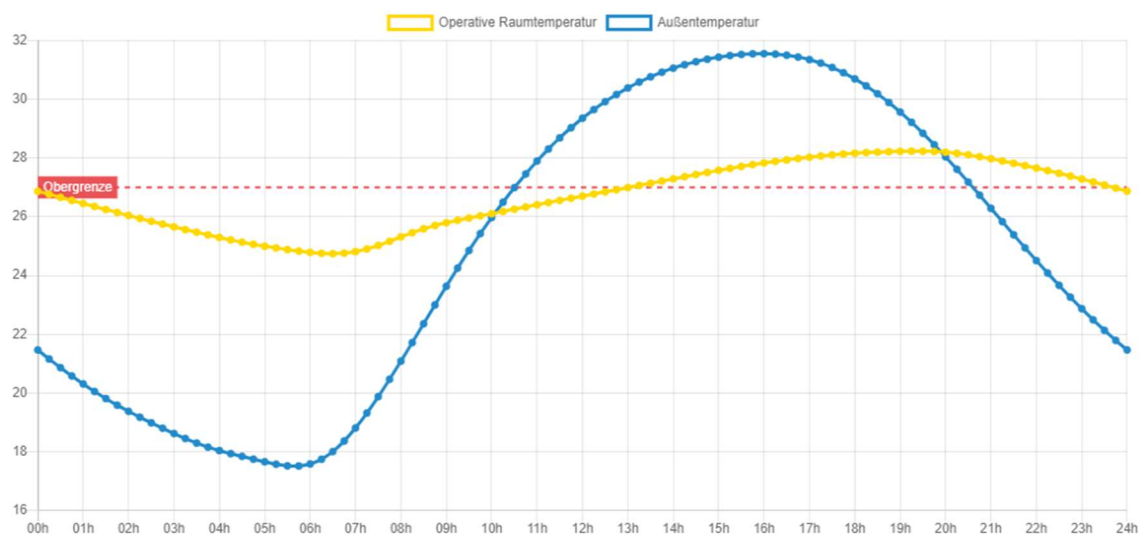
t [h]	Θ_e [°C]	Θ_{op} [°C]	t [h]	Θ_e [°C]	Θ_{op} [°C]
0:00	21,5	27,0 ✓	12:00	29,4	27,1 ⚠
1:00	20,3	26,5 ✓	13:00	30,4	27,4 ⚠
2:00	19,4	26,0 ✓	14:00	31,1	27,8 ⚠
3:00	18,6	25,5 ✓	15:00	31,4	28,2 ⚠
4:00	18,0	25,1 ✓	16:00	31,6	28,5 ⚠
5:00	17,7	24,8 ✓	17:00	31,3	28,7 ⚠
6:00	17,6	24,5 ✓	18:00	30,7	28,9 ⚠
7:00	18,8	24,6 ✓	19:00	29,6	28,9 ⚠ ☀
8:00	21,1	25,2 ✓	20:00	28,0	28,9 ⚠
9:00	23,6	25,9 ✓	21:00	26,3	28,5 ⚠
10:00	26,0	26,3 ✓	22:00	24,5	28,0 ⚠
11:00	27,9	26,7 ✓	23:00	22,9	27,5 ⚠

Holzfaserdämmplatte:

Außen					
Baustoff	Dicke [cm]	λ [W/(m·K)]	ρ [kg/m ³]	c [kJ/kg·K]	
① Kalkzementputz	2,5	0,800	1800	1,100	
② Vollziegelmauerwerk	44,0	0,700	1600	0,900	
③ Kalkputz	2,5	0,700	1400	1,130	
④ Holzfaserdämmplatte	23,0	0,039	161	1,000	
↳ 9,6 % Nutzholz z.B. Fichte/Tanne		0,120	475	1,600	
⑤ OSB Platte	1,0	0,120	640	1,700	
⑥ Putzträgerplatte	2,0	0,039	161	1,662	
⑦ Lehmputz	4,0	0,650	1514	1,500	



20200504_Thesim3D: Operative Raum- und Außentemperatur [°C], 15.Juli, W - Innere Stadt



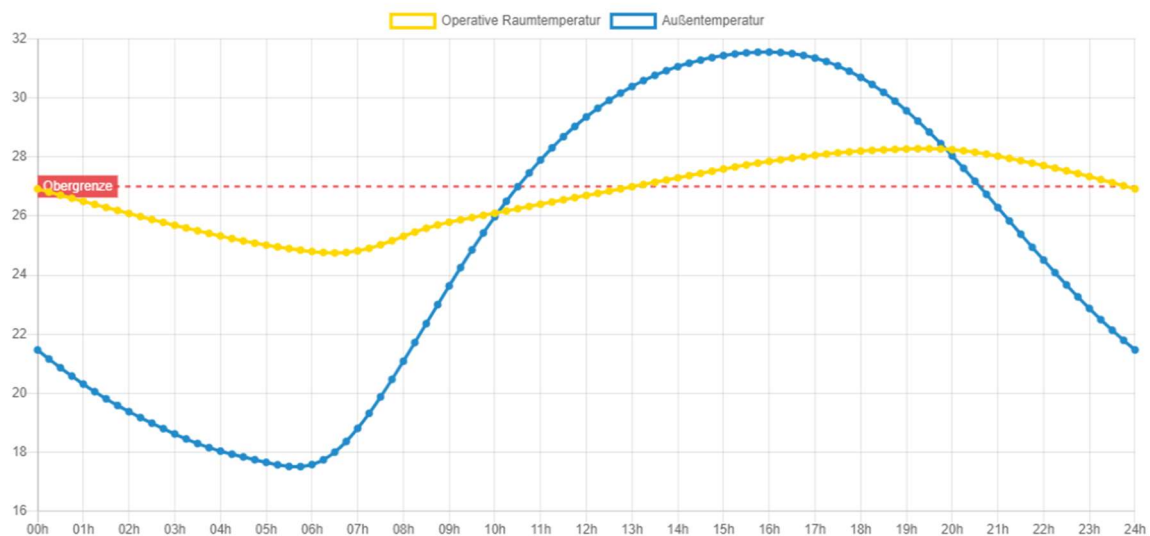
t [h]	Θ_e [°C]	Θ_{op} [°C]	t [h]	Θ_e [°C]	Θ_{op} [°C]
0:00	21,5	26,9	12:00	29,4	26,7
1:00	20,3	26,5	13:00	30,4	27,0
2:00	19,4	26,0	14:00	31,1	27,3
3:00	18,6	25,7	15:00	31,4	27,6
4:00	18,0	25,3	16:00	31,6	27,8
5:00	17,7	25,0	17:00	31,3	28,0
6:00	17,6	24,8	18:00	30,7	28,2
7:00	18,8	24,8	19:00	29,6	28,2
8:00	21,1	25,3	20:00	28,0	28,2
9:00	23,6	25,8	21:00	26,3	28,0
10:00	26,0	26,1	22:00	24,5	27,7
11:00	27,9	26,4	23:00	22,9	27,3

Schilfrohrdämmung:

Außen					
Baustoff	Dicke [cm]	λ [W/(m·K)]	ρ [kg/m³]	c [kJ/kg·K]	
① Kalkzementputz	2,5	0,800	1800	1,100	
② Vollziegelmauerwerk	44,0	0,700	1600	0,900	
③ Kalkputz	2,5	0,700	1400	1,130	
④ Lehmunterputz	3,0	0,650	1514	1,500	
⑤ Schilfrohrplatte	23,0	0,068	80	1,000	
⑥ Lehmputz	4,0	0,650	1514	1,500	



20200504_Thesim3D: Operative Raum- und Außentemperatur [°C], 15. Juli, W - Innere Stadt



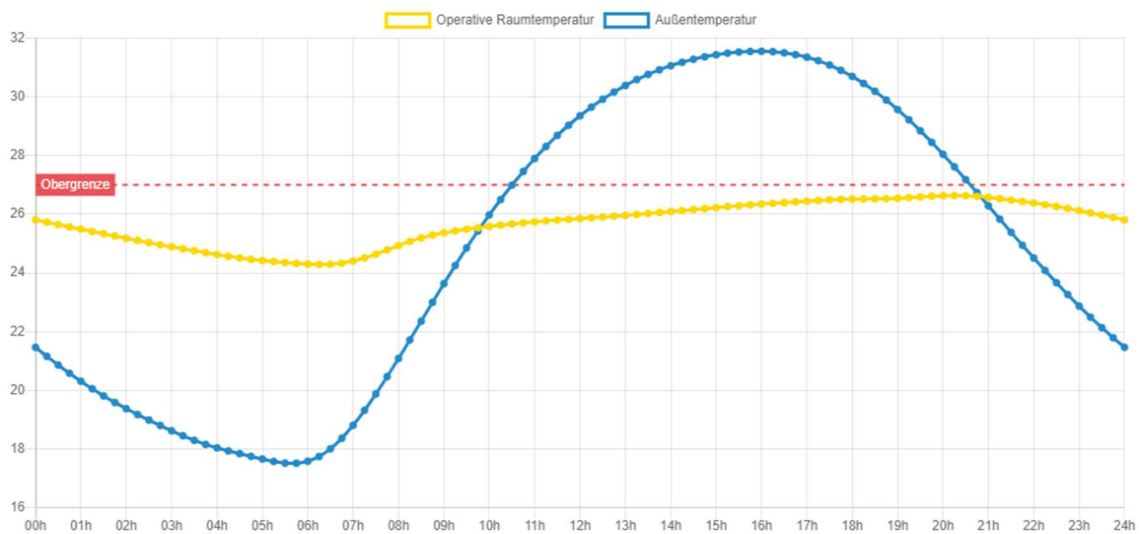
t [h]	Θ_e [°C]	Θ_{op} [°C]	t [h]	Θ_e [°C]	Θ_{op} [°C]
0:00	21,5	26,9 ✓	12:00	29,4	26,7 ✓
1:00	20,3	26,5 ✓	13:00	30,4	27,0 ✓
2:00	19,4	26,1 ✓	14:00	31,1	27,3 ⚠
3:00	18,6	25,7 ✓	15:00	31,4	27,6 ⚠
4:00	18,0	25,3 ✓	16:00	31,6	27,9 ⚠
5:00	17,7	25,0 ✓	17:00	31,3	28,1 ⚠
6:00	17,6	24,8 ✓	18:00	30,7	28,2 ⚠
7:00	18,8	24,8 ✓	19:00	29,6	28,3 ⚠ 0°
8:00	21,1	25,3 ✓	20:00	28,0	28,2 ⚠
9:00	23,6	25,8 ✓	21:00	26,3	28,0 ⚠
10:00	26,0	26,1 ✓	22:00	24,5	27,7 ⚠
11:00	27,9	26,4 ✓	23:00	22,9	27,3 ⚠

Wärmedämmlehm:

Außen					
Baustoff	Dicke [cm]	λ [W/(m·K)]	ρ [kg/m³]	c [kJ/kg·K]	
① Kalkzementputz	2,5	0,800	1800	1,100	
② Vollziegelmauerwerk	44,0	0,700	1600	0,900	
③ Kalkputz	2,5	0,700	1400	1,130	
④ Wärmedämmlehm	26,0	0,094	300	1,419	
↔ 9,6 % Nutzholz z.B. Fichte/Tanne		0,120	475	1,600	
⑤ Lehmputz	4,0	0,650	1514	1,500	

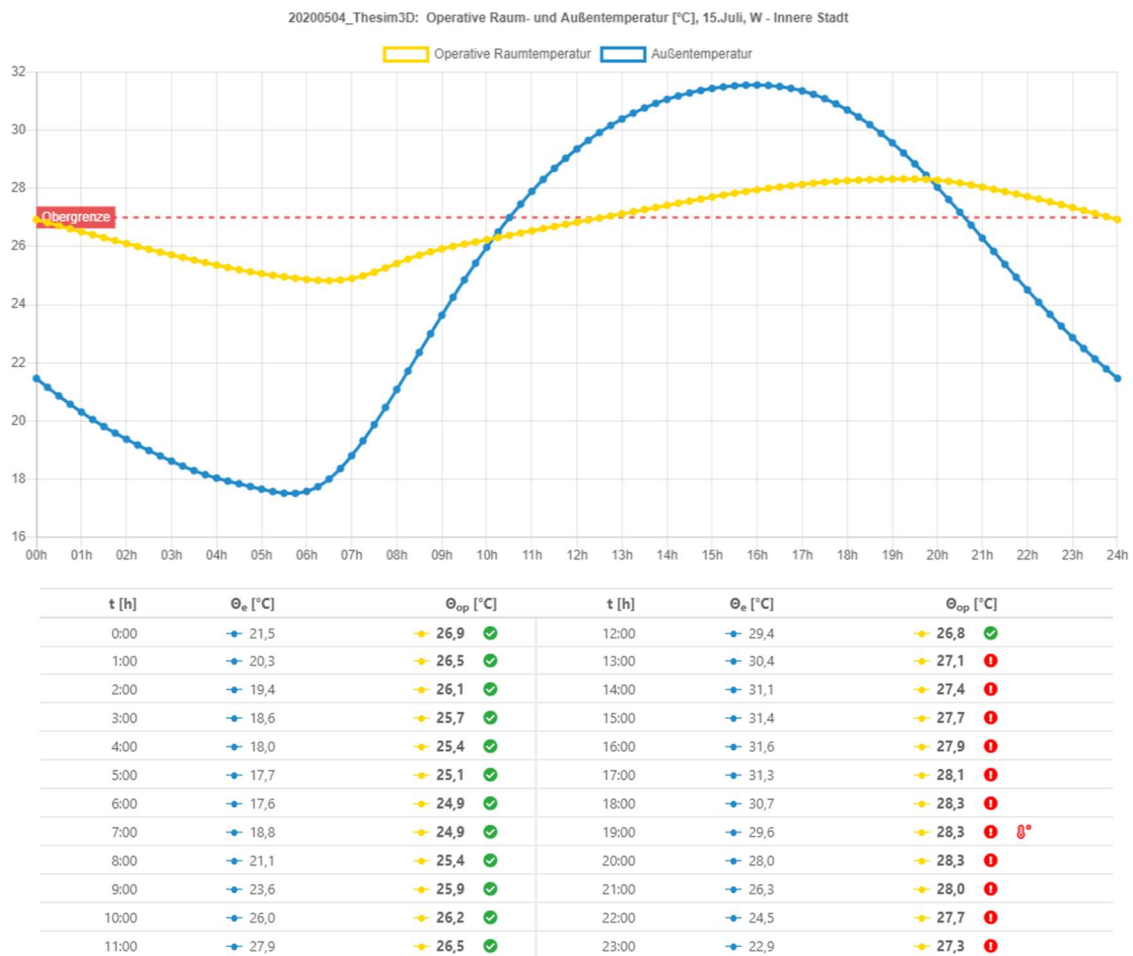


20200504_Thesim3D: Operative Raum- und Außentemperatur [°C], 15. Juli, W - Innere Stadt



t [h]	Θ_e [°C]	Θ_{op} [°C]	t [h]	Θ_e [°C]	Θ_{op} [°C]
0:00	21,5	25,8	12:00	29,4	25,9
1:00	20,3	25,5	13:00	30,4	26,0
2:00	19,4	25,2	14:00	31,1	26,1
3:00	18,6	24,9	15:00	31,4	26,2
4:00	18,0	24,6	16:00	31,6	26,3
5:00	17,7	24,4	17:00	31,3	26,4
6:00	17,6	24,3	18:00	30,7	26,5
7:00	18,8	24,4	19:00	29,6	26,5
8:00	21,1	24,9	20:00	28,0	26,6
9:00	23,6	25,4	21:00	26,3	26,6
10:00	26,0	25,6	22:00	24,5	26,4
11:00	27,9	25,7	23:00	22,9	26,1

Ungedämmte Wandkonstruktion mit Verschattung:



Delphin 6.0:

Hier wird eine genauere Dokumentation der hygrothermischen Simulation von dem Programm Delphin 6.0 angehängt.

Außenklima – Windrichtung Wien:

Definition

Name: WINDDIR Wien

Typ: Windrichtung, Norden=0 Grad, Osten=90 Grad, ... [WindDirection] Art: Konstanter Wert [Constant]

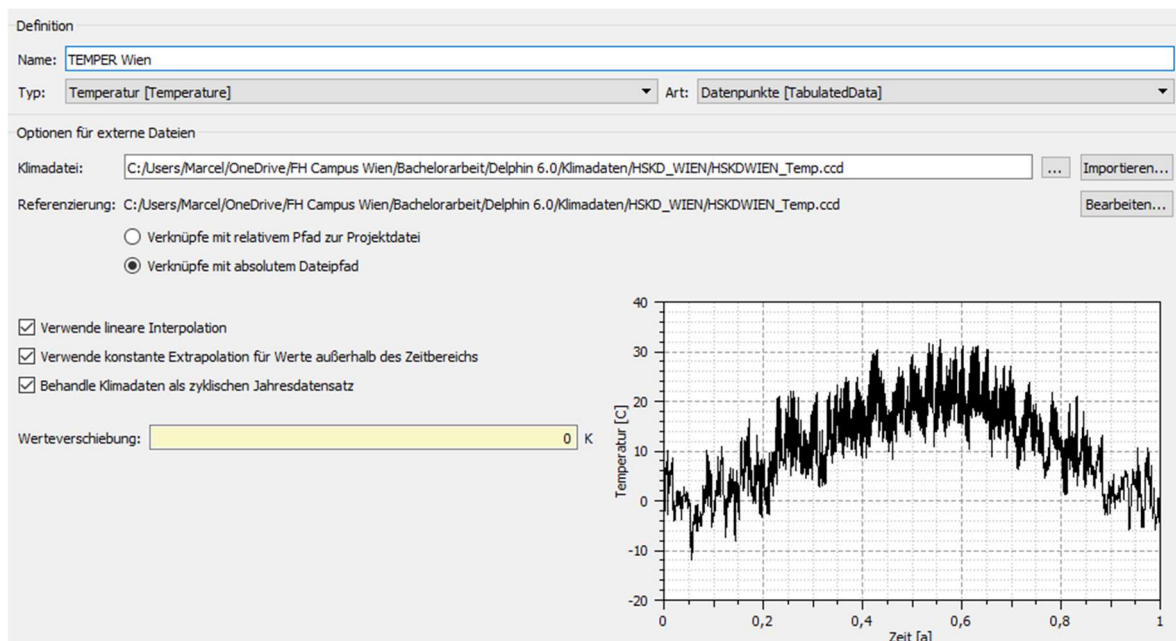
Konstante Parameter

Konstanter Wert: 270 Deg

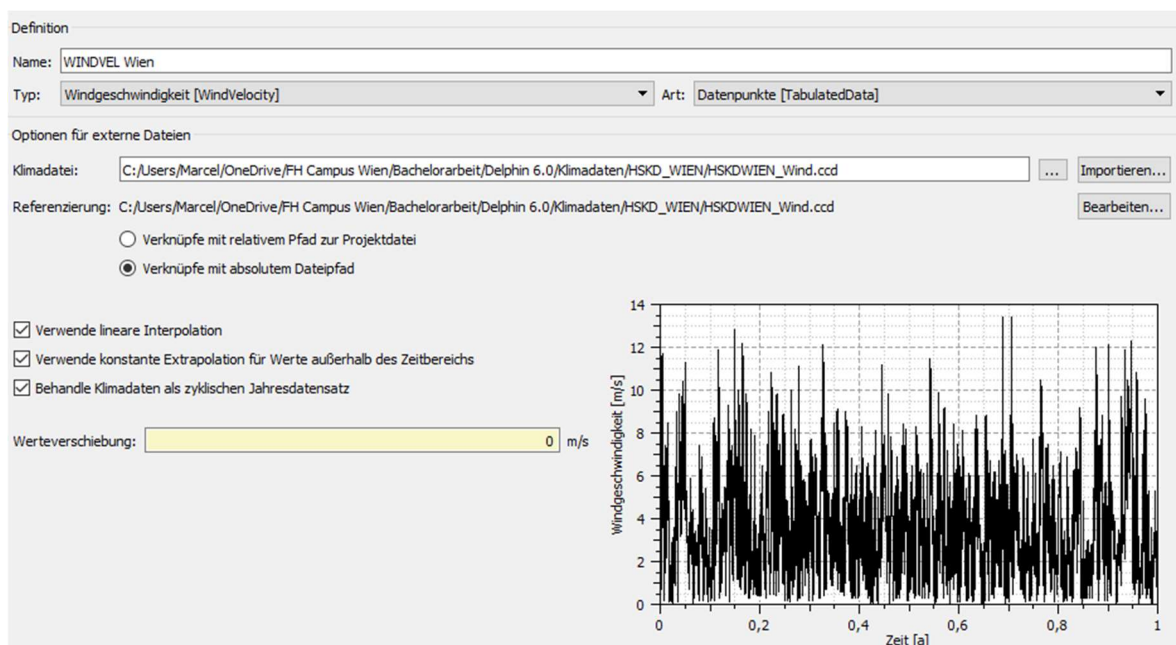
Hinweis

Anstelle Klimabedingungen mit konstanten Parametern zu erstellen, kann man auch einfach den konstanten Wert für die Klimabedingung direkt in die Felder für die Wahl der Klimabedingung eintragen.

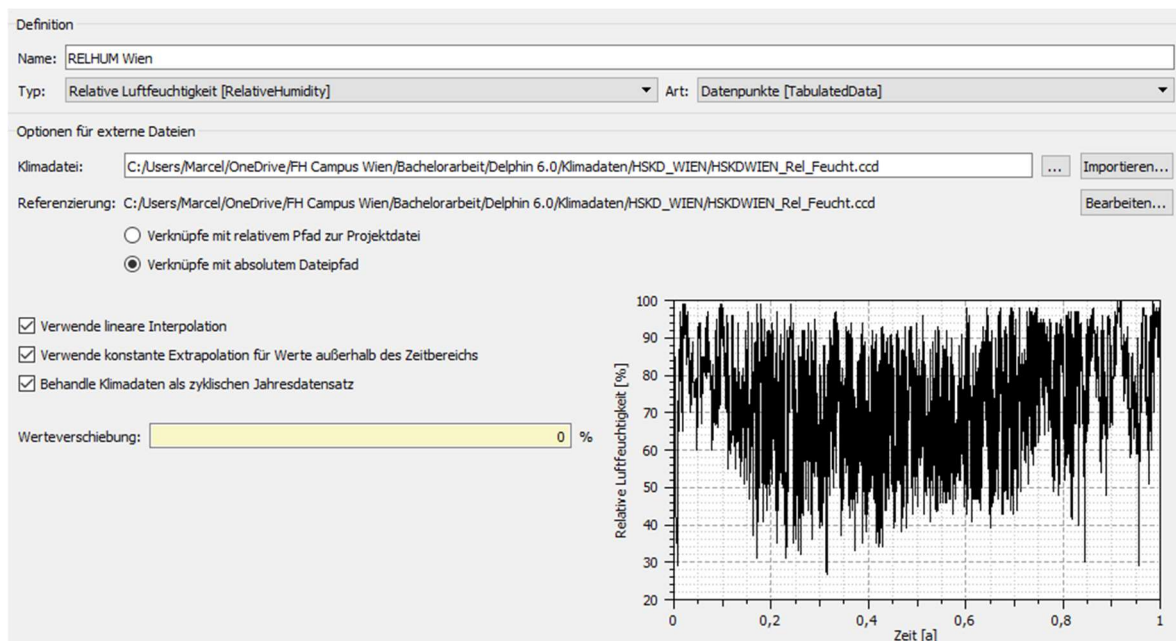
Außenklima – Temperatur Wien:



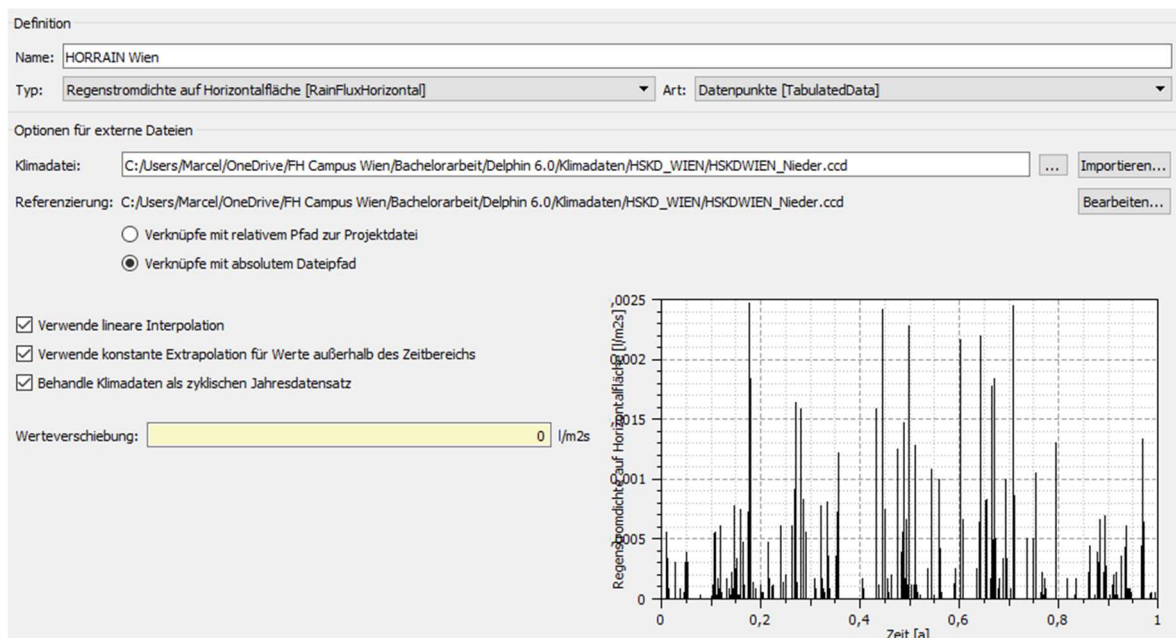
Außenklima – Windgeschwindigkeit Wien:



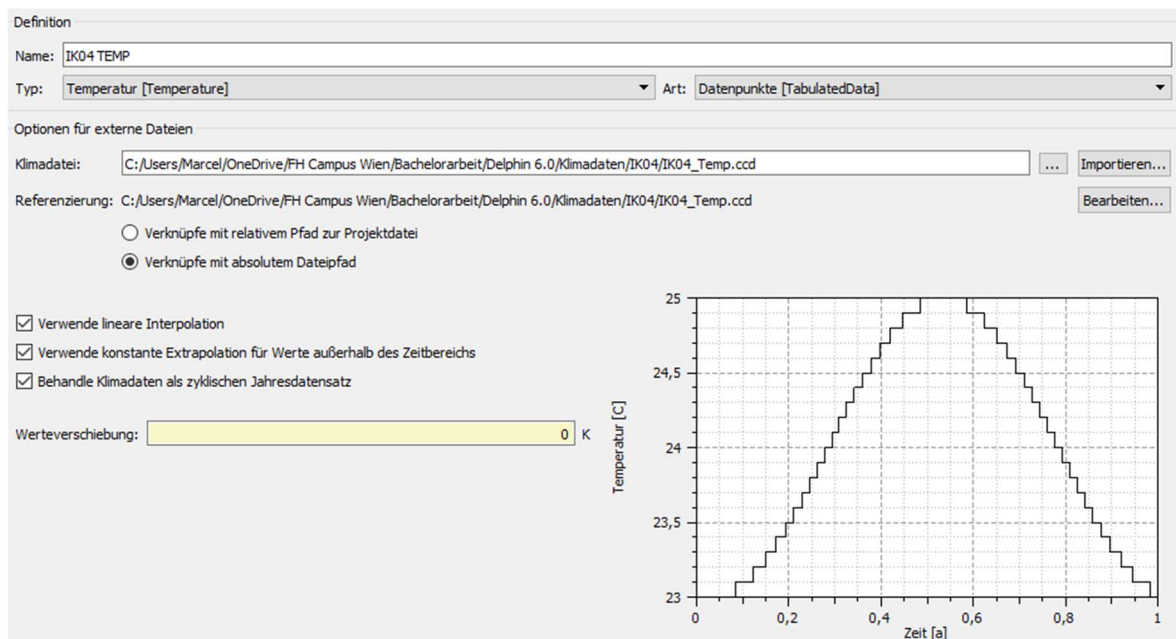
Außenklima – Relative Feuchte Wien:



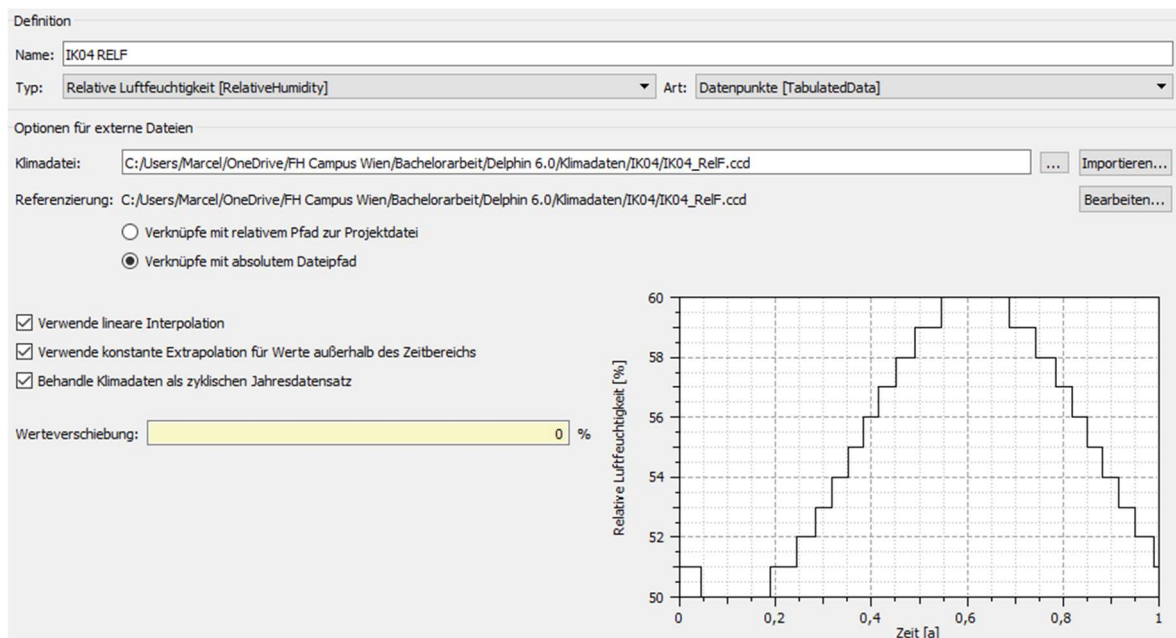
Außenklima – Niederschläge Wien:



Innenklima – Temperatur:



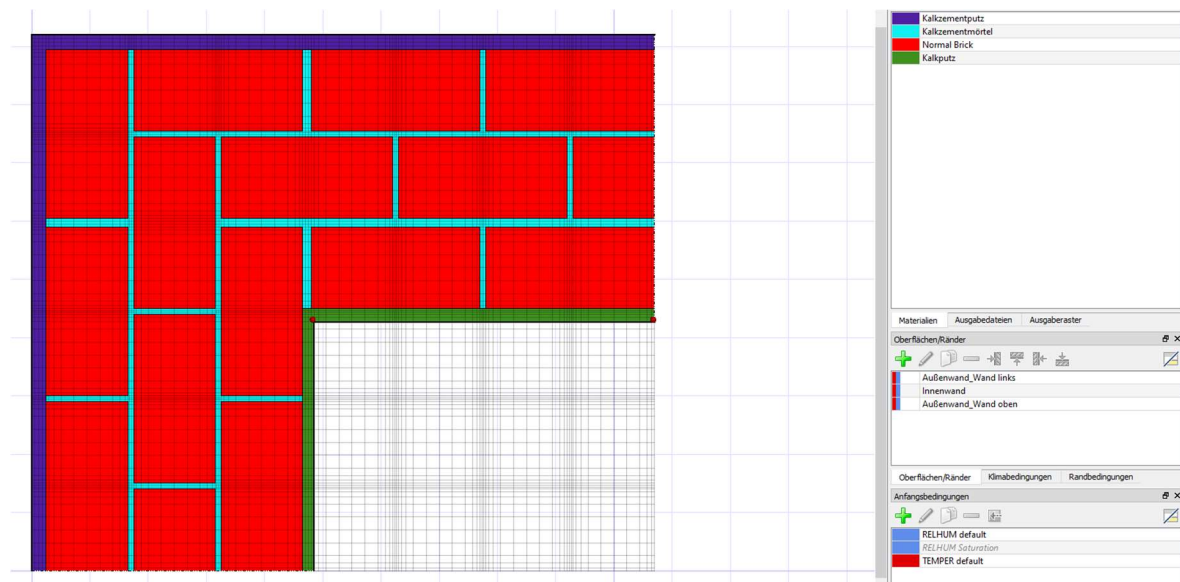
Innenklima – Relative Feuchte:



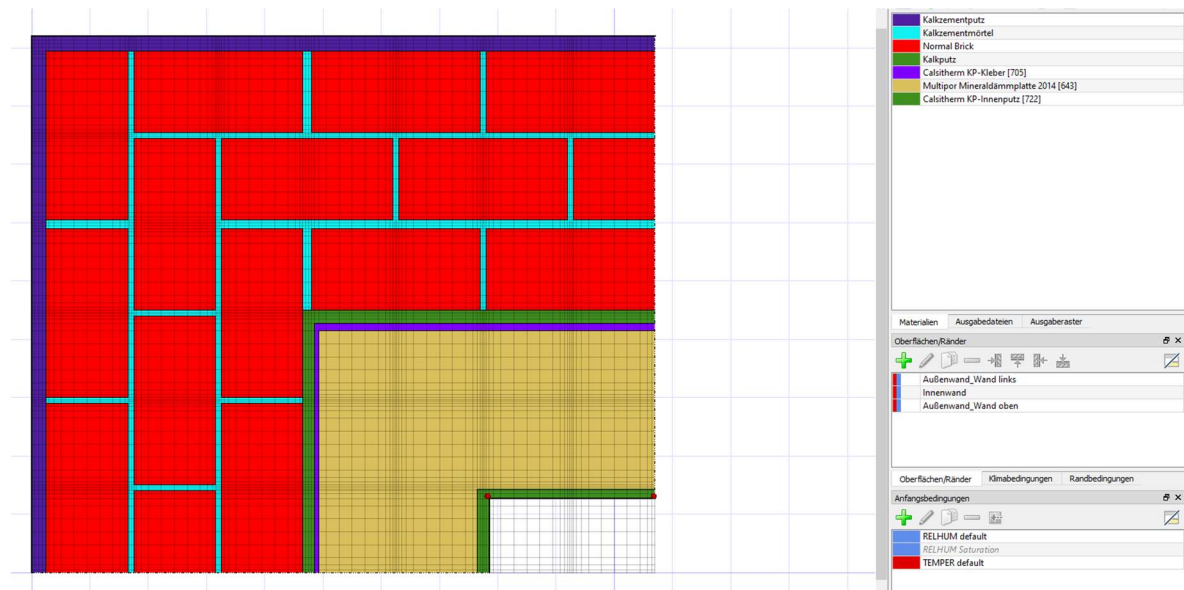
Ausgabe – Modelloptionen:

<input checked="" type="checkbox"/> Energiebilanzgleichung Standard Anfangstemperatur: <input type="text" value="20"/> C <input type="radio"/> Verwende Wärmeleitfähigkeit des trockenen Materials (LAMBDA) <input type="radio"/> Verwende Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit (LAMBDA_DESIGN) <input checked="" type="radio"/> Berücksichtige Materialfeuchte Standard Anfangsluftfeuchte: <input type="text" value="50"/> %		Zusätzliche Modellierungsoptionen <input type="checkbox"/> Verwende anisotropisches Materialmodell	
<input checked="" type="checkbox"/> Feuchtebilanzgleichung Standard Anfangsluftfeuchte: <input type="text" value="50"/> % <input checked="" type="checkbox"/> Verwende Kirchhoff-Potential für Flüssigwassertransport <input type="checkbox"/> Schwerkraft berücksichtigen <input type="checkbox"/> Eismodell (Gleichgewichtsmodell) verwenden <input checked="" type="checkbox"/> Verhindere Überfüllung <input checked="" type="checkbox"/> Verwende strenge Prüfung der Materialfunktionen		Ausgabeoptionen Ausgabezeiteinheit: <input type="text" value="h"/> Kondensat über: <input type="text" value="95"/> % <input type="checkbox"/> Schreibe Ausgaben im Binärformat Zahlengenaugkeit in ASCII-Dateien: <input type="text" value="-1"/>	
<input type="checkbox"/> Luftströmungsgleichung <input type="checkbox"/> Schwerkraft berücksichtigen		Simulationszeiträumen Startdatum: <input type="text" value="01.01.2020 0:00:00"/> Enddatum: <input type="text" value="01.01.2025 0:00:00"/> Simulationsdauer: <input type="text" value="5"/> a	
<input type="checkbox"/> Salzbilanzgleichungen <input type="text" value="Salz-Simulationsoptionen..."/>			
<input type="checkbox"/> Schadstoffbilanzgleichungen <input type="text" value="Schadstoff-Simulationseinstellungen..."/>			

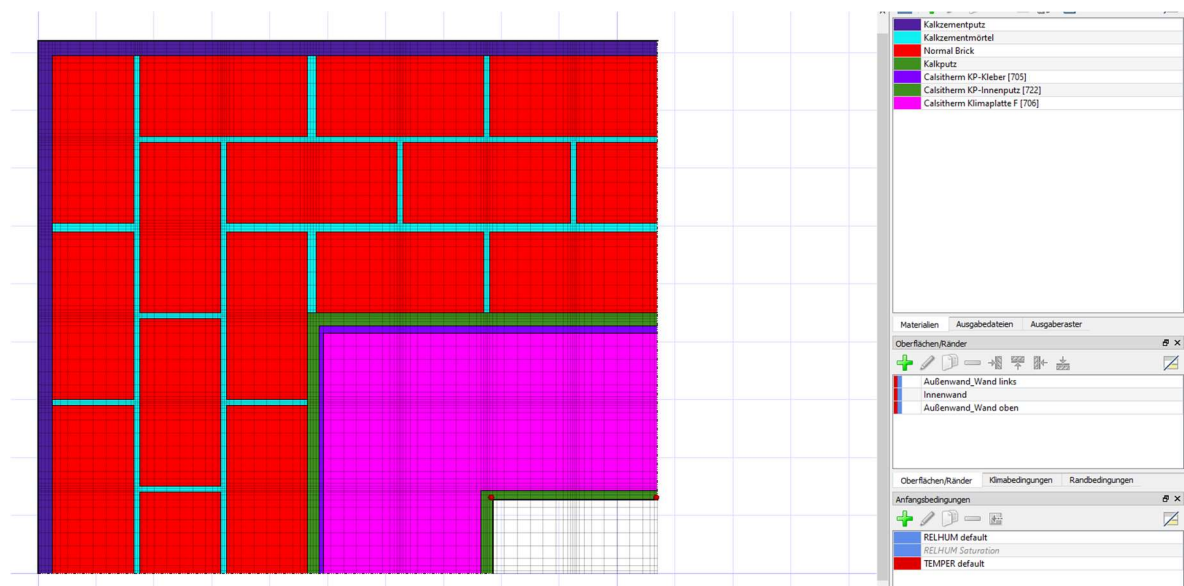
Aufbau – Ungedämmte Bestandskonstruktion:



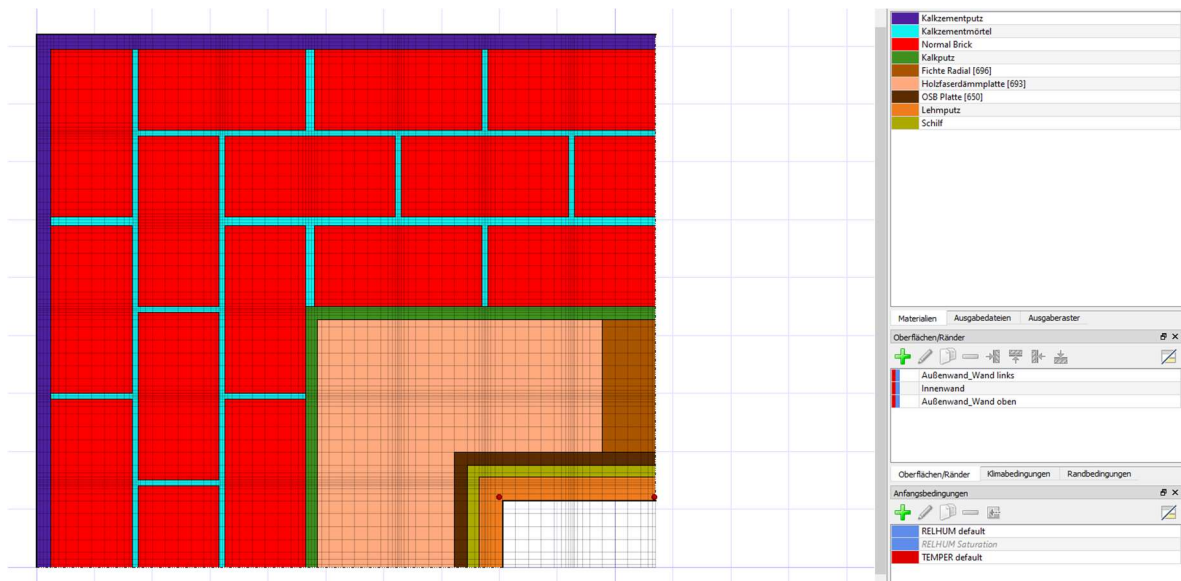
Aufbau – Mineraleisplatte:



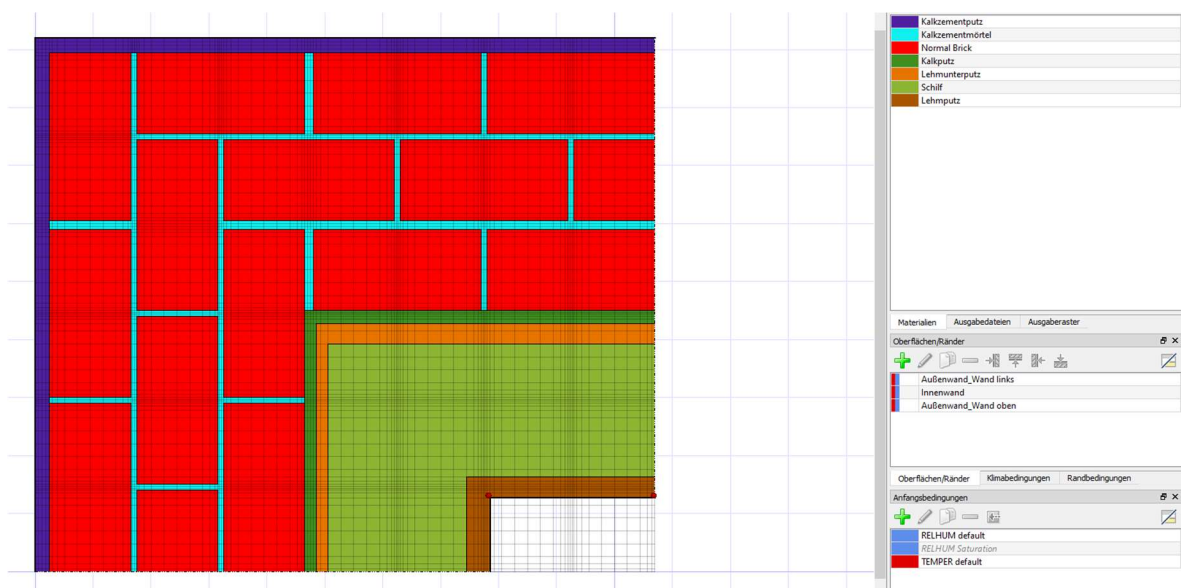
Aufbau – Calciumsilikatplatte:



Aufbau – Holzfaserdämmplatte:



Aufbau - Schilfrohrdämmung:



Aufbau – Wärmedämmlehm:

