



PhD-FSTM-2022-034

Fakultät für Naturwissenschaften, Technologie und Medizin

DISSERTATION

verteidigt am 01/04/2022 in Luxemburg

zur Erlangung des Titels

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DU LUXEMBOURG EN SCIENCES DE L'INGÉNIEUR

von

Sebastian LATZ

geboren am 18. September 1990 in Schorndorf (Deutschland)

Messungen und Simulationen im Vorfeld von Innendämmprojekten zur Erhöhung der Planungssicherheit

Prüfungskommission

Prof. Dr.-Ing. Stefan Maas, Betreuer der Doktorarbeit
Professor, Universität Luxemburg

Prof. Dr.-Ing. Frank Scholzen, Vorsitzender
Professor, Universität Luxemburg

Prof. Dr.-Ing. Andreas Thewes, Stellvertretender Vorsitzender
Professor, Hochschule Trier

Prof. Dr.-Ing. Oliver Kornadt
Professor, Technische Universität Kaiserslautern

Prof. Dr.-Ing. Conrad Völker
Professor, Bauhaus-Universität Weimar

Vorwort

Die vorliegende Dissertation *Messungen und Simulationen im Vorfeld von Innendämmprojekten zur Erhöhung der Planungssicherheit* ist das Resultat meiner mehrjährigen Forschungszeit an der Universität Luxemburg. Die Arbeit ist im Rahmen meines Promotionsstudiums in Kooperation mit der *Administration des bâtiments publics Luxembourg* entstanden.

Im Zeitraum zwischen Oktober 2017 und Februar 2022 habe ich mich der Literaturrecherche, Datenerhebung und –auswertung sowie dem Verfassen der Arbeit gewidmet.

Die Durchführung der Untersuchungen war teilweise beschwerlich und wurde durch die Corona Pandemie erschwert, doch nach ausführlichen Erhebungen war ich in der Lage, die Aufgabenstellung zu meiner eigenen Zufriedenheit zu bearbeiten. Mein Doktorvater Professor Stefan Maas, sowie die Professoren Frank Scholzen und Andreas Thewes standen mir stets helfend zur Seite. Sie haben meine Fragen immer geduldig und ausführlich beantwortet.

Ich möchte mich bei meinen oben genannten Betreuern der Universität Luxembourg sowie der Hochschule Trier, dem Laborpersonal, den Mitarbeitern der *Administration des bâtiments publics* und nicht zuletzt bei Herrn Jean Leyder, der dieses Projekt erst ermöglicht hat, und Herrn Carlo Reckel für die Unterstützung und angenehme Begleitung während der Bearbeitungszeit bedanken.

Ein großer Dank geht auch an meine Kollegen Dr. Steffen Bechtel, Dr. Sasan Rafii-Tabrizi sowie Sebastian Dietz und zahlreichen weiteren, mit denen ich stets angeregt diskutieren und meinen eigenen Horizont erweitern konnte.

Des Weiteren möchte ich allen Personen, die ich im Rahmen meiner Abschlussarbeit interviewt habe oder die mir Zugang zu Messobjekten verschafft haben, und deren Kritik und Hinweise mich stets motivierten, danken. Ohne ihre Kooperation hätte ich meine Ausarbeitung nicht realisieren können.

Zu guter Letzt möchte ich meiner Frau sowie meinen Eltern und Freunden danken. Wenn guter Rat teuer war konnte ich mich immer auf Euch verlassen. Eure Kritik hat mich stets geerdet, wenn ich zu Höhenflügen angesetzt habe und Eure lieben Worte haben mir immer geholfen.

Ich wünsche Ihnen viel Freude beim Lesen meiner Dissertation.



Luxemburg, im Februar 2022

Widmung

*Emma (*07.05.2018)*

&

*Florian (*21.09.2016)*

Zusammenfassung

Auf dem Weg zur Klimaneutralität spielt die Dekarbonisierung des Gebäudesektors eine entscheidende Rolle. Hierfür werden in Luxemburg stetig die aktuellen EU Richtlinien umgesetzt und seit einigen Jahren ist auch ein zu erreichender Mindest-U-Wert für den Fall der Innendämmung im luxemburgischen Gebäudeenergiegesetz, dem *Règlement grand-ducal concernant la performance énergétique des bâtiments*, enthalten. Insbesondere bei historisch relevanten Gebäuden, deren Fassade unter Denkmalschutz steht, aber auch bei vielen anderen Gebäuden mit beispielsweise außen beengten Platzverhältnissen, ist die Innendämmung die einzige Möglichkeit, den Transmissionswärmeverlust durch die Fassade und somit auch die Treibhausgasemissionen zu senken.

Gleichzeitig herrscht bei vielen planenden Architekten und Ingenieuren die Sorge, beim Einsatz von Innendämmung Bauschäden zu riskieren und somit die erhaltenswerte Bausubstanz zu beschädigen. Diese Sorge wird häufig mit dem Wissen von der „Taupunktverschiebung“ durch die Innendämmung in das Mauerwerk begründet. Dies entspringt den Vereinfachungen des Glaserverfahrens und ist von vielen Planenden verinnerlicht, obwohl in der Praxis durch die Sorptionseigenschaften und die Kapillarität bei korrekter Materialauswahl kein flüssiges Wasser ausfällt und kein Schimmel wächst.

Die vorliegende Arbeit untersucht daher, ob und durch welche bauphysikalischen Messungen im Vorfeld (z.B. innerhalb einer Winterperiode) eines komplexen Innendämmprojektes die Planungssicherheit erhöht werden kann. Ein Schwerpunkt ist der hygrothermische Funktionsnachweis für Natursteinfassaden, bei denen der Nachweis basierend auf den bisherigen Verfahren in der Regel scheitert.

Die an zwanzig Versuchsgebäuden durchgeführten Untersuchungen führen zu teilweise überraschenden Ergebnissen: so ergeben die Wärmeflussmessungen an massivem Bruchsteinmauerwerk stets deutlich niedrigere U-Werte in der Praxis im Vergleich zu den Berechnungen mit Standardwerten. Dies führt zu dem, dass das Risiko bei Innendämmung niedriger ausfällt. Es bedeutet andererseits auch gleichzeitig, dass das energetische Einsparpotential durch eine nachträgliche Dämmung des Bauteils überschätzt wird. Die Messung des Innenklimas erweist sich als ein gutes Werkzeug, um die momentane Nutzung des untersuchten Raumes quantitativ beurteilen zu können. Dabei kristallisiert sich heraus, dass in Wohngebäuden überwiegend hohe bis sehr hohe Feuchteniveaus herrschen, während in Verwaltungs- und Bürogebäuden niedrige und normale Feuchteniveaus vorliegen, wobei keines der untersuchten Gebäude mechanisch belüftet wird. Dies lässt den Schluss zu, dass eine Innendämmung bei Verwaltungs- und Bürogebäuden aufgrund der geringeren Feuchtelast weniger problematisch umsetzbar ist, als bei Wohngebäuden. Jedoch sollte stets ein besonderes Augenmerk auf die Auswahl des Dämmsystems und seines Diffusionswiderstandes gelegt werden. Für die Messung des Wasseraufnahmekoeffizienten bei in Zukunft unveränderter Fassade werden sowohl die bekannten Messröhrchen nach Karsten und Franke bzw. Janning als auch ein neues Wasseraufnahmemessgerät von Stelzmann eingesetzt. Während die Messröhrchen auf Fenstereinfassungen und kleinformatigen Steinen als Indikator dienen können, eignet sich das Gerät von Stelzmann besser für die Bewertung

von größeren, verputzten Oberflächen. Die Abdichtung bei der Messung an Natursteinfassaden mit hoher Rauigkeit und bei absandenden Oberflächen zeigt sich hier zusätzlich als problematisch. Vor allem bei hoher Saugfähigkeit der Verfugung kann es bei allen Geräten zu Kurzschlüssen kommen, die einen besonders hohen Wasseraufnahmekoeffizienten ergeben. Unter Zuhilfenahme von Klimaaufzeichnungen aus umliegenden Wetterstationen können die oben genannten Messungen für die Bauteilcharakterisierung und Parametrierung von numerischen Simulationstools verwendet werden, wobei letztlich all diese Messmethoden nur eine begrenzte Aussagefähigkeit haben.

Bei saugenden Fassaden ist die tatsächliche Schlagregenbelastung auf die Fassade aber entscheidend über die Funktion der Innendämmung, da diese das Trocknungspotential in den Wintermonaten erheblich reduziert und bei starker Feuchteanreicherung Frostschäden drohen. Da in-situ Messungen, wie bereits erwähnt, komplex und fehleranfällig sind, wurde eine andere Methode entwickelt. Sie basiert auf Dauermessungen der Mauerwerksfeuchte einige cm unter der Außenoberfläche, auf Klimaaufzeichnungen und numerischer Simulation.

Hierfür werden an einer exponierten Stelle auf der Wetterseite eine Dauermessung und mehrere Stichproben der relativen Feuchte durchgeführt und später in der Simulation der Expositionsfaktor iterativ so angepasst, dass Simulation und Messung übereinstimmen. So kann ein Näherungswert für die tatsächliche Exposition der Messstelle und deren Wasseraufnahme aus Regen ermittelt werden.

Für die Erkennung exponierter Stellen an der Fassade werden sowohl theoretische Überlegungen herangezogen, als auch optisch die Fassadenbenetzung zu Beginn von Regenereignissen untersucht. Am Beispiel der alten Nationalbibliothek von Luxemburg, mit teilweise 300 Jahre alter Natursteinfassade, wird gezeigt, wie diese Nachweismethode bei einer geschützten Fassade funktionieren kann, auch wenn der Wasseraufnahmekoeffizient deutlich über dem empfohlenen Grenzwert aus Normen und Merkblättern liegt.

Um in Zukunft in der Materialdatenbank der WUFI Software des Fraunhofer IBP auch auf luxemburgische Natursteine zugreifen zu können, werden zwei Materialdatensätze typischer luxemburgischer Natursteine analysiert und die Daten aufbereitet, dass sie in die Software eingelesen werden können. Die Durchführung von genauen bauphysikalischen Untersuchungen bereits im Vorfeld einer Sanierungsmaßnahme eines von innen zu dämmenden Gebäudes ermöglicht genaue Aussagen über die hygrothermische Reaktion des Mauerwerks auf die spätere Dämmung und erhöht somit die Planungssicherheit. In Abhängigkeit des Renovierungsumfangs können durchaus auch schon einzelne Messungen genügen, um dieses Ziel zu erreichen.

Offene Fragen bleiben weiterhin bei der Modellierung von Grenzflächen im Mauerwerk. Vor allem bei Bruchsteinen existieren zahlreiche Grenzflächen und Wechsel zwischen Gestein, Mörtel und Lufteinschlüssen. Diese machen eine exakte Modellierung der Feuchte im Kern des Mauerwerks basierend auf idealisierten Materialdatensätzen vor allem im Grenzbereich zwischen hygroskopischer und kapillarer Feuchte schwierig. Bisher können nur allgemeine Aussagen getroffen werden, weil Lufteinschlüsse und 3d-Grenzflächen den lokalen Wärmedurchgangswiderstand und Feuchtetransport stark beeinflussen.

Abstract

Decarbonization of the building sector plays a decisive role on the way to climate neutrality. Therefore the current EU directives are constantly being implemented in Luxembourg and, for some years now, a maximum U-value for the case of interior insulation is included in the Luxembourg building energy law, the *Règlement grand-ducal concernant la performance énergétique des bâtiments*. Particularly in the case of historically relevant buildings whose façades are listed, but also in the case of many other buildings with, for example, confined space on the outside, interior insulation is the only way to reduce transmission heat loss through the façade and thus also greenhouse gas emissions.

At the same time, many planning architects and engineers are concerned about the risk of structural damage when using interior insulation and thus damaging the building fabric that is worth preserving. This concern is often justified by the knowledge of the "dew point shift" caused by interior insulation into the masonry. This stems from the simplifications of the Glaser method and is internalized by many designers, although in practice, due to the sorption properties and capillarity, no liquid water precipitates and no mold grows if the material is selected correctly.

This dissertation therefore investigates whether and by which building physics measurements in advance (e.g. of a winter period) of a complex interior insulation project can increase the planning reliability. One focus is the hygrothermal functional verification for natural stone facades, where the proof of design based on previous methods usually fails.

The investigations carried out on twenty test buildings lead to some surprising results: for example, the heat flow measurements on solid quarry stone masonry always yield significantly lower U-values in practice compared to the calculations with standard values. On the one hand, this means that the risk is lower with interior insulation. On the other hand, it also means at the same time that the potential energy savings from subsequent insulation of the building component are overestimated. The measurement of the indoor climate proves to be a good tool to quantitatively assess the current use of the examined room. It crystallizes that residential buildings have predominantly high to very high humidity levels, while administrative and office buildings have low and normal humidity levels, with none of the buildings studied being mechanically ventilated. This suggests that interior insulation is less problematic to implement in administrative and office buildings than in residential buildings due to the lower moisture load. However, special attention should always be paid to the selection of the insulation system and its diffusion resistance. For the measurement of the water absorption coefficient with an unchanged facade, both the well-known measuring tubes according to Karsten and Franke or Janning and a new water absorption measuring device from Stelzmann are used. While the measuring tubes can be used as an indicator on window surrounds and small-sized stones, the device from Stelzmann is better suited for evaluating large, plastered surfaces. The sealing during the measurement on natural stone facades with a high degree of roughness and on sandy surfaces also proved to be problematic. Particularly in the case of high absorbency of the grouting, short circuits can occur with all devices, resulting in a particularly high water absorption coefficient. With the aid of climate records from surrounding weather stations, the above measurements can be

used for component characterization and parameterization of numerical simulation tools, although ultimately all these measurement methods have only limited informative value.

However, in the case of absorbent facades, the actual driving rain load on the facade is decisive for the function of the interior insulation, since this considerably reduces the drying potential during the winter months. Since in-situ measurements are complex and prone to error, as already mentioned, another method was developed. It is based on continuous measurements of masonry moisture a few cm below the exterior surface, climate records and numerical simulation.

For this purpose, an approximate value for the actual exposure of the measuring point and its water absorption from rain is determined iteratively. For this purpose, a permanent measurement and several random samples of the relative humidity are taken at an exposed location on the weather side, and later the exposure factor is iteratively adjusted in the simulation so that simulation and measurement match.

For the detection of exposed spots on the facade, theoretical considerations are used as well as optical investigation of the facade wetting at the beginning of rain events. The example of the old National Library of Luxembourg, with a partially 300-year-old natural stone façade, is used to show how this detection method can work for a protected façade, even if the water absorption coefficient is significantly higher than the recommended limit value from standards and codes of practice.

In order to be able to access Luxembourgian natural stones in the material database of the WUFI software of Fraunhofer IBP in the future, two material data sets of typical Luxembourgian natural stones will be analyzed and the data prepared so that they can be read into the software. The execution of precise structural-physical investigations already in the run-up to a renovation measure of a building to be insulated from the inside enables exact statements about the hygrothermal reaction of the masonry to the later insulation and thus increases the planning reliability. Depending on the scope of the renovation, individual measurements may be sufficient to achieve this goal.

Open questions remain about the modeling of boundary surfaces in masonry. Particularly in the case of quarry bricks, there are numerous interfaces and alternations between rock, mortar and air inclusions. These make accurate modeling of moisture in the core of the masonry based on idealized material data sets difficult, especially in the interface between hygroscopic and capillary moisture. So far, only general statements can be made because air inclusions and 3d interfaces strongly influence the local thermal resistance and moisture transport.

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG UND ANGESTREBTE ZIELE	20
1.1	HINTERGRUND.....	20
1.2	ZIELSTELLUNG.....	20
1.3	AUFBAU DER ARBEIT.....	21
2	GRUNDLAGEN	22
2.1	INNENDÄMMUNG – EIN HYGROTHERMISCHER SONDERFALL.....	22
2.2	WÄRME- UND FEUCHTETRANSPORTMECHANISMEN.....	23
2.2.1	<i>Wärmetransport im Bauteil</i>	<i>24</i>
2.2.1.1	Wärmeleitung.....	24
2.2.1.2	Wärmestrahlung.....	25
2.2.2	<i>Dampf- und Flüssigtransport im Bauteil.....</i>	<i>26</i>
2.2.2.1	Feuchtequellen	26
2.2.2.2	Feuchtespeicherung in porösen Baustoffen	27
2.2.2.3	Wasserdampfdiffusion	33
2.2.2.4	Oberflächendiffusion und kapillare Leitung.....	36
2.2.2.5	Verfahren zur Bestimmung der Feuchtetransportkoeffizienten.....	38
2.3	NORMUNG, FORSCHUNG UND STAND DER TECHNIK.....	43
2.3.1	<i>Normenwerke im Kontext der Innendämmung</i>	<i>43</i>
2.3.1.1	National.....	43
2.3.1.2	DIN Normen	43
2.3.1.3	WTA Merkblätter.....	47
2.3.2	<i>Analyse von Schlagregen im Kontext der Bauphysik</i>	<i>51</i>
2.3.3	<i>Hydrophobierung im Kontext der Innendämmung</i>	<i>53</i>
2.3.4	<i>Analyse von Holzbalkendecken im Zusammenhang mit Innendämmung</i>	<i>56</i>
2.3.5	<i>Einfluss von Grenzflächen und Gaseinschlüssen im Mauerwerk auf den Wärme- und Feuchtetransport</i>	<i>59</i>
2.4	NACHWEISVERFAHREN	60
2.4.1	<i>Nachweisfreie Konstruktionen gemäß DIN 4108-3.....</i>	<i>60</i>
2.4.2	<i>Das Glaserverfahren.....</i>	<i>60</i>
2.4.3	<i>Das vereinfachte Nachweisverfahren nach WTA 6-4.....</i>	<i>62</i>
2.4.4	<i>Numerische Simulationsverfahren</i>	<i>64</i>
2.5	WUFI SIMULATIONSTOOLS	65

Messungen und Simulationen im Vorfeld von Innendämmprojekten
zur Erhöhung der Planungssicherheit

3	BAUPHYSIKALISCHE UNTERSUCHUNGEN	67
3.1	VERFÜGBARE MESSMETHODEN	67
3.1.1	<i>Innenklima</i>	67
3.1.2	<i>Außenklima</i>	71
3.1.3	<i>Wärmefluss (U-Wert)</i>	72
3.1.4	<i>Mauerwerksfeuchte</i>	78
3.1.5	<i>Wasseraufnahmekoeffizient der Fassade</i>	83
3.1.6	<i>Thermografie</i>	85
3.1.7	<i>Materialparameter</i>	87
3.2	FELDTTEST KONFERENZRAUM 5 BEI ABP	94
3.2.1	<i>Beschreibung der Testflächen</i>	96
3.2.2	<i>Transformation des Raumes</i>	98
3.2.3	<i>Mess- und Simulationsergebnisse</i>	99
3.2.4	<i>Rückschlüsse und Empfehlungen</i>	102
4	ERMITTLUNG DES EXPOSITIONSFAKTORS EINER FASSADE	104
4.1.1	<i>Schlagregen und die Exposition einer Fassade</i>	104
4.1.2	<i>Ansatz zur Ermittlung der Exposition</i>	105
4.1.3	<i>Dauermessung der Feuchte unter der Außenhaut</i>	108
4.1.4	<i>Simulation der Messstelle</i>	111
4.1.5	<i>Möglichkeiten und Grenzen der Methode</i>	112
4.1.6	<i>Ermittlung der besten Messstelle</i>	112
5	PLANUNG EINER INNENDÄMMUNG AM BEISPIEL DER „ANCIENNE DIRECTION“ IN LUXEMBOURG	114
5.1	BESTANDSAUFNAHME	117
5.1.1	<i>Zustand Fassade und Mauerwerk</i>	117
5.1.2	<i>Messung des Wasseraufnahmekoeffizienten w_a</i>	118
5.1.3	<i>Wärmeflussmessung zur Bestimmung des experimentellen U-Wertes</i>	120
5.1.4	<i>Zu erwartendes Innenklima</i>	123
5.1.5	<i>Bauschäden jeglicher Art</i>	123
5.2	ZIELE DES BAUHERREN	123
5.3	ENTSCHEIDUNG ÜBER DEN SCHLAGREGENSCHUTZ	124
5.4	NACHWEISFÜHRUNG	124
5.4.1	<i>Vereinfachter Nachweis auf der ungestörten Wand</i>	124
5.4.2	<i>Numerischer Nachweis für die Bereiche um die Fenster</i>	125

6	OPTIMIERUNG VON INNENDÄMMMAßNAHMEN	129
6.1	EINFLUSSFAKTOREN	129
6.2	BEISPIELHAFTE BERECHNUNG	131
6.2.1	<i>Energetische Betrachtung</i>	131
6.2.2	<i>Wirtschaftlichkeitsbetrachtung</i>	133
6.3	OPTIMALE DÄMMSTÄRKE.....	136
7	SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK.....	137
	ANHANG A: BERECHNUNGSSCHRITTE UND BEISPIEL DES GLASERVERFAHRENS.....	139
	ANHANG B: WTA.....	147
	ANHANG C: GRUNDLAGEN DER INFRAROT-THERMOGRAFIE.....	148
	ANHANG D: PRAXISLEITFADEN INNENDÄMMUNG	14850
	ANHANG E: WIRTSCHAFTLICHKEITSBERECHNUNGEN.....	184

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Qualitativer Temperaturverlauf in unterschiedlichen Mauerwerkskonstruktionen in der Heizperiode [4]	22
Abbildung 2: Feuchtequellen im Gebäude [7]	26
Abbildung 3: Schematische Feuchtespeicherfunktion eines porösen Baustoffs bei konstanter Temperatur.	28
Abbildung 4: Meniskusbildung von Wasser in einer Kapillare	29
Abbildung 5: Die Sorptionsisotherme des Erzener (LU) Natursteins	30
Abbildung 6: Qualitativer Zusammenhang der Feuchtetransportkomponenten flüssig / gasförmig.	31
Abbildung 7: Feuchtespeicherfunktion eines kapillaraktiven Dämmstoffs (Multipor).....	32
Abbildung 8: Feuchtespeicherfunktion eines hydrophoben Dämmstoffs (Calostat).....	32
Abbildung 9: Einfluss des Diffusionswiderstandes einer Innendämmschicht auf den diffusionsgetriebenen Feuchtetransport durch die Dämmschicht anhand zweier Beispieltage.	34
Abbildung 10: Kombiniertes Dampf- und Flüssigtransport in einer Baustoffpore [10].....	36
Abbildung 11: Den Feuchtebereichen zugeordnete Feuchtetransportexperimente [13]	38
Abbildung 12: Skizze des Versuchsaufbau und qualitative Darstellung zweier unterschiedlicher Proben [14].....	39
Abbildung 13: Prinzipskizze des Wasseraufnahmeversuchs	40
Abbildung 14: Qualitativer Verlauf der Massezunahme beim Wasseraufnahmeversuch.	40
Abbildung 15: Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten	41
Abbildung 16: Feuchtestufen gemäß DIN EN 15026 und WTA 6-2	47
Abbildung 17: Anforderungen an die Fassade gemäß DIN und WTA	49
Abbildung 18: Risiko für Holzerstörung gemäß WTA 6-8.....	50
Abbildung 19: Schlagregenmessgerät des Fraunhofer IBP	52
Abbildung 20: Tropfenkontur bei hydrophober (links) und hydrophiler (rechts) Oberfläche und Kontaktwinkel.	53
Abbildung 21: Schematische Darstellung verschiedener Steinschutzmaßnahmen [21].	53
Abbildung 22: Abplatzung an der obersten Gesteinsschicht infolge einer Hydrophobierung [22] .	54
Abbildung 23: Gasblase am Erzener Naturstein	55
Abbildung 24: Gasblase am Gilsdorfer Naturstein	55

Abbildung 25: Feuchtequellen am Balkenkopf [23]	56
Abbildung 26: Abgedichtete Balkenköpfe mit Innendämmung [52]	57
Abbildung 27: Ausführung einer Gefachdämmung [53]	58
Abbildung 28: Klimabedingungen für das Periodenbilanzverfahren der DIN 4108 [3]	61
Abbildung 29: Vereinfachtes Nachweisverfahren der WTA 6-4	62
Abbildung 30: Simulationsergebnis einer 1D WUFI Simulation mit WUFI Pro 6.5	66
Abbildung 31: Vormessung des Innenklimas über zwei Monate	68
Abbildung 32: Stundenwerte der inneren Feuchte in % r.F. gegen Außentemperatur	69
Abbildung 33: Stundenwerte der inneren Feuchte in Pa gegen Außentemperatur	70
Abbildung 34: Stationsübersicht - Agrarwetterstationen Luxembourg [30]	71
Abbildung 35: Messaufbau bestehend aus Wärmeflussplatte und vier Temperatursensoren [31]... 72	
Abbildung 36: Skizzenhafte Darstellung des Temperaturverlaufs im Mauerquerschnitt	72
Abbildung 37: Außenansicht der Messbox	74
Abbildung 38: Innenansicht mit Heiz- und Messequipment	74
Abbildung 39: Grafische Auswertung der Wärmeflussmessung.	75
Abbildung 40: Unterschiedliche Verläufe bei Schäden durch Feuchteintrag [32]	78
Abbildung 41: Kombiniertes Temperatur und Feuchtefühler mit Almemo Messstecker [33]	79
Abbildung 42: Sensoren direkt im Mauerwerk sowie eingeschoben im Kunststoffrohr in größerer Tiefe.	80
Abbildung 43: Zeichnung der Einschiebehülse (PLA inlet) für Feuchtemessungen	81
Abbildung 44: Beispiel einer punktuellen Feuchtemessung im Mauerwerksquerschnitt	82
Abbildung 45: Die Grafik zeigt den Unterschied zwischen Karsten (links) und Pleyer Röhrchen (rechts) [29]	83
Abbildung 46: Messprinzip des WAM100B	83
Abbildungen 47: Messaufbau WAM 100B an einem Gebäude in der Eifel	84
Abbildung 48: Exemplarische Messaufzeichnung einer w_a -Wert Messung	84
Abbildung 49: Thermogramm einer Fensternische	85
Abbildung 50: Messwerte einer Überprüfung des Oberflächenfaktors mittels Anlegefühler	86
Abbildung 51: Bohrkern mit inhomogener Mischung aus Bruchsteinen und Mörtel	88

Abbildung 52: Unterschiedliche Wasser-Steighöhen bei einem im Wasserbad stehenden Bohrkern über 5 Tage.....	89
Abbildung 53: Messverlauf der Sorptionsmessung am Ernzerer Naturstein.....	91
Abbildung 54: Messverlauf der Sorptionsmessung am Gilsdorfer Naturstein.....	91
Abbildung 55: Ernzerer Naturstein.....	92
Abbildung 56: Bild der Pont Adolphe aus Gilsdorfer Naturstein	93
Abbildung 57: Ansicht des Konferenzraumes.....	94
Abbildung 58: Lage des Konferenzraums über dem Tal der Alzette	94
Abbildung 59: Verteilung der Testflächen im Konferenzraum.....	96
Abbildung 60: Abgenommener Bestandsputz unter der Testfläche der Udi Reco Dämmung und eingebaute Messrohre an der Ostfassade unter der SLENTITE (oben rechts) Testfläche sowie unter der Calostat Testfläche (rechts). Aufgebrachte SLENTITE Platten (unten).	98
Abbildungen 61: Montierte Calostat (links) und aufgebrachte Aerobran (rechts) Testflächen	99
Abbildung 62: Temperatur- und Feuchteverläufe im Innenraum mit CO ₂ Messwerten	100
Abbildung 63: Einordnung des Innenklimas in die EN 15026.....	100
Abbildung 64: Temperaturverläufe unter den Dämmschichten	101
Abbildung 65: Feuchteverläufe unter den Dämmschichten	101
Abbildung 66: Vergleich Simulation vs. Messung im Fall der SLENTITE Testfläche (System I)	102
Abbildung 67: Ablaufdiagramm der Expositionsermittlung.....	107
Abbildung 68: Bibliothek mit Innenhof aus der Vogelperspektive.....	108
Abbildung 69: Schlagregenanalyse des Standortes Trier (ca. 35 km Luftlinie) aus dem hygrothermischen Referenzjahr	108
Abbildung 70: Südwand des Innenhofs der ehemaligen Bibliothek mit eingetragenen Feuchtemessstellen.....	109
Abbildung 71: Aufzeichnung der Feuchte im Mauerwerk sowie weiterer Parameter	110
Abbildung 72: Vergleich zwischen gemessener und simulierter Feuchte ca. 8 cm unter der Natursteinoberfläche	111
Abbildung 73: Algenbildung (oben links) und Fassadenbenetzung bei einsetzendem Regen.....	113
Abbildung 74: Aufnahme aus dem Jahr 2021	114
Abbildung 75: Eine Darstellung des Stahlwerksareals aus dem Jahr 1923.....	115

Abbildung 76: Eine Aufnahme aus dem Jahr 1945.....	115
Abbildung 77: Um Hinweise zur Messtechnik erweitertes Ablaufdiagramm zur Planung einer Innendämmung gemäß WTA 6-4.....	116
Abbildung 78: Frostschaen an einem Ziegel und defekte Verfugung.....	117
Abbildung 79: Anordnung der Röhrrchen bei der w_a Wert Messung.	118
Abbildung 80: Messergebnisse der spezifischen Wasseraufnahme bezogen auf die Zeit	118
Abbildung 81: Messergebnisse der spezifischen Wasseraufnahme bezogen auf die Wurzel der Zeit	118
Abbildung 82: Nahansicht der Beschichtung auf dem Naturstein	119
Abbildung 83: Ergebnisgrafik für die Wärmeflussmessung in der "Ancienne direction"	120
Abbildung 84: Qualitative Darstellung des Wärmebrückeneinflusses zwischen zwei Fenstern....	120
Abbildung 85: Nachmessung U-Wert „Ancienne Direction“ - 8 Wochen Übersicht.....	121
Abbildung 86: Nachmessung U-Wert „Ancienne Direction“ - 6 Tage im April	122
Abbildung 87: Eintragung in die Grafik des vereinfachten Nachweises	124
Abbildung 88: Übersichtsdarstellung über den 2 D Mauerwerksquerschnitt	125
Abbildung 89: 2D Simulation einer Fenstereinfassung im nicht gedämmten Zustand.....	126
Abbildung 90: WUFI 2 D - Bauteilskizze mit 4 cm Innendämmschicht	127
Abbildung 91: 2D Simulation einer Fenstereinfassung mit 4 cm starker Innendämmung	127
Abbildung 92: Ergebnisse der 2D Simulation an einer Fenstereinfassung mit Temperatur und Feuchteverlauf.....	128
Abbildung 93: Qualitative Darstellung des energetischen Optimums einer Dämmung	130
Abbildung 94: Ergebnis der Parametervarianz am Beispiel der Holzfaserdämmung.	132
Abbildung 95: Dämmstoffvergleich aus primärenergetischer Sicht für Heizen sowie graue Energie	133
Abbildung 96: Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zweier Dämmstoffe.....	135
Abbildung 97: U-Werte von gedämmtem Mauerwerk mit konventionellem Dämmstoff	136
Abbildung 98: Schichtaufbau für die Glaserberechnung	140
Abbildung 99: Glaserdiagramm mit eingetragenen Ergebnissen.....	144
Abbildung 100: Diffusionsdiagramm für vier Fälle von Kondensationsbildung aus der DIN 4108-3	144

Abbildung 101: Diffusionsdiagramme für vier Fälle von Tauwasserverdunstung aus der DIN 4108-3.....	145
Abbildung 102: Wellenlängenbereiche unterschiedlicher Spektren [46].....	148
Abbildung 103: Erweitertes Ablaufdiagramm der Planung einer Innendämmung nach WTA 6-4.....	151
Abbildung 104: Darstellung der Ergebnisse einer Wärmeflussmessung	154
Abbildung 105: Grafische Darstellung des Innenklimas	155
Abbildung 106: Stundenwerte der inneren Feuchtelast im Normdiagramm.....	156
Abbildung 107: Messgeräte zur Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten	157
Abbildung 108: Darstellungen unterschiedlich berechneter Fassaden	158
Abbildung 109: Thermografieaufnahmen eines Gebäudes mit unterschiedlicher Filtration [47]..	160
Abbildung 110: U-Wert Entwicklung von nachträglich gedämmtem Mauerwerk in Abhängigkeit der Dämmstärke.....	162
Abbildung 111: Endenergiebedarfskennzahl Wärme nach äußerer Fassadendämmung an einem Modellhaus [48]	163
Abbildung 112: Dampfdiffusionssperrendes Innendämmsystem [49].....	169
Abbildung 113: Minstdiffusionswiderstand s_d der Innendämmung als Funktion von ΔR dieser Dämmung nach [50].....	171
Abbildung 114: Simulationsergebnis einer 1D WUFI Simulation.....	175
Abbildung 115: Messung der Feuchte im Mauerwerksquerschnitt.....	176
Abbildung 116: Klassische Schadensbilder bei feuchtem Mauerwerk [32]	177
Abbildung 117: Messung der Porenluftfeuchte in drei Tiefen (3/7/25 cm)	177
Abbildung 118: Wärmebrückenberechnung mit Flankendämmung [51].....	180
Abbildung 119: Beispiel eines Dämmstoffdübels [Fischer]	181
Abbildung 120: Installationsdose für Innendämmungen [Kaiser]	182
Abbildung 121: Eingabedaten Wirtschaftlichkeitsberechnung Holzfaser-Innendämmung	184
Abbildung 122: Eingabedaten Wirtschaftlichkeitsberechnung Calostat-Innendämmung.....	185

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zusammenstellung der in der Praxis vorkommenden Transportmechanismen nach Künzel [5], ergänzt um Beispiele.	23
Tabelle 2: Generierung der wassergehaltsabhängigen Feuchtetransportkoeffizienten mittels WUFI Ansatz.....	42
Tabelle 3: Ergebnisse der w-Wert und Kontaktwinkelmessung	55
Tabelle 4: Ergebnisse der Wärmeflussmessungen aus dem Zeitraum 2018 bis 2021.....	76
Tabelle 5: Materialdaten des Ernzerer und des Gilsdorfer Natursteins	92
Tabelle 6: Übersicht über die Dämmsysteme im Feldversuch mit den Ergebnissen der Wärmeflussmessungen.....	97
Tabelle 7: Messergebnisse der Stichproben an der Innenhoffassade der BNL	110
Tabelle 8: Wirtschaftlichkeitsbetrachtung - Variantenübersicht.....	135
Tabelle 9: Materialien für die Glaserberechnung.....	140
Tabelle 10: Wasserdampfsättigungsdrücke aus der DIN 4108-3	142
Tabelle 11: Aspekte und Fragestellungen zur Auswahl des Innendämmsystems [Scheffler].....	161

Abkürzungsverzeichnis

ABP	Administration des bâtiments publics Luxembourg
BNL	Bibliothèque nationale du Luxembourg (alte National-Bibliothek)
UL	Universität Luxembourg
SNHBM	Société Nationale des Habitations à Bon Marché
LTAM	Lycée des Arts et Métiers
EFH	Einfamilienhaus
MFH	Mehrfamilienhaus
SA	société anonyme – Aktiengesellschaft

Formelverzeichnis

λ	Wärmeleitfähigkeit	$[W/(m * K)]$
d	Dicke des Materials	$[m]$
R_T	Wärmedurchgangswiderstand	$[m^2 * K/W]$
R	Wärmedurchlasswiderstand	$[m^2 * K/W]$
U	Wärmedurchgangskoeffizient / U-Wert	$[W/(m^2 * K)]$
$R_{si/se}$	Wärmeübergangswiderstände der Oberflächen	$[m^2 * (K/W)]$
$\alpha_{i/a}$	Wärmeübergangskoeffizient innen / außen = $1/R$	$[W/(m^2 * K)]$
h_c	Wärmeübergangskoeffizient basierend auf Konvektion	$[W/(m^2 * K)]$
h_r	Wärmeübergangskoeffizient basierend auf Strahlung	$[W/(m^2 * K)]$
σ_{SB}	Stefan-Boltzmann-Konstante: $5,67 * 10^{-8}$	$[W/(m^2 * K^4)]$
A	Oberfläche	$[m^2]$
θ	Kontaktwinkel	$[^\circ]$
σ	Oberflächenspannung	$[N/m]$
ρ	Dichte der Flüssigkeit	$[kg/m^3]$
g	Erdbeschleunigung: 9,81	$[m/s^2]$
r	Radius der Röhre	$[m]$
A_w	Aufgenommene Wassermenge im Saugversuch	$[kg/m^2]$
T	Absolute Temperatur des abstrahlenden Körpers	$[K]$
p_L	Umgebungsluftdruck - normal 1013 hPa	$[Pa]$
grad p	Gradient des Wasserdampfpartialdruckes	$[Pa]$
δ_L	Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizient in Luft	$[K/Pa]$
s_d	Dampfdiffusionswiderstand	$[m]$
μ	Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	$[-]$
grad w	Gradient des Wassergehalts	$[(kg/m^3)/m]$
g_w	Dichte des Flüssigtransportstromes	$[kg/m^2s]$
$D_{W(w)}$	Flüssigtransportkoeffizient „Weiterleiten“	$[m^2/s]$
$D_{W(s)}$	Flüssigtransportkoeffizient „Saugen“	$[m^2/s]$

Messungen und Simulationen im Vorfeld von Innendämmprojekten
zur Erhöhung der Planungssicherheit

w	Wassergehalt	$[\text{kg}/\text{m}^3]$
w_a	Wasseraufnahmekoeffizient	$[\text{kg}/(\text{m}^2\text{s}^{0.5})]$
w_f	freie Wassersättigung	$[\text{kg}/\text{m}^3]$
R_S	Schlagregen senkrecht zur Gebäudeoberfläche	$[\text{mm}/\text{h}]$
R_N	Normalregen	$[\text{mm}/\text{h}]$
v	Windgeschwindigkeit senkrecht zur Gebäudeoberfläche gemessen in 10 m Höhe	$[\text{m}/\text{s}]$
$r_S = R_2$	Positionsabhängiger Proportionalitätsfaktor	$[\text{s}/\text{m}]$

Liste der untersuchten Gebäude in Luxemburg und Deutschland

Durchgeführte Messungen

Nr	Ort	Bezeichnung	Wärmefluss	Innenklima	Thermografie	Feuchte im Querschnitt	Feuchte punktuell	Wasseraufnahmekoeffizient	Material
1	Bonnevoie (L)	Villa Verlorenkost				X	X	X	X
2	Bitburg (D)	Reihenendhaus Albachstraße			X			X	
3	Luxemburg	Alte Nationalbibliothek	X	X	X	X	X	X	X
4	Saarbrücken (D)	Testgebäude „Außenwandheizung“	X						
5	Diekirch (L)	SNHBM – Rue des Fleurs	X	X	X	X	X	X	
6	Dudelange (L)	ProFamilia, Route de Zoufftgen	X		X		X		
7	Trier (D)	Geb. K, Hochschule Trier	X	X	X	X	X	X	X
8	Luxemburg	Schule LTAM, Limpertsberg					X	X	
9	Luxemburg	Oekozer Paffendall	X	X	X				
10	Petange (L)	EFH - Altbau	X	X			X		
11	Luxemburg	Ancienne Direction – Paul Wurth	X		X	X	X	X	X
12	Rödigen (D)	Bauernhof - renoviert			X				
13	Dudelange (L)	Schulgebäude, Rue du Parc	X	X			X		
14	Kirchberg (L)	SNHBM – neues MFH	X	X	X				
15	Rudersberg (D)	EFH BJ 1962	X	X	X				
16	Syren (L)	Kommunales Gebäude	X						
17	Trierweiler (D)	MFH BJ 1998	X	X	X			X	
18	Wadrill (D)	Arztpraxis „Alte Mühle“	X	X					
19	Luxemburg	Villa Louvigny				X	X		X
20	Luxemburg	Testwände Konferenzraum 5	X	X	X	X	X	X	X

1 Einleitung und angestrebte Ziele

1.1 Hintergrund

Seit rund 40 Jahren existieren Verordnungen über die Energieeffizienz von Gebäuden vorrangig mit dem Ziel, den Verbrauch fossiler Brennstoffe zu reduzieren und den CO₂ Ausstoß zu senken. Mit der Verschärfung der Anforderungen an die Wärmedurchgangskoeffizienten mit der Novelle des „Règlement grand-ducal concernant la performance énergétique des nouveaux bâtiments fonctionnels et d'habitation [1] vom Juni 2021“ gelten in Luxemburg die schärfsten Anforderungen in Europa.

Während für Neubauten schärfste Anforderungen gelten, wird auch die energetische Sanierung von Bestandsbauten reglementiert und mit einem Prämiensystem gefördert, um das ambitionierte Ziel des nationalen Klimaplanes Luxembourgs [2], der Erreichung der Klimaneutralität bis 2050, zu gewährleisten. Für Gebäude, deren Fassade nicht von außen, sondern nur von innen gedämmt werden kann, soll oder darf, wurde in oben genanntem Règlement ebenfalls ein zu erreichender U-Wert von 0,4 W/m²*K vorgegeben. Für von *Sites et monuments*, der nationalen Denkmalschutzbehörde, als Denkmal klassifizierte Gebäude gilt diese Anforderung ebenfalls. Jedoch kann mit Begründung im Rahmen des Bauantrages eine Freistellung beantragt werden.

Da unter Planern und Architekten eine große Unsicherheit bezüglich der sicheren Planung von Innendämmsystemen herrscht, wird häufig der Weg der Freistellung gewählt und die Gebäudehülle nur ertüchtigt und ästhetisch saniert. Energieeinsparpotentiale werden aus Angst vor folgenden Bauschäden durch Feuchtigkeit somit nicht genutzt. Dies führt auf der einen Seite zu höheren Energieverbrauchswerten im späteren Betrieb der Gebäude und auf der anderen Seite aufgrund niedriger Oberflächentemperaturen in der Heizperiode zu schlechterem thermischem Komfort und möglichem Schimmelbefall im Bereich von Wärmebrücken an ungedämmten Bauteilen.

Zwar gibt es im Normenwerk der DIN und in den Merkblättern der WTA Merkblattreihe 6 „harte“ Kriterien, die den Planer unterstützen sollen, jedoch können diese bei historischen Gebäuden häufig nicht ohne vorherige eingehende Untersuchungen beurteilt werden. Vor diesem Hintergrund wurde in einer Kooperation zwischen der *Administration des bâtiments publics Luxembourg (ABP)*, sowie der Universität Luxembourg (UL) analysiert, welche Maßnahmen von Planern und Architekten getroffen werden können, um langfristig sichere Innendämmsysteme zu planen und zu realisieren. Insbesondere vor dem Hintergrund, dass in vielen Projekten der öffentlichen Hand ausreichend Zeit besteht, um umfangreiche Vormessungen in der Winterperiode durchführen zu können und so die lokalen Gegebenheiten und die Ist-Situation im Vorfeld genau zu analysieren.

1.2 Zielstellung

In dieser Arbeit werden die zur Verfügung stehenden Methoden zur Durchführung von bauphysikalischen Voruntersuchung dargestellt und auf ihren Nutzen hin untersucht. Die Ergebnisse aus den Voruntersuchungen werden für Simulationen verwendet und mit in-situ Messungen der

Mauerwerksfeuchte und der Feuchte in der Grenzschrift unterhalb der Innendämmung an Beispielgebäuden in Luxembourg und der Großregion verglichen. Zur verbesserten Parametrierung der zur Verfügung stehenden numerischen Simulationstools werden Materialuntersuchungen durchgeführt und in die Simulation implementiert.

Basierend auf den durchgeführten Untersuchungen wird der Planungsleitfaden des WTA Merkblatts 6-4 um konkrete Handlungsanweisung bezüglich der möglichen Vormessungen ergänzt und die historischen baulichen Gegebenheiten in Luxemburg und der Großregion werden berücksichtigt.

1.3 Aufbau der Arbeit

Im Rahmen dieser Arbeit werden zunächst die bauphysikalischen Grundlagen untersucht und die Besonderheiten der Innendämmung im Vergleich zur weit verbreiteten Außendämmung dargestellt. Dem folgt eine Literaturrecherche mit der Darstellung des aktuellen Wissensstandes sowie dem bisherigen Vorgehen bei Innendämmprojekten. Dies beinhaltet die Nachweisführung gemäß aktueller Normen und eine Einführung in die Softwarefamilie WUFI des Fraunhofer Institutes für Bauphysik.

In Kapitel 3 werden die zur Verfügung stehenden bauphysikalischen Messmethoden präsentiert, mit deren Ergebnissen der Planungsprozess verbessert und die Parametrierung der Softwarelösungen optimiert werden kann. Darauf folgt die Vorstellung eines Feldtestes, der in einem Konferenzraum des Bürogebäudes bei ABP durchgeführt wurde. Hierbei werden vier Innendämmsysteme miteinander verglichen und Langzeitmessungen durchgeführt und mit Simulationsergebnissen verglichen. Der Vergleich erlaubt Rückschlüsse auf die Qualität der gewählten Eingabeparameter.

Im folgenden Kapitel wird ein kritischer Parameter im Kontext der Innendämmung genauer beleuchtet: Die sogenannte Fassadenexposition ist nicht direkt messbar und unterliegt selbst innerhalb einer Gebäudefassade enormen Schwankungen. Da sie großen Einfluss auf die Wasseraufnahme der Fassade von außen haben kann, spielt sie allerdings eine gewichtige Rolle und kann über den Erfolg eines Innendämmprojektes insbesondere bei Gebäuden mit Natursteinfassade entscheiden.

Im fünften Kapitel wird eine exemplarische Planung eines Innendämmsystems an einem Beispielgebäude dargestellt. Grundlage des Planungsprozesses ist ein parallel zu dieser Arbeit veröffentlichter praktischer Planungsleitfaden.

Im vorletzten Kapitel sechs wird die Vorgehensweise zur Erreichung einer optimierten Innendämmung dargestellt. Es werden die Parameter Raumverlust, Kosten (Fläche, Material, Installation), Energieeinsparung, graue Energie und thermischer Komfort behandelt, um dem Ziel der optimalen Dämmstärke näher zu kommen.

Dem folgt eine Schlussfolgerung mit Empfehlungen und ein Ausblick über weitere Forschungslücken.

2 Grundlagen

2.1 Innendämmung – ein hygrothermischer Sonderfall

Architekten und Ingenieure bringen die Innendämmung bestehender Wandkonstruktionen häufig mit Schimmelproblemen und Bauschäden in Verbindung. Dies liegt begründet im Wissen über die Verschiebung des sogenannten Taupunktes in das Mauerwerk. Diese Annahme wird durch die Vereinfachungen gestützt, die im Rahmen des Glaserverfahrens zum Feuchteschutznachweis der DIN 4108-3 [3] verwendet werden.

Neben oben genannter, zum Teil unbegründeter Angst, bestehen zwei weitere Risiken gegenüber monolithischer oder von außen gedämmten Mauern: Durch die innenliegende Dämmschicht, kühlt die Bestandskonstruktion in der Heizperiode stärker aus, da der Wärmefluss von innen reduziert wird. In Folge dessen, reduziert sich das Trocknungspotential des Mauerwerkes nach Regenereignissen. Das heißt aufgesaugtes Wasser kann in der Frostperiode zu Schäden führen. Ein weiteres Risiko entsteht durch die Fehleinschätzung von Wärmebrücken an in der Außenwand eingebundenen massiven Bauteilen. Bei nicht korrekter Dimensionierung von Dämmkeilen kann es hier zu Schimmelpilzbildung auf den Oberflächen der kalten Bauteile kommen.

Folgende Abbildung zeigt schematisch den Temperaturverlauf in monolithischen, innen gedämmten und außen gedämmten Mauerwerkskonstruktion. Aufgrund nicht stationärer Bedingungen weichen reale Temperaturverläufe vom Schema ab.

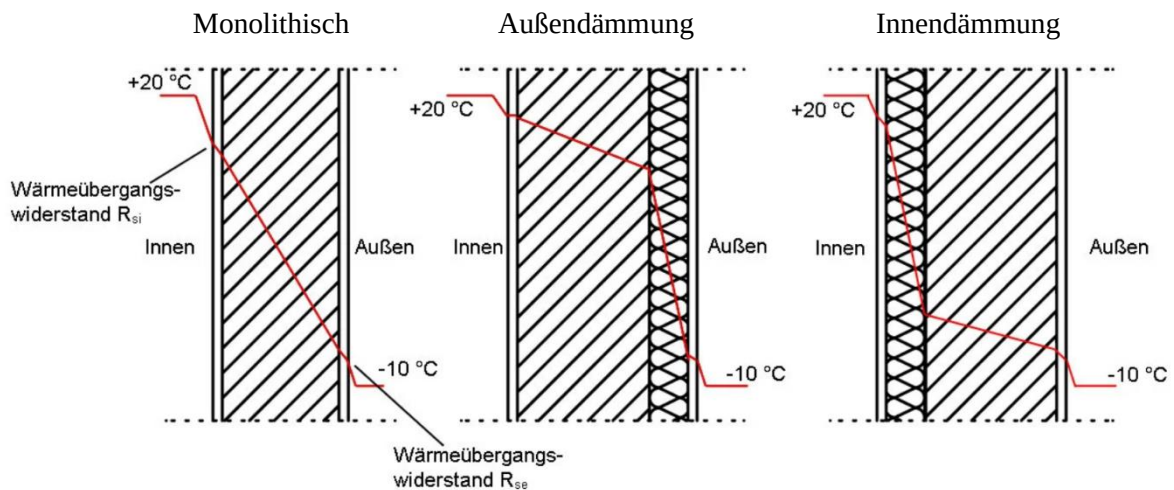


Abbildung 1: Qualitativer Temperaturverlauf in unterschiedlichen Mauerwerkskonstruktionen in der Heizperiode [4]

Es ist deutlich erkennbar, dass das tragende Bestandsmauerwerk in der Heizperiode durch die innenliegende Dämmschicht deutlich abkühlt. Bei länger anhaltenden Kälteperioden, ist es möglich, dass sich unter der Innendämmschicht, Temperaturen um den Gefrierpunkt einstellen.

2.2 Wärme- und Feuchtetransportmechanismen

Um die in der Vergangenheit teilweise aufgetretenen Probleme verstehen und in der Zukunft vermeiden zu können, müssen die Wärme- und Feuchtetransportmechanismen analysiert und berücksichtigt werden.

Tabelle 1: Zusammenstellung der in der Praxis vorkommenden Transportmechanismen nach Künzel [5], ergänzt um Beispiele

	Transportmechanismus	Ursache	Beispiel
Wärmetransport	Wärmeleitung	Temperatur	Winter: Innen / Außen
	Wärmestrahlung	Temperatur (4. Potenz)	Oberflächen mit unterschiedlicher T
	Luftströmung	Druck und Dichte	Wind
	Enthalpieströme durch Feuchtbewegung	Phasenwechsel im Medium	Kondensation an kalten Oberflächen
Wasser-dampftransport	Gasdiffusion	Wasserdampf-partialdruck	Feuchtebedingungen Innen / Außen
	Molekulartransport		Dampfbremsfolien
	Lösungsdiffusion		Anwendungen in der Chemie
	Konvektion	Druckgefälle	Hinterlüftung
Wasserflüssig-transport	Kapillarleitung	Porendrucke	Saugvorgänge
	Oberflächendiffusion	Luftfeuchte	Oberflächentrocknung
	Sickerströmungen	Gravitation	Drückendes Wasser im Sockelbereich
	Hydraulische Strömungen	Hydraulischer Druck	
	Elektrokinese	Elektrische Felder	Nur durch Spannungsinduzierung
	Osmose	Ionenkonzentration	Salze im Sockelbereich

Im Folgenden werden die im Kontext der Innendämmung relevanten Mechanismen erläutert. Prinzipiell wird der Feuchtetransport zwischen Dampf- und Flüssigtransport unterschieden.

2.2.1 Wärmetransport im Bauteil

2.2.1.1 Wärmeleitung

Um Temperaturverläufe im Mauerwerk annäherungsweise berechnen zu können, ist das Wissen über verschiedene Materialparameter von Bedeutung. Der Wärmedurchgangswiderstand R einer Schicht berechnet sich dabei wie folgt:

$$R = \frac{d}{\lambda} \quad (1)$$

Wobei:

λ	Wärmeleitfähigkeit	$\left[\frac{W}{m \cdot K}\right]$
d	Dicke des Materials	$[m]$
R	Wärmedurchgangswiderstand	$\left[\frac{m^2 \cdot K}{W}\right]$

Der Kehrwert der Summe aller Schichtwiderstände sowie der äußere und innere Wärmeübergangswiderstand ist der Wärmedurchgangskoeffizient, in der Bauphysik auch als U -Wert, in der Industrie und früher als k -Wert bezeichnet.

$$U = \frac{1}{R_{si} + R_1 + R_2 + R_3 + R_n + R_{se}} \quad (2)$$

Wobei:

U	Wärmedurchgangskoeffizient	$\left[\frac{W}{m^2 \cdot K}\right]$
R_n	Wärmedurchgangswiderstand der n -ten Schicht	$\left[\frac{m^2 \cdot K}{W}\right]$
$R_{si/se}$	Wärmeübergangswiderstände - Oberflächen innen und außen	$\left[\frac{m^2 \cdot K}{W}\right]$

Bei den Wärmeübergangswiderständen auf der Innen- und Außenoberfläche handelt es sich um in der DIN EN ISO 6946:2018-03 [6] festgelegte Werte, die ursprünglich für die Heizlastberechnung bestimmt wurden. Reale Messungen von Hoos et al. [7] zeigen den dynamischen Einfluss von Strahlung und Windgeschwindigkeit auf der Außenseite sowie konvektive Effekte auf der Innenseite. Dabei variieren die äußeren, gemessenen Wärmeübergangswiderstände zwischen 0,00 und 0,50 $m^2 \cdot K/W$ während der 12 Tage Mittelwert bei 0,25 $m^2 \cdot K/W$ lag und somit deutlich über dem Standardwert von 0,04 $m^2 \cdot K/W$. Auch innen wird 0,13 $m^2 \cdot K/W$ verwendet, was eher niedrig ist und nur in ungünstigen Fällen zu den Messwerten passt. Insbesondere im Bereich von Ecken und Kanten, wo die Konvektion reduziert ist, liegt der raumseitige Wärmeübergangswiderstand häufig höher, wodurch sich in der Heizperiode niedrigere Temperaturen einstellen können und das Schimmelwachstumsrisiko steigt.

2.2.1.2 Wärmestrahlung

Wärmestrahlung wird von allen Festkörpern, Flüssigkeiten und Gasen emittiert, deren Temperatur sich oberhalb des absoluten Nullpunktes befindet. Die Sonne ist die bekannteste Strahlungsquelle, ohne die ein Leben auf der Erde undenkbar wäre.

Strahlungsgewinne und -verluste (z.B. gegenüber dem kalten Nachthimmel) sind im Rahmen der U-Wert Berechnung nach EN ISO 6946, Anhang A bereits näherungsweise in den Oberflächenübergangswiderstand (R_{se}) integriert. Die nachfolgenden Formeln gelten für parallele Oberflächen. Bei nicht parallelen Oberflächen sind die sogenannten Sichtfaktoren zu berücksichtigen.

$$R_s = \frac{1}{h_c + h_r} \quad (3)$$

Wobei:

h_c	Wärmeübergangskoeffizient basierend auf Konvektion [W/m ² *K]
h_r	Wärmeübergangskoeffizient basierend auf Strahlung [W/m ² *K]

Für die meisten Anwendungen der Bauphysik reicht diese Vereinfachung aus. Für detaillierte Strahlungsbilanzen bietet das Stefan-Boltzmann Gesetz die Grundlagen:

$$\dot{Q} = \epsilon * \sigma_{SB} * A * T^4 \quad (4)$$

Wobei:

$\dot{Q}$	Wärmestrom bzw. Strahlungsleistung
ϵ	Emissionsgrad - die Werte liegen zwischen 0 (perfekter Spiegel) und 1 (idealer Schwarzer Körper).
σ_{SB}	Stefan-Boltzmann-Konstante: $5,67 * 10^{-8} \left[\frac{W}{m^2 * K^4} \right]$
A	Oberfläche des abstrahlenden Körpers
T	Temperatur des abstrahlenden Körpers

Numerische Simulationstools für den gekoppelten Wärme- und Feuchtetransport erlauben eine explizite Strahlungsbilanz. Hierfür sind allerdings detaillierte Klimadaten mit Messwerten der tatsächlichen Einstrahlung, der atmosphärischen Gegenstrahlung sowie die Kenntnis der Einstrahlungsfaktoren (view-factors) notwendig, wodurch sich die Berechnung deutlich verkompliziert.

2.2.2 Dampf- und Flüssigtransport im Bauteil

Neben dem Wärmetransport spielt der Feuchtetransport im Bauteil im Kontext der Innendämmung eine wichtige Rolle. Folgende theoretische Grundlagen gelten prinzipiell für poröse Baustoffe und in gewissen Grenzen auch für faserhaltige Materialien wie Holzfaserdämmplatten. Insbesondere die kapillare Leitung flüssigen Wassers sowie die Wasserdampfdiffusion dominieren dabei die Transportvorgänge.

Im Bereich der Gebäudesockel können auch hydraulische und Sickerströmungen sowie osmotische Vorgänge eine Rolle spielen. Diese treten im Besonderen bei intensivem Streusalzeinsatz in Erscheinung.

2.2.2.1 Feuchtequellen

Praktisch alle Gebäude sind durch Ihre Nutzung sowie durch äußere klimatische Bedingungen einer ständigen Feuchtelast ausgesetzt.

Insbesondere bei starken Regenereignissen können durch Risse und Undichtigkeiten in der Fassade große Mengen Wasser in das Mauerwerk eindringen.

Im Sockel und Kellerbereich spielt die Abdichtung und der Schutz vor Salzen eine entscheidende Rolle für die Funktion des Feuchteschutzes. Sickerströmungen und drückende Feuchtigkeit von außen können eine Innendämmung in diesen Bereichen ebenfalls unmöglich machen.

Die Feuchtelast durch die Nutzung ist besonders zu untersuchen, da sie sich kurzfristig durch Umnutzung stark verändern kann. Die anfallende Feuchte kann sich in der Heizperiode an kalten Außenbauteilen niederschlagen und zu Bauschäden führen. Insbesondere das Schimmelwachstum spielt hier eine große Rolle.

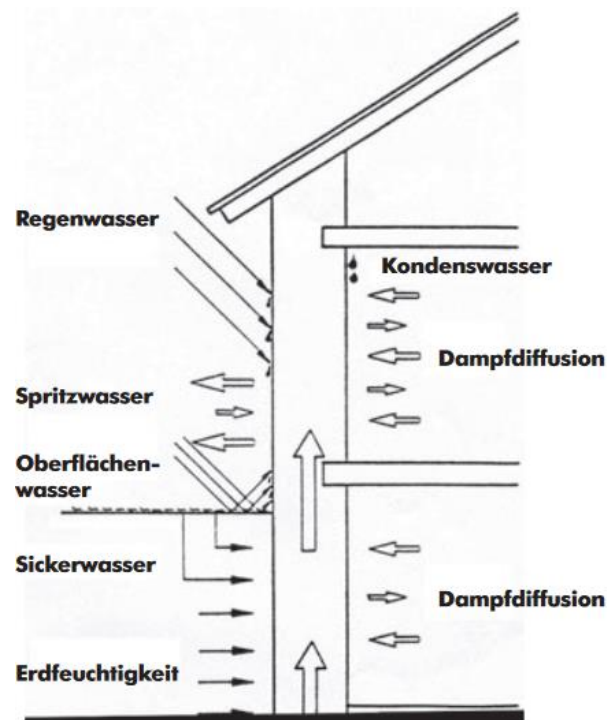


Abbildung 2: Feuchtequellen im Gebäude [7]

Bauteile die Sickerwasser- oder der Erdfeuchtigkeit ausgesetzt sind, sollten auf Ihre Feuchtebelastung vom berührenden Erdreich aus untersucht werden.

Im Planungsprozess einer Innendämmung sind alle oben genannten Feuchtequellen im Einzelfall zu bewerten und zu berücksichtigen.

2.2.2.2 Feuchtespeicherung in porösen Baustoffen

Die Mehrheit der üblicherweise verwendeten Baustoffe besitzt eine poröse Struktur. Diese Luftvolumina füllen sich durch oben genannte Feuchtetransportvorgänge in Abhängigkeit der Umgebungsfeuchte.

Der Wassergehalt kann als Masse des Wassers bezogen auf die Masse des Baustoffes oder auf dessen Volumen angegeben werden.

Volumenbezogener Feuchtegehalt $w = \frac{\text{Masse des Wassers}}{\text{Volumen des Baustoffs}} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \quad (5)$

Massebezogener Feuchtegehalt $u = \frac{\text{Masse des Wassers}}{\text{Masse des trockenen Baustoffs}} \left[\frac{\text{kg}}{\text{kg}} \right] \quad (6)$

Ein weiteres Kriterium bei der Funktionsbeurteilung stellt der Sättigungsgrad bzw. normierte Wassergehalt dar:

$$\text{Sättigungsgrad} = \frac{\text{Wassergehalt}}{\text{Wassergehalt bei freier Sättigung}} [-] \quad (7)$$

Diese Koeffizienten werden dazu verwendet, um materialspezifische Grenzwerte zu definieren (siehe Kap. 2.3.1.3 WTA Merkblätter).

Um den Verlauf der Feuchtigkeit in Abhängigkeit der Umgebungsfeuchte darzustellen, wurde in der Vergangenheit die sogenannte Feuchtespeicherfunktion, auch Sorptionsisotherme genannt, eingeführt. Diese wird in drei Bereiche unterteilt, wobei $T = \text{konstant}$ angenommen wird:

- Sorptionsfeuchte
- Kapillarpwasserbereich bis zur freien Sättigung (miteinander verbundene Poren sind gefüllt)
- Übersättigungsbereich (alle Poren werden z.B. durch Eintauchen in Wasser gefüllt)

Die X-Achse der folgenden Abbildung 3 zeigt die relative Luftfeuchte in den Poren des jeweiligen Baustoffs. Die Y-Achse gibt den zugehörigen Wassergehalt, in der Regel als $[\text{kg}/\text{m}^3]$ an.

Bei den üblicherweise verwendeten Baustoffen handelt es sich um hygroskopische, poröse Materialien. Im Kapillarporenmodell, welches zur Beschreibung der auftretenden Transporteffekte verwendet wird, wird von einer gleichmäßigen Porengrößenverteilung ausgegangen. Es wird ebenfalls angenommen, dass alle Poren miteinander verbunden sind und keine „Sackgassen“ existieren.

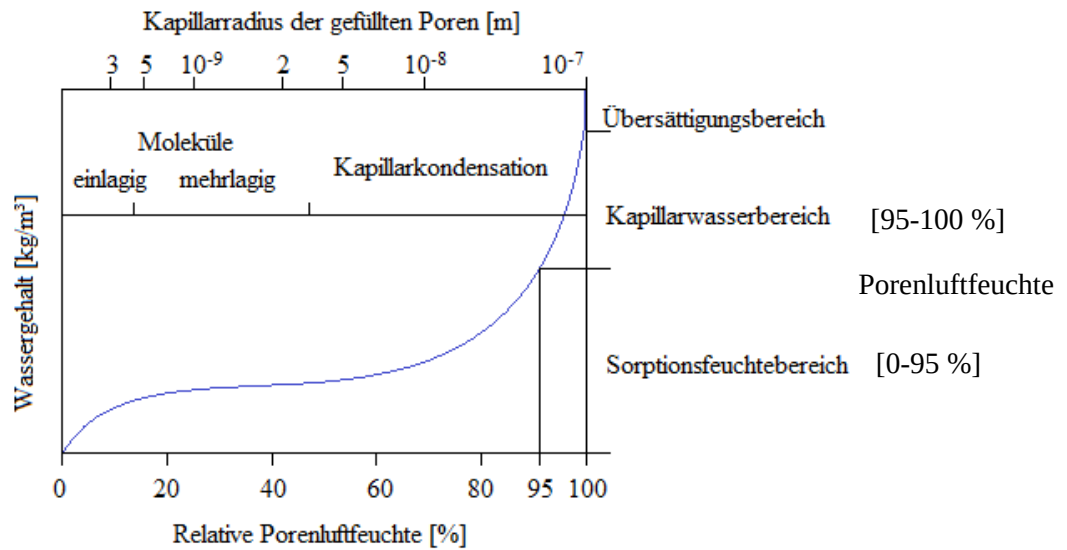


Abbildung 3: Schematische Feuchtespeicherfunktion eines porösen Baustoffs bei konstanter Temperatur.

Da die Saugspannung bzw. die freie Steighöhe, mit dem Porendurchmesser abnimmt, kann theoretisch jedem Feuchtegehalt jeweils eine maximale Porengröße, die noch mit Wasser gefüllt ist, zugeordnet werden [8]. Dies bedeutet, dass die Kapillaren mit dem geringeren Durchmesser die größeren Nachbarkapillaren leersaugen.

Für die Bewertung der kapillaren Eigenschaften eines Baustoffs folgt man dem Modell einer zylindrischen Pore. In Abbildung 4 ist die Ausbildung des Meniskus in einer Pore mit Darstellung des Kontaktwinkels θ zu sehen.

Dabei herrscht die Vorstellung, dass ein poröser Baustoff aus einem Netz großer und kleiner Poren besteht. Da in den kleinen Poren eine größere Saugspannung herrscht, geht man davon aus, dass diese die großen Poren zuerst bis zur eigenen Füllung leeren.

Die theoretische Steighöhe h einer Flüssigkeitssäule im idealen Zylinder ist gegeben durch [9]:

$$h = \frac{2 \cdot \sigma \cdot \cos \theta}{\rho \cdot g \cdot r} \quad (8)$$

Wobei:

θ	Kontaktwinkel	[°]
σ	Oberflächenspannung	[N/m]
ρ	Dichte der Flüssigkeit	[kg/m³]
g	Erdbeschleunigung: 9,81	[m/s²]
r	Radius der Röhre	[m]

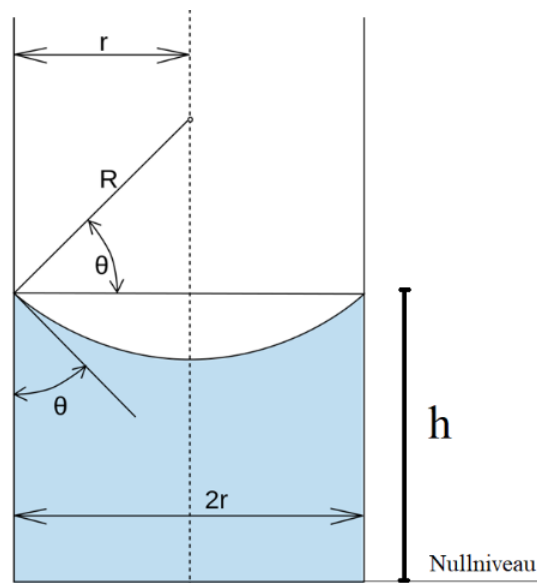


Abbildung 4: Meniskusbildung von Wasser in einer Kapillare

Da sich der Radius der Kapillare im Nenner befindet, ist es leicht verständlich, dass die Steighöhe bzw. der kapillare Unterdruck mit einer Reduktion des Porendurchmessers steigen.

Da es sich bei porösen Baustoffen nicht um ideale, zylindrische Poren handelt, ist dieses Modell nur eine grobe Näherung. In der Realität existieren diverse Einschränkungen:

- Es existiert kein perfektes Netz, sondern viele in sich geschlossene Systeme.
- Der Porendurchmesser variiert stark.
- Die Porenoberfläche wird durch die Molekülstruktur dominiert, wodurch sich keine Menisken ausbilden können.

Sorptionsfeuchtebereich (0-95%)

Vom Sorptionsfeuchte- oder hygroskopischen Bereich wird bei einer relativen Porenluftfeuchte zwischen 0 und 95% gesprochen. Die Wasseraufnahme und –abgabe findet auf Porenebene überwiegend durch Sorptionsprozesse bei Kontakt des Baustoffes mit der Umgebungsluft bis zum Erreichen von Gleichgewichtszuständen statt. Dabei handelt es sich um das Anhaften bzw. Lösen von den inneren Oberflächen und den Übergang in die Gasphase. Der Einfluss der Lufttemperatur ist für bauphysikalische Betrachtungen zwischen 5 und 70 °C vernachlässigbar gering [5]. In der Bauphysik sind stets Zustände im Sorptionsfeuchtebereich anzustreben. Im Bestfall liegen alle Feuchtwerte < 80 % relativer Porenluftfeuchte. Hier befinden wir uns im „flachen“ Bereich der Sorptionsisotherme und es findet keine nennenswerte Feuchteanreicherung im Bauteil statt. Auch Schimmelpilze haben unter diesen Umständen, wenig bis keine Chance zu wachsen.

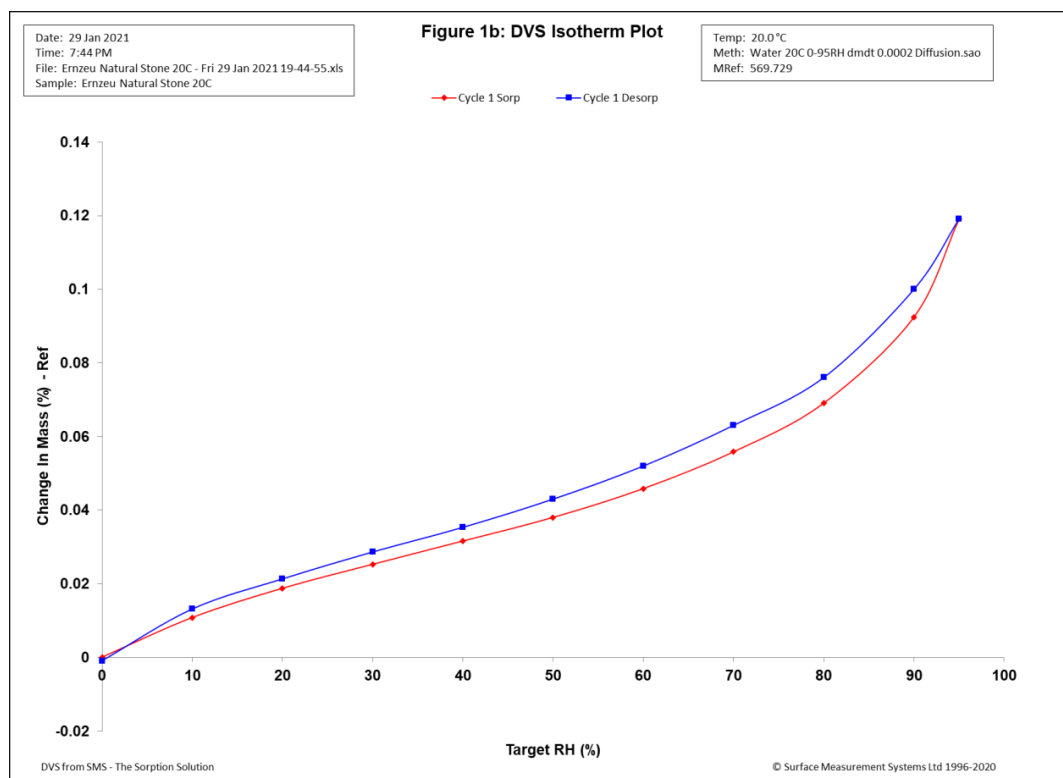


Abbildung 5: Die Sorptionsisotherme des Ernzener (LU) Natursteins

Die obige Abbildung zeigt exemplarisch die mit einem Diffusion Vapour System der Firma *Surface Measurement Systems* aus Großbritannien gemessene Sorptionsisotherme des Ernzener Natursteins. Für die Verwendung der Sorptionsisotherme in numerischen Simulationsprogrammen wird der Mittelwert aus Sorptions- und Desorptionsisotherme gebildet. In der Regel ist die Hysterese zwischen beiden Kurven gering, wie auch im vorliegenden Fall. Als Ursache hierfür wird angenommen, dass es bei der Desorption zu einer zum Teil verzögerten Feuchteabgabe in Abhängigkeit der Porendurchmesser kommt.

Kapillarwasserbereich (95-100%)

Im Kapillarwasserbereich (also Porenluftfeuchte $> 95\%$) kommt es zur verstärkten Tröpfchenbildung in den Kapillaren des Baustoffs und die kapillare Leitung überwiegt die Diffusion hinsichtlich der Feuchtetransportkapazität. Der Bereich reicht bis zur freien Sättigung (Porenluftfeuchte = 1), die nur durch das Saugverhalten des jeweiligen Baustoffs erreicht werden kann. Im Kontext der Innendämmung spielt dieser Bereich insbesondere im Bereich des äußeren Putzes eine Rolle.

Die unterschiedlichen Feuchtetransportmechanismen können zwar näherungsweise durch einen Feuchtetransportkoeffizienten dargestellt, aber nicht messtechnisch erfasst werden. Folgende Abbildung verdeutlicht qualitativ das parallele existieren von Dampf- und Flüssigtransport.

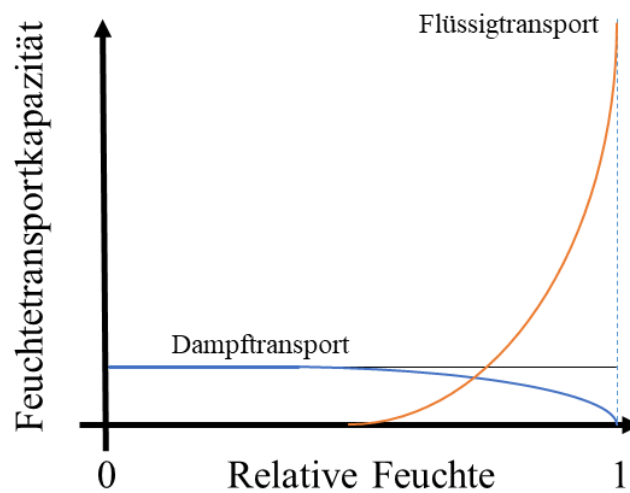


Abbildung 6: Qualitativer Zusammenhang der Feuchtetransportkomponenten flüssig / gasförmig.

Freie Sättigung und Übersättigungsbereich ($>100\%$)

Bei der freien Sättigung handelt es sich um die Grenze zwischen Kapillarwasserbereich und Übersättigungsbereich. Während das Wasser im Kapillarwasserbereich in den Poren gebunden ist, existiert ungebundenes Tauwasser erst, sobald der Wert der freien Sättigung überschritten ist. Ungebundenes Wasser füllt in einem Baustoff auch die Poren, die aufgrund ihrer Geometrie nicht zum Flüssigtransport beitragen (z.B. Sackporen). Dieses Wasser verlässt die Probe nach dem Eintauchen in ein Wasserbecken innerhalb kurzer Zeit wieder, sobald diese aus dem Wasserbad gezogen wird.

Auf der Kurve der Feuchtespeicherfunktion, ist die Obergrenze des Kapillarwasserbereiches, die freie Sättigung mit der relativen Feuchte = 1 definiert. Zwischen der freien Sättigung und der maximalen Sättigung, der Obergrenze des Übersättigungsbereiches, steigt die Funktion theoretisch

unendlich steil an. Häufig wird der Wert der maximalen Sättigung mit einer relativen Feuchte von 1,01 angegeben.

Der Übersättigungsbereich spielt für die Betrachtungen in der Bauphysik nur eine untergeordnete Rolle, da der Zustand der Übersättigung nur mit künstlichen Maßnahmen, wie dem Eintauchen einer Probe in ein Wasserbad, erzeugt werden kann.

Bei der Übersättigung kommt es zu einer Sättigung aller Poren, auch derer, die nicht am Kapillartransport beteiligt sind.

Bei hydrophoben Dämmstoffen, bei denen sich selbst bei einer Umgebungsfeuchte von 100% in den Poren kein Wasser bildet, entspricht die freie Wassersättigung der Sättigungsdampfkonzentration [5]. Die freie Wassersättigung ist auch hier mit der vollständigen Füllung aller Poren erreicht.

Folgende Abbildungen aus der Datenbank der Software *WUFI Pro* zeigen exemplarisch, wie unterschiedlich die Feuchtespeicherfunktionen zwei für Innendämmung geeigneter Materialien sein können. Die absolute Wasseraufnahme des kernhydrophobierten Dämmstoffs (unten) ist im Vergleich zum porösen und kapillaraktiven Dämmstoff (oben) sehr gering.

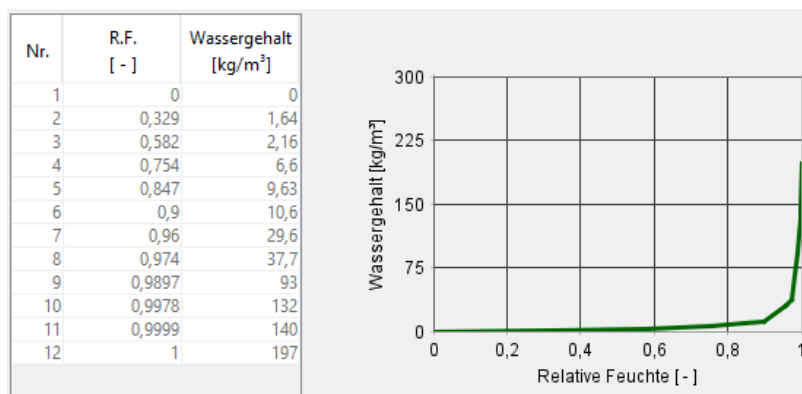


Abbildung 7: Feuchtespeicherfunktion eines kapillaraktiven Dämmstoffs (Multipor)

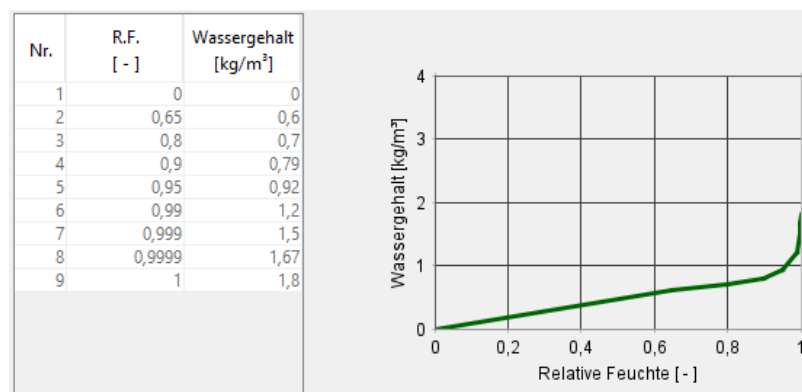


Abbildung 8: Feuchtespeicherfunktion eines hydrophoben Dämmstoffs (Calostat)

2.2.2.3 Wasserdampfdiffusion

Die sogenannte Wasserdampfdiffusion ist der im Normalbetrieb eines Gebäudes dominierende Transportvorgang im Mauerwerk. Sie wird durch Konzentrationsunterschiede des Wasserdampfes in den Bauteilschichten sowie der Innen- und Außenluft angetrieben. Vereinfacht handelt es sich um einen Ausgleich zwischen den Wasserdampfpartialdrücken. Beschrieben wird dieser Effekt durch die kinetische Gastheorie.

Im Baustoff kommt es in Abhängigkeit des Porendurchmessers zu Effusion nach Knudsen (kleine Poren $< 5 \cdot 10^{-9} \text{ m} = 0,005 \text{ }\mu\text{m}$) sowie zu Diffusion wie in der Umgebungsluft entsprechend dem Fick'schen Gesetz in großen Poren $> 10^{-6} \text{ m} = 1 \text{ }\mu\text{m}$). Im Zwischenbereich kommen beide Effekte parallel vor.

Das Fick'sche Gesetz besagt, dass die Diffusionsstrom- oder Teilchenstromdichte proportional zum Konzentrationsgradienten des Druckes ist. Die Effusion nach Knudsen folgt ebenfalls dem Konzentrationsgefälle des Wasserdampfes, allerdings ist die mittlere freie Weglänge der Moleküle größer als der Porendurchmesser, wodurch der Transport durch die Molekülkollisionen mit der Porenwand bestimmt wird [10]. Die Abhängigkeit des Diffusionskoeffizienten von der Temperatur und die Druckunabhängigkeit sind weitere Unterschiede.

Um beide Diffusionseffekte zusammenfassen zu können, wurde die baustoffabhängige Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ eingeführt. Dies ist ein Faktor und vergleicht die ungestörte Diffusion in Luft mit der Diffusion im Baustoff. Daraus ergibt sich folgender Zusammenhang für den Dampfdiffusionsstrom:

$$g_v = -\frac{\delta}{\mu} * \text{grad } p \quad (9)$$

Wobei:

g_v	Dampfdiffusionsstromdichte [$\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$]
μ	Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl [-] aus Tabellen z.B. DIN 12572
δ	Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizient in Luft
grad p	Gradient des Wasserdampfpartialdruckes

Der Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizient in Luft berechnet sich gemäß DIN EN ISO 12572 aus dem Jahr 2017 wie folgt:

$$\delta_L = 2,0 * 10^{-7} * T^{0,81} / P_L \quad (10)$$

Wobei:

T	absolute Umgebungstemperatur [K]
P_L	Umgebungsluftdruck [Pa] - normal 101.300 Pa

Zur Bewertung einer Bauteilschicht hinsichtlich ihrer Diffusionseigenschaften wird die Dicke der Schicht mit dem gemessenen oder aus Tabellen ermittelten μ Wert multipliziert.

$$s_d = \mu * d \quad (11)$$

Wobei:

s_d	Dampfdiffusionswiderstand / äquivalente Luftschichtdicke [m]
μ	Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl [-]
d	Bauteildicke [m]

Die DIN 4108-3 teilt Konstruktionen anhand ihres Diffusionswiderstandes in folgende Kategorien ein:

	s_d	$\leq 0,5 \text{ m}$	diffusionsoffen
$0,5 \text{ m} \leq$	s_d	$\leq 10 \text{ m}$	diffusionsbremsend
$10 \text{ m} \leq$	s_d	$\leq 100 \text{ m}$	diffusionshemmend
$100 \text{ m} \leq$	s_d	$\leq 1500 \text{ m}$	diffusionssperrend
	s_d	$\geq 1500 \text{ m}$	diffusionsdicht

Folgende Abbildung zeigt beispielhaft den Einfluss des Diffusionswiderstandes s_d auf den Feuchtedurchgang $[\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{Tag}]$ für einen realistischen Winter- bzw. Sommerfall durch eine Innendämmschicht. Bereits ab einem Diffusionswiderstand von 2 m nimmt das diffusionsgetriebene Trocknungspotential im Sommer deutlich ab. Ebenfalls gut nachzuvollziehen ist, dass ab 1 m Diffusionswiderstand auch der Feuchteintrag durch die Innendämmung in Richtung des Mauerwerkes deutlich abnimmt.

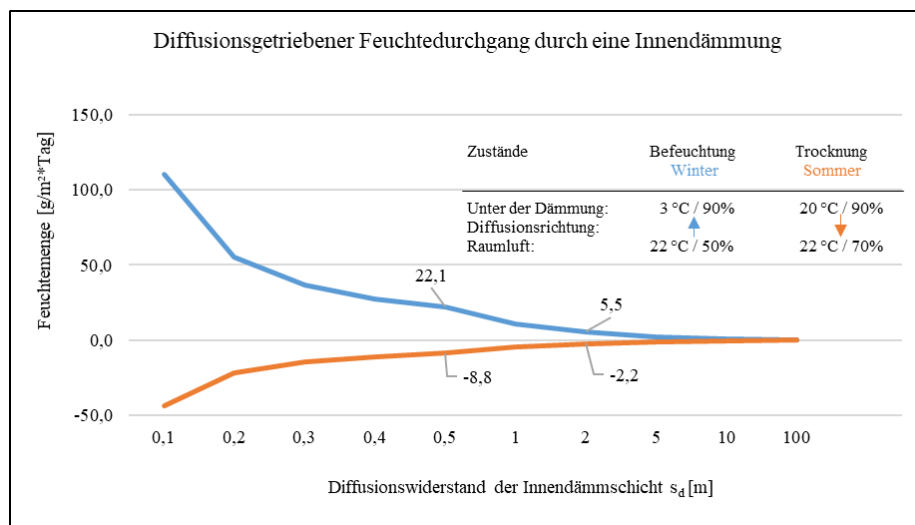


Abbildung 9: Einfluss des Diffusionswiderstandes einer Innendämmschicht auf den diffusionsgetriebenen Feuchtetransport durch die Dämmschicht anhand zweier Beispieltage.

Die für die Abbildung 9 verwendeten hygrothermischen Bedingungen unter der Dämmebene (3 °C, 90% r.F.) und auf der Raumseite (22 °C, 50% r.F.) sind für einen kalten Wintertag im Januar im Wohnbereich mit einer Dämmstärke von 8 cm (WLG 040) üblich und können als repräsentativ angenommen werden. Bei höheren Dämmstärken können auch niedrigere Temperaturen bis in den Minusbereich im Mauerwerk auftreten.

Bei der Einschätzung ist allerdings auch zu berücksichtigen, dass zwar der thermische Widerstand R und der Diffusionswiderstand s_d mit steigender Dicke proportional steigen – der U-Wert allerdings nicht linear sinkt. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass eine Innendämmung auf einer ungestörten Wand, die bei geringer Dämmstärke einen Minstdiffusionswiderstand von 1 m erreicht, zumindest aus Diffusionssicht problemlos dicker ausgeführt werden kann, wenn der Diffusionswiderstand mit der Dämmstärke entsprechend steigt. Der Schlagregenschutz ist hier separat zu betrachten.

Stelzmann und Worch kommen in Ihren Untersuchungen zu Innendämmungen mit teils > 20 cm Dämmstärke zu ähnlichen Ergebnissen [11].

Für Innendämmkonstruktionen ist daher eine von der DIN 4108-3 abweichende Einteilung zu empfehlen:

$s_d \leq 0,5 \text{ m}$	diffusionsoffene Innendämmung
$0,5 \text{ m} \leq s_d \leq 2 \text{ m}$	diffusionshemmende Innendämmung
$s_d \geq 2 \text{ m}$	diffusionsbremsende Innendämmung

Während eine gewisse Rücktrocknungsfähigkeit bei diffusionsoffener Innendämmung ebenfalls gegeben ist, nimmt diese bei einem Diffusionswiderstand der Innendämmkonstruktion in diesem Beispiel von 2 m um 75% gegenüber der Rücktrocknungskapazität bei $s_d = 0,5 \text{ m}$ ab. Bei einem Diffusionswiderstand größer 2 m ist keine nennenswerte Abtrocknung mehr möglich. Ebenso verhält es sich in umgekehrter Richtung im Winterfall.

Daraus folgt, dass bei nicht korrekt verklebten Stößen oder ungewollten Durchdringungen von Dampfbremssfolien oder sogar Dampfsperren die Rücktrocknung nahezu unmöglich ist und es so zu Schäden kommen kann. Sofern die Feuchtelast aus dem Innenraum es zulässt, sollte daher stets eine diffusionsoffener Bauweise bevorzugt werden. Sollte eine Folienkonstruktion aufgrund besonders hoher Feuchtelast im Innenraum oder konstruktionsbedingt notwendig sein, sind immer adaptive Diffusionsbremsfolien den diffusionssperrenden Folien gegenüber zu bevorzugen.

Bei einer feuchteadaptiven Dampfbremse handelt es sich meist um eine Folie aus Polyamid die ihren Diffusionswiderstand auf die sie umgebende relative Luftfeuchte einstellt. Durch ihren variablen Diffusionswiderstand sorgt sie dafür, dass feucht gewordene, gedämmte Konstruktionen wieder austrocknen können. Gleichzeitig kann sie als Luftdichte Schicht dienen. Bei hoher Umgebungfeuchte reduziert sich deren Diffusionswiderstand (z.B. $s_d = 5$ bei 50 % r.F. bis 0,2 m bei 95 % r.F.) während er bei niedrigerer Umgebungfeuchte steigt.

2.2.2.4 Oberflächendiffusion und kapillare Leitung

Während es sich bei der Wasserdampfdiffusion um gasförmigen Feuchtetransport handelt, spricht man bei der Oberflächendiffusion und der kapillaren Leitung von Flüssigtransport. Daher werden diese beiden Effekte ähnlich wie die Knudsen Effusion und die Fick'sche Diffusion gemeinsam betrachtet.

Während die Oberflächendiffusion zwischen 30 und 50% einsetzt, tritt die kapillare Leitung mit steigendem Sorbatfilm in der Pore auf. Ab 95%, der Erreichung des Kapillarwasserbereichs, dominiert die kapillare Leitung in den Poren. Der Antrieb für den flüssigen Wassertransport ist der Gradient des flüssigen Wassers nach Gleichung 5, während die Diffusion von der Konzentration bzw. dem Partialdruck des Wasserdampfes getrieben wird.

Krus [10] hat 1995 in seiner Dissertation folgende Abbildung 10 zur Verdeutlichung der Effekte Oberflächendiffusion und Diffusion vorgestellt. Die obere Abbildung zeigt den isothermen Fall, bei dem beide Transporteffekte in die gleiche Richtung wirken. In der Praxis tritt dies zum Beispiel nach einem Regenereignis mit Benetzung der Fassade bei der Weiterverteilung der Feuchtigkeit in das Mauerwerk auf. Die untere Pore zeigt den Zustand mit entgegen gesetzten Strömungen – dies kann in porösen Innendämmsystemen in der Heizperiode der Fall sein. Dabei kondensiert die Feuchte aus dem Diffusionseintrag in den Poren und wird über Oberflächendiffusion sowie in Ausnahmefällen bei besonders hohen Feuchtwerten auch durch kapillare Leitung zurückgeleitet. Treibende Kräfte sind bei der Oberflächendiffusion Konzentrationsunterschiede im Wassergehalt und bei der kapillaren Leitung der Krümmungsdruck der Wasseroberfläche in der Pore.

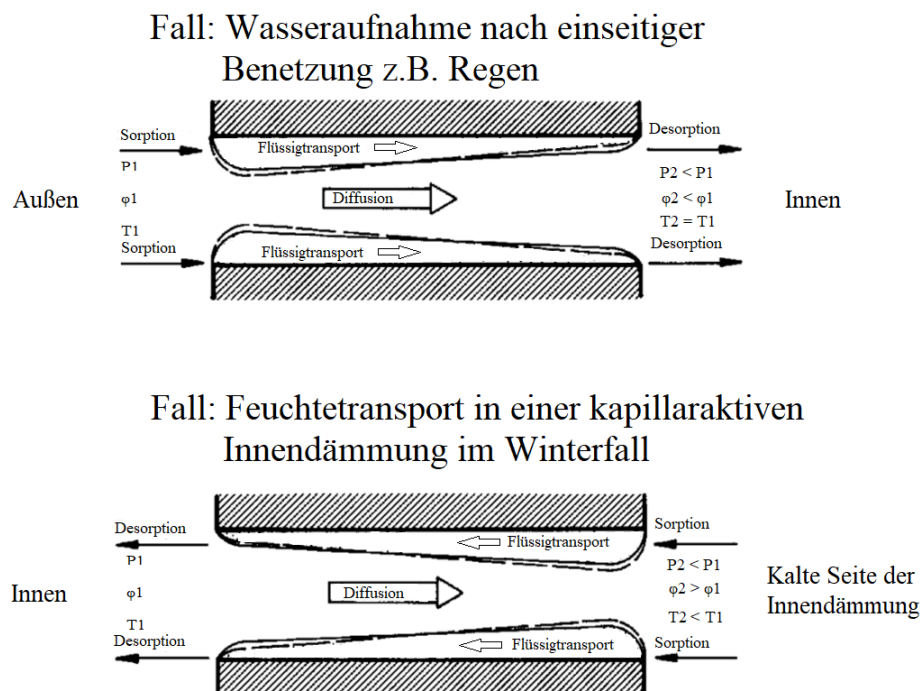


Abbildung 10: Kombiniertes Dampf- und Flüssigtransport in einer Baustoffpore [10]

Da beide Flüssigtransporteffekte parallel und in Abhängigkeit der relativen Porenluftfeuchte unterschiedlich intensiv stattfinden, ist es sinnvoll, sie gemeinsam zu bewerten. Die exakte mathematische Beschreibung der Kapillarleitung als Einzeleffekt ist praktisch unmöglich, da sich die realen Baustoffporen hinsichtlich Geometrie, Ausdehnung / Querschnitt und Oberflächenstruktur als zu komplex und imperfekt erweisen.

Um Flüssigtransporte trotzdem quantifizieren zu können, wurde basierend auf dem Saugversuch folgende Definition abgeleitet:

$$A_w = w_a * \sqrt{t} \quad (12)$$

Wobei:

A_w	Aufgenommene Wassermenge im Saugversuch	[kg/m ²]
w_a	Wasseraufnahmekoeffizient	[kg/(m ² *h ^{1/2})]
$\sqrt{t}$	Wurzel der Saugzeit	[$\sqrt{h}$]

Die für die Weiterverteilung verantwortlichen kapillaren Zugkräfte können in der Praxis nicht definiert werden, weshalb Otto Krischer [12] bereits in den 70er Jahren den Gradienten des Wassergehaltes als Ursache für die kapillare Weiterleitung erkannt und folgende Beschreibung eingeführt hat.

$$g_w = -D_{w(w)} * \text{grad } w \quad (13)$$

Wobei:

g_w	Dichte des Flüssigtransportstromes	[kg/(m ² s)]
$D_{w(w)}$	Flüssigtransportkoeffizient „Weiterleiten“	[m ² /s]
grad w	Gradient des Wassergehalts über der Bauteillänge	[(kg/m ³)/m]

Für numerische Berechnungen wurden die beiden Flüssigtransportkoeffizienten D_{ws} für kapillares Aufsaugen auf der Oberfläche (zum Beispiel von Schlagregen) und D_{ww} für das Weiterleiten in den Poren eingeführt.

2.2.2.5 Verfahren zur Bestimmung der Feuchtetransportkoeffizienten

Aufgrund der komplizierten Zusammenhänge zwischen Feuchtetransport und Feuchtespeicherfunktion (Abb. 3) können die einzelnen Komponenten des Feuchtetransportes nur in den jeweiligen Teilbereichen in Versuchen erfasst werden, in denen ihr Transportmechanismus dominiert. Der für die Funktion einer Innendämmung relevante Bereich zwischen 60% und 95% kann mit dem nachfolgend beschriebenen KAPI-Test im Labor durchgeführt werden und ist mit dem Trocknungsversuch der einzige Test, der eine integrale Bestimmung ermöglicht.

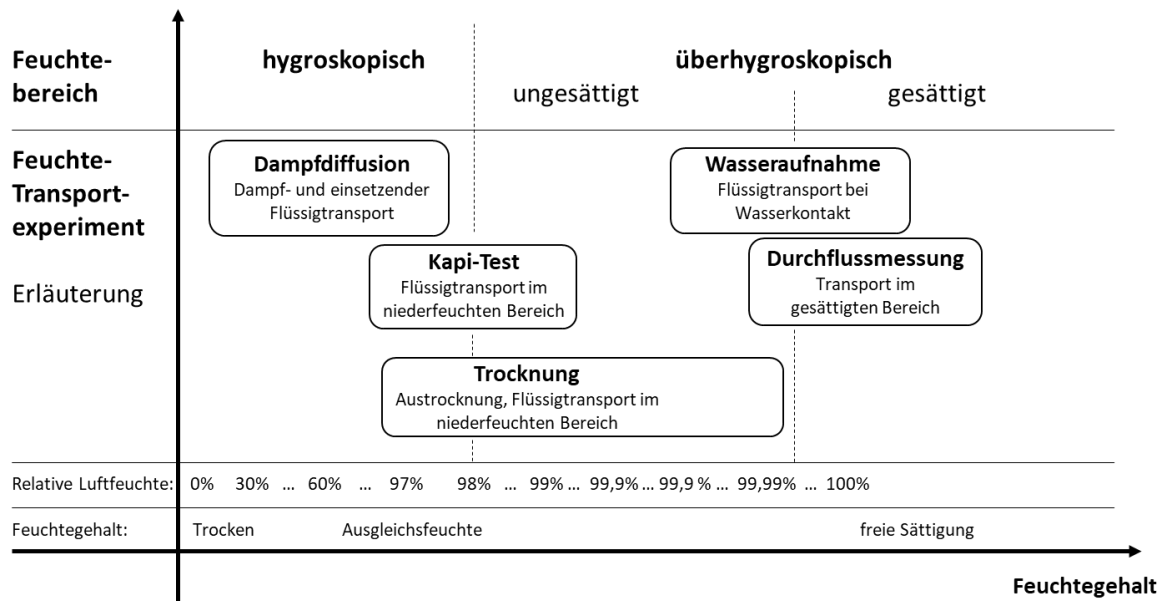


Abbildung 11: Den Feuchtebereichen zugeordnete Feuchtetransportexperimente [13]

Im Folgenden werden drei Labor Testverfahren vorgestellt, mit deren Hilfe Materialiensätze für die numerische Simulation genauer parametrisiert werden können. Da dem Dämmmaterial hier die wichtigsten Aufgaben des Feuchtehaushalts obliegen und dieses in der Regel künstlich hergestellt wird, ist es unproblematisch, dass diese Untersuchungen nur im Labor und nicht an bestehendem Mauerwerk durchgeführt werden können.

Diffusionswiderstandszahl μ

Der Diffusionswiderstand eines Baustoffs nach Gl. 11 kann im Labor mit Hilfe des dry-cup / wet-cup Tests nach DIN EN 12572 gemessen werden.

Für die Ermittlung des Diffusionswiderstandes im Bereich $< 50\%$ r.F. wird das dry-cup, für den Feuchtebereich zwischen 50 und 100% r.F. das wet-cup Verfahren angewendet.

Im Verfahren wird ein oben offenes Gefäß, das mit einem Trocknungsmittel (dry) oder einer gesättigten Salzlösung (wet) gefüllt ist, dicht mit einer plattenförmigen Probe gedeckelt und

verschlossen. Durch die Füllung stellt sich ein konstanter Wasserdampfpartialdruck im Gefäß ein. Dieses abgedichtete Gefäß wird nun in eine Klimakammer mit abweichendem Wasserdampfpartialdruck gebracht.

Durch das Konzentrationsgefälle stellt sich durch die Probe hindurch ein Diffusionsstrom ein, der zu einer konstanten Gewichtsabnahme führt und über welche wiederum der Diffusionswiderstandkoeffizient μ berechnet werden kann. Die Diffusionswiderstände im wet-cup Test liegen in der Regel über den dry-cup Ergebnissen, da sich der freie Porendurchmesser durch Adsorption reduziert.

KAPI-Test

Mit dem am Fraunhofer Institut für Bauphysik entwickelten KAPI-Test kann der Flüssigtransport im niederfeuchten Bereich, d.h. im Übergangsbereich zwischen Diffusion, Oberflächendiffusion und kapillarer Leitung, das heißt bei Ausgleichsfeuchten von 80 – 98 % ermittelt werden.

Dabei imitiert der Versuchsaufbau die realen Bedingungen einer Innendämmkonstruktion im Heizfall. Eine prismatische Materialprobe wird einseitig gekühlt und gegenüberliegend Raumbedingungen (23 °C / 70% r.F.) ausgesetzt. Damit ausschließlich eindimensionale Effekte auftreten, werden die Seiten der Probe versiegelt und mit Dämmstoff geschützt.

In Abhängigkeit der Feuchtetransporteigenschaften stellt sich über den Querschnitt der Materialprobe ein Feuchteprofil ein, das in regelmäßigen Abständen mittels Kernspinresonanzspektroskopie und Gravimetrie erfasst wird.

Die folgende Abbildung skizziert den Messaufbau und zeigt qualitativ die Unterschiede zwischen einer hohen und einer niedrigen Kapillaraktivität des getesteten Dämmstoffs.

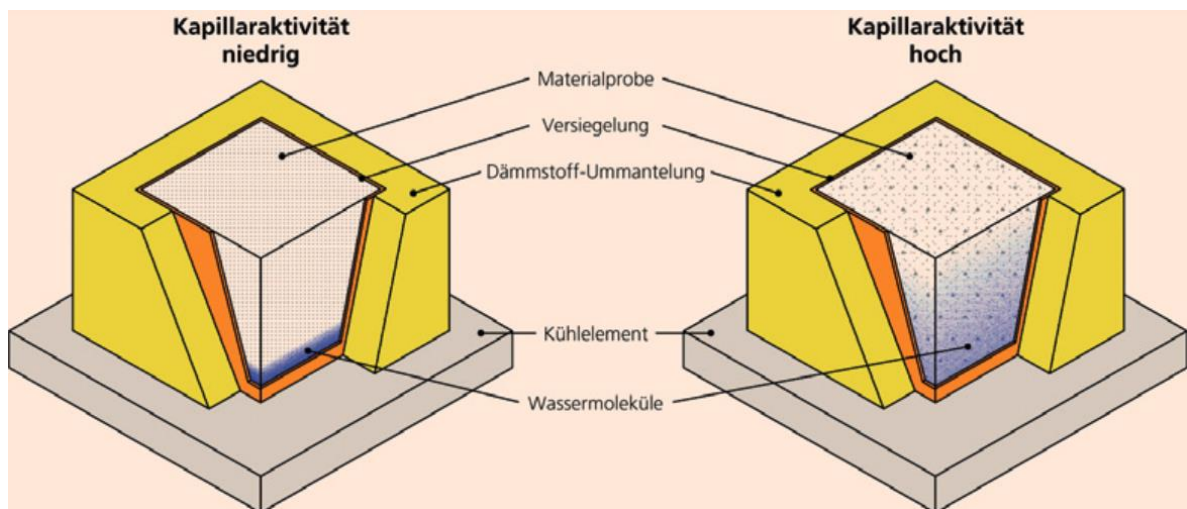


Abbildung 12: Skizze des Versuchsaufbaus und qualitative Darstellung zweier unterschiedlicher Proben [14]

Hydrophobisierte Dämmstoffe und Materialien mit niedriger Kapillaraktivität lassen sich gut über ihre Diffusionskennwerte charakterisieren, denn es findet kaum Sorption oder kapillare Leitung statt. Bei porösen Baustoffen verteilt sich die Feuchtigkeit durch Sorptionseffekte und bei höherer relativer Feuchte setzen konzentrationsgetriebene Effekte von rückfließendem Wasser ein, sodass die Quantifizierung durch Diffusion alleine nicht ausreicht.

Wasseraufnahmeversuch im Labor

Die Messung des Wasseraufnahmekoeffizienten eines Baustoffs im Labor ist in der DIN EN ISO 15148:2018-12 geregelt. Dabei wird eine Baustoffprobe mit definierter Fläche A ca. 5 mm tief in ein Wasserbad gehalten und die Gewichtszunahme der Probe gemessen. Dabei werden die Seiten der Probe versiegelt um weitgehend eindimensionalen Feuchtetransport sicher zu stellen.



Abbildung 13: Prinzipskizze des Wasseraufnahmeversuchs

Der Versuch kann mit manueller Wägung in einem vorher festgelegten Zeitintervall, sowie mit digitaler Dauermessung an eine Aufhängung durchgeführt werden. Der Versuch ist spätestens dann beendet, wenn der Prüfkörper vollständig durchfeuchtet ist. Bei schwach saugendem Prüfling kann die Messung aber auch nach z.B. 24 h beendet werden. Die Lufttemperatur sollte 23 °C und 50% r.F. betragen. Die Wassertemperatur sollte ebenfalls 23 °C betragen.

Qualitativ folgt die Wasseraufnahme über der Zeit einer Wurzelfunktion. Zu Beginn saugt die Oberfläche der Probe stark und Wasseraufnahme flacht über die Zeit ab.

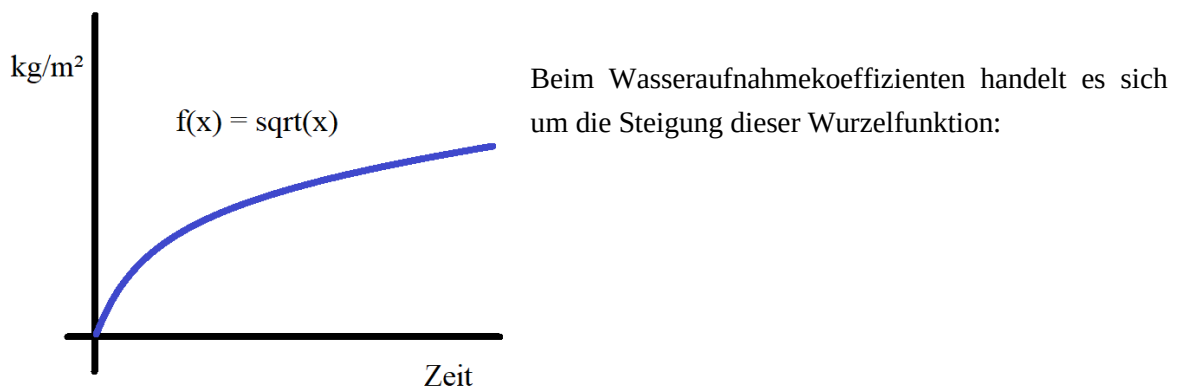


Abbildung 14: Qualitativer Verlauf der Massezunahme beim Wasseraufnahmeversuch.

$$w_a = A_W / (A \cdot \sqrt{t}) \quad (14)$$

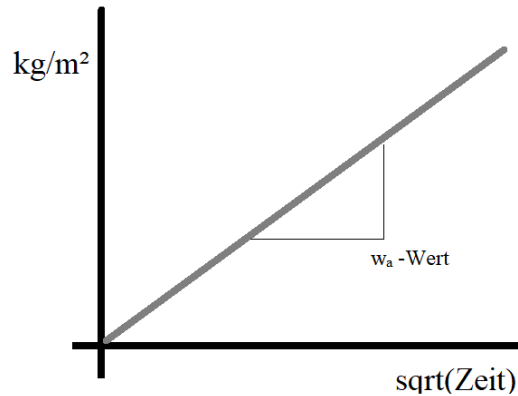


Abbildung 15: Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten

Folgende Tabelle gibt eine Übersicht über die Wasseraufnahmekoeffizienten w_a verschiedener Baustoffe. Insbesondere bei historischen und bei Naturbaustoffen ist eine natürliche, größere Varianz möglich. Die Einheit des w_a -Wertes ist gemäß Herleitung $[\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})]$.

- Naturstein	0,2 – 3	
- Historischer Kalkputz	1 – 10	abhängig von den Zuschlagstoffen
- Zementputz	~ 0,5	
- Beton	1 – 2	
- Kunstharzoberputz	0,05 – 0,1	
- Mineralischer Putz	0,1	mit Hydrophobierungszuschlägen

Basierend auf diesen Vormessungen im Labor können drei für die Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports mittels numerischer Simulation relevante Transportkoeffizienten gebildet werden.

- Der Diffusionswiderstand μ
- Der Flüssigtransportkoeffizient für Saugen an der Bauteiloberfläche – D_{ws}
- Der Flüssigtransportkoeffizient für das Weiterleiten innerhalb des Bauteils – D_{ww}

Während der Diffusionswiderstand über dem gesamten Feuchtebereich weitgehend konstant ist oder nur in geringem Maße abnimmt, sind die beiden Flüssigtransportkoeffizienten extrem abhängig vom Wassergehalt und nehmen mit steigendem Wassergehalt stark zu.

Da für die wenigsten Materialien exakte Messwerte über die gesamte Breite des Wassergehaltes existieren, wurde am Fraunhofer Institut für Bauphysik eine grobe Schätzformel entwickelt, um auf

Basis des Wasseraufnahmeversuchs und der Feuchtespeicherfunktion eine Näherung zur Verfügung stellen zu können.

Da sowohl für die Wasseraufnahme als auch den Wasseraufnahmekoeffizienten und den Wassergehalt häufig das Kürzel w verwendet wird, wurde in diesem Fall mittels tiefgestelltem Buchstaben unterschieden.

$$D_{WS} = 3,8 * \left(\frac{w_a}{w_f} \right)^2 * 1000 \left(\frac{w}{w_f} - 1 \right) \quad (15)$$

Wobei:

D_{WS}	Flüssigtransportkoeffizient für Saugen	[m ² /s]
w_a	Wasseraufnahmekoeffizient	[kg/(m ² s ^{0,5})]
w	Wassergehalt	[kg/m ³]
w_f	freie Wassersättigung	[kg/m ³]

Basierend auf dieser Funktion kann das numerische Situationstool WUFI Feuchtetransport-Tabellen wie folgt generieren. Es gilt für Saugen (D_{WS}) und Weiterleiten (D_{WW}) die Gleichung 15.

Tabelle 2: Generierung der wassergehaltsabhängigen Feuchtetransportkoeffizienten mittels WUFI Ansatz

w [kg/m ³]	D_{WS} [m ² /s]	D_{WW} [m ² /s]
0	0	0
w_{80} ¹	$D_{WS}(w_{80})$	$D_{WS}(w_{80})$
w_f	$D_{WS}(w_f)$	$D_{WS}(w_f) / 10$

¹ Wassergehalt bei einer relativen Porenluftfeuchte von 80%

2.3 Normung, Forschung und Stand der Technik

2.3.1 Normenwerke im Kontext der Innendämmung

2.3.1.1 National

In Luxemburg werden Normen vom *Luxemburgischen Institut für Normung, Zulassung, Sicherheit und Qualität von Produkten und Dienstleistungen* kurz ILNAS veröffentlicht und verwaltet. Im Kontext der Innendämmung existieren allerdings keine separaten luxemburgischen Normen. Hier bedient man sich am Regelwerk der Nachbarländer oder der EN. Insbesondere die deutsche DIN Normung als auch das Schweizer SIA Regelwerk finden Anwendung.

Im *Règlement grand-ducal du 9 juin 2021 concernant la performance énergétique des bâtiments*, der Großherzogliche Verordnung vom 9. Juni 2021 über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden werden Mindestanforderungen an neue Gebäude und Sanierungen definiert. Hier ist auch definiert, dass im Sanierungsfall mit Innendämmung ein Mindest-U-Wert von $0,4 \text{ W/m}^2\text{K}$ eingehalten werden muss.

Neben der Verordnung zur Energieeffizienz, existiert auch ein Fördertool zur finanziellen Anreizung von Sanierungsmaßnahmen mit dem Fokus auf Verbesserung der Energieeffizienz im Bestand. Das sogenannte PrimeHouse Programm unterstützt Bauherren mit bis zu 50 % der Bausumme, wenn im PrimeHouse Programm festgeschriebenen Kriterien erfüllt werden.

2.3.1.2 DIN Normen

Das *Deutsche Institut für Normung e.V.* ist die Normungsorganisation in Deutschland. Neben eigenen Normen werden europäische Normen in nationale Normen überführt. Ende 2020 gab es ca. 34.500 DIN-Normen.

Im Kontext der Innendämmung spielt insbesondere die **DIN 4108 Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden** eine zentrale Rolle.

Die DIN 4108 enthält:

- | | |
|---|--------------------|
| - Eine Liste nachweisfreier Konstruktionen | Verweis auf: |
| - Das Glaserverfahren zur statischen Diffusionsberechnung | → DIN EN ISO 13788 |
| - Numerische Methoden zur hygrothermischen Simulation | → DIN EN 15026 |

Die Teile 2,3 und 4 der DIN 4108 behandeln dabei die Mindestanforderungen an den Wärmeschutz sowie die den klimabedingten Feuchteschutz.

Nach DIN 4108 **Teil 2** gilt die Anforderung an die thermische Mindestqualität von Bauteilen und Anschlüssen und dabei ein Mindestmaß an thermischem Komfort bei gleichzeitiger Schimmelfreiheit sicherzustellen. Für Außenwände ist ein Wärmedurchgangswiderstand von 1,2

m*K/W hinterlegt – dies entspricht unter Berücksichtigung des inneren und äußeren Wärmeübergangskoeffizienten einem U-Wert von 0,73 W/m²*K. Um Bauteilanschlüsse schimmelfrei zu halten, ist gemäß Norm eine Wärmebrückenberechnung entsprechend der *DIN ISO 10211: Wärmebrücken im Hochbau* durchzuführen.

Kennwert für die Einhaltung des Wärmeschutzes im Bereich von Wärmebrücken ist der sogenannte Oberflächenfaktor: f_{Rsi} . Dieser ist wie folgt definiert:

$$f_{Rsi} = \frac{T_{si} - T_e}{T_i - T_e} \quad (16)$$

Wobei:

f_{Rsi}	Der Oberflächentemperaturfaktor	[-]
T_{si}	Oberflächentemperatur innen	[°C]
T_i	Lufttemperatur innen	[°C]
T_e	Lufttemperatur außen	[°C]

Gemäß dem in der Norm definierten Winterfall ist eine relative Feuchte an der Bauteiloberfläche von 80 % gerade noch akzeptabel. Die Randbedingungen:

$$\begin{aligned} T_i &= 20 \text{ °C} && \text{bei 50 \% relativer Luftfeuchte} \\ T_e &= -5 \text{ °C} \end{aligned}$$

führen bei einer Oberflächentemperatur von:

$$T_{si} = 12,6 \text{ °C}$$

zu den akzeptablen 80 % relativer Feuchte auf der Oberfläche. Daraus ergibt sich ein Oberflächenfaktor $f_{Rsi} = 0,7$.

Sobald der Grenzwert von 80 % überschritten wird, kann in Abhängigkeit des Substrates der Befall durch Schimmel nicht mehr ausgeschlossen werden. Die Schweizerische SIA Norm 180 verlangt aufgrund des alpinen, kälteren Klimas in der Schweiz einen f_{Rsi} von 0,75. So kann auch bei niedrigeren Außentemperaturen (im Falle der SIA 180 = -10 °C) noch oben genannte Oberflächentemperatur auf der Innenseite erreicht werden.

Folgerichtig verlangt diese Norm, dass bei der Planung einer Innendämmung auch stets eine Wärmebrückenberechnung durchzuführen ist, um Schimmelfreiheit an den einbindenden Bauteilen nachzuweisen. Um die thermischen Verluste im Bereich der Wärmebrücken gering zu halten, sollte stets ein möglichst hoher Oberflächenfaktor angestrebt werden. Der Vorteil des Oberflächenfaktors ist die Unabhängigkeit von den absoluten Temperaturen, weshalb er auch in der Übergangszeit und unabhängig von den Normtemperaturen ermittelt werden kann (siehe Kap. 3.1.6).

In **Teil 3 (Klimabedingter Feuchteschutz)** der DIN 4108 werden konkrete Hinweise für die Planung und Ausführung des feuchtetechnischen Nachweises gegeben. Prinzipiell wird der Feuchteschutz aus zwei Blickrichtungen betrachtet: Dem äußeren Schlagregenschutz sowie dem Schutz vor Feuchteintrag ins Bauteil aus der Innenluft infolge von Diffusion.

Schlagregenschutz

Für die Bewertung des Schlagregenschutzes nach DIN 4108 Teil 3 spielt auf der einen Seite die Schlagregenbelastung und auf der anderen Seite die Widerstandsfähigkeit der Konstruktion eine Rolle.

Gemäß Norm wird Deutschland in drei Beanspruchungsgruppen untergliedert:

- Beanspruchungsgruppe I
 - < 600 mm Niederschlag
 - Windarme Gebiete
 - Windgeschützte Lagen
- Beanspruchungsgruppe II
 - 600 – 800 mm Niederschlag
 - Mittlere Belastung
 - Hochhäuser und exponierte Gebäude trotz Regen < 600 mm
 - Windgeschützte Gebäude der Beanspruchungsgruppe III
- Beanspruchungsgruppe III
 - > 800 mm Niederschlag
 - Wind- und Regenreiche Gebiete
 - Hochhäuser und exponierte Gebäude trotz Regen < 800 mm

Das Moseltal zwischen Trier und Koblenz wird der Beanspruchungsklasse II zugeordnet, während die Eifel und das Saarland der höchsten Beanspruchungsklasse angehören. Aufgrund der örtlichen Nähe Luxemburgs, kann davon ausgegangen werden, dass hier ebenfalls die beiden höheren Beanspruchungsklassen vorliegen.

Die tatsächliche Schlagregebelastung ist aus der Fassadenexposition sowie dem lokalen Klima zu ermitteln und kann lokal stark variieren.

Im Zuge eines Innendämmprojektes ist zu entscheiden, ob und in welchem Umfang die Fassade erneuert wird. Bei nur teilweiser Sanierung müssen eventuell entstehende Schwachstellen berücksichtigt werden. Bei kompletter Sanierung kann durch die Kombination moderner Putz- und Anstrichsysteme ein guter Schutz erreicht werden.

Die WTA Merkblätter 4 und 5 aus der Merkblattreihe 6 für Innendämmung geben Grenzwerte für den Wasseraufnahmekoeffizienten der Fassade an. Eine konkrete Vorgehensweise zur Erfassung der Messwerte sowie zur Bestimmung des Messortes werden auch hier nicht gegeben.

Dampfdiffusion aus der Raumluftheuchte

Der Dampfdiffusionsnachweis gemäß DIN 4108-3 wird mit Hilfe des Glaser-Verfahrens durchgeführt.

Das Verfahren, auch Periodenbilanzverfahren genannt, ist eine Untersuchung, ob und wie viel Tauwasser in einem Bauteil (z.B. Außenwand oder Dach) in der Winterperiode ausfällt. Das Verfahren umfasst die Berechnung des U-Wertes, der Temperaturen an den Schichtgrenzen sowie der Wasserdampfsättigungsdrücke, die Erstellung des Glaser-Diagramms und schließlich die Berechnung des Tauwassers. Das Diagramm zeigt, unter welchen Bedingungen und an welchen Stellen im Bauteil Tauwasser entstehen kann und wie das Tauwasser wieder abgeführt wird. Dabei sind zwei Kriterien zu erfüllen:

- Die maximale Tauwassermenge ist je nach Saugfähigkeit des Materials begrenzt auf Werte zwischen 0,5 und 1 kg/m².
- Die in der Winterperiode angefallene Kondensatmenge muss in der Sommerperiode vollständig aus dem Bauteil verdampfen können.

Es wurde zu einer Zeit entwickelt, als die heute übliche computergestützte Analyse noch nicht möglich war und wurde daher als tabellarisch-grafische Methode konzipiert, die schnell und mit einfachen Rechenoperationen Ergebnisse liefert.

Das Verfahren kann als konservativ bezeichnet werden. Wenn eine Konstruktion nach dem Glaser-Verfahren als unkritisch eingestuft ist, wird sie aus hygrothermischer Sicht und bei gegebenem Schlagregenschutz funktionieren. Das heißt aber nicht, dass eine nach Glaser als problematisch angesehene Konstruktion in der Praxis nicht funktioniert.

Generell können diffusionsoffene Innendämmsysteme mit dem Glaser-Verfahren nur begrenzt nachgewiesen werden, da die Methode nur Diffusionsvorgänge berücksichtigt. Die Sorption und Effekte des Flüssigtransportes in Poren bleiben bei der Berechnung unberücksichtigt.

Neben der DIN 4108 existiert noch die **DIN EN ISO 13788**, deren Inhalt teilweise deckungsgleich mit der erstgenannten Norm ist. Kern der Norm ist die Beschreibung des Glaserverfahrens. Dabei bezieht sich die DIN 4108 auf die DIN EN ISO 13788 sowie **die DIN EN 15026**, in der wiederum die hygrothermische Bauteilsimulation mittels numerischer Verfahren samt theoretischer Grundlagen beschrieben wird.

Die DIN EN 15026 liefert auch vier Feuchtestufen für die Bewertung der Innenluftfeuchte in Abhängigkeit von der Außenlufttemperatur. Die Darstellung hierzu befindet sich in Kapitel 3.1.1 Messung des Innenklimas. Ein Beispiel zum Glasererfahren ist im Anhang gezeigt.

2.3.1.3 WTA Merkblätter

6-1 Leitfaden für hygrothermische Simulationsberechnungen

Das erste Merkblatt der Serie gibt auf 11 Seiten Hinweise zur korrekten Schrittfolge bei der Durchführung von hygrothermischen Simulationsberechnungen. Es dient als Grundlage für Merkblatt zwei.

6-2 Simulation wärme- und feuchtetechnischer Prozesse

Das WTA Merkblatt 2 stellt die mathematischen und physikalischen Grundlagen der numerischen Simulationstools sowie die Messmethoden zur Ermittlung relevanter Materialparameter vor. Des Weiteren gibt es Hinweise zur Auswahl der klimatischen Randbedingungen und zur Prüfung der Plausibilität. Folgende vier Feuchtestufen werden mit zugehörigem Temperaturdiagramm in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur vorgeschlagen.

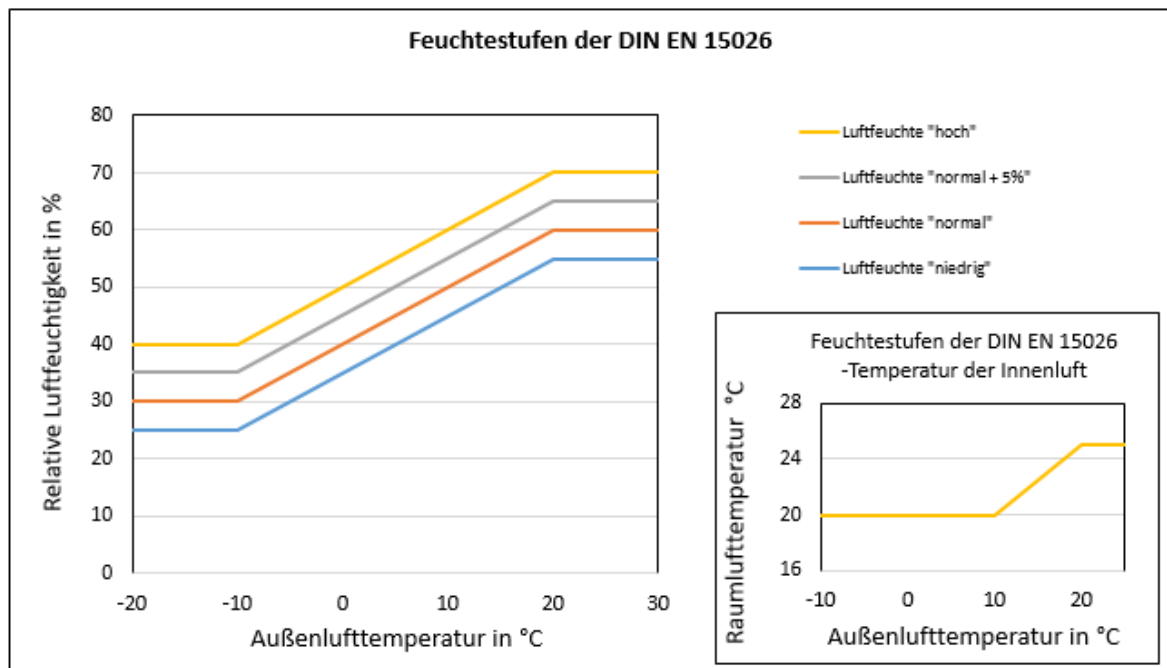


Abbildung 16: Feuchtestufen gemäß DIN EN 15026 und WTA 6-2

Es wird empfohlen beim Nachweis mittels numerischer Simulationen die Feuchtestufe „normal + 5%“ anzuwenden.

Im Vergleich zur DIN EN 15026 geht das Merkblatt in der Tiefe der Beschreibung mehr ins Detail und ist so eine hervorragende Literaturgrundlage für Wissenschaftler und Ingenieure, die sich intensiver mit dem Thema der hygrothermischen Bauteilsimulation auseinandersetzen möchten.

6-3 Rechnerische Prognose des Schimmelpilzwachstumsrisikos

Mit Merkblatt drei wird eine Hilfestellung für die Interpretation hygrothermischer Simulationsrechnungen mit dem Schwerpunkt „Schimmelpilzwachstumsrisiko“ gegeben. Die biologischen Grundlagen und Voraussetzungen für Schimmelpilzwachstum werden erläutert. Es enthält Hinweise für die Bauteilauslegung, Folgeabschätzung bei Umnutzung, Schadensdiagnose und weitere Architekten- und Ingenieursdienstleistungen mit dem Fokus auf der Vermeidung von Schimmelpilzwachstum.

6-4 Innendämmung nach WTA I: Planungsleitfaden

Merkblatt vier enthält die bauphysikalischen Grundlagen für eine schadensfreie Innendämmung in reduzierter Form im Vergleich zu Merkblatt 6-2 und stellt ein vereinfachtes Nachweisverfahren vor, das ohne aufwändige numerische Simulation dafür unter strengen Randbedingungen den Nachweis unterschiedlicher Innendämmsysteme ermöglicht.

Neben der numerischen Simulation und dem Glaserverfahren ist das vereinfachte Verfahren nach WTA 6-4 eine der drei möglichen Nachweisführungen.

Dabei handelt es sich um ein grafisches, schnell umsetzbares Verfahren, das in Abhängigkeit der wärmeschutztechnischen Verbesserung ΔR einen Minstdiffusionswiderstand für das Dämmsystem vorschreibt. Dabei werden zwei Arten des Untergrundes unterschieden: Saugfähig / schlecht saugfähig. Die Randbedingungen werden in Kapitel 2.4.2 detailliert beschrieben.

6-5 Innendämmung nach WTA II: Nachweis von Innendämmsystemen mittels numerischer Berechnungsverfahren

Das fünfte Merkblatt der Reihe definiert konkrete Grenzwerte für die Auswertung numerischer Berechnungsverfahren und gibt Hinweise für das praktische Vorgehen beim Detailnachweis von Bauteilen mit Innendämmung.

Folgende Grenzwerte werden gemäß WTA für den numerischen Bauteilnachweis empfohlen:

- Für nicht frostbeständige Bauteilschichten sollte ein Sättigungsgrad² von 30% nicht überschritten werden. Aufgrund eines Sicherheitsfaktors sind höhere Sättigungsgrade zulässig, sofern die relative Porenluftfeuchte unter 95 % bleibt.
- Für gipshaltige Baustoffe wird eine Obergrenze von 95 % empfohlen, um die Festigkeit nicht zu gefährden.

Insbesondere in Laibungsbereichen, in denen auch ohne Innendämmung auf den Bestandsflächen niedrige Oberflächentemperaturen herrschen, ist zu prüfen, ob ein

² Sättigungsgrad = Wassergehalt / Wassergehalt bei freier Sättigung

Abschlagen des Bestandsputzes aus Gips eine höhere Dämmstärke und gleichzeitig mehr Sicherheit erlaubt.

- Für Bauteile aus Holz dürfen die Werte der relativen Porenluftfeuchte (95 % bei 0 °C gleitend bis 86 % bei 30 °C) in Abhängigkeit der Temperatur im Bauteil nicht überschritten werden. Zusätzlich ist im Jahresmittel eine relative Feuchte < 85 % einzuhalten. Diese Grenzwerte sind im WTA Merkblatt 6-8 geregelt.
- Gemäß WTA 6-3 und DIN 4108-2 ist das Risiko für Schimmelwachstum auf der Innenoberfläche des Bauteils zu prüfen. Insbesondere im Bereich von Wärmebrücken durch eingebundene Bauteile ist dies notwendig.

Neben den Grenzwerten für die Bewertung der Feuchte in der Konstruktion enthält das Merkblatt eine Empfehlung zur maximalen Wasseraufnahme der Fassade sowie zum Diffusionswiderstand der Oberfläche (Kombination aus Putz und Anstrich). Aufgrund der Tatsache, dass durch eine Innendämmung die Bestandskonstruktion in den Wintermonaten stärker auskühlt und somit schlechter trocknet, sind die Grenzwerte schärfer gewählt, als es die DIN 4108-3 fordert.

$$w_a * s_d \leq 0,1 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \sqrt{\text{h}}) \quad (17)$$

➔ bei gleichzeitiger Begrenzung der Einzelparameter auf:

- Wasseraufnahmekoeffizient der Fassade im Bestand oder nach Sanierung

$$w_a \leq 0,2 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \sqrt{\text{h}}) \quad (18)$$

- Putz und Anstrich im Bestand oder nach Sanierung

$$s_d \leq 1,0 \text{ m} \quad (19)$$

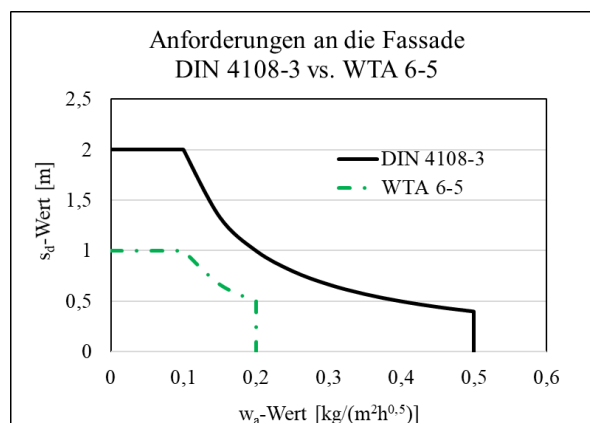


Abbildung 17: Anforderungen an die Fassade gemäß DIN und WTA

6-8 Feuchtetechnische Bewertung von Holzbauteilen – Vereinfachte Nachweise und Simulation

Das Merkblatt 6-8 gibt Hinweise zur hygrothermischen Beurteilung von Holzkonstruktionen und Holzfaserdämmungen. Die Anforderungen der DIN 68800 „Holzschutz“ gibt sehr scharfe Grenzwerte für die maximal zulässigen Feuchtegehalte bei Holzfaserstoffen. Dieser Grenzwert von 18 M.% wird beim Einsatz von leichten Holzfaserdämmstoffen im Bereich der kalten Seite einer Innendämmung oft überschritten. Vor diesem Hintergrund hat die WTA basierend auf Forschungsergebnissen des Fraunhofer IBP sowie der TU Dresden einen Grenzwert in Abhängigkeit der Temperatur und der relativen Feuchte eingeführt. Folgende Abbildung zeigt die Abhängigkeit.

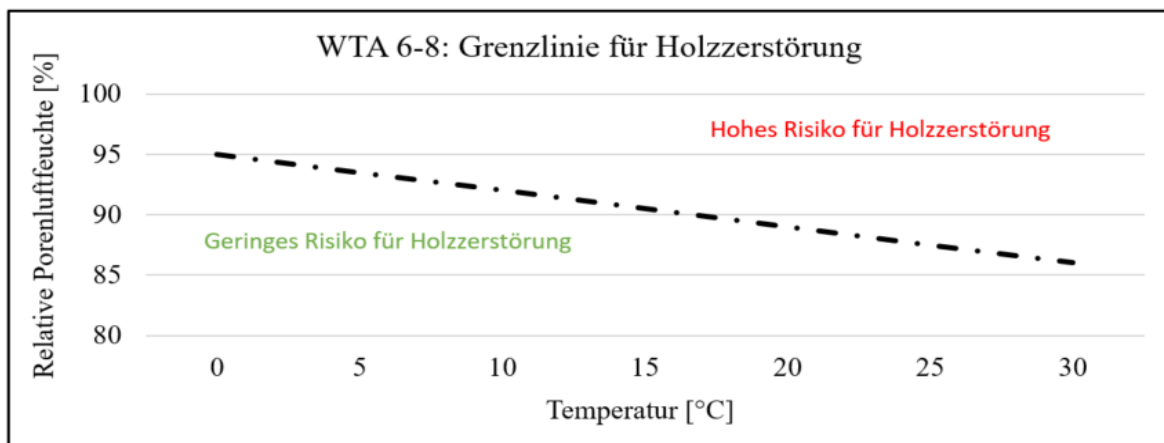


Abbildung 18: Risiko für Holzerstörung gemäß WTA 6-8

Während der Grenzwert der DIN 68800 mit 18 M.% bei einer flexiblen Holzfaserdämmplatte bereits bei einer relativen Feuchte von ca. 80 % die Grenze setzt, kann diese bei einer Innendämmung im kritischen Bereich, in Abhängigkeit der Temperaturen in dieser Bauteilschicht, deutlich stärker durchfeuchten, ohne Schaden zu nehmen. Diese Kontroverse ist wird in den Normenausschüssen bearbeitet und es soll für Holzfaserdämmstoffe ein neuer Grenzwert von 27 M.% eingeführt werden.

Merkblattreihe 8: Fachwerk und Holzkonstruktionen

Die Merkblattreihe 8 setzt sich mit der Instandsetzung von Fachwerkgebäuden und den dazugehörigen Holzkonstruktionen auseinander. Blatt 1 beschreibt die bauphysikalischen Grundlagen, während in Blatt 5 die Besonderheiten im Kontext der Innendämmung erläutert werden. In Blatt 10 wird die Verbesserung des Wärmeschutzes von Fachwerken abgehandelt.

Wichtigste Quintessenz für Fachwerkgebäude ist, dass der Diffusionswiderstand der Innendämmschicht $s_d < 2$ m ausfallen sollte, um eine Trocknungskapazität zum Innenraum nach Schlagregenereignissen zu bewahren. Aufgrund der inhomogenen Oberfläche und der häufig offenen Holzfasern kann nie 100% ausgeschlossen werden, dass eine minimale Feuchtemenge in die Konstruktion eintritt. Da es in Luxemburg nur eine verschwindend geringe Anzahl an Fachwerkbauten gibt, spielen diese Besonderheiten hier nur eine untergeordnete Rolle.

2.3.2 Analyse von Schlagregen im Kontext der Bauphysik

Schlagregen spielt im Kontext der Innendämmung eine entscheidende Rolle. Durch die Festlegung niedriger Grenzwerte für die maximale Wasseraufnahme und den Diffusionswiderstand der Oberfläche in bauaufsichtlich eingeführten Normen wird deutlich, dass das Eindringen von Regen in die Fassade auf ein Minimum reduziert werden muss, um Bauschäden zu vermeiden. Gleichzeitig schließen diese Grenzwerte eine Innendämmung von Natursteinfassaden aus, wie sie Bestandteil zahlreicher historisch relevanter Gebäude in Luxemburg sind, da für diese ein Nachweis der Unterschreitung der oben genannten Grenzwerte unmöglich ist.

Der häufig vorkommende, gelblich schimmernde Ernzener Sandstein wird z.B. mit einem w_a -Wert von $1,6 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \sqrt{\text{h}})$ angegeben.

Gleichzeitig existieren Natursteinmauerwerke zum Teil seit vielen Jahrhunderten, ohne dass diese zerstört wurden. Nicht selten jedoch wurden die Natursteinmauerfassaden, an der Süd-West-Hauptwetterseite im Laufe der Zeit verputzt und angestrichen.

Neben dem Wasseraufnahmekoeffizienten ist entscheidend, wieviel Wasser auf der Fassade überhaupt zum Aufsaugen zur Verfügung steht. Folgende Parameter haben hierauf Einfluss:

- Niederschlag im Jahresverlauf [mm]
- Windgeschwindigkeit [m/s]
- Windrichtung [°]
- Ausrichtung der Fassade [°]
- Neigung der Fassade [°]
- Dachüberstand
- Gebäudehöhe [m]
- Gebäudeform
- Geographie der Umgebung
- Messstelle auf der Fassade (Vorsprung, Gaube, Ecke, etc.)

Anhand der Vielzahl der Einflussfaktoren lässt sich erahnen, dass es keinen einfachen Zusammenhang zwischen dem Standort des Gebäudes und der tatsächlich auftretenden Benetzung der Fassade gibt. Mehrere Beschreibungsversuche haben sich auf einzelne Faktoren der Beurteilung beschränkt [15].

Am Fraunhofer IBP in Holzkirchen wurden in den 90er Jahren ebenfalls Schlagregenuntersuchungen durchgeführt und folgender Zusammenhang aufgestellt [16]:

$$R_S = r_S * v * R_N \quad (20)$$

Wobei:

R_S	Schlagregen senkrecht zur Gebäudeoberfläche	[mm/h]
R_N	Normalregen	[mm/h]
v	Windgeschwindigkeit senkrecht zur Gebäudeoberfläche gemessen in 10 m Höhe	[m/s]
r_S	Positionsabhängiger Proportionalitätsfaktor	[s/m]

Der positionsabhängige Proportionalitätsfaktor kann auch als Exposition bezeichnet werden und enthält die Einflüsse der Gebäudeform, -höhe, Nachbarbebauung [17], Neigung der Fassade, Dachüberstand, Geographie der Umgebung sowie den Ort der Messstelle auf der Fassade. Insbesondere die Gebäudehöhe hat einen großen Einfluss auf den Wert. Ab einer Höhe von 10 m kann der Faktor den Wert von 1 erreichen, bei höheren Gebäuden kann er auch darüber liegen [16].

Die direkte Messung von Schlagregen am Gebäude gestaltet sich aus oben genannten Gründen schwierig. Blocken & Carmeliet [18] berichten über diverse Messverfahren aus dem letzten Jahrhundert. Alle Geräte eint die hohe Messabweichung selbst bei künstlich berechneten Tests. Abweichungen bis 100 % sind keine Seltenheit. Ursächlich sind unter anderem Verdampfungs- und Abtropfverluste.

Im Rahmen des Forschungsprojektes *Energieeffizienzsteigerung durch Innendämmung* [19] in Deutschland wurde am Fraunhofer IBP in Holzkirchen eine neue Schlagregenmessplatte entwickelt und erprobt und 2018 vorgestellt.. Die nebenstehende Abbildung zeigt die Sammelschale des Gerätes.

Das Gerät wird als einfach zu handhaben und günstig beschrieben. Nachteilig ist die manuelle Messung, die pro Regenereignis ausgewertet werden muss.

Auf einer 3 m hohen Testfassade wurde in mehreren Höhen Messgeräte montiert und zum Teil große Unterschiede (ca. 50%) bei geringem Höhenunterschied (ca. 1,3 m) ermittelt. Der Unterschied wird mit dem durch die Anströmung des Windes entstehenden Staudruck begründet [20].

Daraus kann der Rückschluss gezogen werden, dass insbesondere im Bereich von Gebäudeecken und hervorstehenden Bauteilen mit hohen Regenlasten zu rechnen ist. Durch Moosbewuchs und Verwitterung sind diese Stellen nach einigen Jahren sichtbar.

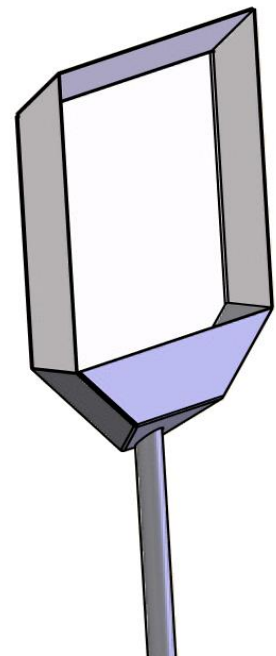


Abbildung 19:
Schlagregenmessgerät
des Fraunhofer IBP

2.3.3 Hydrophobierung im Kontext der Innendämmung

In den vergangenen Jahren wurde im Rahmen von Innendämmprojekten bei Gebäuden mit Sichtsteinmauerwerk häufig die Hydrophobierung der Fassade durchgeführt, um die Grenzwerte der Wasseraufnahme einzuhalten.

Um die Möglichkeiten und Grenzen der Hydrophobierung verstehen zu können, ist die Kenntnis über die physikalischen Hintergründe notwendig. Unter Hydrophobierung wird häufig die Veränderung des Kontaktwinkels eines Wassertropfens auf einer Oberfläche verstanden, denn die Tropfenkontur und der sich einstellende Kontaktwinkel dienen als Definitionskriterium für den Grad der Hydrophobierung.

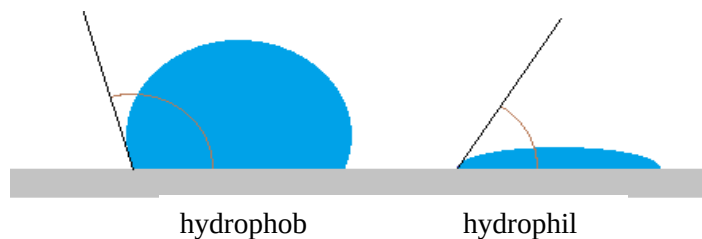


Abbildung 20: Tropfenkontur bei hydrophober (links) und hydrophiler (rechts) Oberfläche und Kontaktwinkel.

Bei der Durchführung einer Hydrophobierung werden flüssige Silane, Siloxane oder Siliconharz mit Lösungsmittel auf die Fassade aufgetragen. Durch den Kontakt mit Feuchtigkeit reagieren diese und bilden eine Siliconharzschicht, dessen Oberflächenspannung deutlich über der des beschichteten Materials liegt. Teilweise werden diese Beschichtungen auch unter dem sogenannten Lotus-Effekt vermarktet. Das Ziel muss sein, dass diese Beschichtung tief in das Material eindringt und dabei nur einen dünnen Film in den Poren bildet, ohne diese zu verstopfen und so den Diffusionswiderstand zu erhöhen. Folgende Grafik des Instituts für Bauklimatik an der TU Dresden zeigt von links nach rechts: unbehandelter Baustoff, eine dünne Hydrophobierungsschicht, einen Polymerfilm sowie versiegelte Poren.

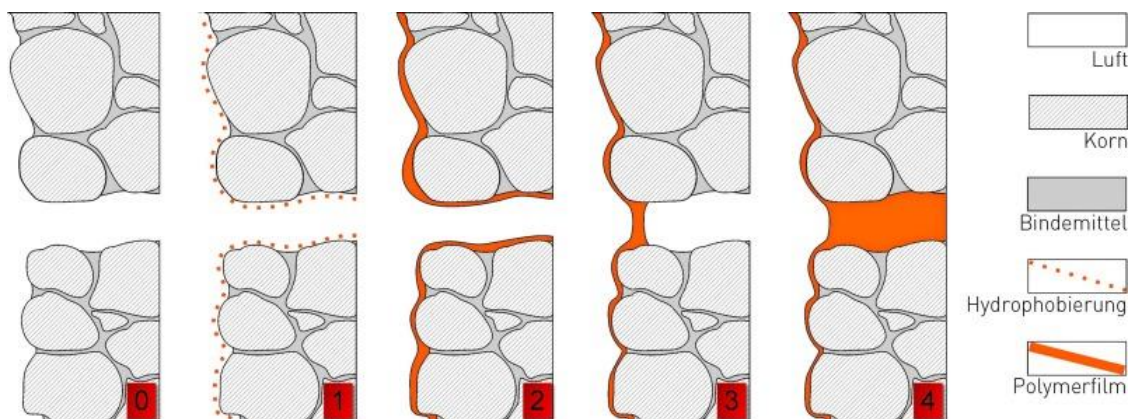


Abbildung 21: Schematische Darstellung verschiedener Steinschutzmaßnahmen [21].

Problematisch ist daher, dass durch die Hydrophobierung zum einen zwar der Wasseraufnahmekoeffizient der Fassade reduziert, zum anderen aber auch unweigerlich der Diffusionswiderstand erhöht wird.

Durch Verwitterung kann es zu einer Abnutzung der Hydrophobierung kommen. Dies geschieht beispielsweise durch Spannungen aufgrund von Materialausdehnung bei starker Sonneneinstrahlung, in deren Folge es zu starker Temperaturerhöhung an der Materialoberfläche kommen kann und der Materialkontraktion im Winter. Die maximalen Temperaturunterschiede können je nach Ausrichtung der Fassade und ihrer Farbe bis zu 80 K (-20 °C im Winter, 60 °C im Sommer) betragen. Dadurch steigt mit der Zeit der Wasseraufnahmekoeffizient wieder an, wobei sich der erhöhte Diffusionswiderstand in der Regel nicht verringert und so die Trocknungseigenschaften schlechter sind, als vor der Hydrophobierung [21][22].

Der oben erwähnte Abperleffekt, der sich nach der Hydrophobierung zeigt, verschwindet häufig bereits nach einigen Wochen. Dies hängt mit der Verschmutzung der Oberfläche sowie ersten Verwitterungsanzeichen zusammen. Dies muss nicht zwangsläufig bedeuten, dass die Hydrophobierung bereits wirkungslos geworden ist, da die Hydrophobierung in tieferen Schichten noch funktional sein kann. Nur eine Messung des Wasseraufnahmekoeffizienten direkt an der Fassade in regelmäßigen Abständen kann dabei helfen, langfristig sicherzustellen, dass die Fassade nicht durch einen Verschleiß der Hydrophobierung Schaden nimmt.

Es wird empfohlen in Abständen von 5 Jahren Messungen durchzuführen und nach ca. 10 Jahren die Hydrophobierung zu erneuern [21]. Problematisch am nachlassenden Abperleffekt aufgrund von Verschmutzung ist, dass in diesem Fall das Wasser weder abläuft noch vom Mauerwerk aufgenommen wird und somit die obere Schicht (in der Regel wenige mm) stark durchnässt und nur langsam trocknet. Bei Temperaturen um den Gefrierpunkt kann es zu Frostabplatzungen kommen. Folgende Bilder geben einen Eindruck:



Abbildung 22: Abplatzung an der obersten Gesteinsschicht infolge einer Hydrophobierung [22]

Um zu prüfen, ob ein direkter Zusammenhang zwischen dem Wasseraufnahmekoeffizienten w_a und dem Kontaktwinkel eines Wassertropfens auf einer Gesteinsoberfläche besteht, wurden zusammen mit der Firma HYDAC zwei in Luxemburg typische Natursteine getestet.

- Ernzerer Naturstein aus dem Steinbruch von Carrière Feidt in Erzen
- Gilsdorfer Naturstein aus dem Steinbruch von Carrière Feidt in Gilsdorf

Der Ernzerer Naturstein ist relativ leicht, gut zu bearbeiten und kommt häufig als Fenstereinfassung zum Einsatz. Manchmal auch als vorgehängte Platten an Fassaden. Der Gilsdorfer Naturstein ist hingegen dicht und druckfest und wird entsprechend als Brückenstein und auch häufig als Stufenstein eingesetzt.

Der Kontaktwinkel wurde mit der Captive Bubble Methode gemessen. Dabei wird eine Gasblase von unten an eine in Wasser getauchte, gesägte Gesteinsprobe geleitet und über eine hochauflösende Optik der Kontaktwinkel gemessen.

Zum Einsatz kommt Messtechnik der Firma Krüss.

Als Messfluid wird hochreines Wasser (ROTISOLV® LC-MS Grade) verwendet. Die Wassertemperatur beträgt 22 °C. Mit jeder Probe werden fünf Messungen durchgeführt.

Die Wasseraufnahme des jeweiligen Steines wird im Labor gemäß DIN 15148 mit manueller Wägung ermittelt. Während es beim Gilsdorfer nur zu einer minimalen Wasseraufnahme kommt, saugt der Ernzerer Naturstein relativ stark. Auch auffallend ist, dass der Ernzerer vor allem bei vollständiger Benetzung stark zum Absanden neigt.

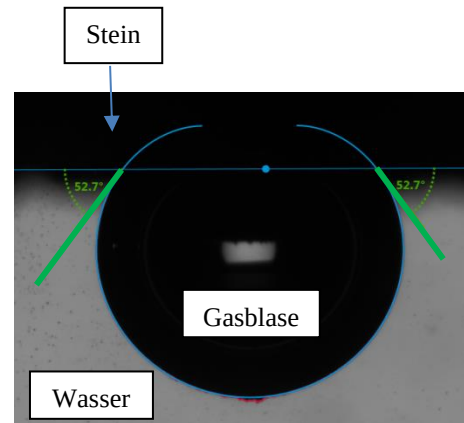


Abbildung 23: Gasblase am Ernzerer Naturstein

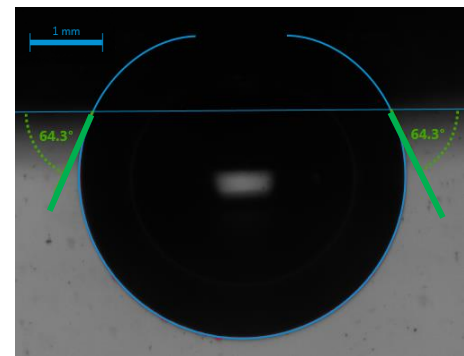


Abbildung 24: Gasblase am Gilsdorfer Naturstein

Tabelle 3: Ergebnisse der w -Wert und Kontaktwinkelmessung

Probe	Dichte [kg/m^3]	Kontaktwinkel [$^\circ$]	w_a -Wert [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \sqrt{\text{h}})$]
Ernzerer Naturstein	2000 - 2200	$54 \pm 3^\circ$	$\sim 1,6 - 2,8$
Gilsdorfer Naturstein	2400 - 2500	$63 \pm 3^\circ$	$< 0,2$

2.3.4 Analyse von Holzbalkendecken im Zusammenhang mit Innendämmung

Holzbalkendecken sind insbesondere im Altbau eine weit verbreitete Konstruktionsart für Decken. Da die Bestandsmauern für die tragenden Holzbalken als Auflager dienen und die Balken häufig weit ins Mauerwerk hineinreichen, durchstoßen sie auch später die Dämmschicht. Dies kann zu kritischen Feuchtwerten im Bereich der Balkenköpfe und zur Holzerstörung und in der Folge zum Verlust der Tragfähigkeit führen.

Problematisch ist neben dem Feuchteintrag aus Diffusion im Besonderen auch die schwierige Abdichtung eines faserigen Balkens. Wenn diese nicht korrekt ausgeführt wird, führt sie zu konvektivem Feuchteintrag in die kritische Region im kalten Mauerwerk. Besonders wenn sich im Laufe der Zeit tiefe Riefen durch die Trocknung des Holzes gebildet haben, ist die praktische Umsetzung einer Abdichtung schwierig. Folgende Abbildung verdeutlicht, wie mögliche Feuchtequellen auf den Balkenkopf einwirken können.

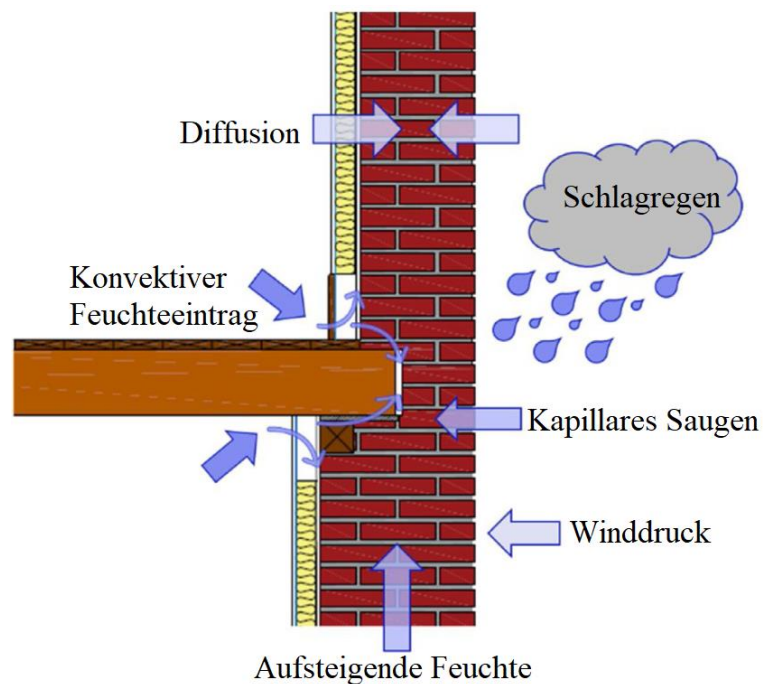


Abbildung 25: Feuchtequellen am Balkenkopf [23]

Für die Bewältigung der dargestellten Probleme gibt es mehrere Lösungsansätze. Für den Schlagregenschutz gelten die verschärften Anforderungen aus der WTA 6-5 (Abbildung 15). Aufsteigende Feuchte spielt in der Regel nur bei Kellerdecken eine Rolle da, die freie Steighöhe im Mauerwerk durch die häufigen Materialwechsel begrenzt ist [23]. Insbesondere hygroskopische Feuchte durch Salzeinlagerungen wird häufig mit aufsteigender Feuchte verwechselt.

Die Balken durchdringen die Innendämmung und es entsteht unweigerlich eine Wärmebrücke. Hierfür gibt es zwei Lösungsansätze:

- Der erste Ansatz ist in Abbildung 25 dargestellt: Um den Balken wird bewusst ein Wärmeverlust hingenommen, um die Trocknung nach Regenereignissen sicherzustellen und die relative Feuchte und somit auch die absolute Feuchte zu begrenzen.

Das Hauptrisiko bei dieser Konstruktionsart ist, dass sich durch konvektiven Feuchteeintrag größere Feuchtemengen akkumulieren, als dies durch Diffusion bei der ersten Variante geschehen kann.

Der Erfolg der Umsetzung hängt maßgeblich von der Luftdichtheit der Ausführung ab. Konvektiver Feuchteeintrag in den Bereich der Wärmebrücke muss zwingend vermieden werden.

- Alternativ wird der Balken möglichst eng in die Dämmschicht eingebunden und die Oberfläche der Innendämmung im Bereich der Balkendurchdringung mit dem Balken großflächig verklebt. Ziel ist es konvektiven Feuchteeintrag und Diffusionsbrücken zu vermeiden. Insbesondere dann, wenn das Bestandsmauerwerk eine gute thermische Qualität hat, sind keine Schäden zu erwarten. Nachteilig ist, dass die Bestandswand und der Balken komplett freigelegt werden müssen. Dies erlaubt eine durchgehende Dämmschicht vom untersten Geschoss bis unters Dach und verspricht den besten Wärmeschutz.

Problematisch kann sich dies auf den Schallschutz auswirken, da der Innendämmstoff die Etagen aus akustischer Sicht „miteinander verbindet“. Aufgrund ihrer geringen Dichte haben Dämmstoffe keine optimalen Schallschutz Eigenschaften. Dieses Problem kann durch sauberes Anarbeiten und die Verwendung von Randdämmstreifen minimiert werden. Durch die Randdämmstreifen wird das Übertragungsrisiko von Körperschall aus dem Boden auf die Wand reduziert.



Abbildung 26: Abgedichtete Balkenköpfe mit Innendämmung [52]

Folgende Abbildung zeigt, wie die Innendämmung bei Holzbalkendämmung mit einer Dämmung des Raumes zwischen den Balken umgesetzt werden kann. Hierfür ist die Decke im Bereich der Wände um wenige cm zu öffnen, sodass die Abdichtung der Balken erfolgen kann und eine Dämmplatte von mindestens 2 cm Stärke eingebracht werden kann. Wenn es die Platzverhältnisse erlauben, kann auch mit der Nennstärke der Innendämmung gedämmt werden.

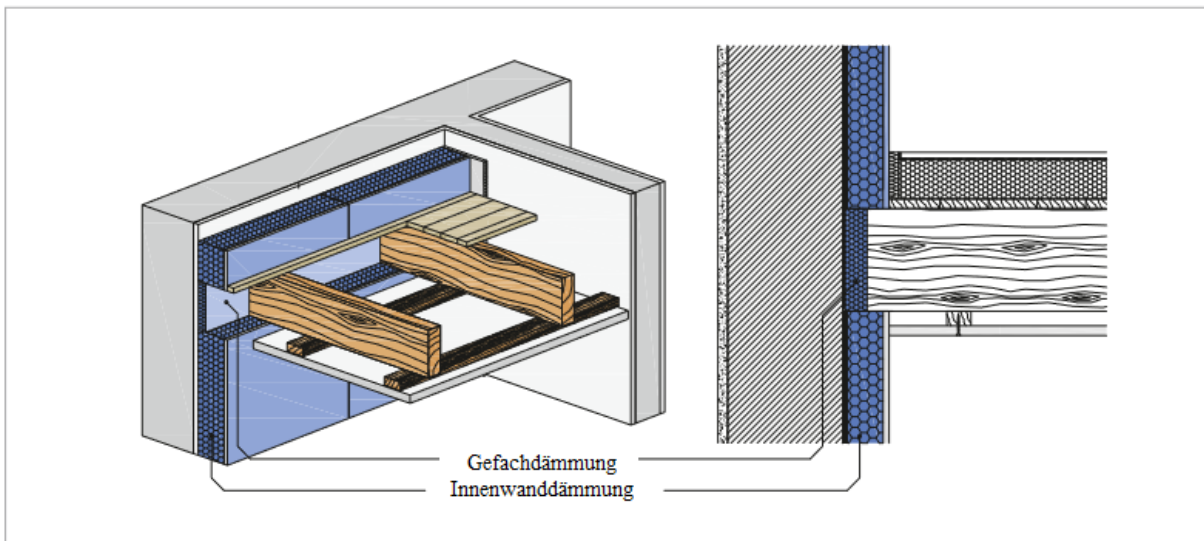


Abbildung 27: Ausführung einer Gefachdämmung [53]

Bei einer Kernsanierung scheint die letztere Lösung die aus hygrothermischer Sicht „vollständigere“ Lösung zu sein, da sie das Risiko des konvektiven Feuchteintrags geringhält und die Entstehung von Wärmebrücken minimiert.

Voraussetzung ist allerdings immer, dass der äußere Schlagregenschutz gegeben ist und die Balken in der Vergangenheit noch nicht geschädigt wurden. Wenn einzelne Räume oder Etagen schrittweise gedämmt werden, kann Ansatz 1 angewendet werden.

Ähnlich ist auch vorzugehen, wenn im Laufe der Zeit einzelne Stahlträger zur Unterstützung der Deckenkonstruktion eingezogen wurden. Der Träger an sich muss mit in die Dämmung integriert und die Wärmebrücke durch „einpacken“ des Trägers minimiert werden. In jedem Fall sind genauere Untersuchungen notwendig.

2.3.5 Einfluss von Grenzflächen und Gaseinschlüssen im Mauerwerk auf den Wärme- und Feuchtetransport

Die Grenzflächen im Mauerwerk zwischen Steinen, Mörtel und Gaseinschlüssen haben im Mauerwerk entscheidenden Einfluss auf die Wärmeleitung und die Feuchteausdehnung.

Während die Charakterisierung eines reinen Baustoffs im Labor häufig klare und nachvollziehbare Messwerte bezüglich der Wärmeleitung, des Wasseraufnahmekoeffizienten und des Diffusionswiderstandes liefert, ist Charakterisierung eines Gemisches z.B. in einem Bruchsteinmauerwerk, aus unterschiedlich großen Steinen unterschiedlicher Herkunft und nicht einheitlicher Mörtelmischungen nicht so einfach möglich.

Brocken hat bereits 1998 in seiner Dissertation *Moisture transport in brick masonry: the grey area between bricks* [24] bemerkt, dass die Simulation mit idealisierten Materialkennwerten ohne Berücksichtigung der Grenzflächen und Mörtelschichten nur zu Näherungswerten führen kann. Er stellt in seinen Untersuchungen fest, dass die Kapillardrücke beim Wasseraufnahmeversuch in den unterschiedlichen Materialien stark schwanken und damit die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Feuchte variieren kann.

Eine Charakterisierung dieser Grenz- und Kontaktflächen mittels einfacher Parameter, die in die numerischen Berechnungen zum Feuchtetransport implementiert werden können, existieren nach Wissenstand des Autors bis heute nicht.

Bei der Einflussbewertung auf den Wärmetransport besteht hingegen die Möglichkeit, den Wärmedurchgang am Bauteil mittels einer Wärmeflussplatte in der Heizperiode zu bestimmen und daraus Rückschlüsse auf einen integralen Wärmedurchgangskoeffizienten über alle Materialschichten zu ermitteln. Dieser Materialkoeffizient kann dann als Eingangsparameter in die Simulation integriert werden.

Bereits Hoos [25] hat 2015 festgestellt, dass zahlreiche historische Mauerwerke, deren berechnete U-Werte aufgrund der idealisierten und tabellierten Materialeigenschaften um $2,1 \text{ W/m}^2\text{K}$ liegen müssten, bei Langzeitmessungen über > 9 Tage experimentelle U-Werte von $0,9\text{-}1,2 \text{ W/m}^2\text{K}$ erreichten und somit 30 % bis 60 % unter typischen Werten aus Bauteilkatalogen liegen.

Ähnliche Ergebnisse wurden in Messungen ermittelt, die im Zuge dieses Projektes an Gebäuden des Bestandes der ABP durchgeführt wurden. Als Ursachen hierfür wurden zum einen die in der Norm für die Heizlastberechnung sehr konservativ angenommenen Wärmeübergangskoeffizienten (insbesondere auf der Außenseite) und zum anderen die zahlreichen Gaseinschlüsse + Grenzflächen im Bruchsteinmauerwerk erkannt.

Diese Gaseinschlüsse mit wenigen Millimetern Durchmesser in zwei-schaligem Bruchsteinmauerwerk wirken wie weitgehend beruhigte Luft in Dämmstoffen und reduzieren somit signifikant den Wärmedurchgang. Thermografieaufnahmen haben gezeigt, dass sich trotzdem homogene Oberflächentemperaturen ausbilden und es sich nicht nur um lokale Effekte handelt.

2.4 Nachweisverfahren

Um langfristige Feuchtigkeitsschäden (Frost, Schimmel, Pilze, etc.) durch Tauwasser im Winter oder Sommer zu vermeiden, müssen Bauteile nach DIN 4108-3 und ISO 13788 geprüft werden. Für Innendämmungen stellt die WTA zusätzlich den vereinfachten Nachweis in Merkblatt 6-4 zur Verfügung.

In der Praxis gibt es also vier mögliche Varianten des Funktionsnachweises:

- Nachweisfreie Konstruktionen gemäß DIN 4108-3
- Das Glaserverfahren als Diffusionsnachweis gemäß DIN 4108-3
- Den vereinfachten Nachweis nach WTA 6-4
- Numerische Nachweisverfahren mittels Software (WUFI, Delphin, und andere)

2.4.1 Nachweisfreie Konstruktionen gemäß DIN 4108-3

An die nachweisfreien Konstruktionen gelten folgende Anforderungen:

- $\Delta R \leq 1,0 \quad [\text{m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}]$
- $s_d \geq 0,5 \quad [\text{m}]$

Somit sind diese auf eine Dämmstärke von vier cm bei konventionellem Dämmstoff der WLG 040 limitiert. Dabei hat sich herausgestellt, dass Bestandskonstruktionen, die ohne Innendämmung funktioniert haben auch bis zu einer gewissen Dämmstärke und bei minimalem Diffusionswiderstand der Innendämmung von mindestens einem halben Meter auch mit Innendämmung funktionieren.

Geht man von einem U-Wert im Bestand von $1,5 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ kann mit 4 cm Dämmung bereits ein U-Wert von $0,6 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ erreicht werden.

Ist der U-Wert im Bestand $1,0 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ kann eine Verbesserung auf $0,5 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ erreicht werden.

Übliche Dämmaufbauten sind:

- EPS mit Gipsputz
- Mineralwolle mit Dampfbremse
- Holzfaser mit diffusionsbremsendem Putzsystem

2.4.2 Das Glaserverfahren

Mit dem Glaserverfahren können unter der Voraussetzung, dass der äußere Schlagregenschutz gegeben ist, auch höhere Dämmstärken berechnet werden. Es handelt sich dabei um eine Untersuchung, ob und wie viel Tauwasser in einem Bauteil (z.B. Außenwand oder Dach) aufgrund von Diffusionsvorgängen ausfällt. Das Verfahren umfasst die Berechnung des U-Wertes und der Temperaturen an den Schichtgrenzen sowie der Wasserdampf-sättigungsdrücke, die Erstellung des Glaser-Diagramms und schließlich die Berechnung des Tauwassers. Das Diagramm zeigt, unter

welchen Bedingungen und an welchen Stellen im Bauteil Tauwasser entstehen kann und wie das Tauwasser wieder abgeführt wird.

Das Glaserverfahren kann als konservativ bezeichnet werden. Wenn eine Konstruktion nach der Glaser-Methode unkritisch ist, wird sie aus hygro-thermischer Sicht immer funktionieren. Das heißt aber nicht, dass eine nach Glaser als problematisch angesehene Konstruktion in der Praxis nicht auch funktioniert. Der Nachweis diffusionsoffener Innendämmsysteme gestaltet sich mit dem Glaserverfahren schwierig. Die Methode berücksichtigt nur Diffusionsvorgänge; Sorption und Phänomene des entgegen dem Diffusionsstrom gewandten Flüssigtransport werden bei der Berechnung nicht berücksichtigt.

Prinzipiell gibt es zwei Arten: Das Monatsbilanzverfahren und das Periodenbilanzverfahren. Da die Temperaturen beim Monatsbilanzverfahren nicht normiert sind, verwenden wir das vollnormierte Periodenbilanzverfahren. Die Rahmenbedingungen sind in Tabelle A.3 der DIN 4108-3 festgelegt:

Tabelle A.3 — Klimabedingungen für die Beurteilung der Tauwasserbildung und Verdunstung im Inneren von Bauteilen						
Klima	Temperatur	Relative Luftfeuchte	Wasserdampf-teildruck	Dauer		
	θ	ϕ	p	t		
	°C	%	Pa	d	h	s
Tauperiode von Dezember bis Februar						
Innenklima	20	50	1 168	90	2 160	$7\,776 \cdot 10^3$
Außenklima	-5	80	321			
Verdunstungsperiode von Juni bis August ^a						
Wasserdampf-teildruck Innenklima			1 200	90	2 160	$7\,776 \cdot 10^3$
Wasserdampf-teildruck Außenklima			1 200			
Sättigungsdampfdruck im Tauwasserbereich:			1 700			
— Wände, die Aufenthaltsräume gegen Außenluft abschließen; Decken unter nicht ausgebauten Dachräumen						
— Dächer, die Aufenthaltsräume gegen Außenluft abschließen			2 000			

^a In der Verdunstungsperiode werden im Rahmen des Perioden-Bilanzverfahrens nicht die Temperaturen und Luftfeuchten, sondern nur die gerundeten Wasserdampf-teildrücke als Klima-Randbedingung vorgegeben.

^a In der Verdunstungsperiode werden im Rahmen des Perioden-Bilanzverfahrens nicht die Temperaturen und Luftfeuchten, sondern nur die gerundeten Wasserdampfdrucke als Klima-Randbedingung vorgegeben.

Abbildung 28: Klimabedingungen für das Periodenbilanzverfahren der DIN 4108 [3]

Das Glaserverfahren verlangt eine präzise Definition der klimatischen Umgebungsbedingungen. Diese sind genormt, können aber auch kritischer oder „bauteilfreundlicher“ gestaltet werden. So können auch landesspezifische Besonderheiten, wie besonders kalte oder milde Winter berücksichtigt werden. In Anhang A ist ein Rechenbeispiel ausführlich beschrieben.

2.4.3 Das vereinfachte Nachweisverfahren nach WTA 6-4

Das vereinfachte Nachweisverfahren für Innendämmkonstruktionen der WTA ermöglicht mit Hilfe einer leicht verständlichen Grafik und wenigen, klar definierten Randbedingungen die Erbringung eines Nachweises für Innendämmkonstruktionen. Es geht dabei hinsichtlich der wärmeschutztechnischen Verbesserung deutlich über die nachweisfreien Konstruktionen der DIN 4108-3 hinaus.

Die Kernaussage der Grafik lautet, dass der erforderliche Diffusionswiderstand s_d des inneren Dämmmaterials inkl. Raumabschluss mit steigendem ΔR der Innendämmung und sinkender Wasseraufnahmefähigkeit w_a auf der Innenoberfläche der Bestandswand wachsen muss.

Folgende Abbildung entspricht inhaltlich weitgehend der Grafik aus dem Merkblatt und wurde nur auf der um die äquivalente Dämmstärke bei einem Material mit der WLГ 040 ergänzt.

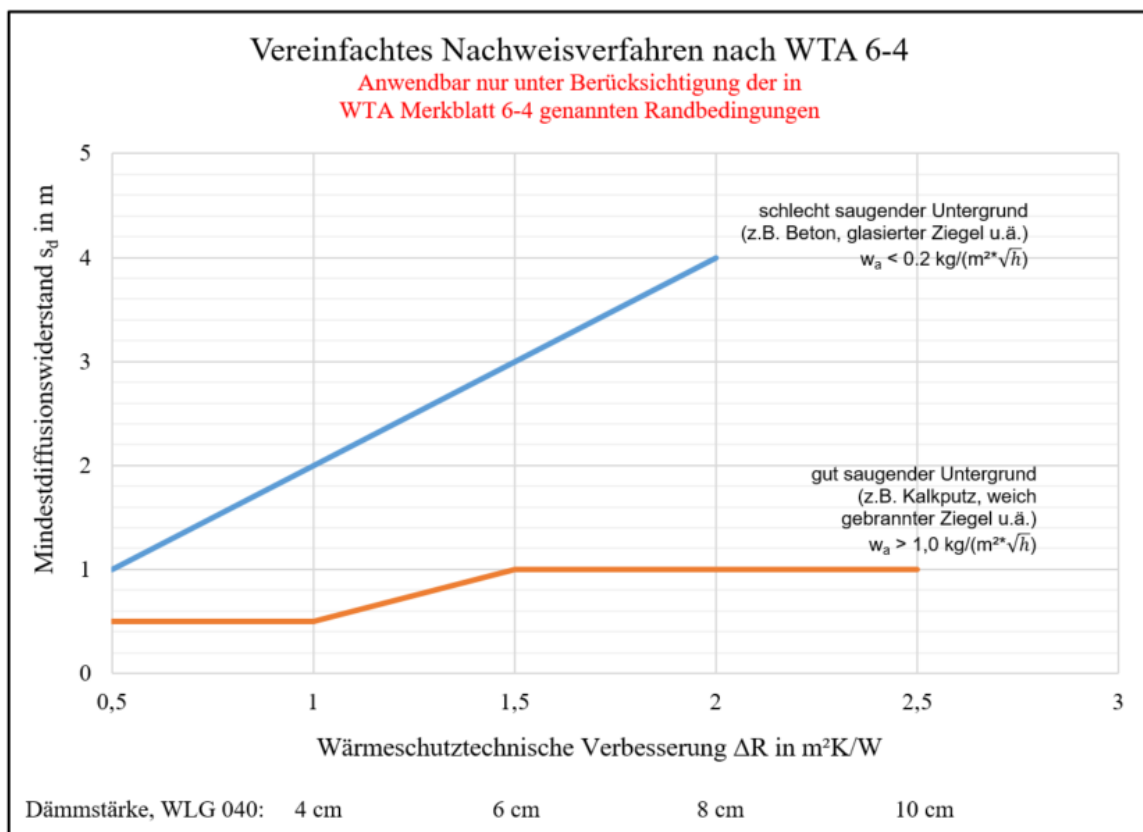


Abbildung 29: Vereinfachtes Nachweisverfahren der WTA 6-4

Dabei werden im Verfahren prinzipiell zwei unterschiedlich stark saugende Untergründe als Grenzlinien berücksichtigt. Die orangene bildet den Minstdiffusionswiderstand s_d der Innendämmung bei saugfähigem Untergrund ab, die blaue Linie für schlecht saugenden Untergrund. Die Unterscheidung erfolgt mittels eines im Saugversuch ermittelten Wasseraufnahmekoeffizienten w_a , wobei Zwischenwerte interpoliert werden können.

Folgende Randbedingungen müssen neben den drei Kernkriterien (s_d , w_a , ΔR) für die Anwendung der vereinfachten Methode erfüllt sein:

- Die Feuchtigkeitsbelastung im Raum sollte "normale Bedingungen" nach WTA 6-2 nicht überschreiten (vgl. Abb. 32, 33).
- Zusätzliche Feuchtigkeitsquellen im Mauerwerk müssen ausgeschlossen werden.
- Die durchschnittliche jährliche Außentemperatur sollte über 7 °C liegen. Die mittlere Außentemperatur in Luxemburg liegt bei rund 9 °C.
- Eine Hinterlüftung der Dämmschicht mit feuchter Raumlufte muss durch vollflächigen Kontakt der Dämmschicht mit der Bestandswand und bauseits korrekt ausgeführte Bauteilanschlüsse ausgeschlossen werden.
- Außenseitige Beschichtungen müssen schlagregendicht laut WTA-Merkblatt 6-5 sein:

$$w_a * s_d \leq 0,1 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \sqrt{\text{h}})$$

$$w_a \leq 0,2 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \sqrt{\text{h}})$$

$$s_d \leq 1,0 \text{ m}$$

- Das vorhandene Mauerwerk hat einen minimalen Wärmedurchgangswiderstand von $R \geq 0,4 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$ aufzuweisen. Dies entspricht einem U-Wert $\leq 2,5 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$.
- Die vorhandene Wand und die Dämmschicht müssen bis zu 95% Gleichgewichtsfeuchte feuchtigkeitsbeständig sein.

Zusätzlich enthält der Leitfaden des Merkblattes folgende allgemeine Planungsinformationen:

- Ein besserer R-Wert der bestehenden Konstruktion führt grundsätzlich zu einem geringeren Kondenswasserrisiko und ermöglicht größere Schichtdicken der Innendämmung.
- Die Schadensfreiheit in Anschlussbereichen wie Decken, eingebundene Innenwände, Fensterbänke usw. muss durch eine Wärmebrückenberechnung sichergestellt werden.
- Je diffusionsdichter das innere Dämmsystem ist, desto geringer fällt das Trocknungspotential nach innen aus. Das Prinzip der Bauphysik gilt: **So diffusionsdicht wie nötig, so diffusionsoffen wie möglich.**
- Um die kapillaraktiven Eigenschaften der Innendämmsysteme während des Entwurfs zu berücksichtigen, wird ein rechnerischer Nachweis nach WTA 6-5 empfohlen. Dies bedeutet formal, dass mit dem vereinfachten Verfahren (vgl. Abb. 28) keine kapillaraktiven Dämmstoffe nachgewiesen werden können, da diese häufig einen geringeren Diffusionswiderstand als 1 m aufweisen.

2.4.4 Numerische Simulationsverfahren

Neben dem Glaserverfahren nach ISO 13788 und DIN 4108-3 steht der Nachweis mittels Simulation des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransportes zur Verfügung. Diese Simulationsprogramme wurden ab Beginn der 90er Jahre entwickelt und stehen heute ausgereift zur Verfügung.

Es ist empfehlenswert sich bei der Nachweisführung an das WTA Merkblatt 6-1 zu halten. Prinzipiell können Simulationen mit stationären und in-stationären Randbedingungen bei eindimensionalen und zweidimensionalen Bauteilen durchgeführt werden. Die Schwierigkeit der Bewertung nimmt mit der Komplexität der Simulation zu.

Die wesentlichen Bewertungskriterien sind in WTA Merkblatt 6-5 enthalten und wurden bereits in Kapitel 2.3.1.3 *WTA Merkblätter* erläutert.

In Deutschland wurden seit Anfang der 90er Jahre zwei Softwarelösungen zum gekoppelten Wärme- und Feuchtetransport sowohl am Bauklimatiklabor der TU Dresden (Software Delphin) sowie am Fraunhofer Institut für Bauphysik (Softwarefamilie WUFI) in Stuttgart und Holzkirchen parallel entwickelt und validiert. Sie basieren im Kern auf den Dissertationen von John Grunewald (heute Leiter des Bauklimatiklabors an der TU Dresden) und Hartwig Künzel (heute Abteilungsleiter Hygrothermik Fraunhofer IBP).

In beiden Softwarelösungen ist die Durchführung einer Simulation ähnlich:

- Definition des Wandaufbaus (Material aus Datenbank oder manuell)
- Definition der klimatischen Randbedingungen (aus Datenbank oder Messungen)
- Anpassung der Oberflächenkoeffizienten
- Startzeitpunkt und Dauer der Simulation
- Anfangsbedingungen (Feuchte und Temperatur)
- Festlegung der kritischen Punkte und Erstellung von Temperatur- und Feuchteprofilen
- Bewertung der Simulation (u.a. Prüfung der Numerik auf Konvergenzfehler)

Die Ergebnisausgabe kann weitgehend individuell gestaltet werden. Im Rahmen von Analysen zur Innendämmung ist es hilfreich, sowohl die kritische Stelle unter der Innendämmung z.B. Feuchte und Temperatur im Klebemörtel, als auch die Feuchteentwicklung unter dem Außenputz sowie im Mauerwerkskern zu beobachten.

Ein Kriterium für eine erfolgreiche Simulation ist die Erreichung des eingeschwungenen Zustandes. Insbesondere die korrekte Auswahl des Außenklimas ist hier eine Herausforderung, da bei einer Langzeitsimulation, die Verwendung eines besonders kalten und feuchten Jahres über mehrere Simulationsjahre zu einer deutlich zu konservativen Einschätzung führt und viele Konstruktionen ausschließt, die aber in der Praxis seit vielen Jahren funktionieren.

Generell gilt es mit der Simulation zuerst den ungedämmten Zustand abzubilden und dann mit einfachen Anpassungen zu beginnen. Mehrdimensionale Simulation sind erst sinnvoll, wenn die eindimensionale Simulation ausgereizt wurde.

2.5 WUFI Simulationstools

WUFI ist eine Familie von Softwareprodukten des Fraunhofer Institutes für Bauphysik, welche im Prinzip realitätsnahe Berechnungen des gekoppelten ein- oder zweidimensionalen Wärme- und Feuchtetransports in Wänden und anderen mehrschichtigen Bauteilen ermöglichen, die natürlichen Wetterbedingungen ausgesetzt sind. WUFI ist ein Akronym für "**W**ärme **U**nd **F**euchte **I**nstationär". Die WUFI Software nutzt die neuesten Erkenntnisse zur Dampfdiffusion und zum kapillaren Feuchtetransport in Baustoffen. Die Software wurde durch einen detaillierten Vergleich mit Messungen im Labor und auf dem Freilandprüfplatz des Fraunhofer IBP in Holzkirchen validiert.

WUFI berechnet die transiente zeitliche Entwicklung der Temperatur- und Feuchtefelder in einem eindimensionalen Querschnitt einer Komponente, die aus mehreren Schichten unterschiedlicher Materialien bestehen kann. Die Verwendung vereinfachter Transportmodelle, die auf die bauphysikalischen Gegebenheiten zugeschnitten sind, erleichtert die praktische Anwendung und Interpretation der Ergebnisse.

Der Schichtaufbau der Komponente wird über ein grafisches Eingabefeld eingegeben. Die jeweiligen Materialeigenschaften können einer mitgelieferten Materialdatenbank entnommen oder vom Benutzer manuell eingegeben werden. WUFI verwendet relativ einfache, beschreibende Funktionen, die die Plausibilitätsprüfung von Eingaben und die Messung oder Schätzung von fehlenden Daten erleichtern. In einigen Fällen stehen zusätzlich Näherungsfunktionen zur Verfügung, um fehlende Kennwerte aus anderen Standardmerkmalen zu ermitteln.

Als Randbedingungen können Wetterdaten angegeben werden, so dass der Einfluss der natürlichen Bewitterung durch Anwendung der Lufttemperatur und -feuchtigkeit, der Strahlung (direkt, diffus sowie Gegenstrahlung) und ggf. der Schlagregenbelastung (Windgeschwindigkeit, -stärke, Exposition, Niederschlagsmenge) berücksichtigt werden kann.

Bei der Berechnung ermittelt WUFI die instationäre Entwicklung der Temperatur- und Feuchteprofile im Bauteil in einstündigen Schritten. Die betrachteten Transportmechanismen sind Wärmeleitung, Wasserdampfdiffusion und Flüssigtransport. Die Speicherkapazitäten der Materialien für Wärme und Feuchtigkeit werden durch die spezifische Wärmekapazität und die Feuchtespeicherfunktion beschrieben.

Das Ergebnis einer Simulation kann in einem Zeitrafferfilm abgespielt und später mittels diverser Liniendiagramme (z.B. Feuchte und Temperatur über der Zeit) analysiert werden. Folgende Abbildung zeigt das Endbild einer Simulation eines von innen gedämmten Mauerwerkes mit wasserdichtem, mineralischem Außenputz und einem 10 cm starken, diffusionsoffenen Innendämmsystem. Im oberen Teil der Darstellung ist der instationäre Temperaturverlauf von außen (links) nach innen (rechts) mit einer roten Linie dargestellt. Die violette Linie entspricht der Taupunkttemperatur. Im unteren Teil sind die relative Porenluftfeuchte sowie die im Zeitrahmen der Simulation überstrichenen Feuchtwerte grün dargestellt.

Die blaue Linie zeigt den absoluten Wassergehalt [kg/m^3].

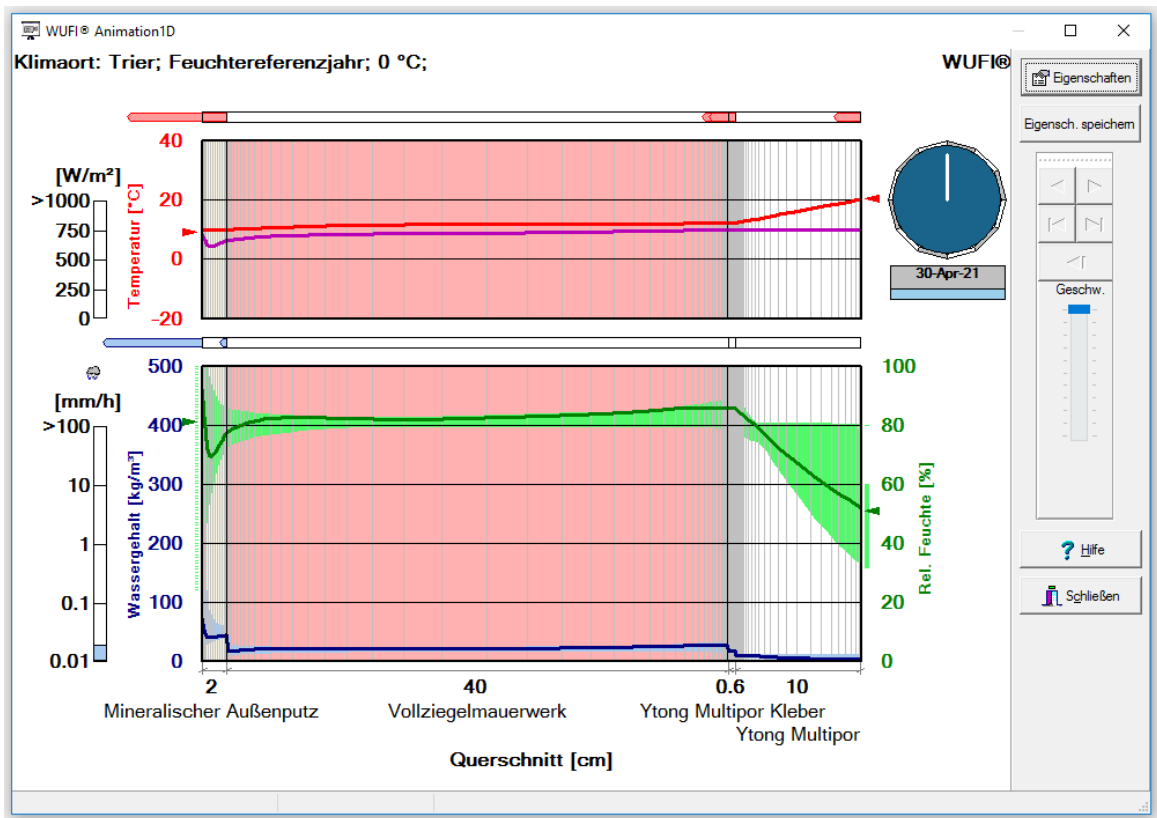


Abbildung 30: Simulationsergebnis einer 1D WUFI Simulation mit WUFI Pro 6.5

Berechnungsgrundlagen

Die Modellierung der in-stationären Wärme- und Feuchtetransportvorgänge basiert auf den Erhaltungssaxiomen der klassischen Physik, d. h. der Erhaltung von Masse und Energie. Die Erhaltungssätze besagen, dass die resultierenden Zu- und Abflussraten zusammen mit der lokalen Erzeugungs- oder Absorptionsrate dieser Mengen gleich der zu erhalten Mengen sind [26].

Die zeitlich variablen Transportvorgänge werden durch die folgenden partiellen Differentialgleichungen beschrieben. Auf der linken Seite sind jeweils die Speicherterme und auf der rechten Seite die Transportterme aufgetragen. Die Wärmespeicherung wird durch die Wärmekapazität des Baumaterials und die darin enthaltene Feuchtigkeit bestimmt.

$$\text{Wärmetransport} \quad \frac{\partial H}{\partial T} * \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda * \frac{\partial T}{\partial x} \right) + h_v * \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\delta}{\mu} * \frac{\partial p_D}{\partial x} \right) \quad (21)$$

$$\text{Feuchtetransport} \quad \rho_w * \frac{\partial w}{\partial \varphi} * \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} * \left(\rho_w * D_w * \frac{\partial w}{\partial \varphi} * \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\delta}{\mu} * \frac{\partial p_D}{\partial x} \right) \quad (22)$$

Neben diesem Modell von Künzle [5] existieren noch weitere Modelle von Grunewald [27], Liu [28] und anderen, die im Kern allerdings auch die oben genannten Erhaltungssätze und Materialparameter nutzen.

3 Bauphysikalische Untersuchungen

Im Vorfeld einer Innendämmmaßnahme kommen diverse Messmethoden für die Untersuchung der Bestandskonstruktion in Frage. Folgende Kriterien entscheiden über die Sinnhaftigkeit einer Messung im Vorfeld:

- Dauer bis zum Umbau
- Klimabedingungen während der Messperiode
- Umfang der Sanierung
- Zukünftige Nutzung des Gebäudes
- Ziele der Dämmmaßnahme

So macht es zum Beispiel keinen Sinn wenige Wochen vor Umbaubeginn mit einer Dauermessung zu beginnen, die zum Beispiel eine Winterperiode abdecken soll. Die Messung des Wasseraufnahmekoeffizienten an der Außenfassade ist ebenfalls nur dann sinnvoll, wenn die Außenfassade im Rahmen der Sanierung nicht neu verputzt oder angestrichen wird.

3.1 Verfügbare Messmethoden

3.1.1 Innenklima

Eine Messung des Innenklimas ist dann sinnvoll, wenn sich die Nutzung des Gebäudes in Zukunft ähnlich verhält. Sie kann Aussagen über das Lüftungsverhalten, die Luftdichtigkeit des Gebäudes, sowie die Nutzungsintensität ermöglichen. Dafür sollten folgende Parameter über einen Zeitraum von mehreren Wochen oder Monaten mitgeschrieben werden. Stundenmittelwerte haben sich als geeignet herausgestellt. Auch vor dem Hintergrund, dass Daten von öffentlichen Wetterstationen in der Regel in Form von Stundenwerten verfügbar sind und diese sich so leichter vergleichen lassen.

- Raumlufttemperatur [°C]
- Relative Raumluftfeuchte [%]
- CO₂ [ppm]

Ein direkter Vergleich der klimatischen Bedingungen auf der Raumseite mit der Außenlufttemperatur ermöglicht Rückschlüsse auf die Raumluftfeuchte mit Hilfe von Normwerten zu ziehen. Die Abklingkurve des CO₂ Pegels ermöglicht, den Luftwechsel zu bestimmen.

Folgende Abbildung zeigt eine knapp zwei monatige Messung in einem Konferenzraum. Anhand des CO₂ Niveaus ist die Nutzungszeit gut zu erkennen. Das schnelle Abklingen des CO₂ Niveaus lässt auf einen generell hohen Luftwechsel schließen. Das Niveau der relativen Luftfeuchte zeigt eine starke Abhängigkeit von der Nutzung, während die Raumlufttemperatur davon weniger betroffen ist.

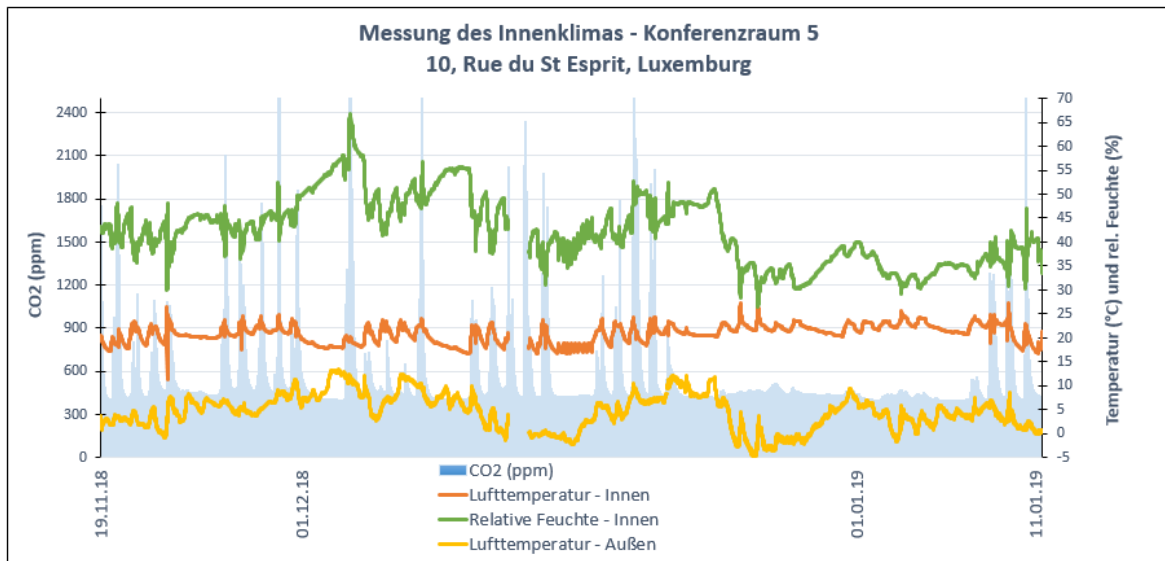


Abbildung 31: Vormessung des Innenklimas über zwei Monate

Um die relative Feuchtigkeit in der Raumluft beurteilen zu können, ist eine Einordnung in die vier Feuchtestufen der DIN EN 15026 / WTA 6-2 sinnvoll. Diese gibt vier unterschiedliche Feuchtestufen an (vgl. Abb. 16).

Es ist zu berücksichtigen, dass ab einer Außentemperatur von 10 °C und darunter konstant eine Raumtemperatur von 20 °C angenommen wird. In der Praxis jedoch können insbesondere durch die Nachtabsenkung oder bei intensiver Raumnutzung mit vielen Personen die Temperaturen abweichen. Daher kann es Sinn machen, die relativen Feuchte zusammen mit den zugehörigen Temperaturwerten in den Wasserdampfpartialdruck umzurechnen. Hierfür existieren mehrere Ansätze, wobei nachfolgend die sogenannte Magnus Formel zur Berechnung des Wasserdampfpartialdruckes in der Raumluft angewandt wurde (Abweichung $\leq 0,5\%$):

$$p_{pd} = \varphi * 611,2 * e^{\left(\frac{17,62 + \vartheta}{243,12 + \vartheta}\right)} \quad (23)$$

Wobei:

p_{pd}	Wasserdampfpartialdruck [Pa]
φ	Relative Luftfeuchte [%]
ϑ	Temperatur [°C]

Die Formel gilt für den Temperaturbereich für Luft über Wasser von -50 bis 100 °C und den Umgebungsdruck von 101325 Pa. Sobald man die gemessenen Stundenpaare aus der relativen

Luftfeuchte innen gegen die Außentemperatur aufträgt, ergibt sich folgende Messwolke für die in der vorangegangenen Abbildung 31 dargestellten klimatischen Bedingungen.

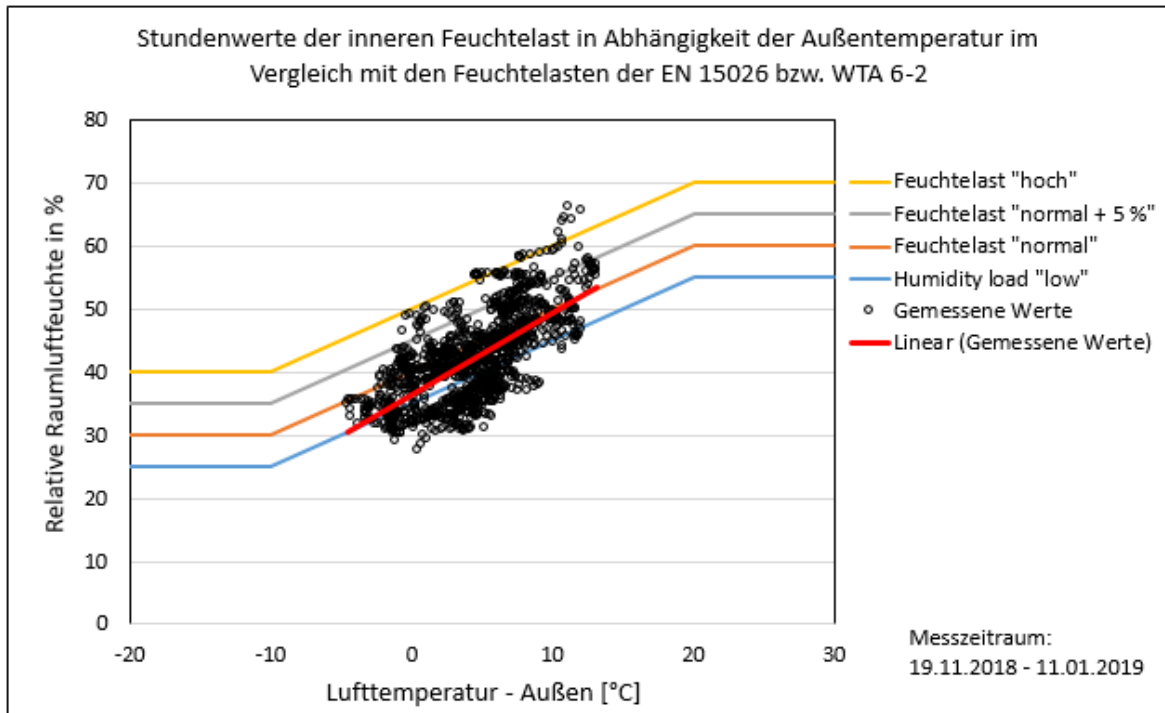


Abbildung 32: Stundenwerte der inneren Feuchte in % r.F. gegen Außentemperatur

Um den Einfluss der Raumtemperatur zu berücksichtigen kann mit Hilfe der Magnus-Formel der Wasserdampf-sättigungsdruck ermittelt und durch Multiplikation mit der relativen Raumlufffeuchte daraus der Wasserdampfpartialdruck errechnet werden [29].

Die in der folgenden Abbildung 33 im Vergleich zur Abb. 16 links (S. 47) auftretenden Knicke in den Wasserdampfpartialdruckkurven bei einer Außentemperatur von 10 °C treten durch den Anstieg der Innenlufttemperatur von 20 °C auf 24 °C auf (vgl. Abb. 16 rechts).

Trägt man nun die so ermittelten Partialdrücke gegenüber der Außenlufttemperatur auf, erhält man folgende Abbildung:

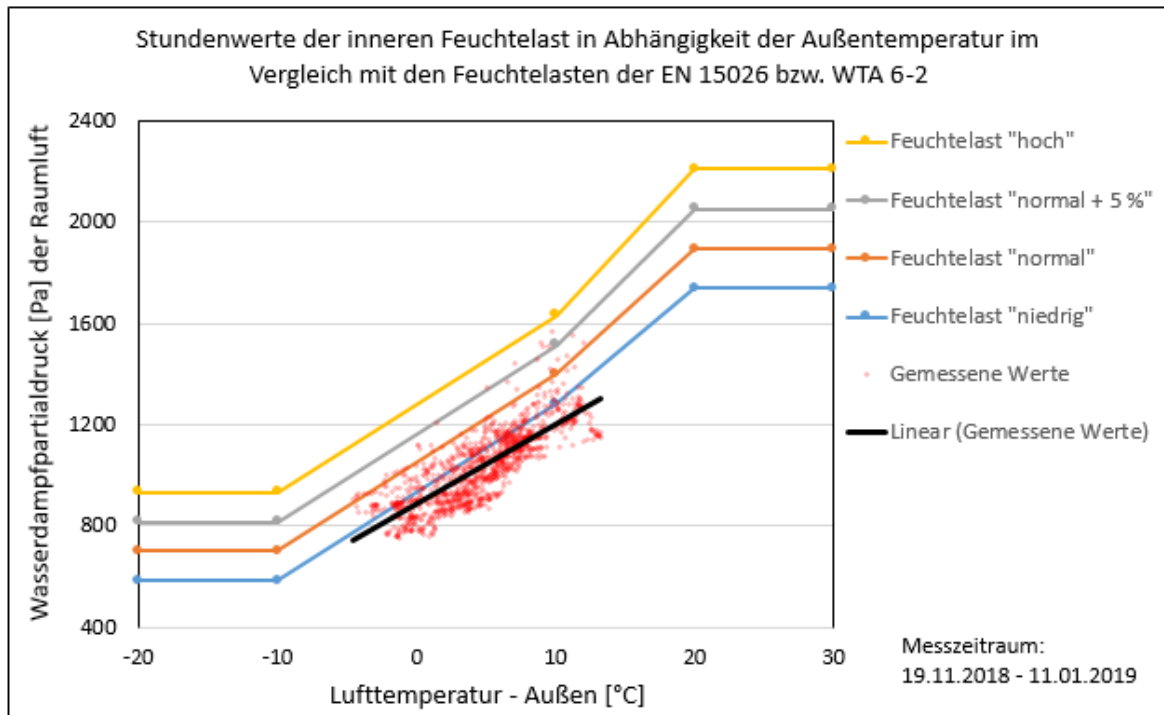


Abbildung 33: Stundenwerte der inneren Feuchte in Pa gegen Außentemperatur

In dargestelltem Beispiel stellt sich durch die genauere Betrachtung eine deutlich geringere Feuchtelast im Konferenzraum heraus. Die einfache Methode nach Abb. 31 hätte zu einer konservativeren Einschätzung und somit möglicherweise zum Ausschluss funktionierender Konstruktionen geführt.

3.1.2 Außenklima

Das Außenklima spielt wie das Innenklima eine erhebliche Rolle bei der Bewertung von Innendämmkonstruktionen. Insbesondere die eingeschränkte Vorhersagbarkeit führt zur Verwendung eher konservativer Feuchtereferenzjahre.

Relevante Parameter für die numerische Simulation sind die folgenden:

- Außentemperatur [°C]
- Relative Feuchte [%]
- Regen [mm]
- Windgeschwindigkeit [m/s]
- Windrichtung [°]
- Direkte Strahlung [Wh]
- Diffuse Strahlung [Wh]
- Gegenstrahlung [Wh]
- Luftdruck [Pa]

Da sich die vor-Ort Messung einiger dieser Parameter schwierig gestaltet und sehr kostenaufwändig sein können, macht es Sinn auf öffentliche, kalibrierte Messstationen zurückzugreifen. In Luxembourg bietet das agrarmeteorologische Messnetz Onlinezugriff auf 33 Wetterstationen.

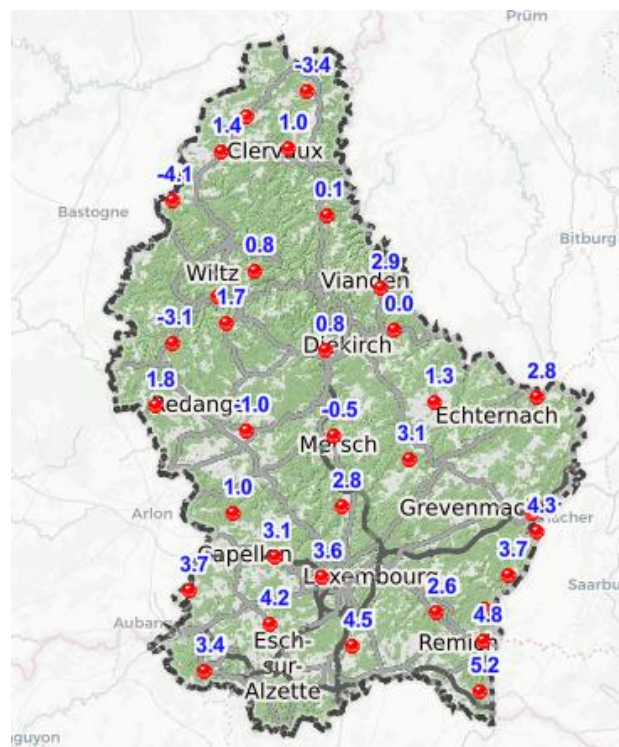


Abbildung 34: Stationsübersicht - Agrarwetterstationen Luxembourg [30]

3.1.3 Wärmefluss (U-Wert)

Eine Wärmeflussmessung an der Bestandswand dient der Beurteilung der thermischen Qualität eben dieser. Mit dem Ergebnis kann die exakte Dämmstoffdicke zur Erreichung eines Mindest-U-Wertes, sowie mögliche Einsparpotentiale berechnet werden. Folgender Messaufbau dient zur Erfassung des Wärmeflusses und der Temperaturverläufe:

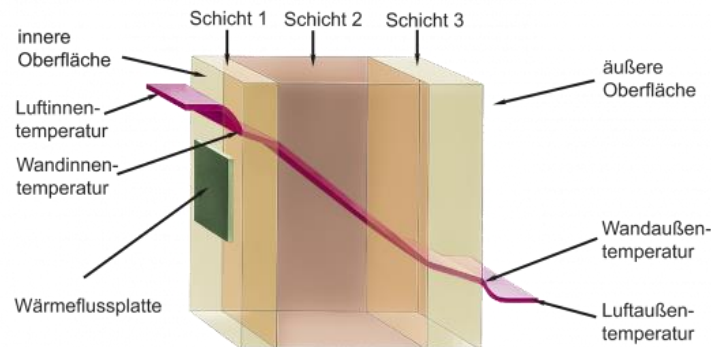


Abbildung 35: Messaufbau bestehend aus Wärmeflussplatte und vier Temperatursensoren [31].

Die Messprozedur ist in der *ISO 9869-1:2014: Wärmedämmung - Vor-Ort Messung des Wärmewiderstandes und des Wärmedurchgangs von Bauteilen - Teil 1: Verfahren mit dem Wärmestrommesser* genormt.

Da im Kontext der Innendämmung üblicherweise schwere Bauteile mit relativ hoher Wärmespeicherkapazität untersucht werden, ist es notwendig eine Messdauer von mehreren Tagen einzuhalten, um die, durch die Varianz der äußeren Temperatur entstehenden in-stationären Effekte auszugleichen.

Folgende Abbildung zeigt mögliche Temperaturverläufe im Bauteil. Während Linie ‚a‘ den stationären Wärmefluss darstellt, könnte zu Beginn der Messung auch das Temperaturprofil ‚b‘ und zum Ende der Messung Profil ‚c‘ vorgelegen haben. Die Differenz der Temperaturen multipliziert mit dem Wärmespeicherkoeffizienten des Materials ergeben einen Fehler in der Messung. Wenn die Messung aber sehr lange gedauert hat und ein entsprechend großer Wärmefluss durch das Bauteil stattgefunden hat, reduziert sich der Einfluss des beschriebenen Effektes auf das Messergebnis d.h. man nähert sich durch Messungen dem stationären Wert ‚a‘ an.

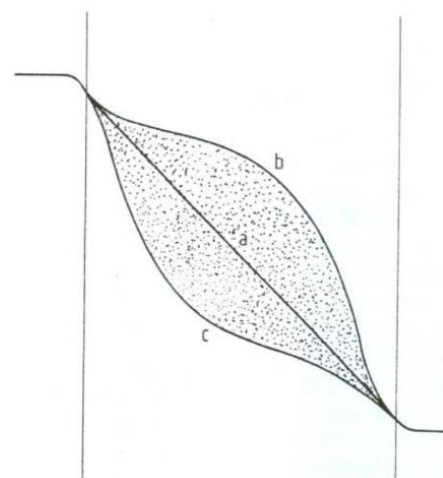


Abbildung 36: Skizzenhafte Darstellung des Temperaturverlaufs im Mauerquerschnitt

Die Durchschnittsmethode in der ISO 9869:2014 empfiehlt daher, dass eine Messung an einem schweren Bauteil mindestens 72 h dauern sollte und auch ein Vielfaches von 24 h, damit Tag-Nacht Unterschiede sich ausmitteln.

Generell sollte während der gesamten Messung eine ausreichend große Temperaturdifferenz vorherrschen. Empfohlen werden mindestens 10 K Unterschied. Umso größer der gesamte Wärmefluss während der Messung, desto geringer ist die Messunsicherheit. Während der durchgeführten Messungen hat sich einer Messdauer zwischen 7 und 14 Tagen als praktikabel herausgestellt.

Die Mittelwertmethode der ISO Norm definiert den Wärmedurchgangswiderstand des gemessenen Elements wie folgt:

$$R_t = \frac{\sum_{j=1}^n (T_{sij} - T_{sej})}{\sum_{j=1}^n q_i} \quad (24)$$

Wenn der Wert nach jeder Messung über einen ausreichend langen Zeitraum berechnet wird, wird eine Konvergenz zu einem asymptotischen Wert beobachtet. Dieser asymptotische Wert liegt nahe am tatsächlichen Wert, wenn die folgenden Bedingungen erfüllt sind:

- Die Temperatursensoren und der Wärmeflussensor sollten nicht der direkten Sonneneinstrahlung ausgesetzt sein. Es ist zu beachten, dass bei Sonneneinstrahlung auf die Außenfläche ein falsches Ergebnis erzielt werden kann (der ermittelte U-Wert ist dann zu niedrig).
- Der Wärmeleitwert des Elements ist während des Tests konstant und variiert nicht durch Feuchteinflüsse
- Der Wärmehalt des Elements ist am Ende und zu Beginn der Messung gleich (max. 5 % Abweichung gemäß ISO 9869), d. h. die durchschnittliche Temperatur der Wand bleibt annähernd gleich.

Exemplarische Wärmeflussmessung mit Hilfe einer künstlichen Messbox

Die Wärmeflussmessungen am künftigen Pro Familia-Gebäude in Düdelingen wurden im Januar und Anfang Februar 2018 u.a. an der ungedämmten Ostfassade durchgeführt. Da das Gebäude seit etwa 10 Jahren leer steht und nur minimal beheizt wird, wurde eine Messbox (2,5 m * 2,5 m * 2,2 m) gebaut, die elektrisch beheizt wurde, um einen geeigneten Wärmestrom durch das Außenmauerwerk zu erzeugen.

Die Messbox bestand aus OSB-Platten, die von innen mit einer 4 cm dicken Mineralwolldämmung versehen waren. Die Beheizung erfolgte mit einem elektrischen Radiator. Dieser wurde durch einen Ventilator angeblasen, so dass eine homogene, hohe Temperatur im Raum vorhanden war.

Das Kabel des Außentemperaturfühlers wurde durch ein vorhandenes Loch in der Wand nach außen geführt. Das Loch mit Mineralwolle im Anschluss verschlossen.



Abbildung 37: Außenansicht der Messbox



Abbildung 38: Innenansicht mit Heiz- und Messequipment

Gemessen wurde mit einer kalibrierten Wärmeflussplatte des Herstellers Ahlborn und für die Temperaturmessung wurden Ni-Cr Thermodrähte verwendet.

Nach einer Aufheizzeit von mehreren Tagen stabilisieren sich die Luft- und die Oberflächentemperaturen in der Messbox. Die Lufttemperatur liegt bei rund 38 °C während die Oberfläche ca. 35 °C erreicht. Die mittlere Differenztemperatur zwischen innen und außen liegt über den Betrachtungszeitraum bei ca. 33 K und somit deutlich über der Mindestdifferenz.

Folgende Abbildung zeigt die Messergebnisse der Wärmeflussmessung. Die gelbe Linie stellt dabei den R-Wert des Bauteils dar. Die blaue Linie den Mittelwert. Der experimentelle U-Wert ergibt sich aus dem Kehrwert der Summe aller Widerstände (Bauteil + Oberflächen).

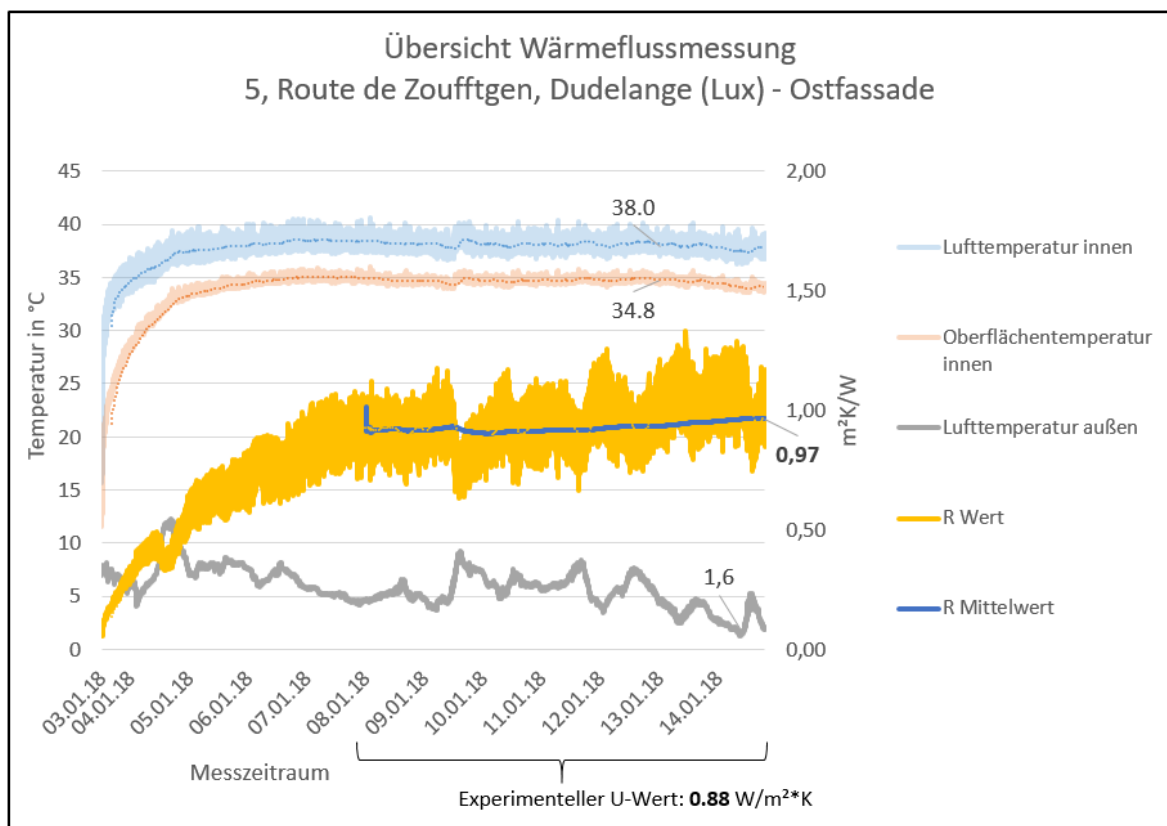


Abbildung 39: Grafische Auswertung der Wärmeflussmessung.

Das Ergebnis der Messung liefert den Wärmedurchgangswiderstand der Bestandswand. Da auf der Außenseite keine Oberflächentemperatur gemessen werden konnte, wurde der Normwert von 0,04 m²K/W als R_{se} verwendet. Der Wert kann als Grundlage zur Potenzialberechnung für Einsparungen und der Auslegung der Innendämmung verwendet werden.

Beispiel: Ziel-U-Wert = 0,4 W/(m²K); Dämmstoff: Holzfaserdämmung $\lambda = 0,040$ W/(mK)

$$U = \frac{1}{\sum R} = \frac{1}{R_{si} + R_{Messung} + \frac{d}{\lambda} + R_{se}} \leq 0,4 \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad d = 6 \text{ cm} > U = 0,38 \text{ W/m}^2 \cdot K$$

Messungen und Simulationen im Vorfeld von Innendämmprojekten
zur Erhöhung der Planungssicherheit

Übersicht der durchgeführten U-Wert Messungen

Folgende Tabelle enthält die Messergebnisse und der ad-hoc errechneten Ergebnisse mit Standard-Tabellenwerten für die U-Wert Bestimmung an unterschiedlichen Fassaden. Zusätzlich sind die Wandaufbauten hinterlegt.

Tabelle 4: Ergebnisse der Wärmeflussmessungen aus dem Zeitraum 2018 bis 2021

Nr	Ort	Beschreibung	n ₃	Wandaufbau	Mess- ergebnis [W/(m²K)]	Berechneter U-Wert [W/(m²K)]
3	Luxembourg	Alte Nationalbibliothek	2	80 cm Naturstein 2 cm Innenputz	1,08	1,5
4	Saarbrücken	Testgebäude „IZES Außenwandheizung“	1	Messung des Wärmeflusses durch eine Betonmauer		
5	Diekirch	SNHBM – Rue des Fleurs	2	2 cm Außenputz 45 cm Bruchsteinmauer 2 cm Innenputz	1,46	2,2
6	Dudelange	ProFamilia, Route de Zoufftgen	4	2 cm Außenputz 60 cm Bruchsteinmauer 2 cm Innenputz	0,88	1,8
7	Trier	Geb. K, Hochschule Trier	1	2 cm Außenputz 60 cm Bruchsteinmauer im Kern 3 cm Luftspalt 1 cm Innenputz	0,81	1,35
9	Luxembourg	Oekozer Paffendall	1	Stark gedämmte Holzrahmen- konstruktion	0,12	0,107
10	Petange	EFH - Altbau	1	2 cm Außenputz 60 cm Bruchstein 10 cm Multipor 042 1 cm Innenputz	0,38	0,36
11	Luxemburg	Ancienne Direction – Paul Wurth	1	2 cm Außenputz 60 cm Ziegelmauerwerk 2 cm Innenputz	0,56 0,88	0,85
13	Dudelange	Schulgebäude, Rue du Parc	1	2 cm Außenputz 60 cm Bruchstein 10 cm Multipor 042 1 cm Innenputz	0,34	0,36
14	Kirchberg	SNHBM – neues MFH	1	1 cm Außenputz 20 cm MW 035 20 cm Betonfertigteil 1 cm innenputz	0,21	0,17

³ Anzahl der Messungen

Messungen und Simulationen im Vorfeld von Innendämmprojekten
zur Erhöhung der Planungssicherheit

Nr	Ort	Beschreibung	n ⁴	Wandaufbau	Mess- ergebnis [W/(m²K)]	Berechneter U-Wert [W/(m²K)]
15	Rudersberg	EFH BJ 1962	2	2 cm Außenputz 24 cm Lochziegel 5 cm Kalziumsilikat 1 cm Innenputz	0,9 ⁵ 0,5	1,03 0,55
16	Syren	Kommunales Gebäude	2	2 cm Außenputz 60 cm Bruchstein 2 cm EPS 1 cm Gipskarton	1,34 ⁶ 0,88	1,8 0,94
17	Trierweiler	MFH BJ 1998	1	1 cm Außenputz 8 cm EPS 040 24 cm Leichtbeton 1 cm Innenputz	0,34	0,36
18	Wadrill	Arztpraxis „Alte Mühle“	1	2 cm Außenputz 60 cm Buntsandstein 2 cm Innenputz	1,15	1,8
20	Luxemburg	Testwände Konferenzraum 5	8	4 Testflächen siehe Kap. 3.2		

Insbesondere bei den Bruchsteinmauerwerken fällt auf, dass die Messungen im ungedämmten Zustand zum Teil deutlich bessere U-Werte ergeben als die Berechnungen mit Standardkennwerten aus der Literatur. Als ursächlich werden die zahlreichen Grenzflächen und Lufteinschlüsse im Mauerwerk gesehen.

Während sich diese Wände aufgrund ihrer relativ guten thermischen Qualität auch gut für die Anbringung einer Innendämmung eignen, bedeutet dies allerdings auch, dass das energetische Einsparpotential durch die Anbringung einer Dämmung bei der Verwendung von Katalogwerten überschätzt wird.

Bei Wärmeflussmessungen an gedämmtem Mauerwerk reduziert sich die U-Wert Differenz zwischen Messung und Berechnung aufgrund der hinsichtlich des thermischen Widerstandes dominierenden Dämmschicht.

⁴ Anzahl der Messungen

⁵ Ohne 5 cm Kalziumsilikat Innendämmung

⁶ Ohne 2 cm EPS Innendämmung

3.1.4 Mauerwerksfeuchte

Eine Messung der Mauerwerksfeuchte im Querschnitt der Bestandswand kann Auskunft über den bisherigen Schlagregeneintrag bzw. mit dem Wissen des Wasseraufnahmekoeffizienten über die Exposition der Fassade geben. Daneben können weitere Schadensursachen erkannt werden. Mögliche Befunde sind:

- | | | |
|------------------------------|---|---|
| a) aufsteigende Feuchte | = | höchster Durchfeuchtungsgrad im Kern der Wand |
| b) Kondensatfeuchte | = | Durchfeuchtungsgrad nimmt nach außen hin ab |
| c) ungenügender Wetterschutz | = | Durchfeuchtungsgrad nimmt nach innen hin ab |
| d) salzgebundene Feuchte | = | hohe Oberflächenfeuchte nimmt nach außen hin ab |

Prinzipiell kann die Mauerwerksfeuchte indirekt über die sich in den Poren einstellende Gleichgewichtsfeuchte gemessen werden. Daraus können sich unterschiedliche Profile ergeben.

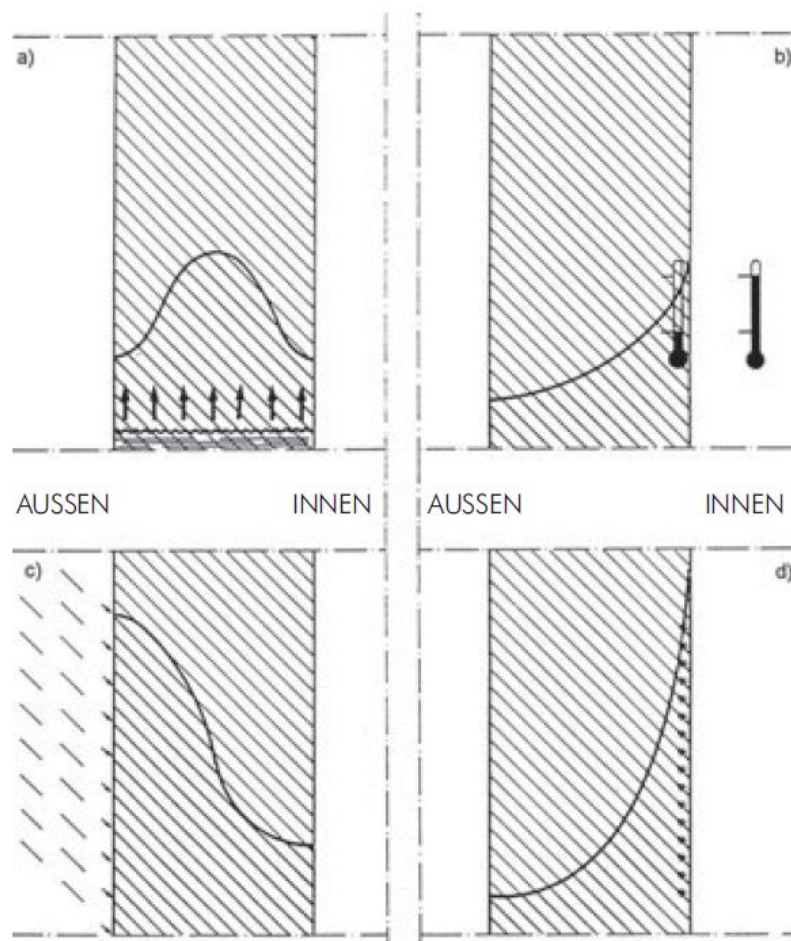


Abbildung 40: Unterschiedliche Verläufe bei Schäden durch Feuchteintrag [32].

Messtechnik:

Für die Messung der Porenausgleichsfeuchte / Gleichgewichtsfeuchte eignen sich Stabfühler mit kombinierten Messköpfen für Feuchte und Temperatur. Diese nutzen in der Regel das Prinzip der kapazitiven Luftfeuchtemessung und sind mit einem Polymer zwischen zwei Glasscheiben ausgestattet, das in Abhängigkeit der Umgebungsfeuchte aufnimmt und wieder abgibt. Entsprechend der Befeuchtung ändert sich die Dielektrizitätskonstante und somit die Kapazität dieses einfachen Kondensators. Das Messergebnis wird an einen Datenlogger übergeben und kann mit Hilfe einer Analysesoftware weiterverarbeitet werden.

Folgender Fühler wurde im Rahmen der Untersuchungen angewendet:



Abbildung 41: Kombiniertes Temperatur und Feuchtefühler mit Almemo Messstecker [33]

Daten des Sensors:

Messbereich:	5...98 % r.F.
Sensor:	CMOSens® Technologie
Genauigkeit:	±2,0 % r.F. im Bereich 10 ... 90 % r.F. ±4,0 % r.F. im Bereich 5 ... 98 % r.F. bei Nenntemperatur
Hysterese:	typ. ±1 % r.F.
Nenntemperatur:	23 °C ±5K
Sensorbetriebsdruck:	atmosphärischer Druck

Für die Durchführung der Messung müssen kleinere Sondagen mit Hilfe einer Bohrmaschine durchgeführt werden. In der Praxis hat es sich für Einmalmessungen bewährt mit einem $\phi = 10$ mm Bohrer in die gewünschte Tiefe zu bohren. Die Bohrung sollte dann ausgeblasen werden und im Anschluss kann der Fühler bis ans Ende der Bohrung eingeschoben werden. Der Kabeleingang wird mit Dichtmasse aus einer Kartusche vorübergehend verschlossen.

In der Regel stellt sich innerhalb von 15 min eine Gleichgewichtsfeuchte ein. Wichtig ist, dass sich sowohl bei der Feuchte als auch bei der Temperatur keine größeren Änderungen mehr ergeben. Durch den Bohrvorgang kann es passieren, dass sich ein Wärmestau gebildet hat, der zuerst abklingen muss. Der sich einstellende Wert ist als Indikator zu betrachten, mit dessen Hilfe ein Profil über den Mauerwerksquerschnitt erzeugt werden kann.

Für Dauermessungen ist es sinnvoll den Messaufbau so zu wählen, dass das Sensorloch dauerhaft und weitgehend luftdicht verschlossen ist und der Sensor trotzdem bei Bedarf ausgetauscht werden kann. Hierfür wurde ein Elektroinstallationsrohr mit 25 mm Durchmesser mit einer 3-D gedruckten PLA Einschiebehülse, Gummidichtringen und Maschinenfett als Gleitmittel kombiniert.

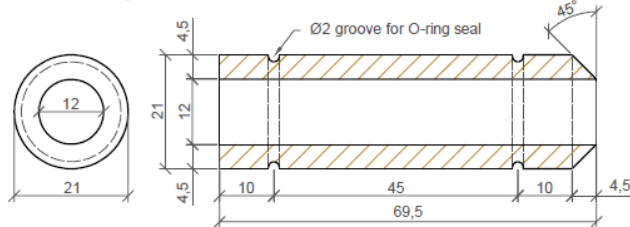


Abbildung 42: Sensoren direkt im Mauerwerk sowie eingeschoben im Kunststoffrohr in größerer Tiefe.

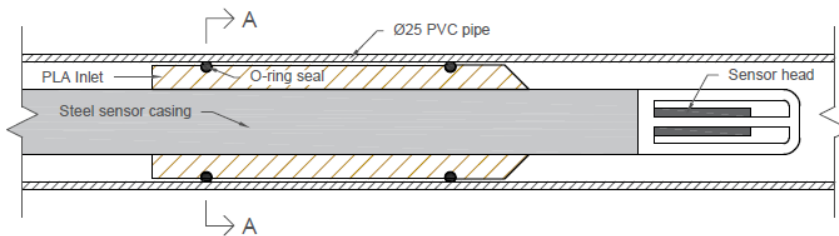
Folgende Abbildung zeigt eine Zeichnung der Einschiebehülse für das Kunststoffrohr. In Kombination mit 2 Gummiringen und Maschinenfett lässt sich der Sensor so beliebig oft aus der

Messbohrung herausziehen, falls es zu Problemen mit dem Sensor kommt. Das Kunststoffrohr verbleibt im Mauerwerk und wird am Bohrlocheingang mit Silikon abgedichtet. Bei eingeschobenem Sensor bildet sich im vordersten Raum des Rohres ein Raum, in dem sich die Porenausgleichsfeuchte messen lässt.

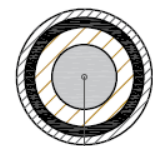
PLA Inlet, 1:1



Section in the wall, 1:1



Section A:A, 1:1



Layers:

- Steel sensor casing
- PLA inlet
- Rubber O ring seal
- Grease
- PVC pipe

Abbildung 43: Zeichnung der Einschiebehülse (PLA inlet) für Feuchtemessungen

Für einmalige Messungen zur Indikation der Feuchte im Mauerwerksquerschnitt, ist es ausreichend Bohrungen senkrecht zum Mauerwerk zu bohren. Um den Einfluss von Wärmebrücken auf Langzeitmessungen zu reduzieren, ist es sinnvoll parallel zu den Isothermen zu bohren. Dies kann zum Beispiel aus Fensterlaibungen heraus geschehen. Bohrer mit der Nennweite 28 mm sind in der Länge bis 1 m verfügbar. Mit Hilfe eines Metallstabes (z.B. Schweißdraht) kann der Sensor, der fest in der Hülse steckt, in das im Mauerwerk eingesteckte Kunststoffrohr eingeschoben werden.

Folgende Messung wurde in einem leerstehenden Gebäude mit ausgeprägtem Schimmelwachstum durchgeführt. Der Messaufbau ist auf den Abbildungen 42 und 44 zu sehen. Obwohl das Gebäude bereits seit zwei Jahren geräumt war, konnte wenige Zentimeter unter der Innenoberfläche noch eine Feuchte > 90 % gemessen werden.

Beim Auszug der letzten Bewohner wurde eine minimal hinter lüftete Schrankwand zurückgelassen. Diese wirkt praktisch wie eine Innendämmung und reduziert den Wärmefluss durch die Wand, wodurch sich die Oberflächentemperatur hinter dem Schrank absenkt und sich aufgrund der möglichen konvektiven Hinterlüftung Feuchte niederschlägt.

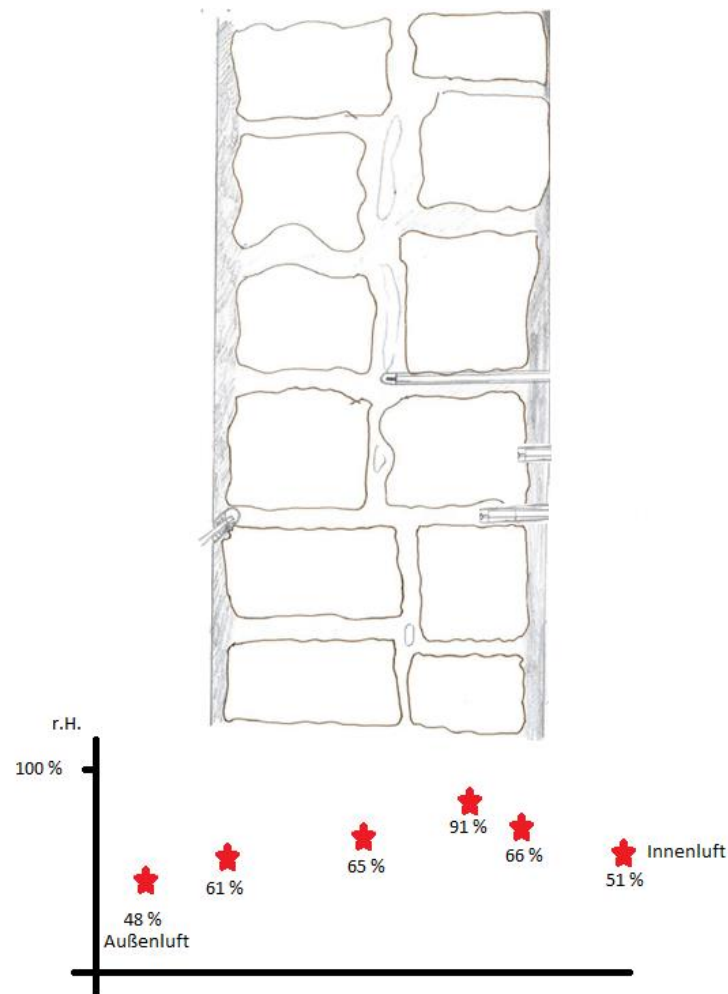


Abbildung 44: Beispiel einer punktuellen Feuchtemessung im Mauerwerksquerschnitt

3.1.5 Wasseraufnahmekoeffizient der Fassade

Schlagregen entsteht durch Wind, der Regen aus der Vertikalen ablenkt und dieser in der Folge mit der Fassade in Kontakt kommt. So können auch Fassaden benetzt werden, obwohl sie durch Dachüberstände geschützt wirken.

Durch Innendämmung kühlt die Bestandskonstruktion in der Heizperiode stärker aus und kann sich durch Regeneintrag stärker auffeuchten. Der sonst abtrocknend wirkende Wärmestrom aus der Innenseite ist jedoch deutlich reduziert. Die Kombination aus Innendämmung und wasseraufnehmender Fassade kann also im schlimmsten Fall zu Bauschäden führen.

Um die maximale Wasseraufnahme in Folge von Schlagregenevents quantifizieren zu können, wird der Wasseraufnahmekoeffizient w_a oder im Englischen häufig auch als A-Wert bezeichnet, verwendet. Während für moderne, künstlich hergestellte Baumaterialien reproduzierbare Kennwerte aus Laborversuchen existieren, besteht bei der Altbausanierung die Schwierigkeit, der im Bestfall zerstörungsfreien Prüfung des Wasseraufnahmekoeffizienten direkt an der Fassade.

Hierfür wurden in der Vergangenheit mehrere leicht voneinander abweichende Testverfahren entwickelt. Die Bekanntesten zur zerstörungsfreien Prüfung sind:

- Das Karsten Röhrchen
- Das Pleyer Röhrchen
- Die Frank Platte.

Die drei Geräte eint, dass sie mit Hilfe eine Dichtmasse auf die zu untersuchende Fassade aufgeklebt und im Anschluss mit Wasser gefüllt werden.

Pleyer versucht bei seinem Messaufbau, den Fehler durch mehrdimensionalen Wassereintritt in die Fassade, wie dies beim Karsten-Röhrchen zu beobachten ist, durch eine zweite Benetzungsfläche in Form eines Außenringes zu minimieren. Folgende Abbildung zeigt schematisch wie der äußere Ring als Abschirmung dient.

In mehreren Arbeiten wurden die existierenden Methoden zur Messung des Wasseraufnahmekoeffizienten im Altbaubereich umfangreich analysiert [34][32][35][36]. Stelzmann hat im Rahmen seiner Promotion das Wasseraufnahmemeßgerät WAM100B vorgestellt. Dieses Gerät zeichnet sich durch die

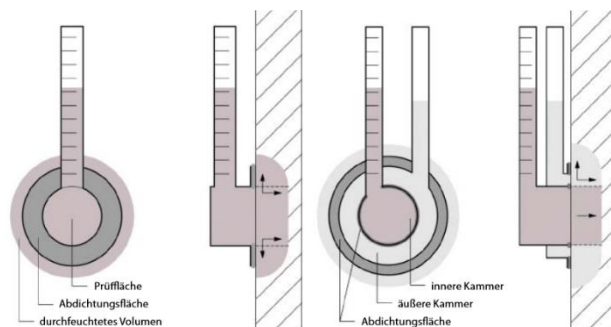


Abbildung 45: Die Grafik zeigt den Unterschied zwischen Karsten (links) und Pleyer Röhrchen (rechts) [29].

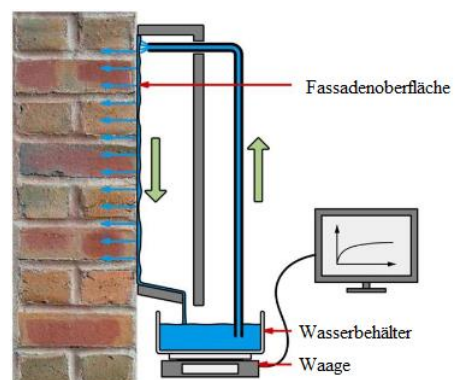


Abbildung 46: Messprinzip des WAM100B

deutlich vergrößerte Messfläche von 0,12 m² sowie durch die Benetzung der Fassade mittels Sprüheinrichtung und automatischer Wassermengenmessung aus. Bei einer vergleichenden Untersuchung der Hochschule Bern wurde festgestellt, dass das WAM100B im Vergleich der genannten den Testergebnissen des Wasseraufnahmeexperiments im Labor am nächsten kommt. Insbesondere die Messungen mit dem Karsten Röhrchen unterliegen großen Abweichungen [36].

Für eine Messung wird das WAM100B auf der Wetterseite des Gebäudes an einer repräsentativen Stelle des Gebäudes mittels Sanitärfermit dicht mit der Fassade verbunden. Der Messaufbau ist auf den folgenden Abbildungen zu sehen.



Abbildungen 47: Messaufbau WAM 100B an einem Gebäude in der Eifel

Die Messaufnahme führt zu folgendem exemplarischen Ergebnis:

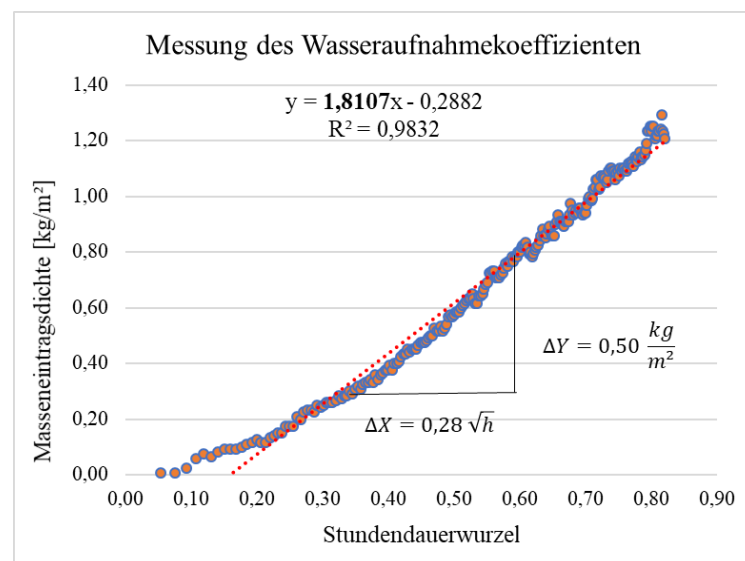


Abbildung 48: Exemplarische Messaufzeichnung einer w_a -Wert Messung

Der Kennwert w_a ergibt sich aus der Steigung der Messkurve über der Wurzel der Zeit, die gestrichelt eingezeichnet ist.

$$w_a = \frac{\Delta Y}{\Delta X} \approx \frac{0,5 \frac{kg}{m^2}}{0,28 \sqrt{h}} \approx 1,8 \frac{kg}{m^2 \cdot \sqrt{h}} \quad (25)$$

Folglich liegt der w_a -Wert im Beispiel bei etwa 1,8 [kg/(m²·√h)].

3.1.6 Thermografie

Thermografieaufnahmen im Bestand dienen dazu Wärmebrücken, Feuchteschäden und Besonderheiten in der Baukonstruktion zu erkennen. In der Planungsphase sollten daher, wenn es die klimatischen Bedingungen zulassen, Thermografieaufnahmen des zu dämmenden Gebäudes erstellt werden. Um qualitativ hochwertige und aussagekräftige Aufnahmen erstellen zu können, sollten über einen längeren Zeitraum Temperaturunterschiede zwischen beheizten Räumen und der Außenluft > 10 K (besser höher) herrschen. Folglich sind Aufnahmen von Thermografien praktisch nur in der Heizperiode zwischen Oktober und April möglich.

Sobald eine Wärmebrücke mittels Thermografie erkannt wurde, gilt es diese zu quantifizieren. Aufgrund der thermischen Trägheit der Bauteile sind Thermografieaufnahmen für die Quantifizierung nur eingeschränkt geeignet.

Quantifizierung einer Wärmebrücke

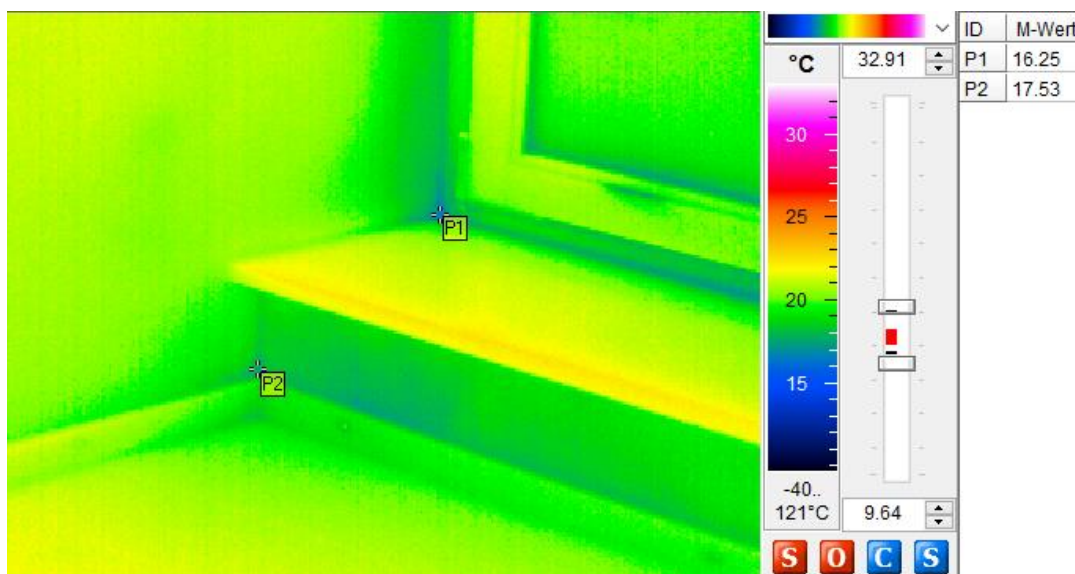


Abbildung 49: Thermogramm einer Fensternische

Obige Abbildung 49 zeigt ein Thermogramm einer Fensternische. Am kältesten Punkt P1 ist eine Temperatur von 16,25 °C ermittelt worden. Eine Berechnung des f_{RSI} gibt einen ersten Eindruck der Qualität der Wärmebrücke:

- Außentemperatur: 8 °C
- Innentemperatur: 23 °C
- f_{RSI} Bereich Fußleisten: 0,633
- f_{RSI} Bereich Fensterrahmen: 0,57

Diese ermittelten Oberflächenfaktoren f_{RSI} lassen den Schluss zu, dass die erkannten Wärmebrücken deutlich unter den normativen Anforderungen von 0,7 liegen. Da die Lufttemperaturen zeitlichen schwanken und das Mauerwerk und somit auch die Oberflächentemperatur einer gewissen Trägheit unterliegt, handelt es sich beim Oberflächenfaktor f_{RSI} um einen instationären Wert.

Um den langfristigen Mittelwert des Oberflächenfaktors f_{RSI} zu ermitteln, wurde die Oberflächentemperatur an Punkt P1 des Fensterrahmens über knapp zwei Wochen mit fest installierten Temperaturfühlern erfasst und aufgetragen und auf der folgenden Abbildung 50 dargestellt. Die Auswertung der Messung zeigt, dass der instationäre f_{RSI} zwischen 0,55 und 0,9 schwankt. Der Mittelwert lag bei 0,7 und somit erreicht die Wärmebrücken die Mindestanforderungen.

Die optische Prüfung der Wärmebrücke ergab ebenfalls keine Spuren von Schimmel an der Oberfläche.

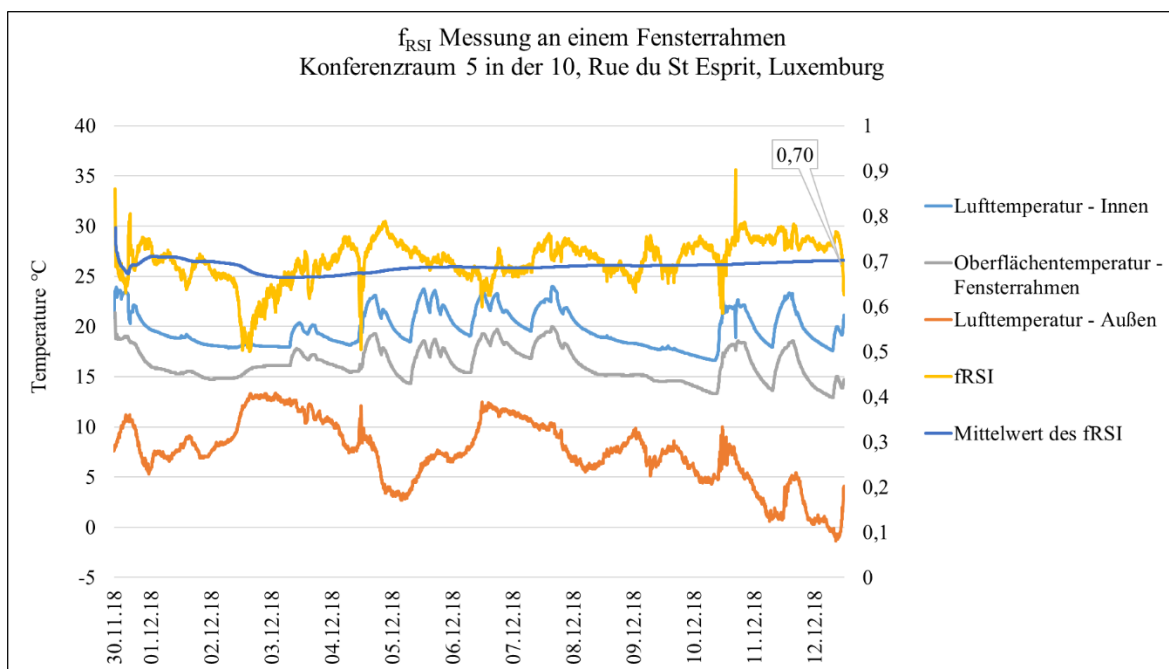


Abbildung 50: Messwerte einer Überprüfung des Oberflächenfaktors mittels Anlegefühler

Die Differenz bei der Ermittlung des Oberflächenfaktors mittels Thermografie Kamera sowie mittels Anlegefühler und insbesondere der Verlauf des instationären Oberflächenfaktors (gelbe Linie) zeigt deutlich, dass Thermogramme primär der Erkennung von Wärmebrücken dienlich sind. Die tatsächliche Bewertung mittels Temperaturfühler dauert allerdings mehrere Tage, um den Effekt der thermischen Trägheit herauszufiltern. Dies ist sehr ähnlich zur U-Wert Messung mittels Wärmeflussplatte.

Bei der Wahl der Messdauer ist darauf zu achten, dass zum Beginn und zum Ende der Messung ähnliche Temperaturen im Bauteil bzw. auf dessen Oberflächen herrschen. Dies kann auch erreicht werden, indem nachträglich ein geeigneter Auswertezeitraum aus der Messreihe gewählt wird. Im Prinzip ist das Verhalten der Messung mit dem der Wärmeflussmessung vergleichbar. Schwere Bauteile reagieren träger als leichte Bauteile, weshalb bei schweren Bauteilen eine längere Messdauer von mehreren Tagen gewählt werden sollte.

Auf Abb. 50 ist auch zu erkennen, dass stärkere Schwankungen beim instationären f_{RSI} in der Regel mit einer sprunghaften Änderung der Außenlufttemperatur korrelieren. Hierbei handelt es sich um zeitlich begrenzte Schwankungen. Bei grenzwertigen Ergebnissen des Oberflächenfaktors sollte zusätzlich die Raumluftfeuchte als Bewertungskriterium hinzugezogen werden, da die realen Feuchtwerte in der Regel vom Normwert abweichen. Des Weiteren ist es möglich über kombinierte Sensoren neben der Oberflächentemperatur zusätzlich auch die relative Luftfeuchte in Oberflächennähe zu messen und so konkrete Aussagen zum Schimmelwachstumsrisiko tätigen zu können.

3.1.7 Materialparameter

Sofern unbekannte Materialien auftreten, können für die Simulation relevante Parameter nur durch eine Probenentnahme ermittelt werden.

- Dichte (bei Natursteinen in der Regel zwischen 1800 ... 2500 kg/m³)
- Wasseraufnahmekoeffizient
- Porosität
- Feuchtespeicherfunktion

Die Wärmespeicherkapazität variiert in der Regel vor allem in Abhängigkeit des Feuchtegehaltes des Baustoffs. Trockene Natursteine haben eine Speicherkapazität um 850 bis 1000 J/kg. Hier ist eine Schätzung auch aufgrund der geringen Sensitivität der Simulation auf diesen Parameter ausreichend.

Nicht zu vernachlässigen ist bei historischen Baustoffen jedoch der häufig lokale Ursprung. Bauten die vor dem ersten Weltkrieg errichtet wurden, bestehen zum Großteil aus Steinen, die in lokalen Steinbrüchen gebrochen wurden, da der geringe Grad der Technisierung noch keine weiten Transporte zugelassen hat. Ausnahmen bestätigen hier die Regel wie z.B. bei Schlössern und bedeutenden Verwaltungsgebäuden.

Folgende Abbildung zeigt einen Bohrkern aus einem mittlerweile abgerissenen Gebäude in Diekirch. Er zeigt, zwei klassische Natursteine, den Muschelkalk aus Gilsdorf und den in rötlichen, sehr weichen Buntsandstein in einem typischen Aufbau von Natursteinwänden im Luxemburger Raum. Diese sind häufig zwischen 50 und 80 cm dick und bestehen aus zwei Hauptmauern deren Zwischenraum mit Bruchstücken aus geschlagenen Steinen, Mörteln und zum Teil größeren Lufteinschlüssen besteht. Eine Analyse der Probe zeigte deutlich die Inhomogenität anhand der gemessenen w_a -Werte – eingezeichnet auf der folgenden Abbildung. Bei der Simulation einer solchen Wand tritt automatisch die Fragestellung auf, welche Koeffizienten für die Berechnung zugrunde gelegt werden sollten.

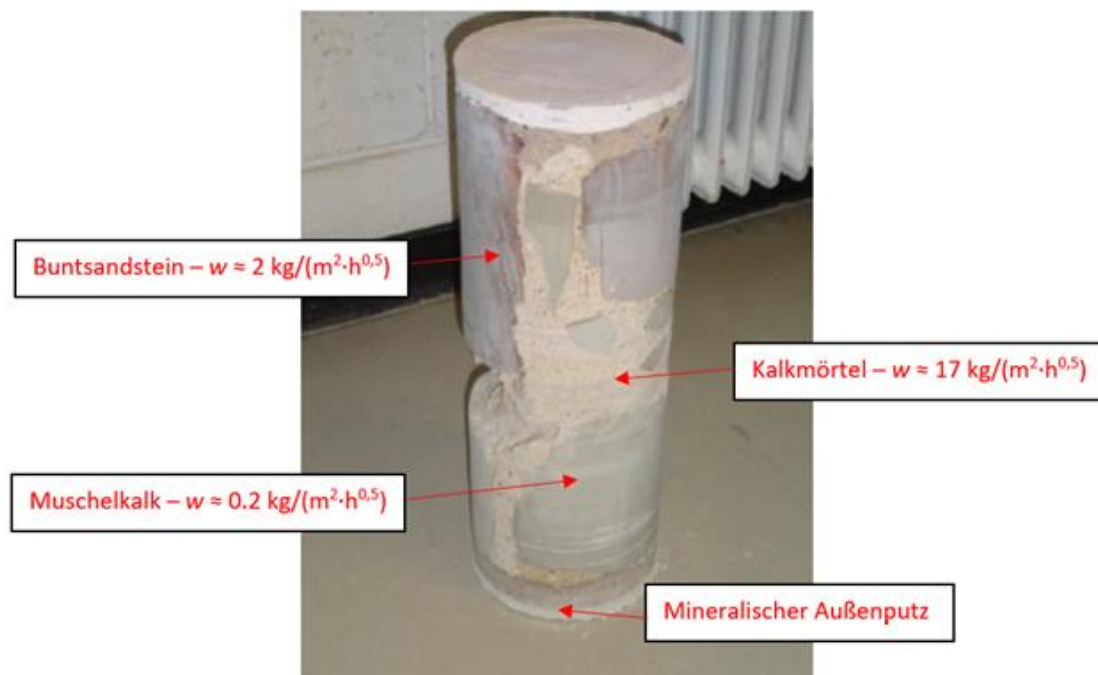


Abbildung 51: Bohrkern mit inhomogener Mischung aus Bruchsteinen und Mörtel

Optische Ausbreitung der Feuchtigkeit im Bohrkern

Um zu beobachten, wie sich Feuchtigkeit z.B. nach einem Regenereignis im Mauerwerk ausbreitet, wurde oben genannter Bohrkern in ein Wasserbad gestellt und die Steighöhe des Wassers in den unterschiedlichen Baustoffen beobachtet. Das aufgesaugte und verdampfte Wasser wurde täglich ergänzt, so dass die Eintauchtiefe näherungsweise konstant war. Die Abbildungen befinden sich auf der folgenden Seite.



5 Minuten nach dem Eintauchen



24 h nach dem Eintauchen



72 h nach dem Eintauchen



5 Tage nach dem Eintauchen sind Salze aus Trocknungsprozessen zu erkennen

Abbildung 52: Unterschiedliche Wasser-Steighöhen bei einem im Wasserbad stehenden Bohrkern über 5 Tage

Folgendes konnte beobachtet werden:

- Direkt nach dem Eintauchen stieg das Wasser im Bereich von Rissen mehrere cm.
- Im Mörtel stieg das Wasser innerhalb eines Tages gut sichtbar um 15 cm an.
- Im Bereich des Gilsdorfer Steines konnte nur an der Oberfläche Feuchte erkannt werden.
- Der höchste Wasseranstieg konnte im Grenzbereich zwischen Stein und Mörtel beobachtet werden.
- Nach 5 Tagen waren erste Abtrocknungsspuren zu erkennen. Das Wasser stieg nicht weiter an.
- Folgend stellte sich ein Gleichgewicht zwischen Abtrocknen und Saugen ein.

Die Beobachtungen decken sich mit Untersuchungen des Fraunhofer IBP zur Steighöhe von Wasser in Mauerwerk historischer Gebäude [37]. Dort wird ebenfalls festgestellt, dass die Ausbreitung in inhomogenem Mauerwerk begrenzt ist.

Bestimmung der Feuchtespeicherfunktion des Ernzer und Gilsdorfer Natursteins mittels DVS

Um die Feuchtespeicherfunktion eines unbekannten Baustoffs zu ermitteln, kann der Baustoff gemäß DIN EN ISO 12571 z.B. in einer Klimakammer konditioniert und regelmäßig gewogen werden.

Die dynamische Dampfsorption (Dynamic Vapor Sorption, DVS der Firma Surface Measurement Systems, kurz SMS) ist ein automatisiertes gravimetrisches Sorptionsverfahren, mit dem gemessen wird, wie schnell und wie viel eines Lösungsmittels von einer Probe absorbiert wird: z. B. eine kleine Baustoffprobe, die Wasser absorbiert. Dazu wird die Dampfkonzentration in der Umgebung der Probe in Stufen verändert und die daraus resultierende Massenänderung über eine Feinwaage gemessen. Für Baustoffe ist es sinnvoll Wasserdampf zu verwenden, aber es ist auch möglich, eine breite Palette von organischen Lösungsmitteln zu nutzen. Die dynamische Dampfsorption wird überwiegend in Laboren in der Forschung und Entwicklung von Medikamenten und Lebensmitteln eingesetzt.

Für die Bestimmung der beiden bekanntesten Natursteinsorten in Luxemburg wurden Steine aus den lokalen Steinbrüchen in L-7636 Ernzen und L-9379 Gilsdorf besorgt und mit Unterstützung von SMS untersucht. Die Proben wurden zunächst 10 h lang einem kontinuierlichen Luftstrom ausgesetzt, um die Trockenmasse zu bestimmen. Anschließend wurden die Proben einem ansteigenden Partialdruckprofil ausgesetzt: 0 % bis 90 % r.F. in 10 %-Schritten und dann einem 5 %-Schritt bis 95 % r.F.. Nach dem Erreichen der 95 % Marke wurde der Partialdruck in gleicher Weise gesenkt, um die Desorptionskurve zu erhalten. Die Versuche wurden bei 20 °C, 30 °C und 40 °C durchgeführt. Ein fester dm/dt -Wert von 0,0002 % pro min wurde als Regelgrenze gewählt, bei der die nächste Stufe angepeilt wurde. Anhand dieses Kriteriums kann die DVS-Software automatisch feststellen, wann das Gleichgewicht erreicht ist und einen Messschritt der relativen Feuchte abschließen. Wenn die Massenänderungsrate über einen bestimmten Zeitraum unter diesen Schwellenwert fällt, wird die Luftfeuchtigkeit auf die nächste programmierte Stufe erhöht. Für den Versuch wurde eine maximale Stufenzeit von 6 h und eine minimale Stufenzeit von 10 Minuten

gewählt. Die Ergebnisse der Sorptionsversuche bei beiden Proben "Ernzener Naturstein" und "Gilsdorfer Naturstein" weisen auf eine relativ geringe Wasseraufnahme mit ca. 0,12 % und knapp 1 % hin und lassen auf einen von der Oberflächenadsorption dominierten Mechanismus schließen. Dies ist typisch für Natursteine.

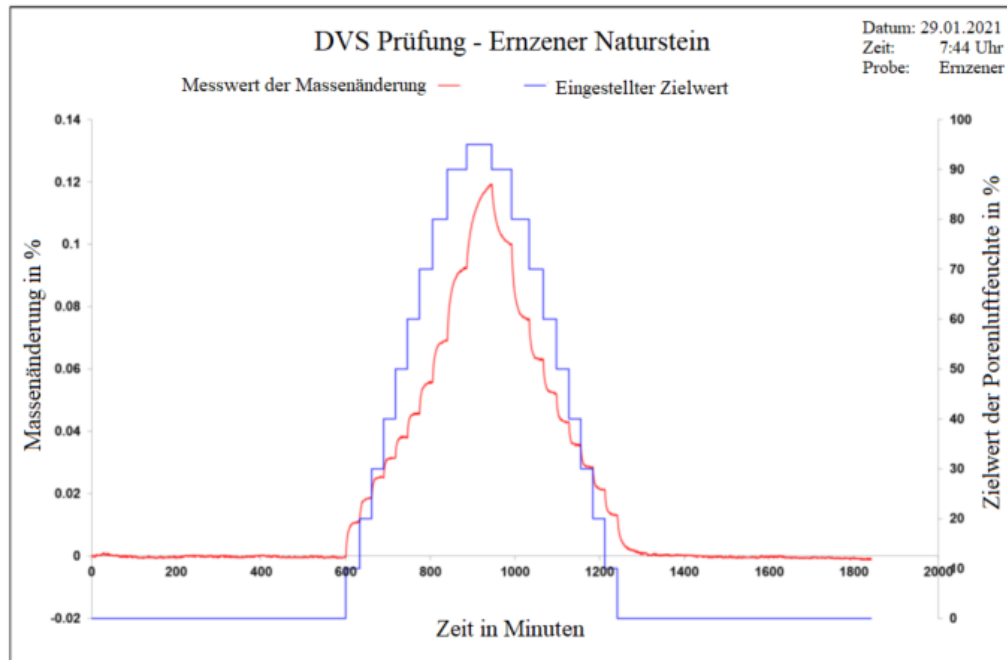


Abbildung 53: Messverlauf der Sorptionsmessung am Ernzener Naturstein.

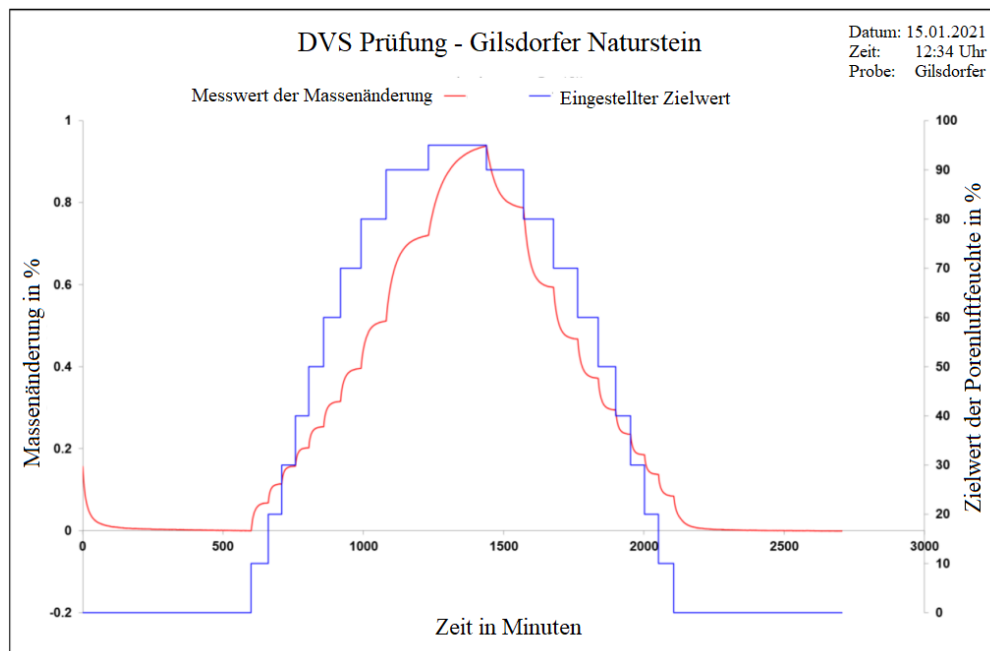


Abbildung 54: Messverlauf der Sorptionsmessung am Gilsdorfer Naturstein.

Aus diesen Messungen lässt sich eine Tabelle erstellen, die problemlos in Simulationsprogramme integriert werden kann. Für die Erstellung des Diagramms wurde der Mittelwert aus den Werten der Sorption sowie der Desorption verwendet.

Tabelle 5: Materialdaten des Ernzeners und des Gilsdorfer Natursteins

Name	Ernzener Naturstein		Gilsdorfer Naturstein	
Dichte [kg/m³]	2180		2500	
Feuchtegehalt:		$\Delta\rho$		$\Delta\rho$
bei 0 % r.F.	0 %	0 kg/m³	0 %	0 kg/m³
bei 10 % r.F.	0,014	0,31	0,08	2
bei 20 % r.F.	0,02	0,44	0,14	3,5
bei 30 % r.F.	0,026	0,57	0,18	4,5
bei 40 % r.F.	0,033	0,72	0,21	5,25
bei 50 % r.F.	0,040	0,87	0,24	6
bei 60 % r.F.	0,048	1,05	0,32	8
bei 70 % r.F.	0,060	1,31	0,43	10,75
bei 80 % r.F.	0,074	1,6	0,55	13,75
bei 90 % r.F.	0,098	2,13	0,75	18,75
bei 95 % r.F.	0,120	2,62	0,95	23,75
Porosität / $w_{\max}$	16,6	362	8,5	212,5
Diffusionswiderstand μ	15/17		120	

Der Ernzeners Naturstein ähnelt sowohl optisch als auch bezüglich der Feuchtespeicherfunktion und dem Saugverhalten dem Ummendorfer Naturstein (in der WUFI Datenbank enthalten). Der Ernzeners Naturstein wird häufig als Fenstereinfassung verbaut. Obwohl er bei Benetzung schnell Wasser aufsaugt, zeigt seine Feuchtespeicherfunktion bis zu 95 % r.F. keinen nennenswerten Feuchteanstieg. Die hohe Porosität führt zu einem guten Diffusionsverhalten. Diffusions-Tests bei SMS ergaben einen μ -Wert von 15.



Abbildung 55: Ernzeners Naturstein

Der Innenhof der alten Nationalbibliothek Luxemburg in der Stadt ist aus einem Stein gemauert, der dem Ernzerer sehr ähnlich ist.

Der Gilsdorfer Naturstein ähnelt farblich und hinsichtlich seiner technischen Eigenschaften dem Zeitzer Sandstein, der ebenfalls bereits in der WUFI Datenbank hinterlegt ist. Aufgrund der hohen Dichte zeichnet er sich durch seine hohe Druckfestigkeit aus. Er nimmt bei Benetzung nur minimal Wasser auf (w_a -Wert $\leq 0,2$ [kg/(m²*√h)]) und hat einen hohen Diffusionswiderstand. Aufgrund der natürlichen Inhomogenität der Natursteine kommt es im Besonderen bei der Messung des Diffusionswiderstandes zu Varianzen im Bereich $\pm 10\%$. Die Messungen für Tabelle 5 wurden bei SMS mittels „dry cup /wet-cup“ Verfahren durchgeführt.

Die Pont Adolphe, gebaut 1903 ist das bekannteste Bauwerk aus Gilsdorfer Naturstein in Luxemburg. Dort wurde der Stein aufgrund seiner hohen Festigkeit verwendet. Die Brücke wurde kürzlich für die Tramüberfahrt aufwändig restauriert.



Abbildung 56: Bild der Pont Adolphe aus Gilsdorfer Naturstein

Der Gilsdorfer wird auch heute noch häufig als Deckstein auf Mauern oder für Skulpturen verwendet. Weitere häufig bei Restaurationen eingesetzte Natursteine sind der Udelfanger aus der Nähe von Trier, der dem Gilsdorfer ähnelt, sowie der Jaumont aus Metz, der Ähnlichkeiten mit dem Ernzerer aufweist.

3.2 Feldtest Konferenzraum 5 bei ABP

In diesem Feldversuch werden vier Innendämmsysteme unter hygrothermischen Gesichtspunkten verglichen. In-situ-Messungen des Mauerwerksfeuchtegehalts, des Wärmedurchgangskoeffizienten und des Wasseraufnahmekoeffizienten der Fassade werden mit Klimamessungen kombiniert und mit WUFI-Simulationen verglichen.

Das Testobjekt ist ein Konferenzraum in einem großen Gebäude aus dem 16. Jahrhundert, das als Bürogebäude von ABP genutzt wird. Das Gebäude befindet sich in der Altstadt von Luxemburg. Die Außenfassade des untersuchten Raumes ist nach Süden und Osten ausgerichtet, befindet sich im 2. Stock und erlaubt einen ungehinderten Blick auf den Grund, ein etwa 100 m tiefes Tal, in dem die Alzette fließt. Daher kann die Fassade als exponiert und schlagregengefährdet angesehen werden. Das Mauerwerk ist etwa 80 bis 90 cm dick, besteht aus Natursteinen und ist von außen und innen mineralisch verputzt.

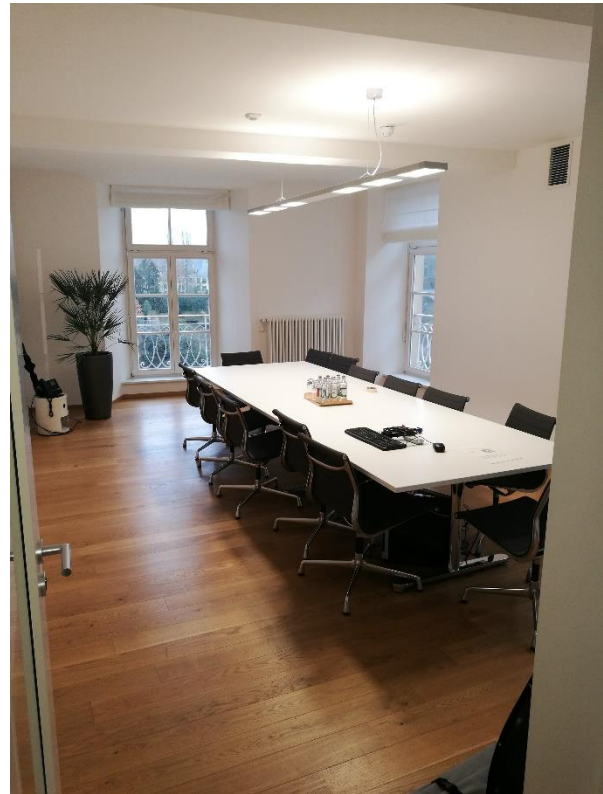


Abbildung 57: Ansicht des Konferenzraumes

Die Universität Luxemburg betreut das Projekt messtechnisch und führte die Planungen durch. Die Umbauten fanden im Sommer 2019 statt und die Ergebnisse wurden auch bereits publiziert [29], [38], [39].



Abbildung 58: Lage des Konferenzraums über dem Tal der Alzette

Im Rahmen des Feldtests werden folgende Untersuchungen durchgeführt und die Ergebnisse in den zuvor genannten Publikationen vorgestellt:

- Wasseraufnahmemessungen an der Außenfassade sowie auf dem Innenputz um die Saugfähigkeit / Feuchteverträglichkeit beurteilen zu können.
- Messungen des Innenklimas
 - o Lufttemperatur
 - o Relative Luftfeuchte
 - o CO₂ Konzentration in der Raumluft
- Wärmeflussmessungen an der nicht gedämmten Fassade sowie an den gedämmten Testflächen.
- Messungen der Temperatur sowie der Feuchte in drei Ebenen:
 - o Unter der Innendämmschicht
 - o Im Kern des Mauerwerks
 - o Unter dem Außenputz
- Das Außenklima wurde über die Wetterstation Merl ermittelt
 - o Temperatur
 - o Relative Luftfeuchte
 - o Einstrahlung
 - o Wind (Geschwindigkeit und Richtung)
- Thermografieaufnahmen
 - o Zusätzlich Temperaturmessungen in Wärmebrücken zur f_{RSI} Ermittlung
- Numerische Simulationen mit WUFI zur Validierung der Eingabeparameter.

3.2.1 Beschreibung der Testflächen

Die Außenwandflächen des Testraumes sind in vier Flächen mit je 6-9 m² aufgeteilt. Diesen wurde willkürlich eines der vier folgenden Innendämmsysteme zugewiesen:

1. BASF **SLENTITE**, Aerogel auf PU Basis
2. Evonik **Calostat**, pyrogenes Silizium mit Mineralwollkaschierung als Putzträger
3. **Udi Reco IN**, Holzfaserdämmung mit flexibler Schicht und Putzträgerplatte
4. Cerabran **Aerobran**, Mineralischer Putz mit Aerogelbestandteilen auf Siliziumbasis

Die Abbildung zeigt die Verteilung der Testflächen auf den beiden Außenwänden des Raumes, dem folgt eine tabellarische Übersicht:

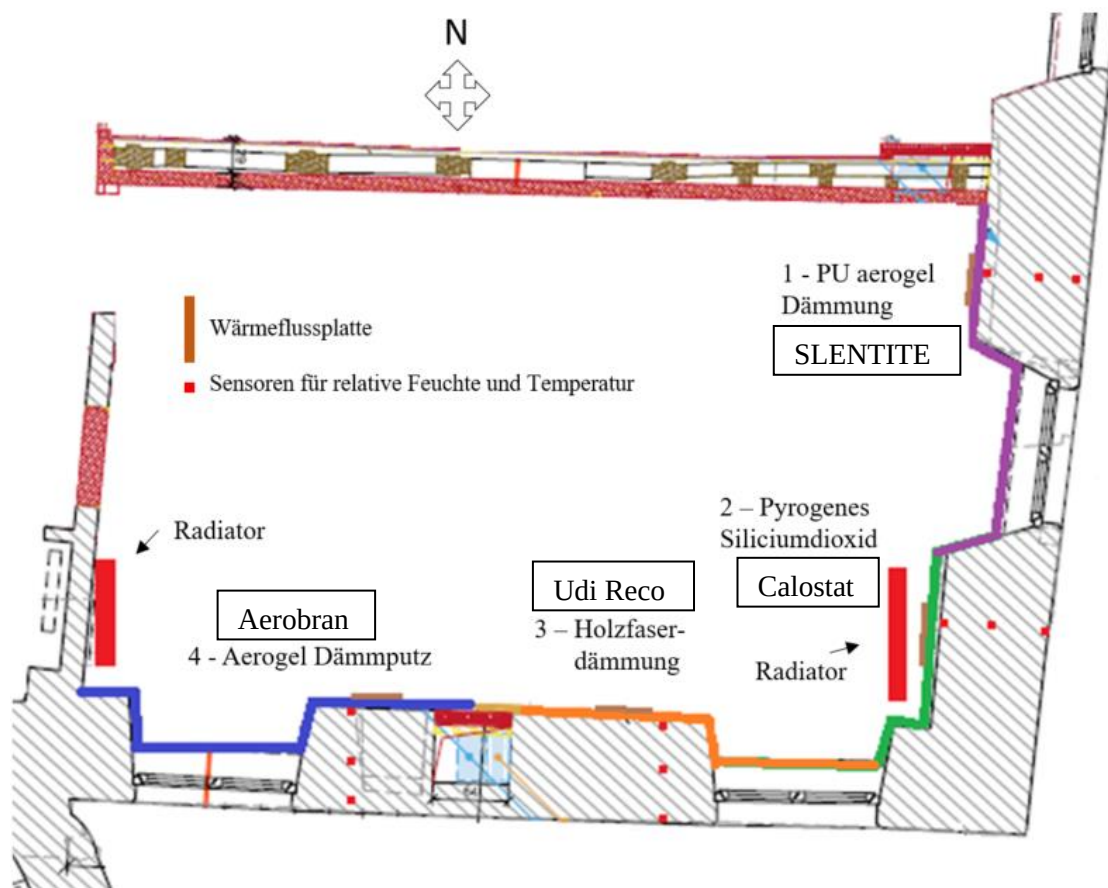


Abbildung 59: Verteilung der Testflächen im Konferenzraum

Messungen und Simulationen im Vorfeld von Innendämmprojekten
zur Erhöhung der Planungssicherheit

Tabelle 6: Übersicht über die Dämmsysteme im Feldversuch mit den Ergebnissen der Wärmeflussmessungen

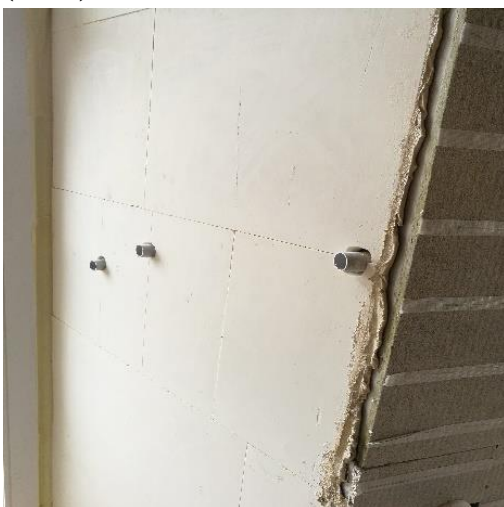
	System I	System II	System III	System IV
Dämmsystem	BASF Slentite Polyurethan aerogel Zwei Schichten je 15 mm = 30 mm $\lambda_{\text{Slentite}} = 0.018 \text{ W/mK}$	EVONIK Calostat Pyrogenes Siliciumdioxid Dämmplatte mit 30 mm Calostat und 10 mm Mineralwolle $\lambda_{\text{Calostat}} = 0.019 \text{ W/mK};$ $\lambda_{\text{mineral wool}} = 0.040$ W/mK	UDI Reco IN Holzfaserdämmung Holzfaserdämmplatte aus Putzträgerplatte und flexibler Schicht, 80 mm $\lambda_{\text{UdiIn}} = 0.038 \text{ W/mK}$	Cerabran Aerobran Aerogel Dämmputz Kalkputz mit Aerogelbestandteilen, 30 mm $\lambda_{\text{Aerobran}} = 0.028 \text{ W/mK}$
Systemaufbau	Klebmörtel, 2-4 mm 1st layer of Slentite, 15 mm glue mortar, 2 mm 2nd layer of Slentite, 15 mm Kalkputz mit Armierung, 10 mm diffusionsoffener Anstrich,	Klebmörtel, 4-6 mm Calostat board, 30 mm Mineral wool, 10 mm 1 dowel per board for fixation Kalkputz mit Armierung, 10 mm diffusionsoffener Anstrich,	flexible Holzwolle, 20 mm Putzträgerplatteaus Holzfaser, 60 mm 3 Dübel pro Dämmplatte Multigrund diffusionsbremsender Grundputz, 10 mm Kalkputz mit Armierung, 10 mm diffusionsoffener Anstrich,	aerogel Dämmputz, 30 - 35 mm Wasserglas zur Stabilisierung, 1 mm Kalkputz mit Armierung, 10 mm diffusionsoffener Anstrich,
Fassadenorientierung	Ost	Ost	Süd	Süd
Gemessener U-Wert Bestandswand [W/m²K]	0,97	0,97	0,54	0,73
Berechneter U-Wert gedämmte Wand [W/m²K]	0,37	0,35	0,26	0,38
Theoretische U-Wert Reduktion [%]	62	64	52	48
ΔR [m²K/W]	1,7	1,8	2,0	1,3
S_d Wert des Dämmsystems [m]	0,22	0,17	1,56	0,21
Gesamte Systemstärke [mm]	48	55	100	45

3.2.2 Transformation des Raumes

Folgende Abbildungen geben einen Eindruck vom Transformationsprozess des Raumes. Der Rückbau des teilweise vorhandenen Gipsputzes erfolgte durch einen lokalen Handwerksbetrieb, der im Anschluss auch die Vorbereitung / Egalisierung des Untergrundes mit Kalkzementputz unter den beiden Testflächen an der Ostfassade durchgeführt hat. Die Installation der Testflächen erfolgte entweder direkt durch die Hersteller oder durch Partnerfirmen, um eine korrekte Montage gemäß den Herstellerangaben gewährleisten zu können.



Abbildung 60: Abgenommener Bestandputz unter der Testfläche der Udi Reco Dämmung und eingebaute Messrohre an der Ostfassade unter der SLENTITE (oben rechts) Testfläche sowie unter der Calostat Testfläche (rechts). Aufgebrachte SLENTITE Platten (unten).





Abbildungen 61: Montierte Calostat (links) und aufgebrachte Aerobran (rechts) Testflächen

Die Oberflächen auf den Testflächen wurden mit armiertem Kalkputz veredelt und mit einem diffusionsoffenen weißen Anstrich versehen.

3.2.3 Mess- und Simulationsergebnisse

Die Messungen wurden über zwei Jahre durchgeführt und ausgewertet. Die Auswertung der Temperatur- und Feuchtwerte in der Raumluft und an den unterschiedlichen Messstellen im Mauerwerk bestätigte die erwarteten Werte.

- Die Vormessung der Raumluftfeuchte ergab niedrige Feuchtwerte
- Insbesondere nach Ausbruch der Corona Pandemie wurde der Konferenzraum nur noch selten voll ausgenutzt und durch das angeordnete deutlich intensivere Lüftungsverhalten sank die Raumluftfeuchte gegenüber den Vormessungen noch weiter ab -> Die Raumluftfeuchte im Verlauf des Tests kann daher als niedrig / trocken eingestuft werden.
- Die Porenluftfeuchte im Mauerwerk stieg in den Winterperioden sowohl unter den Innendämmflächen als auch im Kern des Mauerwerks und unter dem Außenputz von anfangs ca. 55 % auf maximal 84 % an.
- Im Sommer trocknete die Konstruktion an allen Messstellen wieder auf die Ursprungswerte ab.
- Die mit den gemessenen Randbedingungen durchgeführten Simulationen zeigen eine gute Übereinstimmung mit den gemessenen Feuchtemesswerten unter den Dämmflächen.

Folgende Abbildungen zeigen die Messergebnisse aus dem Feldtest.

Messungen und Simulationen im Vorfeld von Innendämmprojekten
zur Erhöhung der Planungssicherheit

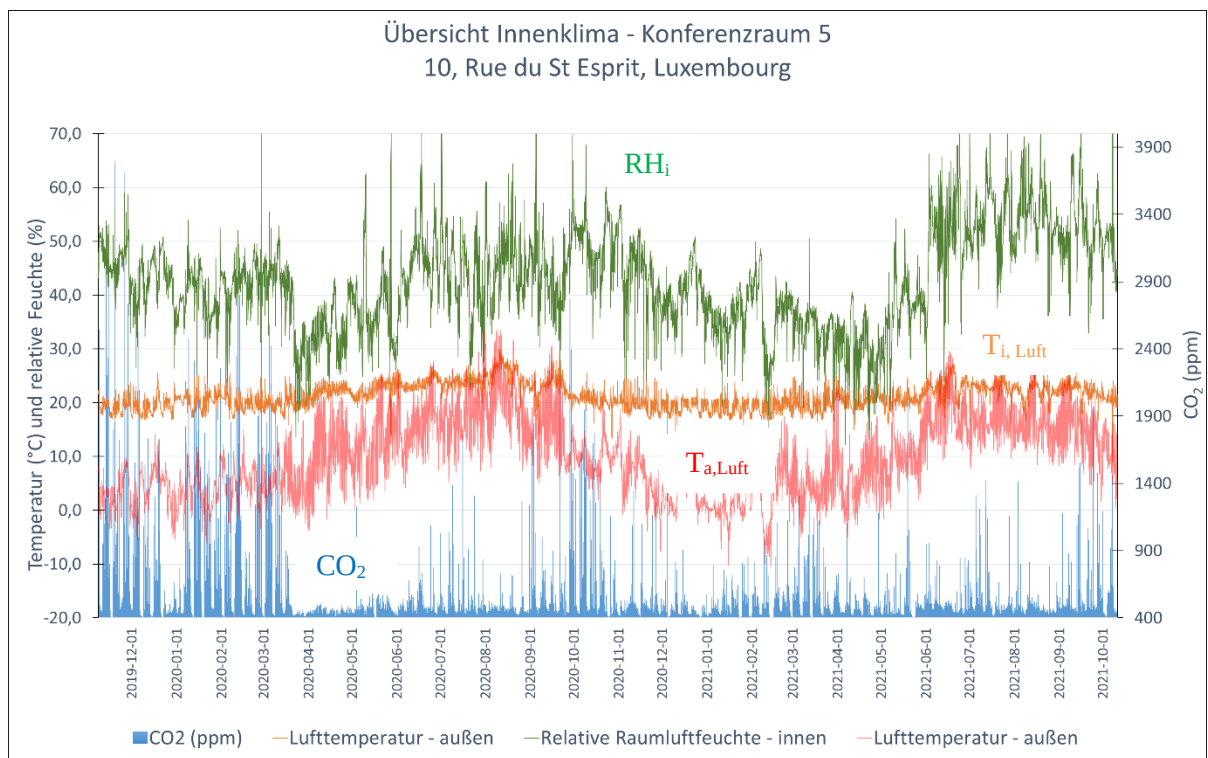


Abbildung 62: Temperatur- und Feuchteverläufe im Innenraum mit CO₂ Messwerten

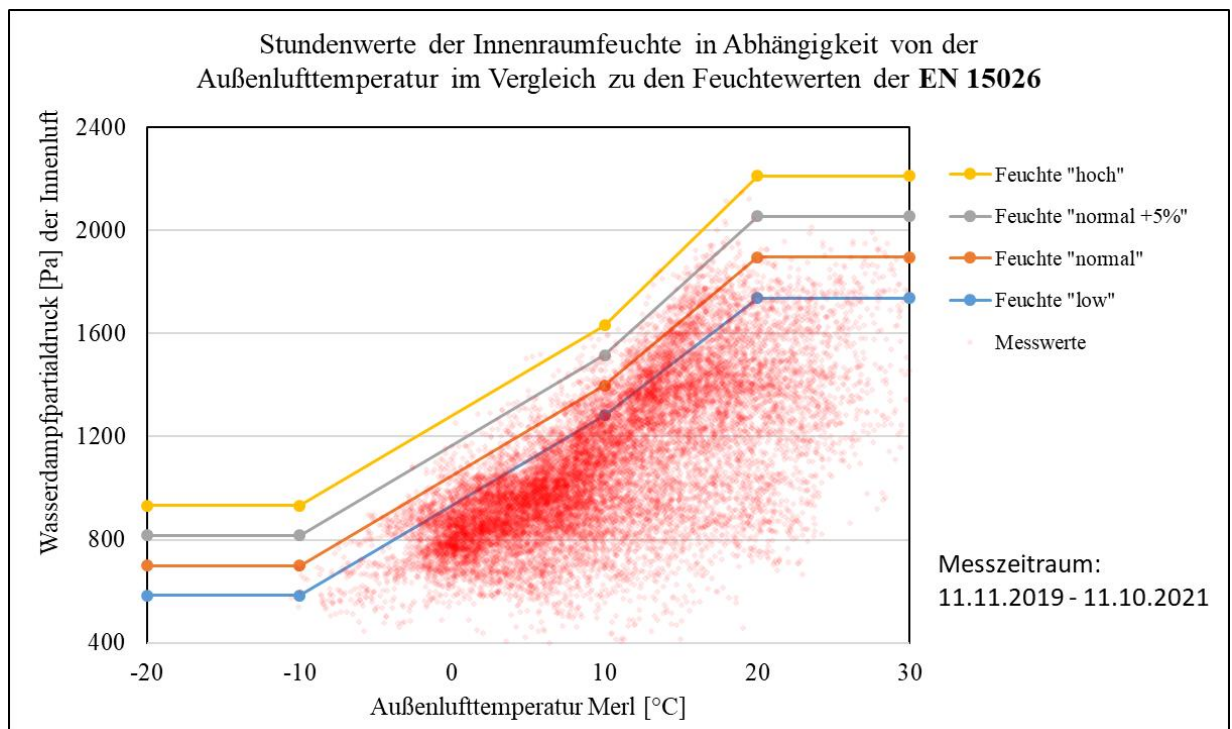


Abbildung 63: Einordnung des Innenklimas in die EN 15026

Messungen und Simulationen im Vorfeld von Innendämmprojekten zur Erhöhung der Planungssicherheit

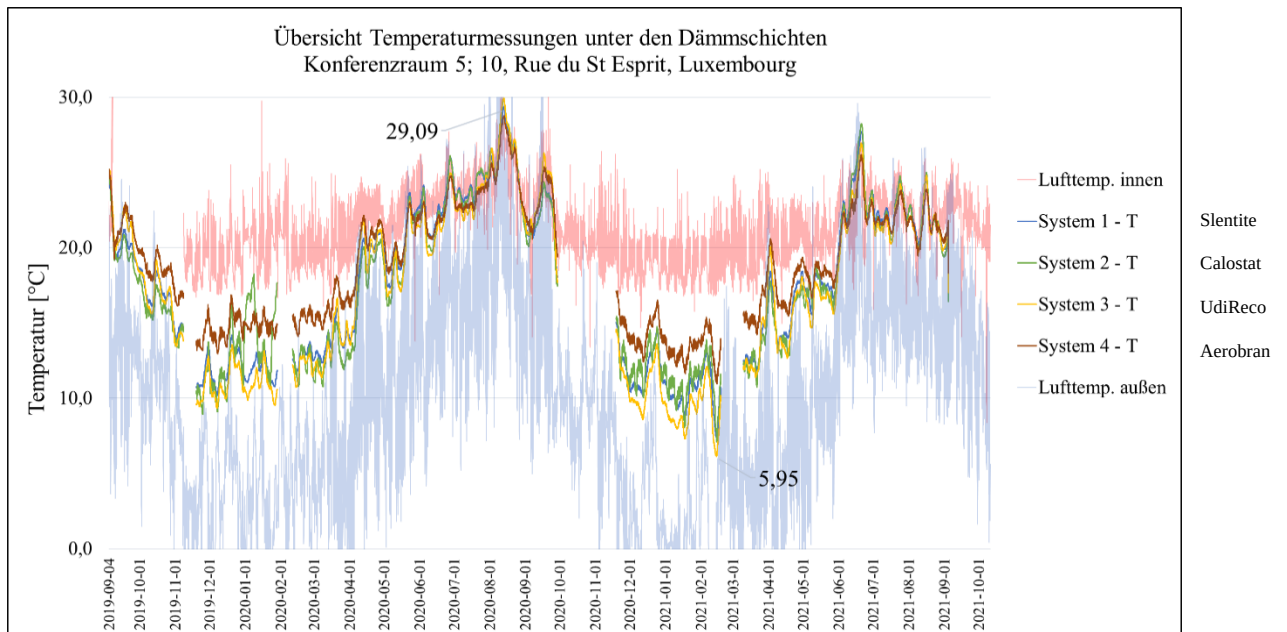


Abbildung 64: Temperaturverläufe unter den Dämmschichten

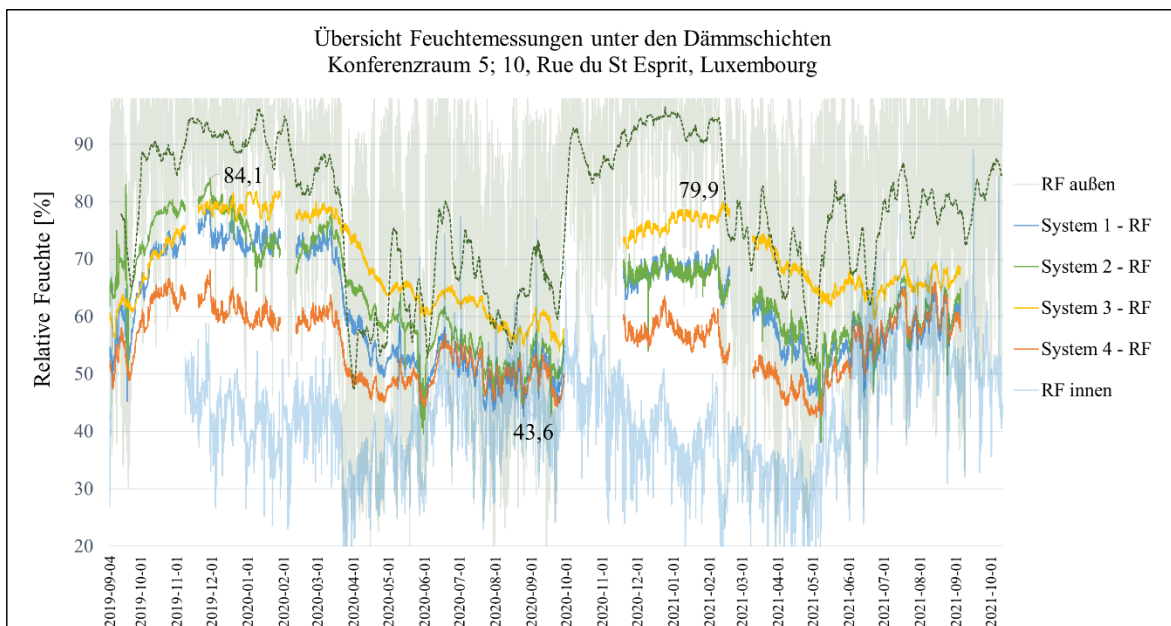


Abbildung 65: Feuchteverläufe unter den Dämmschichten

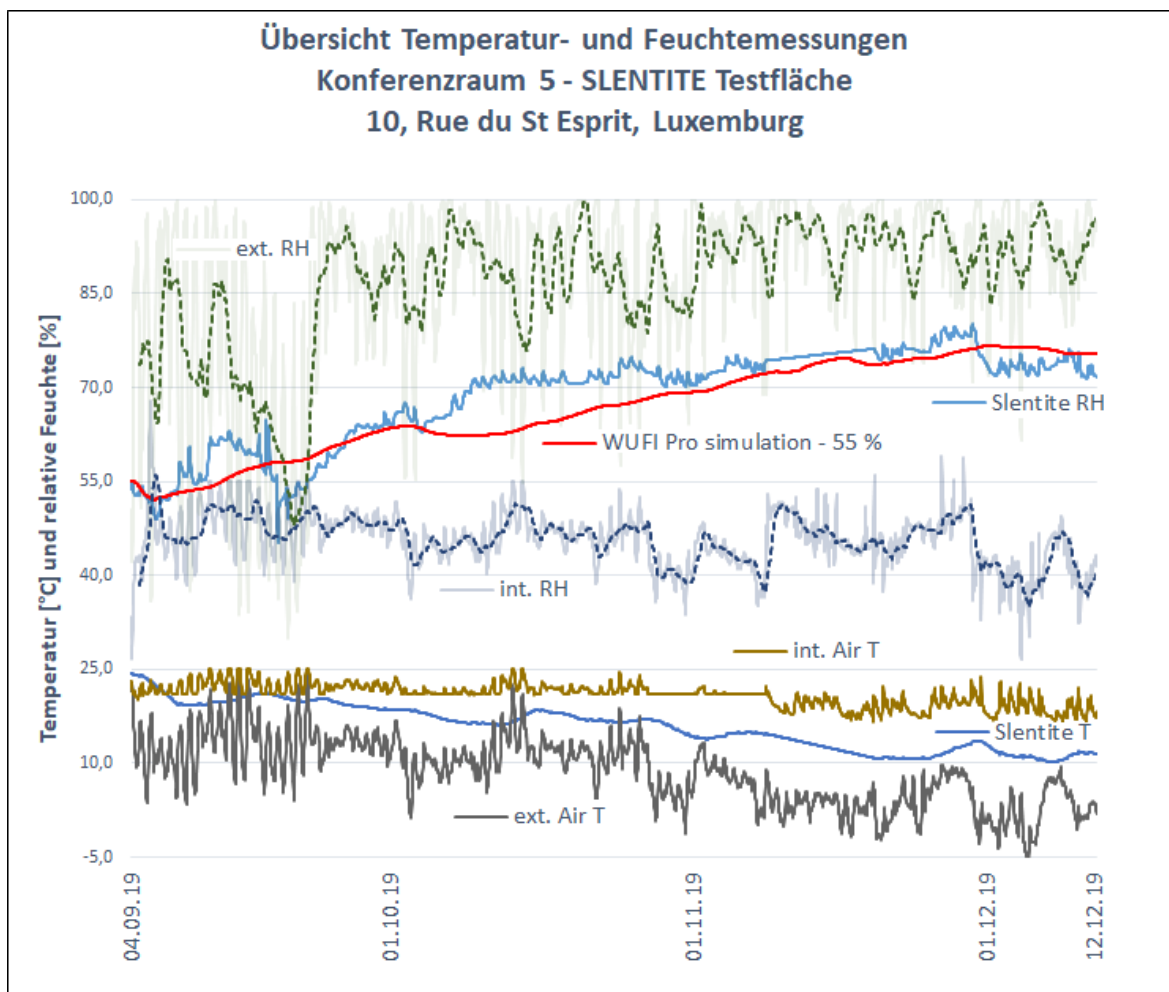


Abbildung 66: Vergleich Simulation vs. Messung im Fall der SLENTITE Testfläche (System I)

3.2.4 Rückschlüsse und Empfehlungen

Prinzipiell funktionieren alle Innendämmsysteme seit Beginn des seit 2,5 Jahre andauernden Feldtests problemlos und es ist äußerlich zu keinen sichtbaren Schäden gekommen. Auch die Messwerte der relativen Porenluftfeuchte, die in der Spitze Werte von 84 % im kritischen Bereich unter der Innendämmschicht erreichen, liegen deutlich unter den als kritisch einzustufenden 95 %, ab denen sich flüssiges Wasser in den Poren ansammelt und der absolute Wassergehalt deutlich ansteigt. Bei Erreichen der 95 % Schwelle steigt das Risiko für Frostschäden sowie die Zersetzung von organischen Bestandteilen deutlich an.

Aufgrund der niedrigen Feuchte im Raum [39] und Abb. 63 sind die Anforderungen an die einzelnen Testflächen als gering einzustufen. Insbesondere zu Beginn der Corona Pandemie wurde der Raum praktisch nicht mehr genutzt und der Wasserdampfpartialdruck der Innenluft sank aufgrund der nicht

mehr vorhandenen Feuchtelast im Inneren deutlich unter das Feuchteniveau „trocken“ des WTA Merkblattes 6-2. Seit Beginn der Corona Pandemie hat das Nutzungsverhalten zu keinem Zeitpunkt das Vorniveau hinsichtlich der sich einstellenden CO₂ und Feuchteniveaus im Raum erreicht (vgl. Abb. 62).

Simulationen unter Verwendung der gemessenen Außenbedingungen haben bei einer Variation des Innenklimas gemäß WTA 6-2 ergeben, dass alle vier Systeme bis zur Feuchte des Niveaus „normal + 5 %“ funktionieren. Bei Verwendung der „hohen“ Feuchtelast kommt es in der Simulation zu einer Überschreitung des 95 % Grenzwertes im kritischen Bereich unter der Dämmschicht.

Generell kann festgestellt werden, dass es durch die diffusionsoffenen und feuchteadsorbierenden Dämmstoffe (außer System 2, Evonik Calostat, welches aufgrund seiner Kernhydrophobierung praktisch keine Feuchtigkeit aufnimmt) zu einer Dämpfung der Feuchteverläufe in der Raumluft kommt. Der gegenteilige Effekt ist bei den Temperaturverläufen zu beobachten: Durch das Absinken der Heizlast sowie die Verminderung der thermischen Trägheit infolge der Innendämmmaßnahme kam es bei Besprechungen mit hoher Teilnehmerzahl schnell zu einem übermäßigen Aufheizen des Raumes. Dieser Effekt wurde zu Beginn auch beim Beheizen des Raumes festgestellt. So war anfangs die Einschalttemperatur (Heizkörperventil wird geöffnet) in der Gebäudeleittechnik auf 19 °C und die Abschalttemperatur auf 22°C eingestellt. Sobald die 22 °C erreicht sind, werden die Ventile automatisch wieder geschlossen. Aufgrund des großen Wasservolumens in den beiden Heizkörpern und der hohen Vorlauftemperatur von ca. 75 °C kam es dann zu einem deutlichen Überschwingen der Innenlufttemperatur bis 26 °C. Nachdem die Grenztemperaturen auf 20 °C für die Einschalttemperatur und 21 °C für das Abschalten eingegrenzt wurden, reduzierte sich das Überschwingen, da sich innerhalb der Aufheizzeit um 1 K noch nicht das gesamte Wasser in den Heizkörpern erwärmt hat.

Eine Befragung mehrerer Mitarbeiter der ABP ergab, dass diese den thermischen Komfort in den ungedämmten Konferenzräumen subjektiv als besser einschätzten, da der gedämmte Konferenzraum als zu warm und stickig empfunden wurde. Nachdem die Solltemperatur um 1 °C gesenkt wurde, verbesserte sich der Eindruck. Im Umkehrschluss kann davon ausgegangen werden, dass sich der Wärmebedarf des Raumes nicht nur aufgrund des verbesserten U-Wertes, sondern auch aufgrund der um ein Kelvin niedrigeren Lufttemperatur reduziert.

Die Beobachtungen der Mitarbeiter lassen sich mit Hilfe der operativen Raumtemperatur erklären – sie ist das arithmetische Mittel aus der Strahlungstemperatur der umgebenden Oberflächen sowie der Lufttemperatur und wird auch als gefühlte Temperatur bezeichnet. Durch den erhöhten Wärmedurchgangswiderstand der Außenwände steigt die Oberflächentemperatur an und die Lufttemperatur kann bei gleichbleibender operativer Raumtemperatur gesenkt werden, ohne, dass es zu Komforteinbußen kommt.

4 Ermittlung des Expositionsfaktors einer Fassade

4.1.1 Schlagregen und die Exposition einer Fassade

Eine computergestützte Vorhersage der Schlagregenverteilung auf einer Fassade würde die Bestimmung der lokalen Windströmungen um das Gebäude von allen möglichen Anströmungsrichtungen zur Charakterisierung des Gebäudes verlangen. Insbesondere im innerstädtischen Gebäudeensemble müssen somit auch die umliegenden Gebäude in die Betrachtungen mit einbezogen werden, da diese die Strömungen am Hauptobjekt beeinflussen. In diesem Fall spricht man von einem dadurch entstehenden Mikroklima, während man bei den Klimamessdaten der nächsten Wetterstation vom lokalen Klima spricht.

Da das Strömungsfeld selbst um einen einfachen Würfel bereits komplex ist, steigt die Schwierigkeit der Beschreibung bei realen Gebäuden mit Fensternischen und Erkern deutlich an [40] und der Rechenaufwand übersteigt in der Regel die Kapazitäten der planenden Ingenieure und Architekten.

Für mehrere einfache Gebäudeformen wurden allerdings bereits solche umfangreichen Computational Fluid Dynamics Simulationen basierend auf der finite Volumen Methode durchgeführt und die Simulationsergebnisse mit realen Messungen validiert. Daraus wurden semi-empirische Modelle erstellt, mit deren Hilfe typischen Gebäudeformen entsprechende Parameterwerte zugeordnet werden können.

Einige Kernaussagen der bisherigen Schlagregenuntersuchungen können wie folgt zusammengefasst werden:

- Mit der Höhe des Gebäudes steigt die Schlagregenmenge auf der Fassade der Wetterseite an.
- Während bei Gebäuden < 10 m der Schlagregenanteil in der Regel nicht mehr als 40 bis 60 % des Normalregens beträgt, steigt der Anteil bei höheren Gebäuden deutlich an und es kann der Effekt auftreten, dass mehr Regen auf einen m² Fassade auftritt als auf einen m² des Bodens fällt.
- Insbesondere Gebäudekanten und hervorstehende Bereiche an einer Fassade sind besonders betroffen [41].
- Häufig sind zwei Fassaden der Hauptwindrichtung primär ausgesetzt und müssen geschützt werden.
- Der Einfluss des Schlagregens wird auch durch die Tropfengröße beeinflusst. Nieselregen mit kleinen Tropfen kann bei langer Einwirkzeit zu einem höheren Wassereintrag ins Mauerwerk führen als kurzer intensiver Schlagregen mit großen Tropfen.
- Die direkte Messung des anfallenden Schlagregens gestaltet sich schwierig. Neben technischen Schwierigkeiten beim Sammeln des auftreffenden Wassers kommt es bei intensivem Regen zu herablaufendem Wasser, dass auch vermeintlich geschütztere Bereiche erreichen und befeuchten kann.

Vor allem bei stark saugenden Fassaden, spielt die tatsächliche Benetzung der Fassade eine essenzielle Rolle für eine nachträglich angebrachte Innendämmung.

Sobald also die Fassade den strengen Grenzwerten für w_a der im Vorfeld genannten Normen nicht entspricht, ist die Kenntnis über den tatsächlichen Schlagregeneintrag unabdingbar, um einen Nachweis mittels numerischer Simulation umzusetzen.

4.1.2 Ansatz zur Ermittlung der Exposition

Bei diesem Ansatz zur messtechnischen Erfassung der Exposition wird das in der Software WUFI 6.5 standardmäßig hinterlegte Schlagregenmodell verwendet:

$$\text{Regenbelastung} = \text{Regen} * (R_1 + R_2 * V_{\text{Wind}}) \quad (26)$$

Dieses Modell unterscheidet sich leicht durch die neigungsabhängige Komponente R_1 von dem in Kapitel 3.2.2 vorgestellten „ersten Fraunhofer Modell“ aus dem Jahr 1996, wohlwissend, dass es sich bei der Software WUFI ebenfalls um ein Produkt der Fraunhofer Gesellschaft handelt. Im WUFI Modell nimmt R_1 den Wert 1 an, sobald die Wand nicht senkrecht steht. Bei senkrechter Wand ist der Wert 0.

Somit entspricht der Koeffizient R_2 dem positionsabhängigen Proportionalitätsfaktor r_s in der nachfolgenden Gleichung

$$R_S = r_s * v * R_N \quad (27)$$

Wobei:

R_S	Schlagregen senkrecht zur Gebäudeoberfläche	[mm/h]
R_N	Normalregen	[mm/h]
v	Windgeschwindigkeit senkrecht zur Gebäudeoberfläche gemessen in 10 m Höhe	[m/s]
$r_s = R_2$	Positionsabhängiger Proportionalitätsfaktor	[s/m]

In der Software WUFI sind folgende Werte für R_2 (entspricht r_s) hinterlegt:

- Kleines Gebäude, Höhe bis 10 m 0,07
- Hohes Gebäude, unterer Teil bis 10 m 0,05
- Hohes Gebäude, mittlerer Teil 10-20 m 0,1
- Hohes Gebäude, oberer Teil > 20 m 0,2

Diese Werte können genutzt werden, wenn keinerlei Informationen über die Exposition existieren. Die Werte sind als konservativ einzuschätzen, das bedeutet tatsächlich kommt etwas weniger Regen auf die Fassade.

Da die Menge des Normalregens und die zugehörige Windgeschwindigkeit aus Messungen an der nächstgelegenen Wetterstation erfassbar sind, ist es das Ziel des Ansatzes aus Messdaten direkt am Gebäude und durch Simulationen diesen Proportionalitätsfaktor für eine besonders exponierte Stelle der Fassade des zu von innen zu dämmenden Gebäudes zu ermitteln. Mit der Kenntnis des Faktors können genauere Vorhersagen über die Mauerwerksfeuchte bei installierter Innendämmung getroffen werden.

Hierzu wird folgendes Vorgehen vorgeschlagen:

- Durchführung einer Dauermessung der relativen Porenluftfeuchte in einer Tiefe von 5-8 cm unter der Außenoberfläche über einen Zeitraum von mehreren Wochen bis Monaten in der Heizperiode an einer exponierten Stelle auf der Wetterseite des Gebäudes.
- Stichprobenhafte Überprüfung der umliegenden Fassadenflächen durch Einzelmessungen mittels Bohrungen und Einschiebefühler über 20 min zu Beginn und am Ende der Messperiode.
- Erstellung eines Feuchteprofils über den Mauerwerksquerschnitt zu Messbeginn mittels mehreren Bohrungen und Feuchtesonden, um die Anfangsbedingungen in der Simulation darstellen zu können.
- Aufzeichnung oder Beschaffung detaillierter Wetterdaten für den Untersuchungszeitraum und Nutzung in der Simulation.
- Durchführung von WUFI Simulationen für den untersuchten Zeitraum mit detaillierter Parametrierung.
- Iterative Anpassung des Proportionalitätsfaktors in der Simulation bis die gemessenen Werte der Feuchte mit der Simulation eine gute Übereinstimmung ergeben.

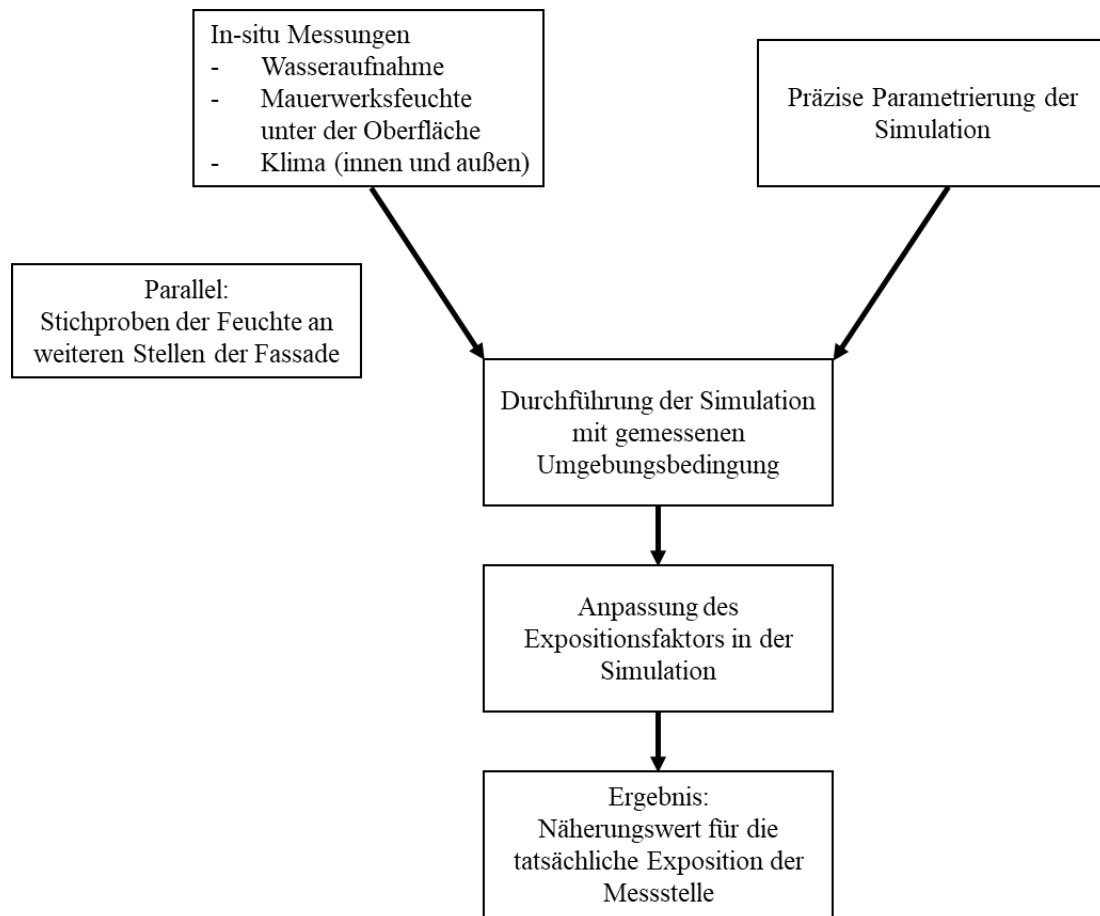


Abbildung 67: Ablaufdiagramm der Expositionsermittlung

4.1.3 Dauermessung der Feuchte unter der Außenhaut

Zur Validierung des vorgeschlagenen Ansatzes werden Untersuchungen an einer Natursteinfassade in der Luxemburger Innenstadt – genauer im Innenhof der alten Nationalbibliothek angestellt. Dort existiert eine mehrere hundert Jahre alte Natursteinfassade aus lokalem Sandstein, dessen Wasseraufnahmekoeffizient deutlich über den DIN Normwerten liegt. Schäden am Mauerwerk oder im Innenraum aufgrund durchdringender Feuchte existieren keine. Einzig die Gesimse sind durch herabtropfendes Wasser erodiert und wurden zum Teil in den vergangenen Jahren durch aufgelegte Bleche geschützt. Folgende Abbildung zeigt die ehemalige Bibliothek und die angebaute Kathedrale. Beide Gebäude wurden im 17. Jahrhundert errichtet. Die untersuchte Fassade ist rot markiert.

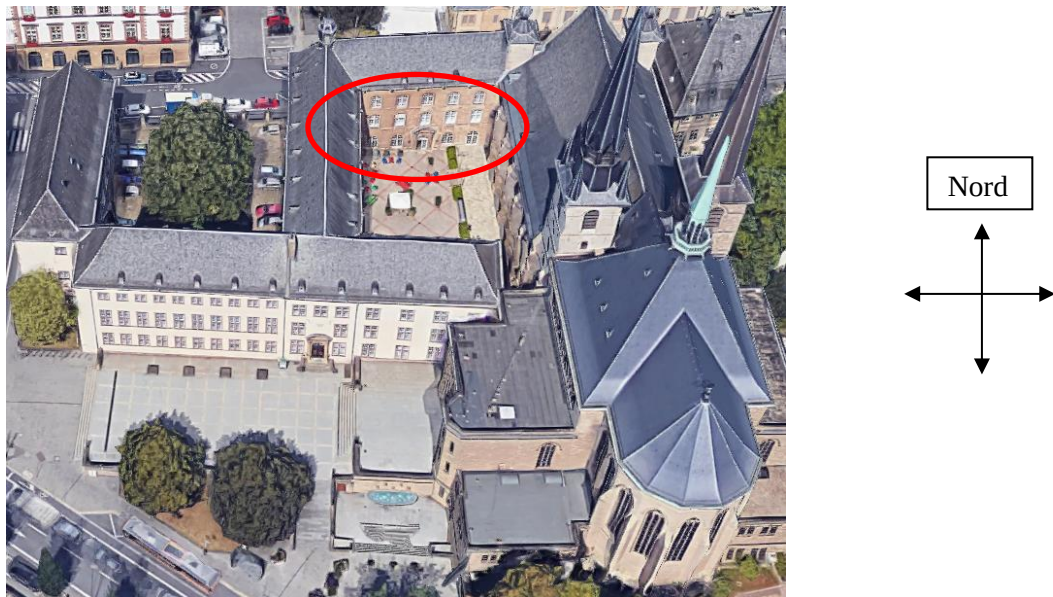
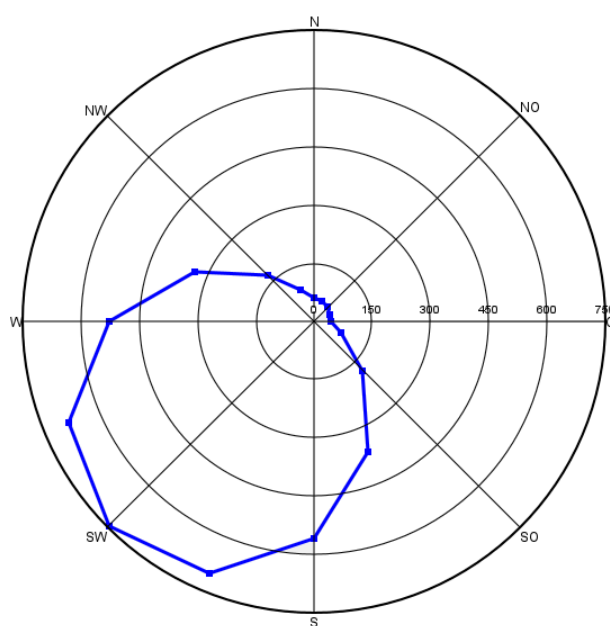


Abbildung 68: Bibliothek mit Innenhof aus der Vogelperspektive



Hygrothermisches Referenzjahr Trier

Mittlere Relative Luftfeuchte [%]:	78,7
Max. Relative Luftfeuchte [%]:	100
Min. Relative Luftfeuchte [%]:	24
Mittlere Windgeschwindigkeit [m/s]:	3,6
Normalregensumme [mm/a]:	971,4

Schlagregensumme [mm/a]

Abbildung 69: Schlagregenanalyse des Standortes Trier (ca. 35 km Luftlinie) aus dem hygrothermischen Referenzjahr

Aus der Klimadatenanalyse in der vorangegangenen Abbildung geht hervor, dass der überwiegende Anteil des Schlagregens aus südwestlicher Richtung kommt. Dies deckt sich mit generellen Beobachtungen in dieser Region und erklärt, weshalb die außenliegenden Fassaden des Gebäudes, nachträglich verputzt wurden.

Bei der untersuchten Fassade handelt es sich um die nach Süden ausgerichtete Wand des Innenhofs. Die beiden anderen Fassaden sind nach Osten und Norden ausgerichtet. Die Westfassade gehört zur angrenzenden Kathedrale und ist nicht Bestandteil der Betrachtung.

Folgende Abbildung zeigt die somit am stärksten von Regen betroffene Fassade im Innenhof:

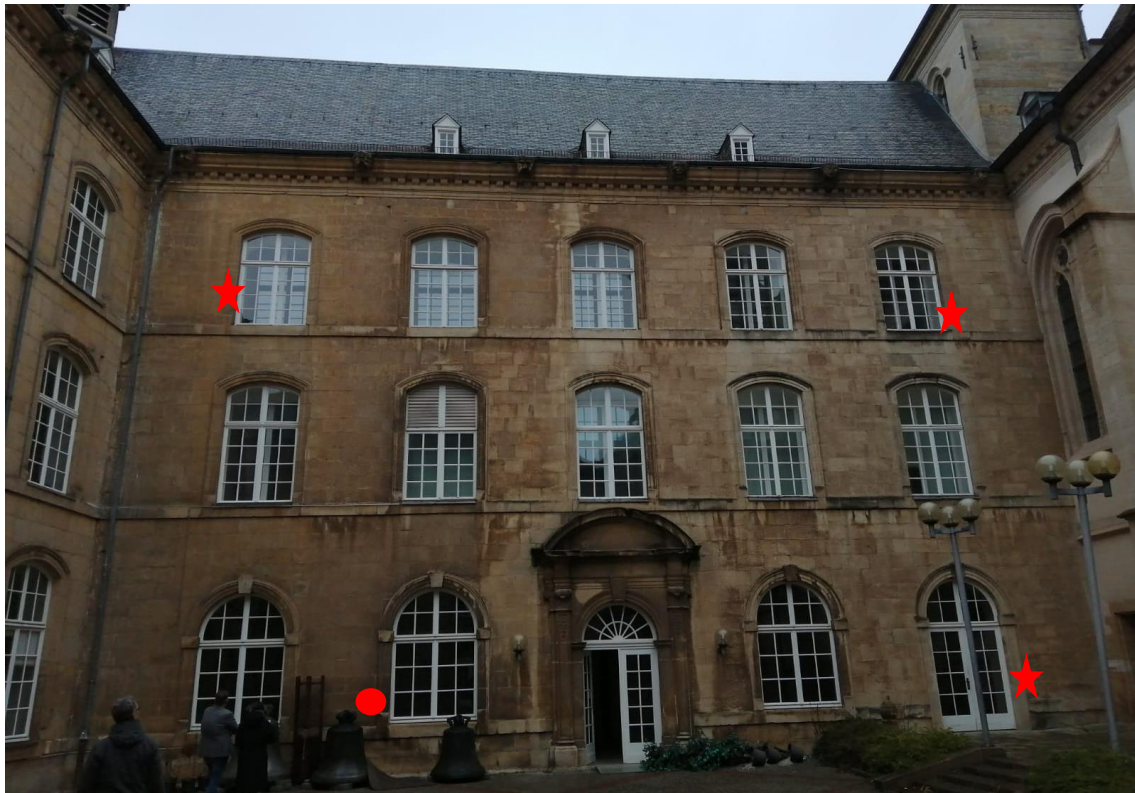


Abbildung 70: Südwand des Innenhofs der ehemaligen Bibliothek mit eingetragenen Feuchtemessstellen.

Im Bereich des roten Punktes wurde eine Dauermessung über knapp drei Monate durchgeführt. An den Sternstellen wurden mit einem mobilen Messgerät punktuelle Messungen zu Beginn und zum Ende der Dauermessung durchgeführt. In der Messperiode fiel insgesamt 226 l/m² Regen. Da das Gebäude nicht mehr genutzt wird, ist es auf eine Temperatur von 15 °C beheizt.

Der Wasseraufnahmekoeffizient der Natursteine liegt im Bereich von 1,7 kg/m²h^{1/2} ± 0,3 kg/m²h^{1/2}.

Die Dicke des Natursteinmauerwerks beträgt 80 cm. Die Messungen finden durch Bohrungen aus den Laibungen statt.

Die Messungen ergeben folgenden Feuchteverlauf. Das Außenklima wird an der ca. 2 km entfernten Wetterstation in Merl aufgezeichnet.

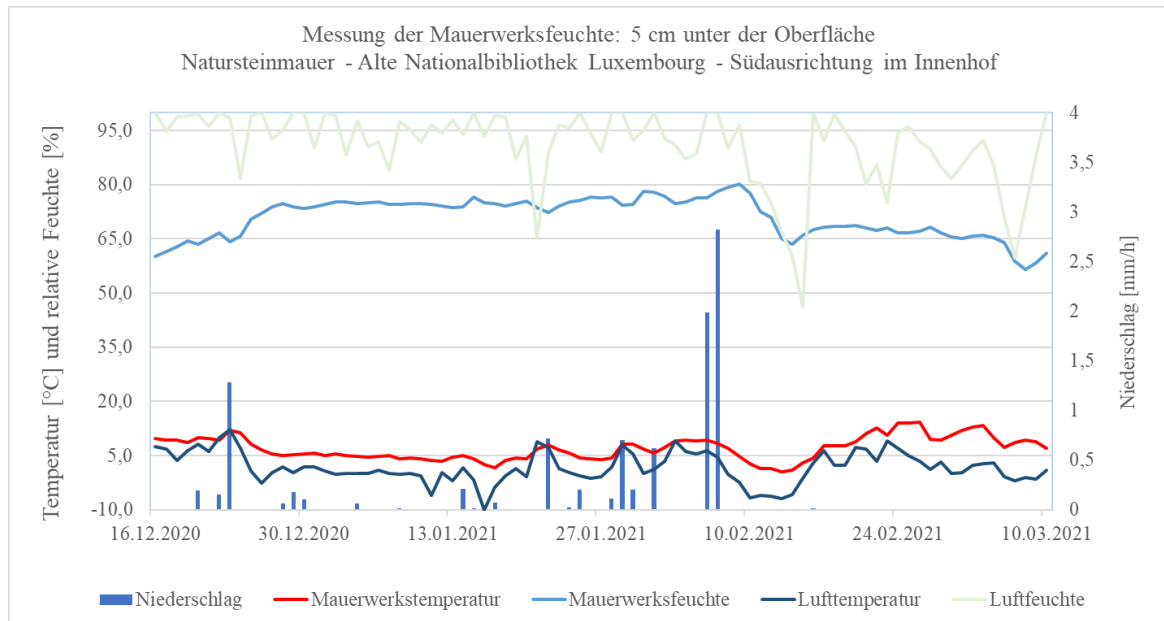


Abbildung 71: Aufzeichnung der Feuchte im Mauerwerk sowie weiterer Parameter

Bezeichnend für den Messzeitraum ist die in der Winterzeit übliche, sehr hohe relative Luftfeuchtigkeit von meist über 80 % (graue Kurve). Dazu passend hat sich im Mauerwerk eine relative Porenluftfeuchte um 75 % eingestellt (blaue Kurve). Nach einem stärkeren Regenereignis im Februar 2021 steigt die Feuchte auf den Höchstwert im Messzeitraum von 81 % an. Aufgrund der schnellen Erholung in den folgenden Tagen mit einem Einbruch der Außenluftfeuchte, kann davon ausgegangen werden, dass es sich um Feuchte aus Adsorptionsvorgängen und weniger direkten Schlagregen handelt.

Die Einzelmessungen ergaben folgende Werte, wobei sich die Messstellenbezeichnung auf Bild 70 mit den eingetragenen Messstellen bezieht. Die Messung erfolgte jeweils in ca. 5-8 cm Tiefe unter der Fassadenoberfläche und die Bohrlochtiefe betrug 20 cm Entfernung von der Laibung.

Tabelle 7: Messergebnisse der Stichproben an der Innenhoffassade der BNL

Datum und Uhrzeit:	16.12.2020,	10.03.2021,
Messstelle [T/RH]	10.15 – 10.55 Uhr	11.05 – 12.00 Uhr
Oben links	10,8 °C / 77 %	6,3 °C / 74 %
Oben rechts	11,1 °C / 72 %	6,8 °C / 69 %
Unten rechts	9,8 °C / 74 %	4,8 °C / 77 %

Die Anfangsmessungen ergaben im Mauerwerk durchweg unkritische Bedingungen mit Werten der relativen Porenluftfeuchte zwischen 61 und 77 %. Auch nach Ablauf der Messperiode bei den Stichproben im März wurden keine ungewöhnlichen Werte festgestellt.

4.1.4 Simulation der Messstelle

Die Simulation der Messstelle wurde mit WUFI Pro 6.5 durchgeführt. Hierbei wurde folgender Wandaufbau verwendet – von innen nach außen:

- 2 cm Kalk-Zement-Putz
- 80 cm Luxemburger Naturstein – Qualität des Ernzener Steins

Hauptmerkmale:

- $\mu \approx 15$
- w_a -Wert $\approx 1,7 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{h}^{1/2})$
- $l \approx 1 \text{ W/mK}$

Für das Außenklima wurden Messungen der Wetterstation Merl verwendet. Auf der Innenseite wurde eine konstante Temperatur von 15 °C angenommen, da die durchgeführte Messung Temperaturen zwischen 20 und 25 °C ergab, obwohl nur minimal geheizt wurde und diese nicht plausibel sind.

Die Oberflächenübergangskoeffizienten wurden aus den WUFI Voreinstellungen gemäß der DIN 4108-3 übernommen: $\alpha_i = 8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ und $\alpha_a = 25 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. In der Simulation wurde der Expositionsfaktor auf 0 gesetzt, wodurch in der Simulation keine Regenaufnahme über die Fassade berücksichtigt wird. Folgende Abbildung zeigt die Verläufe der gemessenen Feuchte und die Werte aus der Simulation. Prinzipiell zeigen die Kurven einen ähnlichen Verlauf.

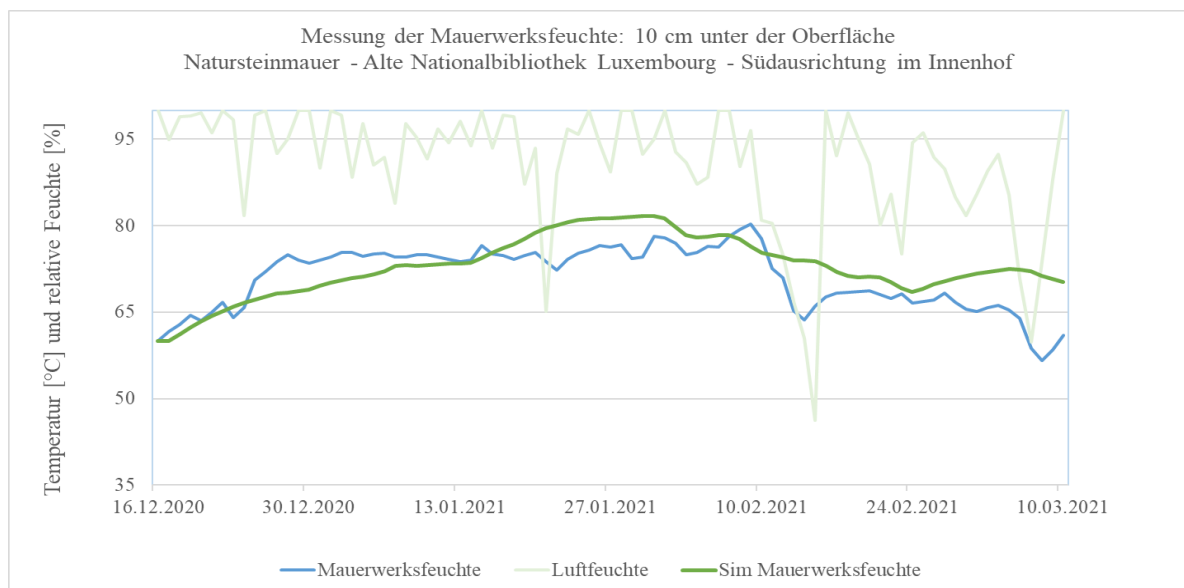


Abbildung 72: Vergleich zwischen gemessener und simulierter Feuchte ca. 8 cm unter der Natursteinoberfläche

4.1.5 Möglichkeiten und Grenzen der Methode

Die Methode eignet sich, um den Nachweis des Schlagregenschutzes gemäß WTA 6-4 zu führen, wenn die Simulation bei abgeschaltetem Schlagregeneintrag eine gute Übereinstimmung erreicht. Auch bei Werten des Proportionalitätsfaktors von 0,01 ist ein Nachweis noch möglich. Bei darüber liegenden Werten kommt es bei im Beispiel gegebener Material und Klimakonstellation zu einer deutlichen Durchfeuchtung – die Werte der relativen Feuchte nähern sich dauerhaft Werten um 98%.

Problematisch ist auch die Implementierung des tatsächlich existierenden Mikroklimas vor der Fassade basierend auf Messung etwas weiter entfernter Klimamessstationen. Insbesondere Verschattungen durch Nachbarfassaden sowie die Strahlungsbedingungen durch umliegende Bebauung führen zwangsweise zu Abweichungen zwischen Simulationen und Messungen.

Die stärker schwankenden Reaktionen des Feuchtefühlers im Mauerwerk im Vergleich zur Simulation deuten auf einen geringeren Diffusionswiderstand des Mauerwerkes in der Realität im Vergleich zur Simulation hin.

Ein bedeutender Faktor, der zu relevanten Unterschieden führen kann, ist die tatsächliche Dauer der Benetzung einer Fassade und die dann zur Verfügung stehende Menge an Wasser. Es ist bekannt, dass kleine Wassertropfen durch Verwirbelungen auch die weniger exponierten Stellen einer Fassade gelangen können und gleichzeitig Regenereignisse mit kleinen Tröpfchen häufig länger andauern. Damit scheint die Voraussetzung gegeben, dass praktisch jeder Fassade mit hohem Saugkoeffizient unabhängig von Ihrer Lage eine erhebliche Menge Wasser zur Verfügung stehen kann.

Beobachtungen an dieser alten Nationalbibliothek bestätigen, dass die Fassade in der Winterzeit zwar benetzt, aber offensichtlich trotz Ihres hohen Saugkoeffizienten keine großen Wassermengen aufnimmt.

Die in diesem Fall reduzierte Beheizung wirkt sich sogar positiv auf die Sicherheit der Einschätzung aus, da das Temperaturprofil im Mauerwerk ein ähnliches Profil annimmt, wie wenn die Wand von innen gedämmt wäre. Das heißt, das reduzierte Trocknungspotential ist in der Betrachtung schon zum Teil bereits berücksichtigt.

4.1.6 Ermittlung der besten Messstelle

Aus den theoretischen Überlegungen zu Beginn des Kapitels angedeutet, geht hervor, dass bei senkrechter Anströmung des Gebäudes mit Würfel- oder Quaderform die Kanten und Ecken als besonders exponiert und anfällig für die Benetzung durch Schlagregen sind, was auch in Abbildung 73 sichtbar ist.

Folgende Abbildungen bestätigen die Aussagen, dass vor allem Gebäudekanten besonders stark von der Bewitterung betroffen sind. Des Weiteren ist deutlich erkennbar, dass die Windrichtung über die Fassadenbenetzung entscheidet. Die der Wetterseite abgewandten Fassaden werden je nach Event gar nicht oder nur minimal benetzt.



Abbildung 73: Algenbildung (oben links) und Fassadenbenetzung bei einsetzendem Regen

Die Messung sollte nicht unter Fensterbänken oder im Bereich von Vorsprüngen stattfinden. Eckbereiche und Wandflächen an denen Schlagregen ungestört herablaufen kann, sind geeignet. Bereiche von Wärmebrücken zum Beispiel an ungedämmten Betonbauteilen sollten vermieden werden, weil dort die Trocknung aufgrund des Wärmestroms aus dem Inneren schneller erfolgt. Diese Stellen können mittels Thermografie im Winter identifiziert werden.

5 Planung einer Innendämmung am Beispiel der „Ancienne Direction“ in Luxembourg

Bei der „Ancienne Direction“ in der Stadt Luxembourg handelt es sich um den alten Firmensitz der Firma Paul Wurth S.A., seit kurzem eine 100 % Tochter der SMS Gruppe. Paul Wurth ist im Bereich der Hochofen und Stahlwerkstechnologie aktiv und wurde in den vergangenen Jahren stetig umstrukturiert, um die Herausforderungen des Weltmarktes bestehen zu können.

Das Direktionsgebäude wurde im Jahre 1900 errichtet und in den vergangenen Jahren dem LUCA (Luxembourg Center for Architecture), der luxemburgischen Stiftung für Architektur und Ingenieurwesen zur Verfügung gestellt. Da sich der bautechnische Zustand des Gebäudes in den vergangenen Jahren stetig verschlechtert hat, wurde Paul Wurth Geprolux mit der Sanierungsplanung beauftragt. Für die Sanierung wird das Gebäude geleert und auch das LUCA wird das Gebäude verlassen. In Zukunft soll das Gebäude von Paul Wurth firmenintern zu Büro Zwecken genutzt werden.

Das Gebäude ist als nationales Monument Luxembourgs eingestuft und in der Liste wie folgt veröffentlicht:

*Das **ehemalige Direktionsgebäude** sowie die Halle 1 auf dem Gelände der ehemaligen Stahlwerke Hollerich, eingetragen im Kataster der Gemeinde Luxembourg, Sektion HoA von Hollerich, unter der Nummer 449/8083 und ist in der Karte als im grafischen Teil gestrichelt dargestellt. - Beschluss des Regierungsrats vom 26. Oktober 2018*

Dadurch kann die Sanierung nur in enger Zusammenarbeit mit dem „Service des Sites & Monuments Nationaux“ (kurz: SSMN) stattfinden. Im Kern dürfen daher keine Arbeiten ausgeführt werden, die den Charakter des Gebäudes verändern. Eine energetische Ertüchtigung mittels außenliegender Fassadendämmung ist somit ausgeschlossen. Auch die Sichtsteine aus Ziegel und Luxemburger Naturstein müssen vollständig erhalten werden. Ähnliches gilt auch für die Ausstattungen im Inneren des Gebäudes – z.B. Holztreppe und Holzböden sind zu erhalten. Die Fenster dürfen zwar ersetzt werden, wobei Material und Aussehen sich am Bestand orientieren und durch SSMN genehmigt werden müssen.



Abbildung 74: Aufnahme aus dem Jahr 2021

Die beiden folgenden Abbildungen zeigen das Gebäude im Kontext der Umgebung. Insbesondere die Dachkonstruktion hatte sich in der Vergangenheit immer wieder geändert.

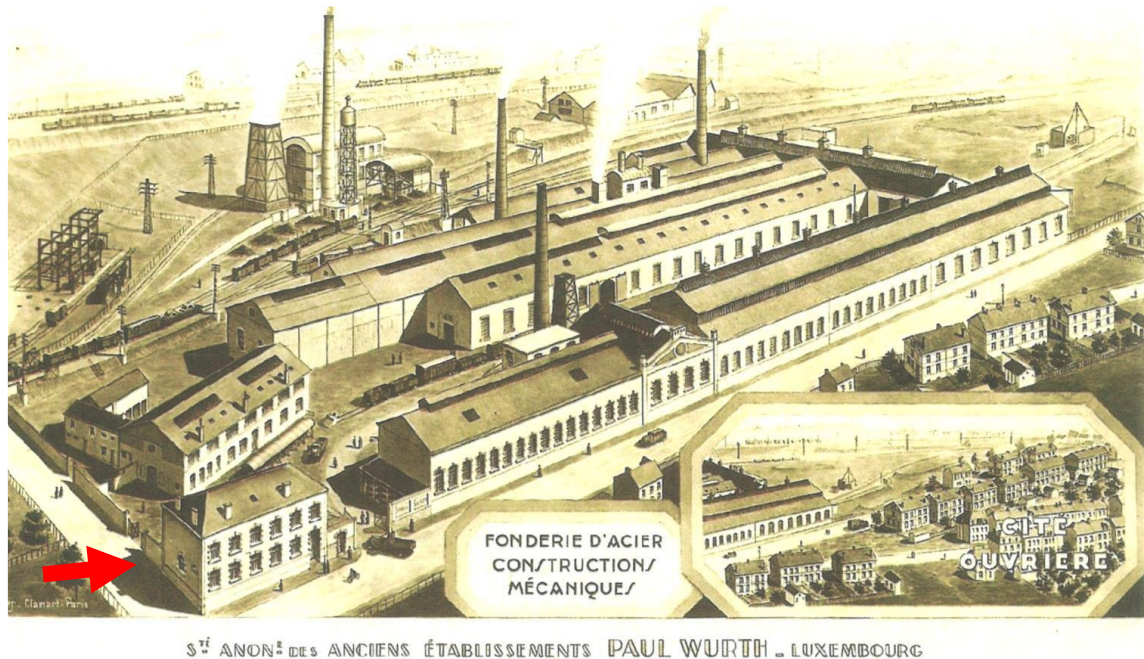


Abbildung 75: Eine Darstellung des Stahlwerksareals aus dem Jahr 1923



Abbildung 76: Eine Aufnahme aus dem Jahr 1945

Für die Planungsdurchführung wurde ein um Messtechnik erweiterter Planungsleitfaden aus dem WTA Merkblatt 6-4 verwendet. Die Erweiterung ist auf der folgenden Seite abgebildet und wurde bei diesem Projekt vollständig abgearbeitet.

Messungen und Simulationen im Vorfeld von Innendämmprojekten zur Erhöhung der Planungssicherheit

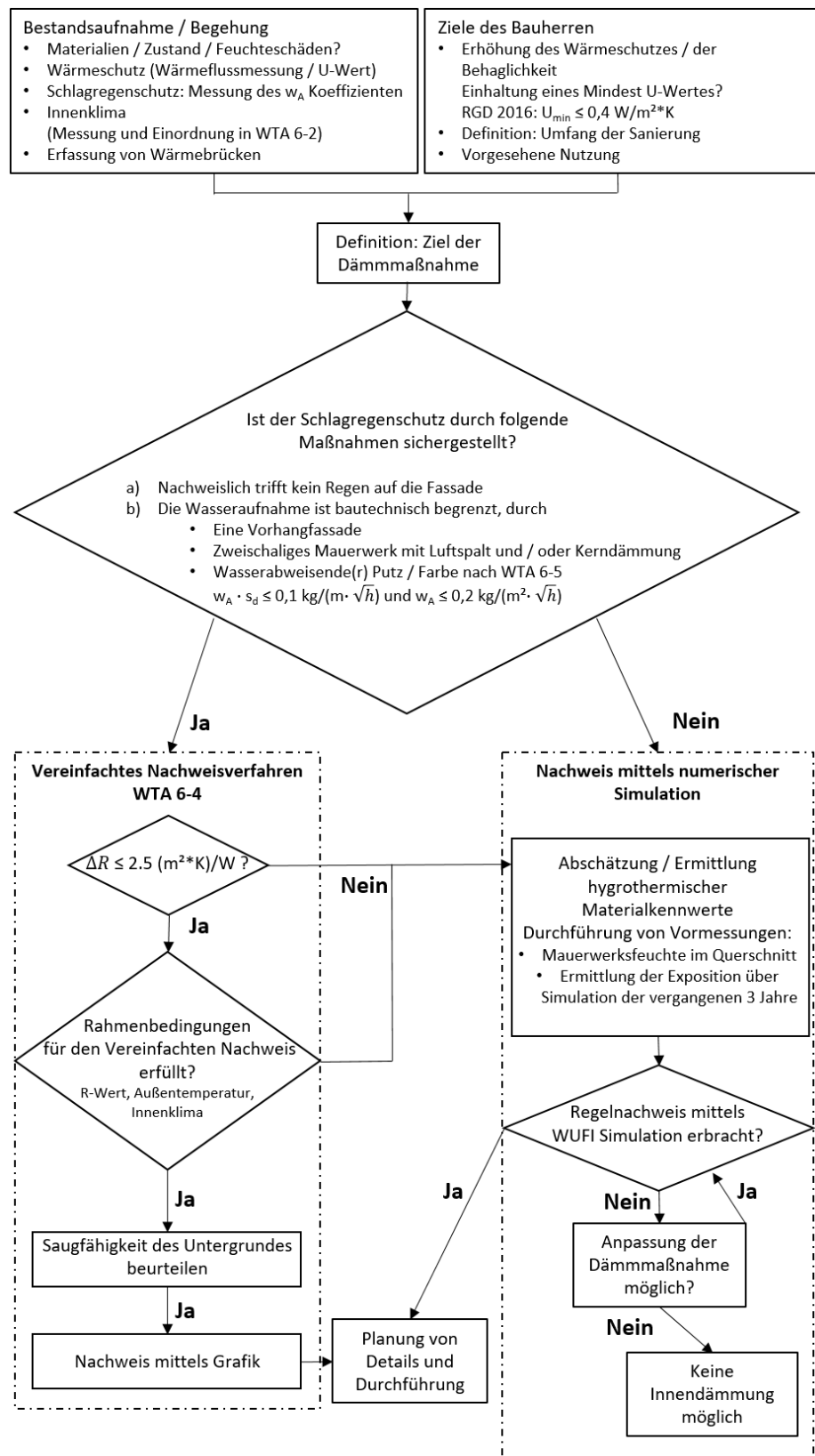


Abbildung 77: Um Hinweise zur Messtechnik erweitertes Ablaufdiagramm zur Planung einer Innendämmung gemäß WTA 6-4

5.1 Bestandsaufnahme

Das Gebäude befindet sich äußerlich in einem schlechten Zustand. Nahezu alle Bauteile zeigen aufgrund des hohen Alters und der geringen Pflege in den vergangenen Jahren erhebliche Schäden.

5.1.1 Zustand Fassade und Mauerwerk

Die Fassade zeigt zahlreiche Beschädigungen, zum Teil durch Verwitterung, zum Teil durch mechanische Einwirkungen. An zwei Stellen zeigen sie auffällige, rötliche Verfärbungen, vermutlich infolge von Korrosion.

- ➔ Die Putzfassade wird repariert und neu angestrichen werden. Es ist davon auszugehen, dass nach der Reparatur die Anforderungen an den Schlagregenschutz gemäß WTA 6-5 erreicht werden.

Die Ziegel- und Natursteineinfassungen um Türen und Fenster sind vor allem im Bereich der Verfugungen stark beschädigt. Es ist nicht auszuschließen, dass in den vergangenen Jahren bereits eine Hydrophobierung der Steine durchgeführt wurde. Auf der nebenstehenden Abbildung 78 ist ein Frostscha- den an einem Stein zu sehen. Im Bereich der Oberfläche ist der Rotfärbung etwas verdunkelt, was für ein Eindringen einer Hydrophobierung spricht. Darüber wurde eine defekte Fuge mit Zementmörtel repariert. Jedoch ist sowohl an den Flanken, als auch den Verbindungen zum Putz eine deutliche Rissbildung zu erkennen, die bei an der Fassade herablaufendem Wasser, zu einer relativ großen Wasseraufnahme führen kann.



Abbildung 78: Frostscha- den an einem Ziegel und defekte Verfugung.

Um die Qualität der Einfassungen abschätzen zu können, wird der Wasseraufnahmekoeffizient mittels Karsten Röhrchen und Janning Platte ermittelt. Hierbei handelt es sich aus Gründen schlechter Messgenauigkeit nur um eine Indikation. Es kann jedoch erkannt werden, ob bereits eine Hydrophobierung durchgeführt wurde oder nicht. Die absoluten Werte dürfen nicht überwertet werden. Prinzipiell gilt für die Sanierung:

- ➔ Die Ziegelsteinfugen sind auszukratzen (mindestens 5 cm) und zu erneuern. Hierbei sollte ein nicht saugender, möglichst diffusionsoffener Mörtel zum Einsatz kommen.
- ➔ Gebrochene Steine und solche mit großflächigen Schäden sind zu tauschen.

Aufgrund der unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten von Mörtel, Ziegel, Ern- zener Naturstein und Putz wird es auch in der Zukunft zu Flankenabriss und kleineren Rissen im Bereich der Grenzflächen kommen. Um dauerhaft schadensfrei zu bleiben, sind die kritischen Fugen regelmäßig zu inspizieren und bei Bedarf zu reparieren.

5.1.2 Messung des Wasseraufnahmekoeffizienten w_a

Da die Erneuerung der Putzfassade bereits fest eingeplant ist, wurde nur an den zu erhaltenen Sichtsteinen die Wasseraufnahme gemessen.

Dabei wurden Karsten Röhrchen und eine Janning Platte (ähnlich der Frank Platte) verwendet. Aufgrund der hohen Sauggeschwindigkeit konnte die üblicherweise angepeilte Messdauer von einer Stunde nicht erreicht werden. Das Nachfüllen eines Messröhrchens um wenige Milliliter, zeigte sich als ungenau und führte zu großen Messabweichungen.

Weitere Störfaktoren in der Messung sind die nicht genau definierten Größen der Messflächen, bzw. der negative Einfluss des Dichtfermits auf die Ausbildung der Fläche.

Es fiel bei der Messung auf, dass die Sauggeschwindigkeit über die gesamte Versuchsdauer annähernd konstant verlief und nicht einer Wurzelfunktion folgte.



Abbildung 79: Anordnung der Röhrchen bei der w_a Wert Messung.

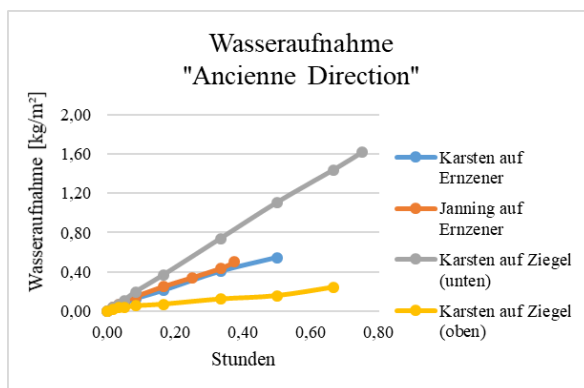


Abbildung 80: Messergebnisse der spezifischen Wasseraufnahme bezogen auf die Zeit

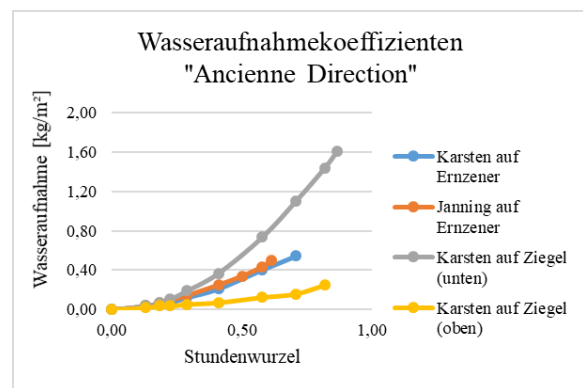


Abbildung 81: Messergebnisse der spezifischen Wasseraufnahme bezogen auf die Wurzel der Zeit

Während die beiden Messungen auf dem Ernzener Naturstein nah bei einander liegen (w_a -Wert: $0,8 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$), zeigen die beiden Messungen auf dem Ziegel große Abweichung. Der w_a -Wert streut zwischen $0,3$ und $1,9 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$.

- ➔ Die hohe Varianz der Wasseraufnahme beim Ziegelstein sowie die Kantenabbrüche lassen vermuten, dass in der Vergangenheit bereits eine Hydrophobierung oder zumindest eine Beschichtung der Steine durchgeführt wurde.

Bei genauer Untersuchung der Natursteine stellte sich tatsächlich heraus, dass bereits eine Beschichtung auf die Steine aufgetragen wurde, die sich mit dem Fingernagel abkratzen lies. Da sich eine solche Beschichtung im Nachhinein nur noch mechanisch, mit einer oberflächlichen Zerstörung des Steines und nachfolgender Politur entfernen lässt, sollte sehr genau über die Sinnhaftigkeit einer solchen Reparaturschicht nachgedacht werden.



Abbildung 82: Nahansicht der Beschichtung auf dem Naturstein

- ➔ Die Natursteine sollten abgebürstet und mit Kaliwasserglas grundiert werden. Im Anschluss kann die Wasseraufnahme wieder mit einem gelblich eingefärbten Kalkanstrich reduziert werden. Dieser Anstrich ist weitgehend diffusionsoffen und reduziert trotzdem die Wasseraufnahme.

5.1.3 Wärmeflussmessung zur Bestimmung des experimentellen U-Wertes

Um die thermische Qualität der Bestandskonstruktion einschätzen zu können, wurde im Oktober 2021 eine Wärmeflussmessung an einer ungestörten Wand an der Nord-Fassade durchgeführt.

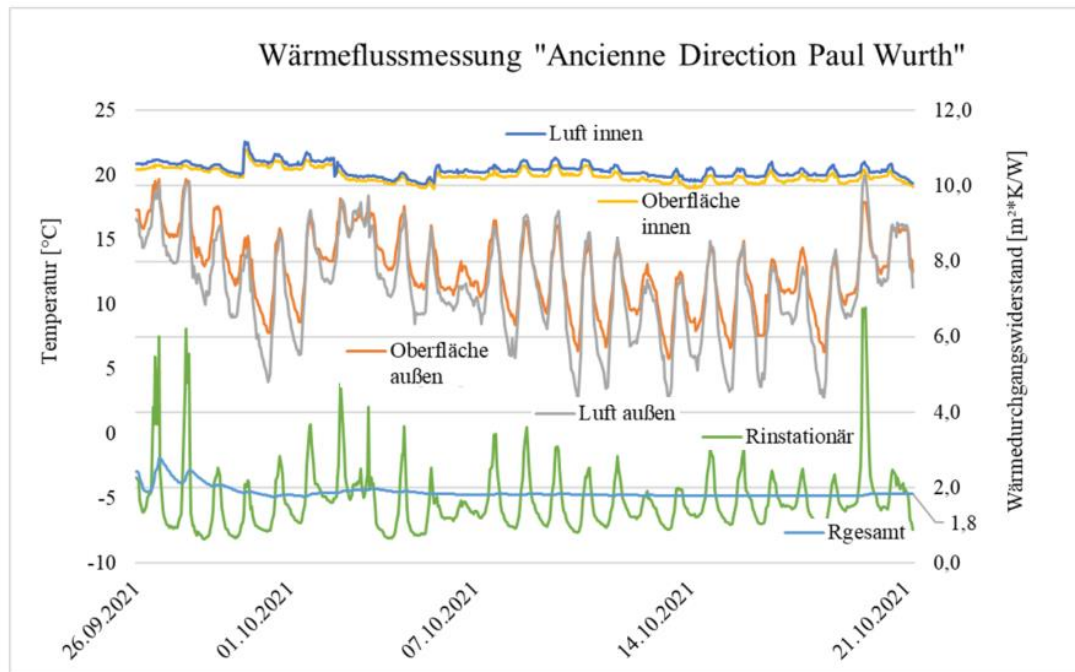


Abbildung 83: Ergebnisgrafik für die Wärmeflussmessung in der "Ancienne direction"

Für die ungestörte Außenwand ergibt die Messung einen Wärmedurchgangswiderstand inkl. der addierten Oberflächenübergangswiderstände gemäß Norm ($\sum R_s = 0,17 \text{ m}^2\text{K/W}$) von 1,8 ($\text{m}^2\text{K/W}$). Daraus ergibt sich ein U-Wert von $0,56 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.

Dieser sehr niedrige Wert für historisches Mauerwerk kann zum einen mit dem sehr dicken Mauerwerk und zum anderen mit den tief einschneidenden Fensternischen im Abstand von etwa 1,5 m links und rechts der Messstelle zusammen. Im Bereich der Laibung der Fenster ist der Wärmefluss deutlich erhöht, wodurch der Wärmefluss auf der ungestörten Wand niedriger ausfällt. Folgender Ausschnitt aus einer Wärmebrückenberechnung stellt diesen Effekt qualitativ dar. Die Wärmefluss-Messstelle ist mit einem roten Streifen dargestellt.

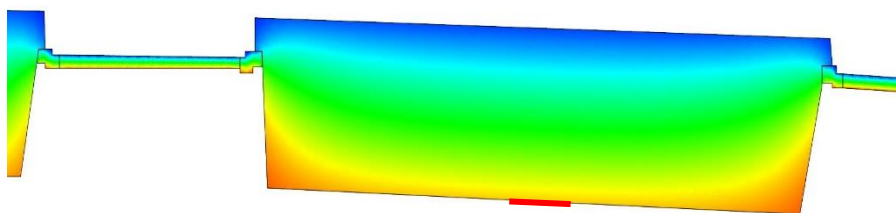


Abbildung 84: Qualitative Darstellung des Wärmebrückeneinflusses zwischen zwei Fenstern.

Auch eine fehlerhafte Messung ist nicht auszuschließen. Da ab Dezember aufgrund reduzierter Nutzung die Heizung heruntergefahren wurde, konnte die Messung nicht mit einer anderen Messplatte an der selben Stelle wiederholt werden.

Die Wiederholungsmessung fand ab April 2022 in einem benachbarten, einzeln beheizten Raum statt. Aufgrund der zum Teil hohen Außentemperaturen stellt sich kein dauerhaft hoher Temperaturunterschied ein. Ab Mitte April erreicht die Lufttemperatur außen tagsüber regelmäßig die Temperatur der Innenluft. Folgende Abbildung zeigt die Temperaturverläufe sowie den instationären Wert des Bauteilwiderstandes.

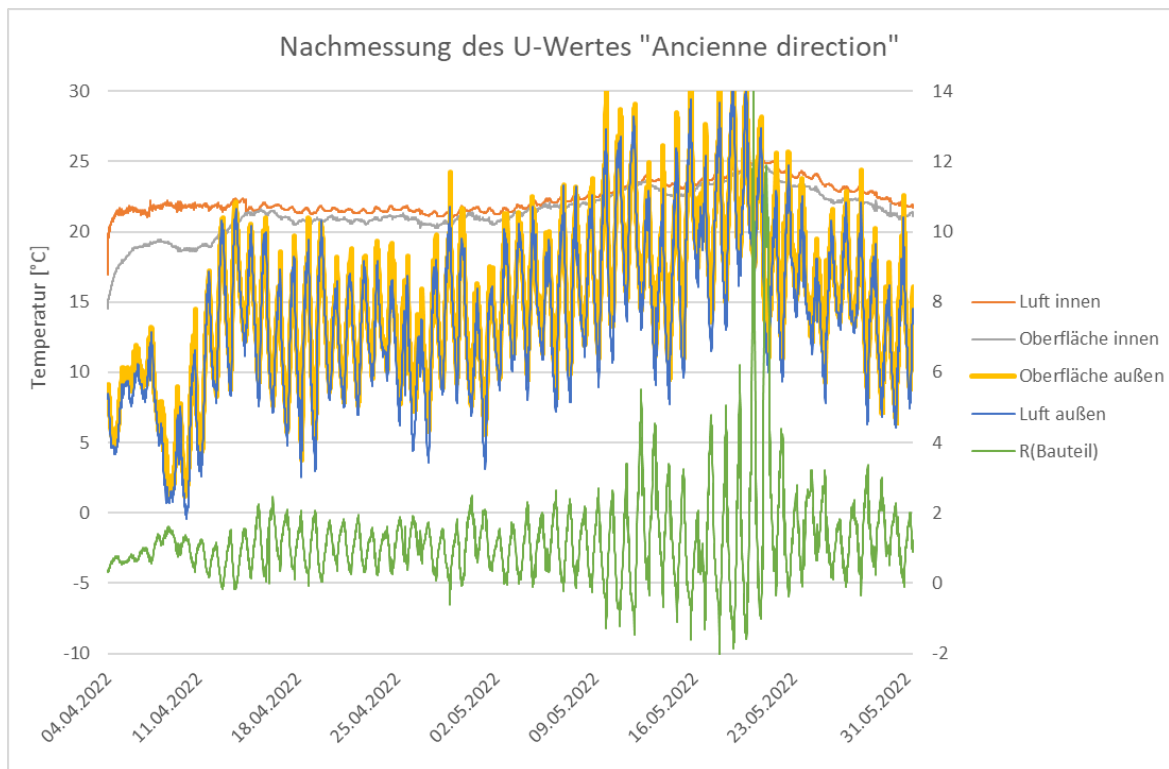


Abbildung 85: Nachmessung U-Wert „Ancienne Direction“ - 8 Wochen Übersicht

Um dennoch eine Aussage über die thermische Qualität des Mauerwerks treffen zu können, wurde aus der 58 Tage andauernden Messreihe der Zeitraum von 06.04.22 bis 12.04.22 ausgewählt und analysiert. In diesem Zeitraum liegt die Temperaturdifferenz zwischen den beiden Oberflächen im Mittel bei 11 K und somit noch im akzeptablen Bereich. Auf der folgenden Abbildung befindet sich die grafische Auswertung des 6 tägigen Zeitraums.

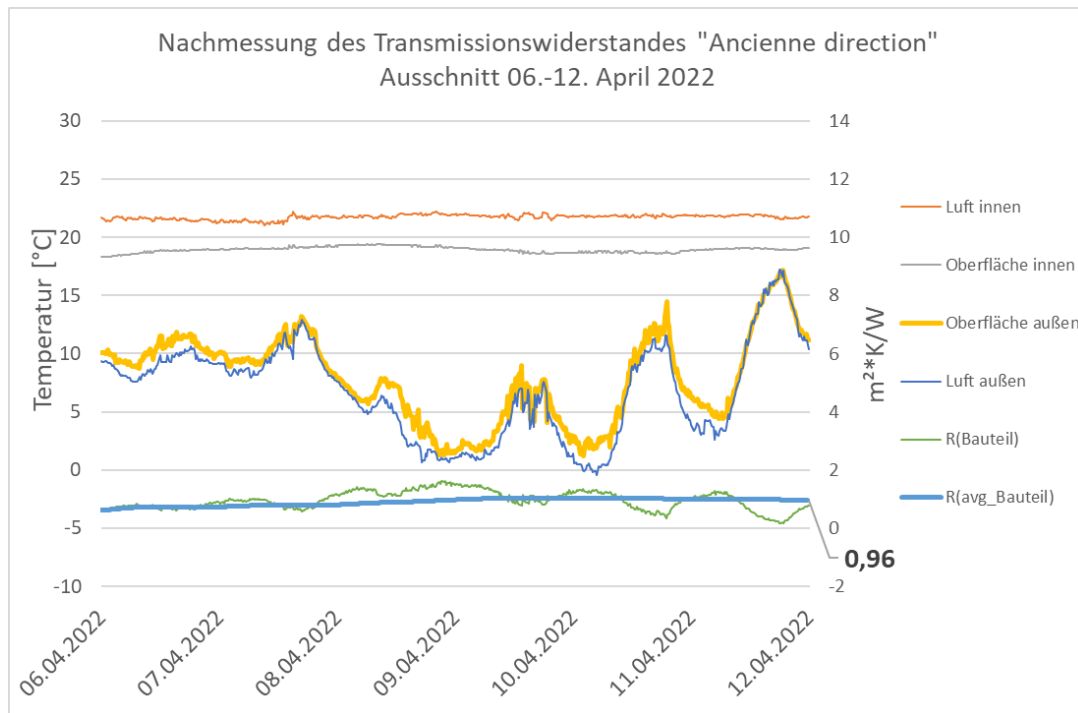


Abbildung 86: Nachmessung U-Wert „Ancienne Direction“ - 6 Tage im April

Die Auswertung ergibt einen Transmissionswiderstand des Mauerwerks von $0,96 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$. Nach Addition der normierten Oberflächenübergangswiderstände, ergibt sich daraus ein experimenteller U-Wert = $0,88 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$.

Dieser Wert liegt nah am ursprünglichen Erwartungswert von etwa $1 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ und wird daher als realistisch betrachtet.

5.1.4 Zu erwartendes Innenklima

Da der aktuelle bauliche Zustand für die zukünftige Nutzung nicht repräsentativ ist, ist eine Messung des Innenklimas nicht zielführend. Da das Gebäude eine mechanische Lüftung erhalten und als Bürogebäude genutzt werden soll, kann von einer niedrigen bis normalen Feuchte gemäß WTA 6-2 ausgegangen werden. Für die Simulationen wurde „normales“ Innenklima angenommen.

5.1.5 Bauschäden jeglicher Art

Im Zuge der Bestandserfassung sollten nicht nur die typischen Bauschäden, welche im Zusammenhang mit Innendämmung auftreten können untersucht werden, sondern jegliche Schäden dokumentiert werden. Häufig vorkommende Schäden, die lange unerkannt bleiben oder seit Jahren hingenommen werden sind:

- Defekte Regenfallrohre und dadurch stärkere Benetzung der Fassade in diesem Bereich oder sogar ein Eindringen des Wassers in die Konstruktion
- Feuchteintritte im Bereich erdberührender Bauteile aufgrund ungenügender Abdichtung
- Leckagen an wasserführenden Leitungen (Wasser, Abwasser, Heizung)

Aber Achtung: Insbesondere bei Wasserleitungen im Außenwandbereich kann es durch die Anbringung einer Innendämmung zu Frostschäden kommen, da die Bestandswand kälter wird. Auch Heizungsleitungen können unter Umständen gefährdet sein, sodass gegebenenfalls die Leitungsführung geändert oder zur Not eine elektrische Begleitheizung mit Frostwächter verbaut werden muss.

5.2 Ziele des Bauherren

Im Gespräch mit dem Projektleiter auf Seiten des Bauherrn wurden folgende Ziele festgelegt:

- Einhaltung der gesetzlichen Grenzen ($U\text{-Wert} \leq 0,4 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$).
- Nutzung der Immobilie als Bürogebäude.
- Kernsanierung unter Berücksichtigung der strengen Rahmenbedingungen des Denkmalschutzes
 - o Böden bleiben erhalten
 - o Neue Fenster im Dekor des Bestandes
 - o Holztreppe bleibt erhalten
 - o Außenputz und Anstrich wird erneuert
 - o Dachkonstruktion wird im Rahmen der Möglichkeiten erhöht.
- Kostenbewusstsein und minimaler Raumverlust durch die Innendämmung.
- Verwendung nachhaltiger und unproblematischer Materialien soweit möglich.

5.3 Entscheidung über den Schlagregenschutz

Gemäß dem Ablaufdiagramm der Planung einer Innendämmung nach Abbildung 77, ist im weiteren Verlauf die Beurteilung über den Schlagregenschutz durchzuführen.

- Für die ungestörte Fassade ist der Schlagregenschutz nach der Reparatur des Putzes und der Aufbringung eines neuen Anstrichs gesichert und somit ist hier der Nachweis mittels vereinfachtem Verfahren zulässig.
- Bei den Ziegel- und Natursteinen um die Fenster liegen die Wasseraufnahmekoeffizienten zum Teil deutlich über den Grenzwerten der WTA 6-5 ($w_a > 0,2 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$). Hier ist somit ein Nachweis mittels numerischer Simulation notwendig. Da es sich um mehrdimensionale Effekte handelt, kommt hierfür nachfolgend WUFI 2D zum Einsatz.

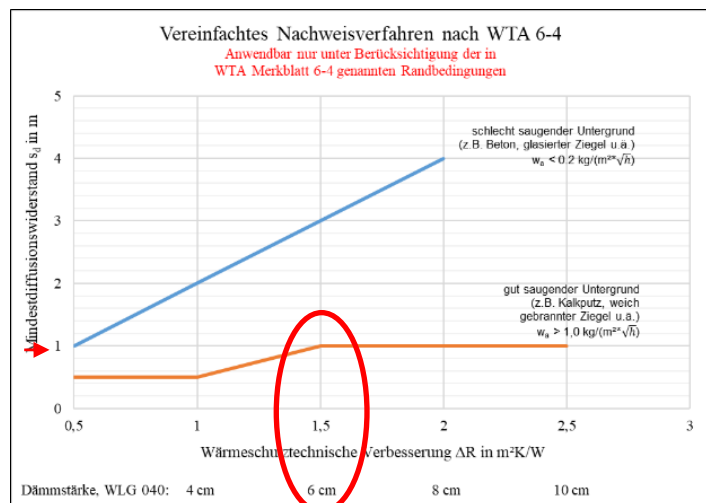
5.4 Nachweisführung

5.4.1 Vereinfachter Nachweis auf der ungestörten Wand

Auf Basis der gesetzlichen Kriterien zum Wärmedurchgangswiderstand bei Innendämmung im Bestand wird die Dicke der Dämmung ausgelegt.

- Wärmeflussmessung (2te) im Bestand $\sum R = 1,14 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$
 - Mindest-U-Werte $\leq 0,4 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$ $> \sum R = 2,50 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$
- $$\Delta R \geq 1,36 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$$

Die Differenz ergibt die wärmeschutztechnische Verbesserung bzw. die Dämmstoffstärke, die den Dämmwiderstand um $\geq 1,36 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$ erhöht. Da der überwiegende Teil der Innendämmstoffe plattenförmig in unterschiedlichen Dämmstärken, üblicherweise in zwei cm Schritten angeboten wird, ergibt sich daraus eine Dämmstärke von 6 cm bei einer WLГ 040.



Trägt man diese in der Grafik des vereinfachten Nachweises auf, folgt daraus, dass ein Mindestdiffusionswiderstand von 1,0 m erforderlich ist.

Abbildung 87: Eintragung in die Grafik des vereinfachten Nachweises

Aufgrund der Widerstandsverbesserung von $> 1 \text{ m}^2\text{K/W}$ ist kein Nachweis mittels der DIN 4108-3 möglich, da das Bauteil nicht unter die nachweisfreien Konstruktionen fällt. Mit der ausgewählten Dämmung und bei gemessenem Widerstand (2te Messung) ergibt sich daraus folgender U-Wert:

- Wärmeflussmessung im Bestand	$R = 1,14 \text{ m}^2\text{K/W}$
- Dämmwiderstand der Innendämmung:	$R = 1,50 \text{ m}^2\text{K/W}$
Summe:	$R = 2,64 \text{ m}^2\text{K/W}$
$U = 0,38 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}) \leq 0,4 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$	

5.4.2 Numerischer Nachweis für die Bereiche um die Fenster

Die Fenstereinfassungen können mittels WUFI 2D simuliert werden. Hierzu ist es notwendig, den Aufbau über das Eingabefenster grafisch darzustellen. Es wird zuerst der Aufbau ohne und anschließend mit Innendämmung generiert und simuliert. Die Ergebnisse werden mit Messdaten verglichen und basieren auf der ersten Wärmeflussmessung (Oktober 2021), weshalb mit einer Dämmstärke von 4 cm gerechnet wird. Für den Abgleich der Mauerwerksfeuchte, wird mittels 10 mm Bohrung an zwei Stellen die Materialfeuchte nach einer Ausgleichszeit von 20 min gemessen. Während der Messungen herrschte reduzierter Heizbetrieb und im Raum hinter dem Fenster betrug die Temperatur $17 \text{ }^\circ\text{C}$. Im Anschluss an die grafische Darstellung, werden den erstellten Flächen Materialdatensätze zugeordnet. Folgende Randbedingungen sind für die Simulation gewählt worden:

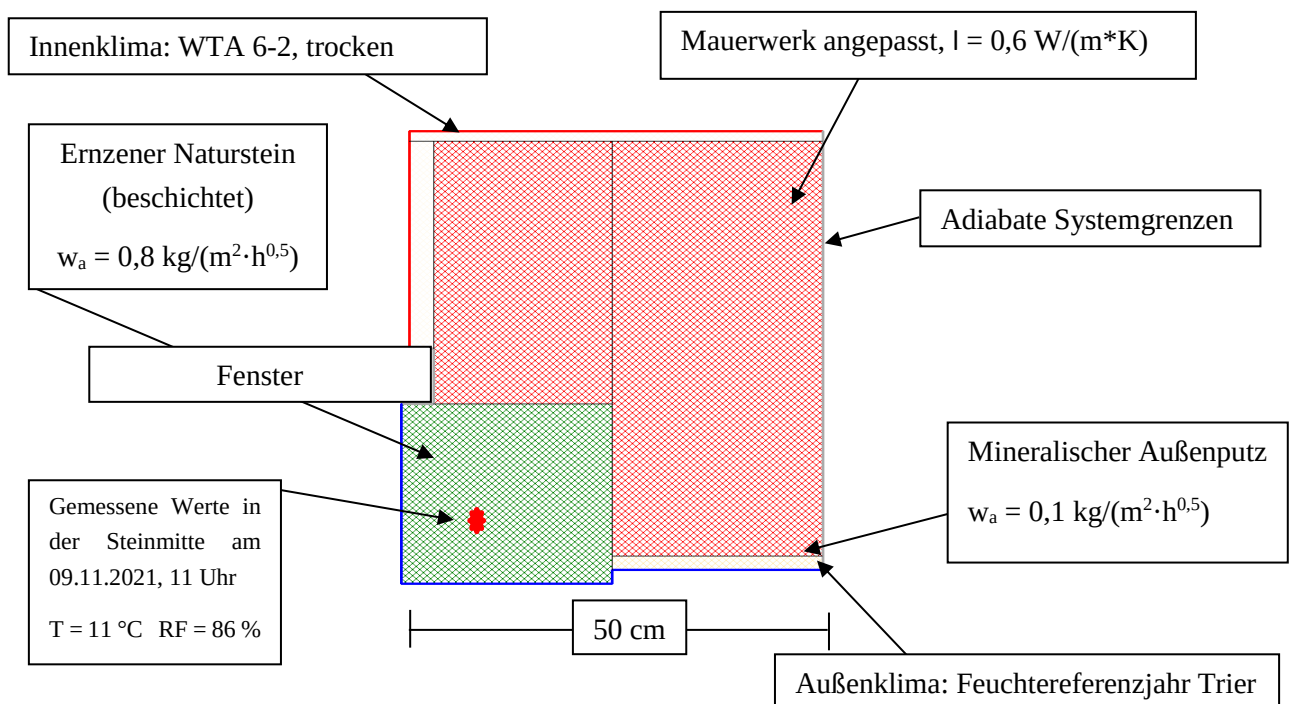
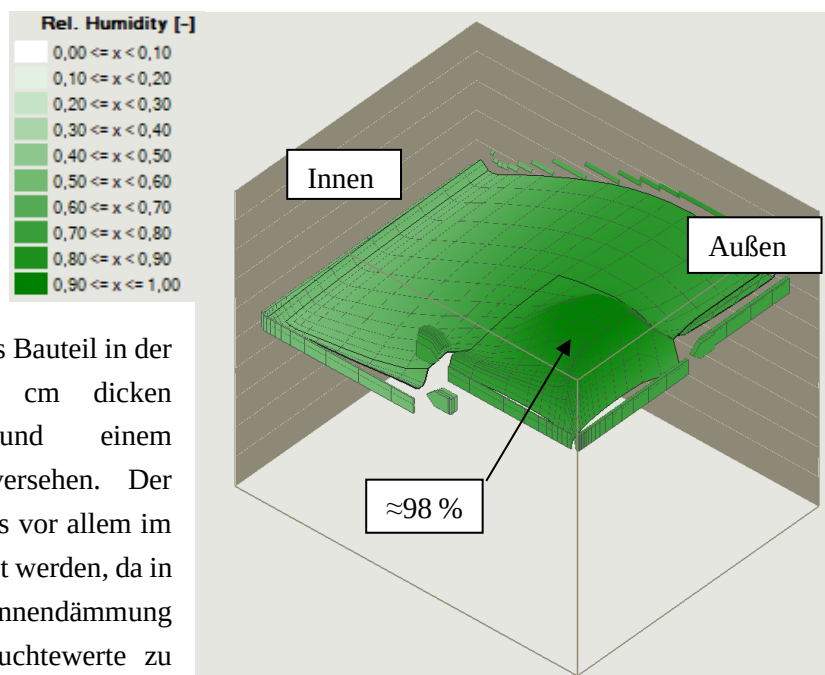


Abbildung 88: Übersichtsdarstellung über den 2 D Mauerwerksquerschnitt

Auf der Grundlage der oben genannten Eingangsparameter wird eine Simulation für das ungedämmte Bauteil durchgeführt. Obwohl der Schlagregenexponent r_s mit 0,01 bereits minimal angesetzt wird, ergibt die Simulation deutlich höhere Feuchtwerte im Naturstein als die Messung vor Ort erwarten lässt. Die im Kontext der Innendämmung häufig als Grenze genannten 95 % relative Porenluftfeuchte im Naturstein werden überschritten, das Ergebnis ist jedoch als unkritisch einzustufen, da die Durchfeuchtung des Natursteins unter 30 % (vgl. Kap. 2.3.1.3, S. 48) liegt und somit in diesem Fall kein Frostschaden droht. Die höchste Durchfeuchtung liegt im Kern des Ecksteins. Basierend auf der relativen Feuchte von ca. 98 % (dies entspricht einem Wassergehalt von rund 4,5 kg/m³) und der freien Sättigung (ca. 170 kg/m³) liegt die Durchfeuchtung bzw. der Sättigungsgrad bei 2,6 %.

Gut zu sehen ist auch, dass die Feuchtigkeit im Querschnitt von innen nach außen zunimmt. Durch die große Verdunstungsfläche des Ecksteins im Vergleich zur Benetzungsfläche zeigt der Stein vor allem im Sommer ein gutes Abtrocknungsverhalten.

Die Abbildung gibt den Zustand im Bauteil im Winterfall wieder – dargestellt ist der Verlauf der relativen Feuchte:



Im nächsten Schritt wird das Bauteil in der Software mit einer 4 cm dicken Holzfaserdämmschicht und einem zugehörigen Innenputz versehen. Der Bestandsputz aus Gips muss vor allem im Bereich der Laibung entfernt werden, da in diesem Bereich unter der Innendämmung die höchsten relativen Feuchtwerte zu erwarten sind und gleichzeitig so Platz für die Innendämmung geschaffen wird.

Abbildung 89: 2D Simulation einer Fenstereinfassung im nicht gedämmten Zustand

Obwohl auch in Zukunft aufgrund der Nutzung als Verwaltungsgebäude und im Zusammenspiel mit einer mechanischen Lüftungsanlage davon auszugehen ist, dass das Innenklima normale Feuchte nicht überschreitet, wurde für die Simulation des gedämmten Bauteils die „normale +5 %“ Feuchte gemäß WTA 6-2 gewählt. Die aufgebrachte Dämmschicht hat in Kombination mit dem gewählten Putz einen Diffusionswiderstand $s_d = 1$ m.

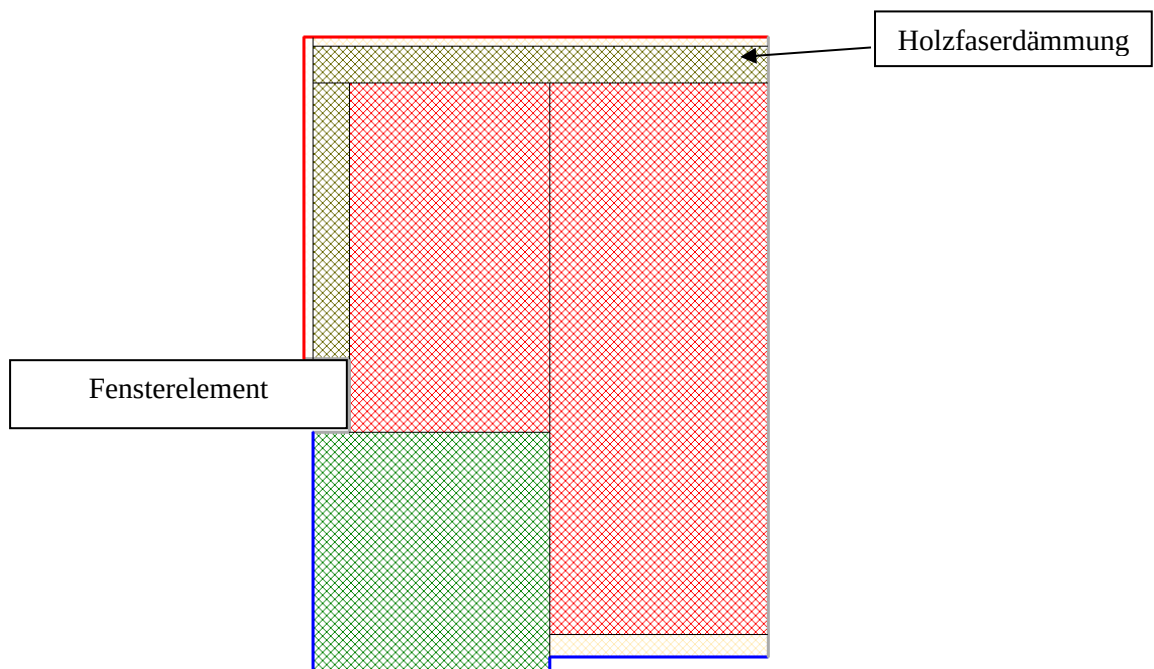


Abbildung 90: WUFI 2 D - Bauteilskizze mit 4 cm Innendämmschicht

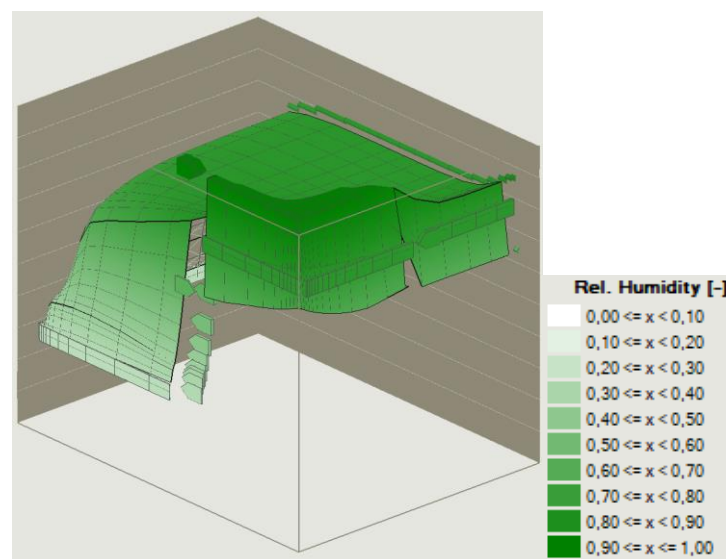


Abbildung 91: 2D Simulation einer Fenstereinfassung mit 4 cm starker Innendämmung

Durch die Innendämmung stellt sich im Winter eine deutlich höhere Feuchte im äußeren Teil des Bauteils ein. Auch im Grenzbereich zwischen Bestandskonstruktion und Dämmschicht ist die relative Porenluftfeuchte erhöht, liegt aber im unkritischen Bereich um 89 %.

Folgende Abbildung 92 zeigt den Feuchteverlauf unter der Innendämmschicht im Bereich der Wärmebrücke der Fensterlaibung dort wo der schwarze Kreis ist. Unter gegebenen Rahmenbedingungen wird eine maximale Feuchte von 89 % erreicht. Dieser Wert liegt deutlich unter dem kritischen Bereich von 95 %.

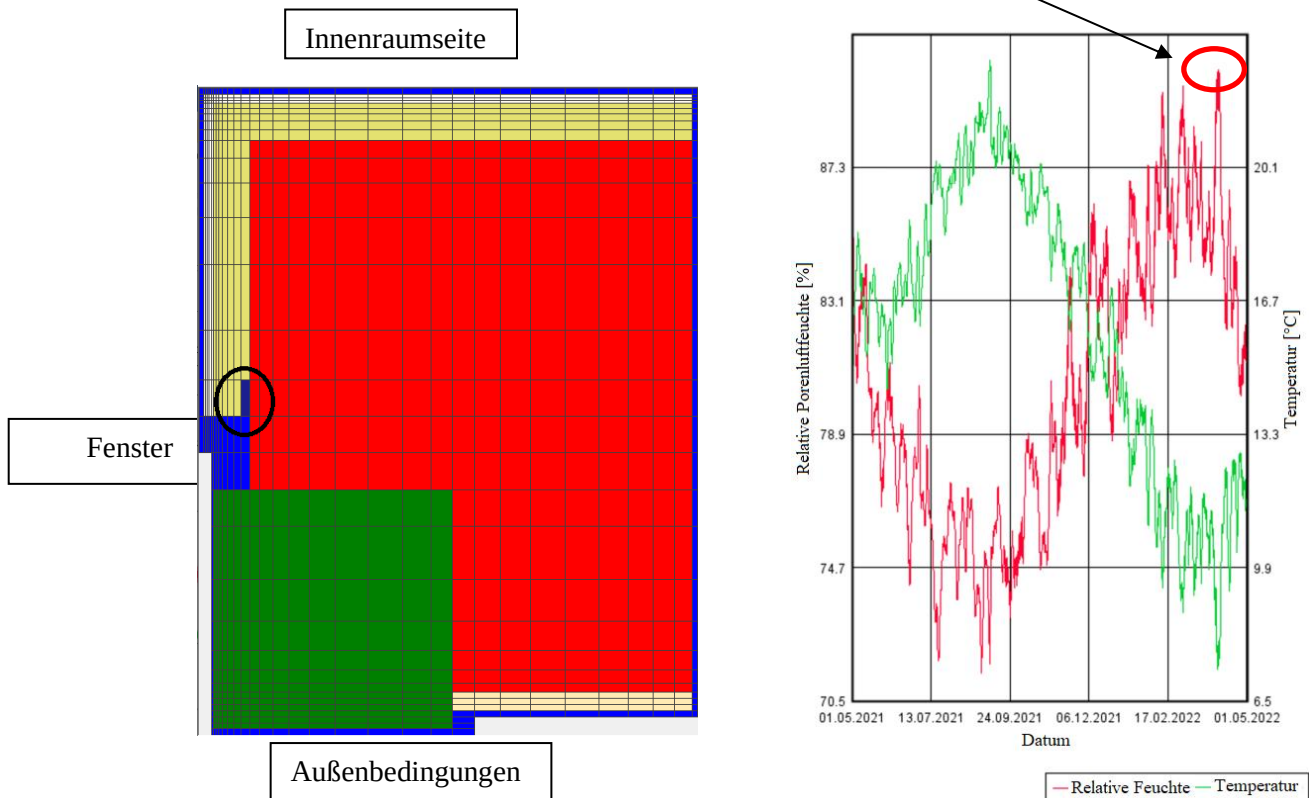


Abbildung 92: Ergebnisse der 2D Simulation an einer Fenstereinfassung mit Temperatur und Feuchteverlauf

Da der Nachweis für dieses Bauteil mittels Simulation sowohl unter den zu erwartenden „normalen“ als auch unter verschärften Bedingungen bezüglich des Innenklimas gelingt, ist der Bauteilnachweis gelungen und die Innendämmung kann nach Durchführung der genannten Fassadenreparaturen durchgeführt werden.

6 Optimierung von Innendämmmaßnahmen

In Abhängigkeit der gegebenen örtlichen Rahmenbedingungen eignen sich unterschiedliche Systeme und Dicken von Innendämmungen besser oder schlechter. Bei den Optimierungen kann die Priorität sowohl auf die energetische, als auf die finanzielle Wirtschaftlichkeit gelegt werden. Neben diesen beiden Eigenschaften werden auch noch Äquivalente zur Bewertung der Umweltverträglichkeit herangezogen. Das Bekannteste ist das GWP – Global Warming Potential, bei dem alle Emissionen und Verbräuche in CO₂ Äquivalente umgerechnet werden.

Im Folgenden werden die Einflussfaktoren beleuchtet und ihre Wirkung auf die Auslegung der Innendämmkonstruktion analysiert.

6.1 Einflussfaktoren

Prinzipiell spielen folgende Überlegungen bei der Optimierung einer Dämmmaßnahme eine Rolle:

- Gesetzliche Rahmenbedingungen – U-Wert maximal 0,4 W/m²*K
- Thermischer Widerstand der Bestandskonstruktion
- Klimabedingungen / Heizgradtage
- Energieaufwand für die Herstellung des Dämmstoffs (graue Energie)
- Flächenverlust im Gebäude durch die Dämmung
- Flächenpreis
- Wertsteigerung der Immobilie durch die Dämmung
- Art der Energiebereitstellung / Primärenergiefaktor
- Energiekosten /-entwicklung

Einige der Faktoren sind statisch und es wird in der Kalkulation der zur Bauphase gültige Wert verwendet z.B. der Mindest-U-Wert, der thermische Widerstand im Bestand, die graue Energie oder der Flächenverlust, während andere Faktoren sich in der Zukunft ändern werden und sich so auch die Relation zwischen diesen einzelnen Parametern ändern kann.

Die klimatischen Bedingungen variieren lokal und ändern sich zeitlich nur langsam. Kalte Winter und wärmere Winter wechseln sich in der Regel ab und ergeben daraus einen Mittelwert, die Gradtagszahl. Als Heizgrenztemperatur ist gemäß der zurückgezogenen DIN 4108-6 (abgelöst durch die DIN 18599) die Außentemperatur von 15 °C definiert.

Der Energieaufwand für die Herstellung ist neben dem verfügbaren Raum bei Innendämmung oft der begrenzende Faktor. Da die relative energetische Einsparung mit steigender Dämmstärke immer geringer wird, egalisieren sich die Einsparung und der Energieaufwand für die Herstellung des

Materials irgendwann. Die für die Herstellung des Dämmstoffes benötigten Energiemengen sind in „Europäischen Produktdeklarationen“ (kurz EPD) hinterlegt.

Problematisch ist, dass Hersteller die Wichtigkeit dieser Daten für den Entscheidungsprozess der Kunden erkannt haben und für ein gutes Marketing teilweise bereit sind, diverse „Kniffe“ für die Bilanz des Gesamtenergiebedarfs anzuwenden. Dies führt dazu, dass insbesondere Produkte, die bei hohen Temperaturen hergestellt werden und deren absoluter Energiebedarf in der Herstellung hoch ist, bilanziell durch den Kauf von Zertifikaten „optimiert“ werden können, um im Vergleich besser dazustehen. Hier besteht ganz klar noch Normierungsbedarf.

Folgende Abbildung stellt qualitativ den Bestpunkt einer Dämmung unter Berücksichtigung der grauen Energie dar.

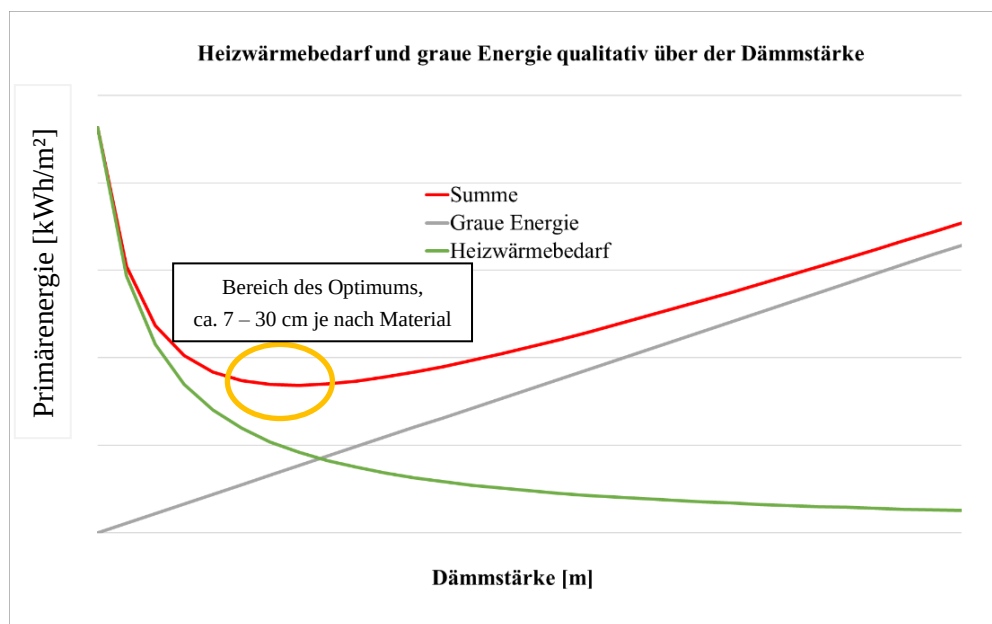


Abbildung 93: Qualitative Darstellung des energetischen Optimums einer Dämmung

Je nach Energiebedarf im Herstellprozess steigt die graue Gerade mehr oder weniger steil an. Die grüne Linie stellt den Primärenergieverbrauch durch Wärmeverlust durch einen m² Wandfläche infolge der Beheizung eines Gebäudes dar. Es handelt sich dabei um eine Funktion der folgenden Parameter:

- l-Wert des Dämmstoffs
- Dämmstärke
- U-Wert im Bestand
- Gradtagszahl am jeweiligen Standort
- Nutzungszeit der Dämmung (z.B. 30 / 40 / 50 Jahre)
- Primärenergiefaktor der Energiequelle (Strom, Öl, Gas, etc.)
- Wirkungsgrad bzw. Leistungszahl des Heizsystems

Nicht berücksichtigt wird das Recyclingpotential des Dämmstoffs infolge einer anschließenden stofflichen oder energetischen Verwertung. Weiterhin unberücksichtigt ist der steigende Einfluss von Wärmebrücken bei größer werdender Dämmstärke.

6.2 Beispielhafte Berechnung

Für die beispielhafte Berechnung werden vier Dämmstoffe verglichen, die sich im Systemaufbau mit zugehörigem Trockenbausystem, Putz, Klebemörtel oder Dübel für den Einsatz als Innendämmung eignen. Für alle vier Dämmstoffe liegen EPDs aus der ÖKOBAUDAT des deutschen Bundesministeriums des Inneren vor. Im Bestand wird ein U-Wert von 1 W/m²*K angenommen.

Die sich daraus ergebenden Systemstärken zur Erreichung eines U-Wertes von 0,4 W/m²*K beinhalten den Dämmstoff sowie den Raumabschluss.

- Evonik Calostat [42],	l = 0,019 W/mK	Systemstärke: 4 cm
- Mineralwolle [43],	l = 0,032 W/mK	8 cm
- Holzfaserdämmung [44],	l = 0,04 W/mK	9 cm
- PU/PIR Hartschaum [45],	l = 0,023 W/mK	5 cm

6.2.1 Energetische Betrachtung

Für die energetische Betrachtung wird der Wärmeverlust durch 1 m² Fassade berechnet und daraus der Primärenergiebedarf für die Beheizung ermittelt und die für die Herstellung des Dämmstoffs benötigte Primärenergie in Abhängigkeit der Dämmstärke addiert. Dafür wird aus dem EPD der totale nicht erneuerbare Primärenergiebedarf für die Herstellung ausgewählt und mit dem Primärenergiebedarf für die Beheizung addiert.

$$Summe\ PE(d) = \frac{Gradtagszahl * 24 * Betriebsdauer * \left(\frac{1}{U_{Bestand}} + \frac{d}{\lambda} \right)^{-1} * f_{PE}}{Eta_{Heizungsanlage} * 1000} + d * PE_{Herstellung} \quad (27)$$

Wobei:

Summe PE	Gesamtprimärenergiebedarf für Herstellung und Betrieb	[kWh _{prim}]
Gradtagszahl	Kennzahl für die Heizintensität am Standort	[Kd] oder [Kh]
d	Dicke des untersuchen Dämmstoffs	[m]
PE _{Herstellung}	Primärenergie für die Herstellung bezogen auf einen m ³	[MJ/m ³] oder [kWh/m ³]
Betriebsdauer	Betrachtungszeitraum der installierten Dämmung	[Jahre]
Eta _{Heizungsanlage}	Wirkungsgrad der Kesselanlage oder der Wärmepumpe	[-]
f _{PE}	Primärenergiefaktor	[kWh _{PE} / kWh _{EE}]

Aufgrund der großen möglichen Varianz bei den Eingabewerten für die unterschiedlichen Parameter, kann es sinnvoll sein, das Ergebnis als Ergebnisband auszugeben. Folgende Abbildung zeigt dies exemplarisch für eine Holzfaserdämmung.

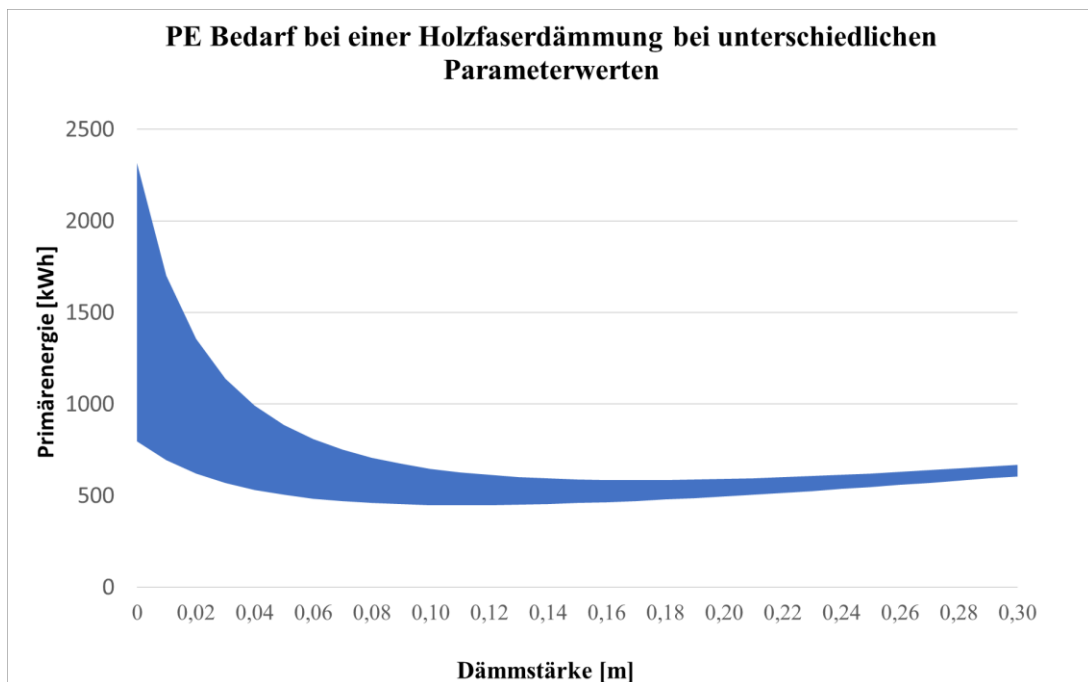


Abbildung 94: Ergebnis der Parametervarianz am Beispiel der Holzfaserdämmung.

Dabei fällt besonders auf, dass die Einflüsse aller Parameter bei steigender Dämmstärke deutlich erkennbar nachlassen und der Anteil der Primärenergie, der für die Herstellung des Dämmstoffs benötigt wird, dominiert.

Folgende Abbildung 94 zeigt die vier Dämmstoffe mit ihren unterschiedlichen Kurvenverläufen. Mit folgenden Parameterwerten:

- | | | |
|--------------------------|------|-------------------------|
| - Gradtagszahl | 3510 | [Kd] |
| - Betriebsdauer | 20 | [a] |
| - U-Wert im Bestand | 1 | [W/(m ² *K)] |
| - Primärenergiefaktor | 1,8 | [kWh] |
| - Eta _{Heizung} | 3,5 | |

In der Kalkulation ist kein Wärmebrückenzuschlag und kein Recyclingpotential berücksichtigt. Allerdings müssen Wärmebrücken im Einzelfall betrachtet werden, denn eine pauschale Berücksichtigung führt zu großen Ungenauigkeiten und unter Umständen auch zu lokalen Problemen bezüglich der zulässigen Oberflächentemperaturen.

Es fällt auf, dass vor allem der PU Hartschaum aufgrund seines hohen Anteils an grauer Energie schon bei geringer Dämmstärke von etwa 6 cm seinen Bestpunkt erreicht. Eine weitere Erkenntnis ist, dass das Optimum häufig sehr flach verläuft.

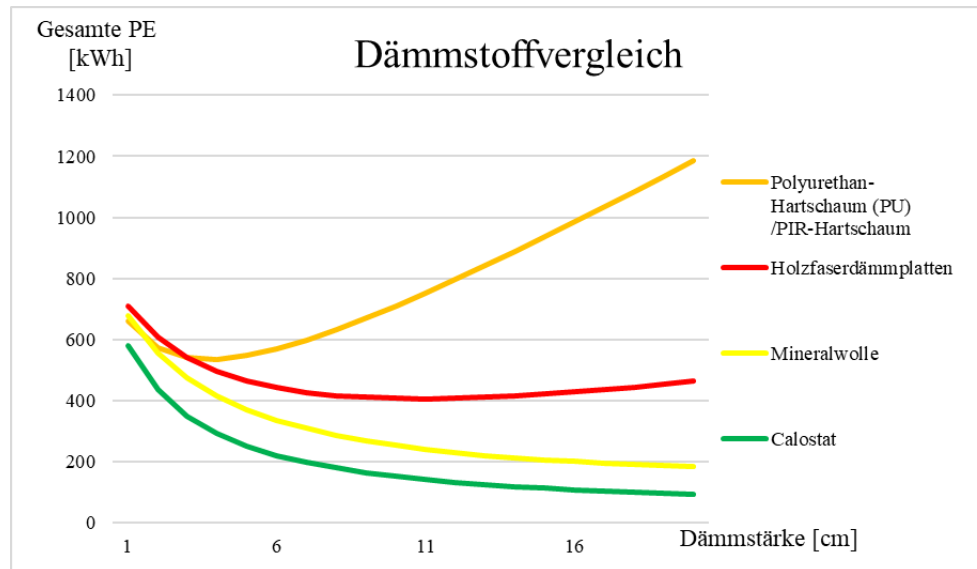


Abbildung 95: Dämmstoffvergleich aus primärenergetischer Sicht für Heizen sowie graue Energie

Analysiert man die Dämmstoffe genauer, fällt folgender Zusammenhang auf: Der λ Wert korreliert bei klassischen Dämmstoffen in der Regel bis zu einer gewissen Untergrenze (der Wärmeleitfähigkeit beruhigter Luft), mit der Dichte des Dämmstoffs. Je geringer die Dichte eines Materials, desto geringer sein λ -Wert. Dies wirkt sich oft auch positiv auf die Primärenergiebilanz bei der Herstellung aus. Dämmstoffe mit geringer Dichte können so die zum Teil hohen Energiebedarfe in der Herstellung pro kg Dämmstoff kompensieren. Dies gilt nur eingeschränkt für Dämmstoffe mit Austauschgasen und solche deren Dämmeffekt auf ihrer Nanostruktur oder Vakuumtechnologie beruht. Trotzdem ist die Anwendbarkeit des Dämmstoffs zu berücksichtigen.

6.2.2 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Die Kernfragen im Rahmen der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung liegen in der Beantwortung der Frage nach Preisentwicklung für Löhne, Energie, Material und Wohnraum. Dazu ist es schwierig, heute die Betriebsdauer eines Innendämmsystems oder einer Heizungsanlage vorauszusagen. Selbst die Preisabschätzung für die Montage eines Innendämmsystems zeigt sich bei den aktuellen Dynamiken und vor dem Hintergrund einer erwarteten Inflation schwierig.

Um diese Frage beantworten zu können, wurde ein einfacher Excel Kalkulator erstellt, mit dem die folgenden Parameter in die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung integriert werden können:

- U-Wert im Bestand
- Dicke und Wärmeleitfähigkeit des Dämmstoffs
- Primärenergiefaktor
- Wirkungsgrad des Heizsystems
- Betrachtungszeitraum
- Gradtagszahl
- Wohnfläche / Prozentualer Verlust durch die Innendämmung (üblicherweise 2 ... 6 %)
- Energiepreis / Preissteigerung
- Flächenpreis / Preissteigerung
- Mietniveau / Mietentwicklung
- Wertsteigerung durch die energetische Sanierung (Miete oder Flächenpreis)
- Material- und Arbeitskosten
- Staatliche Förderung

Aufgrund der zahlreichen Eingabeparameter und einiger Unbekannter sowie der Tatsache, dass lokale Effekte insbesondere bei der Wohnraumbepreisung eine große Rolle spielen, können mit Hilfe des Kalkulators keine allgemeingültigen Aussagen getroffen werden.

Das Tool eignet sich um projektbezogen unterschiedliche Innendämmsysteme zu vergleichen und somit die Wirtschaftlichkeit zu optimieren.

Um für Luxemburg eine Aussage treffen zu können, wurde für ein EFH im luxemburgischen Stadtgebiet eine Kalkulation mit zwei unterschiedlichen Dämmstoffen sowie unterschiedlichen Dämmstärken durchgeführt. Folgende Basisdaten wurden verwendet:

- U-Wert im Bestand	1 W/m ² *K
- Dicke und Wärmeleitfähigkeit des Dämmstoffs	Calostat vs. Holzfaser
- Primärenergiefaktor	1,8
- Wirkungsgrad des Heizsystems	WP mit JAZ 3,5
- Betrachtungszeitraum	30 Jahre
- Gradtagszahl	3510 Kd
- Wohnflächenverlust	Berechnet nach Dämmstärke
- Außenwandfläche:	250 m ²
- Energiepreis / Preissteigerung	3 %/a (ohne Inflation)
- Flächenpreis / Preissteigerung	5 %/a (ohne Inflation)
- Wertsteigerung durch die energetische Sanierung	10 %
- Material- und Arbeitskosten	Spezifisch, materialabhängig
- Staatliche Förderung	5 €/m ²

Im Kalkulator werden fünf Varianten mit steigender Dämmstärke betrachtet.

Tabelle 8: Wirtschaftlichkeitsbetrachtung - Variantenübersicht

Varianten	I	II	III	IV	V	Einheit
Holzfaser	4	6	8	10	12	cm
Calostat	2	3	4	5	6	cm

Da es sich bei beiden Dämmstoffen um Plattenwerkstoffe handelt, wird für beide Materialien der gleiche Verarbeitungspreis von 65 €/m² angesetzt. Die Materialpreise wurden aus Herstellerangaben und Händlerangeboten übernommen. Die Kalkulation befindet sich im Detail im Anhang D.

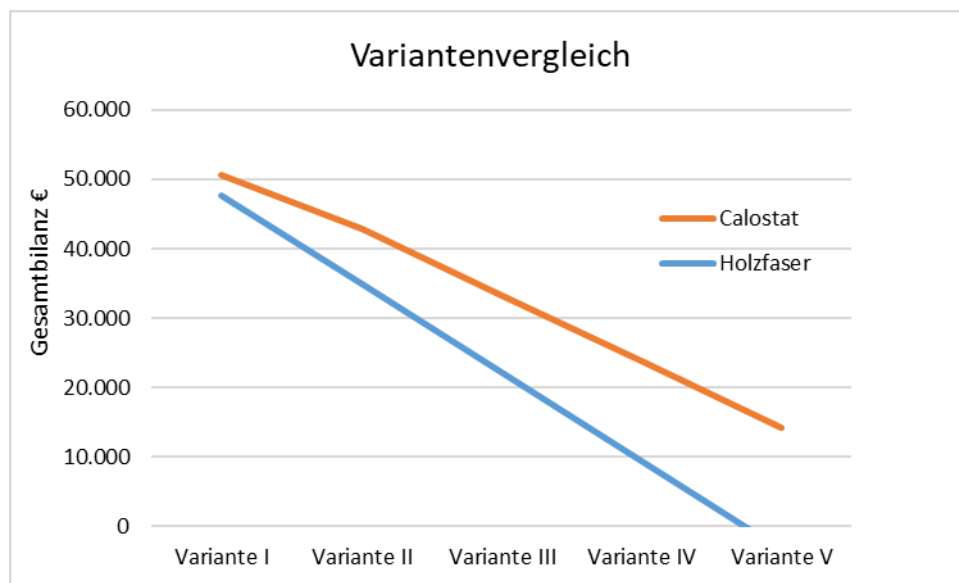


Abbildung 96: Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zweier Dämmstoffe

Bei der Gesamtbilanz handelt es sich um einen Vergleich der Gesamtkosten zum unsanierten Fall. Positive Werte ergeben über den Betrachtungszeitraum eine Einsparung. Aus der Betrachtung geht hervor, dass der Hochleistungsdämmstoff Calostat aufgrund des geringeren Flächenverlustes und trotz des höheren Materialpreises (ca. 2,5-fach im Vergleich zur Holzfaser) zu einer besseren Gesamtwirtschaftlichkeit führt. Ebenfalls zeigt sich, dass mit steigender Dämmstärke die Wirtschaftlichkeit der Dämmmaßnahmen sinken. Ursächlich für beide Effekte ist der hohe Wertverlust durch die reduzierte Wohnfläche. Die berücksichtigte Wertsteigerung und die Energieeinsparung können diesen Effekt nicht ausgleichen.

6.3 Optimale Dämmstärke

Je nach Betrachtungsweise lassen sich unterschiedliche Optima bezüglich der Dämmstärke ermitteln, sodass sich hier ebenfalls keine pauschale Aussage treffen lässt.

Um den Mindest-U-Wert von $0,4 \text{ W/m}^2\text{K}$ zu erreichen, sind je nach Qualität des Bestandes, 6-8 cm eines konventionellen Dämmstoffes notwendig. Berücksichtigt man die Tatsache, dass eine minimale Dämmstärke zur besten Wirtschaftlichkeit führt und die ohnehin flach auslaufende U-Wert Kurve durch die graue Energie des Dämmstoffs noch belastet wird, empfiehlt es sich, wie auf der folgenden Abbildung dargestellt, eine Dämmstärke zwischen 6 und 10 cm zu wählen. Bei verbessertem I-Wert kann die Dämmstärke entsprechend dünner ausgewählt werden.

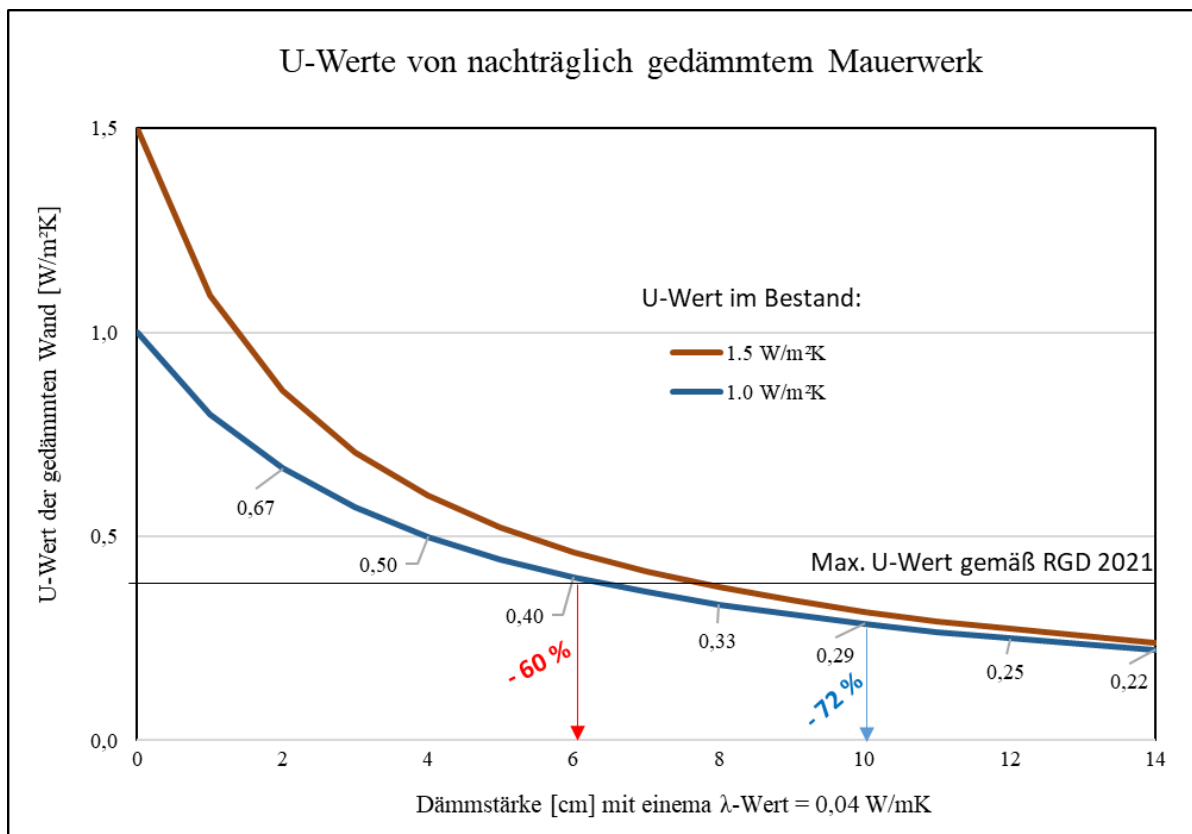


Abbildung 97: U-Werte von gedämmtem Mauerwerk mit konventionellem Dämmstoff

7 Schlussfolgerungen und Ausblick

Luxemburgs ambitionierte Energieeffizienzziele für den Gebäudesektor verlangen in der Zukunft eine hohe Renovierungsrate bei der auch die Innendämmung verstärkt zum Einsatz kommen wird. Alleine die staatliche Institution *Service des sites et monuments nationaux* zählt in seiner Liste der denkmalgeschützten Gebäude rund 5.500 Objekte, die nur zu einem geringen Anteil energetisch saniert sind und deren erhaltenswerten Fassaden in der Regel nur durch die Anbringung einer Innendämmung energetisch verbessert werden können. Auch im Gebäudebestand der Verwaltung der öffentlichen Gebäude ABP befinden sich rund 320 Gebäude, die in den kommenden Jahren mittels Innendämmung energetisch saniert werden sollen.

Um eine langfristig funktionierende Innendämmung planen zu können, ist eine detaillierte Kenntnis über die technischen Eigenschaften der vorhandenen Bausubstanz, die klimatischen Randbedingungen und das Nutzungsverhalten notwendig. Genaue Untersuchungen der Wandaufbauten und des feuchtetechnischen Verhaltens ermöglichen eine präzisere Parametrierung der zur Verfügung stehenden numerischen Simulationsprogramme. Die in dieser Arbeit vorgestellten Untersuchungsmethoden ermöglichen eine deutliche Erhöhung der Planungssicherheit für eine Innendämmung gegenüber voreingestellten Standardwerten, da diese nicht immer die lokalen Gegebenheiten abbilden. Zum Teil lässt sich der Funktionsnachweis nur mit Hilfe von Messungen erbringen, da es sich sowohl bei Katalog- als auch bei den in den Simulationstools voreingestellten Werten eher um konservative Werte handelt, die in der Praxis funktionierende Innendämmkonstruktionen teilweise als grenzwertig oder nicht funktionierend deklarieren.

Insbesondere bei Fassaden, deren Wasseraufnahmekoeffizient w_a nicht die strengen Grenzwerte der DIN 4108 bzw. die verschärften Anforderungen des WTA Merkblattes 6-5 einhält, kann der tatsächliche Feuchteeintrag infolge von Regenereignissen bisher nur über mehrmonatige Feuchtemessungen im Mauerwerk ermittelt werden. Die direkte Messung des tatsächlich auf die Fassade auftreffenden Regens, der an der Fassade herablaufenden Wassermenge und der Exposition gestalten sich aufgrund der zahlreichen Einflussfaktoren weiterhin als Herausforderung. Obwohl hier bereits seit längerem Untersuchungen durchgeführt werden, sind noch essenzielle Fragen bei der Bewertung der Exposition individueller Gebäude gegenüber Schlagregen offen. Das behandelte Beispiel der ehemaligen Nationalbibliothek zeigt, dass auch Natursteinfassaden mit stark saugender Oberfläche von innen gedämmt werden können, wenn z.B. die umgebende Bebauung die Fassade vor negativen Schlagregeneinflüssen schützt. Hier kann der Nachweis über dauerhafte Feuchtemessungen unter der Fassadenoberfläche unterstützt werden. Über eine Anpassung der Simulation an die tatsächlichen Messwerte kann so die Vorhersage für eine Konstruktion mit Innendämmung präzisiert werden.

Eine ähnliche Lösung ergibt sich für die in Luxemburg häufig vorkommenden Natursteineinfassungen an Fenstern und Türen. Während der Hauptteil der Fassade mit einer Kombination aus Putz und Anstrich vor Regen geschützt ist, handelt es sich bei den

Steineinfassungen um Schwachstellen, die im Einzelfall genauer untersucht und im Zuge der Sanierung häufig repariert werden müssen. Besonders die Kontaktstellen zwischen Putz, Stein und Mörtel neigen aufgrund unterschiedlicher thermischer Ausdehnung der Materialien zu Flankenabrissen und somit zu Schwachstellen, in die Regenwasser in größeren Mengen eindringen kann. Hier sind stets auch genaue visuelle Untersuchungen notwendig, um Schäden, die in der Vergangenheit entstanden sind, erkennen und im Zuge der Sanierung beheben zu können. Feuchtemessungen im Stein, über mehrere Wochen, helfen bei der Beurteilung der Konstruktionen.

Neben den bauphysikalischen Untersuchungen haben vergleichende Untersuchungen unterschiedlicher Dämmstoffe sowohl aus wirtschaftlicher als auch aus energetischer Sicht gezeigt, dass es sich in Luxembourg aufgrund der hohen Immobilienpreise lohnen kann, in einen teureren Hochleistungsdämmstoff mit reduziertem I-Wert und dadurch reduzierter Dämmstärke zu investieren und so bei minimalem Raumverlust eine gute Dämmwirkung zu erhalten.

In Zukunft gilt es, vor allem durch ein vergrößertes Fortbildungsangebot, planende Architekten und Ingenieure über die Problemfelder der Innendämmung aufzuklären und ihnen mit dem parallel zu dieser Arbeit erarbeiteten Leitfaden eine praktische Handlungsanweisung zur Verfügung zu stellen, denn Bauwerke mit erhaltenswerter Fassade lassen sich sehr häufig bei Einhaltung der technischen Regeln mit geringem Mehraufwand auch von innen energetisch sanieren.

Anhang A: Berechnungsschritte und Beispiel des Glaserverfahrens

Allgemeine Vorgehensweise bei der Anwendung des Glaserverfahrens

Die grundlegenden Schritte zur Abschätzung des im Winterhalbjahr anfallenden Kondensats sind:

1. Berechnung des Temperaturprofils innerhalb der Konstruktion anhand des Wärmewiderstands der Schichten und der Umgebungstemperaturen.
2. Berechnung des Sättigungsdampfdruckprofils aus dem Temperaturprofil (d.h. Bestimmung der Sättigungsdampfdrücke an allen Schichtgrenzen aus den jeweils herrschenden Temperaturen).
3. Berechnung der Umgebungsdampfdrücke auf beiden Seiten der Struktur (aus den Umgebungstemperaturen und -feuchten).
4. Berechnung des Dampfdruckprofils durch die Konstruktion unter Verwendung von Wasserdampfdiffusionswiderständen und Umgebungsdampfdrücken (d.h. Bestimmung der Dampfdrücke an allen Schichtgrenzen).
5. Unterscheidung der verschiedenen Fälle:
 - a. Der Dampfdruck erreicht oder überschreitet an keiner Schichtgrenze den Sättigungsdampfdruck → kein Kondensat.
 - b. Der Sättigungsdampfdruck wird an einer Schichtgrenze oder sogar an mehreren Schichten erreicht/überschritten → Kondensatebene.
6. Wenn Kondensation auftritt, wird die Menge des anfallenden Kondensats pro Zeiteinheit bis zum Kondensationsniveau berechnet und mit der Länge der Periode multipliziert.
7. Nach der Berechnung der Kondensatmenge kann die potentielle Verdunstungsmenge im Sommer mit einem ähnlichen Verfahren bestimmt werden.
8. Für den Feuchtigkeitsnachweis nach DIN 4108-3 müssen die folgenden Kriterien erfüllt sein:
 - a. - Die Kondensatmenge muss kleiner sein als die potenzielle Verdunstungsmenge.
 - b. - Die Kondensatmenge darf einen von der Bauart und vom Material abhängigen Grenzwert nicht überschreiten.

Im Folgenden wird exemplarisch gezeigt, wie ein Nachweis einer diffusionsoffenen Innendämmung mittels Glaserverfahren scheitert. Eine solche, in der Praxis häufig vorkommende Konstruktion muss also mittels des numerischen Nachweises z.B. WUFI abgehandelt werden.

Wandaufbau und Daten

Tabelle 9: Materialien für die Glaserberechnung

Nr.	Material	Dicke [m]	Diffusions- widerstand μ	Äquivalente Luftschicht- dicke S_d [m]	Wärmeleitfähigkeit λ -Wert [W/m*K]
1	Mineralischer Außenputz	0,02	25	0,5	0,8
2	Bruchsteinmauerwerk	0,4	10	4,0	0,6
3	Ytong Multipor Klebemörtel	0,006	15,1	0,0906	0,155
4	Ytong Multipor Dämmplatte	0,1	4,1	0,41	0,042



Abbildung 98: Schichtaufbau für die Glaserberechnung

Berechnung des U-Wertes und des Temperaturprofils im genannten Beispiel

$$U = \frac{1}{R_{Si} + \sum R + R_{Se}} = \frac{1}{0,25 + \frac{0,1}{0,042} + \frac{0,006}{0,155} + \frac{0,4}{0,6} + \frac{0,02}{0,8} + 0,04} = 0,294 \text{ W/(m}^2\text{*K)}$$

Wobei im Fall der Glaserberechnung ein Innenübergangswiderstand von $0,25 \text{ m}^2\text{K/W}$ zur Anwendung kommt, um den konservativen Betrachtungsfall (im Hinblick auf die Oberflächentemperaturen und -feuchte) einer Raumecke mit reduzierter Luftbewegung und somit erhöhtem Risiko abzubilden.

Um die Wasserdampfdrücke aus einer Tabelle ermitteln zu können, werden die Temperaturen an den Grenzen der jeweiligen Materialien berechnet.

$$\vartheta = 20 - (R * U * \Delta T)$$

Wobei es sich bei ΔT um die Differenz der inneren und äußeren Lufttemperaturen handelt. Gemäß Tabelle A.3 der DIN 4108-3 sind dies 25 K.

$$\vartheta_i = 20 \text{ °C}$$

$$\vartheta_{si} = 20 - (0,25 * 0,294 * 25) = 18,2 \text{ °C}$$

$$\vartheta_{layer\ 1/2} = 18,2 - \left(\left(\frac{0,1}{0,042} \right) * 0,294 * 25 \right) = 0,7 \text{ °C}$$

$$\vartheta_{layer\ 2/3} = 0,7 - \left(\left(\frac{0,006}{0,155} \right) * 0,294 * 25 \right) = 0,4 \text{ °C}$$

$$\vartheta_{layer\ 3/4} = 0,4 - \left(\left(\frac{0,4}{0,6} \right) * 0,294 * 25 \right) = -4,5 \text{ °C}$$

$$\vartheta_{se} = -4,5 - \left(\left(\frac{0,02}{0,8} \right) * 0,294 * 25 \right) = -4,7 \text{ °C}$$

$$\vartheta_e = -5 \text{ °C}$$

Der Wasserdampfgesättigungsdruck kann nun mit Hilfe der folgenden Formeln oder einer Dampftafel bestimmt werden:

$$-20 \text{ °C} - 0 \text{ °C}: P_s = 4,689 * \left(1,486 + \frac{\vartheta}{100} \right)^{12,3}$$

$$0 \text{ °C} - 20 \text{ °C}: P_s = 288,680 * \left(1,098 + \frac{\vartheta}{100} \right)^{8,02}$$

Messungen und Simulationen im Vorfeld von Innendämmprojekten
zur Erhöhung der Planungssicherheit

Tabelle 10: Wasserdampfsättigungsdrücke aus der DIN 4108-3

DIN 4108

Wasserdampfsättigungsdruck im Temperaturbereich von 30,9 bis -10,9 °C

Temperatur θ in °C										
ganzzahlige Werte von θ	Dezimalwerte von θ									
	,0	,1	,2	,3	,4	,5	,6	,7	,8	,9
Wasserdampfsättigungsdruck p_s in Pa										
30	4244	4269	4294	4319	4344	4369	4394	4419	4445	4469
29	4006	4030	4053	4077	4101	4124	4148	4172	4196	4219
28	3781	3803	3826	3848	3871	3894	3916	3939	3961	3984
27	3566	3588	3609	3631	3652	3674	3695	3717	3793	3759
26	3362	3382	3403	3423	3443	3463	3484	3504	3525	3544
25	3169	3188	3208	3227	3246	3266	3284	3304	3324	3343
24	2985	3003	3021	3040	3059	3077	3095	3114	3132	3151
23	2810	2827	2845	2863	2880	2897	2915	2932	2950	2968
22	2645	2661	2678	2695	2711	2727	2744	2761	2777	2794
21	2487	2504	2518	2535	2551	2566	2582	2598	2613	2629
20	2340	2354	2369	2384	2399	2413	2428	2443	2457	2473
19	2197	2212	2227	2241	2254	2268	2283	2297	2310	2324
18	2065	2079	2091	2105	2119	2132	2145	2158	2172	2185
17	1937	1950	1963	1976	1988	2001	2014	2027	2039	2052
16	1818	1830	1841	1854	1866	1878	1889	1901	1914	1926
15	1706	1717	1729	1739	1750	1762	1773	1784	1795	1806
14	1599	1610	1621	1631	1642	1653	1663	1674	1684	1695
13	1498	1508	1518	1528	1538	1548	1559	1569	1578	1588
12	1403	1413	1422	1431	1441	1451	1460	1470	1479	1488
11	1312	1321	1330	1340	1349	1358	1367	1375	1385	1394
10	1228	1237	1245	1254	1262	1270	1279	1287	1296	1304
9	1148	1156	1163	1171	1179	1187	1195	1203	1211	1218
8	1073	1081	1088	1096	1103	1110	1117	1125	1133	1140
7	1002	1008	1016	1023	1030	1038	1045	1052	1059	1066
6	935	942	949	955	961	968	975	982	988	995
5	872	878	884	890	896	902	907	913	919	925
4	813	819	825	831	837	843	849	854	861	866
3	759	765	770	776	781	787	793	798	803	808
2	705	710	716	721	727	732	737	743	748	753
1	657	662	667	672	677	682	687	691	696	700
0	611	616	621	626	630	635	640	645	648	653
0	611	605	600	595	592	587	582	577	572	567
-1	562	557	552	547	543	538	534	531	527	522
-2	517	514	509	505	501	496	492	489	484	480
-3	476	472	468	464	461	456	452	448	444	440
-4	437	433	430	426	423	419	415	412	408	405
-5	401	398	395	391	388	385	382	379	375	372
-6	368	365	362	359	356	353	350	347	343	340
-7	337	336	333	330	327	324	321	318	315	312
-8	310	306	304	301	298	296	294	291	288	286
-9	284	281	279	276	274	272	269	267	264	262
-10	260	258	255	253	251	249	246	244	242	239

Glaser Diagramm

Die so ermittelten Temperaturen und Wasserdampfdrücke werden im Glaserdiagramm zusammen aufgetragen. Dies kann von Hand auf Papier oder mit einem Computerprogramm erstellt werden.

Ein Querschnitt des Wandaufbaus bildet die Grundlage. Zu Beginn werden 3 Achsen definiert: Auf der X-Achse / Abszisse werden die s_d -Werte eingetragen. Auf der Innenoberfläche des Bauteils befindet sich der Nullpunkt.

Auf der linken Y-Achse/Ordinate wird der Wasserdampfdruck aufgetragen. Der Nullpunkt ist frei wählbar. Die Temperatur wird auf einer zweiten Y-Achse auf der rechten Seite dargestellt. Zunächst werden die Wasserdampfsättigungsdrücke zu den jeweiligen Schichten aufgetragen. Das gleiche geschieht mit den Temperaturwerten. Die einzelnen Punkte werden mit geraden Linien verbunden.

Im nächsten Schritt werden die Wasserdampfpartialdrücke aus der Norm an den Oberflächen (innen und außen) eingetragen. Wenn die Verbindungsgerade dieser Partialdrücke die Linie der Dampfsättigungsdrücke schneidet, liegt Kondensation vor. Schneiden sich diese beiden Linien nicht, tritt keine Kondensation auf und der Funktionsnachweis für das Bauteil ist bereits erbracht.

Wenn es zur Kondensation kommt, wird die Verbindungslinie tangential an die Linie des Wasserdampfsättigungsdrucks angelegt. Es ist hilfreich, mit verschiedenen Farben zu arbeiten. In diesem Beispiel werden die folgenden Farben verwendet:

- Temperatur - Schwarz
- Wasser-Sättigungsdruck - Rot
- Wasserdampfpartialdruck - Blau

Auf der folgenden Seite ist das Glaserdiagramm des Rechenbeispiels dargestellt.

Diffusionsberechnung

Da es im Beispiel zur Kondensatbildung in einer Schicht (dem Klebemörtel) kommt, ist die entsprechende Formel aus der DIN zur Ermittlung der Kondensationsmenge zu verwenden.

$$g_c = \delta_0 * \left(\frac{p_i - p_{c1}}{s_{d,c1}} - \frac{p_{c2} - p_e}{s_{d,T} - s_{d,c2}} \right) = 2 * 10^{-10} \frac{kg}{msPa} * \left(\frac{1168 - 645}{0,41} - \frac{630 - 321}{5 - 0,5} \right) \\ = 2,41 * 10^{-7} \frac{kg}{sm^2}$$

$$\delta_0 = \frac{D_0}{R_v * T} = \frac{2,454 * 10^{-5}}{462 * 283} \frac{kg}{msPa} \quad \text{Wasserdampfdiffusionsleit-Koeffizient in Luft} \\ = 2 * 10^{-10} \frac{kg}{msPa} \quad \text{Praxiswert}$$

Messungen und Simulationen im Vorfeld von Innendämmprojekten
zur Erhöhung der Planungssicherheit

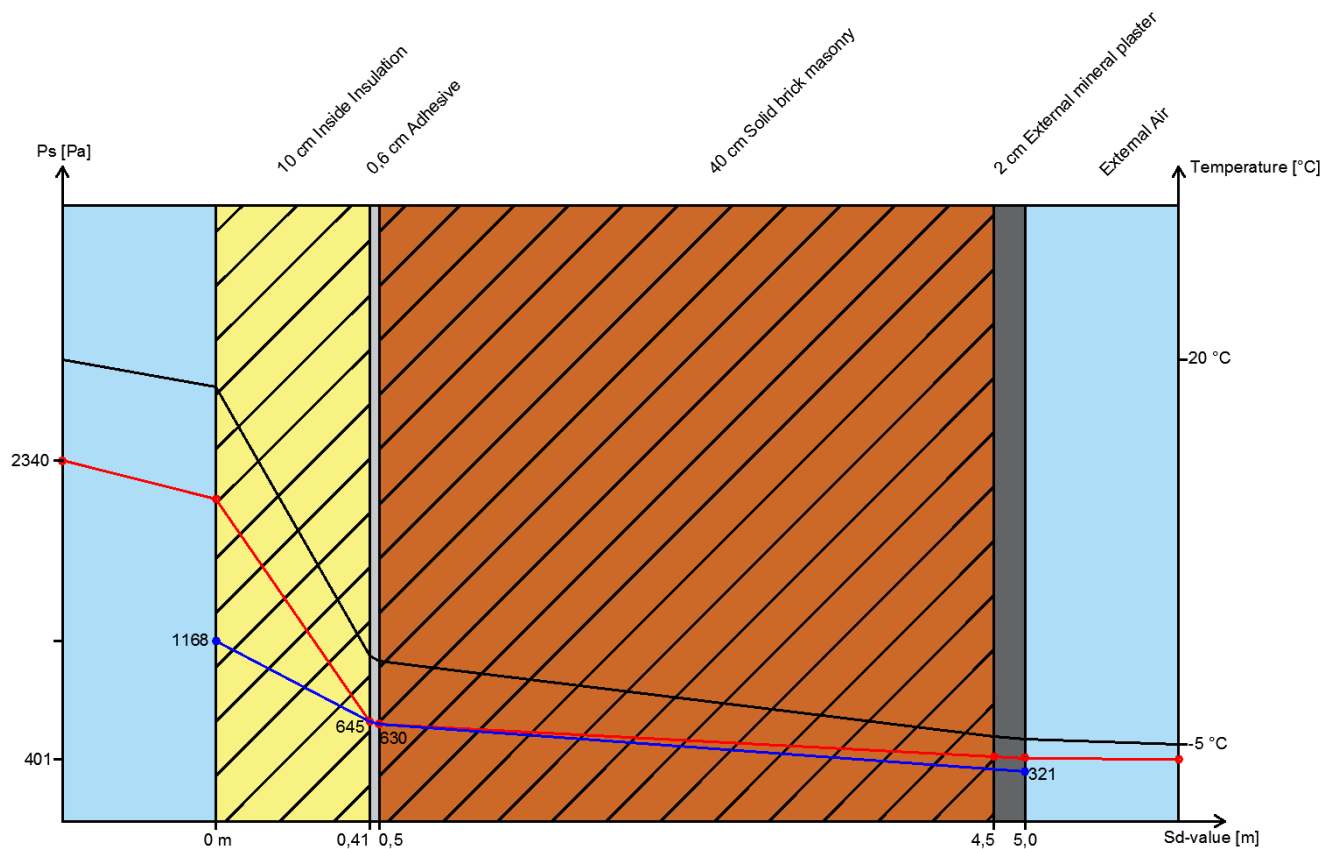


Abbildung 99: Glaserdiagramm mit eingetragenen Ergebnissen

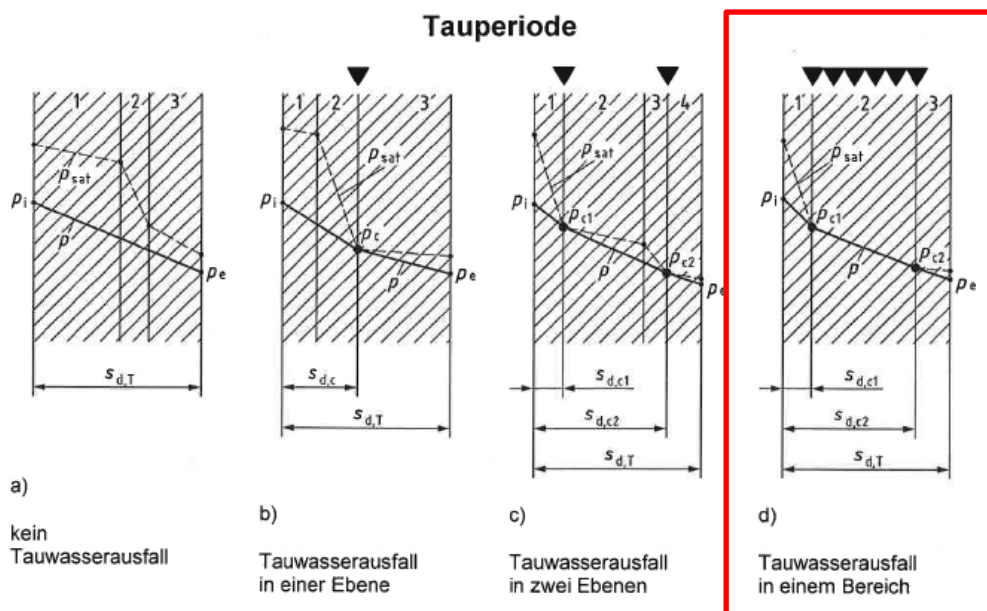


Abbildung 100: Diffusionsdiagramm für vier Fälle von Kondensationsbildung aus der DIN 4108-3

Die Summe des kondensierenden Wassers in der Tauperiode wird über die Multiplikation des g_c Wertes mit der Periodenlänge bestimmt ($90 \text{ Tage} = 90 \cdot 24 \cdot 3600 \text{ s}$).

$$m_c = g_c \cdot t_c = 1,877 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

Für die Berechnung der Verdunstungsmenge im Sommer wird die äquivalent vorgegangen.

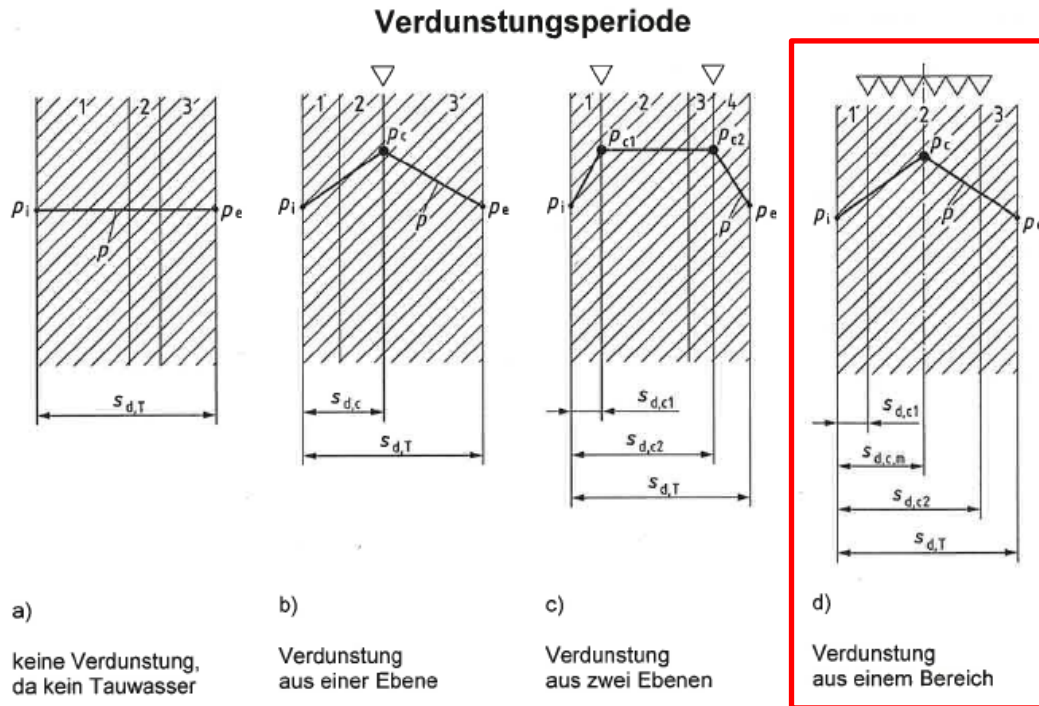


Abbildung 101: Diffusionsdiagramme für vier Fälle von Tauwasserverdunstung aus der DIN 4108-3

$$\begin{aligned} g_c &= \delta_0 \cdot \left(\frac{p_c - p_i}{s_{d,cm}} + \frac{p_c - p_e}{s_{d,T} - s_{d,cm}} \right) \\ &= 2 \cdot 10^{-10} \frac{\text{kg}}{\text{msPa}} \cdot \left(\frac{1700 \text{ Pa} - 1200 \text{ Pa}}{0,455 \text{ m}} + \frac{1700 \text{ Pa} - 1200 \text{ Pa}}{5 \text{ m} - 0,455 \text{ m}} \right) \\ &= 2,42 \cdot 10^{-7} \frac{\text{kg}}{\text{sm}^2} \end{aligned}$$

$$m_{ev} = g_c \cdot t_c = 1,882 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

Funktionsbewertung

Zur Bewertung einer Konstruktion muss diese zwei Anforderungen erfüllen:

- Die erste Anforderung ist, dass in der Verdunstungsperiode mehr Kondensat verdampft als in der Tauperiode anfällt. Hier kann aus Sicherheitsgründen auch noch eine Minstdifferenz (z.B. 200 g) gefordert werden.

$$m_c = 1,877 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} > m_{ev} = 1,882 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$



- Die zweite Anforderung ist, dass die maximale Kondensatmenge einen materialabhängigen Grenzwert zwischen 0,5 und 1,0 kg/m² nicht überschreitet.

$$m_c = 1,877 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} > 1,0 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$



Diesen Ergebnissen entsprechend, ist der Bauteilnachweis für dieses Bauteil nicht gelungen. In den benachbarten deutschsprachigen Ländern (AUT, CH, etc.) können leicht abweichende Grenzwerte gelten.

Anhang B: WTA

Die WTA ist die *Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege*. Es existiert sowohl ein eingetragener Verein, der in ehrenamtlicher Arbeit Merkblätter erarbeitet, als auch eine GmbH, die diese Merkblätter vertreibt und Aus- und Weiterbildungsseminare anbietet.

Die Merkblätter werden in mehreren themenorientierten Referaten von anerkannten Fachexperten aus der Wissenschaft und Praxis erarbeitet. Es existieren folgende elf Merkblattserien. Die in direktem Kontext der Innendämmung stehenden Einzelblätter sind mit Titel erwähnt. In der Merkblattreihe 6 existieren neben diesen genannten auch noch weitere, die sich nicht direkt auf das Thema Innendämmung beziehen.

1 – Holz und Holzschutz

2 – Oberflächentechnologie

3 – Naturstein und Kunststein

4 – Bauwerksabdichtung

5 – Beton

6 – Bauphysik / Innendämmung

- 6-1 Leitfaden für hygrothermische Simulationsberechnungen
- 6-2 Simulation wärme- und feuchtetechnischer Prozesse
- 6-3 Rechnerische Prognose des Schimmelpilzwachstumsrisikos
- 6-4 Innendämmung nach WTA I: Planungsleitfaden
- 6-5 Innendämmung nach WTA II: Nachweis von Innendämmsystemen mittels numerischer Berechnungsverfahren
- 6-8 Feuchtetechnische Bewertung von Holzbauteilen – Vereinfachte Nachweise und Simulation

7 – Tragverhalten und Schadensdiagnostik

8 – Fachwerk und Holzkonstruktionen

- 8-1 Fachwerkinstandsetzung nach WTA I: Bauphysikalische Anforderungen an Fachwerkgebäude
- 8-5 Fachwerkinstandsetzung nach WTA V: Innendämmungen

9 – Metall und Glas

10 – Präventive Konservierung

11 – Brandschutz

Anhang C: Grundlagen der Infrarot-Thermografie

Alle Körper mit einer Temperatur oberhalb des absoluten Nullpunktes ($> -273,15\text{ K}$) emittieren Strahlung. Für die bauphysikalische Messtechnik ist der Bereich der Infrarotstrahlung (IR) zwischen $0,78$ und $20\text{ }\mu\text{m}$ relevant.

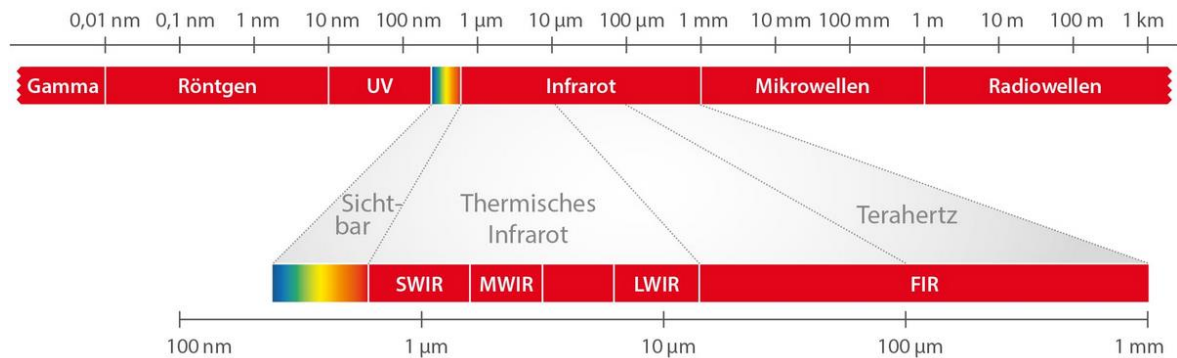


Abbildung 102: Wellenlängenbereiche unterschiedlicher Spektren [46]

Die IR Strahlung stellt eine elektromagnetische Welle dar. Durch die Bestimmung ihrer Intensität kann die Oberflächentemperatur des abstrahlenden Körpers bestimmt werden.

Für die praktische Messung ist die Kenntnis des Emissionsgrades relevant. Der Emissionsgrad ist ein Maß dafür wieviel Wärmestrahlung eine Oberfläche mit ihrer Umgebung austauscht. Der Wert liegt zwischen 0 und 1 wobei ein schwarzer Strahler den Wert 1 erreicht. Für die Praxis der Gebäudethermografie ist ein Emissionsgrad um 0,8 praktikabel. Jedoch muss stets im Hinterkopf bleiben, dass unterschiedliche Oberflächen unterschiedliche Emissionsgrade haben und es so zu einer fehlerhaften Anzeige kommen kann. Auch der Einfluss durch Transmission (z.B. durch eine Scheibe) und durch Reflektion (z.B. Sonne auf Fassade oder Scheibe).

Anhang D: Praxisleitfaden Innendämmung

Inhaltsverzeichnis

- Vorwort
- 1. Einleitung
- 2. Praktische Herangehensweise
- 3. Checkliste

Vorwort

Aus unterschiedlichen Gründen bestehen gegenüber der Innendämmung immer noch große Vorurteile und es herrscht sowohl bei Ingenieuren und Architekten als auch bei Bauherren großes Misstrauen gegenüber der dauerhaften Schadensfreiheit dieser Konstruktionen gegenüber Feuchte- und Schimmelschäden.

Trotz dieses Misstrauens hat sich in den vergangenen Jahren ein breit gefächertes Angebot an Innendämmsystemen auf dem Markt entwickelt. Es stehen diffusionsoffene und diffusionsbremsende / -dichte Systeme in diversen Materialien zur Verfügung. Die bekannte Kalziumsilikatplatte wird zwar immer noch häufig verbaut, stellt allerdings hinsichtlich ihrer Dämmeigenschaften längst nicht mehr den Stand der Technik dar.

Auch die theoretischen Grundlagen des sich durch die Innendämmung ändernden Wärme- und Feuchtetransportes im Mauerwerk wurden in den vergangenen 30 Jahren umfangreich erforscht und es stehen diverse Methoden und Werkzeuge zum Funktionsnachweis von Innendämmsystemen zur Verfügung. Gemein haben diese Methoden jedoch, dass sie deutlich komplizierter ausfallen als das bisher genutzte Glaserverfahren und es einige Erfahrung für die korrekte Anwendung der Simulationstools bedarf.

Der folgende Leitfaden soll als Werkzeug für Planer dienen und gibt konkrete Hinweise zur Abhandlung anstehender Innendämmprojekte. Zusätzlich klärt der Leitfaden über die im Zusammenhang mit Innendämmung häufig fallenden Begrifflichkeiten auf und stellt die unterschiedlichen Dämmsysteme und die möglichen Nachweisverfahren vor.

Schließlich wird auf die Auslegung von Anschlussdetails zur Vermeidung von Wärmebrücken und auf die Ausführungseinzelheiten unterschiedlicher Innendämmsysteme eingegangen.

Sebastian Latz

Januar 2020

Universität Luxemburg

1 Einleitung

1.1 Probleme der Innendämmung

Die Probleme der Innendämmung in der Vergangenheit lassen sich durch die auftretenden Schäden anhand der Ursachen und den zugehörigen Auswirkungen in drei Gruppen gliedern:

- Schimmelwachstum auf der Innenoberfläche durch Wärmebrücken.
- Hinterlüftung der Dämmebene und Schimmelpilzbildung unter bzw. in der Dämmebene.
- Auffeuchtung des Mauerwerkes durch innere und äußere Feuchteinflüsse in deren Folge es zu Frost und Schimmelschäden kommen kann.

Die Ursache der Feuchte und Schimmelschäden aus bauphysikalischer Sicht ist ein verändertes hygrothermisches Verhalten der Fassadenkonstruktion durch das Anbringen der Innendämmung. Da der Temperaturabfall in der Winterperiode überwiegend in der Dämmschicht stattfindet, wird die Bestandswand kälter. Dies hat einen Diffusionsstrom aus der Raumluftfeuchte in das Mauerwerk zur Folge. Über die Zeit und in Abhängigkeit der eingesetzten Materialien und deren Eigenschaften kumuliert die anfallende Feuchtigkeit im Baustoff und es kann zu Schäden kommen. Die Aufgabe des Innendämmsystems ist die Umsetzung eines geeigneten Feuchtemanagements, das im Jahresverlauf kritische Feuchtegehalte in der Konstruktion vermeidet.

Neben dem Diffusionsstrom von der Raumseite spielt auch der Feuchteeintrag durch Schlagregen von der Außenseite und durch das erdberührte Mauerwerk bei der Funktionsweise für Innendämmsysteme eine wichtige Rolle. Durch die Innendämmung kann es dazu kommen, dass vormals unkritische Feuchte nicht mehr abtrocknen kann und sich langfristig so ansammelt, dass es zu oben genannten Schäden führt.

1.2 Aufbau des Dokuments

Dieser Leitfaden orientiert sich im Kern an einem weiterentwickelten Entscheidungsgraphen aus dem WTA Merkblatt 6-4 welcher insbesondere durch mögliche Vormessungen zur verbesserten Entscheidungsfindung erweitert wurde.

Nach einer Einleitung wird im zweiten Kapitel auf oben genannten Entscheidungsgraphen eingegangen und alle Schritte werden in den folgenden Unterkapiteln erläutert. Dabei werden alle relevanten Themen angeschnitten. Auf die Wiedergabe von Expertenwissen wird ausdrücklich verzichtet um die Lesbarkeit des Leitfadens zu erhalten und das Volumen zu begrenzen.

In Kapitel drei wird eine Checkliste geliefert, mit deren Hilfe sich ein Planer durch ein Innendämmprojekt arbeiten kann und die die notwendigen Erkundungsschritte beinhaltet. Mit dieser Checkliste wird der eigentliche Leitfaden abgeschlossen.

Die theoretischen Grundlagen können Abschnitt 2 der Dissertation entnommen werden.

2 Praktische Herangehensweise an ein Innendämmprojekt

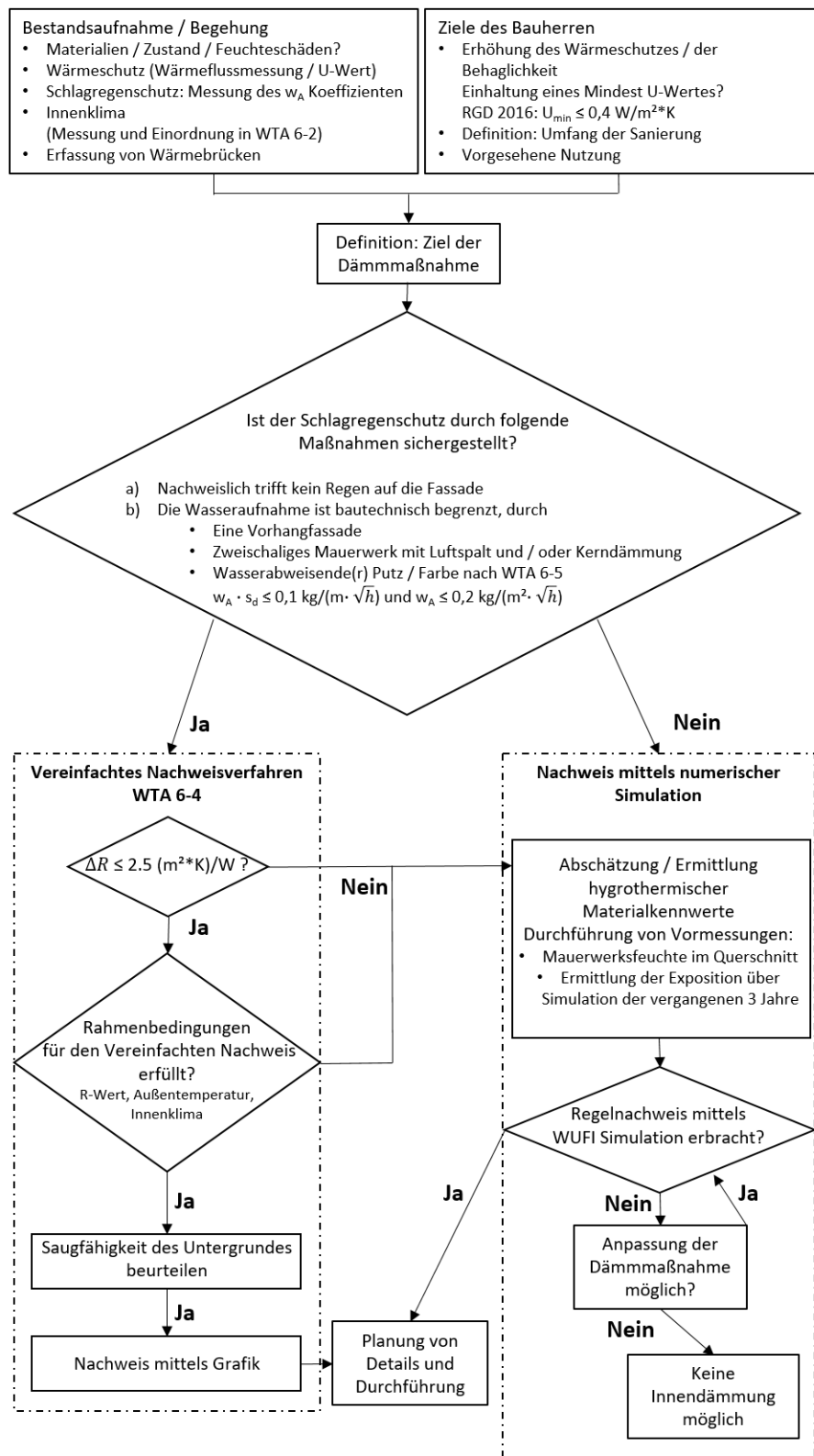


Abbildung 103: Erweitertes Ablaufdiagramm der Planung einer Innendämmung nach WTA 6-4

2.1 Bestandsaufnahme

Die Bestandsaufnahme spielt bei Innendämmprojekten wie auch bei anderen Renovierungsprojekten eine wichtige Rolle. Hier werden die Grundlagen für die spätere Auslegung des Innendämmsystems gelegt. Dies bedeutet, dass sich Fehleinschätzungen direkt auf das Endergebnis auswirken werden, weshalb diesem Punkt besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden sollte. Im Folgenden werden die wichtigsten Punkte der Bestandsaufnahme dargestellt.

Zu beachten ist, dass der Umfang der Bestandsaufnahme auch von den Zielen des Bauherrn abhängt und unter Umständen nicht alle möglichen Vormessungen benötigt werden.

2.1.1 Materialien / Zustand / Bauschäden

Zu Beginn des Projektes sollten Bestandspläne und Unterlagen gesichtet und mit den auf der Baustelle tatsächlich vorgefundenen Gegebenheiten verglichen werden. Nicht selten weichen Pläne vom tatsächlich gebauten erheblich ab, wodurch diese Pläne nicht mehr als einzige Planungsgrundlage verwendet werden können und um Details ergänzt werden müssen.

Hinsichtlich der Materialien haben wir es bei historischen Gebäuden in Luxemburg überwiegend mit zweischaligem Bruchsteinmauerwerk aus verschiedenen Natursteinen (aus unterschiedlichen Steinbrüchen) und häufig großen Mörtelmengen zu tun. In der Regel wurde der Spalt zwischen den Schalen mit kleineren Steinen und Mörtel verfüllt. Dies führte zu größeren Lufteinschlüssen, die sich wiederum positiv auf die U-Werte der Bestandsmauerwerke auswirken.

Für Berechnungen und Messungen sind des Weiteren von Relevanz:

- Schichtaufbau des Mauerwerkes
- einzelne Schichtdicken
- verwendete Putze
- Art der Deckenkonstruktion (Holzbalken, Stahlträger, etc.)
- Konstruktiver Regenschutz (Dachüberstände oder Vertäfelung der Fassade)
- Sicht-Natursteinmauerwerk (empfindlich bzgl. Schlagregen?)
- Nutzung des Gebäudes / Erfolgt eine Umnutzung?
- Sind Bau- / Feuchteschäden bekannt?

Falls ja – sind die Ursachen geklärt? Möglichkeiten sind: Defekte Rohre, Nässe aufsteigend aus dem Erdreich, Spritzwasser auf der Fassade / Salze, Schlagregen / defekter Putz

Da mit numerischen Simulationsprogrammen primär Feuchte aus Regenereignissen und der Luftfeuchte simuliert werden, sind besondere Abnormitäten im Planungsprozess zu berücksichtigen.

Bei Gebäuden deren Baujahr vor 1900 liegt, kann mit großer Sicherheit davon ausgegangen werden, dass lokale Materialien (aus lokalen Steinbrüchen) verwendet wurden, dies hilft bei der Feststellung des verwendeten Mauersteines und seiner Eigenschaften.

2.1.2 Vormessungen

Vormessungen dienen dazu Wissen über die bestehende Bausubstanz und die anliegenden Rahmenbedingungen zu generieren. Die Messergebnisse werden später als Eingabeparameter für den Funktionsnachweis mittels numerischem Nachweis oder dem vereinfachten Nachweis gemäß WTA 6-2 benötigt.

2.1.2.1 Messung des Wärmeflusses (siehe auch Dissertation Kap. 3.1.3)

Die Messung des U-Wertes der Bestandskonstruktion ist nur dann möglich, wenn im Vorfeld der Sanierungsmaßnahme eine Heizperiode liegt, bei der über einen längeren Zeitraum (mehrere Wochen) hohe Temperaturdifferenzen ($> 10\text{ K}$) zwischen Innenraum und der Außenluft vorliegen. Dies setzt auch voraus, dass das entsprechende Gebäude noch großflächig um den Messpunkt beheizt wird. Die Messung der Wärmestromdichte erfolgt mit einer Wärmeflussplatte und vier Temperatursensoren:

- Lufttemperatur innen
- Oberflächentemperatur innen
- Oberflächentemperatur außen
- Lufttemperatur außen

Da es aufgrund schwankender Außentemperaturen in der Regel nicht zu einem stationären Wärmefluss im Mauerwerk kommt, sollte die Messdauer mindestens mehrere Tage, besser Wochen betragen, um diese Effekte auszugleichen. Grundsätzlich gilt, je schwerer die Bauteile, desto länger die Messdauer. Das korrekte Vorgehen beim Messen und die Auswertung des Wärmedurchgangskoeffizienten ist in der ISO 9869 beschrieben.

Der U-Wert der Bestandswand spielt bei der Auslegung der neuen Innendämmung eine wichtige Rolle. Ein niedriger Ausgangswert sorgt für eine höhere Konstruktionssicherheit. Umgekehrt heißt dies, dass eine aus thermischer Sicht sehr schlechte Wand ein hohes Risiko für eine Kondensatanreicherung unter der Dämmschicht birgt.

Des Weiteren lässt sich herausfinden, ob evtl. bereits in der Vergangenheit eine Dämmung des Mauerwerkes stattgefunden hat und wie erfolgreich eine Dämmmaßnahme (egal ob von außen, im Mauerwerk oder von innen) war.

Folgende Abbildung zeigt beispielhaft die mit Excel dargestellten Ergebnisse einer Messung. Dabei sollten die beiden Oberflächentemperaturen innen und außen mit Anlegefühlern und der Wärmefluss mit einer Wärmeflussplatte erfasst werden. Es ist darauf zu achten, dass die Einflüsse von Wärmebrücken in der Messzone minimal sind.

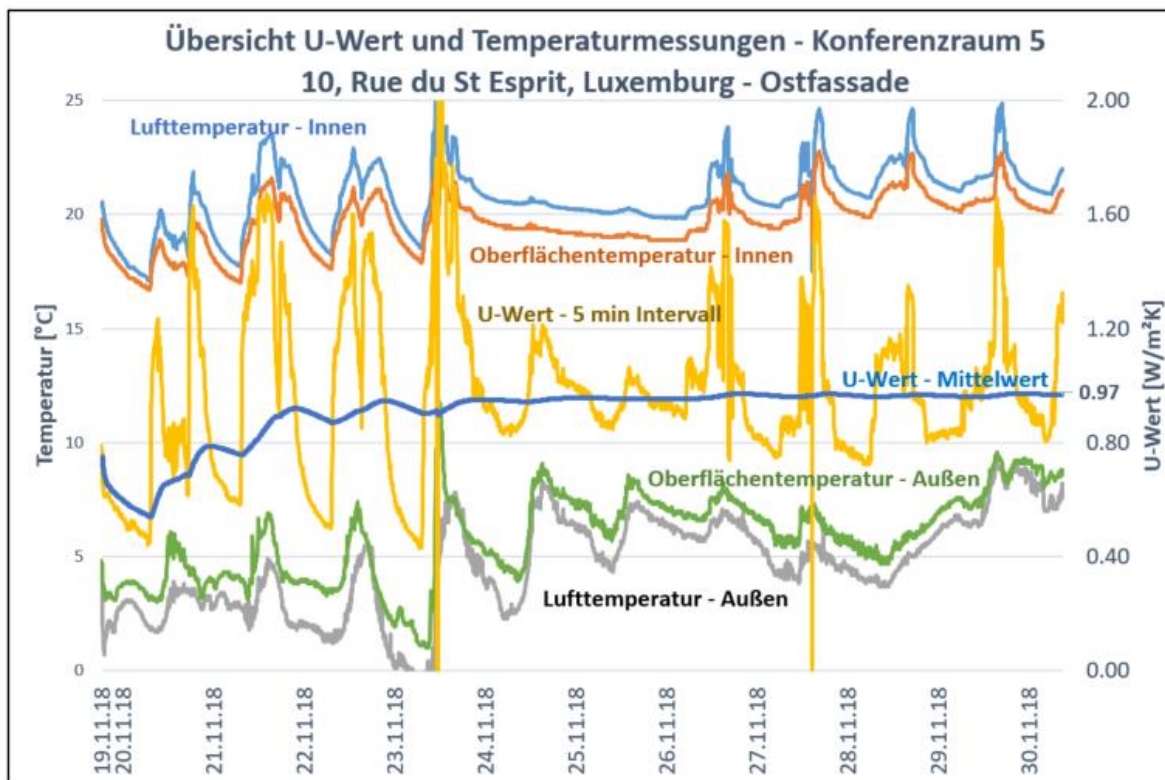


Abbildung 104: Darstellung der Ergebnisse einer Wärmeflussmessung

Sofern auch die Lufttemperaturen innen und außen erfasst werden, lassen sich daraus auch die Wärmeübergangskoeffizienten d_i und d_a ermitteln, die nach Norm auf $d_i = 8 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ und $d_a = 25 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ festgelegt sind. In der Praxis sind diese Koeffizienten oft kleiner, da die Norm eine konservative Abschätzung für die U-Wert Berechnung im Rahmen der Heizlastberechnung darstellt.

2.1.2.2 Messung und Deutung des Innenklimas

Das Innenklima hat große Auswirkungen auf die Funktion des Innendämmsystems. Besonders die Raumluftfeuchte und der sich durch die Differenz zwischen innerem und äußerem Wasserdampfpartialdruck einstellende Diffusionsstrom spielt bei den rechnerischen Nachweisverfahren eine große Rolle.

Folgende Parameter können einfach und mit günstiger Messtechnik erfasst werden:

- Raumlufttemperatur
- relative Raumluftfeuchte
- CO₂ Gehalt der Raumluft
- Außenlufttemperatur

Der CO₂ Gehalt der Raumluft ist dabei ein Indikator für das Lüftungsverhalten der Raumnutzer. Hohe Werte über 1500 ppm sprechen für nicht ausreichenden Luftwechsel. Dauerhaft niedrige Werte im Bereich von 500 ppm sprechen für eine falsch eingestellte Lüftungsanlage [VDI 6022-3] oder dauerhaft geöffnete Fenster bzw. eine Nicht-Nutzung des Raumes.

Der Sensor sollte in der Raummitte aufgestellt werden um einen repräsentativen Temperaturwert zu erfassen. Bei einer Raumgröße > 40 m² kann es unter Umständen sinnvoll sein mehrere Sensoren zu nutzen. Sofern die Außenlufttemperatur nicht gemessen werden kann, kann alternativ die [agrimeteo](http://www.agrimeteo.lu)⁷ Webseite als Datenquelle verwendet werden. Hier werden Außenklimadaten an zahlreichen Standorten in Luxemburg dokumentiert. Folgende Grafik zeigt beispielhaft eine 10 tägige Aufzeichnung.

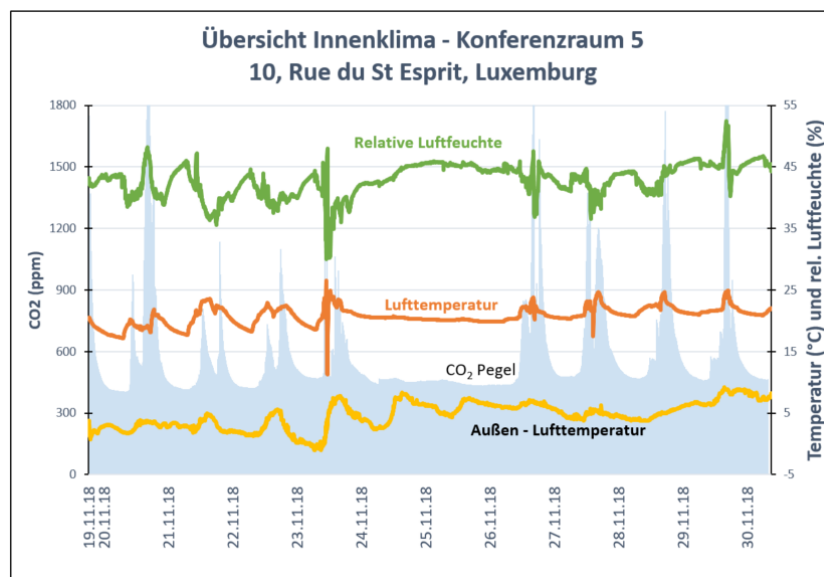


Abbildung 105: Grafische Darstellung des Innenklimas

⁷ www.agrimeteo.lu

Da die Deutung und Einordnung der vorangegangenen Messgrafik schwierig ist, werden die Raumlufthtemperatur und -feuchte mit der Außentemperatur verglichen und das Klima in eine der vier Stufen der WTA Norm 6-2 eingeordnet. Da die Raumlufthtemperatur im Winter aber selten konstant 20 °C beträgt, sondern in der Regel höher liegt und etwas schwankt, wird der tatsächliche Wasserdampfpartialdruck der Raumlufth berechnet und mit den Normwerten verglichen. Die Umrechnung geschieht mit Hilfe der Magnus-Formel auf Basis von Stundenwerten. Die Formel gilt für den Temperaturbereich für Luft über Wasser von -50 bis 100 °C und den Umgebungsdruck von 101325 Pa.

$$p_{pd} = \varphi * 611,2 * e^{\left(\frac{17,62 * \vartheta}{243,12 + \vartheta}\right)} \quad (23)$$

Wobei:

p_{pd}	Wasserdampfpartialdruck [Pa]
φ	Relative Luftfeuchte [%]
ϑ	Temperatur [°C]

Werden die Ergebnisse in Form von Stundenwerten in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur in ein Diagramm eingetragen, ergibt sich folgendes Bild. Es bildet sich eine Wertewolke, deren Progressionslinie in der Regel einer der vier Feuchtelasten am nächsten liegt.

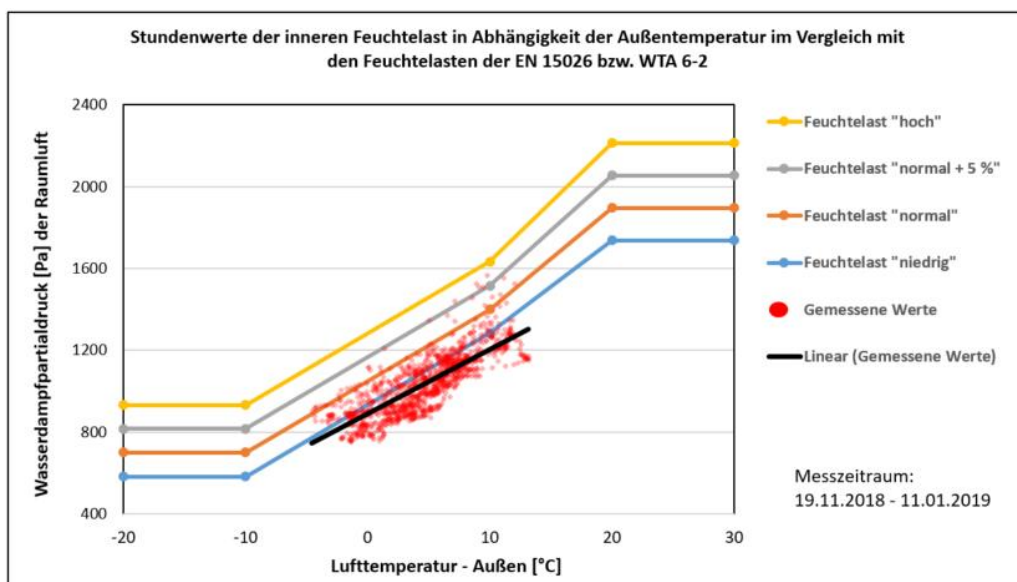


Abbildung 106: Stundenwerte der inneren Feuchtelast im Normdiagramm

Mit diesem Wissen kann das Innenklima in einer möglichen numerischen Simulation festgelegt werden. Auch beim vereinfachten Nachweis nach WTA 6-4 ist eine Vormessung notwendig.

2.1.2.3 Messung des Wasseraufnahmekoeffizienten

Sofern geplant ist die Fassade im Rahmen der gesamten Sanierungsmaßnahme unberührt zu lassen und es nicht bekannt ist, um welche Kombination aus Putz und Anstrich es sich handelt, kann es sinnvoll sein, den Wasseraufnahmekoeffizient der Außenfassade an mehreren Stellen zu messen.

Dieser w_a Koeffizient spiegelt die Dichtigkeit der Außenhülle gegen Schlagregenereignisse wider. Kleine w_a Werte unter $0,2 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$ werden bei Sanierungen angestrebt und gelten als Schlagregendicht. Dies bedeutet, dass bei einer einstündigen Benetzung der Oberfläche nur $0,2 \text{ kg}$ Wasser pro m^2 aufgenommen wird. Die Messung des w_a Koeffizienten kann über Pleyer- oder Franke-Röhrchen oder das sogenannte Wasseraufnahmemessgerät WAM 100B der HTWK Leipzig geschehen. Bei letzterem wird eine gut abgedichtete Testfläche am Gebäude für eine Stunde mit Umlaufwasser aus einem Tank beaufschlagt und das Differenzgewicht des Vorratsbehälters kontinuierlich gemessen. Die Differenz ergibt den auf die Fläche bezogenen Wasseraufnahmekoeffizient.

Besonders bei Natursteinfassaden kann eine solche Messung im Vorfeld Sinn machen. Mit dem Wissen des tatsächlichen Wasseraufnahmekoeffizienten und dem Innen- und Außenklima, sowie zusätzlich der Exposition (wie viel Regen trifft tatsächlich auf die Wand) der Fassade können Innendämmsysteme über mehrere Jahre simuliert werden. Vorneweg kann gesagt werden, dass Fassaden, deren Oberflächen größere Risse aufweisen oder weil sie aus saugfähigem Material bestehen sich schlecht mit Innendämmsystemen vertragen, weil sie zu viel Wasser aufnehmen.

Auf folgenden Abbildungen sind die möglichen Messverfahren für den Wasseraufnahmekoeffizienten w_a dargestellt. Das WAM100B links ist mit rund 7.000 € das mit Abstand teuerste, aber zugleich auch präziseste Messgerät. Die Messröhrchen auf der rechten Seite sind günstig, allerdings aufgrund der kleinen Messfläche relativ ungenau.



Abbildung 107: Messgeräte zur Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten

Bei der Messung sollte an allen Seiten des Gebäudes und an repräsentativen Stellen, d.h. an Stellen, die bei Schlagregenereignissen auch tatsächlich benetzt werden, gemessen werden. Besonders bei verwinkelten Altbauten mit Erkern, Türmchen und Überständen sollte die Fassade genau untersucht werden.

Folgende Aufnahmen zeigen exemplarisch, wie sich die Ausrichtung des Gebäudes und Dachüberstände auf die Benetzung der Fassade auswirken können.



Abbildung 108: Darstellungen unterschiedlich beregneter Fassaden

Besonders die Abbildung rechts unten zeigt, wie eine Fassade trotz großem Dachüberstand bereits wenige cm unter dem First bei Regen benetzt werden kann. Dies zeigt, wie schwierig sich die Einschätzung der Fassadenexposition gestaltet, denn selbst große Dachüberstände sind kein verlässlicher Grund für einen reduzierten Expositionsfaktor.

2.1.2.4 Aufnahme von Wärmebildern

Sofern die Planungsphase in eine Kaltperiode fällt und das Gebäude noch beheizt wird, kann eine Thermografie hilfreich bei der Lokalisation von Wärmebrücken sein. Denn besonders, wenn die Planunterlagen bei Altbauten nur noch teilweise vorhanden sind, können so böse Überraschungen durch Wärmebrücken vermieden werden. Dabei werden folgende Arten unterschieden:

- *Materialbedingte Wärmebrücken*
Materialbedingte Wärmebrücken entstehen, wenn Bauteile mit stark unterschiedlicher Wärmeleitfähigkeit aneinander angrenzen. Ein typisches Beispiel hierfür sind Fensterrahmen direkt am Fensterglas. Über die Rahmen ist im Vergleich zu den angrenzenden Schichten der Wärmeabfluss erhöht.
- *Geometrisch bedingte Wärmebrücken*
Geometrische Wärmebrücken entstehen, wenn die wärmeabgebende Oberfläche sehr viel größer ist als die Wärme aufnehmende Oberfläche. Typische Beispiele hierfür sind Gebäudeecken. Hier sinken an den Oberflächen die Oberflächentemperaturen stark ab, da die Wärme über die größeren abgebenden Oberflächen gut abfließen kann.

Hin und wieder wird auch von konstruktiven Wärmebrücken gesprochen. In der Regel handelt es sich dabei allerdings um eine Kombination der beiden oben genannten Wärmebrückenarten. Typische Vertreter sind z.B. Betonbalkone, die mit einer Decke verbunden sind und eine Dämmschicht durchdringen.

Die Auswirkungen von Wärmebrücken sind reduzierte Oberflächentemperaturen im Vergleich zum ungestörten Wandquerschnitt. Daraus können folgende Probleme resultieren:

- Gefahr von Tauwasserausfall und in der Folge Schimmelpilzbildung oder Verfärbung
- Erhöhter Heizenergieverlust
- Verschlechterung von Wohnkomfort, Behaglichkeit und optische Beeinträchtigung

Bei der Aufnahme von Wärmebildaufnahmen mit Hilfe von Infrarotkameras sind zahlreiche Dinge zu berücksichtigen. Die Euronorm DIN EN 16714-2 stellt hier einen Leitfaden zur Verfügung, der für eine korrekte Einstellung der Kamera und Bewertung der Bilder strikt beachtet werden sollte.

Unter anderem sind folgende Parameter bei der Aufnahme von Thermografie Bildern zu berücksichtigen:

- Auswahl des richtigen Emissionsfaktors (typische Baustoffe: $\epsilon \approx 0,8$)
- Innentemperatur im Gebäude
- Außentemperatur (Differenz zur Innentemperatur)
- Einfluss des instationären Wärmestroms
 - Einfluss des Nachthimmels
 - Einfluss von Sonnenstrahlung
 - Einfluss von Konvektion
- Richtige Skalierung und Farbwahl bei der Nachbearbeitung der Aufnahmen
- Vergleichsaufnahme mit einem Fotoapparat um Details erkennen zu können

Folgende Aufnahmen wurden am selben Gebäude gemacht. Durch unterschiedliche Einstellungen des Farbschemas und eine abweichende Skalierung entstehen total unterschiedliche Eindrücke von der thermischen Qualität der Gebäudehülle.

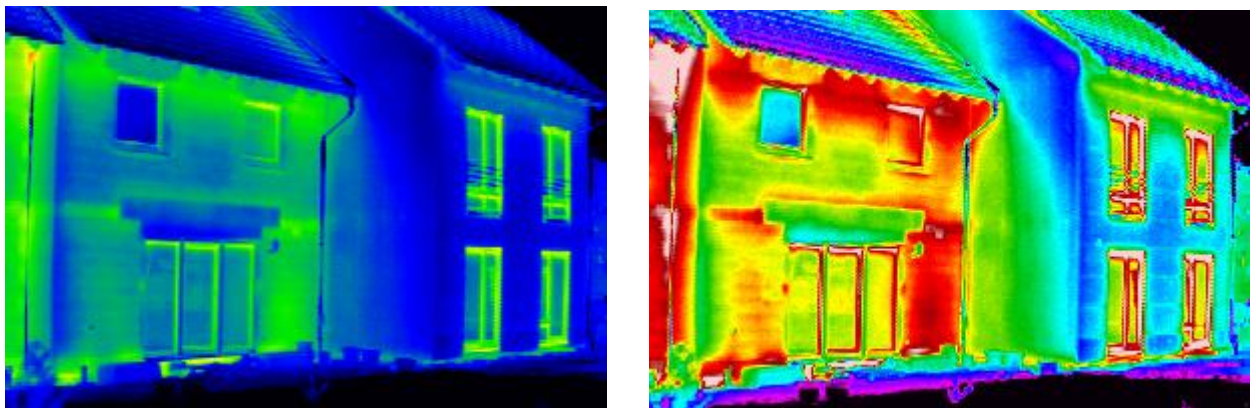


Abbildung 109: Thermografieaufnahmen eines Gebäudes mit unterschiedlicher Filtration [47]

Besonders die Erkennung von Wärmebrücken liefert eine wertvolle Hilfestellung bei der Planung der Innendämmung. Für die quantitative Bewertung einer Wärmebrücke oder Fassade sind Momentaufnahmen nur bedingt geeignet.

2.2 Zieldefinition

2.2.1 Wärmeschutz und thermische Behaglichkeit

Sobald beschlossen wurde, dass die Innendämmung zum Einsatz kommen soll, ist für diese eine Zieldefinition festzulegen. Was soll mit der Innendämmung erreicht werden und welche Nebenkriterien spielen bei der Planung eine Rolle?

Folgende Fragestellungen sind vor der Systemauswahl zu stellen.

Tabelle 111: Aspekte und Fragestellungen zur Auswahl des Innendämmsystems [Scheffler]

Thema	Fragen	Bauphysikalischer Hintergrund
Innendämmung	• Was soll mit der Innendämmung erreicht werden? • Welche Dämmstärken sollen realisiert werden? • Welche Dämmstoffe kommen in Frage? Gibt es Nachhaltigkeitskriterien? • Sollen Förderkriterien erreicht / eingehalten werden?	• Mindestwärmeschutz, Schimmelsanierung oder energetische Sanierung? • Spielraum bei Material- / Systemauswahl und Dämmstärke
Sonstige Maßnahmen	• Welche Maßnahmen sind neben der Innendämmung noch geplant?	• Z.B. Fensteraustausch, Heizungserneuerung, Generalsanierung. • Kann beispielsweise durch die Decke hindurch gedämmt werden?
Künftige Nutzung	• Wie sollen das Gebäude bzw. die einzelnen Räume nach der Sanierung genutzt werden? • Mit welchem Nutzerverhalten ist zu rechnen?	• Beurteilung des zu erwartenden Innenklimas in Abhängigkeit der Nutzung (geringe oder erhöhte Feuchtelast) • Permanente oder saisonale Nutzung • Belastung der Wände? Anforderungen an die Traglast?

Diese und weitere Fragen bilden die Grundlagen zur richtigen Systemauswahl.

2.2.2 Optimale Dämmstärke

Die Wahl der optimalen Dämmstoffstärke ist eine häufig gestellte Frage und nicht einfach zu beantworten, denn sie wird von zahlreichen Parametern beeinflusst:

- U-Wert der Bestandskonstruktion
- Wärmeleitfähigkeit des Dämmmaterials
- Feuchteverhältnisse
- Wirtschaftlichkeit
 - Raumverhältnisse (Raumverlust durch Dämmvolumen)
 - Materialkosten
 - Energieeinsparung

Die folgende Grafik zeigt die Entwicklung des U-Wertes einer typischen Wand bei steigender Dämmstärke und drei unterschiedlichen Ausgangswerten bei einem Dämmstoff der WLG 040. In der Regel reichen bereits 6-8 cm aus um die Vorgabe des Règlement Grand-Ducal 2016 bzgl. des Mindest-U-Wertes nach Innendämmmaßnahmen von $0,4 \text{ W/m}^2\text{K}$ zu unterbieten.

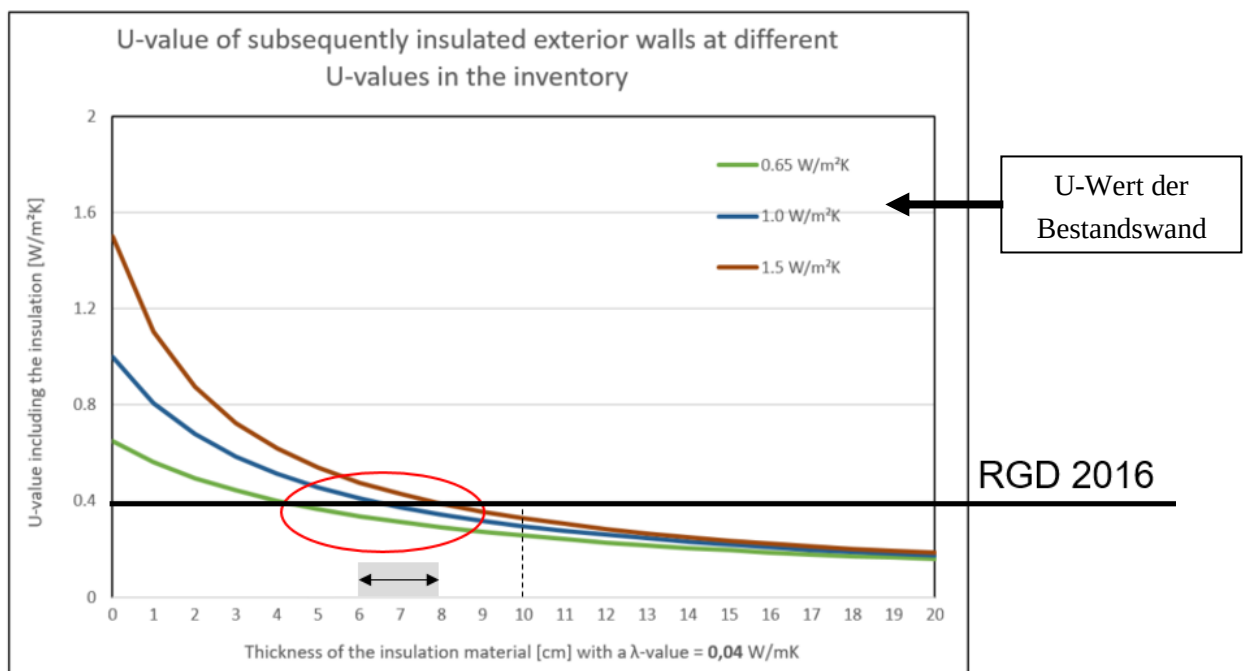


Abbildung 110: U-Wert Entwicklung von nachträglich gedämmtem Mauerwerk in Abhängigkeit der Dämmstärke

Auch die Betrachtung der Energiebedarfskennzahl Wärme bei einem Modell-Mehrfamilienhaus verdeutlicht, dass durch eine Vergrößerung der Dämmstärke ab 10 cm keine nennenswerten Einsparungen mehr zu erwarten sind.

Ursächlich hierfür ist die Tatsache, dass nur ein Teil der Gesamtwärmeverluste durch die Fassade entweicht und die übrigen Bauteile (Decken, Boden, Fenster) sowie Luftwechselverluste nicht optimiert werden. Negativ wirken sich die Wärmebrücken (z.B. einbindende Innenwände, Decken, Fenster, etc.) aus, die nur mit großem Aufwand durch die Anbringung von Dämmkeilen an eingebundenen Bauteilen reduziert werden können und sich bei der Innendämmung in der Regel durch die Absenkung der Bestandswandtemperaturen eher verschärfen.

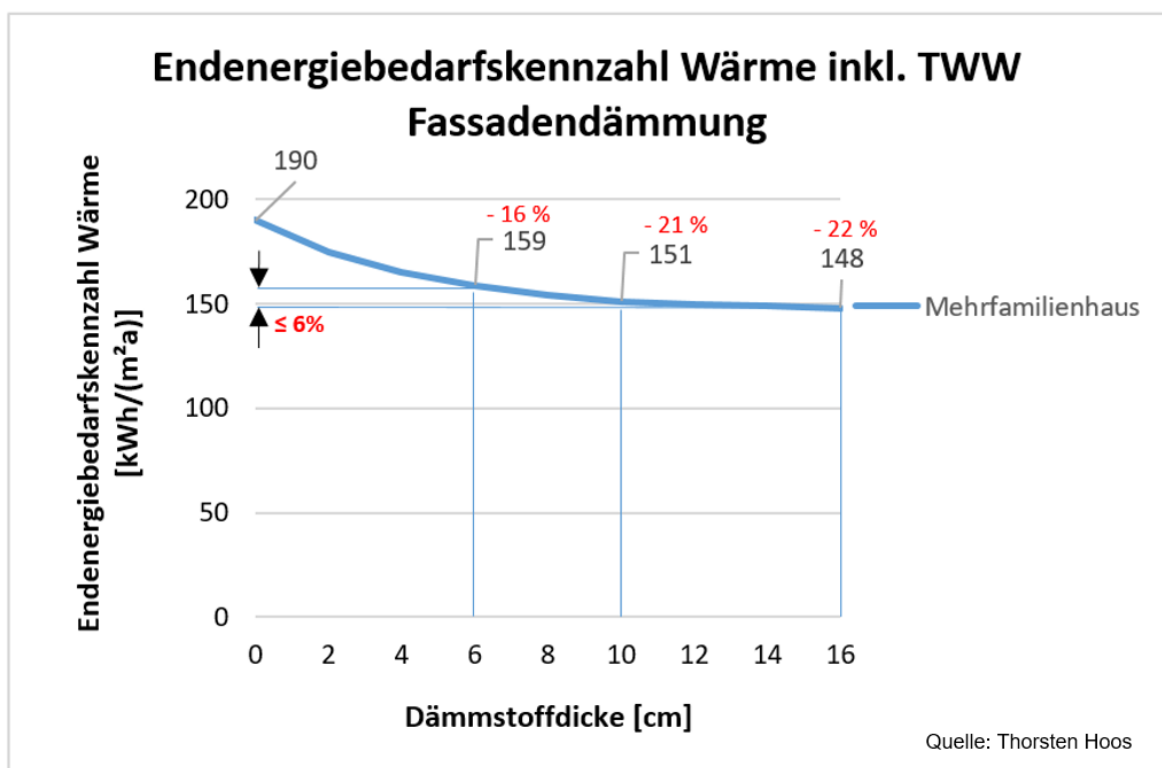


Abbildung 111: Endenergiebedarfskennzahl Wärme nach äußerer Fassadendämmung an einem Modellhaus [48]

2.3 Bewertung des Schlagregenschutzes

Die Bewertung des Schlagregenschutzes erfolgt anhand des gemessenen Wasseraufnahmekoeffizienten. Hier gelten folgende Grenzwerte:

$$\begin{aligned}w_a * s_d &\leq 0,1 \text{ kg/(m}^2\text{*}\sqrt{\text{h}}) \\w_a &\leq \mathbf{0,2 \text{ kg/(m}^2\text{*}\sqrt{\text{h}})} \\s_d &\leq 1,0 \text{ m}\end{aligned}$$

Da der Diffusionswiderstand nicht direkt an der Fassade gemessen werden kann, sollte die Herkunft und Qualität der wasserabweisenden Schicht ermittelt werden. In der Regel handelt es sich bei historischen Putzen allerdings um diffusionsoffene Produkte weshalb der $s_d \leq 1,0 \text{ m}$ Wert normalerweise keine Hürde darstellt. Problematisch sind hier besonders modernere Putzsysteme, die Kunstharz als Bindemittel verwenden und somit einen höheren Diffusionswiderstand aufweisen – in Altbauten kamen diese allerdings praktisch nie zum Einsatz.

Für Konstruktionen deren Wasseraufnahmekoeffizient $w_a \geq \mathbf{0,2 \text{ kg/(m}^2\text{*}\sqrt{\text{h}})}$ gilt, dass Konstruktionen, die ohne Innendämmung schadensfrei funktioniert haben, auch mit Innendämmung funktionieren können. Jedoch ist bei der Auswahl der Dämmstoffstärke zu berücksichtigen, dass das Trocknungspotential mit steigender Dämmstoffstärke sinkt. So kann es unter Umständen möglich sein, dass nur eine Minimaldämmung von 2 cm möglich ist. Wichtig ist, dass beim Nachweis mittels numerischer Simulation im Vorfeld eine Simulation durchgeführt wird, die auf folgenden gemessenen Werten basiert:

- Innenklima des angrenzenden Raumes
- Außenklima des Ortes (Nutzung der Aufzeichnungen der nächstgelegenen Wetterstation)
- U-Wert der Bestandskonstruktion aus Wärmeflussmessung
- Endwerte der Simulation aus Feuchtemessungen im Mauerwerksquerschnitt

Sofern die Ergebnisse der Simulation deutlich nach oben oder unten abweichen kann mittels Anpassung des Expositionswertes der Fassade eine Angleichung des Simulationsergebnisses zu den gemessenen Werten der Mauerwerksfeuchte erfolgen. Siehe Kapitel

Mit den so ermittelten Werten der Fassadenexposition können nun Simulationen mit gedämmtem Mauerwerk durchgeführt werden.

2.4 Auswahl des Dämmsystems

Vorgenannte Auswahlaspekte und die Ergebnisse anschließender hygrothermischer Simulationen beeinflussen die Systemauswahl. Zu berücksichtigen ist, dass der Systemgedanke auf dem Zusammenspiel der eingesetzten Komponenten wie Dämmmaterial, Innenputz, Dampfbremse, Vorwandssystem, Raumabschluss, usw. beruht.

Auch wenn häufig der Eindruck erweckt wird, dass alle Komponenten von einem Hersteller gekauft werden müssen, bedeutet dies eigentlich nur, dass die Komponenten auf einander abgestimmt sein sollen und eben nicht wahllos kombiniert werden können.

Eine pauschale Antwort auf die Frage des besten Systems lässt sich leider nicht geben. Sofern das Innenklima eher trocken ist und somit geringere hygrothermische Ansprüche stellt, dafür ein gutes Austrocknungspotential nach innen benötigt wird, können diffusionsoffene Dämmsysteme die richtige Wahl sein. Ist das Innenklima aber eher feucht oder es kann im Winter zu anhaltender Feuchte über mehrere Stunden kommen, so können diffusionsbremsende Dämmsysteme die bessere Wahl sein. Wenn die bremsende Schicht eine feuchteadaptive Dampfbremsfolie ist, kann damit auch noch ein gewisses Austrocknungspotential des Mauerwerkes sichergestellt werden.

Ein weiterer Aspekt, der die Frage des Dämmsystems beeinflussen kann, sind haustechnische Installationen. Während es unproblematisch ist, wenn Kabel in der kalten Wand geführt werden, kann es bei Trinkwasserleitungen durchaus problematische werden, wenn diese auf der kalten Seite der Dämmung geführt werden. Man stelle sich nur einmal vor, die Leitung kühlt während des zweiwöchigen Winterurlaubes im Januar soweit aus, dass es zur Frostbildung kommt, wodurch der Schaden hier schnell hoch werden kann. Wenn umfangreiche Installationen in der Wand verbaut sind, kann es sinnvoll sein ein Trockenbausystem mit mehreren Eben zu nutzen. Hier wird die äußere Ebene dampfbremsend / -sperrend ausgeführt und eine zweite, nach innen diffusionsoffene Ebene auf der warmen Seite für die Installationen vorgesehen.

Grundsätzlich werden die auf dem Markt verfügbaren Dämmsysteme durch ihre Diffusionseigenschaften eingeteilt. Diese Systeme gehen grundlegend unterschiedlich an die Aufgabe des Feuchtemanagements heran.

Dabei werden prinzipiell drei Systeme unterschieden:

- Diffusionsoffene und kapillaraktive Systeme
- Diffusionsbremsende und absorbierende Systeme
- Diffusionsdichte Systeme

Nach DIN 4108-3 werden die Diffusionseigenschaften bestimmter Bauteile in diffusionsoffen, -hemmend und -dicht wie folgt eingestuft:

Table 1: Einteilung der Diffusionsdichtheit für Bauteile nach DIN 4108-3

s_d -Wert	Grad der Dichtheit	Widerstand gegen Wasserdampfdiffusion
$s_d \leq 0,5 \text{ m}$	diffusionsoffen	gering
$0,5 \text{ m} < s_d < 1500 \text{ m}$	diffusionshemmend (Dampfbremse)	mittel
$s_d \geq 1500 \text{ m}$	diffusionsdicht (Dampfsperre)	hoch

Bauteile mit einer Wasserdampfdiffusionsäquivalenten Luftschichtdicke von 0,5 bis 1500 m werden als Dampfbremse, alles darüber als Dampfsperre bezeichnet.

Im Kontext der Innendämmung wird sich häufig nicht an die obige Tabelle gehalten. Häufig werden die diffusionsbremsenden und die diffusionsdichten Systeme zusammengefasst. Aufgrund ihrer deutlich unterschiedlichen Eigenschaften hinsichtlich des Trocknungspotentials sollten sie allerdings unterschieden werden.

Ursächlich dafür ist die Tatsache, dass eine dampfbremsende Innendämmung mit einem s_d Wert von 2 m durchaus noch eine Austrocknung der Dämmung und des Mauerwerkes nach innen zu lässt. Im Gegensatz dazu lässt eine Innendämmung mit einem Diffusionswiderstand $s_d > 10 \text{ m}$ praktisch keine Austrocknung der Fassade (z.B. nach Schlagregenereignissen) zur Raumseite mehr zu. Vergleiche hierzu Abbildung 9.

Daher ist folgende Einteilung für Innendämmsysteme sinnvoller:

Table 2: Einteilung von Innendämmsystemen nach ihren Diffusionseigenschaften

s_d -Wert	Grad der Dichtheit	Widerstand gegen Wasserdampfdiffusion / Trocknungsfähigkeit
$s_d \leq 0,5 \text{ m}$	diffusionsoffen	Gering / gut
$0,5 \text{ m} < s_d < 2 \text{ m}$	diffusionshemmend	Mittel / häufig ausreichend
$s_d \geq 2 \text{ m}$	diffusionsbremsend	Hoch / häufig nicht ausreichend

Im Folgenden werden diese drei Systeme vorgestellt und Vor- und Nachteile aufgezeigt.

2.4.1 Diffusionsoffene Systeme ($s_d \leq 0,5 \text{ m}$)

Bei den diffusionsoffenen handelt es sich um Innendämmsysteme, deren Diffusionswiderstand $s_d < 0,5 \text{ m}$ beträgt. In der Regel handelt es sich dabei um poröse mineralische Baustoffe deren innere Oberfläche und deren Volumen eine große Feuchtespeicherung ermöglichen. Die Baustoffe werden im Test der Wasseraufnahmefähigkeit als saugend eingestuft, wodurch sie die Möglichkeit besitzen ab einer gewissen Sättigung die anfallende Feuchtigkeit entgegen des Diffusionsstromes zurück in Richtung des Raumes zu transportieren. Es findet dadurch eine Verteilung der Feuchtigkeit im Dämmstoff statt. Dies wird als Kapillaraktivität bezeichnet.

Neben mineralischen Dämmplatten, deren Dämmwirkung auf der Dämmwirkung von eingeschlossenen Luftblasen beruht, kommen mittlerweile verstärkt Dämmstoffe auf den Markt deren Dämmwirkung mit Hilfe von Aerogelen z.B. in Verbindung mit einem mineralischen Putz bereitgestellt wird. Bei den Aerogelen wird der Molekülkontakt / die Brown'sche Bewegung der Teilchen durch kleinste Porengrößen unterdrückt und somit ein deutlich reduzierter Lambda Wert erreicht.

Vorteile

- Beste Trocknungseigenschaften zur Raumseite.
- Geringe Systemdicke durch gute Dämmeigenschaften und dünnen Raumabschluss.
- Unempfindlicher gegen Durchdringungen / Nägel, Schrauben etc.
- Vollständige Systeme inkl. Dämmkeile / Detaillösungen verfügbar.

Nachteile

- Die Innenraumfeuchte muss in der Heizperiode begrenzt werden.
- Keine Montage schwerer Schränke im Dämmmaterial aufgrund der geringen Dämmstoffdichte.
- Druckfestigkeit der Oberfläche aufgrund der geringen Dämmstoffdichte begrenzt.

2.4.2 Diffusionshemmende Systeme ($0,5 \text{ m} < s_d < 2 \text{ m}$)

Bei den diffusionsbremsenden Systemen haben die eigentlichen Dämmstoffe nur begrenzt die Fähigkeit am Feuchtemanagement teilzunehmen. Aus diesem Grund muss der in der Winterperiode auftretende Diffusionsstrom in den Dämmstoff ab einer gewissen Dämmstoffdicke durch eine dampfbremsende Schicht begrenzt werden. Diese Begrenzung des Diffusionsstromes kann durch eine variable Dampfbremssfolie, einen dampfbremsenden Innenputz oder die dampfbremsenden Eigenschaften des Dämmstoffes selbst hergestellt werden. Entsprechend flexibel lassen sich die Raumabschlüsse dieser Systeme gestalten.

Variable Dampfbremssfolien ändern ihre Diffusionseigenschaften in Abhängigkeit der Umgebungsfeuchte. Auf dem Markt sind Folien erhältlich deren s_d Wert zwischen 2 und 5m liegt. Diese Eigenschaft kann auch im Bereich der Innendämmung genutzt werden. So kann Feuchtigkeit aus der Innendämmung entweichen während ein Eindringen von der Raumseite effektiv verhindert wird.

Zum Beispiel haben Innendämmsysteme auf Basis von Weichholzfaserplatten zwar die Möglichkeit Feuchtigkeit durch Sorption zu speichern, allerdings ist aufgrund der unsortierten Orientierung der Fasern ein kapillarer Rücktransport zur Innenoberfläche praktisch nicht möglich. Um die Feuchteansammlung zu begrenzen sollte daher eine diffusionsbremsende Schicht in Form eines dampfbremsenden Putzes eingeplant werden.

Vorteile

- Unempfindlicher gegen höhere Innenraumfeuchten.
- Praktisch alle sorptionsfähigen Dämmstoffe in Trockenbausystemen einsetzbar.
- Tragfähiger Wandabschluss durch Trockenbausysteme erstellbar.

Nachteile

- In der Regel sind keine Dämmkeile in den Systemen enthalten.
- Dicker Wandaufbau durch Dampfbremse und tragfähigen Raumabschluss.
- Es wird dringend ein luftdichter Raumabschluss benötigt.

2.4.3 Diffusionsbremsende und -sperrende Systeme ($s_d \geq 2 \text{ m}$)

Während die diffusionsoffenen und die diffusionshemmenden Systeme quasi als Bausätze von den Herstellern zur Verfügung gestellt werden, lassen die diffusionssperrenden Systeme den Planern freie Hand bei der Gestaltung der Innendämmkonstruktion. Es können quasi alle Dämmstoffe in Verbindung mit einer dampfbremsenden Folie in Kombination mit einer Trockenbauwand eingesetzt werden. Folgende Darstellung zeigt den typischen Dampfdruck- und Temperaturverlauf in einer solchen Konstruktion im Winterfall.

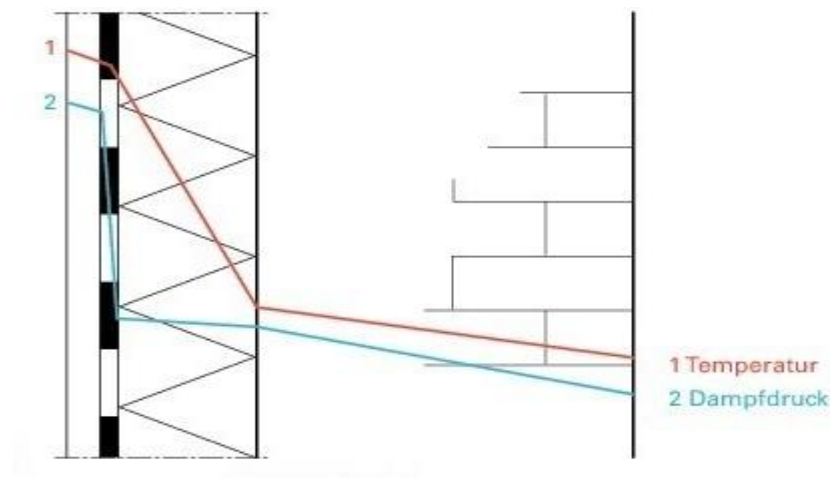


Abbildung 112: Dampfdiffusionssperrendes Innendämmsystem [49]

Vorteile

- Unempfindlich gegen höchste Innenraumfeuchten.
- Praktisch alle Dämmstoffe einsetzbar.
- Tragfähiger Wandabschluss durch Trockenbausysteme erstellbar.

Nachteile

- Empfindlich gegen eindringenden Schlagregen und andere wandseitige kleinste Feuchtequellen
- Dicker Wandaufbau durch Dampfsperre und tragfähigen Raumabschluss
- Empfindlich gegen Durchdringungen der dampfsperrenden Schicht
- Installationsschicht für Elektro und Sanitär vor der dampfsperrenden Schicht notwendig. Die baupraktische Ausführung ist hier schwierig!
- Es wird dringend ein luftdichter Raumabschluss benötigt.

2.5 Nachweisverfahren

Für die Beurteilung eines geplanten Innendämmsystems stehen drei unterschiedliche Verfahren zur Verfügung, die allerdings gewisse Rahmenbedingungen voraussetzen:

- Das Glaserverfahren nach DIN 4108-3 oder ISO 13788
- Das vereinfachte Nachweisverfahren nach WTA 6-4
- Der Nachweis mittels numerischer Simulation (z.B. WUFI, Delphin)

2.5.1 DIN 4108-3 Glaserverfahren

Um Langzeitfeuchtigkeitsschäden (Frostabplatzungen, Schimmel, Pilze etc.) durch Kondensation im Winter oder Sommer zu vermeiden, müssen Bauteile nach der Glaser-Methode oder einem Simulationsprogramm nach DIN 4108-3 und DIN EN ISO 13788 geprüft werden.

Das Glaser-Verfahren ist eine Untersuchung, ob und wie viel kondensierendes Wasser in einer strukturellen Komponente (z. B. Außenwand oder Dach) anfällt. Sie bildet die Grundlage für das Nachweisverfahren nach *DIN 4108-3 Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz - Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung* zur Beurteilung des Kondensationsrisikos. Das Verfahren umfasst die Berechnung des U-Wertes und der Temperaturen an den Schichtgrenzen sowie der Wasserdampf-sättigungsdrücke. Daraus erfolgen die Skizzierung des Glaser-Diagramms und schließlich die Berechnung des Kondenswassers. Das Diagramm zeigt, unter welchen Bedingungen und an welchen Stellen im Bauteil Kondensation auftreten kann und wie das Kondenswasser wieder verdampft.

Das Verfahren wurde zu einer Zeit entwickelt, als die heute übliche computergestützte Analyse noch nicht möglich war und daher als tabellarisch-grafische Methode konzipiert, die schnell und mit einfachen Rechenoperationen Ergebnisse liefert. Die Glaser-Methode kann als konservativ angesehen werden. Wenn eine Konstruktion nach der Glaser-Methode unkritisch ist, wird sie aus hygro-thermischer Sicht bei gegebenem Schlagregenschutz funktionieren. Dies bedeutet jedoch nicht, dass eine nach Glaser als problematisch angesehene Auslegung in der Praxis nicht funktioniert.

Generell können diffusionsoffene Innendämmsysteme mit der Glaser-Methode fast nie nachgewiesen werden. Die Methode berücksichtigt nur Diffusionsprozesse, während Sorption und Kapillaraktivität bei der Berechnung nicht berücksichtigt werden. Auch äußere Einflüsse durch Schlagregen und Bodenfeuchten / aufsteigende Feuchte werden im Nachweisverfahren nicht berücksichtigt.

Problematisch ist die Tatsache, dass die baupraktische Ausführung von Dampfbremsen / -sperrern häufig nicht perfekt gelingt und es durch Alterung der Materialien zu Rissen und Fugen kommen kann. Dies wird in Nachweisen generell nicht berücksichtigt, sollte aber vom Fachplaner bedacht werden.

2.5.2 WTA 6-4 Vereinfachtes Nachweisverfahren

Die Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V. – WTA. Die WTA ist die einzige Organisation, die Regeln und Vorschriften für die Sanierung bestehender Gebäude und die Sanierung historischer Gebäude in Deutschland aufstellt.

In der Merkblattserie 6 behandelt die WTA das weite Feld der Innendämmung. Der Planungsleitfaden stellt die Problembereiche der Innendämmung und die bauphysikalischen Nachweisverfahren vor:

- Nachweis durch hygrothermische Simulationsrechnung
- Vereinfachte Validierungsmethode

2.5.2.1 Bewertung des Untergrundes, Diffusionswiderstandes und delta R

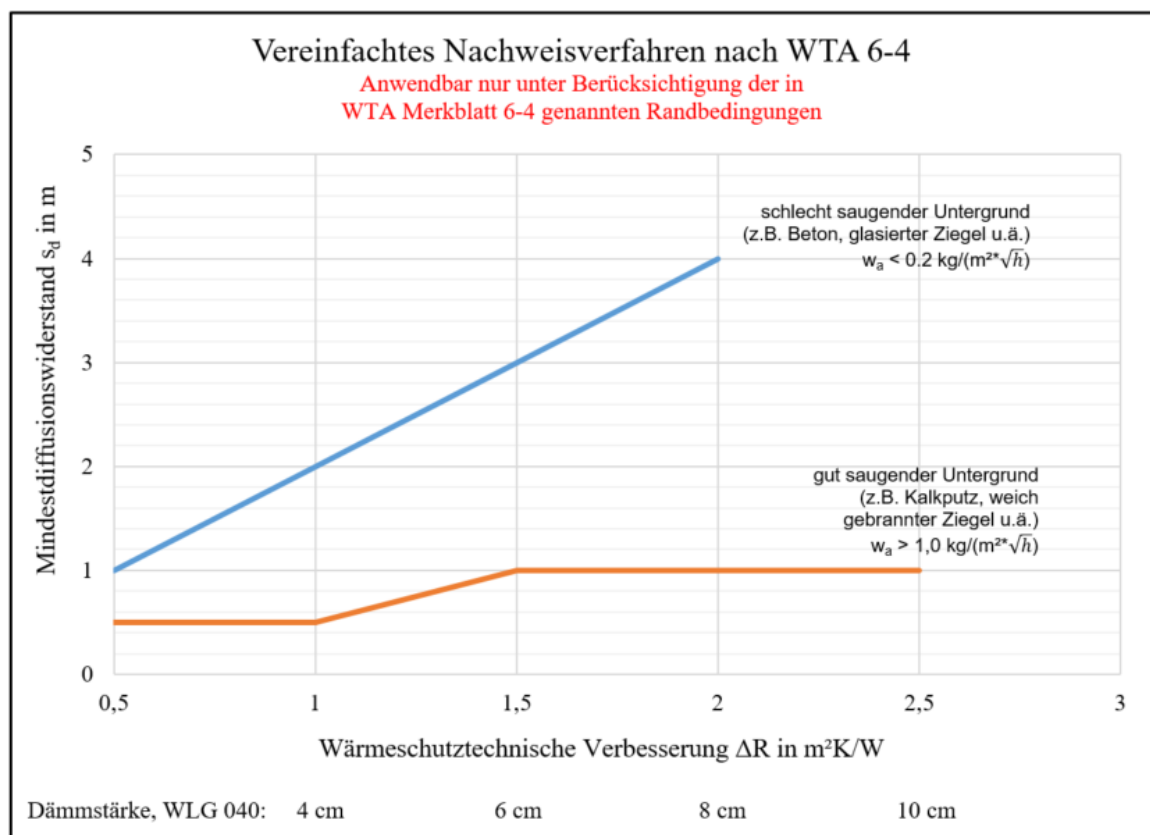


Abbildung 113: Mindestdiffusionswiderstand s_d der Innendämmung als Funktion von ΔR dieser Dämmung nach [50]

Die Kernaussage der Grafik lautet, dass der erforderliche Diffusionswiderstand s_d des inneren Dämmmaterials inkl. Raumabschluss mit steigendem Dämmleistung (dem ΔR) der Innendämmung und sinkender Wasseraufnahmefähigkeit der Bestandswand wachsen muss.

Diese WTA-Richtlinie gibt ein vereinfachtes Nachweisverfahren für Innendämmsysteme vor, das die folgenden drei Parameter enthält:

- Saugfähigkeit der vorhandenen Wand unter der Innendämmung
- Der Diffusionswiderstand des inneren Dämmmaterials inkl. Raumabschluss
- die Wärmedurchgangswiderstandsvergrößerung durch die Innendämmung
($\Delta R = \sum \frac{d_i}{\lambda_i}$)

2.5.2.2 Rahmenbedingungen erfüllt?

Folgende Voraussetzungen müssen neben den drei Kernkriterien für die Anwendung der vereinfachten Methode erfüllt sein:

- Die Feuchtigkeitsbelastung im Raum sollte "normale Bedingungen" nach WTA 6-2 nicht überschreiten.
- Zusätzliche Feuchtigkeitsquellen im Mauerwerk müssen ausgeschlossen werden.
- Die durchschnittliche jährliche Außentemperatur sollte über 7 °C (Lux: 9 °C) liegen.
- Es sollte keine Luftkonvektion zwischen der Außenwand und der inneren Isolierung geben.
- Außenseitige Beschichtungen müssen schlagregendicht laut WTA-Merkblatt 6-5 sein - bei der beanspruchten Oberfläche muss demnach folgendes gewährleistet sein:

$$w_a * s_d \leq 0,1 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \sqrt{\text{h}})$$

$$w_a \leq 0,2 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \sqrt{\text{h}})$$

$$s_d \leq 1,0 \text{ m}$$

- Das vorhandene Mauerwerk hat einen minimalen Wärmedurchgangswiderstand von $R \geq 0,4 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$, dies entspricht einem U-Wert von mindestens $\leq 2,5 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$.
- Die vorhandene Wand und die Dämmschicht müssen feuchtigkeitsbeständig sein (bis zu 95% Gleichgewichtsfeuchte).

Das Merkblatt 6-4 enthält folgende zusätzliche allgemeine Planungsinformationen:

- Ein besserer R-Wert der bestehenden Konstruktion führt grundsätzlich zu einem geringeren Kondenswasserrisiko und ermöglicht größere Schichtdicken der Innendämmung.
- Die Schadensfreiheit in Anschlussbereichen (Decken, eingebundene Innenwände, Fensterbänke usw.) muss durch eine Wärmebrückenberechnung sichergestellt werden.
- Je diffusionsdichter das innere Dämmsystem ist, desto geringer fällt das Trocknungspotential nach innen aus. Das Prinzip der Bauphysik gilt:
So diffusionsdicht wie nötig, so diffusionsoffen wie möglich.
- Um die kapillaraktiven Eigenschaften der Innendämmsysteme während des Entwurfs zu berücksichtigen, wird ein rechnerischer Nachweis nach WTA 6-5 (numerische Computersimulation) empfohlen. Dies bedeutet, dass mit dem vereinfachten Verfahren (vgl. Abb. 113) keine kapillaraktiven Dämmstoffe nachgewiesen werden können.

2.5.3 Nachweis mittels numerischer Simulation

Neben dem Glaserverfahren nach ISO 13788 und DIN 4108-3 steht der Nachweis mittels Simulation des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransportes zur Verfügung. Diese Simulationsprogramme wurden ab Mitte der 90er Jahre entwickelt und stehen heute ausgereift zur Verfügung.

Die Softwareprodukte ermöglichen eine realistische Berechnung des gekoppelten ein- oder zweidimensionalen Wärme- und Feuchtigkeitstransports in Wänden und anderen mehrschichtigen Bauteilen, die natürlichen Wetterbedingungen ausgesetzt sind. Die Softwarelösungen nutzen die neuesten Erkenntnisse zur Dampfdiffusion und zum kapillaren Feuchtigkeitstransport in Baustoffen. Die Softwarelösung sollte durch einen detaillierten Vergleich mit Messungen im Labor validiert worden sein.

Der Schichtaufbau der Komponente wird über ein grafisches Eingabefeld eingegeben; Die jeweiligen Materialeigenschaften können einer mitgelieferten Materialdatenbank entnommen oder vom Benutzer manuell eingegeben werden. Die Software WUFI des Fraunhofer Institutes verwendet relativ einfache, deskriptive Metriken, die die Plausibilitätsprüfung von Eingaben und die Messung oder Schätzung von fehlenden Daten erleichtern. In einigen Fällen stehen zusätzlich Funktionen zur Verfügung, um fehlende Kennwerte aus anderen Standardmerkmalen zu ermitteln.

Im Ablauf wird die transiente zeitliche Entwicklung der Temperatur- und Feuchtfelder in einem eindimensionalen Querschnitt einer Komponente, die aus mehreren Schichten unterschiedlicher Materialien bestehen kann berechnet. Die Verwendung vereinfachter Transportmodelle, die auf die bauphysikalischen Gegebenheiten zugeschnitten sind, erleichtert die praktische Anwendung und Interpretation der Ergebnisse.

Als Randbedingungen können Wetterdaten angegeben werden, so dass der Einfluss der natürlichen Bewitterung durch Anwendung der Lufttemperatur und -feuchtigkeit, der Sonneneinstrahlung und ggf. der Schlagregenbelastung berücksichtigt werden kann.

Bei der Berechnung werden die instationäre Entwicklung der Temperatur- und Feuchteprofile in der Komponente in einstündigen Schritten ermittelt. Die betrachteten Transportmechanismen sind Wärmeleitung, Wasserdampfdiffusion und Kapillarleitung. Die Speicherkapazitäten der Materialien für Wärme und Feuchtigkeit werden durch die spezifische Wärmekapazität und die Feuchtigkeitsspeicherfunktion beschrieben.

Das Ergebnis einer Simulation kann in einem Zeitrafferfilm abgespielt und später mittels diverser Liniendiagramme (Feuchte und Temperatur) analysiert werden. Folgende Abbildung zeigt das Endbild einer Simulation eines von innen gedämmten Mauerwerkes mit wasserdichtem Außenputz und einem 10 cm starken, diffusionsoffenen Innendämmsystem.

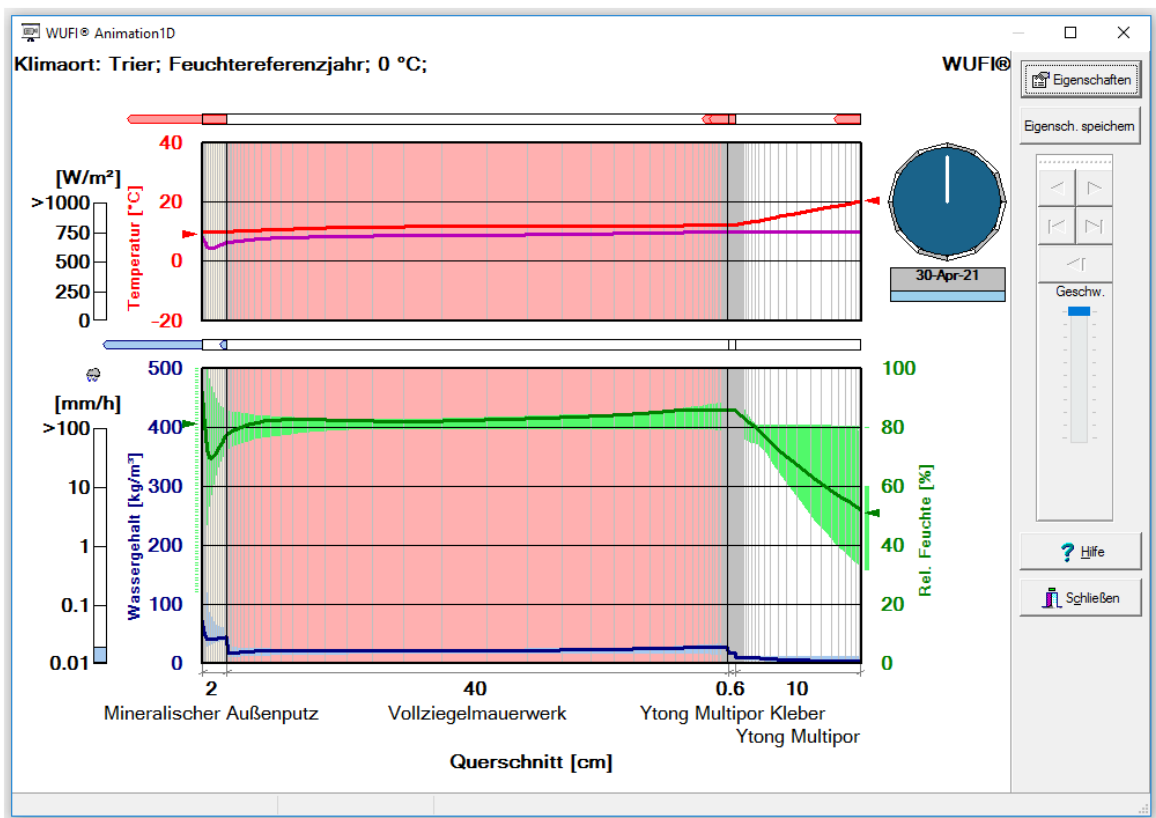


Abbildung 114: Simulationsergebnis einer 1D WUFI Simulation

Folgende Kriterien müssen im Rahmen der Simulationsauswertung berücksichtigt werden:

Feuchtegleichgewicht: Eingependelter Zustand in der Lebensdauer (30 a) erreicht?

Schimmelwachstum: Oberflächenfeuchte dauerhaft < 80 %?

Holzfäule: DIN 68800: Holzschutz

< 18 M.% Weichholzfaserplatten

< 20 M.% Konstruktionsholz / Massivholz

Frostgefahr: Relative Porenluftfeuchte immer < 95 %?

Wird überarbeitet
neuer Wert: 27 %

2.5.3.1 Messung der Mauerwerksfeuchte

Sofern der Wasseraufnahmekoeffizient der Fassade über dem Wert von $0,2 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$ liegt, sollte eine Innendämmkonstruktion nur mit Hilfe einer numerischen Simulation durchgeführt werden. Hier macht es Sinn die Mauerwerksfeuchte im Querschnitt an 2-3 kritischen Stellen (siehe Leitfaden Kap. 2.3) zu messen.

Die Erstellung eines Feuchteprofils des Bestandsmauerwerkes kann vor der Sanierungsmaßnahme ohne großen Aufwand durchgeführt werden. Hierfür wird die Porenausgleichsfeuchte in mehreren Tiefen des Mauerquerschnittes gemessen und dokumentiert. Folgende Abbildung zeigt exemplarisch das Ergebnis einer solchen Messung.

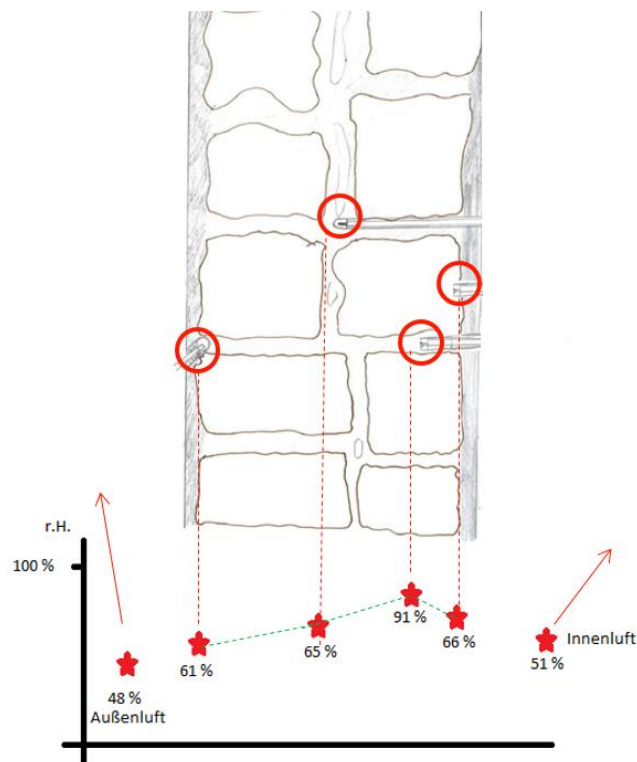


Abbildung 115: Messung der Feuchte im Mauerwerksquerschnitt

Für die Messung müssen 8 mm Löcher gebohrt werden und anschließend Feuchte- / Temperaturfühler eingeführt werden. Ein Gleichgewicht stellt sich in der Regel innerhalb von 15 min ein.

Folgende Profile haben typischen Schadensursachen.

- a) Aufsteigende Feuchte:
Höchster Durchfeuchtungsgrad im Kern der Wand
- b) Kondensationsfeuchte:
Durchfeuchtungsgrad nimmt nach außen hin ab
- c) Ungenügender Wetterschutz:
Durchfeuchtungsgrad nimmt nach innen hin ab
- d) Salzgebundene Feuchte:
Hohe Oberflächenfeuchte nimmt nach außen hin ab

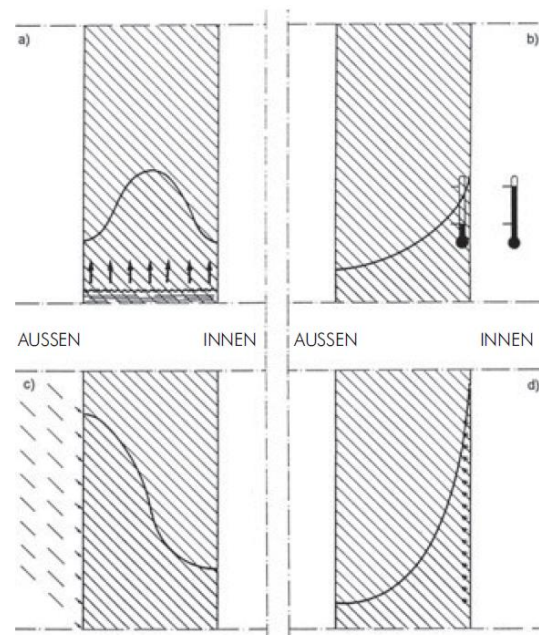


Abbildung 116: Klassische Schadensbilder bei feuchtem Mauerwerk [32]

Werte der relativen Feuchte unter 80 % können als unkritisch angesehen werden. Für die Beurteilung sollte das vorangegangene Außen- und Innenklima mitberücksichtigt werden. So sind Feuchtigkeitswerte im Bereich von 80 % trotz wochenlanger Trockenheit und Hitze durchaus zu hinterfragen, da vermutlich bereits ein Trocknungsprozess begonnen hat. Bei höheren Werten ist im weiteren Planungsverlauf die Ursache zu ermitteln und nach Möglichkeit zu beseitigen.

Nebenstehende Abbildung zeigt die praktische Umsetzung einer Messung der Mauerwerksfeuchte.



Abbildung 117: Messung der Porenluftfeuchte in drei Tiefen (3/7/25 cm)

2.5.4 Kein Nachweis möglich – Anpassung der Dämmmaßnahme

Sofern sich die gewählte Innendämmkonstruktion nicht mittels numerischer Simulation nachweisen lässt, ist zuerst die Ursache hierfür zu suchen. So kann ein gescheiterter Nachweis folgende Ursachen haben:

1. Es tritt zu viel Regen von außen ein bzw. kann nicht wieder abtrocknen.
2. Das Innenklima ist zu feucht für die gewählte Konstruktion.
3. Eine Kombination aus beidem.

Um dem ersten Punkt Herr zu werden, kann die gewählte Dämmstärke reduziert werden. Sofern die Bestandskonstruktion vorher schadensfrei war, sollte zumindest eine minimale Dämmung möglich sein. Hier ist allerdings der Einzelfall genau zu untersuchen. Auch eine Beschichtung – zum Beispiel durch einen neuen Anstrich kann bei Putzfassaden den Wasseraufnahmekoeffizienten nachhaltig senken.

Um die Feuchtigkeit aus dem Innenraum in den Griff zu bekommen, muss der Diffusionswiderstand der Innendämmkonstruktion erhöht oder auf kapillaraktive Dämmstoffe zurückgegriffen werden. Die Kalziumsilikatplatte und diverse Mineralschaum Dämmplatten sind kapillaraktiv und können mit Hilfe der sogenannten kapillaren Rückleitung die Feuchtigkeit im Bauteil begrenzen. Dabei sollte nicht außer Acht gelassen werden, dass sich die Trocknungskapazität der Gesamtkonstruktion zum Rauminnen durch den erhöhten Diffusionswiderstand auf der Innenseite des Raumes verschlechtert. Das bedeutet, dass zwar die Feuchtigkeit von innen begrenzt wird auf die Feuchtigkeit von außen unter Umständen nicht mehr abtrocknen kann.

Über eine iterative Anpassung ist eine Lösung zu suchen, die der Zielvorgabe am nächsten kommt und die Kriterien für eine langfristige Schadensfreiheit erreicht.

2.6 Planung von Details und Durchführung

Sobald der Nachweis des gewählten Dämmsystems gelungen ist, müssen Anschlussdetails, Durchdringungen sowie Installationen geplant werden. Besonders den Wärmebrücken (Anschlussdetails) kommt hierbei eine wichtige Rolle zu.

2.6.1 Minimalanforderungen an Wärmebrücken

Die Minimalanforderungen an die Vermeidung von Wärmebrücken sind in der DIN 4108 beschrieben und nutzen den f_{RSI} als Maß für die Qualität einer Wärmebrücke. Dieser Faktor ist wie folgt definiert:

$$f_{RSI} = \frac{T_{SI} - T_E}{T_I - T_E}$$

Im deutschen Raum sind Werte $> 0,70$ anzustreben. Im Alpenraum sind aufgrund niedrigerer zu erwartender Außentemperaturen Werte $> 0,75$ zu erreichen. Ein Vorteil dieses Faktors ist, dass er innerhalb von längeren Kaltphasen ähnlich wie der U-Wert gemessen werden kann. Dabei ergeben sich allerdings auch ähnliche Probleme. Um verlässliche Ergebnisse zu erreichen müssen lange Messdauern eingehalten werden. Die Messungen sollten äquivalent zu den U-Wert Messungen durchgeführt werden.

2.6.2 Berechnung von 2D und 3D Wärmebrücken

Die Planung von Wärmebrücken vermeidenden Maßnahmen erfolgt in der Regel mit Hilfe von 2D Wärmebrückenberechnungsprogrammen oder unter Zuhilfenahme von standardisierten Wärmebrückenkatalogen. Diese beinhalten nahezu alle für Neubauten relevanten Fälle von Wärmebrücken und sind als Anhang in der DIN 4108 Beiblatt 2 verfügbar.

In Altbauten treten diese Fälle allerdings nur selten auf weshalb für kritische Konstruktionen (und dazu gehören Innendämmungen) immer Wärmebrückenberechnungen durchgeführt werden sollten. Dies macht eine detaillierte Aufnahme der Ist-Situation notwendig.

Vorherige Thermografieaufnahmen in der kalten Jahreszeit können die Ortung von Wärmebrücken erleichtern. Denn häufig sind Wärmebrücken nicht mit dem bloßen Auge erkennbar. Zum Beispiel, wenn Stahlträger zur Unterstützung von Holzbalkendecken eingezogen wurden sind dies extreme Wärmebrücken, die allerdings häufig unter Gipskarton versteckt und so für das Auge nicht einfach sichtbar sind.

Werden diese bei der Planung übersehen, sind Schäden durch Schimmelpilzbildung nicht ausgeschlossen. Die Berechnung von Wärmebrücken erfolgt nach DIN 4108-2.

2.6.3 Auslegung von Dämmkeilen und Übergängen

Die Auslegung von Dämmkeilen oder Übergängen kann mit Hilfe von 2D Wärmebrückenberechnungsprogrammen erfolgen. In der Regel ist der Planer allerdings bei der Auswahl von Dämmkeilen auf das Angebot des Systemherstellers limitiert. Diese bieten z.B. 50/60 cm lange Keile an, die in einen Innenputz integriert werden sollen um das Raumbild nur minimal zu verändern.

Folgende Abbildung zeigt vergleichend eine Flankendämmung mittels rechteckiger Platte und mit Dämmkeil. Der Dämmkeil hat nicht nur optisch Vorteile, er führt auch zu einem homogenen Temperaturverlauf an den Oberflächen.

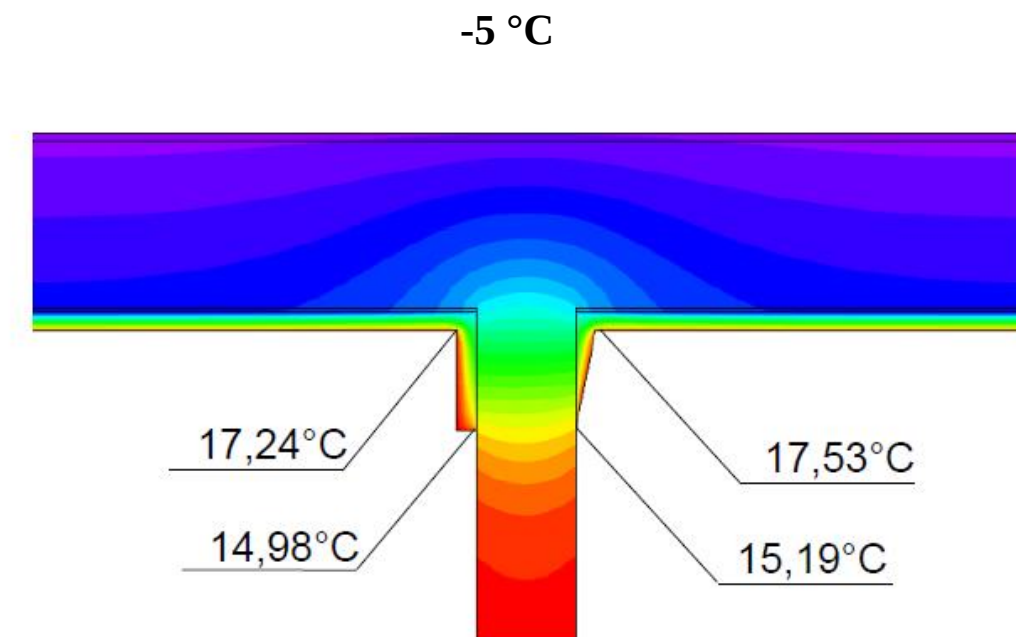


Abbildung 118: Wärmebrückenberechnung mit Flankendämmung [51]

Bei Dämmungen der einbindenden Bauteile müssen die Auswirkungen auf die Nachbarräume berücksichtigt werden. Durch einen Dämmkeil kann es dazu kommen, dass im ungedämmten Nachbarraum in angrenzenden Nischen und Ecken die Temperaturen so sehr absinken, dass es zu Schäden kommt.

2.6.4 Elektro-, HVAC und andere Installationen

Alle Arten von Installationen können bei Innendämmungen zu Schwierigkeiten führen. Dabei können drei Arten von Problemen entstehen:

- Wärmebrücken durch Durchdringungen des Dämmstoffes
- Befestigungsschwierigkeiten durch die geringe Tragfähigkeit der Dämmschicht
- Konvektiver Feuchteintrag hinter die Dämmebene durch Installationsöffnungen

Für alle Probleme sind mittlerweile Lösungen auf dem Markt verfügbar. Dadurch entstehende Mehrkosten sollten auf jeden Fall in der Kalkulation berücksichtigt werden. Vor allem, wenn alternativ auch eine Außendämmung in Frage kommt.

Lösungen

- **Befestigungsproblematik**

Je nach Gewicht der zu montierenden Konstruktion muss im Vorfeld entschieden werden, ob eine tragfähige Vorwandkonstruktion notwendig ist. Auch die Druckverträglichkeit der jeweiligen Konstruktion ist zu berücksichtigen.

Für leichte Lasten < 2 kg können i.d.R. ohne Probleme Dämmstoffdübel zur Befestigung verwendet werden. Diese sind zusätzlich thermisch entkoppelt und reduzieren so den Wärmebrückeneffekt.

Für schwere Lasten (z.B. Küchenschränke) sind tragfähige Vorwandkonstruktionen mit Installationsschicht zu errichten.

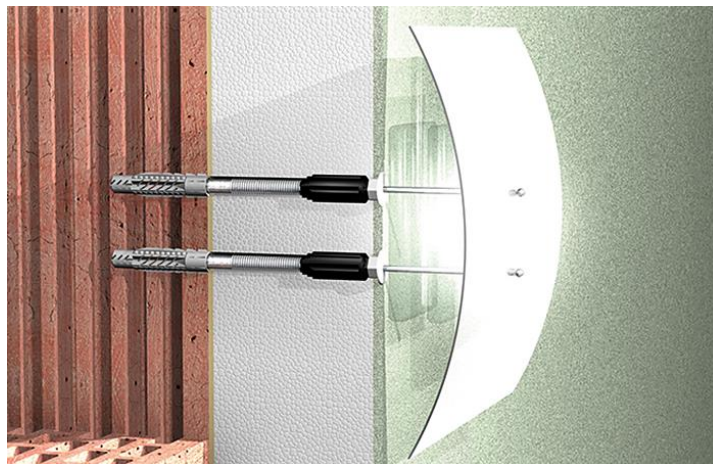


Abbildung 119: Beispiel eines Dämmstoffdübels [Fischer]

- **Konvektiver Feuchteintrag hinter die Dämmstoffebene**

Diese Problematik kann dann entstehen, wenn der gewählte Dämmstoff nicht vollflächig mit der Bestandswand verbunden ist und es keine luftdichte Schicht am Raumabschluss gibt. Dies kann mehrere Ursachen haben: Ist die Bestandswand vollkommen uneben oder der Dämmstoff ist aus Faserstoffen und eine vollflächige Verklebung nicht möglich. In diesen Fällen ist darauf zu achten, dass eine Luftdichtheitsebene in Form einer Folie oder eines korrekt ausgeführten Innenputzes existiert. Bei plattenförmigen Dämmstoffen sollte der Untergrund vor der Verklebung egalisiert werden.

Auch bei nicht sachgerecht ausgeführten Elektroinstallationen kann es zu einer Hinterlüftung der Dämmebene kommen. Unten dargestellte Installationsdose löst dieses Problem mit Hilfe einer luftdichten Unterkonstruktion, die eine dünne Dämmschicht integriert hat. Die Unterkonstruktion kann auf eine Dämmstoffdicke zwischen 3 und 10 cm eingestellt werden. Die Kabelführung folgt in diesem Fall in Schlitzen unter der Dämmschicht.



Abbildung 120: Installationsdose für Innendämmungen [Kaiser]

Durch diese Lösung kann der Wärmebrückeneffekt auf ein akzeptables Niveau minimiert werden. Durch die luftdichte Ausführung wird eine Hinterlüftung der Dämmung vermieden.

3 Checkliste

1. Begehung mit Fotodokumentation

- Materialien / Zustand bekannt? ☐
- Feuchteschäden erkannt / Ursachen bekannt? ☐
- Erfassung von Wärmebrücken ☐

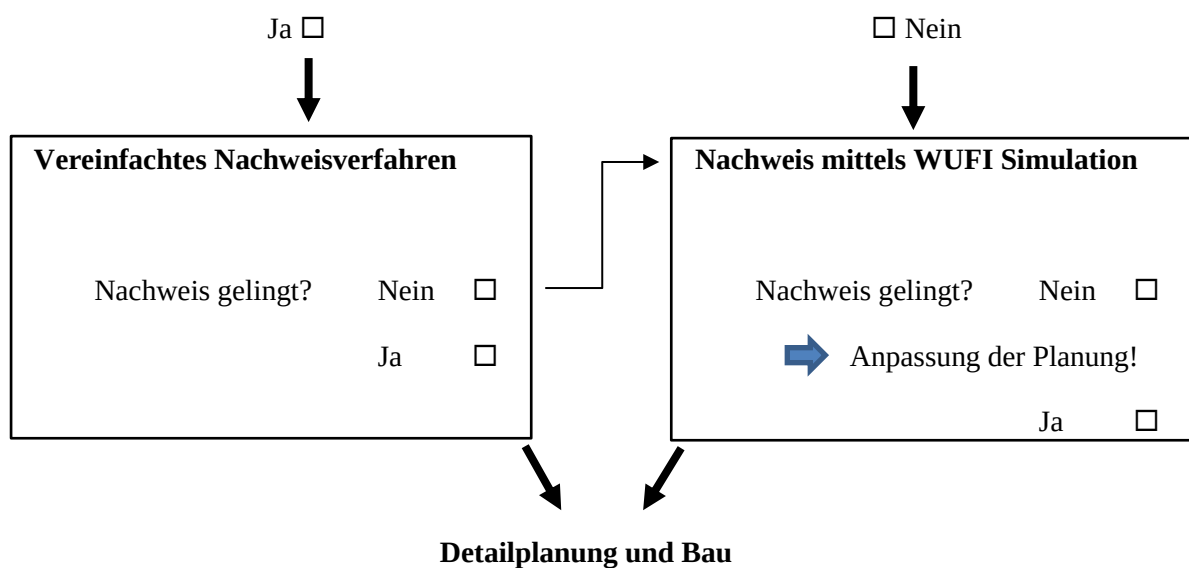
2. Vormessungen

- U-Wert Messung: _____ W/m²*K ☐
- Innenklima: ☐ Trocken ☐ Normal ☐ Normal + 5% ☐ Feucht
- Wasseraufnahmekoeffizient w_a = _____ ☐ $\leq 0,2 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \sqrt{\text{h}}) \leq$ ☐
- Thermografie / f_{RSI} ☐

3. Zieldefinition

- Definition: Umfang der Sanierung ☐
- Ziel U-Wert: _____ ☐
- Benötigte Dämmstärke / ΔR = _____ ☐
- Nutzung definiert? ☐

4. Ist der Schlagregeneintrag bautechnisch begrenzt? $w_a \leq 0,2 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \sqrt{\text{h}})$



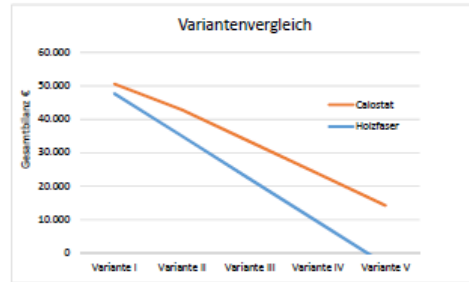
Messungen und Simulationen im Vorfeld von Innendämmprojekten zur Erhöhung der Planungssicherheit

Anhang E: Wirtschaftlichkeitsberechnungen

Kalkulationstool Innendämmung

Projektdaten

Name
Ansprechpartner
Straße
PLZ
Ort



Wohnfläche	130	m²
*ohne Innendämmung		
Wandlänge	72	m
Raumhöhe	2,5	m
Innendämmfläche	180	m²
U-Wert der Bestandskon.	1	W/(m²·K)
Mindest-U-Wert	0,4	W/(m²·K)
Eta WEZ vor Sanierung	350,00%	
Eta WEZ nach Sanierung	350,00%	
Primärenergiefaktor	1,8	-
Gradtagszahl	3510	Kd
Betrachtungszeitraum	30	a

Kosteneinflüsse	Einheiten	Variante I	Variante II	Variante III	Variante IV	Variante V
Name des Dämmstoffs		Diverse	Diverse	Diverse	Diverse	Diverse
Marke		Diverse	Diverse	Diverse	Diverse	Diverse
Material		Holzfaser	Holzfaser	Holzfaser	Holzfaser	Holzfaser
Lambda-Wert des Dämmstoffs	W/(m·K)	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
Dicke des Dämmstoffs	m	0,04	0,06	0,06	0,10	0,12
Lambda-Wert des Innenputzes	W/(m·K)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Dicke des Innenputzes	m	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015
U-Wert nach der Sanierung	W/(m²·K)	0,496	0,398	0,332	0,264	0,249
Transmissionswärmeverluste Fassade - ohne Sanierung	kWh/a	15.163	15.163	15.163	15.163	15.163
Transmissionswärmeverluste Fassade - mit Sanierung	kWh/a	7.525	6.029	5.029	4.314	3.777
Energiepreis (bezug)	€/kWh	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150
Energiepreisteigerung	%/a	2,00%	2,00%	2,00%	2,00%	2,00%
Anteil Fassade an Heizkosten - ohne Sanierung	€	92.271	92.271	92.271	92.271	92.271
Anteil Fassade an Heizkosten - mit Sanierung	€	45.792	36.688	30.604	26.251	22.982
Materialkosten	€/m²	30,00	35,00	40,00	45,00	50,00
Arbeitskosten inkl. Nebenkosten	€/m²	65,00	65,00	65,00	65,00	65,00
Investitionskosten Innendämmung	€	17.100	18.000	18.900	19.800	20.700
Staatliche Förderung (z.B. PrimeHouse)	€/m²	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
Gesamtförderung	€	650	650	650	650	650
Mietniveau - kalt - unsaniert	€/m²	13	13	13	13	13
Mietpreisanstieg	%/a	1,80%	1,80%	1,80%	1,80%	1,80%
Gesamtmiete - unsaniert	€	797.438	797.438	797.438	797.438	797.438
Wohnfläche nach Sanierung	m²	126,0	124,6	123,2	121,7	120,3
Wohnflächenverlust	%	3,0%	4,2%	5,3%	6,4%	7,5%
Mietniveau - kalt - saniert	€/m²	14	14	14	14	14
Mietpreisanstieg	%/a	2,00%	2,00%	2,00%	2,00%	2,00%
Gesamtmiete - saniert	€	859.018	849.203	839.389	829.575	819.761
Verkaufspreis - unsaniert	€/m²	7.500	7.500	7.500	7.500	7.500
Verkaufspreis - saniert	€/m²	8.250	8.250	8.250	8.250	8.250
Gesamtbilanz bei Verkauf mit Sanierung	€	47.730	34.950	22.170	9.390	-3.390
Gesamtbilanz bei Vermietung mit Sanierung	€	91.608	89.998	85.368	79.007	71.562

Abbildung 121: Eingabedaten Wirtschaftlichkeitsberechnung Holzfaser-Innendämmung

Messungen und Simulationen im Vorfeld von Innendämmprojekten zur Erhöhung der Planungssicherheit

Kalkulationstool Innendämmung

Projektdaten		Wohnfläche	130	m²		
		*ohne Innendämmung				
Name		Wandlänge	72	m		
Ansprechpartner		Raumhöhe	2,5	m		
Straße		Innendämmfläche	180	m²		
PLZ						
Ort						
		U-Wert der Bestandskon.	1	W/(m²*K)		
		Mindest-U-Wert	0,4	W/(m²*K)		
		Eta WEZ vor Sanierung	350,00%			
		Eta WEZ nach Sanierung	350,00%			
		Primärenergiefaktor	1,8	-		
		Gradtagszahl	3510	Kd		
		Betrachtungszeitraum	30	a		
Kosteneinflüsse	Einheiten	Variante I	Variante II	Variante III	Variante IV	Variante V
Name des Dämmstoffs						
Marke						
Material		Pyrogenes Silicium	Pyrogenes Silicium	Pyrogenes Silicium	Pyrogenes Silicium	Pyrogenes Silicium
Lambda-Wert des Dämmstoffs	W/(m²*K)	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Dicke des Dämmstoffs	m	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06
Lambda-Wert des Innenputzes	W/(m²*K)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Dicke des Innenputzes	m	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015
U-Wert nach der Sanierung	W/(m²*K)	0,496	0,398	0,332	0,284	0,249
Transmissionswärmeverluste Fassade - ohne Sanierung	kWh/a	15.163	15.163	15.163	15.163	15.163
Transmissionswärmeverluste Fassade - mit Sanierung	kWh/a	7.525	6.029	5.029	4.314	3.777
Energiepreis (bezug)	€/kWh	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150
Energiepreiserhöhung	%/a	2,00%	2,00%	2,00%	2,00%	2,00%
Anteil Fassade an Heizkosten - ohne Sanierung	€	92.271	92.271	92.271	92.271	92.271
Anteil Fassade an Heizkosten - mit Sanierung	€	45.792	36.688	30.604	26.251	22.982
Materialkosten	€/m²	80,00	90,00	110,00	130,00	150,00
Arbeitskosten inkl. Nebenkosten	€/m²	65,00	65,00	65,00	65,00	65,00
Investitionskosten Innendämmung	€	26.100	27.900	31.500	35.100	38.700
Staatliche Förderung (z.B. PrimeHouse)	€/m²	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
Gesamtförderung	€	650	650	650	650	650
Mietniveau - kalt - unsaniert	€/m²	13	13	13	13	13
Mietpreisanstieg	%/a	1,80%	1,80%	1,80%	1,80%	1,80%
Gesamtmielte - unsaniert	€	797.438	797.438	797.438	797.438	797.438
Wohnfläche nach Sanierung	m²	127,5	126,8	126,0	125,3	124,6
Wohnflächenverlust	%	1,9%	2,5%	3,0%	3,6%	4,2%
Mietniveau - kalt - saniert	€/m²	14	14	14	14	14
Mietpreisanstieg	%/a	2,00%	2,00%	2,00%	2,00%	2,00%
Gesamtmielte - saniert	€	868.832	863.925	859.018	854.111	849.203
Verkaufspreis - unsaniert	€/m²	7.500	7.500	7.500	7.500	7.500
Verkaufspreis - saniert	€/m²	8.250	8.250	8.250	8.250	8.250
Gesamtbilanz bei Verkauf mit Sanierung	€	50.610	42.870	33.330	23.790	14.250
Gesamtbilanz bei Vermietung mit Sanierung	€	92.423	94.819	92.397	88.243	83.005

Abbildung 122: Eingabedaten Wirtschaftlichkeitsberechnung Calostat-Innendämmung

Literaturverzeichnis

- [1] Le Ministre de l'Énergie, "Règlement grand-ducal du 9 juin 2021 concernant la performance énergétique des bâtiments," *Legilux*, 2021. moz-extension://8bd34d97-53e9-410b-bcc3-451e5c885c6c/enhanced-reader.html?openApp&pdf=https%3A%2F%2Fdata.legilux.public.lu%2Ffile%2Feli-etat-leg-rgd-2021-06-09-a439-jo-fr-pdf.pdf (accessed Jul. 24, 2021).
- [2] Le Ministre de l'Énergie, *INTEGRIERTER NATIONALER ENERGIE- UND KLIMAPLAN LUXEMBURGS FÜR DEN ZEITRAUM 2021-2030 Gem. .*
- [3] DIN, *DIN 4108-3: 2018-10 Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz - Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung*. 2018, p. 75.
- [4] N. Bogusch and T. Duzia, *Basiswissen Bauphysik: Grundlagen des Wärme- und Feuchteschutzes*, 2nd ed. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.
- [5] H. M. Künzel, "Verfahren zur ein- und mehrdimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten," Universität Stuttgart, 1994.
- [6] "DIN EN ISO 6946:2018-03 Bauteile - Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient - Berechnungsverfahren," 2018. doi: <https://dx.doi.org/10.31030/2518301>.
- [7] T. Hoos, A. Merzkirch, S. Maas, F. Scholzen, and D. Waldmann, "Messtechnische Ermittlung der U-Werte von Altbaufassaden im Vergleich mit Typologiewerten," 2015. Accessed: Jul. 25, 2021. [Online]. Available: https://orbi.uni.lu/bitstream/10993/23050/1/Paper_U-Werte.pdf.
- [8] M. Krus, "Bestimmung der Feuchtespeicherfunktion -IBP Mitteilung 292," Stuttgart, 1996.
- [9] Friedrich, *Tabellenbuch Bau- und Holz*. Leipzig: VEB Fachbuchverlag, 1980.
- [10] M. Krus, "Feuchtetransport- und Speicherkoeffizienten poröser mineralischer Baustoffe. Theoretische Grundlagen und neue Meßtechniken," Universität Stuttgart, 1995.
- [11] A. Worch and M. Stelzmann, "Feuchtetechnisches Verhalten von Innendämmsystemen mit hohen Dämmstoffdicken: Auswertung eines dreijährigen Monitoring verschiedener Innendämmsysteme mit hohen Wärmedurchlasswiderständen," *Bauphysik*, vol. 41, no. 4, pp. 193–198, Aug. 2019, doi: 10.1002/bapi.201900015.
- [12] O. Krischer, *Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik*. Springer Berlin Heidelberg, 1963.
- [13] G. A. Scheffler, *Bauphysik der Innendämmung*. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2016.
- [14] A. Binder, D. Zirkelbach, H. Künzel, C. Fitz, and A. Al, "IBP-Mitteilung," vol. 38, 2011.
- [15] A. Erkal, D. D'ayala, and L. Sequeira, "Assessment of wind-driven rain impact, related surface erosion and surface strength reduction of historic building materials," doi: 10.1016/j.buildenv.2012.05.004.
- [16] H. M. Künzel, "IBP-Mitteilung 263," Stuttgart, 1994.
- [17] B. Blocken, G. Dezsö, D. Dezsö, J. Van Beeck, and J. Carmeliet, "The mutual influence of two buildings on their wind-driven rain exposure and comments on the obstruction factor," 2009, doi: 10.1016/j.jweia.2009.06.003.

- [18] B. Blocken and J. Carmeliet, “A review of wind-driven rain research in building science,” *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 92, pp. 1079–1130, 2004, doi: 10.1016/j.jweia.2004.06.003.
- [19] Max Engelhardt Florian Kagerer Carolin Kokolsky Christine Maderspacher Holger Simon Christoph Sprengard Florian Antretter Dr. Cornelia Fitz Prof. Dr. Martin Krus Prof. Dr. Hartwig Künzel Tobias Schöner Dr. Daniel Zirkelbach, “Energieeffizienzsteigerung durch Innendämmung,” 2019. Accessed: Dec. 17, 2021. [Online]. Available: www.ibp.fraunhofer.de.
- [20] T. Schöner, T. Hevesi-Toth, D. Zirkelbach, and C. Fitz, “IBP-MITTEILUNG 561, 45 (2018).” Accessed: Dec. 17, 2021. [Online]. Available: www.ibp.fraunhofer.de.
- [21] R. Plagge and J. Engel, “Schlagregensicherheit bei Innendämmung,” *Bauen im Bestand*, Jan. 2013.
- [22] V. der Landesdenkmalpfleger, “Zum Umgang mit Hydrophobierungen von mineralischen Oberflächen im Bereich der Denkmalpflege,” Nov. 2016.
- [23] T. K. Hansen, S. P. Bjarløv, and R. Peuhkuri, “The effects of wind-driven rain on the hygrothermal conditions behind wooden beam ends and at the interfaces between internal insulation and existing solid masonry,” *Energy Build.*, vol. 196, pp. 255–268, 2019, doi: 10.1016/j.enbuild.2019.05.020.
- [24] H. J. P. Brocken, “Moisture transport in brick masonry : the grey area between bricks,” TU Eindhoven, Eindhoven, 1998.
- [25] T. Hoos, A. Merzkirch, S. Maas, F. Scholzen, and D. Waldmann, “Messtechnische Ermittlung der U-Werte von Altbaufassaden im Vergleich mit Typologiewerten,” 2015.
- [26] H. Hens, “Heat, Air and Moisture Transfer in Highly Insulated Building Envelopes (Hamtie),” 2002.
- [27] J. Grunewald, “Diffusiver und konvektiver Stoff- und Energietransport in kapillarporösen Baustoffen,” Technische Universität Dresden, Dresden, 1997.
- [28] X. Liu, Y. Chen, H. Ge, P. Fazio, and G. Chen, “Numerical investigation for thermal performance of exterior walls of residential buildings with moisture transfer in hot summer and cold winter zone of China,” *Energy Build.*, vol. 93, pp. 259–268, 2015, doi: 10.1016/j.enbuild.2015.02.016.
- [29] S. Latz *et al.*, “Evaluation von bauphysikalischen Vormessungen im Rahmen von komplexen Innendämmprojekten,” in *Bauphysiktag 2019 in Weimar 25.-26. September. Bauphysik in Forschung und Praxis; Schriftenreihe der Professur Bauphysik, Bauhaus-Universität Weimar*, 2019, pp. 17–19.
- [30] Administration des Services techniques de l’agriculture, “Agrarmeteorologisches Messnetz Luxemburg,” 2022. <https://www.agrimeteo.lu/>.
- [31] “Wärmeflussmessung - Ahlborn Mess- und Regelungstechnik GmbH.” https://www.ahlborn.com/de_DE/waermeflussmessung (accessed Nov. 25, 2021).
- [32] C. Arendt, “Baufeuchtigkeit prüfen und beheben. Verfahrenstechniken.,” 2006. Accessed: Nov. 16, 2021. [Online]. Available: moz-extension://8bd34d97-53e9-410b-bcc3-451e5c885c6c/enhanced-reader.html?openApp&pdf=https%3A%2F%2Fwww.preisinger.info%2Fdownload%2Fbaufuechtigkeit_pruefen_und_beheben_ils_nrw.pdf.
- [33] Ahlborn Mess- und Regelungstechnik GmbH, “Luftfeuchtemessung - digitaler Fühler,” Holzkirchen, 2021. Accessed: Nov. 29, 2021. [Online]. Available: www.ahlborn.com.

- [34] M. Stelzmann, “Entwicklung und Validierung eines Verfahrens zur Untersuchung des Schlagregenschutzes von Fassaden denkmalgeschützter Bestandsgebäude,” TU Dresden, 2020.
- [35] M. Stelzmann, R. Berg, U. Möller, and J. Grunewald, “Aw-Wert Messung in situ-Worauf ist bei der Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten zu achten?,” 2017, Accessed: Nov. 30, 2021. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/320800718_Aw-Wert_Messung_in_situ-Worauf_ist_bei_der_Bestimmung_des_Wasseraufnahmekoeffizienten_zu_achten.
- [36] B. Wehle and F. Gariglio, “Wasseraufnahmekoeffizienten der Aussenputze historischer Gebäude der Bauperiode 1850-1920,” Bern, Dec. 2015. Accessed: Dec. 20, 2021. [Online]. Available: www.ahb.bfh.ch.
- [37] H. Künzel, “Schadensursachen bei alten Gebäuden: Aufsteigende Feuchte, hygroskopische Feuchte oder Tauwasser?,” 1998.
- [38] E. Günther, S. Bichlmair, S. Latz, and M. Fricke, “Internal wall insulation with a new aerogel panel: SLENTITE® for energetic retrofit in historic buildings,” in *E3S Web of Conferences*, 2020, vol. 172, doi: 10.1051/e3sconf/202017201006.
- [39] S. Latz, F. Scholzen, A. Thewes, and S. Maas, “Comparison of high-performance and conventional internal insulation materials based on hygrothermal analysis using in situ measurements and simulation,” vol. 44, pp. 1–12, 2022, doi: 10.1002/bapi.202100039.
- [40] A. Karagiozis, G. Hadjisophocleous, and S. Cao, “Wind-driven rain distributions on two buildings,” *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 67–68, pp. 559–572, Apr. 1997, doi: 10.1016/S0167-6105(97)00100-1.
- [41] B. Blocken, G. Dezsö, J. van Beeck, and J. Carmeliet, “The mutual influence of two buildings on their wind-driven rain exposure and comments on the obstruction factor,” *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 97, no. 5–6, pp. 180–196, Aug. 2009, doi: 10.1016/j.jweia.2009.06.003.
- [42] “Prozess-Datensatz: CALOSTAT® (de).” https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=e51ce180-a6c6-4f36-aa9c-0f0f496e9086&version=00.02.000&stock=OBD_2021_I (accessed Jan. 31, 2022).
- [43] “Prozess-Datensatz: Mineralwolle (Fassaden-Dämmung) (de).” https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=f8afef87-5de3-4996-838c-1f2af9ef81df&version=20.20.020&stock=OBD_2021_I&lang=de (accessed Jan. 31, 2022).
- [44] “Prozess-Datensatz: Holzfaserdämmstoff Trockenverfahren (Durchschnitt DE) (de).” <https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=34633906-b5d4-48d8-adf4-90037a7499d9&version=00.00.053> (accessed Jan. 31, 2022).
- [45] “Prozess-Datensatz: PIR Hartschaum (de).” https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=2c076ee7-3853-4f69-9bf5-8ec265fa43e0&version=20.19.120&stock=OBD_2021_I&lang=de (accessed Jan. 31, 2022).
- [46] Infratec, “Wellenlängenbereiche.” [Online]. Available: <https://www.infratec.de/sensorik/service-support/glossar/infrarot/>.
- [47] D.-I. G. Dittié, “Thermografie.” Königswinter, 2015, [Online]. Available: www.thermografie.de.
- [48] T. Hoos, “Einsparpotential und ökonomische Analyse der energetischen Sanierung staatlicher

- Gebäude in.” Shaker, Luxembourg, 2012, [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/10993/15440>.
- [49] X. Thorsten Schoch and X. Gregor A. Scheffler, “Diffusionssperrendes Innendämmsystem,” *Dtsch. Bauzeitung*, no. 02/2011, 2011, [Online]. Available: https://www.dbz.de/artikel/dbz_Diffusionsoffen_und_kapillaraktiv_Energetische_Innenwand_sanierung-1067767.html.
- [50] D.-I. A. W. et Al., “Inside insulation according to WTA I: planning guide,” *WTA GmbH*, 2016.
- [51] Max Flies, “Innendämmung - Nachträglicher Wärmeschutz für den Gebäudebestand in Luxemburg,” Luxembourg, 2017.
- [52] “Innendämmung korrekt durchführen.” <https://www.raum-analyse.de/waermedaemmung/innendaemmung/> (accessed Feb. 16, 2022).
- [53] Saint-Gobain Rigips GmbH, “Rigiteherm 032 - Die sichere und wirtschaftliche Innendämmung,” Gelsenkirchen, Oct. 2012.

Lebenslauf

Name:	Sebastian Latz
Geburtstag, -ort:	18. September 1990, D-736314 Schorndorf
Familienstand:	verheiratet, 2 Kinder
Schulbildung:	
1997 – 2001	August – Lämmle Grundschule Steinenberg
2001 – 2009	Burg – Gymnasium Schorndorf, Abschluss mit Abitur
Zivildienst:	
2009 – 2010	Zentrum für Psychiatrie Winnenden, Abt. Technik und Bau
Hochschulausbildung:	
2010 – 2016	Studium an der Hochschule Trier B. Eng. Versorgungstechnik und TGA, Thesis bei der Daimler AG M. Eng. Energiemanagement, Thesis bei der Dillinger Hütte
Berufstätigkeit:	
2016 – 2017	Betriebsingenieur Gebäudetechnik / Facility Management Kuehne + Nagel Sarl in Contern / Luxembourg
2017 – 2022	Doktorand und wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Universität Luxemburg bei Prof. Dr.-Ing. S. Maas
01/2021 –	Mitgründer und Geschäftsführer Letz Green Renewables Sarl-s, www.lgr.lu