

# Ein Luxemburger Leitfaden für die Planung von Innendämmprojekten durch Messungen und Simulationen

Sebastian Latz<sup>1)</sup>, Andreas Thewes<sup>2)</sup>, Branca Delmonte<sup>1)</sup>, Stefan Maas<sup>1)</sup>

- 1) Université du Luxembourg, Department of Engineering (DoE), Faculty of Sciences, Technology and Medicine, Campus Kirchberg, 6 rue Coudenhove-Kalergi, L-1359 Luxembourg, corresponding author [branca.delmonte@uni.lu](mailto:branca.delmonte@uni.lu)
- 2) Hochschule Trier, Schneidershof, Fachbereich Bauingenieurwesen

## 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 Mindestwärmedurchgangskoeffizient U bei Sanierungen im luxemburgischen Gebäudeenergiegesetz, dem *Règlement grand-ducal concernant la performance énergétique des batiments* [1] enthalten. Insbesondere bei historischen und geschützten Gebäuden, aber auch bei vielen anderen Bauten mit beispielsweise außen beengten Platzverhältnissen, ist eine Innendämmung oft die einzige Möglichkeit, den Transmissionswärmeverlust durch die Fassade und somit auch die Treibhausgasemissionen zu senken. Auch für diese Art der Dämmmaßnahme sind einzuhaltende Grenzwerte festgelegt. Gleichzeitig herrscht bei vielen Architekten und Ingenieuren jedoch die Sorge, beim Einsatz von Innendämmung Bauschäden zu riskieren und somit die Bausubstanz zu schädigen oder ein ungesundes Raumklima zu fördern. Diese wird häufig durch die „Taupunktverschiebung“ in das Mauerwerk infolge der Innendämmung begründet. Dies entspringt wahrscheinlich den Vereinfachungen des Glaserverfahrens und ist von vielen Planenden verinnerlicht, obwohl in der Praxis durch die Sorptionseigenschaften und die Kapillarität bei korrekter Materialauswahl keine dauerhafte Durchnässung auftritt und auch kein Schimmel wächst. Daraus folgt, dass die innenliegende Dämmung öfter problemlos funktioniert als gedacht.

Der vorliegende Artikel verdeutlicht, ob und durch welche bauphysikalischen Messungen und Simulationen im Vorfeld eines Innendämmprojektes die Planungssicherheit erhöht werden kann. Ein Schwerpunkt ist der hygrothermische Funktionsnachweis für Natursteinfassaden, bei denen das normbasierte, vereinfachte Nachweisverfahren meistens scheitert, da konservative Annahmen hinterlegt sind beziehungsweise die Norm von vornherein diese Anwendung ausschließt, um auf der sicheren Seite zu bleiben.

An der Universität Luxemburg wurde im Auftrag der öffentlichen Bauverwaltung (Administration des Bâtiments Publics- kurz ABP) ein genereller Leitfaden für Innendämmprojekte entwickelt, um den Architekten und Ingenieuren eine Planungshilfe zu bieten. Dieser ist nachfolgend zusammenfassend dargestellt.

## Summary

The decarbonisation of the building sector plays a crucial role on the path to climate neutrality. To this end, the current EU directives are constantly being implemented in Luxembourg and for some years now, a minimum heat transmission coefficient U to be achieved for renovations has also been included in the Luxembourg Building Energy Act, the *Règlement grand-ducal concernant la performance énergétique des batiments* [1]. Especially in historic and protected buildings, but also in many other buildings with limited space on the outside for example, interior insulation is often the only way to reduce transmission heat losses through the façade and thus also reduce greenhouse gas emissions. Limit values to be complied with are also specified for this type of insulation measure. At the same time, however, many architects and engineers are concerned that the use of interior insulation will risk structural damage and thus damage the building fabric or promote an unhealthy

indoor climate. This is often due to the "dew point shift" in the masonry as a result of the interior insulation. This probably arises from the simplifications of the 'Glaser'-method that is internalized by many planners, although in practice very often no permanent wetting occurs and no mold grows due to the sorption properties and capillarity of correctly chosen insulation material. As a result, the internal insulation works more often than expected without any problems.

This article clarifies whether and by which building physics measurements and simulations in the preparation phase of an internal insulation project planning reliability can be increased. One focus is on hygrothermal functional verification for natural stone façades, where the standard-based, simplified verification procedure usually fails because conservative assumptions are deposited or the standards even excludes this application to stay on the safe side.

At the University of Luxembourg, a general guideline for interior insulation projects has been developed on behalf of the Public Buildings' Administration (Administration des Bâtiments Publics - ABP for short) in order to provide planning aid to architects and engineers. This guideline is summarised hereafter.

## Abkürzungsverzeichnis

ABP                      `Administration des Bâtiments Publics`, Verwaltung der öffentlichen Gebäude Luxemburgs

## Formelverzeichnis

|                |                                                                           |                     |
|----------------|---------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| $\lambda$      | Wärmeleitfähigkeit                                                        | $[W/(m * K)]$       |
| $d$            | Dicke des Materials                                                       | $[m]$               |
| $R$            | Wärmedurchlasswiderstand                                                  | $[m^2 * K/W]$       |
| $U$            | Wärmedurchgangskoeffizient / U-Wert                                       | $[W/(m^2 * K)]$     |
| $\alpha_{i/a}$ | Wärmeübergangskoeffizient innen / außen = $1/R_s$                         | $[W/(m^2 * K)]$     |
| $A$            | Oberfläche                                                                | $[m^2]$             |
| $\theta$       | Kontaktwinkel                                                             | $[^\circ]$          |
| $\sigma$       | Oberflächenspannung                                                       | $[N/m]$             |
| $\rho$         | 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                             | $[K]$               |
| grad p         | Gradient des Wasserdampfpartialdruckes                                    | $[Pa]$              |
| $s_d$          | wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke                         |                     |
|                | $[m]$                                                                     |                     |
| $\mu$          | 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“                                      | $[m^2/s]$           |
| $w$            | Wassergehalt                                                              | $[kg/m^3]$          |
| $w_a$          | Wasseraufnahmekoeffizient                                                 | $[kg/(m^2h^{0.5})]$ |
| $w_f$          | freie Wassersättigung                                                     | $[kg/m^3]$          |
| $R_s$          | Schlagregen senkrecht zur Gebäudeoberfläche                               | $[mm/h]$            |
| $R_N$          | Normalregen                                                               | $[mm/h]$            |
| $v$            | Windgeschwindigkeit senkrecht zur Gebäudeoberfläche gemessen in 10 m Höhe | $[m/s]$             |

## 1. Einleitung und Übersicht

Künftig sollte stärker bedacht werden, dass Gebäude viel „graue Energie“ beinhalten und zum Teil sehr lange Lebensdauern haben, wie uns viele alte Häuser in unserer Umgebung zeigen. Zudem sind die Baupreise enorm gestiegen, was ebenfalls für die Sanierung spricht. Weiterhin weicht der tatsächliche Energieverbrauch oft erheblich vom berechneten Verbrauch der Energiepässe aus einer Vielzahl von Gründen ab. Altbauten sind oft besser als berechnet und Neubauten schlechter als gedacht, so dass die Differenz im realen Verbrauch nicht so groß ist, wie oft behauptet wird [2], [20], [21]. Daraus folgt zudem, dass gezielte energetische Verbesserungen beim Altbau wie z.B. die Innendämmung einen erheblichen Mehrwert darstellen. Schließlich scheiden sich bei der Bewertung des Innenraumkomforts die Geister, d.h. bei der Frage, ob ein sanierter Altbau „besser“ oder behaglicher ist als ein Neubau.

Vor diesem Hintergrund sollte daher stets die Frage der möglichen Sanierung, oder noch präziser welcher Sanierungsmaßnahmen, vor dem Abriss genau geprüft werden. Hier reiht sich zweifellos die Innendämmung ein, die in der Praxis wider Erwarten oft problemlos funktioniert und eindeutig zu niedrigen Energieverbrauchswerten führt.

Dieser Artikel versucht die physikalischen grundlegenden Phänomene zusammen mit den einschlägigen Normen darzustellen. Ebenso werden mögliche Messungen und sinnvolle bauphysikalische Untersuchungen aufgeführt, bevor die Auswertung eines durchgeführten Feldtests die Arbeit abrundet. Dies schließt auch praktische Lösungsansätze zur Ermittlung des sogenannten Expositionsfaktors einer Fassade mit ein, welcher eine wichtige Eingabegröße für die Simulation darstellt.

## 2. Stand der Technik

### 2.1 Feuchtespeicherung in porösen Baustoffen

Die Mehrheit der üblicherweise verwendeten Baustoffe besitzt eine poröse Struktur. Diese Luftvolumina füllen sich durch Feuchtetransportvorgänge in Abhängigkeit der Umgebungsfeuchte. Der Wassergehalt kann als Masse des Wassers bezogen auf die Masse des trockenen Baustoffes oder auf dessen Volumen angegeben werden.

$$\text{Massebezogener Feuchtegehalt } u = \frac{\text{Masse des Wassers}}{\text{Masse des trockenen Baustoffs}} \quad \left[ \frac{\text{kg}}{\text{kg}} \right] \quad (1)$$

$$\text{Volumenbezogener Feuchtegehalt } w = \frac{\text{Masse des Wassers}}{\text{Volumen des Baustoffs}} \quad \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \quad (2)$$

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

$$\text{Sättigungsgrad} = \frac{\text{Wassergehalt}}{\text{Wassergehalt bei freier Sättigung}} \quad [-] \quad (3)$$

Diese Koeffizienten werden dazu verwendet, um materialspezifische Grenzwerte zu definieren, siehe z.B. WTA-Merkblätter des Referates 6, also WTA-6-1 bis 6-8 [18].

Um den Verlauf der Feuchtigkeit in Abhängigkeit der Umgebungsfeuchte darzustellen, wird die sogenannte Feuchtespeicherfunktion oder Sorptionsisotherme (vgl. Abb.1) eingeführt. Diese wird in drei Bereiche unterteilt, wobei  $T = \text{konstant}$  sei:

- Der **Sorptionsfeuchtebereich erstreckt sich von 0% bis 95%**. In diesem Bereich dominiert die Diffusion den Feuchtetransport nach dem FICKschen Gesetz  $g_v = -\frac{\delta}{\mu} \cdot \text{grad } p$  (siehe Gl. (5)) und wird vom Gradienten des Wasserdampfpartialdruckes  $p$  getrieben.
- Der **Kapillarwasserbereich geht von 95%-100%** bis zur freien Sättigung (=100%), was bedeutet, dass miteinander verbundene Poren gefüllt sind. In diesem Bereich dominiert der flüssige Transport des Wassers im Baustoff im Vergleich zur Diffusion. Die theoretische Steighöhe  $h$  einer Flüssigkeit in einer zylindrischen Pore berechnet sich zu  $h = \frac{2 \cdot \sigma \cdot \cos \theta}{\rho \cdot g \cdot r}$ , wobei  $\theta$  der Kontaktwinkel des Randmeniskus zw. Rand und Flüssigkeit und  $\sigma$  die Oberflächenspannung [N/m] ist (siehe Abb. 2 bzw. Gl. (4)). Diesen Sachverhalt nutzen vor allem Pflanzen und Bäume, um das Wasser von den Wurzeln bis in gr. Höhen zu transportieren. Es können also gr. Mengen befördert werden, jedoch erst ab ca. 95% Porenluftfeuchte, also bei vorhandenem flüssigem Wasser.
- Vom **Übersättigungsbereich >100%** wird gesprochen, wenn alle Poren, auch Sacklohporen z.B. durch Eintauchen in Wasser gefüllt werden. Dieses Wasser verlässt die Sacklohporen nach dem Eintauchen wieder schnell, weshalb sie beim Wassertransport keine Rolle spielen.

Die x-Achse der folgenden Abbildung 1 zeigt die relative Luftfeuchte in den Poren des untersuchten jeweiligen Baustoffs. Die y-Achse gibt den zugehörigen Wassergehalt in [kg/m³] 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, so dass der Übersättigungsbereich praktisch von der Beschreibung ausgeschlossen ist.

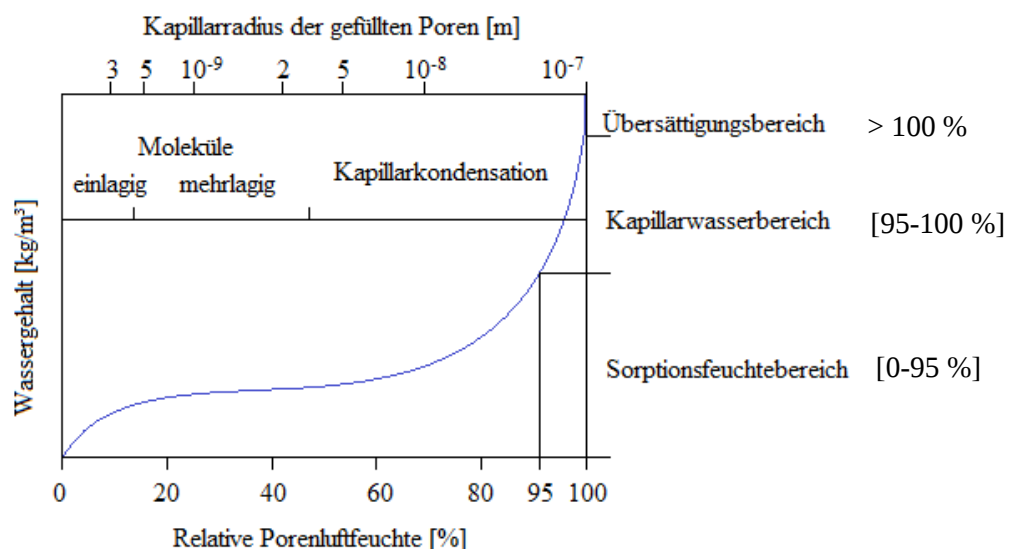


Abbildung 1: Schematische Feuchtespeicherfunktion eines porösen Baustoffs bei konstanter Temperatur.

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 [5]. Für die Bewertung der kapillaren Eigenschaften eines Baustoffs folgt man dem einfachen Modell einer zylindrischen Pore. In Abbildung 2 ist die Ausbildung des Meniskus in einer Pore mit Darstellung des Kontaktwinkels  $\theta$  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 kann z.B. bei Friedrich [6] nachgelesen werden:

$$h = \frac{2 \cdot \sigma \cdot \cos \theta}{\rho \cdot g \cdot r} \quad (4)$$

wobei:

|          |                         |         |
|----------|-------------------------|---------|
| $\theta$ | Kontaktwinkel           | [°]     |
| $\sigma$ | Oberflächenspannung     | [N/m]   |
| $\rho$   | Dichte der Flüssigkeit  | [kg/m³] |
| $g$      | Erdbeschleunigung: 9,81 | [m/s²]  |
| $r$      | Radius der Röhre        | [m]     |

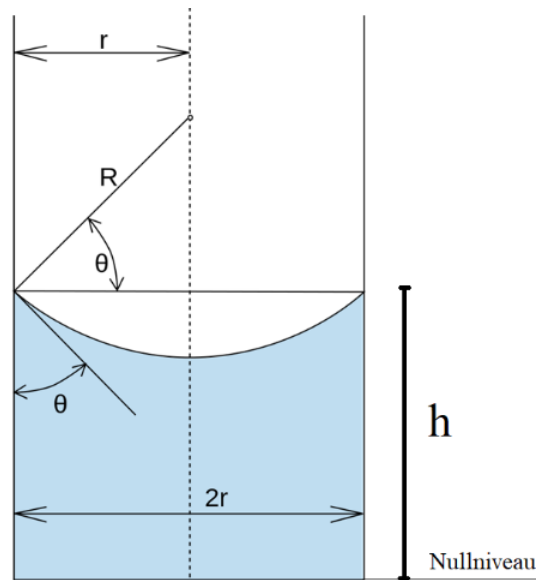


Abbildung 2: Meniskusbildung von Wasser in einer Kapillare

Vom Sorptionsfeuchte- oder vom hygroskopischen Bereich wird bei einer relativen Porenluftfeuchte zwischen 0 und 95% gesprochen (Abb. 1). Die Wasseraufnahme und -abgabe findet auf Porenebene überwiegend durch Sorptionsprozesse bei Kontakt des Baustoffes mit der Umgebungsluft bis zum Erreichen von Gleichgewichtszuständen statt, wobei der Wasserdampfpartialdruck die treibende Größe des Transportes ist. 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 [4]. In den Baumaterialien 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. Der

akzeptable Bereich kann bis 95% ausgedehnt werden (Abb.1), denn erst dann findet Tröpfchenbildung statt und man erreicht den Kapillarwasserbereich (siehe auch Kap. 2.4.4 und 2.5.3). Auch Schimmelpilze haben unter diesen Umständen (<80%), kaum eine Chance zu wachsen. In diesem Bereich dominiert die Diffusion klar den Feuchtetransport.

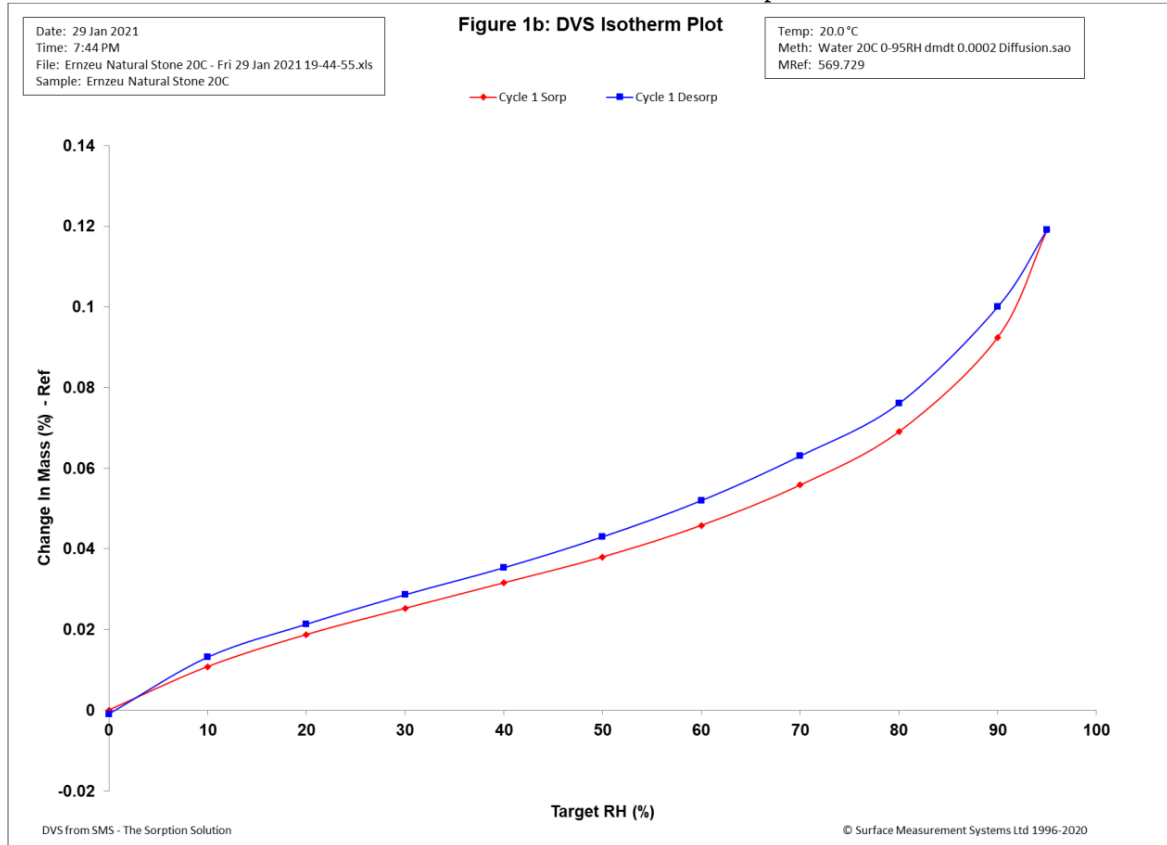


Abbildung 3: gemessene Sorptionsisotherme des Ernzeurer Natursteins aus Luxemburg

Die obige Abbildung 3 zeigt exemplarisch die mit einem „Diffusion Vapour System“ der Firma Surface Measurement Systems aus Großbritannien gemessene Sorptionsisotherme des Ernzeurer Natursteins aus Luxemburg. 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 verzögerten Feuchteabgabe in Abhängigkeit der Porendurchmesser kommt.

Im Kapillarwasserbereich (also Porenluftfeuchte zwischen 95% und 100%) kommt es zur verstärkten Tröpfchenbildung in den Kapillaren des Baustoffs und die kapillare Leitung flüssigen Wassers überwiegt dann schnell bei Weitem die Diffusion beim Feuchtetransport. Die freie Sättigung (Porenluftfeuchte = 1) kann nur durch das Saugverhalten des jeweiligen Baustoffs erreicht werden und sie hat im Kontext der Innendämmung vor allem im Bereich des äußeren Putzes eine Bedeutung.

Während das Wasser im Kapillarwasserebereich (95%-100%) in den Poren gebunden ist, existiert ungebundenes Tauwasser (>100%), sobald auch Sackporen gefüllt sind, die aufgrund ihrer Geometrie nicht zum Flüssigtransport beitragen können. Dieses Wasser verlässt die Probe nach dem Eintauchen in ein Wasserbecken innerhalb kurzer Zeit wieder, sobald diese aus dem Wasserbad

gezogen wird. Der Übersättigungsbereich mit der dort sehr steilen Sorptionsisotherme spielt für die Betrachtungen in der Bauphysik nur eine untergeordnete Rolle, da der Zustand der Übersättigung nur mit künstlichen Maßnahmen erzeugt werden kann, wie z.B. dem Eintauchen einer Probe in ein Wasserbad.

## 2.2 Wasserdampfdiffusion

Die Wasserdampfdiffusion ist der normalerweise dominierende Feuchtetransportvorgang im Mauerwerk (0-95% Sorptionsfeuchte). Sie wird durch Konzentrationsunterschiede des Wasserdampfpartialdruckes in den Bauteilschichten und der Innen- und Außenluft angetrieben. Im Baustoff kommt es in Abhängigkeit des Porendurchmessers zur Effusion nach Knudsen in den kleineren Poren  $< 5 \cdot 10^{-9} \text{ m} = 5 \text{ nm}$ , sowie zur Diffusion wie in der Umgebungsluft nach dem FICKschen Gesetz in den größeren Poren  $> 10^{-6} \text{ m} = 1 \text{ }\mu\text{m}$ . Im Zwischenbereich kommen beide Effekte parallel vor. Die Effusion nach Knudsen folgt ebenfalls dem Konzentrationsgefälle des Wasserdampfes wie die Diffusion, allerdings ist die mittlere freie Weglänge der Moleküle größer als der Porendurchmesser, wodurch der Transport durch die Molekülkollisionen mit der Porenwand bestimmt wird [7].

Um beide Diffusionseffekte zusammenfassen zu können, wurde die baustoffabhängige Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl  $\mu$  eingeführt. Dieser Faktor vergleicht die ungestörte Diffusion in Luft mit der Diffusion im Baustoff. Daraus ergibt sich folgender Zusammenhang für den Dampfdiffusionsstrom:

$$g_v = -\frac{\delta}{\mu} * \text{grad } p \quad (5)$$

mit:

|                                                                                                                                                                                                                          |                                                                      |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| $g_v$                                                                                                                                                                                                                    | Dampfdiffusionsstromdichte [ $\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$ ]      |
| $\mu$                                                                                                                                                                                                                    | Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl [-] aus Tabellen z.B. DIN 12572 |
| $\delta$                                                                                                                                                                                                                 | Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizient in Luft                         |
| $(\approx 6,78 \cdot 10^{-7} \frac{\text{kg}}{\text{m}\cdot\text{h}\cdot\text{Pa}} = 1,88 \cdot 10^{-10} \frac{\text{kg}}{\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{Pa}} \text{ bei } 5^\circ\text{C und } p = 1013 \text{ mbar})$ |                                                                      |
| grad p                                                                                                                                                                                                                   | Gradient des Wasserdampfpartialdruckes [ $\text{Pa}/\text{m}$ ]      |

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

$$s_d = \mu * d \quad (6)$$

mit:

|       |                                                                  |
|-------|------------------------------------------------------------------|
| $s_d$ | wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke [ $\text{m}$ ] |
| d     | Bauteildicke [ $\text{m}$ ]                                      |

Die DIN 4108-3 teilt Konstruktionen anhand ihres Diffusionswiderstandes  $s_d$  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    |

Bei der Einschätzung ist allerdings zu berücksichtigen, dass zwar der thermische Widerstand R und der Diffusionswiderstand  $s_d$  mit steigender Dicke proportional steigen – der U-Wert allerdings nichtlinear sinkt. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass eine Innendämmung auf einer ungestörten Wand, die bei geringer Dämmstärke einen Mindestdiffusionswiderstand 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 [8]. Für Innendämmkonstruktionen wird jedoch oft eine abweichende Einteilung empfohlen:

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

Bei einem Diffusionswiderstand größer 2 m ist keine nennenswerte Abtrocknung im Sommer mehr möglich und ebenso verhält es sich in umgekehrter Richtung im Winterfall.

Daraus folgt aber auch bei diffusionsdichten Schichten, dass bei kleinen oft ungewollten Störungen, Rissen, nicht korrekt verklebten Stößen oder ungewollten Durchdringungen von Dampfbremsfolien oder sogar Dampfsperren die Rücktrocknung nahezu unmöglich ist und es zu Schäden kommen kann. Sofern die Feuchtelast aus dem Innenraum es zulässt, sollte daher stets eine diffusionsoffenere Bauweise bevorzugt werden. Manchmal ist auch eine Abtrocknung über die der Folie gegenüberliegende raumferne Seite möglich. 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. Bei hoher Umgebungsfeuchte reduziert sich deren Diffusionswiderstand (z.B.  $s_d = 5 \text{ m}$  bei 50 % r.F. bis 0,2 m bei 95 % r.F.), während er bei niedrigerer Umgebungsfeuchte steigt. Dies soll nur erklären, dass man i.a. nur so dampfdicht wie nötig bauen soll, weil offene Konstruktionen meist fehlertoleranter sind.

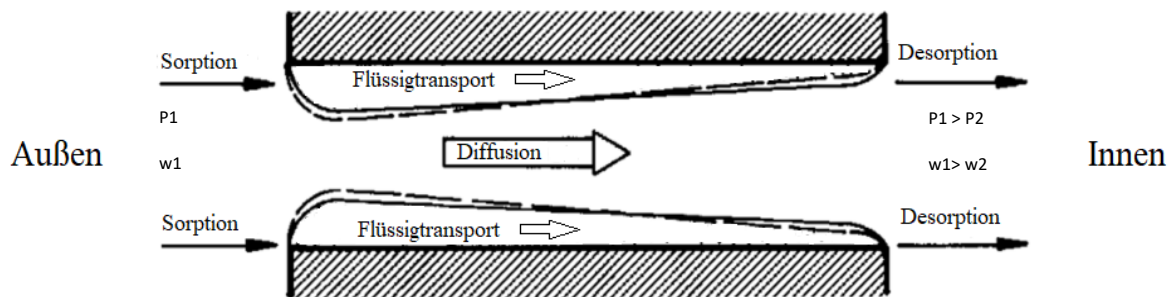
## 2.3 Oberflächendiffusion und kapillare Leitung

Während es sich bei der Wasserdampfdiffusion um gasförmigen Feuchtetransport handelt, ist es bei der Oberflächendiffusion und der kapillaren Leitung ein Transport von flüssigem Wasser. Daher werden diese beiden Effekte ähnlich wie die Knudsen Effusion und der Diffusion gemeinsam betrachtet.

Während die Oberflächendiffusion zwischen 30% und 50% einsetzt, tritt die kapillare Leitung mit steigendem Sorbatfilm in der Pore auf. Ab einer Porenluftfeuchte größer als 95% wird der Kapillarwasserbereich erreicht und es dominiert die kapillare Leitung von flüssigem Wasser den Feuchtetransport. Wie schon erwähnt, ist der Antrieb für den flüssigen Wassertransport der Gradient des flüssigen Wassers nach Gl. (8), während die Diffusion durch den Partialdruck des Wasserdampfes nach dem FICKschen Gesetz getrieben wird (Gl. (5)).

Krus [7] hat 1995 in seiner Dissertation ein sehr ähnliches Bild wie in Abbildung 4 zur Verdeutlichung der Effekte 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. Das untere Bild zeigt den Zustand mit entgegen gesetzten Strömungen, was z.B. in porösen Innendämmsystemen in der Heizperiode der Fall sein kann. Dabei wird zuvor kondensiertes Wasser durch kapillare Leitung zurück nach innen geleitet, während die Diffusion des Dampfes von innen nach außen verläuft. Treibende Kräfte sind beim flüssigen Transport Konzentrationsunterschiede im Wassergehalt (Gl.(8)) und bei der kapillaren Leitung der Krümmungsdruck infolge der Oberflächenspannung in der Pore (Gl.(4)).

## 1. Fall: Wasseraufnahme nach äußerer Regenbenetzung



## 2. Fall: Feuchtetransport in einer kapillaraktiven Innendämmung im Winter

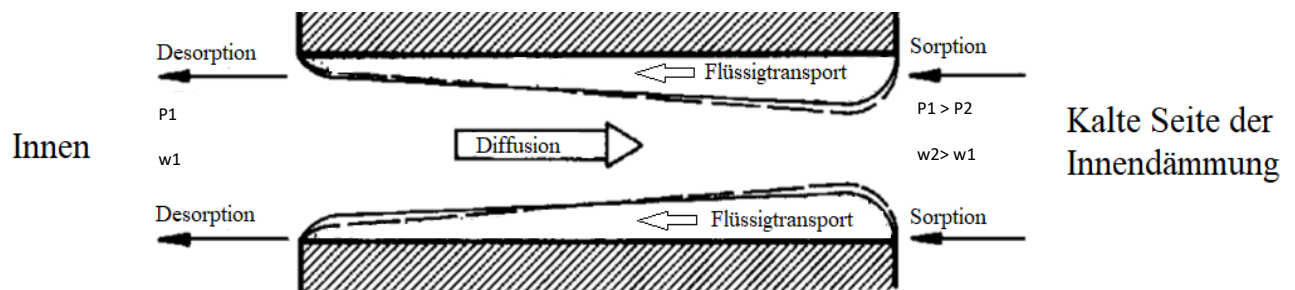


Abbildung 4: Zwei Beispiele eines kombinierten Dampf- und Flüssigtransportes, in Anlehnung an Krus [7]

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:

$$A_W = w_a * \sqrt{t} \quad (7)$$

mit:

|            |                                         |                                          |
|------------|-----------------------------------------|------------------------------------------|
| $A_W$      | aufgenommene Wassermenge im Saugversuch | [kg/m <sup>2</sup> ]                     |
| $w_a$      | Wasseraufnahmekoeffizient               | [kg/(m <sup>2</sup> *h <sup>1/2</sup> )] |
| $\sqrt{t}$ | Wurzel der Saugzeit                     | [√h]                                     |

Die für die Weiterverteilung verantwortlichen kapillaren Zugkräfte können in der Praxis nicht definiert werden, weshalb Otto Krischer [9] bereits in den 70er Jahren den Gradienten des Wassergehaltes als Ursache für die kapillare Weiterleitung erkannt und folgende Beschreibung eingeführt hat.

$$g_w = -D_{W(w)} \cdot \text{grad } w \quad (8)$$

mit:

|            |                                                  |                                             |
|------------|--------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| $g_w$      | Dichte des Flüssigtransportstromes               | [kg/(m <sup>2</sup> s)]                     |
| $D_{W(w)}$ | Flüssigtransportkoeffizient „Weiterleiten“       | [m <sup>2</sup> /s]                         |
| grad w     | Gradient des Wassergehalts über der Bauteillänge | [kg/(m <sup>3</sup> ·m)=kg/m <sup>4</sup> ] |

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.

Im Folgenden werden Labortestverfahren kurz vorgestellt, mit deren Hilfe Materialdatensätze für die numerische Simulation bestimmt werden können.

### 2.3.1 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.

Der Versuch kann mit manueller Wägung in einem vorher festgelegten Zeitintervall, sowie mit digitaler Dauermessung an einer 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 die Wasseraufnahme flacht über die Zeit ab, so dass die aufgenommene Wassermasse  $A_w$  [kg] dividiert durch die eingetauchte Stirnfläche A [m<sup>2</sup>] über der Wurzel der Zeit [h<sup>-0.5</sup>] folgender Gesetzmäßigkeit gehorcht. Der  $w_a$ -Wert ist dann die Steigung der sich ergebenden Geraden mit der  $\sqrt{t}$  auf der x-Achse.

$$w_a = A_w / (A \cdot \sqrt{t}) \quad (9)$$

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 [kg/(m<sup>2</sup>·h<sup>0.5</sup>)].

|                         |            |                                  |
|-------------------------|------------|----------------------------------|
| - 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 Vormessungen im Labor können drei für die Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports mittels numerischer Simulation nach Gl. (8) relevante Transportkoeffizienten gemessen werden.

- Diffusionswiderstandszahl  $\mu$
- Flüssigtransportkoeffizient für Saugen an der Bauteiloberfläche –  $D_{ws}$
- 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  $D_{ws}$  und  $D_{ww}$  stark abhängig vom Wassergehalt und nehmen mit steigendem Wassergehalt 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 hier mittels tiefgestelltem Buchstaben unterschieden.

$$D_{ws}(w) = 3,8 * \left(\frac{w_a}{w_f}\right)^2 * 1000^{\left(\frac{w}{w_f} - 1\right)} \quad (10)$$

mit:

|          |                                        |                                         |
|----------|----------------------------------------|-----------------------------------------|
| $D_{ws}$ | Flüssigtransportkoeffizient für Saugen | [m <sup>2</sup> /s]                     |
| $w_a$    | Wasseraufnahmekoeffizient              | [kg/(m <sup>2</sup> s <sup>0,5</sup> )] |
| $w$      | Wassergehalt                           | [kg/m <sup>3</sup> ]                    |
| $w_f$    | freie Wassersättigung                  | [kg/m <sup>3</sup> ]                    |

Basierend auf dieser Funktion kann das numerische Simulationsprogramm WUFI Feuchtetransport-Tabellen wie folgt generieren. Es gilt für Saugen ( $D_{ws}$ ) und Weiterleiten ( $D_{ww}$ ) die Gl. (10).

| $w$ [kg/m <sup>3</sup> ] | $D_{ws}$ [m <sup>2</sup> /s] | $D_{ww}$ [m <sup>2</sup> /s] |
|--------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 0                        | 0                            | 0                            |
| $w_{80}^1$               | $D_{ws}(w_{80})$             | $D_{ws}(w_{80})$             |
| $w_f$                    | $D_{ws}(w_f)$                | $D_{ws}(w_f) / 10$           |

Tabelle 1: Wassergehaltsabhängige Feuchtetransportkoeffizienten nach dem WUFI Ansatz (Hinweis: mit  $w_{80}^1$  ist ein Wassergehalt bei einer relativen Porenluftfeuchte von 80% gemeint.)

## 2.4 Normung

### 2.4.1 Thermische Anforderungen an die Hülle

In Luxemburg werden im „*Règlement grand-ducal du 9 juin 2021 concernant la performance énergétique des bâtiments*“ Mindestanforderungen an neue Gebäude und bei Sanierungen definiert. So wird z.B. im Sanierungsfall mit Innendämmung der Mindest-U-Wert von 0,4 W/m<sup>2</sup>\*K gefordert. 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 und verweist 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 den klimabedingten Feuchteschutz. Nach DIN 4108 Teil 2 gilt es die Anforderung an die thermische Mindestqualität von Bauteilen und Anschlüssen, um dabei ein Mindestmaß an thermischem Komfort bei gleichzeitiger Schimmelfreiheit sicherzustellen. Für Außenwände ist ein Wärmedurchlasswiderstand von 1,2 m<sup>2</sup>\*K/W hinterlegt – dies entspricht unter Berücksichtigung des inneren und äußeren Wärmeübergangskoeffizienten einem U-Wert von 0,73 W/m<sup>2</sup>\*K. Um Bauteilanschlüsse schimmelfrei zu halten, ist gemäß Norm eine Wärmebrückenberechnung entsprechend der *DIN ISO 10211: Wärmebrücken im Hochbau* durchzuführen.

<sup>1</sup> Wassergehalt bei einer relativen Porenluftfeuchte von 80%

Ein wichtiger Kennwert für die Einhaltung des Wärmeschutzes im Bereich von Wärmebrücken ist der sogenannte Oberflächentemperaturfaktor  $f_{Rsi}$ , der wie folgt definiert ist:

$$f_{Rsi} = \frac{T_{si} - T_e}{T_i - T_e} \quad (11)$$

mit:

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

Je näher der Oberflächentemperaturfaktor  $f_{Rsi}$  an 1 kommt, desto näher kommt  $T_{si}$  an  $T_i$  und je besser ist die Isolierung oder je geringer ist die Wärmebrücke. Gemäß dem in der Norm definierten Winterfall ist eine relative Feuchte an der Bauteiloberfläche von max. 80 % über eine Zeit von einigen Tagen gerade noch akzeptabel, um Schimmelwachstum zu vermeiden. Die Randbedingungen für Deutschland sind wie folgt definiert:

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

was dann

bei der kritischen relativen Feuchte von 80% gemäß dem MOLLIER oder CARRIER-Diagramm zu einer kritischen Oberflächentemperatur von

$$T_{si} = 12,6 \text{ °C} \text{ führt.}$$

Daraus ergibt sich unter normativen, stationären Randbedingungen die Bedingung für den Oberflächentemperaturfaktor zu  $f_{Rsi} \geq 0,7$ .

#### 2.4.2 Schlagregenschutz

Prinzipiell wird der Feuchteschutz aus zwei Blickrichtungen betrachtet: dem äußeren Schlagregenschutz und dem Schutz vor Feuchteintrag ins Bauteil aus der Innenluft infolge von Diffusion.

Sobald der Grenzwert von 80 % Luftfeuchte überschritten wird, kann in Abhängigkeit des Oberflächenmaterials der Befall durch Schimmel nicht mehr ausgeschlossen werden. Die Schweizerische SIA Norm 180 verlangt aufgrund des alpinen, kälteren Klimas in der Schweiz einen  $f_{Rsi} \geq 0,75$ . So kann auch bei niedrigeren Außentemperaturen (im Falle der SIA 180 = -10 °C) noch oben genannte Grenz-Oberflächentemperatur vom min. 12.6°C auf der Innenseite gewährleistet werden.

Folgerichtig verlangt diese Norm, dass bei der Planung einer Innendämmung auch stets eine Wärmebrückenberechnung durchzuführen ist, um Schimmelfreiheit an den einbindenden Bauteilen nachzuweisen. Auch um die thermischen Verluste im Bereich der Wärmebrücken gering zu halten, sollte stets ein möglichst hoher Oberflächentemperaturfaktor  $f_{Rsi}$  angestrebt werden. Der Vorteil des Oberflächenfaktors ist die Unabhängigkeit von den tatsächlichen Temperaturen, weshalb er auch in der Übergangszeit und unabhängig von den Normtemperaturen messtechnisch ermittelt werden kann.

In Teil 3 (klimabedingter Feuchteschutz) der DIN 4108 werden konkrete Hinweise für die Planung und Ausführung des feuchtetechnischen Nachweises gegeben.

Für die Bewertung des Schlagregenschutzes 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
  - o Niederschlag < 600 mm
  - o windarme Gebiete
  - o windgeschützte Lagen
- Beanspruchungsgruppe II

- 600 – 800 mm Niederschlag
- Mittlere Belastung
- Hochhäuser und exponierte Gebäude trotz Niederschlag < 600 mm
- windgeschützte Gebäude der Beanspruchungsgruppe III
- Beanspruchungsgruppe III
  - mehr als 800 mm Niederschlag
  - wind- und regenreiche Gebiete
  - Hochhäuser und exponierte Gebäude trotz Niederschlag < 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.

Diese Gruppen sind jedoch nur ein grober Anhalt und die tatsächliche Schlagregebelastung ist aus der Fassadenexposition sowie dem lokalen Klima zu ermitteln und kann sogar an einer gegebenen Hauswand lokal von einem Punkt zum nächsten stark variieren (s.u., Kapitel 5).

Im Zuge eines Innendämmprojektes ist zu entscheiden, ob und in welchem Umfang die Fassade erneuert wird. Bei einer Teilsanierung 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.

#### **2.4.3 Thermische Dampfdiffusion aus der Raumluftheuchte (Glaser-Verfahren)**

Der Dampfdiffusionsnachweis gemäß DIN 4108-3 wird mit Hilfe des Glaser-Verfahrens durchgeführt. Das Verfahren, auch Periodenbilanzverfahren genannt, ermittelt, 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 Wasserdampfpartialdrücke, die Erstellung des Glaser-Diagramms und schließlich die Berechnung der Tauwassermenge pro m<sup>2</sup> im Winter. Das Verfahren unter Norm-Randbedingungen zeigt, ob und an welchen Stellen im Bauteil Tauwasser entstehen kann, ob die zulässige Tauwasserhöchstmenge überschritten wird und ob das entstandene Tauwasser im Sommer wieder verdunstet oder die Konstruktion sich über die Jahre immer weiter durchfeuchtet.

Dabei sind zwei Kriterien zu erfüllen:

- die maximale Tauwassermenge in der Heizperiode ist je nach Saugfähigkeit des Materials begrenzt auf Werte zwischen 0,5 und 1 kg/m<sup>2</sup>,
- die in der Winterperiode angefallene Kondensatmenge muss stets in der Sommerperiode vollständig aus dem Bauteil verdampfen.

Das Verfahren 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.

Es wird nur die Diffusion berücksichtigt und viele Effekte wie Sorption und Transport von flüssigem Wasser, wie anfangs kurz beschrieben, werden vernachlässigt. Wenn jedoch eine Konstruktion nach dem Glaser-Verfahren als sicher eingestuft werden kann, wird sie bei korrekter Ausführung und bei gegebenem Schlagregenschutz tatsächlich auch funktionieren. Das Glaserverfahren gilt als konservativ, d.h. auf der sicheren Seite liegend. Die Umkehrung gilt jedoch nicht: eine Konstruktion, die den Glaser-Nachweis nicht erbringt, kann durchaus in der Praxis problemlos funktionieren.

Es sei daher hier angemerkt, dass diffusionsoffene und viele praktisch funktionierende Innendämmsysteme den Glaser-Nachweis eben nicht schaffen oder die Norm die Anwendung des Glaser-Nachweises von vornherein bei Innendämmung ausschließt.

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 Glaserverfahren. 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 Darstellungen hierzu befinden sich in Abbildung 5.

#### 2.4.4 Leitfaden für hygrothermische Simulationen (WTA-Merkblätter)

Die Reihe oder das Referat 6 [18] ist in diesem Zusammenhang wichtig und Blatt 6-1 enthält den Leitfaden für hygrothermische Simulationsberechnungen. Dieses Merkblatt gibt Hinweise zur korrekten Schrittfolge bei der Durchführung von hygrothermischen Simulationsberechnungen. Es dient als Grundlage für Merkblatt 2, welches die mathematischen und physikalischen Grundlagen der numerischen Simulationstools, sowie die Messmethoden zur Ermittlung relevanter Materialparameter vorgibt. Des Weiteren gibt es Hinweise zur Auswahl der klimatischen Randbedingungen und zur Prüfung der Plausibilität. Folgende vier Feuchtestufen werden mit dem zugehörigem Rauminnentemperaturdiagramm in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur vorgeschlagen.

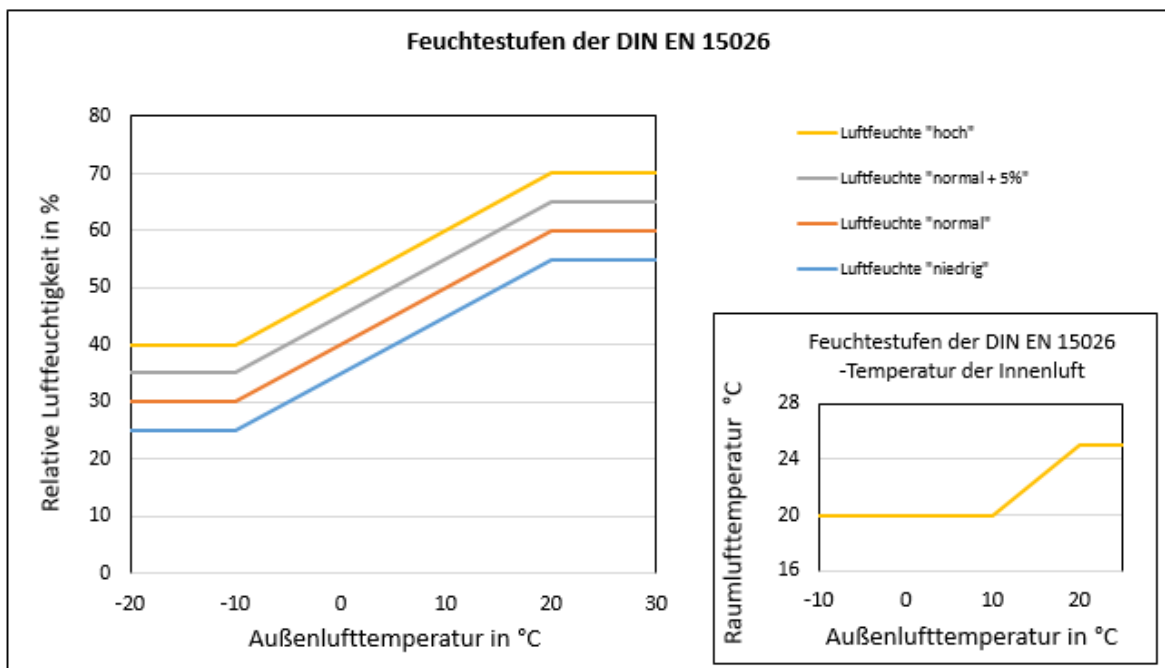


Abbildung 5: Feuchtestufen gemäß DIN EN 15026 und WTA 6-2

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.

Mit Merkblatt 6-3 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.

Merkblatt 6-4 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, wie später noch erläutert wird.

Das fünfte Merkblatt der Reihe (WTA 6-5) definiert konkrete Grenzwerte für die Auswertung numerischer Berechnungsverfahren und gibt Hinweise für das praktische Vorgehen beim Detailnachweis von Bauteilen mit Innendämmung.

Folgende Grenzwerte werden für den numerischen Bauteilnachweis dort empfohlen:

- für nicht frostbeständige Bauteilschichten sollte ein Sättigungsgrad<sup>2</sup> 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 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, also der Kombination aus Außenputz 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 (vgl. Abb.6).

$$w_a * s_d \leq 0,1 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \sqrt{\text{h}}) \quad (12)$$

➔ bei gleichzeitiger Begrenzung der Einzelparameter auf:

- Wasseraufnahmekoeffizient der Fassade im Bestand oder nach Sanierung

$$w_a \leq 0,2 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \sqrt{\text{h}}) \quad (13)$$

- Putz und Anstrich im Bestand oder nach Sanierung

$$s_d \leq 1,0 \text{ m} \quad (14)$$

---

<sup>2</sup> Sättigungsgrad = Wassergehalt / Wassergehalt bei freier Sättigung

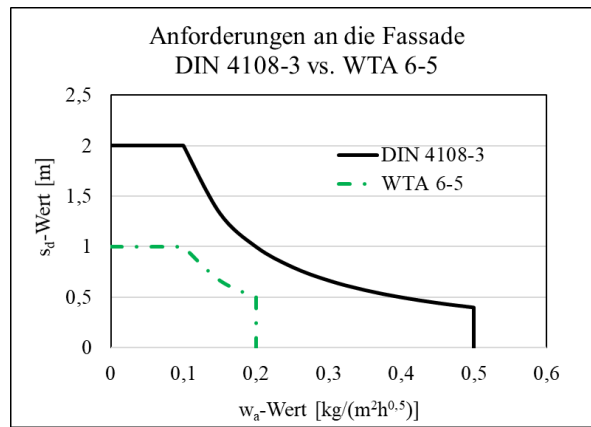


Abbildung 6: Anforderungen an die Fassade gemäß DIN und WTA 6-5

Das Merkblatt 6-8 „Feuchtetechnische Bewertung von Holzbauteilen – Vereinfachte Nachweise und Simulation“ 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 Masse-% 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 7 zeigt die Abhängigkeit.

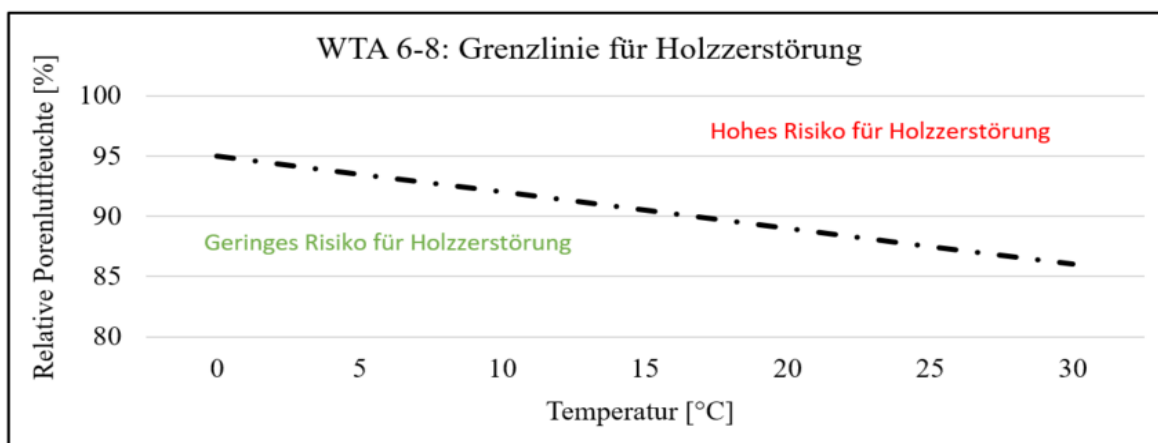


Abbildung 7: Risiko für Holzzerstörung gemäß WTA 6-8

Während der Grenzwert der DIN 68800 mit 18 Masse-% 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 wird in den Normungsausschüssen bearbeitet und es soll für Holzfaserdämmstoffe ein neuer Grenzwert von 27 Masse-% eingeführt werden.

Die Merkblattreihe WTA 6-8 „Fachwerk und Holzkonstruktionen“ 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 ausgeschlossen werden, dass eine gewisse Feuchtemenge in die Konstruktion eintritt. In Luxemburg gibt es nur eine verschwindend geringe Anzahl an Fachwerkbauten, so dass diese Besonderheiten hier nur eine untergeordnete Rolle spielen.

## 2.5 Nachweisverfahren

Um langfristige Feuchtigkeitsschäden wie 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 6-4 zusätzlich den vereinfachten Nachweis 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 (vgl. Kap.2.5.3)
- numerische Nachweisverfahren mittels Software (WUFI, Delphin, und andere)

### 2.5.1 Nachweisfreie Konstruktionen gemäß DIN 4108-3

An die nachweisfreien Konstruktionen mit  $R_{\text{Bestandswand}} \in ] 0,5; 1 \text{ m}^2\text{K/W}]$  gelten folgende Anforderungen:

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

Somit sind diese auf eine Dämmstärke von max. 4 cm bei konventionellem Dämmstoff der WLG 040 limitiert. Es wird hier ausgesagt, dass Bestandskonstruktionen, die ohne Innendämmung funktioniert haben, auch bis zu einer gewissen Innendämmstärke und bei einer diffusionsäquivalenten Luftschichtdicke der Innendämmung (inkl. der raumseitigen Bekleidung) von mindestens einem halben Meter ( $s_d \geq 0,5\text{m}$ ) funktionieren.

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

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

Übliche Dämmaufbauten sind:

- Expandiertes Polystyrol (=EPS oder „Styropor“) mit Gipsputz, auch als fertige Platten üblich
- Mineralwolle mit Dampfbremse
- Holzfaser mit diffusionsbremsendem Putzsystem

### 2.5.2 Glaserverfahren

Mit dem Glaserverfahren können unter bestimmten Bedingungen und gegebenem äußerem Schlagregenschutz auch höhere Dämmstärken nachgewiesen werden.

Wie schon erwähnt, kann das Glaserverfahren als konservativ bezeichnet werden. Wenn eine Konstruktion diesen Nachweis schafft, wird sie aus hygro-thermischer Sicht immer funktionieren und es gibt keine Probleme. Das heißt aber nicht, dass eine Konstruktion, die diesen Glaser-Nachweis nicht besteht in der Praxis tatsächlich Probleme haben wird. Es ist z.B. bekannt, dass der Nachweis diffusionsoffener Innendämmsysteme mit dem Glaserverfahren oft nicht gelingt, weil diese Methode nur Diffusionsvorgänge berücksichtigt und Sorption sowie den Transport von flüssigem Wasser nicht mit einbezieht. Jedoch werden bei hohen Porenluftfeuchten über 95% (siehe Abb. 1) große Mengen an Wasser von ihnen transportiert.

Prinzipiell gibt es zwei Arten des Glaserverfahrens: das Monatsbilanzverfahren und das Periodenbilanzverfahren. Da die Temperaturen beim Monatsbilanzverfahren nicht normiert sind, wird hier auf das vollnormierte Periodenbilanzverfahren verwiesen. Die Rahmenbedingungen sind in der nachfolgenden 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 |       |                     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|----------------------|-----------------------|-------|-------|---------------------|
|                                                                                                      | $\theta$   | $\phi$               | $p$                   | $t$   |       |                     |
|                                                                                                      | °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 <sup>a</sup>                                                 |            |                      |                       |       |       |                     |
| Wasserdampfteildruck Innenklima                                                                      |            |                      | 1 200                 | 90    | 2 160 | $7\,776 \cdot 10^3$ |
| Wasserdampfteildruck 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                 |       |       |                     |

<sup>a</sup> In der Verdunstungsperiode werden im Rahmen des Perioden-Bilanzverfahrens nicht die Temperaturen und Luftfeuchten, sondern nur die gerundeten Wasserdampfteildrücke als Klima-Randbedingung vorgegeben.

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

Abbildung 8: Klimabedingungen für das Periodenbilanzverfahren der DIN 4108 [3]

Die DIN 4108 gibt für das Glaserverfahren eine präzise Definition der klimatischen Umgebungsbedingungen innen und außen, sowohl im Winter (Tauperiode) und auch im Sommer (Verdunstungsperiode) vor. Außer den genannten Normbedingungen, können aber auch kritischere oder „bauteilfreundlichere“ Bedingungen gewählt werden. So können auch landesspezifische Besonderheiten, wie besonders kalte oder milde Winter berücksichtigt werden. Der Anhang A der Dissertation von S. Latz [19] zeigt einen nicht erfolgreichen Glaser-Nachweis einer diffusionsoffenen Innendämmung.

### 2.5.3 Vereinfachtes Nachweisverfahren nach WTA 6-4

Dieses Verfahren 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 nachstehenden Abb. 9 lautet, dass die erforderliche wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke  $s_d$  des inneren neu aufzubringenden Dämmmaterials einschl. des inneren Raumabschlusses mit steigendem  $\Delta R$  der Innendämmung und sinkender Wasseraufnahmefähigkeit  $w_a$  auf der Innenoberfläche der Bestandswand wachsen muss.

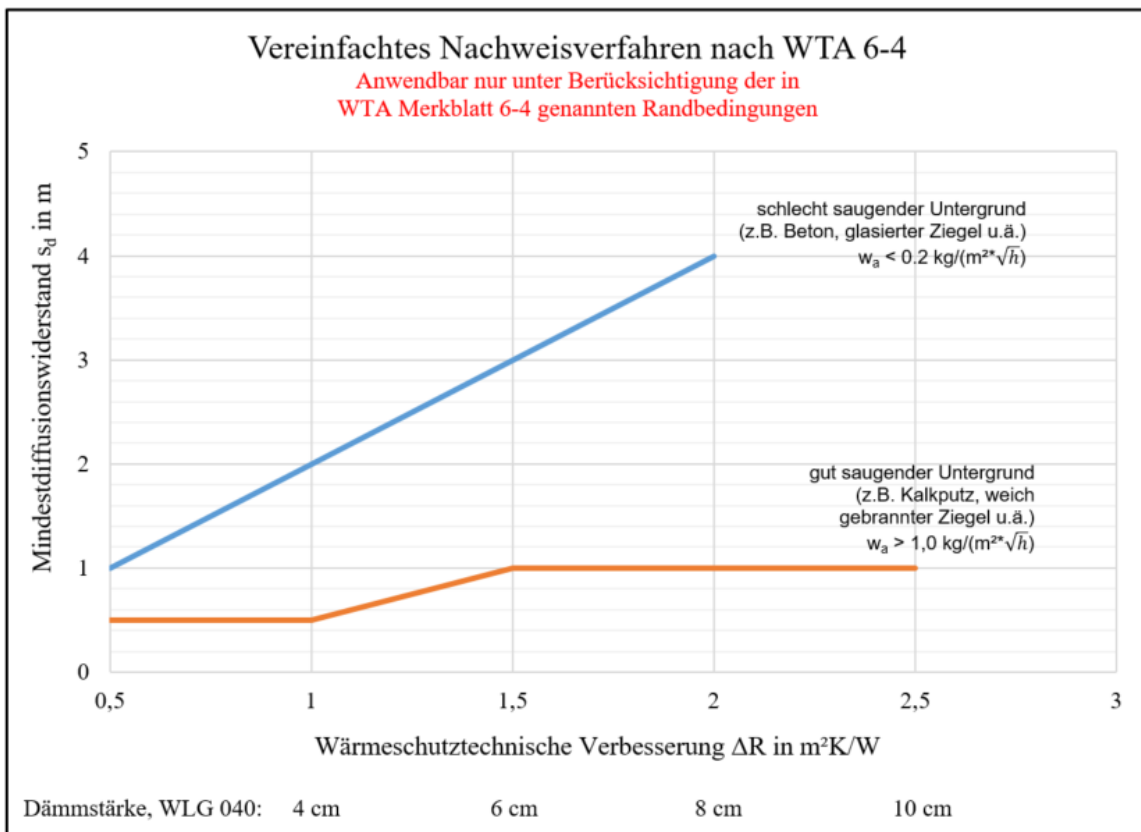


Abbildung 9: Vereinfachtes Nachweisverfahren der WTA 6-4

Im Verfahren werden zwei unterschiedlich stark saugende Untergründe als Grenzlinien berücksichtigt. Die orangefarbene Linie zeigt den Minstdiffusionswiderstand  $s_d$  der Innendämmung einschl. Raumabschluss bei gut saugfähigem Untergrund, die blaue Linie bei schlecht saugfähigem Untergrund. Die Unterscheidung erfolgt mittels eines im Saugversuch ermittelten Wasseraufnahmekoeffizienten  $w_a$ , wobei Zwischenwerte interpoliert werden können. Der Hintergrund ist einleuchtend: wenn der Untergrund schlecht Wasser aufnimmt, darf nicht so viel Feuchtigkeit an die abgekühlte Bestandswand kommen. Je grösser  $\Delta R$ , desto grösser muss auch  $s_d$  der neuen inneren Dämmschicht sein, insbesondere bei schlecht saugendem Untergrund.

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

- die Feuchtigkeitsbelastung im Raum sollte "normale Bedingungen" nach WTA 6-2 nicht überschreiten (vgl. Abb. 5, 11, 12).
- zusätzliche Feuchtigkeitsquellen im Mauerwerk müssen ausgeschlossen werden.
- die durchschnittliche jährliche Außentemperatur sollte über 7 °C liegen. Hinweis: Die mittlere Außentemperatur in Luxemburg liegt bei rund 10 °C.
- eine Hinterlüftung der Dämmschicht mit feuchter Raumlufte muss durch vollflächigen Kontakt der Dämmschicht mit der Bestandswand und bauseits korrekt ausgeführten Bauteilanschlüssen und Bauteildurchstößen der Innendämmung ausgeschlossen werden.
- außenseitige Beschichtungen müssen schlagregendicht laut WTA-Merkblatt 6-5 sein:

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

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

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

- das vorhandene Mauerwerk hat einen minimalen Wärmedurchgangswiderstand von  $R \geq 0,4 \text{ m}^2\text{K/W}$  aufzuweisen. Dies entspricht einem U-Wert  $\leq 2,5 \text{ W/m}^2\text{K}$ , was selbst bei schlechten Altbauten normalerweise erfüllt ist [17].
- die vorhandene Wand und die Dämmschicht müssen bis zu 95% Porenluftfeuchte feuchtigkeitsbeständig sein.
- als nachweisfrei nach DIN 4108-3 gilt eine Außenwand mit Innendämmung  $0,5 \text{ m}^2\text{K/W} < \Delta R \leq 1 \text{ m}^2\text{K/W}$  bei  $s_d \geq 0,5 \text{ m}$ . Die obere Grenze liegt am 1. Knick der orangefarbenen Kurve und gilt daher nach WTA nur für gut saugenden Untergrund. Dies zeigt die Streuungen bzw. Ähnlichkeiten der verschiedenen Normen.

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. Für die Praxis kann dies u.U. großen Aufwand bedeuten.
- je diffusionsdichter das innere Dämmsystem ist, desto geringer fällt das Trocknungspotential nach innen aus und je fehleranfälliger wird es. Das altbekannte Prinzip der Bauphysik sollte beachtet werden: 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 oft mit dem vereinfachten Verfahren nach Abb. 9 und meist auch mit dem Glaserverfahren nach Abb. 8 keine kapillaraktiven Dämmstoffe nachgewiesen werden können, da diese häufig eine geringere wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke als 0,5 m bzw. 1 m aufweisen.

### 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
- künftige Nutzung des Gebäudes
- Ziele der Dämmmaßnahme

So macht es zum Beispiel keinen Sinn wenige Wochen vor Umbaubeginn mit einer Dauermessung zu beginnen, die mindestens eine Winterperiode abdecken sollte. Die Messung des Wasseraufnahmekoeffizienten an der Außenfassade ist offensichtlich 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 empfehlenswert, 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.

- Raumlufthtemperatur  $[\text{°C}]$
- Relative Raumlufthfeuchte  $[\%]$

- CO<sub>2</sub> [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 CO<sub>2</sub> Pegels ermöglicht, den Luftwechsel zu bestimmen.

Folgende Abbildung zeigt eine knapp zweimonatige Messung in einem Konferenzraum der ABP. Anhand des CO<sub>2</sub> Niveaus ist die Nutzungszeit gut zu erkennen. Das schnelle Abklingen der CO<sub>2</sub> Konzentration lässt auf einen generell hohen Luftwechsel schließen. Das Niveau der relativen Luftfeuchte zeigt eine starke Abhängigkeit von der Nutzung, wovon die Raumlufttemperatur natürlich weniger betroffen ist, weil die Heizkörper über Thermostatventile verfügen.

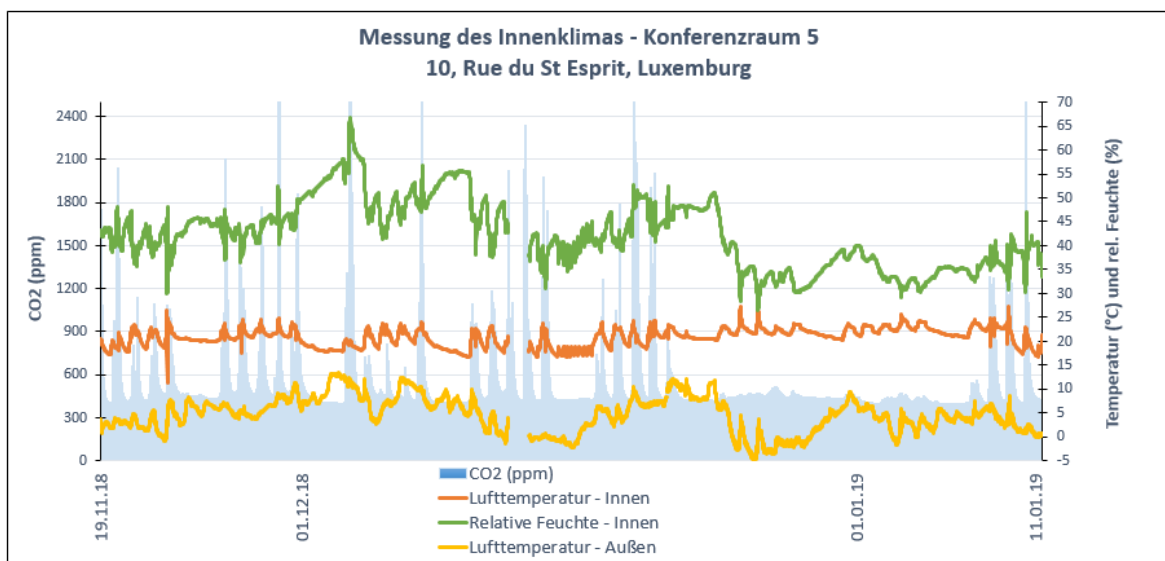


Abbildung 10: Vormessung des Innenklimas über zwei Monate

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.5, Abb. 11, Abb.12).

Diese Norm nimmt an, dass ab einer Außentemperatur von 10 °C und darunter eine konstante Raumtemperatur von 20 °C herrscht (vgl. Abb. 5). In der Praxis jedoch können insbesondere durch die Nachtabsenkung oder bei intensiver Raumnutzung mit vielen Personen die Temperaturen abweichen. Daher wird empfohlen die relative Feuchte zusammen mit den zugehörigen Temperaturwerten in den Wasserdampfpartialdruck umzurechnen und diesen über der Außentemperatur aufzutragen, wodurch die beiden Diagramme zusammengefasst werden. Hierfür existieren mehrere Ansätze, wobei nachfolgend die sogenannte Magnus Formel [10] zur Berechnung des Wasserdampfpartialdruckes in der Raumluft angewandt wurde (Abweichung ≤ 0,5 %):

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

mit

$p_{pd}$  Wasserdampfpartialdruck [Pa]  
 $\varphi$  relative Luftfeuchte [%]  
 $\vartheta$  Temperatur [°C]

Diese 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 inneren Luftfeuchte gegen die Außentemperatur aufträgt, ergibt sich folgende Messwolke für die in

der vorangegangenen Abbildung dargestellten klimatischen Bedingungen. Hier hat man den Eindruck, dass die Feuchtelast im Mittel „normal“ ist.

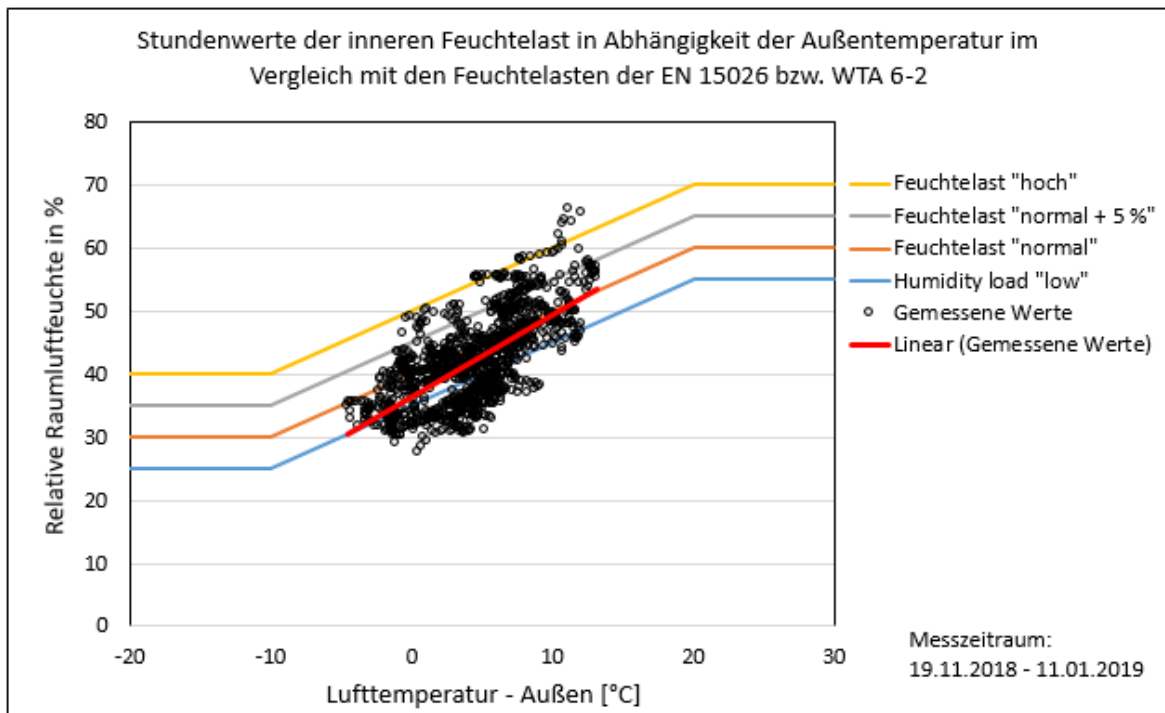


Abbildung 11: Stundenwerte der inneren Feuchte in % r.F. gegen Außentemperatur

Um den Einfluss der nicht konstant angenommenen Raumtemperatur zu berücksichtigen, sollte mit Hilfe der Magnus-Formel der Wasserdampf-sättigungsdruck ermittelt und durch Multiplikation mit der relativen Raumluftfeuchte daraus der Wasserdampfpartialdruck errechnet werden [10].

Daraus folgt dann Abbildung 12, die im Vergleich zur Abb. 11 links zusätzliche Knicke enthält, weil bei einer Außentemperatur von 10 °C auch die Innenlufttemperatur von 20 °C auf 24 °C ansteigt (vgl. Abb. 5 rechts).

Hier also nun die Wasserdampfpartialdrücke über der Außenlufttemperatur zusammen mit den Messwerten (rote Punkte) und einer Ausgleichsgeraden, die aus eben jenen Messpunkten ermittelt wurde.

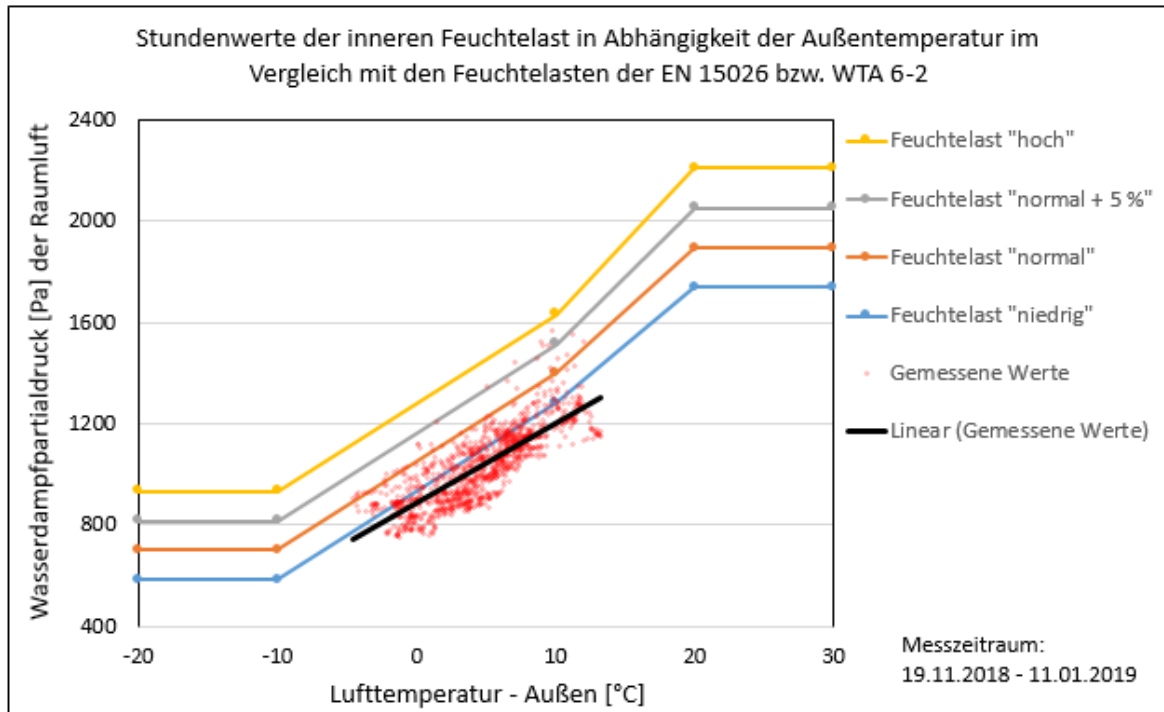


Abbildung 12: Normwerte und Stundenmesswerte der inneren Feuchte als Wasserdampfpartialdruck in Pa über der Außenlufttemperatur

In dargestelltem Beispiel (Abb.12) zeigt sich durch die geänderte und kombinierte Darstellung eine deutlich geringere Feuchtelast („niedrig“) als zuvor vermutet („normal“ lt. Abb. 11) für den untersuchten Konferenzraum. Die Methode nach Abb. 11 hätte zu einer zu konservativeren Einschätzung und somit möglicherweise zum Ausschluss funktionierender Innendämmung geführt.

### 3.1.2 Thermografie

Thermografieaufnahmen im Bestand sind sehr hilfreich um Wärmebrücken, Feuchteschäden und Besonderheiten in der Baukonstruktion qualitativ zu erkennen. Sie sollten, falls möglich, frühzeitig in der Planungsphase erstellt werden. Um qualitativ hochwertige und aussagekräftige Aufnahmen erstellen zu können, sollten über einen längeren Zeitraum Temperaturunterschiede zwischen beheizten Räumen und der Außenluft  $\geq 10$  K vorhanden sein. Folglich sind solche Aufnahmen praktisch nur in der Heizperiode zwischen Oktober und April möglich.

Sobald eine Wärmebrücke mittels Thermografie erkannt wurde, gilt es diese zu quantifizieren, wozu die Thermografieaufnahmen aufgrund der thermischen Trägheit der Bauteile nur sehr eingeschränkt geeignet sind. Thermografien sind nur Augenblickswerte, die aufgrund der Wärmespeicherkapazität der Wand zu falschen Aussagen führen können. Es sollten Anlegefühler verwendet werden, damit Mittelwerte gebildet werden können, wie folgendes Beispiel zeigen soll.

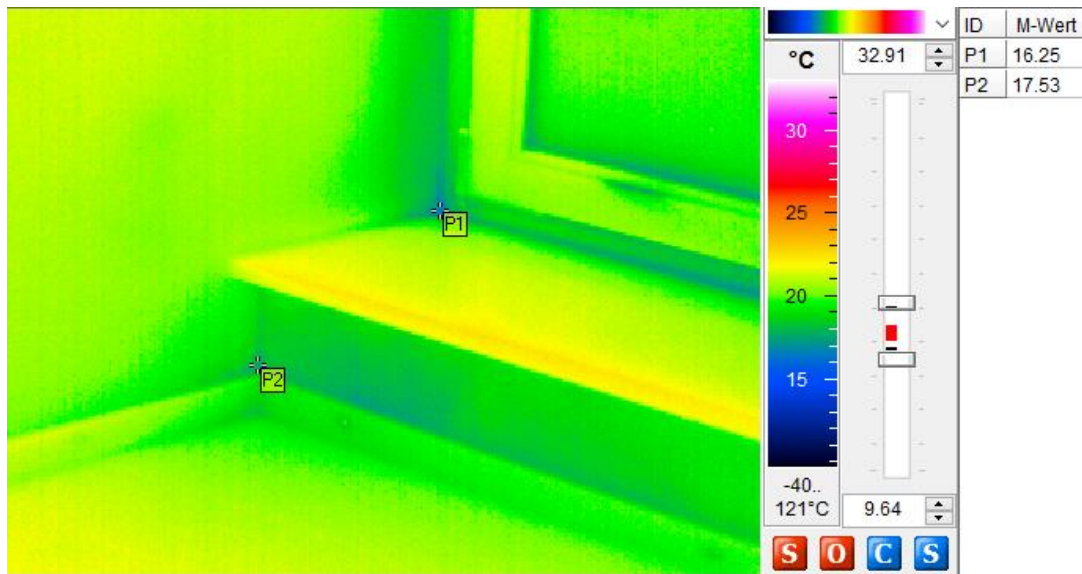


Abbildung 13: Thermogramm einer Fensternische

Obige Abbildung 13 zeigt ein Thermogramm einer Fensternische. Am kältesten Punkt P1 ist eine Temperatur von 16,25 °C ermittelt worden (vgl. Abb.13, oben rechts). Eine Berechnung des  $f_{RSI}$  gibt einen ersten Eindruck der Qualität der Wärmebrücke:

- Außentemperatur: 8 °C
- Innentemperatur: 23 °C
- $f_{RSI}$  Bereich Fensterrahmen P1 :  $0,55 = (16,25^{\circ}\text{C} - 8^{\circ}\text{C}) / (23^{\circ}\text{C} - 8^{\circ}\text{C})$
- $f_{RSI}$  Bereich Fußleisten im Punkt P2: 0,633

Diese ermittelten augenblicklichen Oberflächentemperaturfaktoren  $f_{RSI}$  könnten darauf hindeuten, dass die normativen Anforderungen von 0,7 nicht erfüllt werden. Da die Lufttemperaturen zeitlichen schwanken und das Mauerwerk und somit auch die Oberflächentemperatur einer großen Trägheit unterliegt, handelt es sich bei diesem Oberflächentemperaturfaktor  $f_{RSI}$  um einen instationären Augenblickswert.

Um den entscheidenden zeitlichen Mittelwert des Oberflächentemperaturfaktors  $f_{RSI}$  zu erfassen, wurde die Oberflächentemperatur an Punkt P1 des Fensterrahmens über knapp zwei Wochen mit fest installierten Temperatur-Anlegefühlern erfasst und aufgetragen und sind in der folgenden Abbildung 14 dargestellt. Die Auswertung der Messung zeigt, dass der instationäre augenblickliche  $f_{RSI}$  zwischen 0,55 und 0,9 schwankt. Der Mittelwert dagegen lag bei 0,7, weshalb diese Wärmebrücken die Mindestanforderungen in Luxemburg/Deutschland erfüllt, während in der Schweiz aufgrund der kühleren Winter ein Grenzwert von 75% gilt.

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

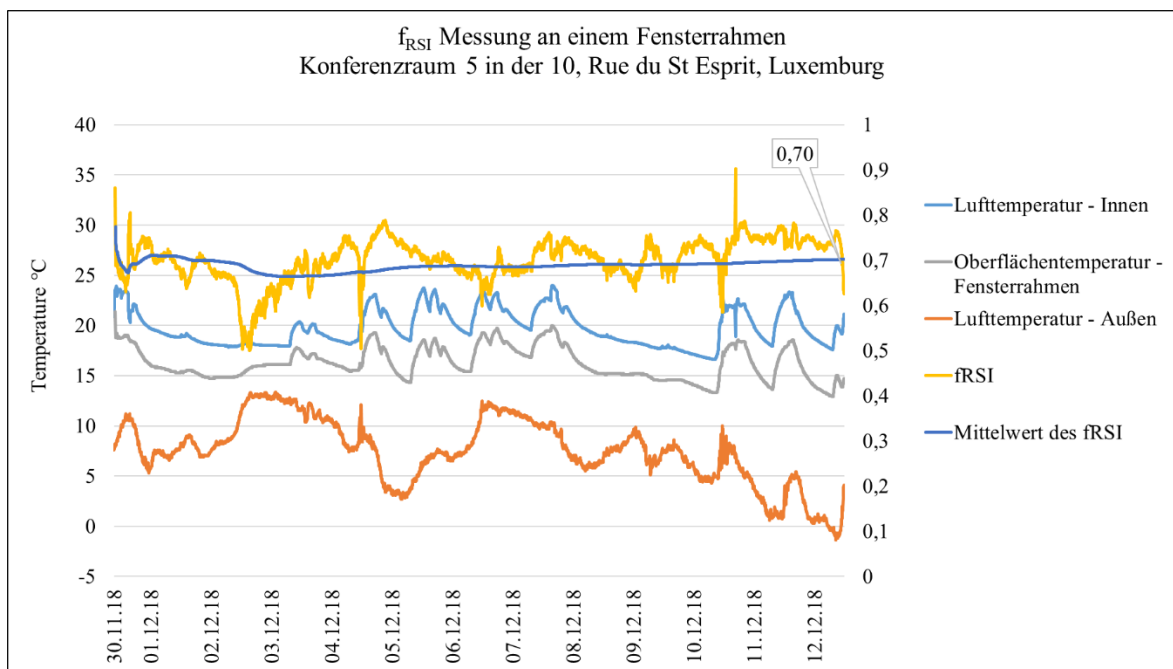


Abbildung 14: Messwerte einer Überprüfung des Oberflächenfaktors mittels Anlegefühler

Die starke Schwankung des instationären Oberflächentemperaturfaktors  $f_{RSI}$  (gelbe Linie) zeigt deutlich, dass Thermogramme primär der Erkennung von Wärmebrücken dienlich sind. Die tatsächliche Bewertung mittels Temperaturfühler braucht mehrere Tage, um den Effekt der thermischen Trägheit herauszufiltern. Dies ist sehr ähnlich bei der U-Wert Messung mittels Wärmeflussplatte [12].

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, also oft Vielfache von  $1d=24h$ . Im Prinzip ist das Verhalten der Messung mit dem der Wärmeflussmessung vergleichbar. Schwere Bauteile reagieren langsamer als leichte Bauteile, weshalb bei schweren Bauteilen eine längere Messdauer gewählt werden sollte.

In Abb. 14 ist auch zu erkennen, dass stärkere Schwankungen beim instationären  $f_{RSI}$  natürlich mit einer sprunghaften Änderung der Außenlufttemperatur (orangefarbene Linie) korrelieren. Bei grenzwertigen Ergebnissen des Oberflächenfaktors sollte zusätzlich die Raumluftfeuchte als Bewertungskriterium hinzugezogen werden, da die realen Feuchtwerte meist 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 konkretere Aussagen zum Schimmelwachstumsrisiko zu machen. Der Mittelwert der relative Feuchte sollte lokal unter 80% bleiben, um Schimmel zu vermeiden.

#### 4. Feldtest Konferenzraum 5 bei ABP

In diesem Feldversuch im sogenannten Konferenzraum 5 der *Administration des Bâtiments Publics (ABP)* 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 der öffentlichen Gebäudeverwaltung Luxemburgs in einem Gebäude aus dem 16. Jahrhundert, das als Haupt-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 sogenannten „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.

Die Umbauten fanden im Sommer 2019 statt und die Ergebnisse wurden bisher nur teilweise publiziert [10], [13], [15].



Abbildung 15: Ansicht des Konferenzraumes

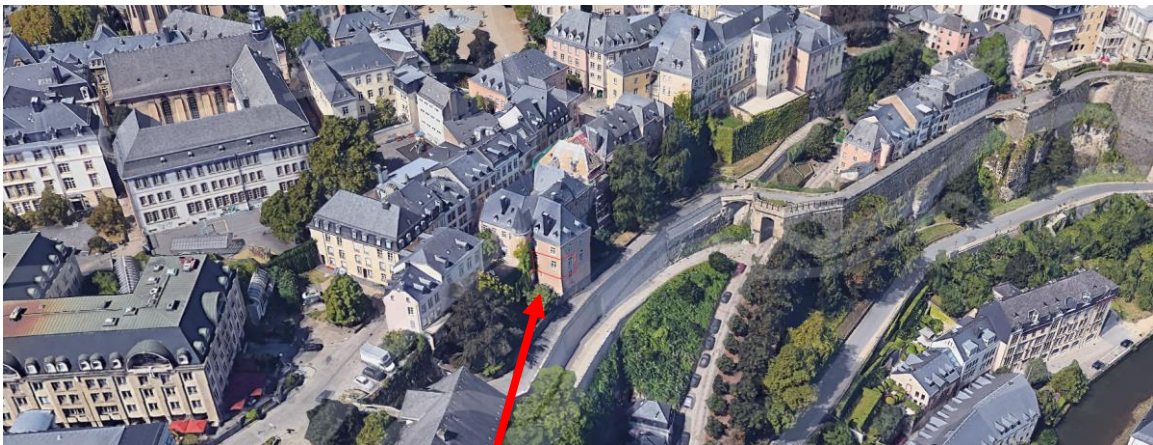


Abbildung 16: Lage des Konferenzraums über dem Tal der Alzette

Im Rahmen des Feldtests werden folgende Untersuchungen durchgeführt:

- Wasseraufnahmemessungen an der Außenfassade und auf dem Innenputz, um die Saugfähigkeit / Feuchteverträglichkeit beurteilen zu können,
- Messungen des Innenklimas, d.h. der
  - o Lufttemperatur,

- relative Luftfeuchte,
  - CO<sub>2</sub> Konzentration in der Raumluft,
- Wärmeflussmessungen an der nicht gedämmten Fassade und später an den gedämmten Testflächen,
- Messungen der Temperatur und der Feuchte in drei Ebenen:
  - unter der Innendämmschicht,
  - im Kern des Mauerwerks,
  - unter dem Außenputz,
- das Außenklima wurde über die Wetterstation in Luxemburg-Merl ermittelt
  - Temperatur,
  - relative Luftfeuchte,
  - Einstrahlung,
  - Wind (Geschwindigkeit und Richtung),
- Thermografieaufnahmen
  - und zusätzlich Temperaturmessungen in Wärmebrücken zur Ermittlung von  $f_{RSI}$
- numerische Simulationen mit WUFI zur Validierung der Eingabeparameter.

#### 4.1 Beschreibung der Testflächen

Die Außenwandflächen des Testraumes sind in vier Flächen mit je 6-9 m<sup>2</sup> aufgeteilt. Diesen wurde willkürlich eines der vier folgenden Innendämmsysteme zugewiesen:

1. BASF **PLENTITE**, ein Aerogel auf PU-Basis,
2. Evonik **Calostat**, ein 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 17 zeigt die Verteilung der Testflächen in verschiedenen Farben an beiden Außenwänden des Raumes:

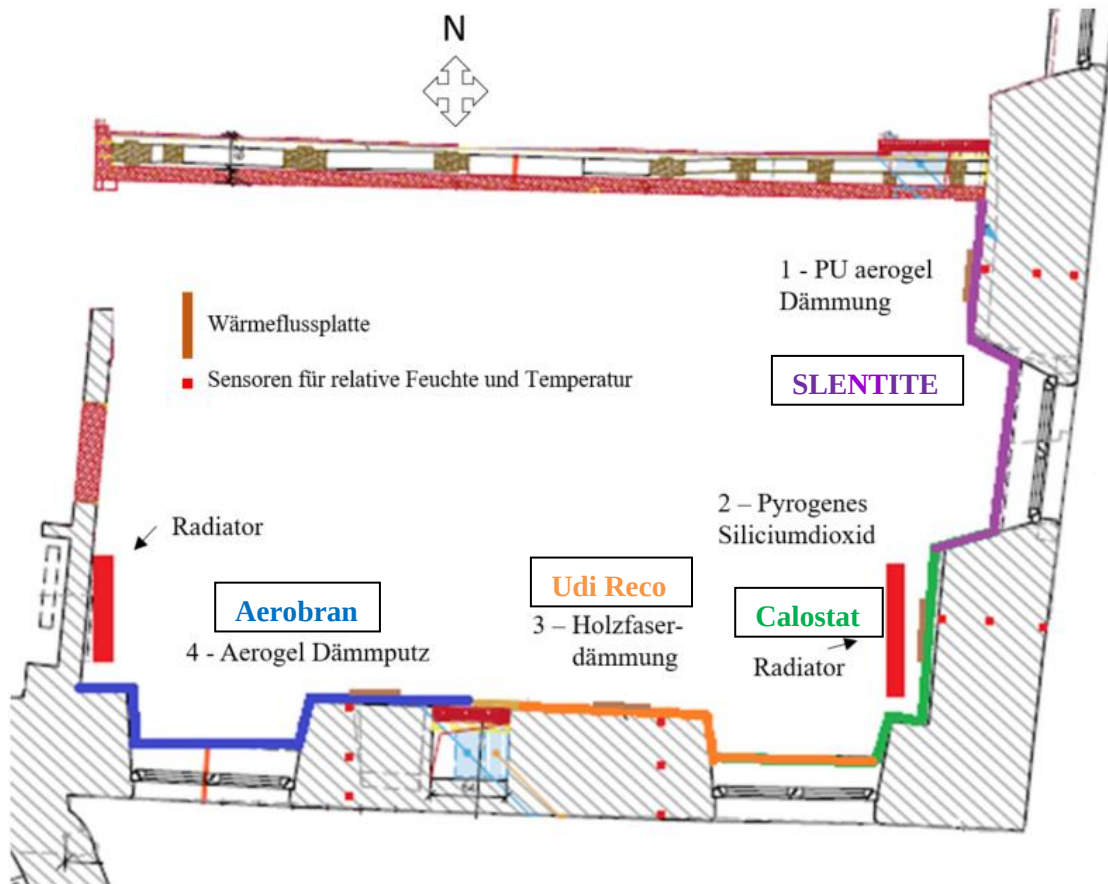


Abbildung 17: Verteilung der Testflächen im Konferenzraum

Tabelle 3: Übersicht über die Dämmsysteme im Feldversuch mit den Ergebnissen der Wärmeflussmessungen

|                                          | System I                                                                                                                                                       | System II                                                                                                                                                                                                                    | System III                                                                                                                                                                                                          | System IV                                                                                                                                        |
|------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Dämmsystem                               | <b>BASF Slentite</b><br>Polyurethan aerogel<br><br>Zwei Schichten je 15 mm → 30 mm<br>$\lambda_{\text{Slentite}} = 0.018 \text{ W/mK}$                         | <b>EVONIK Calostat</b><br>Pyrogenes Siliciumdioxid<br><br>Dämmplatte mit 30 mm Calostat und 10 mm Mineralwolle<br>$\lambda_{\text{Calostat}} = 0.019 \text{ W/mK}$ ;<br>$\lambda_{\text{mineral wool}} = 0.040 \text{ W/mK}$ | <b>UDI Reco IN</b><br>Holzfaserdämmung<br><br>Holzfaserdämmplatte aus Putzträgerplatte und flexibler Schicht, 80 mm<br>$\lambda_{\text{UdiIn}} = 0.038 \text{ W/mK}$                                                | <b>Cerabran Aerobran</b><br>Aerogel Dämmputz<br><br>Kalkputz mit Aerogelbestandteilen, 30 mm<br>$\lambda_{\text{Aerobran}} = 0.028 \text{ W/mK}$ |
| Systemaufbau                             | Klebemörtel, 2-4 mm<br>1. Lage Slentite, 15 mm<br>Klebemörtel, 2 mm<br>2. Lage Slentite, 15 mm<br>Kalkputz mit Armierung, 10 mm<br>diffusionsoffener Anstrich, | Klebemörtel, 4-6 mm<br>Calostat-Platte, 30 mm<br>Mineralwolle, 10 mm<br>1 Dübel pro Platte zur Fixierung<br>Kalkputz mit Armierung, 10 mm<br>diffusionsoffener Anstrich,                                                     | flexible Holzwolle, 20 mm<br>Putzträgerplatte aus Holzfaser, 60 mm<br>3 Dübel pro Dämmplatte<br>Multigrund<br>diffusionsbremsender Grundputz, 10 mm<br>Kalkputz mit Armierung, 10 mm<br>diffusionsoffener Anstrich, | aerogel Dämmputz, 30 - 35 mm<br>Wasserglas zur Stabilisierung, 1 mm<br>Kalkputz mit Armierung, 10 mm<br>diffusionsoffener Anstrich,              |
| Fassadenorientierung                     | Ost                                                                                                                                                            | Ost                                                                                                                                                                                                                          | Süd                                                                                                                                                                                                                 | Süd                                                                                                                                              |
| Gemessener U-Wert Bestandswand [W/m²K]   | 0,97                                                                                                                                                           | 0,97                                                                                                                                                                                                                         | 0,54 <sup>1)</sup>                                                                                                                                                                                                  | 0,73 <sup>1)</sup>                                                                                                                               |
| Berechneter U-Wert gedämmte Wand [W/m²K] | 0,37                                                                                                                                                           | 0,35                                                                                                                                                                                                                         | 0,26                                                                                                                                                                                                                | 0,38                                                                                                                                             |
| Theoretische U-Wert Reduktion [%]        | 62                                                                                                                                                             | 64                                                                                                                                                                                                                           | 52                                                                                                                                                                                                                  | 48                                                                                                                                               |
| $\Delta R$ [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                                                                                                                                               |

<sup>1)</sup> Es ist interessant zu sehen, dass bei zwei relativ dicht nebeneinanderliegenden Orten derselben Bruchsteinwand (vgl. Abb. 17) die gemessenen U-Werte zw. 0.54 und 0.73 W/m²/K schwanken.

#### 4.2 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 18: Abgenommener Bestandputz unter der Testfläche der Udi Reco Dämmung und eingebaute Messrohre an der Ostfassade unter der SLENTITE (oben rechts). Testfläche sowie unter Calostat (rechts). Aufgebrachte SLENTITE Platten (unten-links).

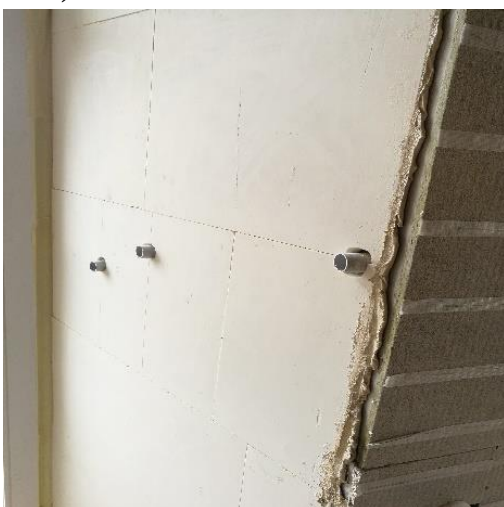




Abbildung 19: Montierte Calostat (links) und aufgetragene Aerobran (rechts) Testflächen

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

#### 4.3 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 (Abb. 21).
- Insbesondere nach Ausbruch der Corona Pandemie wurde der Konferenzraum nur noch selten voll ausgenutzt und durch das angeordnete deutlich intensivere Lüftungsverhalten sank die Rauluftfeuchte 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 (vgl. Abb. 23).
- Im Sommer trocknete die Konstruktion an allen Messstellen wieder auf die Ursprungswerte ab.
- Die mit den gemessenen Randbedingungen durchgeführten Simulationen zeigen eine gute Übereinstimmung für die Temperaturen und die relative Feuchte unter der Dämmung mit den gemessenen Werten, wie am Beispiel von Slentite in Abb. 24 zu sehen ist.

Folgende Abbildungen zeigen die Messergebnisse aus dem Feldtest.

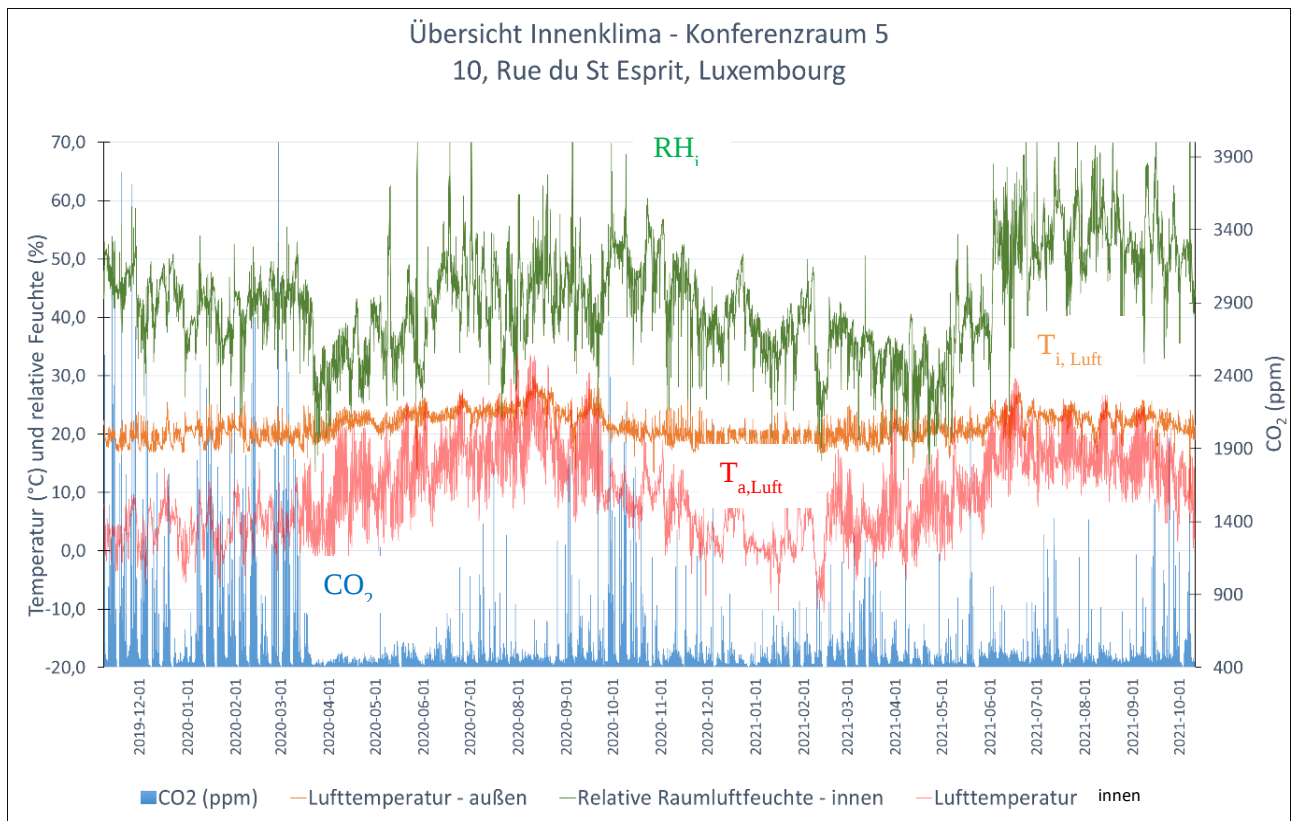


Abbildung 20: Temperatur- und Feuchteverläufe im Innenraum mit CO<sub>2</sub> Messwerten

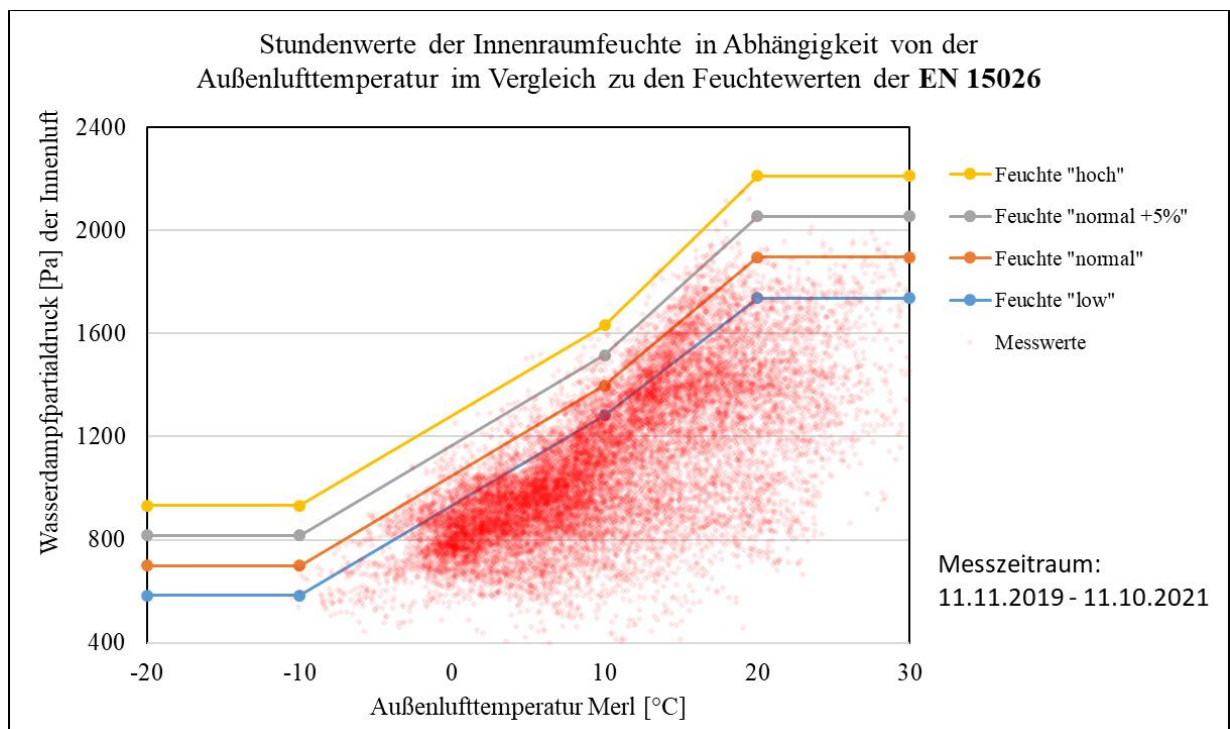


Abbildung 21: Einordnung des Innenklimas in die EN 15026

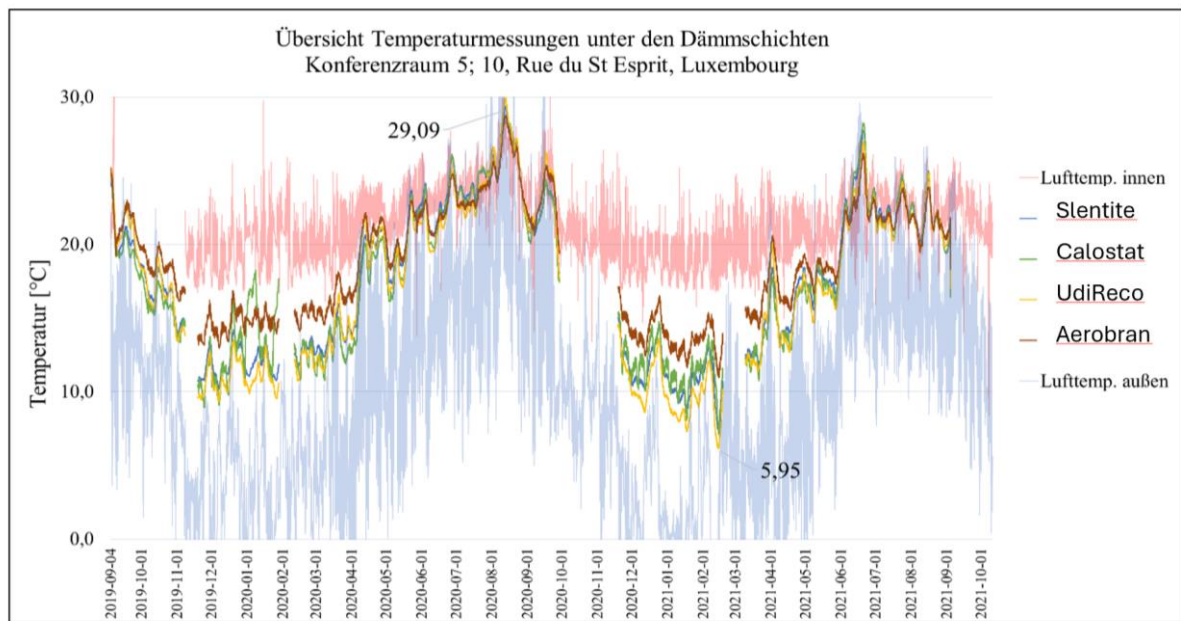


Abbildung 22: Temperaturverläufe über 2 Jahre unter den Dämmschichten (System 1 = Slentite; System 2 = Calostat; System 3 = UdiReco; System 4 = Aerobran)

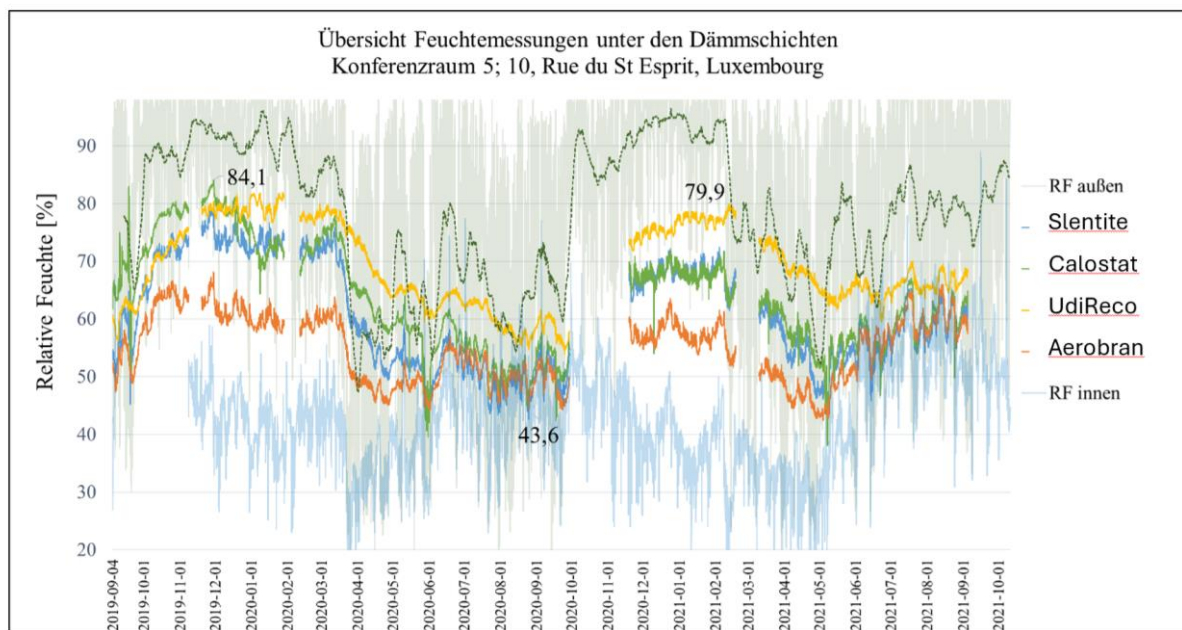


Abbildung 23: Feuchteverläufe über 2 Jahre unter den Dämmschichten (System 1 = Slentite; System 2 = Calostat; System 3 = UdiReco; System 4 = Aerobran)

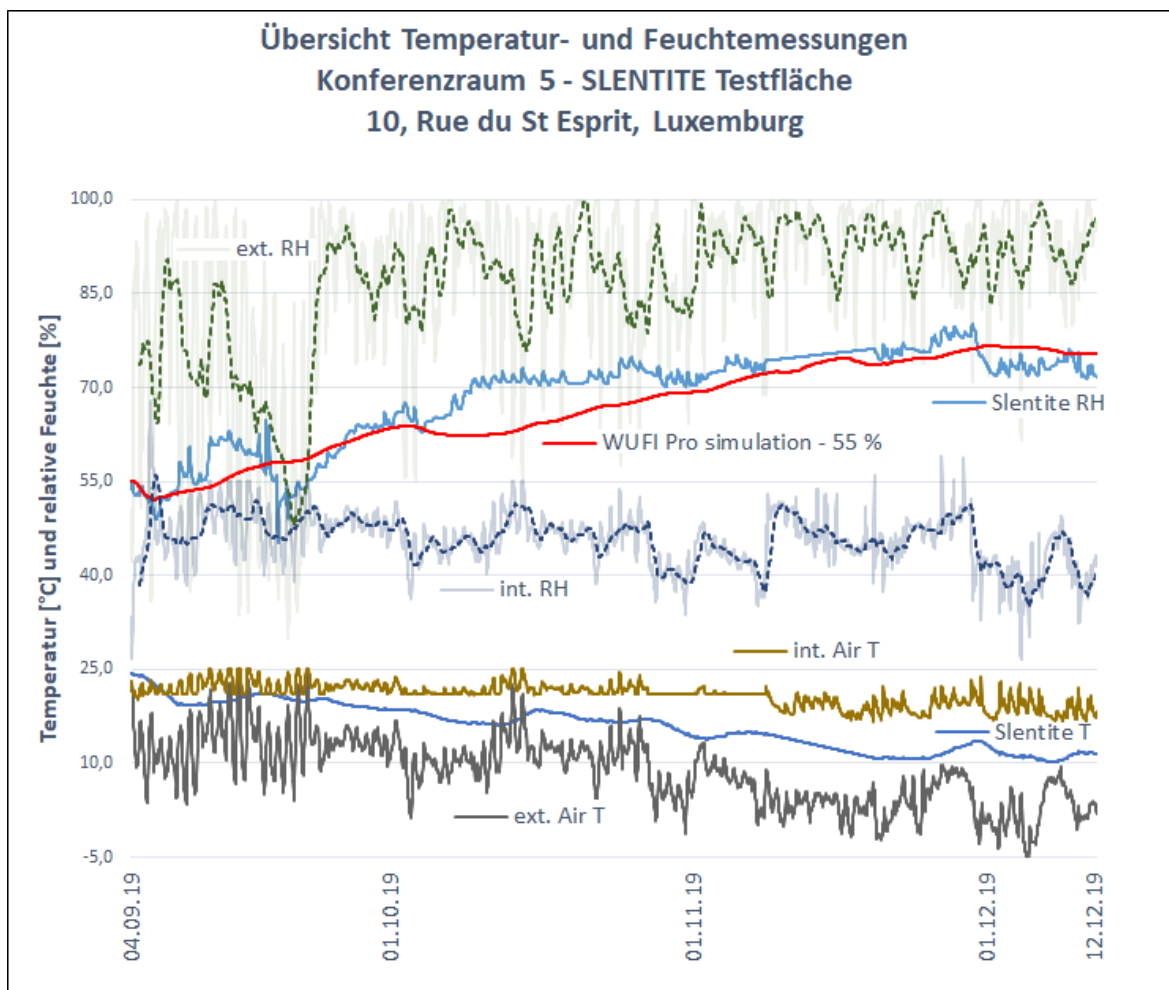


Abbildung 24: Vergleich Simulation vs. Messung für SLENTITE Testfläche (Tab.3, System I)

#### 4.4 Rückschlüsse und Empfehlungen

Prinzipiell funktionieren alle Innendämmsysteme seit Beginn des seit 5 Jahren 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, sogar wenn das Wasser im Sommer wieder abtrocknet.

Aufgrund der „niedrigen“ Feuchte im Raum [14] und Abb. 21 sind die Anforderungen an die einzelnen Testflächen als gering einzustufen. Insbesondere während der Corona Pandemie wurde der Raum weniger 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.

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, schließen die Thermostatventile automatisch wieder. 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 dieser 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 – ohne Zugluft ist sie das arithmetische Mittel aus der Strahlungstemperatur (Mittelwert der umgebenden Oberflächen) und 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.

## 5. Ermittlung des Expositionsfaktors einer Fassade

### 5.1.1 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 [15] 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 (CFD) 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 Fall auftreten, dass mehr Regen auf einen m<sup>2</sup> Fassade auftritt, als auf einen m<sup>2</sup> des horizontalen Bodens fällt.
- Gebäudekanten und hervorstehende Bereiche an einer Fassade sind besonders betroffen [16].
- 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 zuvor genannten Normen nicht entspricht, ist die Kenntnis über den tatsächlichen Schlagregeneintrag unabdingbar, um einen Nachweis mittels numerischer Simulation umzusetzen.

### 5.1.2 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  $R_1$  „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 s/m
- hohes Gebäude, unterer Teil bis 10 m 0,05 s/m
- hohes Gebäude, mittlerer Teil 10-20 m 0,1 s/m
- hohes Gebäude, oberer Teil > 20 m 0,2 s/m

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

Da die Menge des Normalregens und die zugehörige Windgeschwindigkeit aus Messungen an der nächstgelegenen Wetterstation verfügbar 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 von innen zu dämmenden Gebäudes zu ermitteln. Mit der Kenntnis des Faktors können genauere Vorhersagen über die Mauerwerksfeuchte bei installierter Innendämmung getroffen werden, wohlwissend das diese Faktoren sehr sensitiv sind.

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 Minuten zu Beginn und am Ende der Messperiode.
- Erstellung eines Feuchteprofils über den Mauerwerksquerschnitt zu Messbeginn mittels mehrerer Bohrungen und Feuchtesonden, um die Anfangsbedingungen in der Simulation richtig 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  $r_s = R_2$  in der Simulation bis die gemessenen Werte der Feuchte mit der Simulation eine gute Übereinstimmung ergeben.

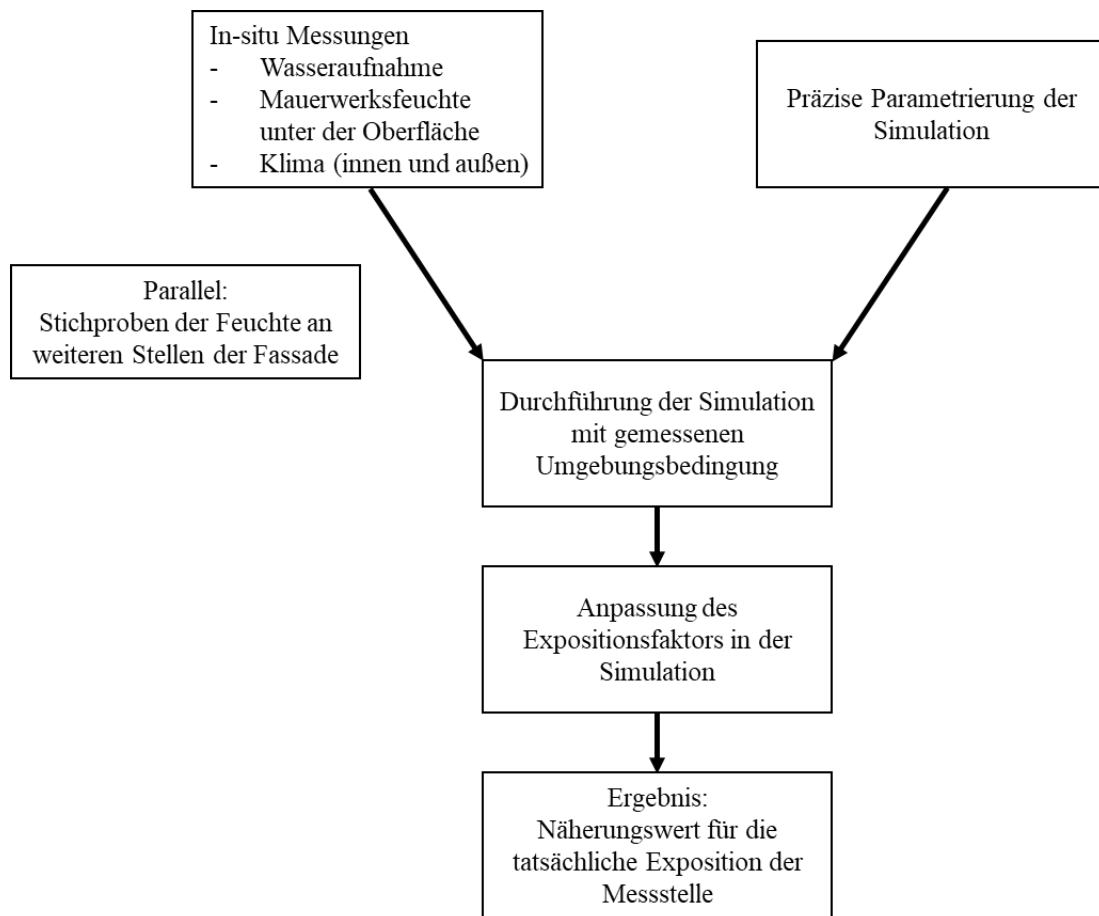


Abbildung 25: Ablaufdiagramm der Expositionsermittlung

## 6. 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 Denkmalschutzbehörde das ‚Institut National pour le Patrimoine Architectural (INPA)‘ (oder früher ‚Service des Sites et Monuments Nationaux‘) zählt in ihrer Liste der geschützten 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 Bestand der Verwaltung der öffentlichen Gebäude ABP befinden sich über 300 Gebäude, die in den kommenden Jahren mittels Innendämmung energetisch saniert werden sollen, plus all die vielen Privatgebäude im Bestand, wo Außendämmung oft nicht gewünscht oder nicht möglich ist. Dies zeigt die Bedeutung, die der Innendämmung zukommt.

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. Auch Natursteinfassaden mit stark saugender Oberfläche können von innen gedämmt werden können, wenn z.B. die umgebende Bebauung die Fassade vor starkem Schlagregen schützt. Hier kann der Nachweis über dauerhafte Feuchtemessungen unter der Fassadenoberfläche sehr erfolgreich unterstützen. 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 Luxemburg aufgrund der hohen Immobilienpreise lohnen kann, in einen teureren Hochleistungsdämmstoff mit reduziertem Wärmeleitfähigkeiten und dadurch reduzierter Dämmstärke zu investieren und so bei minimalem Raumverlust eine gute Dämmwirkung zu erhalten.

(Hinweis: Die Autoren wissen sehr wohl, dass die wirtschaftlichen Aspekte der Innendämmung ein umfassendes Thema ist, was hier nicht betrachtet wurde)

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. Für die Sanierung spricht auch der große Einsatz von „grauer Energie“, der stets mit einem Abriss und Neubau einhergeht und der sich leider nur unzureichend exakt in den Preisen widerspiegelt.

## 7. 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] Merzkirch A., Hoos T., Maas S., Scholzen F., Waldmann D., Wie genau sind unsere Energiepässe, 2014 • In *Bauphysik*, 1 (2014), p. 40-43, [ORBilu: Detailed Reference](#)
- [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] H. M. Künzel, "Verfahren zur ein- und mehrdimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten," Universität Stuttgart, 1994.
- [5] M. Krus, "Bestimmung der Feuchtespeicherfunktion -IBP Mitteilung 292," Stuttgart, 1996.
- [6] Friedrich, *Tabellenbuch Bau- und Holz*. Leipzig: VEB Fachbuchverlag, 1980.
- [7] M. Krus, "Feuchtetransport- und Speicherkoeffizienten poröser mineralischer Baustoffe. Theoretische Grundlagen und neue Meßtechniken.," Universität Stuttgart, 1995.
- [8] 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.
- [9] O. Krischer, *Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik*. Springer Berlin Heidelberg, 1963.
- [10] 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.
- [11] Administration des Services techniques de l'agriculture, "Agrarmeteorologisches Messnetz Luxemburg," 2022. <https://www.agrimeteo.lu/>.
- [12] "Wärmeflussmessung - Ahlborn Mess- und Regelungstechnik GmbH." [https://www.ahlborn.com/de\\_DE/waermeflussmessung](https://www.ahlborn.com/de_DE/waermeflussmessung) (accessed Nov. 25, 2021).
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.

- [17] T. Hoos, “Einsparpotential und ökonomische Analyse der energetischen Sanierung staatlicher Gebäude in.” Dissertation Luxembourg, Shaker 2012, [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/10993/15440>.
- [18] Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V., Referat 6, "Bauphysik", WTA Merkblätter 6-i, Tel. +49-89-578 697 27, Fax +49-89-578 697 29, email: [wta@wta.de](mailto:wta@wta.de)
- [19] Sebastian Latz, "Messungen und Simulationen im Vorfeld von Innendämmprojekten zur Erhöhung der Planungssicherheit" Dissertation PhD-FSTM-2022-34 Universität Luxemburg 2022, <https://hdl.handle.net/10993/60311>
- [20] T. Ackermann, Energiebedarf versus Energieverbrauch oder Theorie versus Realität, FH Bielefeld, 2019, [fh-ielefelduntersuchungenergiebedarfversusenergieverbrauch12112019.pdf](#)
- [21] Umwelt Bundesamt, Realitätsnahe Berechnung des Energiebedarfs, 8. Juli 2022, [Ad-hoc Papier – Realitätsnahe Berechnung des Energiebedarfs](#)

## Anhang: Praktische Herangehensweise an ein Innendämmprojekt

### A.1 Übersicht des Leitfadens

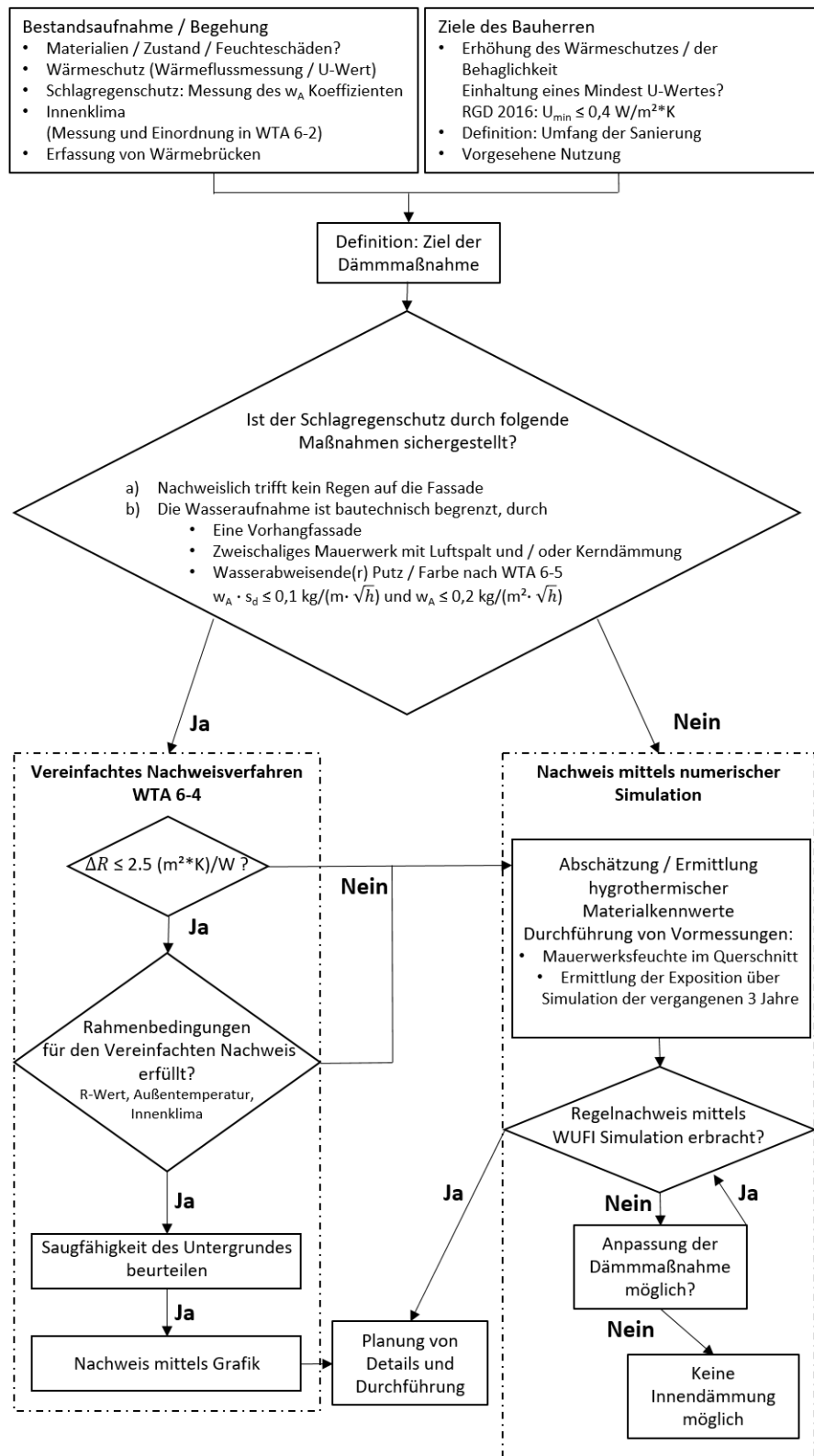


Abbildung 26: Erweitertes Diagramm zur Planung einer Innendämmung in Anlehnung an WTA 6-4

## **A.2 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.

## **A.3 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 erbauten Objekt erheblich ab, wodurch diese Pläne nicht mehr als einzige Planungsgrundlage verwendet werden können und ggf. ergänzt und korrigiert 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 möglichst auszuschließen.

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

#### **A.4 Vormessungen**

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

#### **A.5 Messung des Wärmeflusses [19]**

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 [12] 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 ausmitteln zu können. 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 Mauerkern oder von innen) war.

Folgende Abbildung 27 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.

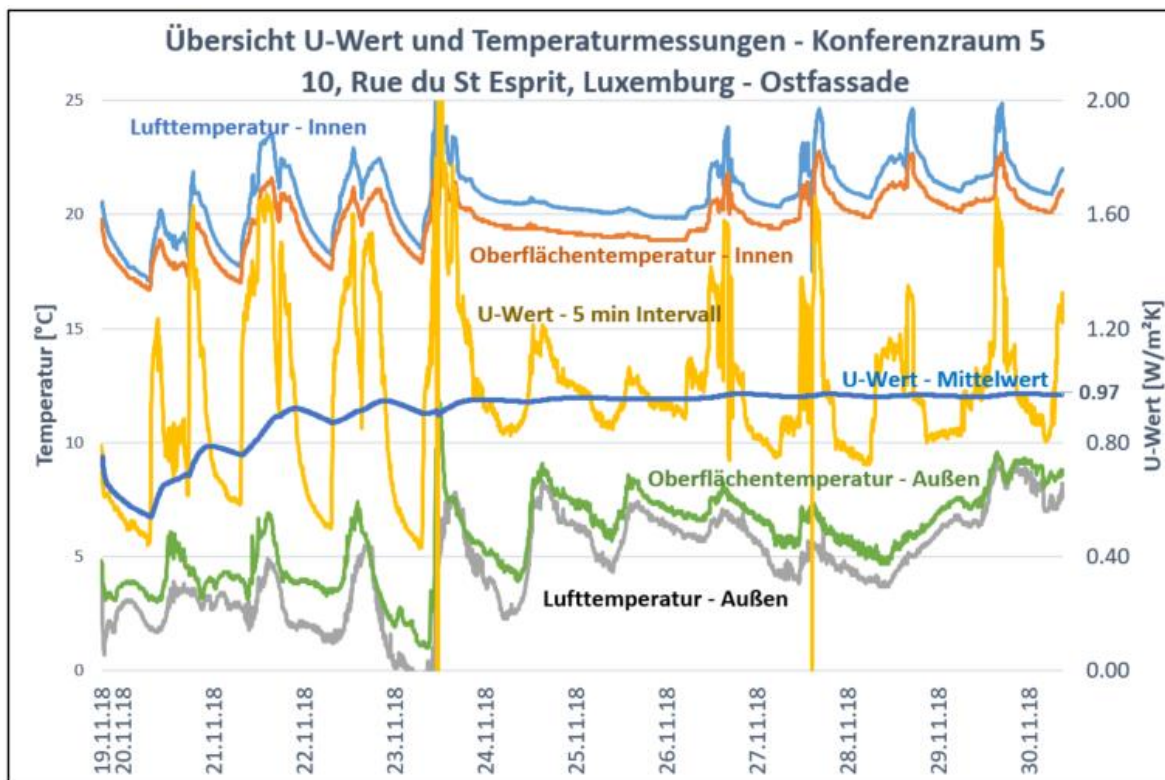


Abbildung 27: Darstellung der Ergebnisse einer Wärmeflussmessung

Sofern auch die Lufttemperaturen innen und außen erfasst werden, lassen sich daraus auch die Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha_i$  und  $\alpha_a$  ermitteln, die nach Norm auf  $\alpha_i = 8 \text{ W/m}^2\text{K}$  oder  $R_{si} = 0.13 \text{ m}^2\text{K/W}$

$\alpha_a = 25 \text{ W/m}^2\text{K}$  oder  $R_{se} = 0.04 \text{ m}^2\text{K/W}$  festgelegt sind. In der Praxis sind diese Koeffizienten jedoch oft kleiner, da die Norm eine konservative Abschätzung für die U-Wert Berechnung im Rahmen der Heizlastberechnung darstellt. Tatsächlich hängen sie von Verhältnissen der freien und durch Wind erzwungenen Konvektion ab und schwanken daher zeitlich natürlich stark.

## A.6 Messung und Deutung des Innenklimas

Das Innenklima hat große Auswirkungen auf die Funktion des Innendämmsystems. Besonders die Raumluftheuchte 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:

- Raumlufthtemperatur
- relative Raumluftheuchte
- CO<sub>2</sub> Gehalt der Raumlufth
- Außenlufthtemperatur

Der CO<sub>2</sub> Gehalt der Raumlufth ist dabei ein Indikator für das Lüftungsverhalten der Raumnutzer. Hohe Werte über 1500 ppm sprechen für nicht ausreichenden Luftwechsel, wobei dieser Wert keine scharfe Grenze darstellt und vor allem kurzzeitige Überschreitungen völlig problemlos sind. 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 CO<sub>2</sub>-Sensor sollte in der Raummitte aufgestellt werden, um einen repräsentativen Temperaturwert zu erfassen. Bei einer Raumgröße > 40 m<sup>2</sup> kann es unter Umständen sinnvoll sein, mehrere Sensoren zu benutzen. Sofern die Außenlufthtemperatur nicht gemessen werden kann, kann alternativ die [agrimeteo<sup>3</sup>](http://www.agrimeteo.lu) Webseite als Datenquelle verwendet werden. Hier werden Außenklimadaten an zahlreichen Standorten in Luxemburg dokumentiert. Folgende Grafik zeigt beispielhaft eine 10-tägige Aufzeichnung.

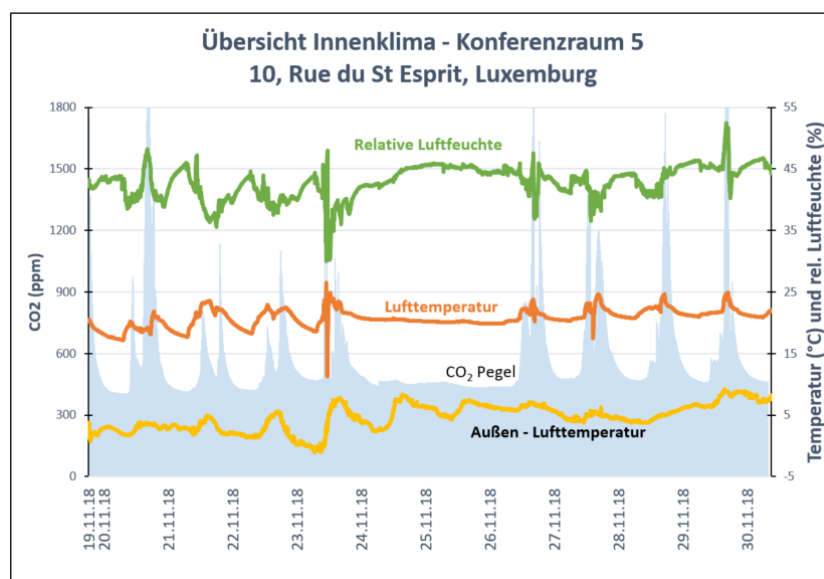


Abbildung 28: Grafische Darstellung des Innenklimas

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

<sup>3</sup> [www.agrimeteo.lu](http://www.agrimeteo.lu) [11]

Umrechnung geschieht mit Hilfe der Magnus-Formel auf Basis von Stundenwerten (vgl. Gl. (23), Abb. 21).

#### **A.7 Danksagung**

Es sei darauf hingewiesen, dass diese Arbeit nur durch die finanzielle Unterstützung der „Administration des Bâtiments Publics (ABP)“ in Luxemburg möglich war, wofür sich alle Autoren herzlich bedanken.