

MESSUNG UND SIMULATION VON INNENDÄMMABNAHMEN DER SOCKELBEREICHSSZONE EINES GRÜNDERZEITGEBÄUDES

Hans Hafellner¹

¹ Technische Universität Graz, Österreich, E-Mail: hafellner@tugraz.at

Kurzfassung

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

Abstract

Two different diffusion-open, capillary-active interior insulation systems were applied to the ground floor of a Wilhelminian style building dating from 1850, and 25 humidity and temperature sensors were installed. Over a period of four years, the external climate as well as the internal climate of the ground floor and basement were measured, and over a period of three years, the humidity as well as the temperature in the affected building components were measured. In the base zone, which was affected by rising damp, it was possible to measure drying behaviour during the winter months. Material samples were taken to determine the hygrothermal parameters required for simulations. With the help of two common programs for transient, multidimensional, hygrothermal simulations, modelling possibilities could be shown. In addition, evaluations were performed with respect to the moisture- and temperature-dependent thermal conductivity of the existing and renovation materials.

Einleitung

Die Prognosen der Bevölkerungsveränderung in Österreich zeigen eine Zunahme bis 2034 in den Ballungsräumen um bis zu 20 % gegenüber 2014. Für Wien wird von einer Zunahme um 15 %, ca. 270.000 Menschen, ausgegangen. Für Graz ist eine Zunahme von 20 % prognostiziert. Dies bedeutet 54.000 Personen mehr in nur 16 Jahren (Stadt Wien, 2017; Stadt Graz, 2015). Diese Menschen benötigen Wohnraum und eine nachhaltige effiziente Lösung ist die Nutzung vorhandener Gebäude. Demzufolge ist eine ressourcenschonende Nachverdichtung notwendig.

Eine der anspruchsvollsten Bauwerksgruppen auf Grund der Bauweise, ist auch zugleich jene mit dem höchsten Potential an Energieeinsparung. Hierbei handelt es sich um Gebäude aus der Bauperiode von vor 1900 bis 1950. Dies entspricht ca. 27 % der Wohngebäude und ca. 29 % der darin befindlichen Wohnungen des Gesamtbestandes in Österreich und 26 % der Wohngebäude in Deutschland (Statistisches Landesamt Baden-Württemberg, 2021).

Durch die thermische Sanierung von Bestandsgebäuden steigt die Lebensqualität der Nutzer, gleichzeitig werden die Gebäude durch die Sanierungsmaßnahmen energieeffizienter. Gründerzeitgebäude ähneln sich in den verwendeten Bauteilaufbauten und Materialien sehr. Die Außenmauern bestehen zum Großteil aus Normalformatziegel- oder Natursteinmauerwerk mit Dicken zwischen ca. 50 und 150 cm (Institut für Energieforschung, 1994). Daher reicht meist schon eine geringe Innendämmung von 5 bis 10 cm, um einen thermischen Neubaustandard zu erreichen (Hafellner, 2021). Doch gerade im Sockelbereich sollte bei den erforderlichen Berechnungen berücksichtigt werden, dass die Wärmeleitfähigkeit vom Wassergehalt des Baustoffs sowie der Temperatur abhängt. Die Sockelzone ist als besonders kritisch einzustufen, da Dampfdiffusion aus verschiedenen Innenbereichen, Schlagregen, Erdfeuchte und Spritzwasser aufeinandertreffen. Die bestmöglichen Anwendungsmöglichkeiten, aber im Gegenzug auch die zu vermeidenden Anwendungsbereiche kapillaraktiver, diffusionsoffener Innendämmungen in einem Gründerzeithaus sollten untersucht werden, sodass eine schadensfreie Umsetzung möglich ist. Durch das Monitoring in Kombination mit Simulationen sollte

mehr Verlässlichkeit und Sicherheit geboten werden. Die Relation des Einflusses vom Feuchtegehalt zur Temperatur, aber auch deren Auswirkung auf die Bestandskonstruktion und die Sanierungsmaßnahmen mittels Innendämmsystemen gelten als Zielvorgabe.

Feuchte- und temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit der Software

In Programm A ist ein lineares feuchteabhängiges Modell verfügbar. Ausgehend von λ_{dry} geht die Gerade bis zur effektiven Sättigung Θ_{eff} mit einem Anstieg der Wärmeleitfähigkeit von Wasser einher, siehe (1) (Bauklimatik Dresden, 2016).

$$\lambda(\Theta_l) = \lambda_{dry} + 0,56 * \Theta_l \quad (1)$$

$\lambda(\Theta_l)$ = feuchteabhängige Wärmeleitfähigkeit [W/(mK)]; λ_{dry} = Wärmeleitfähigkeit trockener Zustand; Θ_l = Wassergehalt [m³/m³];

Zusätzlich können feuchte- und temperaturabhängige Daten eingegeben werden. Die Auswertung bei Anwendung beider Abhängigkeiten wird nach (2) durchgeführt:

$$\lambda_{(\Theta_l, T)} = \lambda(\Theta_l) * \lambda(T) / \lambda_{dry} \quad (2)$$

λ_{eff} = feuchte- und temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit [W/(mK)]; $\lambda(\Theta_l)$ = feuchteabhängige Wärmeleitfähigkeit; $\lambda(T)$ = temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit; λ_{dry} = Wärmeleitfähigkeit trockener Zustand;

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

Die Entwicklung der Wärmeleitfähigkeit bei unterschiedlichen Temperaturkurven verhält sich nicht linear. Die Kombination von feuchte- und temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeiten ist bei wenigen Materialien für die gesamte Bandbreite der im Bauwesen vorkommenden Temperaturen und Feuchtigkeitsgraden erforscht (ÖNORM EN ISO 10456, 2010).

In Programm B ist ebenfalls meist standardmäßig ein lineares, temperaturabhängiges Wärmeleitfähigkeitsmodell hinterlegt, das ausgehend von λ_{dry} bei 10 °C zwei zusätzliche Wärmeleitfähigkeitswerte bei -20 °C und 80 °C erzeugt. Diese haben meist eine Differenz von 0,02 W/mK. Der temperaturbedingte Wärmeleitfähigkeitszuschlag wird, wie in (3) dargestellt, berechnet.

$$\lambda(\vartheta) = \lambda_{10} + a * (\vartheta - 10 \text{ °C}) \quad (3)$$

$\lambda(\vartheta)$ = temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit [W/(mK)]; λ_{10} = Wärmeleitfähigkeit bei 10 °C; a = temperaturbedingter Zuschlag zur Wärmeleitfähigkeit [W/(mK²)]; ϑ = Temperatur [°C]

Der feuchtebedingte Wärmeleitfähigkeitszuschlag in Programm B ist in (4) beschrieben:

$$\lambda(w) = \lambda_{trocken} * (1 + b * w / \rho_s) \quad (4)$$

$\lambda(w)$ = feuchteabhängige Wärmeleitfähigkeit [W/(mK)]; $\lambda_{trocken}$ = Wärmeleitfähigkeit trockener Zustand; b = feuchtebedingter Zuschlag zur Wärmeleitfähigkeit [%/M%]; w = Wassergehalt [kg/m³]; ρ_s = Trockenrohddichte [kg/m³];

Werden beide Abhängigkeiten gemeinsam angewendet, dann addiert das Programm zur trockenen Wärmeleitfähigkeit (Grundkennwert) beide Zuschläge hinzu (Fraunhofer Institut für Bauphysik, 2021).

Forschungsgebäude und Modellbildung

Das Gebäude, anhand dessen die Forschungsarbeiten durchgeführt wurden, befindet sich in Graz und ist ein im Jahr 1850 erbautes Gründerzeitgebäude. Die Nutzung ist überwiegend büroähnlich, durch Studierende für Lern- und Aufenthaltszwecke.

In Abbildung 1 ist der Schnitt der Sockelzone schematisch dargestellt. Die Dicken der Außenmauern variieren in dem Gebäude stark und im Bereich des Aufenthaltsraumes sind die Mauern ca. 90 cm bzw. 100 cm dick. Die Fassade, an deren Innenseite die Dämmmaßnahmen und der Einbau der Sensoren stattfanden, ist nach Nordwesten ausgerichtet. Das ergibt eine starke Schlagregenbeanspruchung und eine geringe Sonneneinstrahlung und führt somit zu Maximalwerten in Hinsicht auf die Feuchtigkeitsbeanspruchung.

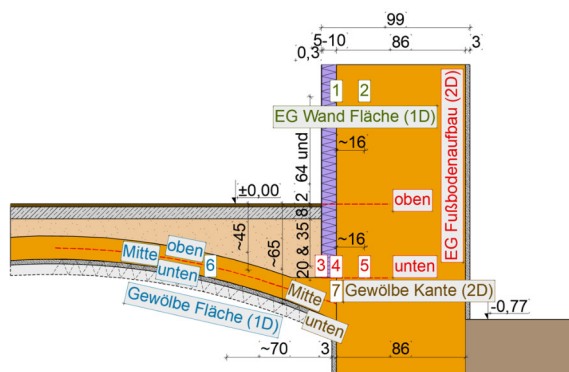


Abbildung 1 Vertikalschnitt Sockelbereich mit Übersicht der Sensoren Positionen welche relative Luftfeuchte und Temperatur messen

Die Auswahl der Dämmsysteme wurde auf Grund der hohen Feuchtebeanspruchung im Sockelbereich auf diffusionsoffene, kapillaraktive, feuchteunempfindliche Dämmsysteme eingeschränkt. Diese ermöglichen, im Gegensatz zu diffusionshemmenden Konstruktionen, auch eine Austrocknung in den Innenbereich. Der Aerogel Dämmputz ist auf Grund seiner chemischen Zusammensetzung nicht feuchteempfindlich und die zum Einsatz gekommene Aufsprühzellulosedämmung zeigte in vorangegangenen Forschungsprojekten ein sehr gutes Austrocknungsverhalten. Im vorliegenden Projekt wurden die beiden Dämmsysteme unabhängig

voneinander in separaten, aber vergleichbaren Abschnitten des Sockelbereiches verbaut.

Die Zellulose ist im Gegensatz zum Aerogel Wärmedämmputz ein organischer, ökologischer „Lowtech“-Baustoff. Der Aerogel Dämmputz wurde hingegen erst im Jahr 2013 am österreichischen Markt eingeführt, wodurch keine Langzeiterfahrungen vorhanden sind. Diese unterschiedlichen Eigenschaften und die dennoch sehr gute Eignung für den hochanspruchsvollen Einsatzbereich gaben den Anlass zur Materialauswahl.

Im Zuge der Untersuchungen wurden das Außenklima (Temperatur [°C], relative Luftfeuchtigkeit [%], Niederschlag [l/m²], Direktstrahlung auf die horizontale Fläche [W/m²], Diffusstrahlung auf die horizontale Fläche [W/m²], Langwellige Abstrahlung des Himmels [W/m²], Windrichtung [°], Windgeschwindigkeit [m/s]), das Innenklima (Temperatur [°C], relative Luftfeuchtigkeit [%]) und das Bauteilverhalten (Temperatur [°C], relative Luftfeuchtigkeit [%]) selbst dokumentiert und gemessen.

Ausgewählte Materialparameter vom Bestand

Die vorkommenden Materialien in Bestandsaufbauten erscheinen auf den ersten Blick oft ähnlich, können sich aber im Detail stark unterscheiden. Vergleicht man die Normalformatziegel, die in der erdberührten Außenwand vom Untergeschoß, in der Gewölbeausbildung und in der Außenwand des Erdgeschoßes zur Anwendung kamen, so wurden völlig unterschiedliche Materialparameter festgestellt. Die Rohdichte der Ziegel ergab Werte zwischen 1554 kg/m³ und 2138 kg/m³, die Sättigungsgrade lagen zwischen 1,50 % bis 47,50 % (min. 0 % bis max. 100 %) und die Porosität zwischen 0,20 m³/m³ und 0,42 m³/m³. Die Wärmeleitfähigkeit der Ziegel zwischen Unter- und Erdgeschoß streute im Mittel zwischen 0,576 W/mK und 0,983 W/mK.

In der Praxis sind oft nicht die Zeit bzw. die monetären Mittel gegeben, um alle Materialparameter labortechnisch aufbereiten zu lassen und so werden einzelne Parameter gemessen und mit bekannten Datensätzen verglichen. In der Datenbank von Programm A stehen Datensätze zu ca. 100 und bei Programm B ca. 75 verschiedenen Ziegeln zur Verfügung.

In *Tabelle 1* sind Datensätze für die Ziegel der Erdgeschoß Wand abgebildet, die mit den Messdaten annähernd vergleichbar sind.

Tabelle 1 Messdaten EG-Ziegel und Auswahl an vergleichbaren Datensätzen aus Programm A

Name	Rohdichte [kg/m ³]	Θ _{por} [m ³ /m ³]	λ [W/mK]
Messung	1726,3	0,3583	0,576
ZE	1657,2	0,3747	0,574
ZK	1734,1	0,3456	0,656
ZM	1719,6	0,3511	0,642
Normziegel	1786,3	0,3535	0,548
Altbauziegel	1731,2	0,3467	0,624

Die Tabelle verdeutlicht die Varianz bei der Auswahl der Materialien aus den Datenbanken. Die fünf geeignetsten Ziegeldatensätze zeigen die breite Streuung der man bei der Auswahl in der Praxis ausgesetzt ist. Einerseits sind die Abweichungen der Materialparameter zu den Messdaten eindeutig zu erkennen und andererseits sind die Datensätze untereinander völlig unterschiedlich, auch wenn einzelne Parameter mit den labortechnischen Auswertungen übereinstimmen.

Die Wärmeleitfähigkeit unterscheidet sich zwischen den Programm datensätzen um bis zu 15 % bei den trockenen Einzelwerten und um bis zu 29 % bei Wassersättigung.

Drei Datensätze der Vorauswahl sind auf Grund des gemeinsamen Ursprunges eines Forschungsprojektes in der Software Programm A (Altbauziegel Dresden: ZE, ZK, ZM) und auch in Programm B (Vollziegel ZE, ZK, ZM) zu finden. Werden die abgespeicherten Graphen der feuchteabhängigen Wärmeleitfähigkeiten der oben genannten Vollziegeldatensätze aus Programm A und Programm B, die eigentlich dieselben Messwerte beinhalten sollten, in Relation gesetzt, so lassen sich eklatante Unterschiede feststellen. Die Wärmeleitfähigkeitswerte weichen bei trockenem Zustand bis zu 15 % und bei den zugehörigen vergleichbaren Maximalfeuchten bis zu 107 % ab.

Die automatisiert generierten temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeiten der drei Ziegeldatensätze aus Programm B haben keinen relevanten Einfluss der Temperatur auf die Wärmeleitfähigkeit. Somit ergeben sich bei der Auswahl dieser Datensätze auch bei den Simulationsergebnissen keine nennenswerten Veränderungen der Wärmeströme mit vorhandenen Temperaturschwankungen. Messungen zeigen jedoch einen deutlich größeren Einfluss.

Die Außenwand hat eine Dicke von 92 cm und daher hat die Wärmeleitfähigkeit des Ziegelmauerwerks entscheidenden Einfluss auf die Transmissionswärmeverluste von Gründerzeitgebäuden. Betrachtet man die bestmögliche Datenauswahl aus Programm A und Programm B, dann ergibt sich bereits eine Schwankung des U-Wertes zwischen 0,551 W/m²K und 0,675 W/m²K ohne Berücksichtigung der Temperatur- und Feuchteabhängigkeit. Das wirkt sich im Detail und auch für das gesamte Gebäude aus. Die Innenoberflächentemperatur differiert hier bei eindimensionalen Betrachtungen um einen halben Grad und auf das gesamte Gebäude gerechnet ergeben die Unterschiede beim Heizwärmebedarf ca. 9 % (89,2 kWh/m²a bis 97,23 kWh/m²a) bzw. beim Endenergiebedarf von 6 % (143,2 kWh/m²a bis 151,3 kWh/m²a) Differenz.

In *Abbildung 2* sind die gemessenen feuchteabhängigen Wärmeleitfähigkeiten der Ziegel, verglichen mit Verläufen bei unterschiedlichen Temperaturen sowie mit den Mittelwerten der für die

Simulation in Frage kommenden Datensätze aus Programm A und Programm B, ersichtlich.

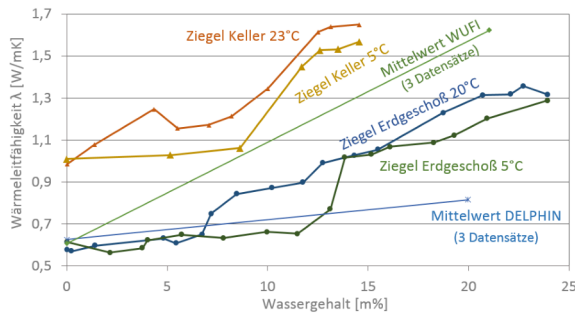


Abbildung 2 gemessene Wärmeleitfähigkeit λ' und gemittelte Datensätze der Software Programm A und Programm B in Abhängigkeit des Wassergehaltes $w(m1)$

Die beiden dargestellten Geraden sollten eigentlich die gleichen Datensätze darstellen. Es lässt sich jedoch erkennen, dass für die Datensätze aus Programm A die simulationstechnisch relevanten Bereiche des Erdgeschoßziegels gut abgebildet werden, die Spreizung zum Ziegel aus dem Untergeschoß jedoch sehr groß ist. Der Mittelwert der Datensätze aus Programm B deckt sich weder mit den gemessenen Datensätzen des Ziegels aus dem Untergeschoß, noch mit jenen aus dem Erdgeschoß. Die gemittelten Datensätze aus Programm A passen jedoch sehr gut mit der Wärmeleitfähigkeit der Messung bei niedrigeren Feuchtegehalten des Erdgeschoß Ziegels überein.

Die Messung der Wärmeleitfähigkeit der Ziegel erfolgte im Labor in Klimakammern mittels eines modifizierten Nadelsonden-Verfahrens.

Ergebnisanalyse und Diskussion

Erdgeschoß Außenwand (1D): Simulationen

Die Klimadaten (Lufttemperatur [$^{\circ}\text{C}$]; relative Luftfeuchtigkeit [%]; Niederschlag [l/m^2]; Globalstrahlung [W/m^2]; Windrichtung [$^{\circ}$]; Windgeschwindigkeit [m/s]) für den Innen- und Außenbereich wurden vor Ort gemessen und zusätzlich wurden Klimadaten für den gleichen Zeitraum einer Bundesanstalt als Abgleich zugekauft. Diese Klimabedingungen wurden in die Software implementiert. Die erforderlichen Materialparameter der Bestandsmaterialien wurden im Labor erfasst und ebenfalls in die Software eingearbeitet, wobei hier nur maßgebliche Parameter gemessen wurden und durch Vergleichswerte der Datenbank die Auswahl der Grundmaterialien für die Simulationen erfolgte. Sämtliche Materialparameter der Innendämmungen waren in zumindest einer Software vorhanden. Durch Umrechnungen konnten die fehlenden Materialdaten auch in die jeweils andere Software übertragen werden. Die Auswirkung und die darauffolgende Auswahl der Wärmeübergangswiderstände und Wasserdampfübergangskoeffizienten wurden in verschiedenen Simulationsvariationen analysiert,

wobei hier die detaillierte Beschreibung zu weit führen würden.

Im Projekt wurden Simulationen und Messungen im 1D Wand-, 1D Gewölbe- und 2D Schnittbereich von Wand zu Gewölbe durchgeführt.

In der Analyse wurden nachfolgende Materialeinstellungen unterschieden:

1. feuchteabh. lineare Wärmeleitf. (aus Software)
2. feuchteabh. Wärmeleitf. (aus Messung)
3. temperaturabh. Wärmeleitf. (aus Messung)
4. feuchte- & temp.abh. Wärmeleitf. (aus Messung)

Der erste Punkt ergibt sich aus dem Softwaremodell, da die feuchteabhängige lineare Wärmeleitfähigkeit eine Standardeinstellung im Programm A ist. Dieses Modell kommt bei der gängigen Vorgehensweise einer Simulation, ohne Messung der feuchte- und temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeit, zum Einsatz. Bei den Varianten zwei bis vier wurden die Messdaten der Wärmeleitfähigkeit des Erdgeschoß Ziegels entweder für die Feuchteabhängigkeit und/oder die Temperaturabhängigkeit eingegeben. Für jene Parameter ohne Messdaten wurden die zugehörigen Standardeinstellungen der Software verwendet.

Alle vier oben genannten Varianten wurden für die Sanierungsmaßnahme mit Aerogel und Zellulose in Programm A simuliert und zusätzlich wurde die Bestandsausführung betrachtet. Die Einstellung mit feuchte- und temperaturabhängiger Wärmeleitfähigkeit (Punkt 4) für die beiden Innendämmungsvarianten und den Bestand wurden zusätzlich in Programm B simuliert.

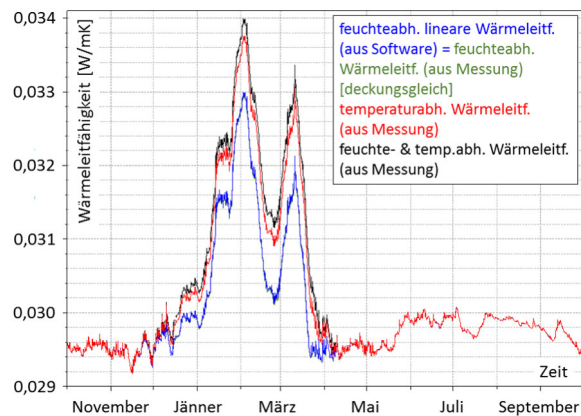


Abbildung 3 Jahresverlauf der Wärmeleitfähigkeit von Aerogel mit verschiedenen Abhängigkeiten

In Abbildung 3 sind die Jahresverläufe der Aerogel Innendämmungsschicht der unterschiedlichen Varianten in Abhängigkeit von Feuchte und Temperatur aus Programm A dargestellt. In den Wintermonaten von Dezember bis April ist eine deutlich höhere Wärmeleitfähigkeit zu verzeichnen. Das betrifft genau jene Monate, in denen die Wärmedämmung am meisten benötigt wird. Die beiden Varianten ohne die Abhängigkeit der Temperatur haben einen ähnlichen Verlauf wie jene mit der Temperaturabhängigkeit, jedoch sind die

Werte nicht gleich hoch. Zu keinem Zeitpunkt im Jahresverlauf entspricht die Wärmeleitfähigkeit dem angegebenen Wert im Datenblatt mit 0,027 W/mK.

Erdgeschoß Außenwand (1D): Vergleich Simulation und Messung

Die Simulationsergebnisse sind in strichlierten und die Messergebnisse in durchgezogenen Kurven dargestellt. Im unteren Bereich der Diagramme sind die Temperaturen und darüber die relativen Luftfeuchten eingefügt.

Die Temperatur im Bereich von ca. 64 cm bis 89 cm über der fertigen Fußbodenoberkante, in dem die Sensoren für den 1D Bereich verbaut wurden, ist für Bereich 1 und 2 sehr ähnlich. In Abbildung 4 wurde daher nur eine Messreihe und ein Ergebnis der Simulation dargestellt. Die Ergebnisse zwischen Simulation und Messung stimmen besonders in den kalten Monaten sehr gut überein.

Die Sensoren zeigen nach der Einbauphase eine relative Luftfeuchte von 100 % auf Grund der Einbaufeuchte des Innendämmsystems.

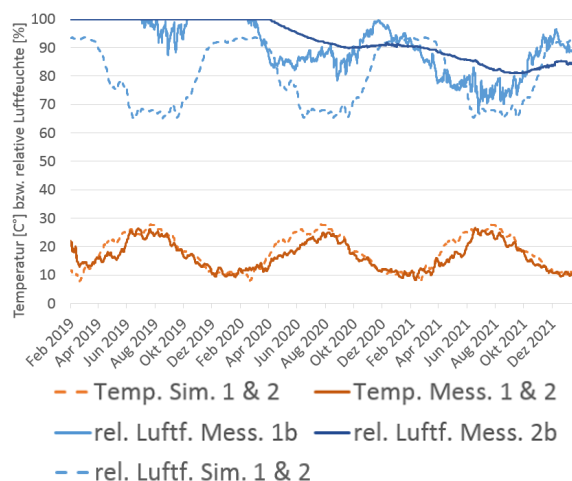


Abbildung 4 Mess- und Simulationsergebnisse der Variante Aerogel EG-Fläche (1D Bereich)

In Abbildung 4 kann an den Messergebnissen abgelesen werden, dass eine Austrocknung erfolgt. Zum Vergleich wurde die Simulationskurve für den eingeschwungenen Zustand in der Ebene zwischen Innendämmung und Mauerwerk (Bereich 1) eingefügt. Hier kann man erkennen, dass sich die Messkurve bereits der niedrigeren Luftfeuchte der Simulation annähert. Die Auswertung der relativen Luftfeuchte im Mauerwerk (Bereich 2) zeigt ein ähnliches, aber abgeschwächtes Verhalten. Die Austrocknungsphase setzt in der Ebene 2 somit später ein. Um in weiterer Folge Aussagen zur Übereinstimmung des Austrocknungsverhaltens von Messung und Simulation machen zu können, muss für die Aerogel Innendämmung noch die künftige Entwicklung abgewartet werden, da die Baufeuchtigkeit zum momentanen Zeitpunkt noch erhöhten Einfluss zeigt.

Im Gegensatz zum Aerogel sind die Werte der relativen Luftfeuchte der Zellulose wesentlich geringer, siehe Abbildung 5. In den Bereichen 1 und 2 erfolgen noch Austrocknungsvorgänge, aber es lässt sich bereits erkennen, dass die Verläufe der relativen Luftfeuchtigkeit aus den Messungen geringer sind als die Simulationsergebnisse. Die Zellulosedämmung hat offensichtlich ein besseres Austrocknungsverhalten in der Anwendung, als die Materialdaten in der Simulationssoftware dies abbilden.

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

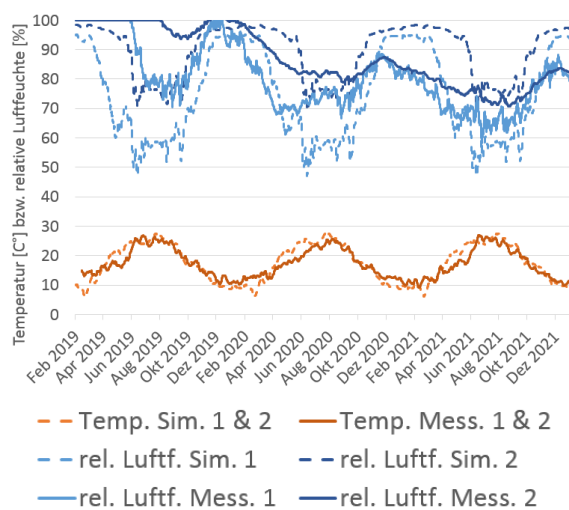


Abbildung 5 Mess- und Simulationsergebnisse der Variante Zellulose EG-Fläche (1D Bereich)

Sockeldetail (2D)

Für die Simulation des gesamten Bereiches vom Keller- und Erdgeschoß samt Sockelzone und angrenzendem Erdreich mussten drei Modelle gebildet werden. Durch die Übergabe der Randbedingungen (Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit, Kapillardruck) von einem Modell zum nächsten konnte die aufsteigende Feuchtigkeit (Eingabe als Wasserkontakt) abgebildet werden.

Die Kalibrierung konnte durch die eingebauten Sensoren im Gewölbe bzw. in der erdberührten Kelleraußenwand erfolgen. Es muss hier jedoch angemerkt werden, dass eine flächendeckende Messung durch die Dicke der Außenwand und die stark variierenden Bauausführungen des Bestandes nicht erfolgen konnte. Es wurden hier die Schwerpunkte auf die maßgeblichen Teile der Innenbereiche der Außenwand gelegt.

In Abbildung 6 ist der maximale Wassergehalt mit der Aerogel Innendämmung dargestellt.

Durch die Dämmmaßnahmen sind die Feuchtegehalte nicht mehr gleichmäßig verlagert, was sich auch schon in den Teilbereichen der 1D Betrachtungen abgezeichnet hat. Die Feuchtigkeit kann durch die Innendämmmaßnahmen schlechter austrocknen und damit wird sie auch höher nach oben transportiert.

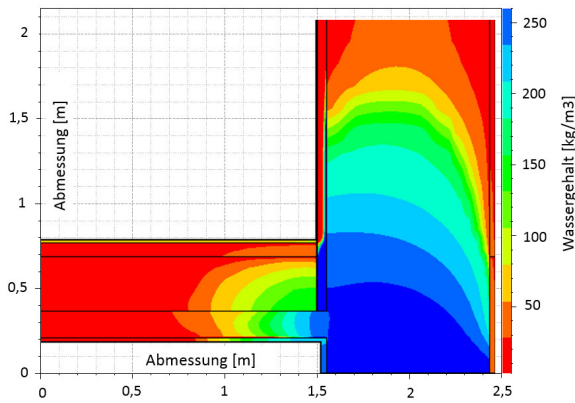


Abbildung 6 Maximaler Wassergehalt der Simulation (Programm A) im Sockeldetail der Aerogel Variante

Die Ergebnisse der feuchte- und temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeiten der 2D Simulationen für den Sockelbereich der Bestands- und Dämmvarianten wurden in Abbildung 7 als Jahresmittelwerte dargestellt. Zusätzlich sind die Abweichungen zu den trockenen Lambdawerten angegeben. Es spiegeln sich hier deutlich die Feuchtegehalte wider und die Unterschiede zu den Ergebnissen ohne zusätzliche Feuchtigkeit durch den Sockelbereich, sind eklatant. Der Einfluss der Temperatur und auch die Schlagregenbelastung spielen im Sockelbereich nur eine untergeordnete Rolle.

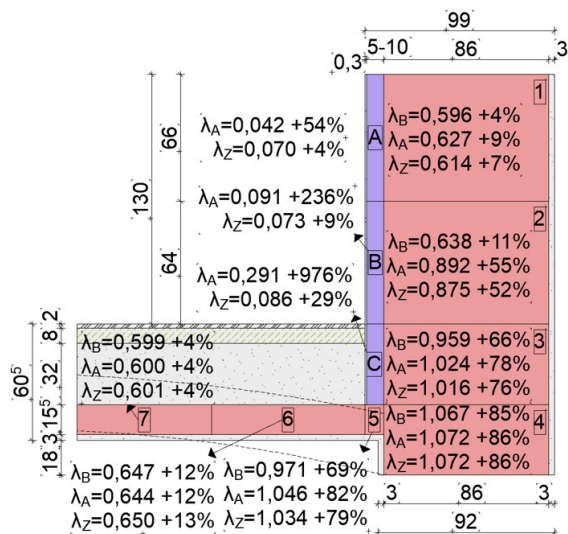


Abbildung 7 feuchte- und temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeiten des Sockeldetails als Jahresmittelwerte

Zusammenfassung

Messergebnisse

Die Messungen der Materialparameter, insbesondere der feuchte- und temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeit der Ziegel, zeigen große Abweichungen in Abhängigkeit von den vorgefundenen Ziegeln auf nur wenigen Metern. Die Ziegelmauerwerke der Gründerzeitgebäude sind durch die nicht maschinelle Herstellung der Baustoffe somit als äußerst inhomogen anzusehen.

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

Simulationsergebnisse

Es zeigt sich, dass die Auswahl der bestmöglich übereinstimmenden Datensätze aus Messung und Programmdatenbanken ohne Adaptierungen zu sehr großen Abweichungen führen. So können zwar die zur Auswahl bestimmten Parameter sehr gut übereinstimmen, jedoch weichen dann die restlichen Materialparameter weit voneinander ab. Verdeutlicht wird das im Zusammenhang mit der feuchte- und temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeit der Ziegel. Bei gut übereinstimmender Rohdichte, Porosität und trockener Wärmeleitfähigkeit, streuen die Modelle der feuchte- und temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeit der Simulationsprogramme weit. Es ist auch festzustellen, dass drei ausgewählte Datensätze für Ziegel, welche auf Grund ihres gemeinsamen Ursprunges in einem Forschungsprojekt sowohl in der Software Programm A als auch in Programm B zu finden sind, dennoch nicht die gleichen Daten verwenden. Somit ergeben sich bei der Auswahl des gleichen, gemessenen Ziegels je nach Programm unterschiedliche Simulationsergebnisse. Die Vorgehensweisen der Ermittlung der Wärmeleitfähigkeiten der Programme ist unterschiedlich. Sie haben verschiedene Formeln und auch Modelle zur standardmäßigen Ermittlung der abhängigen Wärmeleitfähigkeit hinterlegt. Die beiden Simulationsprogramme stimmen in den Ergebnissen der Temperatur und der relativen Luftfeuchte gut

miteinander überein. Die Gesamtwassergehalte weichen jedoch weit voneinander ab und auch die Wassergehalte in den einzelnen Schichten, die damit verbundene Sättigung und auch die feuchteabhängige Wärmeleitfähigkeit weisen maßgebliche Differenzen auf.

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

Die Bemessungswerte der Wärmeleitfähigkeit aus der ÖNORM B 8110-7:2013 wurden mit den Messergebnissen und der Wärmeleitfähigkeitsentwicklung aus den Simulationen verglichen. Es zeigt sich, dass die Normwerte ganzjährig überschritten werden. Die Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von Feuchtigkeit und Temperatur ist somit maßgeblich für die wärmetechnischen Eigenschaften von Bauteilen.

Die Auswertungen der Simulationsergebnisse zeigt, dass durch den hohen Wassergehalt in der Konstruktion sehr viele Parameter und Randbedingungen nebensächlich werden. Es wird deutlich, dass durch die hohe Feuchtigkeit im kalten Bereich der Innendämmung im Fußbodenbereich die Dämmung nicht als sinnvoll anzusehen ist. Die Wärmeleitfähigkeit des Ziegels steigt je nach Bereich um bis zu 86 %. Oberhalb der Fußbodenkonstruktion steigt die Wärmeleitfähigkeit der Aerogel Innendämmung von 0,027 W/mK auf bis zu 0,091 W/mK und jene der Zellulose von 0,067 W/mK auf 0,073 W/mK. Die Dämmwirkung ist trotz der Durchfeuchtung auch im Fußbodenbereich vorhanden. Dies belegen die gemessenen Temperaturen. Jedoch können die erhöhten Feuchtegehalte zu dauerhaften Schäden führen. Das Feuchtespeichervermögen des Bestandsziegelmauerwerks ist sehr hoch, was auch die Messungen im Untergeschoß zeigen. Aber durch die Montage der Innendämmungen erfolgt eine Verminderung der Temperatur und durch die verminderte Austrocknung auch ein Anstieg der Feuchtigkeit hinter der Dämmung im Mauerwerk.

Danksagung

Ein großer Dank geht an die Firmen Röfix AG und Zellulosedämmstoffproduktion CPH welche die Innendämmsysteme zur Verfügung stellten.

Literatur

- Bauklimatik Dresden Software GmbH, 2016. DELPHIN Hilfe, Dresden, Deutschland.
- Das Fraunhofer Institut für Bauphysik IBP, 2021. WUFI Hilfe, Stuttgart, Deutschland.
- Hafellner, H., 2021. Instationäres, hygrothermisches Verhalten von erdnahen Bauteilanschlüssen insbesondere mit Innendämmung. Technische Universität Graz, Graz, Österreich.
- Institut für Energieforschung, 1994. Handbuch für Energieberatung. Institut für Energieforschung, Graz Österreich.
- ÖNORM B 8110-7 Wärmeschutz im Hochbau - Teil 7: Tabellierte wärmeschutztechnische Bemessungswerte, 03.2013. Wien, Österreich.
- ÖNORM EN ISO 10456 Baustoffe und Bauprodukte - Wärme- und feuchtetechnische Eigenschaften - Tabellierte Bemessungswerte und Verfahren zur Bestimmung der wärmeschutztechnischen Nenn- und Bemessungswerte, 02.2010. Wien, Österreich.
- Stadt Graz, 2015. Bevölkerungsprognose 2015–2034 für die Landeshauptstadt Graz, Graz Österreich.
- Stadt Wien, 2017. Bevölkerungsprognose - Statistiken, <https://www.wien.gv.at/statistik/bevoelkerung/prognose>, Zugriff am: 08.02.2017, Wien Österreich.
- Statistisches Landesamt Baden-Württemberg, 2021. <https://www.statistikportal.de/de/wohngebaeude-nachbaujahr>, Zugriff am: 24.06.2021, Baden-Württemberg, Deutschland.

