



Ulrich Ruisinger, Dipl.-Ing.

**Das hygrothermische Verhalten von Balkenköpfen  
bei innen gedämmten Gebäuden -  
The hygrothermal behaviour of joist ends  
in internally insulated buildings**

**DISSERTATION**

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der technischen Wissenschaften

eingereicht an der

**Technischen Universität Graz**

Betreuer

Univ.-Prof. Dr.techn. Dr.iur. Peter Kautsch  
Institut für Hochbau - TU Graz

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Harald Garrecht  
Institut für Werkstoffe im Bauwesen - Universität Stuttgart



## **EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG**

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

---

Datum

---

Unterschrift





---

## Danksagung

Ich bedanke mich herzlich bei meinem Betreuer, Univ.-Prof. Dr.techn. Dr.iur. Peter Kautsch, für die fachliche Unterstützung, das Vertrauen, die wohlwollende Geduld und das Aufzeigen mancher sprachlicher Feinheiten. Ebenso freue ich mich, als Zweitgutachter Univ.-Prof. Dr.-Ing. Harald Garrecht gewonnen zu haben.

Seitens der TU Dresden bin ich Herrn Dipl.-Ing. Heiko Fechner für seine Eingebungen und die Diskussionen zu Dank verpflichtet, und Herrn Dipl.-Ing. (FH) Ulrich Arnold aus Castrop-Rauxel, seines Zeichens Holzschützer, für das geduldige Lektorat.

Auch meiner Frau, Dr. Catherine Rajamathi, die mich immer wieder inspiriert und angetrieben hat, will ich an dieser Stelle danken, sowie meinen Eltern, Ingeborg und Ulrich Ruisinger.

---

---

## Kurzfassung

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Vorstellung von Messungen und Simulationen von fünf ökologischen, diffusionsoffenen Innendämmsystemen und deren Einfluss auf die Balkenaufleger in einem Testhaus in Graz. Durch den Vergleich mit einem ungedämmten Balkenaufleger kann gezeigt werden, dass die Innendämmsysteme in den Deckenbalken weder zu nennenswert höherer Feuchte, noch zu tieferen Temperaturen führten. Obwohl in der Luft von bestimmten Auflagern teilweise für längere Zeit um 100 % relativer Luftfeuchte gemessen worden waren und eine sehr hohe Feuchtebelastung aus dem Raum vorlag, blieb die Holzfeuchte in einem unkritischen Bereich. Eine leichte Ausnahme dabei bildeten zwei Dämmsysteme mit hoher Einbaufeuchte, die aber nach dem Austrocknen der Einbaufeuchte ebenso unproblematisch waren. Aus den Messergebnissen ergibt sich die Empfehlung, die Auflager konvektionshemmend abzudichten. Nach dem Projektende ließen sich die meisten Innendämmsysteme mit wenig Aufwand und praktisch rückstandsfrei wieder entfernen.

Die hygrothermischen Simulationen mit *DELPHIN* konnten die hygrothermischen Messungen sehr gut wiedergeben, wobei die gewählten Simulationseinstellungen detailliert dargestellt werden. 2D-Simulationen waren für rein thermische Berechnungen ausreichend. Bei Betrachtung der Feuchte konnte mit 3D-Simulationen eine etwas höhere Genauigkeit erzielt werden. Es zeigte sich, dass Simulationen geeignet sind, um die hygrothermischen Verhältnisse in Balkenauflagern abzubilden und demzufolge auch zu prognostizieren.

## Abstract

This work deals with the presentation of measurements and simulations of five ecological, diffusion-open internal insulation systems and their influence on the beam-supports in a test house in Graz. The comparison with an uninsulated beam-support shows that the internal insulation systems in the ceiling beams led neither to significantly higher humidity nor to lower temperatures. Though, the relative humidity of the air measured for longer periods of time in certain supports was partly around 100 % with a very high humidity load that was present in the rooms, the wood-humidity remained uncritical. A minor setback was that two insulation systems had a high installation humidity, which, however, showed no problems after drying out the initial installation humidity. The results of the measurements lead to the recommendation of sealing the supports in a convection-inhibiting manner. At the end of the project, most internal insulation systems could be removed with little effort and practically no residue.

In this work, the hygrothermal simulations with *DELPHIN* could reproduce the hygrothermal measurements very well, whereby the selected simulation settings are reproduced in detail. 2D simulations were sufficient for purely thermal calculations, while, a slightly higher accuracy could be achieved with 3D simulations for the humidity calculations. It was shown that simulations are suitable to reproduce the hygrothermal conditions in beam supports and therefore also to predict them.

---

# I Inhaltsverzeichnis

I	Inhaltsverzeichnis	
II	Abkürzungs- und Symbolverzeichnis	
1	Einführung und Motivation .....	1
1.1	Ausgangssituation / Initial situation.....	1
1.2	Zielsetzung / Aim.....	2
1.3	Vorgehen und Abgrenzung.....	3
2	Literaturübersicht.....	5
2.1	Balkenaufleger und Innendämmung in der Vergangenheit .....	5
2.2	Testhäuser mit Innendämmung.....	7
2.3	Labor-Prüfstände .....	11
2.4	Mögliche Schadensursachen .....	12
2.5	Luftdicht oder nicht luftdicht anschließen? .....	12
2.6	Aktive und passive Wärmezufuhr .....	15
2.7	Die Ausgestaltung des Auflagers.....	17
2.8	Simulationen und Simulationswerkzeuge .....	18
2.9	Richtlinien, Merkblätter und Herstellerangaben .....	19
3	Testhaus und energetische Sanierung.....	21
3.1	Planung Versuchsgebäude .....	21
3.2	Auswahl der Dämmsysteme.....	21
3.3	Beschreibung der Testwand.....	22
3.4	Vorbereitende Arbeiten .....	23
3.5	Installation Messtechnik .....	25
3.6	Montage der Dämmsysteme .....	29
3.7	Erfahrungen im Spiegel des WTA-Merkblatts 8-14.....	33
3.8	Beschreibung und Bewertung der Dämmsysteme.....	36
3.9	Erfahrungen beim Rückbau und der Entsorgung.....	39
3.10	Zusammenfassung der baupraktischen Eigenschaften der Dämmsysteme .....	46
3.11	Reduzierung der Transmissionswärmeverluste durch Innendämmmaßnahmen .....	47

---

4	Hygrothermische Materialkennwerte und -funktionen .....	51
4.1	Materialuntersuchungen .....	51
4.2	Messverfahren .....	52
4.3	Verifizierungsexperimente: kontinuierliche Wasseraufnahme und Abtrocknung .....	61
4.4	Erstellung von Materialfunktionen.....	62
4.5	Zusammenfassung der Eigenschaften der Materialien und Innendämmsysteme ...	64
5	Hygrothermische Vor-Ort-Messungen.....	71
5.1	Auswertung der Messdaten.....	71
5.2	Konvertieren der Messdaten .....	72
5.3	Außen- und Raumklima.....	72
5.4	Temperatur und Luftfeuchte zwischen Bestandsoberfläche und Dämmsystem .....	87
5.5	Temperatur und Luftfeuchte in der Mitte der Balkentasche.....	97
5.6	Temperatur und Luftfeuchte vor dem Stirnholz.....	100
5.7	Holzfeuchtemessungen.....	107
5.8	Oberflächentemperaturen .....	113
5.9	Temperatur- und Feuchteprofile an den Balken.....	120
5.10	Abdichtung der Balkenauflagertaschen.....	135
5.11	Mögliches Schimmelpilzwachstum in den Balkenauflägern.....	142
5.12	Resümee der Messungen.....	146
6	Hygrothermische Simulationen .....	149
6.1	Simulationsprogramm DELPHIN .....	149
6.2	Weitere verwendete wissenschaftliche Software .....	156
6.3	Temperatur-Korrektur der Holzfeuchtesensoren.....	158
6.4	Einfluss von Schlagregen .....	161
6.5	Berücksichtigung der Permeabilität der Baumaterialien.....	166
6.6	Vergleich mit Messungen im eindimensionalen Bereich .....	170
6.7	Vergleich mit Messungen in Balkenauflägern .....	182
7	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen .....	211
7.1	Technologische und ökologische Bewertung der Dämmsysteme .....	211
7.2	Bestimmung der Materialeigenschaften.....	212
7.3	Hygrothermische Vorortmessungen .....	213

---

7.4	Hygrothermische Simulationen.....	214
8	Summary and Conclusions .....	217
8.1	Technological and ecological evaluation of insulation systems.....	217
8.2	Determination of material properties.....	218
8.3	Hygrothermal on-site measurements.....	218
8.4	Hygrothermal simulations .....	220
9	Literaturverzeichnis.....	223
10	Abbildungsverzeichnis .....	236
A 1	Sensorverteilung in den Auflagern.....	242
A 2	Bauteilkatalog.....	243
A 3	Umrechnung der Globalstrahlung in direkte und diffuse Strahlung .....	245
A 4	Monatliche Klima-Durchschnittswerte.....	247
A 5	Dissemination - Darstellung der Verbreitungs- und Verwertungsmaßnahmen .....	248

## II Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

### Arabische Symbole

Symbol	Beschreibung	Einheit
$A$	Fläche	$m^2$
$A_w$	Wasseraufnahmekoeffizient	$kg / (m^2 \cdot s^{0,5})$
$c$	Spez. Wärmekapazität	$J / (kg \cdot K)$
$c_g^{m_a}$	Luftmassenkonzentration der Gasphase	$kg / kg$
$c_{wirk}$	Wirksame Wärmekapazität	$kJ / (m^2 \cdot K)$
$d$	Dicke	$m$
$D_{v,air}(T)$	Diffusionskoeffizient von Wasserdampf in Luft (in Abhängigkeit von der Temperatur)	$m / s^2$
$D_{v,mat}$	Diffusionskoeffizient von Wasserdampf in einem Material	$m / s^2$
$g$	Erdbeschleunigung	$m / s^2$
$h$	Höhe	$m$
$h_{si}$	Innerer Wärmeübergangskoeffizient	$W / (m^2 \cdot K)$
$h_v$	Enthalpie des Wasserdampfes	$J / m^3$
$HGT$	Heizgradtage	$K \cdot d$ (bzw. $K \cdot h$ )
$i$	Zählindex	-
$j_l$	Fluss der Flüssigphase	$kg / h$
$j_v$	Wasserdampffluss	$kg / h$
$j_{diff}^Q$	Diffusiver Wärmestrom	$W / m^2$
$j_{conv}^{m_g}$	Konvektiver Strom der Gasphase	$kg / (m^2 \cdot s)$
$j_{conv}^{m_a}$	Konvektiver Strom der Luftphase	$kg / (m^2 \cdot s)$
$j_{conv}^{m_l}$	Konvektiver Strom der Flüssigphase	$kg / (m^2 \cdot s)$
$j_{conv}^{m_v}$	Konvektiver Strom des Wasserdampfs	$kg / (m^2 \cdot s)$
$j_{diff}^{m_v}$	Diffusiver Strom des Wasserdampfs	$kg / (m^2 \cdot s)$
$K_{cap}$	Flüssigwasserleitfähigkeit bei kapillarer Sättigung	$s$
$K_{eff}$	Flüssigwasserleitfähigkeit bei effektiver Sättigung	$s$
$K_g$	Luftleitfähigkeit / Permeabilität	$s$
$K_l$	Flüssigwasserleitfähigkeit	$s$
$K_v$	Wasserdampfleitfähigkeit	$s$
$m$	Masse	$kg$
$m_d$	Masse des trockenen Materials	$kg$
$MDiff$	Gemittelte, absolute Differenz zwischen Messwert und Simulationsergebnis	$kg / m^3$ oder $K$
$m_w$	Masse des Wassers	$kg$
$n$	Zählindex	-
$OI3_{Kon}$	Index zur Bewertung der ökologischen Qualität	
$p$	Druck	$Pa$
$pC$	Kapillardruck in logarithmischem Maßstab	$\log Pa$

Symbol	Beschreibung	Einheit
$p_c$	Kapillardruck	Pa
$p_g$	Luftdruck	Pa
$p_{g,0}$	Referenzluftdruck bei 101325 Pascal	Pa
$R_a$	Gaskonstante von Luft	J / (kg·K)
$R_{IDS}$	Wärmewiderstand des Innendämmsystems	m <sup>2</sup> ·K / W
$R_D$	Gaskonstante	J / (kg·K)
$R_v$	Gaskonstante von Wasserdampf	J / (kg·K)
$s$	Dicke	m
$s$	Standardabweichung	kg / m <sup>3</sup> oder K
$s_a$	Dicke der Luftschicht	m
$s_d$	Wasserdampfäquivalente Luftschichtdicke / $s_d$ -Wert	m
$S_i$	Standardabweichung einer Modalität	-
$T$	Temperatur (in Kelvin)	K
$T_e$	Außentemperatur	K
$T_i$	Innentemperatur	K
$TK$	Temperaturkorrekturfaktor	-
$U$	U-Wert	W / (m <sup>2</sup> ·K)
$u$	Massebezogene Holzfeuchte	kg / kg
$u_g$	Spezifische innere Energie der Gasphase	J / m <sup>3</sup>
$u_l$	Spezifische innere Energie der Flüssigphase	J / m <sup>3</sup>
$v$	Absolute Luftfeuchte	kg / m <sup>3</sup>
$V$	Volumen	m <sup>3</sup>
$w$	Wasseraufnahmekoeffizient	kg / (m <sup>2</sup> ·h <sup>0,5</sup> )



## Griechische Symbole

Symbol	Beschreibung	Einheit
$\gamma$	Winkel zwischen Wasseroberfläche und Porenwandung	deg
$\delta_a$	Wasserdampfpermeabilität	kg / (m·h·Pa)
$\Delta P$	Druckdifferenz	Pa
$\Delta P_{mech}$	Druckdifferenz in Folge von mechanischem Druck	Pa
$\varepsilon$	(Langwelliger) Emissionskoeffizient	-
$\eta_{sp}$	Faktor zur Veränderung der Feuchteleitfähigkeit im niedergefeuchten Bereich	-
$\eta_{cap}$	Faktor zur Veränderung der Feuchteleitfähigkeit im gesättigten Bereich	-
$\lambda$	Rechenwert der Wärmeleitfähigkeit	W / (m·K)
$\lambda_{10,dry}$	Wärmeleitfähigkeit des trockenen Materials bei 10°C	W / (m·K)
$\mu$	Wasserdampfdiffusionswiderstandsfaktor / $\mu$ -Wert	-
$\theta$	Temperatur	°C
$\theta$	Wassergehalt	m <sup>3</sup> / m <sup>3</sup>
$\theta_{80}$	Wassergehalt bei 80% relativer Luftfeuchte	m <sup>3</sup> / m <sup>3</sup>
$\theta_{cap}$	Kapillarer Wassergehalt	m <sup>3</sup> / m <sup>3</sup>
$\theta_e$	Außentemperatur	°C
$\theta_{eff}$	Effektiver Wassergehalt	m <sup>3</sup> / m <sup>3</sup>
$\theta_g$	Volumen der Gasphase	m <sup>3</sup> / m <sup>3</sup>
$\theta_i$	Innentemperatur	°C
$\theta_l(p_c)$	Wassergehalt in Abhängigkeit vom Kapillardruck	m <sup>3</sup> / m <sup>3</sup>
$\theta_l(t)$	Zeitabhängiger Wassergehalt der Flüssigphase	m <sup>3</sup> / m <sup>3</sup>
$\theta_{si}$	Innenoberflächentemperatur	°C
$\rho$	Dichte	kg / m <sup>3</sup>
$\rho_{REV}^{ma}$	Luftmassendichte im Referenzvolumen	kg / m <sup>3</sup>
$\rho_{REV}^{m_{l+v+i}}$	Feuchtemassendichte im Referenzvolumen	kg / m <sup>3</sup>
$\rho_{REV}^U$	Innere Energiedichte	W / m <sup>3</sup>
$\rho_g$	Luftdichte	kg / m <sup>3</sup>
$\rho_l$	Dichte von Wasser	kg / m <sup>3</sup>
$\rho_s$	Dichte des Feststoffes	kg / m <sup>3</sup>
$\rho_w$	Dichte von Wasser	kg / m <sup>3</sup>
$\sigma, \sigma_{lg}$	Oberflächenspannung	Pa
$\sigma^2$	Varianz	-
$\sigma_u^Q$	Innere Wärmequellen oder -senken	J / m <sup>3</sup>
$\sigma_{REV}^{ma}$	Innere Luftquellen oder -senken	kg / m <sup>3</sup>
$\sigma_{REV}^{m_{w+v+i}}$	Innere Feuchtequellen oder -senken	kg / m <sup>3</sup>
$\varphi$	Relative Luftfeuchte	- oder %
$\Phi$	Offene Porosität	m <sup>3</sup> / m <sup>3</sup>

---

# 1 Einführung und Motivation

## 1.1 Ausgangssituation / Initial situation

Im Zuge der weltweiten Bestrebungen zur Energieeinsparung kommt der thermischen Ertüchtigung bestehender Bausubstanz besondere Bedeutung zu. Dabei bieten Innendämmungen die technisch sinnvolle Möglichkeit, die Wärmeenergieverluste über bestehende, ggf. denkmalgeschützte Außenwände signifikant zu senken, die behaglichkeitsrelevanten inneren Oberflächentemperaturen zu erhöhen und das Risiko von Schimmelpilzbefall der Wandoberflächen zu reduzieren.

Neben den bereits seit langem bekannten Ausführungen mit innen liegender Dampfbremse oder dampfdichten Dämmstoffen verfolgen neuere, diffusionsoffene Konstruktionen den Ansatz, schädliche Wasserdampfkondensation unter Ausnutzung der hohen Sorptions- und kapillaren Leitfähigkeit der Dämmmaterialien zu vermeiden. Gleichzeitig ermöglichen sie es der Wand, auch weiterhin nach innen auszutrocknen. Durch die kapillaren Eigenschaften weisen sie zusätzlich eine höhere Fehlertoleranz im Vergleich zu diffusionsbremsenden oder -dichten Dämmsystemen auf. Vergleichende, belastbare Daten zu neueren Innendämmsystemen insbesondere im Hinblick auf die Problematik der Holzbalkenköpfe sind rar und gelangen erst neuerdings verstärkt in den Fokus.

Die Wirkmechanismen der diffusionsoffenen Dämmsysteme sind Planern und Handwerkern noch wenig vertraut, weshalb es immer wieder zu Fehlern in der Planung oder Ausführung kommt. Informationsbedarf besteht beispielsweise hinsichtlich der Abdichtung der Auflagertaschen. Andere Fragen kreisen um die Thematik, ob im Bereich zwischen den Deckenbalken gedämmt werden sollte oder nicht, bzw. wie in Regionen mit hoher Schlagregenbeanspruchung vorgegangen werden kann.

Diese Arbeit verfolgt das Ziel, diffusionsoffene Innendämmsysteme produktneutral zu analysieren und den vermeintlich feuchtetechnisch kritischen Anschluss zu Holzbalkendecken weiter zu entwickeln. Da in Zukunft der Nachhaltigkeit von Bausystemen besonderes Augenmerk zu schenken sein wird, kommt auch der ökologischen Unbedenklichkeit der Dämmsysteme besondere Bedeutung zu, welche ebenfalls überprüft wird.

Bei der Bearbeitung konnte besonders auf das Projekt OEKO-ID, aber auch auf dessen Vorgängerprojekte „Grundlegende bauphysikalische und werkstofftechnische Untersuchungen zu aufgespritzten Zellulosedämmschichten mit Putzauflage für Außenfassaden“ (*Mandl et al. (2001)*) sowie „Zellulose-Innendämmung ohne Dampfsperre“ zurückgegriffen werden (*Kautsch et al. (2006)*). Die Projekte wurden im Rahmen der Programmlinie „Haus der Zukunft“ durchgeführt.

- - -

In the course of worldwide efforts to save energy upgrading of thermal insulation in existing buildings plays a major role. Internal insulation offers a technically meaningful possibility of reducing the thermal energy losses of existing, possibly listed exterior walls significantly, increasing the internal surface temperatures contributing to user's comfort and reducing the risk of mould formation on the surface of walls.

In addition to the designs with internal vapour barriers or vapour-tight insulating materials that have been known for a long time, newer, diffusion-open designs follow the approach of avoiding harmful water vapour condensation by making use of the high sorption and capillary conductivity of the insulating materials. Due to their capillary properties, they also exhibit a higher fault tolerance compared to diffusion-impeding or diffusion-tight insulation systems. Comparative, reliable data on newer interior insulation systems, especially with regard to the problem of wooden joist ends, are scarce and have only recently come into the picture.

The mechanisms of action of diffusion-open insulation systems are still little known to planners and craftsmen, which is why mistakes in planning or execution have repeatedly occurred. There is a need for information, for example, regarding the sealing of the joist bearings. Other questions revolve around the topic of whether insulation should be provided in the area between the ceiling joists or not, or how to proceed in regions with high driving rain loads.

The aim of this work is to analyse diffusion-open interior insulation systems in a product-neutral way and to further develop the (supposedly) most critical moisture connection of external walls and wooden beam ceilings. The sustainability of building systems becomes increasingly important in the future. The ecological harmlessness of the insulation systems will also be of particular importance, which will be reviewed in this work.

The OEKO-ID project and its predecessor projects „Grundlegende bauphysikalische und werkstofftechnische Untersuchungen zu aufgespritzten Zellschichten mit Putzauftrag für Außenfassaden“ (*Mandl et al. (2001)*) as well as „Zellulose-Innendämmung ohne Dampfsperre“ could be used as a basis for processing (*Kautsch et al. (2006)*). The projects were carried out within the framework of the „Haus der Zukunft“ research programme.

## **1.2 Zielsetzung / Aim**

Der Bauteilanschluss von Innendämmung und Holzbalkenaufleger ist häufig Gegenstand von Fachdiskussionen. Ziel dieser Arbeit und des Projektes OEKO-ID ist neben der grundlegenden Analyse und Weiterentwicklung des tendenziell problematischen Bauteilanschlusses die produktneutrale Beurteilung der Verwendung von ökologisch unbedenklicheren Baustoffen.

Die für organische Baumaterialien unter Umständen kritischen Feuchtigkeitsbelastungen wurden durch hygrothermische Vor-Ort-Messungen an einem denkmalgeschützten ehemaligen Sanatorium in Graz-Mariagrün über den Zeitraum von drei Kondensations- und Austrocknungsperioden erhoben. Für die Bewertung aller Dämmmaßnahmen standen detaillierte Messdaten von fünf Dämmsystemen und sieben gedämmten Holzbalkenauflägern zur Verfügung, sowie einem ungedämmten Holzbalkenaufleger.

Weiters sollen die Möglichkeiten und Grenzen des Einsatzes hygrothermischer Simulationsberechnungen untersucht werden, um die Auswirkungen zukünftiger, ähnlich gestalteter Innendämmmaßnahmen ohne aufwändige Messungen verlässlich beurteilen zu können. Die Verbreitung dieser anspruchsvollen Vorgehensweise zur Planung von Dämmmaßnahmen kann so unterstützt werden.

Als Ergebnis der Arbeit sollen sowohl konstruktive Empfehlungen für den feuchtetechnischen Anschluss gegeben werden, als auch eine Hilfestellung bei der computertechnischen Vorgehensweise der Detailplanung angeboten werden.

- - -

The component connection of internal insulation and joist bearing is often the subject of debate among experts. The aim of this work and the project OEKO-ID is the fundamental analysis and further development of this potentially critical connection and the product-neutral evaluation of the usage of more sustainable building materials.

Moisture loads which are critical in some circumstances for organic building materials were determined by on-site hygrothermal measurements over a span of three condensation and drying periods. The test building was a heritage protected former sanatorium in Graz-Mariagrün. For the evaluation of all insulation measures, detailed measurement data of five insulation systems and seven insulated joist bearings as well as one non-insulated joist bearing were studied.

Furthermore, the possibilities and limitations of the usage of hygrothermal simulation tools are to be investigated in order to reliably assess the effects of similarly designed internal insulation measures in the future without extensive measurements. The dissemination of this sophisticated approach for the planning of insulation measures can thus be supported.

As a result of the work, both constructive recommendations for the humidity-technical connection, as well as, assistance with the detailed planning of the computer-technical procedure are to be offered.

### 1.3 Vorgehen und Abgrenzung

Die vorliegende Dissertation baut direkt auf den Arbeiten des Projektes „*OEKO-ID - Innendämmungen zur thermischen Gebäudeertüchtigung, Untersuchung der Möglichkeiten und Grenzen ökologischer, diffusionsoffener Dämmsysteme*“ auf (Kautsch et al. (2013)). Dieses wurde im Rahmen der Programmlinie „*Neue Energien 2020*“ vom Klima- und Energiefonds, von der Steiermärkischen Landesregierung sowie vom Bundesministerium für Unterricht, Kunst und Kultur kofinanziert und umfasste folgende Arbeitspakete:

AP 1        Literaturrecherche, Ökologische Bewertung und Auswahl Dämmsysteme  
(siehe Abschnitte 2, 3.2 und 3.8 bis 3.9)

- AP 2 Planung Versuchsgebäude und Konzeption Messtechnik (siehe Abschnitt 3.1 und 3.5)
- AP 3 Adaptierung Versuchsgebäude (siehe Abschnitt 3.3 und 3.4)
- AP 4 Installation Messtechnik und Applikation Dämmsysteme (siehe Abschnitte 3.5 und 3.6)
- AP 5 Betrieb Versuchsgebäude und hygrothermische Messungen (siehe Abschnitt 5)
- AP 6 Bestimmung Materialkennwerte (siehe Abschnitt 4)
- AP 7 Hygrothermische Simulationsberechnungen (siehe Abschnitt 6)
- AP 8 Mikrobiologische Untersuchungen und Methodenentwicklung (nicht dargestellt, siehe z. B. *Ettenuer et al. (2012)*)
- AP 9 Dissemination (siehe Abschnitt A 5)
- AP 10 Projektsteuerung und Berichtswesen (nicht dargestellt)

Das Arbeitspaket 8 wurde nicht vom Verfasser bearbeitet und ist deshalb hier nicht enthalten. Die Teile der ökologischen Bewertung (AP 1), die nicht vom Verfasser verfasst wurden, sind in dieser Arbeit gekennzeichnet. Die Erläuterungen zur Materialmessung und -charakterisierung aus Arbeitspaket 4 wurde in *Kautsch et al. (2013)* maßgeblich von Dr. Rudolf Plagge verfasst; darauf beruhen die in der vorliegenden Arbeit enthaltenen Ausführungen, wurden allerdings stark verändert.

## 2 Literaturüberblick

### 2.1 Balkenaufleger und Innendämmung in der Vergangenheit

In der Literatur und Planungspraxis wird häufig auf die Herausforderungen hingewiesen, welche die Innendämmung an Planung und Ausführung stellt. Die eingehende Auseinandersetzung mit Balkenauflagern reicht sehr weit zurück, zunächst indessen ohne die Betrachtung von Innendämmungen. In „*Der Praktische Zimmermann*“ von *Promnitz (1870)* wurde empfohlen, das Mauerwerk um das Balkenaufleger mit Lehm- statt Kalkmörtel zu vermörteln. *Promnitz (1870)* ging von einem höheren, hygri-schen Puffervermögen von Lehmputz aus, der ein günstigeres Umfeld für die Balkenköpfe erzeugen sollte. Die sorptiven Eigenschaften von Lehm sind nicht der Grund, dass *Wegener (1894)* nahelegte, für die Deckenschüttung Sand oder Lehm statt Bauschutt zu verwenden, sondern vielmehr die Angst, dass der *Echte Hauschwamm (Serpula lacrymans)* im Bauschutt noch aktiv sein könnte. Auch *Stade (1904)* beschäftigte sich ausführlich mit Holzbalkenköpfen und riet zu einer Luftumspülung, bei der um die Holzbalken eine „*isolierende Luftschicht ... vorteilhaft mit der inneren Luft im Gebäude und der Aussenluft in Verbindung, Cirkulation gebracht wird durch Anordnung entsprechender Kanäle*“. *Wirkner (1949)* nennt diesen Verbindungskanal zwischen Balkentasche und Außenluft „*Spatzenloch*“. Durchgesetzt hat es sich nicht.

Nicht nur *Stade (1904)* oder *Promnitz (1870)* rieten davon ab, die Balkenköpfe durch dichtes „*Umkleiden desselben mit Lehm, Dachpappe u.s.w. ...*“ vermeintlich zu schützen. Trotzdem sind immer wieder, auch in neuerer Literatur, gegenteilige Empfehlungen zu sehen. *Schmitz et al. (1989)* schlagen als eine „*Lösungsmöglichkeit*“ eine um den Balkenkopf gelegte Bitumenbahn vor, was, mit oder ohne Innendämmung, eher als Problemstellung bezeichnet werden müsste (Bild 1).

#### 4.1.1 Übersicht über Lösungsmöglichkeiten

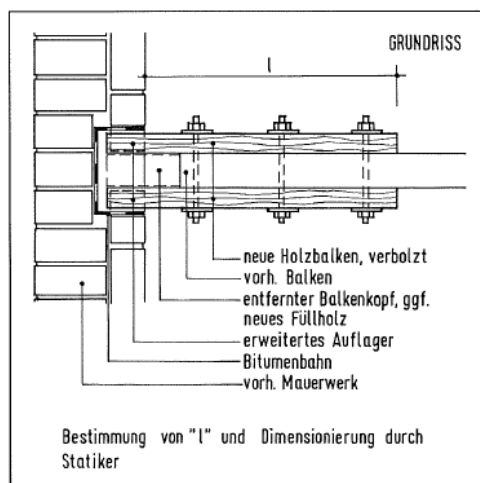


Bild 1 Beispiel einer fragwürdigen Detaillösung für Balkenaufleger aus *Schmitz et al. (1989)*

Feuchtwarme Raumluft, die über Undichtigkeiten in die Decke eindringt und entlang der Deckenbalken streicht, kann dort von den Balkenköpfen nicht in das Mauerwerk entweichen und akkumuliert am kälteren Stirnholz. In der Folge kann der Balkenkopf in Mitleidenschaft gezogen werden. Der Vorschlag aus Bild 1 ist auch noch in der 6. Auflage von *Böhning et Schmitz (2011)* zu finden.

Innendämmung ist keine Erfindung der letzten Jahrzehnte (*Eicke-Henning (2011)*). Schon vor über 100 Jahren wurden Dämmplatten, häufig so genannte „*Sauerkrautplatten*“, auf Innenwänden angebracht, jedoch in geringer Dicke und mit niedrigem Wärmewiderstand. In *Ahnert et Krause (2009)* sind solche historischen Wandaufbauten und einige baukonstruktive Varianten von Balkenauflagern enthalten.

Zu Zeiten der anfangs genannten Veröffentlichungen existierte noch nicht die Verunsicherung, die durch das Aufkommen vermehrter Innendämmmaßnahmen entstand. Aus der Perspektive der meisten Planer und Ingenieure schienen für eine Innendämmung bis in die gegenwärtige Dekade hinein nur zwei Dämmsysteme zur Verfügung zu stehen: entweder Mineralwolle zwischen einer Ständerkonstruktion und mit vorgesetzter Dampfbremse und Gipskartonplatten oder expandierten Polystyrol-(EPS-)Dämmplatten. Beides sind fehleranfällige Konstruktionen, die bei fehlender Luftdichtheit zu großflächigen Schimmelpilzschäden und zu Holzzerstörung hinter der Dämmung führten und so für den (ehemals) schlechten Ruf der Innendämmung verantwortlich zeichnen. Womöglich sind solche Schäden der Grund, weshalb selbst in einigen größeren Kompendien zur Altbausanierung das Thema der Innendämmung, und damit auch der Balkenköpfe selbst, gemieden bzw. nicht behandelt wurde bzw. wird (z. B. *Fechner et al. (2002)*).

Lange Zeit vorherrschend war eine Haltung wie in *Schneider et al. (2005)* in dem Bericht „*AL-Tes Haus*“ formuliert. Darin heißt es, eine „*innen liegende Wärmedämmung ... schafft neue Probleme (Durchfeuchtung der Balkenköpfe der Holzdecken)*. Für gründerzeitliche Zweckbauten ist sie daher abzulehnen.“ Und *Künzel (2004)* schrieb ungefähr zur selben Zeit: „*Leider lassen sich zur Feuchteproblematik der Holzbalkenköpfe im Altbau bislang keine befriedigenden Aussagen machen*.“ Dass sich diese einstmals verbreitete Meinung zu verändern begann, hat mehrere Gründe:

1. Viele Forschungsprojekte mit Testhäusern und Prüfständen vermittelten Kenntnisse über die physikalischen Vorgänge. Die Projekte befassten sich zunächst nur mit den Innendämmsystemen selber, später zunehmend auch mit Balkenauflagern.
2. Die Verwendung fehlertoleranter Dämmsysteme, d. h. diffusionsoffener, kapillar gut leitfähiger Innendämmsysteme.
3. Es wurden leistungsfähige Softwarewerkzeuge (weiter-)entwickelt, die auch für Planungsbüros handhabbar sind.
4. Durch den Austausch von Theorie und Praxis verfügen Planer wie Ausführende über mehr Erfahrung und Wissen und wiederholen nicht alte Fehler.

Die Erkenntnisse aus den diversen Forschungsprojekten sowie Praxiserfahrungen wurden über Artikel und Vorträge verbreitet, sodass schließlich die Meinung in *Schneider et al. (2010)*



wohlwollender ausfällt: „Aufgrund der sehr positiven Erfahrungen bei Demonstrationsprojekten in Deutschland und Österreich, ist die Möglichkeit des Anbringens einer Innendämmung bei historischen Gebäuden eine mittlerweile sehr häufig diskutierte Fragestellung“.

In der gegenwärtigen Dekade nahm die Anzahl der Veröffentlichungen und Vorträge zu Balkenköpfen sprunghaft zu. Dies liegt unter anderem an mehreren, größeren Forschungsprojekten und den daraus resultierenden Fachartikeln: Neben *Kautsch et al. (2013)*, welches in dieser Arbeit ausführlich beschrieben wird, waren das *EnBewe (2017)* und *RIBuild (2019)*. Doch nicht nur der bessere Wissenstand führte zu einer vermehrten Anwendung von Innendämmung, sie hängt auch mit den höheren Forderungen seitens der Gesetzgebung, auch im Altbaubereich, zusammen, einem gestiegenen Umweltbewusstsein und nicht zuletzt einigen Fördermaßnahmen, die an höhere Wärmedämmstandards geknüpft waren bzw. sind.

## 2.2 Testhäuser mit Innendämmung

Der Einsatz und die Wirkungsweise von diffusionsoffenen, kapillar hoch leitfähigen Materialien als Innendämmung wurde zunächst nur an der TU Dresden im Verbund mit der FH Cottbus - Senftenberg untersucht (*Fechner et al. (1996)*). In Zusammenarbeit mit Materialherstellern konnten dann verschiedene Innendämmmaterialien entwickelt bzw. weiterentwickelt werden (*Plagge et al. (2003)* und *Grunewald et al. (2003)*). Komplementäre Softwareprogramme, die den gekoppelten Transport von Wärme und Feuchte berücksichtigen, entstanden in verschiedener Form (*Häupl et al. (1988)*, *Künzel (1994)* und *Grunewald (1997)*). Für den Nachweis der Praxistauglichkeit war jedoch der Einsatz von Innendämmung in Testhäusern notwendig. *Finkenstein (2003)* trägt die Messergebnisse aus einigen Projekten der 90er-Jahre zusammen, in denen im Zusammenhang mit Innendämmmaßnahmen auch Holzbalkenköpfe überwacht worden waren.



Bild 2 Testhaus der TU Dresden und FH Cottbus-Senftenberg

Auch in anderen Nationen wurde die Problematik erkannt und vereinzelt untersucht. In Dänemark befassten sich *Krebs et Collet (1981)* schon früher als im deutschsprachigen Raum mit

30 Balkenköpfen in innen gedämmten Gebäuden. Das ist eine Größenordnung, die in aktuellen Projekten selten übertroffen wird. *Krebs et Collet (1981)* befanden, dass Schlagregen keine nennenswerten Auswirkungen auf die Holzbalken einer mit 150 mm, kapillar nicht leitfähiger Innendämmung versehenen Außenwand hatten. Das ist eine Aussage, die man ohne die genaueren inhaltlichen Zusammenhänge öffentlich nicht äußern sollte.

Für viele Jahre blieb das die einzige Veröffentlichung zu dieser Fragestellung. Mit der zunehmenden Verbreitung der Innendämmung in der vergangenen Dekade kam es im deutschsprachigen Raum häufiger zu Projekten und Testhäusern. Den Zusammenhang zwischen Innendämmung und Holzbalkendecken griffen neben einigen anderen auch *Gnoth et al. (2005)* und *Loga et al. (2003)* auf und konstatierten den untersuchten Innendämmkonstruktionen in Bezug auf den Balkenkopf ein unkritisches Verhalten. Allerdings war bei den Projekten bis ungefähr 2005 der Wärmewiderstand der Dämmschichten in der Regel gering. Selbst ein Wärmewiderstand von 1,5 m<sup>2</sup>·K/W wurde nur sehr selten erreicht. Zudem befassten sich die Testhausprojekte dieser Zeit in der Regel mit der Messung weniger Holzbalkenköpfe mit nur einem Innendämmsystem (z. B. *Silberhorn (2010)*).

Mittlerweile gibt es eine Vielzahl von historischen, innen gedämmten Gebäuden mit Holzbalkendecken unter messtechnischer Überwachung. In *Kehl (2014)*, *Ottinger et al. (2015)* oder *Staar (2018)* werden viele vorgestellt. Das europäische Verbundprojekt *RIBuild (2019)* mit einer Vielzahl von Messstrecken in verschiedenen Ländern Europas findet voraussichtlich noch 2019 seinen Abschluss.

Zu Beginn der jeweils beschriebenen Messungen wurde häufiger ein kritisch hoher Feuchtegehalt im Holz verzeichnet, der meistens auf eine Durchfeuchtung während der vorherigen (Nicht-)Nutzung der Gebäude oder Einbaufeuchte der Dämmung zurückzuführen war. Nachdem im Zuge der baulichen Sanierung und Einrichtung der Messstellen die verschiedenen Ursachen der Durchfeuchtung beseitigt worden waren, trockneten diese Balken in der Regel langsam aber stetig bis auf ein unkritisches Maß aus. Spezielle Trocknungsmaßnahmen werden jeweils nicht erwähnt. In den wenigen, aufschlussreichen Fällen, in denen die Holzfeuchte schon vor Einbau der Innendämmung gemessen worden war (*EnBewe (2017)*), wurde nur eine unwesentliche Erhöhung in Folge von Einbaufeuchte konstatiert. Ausgenommen seien hiervon die Innendämmsysteme mit besonders hoher Einbaufeuchte, wie Wärmedämmputz oder -stampflehm.

Insgesamt konnte nur in sehr wenigen Fällen von länger andauernder, kritischer Holzfeuchte berichtet werden, bei denen nicht auszuschließen war, dass die Innendämmung mitursächlich war und innerhalb dieser Forschungsprojekte waren in der Regel nur einzelne Balken betroffen. In *Hasper et al. (2011)* beispielsweise waren bei zwei Balken über einen längeren Zeitraum kritische Holzfeuchten festgestellt worden. Das Innendämmsystem in Form von 80 mm aufgesprühter Zellulose hatte aber in *Kautsch et al. (2006)* und *Kautsch et al. (2013)* zu keinen Problemen geführt. Trotz einer Hydrophobierung und, laut der dort gültigen Norm *DIN 4108-3*, geringer Schlagregenbeanspruchung trockneten die beiden betroffenen Balken aus *Hasper*

*et al. (2011)* innerhalb des Messzeitraums (nur ein Jahr) nicht ab. Dafür kommen mehrere Gründe in Betracht:

- Die Balken mit dem umgebenden Mauerwerk waren schon vor der Sanierungsmaßnahme viel zu feucht, möglicherweise war eine Feuchtequelle nicht beseitigt worden.
- Die Dicke des Mauerwerks betrug nur 0,24 m, weshalb die Holzbalken, im Vergleich zu den oft dickeren Außenwänden, in einem kälteren Bereich ruhen.
- Die Hydrophobierung war nicht auf das Sichtmauerwerk abgestimmt worden. Bei nicht abgestimmter Hydrophobierung kann es vorkommen, dass sie unwirksam bleibt (*Heinze et al. (2011)*).
- Die Räume wurden nicht durchgehend genutzt, so waren immer wieder Raumtemperaturen von nur 10°C bei hohen Luftfeuchten vorgekommen. Auf Dauer führt dies zu einem höheren Feuchteniveau.

Nach Meinung des Verfassers könnte auch die ausgesprochen dichte Bitumen-Abdichtung der Balkenaufleger dazu beigetragen haben. Sie war in zwei Ebenen, hinter und vor der Innendämmebene, angebracht worden. So verhindert die Abdichtung zwar ein Eindringen der Feuchte aus dem Innenraum, überhöhte Feuchte, die sich noch im Mauerwerk und der Auflagertasche befindet, sowie über das dünne Mauerwerk eindringender Schlagregen, kann jedoch auch nicht nach innen austrocknen. Auf diese sehr gründliche Art der Abdichtung wird noch etwas später eingegangen.

Von einer ungewöhnlichen Lösung mit negativem Ausgang berichten *Dumont et al. (2005)*. In einem Gebäude in Kanada wurden Polyurethan-(PUR-)Innendämmplatten verwendet, das Auflager wurde mit PUR-„Bauschaum“ ausgeschäumt, was der nordamerikanischen Dämmkultur zu entsprechen scheint. Trotzdem, oder gerade deswegen, kam es bei vielen Balkenköpfen in *Dumont et al. (2005)* zu über 20 Masseprozent im Holz. Als Ursache werden aufsteigende Feuchte oder eindringender Schlagregen vermutet. *Straube et Schumacher (2007)* empfehlen das Ausschäumen von Balkenauflagern. Die praktische Vorgehensweise wird beispielsweise in einem „*Bauschaum-Tutorial (2019)*“ vermittelt.



Bild 3 Ausschnitt aus einem Video zur Abdichtung von Balkenköpfen mit PUR-Bauschaum („*Bauschaum-Tutorial (2019)*“)

*Ueno et al. (2013)* machen einige Jahre später in einem größeren Projekt eine vergleichbare Erfahrung. Im Winter 2012/13 wurden im Rahmen einer Sanierung in Lawrence (Massachus-

etts, USA) viele Holzbalken mit aufwändiger Messtechnik untersucht. Die Innendämmung bestand aus drei 50 mm dicken Lagen extrudierter Polystyrol-(XPS-)Dämmung, der Balkenauflagerbereich wurde wieder mit PUR-Bauschaum ausgeschäumt. In der Messperiode von etwas über zwei Jahren zeigten viele Balkenköpfe beständig einen Wassergehalt von über 20 bzw. zum Teil sogar konstant über 30 Masseprozent. Eine Ursache für die hohe Feuchte lag in den nur sehr sporadisch beheizten Räumen, befanden *Ueno et al. (2013)*. Dass die Balken trotz der kritisch hohen Feuchte keinen Schaden nahmen, wurde mit der guten Qualität der ca. 100 Jahre alten Hölzer begründet. Die Holzart war leider nicht angegeben. Nach dem ersten halben Jahr dieser Messungen hatten *Ueno et al. (2013)* berichtet, dass Balkenköpfe in Auflagern, die während der Messungen abgedichtet wurden, eindeutig feuchter wurden und stellen deshalb die Notwendigkeit der Abdichtung von Balkenauflagern in Frage. In *Ueno (2015)* wird diese Aussage dann relativiert, da sich die Feuchtegehalte in den verschiedenen Balken angeglichen hatten. Daraus wird der Schluss gezogen, dass eine Abdichtung keinen nennenswerten Effekt habe, andere Einflüsse wie die geographische Ausrichtung oder höhere Raumtemperaturen seien wichtiger. Der Einfluss der Dicke und der Art der (diffusionshemmenden) Dämmung wurde in diesem Projekt nicht hinterfragt. Die Messergebnisse und Schlussfolgerungen von *Ueno et al. (2013)* bzw. *Ueno (2015)* decken sich damit nicht mit vielfach geteilten Meinungen in Europa. Ein anderes, interessantes Ergebnis am Rande war, dass die oberen Sensoren in den Balkenköpfen eindeutig trockener waren als die unteren. Als Gründe wurden die Nähe bzw. der Kontakt zum Mauerwerk, die größere, luftumspülte Fläche und die Schwerkraft genannt. Nur der letztere Grund erscheint dem Verfasser wenig plausibel, da die Kräfte in den Kapillaren von Hölzern viel größer sind als die Schwerkraft. Dem entgegengesetzt wird der Verfasser immer wieder mit Balkenköpfen konfrontiert, die an der oberen, nicht der unteren Außenecke stärker geschädigt sind (Bild 4).



Bild 4 Balkenkopf mit Schadensbild, das an der oberen Außenecke deutlich ausgeprägter ist

## 2.3 Labor-Prüfstände

Vielversprechende Laborversuche unter kontrollierten Klimabedingungen wie in *Guizzardi et al. (2013)*, *Johansson et al. (2014)*, *Vereecken et Roels (2017)*, *Peper et al. (2013)* oder *EnBewe (2017)*, ermutigen zur Verwendung von Innendämmung trotz, oder besser, auch bei Holzbalkendecken. Vereinfachte, konstruktiv idealisierte Versuchsaufbauten unter vergleichsweise konstanten Klimabedingungen oder kurze Messperioden lassen eine Übertragbarkeit auf reale Verhältnisse zwar nur eingeschränkt zu, immerhin können sie belastbare Hinweise für die Praktikabilität im Alltag liefern. Leider ließen die Laborversuche in *Johansson et al. (2014)* mit Vakuum-Isolations-Paneelen (VIP) wegen Problemen mit der Messtechnik wenig Aussagen zu, sehr interessant war jedoch zu sehen, dass eine ausgeprägte thermische Entkopplung der Balken vom warmen Raumklima eine weitaus höhere Holzfeuchte nach sich zog. Dies ist beispielsweise bei Decken der Fall, die auf der Unterseite aus Schallschutzgründen gedämmt sind, und auf der Oberseite eine Trittschalldämmung aufweisen.

In einem der drei Teststände aus dem Projekt *EnBewe (2017)* wurden sechs Balken mit drei Innendämmsystemen untersucht. Selbst nach einer deutlichen Befeuchtung der Raumluft waren maximal 18 Masseprozent (M%) aufgetreten. In dem Projekt ließ sich ebenfalls bestätigen, dass diffusionshemmende Dämmsysteme mit geringen kapillaren Eigenschaften längere Austrocknungsphasen benötigen, als diffusionsoffene, kapillar gut leitfähige. Anhand eines Vergleichs von zwei Balken eines besonders kapillar leitfähigen Dämmsystems wurde ferner festgestellt, dass eine Abdichtung auf zwei Ebenen in Form eines Putzanschlussklebebandes und vorkomprimierten Dichtungsbandes nicht notwendig ist und somit eine Abdichtungsebene genügt (Bild 5). Darüber hinaus diente dieser Laborversuchsstand der Validierung der hygrothermischen Software.



Bild 5 Zwei Abdichtungssysteme und –ebenen an einem Balken: Putzanschlussklebeband und vorkomprimiertes Dichtungsband



Einen realistischeren Prüfstand entwickelten *Kopecky et al. (2017)*, welche die untersuchten Deckenbalken im Prüfstand in einen üblichen Deckenaufbau integriert hatten. Auf die Ergebnisse dieser Labormessungen wird in Kapitel 2.5 näher eingegangen.

## 2.4 Mögliche Schadensursachen

Nahezu alle Veröffentlichungen weisen übereinstimmend darauf hin, dass die Schlagregenexposition und im Besonderen die Wasseraufnahme über die Außenoberfläche ein entscheidender Faktor für die Entstehung von Holzschäden in Balkenauflagern darstellt, z. B. in *Arnold (2016)*, *Christensen et Bunch-Nielsen (2009)*, *Strangfeld et al. (2007)*, *FV Innendämmung (2016)* oder *Oswald et al. (2011)*. Deshalb nimmt die Einordnung der Schlagregenbelastung immer einen hohen Stellenwert bei den Planungsgrundsätzen ein. Mit welchen Maßnahmen die aufgenommene Schlagregenmenge reduziert werden kann, wie z. B. in *Plagge et Heinze (2016)* oder *Ruisinger (2018)* erläutert, wird oft nicht behandelt.

Weitere, in der Baupraxis häufig vorkommende Ursachen für Schäden an Holzbalkenköpfen zählt das *WTA-MB 8-14* auf: insbesondere Mauerwerksanker, Salze, aufsteigende Feuchte, diffusionshemmendes/-dichtes Einpacken der Balkenköpfe, ungeeignete Dämmmaßnahmen, und Havarien werden genannt. In den Testhäusern war die Ursache von hoher Holzfeuchte häufig bei den baulichen Gegebenheiten zu suchen, so in dem Testhaus in *EnBewe (2017)* in einem defekten Fallrohr. In der praktischen Erfahrung des Verfassers haben sich diffusionsbremsende Dämmsysteme mit sehr hoher Einbaufeuchte und geringen kapillaren Eigenschaften als schadensträchtig herausgestellt. In einem Schadensfall in einem Fachwerkhaus war ein solches Dämmsystem zusätzlich in sehr großer Dicke und im Herbst angebracht worden, sodass die Holzbalken rasch auffeuchteten und nur ausgesprochen langsam abtrockneten. Dies war letztlich einer nicht fachgerechten Projektierung geschuldet (*Ruisinger (2015)*). Dem Verfasser ist kein Schadensfall im Zusammenhang mit kapillar wirksamer Innendämmung bekannt, dem eine sorgfältige Planung und Ausführung vorausgegangen war.

## 2.5 Luftdicht oder nicht luftdicht anschließen?

Die aus den Untersuchungen erwachsenen Empfehlungen sind divers und zum Teil sehr aufwändig in der Ausführung. In dem übergeordneten Bestreben, eine möglichst luftdichte Gebäudehülle zu erzielen, legen der *AkkPassiv (2005)*, *Peper et al. (2013)* oder, in regionaler Nähe zu den vorgenannten, *HessMin (2006)*, arbeitsintensive Abdichtungsmaßnahmen mit Schaumglas und Bitumen oder Dispersionsanstrichen nahe. Darin wird unter anderem empfohlen, den Deckenbalken auf bis zu 0,5 m Länge mit Bitumen abzudichten. Als Erklärung werden zwei Gründe angeführt: zum einen sollen die konvektiven Energieverluste reduziert, am besten unterbunden werden. Zum anderen wird argumentiert, dass durch den möglichen konvektiven Feuchteintrag die Wahrscheinlichkeit eines Bauschadens in Form von Holzzerstörung stark ansteigen würde (*AkkPassiv (2005)*).

Bei den Untersuchungen stand nicht im Vordergrund, mit welcher Wahrscheinlichkeit oder in welchem Ausmaß tatsächlich ein Schaden entstehen könnte, sondern vielmehr, den Balkenanschluss möglichst luftdicht auszuführen. Der Schadenseintritt bei nicht luftdichtem Anschluss scheint als Prämisse nicht hinterfragt worden zu sein. *Ueno (2015)* hatte in dieser Frage eine indifferente Haltung eingenommen. *Vereecken et Roels (2017)* pflichten einer luftdichten Abdichtung prinzipiell bei. Deren Schlussfolgerungen beruhen, wie auch schon in *Pepper et al. (2013)*, auf Untersuchungen in Laborprüfständen mit idealisierten Balkenköpfen ohne Deckenaufbau. In *Vereecken et Roels (2017)* war eine Hälfte der Auflager durch eine luftdichte Folie oder, realitätsnäher, durch PUR-„Bauschaum“ abgedichtet worden. In zwei der drei nicht abgedichteten Auflager war die Luftfeuchte (viel) höher. Leider wird nicht diskutiert, warum bei diesen Versuchen ausgerechnet bei einer EPS-Dämmung kein Unterschied zwischen einem abgedichteten und einem nicht-abgedichteten Auflager festgestellt wurde oder welchen Einfluss ein gewöhnlicher Deckenaufbau hätte. Eine spätere, ausgesprochen gründliche Untersuchung in demselben Teststand beschreibt detailliert die hygrothermischen und konvektiven Vorgänge in den Balkenauflagern des Prüfstandes (*Vereecken et Roels (2019)*). Durch die unvergleichlich hohe Dichte an Messsensoren lassen sich die ablaufenden Prozesse sehr gut nachvollziehen. Die Schlussfolgerungen sind allerdings aus Sicht des Verfassers problematisch. Ein sehr sorgfältig abgedichtetes Auflager mit Mineralwolle-Dämmung wies die niedrigsten Feuchte-Messwerte auf, ähnlich gut schnitt eine Dämmung mit EPS-Platten ab. Die höchsten Messwerte im Stirnholz der Deckenbalken verzeichnete ein Feld mit Calciumsilikat-Dämmplatten. Belegt durch die gut dokumentierten Ergebnisse werden so indirekt diffusionsbremsende Dämmsysteme mit Mineralfaser- oder EPS-Platten empfohlen. Dabei werden wichtige Aspekte außer Acht gelassen. Wie oben schon erwähnt, kommen die in jeder Hinsicht idealisierten Bedingungen des Laborprüfstandes in der Realität nicht vor. Durch die Deckenbekleidungen wird der größte (negative) Einflussfaktor, die Konvektion infolge von Luftdruckdifferenzen, entscheidend abgedämpft (*Kopecky et al. (2017)*). Der praktischen Probleme hinsichtlich der Ausführungsqualität werden gar nicht erwähnt, denn in der hektischen, täglichen Baupraxis werden die Abdichtungs- und Dämmarbeiten in der erforderlichen Ausführungsqualität oft nicht ausgeführt. Bei nicht fachgerechter Ausführung verfügen die beiden diffusionsbremsenden bzw. -hemmenden Systeme über keine Fehlertoleranz. Calciumsilikatplatten oder ähnliche Dämmsysteme dagegen schon, durch ihre hohe Flüssigwasserleitfähigkeit, höhere Feuchtespeicherfähigkeit und durch den geringeren Trocknungswiderstand. Das gleiche trifft zu für den Fall eines nicht ausreichenden Schlagregenschutzes, bei dem zu viel Niederschlag in die Konstruktion eindringt, der durch die mineralischen Dämmsysteme besser kompensiert werden kann.

Gestützt auf wärme-, feuchte- und luftgekoppelte Simulationen äußern auch *Wegerer et al. (2012)* die Meinung, dass Konstruktionen mit Dampfbremsen schon bei kleinsten Luftundichtigkeiten versagen können. Während es sich bei *Wegerer et al. (2012)* noch um wenige, stationäre Simulationen handelte, ermöglichte es die Weiterentwicklung des verwendeten Tools in *Wegerer et al. (2017)*, das Detail auch instationär zu betrachten. Die Simulationsergebnisse

unterstützen die geäußerten Thesen der Verfasser, welche bei nicht luftdichter Erstellung und hoher Raumlufffeuchte sehr deutliche Schäden befürchten. Für eine tiefergehende Diskussion entziehen sich die Ansätze der Simulation, wie in einigen anderen Beiträgen auch, leider einer Bewertung, da sich viele entscheidende Simulationseinstellungen der Veröffentlichung nicht entnehmen lassen.

Im Vergleich zu praktischen Erfahrungen in Testhäusern ohne luftdichten Anschluss sind die geäußerten Befürchtungen jedoch zu drastisch. Zunächst scheinen auch *Kopecky et al. (2017)* diese Befürchtungen zu bestätigen: Sie legen anhand von drei verschiedenen Dämmsystemen und mehreren Abdichtungsvarianten in ihrem Laborprüfstand dar, dass ein nicht abgedichtetes Auflager mit einem ca. 20 mm breiten Luftspalt um den Balken schnell auffeuchtet und die Bedingungen für Schimmelpilzwachstum gegeben sind. Wie auch in *EnBewe (2017)* und später hier gezeigt, stellen *Kopecky et al. (2017)* aber ebenfalls fest, dass trotz hoher Luftfeuchte im Balkenaufleger, die Holzfeuchte nur äußerst verzögert nachzieht und auch bei mehrwöchiger hoher Luftfeuchte noch nicht kritisch wird. Gleichwohl blieb ein anderes, nicht abgedichtetes Auflager mit Vakuuminisulationspaneelen (VIP) praktisch genauso trocken wie ein vergleichbares, abgedichtetes Auflager. Bei dem nicht abgedichteten Auflager waren die VIP-Dämmung und der Putz lediglich ohne Fuge bis an die Balkenoberflächen geführt worden, d. h. sie stießen stumpf auf allen vier Seiten am Balken an. Nach Meinung des Verfassers ist in dieser, wie auch einigen anderen Veröffentlichungen, die Fixierung auf Schimmelpilzwachstum im Balkenaufleger kein wichtiger Beurteilungsfaktor, insbesondere bei abgedichteten Auflagern (s. Thema Abschottung in *UBA (2017)*). Viel entscheidender ist die Holzfeuchte. Leider brechen die aufschlussreichen Messungen im Januar 2017, dem Zeitpunkt der Veröffentlichung, ab. Die weitere Entwicklung verspricht interessant zu werden, wobei den Messungen mehr Regen zu wünschen wäre.



Bild 6 Ein Balkenaufleger mit vorkomprimiertem Dichtungsband, das in der Ecke zusätzlich abgedichtet wurde



Das *WTA-MB 8-14*, welches später erläutert wird, nimmt einen weniger strikten Standpunkt ein. Darin werden aufwändige Abdichtungsmaßnahmen als nicht notwendig erachtet bezüglich der Sicherheit vor Bauschäden, eine „*konvektionshemmende*“ Ausbildung sei ausreichend (Bild 6).

Doch es gibt auch die entgegen gesetzte Meinung, überwiegend in der Praxis. Aufgrund ihrer Untersuchungen, die nicht innen gedämmte Konstruktionen zum Gegenstand hatten, befürwortet *Hofmeister (1995)* die Luftumspülung von Balkenköpfen. Auch heute noch vertritt sie in der Öffentlichkeit bzw. im persönlichen Gespräch diesen Standpunkt, aufgrund „*vielfacher, persönlicher und positiver Erfahrungen*“. Zwischen ungedämmten und innen gedämmten Wänden wird dabei nicht unterschieden. Dabei lässt sie außer Acht, dass das Raumklima seit den 90-er Jahren u. a. wegen dichter werdenden Gebäudehüllen feuchter wurde und damit häufig eine höhere Feuchtelast vorliegt. Zudem wird nicht berücksichtigt, dass Innendämmung die Situation um den Balkenkopf tendenziell kritisch beeinflusst.

Die konvektionshemmende Abdichtung der Auflagertaschen unterstützt beispielsweise *Arnold (2016)*. Der verschiedentlich geforderten Luftumspülung der Balkenköpfe (*Hofmeister (1995)*) tritt er mit der Argumentation entgegen, dass in früheren Zeiten andere Raumklimabedingungen vorherrschten. Abweichendes Raumklima, undichte Fenster und die typische Einzelofenheizung sowie andere Gegebenheiten hätten häufiger ein „umgekehrtes Dampfdruckgefälle“ herbeigeführt, sodass Balkenköpfe zweitweise auch zur Innenseite austrocknen konnten. In einigen Veröffentlichungen wird zwar auch ein „luftdichter“ Anschluss gefordert, beispielsweise in *Kehl (2014)*, der Aufwand für die Abdichtungsmaßnahmen geht allerdings nicht so weit wie in *AkkPassiv (2005)*.

Generell scheint eine sehr uneinheitliche Meinung vorzuherrschen, was unter „luftdicht“ genau zu verstehen ist. Wie in Bild 6 zu sehen ist, kann beispielsweise der Anschluss selbst bei dieser vergleichsweise gewissenhaften Ausführung und einem rissefreien Deckenbalken mit einem vorkomprimierten Dichtungsband nicht als luftdicht bezeichnet werden. Auch die Verwendung von Putzanschlussklebebandern ruft unterschiedliche Meinungen hervor.

## 2.6 Aktive und passive Wärmezufuhr

Eine Innendämmung kühlt die Bestandskonstruktion und damit auch das Balkenaufleger ab. Da kalte Materialien und Luftschichten weniger Feuchte speichern können, feuchten Mauerwerk und Balkentasche tendenziell auf. Um die durch Innendämmung bedingte Temperaturreduktion auszugleichen, plädieren deshalb *Stopp et al. (2010)*, *Häupl (2010)* und *Strangfeld et al. (2012)* oder *Gnoth et al. (2003a)* für eine aktive oder passive Wärmezufuhr in das Balkenaufleger auf vier verschiedene Arten:

- durch passive „Heat-Pipes“, also Wärmetauscher, wie sie beispielsweise in kleinerer Dimension in Computern verbaut werden,
- durch Aussparung der Innendämmung im Sockelbereich, um dort die Heizrohre möglichst nah an die Balkenköpfe heranzuführen (auch bspw. in *Warren et al. (2003)*),

- durch Wärmeleitbleche oder „Wärmeleitnägel“ (s. Bild 7), die Wärme im Deckenbereich zwischen den Geschoßen aufnehmen und zum Stirnholz transportieren, gegebenenfalls beheizt wie in *Wegerer et Bednar (2016)*, oder
- durch bewusste Wärmebrücken, indem die Innendämmung um die Balkenköpfe unterbrochen wurde und durch gut wärmeleitfähige Materialien ersetzt wird.

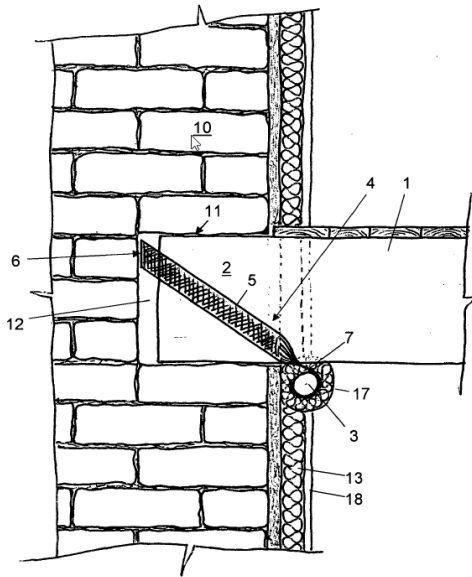


Bild 7 Detailzeichnung einer aktiven Bauteilbeheizung aus *Wegerer et Bednar (2016)*

Während die passiven Methoden die Situation am Balkenkopf nur unzureichend verbesserten, was auch *Ueno (2012)* mit thermischen 3D-Simulationen nachwies, konnten die oben genannten Autoren bei den aktiven Arten der Wärmezufuhr nicht nur rechnerisch, sondern auch anhand (weniger) Messungen, einen wärmeren und damit trockneren Balkenkopf nachweisen: Die Temperaturen ließen sich damit um ca. zwei bis drei Kelvin im Stirnholzbereich erhöhen.

In einem Forschungsprojekt von *Harrestrup et Svendsen (2015)* blieb in einem Kopenhagener Gebäude das unmittelbare Umfeld der Balken bis ungefähr 0,2 m über und unter den Balken ungedämmt. Aufwändige Simulationsrechnungen von *Morelli et Svendsen (2012)* hatten dies nahegelegt und tatsächlich blieben die Holzbalken während der Nutzungsphase trocken, jedoch auf Kosten einer geringeren Energieeinsparung: Im Vergleich zur voll gedämmten Variante erhöhten sich die Energieverluste *des Details* um das Zwei- bis Dreifache. Trotz diesen Verlusten wurde durch alle Dämmmaßnahmen am Gebäude rechnerisch noch eine Energieeinsparung von über 50 % gegenüber dem ungedämmten Gebäude erreicht. Leider war bei keinem Balken zu Vergleichszwecken auch der Bereich um das Auflager gedämmt worden, um zu kontrollieren, ob dieser Balken wesentlich feuchter geworden wäre. Dies wurde später in *Hansen et al. (2018)* nachgeholt. Sie kamen zu dem Ergebnis, dass in einem Testhaus kaum ein Feuchteunterschied zwischen Balken mit 20 cm breiten, ungedämmten Streifen unter und über den Balken und voll gedämmten Deckenbalken auszumachen war. Auf diese Thematik wird in Abschnitt 6.7.7 eingegangen.

Bei den aktiven Maßnahmen der Wärmezufuhr ist der, je nach Variante, große Aufwand zu bedenken, der mit dem Eingriff in jede einzelne Balkentasche verbunden ist, sowie die zusätzlichen Wärmeverluste. Für die Variante, in der die Innendämmung unterbrochen wird um dort, möglichst nahe an den Deckenbalken, die Heizrohre entlang zu führen, beziffern *Stopp et al. (2010)* die zusätzlichen Heizenergieverluste des gesamten Gebäudes auf 10 %. Letztere konterkarieren die allgemeinen Bestrebungen der Einsparung von Wärmeenergie und können überdies zu vertraglichen Problemen führen, da manche staatlichen Fördermaßnahmen mit der Güte des Gebäudeenergiestandards steigen. Wird vertraglich ein bestimmter Gebäudeenergiestandard vereinbart, der dann durch eine aktive Balkenauflegerbeheizung nicht erreicht werden kann, wird dies in der Regel unangenehme Folgen nach sich ziehen. Vor dem Einsetzen solch aufwändiger Maßnahmen sollte zunächst sorgfältig überprüft werden, ob diese wirklich notwendig sind. Wie hier später nachgewiesen wird, ermöglichen das moderne Simulationswerkzeuge mittlerweile. Für einzelne, besonders gefährdete Balken, z. B. in der Gebäudeecke, kann die aktive Wärmezufuhr eine sinnvolle Maßnahme sein.

Doch auch schon ohne Eingriffe in das Balkenaufleger ist eine solche Detailausbildung mit höherem Aufwand verbunden. Für die im vorletzten Paragraph geschilderte Variante mit der Aussparung um die Balkenköpfe betonen *Harrestrup et Svendsen (2015)*, auch in anderen Publikationen, dass einerseits ein luftdichter Anschluss der Dampfbremse an die Holzbalken eminent wichtig sei, andererseits er nur sehr schwierig unter Baustellenbedingungen zu realisieren sei.

## 2.7 Die Ausgestaltung des Auflagers

Speziell die Gestaltung des Auflagers wurde bei der Sanierung der Alten Schäfllerei Benediktbeuern mit einer Vielzahl von Varianten untersucht (*EnBewe (2017)*). So wurde in manchen Fällen der Luftbereich um den Balkenkopf gedämmt, in anderen Fällen wurde eine hygrisch bzw. hygrothermisch trennende Schicht (Nanogel- oder Elastomeraufleger) unter Balken gelegt, bis hin zu einer 0,5 m langen, massiven Wärmeleitplatte aus Kupfer. Fast alle Auflagervarianten hatten zwar positive, aber letztlich nur geringe Auswirkungen auf die Holzfeuchte und Temperaturen im Balkenkopf. Das Wärmeleitblech aus Kupfer hob die Temperaturen mit ungefähr 2,5 Kelvin am deutlichsten an. Die Auflagertaschen von 2 der 26 überwachten Balkenköpfe waren beim Ersatz der Balkenköpfe frisch vermörtelt worden. Hier trocknete die Einbaufeuchte im Holz weitaus langsamer ab, als in den nicht vermörtelten Auflagertaschen.

*Holle et al. (2008)* stellen eine sehr aufwändige Lösung vor: Die Holzbalken werden zunächst in einer Entfernung von 30 bis 50 zum Auflager abgetrennt und in der Mitte geschlitzt. In dem Schlitz wird jeweils ein ca. 10 mm dickes Blech statisch wirksam befestigt, welches in das Auflager der Außenwand hineinragt. Die Auflager selber werden aufgeweitet und mit Dämmung ausgekleidet, sodass die Schlitzbleche in gut gedämmten Auflagern ruhen. Wegen des sehr hohen Aufwands und wegen des immensen Eingriffs in die Bausubstanz rief dieser Vorschlag in öffentlichen Diskussionen oder Vorträgen immer wieder offene Ablehnung bis hin zu

Gelächter hervor. Nur wenig besser gelitten war eine andere, etwas weniger aufwändige Empfehlung aus einem internen Entwurf des *WTA-MB 8-14* (Bild 8), auch wenn sie als „Ideallösung“ beschrieben wurde, die, *wenn möglich*, angestrebt werden *sollte*. Die Empfehlung wurde wegen der Reaktionen und der seltenen Anwendbarkeit rasch wieder entfernt.

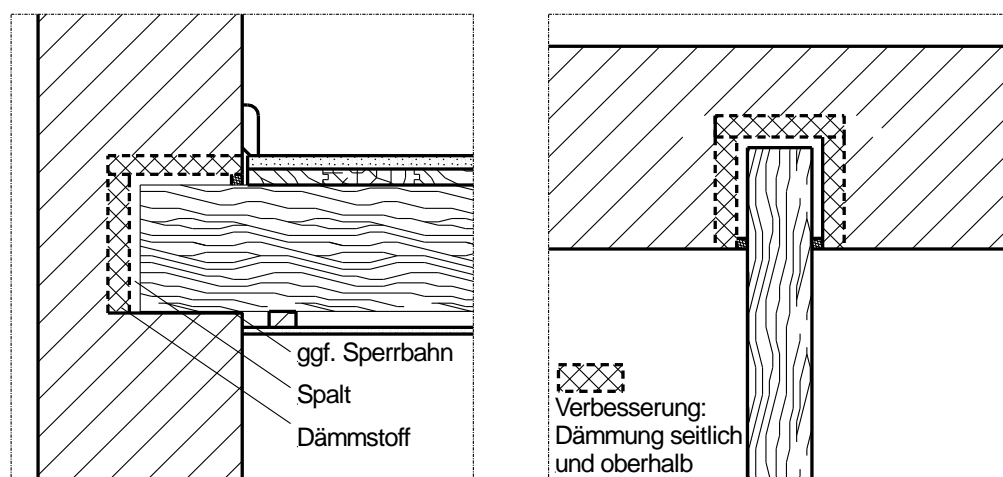


Bild 8 Empfehlung aus einem internen Entwurf des WTA-Merkblatts 8-14

Im kompromisslos gedämmten „Energie Plus Haus Weber“ (*Ronacher (2011)*) wird die Auflagersituation am grundlegendsten verändert: die Deckenbalken werden ebenfalls vor dem Auflager abgetrennt und die Dippel-Baum-Decke liegt auf auf einer eigenen, neu errichteten Holzkonstruktion im Gebäudeinneren, noch vor der Innendämmebene. Auf diese Weise wird die Innendämmung nicht durch den Deckenaufbau unterbrochen und die Deckenbalken sind im Prinzip vor jeglichen Feuchteschäden sicher. Trotzdem wird sich auch diese Variante wegen des großen Aufwands und Raumverlustes nicht durchsetzen.

Die ungünstigen Auswirkungen von diffusionsdichtem, allseitigem Einpacken des Balkenkopfes wurden schon zu Beginn des Kapitels erläutert.

## 2.8 Simulationen und Simulationswerkzeuge

Neben Untersuchungen in Testhäusern widmete sich ein Teil des Projektes *EnBewe (2017)* der Weiterentwicklung der hygrothermischen Simulationssoftware *DELPHIN (2019)*. So wurde die Berücksichtigung anisotroper Eigenschaften, wie z. B. von Holz, sowie die Simulation im dreidimensionalen Raum ermöglicht. Ferner wurde ein Testprozedere vorgestellt, um Simulationsprogramme hinsichtlich des dreidimensionalen, anisotropen Feuchte- und Wärmetransports zu validieren. Anschließend erfolgte die Überprüfung des neuen 3D-Solvers mit Hilfe von Messungen in einem Balkenkopf-Prüfstand.

Verstärkt hatten sich schon vorher die Bemühungen um die computertechnische Simulation von Balkenauflagern in Gebäuden und Laborprüfständen (*Kehl et al. (2013)* oder Kapitel 2.6). Wenn der Hauptzweck der Untersuchungen andere Ziele verfolgte, z. B. die Reduktion des Gebäude-Heizenergiebedarfs, wurden oft nur oberflächliche Simulationen durchgeführt, wie in

*Rasmussen (2010)*. Solche, rein thermische Simulationen müssen als nicht aussagekräftig für eine feuchtetechnische Bewertung betrachtet werden. Meistens wurden und werden zweidimensionale Computerprogramme angewendet, ohne sie anhand von Messungen einer realen Situation überprüfen zu können (z. B. *Korjenic et Dreyer (2003)* oder *Morelli et al. (2010)*). Diese Berechnungen dienen oft der Vorplanung und Machbarkeit späterer Projekte, wie es bereits am Beispiel der Luftdichtigkeit von Balkenauflagern erläutert wurde. Dabei zeigen sich *Morelli et al. (2010)* überzeugt, dass 3D-Simulationen zur korrekten Berechnung von Balkenauflagern notwendig sind. *Janetti et al. (2012)* wendeten die vielfältig einsetzbare, kommerzielle Software COMSOL Multiphysics an. Die Software bedingt, dass für die Simulationen die notwendigen physikalischen Hintergründe und Gesetzmäßigkeiten vom Benutzer selber modelliert werden müssen. So kann zwar dreidimensional Wärme-, Luft- und Feuchtetransport korrekt berechnet werden, die notwendigen Klima- und vor allem Materialdaten müssen allerdings mühselig bereitgestellt werden. Diese Art der Herangehensweise wird deshalb trotz mächtiger Numerik nur Spezialisten mit einem gewissen Zeitbudget offenstehen. Zudem wird in den Projekten mit COMSOL (2019) der wichtige Einfluss des Regens nicht berücksichtigt.

## 2.9 Richtlinien, Merkblätter und Herstellerangaben

Aufgrund einer verbreiteten Unsicherheit in und einer hohen Nachfrage aus der Praxis wurde das *WTA-MB 8-14*, unter Mitarbeit des Verfassers, erarbeitet und summiert den damaligen Kenntnisstand für die Baupraxis. Es widmet sich titelgebend *Balkenköpfen in Außenwänden*. Aufgrund der Komplexität und laufender Forschungsprojekte wurden im *WTA-MB 8-14* nur vorsichtige Empfehlungen ausgesprochen.

Das Merkblatt geht zunächst auf die notwendige Bestandsaufnahme und mögliche Schadensursachen ein. Anschließend werden verschiedene Balkenkopfsituationen bewertet, wobei die Varianten mit Innendämmung durchgängig als potentiell problematisch charakterisiert werden, vor allem in Verbindung mit Schlagregen. Betont wird die Notwendigkeit von Luftschichten um den Balkenkopf. Das Merkblatt bezieht Stellung hinsichtlich der Frage der Luftumspülung aus dem Innenraum oder dem Bereich der Zwischendecke. Diese sei prinzipiell zu vermeiden, wobei ein konvektionshemmender Anschluss an die Innendämmung als ausreichend im Sinne einer Schadensvermeidung befunden wird, ein völlig dichter Anschluss wird ausdrücklich nicht gefordert. Aus den genannten Gründen hält sich das Merkblatt mit konkreten Zahlenangaben bezüglich bevorzugter Eigenschaften von Dämmsystemen (Wärme- und Diffusionswiderstand, Kapillarität) zurück: Dem verbreiteten Wunsch nach nachweisfreien Innendämmvarianten wurde nicht nachgegeben.

Wie in *WTA-MB 8-14* oder *Arnold (2016)* dargelegt wird, müssen Balkenköpfe bei Innendämmung streng genommen gemäß *ÖNORM B 3802-2* oder *DIN 68800-2* der Gebrauchsklasse 2 (GK 2) zugeordnet werden. Diese Zuordnung ergibt das unerwünschte Erfordernis eines chemischen Holzschutzes oder von nachweislich ausreichend dauerhaftem Farbkernholz, wenn nicht, z. B. durch Simulation, nachgewiesen werden kann, dass das Auflager ausreichend trocken bleibt.

Fließen Empfehlungen aus Forschungsprojekten in Verarbeitungsrichtlinien ein, spiegelt das die zunehmende Verbreitung von Erkenntnissen aus der Forschung in die tägliche Baupraxis wieder. In Verarbeitungsrichtlinien von Innendämmsystem-Herstellern oder industrienahen Verbänden wurde in der Vergangenheit das Detail Balkenkopf entweder nicht betrachtet oder sehr oberflächlich abgehandelt. So fanden Balkenköpfe in *Fachverband WDVS (2012)* keine Erwähnung, die folgende Auflage *Fachverband WDVS (2016)* lehnt sich dann an die Empfehlungen des *WTA-MB 8-14* an. In *BDA Wien (2011)* werden schlicht hygrothermische Simulationen anempfohlen. Vergleichsweise früh veröffentlichte dagegen der Hersteller eines Innendämmsystems konkrete Verarbeitungsempfehlungen mit einem expliziten Fokus auf Balkenköpfen (*Saint Gobain (2012)*). Diese Verarbeitungsempfehlung mahnt, dass in der Deckenebene zwischen den Balken gedämmt werden solle, um dort Schimmel zu vermeiden, allerdings in einer geringeren Dicke als im Raum selber, um wiederum den Balkenkopf nicht zu sehr abzukühlen. Damit weist *Saint Gobain (2012)* ein Alleinstellungsmerkmal auf, da sonst keine Abstufung der Schichtdicken empfohlen wird, weder in Fachartikeln, noch in Journalen oder anderen Herstellerempfehlungen wie *Knauf (2018)* oder *Xella (2018)*.

Was den Anschluss der Dämmung an den Balkenkopf betrifft, stellt letztgenannte geringere Anforderungen: Im Gegensatz zu *Saint Gobain (2012)* gilt in *Xella (2018)* ein Hanf-Filz-Dämmstreifen als ausreichend im Sinne des *WTA-MB 8-14*. Eine weitere, besondere Lösung ist in *Gutex (2019)* zu finden. Aussagen zur Art der Abdichtung werden hier nicht gegeben, als Lösung für die Problemstellung wird die Verwendung von Carbonfaser-Heizfolien angeregt.

## 3 Testhaus und energetische Sanierung

### 3.1 Planung Versuchsgebäude

Als Versuchshaus konnte dank der Unterstützung der Grazer Gebäude- und Baumanagement Graz GmbH (GBG) bzw. der Liegenschaftsverwaltung der Stadt Graz das ehemalige Sanatorium Mariagrün, jetzt Kinderkrippe und Kindergarten der Stadt Graz, in der Schönbrunn-gasse 30, akquiriert werden.

Das Gebäude wurde 1885 errichtet und diente bis Ende der 1920-er Jahre als Kur- und Heil-anstalt.



Bild 9 Links die Südost-Ansicht des Kindergartens Schönbrunn-gasse 30; rechts der Südturm mit den übereinanderliegenden Versuchsräumen im Obergeschoß und Dachgeschoß

### 3.2 Auswahl der Dämmsysteme

Ein grundlegender Projektgedanke war die produktneutrale Beurteilung „ökologisch unbedenklicher“ Baustoffe. Im Hinblick auf eine möglichst große Bandbreite unterschiedlicher Konstruktionen und Materialien wurden die folgenden fünf Dämmsysteme ausgewählt:

- 80 mm aufgespritzte Zellulose (organisch,  $\lambda = 0,052 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ )
- 80 mm Perliteplatten (mineralisch,  $\lambda = 0,045 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ )
- 120 mm Wärmedämmputz (mineralisch,  $\lambda = 0,075 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ )
- 60 mm Holzfaserplatten (organisch,  $\lambda = 0,041 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ )
- 100 mm Schilf (organisch,  $\lambda = 0,060 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ )

Die angegebenen Wärmeleitfähigkeiten  $\lambda$  entsprechen den von den Herstellern angegebenen Rechenwerten zur Projektlaufzeit.

Bei der Auslegung der Dämmstoffdicken bestand die Zielvorgabe, den ursprünglich vermuteten U-Wert der Bestandsaußenwand von  $1,16 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$  auf weniger als die Hälfte zu verringern. In einem zweiten Schritt bildeten die handelsüblich verfügbaren Dicken der plattenförmigen Dämmstoffe die Ausgangsbasis und wurden derart ausgewählt, dass die Differenz zum

Ziel-U-Wert von rund  $0,4 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$  möglichst klein ist. Im Verlauf der Messdatenaufzeichnungen und Materialmessungen stellte es sich heraus, dass der ursprünglich angenommene U-Wert der Bestandswand zu hoch angesetzt war und korrigiert werden musste, da der Bestandsziegel weitaus weniger wärmeleitfähig ist als angenommen. Darauf wird in einem späteren Kapitel eingegangen.

### 3.3 Beschreibung der Testwand

Der Testaufbau umfasst eine bzw. zwei Außenwände in zwei übereinanderliegenden Räumen und der Holztramdecke dazwischen, sodass alle fünf Dämmsystem-Felder mindestens einen Holzbalken in derselben Außenwand enthielten. Zudem stand ein Referenzfeld für die Messung eines ungedämmten Balkenfeldes zur Verfügung. Sechs verschiedene Wandaufbauten mit 8 Balken konnten so beprobt werden (Tab. 1). Der neunte Balken wurde nicht mit Messtechnik versehen. Bild 10 dokumentiert die Zuordnung der Dämmsysteme. Ferner sind die Auflagertiefen angegeben sowie die Breite des Luftspalts zwischen Balken und Mauerwerk unterhalb der Einschubdecke (s. auch Tab. 3). Die Auflager sind zum Teil unregelmäßig gemauert, weshalb sich die Breite eines Luftspalts vereinzelt schon auf einer Seite unterschied.

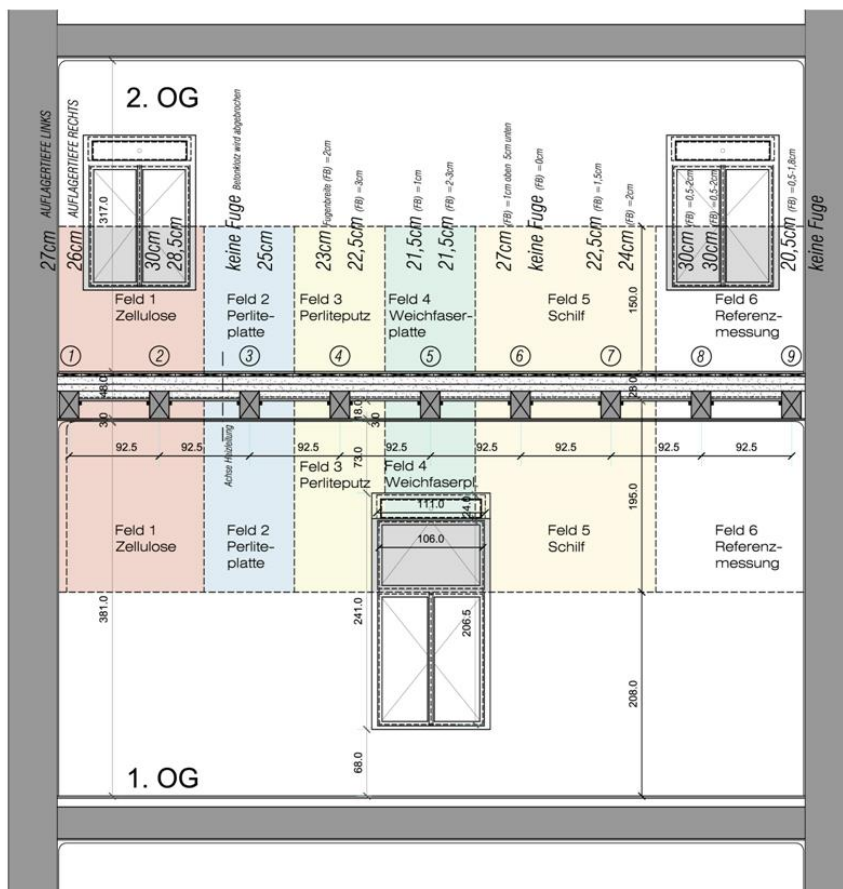


Bild 10 Vertikalschnitt durch die beiden Versuchsräume mit Darstellung der Messfelder und Maße, sowie Fugenbreite und -tiefe in den Balkenauflagern (s. Tab. 3)



Tab. 1 Auflistung der Dämmsysteme und deren Zuordnung zu einzelnen Balken

Feld	Balken	Dämmung	Anmerkungen
1	1 & 2	Zellulose	Enthält als ungünstigen Sonderfall den (Streich-) Balken 1: die geometrische Wärmebrücke Gebäudecke ist durch niedrigere Temperaturen gekennzeichnet und besitzt damit ein höheres Kondensationsrisiko
2	3	Perliteplatte	
3	4	Wärmedämmputz	
4	5	Holzweichfaserplatte	
5	6 & 7	Schilf	Enthält zwei Abdichtungsvarianten: die sechste Balkentasche ist wie bei den Balken 1 bis 5 im OG maximal gegenüber dem Dämmsystem abgedichtet, Balken 7 ist der Sonderfall eines nicht abgedichteten Balkens, zu dem das Dämmsystem 20-30 mm Abstand hält, s. Abschnitt 3.6
6	8	- (keine)	Unveränderter, „historischer“ Wandaufbau mit nicht abgedichtetem Auflager wie Balken Nr. 7

Die Zellulose-Dämmung in Feld 1 wurde auf der nach Süden ausgerichteten Wand noch ungefähr einen Meter weitergeführt.

Werktags diente das Zimmer im Obergeschoß als Spielzimmer für die betreuten Kinder, das Dachgeschoß fand vor dem Projekt OEKO-ID als Lagerraum Verwendung. Während der Projektlaufzeit waren dort die wichtigsten Teile der Messtechnik untergebracht, ferner wurden dort einige Projektsitzungen abgehalten.

### 3.4 Vorbereitende Arbeiten

Da es keine Ausführungspläne des Gebäudes gab, musste die Lage der Balken über das Öffnen der Decke verifiziert werden. Zuerst wurde die Decke im Zimmer des Dachgeschoßes im Bereich unter dem rechten Fenster geöffnet. Die oberste Schicht des Fußbodenaufbaus stellte sich als ein PVC Belag heraus, der auf die ursprüngliche Nutzschicht, einem ca. 20 mm dicken Holzterrazzo geklebt worden war. Darunter befinden sich 30 mm dicke Holzdielen, die auf in Ziegelschutt und Kalkresten schwimmende Polsterhölzer genagelt sind. Der Ziegelschutt wurde entlang der Wand so weit entfernt, bis zwei Deckenbalken und somit die Spannrichtung der Decke sichtbar wurde (Bild 11). Diese Öffnung wurde wieder mit dem ausgelösten Material geschlossen. Der entfernte PVC-Belag wurde nicht wieder bis an die Wand herangeführt, weshalb diese Schicht in den Simulationen keine Berücksichtigung fand.



Bild 11 Links Deckenöffnung im Dachgeschoßzimmer und rechts im Obergeschoß

In weiterer Folge wurde die Decke über die gesamte Wandbreite von unten geöffnet. In keinem Luftspalt um die Balkenköpfe wurde Schüttung aus der Einschnittdecke oder ähnliches entdeckt. Die einzelnen Arbeitsschritte erstreckten sich über das Abschlagen der Hohlkehle und des Putzes an der Decke bis zum Abbrechen der ersten beiden wandseitigen Bretter. Dadurch wurden der Deckenhohlraum und die unverputzte Wandfläche zwischen den Balken sowie die Stülpchalung der Einschnittdecke sichtbar (Bild 11).

Selbst dünne, aber diffusionshemmende Farbschichten auf den Wandoberflächen können durch ihre Feuchttransporteigenschaften das hygrothermische Verhalten entscheidend beeinflussen. Die im Laufe der Zeit aufgetragenen Farbschichten wurden deshalb auf der gesamten Wandoberfläche abgeschert, um diesbezügliche Unwägbarkeiten zu vermeiden. Als Vorbereitung eines geeigneten Untergrundes war es auch notwendig, den fehlenden Putz zwischen den Balken bis zur Einschnittdecke mit einem Kalkputz zu ergänzen.

Die Feldeinteilung und Trennung der Felder wurde mit an die Wand gedübelten Holzleisten und beidseitig montierten Holzwerkstoffplatten vorgenommen. Die Fuge zur Wand wurde dauerelastisch (Masterfix Bausilikon WIE) geschlossen, auch, um eine übergreifende Ausbreitung von mikrobiologischen Stoffen zu verhindern.

Während der Bauaufnahme wurde keine holztechnische Untersuchung der Balkenköpfe vorgenommen. Laut oberflächlicher, visueller Sichtprüfung stellten die Ausführenden lediglich fest, dass alle Balken „in Ordnung“ waren. Nur der Streichbalken habe etwas angegriffen ausgesehen. Eine eingehendere Untersuchung zumindest dieses Balkens wäre wünschenswert gewesen. Allerdings wurde nach dem Abbau der Dämmmaßnahmen (Kapitel 3.9) zumindest oberflächlich keine Verschlechterung festgestellt.

### 3.5 Installation Messtechnik

Das Messkonzept sah sieben Sensortypen mit insgesamt 96 Einzelsensoren vor. Je zwei sehr dünne, kombinierte Luftfeuchte-/Temperaturfühler (Herstellerbezeichnung LF-T 60 SU, Bild 12 ganz rechts) waren pro Innendämmsystem an der Grenzschicht zwischen Bestandsmauerwerk und Dämmsystem, ca. 200 mm unter der Deckenuntersicht platziert (Bild 15 und Bild 16). Wegen des flachen, nur 4,5 mm dünnen Sensorkopfes kam dieser Sensor auch als Oberflächenfühler zur Anwendung.

Zwei weitere, ebenfalls speziell entwickelte, kombinierte Luftfeuchte-/Temperatursensoren wurden neben den Wangen jedes Holzbalkens mittels spezieller Edelstahleinschlaghülsen eingebracht. Einmal in der maximalen Tiefe der Balkentasche, in der Nähe der Stirnseite der Deckenbalken („Stirnholz“-Sensoren) und einmal 150 mm von der Bestandsputzoberfläche entfernt an der Balkenwange („Balkenwange“-Sensoren, Herstellerbezeichnung LF-T 60, Bild 12, Sensoren Nr. 5 und 6 von links). Wegen der flachen Einschlaghülse wurde dieser Sensor vom Hersteller, der Firma Schaller GmbH, Schwertsensor genannt. Einige Sensoren wurden entsprechend den speziellen Anforderungen des Projekts von der Fa. Humimeter / Schaller GmbH entwickelt (Nr. 5, 6 und 8 von links in Bild 12). Eine Übersichtstabelle mit den eingesetzten Sensoren und deren Position befindet sich im Anhang (siehe Tab. 30).



Bild 12 Spezielle Sensoren zur Holzfeuchtemessung (1.+ 2. von links) und für die Luftfeuchte- und Temperaturmessung (Foto: Schaller GmbH)

Zusätzlich waren kombinierte Luftfeuchte-/Temperatursensoren in den beiden Innenräumen und im Außenbereich angeordnet (Herstellerbezeichnung RH 1, Bild 12 Sensor Nr. 7 von links) sowie Oberflächentemperatursensoren.

Die Holzfeuchte wurde durch die getaktete Messung des elektrischen Widerstandes zwischen zwei Einschlagelektroden gemessen, in allen Balken an der potentiell „nassesten Stelle“. Die Balken an den Balken 1 und 8 erhielten je zwei weitere Sensoren an der Balkenwange, jeweils in einer Tiefe von 15 und 30 mm, ungefähr in der Ebene der Innendämmung (Bild 12 ganz links und Bild 15). Die Holzfeuchtesensoren für die „nasseste Stelle“ bestanden aus ungefähr 0,4 m langen Stahlelektroden, welche in vorgebohrte Löcher eingetrieben wurden. Um eine exakte Messstelle benennen zu können, werden derart lange Sensoren häufig bis auf die Spitzen isoliert, womit sichergestellt ist, dass nur dort gemessen wird. Um die maximale Feuchte

entlang der gesamten Länge der Sensoren zu messen, wurde dies bewusst nicht durchgeführt. Mit Hilfe der Sensoren in der Ebene der Innendämmung und den später hier beschriebenen Simulationsergebnissen kann gezeigt werden, dass diese feuchteste Stelle stets nahe am Stirnholz war.

Da die Decken über die gesamte Länge nur von unten geöffnet wurden, setzten die 0,4 m langen Elektroden an der Balkenunterseite in der Ebene der Innendämmung an und verliefen dann schräg nach oben bis zum Stirnholz. Da an der Balkenunterseite gegebenenfalls noch Feuchte aus dem Mauerwerk hätte aufgenommen werden können, wäre eine Sensorführung vom Dachgeschoß her schräg nach unten eigentlich wünschenswert gewesen. Wie sich in den späteren Messungen zeigte, war das aufgrund der sehr niedrigen Schlagregenbelastung nicht notwendig.

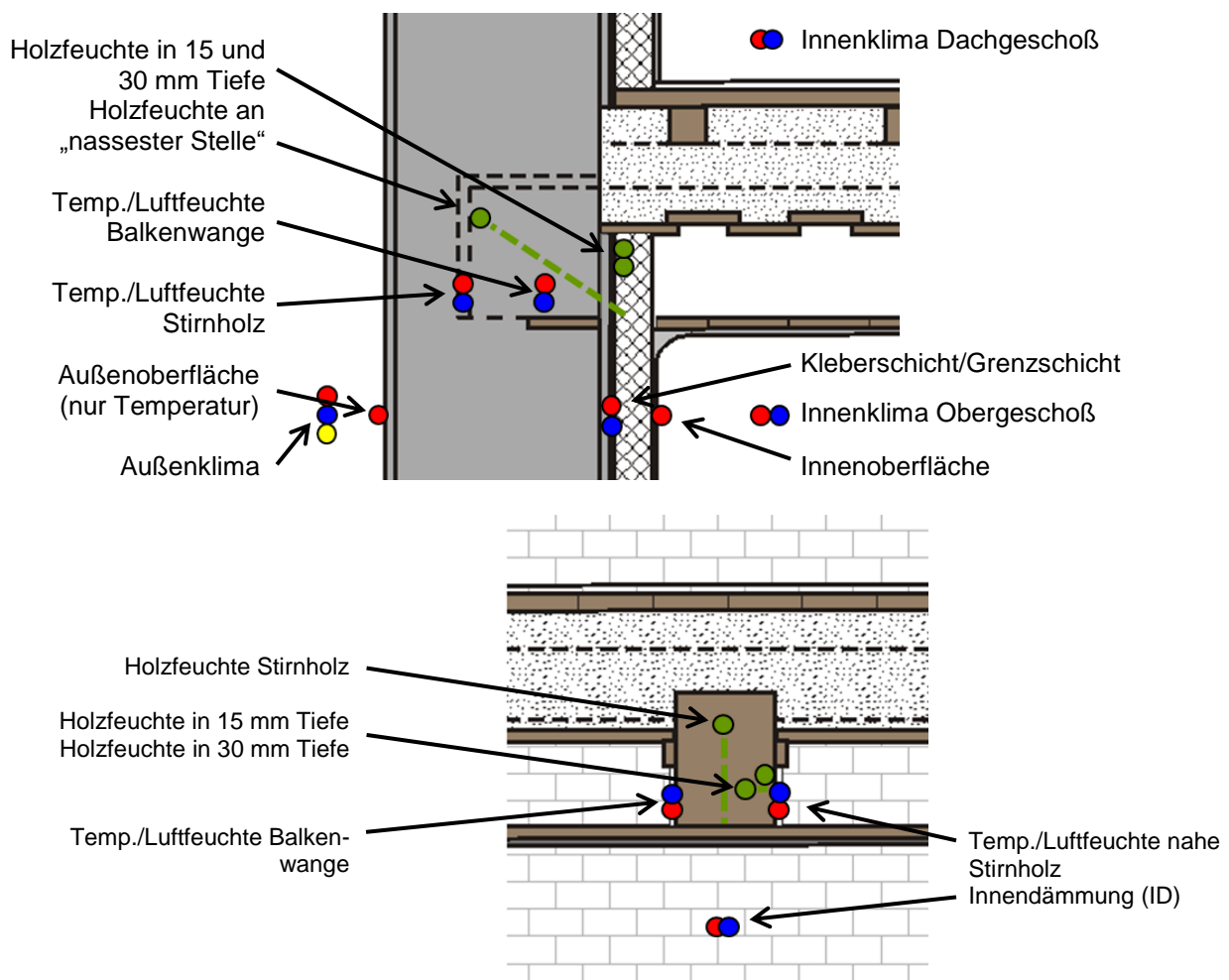


Bild 13 Schematische Darstellung der Lage der Messsensoren: oben Schnitt durch die Außenwand in der Feldmitte zwischen den Holzbalken; unten Schnitt durch den Deckenbalken mit Blick auf die Bestandsoberfläche unter Angabe der Messgröße

Hinsichtlich des Temperaturbereichs sind alle eingesetzten Sensoren geeignet (Tab. 2). Die Messgenauigkeiten von 0,8 bzw. 1,0 K sind bei der Bewertung zu beachten. Im höherfeuchten Bereich ab 90 bzw. 95 % relativer Luftfeuchte dagegen sind die Messfühler auch mit den an-

gegebenen Messtoleranzen nicht mehr zuverlässig. Dies ist für den Innenklima- und Außenklimafühler nicht relevant, da innen derartige Luftfeuchten nicht vorkommen und sich außen die Ungenauigkeiten kaum auf die Simulationen auswirken. In der Konstruktion bedeutet das jedoch für die Sensoren zwischen Innendämmsystem und Bestandputz, dass die Messungen in Feldern mit hoher Einbaufeuchte (Herbst 2010 bis zum Frühling 2011) großen Unsicherheiten unterworfen sind. Später kamen an der Grenzschicht zwischen Dämmsystem und Bestand solche hohen Luftfeuchten nicht mehr vor. Die Schwertsensoren im Balkenaufleger messen immerhin noch bis zu einer Luftfeuchte von 95 % mit der ausgewiesenen Genauigkeit von  $\pm 2,5\%$ . Das bedeutet, dass bis auf einen kurzen Zeitbereich im zweiten Winter und einer längeren Zeitperiode im dritten Winter am Sensor neben dem Stirnholz alle Messwerte zuverlässig sind, unter Beachtung der angegebenen Genauigkeit. Am Messpunkt neben der Wange beträgt der höchste Wert 85 % relativer Luftfeuchte, d. h. die Werte befinden sich immer im sicheren Bereich. In der folgenden Tabelle ist unter anderem die Genauigkeit der verschiedenen Sensoren zusammengestellt.

Tab. 2 Bezeichnung, Einsatzort, und Genauigkeit der eingesetzten Sensoren

Messsensor	Einsatzort	Kalibrierung/Genauigkeit
RH 1: Temperatur, Luftfeuchte	Innenklima	Temperatur: $\pm 0,4^{\circ}\text{C}$ (-55 bis $60^{\circ}\text{C}$ ) Luftfeuchte: $\pm 1,5\%$ (0 bis 90%)
LF-TA 60: Temperatur, Luftfeuchte	Außenklima	Temperatur: $\pm 0,6^{\circ}\text{C}$ (-20 bis $60^{\circ}\text{C}$ ) Luftfeuchte: $\pm 3,0\%$ (0 bis 90%)
LF-T 60: Temperatur, Luftfeuchte	Balkenaufleger	Temperatur: $\pm 0,4^{\circ}\text{C}$ (-10 bis $60^{\circ}\text{C}$ ) Luftfeuchte: $\pm 2,5\%$ (0 bis 95%)
Globalstrahlung	außen	laut Hersteller „max. 5%; typisch 3%“
LF-T 60SU: Temperatur, Luftfeuchte	Grenzschicht Dämmung/Bestand	Temperatur: $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ (-20 bis $60^{\circ}\text{C}$ ) Luftfeuchte: $\pm 2\%$ (0 bis 90%)
Holzfeuchte	Deckenbalken	Holzfeuchte: $\pm 1,5\%$ (8 bis 100%)
T 85/120 Temperaturtransmitter	Wandoberflächen innen und außen	Temperatur: $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$ (-20 bis $85^{\circ}\text{C}$ )

In den anschließenden Kapiteln erfolgt der Vergleich von gemessener und durch Simulationen berechneter Feuchte anhand der absoluten Luftfeuchte. Um eine bessere Bewertung der Abweichung zu ermöglichen, wird deshalb die Genauigkeit der einzelnen Sensoren von der relativen auf die absolute Luftfeuchte übertragen. Weil diese von der Temperatur abhängig ist, ergeben sich daraus Kurven, die in Bild 14 abgebildet sind. Für die Schwertsensoren LF-T 60 in den Auflagern bedeutet das beispielsweise, dass bei einer Temperatur von  $5^{\circ}\text{C}$  die Genauigkeit  $\pm 0,34 \text{ g/m}^3$  beträgt, und bei  $15^{\circ}\text{C}$   $\pm 0,86 \text{ g/m}^3$  (blaue Kurve in Bild 14 links). Die rote Kurve im rechten Diagramm von Bild 14 gibt in Abhängigkeit von der Temperatur an, wie hoch der absolute Feuchtegehalt bei 95 % relativer Luftfeuchte ist. Daraus lässt sich entnehmen, dass die vom Hersteller angegebene Messgenauigkeit bei  $5^{\circ}\text{C}$  oberhalb  $6,5 \text{ g/m}^3$  nicht mehr gegeben ist. Bei  $20^{\circ}\text{C}$  beträgt der Grenzwert  $16,4 \text{ g/m}^3$ .

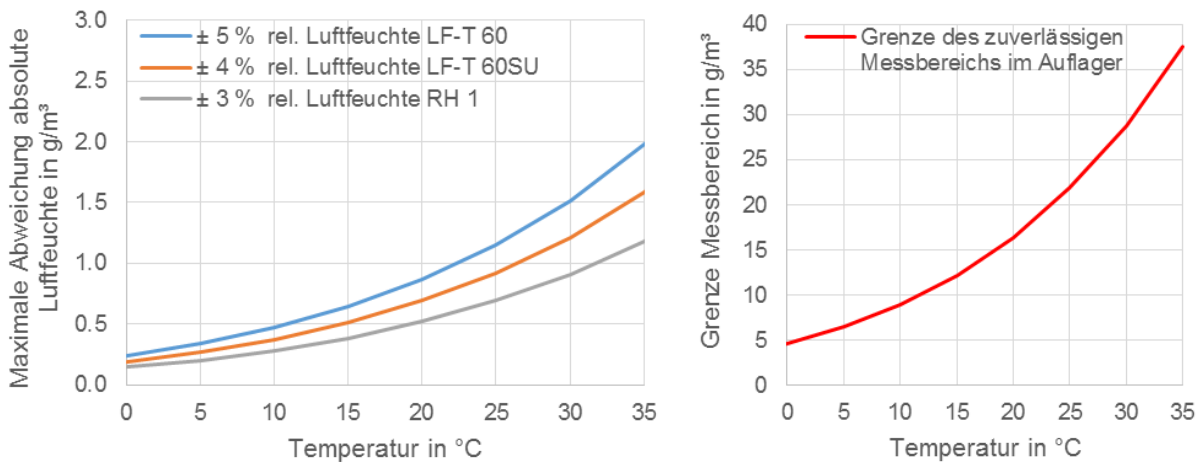


Bild 14 Links die maximale Genauigkeit der Feuchtesensoren in Abhängigkeit von der Temperatur, umgerechnet in g/m<sup>3</sup> absoluter Luftfeuchte; rechts die Grenze des zuverlässigen Messbereichs für die Sensoren im Balkenaufleger, d. h. die Kurve entspricht dem temperaturabhängigen Verlauf der relativen Luftfeuchte über 95 % (s. Tab. 2)

Alle Messdaten wurden kontinuierlich im 5-Minuten-Takt ausgelesen und vor Ort im Dachgeschoß aufgezeichnet. Die Auswertung in Kapitel 5 erfolgt auf der Grundlage von Stundenwerten, bei den klimatischen Randbedingungen in den Räumen und dem Außenklima auf der Grundlage von halbstündlichen Werten. Ein GSM-Modem ermöglichte den Fernzugriff und die regelmäßige Sicherung der Daten auf Servern der TU Graz.

Bild 15 links zeigt die Sensoren in der Gebäudekante, zwischen Zelloseputz und vorhandenem Innenputz vor der Montage des Dämmsystems. Auf dem rechten Bild sind diverse Holzfeuchtesensoren an Balken 1 zu sehen, welche die Feuchte auch in der Ebene der Innendämmung registrierten.

Um konvektive Einflüsse nicht einseitig zu verändern, wurden die beiden Auflagersensoren auf die Luftschlitze links und rechts des Balkens aufgeteilt. Nur, wenn das nicht möglich war, wurden sie in den gleichen Luftschlitz eingebracht.



Bild 15 Links kombinierte Luftfeuchte-/Temperatursensoren in der Gebäude-Außenkante; rechts diverse Holzfeuchtesensoren an Balken 1





Bild 16 Links Ansicht der Messfelder vor Aufbringung der Dämmsysteme; rechts Zellulose-Messfeld in der Gebäudeecke, gesehen vom unteren Geschoß mit schon abgedichteten Holzfeuchtesensoren; an der Decke Montageplatten mit der Messelektronik

Die tief in die Balkentasche eingebrachten Sensoren für den Auflager-Stirnholzbereich wurden so weit wie möglich in den Luftspalt geschoben. Es ließ sich aber nicht überprüfen, ob sie direkt an der Stirnseite der Balkentasche positioniert werden konnten oder ob sie nur bis zu einer Mörtelnase oder einem vorspringenden Ziegel reichten. Die anschließende Tab. 3 fasst die Einschubtiefe dieser Sensoren, gemessen von der ehemaligen Bestandsoberfläche, sowie die Auflagerlänge der Holzbalken in der Balkentasche mit den Breiten der Luftschlitze an der Balkenwange zusammen.

Tab. 3 Auflagerlänge der Holzbalken in der Balkentasche, Breite der Luftschlitze an der Balkenwange und maximale Einschubtiefen der Sensoren am Stirnholz in der Balkentasche - gemessen von der Kante der Bestands-Putzoberfläche (alle Maße in mm)

[mm]	Auflagerlänge / Fugenbreite links	Auflagerlänge / Fugenbreite rechts	Max. Einschubtiefe Sensor
Balken 1	270 / -	260 / -	400
Balken 2	300 / -	285 / -	350
Balken 3	keine Fuge	250 / -	300
Balken 4	230 / 20	225 / 30	330
Balken 5	215 / 10	215 / 20 - 30	280
Balken 6	270 / 10 - 50	keine Fuge	290
Balken 7	225 / 15	240 / 20	350
Balken 8	300 / 5 - 20	300 / 5 - 20	380

### 3.6 Montage der Dämmsysteme

Zur Installation der Messtechnik musste die Deckenuntersicht parallel zur Außenwand geöffnet werden. Vor dem Abdichten der Balkenauflagertaschen wurden zunächst die sichtbaren Enden der 0,4 m langen Holzfeuchtesensoren gedämmt und extra versiegelt. Die Wandoberfläche zwischen den Deckenbalken war im ursprünglichen Zustand nicht verputzt, was vor den

Dämmarbeiten erfolgte. Die Abdichtungsmaßnahmen wurden mehrstufig und ausgesprochen sorgfältig ausgeführt, um den Konvektionspfad vom Obergeschoß in die Balkenaufleger vollständig zu unterbinden:

- Der Luftspalt am Balkenaufleger wurde oberflächlich mit Hilfe eines Gewebebandes verputzt und damit verschlossen (Bild 18).
- Längsrisse in den Deckenbalken wurden mittels einer Bohrschablone im Riss angebohrt und das Bohrloch mit Leim und einem Rundholzdübel ausgefüllt. Bohrlochtiefe und Bohrlochdurchmesser richteten sich nach der Risstiefe und Rissbreite (Bild 17 und Bild 18). Zusätzlich wurden die Risse mit Dichtmasse (dauerelastischer Korkfüllmasse) ausgefüllt.
- Die Kanten zwischen Deckenbalken und Wand sowie zwischen Einlegeböden und Wand wurden mit einem Putzanschlussklebeband (Produkt: Contega PV / ProClima) abgeklebt und das Netz in den Putz bzw. Kleber des jeweiligen Dämmsystems eingespachtelt (Bild 18).

Diese Schritte bestimmten das Vorgehen an den ersten sechs Balken von der Deckenunterseite her. Am siebenten, mit Schilf gedämmten Balken sowie dem achten wurde darauf verzichtet. Die Projektmitarbeiter beließen am siebten Balken zwischen Schilfmattendämmung und Holzbalken bewusst einen Spalt von ungefähr 20 bis 30 mm Breite. Bei entsprechenden Klimarandbedingungen konnte dadurch bei den Balken 7 und 8 die Luft aus dem Deckenhohlraum ungehindert in die Balkenauflagertaschen strömen.

Die mehrstufigen Maßnahmen waren durchaus zeitaufwändig, wurden jedoch vom wissenschaftlichen Personal des Projektes, mithin „engagierten, handwerklich begabten Laien“ ausgeführt. Pro Balkenkopf haben alle Dichtungsmaßnahmen annähernd eine Stunde Zeit in Anspruch genommen. Entsprechend ausgebildete Professionisten wären sicherlich in der Lage gewesen, die Arbeiten weitaus schneller, innerhalb von 30 bis 40 Minuten, zu erstellen. Inwieweit weniger aufwändige Maßnahmen genügen, wird zu einem späteren Zeitpunkt diskutiert.

Vom Dachgeschoß her, das heißt in der Ebene der Schüttung und darüber, wurden keinerlei Abdichtungsmaßnahmen ergriffen. Eine derartige Einbausituation kann in der Realität durchaus vorkommen, wenn sich der Nutzer oder Eigentümer eines anliegenden Raumes jeglicher Dämm- und Abdichtungsmaßnahme verweigert. Im Dachgeschoß wurde entlang der innen gedämmten Wand ein ungefähr 0,3 m breiter Streifen der PVC-Belag zurückgeschlagen bzw. von dem Holzterrazzo getrennt. Nachdem die Holzterrazzoschicht und die Dielung auf einer Breite von ca. 0,2 m entfernt worden waren, ließen sich die Balken inspizieren (Bild 11). Anschließend wurde die Dämmung angebracht. Fehlstellen in der Dielung, die im Rahmen der Erkundung entfernt worden waren, wurden durch neue ersetzt. Die Innendämmsysteme begannen im Dachgeschoß auf der Holzdielung, welche auf den schwimmenden Polsterhölzern befestigt war. Nach Fertigstellung der Dämmfelder wurde der Terrazzo aufgelegt und der Teppich wieder zurückgeschlagen. Da die Balkenaufleger 1 bis 6 nur auf der Unterseite sehr gut abgedichtet waren, werden sie im weiteren Verlauf auch als „teilabgedichtet“ bezeichnet.



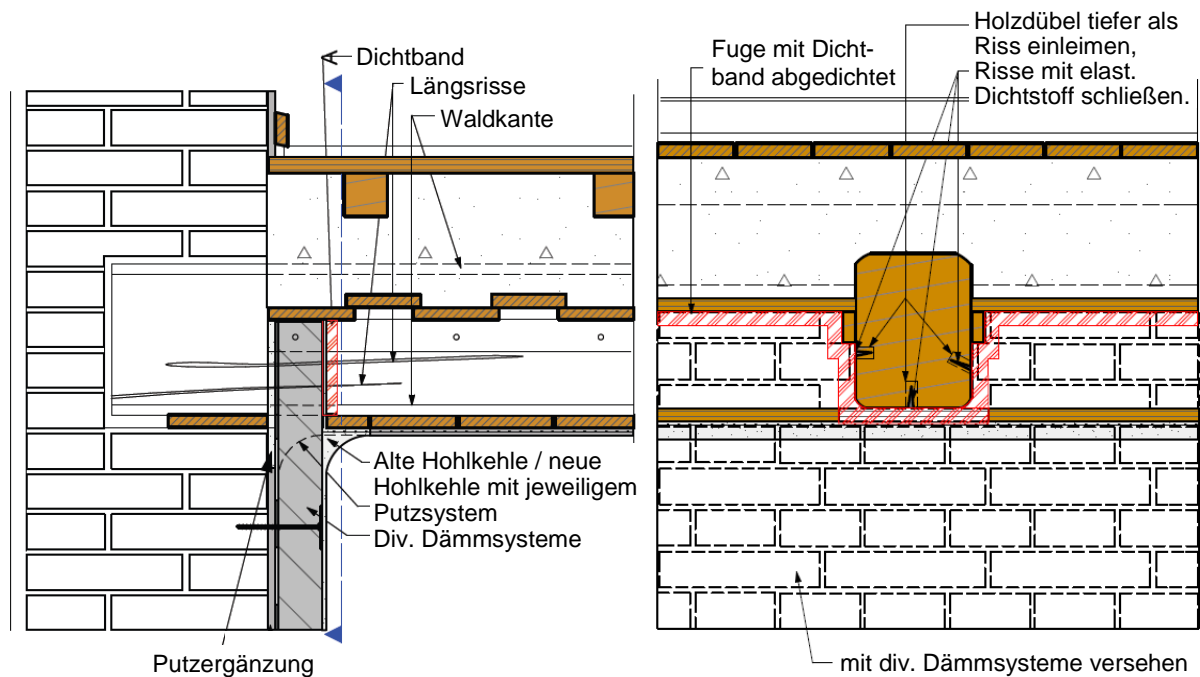


Bild 17 Schematische Darstellung der Abdichtungsmaßnahmen: Links Wandquerschnitt und rechts Schnitt durch den Deckenbalken mit Sicht auf die Außenwand



Bild 18 Links ein Dübel zum Verschließen der Längsrisse und der durch Putzmörtel geschlossene Luftspalt; rechts Abkleben der Kanten zwischen Balken und Einlegeböden zur Wandoberfläche mit Putzanschlussklebeband

Im weiteren Verlauf erfolgte die Montage der einzelnen Dämmsysteme durch Personal der Herstellerfirmen. Nach entsprechender Austrocknungszeit wurden die Deckenhohlräume an der Unterseite geschlossen und die ursprünglich vorhandene Hohlkehle am Übergang zwischen Wand und Decke wiederhergestellt. Bei Anschlüssen an Fensterstöcke wurden die Fugen zum Mauerwerk ebenfalls luftdicht abgeklebt und ein Putzanschlussprofil verbaut.

Der Zeitpunkt des Einbaus der Innendämmungen ist mit Anfang September in bauphysikalischer Hinsicht einerseits ungünstig, weil die warme Sommerperiode mit ihren guten Austrocknungsbedingungen fast vorüber ist. Schließlich kühlt die Wärmedämmung das Bestandsmauerwerk stärker aus, und ein kühleres Bauteil trocknet durch die niedrigeren Temperaturen

langsamer aus. Im Zusammenhang mit der Abtrocknung von Konstruktionen wird dieser Effekt auch als „thermische Antriebskomponente“ beschrieben, welche bei innen gedämmten Wänden geringer ist. Eine zusätzliche Abkühlung durch häufigere Regenereignisse und niedrige Außentemperaturen im Herbst und Winter verstärkt den negativen Effekt, der durch die Innendämmung hervorgerufen wird. Aus Sicht der Forschung ist der Einbauzeitpunkt interessant, weil auf diese Weise kritischere Messwerte wahrscheinlicher werden.

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die Montage der Dämmsysteme in der Reihenfolge der Balkennummern.



Bild 19 Links Aufspritzen der Zellulosedämmung in Feld 1; in der Mitte Abziehen auf die gewünschte Schichtdicke mit Führungsschienen; rechts die Montage der Perlite-Platten in Feld 2 mit der Position einer „Abklatschbeprobung“ für mikrobiologische Untersuchungen (roter Kreis)



Bild 20 Links Einbringen der ersten Lage Wärmedämmputz; in der Mitte Aufkleben der Holzweichfaserplatten auf Lehmputz (am Balkenkopf eine „Kleband-“Manschette für den luftdichten Anschluss); rechts zwei übereinanderliegende, 50 mm dicke Schilfmatten in Lehmputz



Bild 21 Gesamtansicht der fünf Dämmsysteme im Obergeschoß nach Abschluss der Arbeiten; von links: Zellulose, Perliteplatte, Wärmedämmputz, Holzweichfaserplatten und Schilfmatten

Von jedem Dämmsystem wurden bauseits auf Gipsfaserplatten Probekörper in der Größe von Norm-Paletten (0,8 x 1,2 m) für labortechnische Untersuchungen der gleichen Chargen hergestellt, wie sie auf den Wänden appliziert wurden. Nach dem Trocknen wurden die Probekörper an die TU Dresden zur Bestimmung der hygrothermischen Materialfunktionen und an die BOKU Wien zur Bestimmung der mikrobiologischen Aktivität versandt.

### 3.7 Erfahrungen im Spiegel des WTA-Merkblatts 8-14

Die WTA (Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e. V.) ist ein internationaler Verein, der sich mit der Forschung und deren praktischer Anwendung auf dem Gebiet der Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege beschäftigt. In insgesamt elf Referaten werden Themenkreise wie Holz(-schutz), Naturstein, Bauphysik oder Bauwerksabdichtung bearbeitet und in kurzen Merkblättern zusammengefasst, die in regelmäßigen Abständen überarbeitet werden. Im Referat 8 (Fachwerk) hatte sich ein Arbeitskreis aus Ingenieuren, Handwerkern und Wissenschaftlern mit der Thematik von Balkenköpfen in Außenwänden auseinandergesetzt.

Das WTA-Merkblatt 8-14 (*WTA-MB 8-14*) erörtert die möglichen Einbausituationen von Holzbalkenköpfen bei Außen- und Innendämmungen und weist auf die mögliche Gefahren bei Innendämmungen hin. An der Erstellung des Merkblattes hat der Verfasser dieser Arbeit mitgewirkt. Die Fertigstellung des Merkblattentwurfes erfolgte bereits im Juni 2012, sodass nicht alle

Erfahrungen des Projektes OEKO-ID in das Merkblatt einfließen konnten. Die im Merkblatt empfohlene Vorgehensweise soll anhand der praktischen Erfahrungen in der Schönbrunn-gasse 30 diskutiert werden.

In dem WTA-Merkblatt nimmt die Befundung des Ist- Zustandes sowohl der Balkenköpfe und deren Auflagersituation, als auch der Wandkonstruktion und deren Schlagregenbelastung und -belastbarkeit einen breiten Raum ein. Es wird ein umfangreiches Untersuchungsprogramm mit entsprechenden Nachweisen empfohlen, das, in Gänze angewandt, mit größerem Aufwand verbunden sein kann. Die Durchführung einer Bauzustandsanalyse mit messtechnischer Erfassung über Bohrwiderstandsmessungen, Endoskopie, chemischer Analyse oder Ultraschall und einer pathologischen Untersuchung der konstruktiven Hölzer auf Befall von Fäulnispilzen bzw. Schadinsekten sollen zielgerichtet Auskunft über den Zustand der Balken und deren Tragfähigkeit geben.

So wird für die Bestandsaufnahme gefordert:

- Ermittlung des Deckenaufbaus (Maße, Materialien) und der Auflagersituation
- Ermittlung von Schwachstellen
- Ermittlung der Feuchtebelastung und Ursachen, wie Schlagregenbelastung, aufsteigende Feuchte, Kondensatbildung, Nutzung, etc.
- Ermittlung geschädigter Balkenköpfe

Anders als im Testhaus ist es in bewohnten Mehrparteienhäusern (Miete oder Wohnungseigentum) nicht einfach und häufig nicht möglich, die Deckenaufbau-situation in der im WTA-Merkblatt geforderten Weise zu erkunden, um eine Entscheidung über die Durchführung oder Unterlassung einer Innendämmmaßnahme treffen zu können. Soll nur eine Wohneinheit eine Innendämmung erhalten, wird die Genehmigung vom darunter- oder darüber liegenden Wohnungseigentümer oder Mieter, den Fußboden oder die Decke im Auflagerbereich zu öffnen, oft nicht erteilt. Die Befundung ist dann ausschließlich auf die Öffnung der Decke und oder des Fußbodens beschränkt.

Das Freilegen der Deckenbalken im Auflagerbereich von unten war in der Schönbrunn-gasse vergleichsweise einfach zu bewerkstelligen und betrifft einen schmalen Streifen entlang der Außenwand. So konnte problemlos die Lage der Deckenbalken, die Auflagerung, die Dimensionierung der Balkentaschen und der Zustand der Balkenköpfe ermittelt werden. Die Höhe des Einschubbodens ungefähr in der Mitte der Balken, gewährte einen großzügigeren Einblick.

Endoskopische Untersuchungen des Ist- Zustandes der Balkenköpfe und der Auflagersituation sind nur dann mit minimaler Zerstörung des Fußbodens oder der Decke möglich, wenn die genaue Lage der Deckenbalken und deren Dimension bekannt sind. Für gewöhnlich fehlen aber solche Angaben in den historischen Plänen, was die Anzahl der Löcher für die Endoskopie erhöht. Ein ergänzender Hinweis im Merkblatt wäre hilfreich, dass der günstigste Zeitpunkt für eine Befundung am Ende des Winters ist, zum Zeitpunkt der größtmöglichen Kondensatanreicherung im Balkenkopfbereich oder, wenn die Qualität des Schlagregenschutzes in Frage steht, einige Tage nach einem größeren Schlagregenereignis.

Nach der Analyse der Balkenköpfe und Einbausituation sprach in der Schönbrunngrasse 30 nichts gegen eine Innendämmung. Die zwei wichtigsten Forderungen waren gegeben:

- es lag keine Vorschädigung der Holzbalken vor und das Mauerwerk war ausreichend trocken
- in Anbetracht der Situation vor Ort waren die Voraussetzungen für einen ausreichenden Schlagregenschutz aufgrund der Ausrichtung und wegen des Vorhandenseins eines Außenputzes gut. Fehlstellen im Bestandsaußenputz wurden ertüchtigt.

Wären vor dem Einbau einer Innendämmung schon kritische Feuchtigkeitswerte vorhanden gewesen, hätten die Ursachen erhoben und beseitigt (z. B. undichte Blechanschlüsse bei Gsimen, eiserne Deckenanker an der Fassade) und geschädigte Holzteile ausgetauscht werden müssen. Von einer Innendämmung hätte an diesem Objekt je nach Art der Schädigung Abstand genommen werden müssen.

Im Projekt OEKO-ID wurde die im *WTA-MB 8-14* empfohlene Vorgehensweise hinsichtlich der Einbausituation von Balkenköpfen bei Innendämmungen eingehalten. Dort wird beschrieben, dass die Balkenköpfe keinen Kontakt zwischen Hirnholz, Flanken und Oberseite des Balkens mit dem Mauerwerk haben sollen und der Luftspalt vor dem Hirnholz mindestens 20 bis 30 mm zu betragen hat. Eine kapillare Trennung von Balkenunterseite und Mauerwerk, z. B. in Form einer bituminösen Schicht, war allerdings nicht vorhanden. Da der Balkenkopf ursprünglich luftumspült war, keine Schüttung in den Auflagertaschen vorgefunden wurde und eine niedrige Schlagregenbelastung vorliegt, war und ist eine solche hygri-sche Trennschicht nicht erforderlich. Seitliche und obere Fugen sind gemäß WTA-Merkblatt mit vorkomprimierten Dichtbändern oder Hinterstopfung mit anschließendem Mörtelverstrich „*konvektionshemmend*“ zu schließen. Diese Empfehlung wurde nur im Obergeschoß durch das Überputzen des Luftspalts, durch das Schließen der Holzrisse mittels eingeleimten Holzdübeln und durch das Anbringen von Dichtungsbändern an sechs der acht Balken erfüllt. Im Sinne der Erforschung real vorkommender Konstruktionsausführungen wurden zwei Balkentaschen überhaupt nicht abgedichtet (Balken 7 und 8) sowie alle Balkenaufleger 1 bis 6 oberhalb der Schüttung ebenfalls nicht verschlossen.

### 3.7.1 Weitere relevante WTA-Merkblätter

Zum Zeitpunkt des Einbaus der Innendämmung waren die Merkblätter *WTA-MB 6-4* und *WTA-MB 6-5* noch nicht veröffentlicht. Beide beziehen sich auf Innendämmungen im Altbaubereich. Die in *WTA-MB 6-4* angebotene Nachweismöglichkeit richtet sich nur an leicht diffusionsbremsende bzw. -hemmende Innendämmsysteme und berücksichtigt nicht die entlastende Wirkung der Flüssigwasserleitfähigkeit oder des Sorptionsverhaltens. Daher greift es nicht für die in der Schönbrunngrasse 30 gewählten Innendämmsysteme.

Das *WTA-MB 6-5* sieht einen ausreichenden Schlagregenschutz „*in der Regel*“ als sichergestellt, wenn die Außenoberfläche die Anforderungen

$$w \cdot s_d \leq 0,1 \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{h}^{0,5}) \text{ mit } w \leq 0,2 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5}) \text{ und } s_d \leq 1,0 \text{ m}$$



erfüllt. Diese Anforderung ist mit einem w-Wert des Putzes von weit über  $0,2 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$  nicht gegeben, jedoch ist die örtliche Schlagregenbelastung sehr gering (s. Kapitel 6.4).

## 3.8 Beschreibung und Bewertung der Dämmsysteme

Bei der Applikation der einzelnen Dämmsysteme zeigten sich deutliche Unterschiede in der Verarbeitbarkeit und der Eignung hinsichtlich des maschinellen und händischen Auftrags, der Schmutzentwicklung, der Austrocknungsdauer und des Feuchtehaushalts.

### 3.8.1 Aufspritz-Zellulose

Wegen der Umstände bei der Verarbeitung erscheint die Aufspritz-Zellulose für bewohnte (Klein-)Baustellen im Altbestand zum einen wegen der Schmutz- und Staubentwicklung, die bei der Applikation entsteht, zum anderen wegen der langen Trockenzeit vor dem Aufbringen des Grobputzes, als nur eingeschränkt empfehlenswert. Andererseits passt sich der Dämmstoff auch an größere Unebenheiten sehr gut an, ohne dass ein weiterer Arbeitsschritt dafür nötig wäre. Der hygrische Kontakt der Dämmung zum Mauerwerk ist somit unmittelbar gewährleistet. Die Führung des Hobels mit dem überschüssigen Material ist in der Fläche praktisch, im Detail jedoch unhandlich. Die Ausbildung von nach innen gerichteten Ecken wie bei Fensterleibungen ist eine Herausforderung an den Verarbeiter und muss auch von einem Spezialisten mit Geduld ausgeführt werden, da die weiche Zellulose-Masse immer wieder abbricht. Entsprechend den Erfahrungen im Testhaus könnte die Ausbildung der Leibungsdämmung z. B. in Form einer Holzweichfaserplatte die Verarbeitung sehr erleichtern (s. a. *Danner (2010)*).



Bild 22 Zelluloseflocken, Grundlage für die Aufspritz-Zellulose (Quelle: Renocell/Isocell GmbH)

### 3.8.2 Perliteplatte

Eine Voraussetzung für das Anbringen von Perliteplatten ist ein ebener und tragfähiger Untergrund, damit es zu einem vollflächigen hygrischen Kontakt zwischen Dämmplatte und Klebemörtel kommt. Bei nicht vollflächigem Kontakt besteht die Gefahr erhöhter Flüssigwassermengen. Denn durch das System diffundierender Wasserdampf kondensiert im Falle eines Spaltes zwischen Dämmung und Bestand auf der kalten Seite, dem Bestandsmauerwerk, aus und würde im Hohlraum herablaufen. Im Testhaus war die Ebenheit der Bestandswand ausreichend, sodass keine Ausgleichsschicht angebracht und deren Trocknung abgewartet werden musste. Das kommt in der täglichen Baupraxis selten vor. Die Bearbeitung der Platten und Zuschnitte sind leicht mit Holzbearbeitungswerkzeugen vorzunehmen. Eckausbildungen, z. B.

an Fensterlaibungen, dürfen erst nach Abbinden des Klebers abgeschnitten werden. Da kein solcher Anschluss vorhanden war, konnte das Putzsystem vom Verarbeiter noch am selben Tag aufgebracht und das Feld in der Fläche fertiggestellt werden.

Das System ermöglicht sauberes Arbeiten bei äußerst geringem Feuchteintrag, geringem Werkzeugaufwand und kann von einer Person hergestellt werden. Durch die industrielle Fertigung des Plattenmaterials ist ein vergleichsweise konstanter Wärmewiderstand garantiert.



Bild 23 Perliteplatte TecTem® Insulation Board Indoor (KnaufAqua (2019))

### 3.8.3 Wärmedämmputz

Der Auftrag des Thermosilitputzes wurde als Maschinenputz in zwei Schichten à circa 60 mm Dicke ausgeführt. Die zweite Schicht wurde aus terminlichen Gründen (Semesterbeginn des Kindergartens) bereits eine Woche nach dem Auftrag der ersten Schicht aufgebracht, ohne dass diese vollkommen austrocknen konnte. Für den Wärmedämmputz müssen eigentlich längere Austrocknungszeiten vor dem Auftrag der folgenden Schicht eingehalten werden, weil eine weitere Schicht den Diffusionswiderstand vergrößert und sich die Austrocknungsdauer erheblich verlängern kann. Wie später ausgeführt wird, war die Austrocknungszeit dieses Dämmsystems tatsächlich wesentlich länger als die der anderen Systeme. Es wurde vermutet, dass sich Verglasungseffekte an der Oberfläche der ersten Schicht zusätzlich negativ auswirkten und das Abtrocknen weiter verzögerten bzw. behinderten. Nach Aussage des Verarbeiters wurde deshalb die erste Schicht vor Aufbringen der zweiten Putzlage aufgeraut, dennoch zeigen die Messungen eine sehr lange Austrocknungszeit. Ferner wurde vermutet, dass beim Transport des Mörtels durch die Schläuche in höher liegende Geschoße die Thermosilit-Körner des Zuschlages auf dem Weg durchs Rohr teilweise zerrieben werden, wodurch die Dichte des Dämmörtels zu- und die Porosität abnehmen. Die Messungen im Materiallabor hatten gegenüber den Herstellerangaben von  $250 \text{ kg/m}^3$  eine Dichte von  $650 \text{ kg/m}^3$  ergeben. Um die Eigenschaften des Materials nicht zu verändern, erscheinen deshalb die Aufbringung von Hand oder die Begrenzung der Förderhöhe als empfehlenswert. Die Kosten für die Verarbeitung würden sich damit aber erhöhen. Die Möglichkeit, den Mischer und die Pumpe näher an das jeweilige Geschoß zu positionieren, wäre mit den vor Ort ausgeführten Geräten unpraktisch gewesen. Mittlerweile wird vom Hersteller die Wärmeleitfähigkeit ( $\lambda$  nach EN 1745 für P=90%) mit  $0,13 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$  statt  $0,075 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$  angegeben.



Bild 24 Thermosilit-Körner im CalceClima® Thermo Kalk-Wärmedämmputz (Röfix (2019))

#### 3.8.4 Holzweichfaserplatte

Dieses Innendämm-System besteht aus Lehmkleber, Weichfaserplatte, Lehmunterputz, Armierungsgewebe und Lehmfeinputz. Wie bei den Perliteplatten ist auch bei den Holzweichfaserplatten ein ebener, tragfähiger Untergrund Voraussetzung für einen vollflächigen hygrischen Kontakt zwischen Innendämmung und Mauerwerk. Weil der Untergrund den Anforderungen des Herstellers genügt, musste keine Ausgleichsschicht angebracht und deren Trocknung abgewartet werden. Die Bearbeitung der Platten und Zuschnitte sind mittels Holzbearbeitungswerkzeugen leicht durchführbar. Der Feuchteintrag durch den Lehmputz hält sich durch die geringe Dicke von jeweils ca. 10 mm in Grenzen. Durch den Lehmputz als Kleberschicht erhält das System eine weitere Schicht mit gut feuchtepuffernden Eigenschaften. Sofort nach dem Aufbringen der Dämmschicht wird mit einem Zahnpachtel der Lehmunterputz in einer horizontalen Rillenstruktur aufgebracht. Die Wartezeit vor Aufbringen des Feinputzes beträgt 1 Woche bis 10 Tage. Nach der Trocknungsphase wird die Fläche mit einer Glasfaserarmierung genetzt und das Netz mit Lehmfeinputz eingeputzt. Danach bedarf es nochmals einer Trockenzeit von einer Woche um den Oberputz aufbringen zu können. Alle drei beschriebenen Deckschichten haben eine Schichtstärke von je ca. 3 mm. Die industrielle Fertigung des Plattenmaterials garantiert einen vergleichsweise konstanten Wärmewiderstand.



Bild 25 Holzweichfaserplatte STEICOtherm internal (Steico (2019))

#### 3.8.5 Schilfplatte

Die Ausführung der Dämmschicht erfolgte in zwei Schichten von jeweils 50 mm Dicke mit Lehmkleber als hygri-schem Kontakt zur Wand. Die erste Platte wurde in den noch feuchten Lehmkleber eingepresst und mechanisch gesichert. Die zweite Schicht wurde nur mit Hilfe von Dübeln mechanisch durch die erste Platte hindurch in der Wand befestigt. Gemäß den Verar-



beutungsempfehlungen erfolgte die Verlegung der Platten horizontal, um einerseits eine bessere Putzhaftung zu erreichen und um andererseits eine vereinfachte vertikale Luftkonvektion innerhalb der Dämmschicht zu unterbinden. Nur im Leibungsbereich der Fenster oder Türen ist das Anbringen der Platten hochkant besser hinsichtlich der Verarbeitung. Zuschnitte und das Anpassen an kleinere Details sind durch die Bindung der Platten mit verzinktem Stahldraht schwieriger als bei homogenen Plattenmaterialien.

Die Austrocknungszeit ist durch den ca. 20 mm dicken Lehmgrubputz um einiges länger als bei der Weichfaserplatte (Wartezeit vor Aufbringen des Feinputzes, je nach Temperatur und Luftfeuchtigkeit, 2-3 Wochen). Das feuchteregulierende Verhalten des Lehmputzes ist jedoch als Behaglichkeitskriterium positiv einzuschätzen.



Bild 26 Schilfrohrplatte (Prolehm (2019))

Nach Fertigstellung aller Dämmsysteme und Putzarbeiten wurde die Decke wieder geschlossen und ein Putz auf Kalkbasis in gleicher Ausführung wie der Bestand bis zum Deckenrand ausgeführt. Die einzelnen Verarbeiter ergänzten in weiterer Folge in ihrem Putzsystem die Hohlkehle.

Für die Konstruktionen mit Lehm sind die Anschlüsse an die Bestandputze möglichst mit Putzanschlussprofilen herzustellen. Von einer Abdichtung der Fuge zwischen Alt- und Neuputz nur mit Acryldichtstoff wird abgeraten, da durch den dreidimensionalen Anschluss von einer unregelmäßigen Rissbildung ausgegangen werden kann. Eine ordnungsgemäße Fugenausbildung mit entsprechender Breite und Tiefenbegrenzung dient beim Aufbringen des Putzes auch als Abzugsleiste und ergibt eine definierte dünne Fuge, die dann mit Acryl geschlossen werden kann.

Ein ökologischer Vergleich der Dämmsysteme erfolgte mit Hilfe des OI3-Index, wofür auf den Abschlussbericht des Projektes OEKO-ID verwiesen sei (Kautsch et al. (2013)).

### 3.9 Erfahrungen beim Rückbau und der Entsorgung

Es war vorab mit dem Eigentümer vereinbart worden, nach dem Projektabschluss die Räumlichkeiten in den ursprünglichen Zustand rückzuführen und die applizierten Dämmsysteme wieder zu entfernen. Diese Forderung bot über die generierten Messergebnisse hinaus empirisch gewonnene Erkenntnisse über die einzelnen Dämmsysteme hinsichtlich eines sortenreinen Abbruchs, der Reversibilität und der möglichen Wiederherstellung des ursprünglichen

Zustandes. Das stellt vor allem bei denkmalgeschützter Bausubstanz eine anzustrebende Eigenschaft für jegliche Ertüchtigung dar.

Als geeignete und verhältnismäßige Abbruchmethode wurde das mechanische Abtragen, das Abbrechen der Baustoffe mit handgeführten Werkzeugen gewählt. Zum Einsatz kamen Spaten, Maurerhammer und Spachtel.

In Weiteren werden die Möglichkeiten einer sortenreinen Baustofftrennung für die konkreten Dämmsysteme und die gesetzlich vorgeschriebene Trennung entsprechend der Mengenschwellen (die gesetzlich vorgeschriebene Trennung ist, abhängig vom Material, erst ab einer gewissen Menge durchzuführen) erläutert, die insbesondere durch den Einsatz der gewählten selektiven Abbruchmethode realisiert werden kann. Maßgebend dafür ist, eine möglichst hochwertige Wiederverwendung der Abbruchmassen sicherzustellen und somit eine rückstandsarme Kreislaufwirtschaft und einen möglichst geschlossenen Stoffkreislauf zu erzielen. Dabei zeigte es sich, dass die sortenreine Trennung durch die Gegebenheiten vor Ort erschwert werden kann. In der Testwand war beispielsweise die Haftzugfestigkeit zwischen Dämmsystem und Bestandputz größer als die Haftzugfestigkeit zwischen Bestandputz und Mauerwerk.

Die Erfahrungen werden anschließend in Tab. 4 zusammengefasst.

#### **3.9.1 Zellulose**

Zunächst wurde versucht, den Zelluloseputz durch Klopfen mit dem Spaten von der Dämmung zu lösen. In weiterer Folge gelang es, das Armierungsgewebe mit dem Feinputz abzuziehen. Der Grundputz verblieb jedoch auf der Dämmung und konnte händisch nicht abgetrennt werden. Durch das seitliche Einrammen des Spatens und Aushebeln löste sich die gesamte Dämmschicht in einem Stück und zog den mürben Bestandputz großflächig mit ab. Die Eigenfestigkeit der Dämmung und die Haftung am Untergrund waren somit höher als die Haftzugfestigkeit des Putzes bzw. die Haftung zwischen mürbem Unterputz und Mauerwerk.

Eine sortenreine Trennung der einzelnen Schichten war im Testhaus ohne größeren Aufwand folglich nicht möglich. Die Wiederherstellungsmaßnahmen des ursprünglichen Zustandes waren bei diesem Dämmfeld am aufwändigsten. Das war allerdings auf die schlechte Qualität des Bestandputzes zurückzuführen und nicht auf das Dämmsystem. Unter Umständen hatte die hohe Einbaufeuchte die Haftfestigkeit des Bestandputzes negativ beeinflusst. Die Festigkeit einer mineralischen Bestandputzschicht kann mit einer mehrfachen Kalkwassertränkung erhöht werden.

Die empirisch-olfaktorische Diagnose ergab keine auffallenden Gerüche.



Bild 27 Abbruch Zellulosedämmung: Dämmung löste sich großflächig mit Teilen des Bestandputzes

### 3.9.2 Perliteplatte

Der Klebemörtel der Perliteplatte wies die höchste, subjektiv festgestellte Haftzugfestigkeit am Untergrund auf. Die Eigenfestigkeit der Platte war geringer als die Haftung des Klebers am Untergrund. In der Bilddokumentation (Bild 28 links) kann man erkennen, dass sich die Platte nur durch stückweises Abscheren mit einem Spaten löste. Eine sortenreine Trennung des Dämmsystem-Oberputzes von der Dämmplatte war nicht möglich, was als unabhängig von der Größe der zu entsorgenden Masse beurteilt wird.

Die empirisch-olfaktorische Diagnose ergab keine auffallenden Gerüche.



Bild 28 Abbruch Perliteplatte: einzelne Abscherflächen sind links gut sichtbar

### 3.9.3 Wärmedämmputz

Der Abbruch erfolgte wieder mit dem Spaten indem versucht wurde, zwischen ursprünglichem Putz und Dämmung den Spaten einzutreiben und die Dämmung abzuhebeln. Bild 29 links illustriert, wie sich schon im ersten Versuch die gesamte Dämmung durch Aufgehen einer

Fuge vollkommen von der Wand löste und dann in Stücken von der Wand gebrochen wurde. Die Haftung der Dämmung war mitunter so stark, dass der mürbe Bestandputz teilweise mit abgezogen wurde.

Die empirisch-olfaktorische Diagnose ergab keine auffallenden Gerüche.



Bild 29 Abbruch Wärmedämmputz

#### 3.9.4 Holzweichfaserplatten

Die Haftzugfestigkeit von Putz, Armierungsgewebe und Spachtelung auf den Dämmplatten war sehr hoch und ließ sich nicht durch Abziehen des Armierungsgewebes von der Platte lösen. Die Platte riss beim Abbruch mit dem Spaten immer wieder entlang der Verleimung der drei 20 mm dicken Platten auf und konnte nur stückweise abgebrochen werden. Es stellte sich heraus, dass die Eigenfestigkeit der Platten kleiner war als die Haftzugfestigkeit der Verklebung am Untergrund. Deshalb verblieben Reste der Platte und des mit Zahnschachtel aufgebraachten Klebers auf der ursprünglichen Putzschicht (Bild 30 links und mitte). In weiterer Folge wurden die Reste des Klebers mit einem Spachtel vom Untergrund abgeschabt. Der Abbruch der Holzfaserplatten erwies sich deshalb als zeit- und arbeitsaufwändig.

Die empirisch-olfaktorische Diagnose ergab keine auffallenden Gerüche.



Bild 30 Abbruch Holzweichfaserplatte



### 3.9.5 Schilf

Der Abbruch der Schilfplatten vollzog sich in mehreren Schritten. Zunächst wurde der Lehmputz an der Wand mit dem Spaten abgeklopft und am Armierungsgewebe von den Dämmplatten gezogen (Bild 31 mitte). Dann wurde händisch und auch unter Zuhilfenahme des Spatens die obere und danach die untere Schilfplatte ausgehebelt und abgezogen. Größtenteils konnten die mechanischen Befestigungen mit aus der Wand gezogen werden, was im vorliegenden Fall sicher auch daher rührte, dass vom Verarbeiter keine Metalldorne in die Hülsen eingeschlagen worden waren. Die Platten lösten sich deshalb leicht vom Untergrund, ebenfalls die in den Lehmkleber gebettete erste Schicht. Der Lehmkleber wurde ebenfalls mit dem Spaten abgeklopft und löste sich bis auf kleine Stellen ohne Beschädigung des Bestandputzes (Bild 31 rechts).

Im Vorfeld der Abrissarbeiten waren am 7. Mai 2013 Proben für den Nachweis von Schimmelpilzen entnommen worden, um zu überprüfen, ob sich nach der letzten Winterperiode mit den hohen Raumlufffeuchten Schimmelpilze gebildet hätten. Dafür waren mit einem Lochbohrer je zwei Materialproben in allen Feldern des Ober- und Dachgeschoßes gezogen worden, die bis zum Bestandputz reichten. Lediglich an den Schilfproben war ein organischer Geruch festzustellen. Der Geruch nach frisch eingebrachtem Heu bzw. nach einer kurzzeitigen Lagerung in einem Silo lässt Rückschlüsse auf eine biologische Aktivität zu. Er war im Dachgeschoß mit der sehr hohen Raumlufffeuchte während des Winters ausgeprägt wahrzunehmen, im Obergeschoß dagegen nur schwach. Beim Abbruch im August 2013 war der Geruch nicht mehr festzustellen.

Die Schilfplatten konnten vollständig wieder von Kleber und Putz getrennt werden. Der Zustand war ausreichend, um sie in Recycling-Börsen (z. B. [www.recycling.or.at](http://www.recycling.or.at)) zur Wiederverwertung anzubieten. Die sortenreine Trennung dieses Aufbaus erscheint nicht nur hier, sondern auch für größere Flächen als wirtschaftlich praktikabel. Es konnte damit der höchste Grad an Reversibilität festgestellt werden. Für eine reine biologische Kompostierung müsste das bindende Drahtgeflecht von den Schilfhalmen entfernt werden.



Bild 31 Abbruch Schilfplatten

### 3.9.6 Auslösen der Sensoren

Die luftdichte Verklebung der Balkenauflagertaschen war bei der Öffnung augenscheinlich voll funktionstüchtig und wies beim Abbruch sehr hohe Haftzugfestigkeiten auf (Bild 32). Die Abdichtungsbänder zwischen den Balken ließen sich deshalb teilweise nicht mehr entfernen. Nach dem Öffnen der Balkentaschen wurden die dort seitlich der Balken positionierten Sensoren geborgen. Diese Temperatur- und Feuchte-Sensoren ließen sich leicht und unversehrt aus den Balkentaschen entnehmen.

In weiterer Folge wurde versucht, die eingeschlagenen Nägel zur Messung der Holzfeuchte mit Zangen aus den Balkenköpfen zu ziehen. Die langen Nägel saßen jedoch zu fest und ließen sich nicht herausziehen und verblieben somit in den Balkenköpfen. Die Feuchtesensoren auf der Grenzfläche zwischen Dämmsystemen und bestehendem Putz konnten bei allen Dämmfeldern unversehrt ohne weitere Schädigung demontiert werden.



Bild 32 Sensoren nach Entfernen der Schilfdämmung an Auflager 6



Bild 33 Auflager 5 nach Entfernen von Dämmung und Dichtband: Holzdübel und Korkfüllmasse kommen zum Vorschein



Bild 34 Auflager 2: links das Kabel eines Auflagersensors; rechts herunterhängende Kabel weiterer Auflagersensoren

### 3.9.7 Putz- und Malerarbeiten

Die beschädigten Wandflächen wurden mit Kalkputz ausgebessert. Wie vormals erfolgte das Schließen des Deckenhohlraums bis zur Außenwand mit Holzbrettern. Nach der mechanischen Befestigung eines Ziegelputzgewebes auf den Brettern ließ sich wieder eine Hohlkehle ausbilden, welche gegenwärtig den Anschluss von der Wandoberfläche zum bestehenden Deckenputz herstellt.

Nach einer Austrocknungszeit von zwei Wochen wurden alle Wand- und Deckenflächen mit einer diffusionsoffenen Naturharzfarbe neu bemalt.

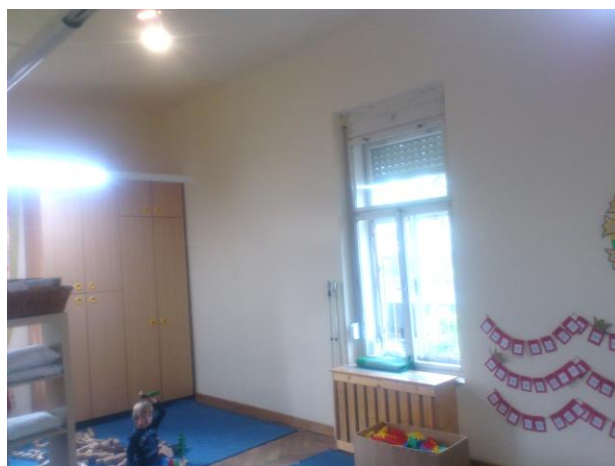


Bild 35 Blick ins Obergeschoßzimmer nach Abbruch der Innendämmung und Wiederherstellung des ursprünglichen Zustands

### 3.10 Zusammenfassung der baupraktischen Eigenschaften der Dämmsysteme

Die nachfolgende Tabelle 4 stellt einige, für die praktische Anwendung relevante Aspekte der im Projekt verwendeten Dämmsysteme gegenüber.

Tab. 4 Tabellarischer Vergleich der verwendeten Dämmsysteme, Einschätzungen beziehen sich auf die Erfahrungen im Testhaus

	Zellulose	Perliteplatte	Thermosilputz	Holzweichfaserplatte	Schilfdämmplatte
Material	organisch	mineralisch	mineralisch	organisch	organisch
Applikation	aufspritzen	kleben	aufspritzen	kleben + dübeln	kleben + dübeln
Dicken in mm laut Hersteller	93	90	124	77	124
Einbaufeuchte	hoch	gering	hoch	gering	mittel
Anforderung an Untergrund	tragfähig	tragfähig und eben	tragfähig	tragfähig und eben	tragfähig
Einbaudauer	4-5 Wochen	1-2 Tage	„mehrere Wochen“	7-10 Tage	2-3 Wochen
Montageaufwand	groß wegen Eckausbildung	gering	mittel, Förderlänge begrenzt	mittel	mittel
Schmutzfaktor	hoch	gering	mittel	mittel	mittel
Befestigungsmöglichkeiten	Bilder und Spiegel direkt, Regale und Wandschränke etc. ja nach Gewicht in tragender Wand oder mit speziellen Elementen (s. Anhang A 2)				
E-Stecker und Schalterdosen	verlängern und am Mauerwerk befestigen bzw. siehe Anhang A 2				
OI3 <sub>Kon</sub> -Index	10,0	25,5	26,5	9,2	-1,4
Reversibilität	mittel, große Mengen anhaftenden Bestandputzes	mittel, Kleber vom Bestandsputz schwer zu trennen	gut, Putz löste sich als Ganzes von der Wand	mittel, Kleber vom Bestandsputz schwer zu trennen	sehr gut, bis auf Dübellöcher keine Beschädigung
Komponententrennbarkeit	nur zum Teil möglich	nicht möglich	nicht notwendig	nicht möglich	möglich
Recycling	recyclierbar Putz: mineral. Bauschutt	mineral. Bauschutt	mineral. Bauschutt	kompostierbar	recyclierbar, kompostierbar

Die Auswirkungen der unterschiedlichen Einbaufeuchten werden in Kapitel 5 anhand der Messdaten diskutiert. Die Systeme Perliteplatte und Holzweichfaserplatte stellen zwar die



höchsten Anforderungen an die Ebenheit des Untergrundes, verursachten aber bei weitem am wenigsten Schmutz. Auch die Dauer des Einbaus lag mit 2 Tagen bis 2 Wochen niedrig. Die Schilfplatte mit dem Lehmputz dauerte etwas länger, bedingt durch die Trockenzeit des Lehmunterputzes. Der Dämmputz war zwar schnell aufgebracht, benötigt aber ob der großen Schichtdicke von hier 60 mm je Putzlage entsprechend lange zur Austrocknung. Im gegenständlichen Fall konnte die empfohlene Trockenzeit auch nicht eingehalten werden, was sich dann durch die sehr langsame Austrocknung im ersten Jahr negativ bemerkbar machte. Bei der aufgespritzten Zellulose musste ebenfalls einige Wochen gewartet werden, bis der Deckputz aufgebracht werden konnte. Hier war vor allem die Verschmutzung des Umfelds sehr hoch. Auch die Austrocknungsdauer war länger als bei den Plattenwerkstoffen, jedoch noch viel zügiger im Vergleich zum Wärmedämmputz.

Beim Abbruch der Konstruktionen zeigte sich, dass die Zellulose, die Perliteplatte und die Holzweichfaserplatte am schwersten vom Untergrund zu lösen waren. Die Zellulose haftete so gut, dass beim Abbruch großflächig der mürbe Unterputz mit der Zellulose mit abgetragen wurde. Der Dämmputz löste sich in einer Schicht und war leicht zu entfernen. Beim Schilf konnte das Armierungsgewebe leicht vom Lehm getrennt werden, auch der Lehmputz ließ sich von den Platten ohne Schwierigkeiten durch Abklopfen entfernen, so dass die Schilfplatten nach Entfernen der Dübel zur Gänze wiedergewonnen werden konnten und als solche anderweitig wieder eingebaut werden könnten. Einschränkend muss erwähnt werden, dass die Verarbeiter das Dämmsystem nicht korrekt angebracht hatten, weswegen sich die Dübel leicht entfernen ließen. Bis auf die Dübellöcher blieb die Wand unversehrt, was bei denkmalgeschützten Objekten von Vorteil ist, wenn der ursprüngliche Zustand wiederhergestellt werden soll.

### **3.11 Reduzierung der Transmissionswärmeverluste durch Innendämmmaßnahmen**

In den folgenden Tabellen ist dargestellt, wie sich die Innendämmmaßnahmen auf den Transmissionswärmeverlust auswirken. Es werden drei Außentemperaturszenarien mit den dazugehörigen Wärmeverlustströmen dargestellt bei jeweils konstanter Innentemperatur von 20 °C. In der Spalte Verbrauch ist der auf einen Quadratmeter berechnete Heizenergiebedarf pro Jahr für den Standort Graz angeführt. Der Verbrauch wird mit Hilfe der Heizgradtage, das ist die Summe der stündlichen Temperaturdifferenzen zwischen Innentemperatur und mittlerer Außentemperatur aller Heiztage im Jahr, gebildet. Die Heizgradtage summierten sich für den Standort Graz zu 3588 K·h, wobei die Heizgrenze mit 12°C festgelegt war. Auf dieser Basis ließ sich der jeweilige Transmissionswärmeverlust in Kilowattstunden pro Jahr und m<sup>2</sup> ermitteln. Die Differenz zwischen ungedämmter und gedämmter Wand ergibt die Energieeinsparung.

Der berechnete U-Wert der Bestandswand musste auf Grund der in den Untersuchungen der TU Dresden gewonnenen Materialkennwerte korrigiert werden. Das im Versuchsobjekt verbaute Ziegelmaterial ist poröser und damit leichter als die im *Baubook (2019)* (Datenbank für Baustoffe vom Energieinstitut Vorarlberg) angegebenen Werte, wodurch sich für die gedämmten Konstruktionen U-Werte ergaben, die zum Teil unter  $0,35 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  lagen.

Tab. 5 Wärmeenergieverluste bei einer Innentemperatur von  $20^\circ\text{C}$  und drei unterschiedlichen Außentemperaturen, Energieeinsparung ermittelt auf Grund der Heizgradtage für den Standort Graz, Schönbrunnngasse 30, mit den tatsächlichen Wärmeleitfähigkeiten

	U-Wert	$\theta_{\text{extern}}$ -10,5°C	$\theta_{\text{extern}}$ -2,5°C	$\theta_{\text{extern}}$ 7,5°C	Verbrauch	Einsparung	
Temperaturdifferenz $\theta_{\text{ext}}-\theta_{\text{int}}$		$\Delta\theta$ 30,5°C	$\Delta\theta$ 22,5°C	$\Delta\theta$ 12,5°C			
Einheit	W/(m <sup>2</sup> ·K)	W/m <sup>2</sup>	W/m <sup>2</sup>	W/m <sup>2</sup>	kWh/(a·m <sup>2</sup> )	kWh/(a·m <sup>2</sup> )	%
<b>Dämmsystem</b>							
- (ungedämmt)	0.695	21.2	15.6	8.7	2.49		
Zellulose (d= 80 mm)	0.316	9.6	7.1	4.0	1.13	1.36	54.6
Perliteplatte (d= 80 mm)	0.318	9.4	7.0	3.9	1.14	1.35	54,2
Dämmputz (d= 120 mm)	0.369	11.3	8.3	4.6	1.32	1.17	46.7
Holzweichfaser (d= 60 mm)	0.341	10.4	7.7	4.3	1.22	1.27	51.0
Schilf (d= 100 mm)	0.322	9.8	7.2	4.0	1.16	1.33	53.4

Tab. 6 Wärmeenergieverluste bei einer Innentemperatur von  $20^\circ\text{C}$  und drei unterschiedlichen Außentemperaturen, Energieeinsparung ermittelt auf Grund der Heizgradtage für den Standort Graz, Schönbrunnngasse 30, mit den ursprünglich gewählten Wärmeleitfähigkeiten aus *Baubook (2019)*

	U-Wert	$\theta_{\text{extern}}$ -10,5°C	$\theta_{\text{extern}}$ -2,5°C	$\theta_{\text{extern}}$ 7,5°C	Verbrauch	Einsparung	
Temperaturdifferenz $\theta_{\text{ext}}-\theta_{\text{int}}$		$\Delta\theta$ 30,5°C	$\Delta\theta$ 22,5°C	$\Delta\theta$ 12,5°C			
Einheit	W/(m <sup>2</sup> ·K)	W/m <sup>2</sup>	W/m <sup>2</sup>	W/m <sup>2</sup>	kWh/(a·m <sup>2</sup> )	kWh/(a·m <sup>2</sup> )	%
<b>Dämmsystem</b>							
- (ungedämmt)	1.176	35.9	26.5	14.7	4.22		
Zellulose (d= 80 mm)	0.406	12.4	9.1	5.1	1.46	2.76	65.4

Perliteplatte (d= 80 mm)	0.376	11.5	8.5	4.7	1.35	2.87	68.0
Dämmputz (d= 120 mm)	0.405	12.4	9.1	5.1	1.45	2.77	65.6
Holzweichfaser (d= 60 mm)	0.425	13.0	9.6	5.3	1.52	2.69	63.9
Schilf (d= 100 mm)	0.389	11.9	8.8	4.9	1.40	2.82	66.9

Der Vergleich der beiden Tab. 5 und Tab. 6 führt vor Augen, wie weit die tatsächliche Situation von einem Berechnungsergebnis abweichen kann, welches auf im vorliegenden Fall nicht zutreffenden Literaturwerten beruht. Zur Erstellung der Tab. 6 wurden für die Wärmeleitfähigkeiten die *Baubook*-Werte verwendet. Der damit berechnete U-Wert der Bestandskonstruktion von 1,176 W/(m<sup>2</sup>·K) liegt 66 % über dem realen Wert von 0,695 W/(m<sup>2</sup>·K) aus Tab. 5. Der höhere U-Wert aus dem *Baubook* (2019) führt zwar zu einer höheren Sicherheit bei hygrothermischen Berechnungen, gleichzeitig werden damit aber die möglichen Energieeinsparungen überschätzt. Bei Eigentümern werden damit zu hohe Erwartungen geschürt, die nicht eingehalten werden können. Die durchschnittliche, zu erwartende Einsparung an Heizenergieverlusten beträgt bei den gewählten klimatischen Randbedingungen mit den tatsächlichen Wärmeleitfähigkeiten durchschnittlich 51 %, mit den offiziellen Werten werden dagegen im Mittel 66 % prognostiziert.

Sollte eine Fehleinschätzung der möglichen Wärmeenergieeinsparungen aufgrund falscher Materialkennwerte häufiger vorkommen und ohne Angabe von Informationen publiziert werden, kann das einem allgemeinen Vertrauensverlust gegenüber Dämmmaßnahmen Vorschub leisten, was unbedingt verhindert werden sollte. Geht es um Hygieneaspekte und die Vermeidung von Bauschäden ist es ratsam, auf hohe Werte wie z. B. aus dem *Baubook* (2019) zurückzugreifen. Bei energetischen Prognoseberechnungen ist es anzustreben, die entscheidende Materialeigenschaft, die Wärmeleitfähigkeit, im Labor zu ermitteln.



## 4 Hygrothermische Materialkennwerte und -funktionen

Die numerische Simulation stellt innerhalb der Bauphysik ein nicht mehr wegzudenkendes Werkzeug dar. Studien, wie z. B. in *Roels et al. (2004b)* oder *Ruisinger et Grunewald (2009)* publiziert, wären ohne ihre Anwendung nicht möglich, Schlussfolgerungen hinsichtlich geeigneter Sanierungs- und Erhaltungskonzepte wären oft nur auf Grundlage langwieriger Messungen ableitbar oder nach der unangenehmen Methode „Trial and Error“ erzielbar.

Mit einer breiteren Anwendung steigen gleichzeitig die Anforderungen an die Genauigkeit und den Umfang der verwendeten Modelle und Daten. Während die spezifischen äußeren Gegebenheiten einer Bauteilsimulation wie der Anfangszustand oder die Klimarandbedingungen recht zuverlässig bestimmbar sind und auch die zur Verfügung stehenden Rechenverfahren bei gleichem Input vergleichbare Ergebnisse liefern (siehe EU-Projekt HAMSTAD in *Roels et al. (2004a)*), stellen vor allem die verwendeten Materialdaten ein entscheidendes Qualitätsmerkmal für die Simulationsergebnisse dar. Da der Aufwand für umfassende Materialuntersuchungen recht hoch ist, besteht ein großes Interesse an Materialmodellen, die möglichst genaue Ergebnisse bei einer geringen Anzahl zu messender Parameter liefern. Die Materialmodellierung erfordert demnach einen Kompromiss zwischen Laboraufwand und Genauigkeit in der Materialcharakterisierung. Der am Institut für Bauklimatik (IBK) der TU Dresden praktizierte Ansatz der Materialcharakterisierung verfolgt einen solchen Kompromiss und liegt auch dieser Arbeit bzw. dem Projekt OEKO-ID zugrunde.

Dieses Kapitel stellt zunächst die Experimente zur Bestimmung der Materialeigenschaften vor. Die wichtigsten gemessenen hygrothermischen Materialkennwerte sind in Tab. 9 aufgeführt. Tab. 10 trägt die Schichtaufbauten der einzelnen Dämmsysteme zusammen, sowie die sich daraus ergebenden charakteristischen Eigenschaften der Gesamtsysteme.

### 4.1 Materialuntersuchungen

Zur hygrothermischen Charakterisierung eines Baustoffes sind Messdaten der entsprechenden Speicher- und Transportkoeffizienten erforderlich. Die Tab. 7 listet die Experimente auf, die am Labor des Instituts für Bauklimatik für die Charakterisierung der Testhausmaterialien durchgeführt wurden. Die Bezeichnungen der Experimente werden durch die daraus abgeleiteten Materialeigenschaften, deren Symbole sowie der physikalischen Einheiten ergänzt.

Tab. 7 Experimente zur Bestimmung von Materialeigenschaften mit Symbolen und Einheiten

Experiment	Materialeigenschaft	Symbol	Einheit
Trocknung und Unterwasser-Vakuum	Rohdichte, Offene Porosität	$\rho_s$ $\Phi$	$\text{kg} / \text{m}^3$ $\text{m}^3 / \text{m}^3$
Wärmeflussmessung	Wärmeleitfähigkeit des trockenen Materials	$\lambda$	$\text{W} / (\text{m} \cdot \text{K})$

Experiment	Materialeigenschaft	Symbol	Einheit
Messung mit Wärme-Puls-Technologie	Spez. Wärmekapazität des trockenen Materials	$c$	$J / (kg \cdot K)$
Feuchtesorption in Exsikkatoren	Feuchtegehalt in Abh. von der relativen Luftfeuchte	$\theta_l(\phi)$	$m^3 / m^3$
Feuchteretention in Druckplattenapparaturen	Feuchtegehalt in Abh. vom Kapillardruck	$\theta_l(p_c)$	$m^3 / m^3$
Wasseraufnahmeexperiment	Feuchtegehalt in Abhängigkeit von der Zeit,	$\theta_l(t)$	$m^3 / m^3$
	Wasseraufnahmekoeffizient, kapillarer Feuchtegehalt	$A_w$ $\theta_{cap}$	$kg / (m^2 \cdot s^{0,5})$ $m^3 / m^3$
Trocknungsexperiment	Feuchtegehalt in Abhängigkeit von der Zeit	$\theta_l(t)$	$m^3 / m^3$
Dampfdiffusionsmessungen	Dry-cup/Wet-cup Dampfdiffusionswiderstände	$\mu_{dry}$	-
		$\mu_{wet}$	-
Strömungsmessungen an gesättigten Proben im Tensionsinfiltrimeter	Flüssigwasserleitfähigkeit bei Sättigung	$K_l(\theta_{eff})$	s

## 4.2 Messverfahren

Vor dem Einschleusen in den Messablauf werden die Proben jeweils konfektioniert und den Versuchen entsprechend vorkonditioniert.

### 4.2.1 Rohdichte oder Trockenraumdichte

Die Rohdichte  $\rho$  ist der Quotient aus der Masse  $m$  des trockenen Probekörpers und seines Volumens  $V$ :

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1)$$

Die Rohdichte enthält im Volumenanteil auch den Porenraum und wird in  $[kg/m^3]$  angegeben. In Abgrenzung vom im Porenraum eventuell gespeicherten Wasser wird die Rohdichte alternativ auch mit  $\rho_s$  bezeichnet. Zur Bestimmung der Rohdichte wird der Probekörper so lange getrocknet, bis sich sein Gewicht nicht mehr ändert. Die Trocknungstemperatur ist abhängig vom Material beträgt zwischen 40 und 110°C. Wird in Simulationen die Rohdichte variiert, um z. B. die Auswirkungen der innerhalb von Messkollektiven üblichen Schwankungen zu überprüfen, ist der Einfluss der Rohdichte auf die Ergebnisse in aller Regel gering. Die Temperaturabhängigkeit der Rohdichte wird in den Berechnungen nicht berücksichtigt.

### 4.2.2 Offene Porosität

Die Bestimmung der offenen Porosität beginnt mit der Lagerung der Proben in einem entlüfteten, mit Wasser gefüllten Exsikkator. Zusätzlich wird an den Probekörpern ein Vakuum für eine

Dauer von 24 Stunden angelegt. Die offene Porosität  $\Phi_o$  in  $[\text{m}^3/\text{m}^3]$  oder  $[\text{Vol}\%]$  ergibt sich aus:

$$\Phi_o = \frac{m_w - m_d}{V \cdot \rho_w} \quad (2)$$

Dabei steht  $m_d$  für die Masse des trockenen Probekörpers und  $m_w$  für die Masse der feuchten Probe,  $V$  für das Volumen und  $\rho_w$  für die Dichte des Wassers. Die mit diesem Verfahren bestimmte Porosität umfasst nicht die gesamte Porosität. Die offene Porosität beinhaltet das für Wasser zugänglichen Porenvolumen. Schwer zugängliche, so genannte Sackporen, oder Poren, die vom Kapillarsystem völlig abgeschnitten sind, werden mit dem Experiment nicht erreicht. Dafür kann ein Heliumpycnometer eingesetzt werden. Helium ist in der Lage, auch kleinste Poren zu erreichen. Im Rahmen üblicher Bauteilberechnungen ist der mit Vakuumlagerung erlangte Wert aber von ausreichender Genauigkeit. In *DELPHIN*-Simulationen liegt  $\Phi_o$  immer über dem Wassergehalt bei effektiver Sättigung  $\theta_{eff}$ . Bei Materialien mit geringer Flüssigwasserleitfähigkeit kann der Abstand zwischen den beiden Materialkennwerten sehr groß werden, bei kapillar gut leitfähigen Materialien beträgt er häufig nur wenige Volumenprozent.

#### 4.2.3 Wärmeleitfähigkeit

Die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  in  $[\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$  ist eine der wichtigsten Materialeigenschaften und dient als Grundlage für die Beurteilung der thermischen Eigenschaften eines Materials. Sie gibt an, welche Energiemenge in  $[\text{W}]$  durch ein Material bestimmter Dicke in  $[\text{m}]$  bei einer an den Seiten anliegenden Temperaturdifferenz in  $[\text{K}]$  fließt. Die Wärmeleitfähigkeit übt auch großen Einfluss auf das hygrische Verhalten eines Materials aus, weil sie indirekt, über die Lenkung der Temperaturverteilung, Eigenschaften wie die Feuchtespeicherung und den Feuchtetransport beeinflusst. Selber ist sie wiederum von den externen Größen Temperatur und Feuchte abhängig, wobei letztere überwiegt. Diese gegenseitige Koppelung von Wärme- und Feuchtevorgängen in Materialien macht in den numerischen Berechnungen eine Vielzahl von Berechnungsschritten notwendig und ist hauptverantwortlich für die oftmals lange Berechnungsdauer hygrothermischer Simulationen.

Wärme kann über drei Arten transportiert werden: Wärmeleitung, Wärmestrahlung und Konvektion. Wärmeleitung geschieht über die Anregung benachbarter, elektrischer Teilchen unterschiedlichen Energieniveaus in der eigentlichen Materialmatrix und dem eingelagerten Wasser. (Langwellige) Wärmestrahlung findet über den Luftraum statt, auch in den Materialporen (*Stefan-Boltzmann-Gesetz*, s. *Fischer et al. (2008)*), und Konvektion über die gerichtete Bewegung von Luftteilchen im Porensystem. Bei der Messung der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  wird zwischen den drei Arten nicht unterschieden, sie fasst alle drei vielmehr zusammen und wird an trockenen Probekörpern ermittelt.

Für die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit werden mehrere Verfahren eingesetzt. Neben der verbreiteten Methode mit einem Plattengerät (*Guarded hot plate apparatus*, *ÖNORM B 6015*) wurden die hier verwendeten Materialien mit Hilfe von Wärme-Puls-Technologie gemessen. Dabei wird ein Sensor auf die möglichst ebene Prüfkörperoberfläche aufgelegt. Anschließend

prägt der Sensor einen genau definierten Wärmeimpuls auf das Material auf. Aus der dynamischen Reaktion des Prüfkörpers ergibt sich indirekt nicht nur die Wärmeleitfähigkeit, sondern auch die Wärmekapazität  $c$ . Dazu wird die abgegebene elektrische Heizleistung in Bezug gesetzt zu der Temperaturentwicklung auf der Prüfkörperoberfläche. Im Vergleich zu der Methode nach *ÖNORM B 6015* ist die Herstellung der Probekörper weniger aufwändig, da sie viel kleiner sein können.

In der Praxis werden vorwiegend zwei verschiedene Wärmeleitfähigkeiten angegeben:

- Die Wärmeleitfähigkeit des trockenen Materials  $\lambda_{dry}$ , gemessen bei 10 oder 23°C und
- der Rechenwert  $\lambda$  der Wärmeleitfähigkeit, der diverse Zuschläge enthalten kann, wie durch Feuchte oder Alterungsprozesse bedingte; der Rechenwert muss beispielsweise bei U-Wert-Berechnungen eingesetzt werden.

#### 4.2.4 Spezifische Wärmekapazität

Die spezifische Wärmekapazität  $c$  in [J/(kg·K)] beschreibt das Wärmespeichervermögen eines Baustoffes. Sie gibt an, wie viel Wärmeenergie pro Kilogramm Baustoff und Kelvin gespeichert werden können. Sie wird, wie  $\lambda$ , am trockenen Probekörper gemessen, damit die Messung nicht durch die Wärmekapazität des Wassers verfälscht wird. Anders als bei der Wärmeleitfähigkeit ist der Einfluss der spezifischen Wärmekapazität auf die Simulationsergebnisse sehr gering.

#### 4.2.5 Hygrische Sorptionsisotherme

Die gesamte Feuchtespeicherfunktion wird üblicherweise in zwei Bereiche unterteilt. Der untere, niedrigere Bereich der Feuchtespeicherfunktion wird als hygroskopisch bezeichnet und endet bei ungefähr 95 % bis maximal 98 % relativer Luftfeuchte. Durch ein bzw. zwei Gegebenheiten grenzt er sich vom überhygroskopischen Bereich ab: Zum einen wird der Wassergehalt der Probekörper durch unterschiedliche Methoden eingestellt und gemessen. Wichtiger ist allerdings, dass die überhygroskopische Feuchte auch als „beweglicheres“ Flüssigwasser, Kondensat oder Tauwasser bezeichnet wird, bzw. als ein Bereich, in welchem der kapillare über dem diffusiven Transport dominiert. Die Festlegung der Grenze auf 95 % ist relativ willkürlich (*Scheffler (2016)*) und müsste eigentlich abhängig vom betrachteten Material und dessen Porenspektrum gewählt werden.

Die herkömmliche Methode zur Messung der hygrischen Sorptionsisotherme beschreibt die *ÖNORM EN ISO 12571*. Eine alternative, schnellere Methode, die nur für vergleichsweise homogene Materialien geeignet ist, wird beispielsweise in *EnBewe (2017)* vorgestellt. Bei der Messung gemäß *ÖNORM EN ISO 12571* werden die Probekörper bei einer definierten Temperatur in Exsikkatoren (Bild 36 links) gelegt, die jeweils ein Salz enthalten. Solange sie nicht gesättigt sind, garantieren diese Salze eine bestimmte Luftfeuchte (s. Tab. 8). Nach Erreichen der Gewichtskonstanz, was mehrere Wochen in Anspruch nehmen kann, werden die Probe-



körper gewogen, woraus sich die Ausgleichsfeuchte ergibt. Anschließend wird die Materialprobe in einen Exsikkator mit niedriger bzw. höherer Luftfeuchte gelegt. Der langwierige Prozess der Messung macht die Suche nach schnelleren Alternativen verständlich.

Im hygroskopischen Bereich lässt sich sowohl die „untere“ Adsorptionskurve ermitteln, d. h. der trockene Probekörper wird in zunehmend feuchtere Exsikkatoren gelegt, als auch die über der Adsorptionskurve verlaufende Desorptionskurve, für welche die Materialproben zunehmend entfeuchtet werden. Die Eigenschaft, dass ein Material bei identischen Umgebungsbedingungen mehrere unterschiedliche Zustände annehmen kann, wird Hysterese genannt. Für die Hysterese kommt nicht nur zum Tragen, wie die aktuellen äußeren Bedingungen sind, die hygrische „Vorgeschichte“ spielt ebenfalls eine wichtige Rolle. Bei der Modellierung und Berechnung von hygrothermischen Vorgängen kommt weiterhin erschwerend hinzu, dass in dynamischen Situationen trotzdem Feuchtegehalte außerhalb dieser Kurven möglich sind, was durch *Scheffler et Plagge (2010)* nachgewiesen wurde. *DELPHIN (2019)* verwendet in den Simulationen die Desorptionskurve, weil nur diese vollständig im hygroskopischen und überhygroskopischen Bereich gemessen werden kann (s. folgendes Kapitel).



Bild 36 Links Exsikkatoren zur Bestimmung der hygroskopischen Sorptionsisotherme; rechts Druckplattenapparaturen zur Bestimmung der Wasserretention

#### 4.2.6 Wasserretention

Aus dem Messprinzip zur Ermittlung der überhygroskopischen Feuchtespeicherung, häufiger Wasserretention oder Saugspannungskurve genannt, ergibt sich die Einschränkung, dass nur die Desorptionskurve gemessen werden kann. Dabei werden die Probekörper zunächst aufgesättigt, um dann auf keramischen Platten in Drucktöpfen (Bild 36 rechts) mit genau definiertem Porenraum platziert zu werden. Nach dem Verschließen der Drucktöpfe wird an diese Keramikplatten ein Unterdruck bzw. eine Saugspannung angelegt, durch welche den Materialproben Feuchte in Abhängigkeit von der Höhe des Drucks entzogen wird. Ähnlich wie bei der Messung der hygroskopischen Sorptionsisotherme wird in jeder Druckstufe gewartet, bis die Probekörper die Gewichtskonstanz erreicht haben, worauf der Wassergehalt gemessen wird. Um einen Wassergehalt nahe der Sättigung einzustellen, ist nur ein geringer Unterdruck notwendig, wofür eine Hängende Wassersäule (0-30 hPa) genügt. Je mehr Feuchte dem Probekörper entzogen wird, desto höher muss der dafür erforderliche Druck werden. Dies wird ab

ungefähr 30 bis 15.000 hPa mit verschiedenen Druckplattenapparaturen wie in Bild 36 realisiert (ÖNORM ISO 11274). Wegen der Messmethode ist die Einheit Pascal. Die Messungen beinhalten Drücke über viele Größenordnungen hinweg, weshalb die Saugspannungskurve üblicherweise im logarithmischen Maßstab aufgetragen wird (Bild 37 rechts).

Die mit der hygri-schen Sorptionsisotherme verbundene Saugspannungskurve bildet die gesamte Feuchtespeicherfunktion (Bild 37). Wie es bei den meisten Ziegeln der Fall ist, ist die Sorptionsisotherme unterhalb 95 % relativer Luftfeuchte extrem niedrig (Bild 37 links).

Der Theorie folgend, dass die *Kelvin*-Gleichung auch im Kapillarsystem von Baumaterialien Gültigkeit hat, lassen sich die unterschiedlichen Potentiale relative Luftfeuchte  $\varphi$  und Kapillardruck  $p_c$  damit folgendermaßen verbinden:

$$\varphi = e^{-\frac{p_c}{\rho_w R_V T}} \quad (3)$$

Darin sind  $R_V$  die allgemeine Gaskonstante von Wasserdampf und  $T$  die Kelvin-Temperatur,  $\rho_w$  steht für die Dichte des Wassers, die relative Luftfeuchte  $\varphi$  bleibt dimensionslos.

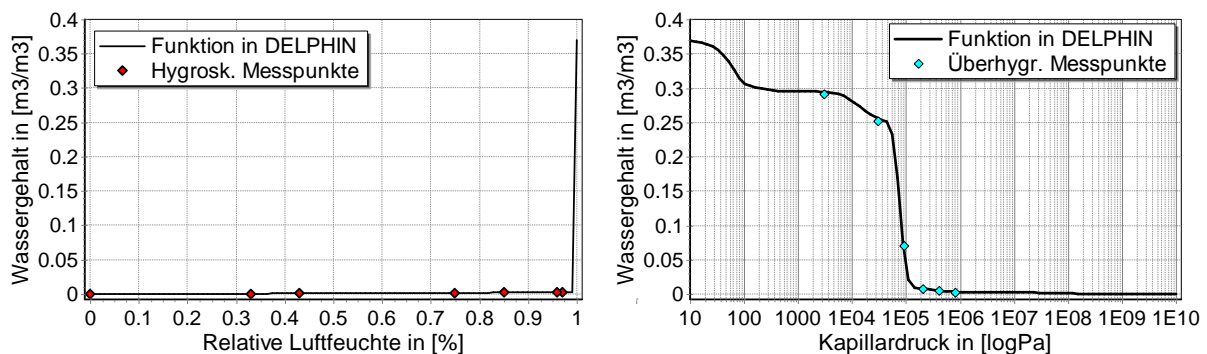


Bild 37 Feuchtespeicherfunktion des Ziegels der Schönbrunn-gasse 30 mit Messpunkten: links Sorptionsisotherme, rechts die gesamte Funktion, aufgetragen über dem Kapillardruck (in Pascal)

In der verwendeten Software *DELPHIN* (2019) ist der höchste Punkt der Feuchtespeicherfunktion der Feuchtegehalt bei effektiver Sättigung  $\theta_{eff}$ . Dennoch wird eine „Übersättigung“ bis hin zu  $\Phi_o$  auf diffusivem Weg zugelassen. Die Messung der überhygroskopischen Feuchte ist nur mit vergleichsweise hohem Aufwand und den notwendigen Apparaturen möglich und wird deshalb häufig vernachlässigt. Das ist für Materialschichten, die nicht mit hoher Feuchte in Berührung kommen, sicherlich ökonomisch sinnvoll. Bei Materialien mit häufigerem Kontakt zu überhygroskopischer Feuchte, Schlagregen oder aufsteigender Feuchte kann dies zu deutlichen Fehleinschätzungen führen, da die Feuchtespeicherung und der *effiziente*, kapillare Feuchtransport bei den meisten Baumaterialien erst im überhygroskopischen Bereich stattfinden. Für den Ziegel wird das besonders deutlich (Bild 37): erst über 98 % relativer Luftfeuchte steigt die Feuchtespeicherung sehr schnell und dies in einem ganz bestimmten Bereich von 50.000 bis 100.000 Pa. Ohne die Messungen in den Druckplattenapparaturen würde dieser Anstieg willkürlich und unter Umständen mit sehr abweichendem Verlauf festgelegt.

Für die spätere Modellierung der Materialfunktionen aus den Messwerten wird eine weitere Verknüpfung wichtig: Die *Laplace*-Gleichung erlaubt es, thermodynamisches Gleichgewicht in den Poren vorausgesetzt, den zu einem Kapillardruck gehörenden Porenradius zu bestimmen.

$$p_c = p_l - p_g = \frac{2 \cdot \sigma_{lg}}{r} \cdot \cos(\gamma) \quad (4)$$

Der Kapillardruck  $p_c$  verursacht die Aszension (und Rezession) von Flüssigkeiten in einer Kapillare und ergibt sich aus der Differenz zwischen dem Druck der Flüssigphase  $p_l$  und der Gasphase  $p_g$ . Bild 38 illustriert das Zusammenspiel der Drücke anhand einer idealisierten, nur teilweise mit Wasser gefüllten Kapillare.

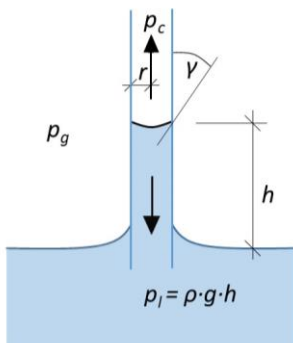


Bild 38 An einer aufsteigenden Wassersäule angreifende Kräfte bzw. Drücke

Der Kapillardruck und der Kontaktwinkel  $\gamma$ , der sich am Kontaktpunkt zwischen gasförmiger, flüssiger und fester Phase bildet, sind von diversen Einflussfaktoren abhängig: von Kohäsions- und Adhäsionskräften entlang der Grenzfläche zwischen und innerhalb der Flüssigkeit und des Gases, von der Oberflächenbeschaffenheit der festen Phase und von den Wechselwirkungen der flüssigen Phase mit der Materialmatrix. Die Einflussfaktoren führen zur Ausbildung einer Oberflächenspannung  $\sigma_{lg}$ , deren Zusammenhang mit  $p_c$  sich mit folgender Gleichung einfacher nachvollziehen lässt:

$$p_c = \frac{2\pi \cdot r \cdot \sigma_{lg}}{\pi r^2} \cdot \cos(\gamma) = \frac{2 \cdot \sigma_{lg}}{r} \cdot \cos(\gamma) \quad (5)$$

#### 4.2.7 Wasseraufnahmekoeffizient

Für die Erfassung des dynamischen Feuchtetransports wurden bei den verwendeten Materialien zwei Experimente durchgeführt. Beim Wasseraufnahmeexperiment nach *ÖNORM EN ISO 15148* wird die Unterseite der Materialprobe mit einer Wasseroberfläche in Kontakt gebracht. Die Seiten der anfangs trockenen oder feuchte konditionierten Proben sind mit Aluminiumfolie oder Epoxidharz abgedichtet, um einen rein eindimensionalen, vertikalen Transportes zu garantieren. Während der sukzessiven Wasseraufnahme werden die Probekörper immer wieder gewogen. Mit der Zeit nehmen die nasser werdenden Materialproben immer weniger Feuchte auf. Aus der Steigung der Wasseraufnahmekurve wird der Wasseraufnahmekoeffizient, der  $A_w$ -Wert in  $[\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{0.5})]$  oder  $w$ -Wert in  $[\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0.5})]$ , bestimmt. Der Wasseraufnahmekoeffizient gibt demnach an, wieviel Feuchte pro Fläche und Zeiteinheit aufgenommen wird, wobei

die Zeitachse in der Wurzel der Zeit aufgetragen wird. Der Wassergehalt am Ende eines „normalen“ Wasseraufnahmeexperimentes vom Typ „A“ (Bild 40) wird der kapillare Feuchtegehalt  $\theta_{cap}$  oder auch die freiwillige Wasseraufnahme genannt.

Bild 39 zeigt eine am Institut für Bauklimatik entwickelte Apparatur zur automatischen Datenerfassung des Wasseraufnahmeversuchs.



Bild 39 Messapparatur zur kontinuierlichen Messung der Wasseraufnahme

Dabei wird der Probekörper in einer speziellen Halterung fixiert, die an einer Digitalwaage ( $\pm 0.01$  g) aufgehängt wird (Überkopfwaage). Eine Wasserschüssel unter der Probe lässt sich jederzeit in der Höhe fein nachjustieren, sodass immer Wasserkontakt besteht, ohne den Probekörper zu tief einzutauchen. Aufhängvorrichtung, Probekörper und Wanne befinden sich in einer kleinen, abgedichteten Klimakammer. Ein Datenlogger zeichnet permanent das Gewicht und die klimatischen Verhältnisse in der Klimakammer auf. Durch die Verwendung dieser Apparatur lassen sich vor allem Messfehler vermeiden, die mit dem Wiegen der Proben verbunden sind:

- Üblicherweise wird die Probe in eine Wanne gestellt; bei der Entnahme zum Zweck der Wägung entstehen Fehler durch den Umgang mit dem anhaftenden Wasser.
- Bei besonders leitfähigen Materialien, wie Calciumsilikat oder bestimmten Perliteprodukten, führt schon das Herausnehmen eines Probekörpers zu Ungenauigkeiten.

Der Wasseraufnahmekoeffizient ist sowohl in der Praxis als auch in der hygrothermischen Bauphysik eine etablierte Größe, aus der sich gewisse Rückschlüsse auf das kapillare Leistungsvermögen schließen lassen. Dennoch wird seine Aussagekraft und Notwendigkeit zunehmend angezweifelt (*Feng et Janssen (2016)*, *Feng et Janssen (2018)* oder *Vogelsang et al. (2014)*). Die Zweifel beziehen sich auf verschiedene Einflüsse während der Messungen, die in der Regel kaum Beachtung finden, z. B. der Temperatur, und die besondere Situation

des Experimentes: Ein trockener Probekörper wird mit Wasser kontaktiert. Das kommt in dieser Form in der Praxis kaum vor bzw. höchstens kurzfristig, während einer Havarie oder wenn Schlagregen auf ein trockenes Material auftrifft, wobei der Schlagregen horizontal eindringt und nicht gegen die Gravitationskraft transportiert wird. In Baukonstruktionen herrscht viel häufiger ein niedrigerer Wassergehalt vor, zu dessen korrespondierender Leitfähigkeit keine Informationen vorliegen, weil es derzeit noch keine Experimente zur direkten Bestimmung ungesättigter Leitfähigkeiten im überhygroskopischen Bereich gibt. Zudem ist eine eindeutige Interpretation der Messdaten im Sinne der Norm häufig nicht möglich: diese geht nämlich von einem linearen Anstieg der Feuchtezunahme aus, was bei vielen Materialien nicht der Fall ist (Bild 40). Der Vorschlag in der neuen *ÖNORM EN ISO 15148*, die im Vergleich zur alten Fassung immerhin das Problem anerkennt, für solch eine Kurvenform („Kurve vom Typ B“) ist wenig hilfreich: es solle die Wassermenge nach 24 h für die Berechnung angesetzt werden.

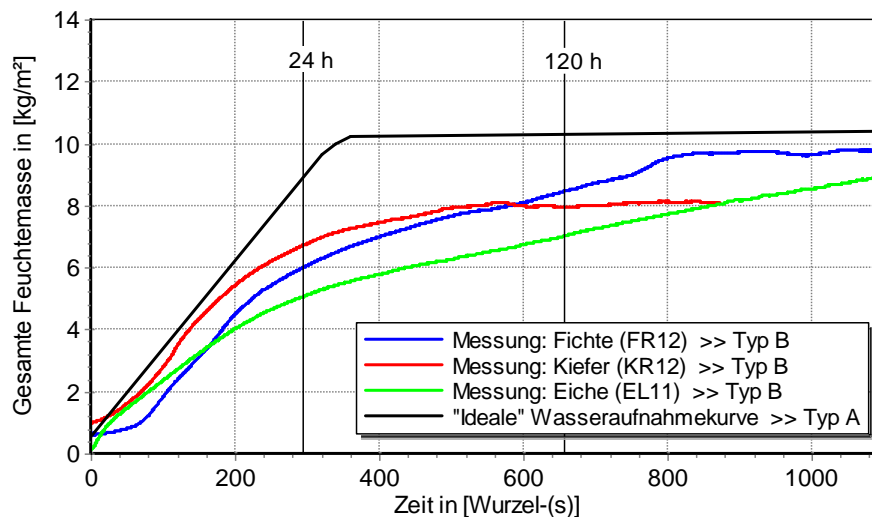


Bild 40 Beispielhafte Wasseraufsaugkurven, deren Form sich nicht der klassischen Aufsaugkurve Typ A (schwarz) fügt und kaum interpretieren lässt (aus *Vogelsang et al. (2014)*)

Weiterhin kommt erschwerend dazu, dass für die Messung des Wasseraufnahmekoeffizienten verschiedene Normen mit jeweils unterschiedlichem Schwerpunkt vorliegen. Mangels Alternativen wird der Wasseraufnahmekoeffizient dennoch in absehbarer Zeit weiter Anwendung finden.

#### 4.2.8 Freie Wasseraufnahme

Die freie Wasseraufnahme ist die gewichts- oder volumenbezogene Menge an Wasser, die ein Material bei Wasserlagerung ohne zusätzliche äußere Kräfte durch Überdruck oder Vakuum aufnimmt. Sie liegt z. B. aufgrund eingeschlossener Luftporen stets (weit) unterhalb der Menge, die das Material aufgrund seiner offenen Porosität  $\Phi_o$  aufnehmen könnte.

#### 4.2.9 Wasserdampfdiffusionswiderstand

Bei sehr niedriger relativer Luftfeuchte bzw. bei üblichen Raumklimabedingungen findet der Feuchtetransport überwiegend in diffusiver Form statt. Die *ÖNORM EN ISO 12572* regelt, wie

mit Hilfe des „Dry-Cup-Verfahrens“ die Messung des Wasserdampfdiffusionswiderstandes  $\mu_{\text{dry}}$  zwischen 0 bis 50 % relativer Luftfeuchte erfolgen soll.

Mit der Anhebung der Luftfeuchte nimmt auch die Flüssigwasserleitfähigkeit zu. Der zweite charakteristische Wasserdampfdiffusionswiderstand, der „Wet-Cup-Wert“  $\mu_{\text{wet}}$ , ist deshalb genau genommen ein Wert, der auch den Flüssigwassertransport in diesem Feuchtebereich zwischen 50 und 95 % relativer Luftfeuchte beinhaltet. Weil sich beide Transportarten nicht trennen lassen und die gesamte transportierte Wassermenge bei höherer Luftfeuchte zunimmt, ist der  $\mu_{\text{wet}}$ -Wert kleiner als der  $\mu_{\text{dry}}$ -Wert. Dem Prozedere der *ÖNORM EN ISO 12572* folgend, wird ein Probekörper in einen Deckel dampfdicht eingepasst. Dieser Deckel wird dann dampfdicht auf ein Gefäß aufgesetzt, in welchem ein Trocknungsmittel oder eine Salzlösung (Tab. 8) eine konstante relative Luftfeuchte garantiert.

Tab. 8 Verwendete Sorbentien zur Gewährleistung konstanter Randbedingungen

Sorbens	Relative Luftfeuchte über dem Sorbens [%]
Silicagel	3 - 5
Magnesiumchlorid	32,9
Natriumchlorid	75,4
Ammonium-Di-Hydrogenphosphat	93,0
Kaliumsulfat	97,4

Wird der Versuchsaufbau unter isothermen Bedingungen in eine Klimakammer mit unterschiedlicher Luftfeuchte gestellt, bildet sich aufgrund des Wasserdampfpartialdruckgefälles zwischen den anliegenden Klimaten auf beiden Seiten der Probe ein Feuchtestrom durch die Materialprobe aus. Nach dem Erreichen eines konstanten Feuchtestroms, was durch regelmäßige Wägung überprüft wird, kann über die Beziehung

$$\mu = \frac{1}{s} \left( \delta_a \cdot A \cdot \frac{p_1 - p_2}{j_v} - s_a \right) \quad (6)$$

der Wasserdampfdiffusionswiderstandsfaktor  $\mu$  berechnet werden. Der Parameter  $s$  [m] steht dabei für die Dicke des Probekörpers,  $\delta_a$  für die Wasserdampfpermeabilität der Luft,  $A$  für die Fläche der Probe und  $s_a$  für die Schichtdicke der Luftschicht zwischen Probekörper und Sorbens, wobei  $s_a$  bei diffusionsbremsenden Materialien praktisch keinen Einfluss mehr hat. Die Parameter  $p_1$  und  $p_2$  sind die Wasserdampfpartialdrücke an der Probenober- und -unterseite und  $j_v$  beschreibt den Wasserdampfdiffusionsstrom. Die Wasserdampfpermeabilität  $\delta_a$  kann vereinfacht mit der Gleichung

$$\delta_a = \frac{0,083 \cdot p_0}{R_D \cdot T \cdot p} \cdot \left( \frac{T}{273} \right)^{1,81} \quad (7)$$

ermittelt werden. Darin repräsentieren  $R_D$  die Gaskonstante von Wasserdampf mit 462 Nm/(kg·K),  $T$  die absolute Kelvin-Temperatur und  $p_0$  den atmosphärischen Druck bei Standardbedingungen von 101325 Pa.



Werden die Luftfeuchte in Gefäß und Klimakammer enger als in der Richtlinie gewählt, lassen sich genauere  $\mu$ -Werte bestimmen. Bei einem Luftfeuchtegefälle von 5 % (Silicagel) und 33 % (Magnesiumchlorid) ist durch die niedrige Luftfeuchte ausgeschlossen, dass kapillarer Flüssigwassertransport stattfindet, weswegen diese Luftfeuchten verwendet wurden.

### 4.3 Verifizierungsexperimente: Kontinuierliche Wasseraufnahme und Abtrocknung

Bei hygrothermischen Simulationen realer Prozesse handelt es sich um dynamische Abläufe. Die bisher vorgestellten Experimente sind jedoch, bis auf das Wasseraufnahmeexperiment, von stationärer Natur, bei denen die Proben im Gleichgewichtszustand gemessen werden und ihren physikalischen Zustand nicht ändern. Aus diesem Grund führten *Scheffler et Plagge (2010)* ein Trocknungsexperiment ein, durch dessen dynamischen Charakter sich die Güte von Materialfunktionen in Simulationsprogrammen genauer überprüfen lässt. Dabei wird ein Probekörper aufgesättigt und an fünf Seiten diffusionsdicht verschlossen. Bei runden Probekörpern wird nur die Oberseite nicht abgedichtet. Anschließend werden sie in einer Art Windkanal (Bild 41) unter genau protokollierten, isothermen Bedingungen getrocknet und dabei regelmäßig gewogen.



Bild 41 Verdunstungsapparatur zur kontinuierlichen Bestimmung der Trocknungsgeschwindigkeit (aus *Scheffler (2008)*)

Der Probekörper durchläuft während des Experiments einen weiten Feuchtebereich. Zu Beginn dominieren die kapillaren Eigenschaften den Trocknungsvorgang, mit sinkender Feuchte wird die Feuchte zunehmend diffusiv transportiert. Zusammen mit dem Wasseraufnahmeexperiment ist der Trocknungsversuch deshalb sehr gut geeignet, um Materialfunktionen zu kalibrieren. Während der Erstellung der Materialfunktionen für die Simulation werden die Simulationsergebnisse mit den Daten der beiden Experimente verglichen, um zu überprüfen, ob der generierte Materialdatensatz in der Lage ist, die Messdaten wiederzugeben (s. Kapitel 4.4).

Durch das Aufsaugexperiment lässt sich der kapillare Flüssigwassertransport im überhygroskopischen Bereich und nahe Sättigung überprüfen, das wichtigere Trocknungsexperiment

dient dazu, den überwiegend diffusiven Feuchtetransport im hygroskopischen Bereich zu kalibrieren.

Ein weiteres, sehr sinnvolles Validierungsexperiment bei dem Feuchte in den Probekörpern kondensiert, stellten *Häupl et al. (1994)* vor. In der Praxis findet mittlerweile ein ähnliches Experiment, der so genannte „Kapi-Test“ Anwendung (*Zirkelbach et Binder (2011)*).

## 4.4 Erstellung von Materialfunktionen

Im Rahmen des ursprünglichen Projektes OEKO-ID kam ein am Institut für Bauklimatik entwickeltes Materialmodell zur Anwendung, welches aus Messwerten Materialfunktionen mit temperatur- und feuchteabhängigen Speicher- und Transportparametern generiert. Das in *Scheffler et Plagge (2010)* formulierte Prozedere fußt auf thermodynamischen Grundlagen, weswegen sich weitere physikalische Transportphänomene, wie der VOC- oder Salztransport (*Nicolai (2007)*), oder auch die Gravitation uneingeschränkt integrieren lassen. Die Berücksichtigung dieser Vorgehensweise garantiert in Verbindung mit der Messung der geschilderten Materialparameter eine hohe Qualität der Materialfunktionen.

In einem ersten Schritt wird die gesamte Feuchtespeicherfunktion iterativ an alle Messpunkte der Saugspannungskurve und Speicherisotherme angepasst. Für die Berücksichtigung der Hysterese steht kein praktikables Modell zur Verfügung (*Funk (2011)*). Da nur die Desorptionskurve vollständig gemessen werden kann, werden die Materialfunktionen in *DELPHIN (2019)* an diese Messpunkte angepasst. Dabei kommt ein multimodaler Funktionsansatz zum Einsatz, der sich aus der Summe gewichteter Einzelfunktionen mit einer entsprechenden Anzahl freier Parameter zusammensetzt:

$$\theta_i(pC) = \sum_{i=1}^N \left[ \frac{\theta_i}{2} \cdot \left( 1 + \operatorname{erf} \left( \frac{(pC_i - pC)}{\sqrt{2}S_i} \right) \right) \right] \quad (8)$$

Hierbei entsprechen die Parameter  $pC$  dem Logarithmus des Kapillardruckes und  $N$  der Modalität (Peak-Anzahl in der Porenvolumenverteilungskurve).  $S_i$  ist die Standardabweichung der einzelnen Modalitäten und  $pC_i$  der Logarithmus der Kapillardrücke an den Peakpositionen mit jeweils  $\theta_i$ , dem charakteristischen gemessenen volumetrischen Wassergehalt. Das bedeutet, dass wenn ein bestimmter Porenradius besonders häufig im Kapillarsystem eines Materials vorkommt, dieser durch seinen zugehörigen Kapillardruck  $pC_i$  und Wassergehalt  $\theta_i$  in der Position fixiert wird, und mit Hilfe des dritten Parameters, der Standardabweichung  $S_i$ , eine Wichtung hinsichtlich der Häufigkeit seines Vorkommens erhält. Für die meisten Materialien genügen zwei bis vier Modalitäten bzw. Peakpositionen.

Dieser Ansatz wurde von *Grunewald et Häupl (2003)* eingeführt und basiert auf einer logarithmischen, Gauß-normalverteilten Porenradienverteilung. Das folgende Integral der Porenradienverteilung (9) ergibt den Inhalt der obigen Feuchtespeicherfunktion (8) bzw. ist die Ableitung der Feuchtespeicherfunktion die Porenradienverteilung



$$\frac{\partial}{\partial pC} \theta_l(pC) = \sum_{i=1}^N \left[ \frac{\theta_i}{\sqrt{2\pi S_i}} \cdot \exp\left(\frac{(pC - pC_i)^2}{2S_i^2}\right) \right] \quad (9)$$

Im zweiten Schritt werden die Funktionen für den Flüssigwasser- und Wasserdampftransport,  $K_l(\theta_l)$  und  $K_v(\theta_l)$ , zu einer einzigen, angepassten Feuchteleitfunktion verschmolzen. Die Summe beider Funktionen  $K_l(\theta_l) + K_v(\theta_l)$  muss monoton ansteigen und die gemessenen  $\mu$ -Werte und Flüssigwasserleitfähigkeiten berühren. Bild 42 aus *Scheffler et Plagge (2010)* hebt die bis zu drei Messpunkte der Dampfleitfähigkeit im niederfeuchten Bereich in roter Farbe hervor, die der Flüssigwasserleitfähigkeit im (nahezu) gesättigten Bereich in blauer Farbe. Die durchgezogene, schwarze Linie repräsentiert die generierte, gemeinsame Feuchteleitfähigkeit  $K_l(\theta_l) + K_v(\theta_l)$ .

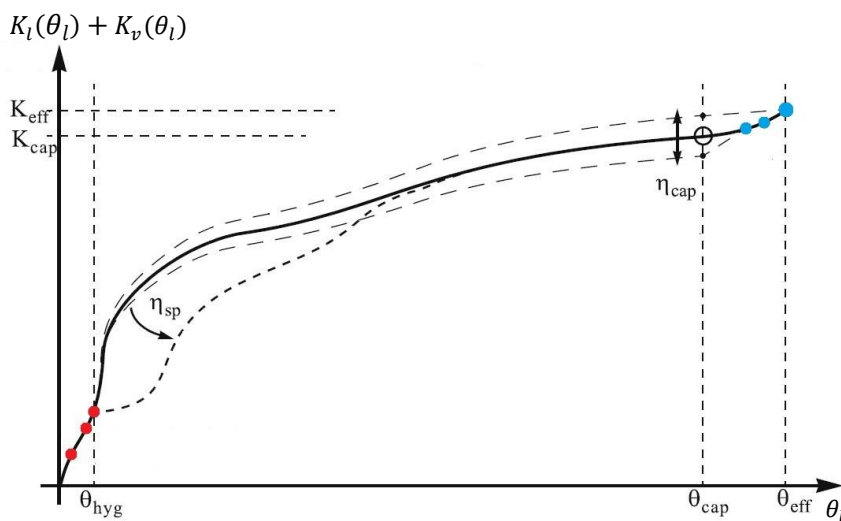


Bild 42 Aus Dampf- und Flüssigwasserleitfähigkeit zusammengesetzte Feuchteleitfunktion  $K_l + K_v$ , (analog *Scheffler (2008)*)

Zwischen den beiden Leitfähigkeits-Messbereichen im niedrigen und hochfeuchten Bereich klafft eine sehr große Lücke, in der keine weiteren Punkte aus Messungen zur Verfügung stehen. Der Verlauf der Kurve wird dort als erste Orientierung anhand des Modellansatzes festgelegt. Anschließend kann dieser Bereich mittels der beiden Validierungsexperimente, Wasseraufnahme- und Trocknungsversuch (oder auch Kondensationsversuch), in gewissem Rahmen kalibriert werden, was die gestrichelten Linien in Bild 42 veranschaulichen. Um dort eine ausreichende Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation zu erzielen, wird die Steigung der Feuchteleitfunktion partiell angepasst, wobei  $K_l$  und  $K_v$  dabei getrennt behandelt werden: der Faktor  $\eta_{sp}$  dient im niederfeuchten Bereich dazu, die  $K_v$ -Kurve an die Versuchsergebnisse anzupassen,  $\eta_{cap}$  füllt diese Funktion für die Flüssigwasserleitfunktion im höherfeuchten Bereich  $K_l$  aus.

Für die Materialien der Schönbrunnstraße 30 konnte eine ausreichende Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation erzielt werden, weshalb die Materialfunktionen in der *DELPHIN*-Materialdatenbank abgelegt wurden. Das Format solcher Dateien wird in *Vogelsang et al. (2013)* beschrieben.

## 4.5 Zusammenfassung der Eigenschaften der Materialien und Innendämmsysteme

Die anschließende Tab. 9 gibt die charakteristischen Messwerte der Materialien wieder und stellt die gemessenen bzw. berechneten Werte den Angaben der Materialhersteller gegenüber. Das effektive Porenvolumen  $\theta_{eff}$  in Tab. 9 ist der Wassergehalt zu Beginn der Desorptionskurve (Abtrocknungskurve).  $\theta_{eff}$  enthält keine Poren, welche unter üblichen Bedingungen nicht am Feuchtetransport teilnehmen, das sind z. B. kleinste Sackporen oder isolierte Poren ohne Kontakt zum Kapillarsystem.

Tab. 9 Gemessene Materialkennwerte in schwarz, angenommene bzw. aus der Literatur entnommene Kennwerte in grün, auf Herstellerangaben beruhende Werte in blau und davon abweichende, aus Simulationen bestimmte Wärmeleitfähigkeiten in rot

	Dichte	Spez. Wärmekapazität	Rechenwert der Wärmeleitfähigkeit	Effektives Porenvolumen	Wasser- aufnahme- koeffizient	$\mu$ - Wert
Symbol	$\rho$	$c$	$\lambda$	$\theta_{eff}(\theta_{80})$	$A_w$	$\mu$
Einheit	kg / m <sup>3</sup>	J / (kg·K)	W / (m·K)	Vol%	kg / (m <sup>2</sup> ·s <sup>0,5</sup> )	-
Bestand: Außenputz	1470	730	0,45	29,8 (4,8)	0,064	12,2
Bestand: Holzterrazzo	<b>800</b>	<b>1000</b>	<b>0,40</b>	<b>30,2 (1,1)</b>	<b>0,100</b>	<b>10</b>
Bestand: Innenkalkputz	1420	600	0,50	36,9 (1,7)	0,057	20,9
Bestand: Kalkputz auf Schilf	<b>1300</b>	<b>1050</b>	<b>0,45</b>	<b>39,0 (1,5)</b>	<b>0,060</b>	<b>6</b>
Bestand: Schüttung	<b>1100</b>	<b>850</b>	<b>0,55</b>	<b>35,0 (1,4)</b>	<b>0,050</b>	<b>7</b>
Bestand: Ziegel	1610	880	0,40	30,0 (0,2)	0,453	12,7
Fichte	394	1840	<b>quer: 0,13 längs: 0,27</b>	72,8 (6,0)	0,018	186 / 10 (oh./mit Riss)
Holzweichfaserdämmplatte	<b>160</b> / 160	<b>2100</b> / 1662	<b>0,041</b>	80,0 (1,8)	<b>0,008</b> / 0,003	<b>5</b> / 3,5
HWFD - Putz und Kleber	<b>1600</b>	<b>1000</b>	<b>0,73</b>	<b>30,0 (1,4)</b>	<b>0,120</b>	<b>10</b>
Schilf	<b>140</b> / 300	2100	<b>0,061</b>	90,0 (3,4)	längs: 0,083	<b>2</b>
Schilf: Lehmputz und -kleber	<b>1700</b> / 1670	840	<b>0,81</b>	28,0 (1,3)	0,250	<b>10</b> / 10,3
TecTem-Klebespachtel	<b>1500</b> / 1315	860	<b>0,9</b> / 0,497	27,7 (7,4)	0,005	<b>30</b> / 18,7
TecTem (Perlite-dämmplatte)	100	1640	<b>0,045</b> / <b>0,047</b>	73,8 (0,3)	1,981	<b>5-6</b> / 8

	Dichte	Spez. Wärmekapazität	Rechenwert der Wärmeleitfähigkeit	Effektives Porenvolumen	Wasseraufnahmekoeffizient	$\mu$ - Wert
Symbol	$\rho$	$c$	$\lambda$	$\theta_{eff}(\theta_{80})$	$A_w$	$\mu$
Einheit	kg / m <sup>3</sup>	J / (kg·K)	W / (m·K)	Vol%	kg / (m <sup>2</sup> ·s <sup>0,5</sup> )	-
TecTem (Flächenspachtel)	1500 / 1090	1360	0,41	26,5 (6,5)	0,006	13 / 16,6
Wärmedämmputz	250 / 600	930	0,075 / 0,095	38,2 (1,6)	0,153	10 / 6,7
Wärmedämmoberputz	1500	850	0,7	34,0 (2,0)	0,08	15
Zellulose	270	1500	0,052	88,0 (1,4)	1,196	2,4 / 10
Zelluloseinnenputz /Renocell	1025	1090	0,225	44,5 (2,9)	0,127	6,2
„Schweizer Fichte“	520	1190	0,130	69,2 (6,8)	0,058	200
Ziegel „Reithalle Potsdam“	1850	810	0,750	28,7 (2,2)	0,041	27,1

Die im Deckenaufbau vorliegenden Materialien wurden nicht untersucht, dazu zählen die Schüttung und die Holzterrazzoschicht. Da auch in der Literatur keinerlei Materialkennwerte vorliegen, wurden deren Eigenschaften abgeschätzt. Ebenso waren die Risse in und Fugen zwischen den 15 bis 30 mm dicken Brettern der Einschubdecke, Holzdielung und Deckenverkleidung zu berücksichtigen. Aus logischen Überlegungen heraus reduzieren diese den vergleichsweise hohen Diffusionswiderstand von Fichte in hohem Ausmaß, weswegen der  $\mu$ -Wert dieser Schichten auf 10 herabgesetzt wird.

Nachfolgend sind in Tab. 10 die Schichtaufbauten der einzelnen Dämmsysteme zusammengetragen, sowie die sich daraus ergebenden Wärmewiderstände,  $s_d$ -Werte und die wirksame Wärmespeicherkapazität  $c_{wirk}$  der Gesamtsysteme. Die konstruktionsbezogenen Kennwerte werden im Anschluss diskutiert. Als Grundlage dienten die am IBK-Materiallabor gemessenen feuchtetechnischen Werte. Bei den Wärmeleitfähigkeiten der Dämmstoffe galten die Angaben der Materialhersteller, sofern nicht durch Simulationen eine genauere Wärmeleitfähigkeit für ein vor Ort verbautes Dämmsystem ermittelt wurde.

Aus dem Vergleich der Wärmewiderstände lässt sich ableiten, welches Dämmsystem die Heizenergieverluste am Wirksamsten reduziert und wo die höchsten Oberflächentemperaturen zu erwarten sind. Demnach dürften auf dem mit Perlitedämmplatten gedämmten Feld 2 die höchsten Temperaturen auf der Wandoberfläche auftreten, welches somit den höchsten Nutzerkomfort bieten würde. Auf Feld 4 mit der 60 mm dicken Holzweichfaserdämmplatte wären die niedrigsten Temperaturen zu erwarten. Leider befand sich in Feld 2 (Perliteplatte) kein Oberflächentempersensor, sodass dies nicht für alle Felder durch Messungen überprüft werden konnte.

Tab. 10 Wärmewiderstand,  $s_d$ -Wert und wirksame Wärmekapazität der einzelnen Dämmsysteme; mit Ausnahme des Wärmedämmputzes entsprechen die Wärmeleitfähigkeiten und  $\mu$ -Werte den Angaben der Hersteller

<b>Feld 1 (Balken 1&amp;2) - Zellulose</b>	Dicke Einheit m	$\lambda$ W/(m·K)	$\mu$ -Wert -	c J/(kg·K)	$R_{IDS}$ m <sup>2</sup> ·K/W	$s_d$ -Wert m	$c_{wirk}$ kJ/(m <sup>2</sup> ·K)
Zellulose	0,08	0,052	2,4	1500	1,481	0,19	32,4
Spezialputz	0,013	0,225	6,2	1090	0,241	0,08	14,5
					<b><math>\Sigma</math>: 1,722</b>	<b>0,27</b>	<b>52,9</b>
<b>Feld 2 (Balken 3) - Perliteplatte</b>							
Klebspachtel	0,006	0,9	18,7	860	0,007	0,1122	6,8
Perliteplatte	0,08	0,047	8	1640	1,778	0,64	13,1
Flächenspachtel	0,004	0,411	16,6	1360	0,010	0,0664	5,9
					<b><math>\Sigma</math>: 1,702</b>	<b>0,82</b>	<b>34,4</b>
<b>Feld 3 (Balken 4) - Wärmedämmputz</b>							
CalceClima Thermo	0,12	0,095	6,7	930	1,263	0,804	53,6
Renoplus	0,004	0,7	15	850	0,006	0,06	5,1
					<b><math>\Sigma</math>: 1,269</b>	<b>0,86</b>	<b>58,7</b>
<b>Feld 4 (Balken 5) - Holzweichfaserplatte</b>							
Lehmkleber	0,004	0,73	10	900	0,005	0,04	6,1
Holzweichfaserplatte	0,06	0,041	3,5	1660	1,463	0,21	15,9
Lehmputze	0,013	0,73	10	900	0,018	0,13	19,9
					<b><math>\Sigma</math>: 1,487</b>	<b>0,38</b>	<b>61,5</b>
<b>Feld 5 (Balken 6&amp;7) - Schilfplatte</b>							
Lehmkleber	0,004	0,81	10,3	840	0,005	0,04	-
Schilfplatte	0,1	0,061	2	2100	1,639	0,20	50,4
2 Lagen Lehmputz	0,02	0,81	10,3	840	0,025	0,21	28,1
					<b><math>\Sigma</math>: 1,669</b>	<b>0,45</b>	<b>78,5</b>
<b>Feld 1 bis 8 - Bestandskonstruktion</b>							
Außenputz	0,02	0,45	12,2	850	0,044	0,24	-
Ziegel	0,46	0,40	12,7	880	1,150	5,84	106,9
Innenputz (OG)	0,037	0,5	20,9	800	0,074	0,52	28,4
					<b><math>\Sigma</math>: 1,268</b>	<b>6,60</b>	<b>135,3</b>

Umgekehrt bedeutet ein höherer Wärmewiderstand ein kälteres Bestandsmauerwerk. Bei niedrigeren Temperaturen kann (Poren-)Luft weniger Feuchte speichern, sodass in der Folge die relative Luftfeuchte ansteigt. Das heißt, die Luftfeuchten in der Balkentasche und in den Materialporen wären bei einer reinen Temperatur-Betrachtung ohne weitere Einflüsse im Feld mit der Perliteplatte am Höchsten.

Der  $s_d$ -Wert ist ein Maß für den Widerstand eines Materials oder Konstruktionsaufbaus gegenüber dem Wasserdampftransport. Ein hoher  $s_d$ -Wert zeigt an, dass wenig Wasserdampf durch

ein Material diffundieren kann. Durch den zusätzlichen  $s_d$ -Wert einer Innendämmung diffundiert per se weniger Feuchte aus dem Raum in eine Konstruktion, wo sie kondensieren könnte. Für diesen Fall ist ein hoher  $s_d$ -Wert mit einer höheren Sicherheit verbunden. Andererseits trocknet eine feuchte Bestandskonstruktion, deren Feuchtebelastung durch eindringenden Schlagregen, aufsteigende Feuchte oder durch Einbaufeuchte verursacht wurde, langsamer nach innen aus. Demzufolge wäre bei den Feldern mit der Holzweichfaserplatte und der Zellulosedämmung mit einer „schnellen“ Reaktion auf hohe Raumfeuchtebelastungen zu rechnen. Feuchteansammlungen auf der kalten Seite der Dämmung, im Balkenaufleger oder durch Schlagregen eindringende Feuchte, könnten aber auch bei entsprechenden klimatischen Randbedingungen vergleichsweise schnell wieder austrocknen. Für die Felder mit der Perliteplatte und dem Wärmedämmputz ist aufgrund der höheren  $s_d$ -Werte zu erwarten, dass Feuchte in der Konstruktion im Vergleich zur Zellulose und den Holzweichfaserplatten langsamer austrocknen würde. Die Perliteplatten werden allerdings mit wenig Einbaufeuchte verbaut und verfügen zudem über eine hohe Flüssigwasserleitfähigkeit, um lokal erhöhte Feuchte im Material zu verteilen. Die Schilfplatten sind mit den Holzweichfaserplatten vergleichbar. Die ausgesprochen diffusionsoffenen Schilfplatten werden durch die Lehmputzdeckschicht vor hoher Raumlufffeuchte in gewissem Maße abgeschirmt.

Wie beispielsweise in *Ruisinger et Grunewald (2009)* wird das Wärmepuffervermögen  $c_{wirk}$  für die innen liegenden Schichten berechnet. Die flächenbezogene wirksame Wärmekapazität - gebildet aus der Wärmekapazität  $c$ , der Dicke  $d$  und der Dichte  $\rho$  in  $J/(m^2 \cdot K)$  - in Anlehnung an *ÖNORM EN ISO 13786* bildet die Fähigkeit der jeweiligen Konstruktion ab, Wärmebelastungen der Raumluff oder durch Strahlung abzumildern bzw. zu verzögern. Dabei werden nur die „wirksamen“, ersten zehn Zentimeter des Bauteils berücksichtigt („10-cm-Regel“).

$$c_{wirk} = \sum_i c_i \rho_i d_i \quad (10)$$

Konstruktionen mit hoher Wärmekapazität können plötzlich auftretende Temperaturspitzen in der Raumluff besser abpuffern. Innendämmsysteme koppeln die Raumluff von den in der Regel gut Wärme speichernden Schichten des historischen Wandaufbaus ab. Ein sehr hoher Wärmewiderstand und die geringe Dichte der hoch porösen Dämmstoffe sorgen so zwar für niedrige Heizenergieverluste und höhere Oberflächentemperaturen, andererseits wird das Wärmepuffervermögen abgesenkt. Dicke, schwere Putzschichten auf Dämmsystemen erhöhen wiederum die wirksame Wärmespeicherkapazität. Wegen der dicken Lehmdeckschicht und der günstigen Eigenschaften ist die Wärmekapazität der Schilffeldes mit  $78,5 \text{ kJ}/(m^2 \cdot K)$  mehr als doppelt so groß wie die des Perlitefeldes (Tab. 10). Auch die Holzweichfaserplatten und der Wärmedämmputz schneiden mit  $61,5$  und  $58,7 \text{ kJ}/(m^2 \cdot K)$  gut ab. Zum Vergleich: die wirksame Wärmekapazität der Bestandskonstruktion beträgt  $120,5 \text{ kJ}/(m^2 \cdot K)$ , die einer konventionellen Innendämmung mit doppelt beplankter Mineralwollendämmung WLG 035 nur ungefähr  $22 \text{ kJ}/(m^2 \cdot K)$ .

#### 4.5.1 Bestandsmaterialien

Die Geometrie der Ziegel konnte anhand einer Öffnung in der Westwand des Dachgeschoßzimmers erfasst werden: Das nicht maßhaltige Format, 275 mm x 130 bis 135 mm x 65 mm stimmt nicht mit üblichen Ziegelabmessungen überein, wie sie z. B. im Internet auf *Backstein (2019)* zu finden sind. Die Messungen der Putzschichten ergaben unterschiedliche Dicken.

Während im Zimmer des Obergeschoßes 25 mm vorgefunden wurden, maß die Innenputzschicht im Dachgeschoß bis zu 50 mm. Bei den ersten 5 mm auf der Raumseite handelte es sich jeweils um einen augenscheinlich dichteren Putz höherer Qualität, während der restliche Teil poröser und brüchiger war, daraus ließen sich durch einen Fingernagel Zuschlagskörner aus den Proben abkratzen. Für die Berechnungen der U-Werte wurde deshalb ein Mittelwert von 37 mm gewählt. Die Schichten konnten ohne Beschädigung nicht getrennt werden, weswegen alle Messkörper aus beiden Schichten bestanden. Bei der Messung des  $A_w$ -Wertes wurde die dichtere, innen liegende Putzschicht mit der Wasseroberfläche kontaktiert. Die gemessene Dicke des Außenputzes betrug 20 mm.

Wie sich im Verlauf der Materialmessungen herausstellte, handelt es sich bei dem vorhandenen Mauerwerksziegel um einen sehr porösen, außergewöhnlich flüssigwasserleitfähigen Mauerwerksziegel. Abweichend von den bereits erwähnten ersten Annahmen aus dem *Bau-book (2019)* erfolgte im Verlauf der Materialmessungen eine deutliche Korrektur der im Vorfeld angenommenen Wärmeleitfähigkeit. Der ursprünglich errechnete U-Wert der Bestandswand wurde so von 1,19 W/(m<sup>2</sup>·K) auf 0,695 W/(m<sup>2</sup>·K) berichtigt.

#### 4.5.2 U-Wert der Bestandskonstruktion und der einzelnen Wandaufbauten

Die Messung realer Heizenergieverluste kann mit Wärmestromplatten ermittelt werden, was allerdings nicht Gegenstand des Projektes gewesen war. Berechnete U-Werte können dennoch als brauchbarer Indikator für die zu erwartenden Heizenergieverluste herangezogen werden (*Richter et Winkelmann-Fouad (2005)*). Mit der Unterstützung von Simulationsprogrammen wie *DELPHIN* können die „offiziellen“ Wärmeleitfähigkeiten überprüft werden. Liegen für eine Mindestzahl von Schichtgrenzen die gemessenen Temperaturen vor - die Innenoberfläche, die kalte Seite der Dämmsysteme und die Außenoberfläche - lässt sich durch Variantenstudien die Wärmeleitfähigkeit der Materialien vor Ort ermitteln. Messung und Simulationsergebnisse müssen dabei übereinstimmen. Tab. 11 stellt die mit den Wärmeleitfähigkeiten der Hersteller berechneten U-Werte den durch Messung und Simulation ermittelten gegenüber. Für die Zellulose war das nur bedingt möglich, da nur für einen Temperatursensor in der Gebäudeecke Messdaten vorlagen und dort wegen der Wärmebrücke zusätzliche, schwierig einzuschätzende Randbedingungen einen Einfluss auf die hygrothermischen Verhältnisse ausüben. Die U-Wert-Berechnung erfolgte mit der Formel

$$U = \frac{q}{\theta_i - \theta_e} \quad (11)$$

wobei der auf der Innenoberfläche aufgezeichnete Wärmestrom  $q$  in die Berechnung einging und  $q$  sowie die Temperaturen  $\theta_i$  und  $\theta_e$  jeweils über die Heizperiode gemittelt wurden.

Tab. 11 Mit den Bemessungswerten der Materialhersteller berechnete, „offizielle“ U-Werte und anhand der Simulationsergebnisse bzw. Messergebnisse berechnete U-Werte

Dämmsystem	U-Werte [W/(m <sup>2</sup> ·K)]	"offiziell"	korrekt
Feld 1 (Balken 2) - Zellulose		0,317	0,316
Feld 2 (Balken 3) – Perliteplatte		0,310	0,318
Feld 3 (Balken 4) – Wärmedämmputz		0,317	0,369
Feld 4 (Balken 5) - Holzweichfaserplatte		0,342	0,341
Feld 5 (Balken 6 & 7) – Schilfplatte		0,322	0,322

Mit Ausnahme des Wärmedämmputzes war die Übereinstimmung sehr gut.





## 5 Hygrothermische Vor-Ort-Messungen

### Danksagung

Ein herzliches Dankeschön gilt dem Institut für Physik bzw. der Wetterstation der Karl-Franzens-Universität (KFU) Graz, welche unkompliziert und rasch deren Wetterdaten zur Verfügung stellte und so zu einer wertvollen Vervollständigung des Projektes bzw. dieser Arbeit beigetragen hat. Mit der Aufnahme der Wetterstation in das ARAD-Projektnetzwerk ging eine Erweiterung der Messtechnik einher, die auch der vorliegenden Arbeit zugutekam. Die Wetterstation steht unter der Verwaltung der ZAMG (Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik) in Wien.

### 5.1 Auswertung der Messdaten

In den folgenden Kapiteln werden zunächst die Raum- und Außenklimadaten ausgewertet. Daran schließt sich die Besprechung der einzelnen Messpositionen an. Die Diagramme in den Kapiteln 5.4 bis 5.8 vermitteln einen Überblick über die Messdaten an bestimmten Positionen. Aus diesem Grund enthalten die Diagramme häufig alle Kurven einer Messposition, um ein Erfassen der Bandbreite und einen groben visuellen Vergleich zu ermöglichen. Einzelne Kurven sind dadurch nicht immer durchgängig erkennbar und bestimmte Kurvenabschnitte können deswegen nur schriftlich beschrieben werden. Die wichtigsten Informationen werden in einem späteren Kapitel diskutiert.

Hinsichtlich der gelegentlichen Verwendung von Abkürzungen für die einzelnen Messstellen sei auf Bild 13 verwiesen oder auf folgende tabellarische Kurzfassung:

Tab. 12 Kurzbezeichnung und Beschreibung der einzelnen Messpositionen

Bezeichnung	Beschreibung
ID	Grenzschicht zwischen Dämmsystem und Bestandskonstruktion
Stirnholz	Sensoren, die im Balkenaufleger so tief wie möglich in den Luftspalt neben dem Holzbalkenkopf platziert wurden
Balkenwange	Sensoren in der Mitte des Balkenauflegers, 0,15 m von der Bestandsoberfläche
Holzfeuchte Stirnholz	Holzfeuchte an der „nassesten Stelle“ bzw. an der oberen Außenecke der Balken
15 mm Tiefe / 30 mm Tiefe	Holzfeuchte in der Ebene der Innendämmung in 15 und 30 mm Tiefe

## 5.2 Konvertieren der Messdaten

Für das Projekt OEKO-ID war eine Vielzahl von Messsensoren eingesetzt worden, für deren wissenschaftliche Auswertung es unerlässlich war, die Rohdaten von der ursprünglich vorgesehenen Software „Dewetron PMT4“ mit hohem Zeitaufwand zu konvertieren.

Eine darstellerisch ansprechende und zugleich von der statistischen Auswertung her komfortable Aufarbeitung ist mit Tabellenprogrammen beispielsweise von OpenOffice oder Microsoft Office prinzipiell möglich, wobei bei älteren Versionen die Beschränkung der bearbeitbaren Zeilen auf 32000 zu gering ist. Doch auch neuere Versionen von Microsoft Excel, OpenOffice oder LibreOffice kommen mit dem Anwachsen der Datenmengen an ihre Grenzen.

Der Export der Daten aus „Dewetron PMT4“ in ein kompatibles Format ist zwar möglich, eventuelle kurzzeitige Ausfälle der Messsensoren müssen jedoch mit ausgesprochen hohem Zeitaufwand aufgearbeitet werden. Da zum Zeitpunkt der Auswertung nur lückenlos austauschbare Datenreihen dienlich sind, müssen die Zeitachsen aller Datenreihen exakt übereinstimmen. Bei mehrjährigen Messungen, die ein häufiges Auslesen der Daten benötigen, werden die zeitlichen Abweichungen der Sensoren untereinander sonst schnell fehlerhaft und damit unbrauchbar. Aus diesem Grund musste im vorliegenden Fall das Auslesen der Messdaten für jeden Sensor einzeln erfolgen. Nur so konnte das kurzzeitige Aussetzen von Sensoren bemerkt und entsprechend verarbeitet werden. Wegen dieser notwendigen Korrektur war es nicht möglich, möglicherweise komfortablere Auswertungssoftware zu verwenden. Es ist auf jeden Fall zu empfehlen, für die beschriebenen Problematiken (Messlücken, Zeitabgleich etc.) spezielle Skripte, z. B. mit *Python* (2019), zu verwenden bzw. zu entwickeln.

Besonders aufwändig war die Beurteilung der Holzfeuchtesensoren, worauf schon in Abschnitt 5.7 verwiesen wurde. Hier waren immer wieder länger anhaltende Messfehler zu verzeichnen. Offensichtliche Messfehler, wie z. B. das Springen der Holzfeuchte um 2 Masseprozent für einige Tage und das anschließende Zurückspringen auf das ursprüngliche Niveau wurden korrigiert, wenn offensichtlich war, welche Werte korrekt waren, z. B. durch den logischen Abgleich mit anderen Sensoren. Nachdem ein Teil der Technik zur Messung der Holzfeuchte am 16. Jänner 2013 ausgetauscht worden war, verbesserte sich die Qualität der Messdaten spürbar.

Alle Ausfälle sowie die korrigierten Daten sind in Dateien dokumentiert und können eingesehen werden.

## 5.3 Außen- und Raumklima

Die folgenden beiden Abbildungen dokumentieren die Stundenwerte von Temperatur und relativer Luftfeuchte des Außenklimas und in den beiden Räume. Der Übersichtlichkeit halber zeigt das daran anschließende Bild 45 die Monatsmittelwerte. Zusätzlich gibt die Tab. 31 im Anhang A 4 die Monatsmittelwerte tabellarisch wieder. Der Messzeitraum umfasste den 5. September 2010 bis zum 17. Juni 2013.

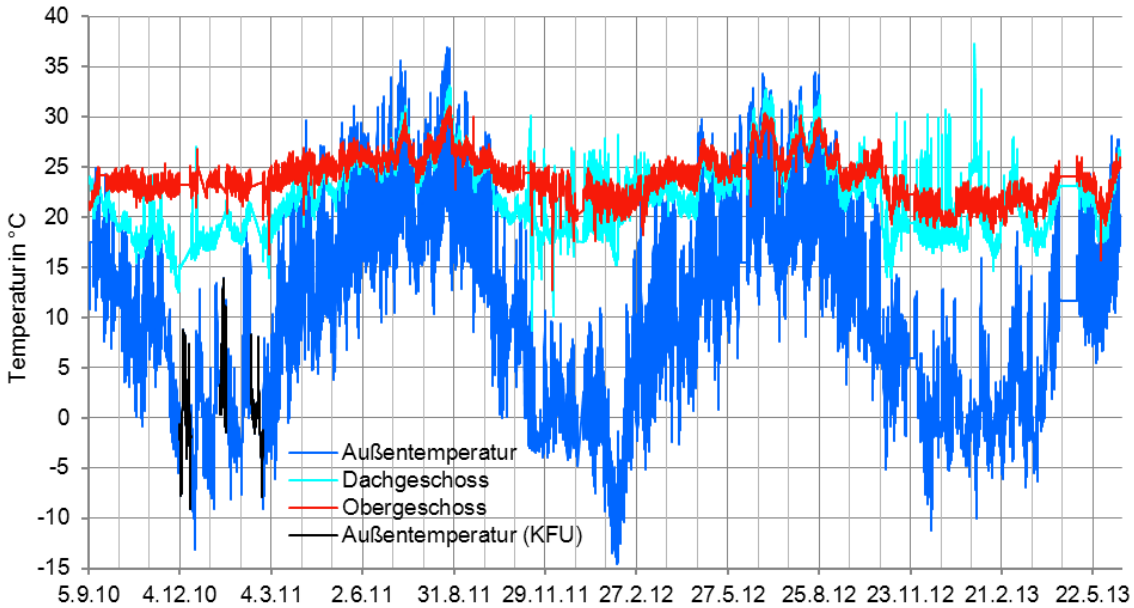


Bild 43 Temperaturverläufe außen und innen; Sensorausfälle wurden durch Daten der KFU-Graz ergänzt

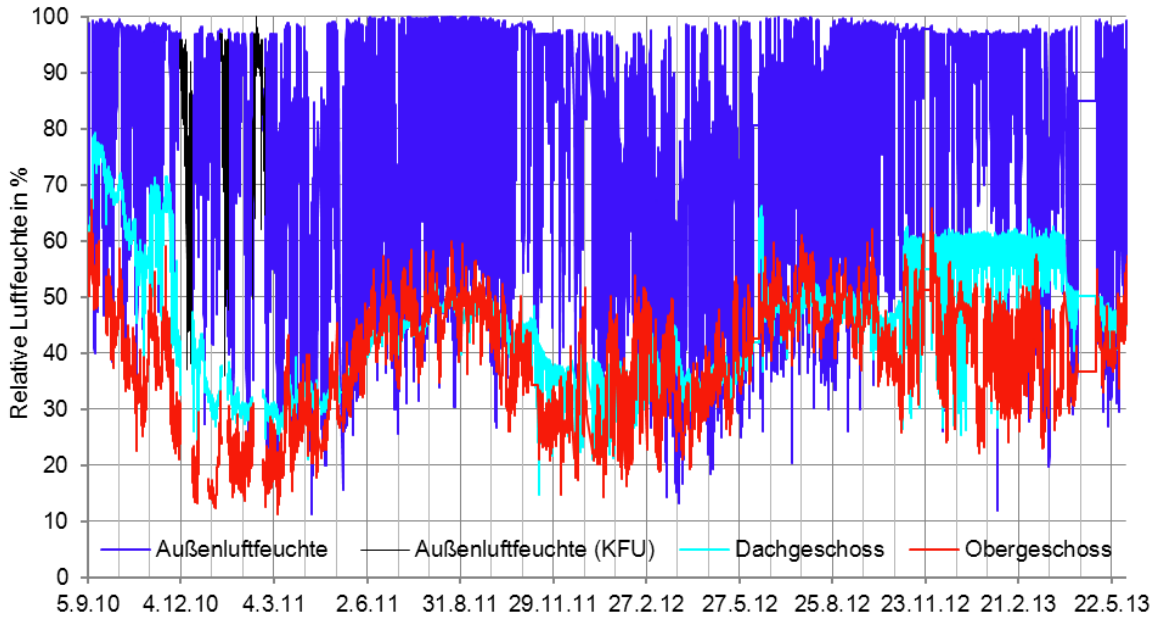


Bild 44 Verlauf der relativen Luftfeuchte außen und innen; Sensorausfälle wurden durch Daten der KFU-Graz ergänzt

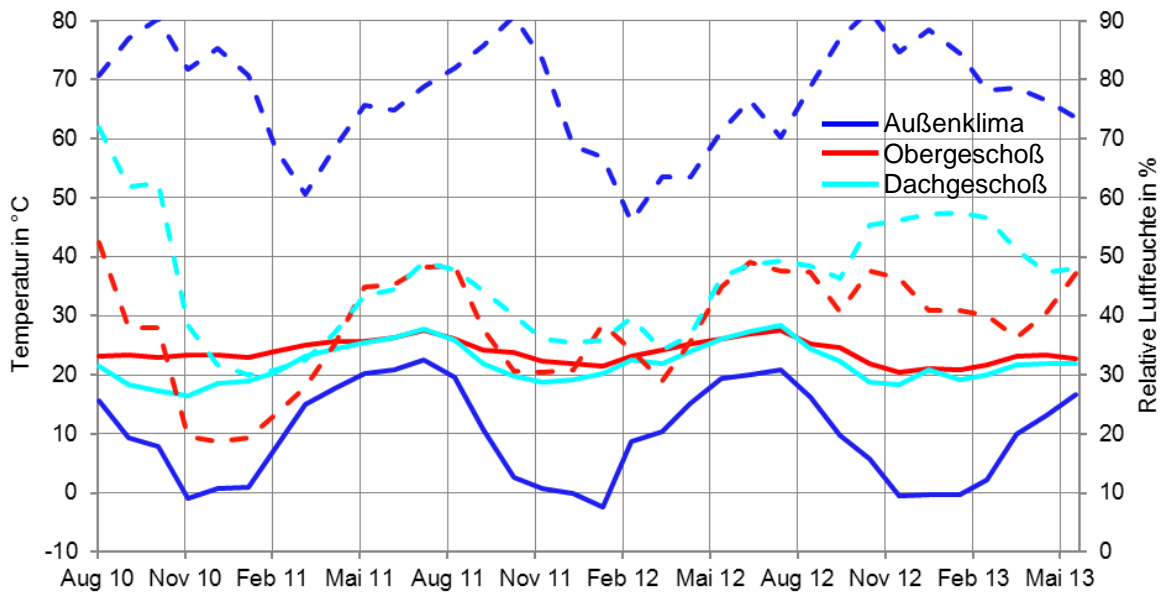


Bild 45 Monatliche Durchschnittswerte für Temperaturen innen und außen (durchgezogen, linke Skala) und Luftfeuchte (gestrichelt, rechte Skala)

Während der Projektdauer bewegte sich die Außentemperatur mit durchschnittlich  $9,8^{\circ}\text{C}$  etwas über dem langjährigen Mittel der Jahre 1971 bis 2000 von  $9,4^{\circ}\text{C}$  (ZAMG (2019)). Der Winter 2012/13 (Oktober bis März) mit einer Durchschnittstemperatur von  $2,8^{\circ}\text{C}$  sowie der Sommer 2011 (April bis September) mit einer Durchschnittstemperatur von  $19,3^{\circ}\text{C}$  erwiesen sich als die extremsten Trocknungs- bzw. Kondensationsperioden. Die Durchschnittstemperaturen der Winter 2010/11 und 2011/12 betrugen  $4,2$  und  $3,4^{\circ}\text{C}$ , die Durchschnittstemperatur des Sommers 2012 nur  $17,0^{\circ}\text{C}$ . Im kältesten Monat, Februar 2012 ( $\varnothing: -2,4^{\circ}\text{C}$ ), kam es zu einer etwas längeren kalten Periode mit bis zu  $-15^{\circ}\text{C}$ .

Im Obergeschoß waren die Innenraumtemperaturen vergleichsweise konstant und fielen vom ersten zum zweiten Winter ab. Sie sanken von  $23,3^{\circ}\text{C}$  im Winter 2010/11 über  $22,8^{\circ}\text{C}$  auf  $21,8^{\circ}\text{C}$  im Winter 2012/13. Dies kann damit zusammenhängen, dass insbesondere im dritten Winter dieses Zimmer wegen der hohen Raumlufffeuchte weniger genutzt und damit weniger geheizt wurde.

Das Zimmer im Dachgeschoß wurde nur als Lager- bzw. Technikraum genutzt. Durch den Einsatz eines mobilen, elektrisch betriebenen Heizkörpers konnte die Durchschnittstemperatur im Winter 2011/12 konstanter auf etwas über  $20,4^{\circ}\text{C}$  bzw.  $19,9^{\circ}\text{C}$  im letzten Winter stabilisiert werden, nachdem sie im ersten Winter 2010/11 nur  $18,3^{\circ}\text{C}$  betragen hatte.

Der Verlauf der relativen Außenluftfeuchte zeigt einen typischen, sehr unruhigen Verlauf (Bild 44). Die Außenluftfeuchte ist während der Kondensationsperiode von untergeordneter Bedeutung, da derartig kalte Luft nur sehr wenig *absolute* Feuchte speichern kann.

Aus diesem Grund ist die Außenluftfeuchte in den meisten Luftfeuchte-Diagrammen dieses Berichtes nicht mit angegeben. Bei  $0^{\circ}\text{C}$  bedeutet eine Steigerung von 50 auf 80% Luftfeuchte einen Sprung im *absoluten* Feuchtegehalt von  $2,4$  auf  $3,9 \text{ g/m}^3$ . Bei  $20^{\circ}\text{C}$  dagegen würde sich

durch einen solchen Sprung in der *relativen* Luftfeuchte die *absolute* Feuchte von 8,6 auf 13,8 g/m<sup>3</sup> erhöhen. Entscheidend an der winterlichen Außenluft ist, dass sie im Verhältnis zur Raumluft fast durchgängig weit weniger Feuchte enthält. Daraus resultiert ein Wasserdampfdruckgefälle, das einen praktisch konstanten Dampftransport von innen nach außen aufrecht erhält.

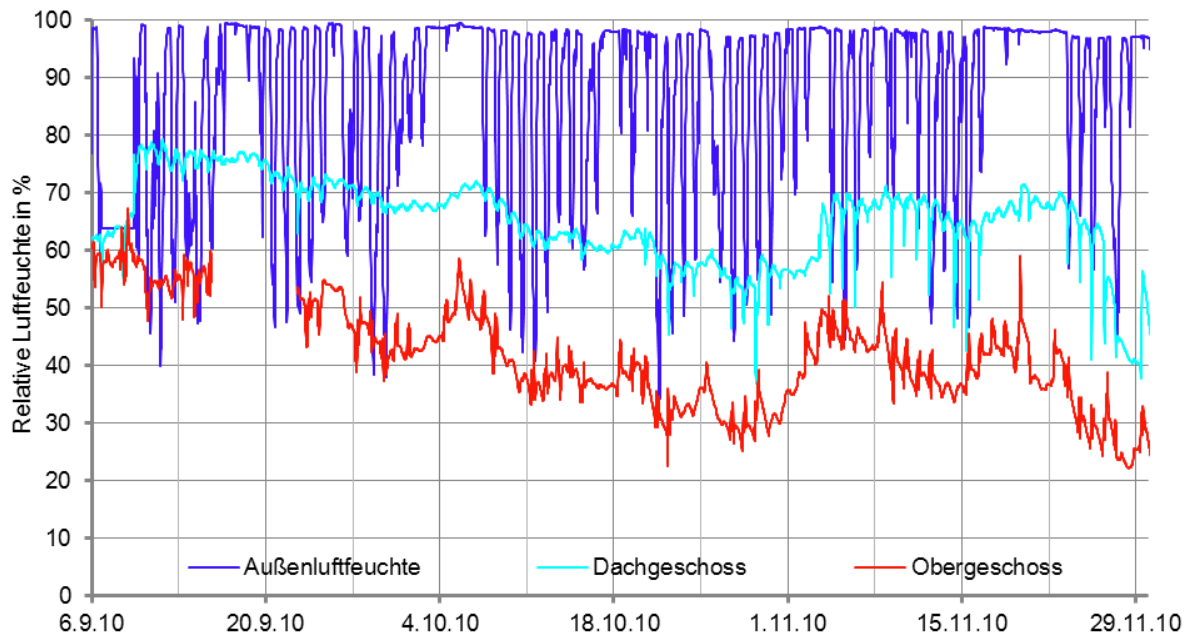


Bild 46 Außenluftfeuchte und Raumluftfeuchten vom 6. September bis 1. Dezember 2010

Zu Beginn der Messungen kam es wegen der Bauarbeiten immer wieder zu hohen Raumluftfeuchten in den beiden Zimmern. Am 9. September 2010 stieg die Luftfeuchte im Dachgeschoß durch die mit den Materialien eingebrachte Feuchte beispielsweise auf knapp 80 % an, ebenso um den 5. Oktober oder Anfang November 2010 (Bild 46). In diesen Zeiträumen wurde die zweite Lage Wärmdämmputz aufgebracht bzw. auf den Holzweichfaserplatten oder der Zellulose-Dämmung wurde der Putz angebracht. Auffallend ist, dass die Luftfeuchte im Dachgeschoß während dieser Bauphase weit über der Luftfeuchte im Obergeschoß verläuft. Das ist ein Hinweis darauf, dass im Dachgeschoß weniger gelüftet wurde und die Temperaturen niedriger waren.

Die Decke zwischen den beiden Räumen entkoppelt die Feuchte betreffend das Klima des Dachgeschoßzimmers von dem des Obergeschoßes. Die Luftfeuchtespitzen im Obergeschoß am 4., 6. und 7. April zeichnen sich ebenso wenig in der Luftfeuchte des Dachgeschoßes ab, wie die Schwankungen zwischen 10. bis 16. April 2011 (Bild 47). Nur am 15. April 2011 scheint ein Feuchteimpuls aus dem Obergeschoß auf das Dachgeschoß einzuwirken. Die Temperaturen beider Räume scheinen in gleicher Weise vom Gang der Außentemperatur beeinflusst.

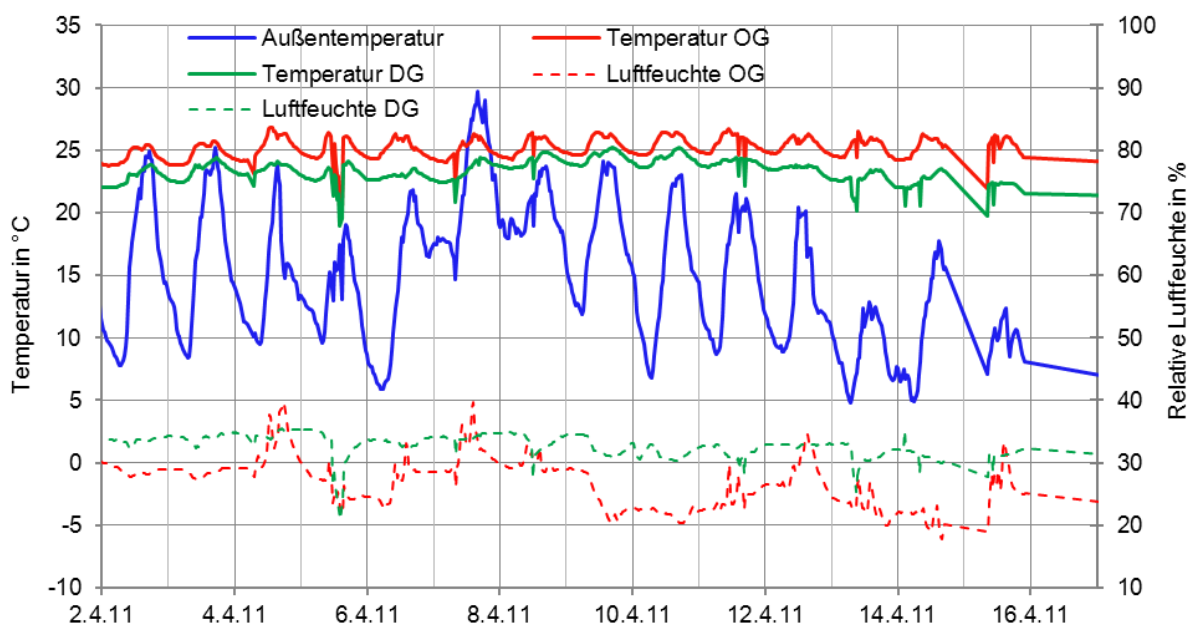


Bild 47 Raumklima und Außentemperatur vom 2.4.2011 bis 16.4.2011

Die Innenraumlufffeuchte im Obergeschoß startete im September 2010 zwar von einem hohen Ausgangspunkt, sank aber in den Wintermonaten stark ab (Bild 45). In den Monaten Oktober 2010 bis März 2011 betrug die durchschnittliche Raumlufffeuchte 26,1 % (Dachgeschoß: 42,5 %), von Dezember 2010 bis Februar 2011 sogar nur 19,2 % (Dachgeschoß: 33,3 %). Als Ursache für diese niedrige Luftfeuchte können mehrere Gründe angeführt werden:

- Neben dem vorbildlichen Lüftungsverhalten durch die Kinderbetreuerinnen im Obergeschoß führt die undichte Gebäudehülle (unsanierte Kastenfenster) dem Gebäude im Winter nutzerunabhängig viel trockene Außenluft zu.
- Hohe Raumtemperaturen.
- Bei den Begehungen standen praktisch immer alle Türen offen und im Zimmer im Obergeschoß spielten zeitweise nur einige Kinder. Im Raum selber fiel deshalb nur wenig Luftfeuchte an, diese wurde durch den ständigen Luftaustausch mit den anderen Räumen weiter gesenkt. Auch nahm das Foyer, welches über mehrere Etagen verläuft, vermutlich viel Feuchte aus den Räumen auf und verteilte diese.
- Das Zimmer des Dachgeschoßes wies neben der Innentür weitere Undichtigkeiten auf.

Im Sinne einer „Grenzen auslotenden“ Untersuchung sind derartig niedrige Luftfeuchten nicht zielführend. Eine niedrige Raumlufffeuchtebelastung verursacht einen geringen Dampfdruckgradienten, sodass nur wenig Wasserdampf in die Konstruktion diffundiert. Selbst Konstruktionen, die unter üblicheren Raumklimabedingungen eindeutig als kritisch eingestuft werden, z. B. Innendämmung mit Mineralwolle *ohne* dampfbremsende Schicht, würden sich bei den Raumlufffeuchten der ersten Kondensationsperiode gewiss als unproblematisch erweisen (*Borsch-Laaks et Walther (2008)*). Im Sinne eines wahrhaftigen Praxistests war es deshalb wünschenswert, höhere Raumlufffeuchten zu erzielen, da eine solch niedrige Belastung einen sehr guten Schutz gegen Feuchteschäden darstellt.

Doch auch in anderer Hinsicht erwies sich die niedrige Raumlufffeuchte als problematisch: In *EN 13779* wird beschrieben, dass sehr niedrige Luftfeuchte unter 20 % Trockenheit und Reizungen der Augen und Luftwege verursachen kann, weshalb für Gebäude üblicher Nutzung häufig ein Mindestwert von 30 % Luftfeuchte empfohlen wird (z. B. in *SIA 382/1*). Dieser Richtwert wird im Winter 2010/11 deutlich unterschritten, was für Kinder mit Atemwegserkrankungen, wie beispielsweise Asthma, problematisch sein kann. Derart niedrige Luftfeuchtwerte in Verbindung mit hohen Raumtemperaturen sind demzufolge für Kinder wie Betreuer in der Tageseinrichtung nicht empfehlenswert.

Für die zweite Kondensationsperiode 2011/12 wurden deshalb mehrere Maßnahmen ergriffen, um die Raumlufffeuchte zu erhöhen. Die einzelnen Maßnahmen sind im kommenden Abschnitt beschrieben.

Im ersten Winter 2010/11 kam es zu einigen Ausfällen bei der Messung der Außen- und Raumklimata. Gleichfalls wurde festgestellt, dass die Messdaten der Globalstrahlung mit maximal  $300 \text{ W/m}^2$  eindeutig zu niedrig und damit unrealistisch waren, weshalb das Sternpyranometer am 13.4.2011 ausgetauscht wurde. Der Ausfall der Außenklimadaten konnte durch eine nahegelegene Klimamessstation der KFU Graz kompensiert werden, welche die Daten erfreulicherweise unkompliziert und unentgeltlich zur Verfügung stellte (siehe Danksagung zu Beginn von Kapitel 5). Die Wetterstation befindet sich in einer Entfernung von 1,4 km und einem Höhenunterschied etwas weniger als 50 m zum Testhaus. Dank der örtlichen Nähe und ähnlicher Topologie kann davon ausgegangen werden, dass sich die Wetterverhältnisse an den beiden Standorten nicht wesentlich unterscheiden.

Diese Messdaten wurden später durch ein weiteres, genaueres Datenpaket ergänzt. Im Rahmen einer Erweiterung der Anlage an der KFU Graz im Sommer 2011 waren zusätzliche Klimadaten verfügbar, hier insbesondere die diffuse, direkte und langwellige Abstrahlung (*Olefs et al. (2016)*). Dadurch konnte in der vorliegenden Arbeit für den Zeitraum ab 1. September 2011 die langwellige Strahlung in 10-Minuten-Intervallen angeordnet werden. Für den Zeitraum ab 1. Juni 2011 standen Regen und Winddaten sogar im 1-Minuten-Intervall zur Verfügung, welche als gemittelte 10-Minuten-Werte eingesetzt wurden.

Auch für einige Zeitabschnitte mit mehrtägigen Messlücken im Außenklima, z. B.

- vom 7. Oktober 2011 (5:50) bis 12. Oktober 2011 (8:40),
- vom 1. August 2012 (8:30) bis 2. August 2012 (23:50) und
- vom 2. Mai 2013 (5:00) bis zum 13. Mai 2013 (12:30).

wurden die in der Schönbrunngrasse erhobenen Daten durch die Messungen an der KFU Graz ergänzt. Die Ergänzungszeiträume sind dokumentiert und können eingesehen werden. Messlücken unter vier Stunden Dauer wurden ignoriert, da sie von kaum feststellbarer Relevanz sind und nur einen sehr kurzfristigen Effekt auf die Außenoberfläche ausüben.

Die Ergänzungen des Außenklimas sind in den Bild 43, Bild 44 und Bild 48 in schwarz bzw. grün dargestellt.

Die in der Schönbrunnngasse 30 und der KFU Graz gemessenen Strahlungswerte unterscheiden sich wenig (Bild 48). In einem Vergleich der Daten zwischen 13.4.2011 und 31.5.2011 übersteigen die Spitzenwerte der Globalstrahlung am Testhaus die Messwerte an der Karl-Franzens-Universität an den meisten Tagen um ungefähr 10 %, was z. B. einer stärkeren Luftverschmutzung am zentrumsnäheren Standort geschuldet sein kann. Wegen der Eigenverschattung der Südwestwand steigen die Testhauswerte täglich erst nach ungefähr 9.30 Uhr stark an, nachdem die Sonne auch diese Wand beschien.

Um auf die Umrechnung des horizontal liegenden Strahlungssensors auf Strahlungswerte für eine vertikale Außenwand verzichten zu können, wurde das Sternpyranometer am 8.2.2012 von einer horizontalen in eine vertikale Stellung gebracht. Die Umrechnung der horizontal gemessenen Werte in kurzweilige Globalstrahlung, die auf eine vertikale Wand fällt, ist im Anhang A 3 beschrieben.

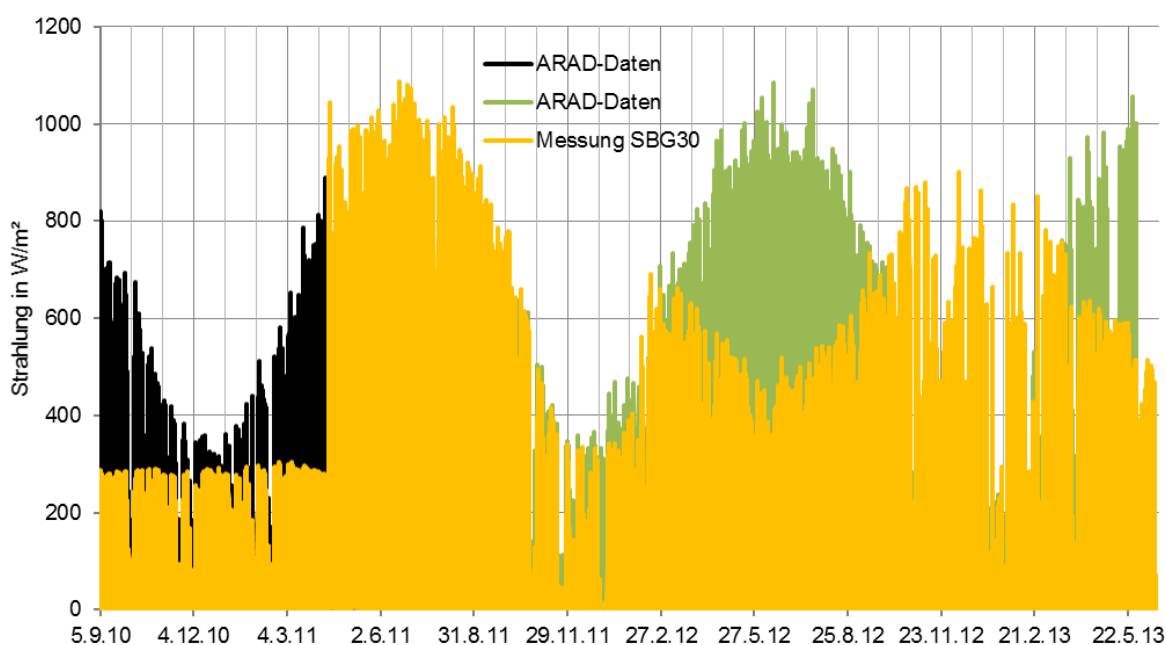


Bild 48 Verlauf der Globalstrahlung: Gelb die am Testhaus gemessenen Werte, schwarz Daten der KFU Graz, grün ZAMG-Daten; am 8.2.2012 Umstellung des Sternpyranometers vor Ort

Der Tagesverlauf der Globalstrahlung in Bild 49 ist hinsichtlich der abschirmenden Wirkung eines Laubbaums aufschlussreich. Bild 110 zeigt den Baum, der in ungefähr 7 m Entfernung vor der Gebäudeecke, ungefähr in Verlängerung der Ost-südost ausgerichteten Gebäudeseite, wächst. In Bild 49 ist der Verlauf der Globalstrahlung während einiger Sommertage zu sehen. In Graz geht die Sonne am 1. August ungefähr um 5:30 auf, und um 20:30 unter. Am steilen Anstieg gegen 10 Uhr (Sommerzeit!) ist zu sehen, dass zu diesem Zeitpunkt die Sonnenstrahlung auf die Testwand auftrifft. Das Maximum wird in Abhängigkeit von der Bewölkung zwischen 12 und 14 Uhr erreicht. Ab ungefähr 15 Uhr ist ein, besonders bei zuvor hoher Sonneneinstrahlung, deutlicher Abfall im Strahlungsverlauf zu sehen. Um diese Zeit schirmt der näher stehende Baum die Fassade ab. Gegen 18 Uhr kommt die tiefer stehende Sonne in den Bereich der Bäume, welche sich an der Grundstücksgrenze zur Schönbrunnngasse befinden.



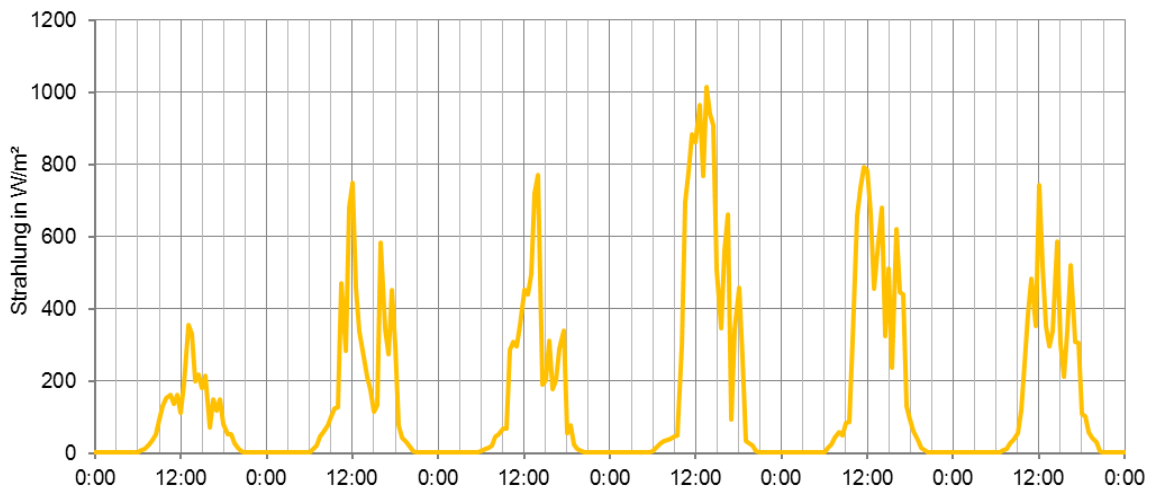


Bild 49 Verlauf der Globalstrahlung vom 29.7. bis zum 4.8.2011

Bild 50 gibt den Verlauf der langwelligen Strahlung wieder. Durch die Erweiterung der Messstation konnte ab dem 1. Juni 2011 die langwellige Strahlung der KFU Graz mitberücksichtigt werden.

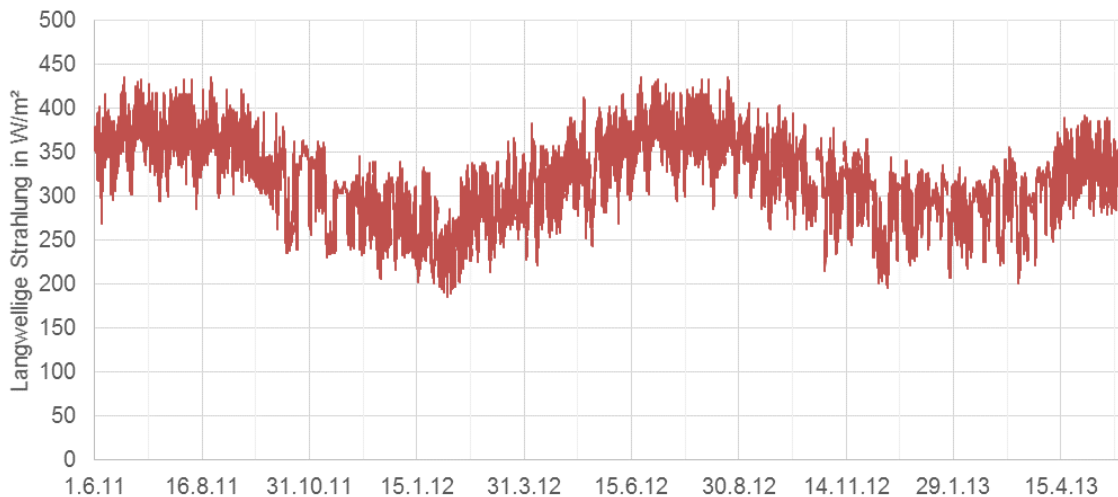


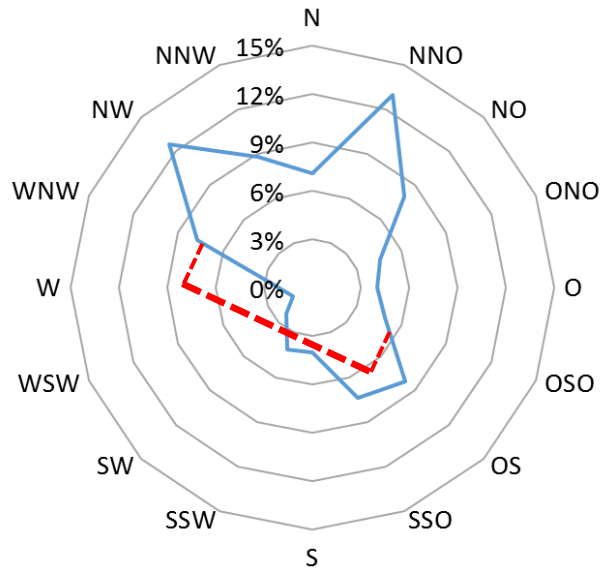
Bild 50 Verlauf der langwelligen Strahlung ab dem 1.6.2011 (Messdaten der KFU Graz/ZAMG)

Für die aufwändige Messung des Niederschlags oder Schlagregens stand keine Technik zur Verfügung. Dank der Klimamessungen an der KFU Graz konnte dennoch Schlagregen in den Simulationen berücksichtigt werden, allerdings standen durchgehende Messwerte erst ab dem 1.6.2011 zur Verfügung.

In die Schlagregenhäufigkeitsverteilung, rechts neben Tab. 13, ist die Lage der Testwand in rot skizziert. Es wird deutlich, dass ausgerechnet auf die Testwand sehr selten Schlagregen auftritt, worauf später noch eingegangen wird.

Tab. 13 Links monatliche Regenmengen in Graz auf eine horizontale Fläche und rechts Schlagregenhäufigkeitsverteilung mit der eingezeichneten geographischen Ausrichtung der Testwand in rot (Messdaten der KFU Graz/ARAD)

	2011	2012	2013
Jan		7.8	32.5
Feb		17.3	99.7
Mrz		4.2	69.6
Apr		77.2	41.3
Mai		126.2	219.0
Jun	136.1	103.5	
Jul	73.5	297.1	
Aug	127.2	71.5	
Sep	119.9	120.8	
Okt	71.7	115.5	
Nov	0.9	75.4	
Dez	11.0	16.9	
$\Sigma$	540.3	1033.4	462.1



Dass die im Messzeitraum verzeichnete durchschnittliche Windgeschwindigkeit mit 1,5 m/s vergleichsweise niedrig ist, reduziert die Schlagregenbelastung zusätzlich (Bild 52 unten). Der Einfluss des Schlagregens wird in Kapitel 6.4 vertieft.

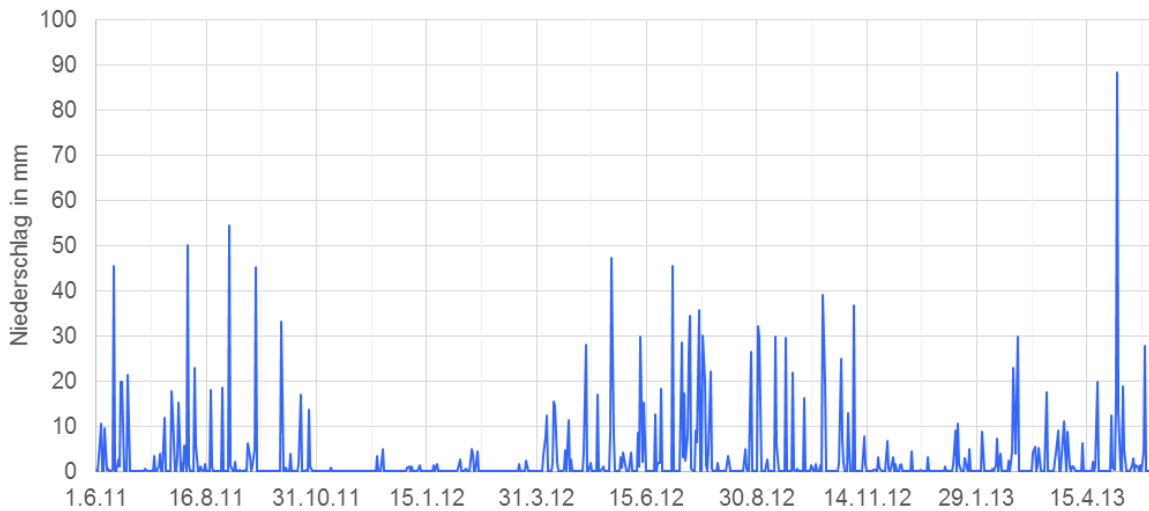


Bild 51 Verlauf der Niederschlagsmengen auf eine horizontale Fläche ab dem 1.6.2011 (Messdaten der KFU Graz/ZAMG)

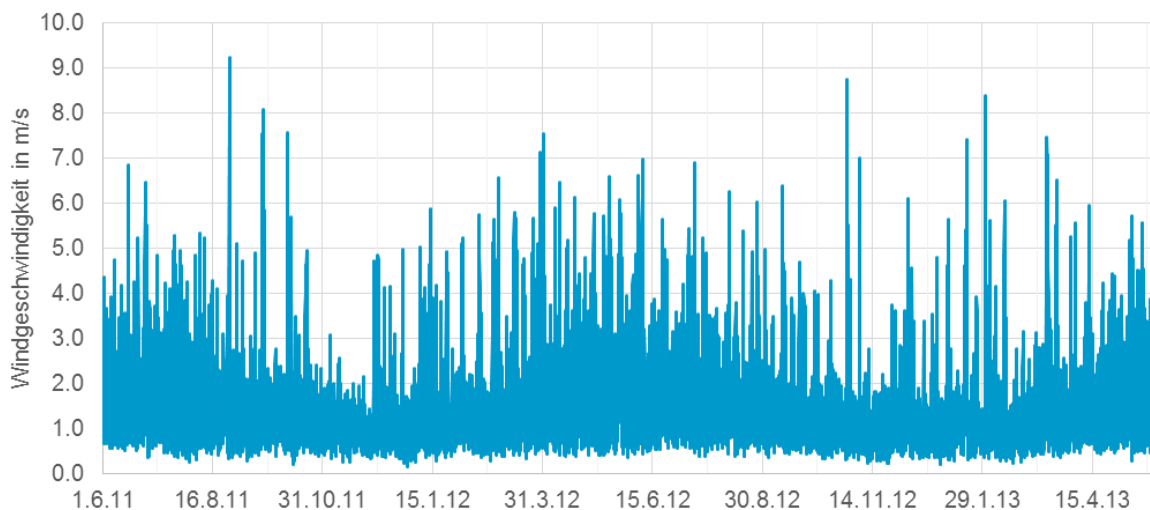


Bild 52 Verlauf der Windgeschwindigkeit ab dem 1.6.2011 (Messdaten der KFU Graz/ZAMG)

### 5.3.1 Maßnahmen zur Beeinflussung der Raumlufffeuchte

Um die Raumlufffeuchte im Ober- und Dachgeschoßzimmer zu erhöhen, wurden in der Kondensationsperiode 2011/12 mehrere Strategien verfolgt:

- Zusätzliche Produktion von Feuchte durch Einsatz von mobilen Luftbefeuchtern in beiden Räumen.
- Reduktion des Dampfstroms nach außen durch die Abdichtung der inneren Fensterebene.
- Reduktion des Dampfstroms in benachbarte Räume durch einen flexiblen Vorhang im Obergeschoß, durch das Schließen der OG-Zimmertüre während der Nacht und an Wochenenden sowie die Abdichtung von Bauwerks-Undichtigkeiten im Dachgeschoß (Wanddurchdringungen für Versorgungsleitungen und Stromkabel).

Anhand der Sensorik in der Konstruktion und den Räumen konnte jederzeit überprüft werden, ob nach Durchführung dieser Maßnahmen kritische Feuchtwerte erreicht oder überschritten wurden.

#### Mobile Luftbefeuchter

Für die Befeuchtung der Räume wurde im Ober- und Dachgeschoßzimmer jeweils ein Befeuchter AxAir LBV 45 der Firma Walter Meier (Klima Deutschland) GmbH, mittlerweile Condair GmbH in Garching, aufgestellt (Bild 53). Um einen möglichst unaufwändigen Betrieb ohne tägliches Nachfüllen der beiden Befeuchter sicherzustellen, wurden Wasserleitungen mit einem Wasserstopmechanismus zu den Befeuchtern verlegt. Ein eingebautes Schwimmerventilsystem diente der Regulierung der Wasserversorgung. Um Störungen des Kindergartenbetriebes durch den Befeuchter zu verhindern und um sicherzustellen, dass die Einstellungen nicht ohne gewissen Aufwand verändert werden können, wurde der Befeuchter im Spielzimmer des Obergeschoßes auf ein extra angefertigtes Podest in ungefähr 2 m Höhe aufgestellt. Die Befeuchter standen zur Sicherheit zusätzlich in einer Plastikwanne.



Bild 53 Befeuchter AxAir LBV 45 der Firma Walter Meier GmbH (Foto: Walter Meier GmbH)

Die Befeuchter sind gemäß den Herstellerangaben für Räume bis 350 m<sup>3</sup> geeignet, die maximale Befeuchtungsleistung liegt bei 45 l/Tag. Das Volumen der beiden Zimmer beträgt ungefähr 115 m<sup>3</sup>, sodass die Geräte als ausreichend erachtet werden können. Die Steuerung der Befeuchter ermöglicht laut Herstellerangaben eine Soll-Raumluftfeuchte von ungefähr 40 bis zu 70 % bzw. permanenten Betrieb. Drei verschiedene Lüftergeschwindigkeiten gestatten unterschiedliche Wasserdampfproduktionsraten. Die Steuerung bzw. Kontrolle kann durch externe Hygrostate erfolgen, welche bei Unterschreitung der eingestellten Raumluftfeuchte die Befeuchter einschalten.

Die Befeuchter wurden im Dezember 2011 mit einer Soll-Raumluftfeuchte von 50 % in Betrieb genommen. Wegen der trotzdem niedrigen gemessenen Raumluftfeuchte wurde am 17. Jänner 2012 auf 60 % erhöht.

Tab. 14 Eingestellte Soll-Raumluftfeuchte der Befeuchter; \*wegen eines defekten Hygrostaten wurde am Befeuchter die Einstellung M / H - zwischen mittlerer und hoher Feuchte – fix gewählt

Zeitraum	Obergeschoß	Dachgeschoß
22.12.2011 - 17.01.2012	50 %	50 %
17.01.2012 - 22./24.03.2012	60 %	60 %
2.11.2012 - 3.12.2012	60 %	65 %
3.12.2012 - 5.12.2012	65 %	65 %
5.12.2012 - 8.4.2013	M/H*	65 %

Aufgrund steigender Außentemperaturen erfolgte die Deaktivierung der Befeuchter Mitte März 2012. Da sich auf stehendem Wasser in den Vorratsbehältern Schimmel bilden kann, wurden die Luftbefeuchter aus Hygienegründen vom 21.3. bis 24.3. auf volle Leistung gestellt. Die nahezu geleerten Vorratsbehälter ließen sich im Anschluss leichter reinigen. Anfang April 2013 war das Vorgehen analog.

### **Reduktion der Feuchtediffusion nach innen und außen**

Mit den Betreuerinnen war vereinbart worden, dass die Zimmertüre zum Testraum des Obergeschoßes nachts und an Wochenenden geschlossen bleiben sollte. Die Einhaltung konnte

wegen des hohen Zeitaufwandes nicht überwacht werden. Es ließ sich aber häufig beobachten, dass während der Befeuchtungsphasen die Luftfeuchte an einigen Wochenenden kontinuierlich zunahm und am Montagmorgen wieder schlagartig abnahm (siehe Bild 55).

Nachdem sich nach Beginn der maschinellen Befeuchtung im Jänner 2012 nicht der erwartete Erfolg eingestellt hatte, wurden weitere Abdichtungsmaßnahmen durchgeführt. Um zu verhindern, dass die im Raum entstehende Feuchte nicht in die anderen Räume verteilt wird, wurde vor die Tür des Obergeschoßes ein Plastikvorhang angebracht. Die ca. 0,15 m breiten, mehrere Millimeter dicken, transparenten Lamellen aus Polyethylen überlappten sich leicht und reichten bis zum Boden. In „geschlossenem“ Zustand blieben allerdings Lücken, welche den möglichen Abschottungseffekt reduzierten.

Weil das Zimmer im Dachgeschoß praktisch nicht genutzt wurde, war die Innentür permanent geschlossen und es wurde nicht gelüftet. Trotzdem wurden im Dachgeschoß zusätzlich die Rohrdurchbrüche in den Wänden, welche für die Wasserrohre der Befeuchter benötigt wurden, mit Hilfe von Mineralwolle und Plastikfolie provisorisch abgedichtet (Bild 54). Die Fugen der Türen sowie die innere Ebene aller Kastenfenster wurden mit speziellen Dichtungsbändern versehen.

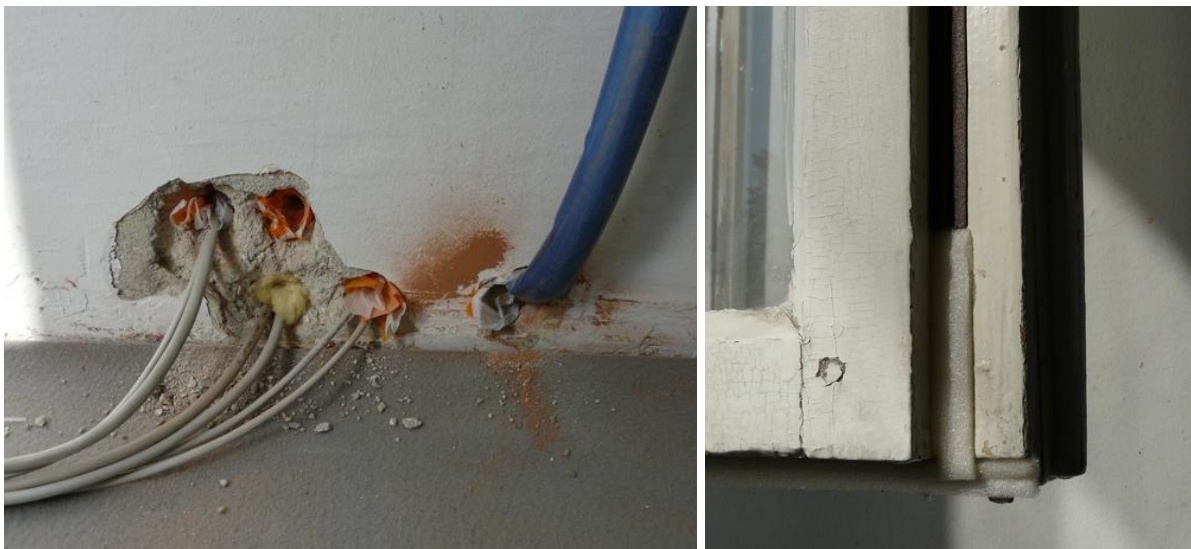


Bild 54 Links Wanddurchbrüche für Messtechnik-Kabel und Wasserversorgungsleitung des Befeuchters, rechts Fensterabdichtung mit (zwei unterschiedlichen) Bändern

### 5.3.2 Erfolg der Abdichtungsmaßnahmen

Der Vorhang aus transparenter PE-Folie wurde im täglichen Betrieb scheinbar nie verwendet, da er, trotz gegenteiliger Bitte der Projektmitarbeiter, bei nahezu jedem Besuch an der Wand fixiert vorgefunden wurde, sodass dessen Einsatz als nicht erfolgreich bezeichnet werden muss. Laut Auskunft der Kindergärtnerinnen hängten sich die Kinder in unbeobachteten Momenten gerne an die Lamellen, um damit zu schaukeln. Sicherlich wurde der Vorhang im täglichen Betrieb zusätzlich als störend empfunden, weil er einige Monate lang unangenehme

Gerüche ausgaste. Es wird deshalb davon ausgegangen, dass der Vorhang keinen Effekt erzielte, da nicht kontrolliert werden konnte, wann der Vorhang als solcher genutzt wurde. Außerdem schloss er die Türöffnung wie beschrieben nicht vollständig ab.

Tab. 15 weist aus, dass das Ziel einer erheblichen Luftfeuchteerhöhung zunächst nicht in befriedigender Weise erreicht werden konnte: In den Monaten Dezember 2011 bis März 2012 konnte die Raumlufffeuchte im Obergeschoß von 20 auf nur 33 % erhöht werden, im Dachgeschoß von 33 auf 37 %. Diese Werte mögen für winterliche Raumlufffeuchten üblich sein, innerhalb des Projektes waren sie im Sinne einer Auslotung der Grenzen der Dämmsysteme nicht ausreichend. Da laut Herstellerangaben und durch die Einstellungen der Befeuchter weit höhere Luftfeuchten hätten erzielt werden sollen, musste die tatsächliche Luftfeuchte aufgrund einer hohen Lüftungsrate zustande gekommen sein. Ein Defekt der Befeuchter war, nach anfänglichen Schwierigkeiten im Jänner 2012, ausgeschlossen worden.

Tab. 15 Mittelwerte der Raumtemperatur und Raumlufffeuchte während der kältesten Wintermonate Dezember bis März von 2011 bis 2013

Zeitraum	Obergeschoß		Dachgeschoß	
	Einheit	[°C / %r. L.]	Einheit	[°C / %r. L.]
Dez 2010 bis Mrz 2011		23,4 / 20		18,6 / 33
Dez 2011 bis Mrz 2012		22,2 / 33		20,1 / 37
Dez 2012 bis Mrz 2013		21,0 / 42		19,6 / 57

Anhand des Raumklimas im Obergeschoß (Bild 55) lassen sich die Betriebszeiten des Kindergartens deutlich ablesen und ebenso, ob gelüftet wurde oder beispielsweise die Erhöhung der Raumlufffeuchte (grüne Linie) durch die Luftbefeuchter ab 19. Jänner 2012.

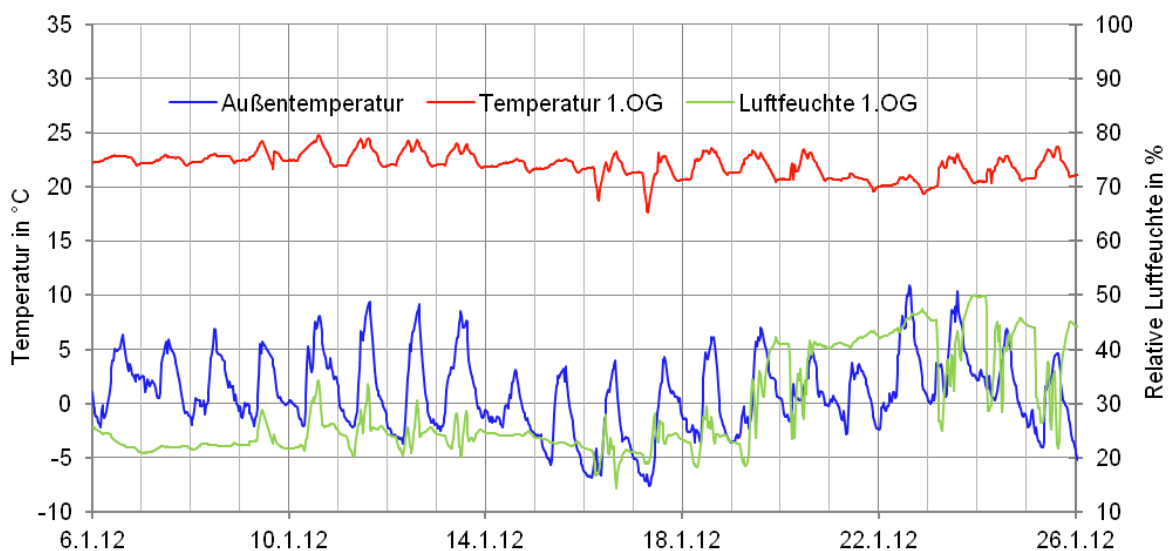


Bild 55 Außen- und Innentemperatur (linke Skala) und Raumlufffeuchte (rechte Skala) im Obergeschoß im Jänner 2012



Bis zum Montag, dem 9. Jänner 2012, herrschte offensichtlich Betriebsruhe, denn wie an den darauf folgenden Wochenenden, z. B. am 14. und 15. Jänner, verändern sich die Luftfeuchte und Temperatur im Raum kaum (Bild 55). Dazwischen führen Heizen und Lüften zu einem lebhafteren Verlauf des Raumklimas. Leider kam es kurz nach Inbetriebnahme der Befeuchter, am 30.12.2011 zu einem Ausfall der Online-Übertragung. Die Wiederherstellung der Online-Überwachung zog sich wegen Verzögerungen seitens der betreuenden Messfirma bis in die dritte Jännerwoche hin. Deshalb konnte nicht bemerkt werden, dass auch der Befeuchter im Zimmer des Obergeschoßes nicht zuverlässig arbeitete und ab dem 30. Dezember ausgefallen war. In Bild 55 zeichnet sich die Wiederinbetriebnahme des Befeuchters am 19. Jänner deutlich ab. Die Luftfeuchte steigt auf über 40 % an. Über das kommende Wochenende hinweg blieb die Türe offensichtlich geschlossen, da die Luftfeuchte gleichmäßig auf über 45 % anstieg und gleichzeitig die Raumtemperatur konstant bei 21°C verblieb.

Morgens, gegen fünf Uhr wechselt die Heizanlage in den Tagmodus und beginnt die Luft aufzuwärmen, weshalb die relative Luftfeuchte regelmäßig absinkt. Nach Auskunft der Betreuerinnen wurde die Luftfeuchte morgens häufig als hoch empfunden. Des Weiteren schilderten die Betreuerinnen, dass sich auf der äußeren Scheibe der Kastenfenster morgens immer wieder Kondensat gebildet hatte, besonders im kalten Februar 2012. Wegen der hohen Luftfeuchte und der von den Kindergärtnerinnen vermuteten Gefährdung der Bausubstanz, öffneten sie deshalb oft morgens die Kastenfenster für kurze Zeit. Bild 56 dokumentiert, dass auch tagsüber immer wieder die Fenster geöffnet wurden.



Bild 56 Eine Figur aus Bausteinen verhindert das Schließen der Fensterflügel im OG-Zimmer

Obwohl die Sollraumluftfeuchte des Hygrostats ab Mitte Jänner 2012 auf 60 % Luftfeuchte eingestellt war, waren nicht mehr als etwas über 50 % Luftfeuchte erreicht worden. Ein Grund dafür war, dass die Lüftergeschwindigkeit im Obergeschoß wegen der hohen Lärmentwicklung wieder reduziert werden musste, da dort eine Kindergruppe nach dem Mittagessen regelmäßig einen Mittagsschlaf hielt. Die Einstellung von 50 % bildete deshalb bis zum Ende des Projektes im Obergeschoß das Maximum. Auch im Dachgeschoß konnten vom Dezember 2011 bis März

2012 nur durchschnittlich 37 % Tab. 15) erreicht werden, obwohl die höchste Lüftergeschwindigkeit eine Luftfeuchte von 60 % hätte bereitstellen sollen. Ein Teil der dort produzierten Feuchte konnte dort durch neue Risse in der Türe des Dachgeschoßes entweichen.

### 5.3.3 Weitere Maßnahmen zur Erhöhung der Raumlufffeuchte in der dritten Kondensationsperiode

Um in der letzten Kondensationsperiode die Luftfeuchten in den Räumen weiter zu erhöhen, wurden deshalb erneut zusätzliche Abdichtungsmaßnahmen vorgenommen.

Im Dachgeschoßzimmer wurde eine neue, provisorische Tür vorgesetzt, welche nach Beendigung der Messungen abgebaut wurde. Umlaufende Lippendichtungen an allen vier Kanten unterbanden wirkungsvoll Konvektionsprozesse. In beiden Zimmern wurden besonders die Rolladenkästen auf Undichtigkeiten untersucht und stellenweise nachgedichtet.

Für den letzten Winter wurde auch im Obergeschoß die innere Kastenfensterebene mit speziellem Fensterfugendichtungsband versehen, sodass weniger Tauwasser auf der äußeren Scheibenebene ausfiel. Dadurch sollte auch verhindert werden, dass die Betreuerinnen zum Lüften verleitet werden, wenn sich Tauwasser gebildet hätte. Zwei kleine Löcher in den äußeren horizontalen Rahmenhölzern (3 mm, von innen nach außen schräg nach unten gebohrt) entlastete die Feuchte im Kastenfensterzwischenraum zusätzlich. Die Löcher wurden später wieder verkittet.

Außerdem wurden die Steckerhygrostate in zwei Klimakammern überprüft. Die Klimaverhältnisse in den Klimakammern wurden zusätzlich mit Hilfe eines Schleuderpsychrometers verifiziert.

Für die beiden Tests wurden die vier Hygrostate mit Nummern versehen. Test 1 wurde in der Klimakammer des Bauphysikalischen Forschungs- und Entwicklungslabors des Instituts für Bauklimatik der TU Dresden durchgeführt: bei einer Raumlufffeuchte von 33 % maßen Stecker 2 und 3 fast übereinstimmend 40 %, mithin 7 % zu viel. Test 2 fand in einem Klimaraum im Labor für Bauphysik des Instituts für Hochbau der TU Graz mit folgenden Ergebnissen statt:

Tab. 16 An den Steckerhygrostaten abgelesene Werte; mit Schleuderpsychrometer gemessene Temperaturen und die daraus abgeleitete Luftfeuchte; eingestelltes Soll-Raumklima: 20°C / 50 %

Datum	Gerät 1	Gerät 2	Gerät 3	Gerät 4	Temperatur	Luftfeuchte
23.10.2012	43,0	53,3	58,7	-	20,6	52
24.10.2012	43,8	44,1	41,1	-	21,4	47
25.10.2012	40,1	44,8	41,5	44,0	-	
29.10.2012	40,2	41,9	41,4	43,9	13,7	45
30.10.2012	36,9	39,9	39,4	39,9	13,2	40



Die mal zu hohe, mal zu niedrigen Messwerte ließen große Zweifel an der Zuverlässigkeit der Hygrostaten zurück. Im weiteren Verlauf wurden die „besten“ Geräte, Gerät 2 und 4, verwendet. Als Schlussfolgerung wurden auch weiterhin die Raumlufftfeuchten durch häufige Kontrolle per GSR-Modem überprüft, um gegebenenfalls die Soll-Raumlufftfeuchte der Befeuchter manuell vor Ort zu steuern.

Weiters konnten die Betreuerinnen durch Gespräche dazu motiviert werden, im Sinne des Projektes weniger vorbildlich zu lüften und zumindest am Abend und am Wochenende konsequent Türen und Fenster zu schließen.

Aus Tab. 15 geht hervor, dass die Maßnahmen im letzten Winter großen Erfolg hatten. Die Luftfeuchte konnte in den kältesten Monaten (Dezember bis März) im Obergeschoß von 33 % auf 42 % erhöht werden, im Dachgeschoß stieg sie sogar von 37 auf 57 % an. Die hohe Steigerung im Dachgeschoß wird besonders auf die Abdichtung der Innentür zurückgeführt. Derart unterschiedliche Belastungsstufen im Hinblick auf der Raumlufftfeuchte stellten sich im weiteren Verlauf als sehr aufschlussreich für die Beurteilung der Innendämmsysteme heraus. Nachteilig für den Kindergarten war, dass der Raum im Obergeschoß im dritten Winter wegen der hohen, als unangenehm empfundenen Feuchte, kaum verwendet wurde. Dies lässt sich auch an der niedrigeren Raumtemperatur in Tab. 15 ablesen.

## 5.4 Temperatur und Luftfeuchte zwischen Bestandsoberfläche und Dämmsystem

Mit Hilfe der Temperatur- und Luftfeuchtesensoren auf der ehemaligen Bestandsoberfläche kann beispielsweise festgestellt werden, ob Flüssigwasser entsteht, oder, wenn nur Temperatursensoren angeordnet sind, ob der Wärmewiderstand eines Dämmsystems tatsächlich dem von den Herstellern angegebenen entspricht. Auch bei Sensoren hoher Qualität ist in gesättigten Materialien, z. B. einem Klebemörtel, zu befürchten, dass die Messfühler Schaden nehmen. Aus diesem Grund wurden die Sensoren auf der Grenzschicht zwischen Bestandswand und Dämmsystem in jedem Feld gedoppelt. Diese Sensor-Paare befanden sich ungefähr 0,25 m unterhalb der Balken, wie in Bild 13 oder Bild 19 dargestellt ist. Die Sensoren im Feld 1 (Streichbalken) waren in der Zimmerecke angeordnet (siehe Bild 15).

Trotz Dopplung der Messfühler fielen unglücklicherweise im mit Wärmedämmputz versehenen Feld 3 beide Luftfeuchtesensoren und an Balken 2 (Zellulose) beide Temperatursensoren aus, was die Auswertung dieser Felder erschwerte. Alle anderen ausgefallenen Sensoren konnten durch die Dopplung kompensiert werden. Tab. 30 im Anhang führt die verschiedenen Sensoren auf. Die Wandoberfläche an Balken 8 war nicht gedämmt, weshalb dort keine entsprechenden Messfühler angebracht worden waren. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind die Temperatur- und Luftfeuchtesensoren auf der Grenzschicht im Weiteren auf je zwei Diagramme verteilt. So bleiben die Diagramme lesbar und einige der Messreihen können direkt miteinander verglichen werden.

Obwohl die gedoppelten Sensorpaare in einem Dämmsystem vergleichsweise nahe beieinanderliegen, können Abweichungen der Sensoren durch Messtoleranzen oder lokal leicht unterschiedliche Einbausituationen entstehen.

Bedingt durch die verschiedenen Eigenschaften ergaben sich vor allem während der Kondensationsperioden Unterschiede zwischen den Dämmsystemen. Da die Differenzen untereinander während der Austrocknungsperiode im Sommer nur gering sind und bei *niedrigen* Luftfeuchten keine Gefährdung der Bausubstanz zu befürchten ist, konzentriert sich die Diskussion der Messwerte auf die winterlichen Verhältnisse.

#### 5.4.1 Temperaturverlauf in Feld 1 bis 7

Die Temperaturen auf der Grenzschicht zwischen der ehemaligen Bestandsoberfläche und der kalten Seite des Dämmsystems veranschaulichen die Diagramme in Bild 57 und Bild 58. Bei der Wahl der Dämmsystemdicken war beabsichtigt worden, einen ähnlichen Wärmewiderstand aller Systeme zu erzielen. In der Konsequenz wurde erwartet, dass die Temperaturen auf der kalten Seite der Wärmedämmung weitgehend übereinstimmen, was im Großen und Ganzen so eintrat. Lediglich der in der Gebäudeecke platzierte Sensor (Bild 57, lila) verlief sogar im Sommer etwas abgesetzt von den übrigen Kurven. Durch die Position in der geometrischen Wärmebrücke unterschieden sich die dortigen Temperaturen um bis zu 8 K während der kalten Witterungsperioden.

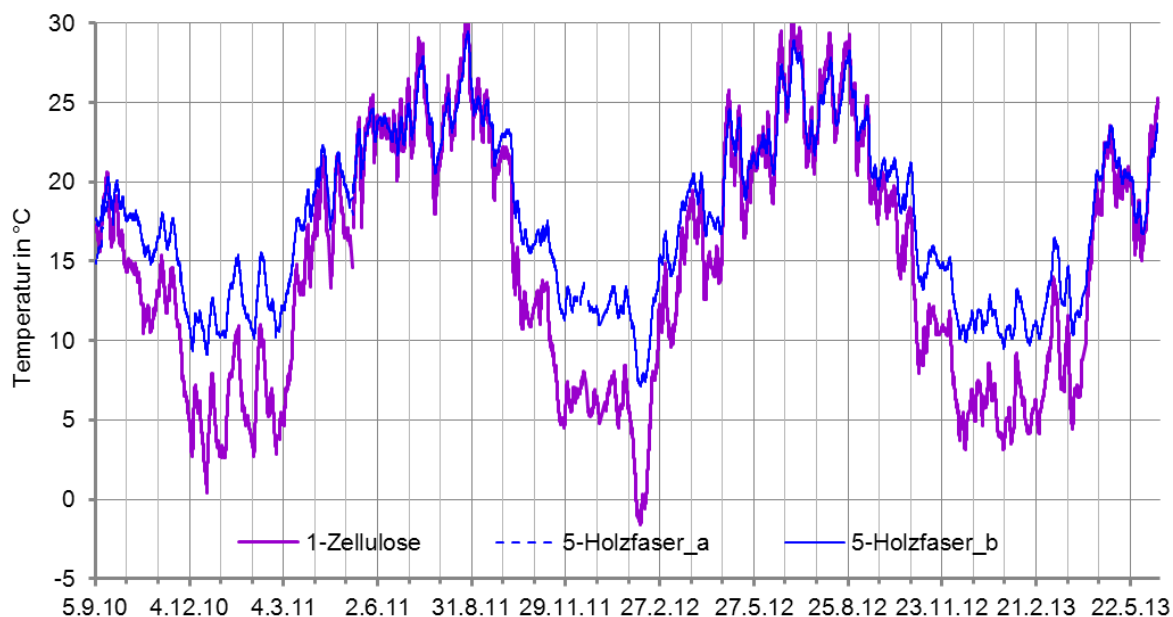


Bild 57 Temperaturverlauf auf der Grenzfläche zwischen Bestandsoberfläche und Dämmsystemen der Balken 1 und 5

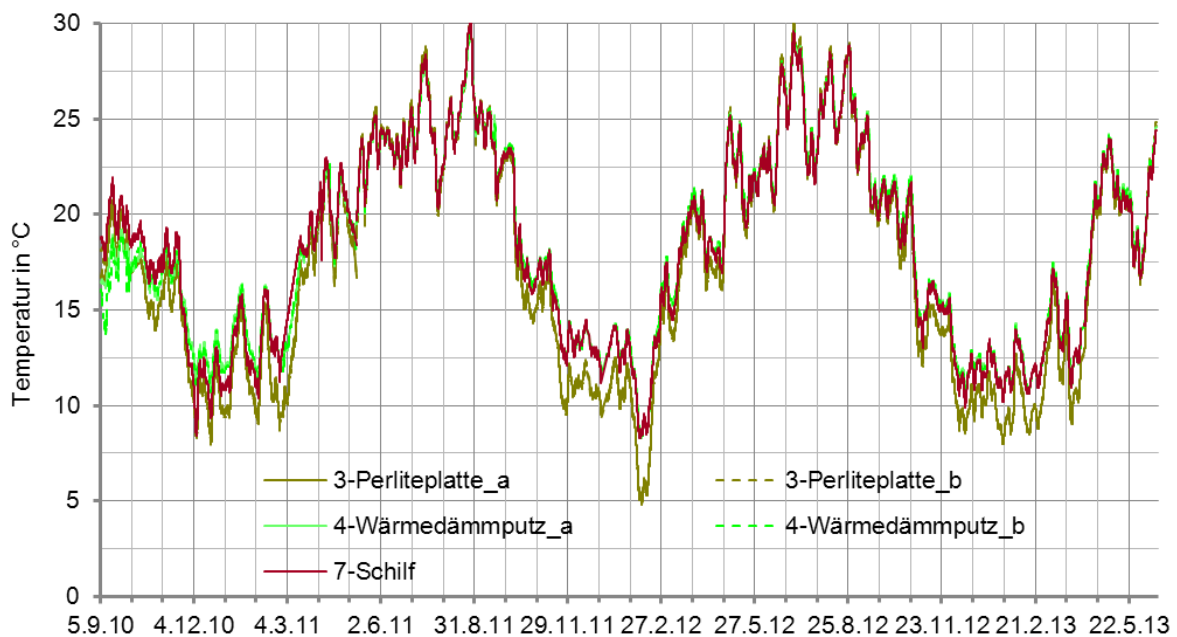


Bild 58 Temperaturverlauf auf der Grenzfläche zwischen Bestandsoberfläche und Dämmsystemen der Balken 3, 6 und 7

In den Sommermonaten waren nur minimale Differenzen zwischen den anderen Sensoren auszumachen und auch in den Wintermonaten existierten nur geringe Unterschiede zwischen den einzelnen Dämmsystemen. Lediglich beide Sensoren im Feld mit Perlitedämmplatten zeigten Temperaturen, die maximal knapp 3 Kelvin unterhalb der anderen Temperaturkurven verliefen. Der Wärmewiderstand der Perlitedämmplatten war zwar am größten (Tab. 11), die Höhe der Temperaturabweichung war angesichts der geringen Wärmewiderstandsdifferenzen  $R_{IDs}$  dennoch etwas höher als erwartet.

Bei Außentemperaturen von bis zu  $-15^{\circ}\text{C}$  wird in der Raumecke sogar der Gefrierpunkt freier Wasseroberflächen mit  $-2^{\circ}\text{C}$  unterschritten. Über das Auftreten von Frost bzw. Frostschäden in Baumaterialien oder an ehemaligen Bestandsoberflächen existieren bis jetzt nur wenige Versuche, welche Ursache und Wirkung mittels physikalischer Formeln verknüpfen (*Feng et al. (2019)*). Es ist aber schon länger bekannt, dass in Baumaterialien in Abhängigkeit von der Porenstruktur und dem Wassergehalt eine Absenkung der Tautemperatur stattfindet (*Neiß (1982)*, *Xu et Häupl (1999)*). Demnach können sich in Baumaterialien erst ab Temperaturen unter  $-5^{\circ}\text{C}$  Frost und Frostschäden ausbilden, wobei dies von weiteren Faktoren wie von schon vorhandenen Strukturschäden, z. B. in Form von Hohlräumen oder Rissen, abhängig ist. Da bei der Anbringung der Zellulose systembedingt hohlraumfrei gearbeitet worden war, besteht hier somit keine Frostgefahr. Zudem verfügt Zellulose über einen sehr großen Porenraum und ist ein vergleichsweise elastisches Material.

#### 5.4.2 Luftfeuchte in Feld 1 mit (Streich-)Balken 1 - Zellulose

Alle Dämmmaterialien enthielten entweder selber eine hohe Einbaufeuchte (Aufspritz-Zellulose und Wärmedämmputz) oder waren in einer zumindest anfangs gesättigten Kleberschicht

verlegt (Perlitedämmplatten, Holzweichfaserplatte, Schilf), auch die angedübelten Schilfplatten. Daher begannen alle Luftfeuchtekurven bei 100 % Luftfeuchte und trockneten unterschiedlich langsam ab (Bild 59 und Bild 60). Bei gleicher Bestandskonstruktion und praktisch identischen Klimarandbedingungen bestimmte somit die Feuchteleitfähigkeit eines Dämmsystems maßgeblich die Trocknungsgeschwindigkeit.

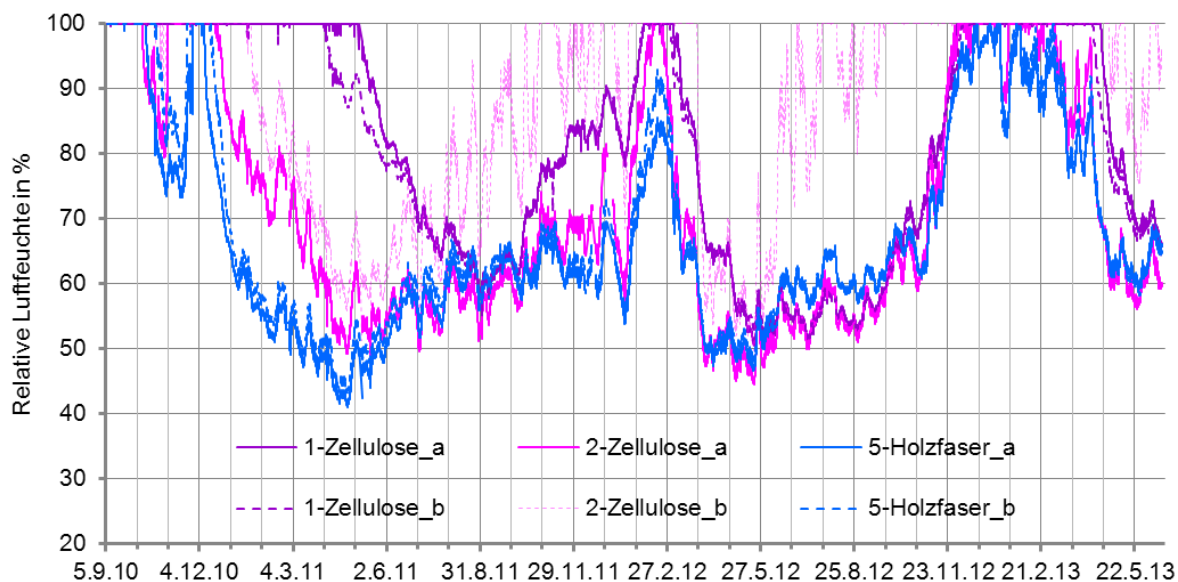


Bild 59 Luftfeuchte-Verlauf auf der Grenzfläche zwischen Bestandsoberfläche und Dämmsystemen der (Streich-)Balken 1, 2 und 5

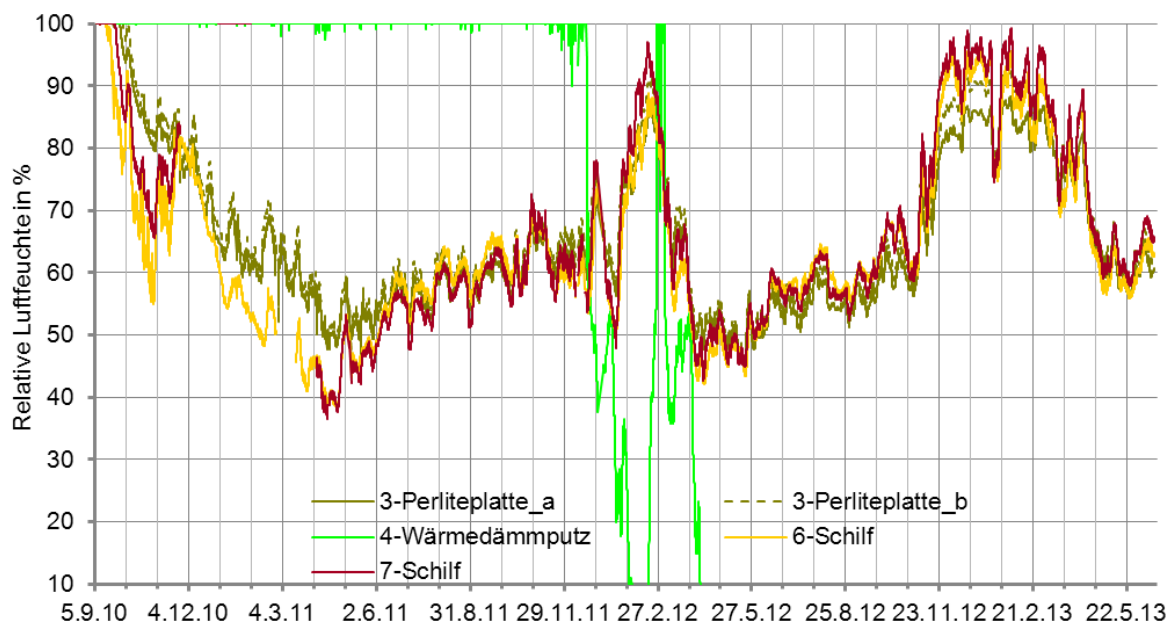


Bild 60 Luftfeuchte-Verlauf auf der Grenzfläche zwischen Bestandsoberfläche und Dämmsystemen der Balken 3, 6 und 7

Die Aufspritz-Zellulose ist besonders diffusionsoffen und sollte deshalb zügig abtrocknen können (Bild 59: violett, voll und gestrichelt). Mit der Dämmung wird aber eine sehr hohe Menge

an Anmachwasser mit eingebracht, welche im Projekt entsprechend länger zum Austrocknen benötigte. Zudem wurde auch bei kleinflächigen Probenahmen festgestellt, dass die Putzdicke mitunter größer war, als die vom Hersteller angegebenen 13 mm. Die Art der Applikation mit einer Putzmaschine, die für einen schnellen Putzauftrag auf große Flächen optimiert ist, lässt vermuten, dass damit kaum millimetergenaue Putzdicken erzielt werden können. An den zusätzlich hergestellten Probekörpern betrug die Dicke uneinheitliche 20 bis 32 mm. Ein höherer Diffusionswiderstand einer dickeren Putzschicht verlangsamt den Austrocknungsprozess. Die Temperatur- und Luftfeuchteverhältnisse erfahren zudem in einer Gebäudeecke eine zusätzliche Belastung durch ihre besondere Lage in der geometrischen Wärmebrücke. Im Winter herrschen dort niedrigere Temperaturen vor mit den bekannten Nachteilen hinsichtlich der niedrigeren Feuchtespeicherung und schlechteren Trocknungsmöglichkeiten. Die Messwerte speziell der Sensoren in der Gebäudeecke müssen deshalb gesondert beurteilt werden.

Weiterhin darf gemutmaßt werden, dass die beiden, lange Zeit feuchten Sensoren das eigentliche Abtrocknen erst verzögert anzeigen. Die Messung von Luftfeuchten um 100 % ist immer noch mit Unsicherheiten verbunden. Die (kapazitiven) Messsensoren sind derart aufgebaut, dass die Luftfeuchte innerhalb einer (geschützten) metallenen Hülle am Kopf der Sensoren gemessen wird. Aus Beobachtungen voran gegangener Projekte, wie *Kautsch et al. (2006)* oder *Fechner et al. (1996)*, ist bekannt, dass Tauwasser innerhalb der Sensoren langsamer abtrocknet als im umgebenden Material, d. h. es wird länger 100 % Luftfeuchte angezeigt als im Material tatsächlich vorhanden.

Für diesen messtechnisch bedingten Grund der länger anhaltenden Feuchte am Balken 1 sprach auch der um einen Monat verschobene Beginn des Abtrocknens der beiden Luftfeuchtefühler im ersten Winter. Schließlich waren im zweiten Winter zwischen den beiden Sensoren in der Zimmerecke kaum Unterschiede zu erkennen. Die genannten Gründe erklären einen Teil des sieben- bzw. achtmonatigen Verharrens auf 100 % Luftfeuchte.

Wegen der Lage in der Wärmebrücke stieg die Luftfeuchte schon Mitte August 2011 wieder an und es bildete sich von Jänner 2012 bis Anfang Februar 2012 Kondensat. Dass auch in der speziellen Lage in der Gebäudeecke die Einbaufeuchte keine Rolle mehr spielte wird dadurch deutlich, dass sie von Anfang Februar bis Anfang März 2012 viel rascher wieder auf ungefähr 75 % Luftfeuchte abtrocknete. Bereits im Mai wurden die anderen Kurven wieder erreicht.

Im letzten Winter 2012/13 wurden wegen der hohen Raumluftfeuchte fast fünf Monate durchgehend 100 % Luftfeuchte gemessen. Anders als die übrigen Sensoren an der Grenzschicht sank die relative Luftfeuchte während dieses Winters nicht kurzzeitig ab. Vor allem der durch die Wärmebrücke verzögerte Abtrocknungsprozess führte dazu, dass die Luftfeuchten erst Anfang Juni mit den übrigen Sensoren ungefähr wieder übereinstimmen.

Durch die besondere Materialzusammensetzung der Zellulose kann davon ausgegangen werden, dass selbst nach einer so langen Befeuchtung keine Feuchteschäden in der Zellulose aufgetreten sind. Während eine Zellulose-Einblasdämmung bei Kondensatausfall bis zu einem gewissen Grad verklumpen und ihre ursprünglichen Materialeigenschaften verlieren würde, befinden sich in der Aufspritz-Zellulose stützende, organische Komponenten, die die Struktur

und Eigenschaften auch bei hoher Feuchteeinwirkung erhalten. In der Dämmung enthaltene Borate sorgen dafür, dass Pilze im Wachstum gehemmt werden.

### 5.4.3 Luftfeuchte in Feld 1 mit Balken 2 (Zellulose)

Der magenta-gestrichelte Graph in Bild 59 unterscheidet sich derart von dem durchgezogenen Graphen, dass ein Defekt im Sensor angenommen wird. Der ungewöhnlich sprunghafte Verlauf setzt sich im Gegensatz zur durchgezogenen magenta Kurve auch im Sommer weit von den übrigen Sensoren ab. Deshalb wird dieser Sensor im Folgenden nicht weiter diskutiert.

Im Vergleich mit den anderen Dämmsystemen dauerte es am zweiten Balken ähnlich lange wie bei den Perlite- und der Holzweichfaserplatten, bis Anfang Oktober 2011, bis kein Tauwasser mehr vorhanden war (Bild 59: magenta Linie). Anfang November zeigte ein erneutes Ansteigen auf 100 % relativer Luftfeuchte an, dass der Oberputz auf die Zellulose aufgebracht wurde. Der, wie berichtet, laut Herstellerangabe nur 13 mm, real jedoch dickere Oberputz brachte wiederum Feuchte in das System ein und reduzierte durch seinen Diffusionswiderstand die Abtrocknung. Im Vergleich mit den Holzweichfaserplatten trocknete das Feld mit der Aufspritz-Zellulose nach dem Aufbringen der Putzschicht sehr viel langsamer aus, obwohl der Oberputz der Zellulosedämmung nominell einen niedrigeren  $s_d$ -Wert hatte. Erst nach ungefähr eineinhalb Monaten fiel die Luftfeuchte wieder unter 100 %. Die durch den Putz verursachte Phase hoher Feuchte hielt aus den erwähnten Gründen (Einbaufeuchte, zusätzlicher Diffusionswiderstand) mit rund 1,5 Monaten viel länger an als bei der Holzweichfaserplatte.

Bei wärmeren Außentemperaturen findet kaum Dampftransport durch die Konstruktion statt, weshalb sich die diffusionsoffenen Innendämmsysteme während der Sommermonate kaum voneinander unterscheiden.

Ein leichter Anstieg um den Dezemberanfang 2011, bei allen Dämmsystemen sichtbar, wurde durch die angestiegene Raumlufffeuchte verursacht (Bild 44). Auch wenn durch die Befeuchter noch nicht die gewünschte Luftfeuchtebelastung produziert werden konnte, kam es mit deren Einsatz trotzdem zu einem sichtbaren Anstieg in allen Dämmsystemen. Bei zusätzlich sehr kalten Außentemperaturen erreichte die Luftfeuchte zwischen Zellulose und Bestandsputz als einzige am 13. Februar 2012 wieder 100 %. Schon nach einer Woche trocknete die Bestandsputzoberfläche wieder schnell ab. Anfang März wurden bei der Zellulose wieder um 80 %, wie bei allen anderen Dämmsystemen, gemessen.

In der dritten Witterungsperiode erreichte der Graph der Zellulose Ende November 2012 wegen der sehr hohen Raumlufffeuchtebelastung wieder 100 % und verblieb am Längsten auf dem Maximalwert, mit Unterbrechungen ungefähr für 3 Monate.

Es deutet sich somit an, dass das Zellulose-Dämmsystem bei höherer hygrothermischer Belastung höhere Luftfeuchten verursachte als die anderen Dämmsysteme. Solange hohe Feuchte nicht mit feuchtesensiblen Materialien, wie z. B. mit bestimmten Gipsputzen, in Berührung kommt, werden dadurch in der Regel keine Schäden an der Bausubstanz ausgelöst.

#### 5.4.4 Luftfeuchte in Feld 2 mit Balken 3 - Perlitedämmplatte

Die beiden Luftfeuchte-Messfühler der Perlitedämmplatten zeichneten sehr ähnliche Werte auf und unterschieden sich nur bei hoher Luftfeuchte im Winter, z. B. Mitte Februar 2012, um maximal 5 % (Bild 60: ocker durchgezogen und ocker gestrichelt). Die Perlitedämmplatten verfügten nach der Zellulosedämmung und dem Wärmedämmputz über den nominell höchsten Diffusionswiderstand, gleichzeitig ist der Wärmewiderstand am höchsten. Der höhere Wärmewiderstand kühlte das Bestandsmauerwerk stärker aus, und ein kühleres Bauteil trocknet tendenziell langsamer aus. Aus diesen Gründen entwich die Feuchte aus diesem Dämmsystem im ersten Winter vergleichsweise langsam, in vergleichbarer Geschwindigkeit wie in der Zellulosedämmung. Im zweiten und dritten Winter, ohne den Einfluss der Einbaufeuchte, zeigten die Perlitedämmplatten ein bauphysikalisch sehr positives Verhalten: die maximalen Werte betrugen 91 und 93 % relativer Luftfeuchte und sanken anschließend schnell wieder ab. Offenbar konnten die eindringenden Feuchtemengen durch dieses Dämmsystem am besten kompensiert werden.

#### 5.4.5 Luftfeuchte in Feld 3 mit Balken 4 - Wärmedämmputz

Beide Luftfeuchtesensoren unter dem Wärmedämmputz gaben über ein Jahr lang fast permanent 100 % Luftfeuchte an (Bild 60: grün). Einer der Sensoren zeichnete ab Ende November 2011 einen unrealistischen Verlauf auf und stürzte Anfang März 2012 auf 0 % ab. Es musste deshalb angenommen werden, dass beide Sensoren defekt sind. Allerdings wurde im September 2011 eine Kontrollmessung vorgenommen, bei der ein passgenaues Loch (Durchmesser 12 mm) durch die Dämmung gebohrt wurde, und ein Messfühler bis auf die Tiefe der stationären Sensoren hineingeschoben werden konnte (Bild 61).



Bild 61 Handgerät mit kombiniertem Temperatur-/Luftfeuchtesensor misst im mit Wärmedämmputz gedämmten Feld die Verhältnisse auf der ehemaligen Bestandsoberfläche

Die Ränder wurden abgedichtet und bereits nach einer kurzen Angleichphase ergab die Messung 94,7 % relativer Luftfeuchte (Bild 61). Zu diesem Zeitpunkt herrschten bei den anderen Feldern viel niedrigere Luftfeuchten vor, ungefähr 60 %. Trotz der hohen Feuchte kann davon ausgegangen werden, dass durch die Reibungswärme beim Bohren des Lochs und durch die kurzzeitige Öffnung die Oberflächen innerhalb des Lochs und das entnommene Bohrmaterial leicht abtrockneten. Das ausgebohrte Material wurde in ein Kunststoffsackerl verpackt und wies laut Fa. Schaller 99,5 % Feuchte auf. Insofern bestätigte die gemessene Luftfeuchte die Werte der stationären, defekten Sensoren zu diesem Zeitpunkt. Es wird jedoch angenommen, dass spätestens die während des gesamten Sommers 2012 gemessenen 100 % Luftfeuchte nicht mehr der Realität entsprechen konnten, alldieweil die Holzfeuchte (Bild 73) in diesem Feld seit Ende 2011 ähnliche Messwerte aufwies wie bei den anderen Systemen. Trotz der defekten Sensoren gilt deshalb als sicher, dass die Luftfeuchtebelastung zwischen Wärmedämmputz und Bestandsputz am Höchsten gewesen ist bzw. am Längsten anhielt.

Der Hersteller des Dämmsystems führte folgende Gründe für die ungünstige, längere Austrocknungsdauer an:

- Die Gesamtdicke des Wärmedämmputzes ist normalerweise auf 0,1 m beschränkt und wurde in dem Projekt nur wegen der entsprechenden Anforderungen seitens des Auftraggebers (Sicherstellung ähnlicher Wärmewiderstände) erhöht.
- Die Abtrocknungszeit von ungefähr 3 Wochen zwischen den beiden 6 cm dicken Dämmschichten sei wegen der Abläufe in der Bauphase zu kurz gewesen. Normalerweise würde die Austrocknungszeit fast doppelt so lang betragen, bis die nächste Schicht aufgetragen wird.
- Zusätzlich vermutete der Hersteller, dass sich zwischen den beiden Dämmschichten eine Verglasungsschicht ausgebildet habe, welche den Dampftransport und damit den Austrocknungsprozess verlangsamte. Diese sei auch nicht durch eine mechanische Behandlung vor dem zweiten Auftrag zu beseitigen gewesen.

#### **5.4.6 Luftfeuchte in Feld 4 mit Balken 5 - Holzweichfaserplatte**

Der Verlauf beider Sensoren war bei niedrigen und mittleren Luftfeuchten ungefähr gleich. Nur bei sehr hoher Feuchte unterschieden sich die Messwerte um bis zu 5 % bzw. nach Anbringung des Putzes um 7 % (Bild 59 blau durchgezogen und blau gestrichelt). Der Wärmewiderstand des Innendämmsystems mit den Holzweichfaserplatten war zwar am geringsten, allerdings betrug die Dicke der Dämmplatten nur 60 mm. Das Entweichen der Einbaufeuchte benötigte ähnlich lange wie bei der Zellulose- und Perlitedämmung, bis Anfang Oktober 2010. Das Aufbringen des Deckputzes Mitte November verursachte einen erneuten Anstieg auf 100 % relative Luftfeuchte. Dieser Zustand dauerte allerdings nur ein bzw. zwei Wochen an. Innerhalb von ungefähr einem Monat sank die relative Luftfeuchte auf der ehemaligen Bestandsoberfläche dann von 100 auf ca. 60 % ab. Das Abtrocknungsverhalten der Holzweichfaserplatten war nach dem Aufbringen der Putzschicht somit besser als das der Zellulosedämmung. Die Kombination aus geringem Wärmewiderstand (nur 60 mm Dicke) und geringstem



Diffusionswiderstand (Tab. 10) wirkte sich günstig auf das Trocknungsverhalten aus. Im zweiten Winter überschritt einer der Sensoren für einen kurzen Zeitraum knapp 90 % Luftfeuchte, während mit dem anderen nur 85 % erreicht wurden. Trotz Raumbefeuchtung und niedriger Außentemperaturen entstand kein Kondensat. Damit verhielten sich die Holzweichfaserplatten ähnlich günstig wie die Perliteplatten. Erst im dritten Winter bei sehr hoher Raumfeuchtebelastung wurden immer wieder 100 % Luftfeuchte erreicht, wenngleich nicht so häufig und anhaltend wie bei der Zellulosedämmung.

Die Messfühler befanden sich in diesem Feld 0,8 m oberhalb des Fenstersturzes, der die Temperaturen und Luftfeuchten in der unmittelbaren Umgebung beeinflusst. Der Einfluss im Bereich der Sensoren war jedoch nur noch gering, wie sich anhand von thermischen 3D-Simulationen zeigen lässt.

#### 5.4.7 Luftfeuchte in Feld 5 mit Balken 6 und 7 - Schilf

Die Differenzen zwischen den beiden Luftfeuchtesensoren unter den Schilfplatten sind kaum größer als bei den Holzweichfaser- und Perlitedämmplatten, obwohl sie in ungefähr 0,7 m Entfernung voneinander, jeweils unter einem Balken, angebracht waren. Nur für kurze Zeit, um den 17.2.2012, betrug der Abstand knapp 8 % relativer Luftfeuchte.

Eine diffusionsoffene, nicht kapillaraktive Innendämmung mit einem  $s_d$ -Wert von 0,34 m und einem Wärmewiderstand von 1,67 m<sup>2</sup>·K/W wird üblicherweise mit einer diffusionsbremsenden Funktionsschicht in Form einer Dampfbremse oder eines diffusionshemmenden Putzes ausgeführt. Gemäß *WTA-Merkblatt 8-10* oder *DIN 4108-3* lagen die Parameter dieses Aufbaus weit über der Grenze für nachweisfreie Konstruktionen ( $\Delta R_{IDS} \leq 0,8$  m<sup>2</sup>·K/W), ein numerischer Nachweis hat deshalb zwingend zu erfolgen. In dem verbauten System konnte demzufolge während der Kondensationsperioden Wasserdampf relativ ungehindert durch den Putz und die Dämmung diffundieren und als Flüssigwasser auf dem Lehmkleber und der ehemaligen Bestandsoberfläche ausfallen. Bei flächig anfallendem Flüssigwasser wirkt sich die ohnehin geringe Flüssigwasserleitfähigkeit des Schilfs parallel zur Wandoberfläche bzw. in Wuchsrichtung nicht entspannend aus. Quer zu den Schilfhalmen ist die Flüssigwasserleitfähigkeit noch geringer, weswegen potentiell Flüssigwasser kapillar nicht weg von der Bestandswand transportiert werden kann. Trotzdem war der Verlauf der relativen Luftfeuchte bemerkenswert niedrig (Bild 60: hellblau und sonnengelb), woraus geschlossen werden kann, dass die geringe Flüssigwasserleitfähigkeit des Schilfes durch den Lehmkleber und Bestandsinnenputz ausgeglichen wurde. Der Lehmkleber wird deshalb innerhalb des Systems in hygrothermischer Hinsicht als sehr wichtig angesehen. Zusätzlich verfügt Schilf über eine höhere Feuchtepufferkapazität als beispielsweise die Dämmstoffe Perlite und Zellulose (vergleiche  $\theta_{80}$  in Tab. 9).

Allerdings reagierten die Sensoren im Schilffeld schneller als die anderen Systeme auf eine höhere Raumfeuchtebelastung durch ansteigende Messwerte. Der Vorteil eines derart diffusionsoffenen Systems wiederum ist, dass das Bestandsmauerwerk und das gegebenenfalls vorhandene Flüssigwasser schnell wieder nach innen diffusiv abtrocknen können.

Anhand von Bild 60 kann tatsächlich eine sehr zügige Abtrocknung konstatiert werden. Noch vor Anfang November 2010 sank die Luftfeuchte auf unter 60 bzw. 70%. Beide Sensoren reagierten wiederum stärker auf einen Anstieg der Innenraumluftfeuchte, z. B. Anfang und Mitte November 2011, als andere Dämmfelder verputzt wurden. Im Vergleich zu den Perliteplatten fiel im Feld der Schilfdämmung die Feuchtezunahme aufgrund der Anbringung des Putzes stärker aus. Auch als Ende Dezember 2011 die Raumluftfeuchte mit Hilfe der Befeuchter anstieg, kam es bei dem hellblauen Sensor, ähnlich wie in der Perlitedämmung, nur kurzzeitig zu Luftfeuchten über 90 %. Im dritten Winter blieben die Luftfeuchten an den Sensoren zwar nicht so niedrig wie bei den Perlitedämmplatten, jedoch war die Belastung in den Holzweichfaserplatten und der Zellulosedämmung höher.

Das günstige Verhalten der Schilfdämmplatten deckt sich mit den bisherigen Erfahrungen in *Wegerer (2010)*.

#### **5.4.8 Zusammenfassung für die Grenzschicht zwischen Bestandputz und Dämmsystemen**

Die Temperaturen an den Sensoren zwischen Bestandputz und Dämmsystemen verliefen in allen Dämmfeldern sehr ähnlich. Lediglich hinter dem System mit dem höchsten Wärmewiderstand, den Perliteplatten, lagen während der Heizperiode niedrigere Temperaturen vor, sowie in der geometrischen Wärmebrücke in der Gebäudeecke.

Beim Vergleich der Luftfeuchtesensoren wurde die höchste Luftfeuchtebelastung in der Zellulosedämmung festgestellt. Die hohe Einbaufeuchte der Dämmung und die später folgende Einbaufeuchte des Deckputzes ließ bereits im ersten Winter einen ungünstigeren Verlauf im Vergleich zu den anderen Dämmsystemen erkennen. Doch auch hohe Feuchtelasten trockneten dort wieder aus und akkumulierten nicht längerfristig. Für den Wärmedämmputz kann wegen der zwar vorhandenen, zum Großteil aber sicherlich falschen Messwerte, aufgrund einer einzelnen händischen Messung und mit dem Hintergrund der noch folgenden Besprechung der Holzfeuchte vermutet werden, dass ein ebensolches bzw. eher kritisches Verhalten im ersten Jahr nach Anbringung der Dämmung auftrat. Es ist deshalb zweckmäßig, bei diesen beiden Systemen mit hoher Einbaufeuchte von einem noch späteren Einbau im Oktober bis Februar/März abzuraten. Auf ausreichendes Lüften nach der Anbringung sollte in besonderem Maß geachtet werden.

Die trocken eingebrachten Dämmstoffe Schilf, Perlitedämmplatten und Holzweichfaserplatten stellten sich bezüglich dieser Messstelle als die besseren Innendämmsysteme heraus, da sie zu Beginn schnell abtrockneten und auch bei hoher Raumfeuchtebelastung nur sehr kurz bzw. nie 100 % Luftfeuchte aufwiesen. Die niedrigsten Luftfeuchten wurden hinter den Perlitedämmplatten gemessen. Die Messwerte auf der Grenzfläche zwischen Dämmsystem und Bestand waren bei den Schilfplatten etwas günstiger als bei den Holzweichfaserplatten.

Der gemessene, unkritische Luftfeuchteverlauf, selbst bei hoher Raumfeuchtelast, war bei den Schilfdämmplatten nicht erwartet worden, da die kapillare Leitfähigkeit von Schilfdämmplatten

entgegen des Dampfstroms äußerst gering ist und höhere Feuchte deswegen nur auf diffusivem Weg wieder in Richtung Innenraum abtrocknen kann. Dieses geringe Austrocknungspotential der Schilfdämmplatten wurde durch die hohe Flüssigwasserleitfähigkeit des Lehmklebers ausgeglichen, sowie die im Vergleich höhere Feuchtespeicherung im Lehmkleber und Bestandsputz.

## 5.5 Temperatur und Luftfeuchte in der Mitte der Balkentasche

Die hier besprochenen kombinierten Temperatur-/Luftfeuchtefühler befanden sich an der Wange der Balken, ungefähr 0,15 m entfernt von der Bestands-Putzoberfläche.

### 5.5.1 Temperaturen

Wie auch schon bei den Temperaturen auf der Bestandsoberfläche unterschieden sich die Temperaturen nur während der kalten Witterungsperiode. Bild 62 illustriert, dass sich die beiden Zellulosesensoren während des ersten Winters von den anderen gemessenen Stellen weniger deutlich absetzten wie in den folgenden Winterperioden, was durch die hohe Einbaufeuchte verursacht worden sein kann, schließlich leiten feuchte Materialien Wärme besser als trockene. Im zweiten und dritten Winter machte die Differenz zu dem Balkenaufleger der Perliteplatte und dem Wärmedämmputz bis zu 3 Kelvin aus. Der Unterschied wurde sicherlich durch den hohen Wärmewiderstand der Zellulosedämmung und, im Falle des Streichbalkens, von der Wärmebrücke verursacht.

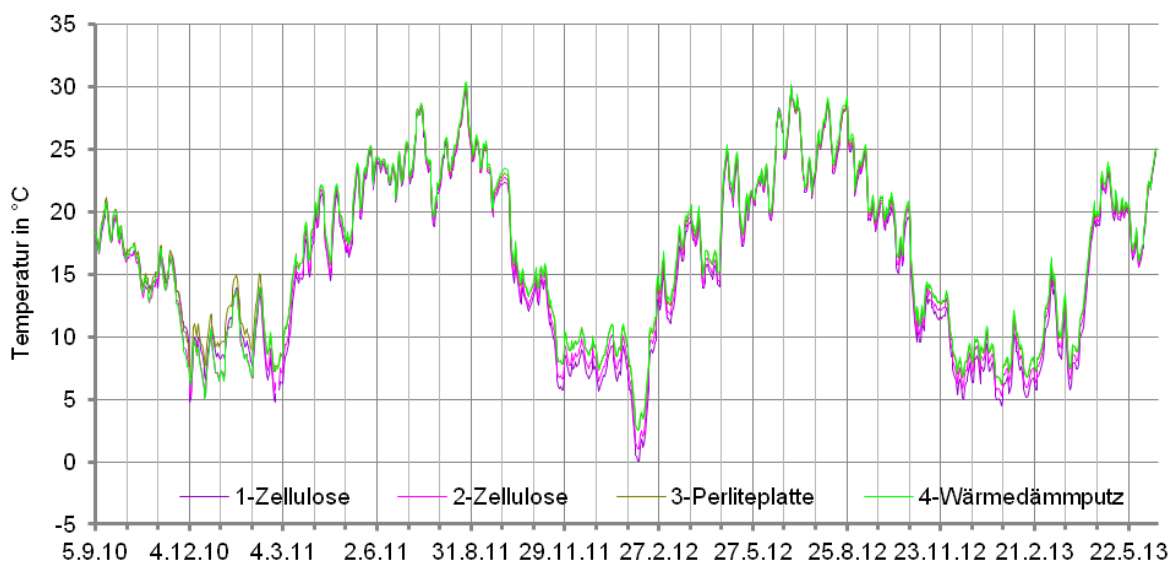


Bild 62 Temperaturen im Luftspalt zwischen Balkenwange und Mauerwerk in 0,15 m Entfernung von der ehemaligen Bestandsoberfläche an Balken 1-4 (gemittelte Tageswerte)

In der Mitte der Auflager der Balken 3 bis 6 unterschieden sich die Temperaturen auch im Winter nur unwesentlich, nur der Verlauf der nicht abgedichteten Auflager 7 und 8 setzte sich davon ab (Bild 62 und Bild 63). In der Balkentasche des ungedämmten Referenzfeldes waren die Temperaturen immer am Höchsten. Wegen der Darstellung als Tageswerte ist nicht zu

erkennen, dass die Linie des Referenzbalkens lebhafter verlief als die der anderen. Hier wurde das Mauerwerk nicht durch die Dämmung abgekühlt und somit thermisch stärker vom Innenraum entkoppelt, zusätzlich konnte Luft aus dem Zwischendeckenbereich in den Luftspalt eindringen und diesen aufwärmen. Letzterer Effekt bewirkte auch im Auflager des nicht abgedichteten „Schilfbalkens“ höhere Temperaturen als in den restlichen gedämmten Feldern. Eine genauere Diskussion des Unterschiedes zwischen abgedichteten und nicht abgedichteten Balkenauflagern erfolgt in Kapitel 5.10.

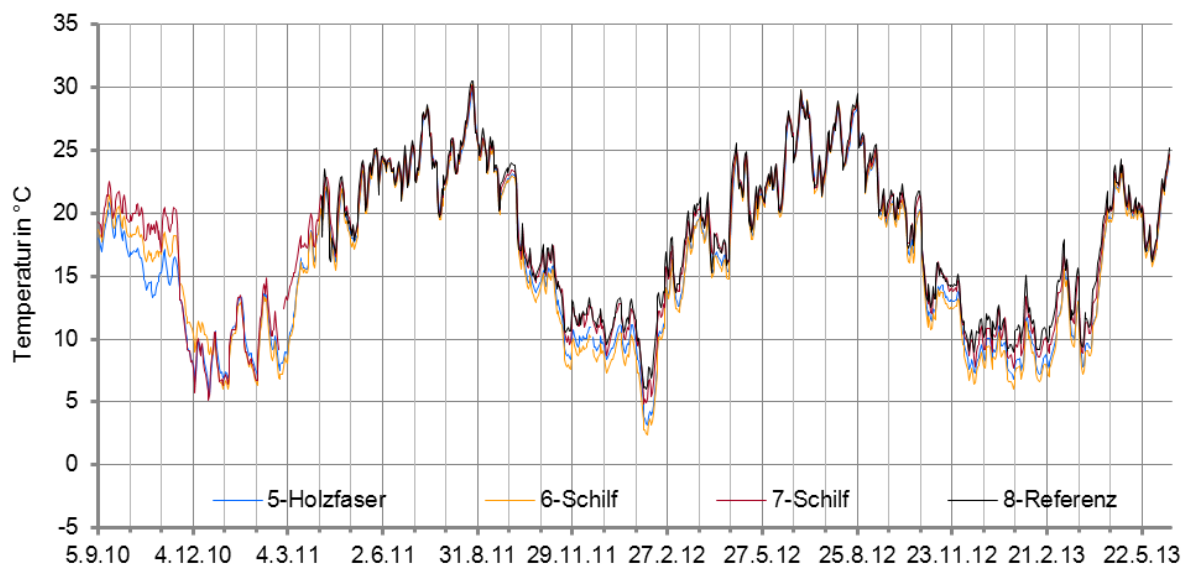


Bild 63 Temperaturen zwischen Balkenwange und Mauerwerk in ungefähr 0,15 m Entfernung von der ehemaligen Bestandsoberfläche an Balken 5-8 (gemittelte Tageswerte)

### 5.5.2 Luftfeuchten

Von einem sichtbar erhöhtem, durch Einbaufeuchte verursachten Niveau gingen alle Luftfeuchte-Kurven bis Mitte November 2010 an abzusinken, bis dann durch die Einbaufeuchte der Oberputzlagen und durch den Einfluss des strengeren Außenklimas die Graphen wieder zu steigen begannen (Bild 64 und Bild 65): Ab Mitte November sanken die Außentemperaturen auf 5°C und darunter. (Bild 44). Doch selbst kurz nach dem Anbringen aller Dämmsysteme oder bei hoher Raumfeuchtebelastung waren an keinem dieser Messfühler längere, substanzgefährdende Luftfeuchten festzustellen. Am Streichbalken wurden im September 2010 nur kurz 90 % Luftfeuchte überschritten, danach betrug der Maximalwert 84 % im abgedichteten Schilfaulager (Balken 6). Nach dem Abtrocknen der Einbaufeuchte im Sommer 2011 spannte sich eine Bandbreite zwischen den Auflagern von minimal 10 % Luftfeuchte im Sommer bis zu 25 % Differenz im Winter zwischen den einzelnen Balkenauflagern auf.

Wegen der unkritischen Werte wird auf diese Messstelle oberflächlicher eingegangen.

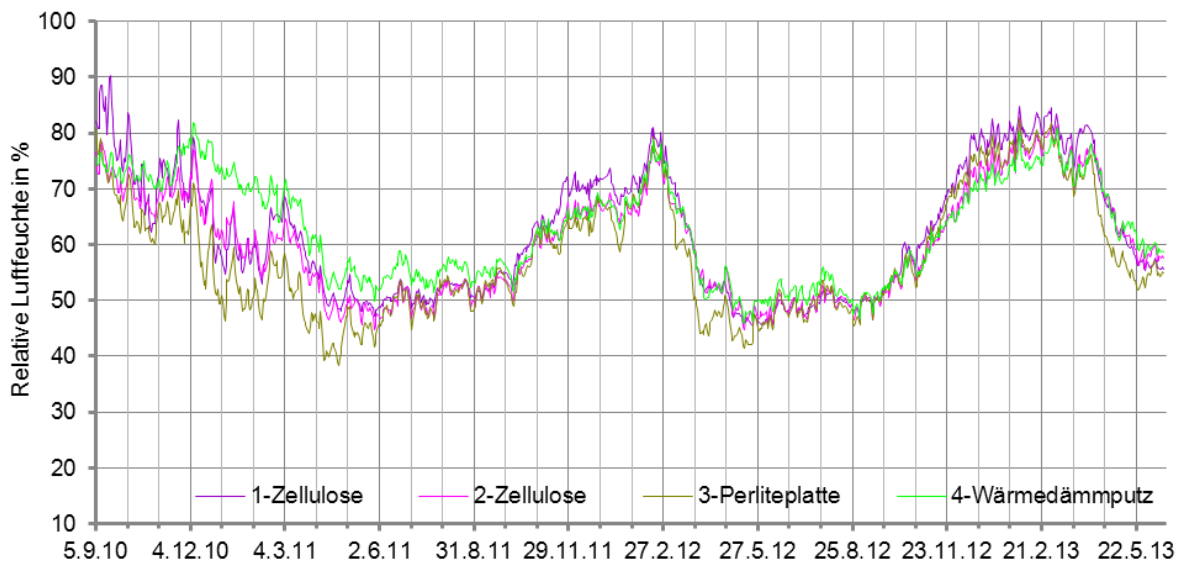


Bild 64 Tageswerte der Luftfeuchten im Luftspalt zwischen Balkenwange und Mauerwerk in ungefähr 0,15 m Entfernung von der ehemaligen Bestandsoberfläche an Balken 1-4

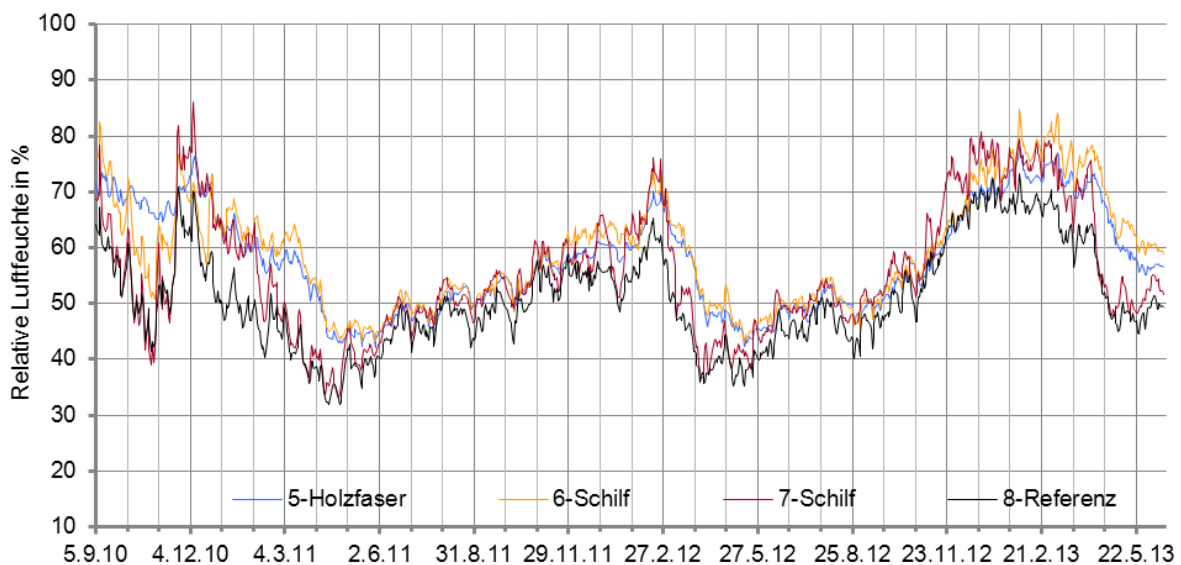


Bild 65 Tageswerte der Luftfeuchten im Luftspalt zwischen Balkenwange und Mauerwerk in ungefähr 0,15 m Entfernung von der ehemaligen Bestandsoberfläche an Balken 5-8

### 5.5.3 Luftfeuchte in Feld 1 an Balken 1 und 2 - Zellulose

Zu Beginn der Aufzeichnungen und auch in den folgenden Wintern war der Luftfeuchteverlauf mit bis zu 85 % an der Wange des Balkens 1 immer unter den Höchststen zu finden. Der Verlauf an Balken 2 kann ebenso zu den überdurchschnittlichen gezählt werden. Durch das Aufbringen des Putzes zusätzlich eingebrachte Einbaufeuchte und die tieferen Außentemperaturen im November 2010 bildeten sich allerdings weniger deutlich als in den nicht abgedichteten Balkentaschen ab (Bild 64 und Bild 65).

#### **5.5.4 Luftfeuchte in Feld 3 an Balken 4 - Wärmedämmputz**

Trotz der ungünstigen Lage in der Gebäudeecke überstieg die Kurve des Wärmedämmputzes (Balken 4) die des Streichbalkens bis zum Beginn des zweiten Winters. Der anhaltend hohe Verlauf ab November 2010 bis Oktober 2011 bestätigt die im vorigen Kapitel formulierte These, dass an der ehemaligen Bestandsoberfläche des Feldes mit Wärmedämmputz sehr lange sehr hohe Feuchten auftraten. Besonders in den ersten Monaten des Jahres 2011 verlief die Kurve der Luftfeuchte des Wärmedämmputzes offensichtlich weit über den anderen. Erst im August 2011 erreichte der Luftfeuchteverlauf im Feld des Wärmedämmputzes die anderen Linien. Auffallend ist auch, dass im Winter 2011/12 und 2012/13 der Graph des Wärmedämmputzes langsamer anstieg, anschließend aber ebenso langsam wieder absank. Dem Wärmedämmputz kann somit ein hygrysch trägeres Verhalten nach dem Abtrocknen der Einbaufeuchte attestiert werden. Dieser Verlauf ist dem höchsten Diffusionswiderstand der fünf Dämmsysteme und dem besonderen Speicherverhalten des Putzes geschuldet.

#### **5.5.5 Luftfeuchte in Feld 2, 4 und 5 an Balken 3, 5 und 6 - Perlite-, Holzweichfaserplatte und Schilf**

Die Dämmsysteme mit Perlite- (Balken 3) und Holzweichfaserplatten (Balken 5) verursachten vergleichsweise niedrige Luftfeuchten an der Balkenwange und verliefen sehr ähnlich. Der Gang der Luftfeuchte bei dem abgedichteten Balken 6 (Schilf) orientierte sich ebenfalls sehr stark an dem günstigen Verlauf der Holzweichfaser- und Perliteplatten. Mit wenigen, kurzen Ausnahmen wurde eine unkritische Luftfeuchte von unter 80 % ermittelt.

#### **5.5.6 Luftfeuchte in Feld 5 und 6 an Balken 7 und 8 – Schilf und ungedämmt**

Der Verlauf in der nicht abgedichteten Balkentasche von Balken 7 (Schilf) war sehr wechselhaft. Winters feuchtete die Luft um den Sensor mit am höchsten unter den gedämmten Balken auf, sommers sank sie am weitesten ab. Nach der Abtrocknungsphase wurden Ende Oktober 2010 sogar nur 35 % Luftfeuchte gemessen, anschließend schnellte die Luftfeuchte auf 91 % hoch (jeweils Stundenwerte!), dem zwar höchsten gemessenen Wert an dieser Stelle, wenngleich bei Betrachtung der Dauer noch unkritisch in Hinsicht auf holzerstörende Pilze. Lediglich neben dem Referenzbalken wurden in den Sommermonaten tiefere Feuchtwerte ermittelt. Wegen der fehlenden Abkühlung der Bestandswand blieb der Referenzbalken auch im Winter am trockensten.

### **5.6 Temperatur und Luftfeuchte vor dem Stirnholz**

Die in diesem Abschnitt beschriebenen flachen Sensoren wurden so tief wie möglich in die Balkenaufleger eingebracht. Die beiden Sensoren an der Balkenwange und an der Balkenstirn waren durchschnittlich um ca. 0,18 m voneinander versetzt und durch den Luftspalt um den Balkenkopf „verbunden“. Die genauen Einbautiefen führt Tab. 30 auf.

### 5.6.1 Temperaturen

Diese Sensoren befanden sich nahe an der Außenoberfläche, wo der thermische Einfluss der Dämmsysteme und der Raumtemperaturen geringer als bei den bereits besprochenen Sensoren war. Es dominiert der Einfluss des viel näheren Außenklimas. In Bild 66 und Bild 67 sind deshalb die Abweichungen der Kurven untereinander im Winter geringer wie an der Balkenwange (Bild 62 und Bild 63).

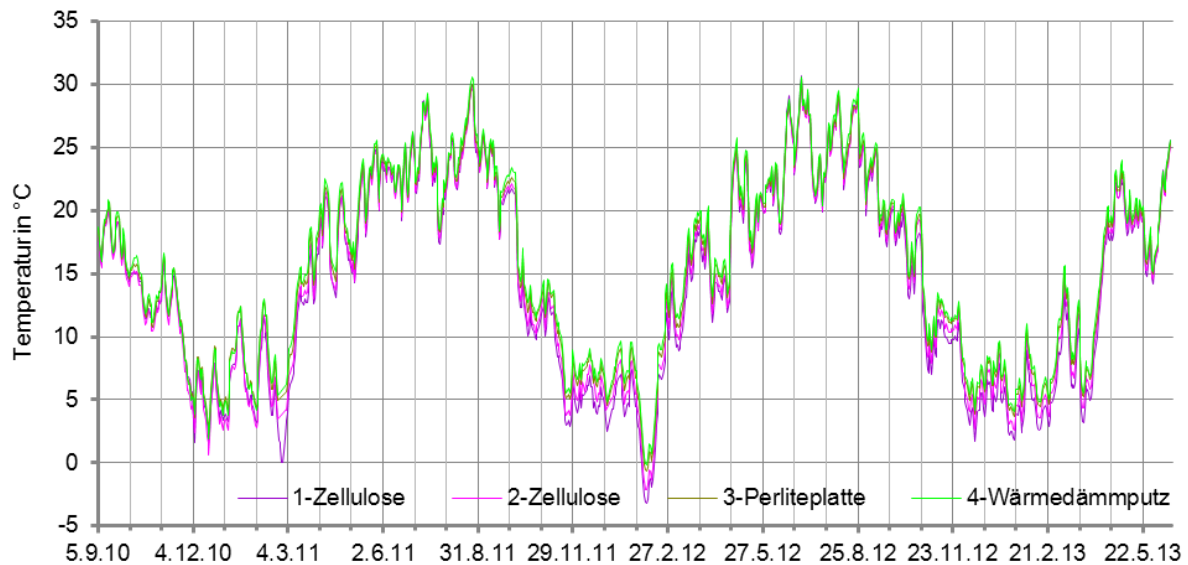


Bild 66 Temperaturen in Stirnholznähe (gemittelte Tageswerte an Balken 1-4)



Bild 67 Temperaturen in den Balkenauflägern in Stirnholznähe an Balken 5-8 (gemittelte Tageswerte)

Die niedrigsten Temperaturen wurden im Auflager des Streichbalkens vorgefunden, gefolgt von den Temperaturen an Balken 2. Wegen den im Vergleich zu den übrigen Linien an Balken 2 um knapp 2 K niedrigeren Temperaturen sei wieder auf die tiefer eingebrachten Sensoren und den höheren Wärmewiderstand der Dämmung verwiesen.

In einem wärmeren Bereich waren im Winter alle restlichen Messkurven, die sich nur um ungefähr 1 Kelvin unterschieden, trotz der nicht konvektionsdichten Ausführung der Auflager der Balken 7 und 8. Die höheren Temperaturen an dieser Messposition können für den Wärmedämmputz und der Holzfaserplatte zusätzlich mit deren niedriger Dämmwirkung begründet werden, im Auflager des Feldes 4 kommt noch die spezielle Situation oberhalb des Fenstersturzes hinzu.

Bemerkenswert erscheint, dass es am ungedämmten Referenzbalken im Winter nicht wärmer war als an allen anderen Balkenköpfen, mit Ausnahme der beiden Balkenköpfe im Zellulosefeld. Höhere Temperaturen im Balkenaullager sind das Hauptargument der Befürworter einer ausgeprägten „Luftumspülung“ von Balkenköpfen. Im vorliegenden Fall können die ähnlich kalten Temperaturen der speziellen Sensorposition zugeschrieben werden, welche in diesem Auflager mit 380 mm mit am Tiefsten bzw. bis zu 0,1 m tiefer platziert worden war (Tab. 3). Simulationsergebnisse bestätigen diesen Schluss ebenfalls. Nur der Sensor am Streichbalken, welcher aufgrund seiner speziellen Exposition nicht mit den anderen Balken verglichen werden kann, war noch tiefer positioniert worden.

Das Temperaturgefälle, welches sich in den Winterperioden 2011/12 und 2012/13 (Dezember bis Ende März) zwischen den beiden Messstellen Balkenwange und Stirnholz ausbildete, betrug in den ersten vier Balkentaschen durchschnittlich 2 Kelvin, bei Balken 5 (Holzweichfaser) und 6 (Schilf) 1 Kelvin, an Balken 7 (Schilf) 2,4 Kelvin und am ungedämmten Referenzbalken 4 Kelvin. Letzteres ist auch im Zusammenhang mit dem Abstand der Sensoren untereinander zu verstehen (Tab. 30), denn die Balkenaullager mit den kleinsten Messfühlerabständen von unter 0,15 m, Balken 5 und 6, wiesen den geringsten Temperaturunterschied auf. Auffällig ist ebenso, dass gerade an den nicht abgedichteten Auflagern die Temperaturdifferenz am größten war, besonders am Referenzbalken, obwohl an Streichbalken 1 der Abstand der Sensoren untereinander noch größer war.

### 5.6.2 Luftfeuchten

Im Gegensatz zu den Temperaturen differierten die relativen Luftfeuchten im Winter sehr weit voneinander (Bild 68 und Bild 69). Besonders im dritten Winter prägte der Einsatz des Luftbefeuchters die Feuchteentwicklung in den Auflagern, wobei schon geringe Temperaturdifferenzen zu höheren Unterschieden der relativen Luftfeuchte beitrugen (vergleiche so genanntes h-x-Diagramm, z. B. in *Fischer et al. (2008)*). Im Sommer bewegten sich mit Ausnahme des Referenzbalkens alle Kurven zwischen rund 40 und 60 % Luftfeuchte.

Mit der im vorigen Absatz festgestellten Temperaturdifferenz wuchs auch die Feuchtebelastung am Stirnholz der Balken. So blieben vor allem die Felder 4 bis 6 vergleichsweise trocken, an den anderen Stirnenden wurden zum Teil über einen längeren Zeitraum hinweg bedenkliche 100 % Luftfeuchte gemessen.



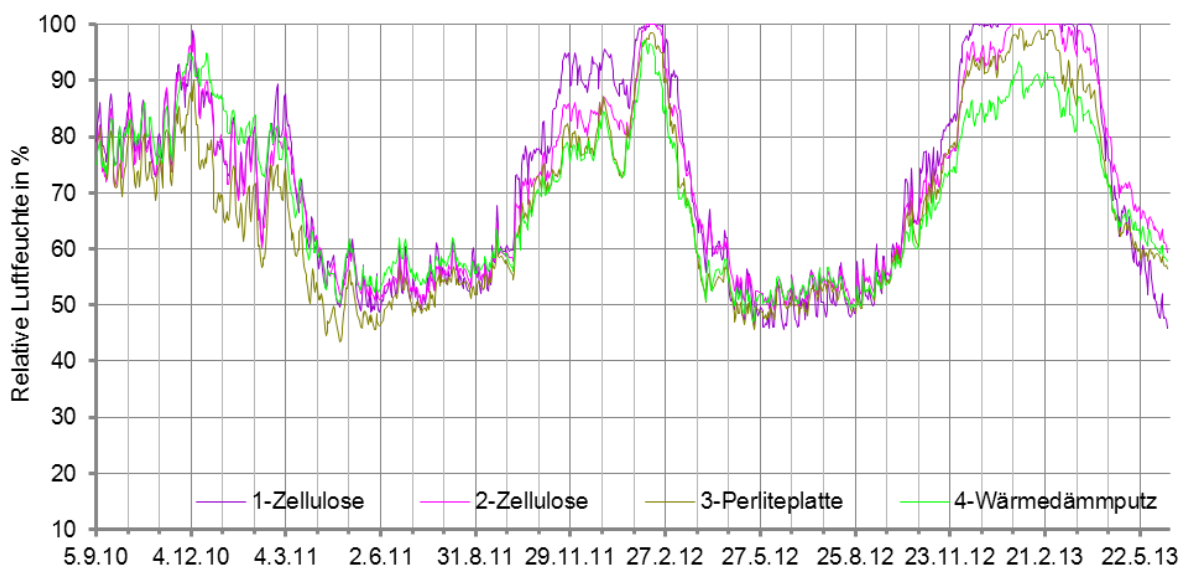


Bild 68 Luftfeuchten an Balkenwangen an Balken 1-4 (gemittelte Tageswerte)

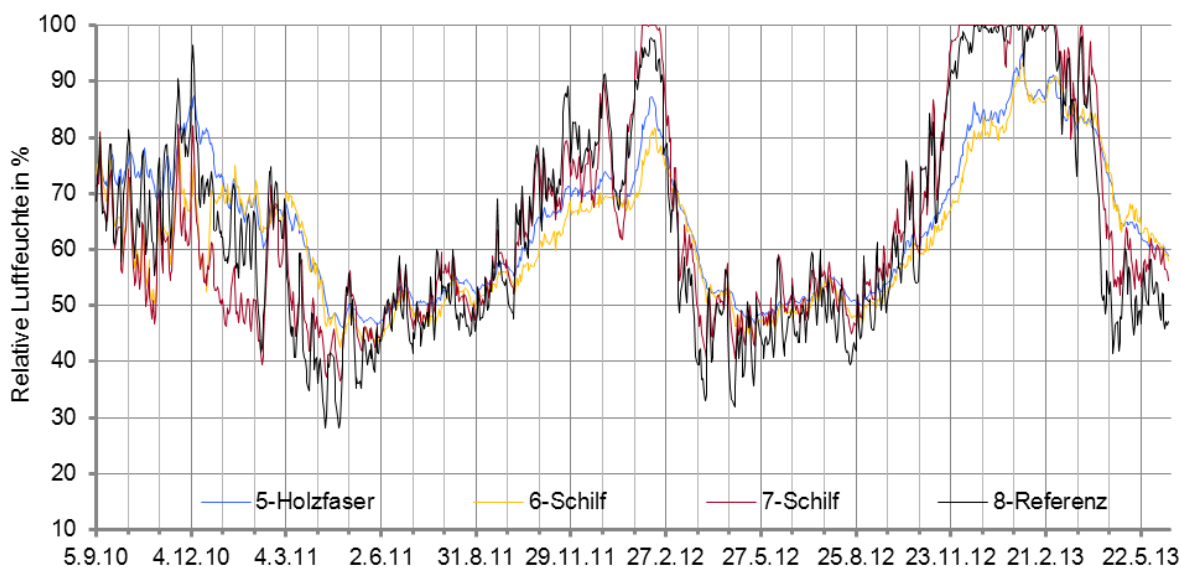


Bild 69 Luftfeuchten an Balkenwangen an Balken 5-8 (gemittelte Tageswerte)

### 5.6.3 Luftfeuchte in Feld 1 an Balken 1 und 2 - Zellulose

An den Balken des Zellulosefeldes war das Feuchteniveau im Winter vergleichsweise hoch (Bild 68). Die Luftfeuchte erreichte Anfang Dezember 2010 für gut einen Tag 100 % relativer Luftfeuchte. Im folgenden Jahr begann im Auflager des Streichbalkens die Feuchte schon ab Mitte September 2011 wieder schnell anzusteigen und übersprang kurzzeitig immer wieder 95 % Luftfeuchte, im 2. Balkenaullager 85 %. Doch erst im Februar 2012, bei sehr kalten Außentemperaturen um  $-10^{\circ}\text{C}$  und darunter, bildete sich für ungefähr drei Wochen Kondensat, 95% relativer Luftfeuchte waren für ungefähr einen Monat überschritten worden (Balken 2: eine Woche Kondensat, drei Wochen über 95 %). Im letzten Winter ermittelte dieser Sensor

für 3,5 Monate fast durchgehend 100 % Luftfeuchte, in Balkenaufleger 2 immerhin für 1,5 Monate, wobei hier noch einmal auf die grundsätzliche Problematik bei der Messung sehr hoher Luftfeuchten hingewiesen sei (s. Abschnitt 5.3.2 und *Kautsch et al. (2006)*). Nach dem Abschalten der Befeuchter trocknete die überhygroskopische Feuchte sehr schnell wieder aus. Zu dem höheren Feuchteniveau trugen (nach Abtrocknen der Einbaufeuchte) die Wärmebrücke, die größere Einbautiefe sowie der höchste Wärmewiderstand bei.

### **5.6.4 Luftfeuchte in Feld 2 und 3 an Balken 3 und 4 - Perliteplatte, Wärmedämmputz**

An Balken 3 (Perliteplatte) stieg die Luftfeuchte im ersten Winter nur für einen Tag über 90 %, im zweiten und dritten Winter wurden 100 % nicht ganz erreicht (Bild 68). In der Balkentasche des mit Wärmedämmputz gedämmten Feldes entstand zwar nur kurz überhygroskopische Feuchte über 95 %, die hellgrüne Line trocknete aber langsamer ab und mischte sich erst wieder Anfang März 2011 unter die anderen Kurven. Im zweiten Winter wurden im Wärmedämmputz maximal 98 % Luftfeuchte erfasst, welche ebenso zügig wie bei den anderen Sensoren abnahmen. Bis in den Herbst 2012 verliefen die Messfühler an den Balken 3 und 4 sehr ähnlich. Offenbar wirkte sich der einmal abgetrocknete Dämmputz sehr positiv auf die hygrometrischen Verhältnisse aus, denn im dritten Winter wurden dort sehr niedrige maximale Luftfeuchten aufgezeichnet. Der niedrigere Wärmewiderstand des Wärmedämmputzes leistete sicherlich auch seinen Beitrag, um die Luftfeuchtespitzen abzumildern.

### **5.6.5 Luftfeuchte in Feld 4 und 5 an Balken 5 und 6 - Holzweichfaserplatte, Schilf**

Am unkritischsten verlief die Luftfeuchte an den Balken 5 (Holzweichfaser) und 6 (Schilf, abgedichtet), was unter anderem der Tatsache geschuldet war, dass hier die Balkenaufleger weniger tief sind (Tab. 30) und der Balken 5 durch die Lage über dem Fenster begünstigt war (Bild 69). Im ersten Winter waren die Luftfeuchten hier wegen der geringen Einbaufeuchte und der fehlenden Befeuchtung sehr niedrig. Beide Kurven verliefen vergleichsweise konstant mit Maximalwerten im Winter von 91 und 92 % Luftfeuchte.

Dass in den abgedichteten Balkenauflagern 5 und 6 ein auffallend langsamerer Anstieg der Luftfeuchte im Vergleich zu den anderen von unten abgedichteten Balkenauflagern im November 2012 zu bemerken war, ist damit zu begründen, dass diese besonders gut abgedichtet worden waren bzw. die Anschlüsse im Dachgeschoß diffusions- bzw. konvektionshemmender waren. Beim Abbau konnte allerdings visuell kein Unterschied in der Ausführungsqualität bemerkt werden.

### **5.6.6 Luftfeuchte in Feld 5 und 6 an Balken 7 und 8 - Schilf, Referenzfeld**

Am Stirnholz des Balkens 7 (Schilf, nicht abgedichtet) bot sich in den kalten Witterungsperioden ein unterschiedliches Bild (Bild 69). Bei niedriger Raumfeuchtebelastung aus dem Zimmer im Obergeschoß stieg die Feuchte im ersten Winter kaum über 80 % und verzeichnete damit die niedrigsten Feuchtwerte. Im zweiten Winter dagegen, bei einer eigentlich üblicheren Raumfeuchtebelastung, bildete sich für einen Zeitraum von zwei Wochen schon durchgehend Kondensat. Die Zustände hoher Feuchtebelastung hielten jedoch nur kurz an. Dies gilt auch

für den Referenzbalken 8, wo die Luftfeuchte einen ähnlichen, wechselhaften Verlauf nahm. Im Auflager des Balkens 8 waren im Sommer 2011 zwar sehr niedrige Luftfeuchten zu verzeichnen, im zweiten Winter jedoch, für einen kürzeren Zeitraum als in Balken 7, entstand auch Kondensat. Für den dritten Winter war die Situation in Stirnholznähe ähnlich kritisch zu bewerten wie am Streichbalken: sehr lang anhaltende, überhygroskopische Feuchte. Im ungedämmten Feld 6 wurden 100 % Luftfeuchte zwar nicht durchgängig gemessen, im kälteren Schilfauflager hingegen blieben mit kurzer Unterbrechung 100 % für ungefähr 3 Monate erhalten, das ist gleichbedeutend mit Kondensat an der Außenfläche des Balkenauflegers, in unmittelbarer Nähe zum Balkenkopf, was auf ein erhöhtes Schadenspotential für den Holzbalken schließen lässt.

Die Gleichgewichtsfeuchte zu einer Luftfeuchte von 90 % beträgt für Fichtenholz ungefähr 20 % Holzfeuchte, wobei die Feuchtespeicherung in Holz sehr stark variieren kann. Insofern sind schon länger anhaltende Messwerte von mehr als 90 % in Balkenkopfnähe als problematisch anzusehen.

Das hygrothermische Verhalten in den Balkenauflagern 6, 7 und 8 wird zu einem späteren Zeitpunkt noch einmal beleuchtet.

An dieser Stelle seien die bemerkenswert großen Unterschiede in der relativen Luftfeuchte zwischen den beiden Sensoren in der Balkentasche herausgestellt, obwohl deren Entfernung nur 0,13 bis 0,25 m beträgt. Für die Monate Jänner und Februar 2012 lässt er sich folgendermaßen beziffern:

Tab. 17 Durchschnittliche Differenz der relativen Luftfeuchte zwischen den Sensoren jeweils an der Balkenwange und am Stirnholz in den Monaten Jänner und Februar 2012

Balken	1	2	3	4	5	6	7	8
Differenz (%)	22,1	21,5	18,6	15,3	13,4	7,7	22,3	27,7

Die Unterschiede gehen konform mit den festgestellten Temperaturdifferenzen: Besonders groß sind sie an den nicht abgedichteten Balken sowie im Feld mit Zollosedämmung, auffällig niedrig dagegen am Balken 5 und besonders 6.

### 5.6.7 Absolute Feuchtemengen in Balkenauflagern

Die *relative* Luftfeuchte gibt nur bedingt ein Abbild der Feuchteverteilung wieder, da sie in großem Maß von der Temperatur bestimmt wird. Die folgenden zwei Abbildungen geben deshalb exemplarisch den Gang der *absoluten* Luftfeuchte an den beiden Sensoren im Auflager wieder.

Beim Betrachten von Bild 70 und Bild 71 wird augenfällig, dass die Verläufe der absoluten Luftfeuchte in den nicht abgedichteten Balkenauflagern lebhafter und durchschnittlich etwas höher waren als in den vom unteren Raum her konvektionsdicht ausgebildeten Balkenauflagern. Gleichfalls ist zu erkennen, dass der Wasserdampf in den Auflagern 7 und 8 inhomogener verteilt war als in den Auflagern des Streichbalkens und des von unten abgedichteten

Auflagers im Schilffeld. Vom Dezember 2012 bis Ende März 2013 betrug die durchschnittliche Differenz zwischen den Sensoren am Stirnholz und der Balkenwange in den Auflagern 7 und 8 1,0 bzw. 0,9 g/m<sup>3</sup>. Im Auflager des Streichbalkens fiel diese mit 0,6 g/m<sup>3</sup> etwas geringer aus. In den teilabgedichteten Auflagern 3 (nicht abgebildet) oder 6 ist der ermittelte Unterschied dagegen geringer und beträgt nur 0,3 g/m<sup>3</sup>. Für die ausgeprägte Konzentration der Feuchte im äußeren Bereich kann nicht nur die größere Tiefe der Balkenaullager 7 und 8 verantwortlich sein, schließlich sind die Balkenaullager 1 und 2 ähnlich ausgebildet bzw. noch tiefer. Die konvektionsoffene Ausgestaltung des Auflagerbereichs trägt ebenso zu dieser Differenz bei.

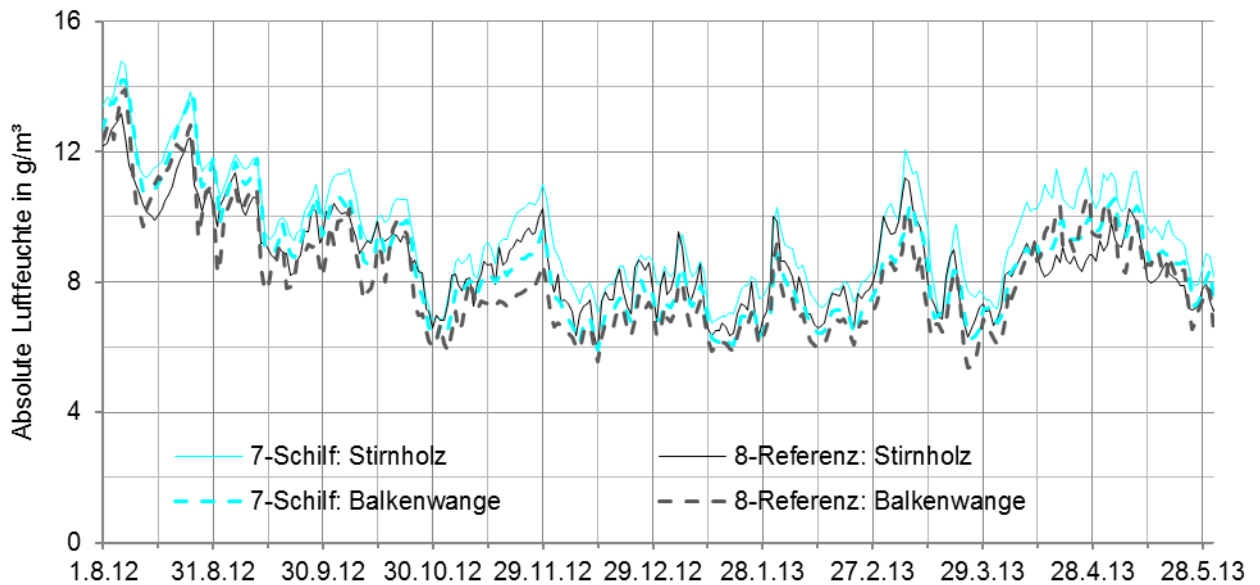


Bild 70 Verlauf der absoluten Feuchte von beiden Balkenaullagersensoren in unterschiedlichen Tiefen vom 1.8.2012 bis zum 30.5.2013 in den Auflagern 7 und 8

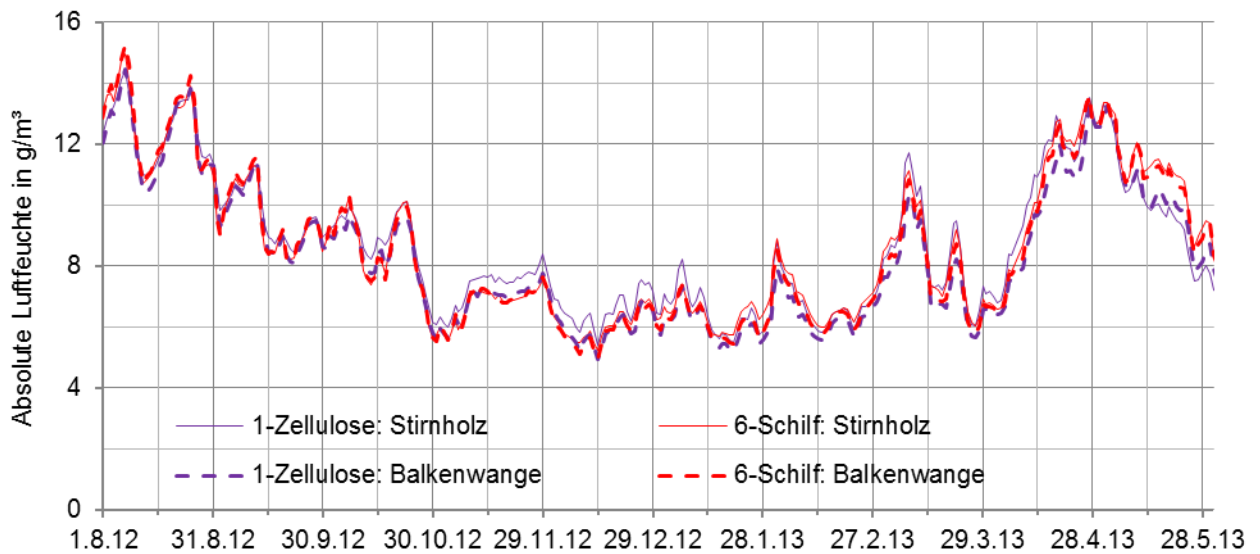


Bild 71 Verlauf der absoluten Feuchte an den beiden Sensoren im Balkenaullager vom 1.8.2012 bis zum 30.5.2013 in den Auflagern 1 (Zellulose) und 6 (Schilf, abgedichtet)

### 5.6.8 Zusammenfassung der Messungen in der Luft der Balkenaufleger

Innerhalb der Balkenaufleger bestand ein auffallendes Gefälle bezüglich der relativen Luftfeuchte, was durch größere Auflagertiefe und nicht abgedichtete Auflager verstärkt wird. Während in der Mitte der Balkenaufleger praktisch nie mehr als 85 % relativer Luftfeuchte gemessen wurden, bildete sich am Ende der Balkenaufleger in den nicht abgedichteten Auflagern 7 und 8 sowie denen der Zellulose bei hoher Raumfeuchtebelastung und niedrigen Außentemperaturen teilweise über mehrere Monate hinweg Kondensat. Eine derart hohe gemessene Luftfeuchte über einen längeren Zeitraum ist für sich betrachtet als kritisch hinsichtlich einer möglichen Holzschädigung anzusehen.

Die Temperaturen an den beiden Messpositionen an Balkenwange und Stirnholz unterschieden sich dabei um ungefähr 2 Kelvin, im offen gehaltenen Auflager des Referenzfeldes um bis zu 4 Kelvin. Die Temperaturen am Stirnholz der meisten gedämmten Balkenköpfe waren niedriger als am ungedämmten Balken im Referenzfeld, was mit dem um wenige Zentimeter tiefer liegenden Sensor zu begründen ist.

## 5.7 Holzfeuchtemessungen

Die hygrothermischen Messungen und Simulationen dieser Arbeit kreisen nicht zuletzt um die Frage, ob durch Innendämmmaßnahmen die tragenden Holzstrukturen in Decken geschädigt werden können.

Nach entsprechend langer und hoher Feuchtebelastung bei ausreichend hohen Temperaturen können Holzfäulepilze einen Abbau der Holzmasse initiieren. Neben der Stabilitätsgefährdung und der allgemeinen Wertminderung von Objekten können Holzfäulepilze auch eine Gefahr für empfindliche Personen darstellen, wenn die Sporen in die Raumluft gelangen. Für die Beurteilung, ob eine Schädigung eintreten wird, wird zumeist die Entwicklung der Holzfeuchte näher betrachtet. In Normen wird im Sinne der Vorbeugung von Holzfeuchteschäden pauschal ein Grenzwert von 20 % Holzfeuchte gefordert, der einzuhalten sei (*ÖNORM B 3802, DIN 68800*). Dieser Grenzwert soll alle Unwägbarkeiten, die z. B. bei einer Messung auf einer Baustelle entstehen können, berücksichtigen und liegt deshalb weit auf der sicheren Seite. Ein gefährlicher, weit verbreiteter Holzschädling, der Echte Hausschwamm (*Serpula lacrymans*) kann allerdings erst oberhalb des Fasersättigungspunktes auskeimen, was einer Holzfeuchte von 26 bis 28 M% entspricht (*Huckfeld et Schmidt (2006), Arnold (2016)*).

### 5.7.1 Holzschädigungsmodell

Hinsichtlich der spezifischen Verhältnisse und der Wahrscheinlichkeit für Holzschädigung wurde ein Rechenmodell maßgeblich an der VTT (Technical Research Centre of Finland) unter Leitung von Hannu Viitanen entwickelt. Viitanen widmete sich seit Ende der 1980-er Jahre der Erforschung von bauschädlichen Pilzen und fasste seine Versuchsergebnisse in empirischen Formeln zusammen (*Viitanen et al. (2010)*). Für die Holzzerstörung gehen der zeitliche Verlauf

der wichtigsten begrenzenden Faktoren, Temperatur und Feuchteangebot in die Berechnung ein.

Das VTT-Schädlingsprognosemodell unterscheidet zwei Phasen:

- Phase I: Die Zeit bis zur Auskeimung.
- Phase II: Die tatsächliche Zerstörung der Holzsubstanz durch holzerstörende Pilze.

Sofern keine anderen Einstellungen getroffen wurden, beginnt das Modell mit Phase I. Erst, wenn für eine ausreichend lange Zeit die klimatischen Gegebenheiten ausreichend für das Auskeimen des holzerstörenden Pilzes gewesen sind, beginnt Phase II mit der Schädigung in Form von Holzabbau. Viitanens bzw. das VTT-Modell gibt den Holzmasseverlust in Masseprozent für Kiefernholz wieder. Dabei kennzeichnet ein Wert über 0 den erlittenen Verlust an Holzmasse in Prozent.

Diesem Modell liegt zugrunde, dass ab einer Temperatur über 0° C und gleichzeitig relativer Luftfeuchtigkeit von mehr als 95 % die Bedingungen für das Wachstum von Holzfäulepilzen gegeben sind. Werden diese Grenzwerte überschritten, so tritt nach einem gewissen Zeitraum, wiederum abhängig von der Temperatur und relativen Luftfeuchtigkeit, ein Masseverlust des Holzes ein. Werden die Grenzwerte wieder unterschritten, wird keine weitere Holzmasse mehr abgebaut. Da die Messwerte immer weit unterhalb 20 % Holzfeuchte blieben, musste dieses Modell und das daraus abgeleitete Modell aus *WTA-MB 6-8* nicht angewendet werden.

In dieser Arbeit wird die Holzfeuchte in Masseprozent angegeben, für welche die Holzfeuchte  $u$  mit der Einheit kg/kg mit 100% multipliziert wird (*ÖNORM EN 844*).

### 5.7.2 Holzfeuchte an der nassesten Stelle

Bezüglich der Holzfeuchte an der nassesten Stelle werden immer beide Datenreihen angegeben: die eigentlichen Messdaten und die temperaturkorrigierten Messdaten (siehe Kapitel 6.3). Aus den Gründen, die in Kapitel 6.3 erläutert sind, beziehen sich die folgenden Besprechungen, wenn nicht anders vermerkt, auf die temperaturkorrigierten Messdaten.

Im Vergleich zu den Luftfeuchte-Diagrammen in der unmittelbaren Umgebung der Balkenköpfe (z. B. Bild 68 und Bild 69) fällt auf, dass die Holzfeuchte weitaus träger auf klimatische Einwirkungen reagierte. Ein Vergleich der Materialkennwerte  $\mu$ -Wert und  $A_w$ -Wert, die den Feuchtetransport in Tab. 9 beschreiben, offenbart, dass die Werte in beiden Fällen den der anderen Materialien zum Teil um ein Vielfaches übersteigen ( $\mu$ -Wert) bzw. unterbieten ( $A_w$ -Wert), was die Trägheit erklärt.

Bei der Messung der Holzfeuchte kam es immer wieder zu auffälligen Sprüngen von bis zu 2,5 M-% im Messverlauf, welche physikalisch nicht erklärbar sind und durch die Messtechnik verursacht wurden. Diese Sprünge nahmen besonders im Jahr 2012 zu. Um die Aussagekraft der Messdaten zu überprüfen, wurden deshalb im Jahr 2012 und 2013 mehrere Kalibrierungen durchgeführt. Die Kalibrierungen zeigten, dass beim Vorliegen eines sprunghaften Verlaufs die jeweils höheren Werte korrekt waren. Auf diese Problematik wird im Kapitel 5.2 näher eingegangen.

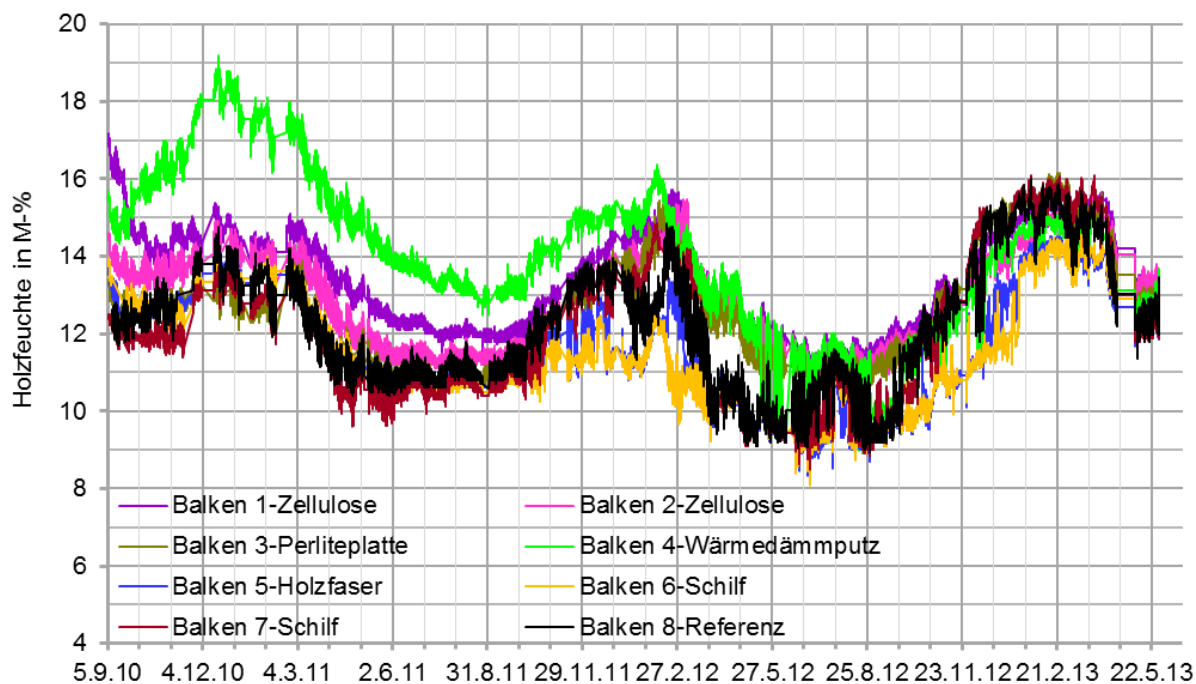


Bild 72 Holzfeuchte an der „nassesten Stelle“ in allen Balken (Stundenwerte)

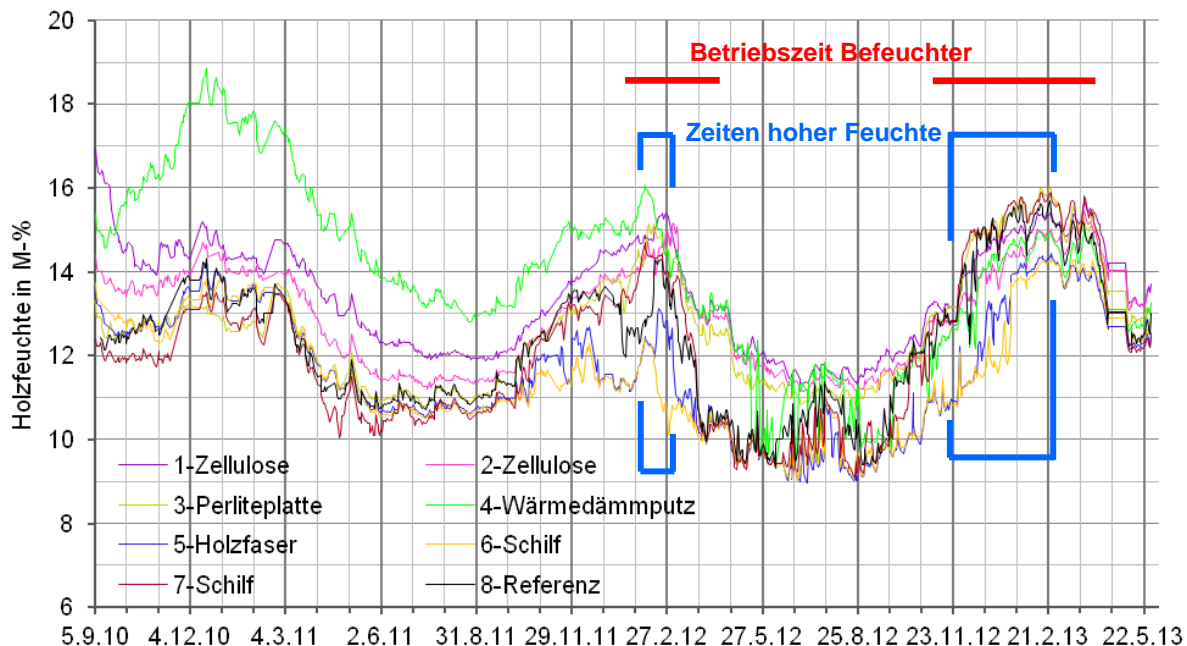


Bild 73 Temperaturkorrigierte (Tages-)Werte der Holzfeuchte an der nassesten Stelle in allen Balken, Betriebszeiten der Luftbefeuchter sowie Zeiträume zwischen 95 und 100 % in der Kleberschicht der Dämmsysteme

An allen Balken, mit Ausnahme des vierten (Wärmedämmputz), sank der Wassergehalt 2010 an der nassesten Stelle zunächst ab (Bild 73). Der Trocknungsprozess setzt sich bis Ende Oktober 2010 fort. Dann verharrten die Holzfeuchten auf einem ungefähr gleichbleibenden Level bis in den März 2011 hinein bzw. zeigten ein lokales Maximum im Dezember 2010. Im

folgenden Sommer 2011 trockneten alle Balken weiter aus, und bewegten sich um 11 M%. Die Balken im Zellulosefeld setzten sich mit Werten um 11,5 (Balken 2) und 12 M% leicht ab, der mit Wärmedämmputz gedämmte Balken 4 sank nur kurz unter 13 M%. Ab September 2011 begannen die gemessenen Holzfeuchten wieder etwas anzusteigen. Während des zweiten Winters (November 2011 bis März 2012) traten zwischen den einzelnen Dämmvarianten große Unterschiede auf. Mit der Annahme, dass bei den unruhigeren Kurven die jeweils höheren Werte korrekt sind, betrogen die niedrigsten Maximalwerte 12,5 bis 13 M% im Feld mit Holzweichfaserplatten und dem teilabgedichteten Schilfauflager, der höchste Wert wurde für das Balkenauflager im Feld mit Wärmedämmputz ermittelt: 16,1 M%. Alle anderen maximalen Holzfeuchtwerte, einschließlich des ungedämmten Feldes, betrogen zwischen 14,3 und 15,4 M%. Trotz beständiger, sehr hoher Raumlufffeuchte im Dachgeschoß und hoher Luftfeuchte im Obergeschoß wurden im letzten Winter 16 M% nicht überschritten. Die Differenz der Maximalwerte Mitte Februar 2013 betrug nur gut 1,5 M%.

Der anhaltend höhere Verlauf des Balkenkopfs in Feld 3 (Wärmedämmputz) ist sicherlich auf die nur sehr langsam abtrocknende, hohe Einbaufeuchte zurückzuführen, welche zum höchsten Holzfeuchtemesswert von 18,8 M% im Dezember 2010 führte. Dass es sich um Einbaufeuchte handeln musste, zeigt der Sachverhalt, dass sich der Gang der Holzfeuchte an Balken 4 bis zum Jahr 2012 zunehmend an die anderen anglich, obwohl keine baulichen oder sonstigen Veränderungen vorgenommen worden waren. Nachdem dieser Balkenkopf 4 Ende Februar 2012 auf das Niveau der anderen abgetrocknet war, sind die Messwerte aller Holzfeuchteelektroden in Anbetracht der Messungenauigkeiten und der nicht identischen Balkenaufлагersituationen vergleichsweise ähnlich. Auch die unterschiedliche Abdichtung der Balkenaufлагers scheint sich nicht eindeutig auf die Holzfeuchte der Deckenbalken auszuwirken.

Eine besondere Gefährdung der Balkenköpfe in nicht abgedichteten Auflagern kann hier nicht festgestellt werden. Zwar nahm die Holzfeuchte in den Balken 7 und 8 im letzten Winter schnell auf knapp 16 M% zu, dieser Wert stellt im Hinblick auf die Raumfeuchtebelastung und die Differenz zum Grenzwert von 20 M% keine Gefahr dar.

In Bild 73 sind die Betriebszeiten der Luftbefeuchter angedeutet sowie Zeiträume, in denen in einigen Dämmsystemen Luftfeuchten zwischen 95 und 100 % festgestellt worden waren. Besonders zu Zeiten maximaler Feuchte an der Grenzfläche zwischen Innendämmung und Bestandskonstruktion lässt sich auch ein Anstieg in der Holzfeuchte erkennen, wenngleich dieser nicht sehr ausgeprägt ist. Demnach reagierten die Holzbalken zwar auf die hohe Feuchtebelastung, dies aber ausgesprochen träge und unaufgeregt.

Leider ist nicht dokumentiert, welche Holzfeuchten vor Einbau der Dämmsysteme vorlagen, da eine Kalibrierung erst am 3. September 2010 erfolgte, nachdem die Dämmsysteme schon angebracht worden waren. Eine Messung im Stirnholzbereich wäre auch nur mit einem unverhältnismäßig hohem Aufwand durchzuführen gewesen. Es wurden von keinen Auffälligkeiten berichtet, lediglich der Streichbalken habe einen „etwas feuchten“ Eindruck gemacht.



### 5.7.3 Holzfeuchtemessungen in der Ebene der ehemaligen Bestandsoberfläche

Mit Hilfe dieser vier Sensoren (Bild 13) sollte untersucht werden, ob die Holzfeuchte entlang der langen Sensoren, und damit mutmaßlich in der Nähe des Stirnholzes, oder in der Ebene der Innendämmung höher war. Da im Fall dieser Sensoren die Temperaturmessung in unmittelbarer Nähe der Messfühler vorgenommen worden war, ist hier keine nachträgliche Temperaturkorrektur notwendig.

Aus Bild 74 und Bild 75 lässt sich eindeutig herauslesen, dass die in den langen Sensoren gemessene Holzfeuchte die der Sensoren in der Ebene der Innendämmung übertraf. Angesichts der anhaltend hohen Luftfeuchte auf der ehemaligen Bestandsoberfläche in der Gebäudecke von Beginn der Messungen bis in den April/Mai 2011 (Bild 59) ist das bemerkenswert. Auch im letzten Winter, als mehrere Monate lang an den Luftfeuchtesensoren im Gebäudeeck 100 % Luftfeuchte gemessen worden waren, bewegten sich die dortigen Holzfeuchte-Messfühler auf der Bestandsoberfläche augenfällig unterhalb der Holzfeuchtemessung in der Nähe des Stirnholzes, obwohl sich die Holzfeuchteelektroden bei der Innendämmung in unmittelbarer Nähe zu den Luftfeuchtesensoren zwischen Bestandsoberfläche und Innendämmsystem befanden.

Leider waren an keinem der anderen Balkenköpfe Holzfeuchteelektroden in der Ebene der Innendämmung eingebracht worden. Der große Abstand an Balken 1 lässt dennoch den Schluss zu, dass auch an den anderen Balkenköpfen das Stirnholz der feuchteste Bereich gewesen ist. Diese Vermutung wird durch die in Kapitel 6 erläuterten Simulationsergebnisse gestützt.

Das hygrothermische Verhalten im Balkenaufleger stellte sich so dar, dass sich zum einen die Feuchte auf die äußerste Luftschicht des Auflagers konzentrierte und zum anderen der Balken Wärme im Raum aufnahm und sie in den Auflagerbereich weiterleitete. So schuf er sich durch seine eigene Wärmebrückenwirkung ein günstigeres Umfeld.

Die Sprünge in den Graphen der Holzfeuchtesensoren an der Bestandsoberfläche, die ab dem Herbst 2012 auftraten, sind Zeichen einer beginnenden Unzuverlässigkeit der Sensoren. Aus diesem Grund wurden die Sensoren zum Ende des Projektes OEKO-ID immer wieder kalibriert.

Am nicht abgedichteten Balken des ungedämmten Referenzfeldes stellte sich die Situation zunächst weniger eindeutig dar, weil der Messfühler in 15 mm Tiefe (rote Linie in Bild 75) von Beginn an uneindeutige Messwerte mit ausgeprägten Sprüngen aufzeichnete. Beim Vergleich mit Bild 74 liegt die Vermutung nahe, dass hier der jeweils tiefere Verlauf der roten Linie der Realität näher kommt, da die blaue Linie des 30 mm tief eingebrachten Fühlers gleichmäßiger zwischen ungefähr 9 und 10 M% verläuft. Dass sich die Sensoren in der Ebene der Bestandsoberfläche im ungedämmten Referenzfeld etwas niedriger bewegten als im Streichbalken, ist wegen der zusätzlichen Feuchtebelastung, der Lage in der Gebäudecke und der Abkühlung durch die Innendämmung schlüssig. Wegen der fehlenden Innendämmung und des tieferen Auflagers war im Feld des Referenzbalkens der Unterschied zwischen Stirnholztemperatur

und der Temperaturmessstelle dieses Sensors auf der Bestandsoberfläche größer. Dementsprechend größer sind die Differenzen zwischen gemessener und temperaturkorrigierter Kurve.

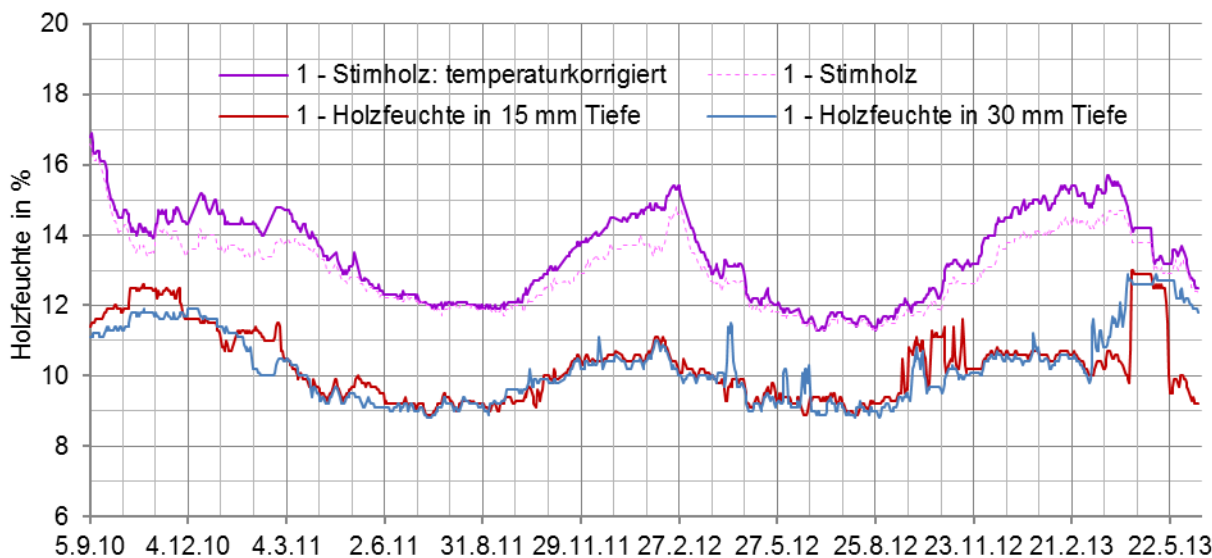


Bild 74 Alle Holzfeuchtesensoren an (Streich-)Balken 1

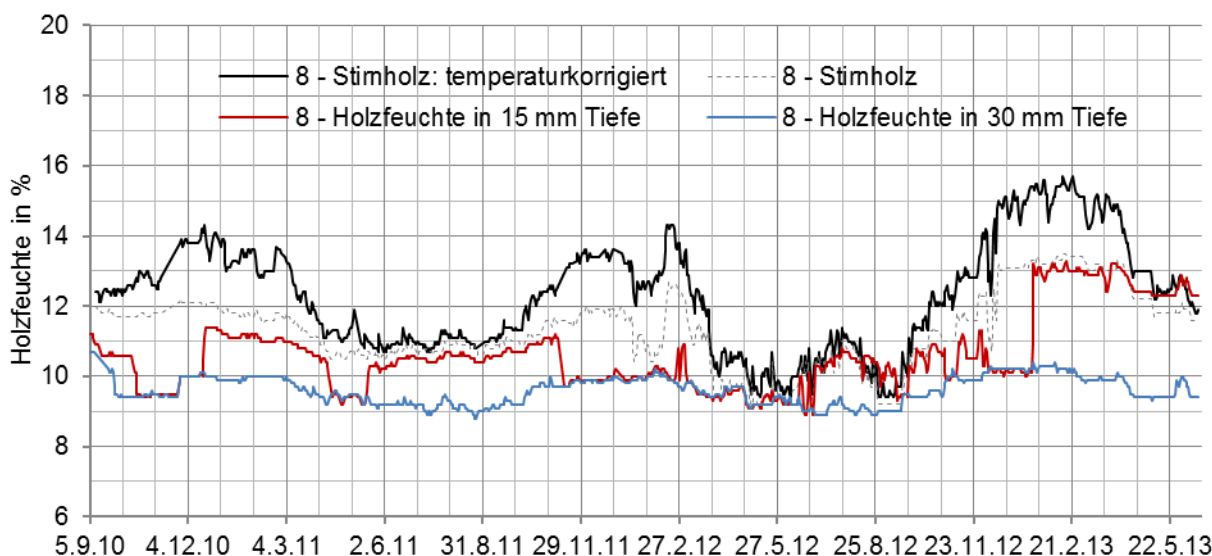


Bild 75 Alle Holzfeuchtesensoren an Balken 8

Zu den Sprüngen im Verlauf der Holzfeuchte, besonders der roten Linie in Bild 75, sei auch an dieser Stelle auf das Kapitel 5.2 verwiesen.

#### 5.7.4 Zusammenfassung zu den Holzfeuchtemessungen

In Anbetracht der hohen Feuchtelast aus den Räumen in den beiden Winterperioden 2011/12 und 2012/13 und der damit verbundenen Kondensatbildung in einigen Innendämmssystemen

sind die gemessenen Holzfeuchten mit maximal 16,2 M% (temperaturkorrigiert und nach Abtrocknen der Einbaufeuchte) als niedrig einzustufen. Lediglich im Balkenkopf des Feldes mit Wärmedämmputz und mit Abstrichen im Streichbalken (Zellulosedämmung) wurden im ersten Winter längere Zeiten mit etwas erhöhten Holzfeuchten gemessen, die sich aber noch unter 20 M% bewegen. Nach dem zweiten Winter bewegten sich alle gemessenen Holzfeuchten relativ gleichförmig. Werden die Imponderabilien bei derartigen Messungen und die unterschiedliche Detailausbildung der Balkenaufleger mitberücksichtigt, scheinen die verschiedenen Innendämmsysteme nur eingeschränkten Einfluss auf die Holzfeuchte in den Balkenköpfen auszuüben. Der Abstand zu dem Grenzwert aus einschlägigen Richtlinien von 20 M% ist generell ausreichend. Anhand von Messungen am Streichbalken konnte herausgearbeitet werden, dass die Holzfeuchte am Stirnholz der Balken größer ist als in der Ebene der Innendämmung.

Im Gegensatz zu der nur wenige Zentimeter entfernten, vertikalen Außenfläche der beiden Auflager feuchten die Balkenköpfe in den, vom Obergeschoß her, nicht abgedichteten Auflagern im Winter zwar schneller, aber keinesfalls übermäßig auf. Trotzdem ist die Forderung nach einer Abdichtung der Auflagertasche sehr sinnvoll. Abgesehen von der größeren Sicherheit kann schließlich in einer ungünstigeren Gemengelage, wie z. B. bei dünneren Außenwänden mit wärmeleitfähigeren Ziegeln, eine höhere Feuchtebelastung im Auflager auftreten. Es kann aus den geringen Differenzen in den Messungen geschlossen werden, dass eine weniger aufwändige, aber dafür den gesamten Balken umfassende, konvektionshemmende Abdichtung ausreichend ist.

Trotz der hohen Raumlufffeuchte im letzten Winter darf die Einschätzung, dass die hier untersuchten oder ähnliche Dämmsysteme sich analog verhalten würden und demnach als unproblematisch anzusehen sind, nicht ungeprüft verallgemeinert werden. Projektspezifische Besonderheiten, beispielsweise der wenig wärmeleitfähige, aber sehr flüssigwasserleitfähige Ziegel, die relativ dicke und dennoch diffusionsoffene Außenwand sowie die sehr geringe Schlagregenmenge sprechen dagegen.

## 5.8 Oberflächentemperaturen

### 5.8.1 Temperaturen auf der Innenoberfläche

Die Sensoren für die Innenoberflächentemperaturen befanden sich ca. 20 cm unterhalb der Decke, in der Mitte der Dämmfelder. Wegen der geringen Abweichungen sind bei der Darstellung aller Messkurven in Bild 76 Einzelheiten kaum zu erkennen. Die Kurven in Bild 77, vom 22.1.2012 bis zum 18.2.2012, bilden deshalb exemplarisch den Temperaturverlauf auf den Innenoberflächen der verschiedenen Dämmsysteme ab. Dabei ist zu beachten, dass Feld 2 keinen Sensor enthielt.

Entsprechend der Wärmewiderstände der Dämmsysteme ordnen sich ungefähr die Oberflächentemperaturen an (Tab. 18). Am wärmsten war es auf der Schilf- und Zellulosedämmung, es folgen der Wärmedämmputz und die Holzweichfaserplatte. Die

Differenz zwischen Referenzfeld und Zellulose- bzw. Schilffeld beträgt weniger als 2 Kelvin. Bild 77 illustriert, dass die Abstände besonders bei kalten Außentemperaturen, z. B. am 1. oder 4. Februar 2012, groß sind. Mit durchschnittlich 19,1°C in der Zimmerecke ist es nur um 1,3 K kälter als ohne Wärmebrückeneinfluss. Dabei ist zu beachten, dass entgegen der landläufigen Meinung in frei beströmbaren Zimmerecken die Temperaturen nicht viel niedriger sein müssen als auf ungestörten Wandoberflächen, was beispielsweise in *Erhorn et al. (1988)* untersucht wurde.

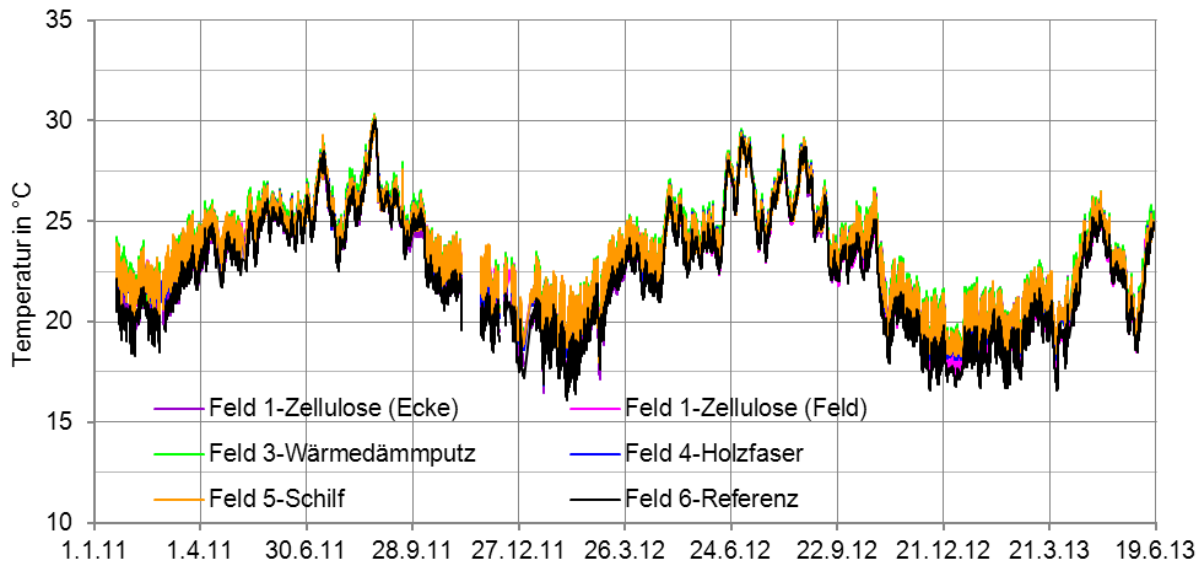


Bild 76 Verlauf der Innenoberflächentemperaturen

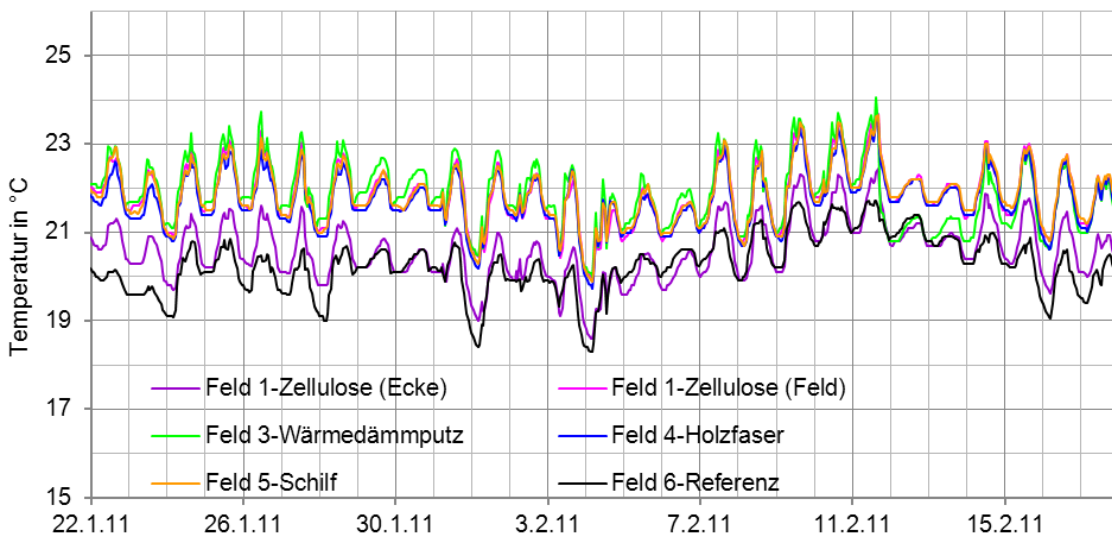


Bild 77 Verlauf der Innenoberflächentemperaturen vom 22.1.2012 bis zum 18.2.2012

Die durchschnittlichen Innenoberflächentemperaturen während des kältesten Monats Februar 2012 betragen:

Tab. 18 Mittlere Innenoberflächentemperaturen während des kältesten Monats Februar 2012

Feld 1 Zellulose-Ecke	Feld 1 Zellulose-Feld	Feld 3 Wärmedämmputz	Feld 4 Holzweichfaser	Feld 5 Schilf	Feld 6 Referenz
19,1°C	20,4°C	20,3°C	20,1°C	20,4°C	18,6°C

Die Unterschiede von weniger als 2 K zwischen gedämmten und ungedämmten Temperatursensoren könnten in dem Sinne mißverstanden werden, dass die durch Dämmung erzielbaren Heizenergieverluste nur gering seien. Mit Bezug auf *Richter et Winkelmann-Fouad (2005)* sei darauf hingewiesen, dass die tatsächlichen Heizenergieverluste nur durch Wärmestromplatten, welche die tatsächlich transportierte Wärmeenergie messen, zuverlässig ermittelt werden können. Temperatursensoren sind während dynamischer Vorgänge dazu nicht geeignet.

Durch Kenntnis der Umgebungs- und Oberflächentemperaturen sowie des U-Werts kann der thermische Übergangswiderstand  $R_{Si}$  rechnerisch bestimmt werden.  $R_{Si}$  ist eine Größe, die in Simulationen einen nicht unerheblichen Einfluss ausüben kann. Für die Berechnung von  $R_{Si}$  wurden bestimmte Zeiträume identifiziert, in denen möglichst gleichmäßige Innen- und Außentemperaturen und wenig Strahlung vorherrschten: der 1. und 2.12.2012 (siehe Bild 78), der 21. bis 23.12.2012, der 12. bis 18.1.2013 und der 22. bis 24.3.2013. Je dynamischer das Temperaturverhalten ausfällt, desto schwieriger lässt sich  $R_{Si}$  bestimmen, da Wärmespeichereffekte den Übergangswiderstand zu sehr beeinflussen.

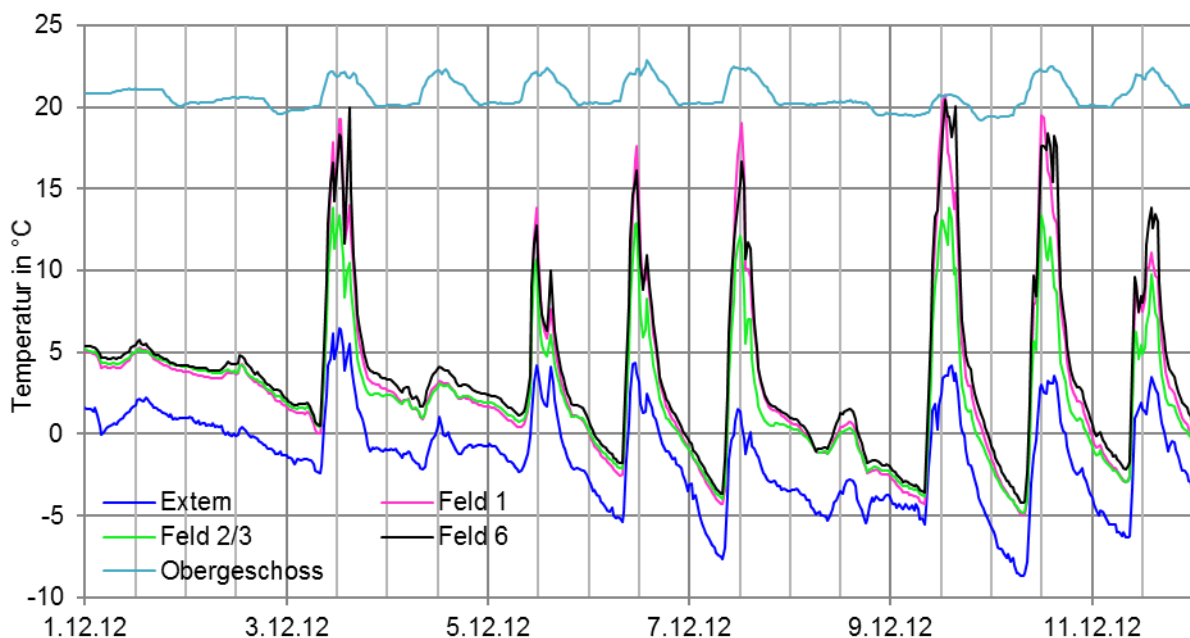


Bild 78 Verlauf der Außenoberflächentemperaturen, sowie Innen- und Außentemperatur Anfang Dezember 2012

Das Obergeschoß war während dieser Zeiträume durchgehend beheizt, wenngleich während Wochenenden mit niedrigerer Leistung, was sich in den gleichmäßigeren Temperaturen niederschlägt. Im Dachgeschoß wurde, abgesehen vom letzten Abschnitt, nur auf niedrigem Niveau geheizt. Mit Hilfe der Formel

$$R_{si} = \frac{\theta_i - \theta_{si}}{(\theta_i - \theta_e) \cdot U} \quad (12)$$

kann der innere thermische Übergangswiderstand berechnet werden. Als Zahlgrundlage dienten gemessene Stundenwerte, die über die genannten Zeitabschnitte gemittelt wurden.

Tab. 19 Gemittelte innere, thermische Übergangswiderstände in [m<sup>2</sup>K/W] während verschiedener Zeitabschnitte sowie Temperaturdifferenz zwischen Außenklima und Innenraum im Obergeschoß

Zeitabschnitt	Feld 1 Zellulose	Feld 3 Dämmputz	Feld 4 Holzfaserpl.	Feld 5 Schilf	Feld 6 ungedämmt	Temperaturdifferenz
1.-2.12.12	0.10	0.09	0.13	0.11	0.11	20.6
21. - 23.12.12	0.13	0.11	0.17	0.14	0.16	21.6
12. - 18.1.13	0.15	0.13	0.20	0.17	0.19	24.1
22. - 24.1.13	0.14	0.13	0.17	0.15	0.18	22.0
Durchschnitt	0.13	0.12	0.17	0.14	0.16	

Es wurde festgestellt, dass es für die Übergangswiderstände unwichtig war, ob im Innenraum tagsüber stärker geheizt wurde oder nicht. Entscheidender war die Differenz zwischen Außen- und Innentemperaturen (letzte Spalte in Tab. 19). Hier ist eine eindeutige Korrelation zu erkennen: höhere Temperaturunterschiede, wie zwischen dem 12.1. und 18.1.2013, verursachen einen höheren Übergangswiderstand. Weiterhin auffallend sind die höheren Übergangswiderstände in Feld 4 (Holzfaserdämmplatten) und im Referenzfeld 6. Offenbar ist gerade in Feld 4 eine geringere Strömungsgeschwindigkeit vorhanden, wofür die veränderten Strömungsverhältnisse im Umfeld des Fensters verantwortlich zeichnen. Es wird vermutet, dass die Fensterlaibung den nur ein wenig unterhalb der Decke platzierten Sensor eher von Luftbewegungen abschirmt denn darin mit einbezieht. Die Erwartungshaltung für Feld 6 ist ein niedrigerer Widerstand: höhere Temperaturdifferenzen zwischen Raum und Oberfläche bewirken eine höhere Strömungsgeschwindigkeit und damit einen niedrigeren Widerstand. Für den höheren Übergangswiderstand in diesem Feld wird als Ursache die Lage im Raum vermutet, sowie, dass die Oberflächentemperatur über die gesamte Raumhöhe gleichmäßiger verläuft.

Da in *DELPHIN* derzeit noch keine dynamischen Übergangswiderstände vereinbart werden können, wurde für das Obergeschoß für jedes Feld der Mittelwert aus obiger Tabelle übernommen. Im Dachgeschoß wurden keine Oberflächentemperaturen gemessen. Auf Basis der vorherigen Schlussfolgerungen wird deshalb wegen der niedrigen Raumtemperaturen jeweils der Wert aus der ersten Zeile übernommen.

### 5.8.2 Temperaturen auf der Außenoberfläche

Die Montage und Inbetriebnahme der Sensoren auf der Außenoberfläche erfolgte nachträglich im April 2011. Sie wurden, mit Ausnahme der Außentemperatur, nicht nur von der Innendämmung beeinflusst. Einen weitaus stärkeren Einfluss übten tagsüber die Sonneneinstrahlung sowie weitere Faktoren wie die Verschattung durch Vegetation, die Oberflächenfarbe und in geringerem Ausmaß die Schmuckelemente der Fassade aus.

In der Schönbrunnungasse 30 waren die Sensoren wegen der aufwändigen Fensterverkleidung ungefähr 0,9 m unterhalb der Innenoberflächen-Temperaturmessfühler, und nur ca. 0,4 m über der Unterkante der Dämmfelder fixiert, sodass der nicht gedämmte Bereich im Obergeschoß die gemessenen Außenoberflächentemperaturen ebenfalls etwas beeinflussen kann.

Anhand Bild 79 ist zu sehen, dass die Sensoren auf zwei unterschiedliche Konstruktionen der Bestandswand angebracht worden sind. Unter den Balken 3 (Perlitedämmplatte) und 4 (Wärmedämmputz), sowie den Balken 6 und 7 (Schilf) waren die Fensteröffnungen nachträglich vermauert worden. Die Annahme liegt nahe, dass diese Ziegel andere Eigenschaften aufweisen wie die originalen Mauerwerksziegel. Eine Auswertung der Messwerte sollte ungefähre Rückschlüsse darauf zulassen, welche Art von Ziegeln verarbeitet worden sind, weil die Sensoren im Feld 1 und 2(/3) recht nahe beieinanderlagen und der Wärmewiderstand der zwei Dämmsysteme, im Gegensatz zum ungedämmten Feld 6, sehr ähnlich ist.



Bild 79 Positionen der Oberflächentempersensoren auf der nach Südwestsüd ausgerichteten Außenwand

Dass solche Einflüsse vorhanden sein müssen, ist an den großen Unterschieden in den Tageshöchsttemperaturen zu sehen (Bild 80). Die Temperaturen am Sensor in Feld 3 waren grundsätzlich niedriger, was zum Großteil an dem unterschiedlichen Putz und Mauerwerksziegel liegen muss, schließlich wiesen die Wärmewiderstände der Felder 1 bis 3 ungefähr in dieselbe Größenordnung auf.

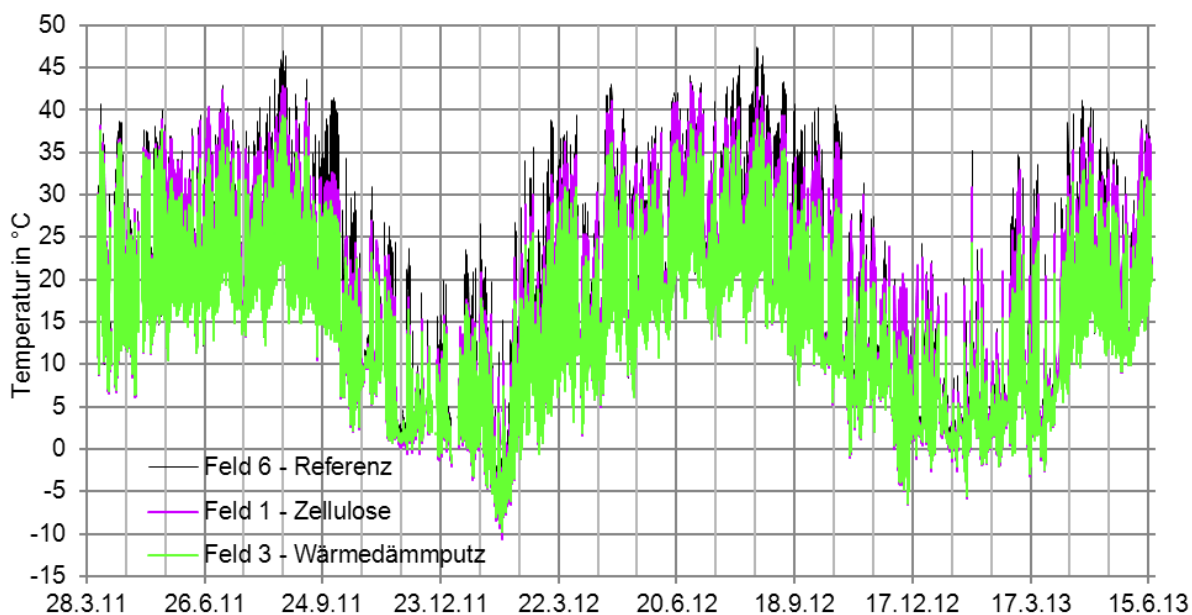


Bild 80 Verlauf der Außenoberflächentemperaturen

Während der Sommermonate, wenn Innendämmkonstruktionen generell nur sehr geringen Einfluss auf die Außenoberflächentemperaturen ausüben, waren die Nachttemperaturen zwischen den einzelnen Messpositionen fast identisch und unterschieden sich um weniger als ein Kelvin. Im Winter, wie in Bild 78, waren die Unterschiede nur wenig größer. Bei nächtlichen Außentemperaturen unter  $-10^{\circ}\text{C}$  differierten die Oberflächentemperaturen zwischen Feld 1 und 2/3 gegenüber Feld 6 um maximal 2 Kelvin, wobei es im ungedämmten Feld 6 immer am wärmsten war. Aus dem in Bild 78 gezeigten Ausschnitt lassen sich verschiedene Dinge schließen:

- Die Innenraumtemperatur hatte nur einen untergeordneten Einfluss auf die äußere Wandoberflächentemperatur: Im Vergleich vom 4.12. und 8.12 zeigt sich, dass trotz der höheren Temperaturen im Innenraum am 4.12. die Oberflächentemperaturen nicht stärker ansteigen wie am 8.12.
- Nicht die Art der Ziegel im ausgemauerten Fenster, sondern die Putzoberfläche und womöglich auch die Lage des Sensors (etwas stärkere Abschattung durch Schmutzelemente) waren dafür verantwortlich, dass die Temperaturen in Feld 2/3 tagsüber während nennenswerter Sonneneinstrahlung auffallend niedriger verliefen: an Tagen quasi ohne Sonneneinstrahlung (1., 2. und 8.12.) bewegten sich die Temperaturen auf den beiden gedämmten Feldern nahezu deckungsgleich, bei hoher Sonneneinstrahlung verliefen die Temperaturen in Feld 2/3 dagegen viel niedriger.
- Die Sensoren in den Feldern 1 und 2/3 wurden wegen der tiefer stehenden Sonne und trotz „fehlendem“ Laub stärker vom Baum verschattet: vor allem am 9. und 10.12. aber auch am 7.12. fiel die Temperatur gleich nach 12 Uhr schnell ab, während sie im Feld 6 länger auf einem höheren Niveau verblieb.



- Der Ziegel, der zum Ausmauern der Fensteröffnung verwendet wurde, besitzt ungefähr denselben Wärmewiderstand wie der Bestandsziegel bzw. könnte er auch etwas niedriger sein: die Temperaturen verlaufen nicht nur im in Bild 78 gezeigten Abschnitt nachts im Winter sehr ähnlich. Zeitweise sanken die Temperaturen in Feld 1 um bis zu 0.5 Kelvin unter die in Feld 2/3, was jedoch auch an dem höheren Wärmewiderstand in Feld 1 (0,316 m<sup>2</sup>K/W) im Vergleich zum gemittelten Wärmewiderstand der Felder 2 und 3 (0,339 m<sup>2</sup>K/W, der Sensor liegt zwischen den beiden Feldern) lag.

Ähnlich wie in Abschnitt 5.8.1 wurde versucht, mit Hilfe der Temperaturen während sonnenarmer, gleichmäßig warmer Tage die thermischen Übergangskoeffizienten zu berechnen. Dafür wurden zwei Abschnitte, der 19.11. bis zum 23.11.2011 und der 12.1. bis zum 17.1.2013, genauer betrachtet.

Tab. 20 Gemittelte äußere, thermische Übergangswiderstände während verschiedener Zeitabschnitte sowie Temperaturdifferenz zwischen Außenklima und Innenraum im Obergeschoß (in m<sup>2</sup>K/W)

Zeitabschnitt	Feld 1 Zellulose	Feld 2/3 Dämmputz	Feld 6 ungedämmt	Temperaturdifferenz
19. bis 23.11.11	0.44	0.45	0.26	25.9
12. bis 17.1.13	0.44	0.42	0.25	24.1
Durchschnitt	0.44	0.44	0.26	

Die berechneten äußeren Übergangswiderstände liegen allerdings fern jeder Erfahrung. Der in Normen und Richtlinien üblicherweise angenommene Richtwert von 0,04 m<sup>2</sup>K/W (bzw. 0,06 m<sup>2</sup>K/W) für den äußeren Wärmeübergangswiderstand ist um das 10-fache niedriger wie der hier berechnete! Die naheliegende Begründung war anzunehmen, dass die Messwerte nicht korrekt sind. Da die drei Oberflächentemperaturen prinzipiell plausible Werte und ähnliche Verläufe aufwiesen wurde vermutet, dass der Außentemperatursensor nicht richtig kalibriert oder nicht fachgerecht verbaut wurde. Deshalb wurde die in der Schönbrunnngasse 30 gemessene Außentemperatur mit der „offiziellen“ Außentemperatur der ARAD-Messstelle an der KFU Graz verglichen. Diese verlief nur um einen knappen Kelvin höher, weshalb die berechneten Wärmeübergangswiderstände zwar etwas niedriger wären, jedoch kaum weniger überzeugend. Zudem ist der festgestellte Temperaturunterschied der beiden Messstellen trotz der geringen geographischen Entfernung durchaus einleuchtend, schließlich befindet sich der Messfühler an der KFU Graz etwas niedriger sowie in einer zentraleren Stadtlage. Dass alle Oberflächentemperatursensoren falsch kalibriert oder angebracht worden sind, wurde angesichts der Erfahrung der Beteiligten und aufgrund der Menge der Sensoren ausgeschlossen. Vermutlich waren der Einfluss der Strahlung bzw. der fehlende Schutz davor ursächlich für die unsinnigen Werte.

Die berechneten, wenig überzeugenden, äußeren Wärmeübergangswiderstände müssen deshalb zunächst so hingenommen werden, ehe sie mit dem Mittel der Simulation überprüft werden können.

## 5.9 Temperatur- und Feuchteprofile an den Balken

Im Sinne einer zugänglicheren Interpretation der Messdaten sind in diesem Kapitel die Außentemperatur und die Raumlufffeuchte im Obergeschoß in transparenten Farben mit angegeben. Bei allen Kurven handelt es sich um Stundenwerte. Aufgrund der jeweils zwei Diagramme und der Länge der dazugehörigen Diskussion sind die Diskussion jeweils links und die Diagramme jeweils rechts abgebildet. Dies erleichtert das Nachvollziehen, verursacht jedoch Leerzeilen.

### 5.9.1 Profile in Feld 1 an Balken 1 und 2 - Zellulose

Im ersten Winter 2010/11 herrschten an der Oberfläche der Bestandswand noch ähnliche Temperaturen wie im äußeren Bereich des Balkenaufagers, in Bild 81 lassen sie sich kaum unterscheiden. Deutlich abgesetzt davon bewegten sich die Temperaturen an der Balkenwange um bis zu 6 K höher. Dies kann durch die Einbaufeuchte induziert worden sein, welche durch die höhere Wärmeleitfähigkeit der feuchten Zellulose den Sensor in der Balkenwange etwas mehr erwärmte. Schließlich waren die Unterschiede im zweiten und dritten Winter weniger deutlich. Die niedrigste Temperatur beträgt  $-4,7^{\circ}\text{C}$ .

Innerhalb der Balkentasche kam es im zweiten Winter trotz eines geringeren Temperaturunterschiedes (Bild 81) zu größeren Abweichungen der Luftfeuchte (Bild 82). Während an der Balkenwange noch unter 80 % Luftfeuchte vorherrschten, hatte sich z. B. im Februar 2012 schon Tauwasser am äußeren Ende der Balkentasche gebildet. Der Wasserdampf akkumulierte offenkundig bei sehr kalten Außentemperaturen nahe der Außenoberfläche, während an der Balkenwange noch eine unauffällige Luftfeuchte registriert wurde. Im Winter 2012/13 war dieses Verhalten durch die hohe Raumfeuchtelast noch ausgeprägter zu beobachten. Die Austrocknungsphase begann um die beiden Luftfeuchtefühler auf der Bestandskonstruktion im Frühjahr 2011 um einen Monat verzögert. Ab Juni 2011 verliefen beide Sensoren nahezu synchron. In der zweiten und dritten kalten Witterungsperiode trat, zeitgleich mit der Auflagertaschenaußenseite, auch an der Grenzfläche zwischen Dämmsystem und Bestand Kondensat auf. Anders als auf der Grenzschicht zwischen Dämmung und Bestandsoberfläche konnte sich an der Balkenaufageraußenseite im Februar 2012 tatsächlich Eis gebildet haben. Hier handelt es sich um eine Materialoberfläche, an der sich Tautropfen bei Temperaturen unter  $0^{\circ}\text{C}$  zu Eis umformen können. Eisbildung in Konstruktionen kann nur mit einer aufwändigen Messsensorik nachgewiesen werden. Eine Schadenswirkung ist an dieser Stelle allerdings nicht vorhanden. Sobald es wieder auftaut, kann das Flüssigwasser von dem saugfähigen Mauerwerk aufgenommen und verteilt werden.

Der Streichbalken wies eine im Vergleich etwas erhöhte Anfangsfeuchte auf, die im Verlauf des ersten Sommers auf 12 M% Holzfeuchte absank und sich im Weiteren gleichmäßig und von der zwischenzeitlich hohen Raumlufffeuchte scheinbar unbeeindruckt zwischen 12 und etwas mehr als 15 M% bewegte.

Angaben zu den Genauigkeiten der einzelnen Messsensoren waren in Tab. 2 (Kapitel 3.5) aufgeführt.

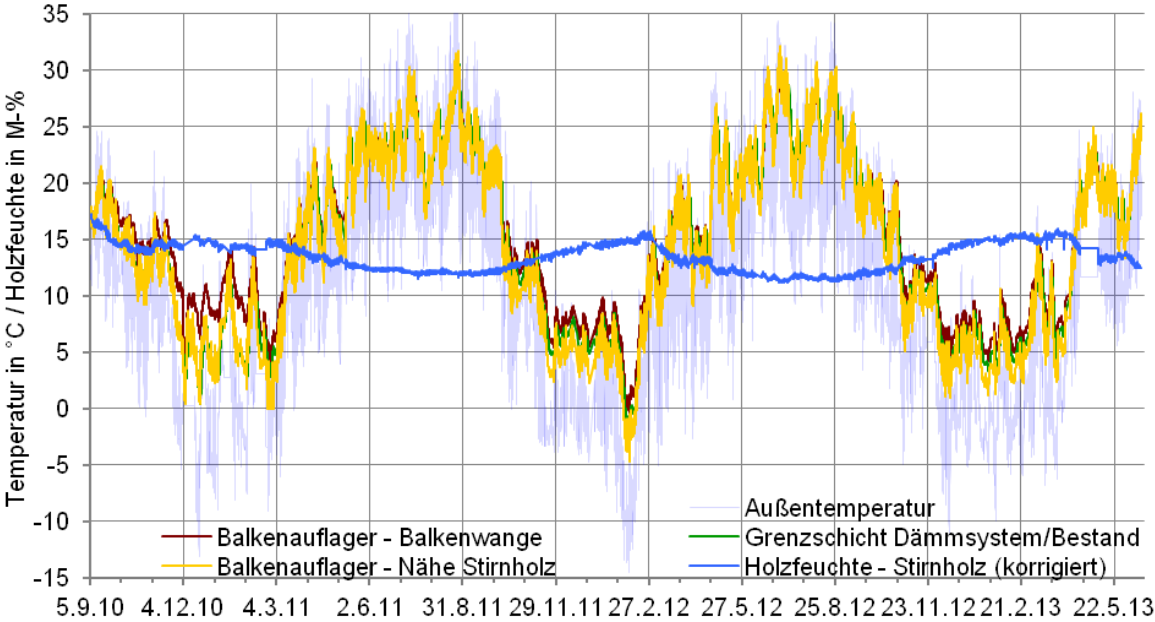


Bild 81 Stundenwerte der Temperaturen und der temperaturkorrigierten Holzfeuchte an Balken 1

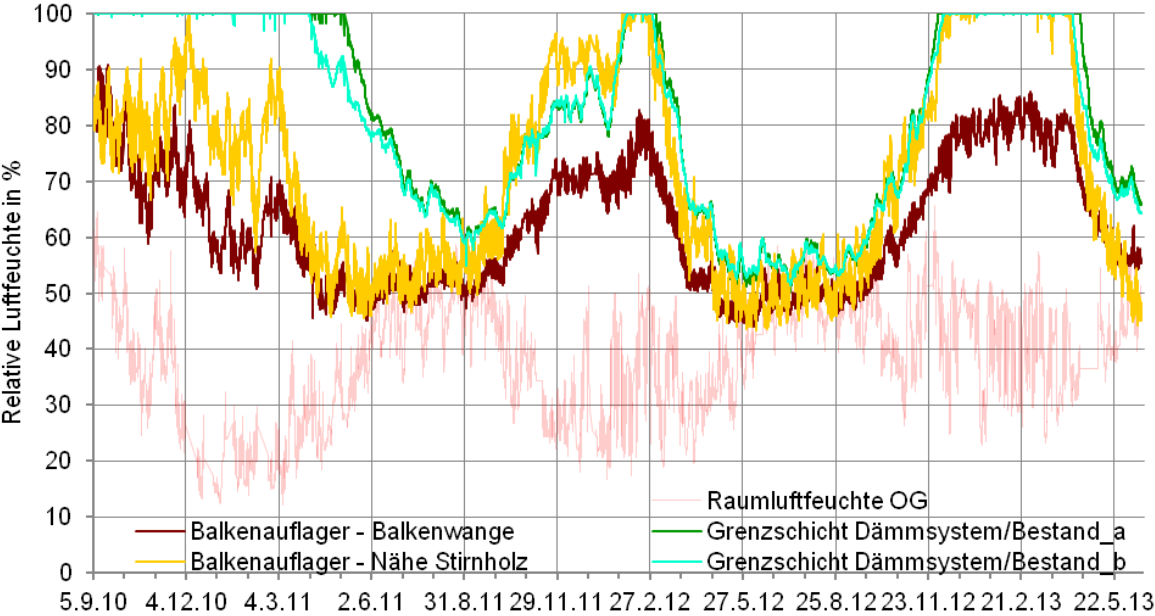


Bild 82 Stundenwerte der relativen Luftfeuchte an Balken 1

Wie schon am Streichbalken unterschieden sich die Temperaturkurven an der Balkenwange bei niedrigeren Außentemperaturen im ersten Winter mehr als in der zweiten Kondensationsperiode (Bild 83). Im Auflager des zweiten Balkens wurden nahe der Außenoberfläche minimal  $-4,0^{\circ}\text{C}$  erreicht. Da es im letzten Winter 2012/2013 zu keiner ausgeprägten Kältephase wie im Februar 2012 kam, sanken die Temperaturen nicht unter  $2^{\circ}\text{C}$ . Typisch für winterliche Verhältnisse scheinen Temperaturen zwischen  $2$  und  $10^{\circ}\text{C}$  zu sein. Die Sensoren auf der Grenzfläche zwischen Dämmsystem und Bestand fielen schon ab November 2010 aus.

An Balken 2 ist die durch das Aufbringen des Oberputzes eindringende Feuchte Anfang November 2011 gut erkennbar (Bild 84, grün und hellblau): Beide Luftfeuchtesensoren auf der Bestandsoberfläche maßen  $100\%$  Luftfeuchte. Die Darstellung aller Profile macht allerdings auch deutlich, dass der hellblaue Luftfeuchte-Sensor angesichts des häufig hohen und sehr unruhigen Verlaufs von Beginn an defekt war (Bild 60). Die zwei folgenden Kondensationsphasen im Februar 2012 und Winter 2012/13 deckten sich wieder gut mit den Perioden hoher Luftfeuchte am äußeren Ende des Balkenaufagers. Trotz Einbaufeuchte und der längeren Phase hoher Feuchte am Luftfeuchte-Sensor kam es am Ende der Balkentasche im ersten Winter dagegen „nur“ zu  $98\%$  Luftfeuchte. Die Einbaufeuchte durch Dämmung und Putz zu Projektbeginn übte demnach einen geringeren Einfluss als die hohe Raumluftfeuchte aus. An der Balkenwange werden  $80\%$  Luftfeuchte während der gesamten Messdauer nur sporadisch überschritten.

Auf die Bildung von Tauwasser im Februar 2012 reagierte die temperaturkorrigierte Holzfeuchte an der nassesten Stelle um ca. 2 Wochen zeitversetzt mit einer Erhöhung von ungefähr  $1\text{ M}\%$ . Zwischen den Winterperioden 2011/12 und 2012/13 stieg die Luftfeuchte trotz hoher Raumluftfeuchten kaum an, um ca.  $0,5\text{ M}\%$ . Ein Zusammenhang zwischen der maximalen Holzfeuchte Ende Februar 2012 und den niedrigen Außentemperaturen wird nicht vermutet, da beide Ereignisse um ca. drei Wochen zeitversetzt auftraten. Maximal wurden ungefähr  $15,5\text{ M}\%$  Holzfeuchte gemessen.

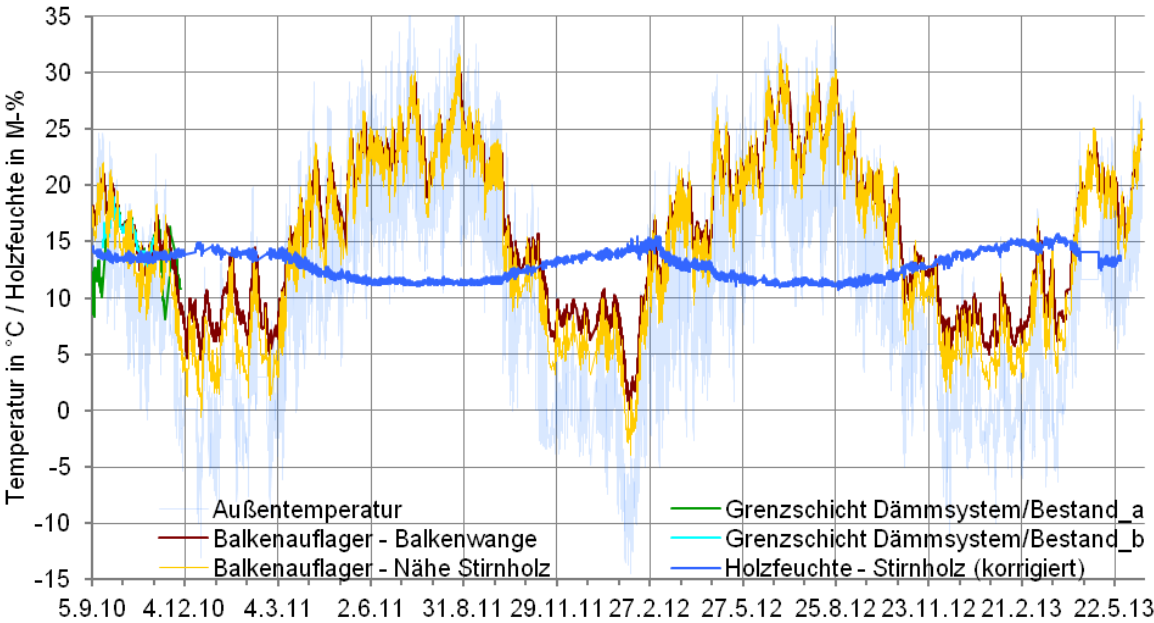


Bild 83 Stundenwerte der Temperaturen und der temperaturkorrigierten Holzfeuchte an Balken 2

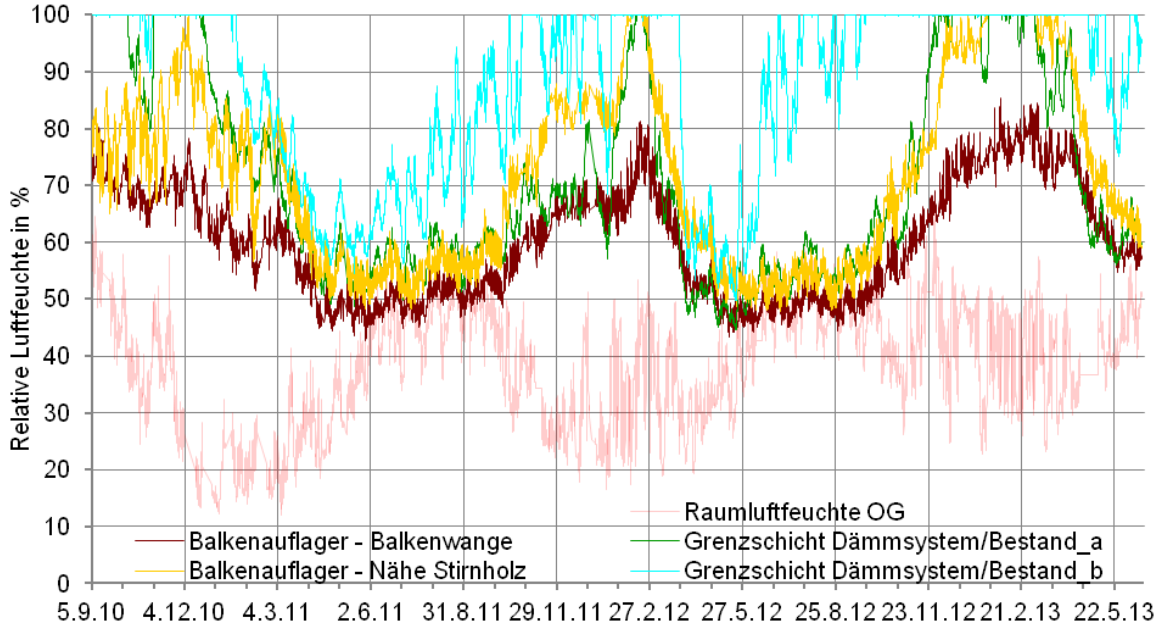


Bild 84 Stundenwerte der relativen Luftfeuchte an Balken 2

### 5.9.2 Profile in Feld 2 an Balken 3 - Perliteplatte

Um den dritten Balken trat eine analoge Temperaturentwicklung wie bei Balken 2 in Feld 1 auf (Bild 85): Bis auf sehr kalte Witterungsperioden verliefen die Temperatursensoren in der Klebemörtelschicht fast deckungsgleich mit den Messfühlern im Balkenaufleger und werden deshalb größtenteils verdeckt (grün und hellblau). Trotz des hohen Wärmewiderstands der Innendämmung betrug die Minimaltemperatur am Stirnholz nicht weniger als  $-2,2^{\circ}\text{C}$ , da diese Balkentasche nicht so tief ist.

Auf der kalten Seite der Innendämmung (Bild 86, grün und hellblau) verblieb bis Anfang Oktober 2010 Flüssigwasser. Nach dem zügigen Abtrocknen folgte ein unproblematischer Luftfeuchteverlauf, im zweiten Winter werden 90 % Luftfeuchte von einem Messfühler nur für einige Tage überschritten. In der Kondensationsperiode 2012/13 bewegte sich derselbe Sensor häufiger über 90 bis maximal 94 % Luftfeuchte, der zweite Sensor blieb unter 90 % Luftfeuchte. Anders als in den Auflagern des ersten Zellulose-Feldes stieg die Feuchtebelastung hinter der Perliteplatte nicht so hoch wie am Stirnholz im Balkenaufleger. Dort verlaufen beide Luftfeuchtesensoren nahezu synchron, nur bei Luftfeuchten ab 80 % Luftfeuchte wichen sie um bis zu 5 % ab. An der Stirnseite der Balkentasche kam es im Februar 2012 fast zu Kondensatausfall, 100 % wurden aber ebenso wenig wie im folgenden Winter gemessen (Bild 86, gelb). An der Balkenwange wurden wieder nur ca. 80 % erreicht.

An Balken 3 kann ein gleichmäßiger Holzfeuchteverlauf mit maximal 16,2 M% (temperaturkorrigiert) im Februar 2012 beobachtet werden (Bild 85, blau). Hier beeinflusste die Raumluftfeuchte die Holzfeuchte stärker als in Feld 1 mit Zellulose: In den drei aufeinanderfolgenden kalten Witterungsperioden wuchs mit der Raumluftfeuchte die maximale Holzfeuchte von 14,1 über 15,5 auf 16,2 M% Holzfeuchte sukzessive an. Wie schon an Balken 2 war der Holzfeuchteverlauf im zweiten Winter zwar etwas höher, während des Sommers ist kein Unterschied zum Verlauf des ersten Sommers zu sehen was bedeutet, dass das etwas höhere Feuchteniveau im Balken problemlos austrocknen konnte.

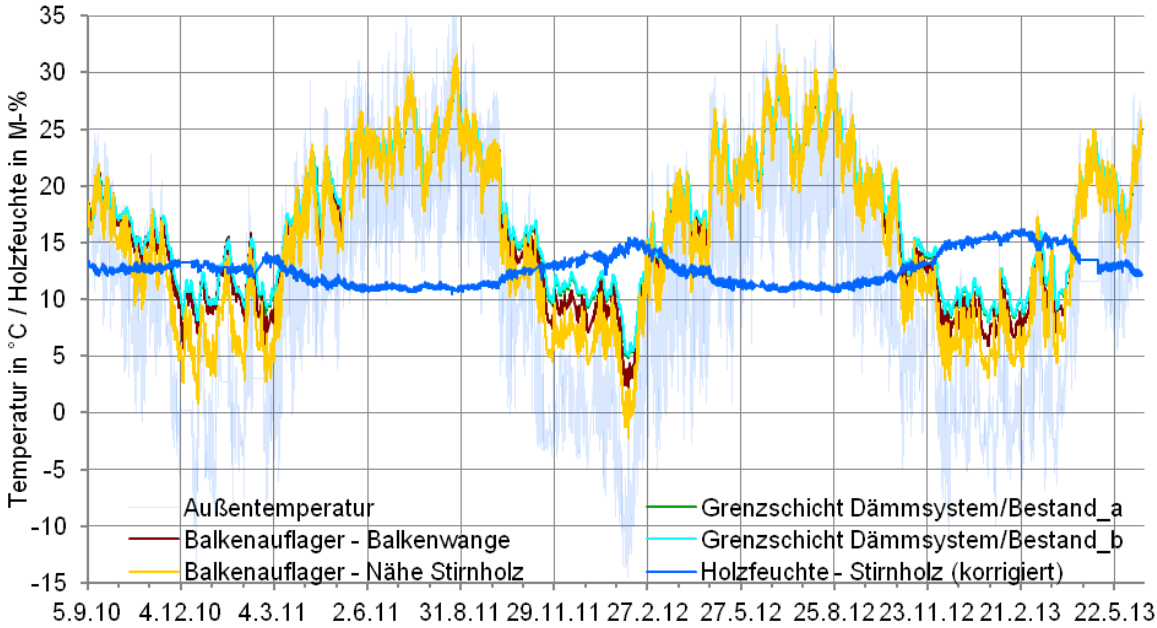


Bild 85 Stundenwerte der Temperaturen und der temperaturkorrigierten Holzfeuchte an Balken 3

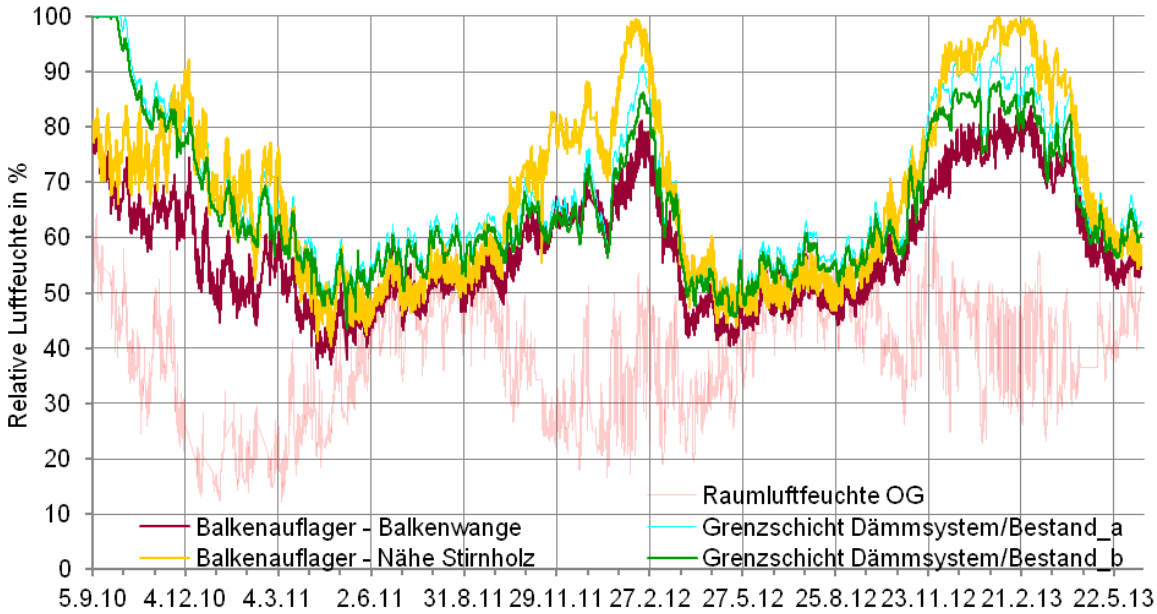


Bild 86 Stundenwerte der relativen Luftfeuchte an Balken 3

### 5.9.3 Profile in Feld 3 an Balken 4 - Wärmedämmputz

Abweichend von den bisher beschriebenen thermischen Verhältnissen an den Deckenbalken wichen die Temperaturen in der Klebemörtelschicht nicht nur bei sehr tiefen Außentemperaturen unter  $-5^{\circ}$  bis  $-10^{\circ}\text{C}$  von dem Sensor an der Balkenwange ab, sondern verliefen schon im Herbst weit darüber (Bild 87, grün und hellblau). Der geringere Wärmewiderstand der Dämmung begünstigte dieses Verhalten, weil dadurch eine gleichmäßigere Temperaturverteilung in Wandquerschnitt und Auflager hervorgerufen wurde. Die niedrigste Temperatur in der Nähe des Stirnholzes betrug  $-1,6^{\circ}\text{C}$ . Der Unterschied zwischen den Temperaturfühlern im Auflager war geringer.

Auch an Balken 4 entstand weder im zweiten noch im dritten Winter Tauwasser an den Außenflächen der Auflagertasche (Bild 88, gelb). Nachdem sie im Winter 2011/12 noch ähnlich hoch wie im Feld der Perliteplatte verlief (Bild 86), sank die Luftfeuchte demgegenüber im letzten Winter sogar ab. Die Luftfeuchte an der Balkenwange (braun) war wieder durch einen unproblematischen Verlauf gekennzeichnet. In Bild 88 ist nur einer der beiden defekten Luftfeuchtesensoren (grün) abgebildet.

Die Kurve der Holzfeuchte in Bild 87 entwickelte sich spiegelbildlich zur Kurve in Bild 85. Während die Holzfeuchte im Feld der Perliteplatte von Winter zu Winter mit der Feuchtebelastung aus dem Raum anstieg, sank die (temperaturkorrigierte) Holzfeuchte von maximal 19,2 über 16,4 auf 15,2 M% ab. Zusammen mit dem Gang der Luftfeuchte im Luftspalt um den Balkenkopf (Bild 88) lässt sich konstatieren, dass der Einsatz von Wärmedämmputz nach dem Abtrocknen der Einbaufeuchte im Vergleich der Dämmsysteme tendenziell unkritischere Verhältnisse im Balkenaufleger verursachte, schließlich unterschieden sich die sonstigen konstruktiven Randbedingungen nicht sehr (Tab. 30, Tab. 3). Einschränkend muss hinzugefügt werden, dass der Anschluss des Balkenauflegers im Dachgeschoß zu Projektbeginn nicht genau dokumentiert wurde. Unter Umständen wirkte sich die konstruktive Detailierung im vierten Auflager günstiger auf die hygrothermischen Verhältnisse aus als in den anderen, z. B. dem dritten Auflager mit den Perliteplatten.



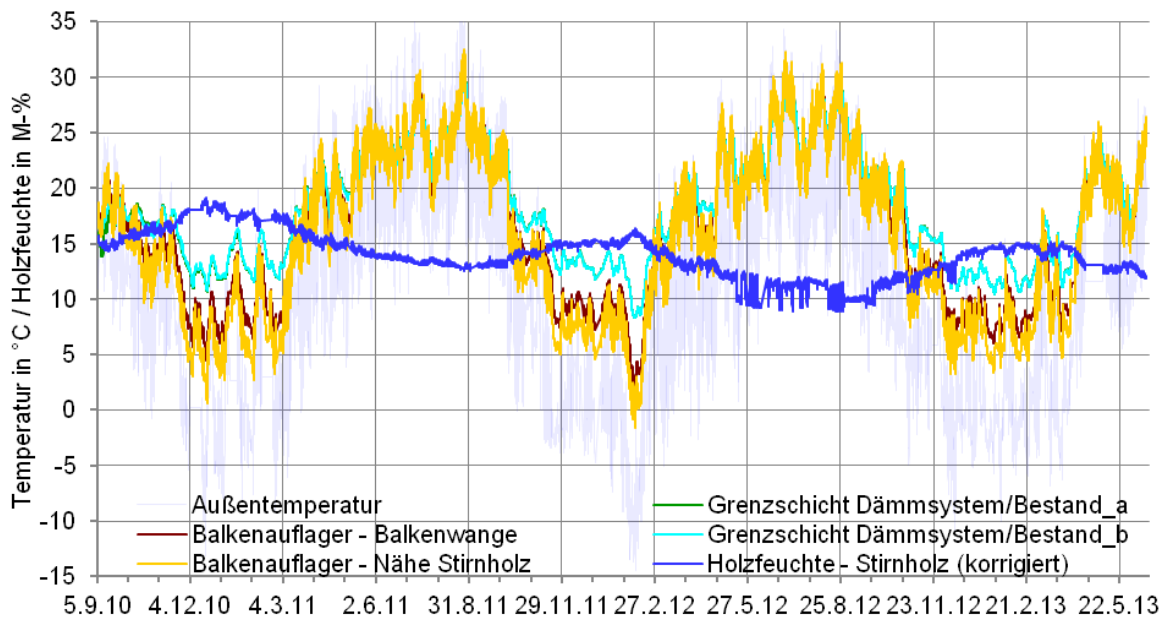


Bild 87 Stundenwerte der Temperaturen und der temperaturkorrigierten Holzfeuchte an Balken 4

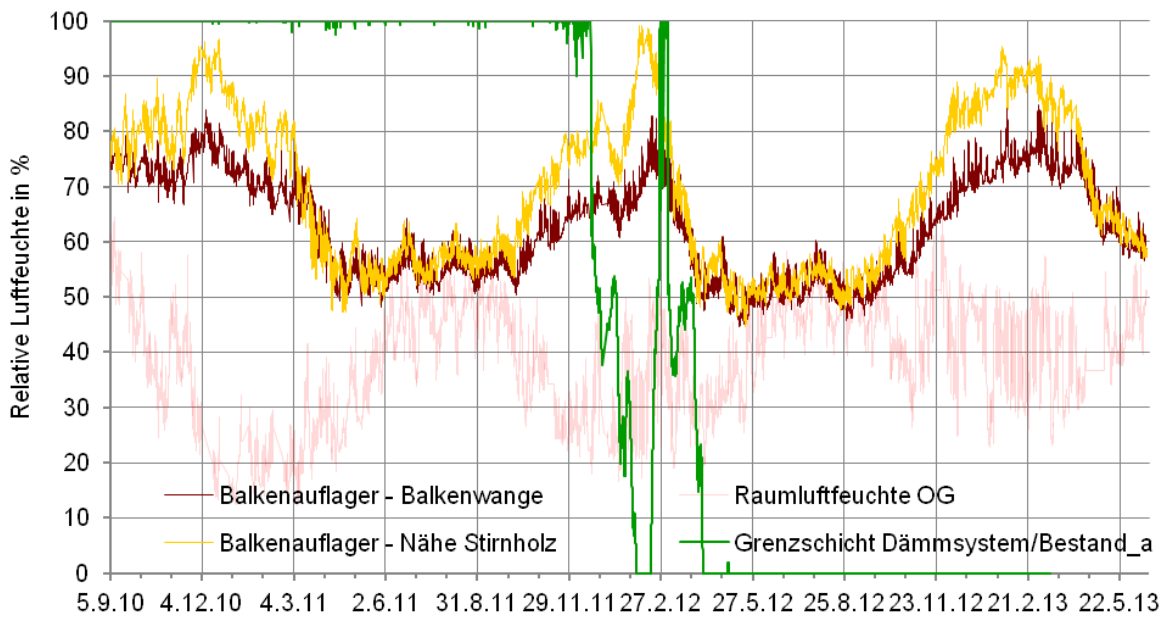


Bild 88 Stundenwerte der relativen Luftfeuchte an Balken 4

#### 5.9.4 Profile in Feld 4 an Balken 5 - Holzweichfaser

Wie auch schon in Feld 3 (Balken 4, Wärmedämmputz), in welchem die Dämmung ebenfalls über eine geringere Dämmwirkung verfügte, wichen auch die Temperatursensoren hinter der Holzweichfaserdämmung (Bild 89, grün und hellblau) stärker von dem Fühler an der Balkenwange ab als an den Balken 1 bis 3, ebenso bedingt durch die Auflagergeometrie und den geringeren Wärmewiderstand der Dämmung sowie durch die Nähe zur Fensteröffnung. Im kompaktesten Balkenaufleger (Tab. 30) differierten die Temperaturen nur wenig. Die niedrigste Temperatur wurde im Februar 2012 mit 0,7°C gemessen. Neben den erwähnten kompakten Auflagerdimensionen wird dieses Auflager durch die Wärmebrücke über dem außen sitzenden Kastenfenster begünstigt.

Beide Luftfeuchtesensoren im Lehmkleber stimmen sehr gut überein, ausgenommen zu Zeiten tiefer Temperaturen bzw. hoher Feuchte, und dokumentieren einen insgesamt unkritischen Luftfeuchteverlauf auf der kalten Seite der Dämmung (Bild 90, grün und hellblau), wenngleich durch die hohe Raumlufffeuchte im Winter 2012/13 immer wieder 100 % Luftfeuchte erreicht wurden. Die durch die Applikation des Oberputzes eindringende Feuchte (100 % Luftfeuchte) im November 2010 trocknete rasch wieder ab und im zweiten Winter übertraf die Luftfeuchte nur für ungefähr eine Woche 90 % relative Luftfeuchte. Der Gang der Luftfeuchte am Holzbalken war sehr niedrig. Bis auf zwei kurze Ausnahmen im Jänner und Februar 2013 überschritt keine Sensorposition 90 % Luftfeuchte. Anders als bei der Perliteplatte war die Feuchtebelastung an der Grenzfläche der Dämmung zur Bestandskonstruktion auffallend höher als im Balkenaufleger nahe der Stirnholzfläche (gelb).

Der niedrige Holzfeuchteverlauf (temperaturkorrigiert, in Bild 89 blau) wurde sicherlich durch dieselben Gründe verursacht: die dünnen Holzweichfaserplatten, welche die Bestandskonstruktion nicht so stark abkühlten wie die Zellulosedämmung oder die Perliteplatte und der nicht so tief in die Wand einbindende Balken. Dennoch war er erstaunlich niedrig: Der höchste gemessene Wert betrug 14,6 M%, im zweiten Sommer wurden unter 10 M% festgestellt. Auch hier profitierte das Dämmsystem zusätzlich von der besonderen Lage über dem Fenster.

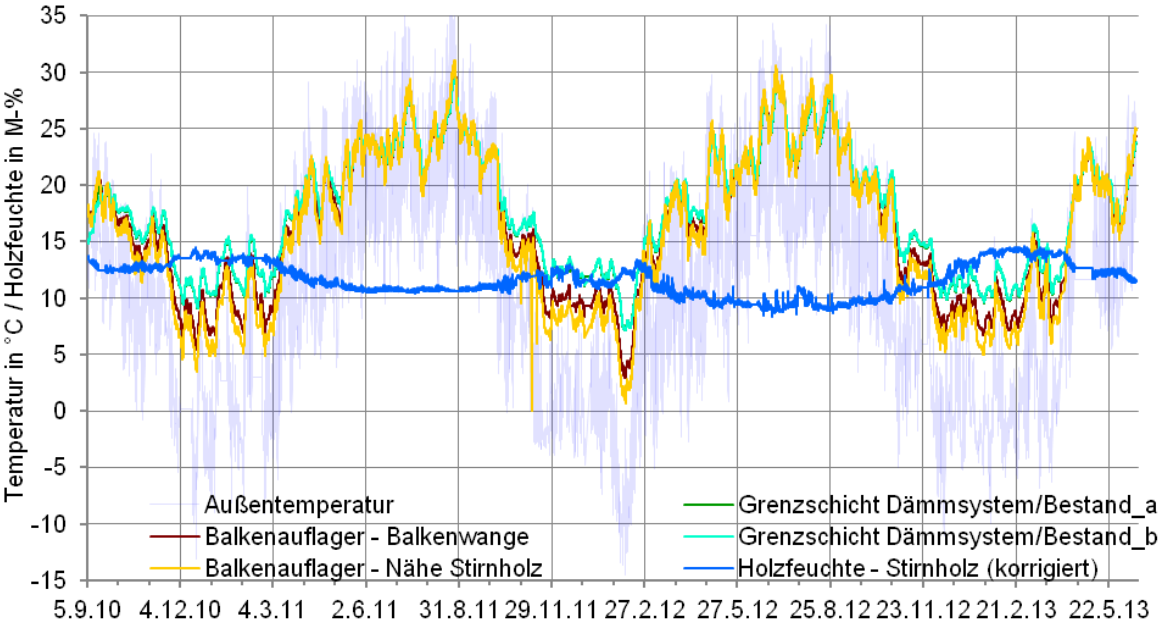


Bild 89 Stundenwerte der Temperaturen und der temperaturkorrigierten Holzfeuchte an Balken 5

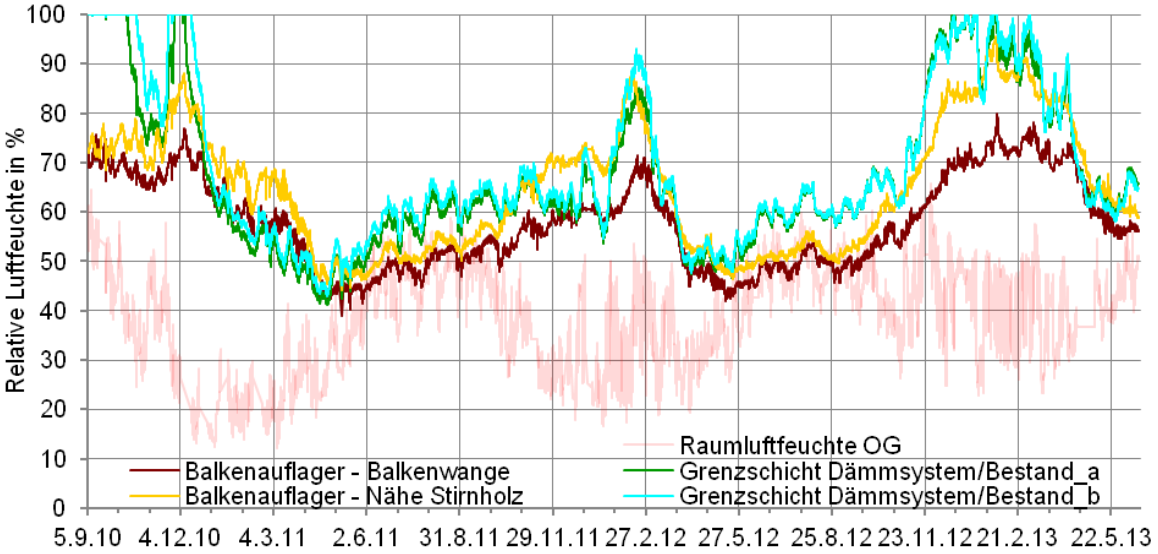


Bild 90 Stundenwerte der relativen Luftfeuchte an Balken 5

### 5.9.5 Profile in Feld 5 an Balken 6 - Schilf

Die Differenzen zwischen den einzelnen Sensoren im Balkenaufleger 6 waren ausgesprochen gering, auch bei niedrigen Außentemperaturen (Bild 91, gelb und braun) wozu die bis zu 50 mm breite Fuge durch ihre erleichterte Luftzirkulation um den Balkenkopf beitrug (Tab. 30). Leider war der Sensor in der Lehmkleberschicht nur bis Anfang Dezember 2010 funktionsfähig. Als niedrigste Temperatur war  $-0,5^{\circ}\text{C}$  registriert worden.

Im September 2010 sank die Luftfeuchte außenseitig der Schilfdämmung auf unter 100 % ab und unterschritt im November bereits 70 % Luftfeuchte, bis sie wieder wegen des angebrachten Oberputzes anstieg (Bild 92, grün). Von Ende November 2010 bis Anfang April 2011 fiel der Luftfeuchtesensor aus. Im zweiten Winter waren die Auswirkungen hoher Raumluftfeuchte Ende Dezember 2011 und im Februar 2012 im Verbund mit niedrigen Außentemperaturen gut zu sehen. Im Bereich des Lehmklebers kam es dann fast zur Bildung von Flüssigwasser. Die Kurve der Luftfeuchte stieg im letzten Winter mit dem Einschalten der Befeuchter zwar sprunghaft an, 100 % Luftfeuchte wurden jedoch nicht gemessen, obwohl der Diffusionswiderstand der 100 mm dicken Schilfdämmung nur ein wenig höher wie der der 60 mm dicken Holzfaserverplatte war. Auch sonst war ein niedriger, unproblematischer Verlauf festzustellen. Die Abweichungen zwischen den beiden Messfühlern in der Balkentasche waren nicht nur bei der Temperatur sondern auch in der Luftfeuchte geringer als beispielsweise bei den Perliteplatten. Die Situation in den Balkentaschen wird in einem folgenden Abschnitt noch näher untersucht.

Der Gang der Holzfeuchte (temperaturkorrigiert, in Bild 91 blau) war unkritisch. Wie im Feld mit der Holzfaserdämmung trocknete das Stirnholz im zweiten Sommer auf unter 10 M% ab. Der gleichmäßige Verlauf erreicht sein Maximum im Februar 2013 mit 14,6 M%.

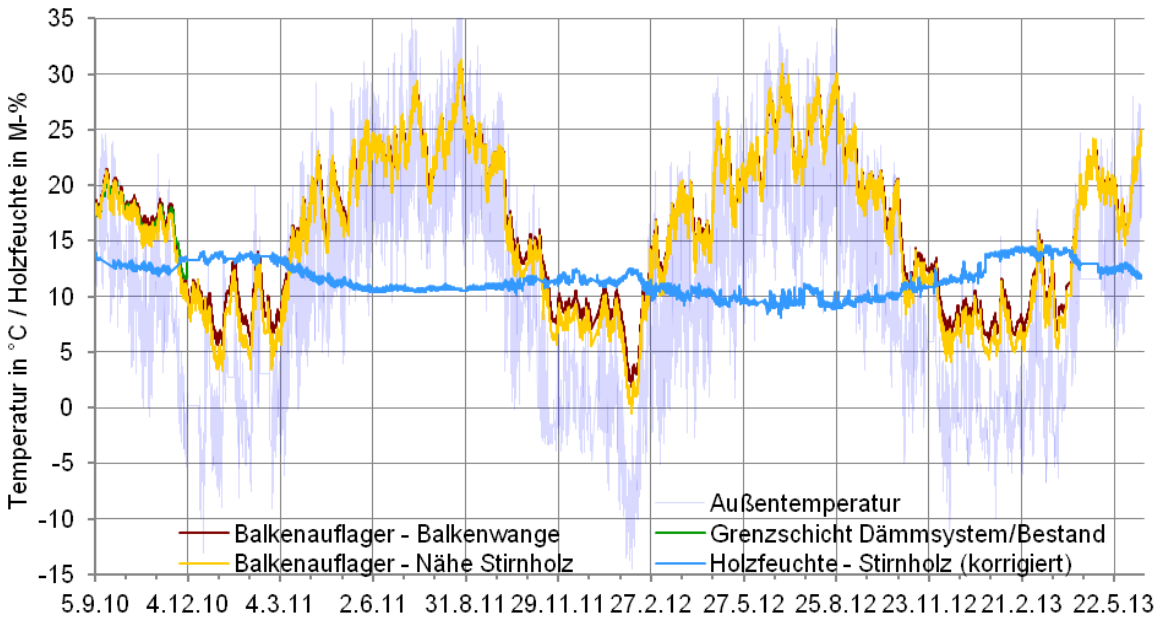


Bild 91 Stundenwerte der Temperaturen und der temperaturkorrigierten Holzfeuchte an Balken 6

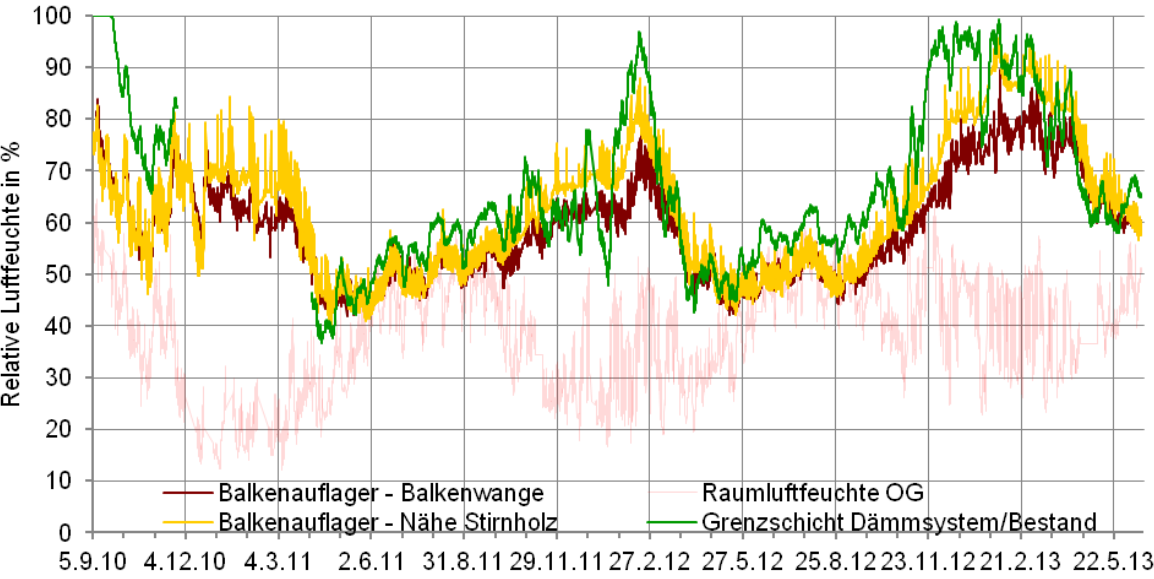


Bild 92 Stundenwerte der relativen Luftfeuchte an Balken 6

### 5.9.6 Profile in Feld 5 an Balken 7 - Schilf

Während des ersten Winters war der Abstand zwischen der Temperatur an der Grenzfläche Dämmsystem/Bestand (Bild 93, grün) und an der Balkenwange (braun) größer als in den folgenden. Der Temperatursensor in der Nähe der Stirnfläche konnte erst Anfang März 2011 aktiviert werden (gelb). Das nicht abgedichtete Balkenaufleger führte nicht zu einer „Durchlüftung“ aus dem Zwischendeckenbereich und damit zu einer homogeneren Temperaturverteilung, vielmehr war das Temperaturgefälle im zweiten Winter etwas ausgeprägter als an Balken 6 (Bild 91), insgesamt allerdings nur um ungefähr einen Kelvin höher als in dem teilabgedichteten Auflager 6. Die niedrigste gemessene Temperatur betrug im Februar 2012  $0,9^{\circ}\text{C}$ , im benachbarten Schilf-Balkenaufleger wurde als niedrigste Temperatur  $-0,5^{\circ}\text{C}$  ermittelt. Der Temperaturverlauf an Balken 6 war also etwas niedriger, obwohl der Sensor an Balken 7 ungefähr 60 mm tiefer im Mauerwerk lag (Tab. 30).

Wie schon an Balken 6 beobachtet, reagierte die Luftfeuchte am Sensor in der Lehmklebemörtelschicht schnell auf klimatische Einflüsse aus dem Raum (Bild 94, grün), im Winter 2012/13 blieb die Luftfeuchte dennoch unterhalb 96 % Luftfeuchte. Die fehlende Abdichtung des Luftspaltes um den Balkenkopf führte dazu, dass der Sensor am Ende der Balkentasche (gelb) auffällig agierte. Das wird besonders gut sichtbar im Februar 2012, als bei sehr kalten Außentemperaturen die Luft am Ende der Balkentasche ausgesprochen schnell auffeuchtete und wieder abtrocknete. Dies traf jedoch nicht auf die Luftfeuchte auf der Balkenwange zu. Wie die Temperatur war auch die Feuchte nicht gleichmäßig verteilt, sondern konzentrierte sich nahe der Außenseite: Bei hoher Raumluftfeuchte Ende Dezember 2011 wurden 90 % Luftfeuchte am Messpunkt am Stirnholz überschritten, an der Balkenwange blieb die Feuchte unter 70 %, und im Februar 2012 bildete sich für zwei Wochen Oberflächenkondensat an der Außenseite des Balkenauflegers, während in ungefähr 0,2 m Entfernung an der Balkenwange nur 80 % erreicht wurden.

Die Holzfeuchte (temperaturkorrigiert, in Bild 93 blau) stieg aufgrund der Raumfeuchtebelastung kontinuierlich an: als höchster Wert wurde im ersten Winter 13,8 M% erreicht, im zweiten Winter 14,8 M%. Wird die einbaubedingte Feuchte in Feld 3 mit Wärmedämmputz außer Acht gelassen, wurde im Februar 2013, neben dem Balken 3 (Perliteplatte), in diesem Deckenbalken die höchste Holzfeuchte mit 16,2 M% gemessen. Der Verzicht auf die Abdichtung schlug sich demzufolge in einer höheren Holzfeuchte wieder.

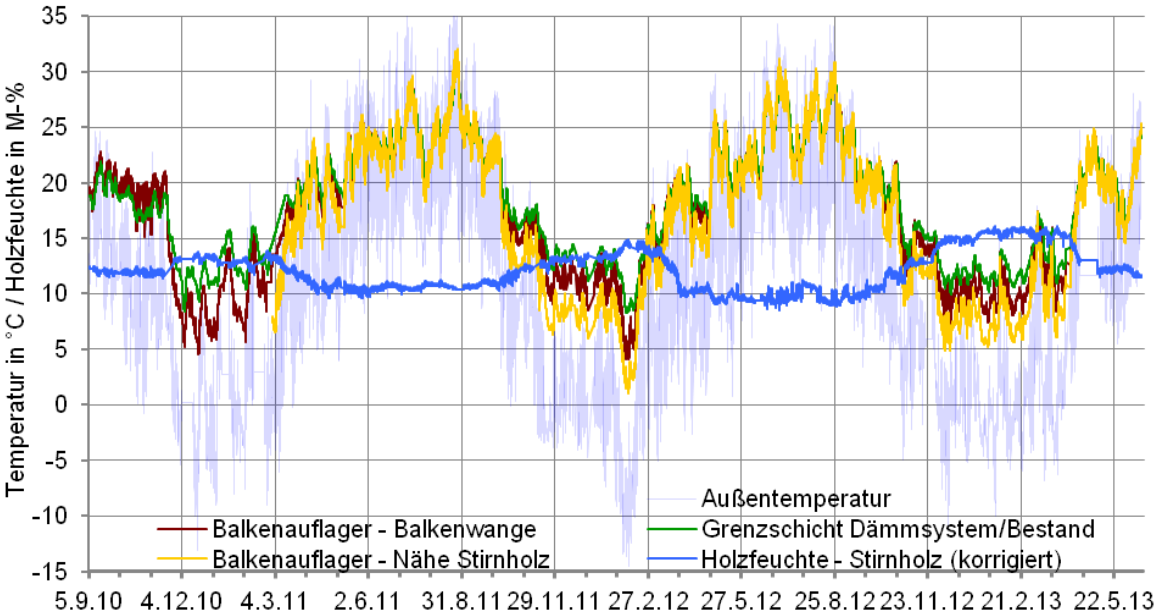


Bild 93 Stundenwerte der Temperaturen und der temperaturkorrigierten Holzfeuchte an Balken 7

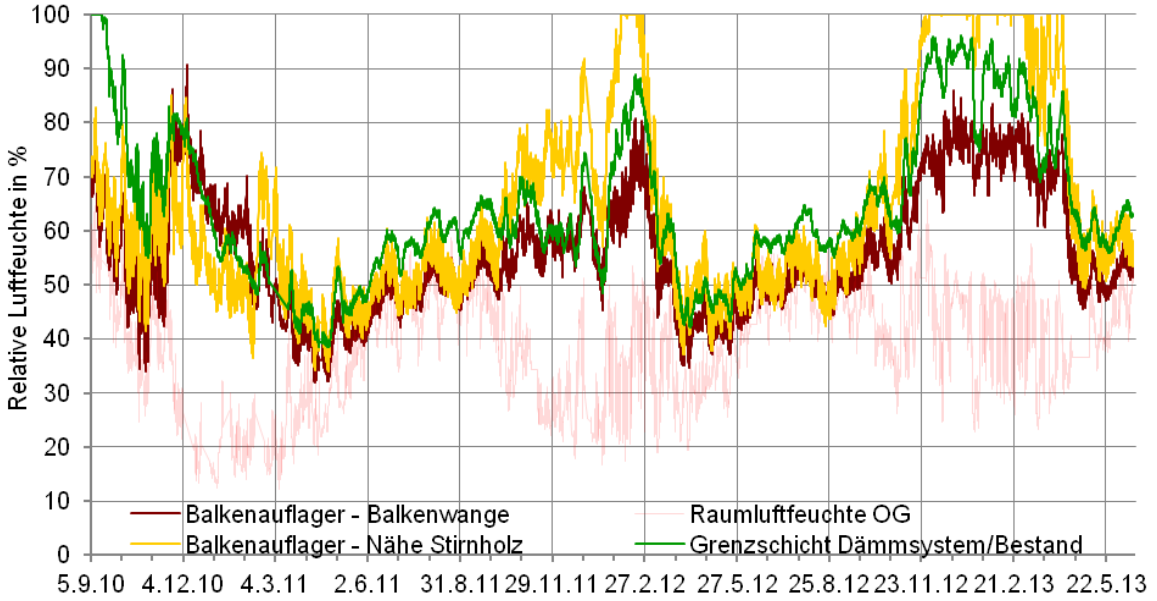


Bild 94 Stundenwerte der relativen Luftfeuchte an Balken 7

### 5.9.7 Profile in Feld 6 an Balken 8 - ungedämmtes Referenzfeld

Schon bei der Gegenüberstellung der Temperaturen in der Nähe des Stirnholzes (Bild 69) war aufgefallen, dass die Temperaturen im ungedämmten Feld ausgesprochen lebhaft verliefen, selbst im Vergleich zu Balkenaufleger 7. Durch die Darstellung der Stundenwerte in Bild 95 tritt dies noch deutlicher hervor (gelb), auch im Vergleich zur Balkenwange (braun). Besonders ausgeprägt ist dieses Verhalten im Winter. Doch auch im Sommer lässt es sich beobachten. Wegen der Auslastung der Datenlogger konnte erst durch den Defekt eines anderen Messfühlers die Temperatur an der Balkenwange ab Mai 2011 aufgezeichnet werden. Die niedrigste Temperatur war  $-2,6^{\circ}\text{C}$ , was etwas verwundert, da am ebenfalls nicht abgedichteten, aber gedämmten Balken 7  $+1^{\circ}\text{C}$  als niedrigste Temperatur verzeichnet wurden. Zu bedenken ist dabei die konstruktive Detailierung des Auflagers, bzw. reicht der Stirnholz-Sensor immerhin mit 0,38 m besonders weit in das Auflager hinein, während es am Auflager 7 0,35 m sind.

Die höchste gemessene Differenz zwischen den beiden nur knapp 0,2 m entfernten Temperaturfühlern im Auflager betrug 7,8 Kelvin im Februar 2012. Im ebenfalls nicht abgedichteten siebenten Auflager (Schilf) wurden in diesem Zeitraum nur 4,5 Kelvin registriert, im teilabgedichteten sechsten Auflager (Schilf) lediglich 2,4 K Kelvin. Hohe Temperaturunterschiede traten in den gedämmten Auflagern deshalb nicht auf, weil die Dämmung die Temperaturen in den Auflagern generell etwas stärker absenkte. An den nicht gedämmten Balken war dieser ausgleichende Effekt nicht vorhanden.

Die hohen Temperaturunterschiede waren dafür verantwortlich, dass es hier zu sehr großen Differenzen der relativen Luftfeuchte innerhalb der Balkentasche kam (Bild 96, gelb und braun). Während am Sensor an der Balkenwange (braun) nur sehr kurzzeitig im ersten Winter 70 % Luftfeuchte überschritten wurden und in den folgenden Winterperioden höchstens 75 %, bildete sich am Messfühler am Stirnholz (gelb) im zweiten Winter vereinzelt und im dritten Winter sehr häufig Oberflächenkondensat. Im Gegensatz zu dieser Messposition im nicht abgedichteten Schilfaufleger (Bild 94) verharrte die Luftfeuchte jedoch nicht bei 100 % Luftfeuchte, sondern sank immer wieder ab. Infolgedessen war die Holzfeuchte nicht so hoch wie im siebenten Auflager.

Die Holzfeuchte (temperaturkorrigiert, in Bild 95 blau) verlief ausgesprochen gleichmäßig und reagierte kaum auf den unruhigen Verlauf der Luftfeuchte oder Temperatur im Balkenaufleger. Vergleichbar mit dem ebenfalls nicht abgedichteten Auflager 7 wurde wieder im Februar 2013 ein Maximalwert von 16,0 M% erreicht.



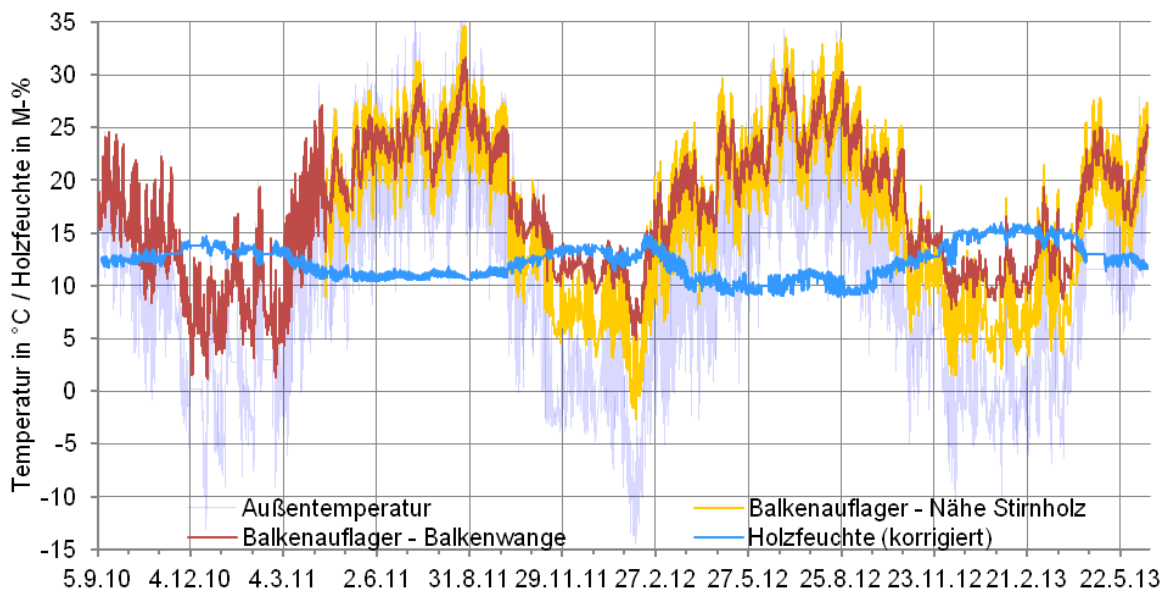


Bild 95 Stundenwerte der Temperaturen und der temperaturkorrigierten Holzfeuchte an Balken 8

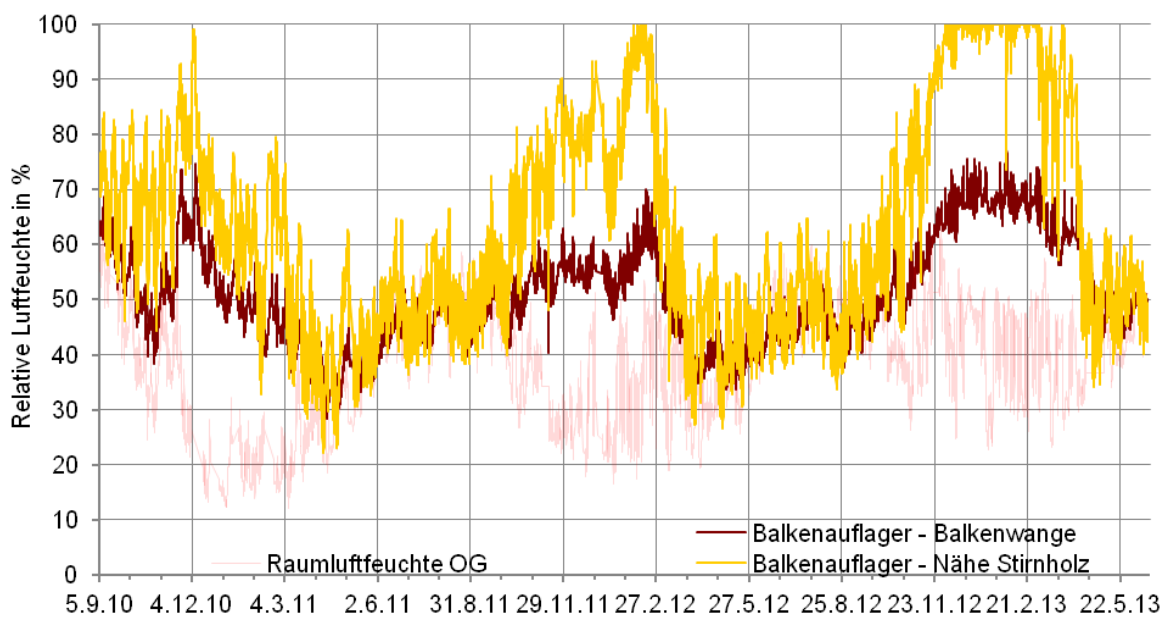


Bild 96 Stundenwerte der relativen Luftfeuchte an Balken 8

## 5.10 Abdichtung der Balkenauflagertaschen

Der diffusionsoffene Anschluss der Innendämmung an den Balken 7 bzw. das Belassen des offenen Auflagers an Balken 8 hatte zur Folge, dass die Temperatur und Luftfeuchte in den Balkentaschen schneller und offensichtlicher auf klimatische Veränderungen im Obergeschoß reagierten. Vor allem die Luftdruckdifferenzen und die temperaturabhängige Differenz des

Wasserdampfdruckes zwischen Räumen und Außenbereich verursachen im Winter überwiegend einen Wasserdampftransport von innen nach außen und folglich auch von den Räumen in die Balkenaufleger. Das Phänomen trat besonders deutlich auf, wenn die Luftbefeuchter mit feuchteintensiven Einstellungen betrieben wurden.

Mit der Befeuchtung der Luft wurde am 2. November 2012 begonnen. Dies lässt sich leicht am Gang der Luftfeuchte im Obergeschoß erkennen (Bild 97, hellblau), ebenso das Ende der aktiven Befeuchtung Anfang April 2013. Die mittleren Temperaturen der beiden Räume befanden sich während dieser Zeit in einem üblichen Bereich, zumindest die mittlere Luftfeuchte im Obergeschoß war deutlich von der Befeuchtung geprägt. Von Dezember 2012 bis Ende März 2013 betrug die Temperatur im Obergeschoß durchschnittlich 21,2°C und die Luftfeuchte 43,1 %, im Dachgeschoß wurden 19,4°C und 56,6 % relativer Luftfeuchte gemessen bei einer mittleren Außentemperatur von 1,5°C.

In Bild 97 ist der Gang der Luftfeuchten auf der Außenseite der Balkentaschen von drei Deckenbalken in unmittelbarer Nähe zum Stirnholz dargestellt. Sehr deutlich treten darin die Differenzen zwischen den unterschiedlich abgedichteten Balkentaschen zutage.

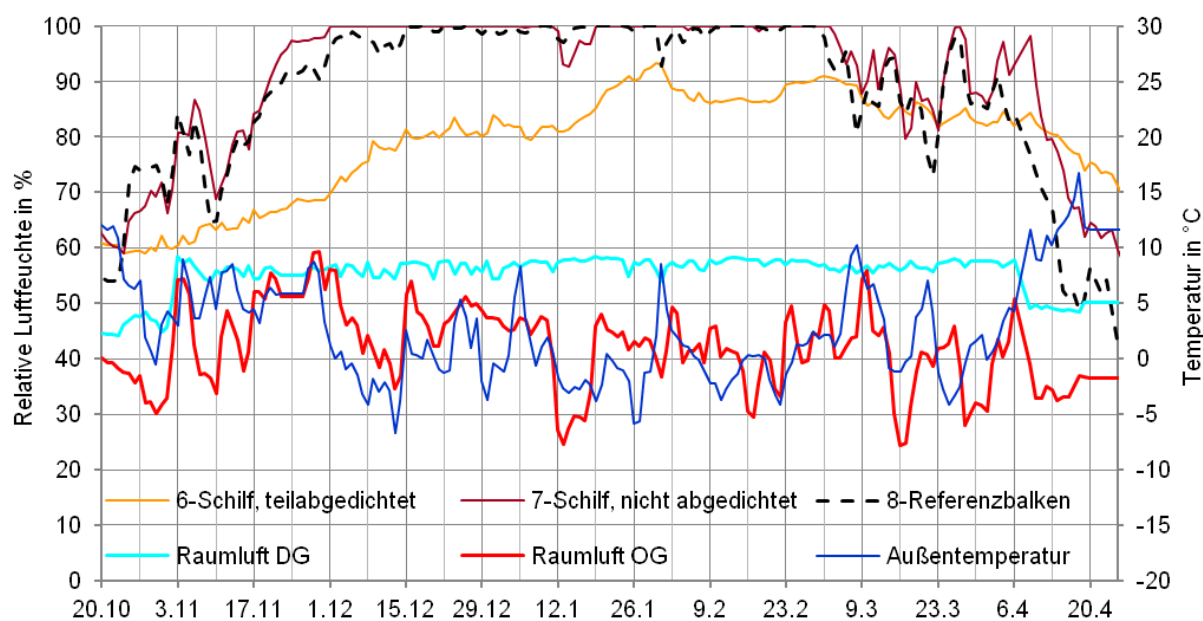


Bild 97 Luftfeuchte in Stirnholznähe der Balken 6 bis 8, im Dach- und Obergeschoß sowie Außenbereich (rechte Skala) vom 20.10. 2012 bis zum 25.4.2013 (Tagesmittelwerte)

Die mittleren Luftfeuchten waren um den 20. Oktober 2010 noch ungefähr gleich. Doch schon ohne Luftbefeuchtung reagierten die Auflager in klimatechnischer Hinsicht unterschiedlich auf einen kontinuierlichen Abfall der Außentemperatur (Bild 97, blau) vom 20. bis zum 30. Oktober 2012 auf ungefähr 0°C. Die Luftfeuchte im teilabgedichteten Auflager 6 (orange) blieb praktisch unverändert, in den nicht abgedichteten Auflagern dagegen nahm sie bereits zu, besonders im Referenzfeld (in Bild 97 schwarz gestrichelt). Kurz danach sprang die Luftfeuchte in den nicht abgedichteten Auflagern auf über 80 % an, als die Befeuchter in beiden Räumen am

2. November, einem Samstag, eingeschaltet wurden (braun und schwarz). Sehr aufschlussreich ist, dass die Feuchte in den offenen Auflagern um den 5. November auf einmal wieder deutlich abfiel, obwohl der Befeuchter im Dachgeschoß bis in den April 2013 bei voller Leistung annähernd 60 % Raumlufffeuchte konstant hielt. Dies genügte nicht, um das Luftfeuchteniveau in den Auflagern 7 und 8 zu halten. Vielmehr fällt sie analog zur Raumlufffeuchte im Obergeschoß (rot) wieder ab. Letzteres wurde durch gelegentliche Ausfälle des Befeuchters im Obergeschoß und durch Lüften verursacht, denn nach Auskunft der Kinderbetreuerinnen wurden Luftfeuchten über ungefähr 50 % als unangenehm hoch empfunden. Im vorliegenden Fall, dem 5. November, einem Montag, wurde aus diesem Grund morgens wieder gelüftet. Erst als sich in den folgenden Tagen die Feuchte im Obergeschoß tendenziell wieder erhöhte, und besonders während niedriger Außentemperaturen ab Ende November, wurden schließlich 100 % Luftfeuchte erreicht. Gleiches kann auch vom 12. bis zum 16. März oder vom 10. bis zum 19. Jänner beobachtet werden: in letzterem Zeitabschnitt fiel die mittlere Raumlufffeuchte von 45 auf unter 30 % ab, worauf die Luftfeuchte in beiden nicht abgedichteten Balkentaschen zeitweise abnahm, obwohl zeitgleich auch die Außentemperatur sank. Erst als die Raumlufffeuchte im Obergeschoß wieder anstieg, wurde wieder die maximale Luftfeuchte von 100 % registriert. Das wärmere Balkenaufleger 8 feuchtete augenscheinlich langsamer auf und trocknete schneller ab, wie sich ab März 2013 im Vergleich mit Auflager 7 (Schilf, in Bild 97 braun) erkennen lässt.

Dies zeigt eindeutig, dass die Raumluffzustände im Obergeschoß viel entscheidender für das Auflager sind als die des Dachgeschoßes. Warme, feuchte Luft steigt wegen der geringeren Dichte und des thermischen Auftriebs nach oben.

Während der Zeiten hoher Feuchtebelastung in den nicht abgedichteten Auflagern bot sich im teilabgedichteten Auflager 6 (gelb) ein ganz anderes Bild. Viel gemächlicher und gleichmäßiger stieg dort die Luftfeuchte an. Das Klima im Auflager schien weitgehend entkoppelt vom Klima des Obergeschoßes zu sein, denn im gelben Graph bildet sich das kurzzeitige Auf und Ab aus dem Obergeschoß nicht ab. Während im Stirnholzbereich der „luftumspülten“ Balken 7 und 8 schon zwei Monate lang 98 bzw. 100 % Luftfeuchte registriert wurden, wurde am Balken 6 die höchste Luftfeuchte von kurzzeitigen 93 % Ende Januar 2013 erreicht. Die verzögerte Auffeuchtung korrespondierte auch zu einer verzögerten Abtrocknung. So stellten sich an den beiden Messfühlern der nicht abgedichteten Auflager Anfang April 2013 nach dem Abschalten der Befeuchter viel schneller 60 % Luftfeuchte ein als am Messfühler im sechsten Auflager.

Gleichwohl spielen sich die hohen Luftfeuchten nur am Ende des Auflagers ab. An der Messposition an der Balkenwange waren die Messungen weit weniger kritisch. Hier erwies sich das abgedichtete Schilf-Auflager (gelb) als das am höchsten belastete, wenngleich die Messwerte mit maximal 84 % völlig unproblematisch waren (Bild 98).

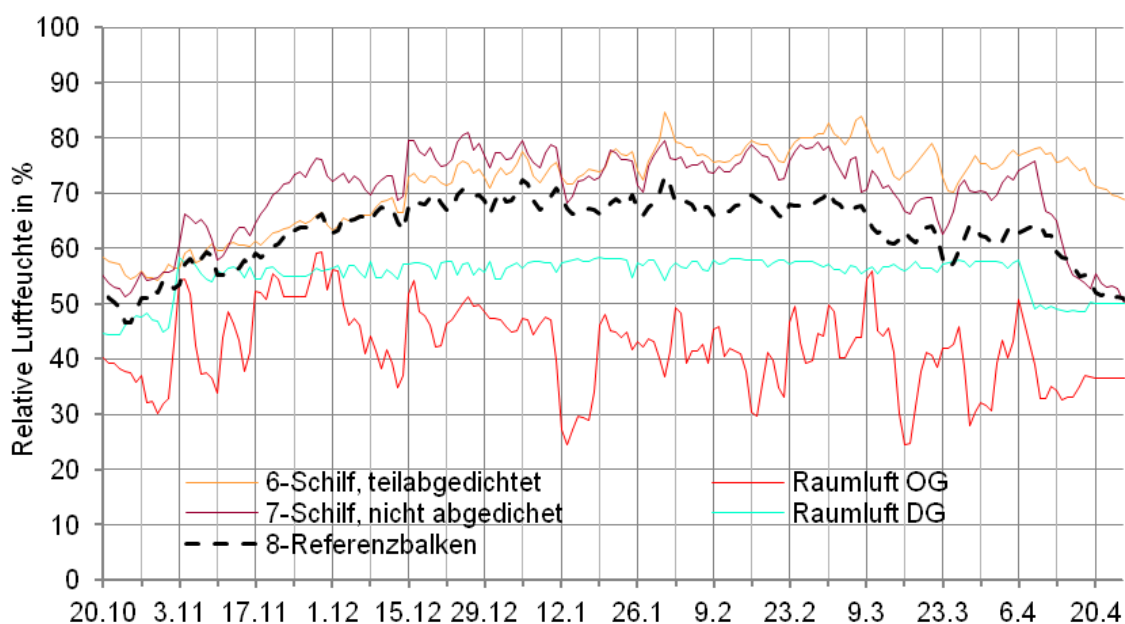


Bild 98 Luftfeuchte an den Balkenwangen der Balken 6 bis 8, im Dach- und Obergeschoß sowie Außenbereich vom 20.10. 2012 bis zum 25.4.2013 (Tagesmittelwerte)

Wegen der Trägheit des Holzes und der nur indirekten Koppelung an die Raumklimare mit den hohen Feuchtelasten wirkten sich die hohen Luftfeuchten kaum auf die Holzfeuchte am Stirnholz der Balken aus (Bild 99). Erst mit den sinkenden Außentemperaturen Ende November 2012 setzte ein merklicher Anstieg ein. In den Balkenköpfen der nicht abgedichteten Auflager (schwarz und braun) wurden zwar zusammen mit Balkenkopf 3 (Perliteplatte) die höchsten Holzfeuchten gemessen, dennoch setzten sie sich nicht von den anderen Linien ab. In Anbetracht der Sensorgenauigkeit von  $\pm 1,5 \text{ M\%}$  (Tab. 2) sind die Differenzen in Bild 99 unerheblich. Die durch die hohe innere Feuchtelast und niedrige Außentemperaturen ausgelöste Steigerung in den Holzfeuchtekurven im Zeitraum vom 2. November 2012 bis zum 8. April 2013 belief sich auf ungefähr 3 M%.

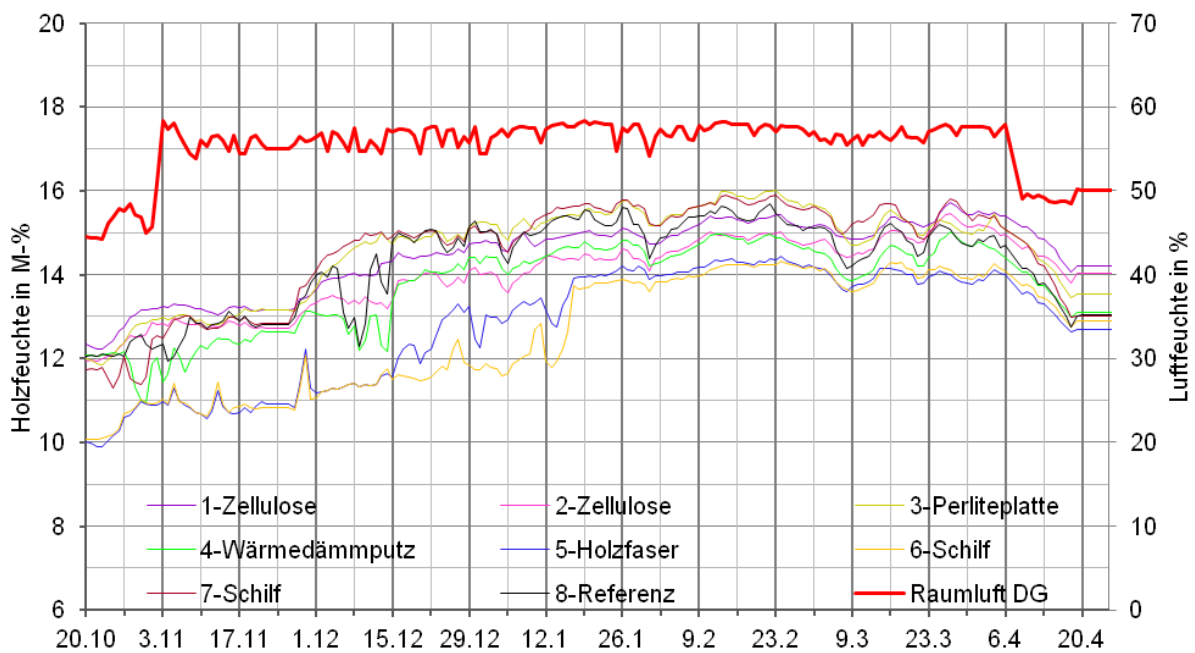


Bild 99 Holzfeuchte an der nassesten Stelle der Balkenköpfe und Raumluftfeuchte im Dachgeschoß vom 20.10. 2012 bis zum 25.4.2013 (Tagesmittelwerte)

Immer wieder werden in der Praxis Balkentaschen nicht abgedichtet mit dem Argument, den Balkenkopfbereich durch einströmende Raumluft aufwärmen zu wollen (siehe Kapitel 2.5). Abgesehen von der Tatsache, dass Holzschädlinge bei höheren Temperaturen besser gedeihen, ist der beobachtete Effekt bei den mit Schilf gedämmten Feldern gering: Der Unterschied beträgt während der niedrigsten Außentemperaturen um  $-10^{\circ}\text{C}$  im Februar 2012 unter 2 Kelvin. Während im teilabgedichteten Balkenaufleger 6 im Stirnholzbereich dabei durchschnittlich 77 % Luftfeuchte gemessen wurden, bildete sich hingegen im nicht abgedichteten Balkenaufleger 2011/12 immer wieder Kondensat.

In den kältesten Monaten Dezember 2012 bis Ende Februar 2013 belief sich die Temperaturdifferenz an dieser Messposition auf nur 0,7 Kelvin, was sich im Bild 100 kaum ausmachen lässt. Bedenkt man die Messgenauigkeit der Sensoren, wird der Unterschied unerheblich. Erkennbarer ist der Unterschied an der Balkenwange, in der Mitte der Balkenaufлагertasche (Bild 101) mit 1,8 Kelvin. Die größere Temperaturspreizung ist an dieser Stelle jedoch weniger wichtig, da die weit höhere Feuchtebelastung am Stirnende vorherrscht. Offensichtlich war die aufgrund der „Luftumspülung“ höhere Temperatur in den nicht abgedichteten Balkenauflägern nicht hoch genug, um die Feuchtebelastung zu senken. Die Messungen können die Behauptung nicht unterstützen, dass die Luftumspülung der Balkenköpfe die Umgebungsfeuchte im Balkenaufleger reduzieren kann.

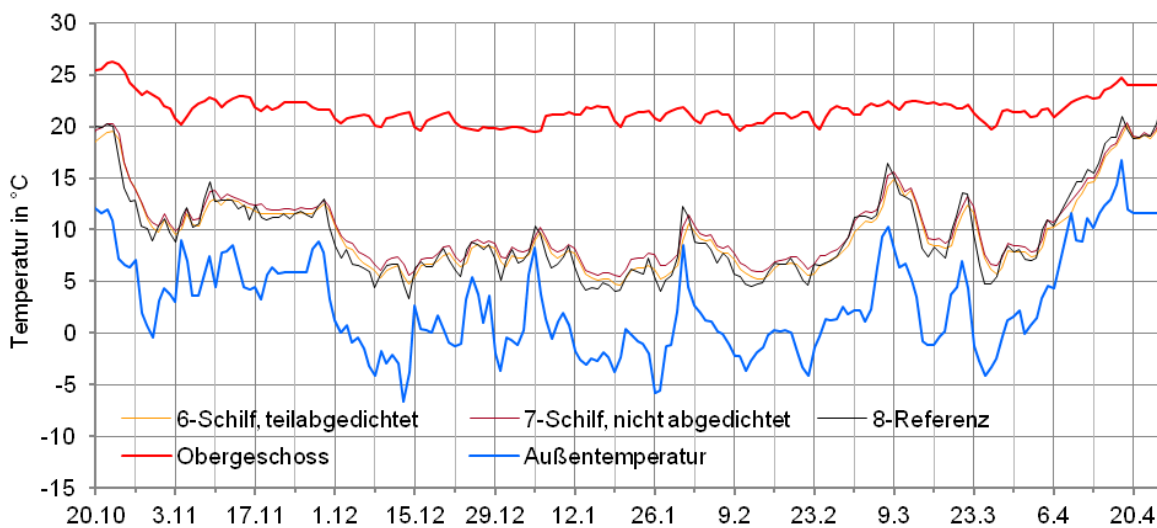


Bild 100 Temperaturen am Stirnholzbereich der Balken 6 bis 8 sowie im Obergeschoß und Außenbereich vom 20.10. 2012 bis zum 25.4.2013 (Tagesmittelwerte)

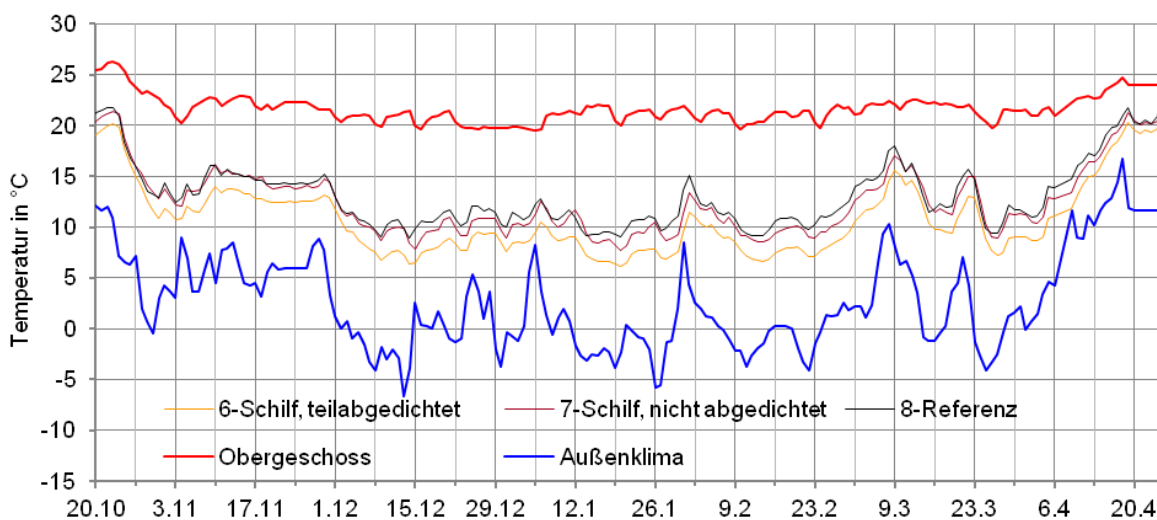


Bild 101 Temperaturen an der Balkenwange in Balkenaufleger 6 bis 8 sowie im Obergeschoß und Außenbereich vom 20.10. 2012 bis zum 25.4.2013 (Tagesmittelwerte)

Die Diagramme mit der Verteilung der absoluten Luftfeuchte bestätigen die vorherigen Aussagen. Innerhalb des Auflagers von Balken 6 herrschte im näher untersuchten Zeitraum eine relativ homogene Feuchteverteilung vor (Bild 102). Wie die relative war die absolute Feuchtemenge in der Nähe des Stirnholzes (in Bild 102 gelb) ebenfalls fast durchgängig größer als an der Balkenwange (braun), allerdings nur um vernachlässigbare  $0,2 \text{ g/m}^3$  (November bis Ende Februar). Die absolute Feuchtemenge stieg während der Zeit hoher Feuchtebelastung in den Räumen kaum an, die Zunahme der relativen Feuchte war demnach in erster Linie auf die niedrigeren Außentemperaturen zurückzuführen. Durch die Abdichtung zum Obergeschoß und trotz der zum Dachgeschoß nicht abgedichteten Balkentasche scheint die absolute Luftfeuchte den Impulsen des Außenklimas zu folgen. Eine temperatur-induzierte, außergewöhnliche Erhöhung der absoluten Luftfeuchte im Dachgeschoß zwischen dem 18. Jänner und dem

8. Februar 2013 schlägt sich ebenso wenig im Lauf der absoluten Feuchte nieder wie eine weitere derartige Phase ab dem 19. Februar. Hohe Außenluftfeuchten um den 9. März oder der beginnende Frühling ab April hinterlassen dagegen eine eindeutigere Prägung.

Im nicht abgedichteten siebenten Auflager ist die Verteilung der absoluten Feuchte deutlicher zu sehen (Bild 103). Die beiden Linien bewegen sich zwischen November 2012 und Ende Februar 2013 mit einem Abstand von durchschnittlich  $1,0 \text{ g/m}^3$ . Die starke Kopplung an das Außenklima bleibt allerdings in abgeschwächter Form bestehen. So nahm Ende November die absolute Luftfeuchte im siebenten Auflager stärker zu als im sechsten, andererseits fiel die Feuchtemenge am 11. Jänner nicht übermäßig ab, als im Obergeschoß die absolute Feuchte von knapp 9 auf  $4,5 \text{ g/m}^3$  sank. Die absolute Feuchte war auf der kalten Seite des Dämmsystems, d. h. auf der Bestandsoberfläche (Bild 103, grün), bis auf kurze Ausnahmen am höchsten, obwohl Lehmkleber und Bestandsputz viel Feuchte speichern und die innere Schicht des Putzes diffusionsbremsender war. Dabei ist zwischen grüner und brauner Linie eine größere Parallelität festzustellen, als zwischen den beiden Linien im Balkenaufleger, gelb und braun.

Im Referenzfeld (Bild 104) belief sich die Differenz in der absoluten Feuchtemenge im Auflager auf  $0,9 \text{ g/m}^3$ , ist also nur ein wenig kleiner als im anderen, nicht abgedichteten Auflager 7. Und wie im siebenten Auflager beeinflusst das Klima im Obergeschoß das Mikroklima im Auflager stärker als im teilabgedichteten Feld 6.

Eine direkte Gegenüberstellung der absoluten Luftfeuchte an der Messposition vor dem Stirnholz der Auflager 6 und 7 zeigt, dass sich zwischen November 2012 und Ende Februar 2013 die absolute Luftfeuchte im nicht abgedichteten Balken im Mittel um  $1,8 \text{ g/m}^3$  höher bewegte. Folglich verursachte die fehlende Abdichtung auch eine spürbar höhere absolute Feuchtelast im Balkenaufleger. Hauptsächlich die Dämmung ist dafür verantwortlich, dass im mit Schilf gedämmten Auflager 7 eine um durchschnittlich  $0,5 \text{ g/m}^3$  höhere Feuchtemenge zu finden ist als im Auflager des Referenzbalkens 8.

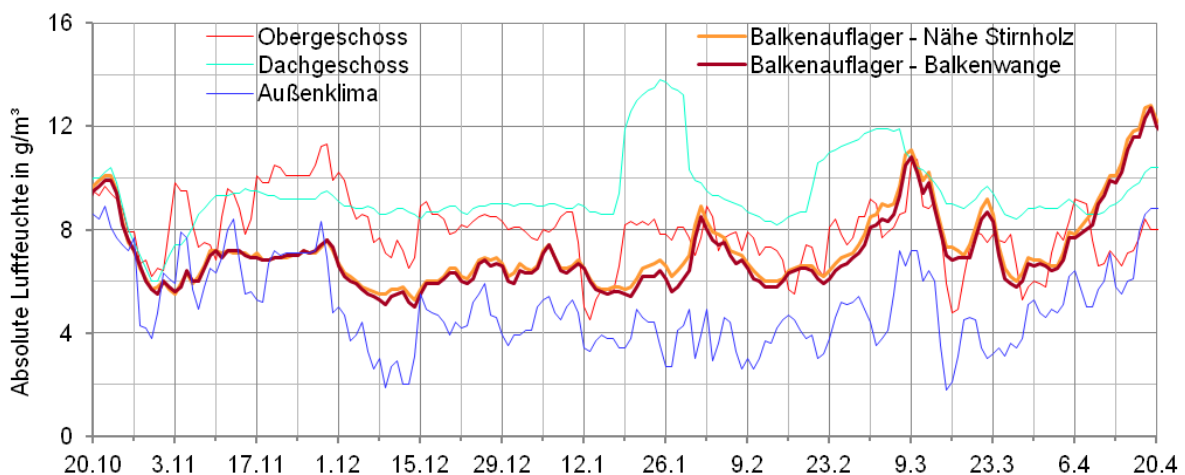


Bild 102 Absolute Feuchte im Balkenaufleger 6, in beiden Räumen und im Außenbereich vom 20.10.2012 bis zum 20.4.2013 (Tagesmittelwerte)



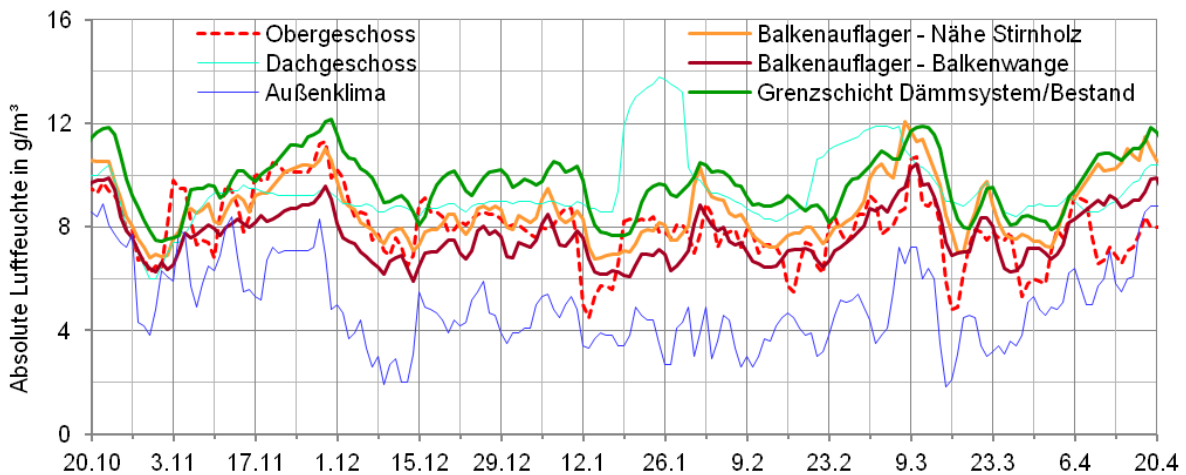


Bild 103 Absolute Feuchte im Balkenaufleger 7, an der Messposition ‚ID‘, in beiden Räumen und im Außenbereich vom 20.10.2012 bis zum 20.4.2013 (Tagesmittelwerte)

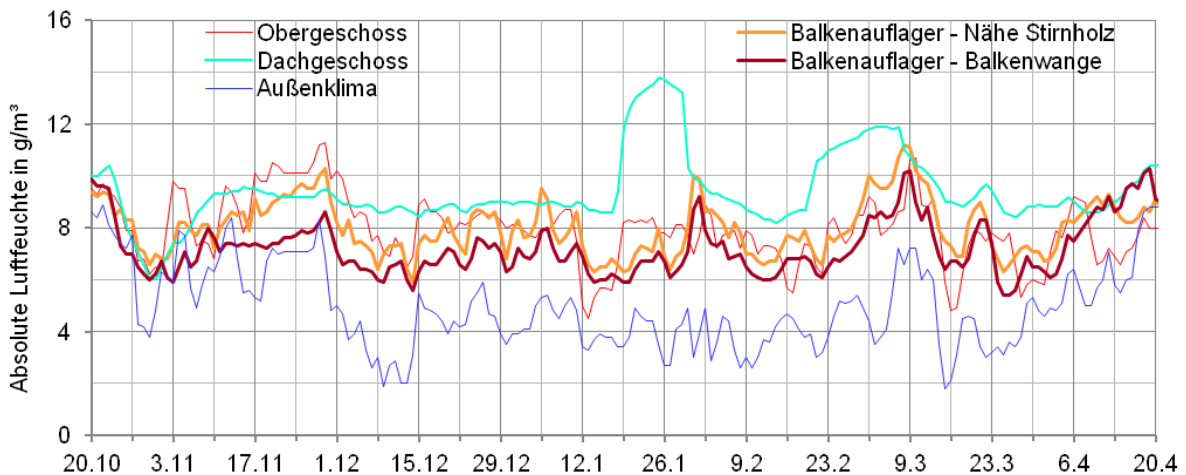


Bild 104 Gemittelte Tageswerte der absoluten Feuchte im Balkenaufleger 8, in beiden Räumen und im Außenbereich vom 20.10.2012 bis zum 20.4.2013

## 5.11 Mögliches Schimmelpilzwachstum in den Balkenauflägern

Mit Hilfe des Postprozessors der Software *DELPHIN* kann überprüft werden, ob unter den klimatischen Randbedingungen in den Balkenauflägern Schimmelpilzwachstum möglich ist. Das implementierte Schimmelpilzprognosemodell wurde wie das Modell zur Holzerzörung am VTT (Technical Research Centre of Finland) entwickelt und ist in *Ojanen et al. (2010)* erläutert. In die Berechnung des möglichen Schimmelpilzwachstums gehen die Temperatur und die relative Luftfeuchte ein. Zudem muss die Anfälligkeit der Materialoberfläche und des Untergrundes angegeben werden. Wie ausgeprägt sich einmal gewachsene Schimmelpilze während ungünstiger Klimarandbedingungen wieder zurückbilden ist ebenfalls einzuschätzen. Als Ergebnis der Berechnungen wird ein Schimmelindex von 0 bis 6 ausgegeben, dessen Bedeutung in Tab. 21 erläutert wird.



Anmerkung: Laut Hannu Viitanen, dem Hauptentwickler des VTT-Schimmelindexmodells, ist erst die potentiell gesundheitsgefährdende Sporenbildung ab einem Index von ‚3‘ als kritisch anzusehen.

Tab. 21 Schimmelindex nach dem VTT-Modell zur Prognose von Schimmelpilzwachstum

Schimmelindex	Bedeutung
0	Kein Wachstum
1	Beginnendes, nur mikroskopisch sichtbares Wachstum, wenige Hyphen
2	Nur mikroskopisch sichtbares Wachstum, mehrere Kolonien von Hyphen haben sich gebildet
3	Wachstum ist mit freiem Auge zu sehen, Mycel bedeckt weniger als 10% der Fläche sichtbar bzw. mikroskopisch entdeckbares Mycel bedeckt weniger als 50% der Fläche, beginnende Sporenbildung
4	Wachstum ist mit freiem Auge zu sehen, Mycel bedeckt visuell sichtbar ca. 10-50% der Fläche bzw. mikroskopisch entdeckbares Mycel bedeckt mehr als 50%
5	Wachstum ist mit freiem Auge zu sehen, Mycel bedeckt visuell sichtbar mehr als 50% der Fläche
6	Sehr starkes Wachstum, Mycel bedeckt nahezu 100%

Getrennt für beide Messpositionen im Auflager wurde der Schimmelindex berechnet. Zu beachten ist dabei, dass die Messsensoren die Temperatur und relative Luftfeuchte der Luft im Luftspalt erfasst haben und nicht an einer der Materialoberflächen. Mit der Verwendung des Schimmelpilzprognosemodells auf Basis der Messdaten werden diese deshalb mit den Verhältnissen auf der Materialoberfläche gleichgesetzt.

Die Anfälligkeit der Materialoberfläche und des Untergrundes wird in vier Stufen eingeteilt, wobei hier jeweils die zweithöchste ‚sensitiv‘ (Anfälligkeitsstufe 2: „Hobelmateriale, papierbeschichtete Produkte, Holzwerkstoffe“) gewählt wurde. Dem liegt eine Annahme auf der sicheren Seite dergestalt zugrunde, dass sich noch während der Bauzeit oder in den Jahren danach genügend organisches Material, z. B. aus der Schüttung, auf den Ziegeloberflächen der Auflager abgesetzt hat. Für die Modellkomponente Rückbildung vorhandener Schimmelpilze unter ungünstigen Klimarandbedingungen wurde die konservativste Einstellung ‚fast keine Rückbildung‘ gewählt.

Zu Beginn der Messungen, im Herbst 2010, entstand immer wieder durch die Einbaufeuchte neuer Putz- oder Dämmschichten eine kurzzeitige Feuchtebelastung. Während dieser kurzen Zeit setzte deshalb schon Schimmelpilzwachstum ein, das sich, entsprechend des VTT-Modells, langsam wieder zurückbildete (Bild 105). Mit dem Betrieb der Befeuchter und ansteigender Feuchtebelastung aus den Räumen im zweiten und vor allem dritten Winter wurde deutlicheres

Schimmelwachstum verzeichnet. Um diese beiden Phasen zu unterscheiden bzw. um den Effekt der unterschiedlichen Feuchtelasten zu trennen, werden die ersten beiden Jahre in Tab. 22 getrennt vom dritten Jahr mit dem jeweiligen Maximalwert angegeben.

Den für die Auflager typischen Schimmelindex-Verlauf veranschaulicht Bild 105:

- Ein kurzer, leichter Anstieg im ersten Winter 2010/12, bedingt durch die noch vorhandene Einbaufeuchte,
- ein Anstieg am Ende des zweiten Winters 2011/12, verursacht durch die erhöhte Feuchtelast, die Schimmelbelastung klingt langsam wieder ab und
- ein offensichtlicher Anstieg, der schon zum Jahreswechsel 2012/13 einsetzt und sogar ausreichend für Sporenbildung wäre.

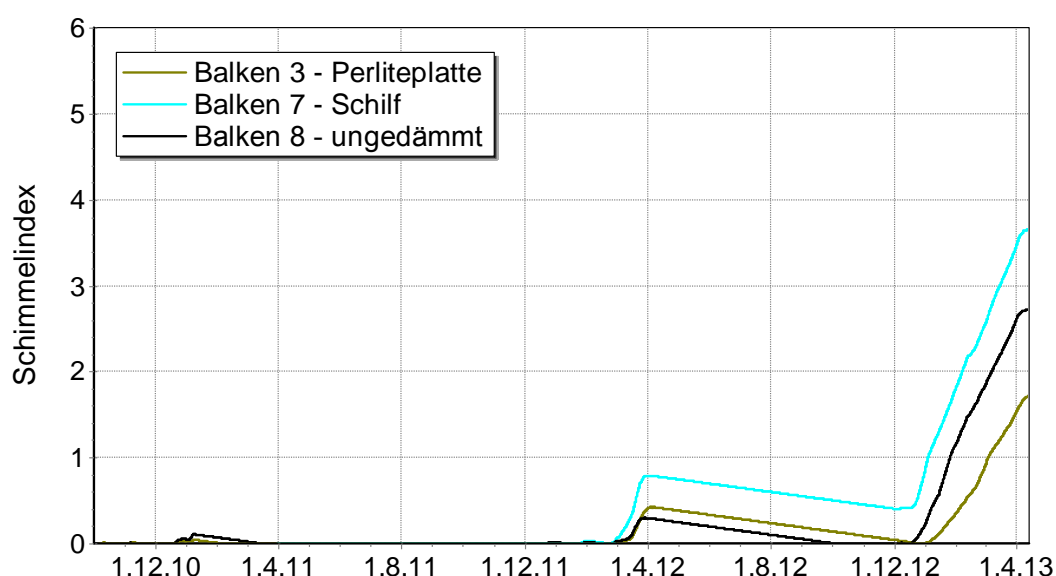


Bild 105 Verlauf des VTT-Schimmelindex' auf der Außenfläche von drei Balkenauflagern

Es wird angenommen, dass sich nach dem Ende des Projekts auch bei Aufrechterhaltung der Konstruktionen, der Schimmelindex vollständig zurückbilden würde, weil der Hauptimpuls, die Befeuchtung im Winter, fehlen würde.

Die höheren Luftfeuchten am Ende der Auflagertaschen führten trotz der dort niedrigeren Temperaturen offenbar dazu, dass dort häufiger die Bedingungen für Schimmelpilzwachstum gegeben waren (Tab. 22). Zu beachten ist, dass ein Schimmelindex von 3 nur in den nicht abgedichteten Auflagern detektiert wurde, sowie an der Balkenwange des Streichbalkens (nicht abgebildet). Im Auflager 7 des mit Schilf gedämmten Feldes beträgt der Schimmelindex sogar gerundet 4. Bezüglich Schimmelpilzwachstum ist folglich auch die Abdichtung von Auflagern zu empfehlen. Wird für die Auflageroberfläche und den Untergrund eine niedrigere Anfälligkeit von ‚3‘ gewählt (zementhaltige Materialien, Kunststoffe, Mineralwolle), ergibt sich für die Wange des Streichbalkens ein maximaler Schimmelpilzindex von 0,4, mit der Anfälligkeit ‚2‘ waren es 3,0. Für die Flanke des Balkens 7 wird ein Maximalwert von 0,6 berechnet, mit der

Anfälligkeit ‚2‘ waren es 3,6 gewesen. In einer ähnlich gearteten Untersuchung stellten *Harrestrup et Svendsen (2016)* eine größere Schimmelpilzbelastung fest.

Tab. 22 Maximaler Schimmelindex in den Auflagern in den Auflagern; das erste und zweite Jahr wird getrennt vom dritten Jahr ausgewertet; rot hervorgehoben ein VTT-Schimmelindex größer drei (gerundet)

Balken	Messposition	1./2. Jahr	3. Jahr
1-Zellulose	Wange	0.1	0.1
	Stirn	1.2	<b>3.0</b>
2-Zellulose	Wange	0	0
	Stirn	0.5	2.2
3-Perliteplatte	Wange	0	0
	Stirn	0.4	1.7
4-Dämmputz	Wange	0	0
	Stirn	0.5	0.5
5-Holzweichfaser	Wange	0	0
	Stirn	0	0.5
6-Schilf	Wange	0	0
	Stirn	0	0.4
7-Schilf	Wange	1.2	1.4
	Stirn	0.7	<b>3.6</b>
8-Referenz	Wange	0	0
	Stirn	0.3	<b>2.7</b>

Zu diskutieren ist, inwieweit Schimmelpilzwachstum in den Auflagern überhaupt gesundheitlich relevant ist, selbst bei den nicht abgedichteten Auflagern. Bei den im Auflagerbereich vorherrschenden (Kriech-)Strömungsgeschwindigkeiten und den konstruktiven Hindernissen zwischen Innenraum und Auflagern gibt es für die Schimmelpilzsporen keine Möglichkeit, in die Raumluft zu gelangen (*Zöller et al. (2019)*). Erst, wenn sich Fugen oder Risse in der Deckenbekleidung bilden oder Löcher, z. B. für die Raumbelichtung, angebracht würden ist es denkbar, dass Sporen die Raumluft erreichen können. Auch wenn Reparaturarbeiten anstehen, könnten die Schimmelsporen zumindest kurzzeitig ein gesundheitliches Problem darstellen.

Das VTT-Schimmelpilzprognosemodell wurde für Raumbooberflächen entwickelt (*Ojanen et al. (2010)*). Insofern ist es auch diskussionswürdig, ob es auf Materialoberflächen mit Luftkontakt wie im Balkenaufleger angewendet werden kann. Aus diesem Grund wird hier bewusst keine Untersuchung möglichen Schimmelpilzwachstums für die Messstelle zwischen Innendämmung und Bestandsoberfläche durchgeführt. Hier ist die Anwendung des VTT-Modells nach Ansicht des Verfassers unsinnig, weil die luftdichten Dämmschichten und die quasi vollflächige Verklebung mit zudem noch sehr basischen Mörteln dort ein Schimmelpilzwachstum zusätzlich unwahrscheinlich erscheinen lassen. Einzig für die Lehmkleberschicht im Schilffeld wurde

wegen dessen diffusionsoffener Struktur ein Schimmelpilzindex ermittelt. Mit der zweithöchsten Anfälligkeit ‚2‘ ergab sich dort auf der Lehmkleberschicht ein Schimmelpilzindex von 1,3, der sich im dritten Winter während der Befeuchtung der Räume aufbaute und anschließend wieder zurückbildete.

## 5.12 Resümee der Messungen

Den Messungen konnte entnommen werden, dass die Temperaturen im Zimmer des Obergeschoßes während der drei Kondensationsperioden im Vergleich zu üblichen Wohnräumen etwas wärmer, im Dachgeschoß dagegen etwas kälter waren. Im Dachgeschoß wurde deshalb ab dem zweiten Winter mit einem mobilen Heizkörper ein „wohnraumübliches“ Temperaturniveau sichergestellt. Im ersten Winter 2010/11 waren die Raumlufffeuchten ausgesprochen niedrig, weshalb in den folgenden Kondensationsperioden Befeuchter verwendet und Abdichtungsmaßnahmen vorgenommen wurden. Da in der zweiten Kondensationsperiode die gewünschte Raumlufffeuchte ebenfalls nicht erreicht werden konnte, wurden im Oktober 2012 weitere, umfangreichere Abdichtungsmaßnahmen ausgeführt und „Verhaltensregeln“ (nicht lüften) mit den Kinderbetreuerinnen vor Ort vereinbart. Diese Mittel führten schließlich im Winter 2012/13 zu der gewünschten, sehr hohen Feuchtelast, die eine Beurteilung der Konstruktionen unter kritischeren Randbedingungen ermöglichte.

In der Zellulosedämmung wurden aufgrund der Einbaufeuchte im ersten Winter über einen langen Zeitraum hinweg 100 % Luftfeuchte in der Kondensationsebene, d. h. der auf dem Bestandsputz, gemessen, bis die Dämmung abtrocknete. Die durch die erwähnten Maßnahmen erhöhte Raumlufffeuchte verursachte für zwei bis drei Wochen im zweiten Winter 100 % Luftfeuchte und im letzten Winter 2012/13, verbunden mit niedrigen Außentemperaturen, für mehrere Monate. Im Wärmedämmputz zog sich der Austrocknungsprozess vermutlich bis in den Herbst 2011 hinein. Dies konnte aus der Beurteilung anderer Messfühler und einer händischen Messung geschlossen werden, sowie aus den Daten der Holzfeuchtemessung, da beide Luftfeuchtesensoren in dieser Kondensationsebene ausgefallen waren. Alle anderen Dämmsysteme wiesen weitaus weniger häufig kritische Luftfeuchten über 95 % auf, besonders die Perlite- und Schilfdämmplatten trockneten schnell ab. Somit wurde nachweislich in der Zellulosedämmung am häufigsten eine Luftfeuchte von 100 % festgestellt. Die erwähnte händische Messung und der hohe Holzfeuchteverlauf im Feld mit Wärmedämmputz lassen die Schlussfolgerung zu, dass dort in ähnlicher Häufigkeit 100 % relativer Luftfeuchte erreicht worden sind, nach Ansicht des Verfassers noch häufiger als in der Zellulosedämmung. Addieren sich im Zuge einer Sanierung weitere feuchteintensive Arbeiten zu den Dämmmaßnahmen, wie z. B. das Einbringen eines neuen Estrichs, der für mehrere Monate Einbaufeuchte abgibt, oder erfolgt der Einbau *nicht* im Frühling oder Sommer, scheinen die anderen Systeme mit Holzweichfaser, Schilf und Perliteplatte besser geeignet. Letztere Dämmsysteme überzeugten durch vergleichsweise schnelles Austrocknen und hygrothermisch unproblematisches Verhalten. *Nach dem Abtrocknen der Einbaufeuchte* wiederum erwies sich der Wärmedämmputz als sehr gut bzw. auch die Zellulosedämmung als gut geeignet.

Die Holzfeuchte in den Deckenbalken ist die wichtigste Größe bei der Bewertung der Innendämmmaßnahmen. Alle gemessenen Holzfeuchten waren weit unterhalb einschlägiger Grenzwerte für Auskeimung und Wachstum. Selbst wenn 100 % relativer Luftfeuchte für einen längeren Zeitraum in der Kondensationsebene eines Dämmsystems oder an der Außenfläche einer Auflagertasche festgestellt worden waren, schlug sich dies kaum im Verlauf der Holzfeuchte nieder. Die Holzbalken erwiesen sich in gewisser Weise als entkoppelt bzw. nur entfernt beteiligt an den Vorgängen in der Kondensationsebene auf der ehemaligen Innenoberfläche oder der unmittelbaren Umgebung des Stirnholzes. Auf hohe Feuchten im äußeren Bereich der Auflager reagierten die Holzbalken zeitlich stark verzögert und mit nur leichter Feuchteerhöhung. Dies unterstreicht, wie notwendig ein Luftspalt vor und um den Balkenkopf ist. Ferner wurde festgestellt, dass die Feuchtebelastung im Stirnbereich des Streichbalkens höher war als in der Ebene der Innendämmung, selbst wenn in nur 0,2 m Entfernung, durch die Sensoren auf der Bestandsoberfläche, für längere Zeit 100 % Luftfeuchte gemessen worden waren. Holzbalken scheinen sich durch ihre Wärmebrückenwirkung hygrothermisch günstige Verhältnisse zu schaffen.

Das Auflager des Referenzbalkens im ungedämmten, „luftumspülten“ Feld war weder trockener noch deutlich wärmer als die anderen Auflager. Genauso führte die Luftumspülung nicht zu einer erhöhten oder niedrigeren Holzfeuchte, sondern bewegte sich in einem ähnlichen Bereich wie in den von unten gut abgedichteten Auflagern.

Der Wärmedämmputz mit Thermosilit wies eine ungewöhnlich lange Austrocknungszeit von ungefähr über einem Jahr auf und erreichte im ersten Winter die mit Abstand höchsten Holzfeuchtwerte. Nach der langen Abtrocknungsphase bewegte sich die Holzfeuchte unterhalb des Durchschnitts aller Kurven.

Das Balkenaufleger in einem mit Schilf gedämmten Feld war nicht abgedichtet, was im Vergleich zum abgedichteten Auflager eine signifikant höhere Luftfeuchtebelastung in der Balkentasche nach sich zog. Auch in dem anderen nicht abgedichteten Auflager des ungedämmten Referenzbalkens wurde eine höhere absolute und vor allem relative Luftfeuchte festgestellt. Ferner prognostizierte das VTT-Schimmelpilzprognosemodell nur in den beiden nicht abgedichteten Auflagern und dem Streichbalken Schimmelpilzwachstum mit Sporenbildung. Auch wenn sich die höhere Feuchtebelastung kaum auf die Holzfeuchte am Balkenkopf niederschlug, wird empfohlen, die Balkentaschen konvektionshemmend abzudichten, sodass keine konvektive Verbindung zwischen Balkenaufleger und Balkenzwischenraum besteht. Aufwändige Detaillösungen zur Abdichtung, wie sie in *AkkPassiv (2005)* für diffusionsdichte Innendämmsysteme vorgeschlagen werden, sind bei diffusionsoffenen, kapillar aktiven Dämmsystemen mit ausreichendem Schlagregenschutz nicht notwendig.

Die Messdaten haben ebenso aufgezeigt, dass die Feuchteverhältnisse in den nicht abgedichteten Balkenauflagern in höherem Maß vom Raumklima des unteren Geschoßes bestimmt waren. Da feuchtwarme Raumluft nach oben steigt und in Häusern mit Holzbalkendecken der obere Bereich der Balkentaschen in vielen Fällen durch Schüttung besser abgeschirmt ist als

der Bereich unterhalb der Einschnittdecke, lässt sich diese Erkenntnis auch auf andere Gebäude übertragen. Jedoch muss dabei auch die Dichtheit der Decken- und Bodenbekleidung beachtet werden.

## 6 Hygrothermische Simulationen

Um das hygrothermische Verhalten von Konstruktionen unter realitätsnahen Bedingungen zu simulieren, kommen in der Regel ein- oder mehrdimensionale Softwareprogramme wie *DELPHIN* (2019) oder *WUFI* (2019) zum Einsatz. Bei Balkenauflagern handelt es sich allerdings um dreidimensionale Konstruktionsdetails, die zweidimensional nicht adäquat abgebildet werden können. Auf den Bau spezialisierte, am Markt erhältliche, dreidimensionale Programme wie *Heat3* (Blomberg (2001)) oder *Antherm* (2019) erfassen nur thermische Prozesse oder maximal die Wasserdampfdiffusion. Praktikable Software für hygrothermische, dreidimensionale Simulationen mit der Möglichkeit einer Erweiterung Richtung Luftströmungen steht erst seit 2017 zur Verfügung, im Rahmen einer Erweiterung von *DELPHIN* (EnBewe (2017)). Weiteren Ansätzen zur dreidimensionalen Modellierung fehlt noch eine ausführliche Validierung der implementierten Modelle oder sie sind nicht frei erwerbbar (Bednar (2000)). Die Adaptation multifunktionaler Softwaretools an Baubelange wurde schon in Kapitel 2.8 als sehr anspruchsvoll und zeitaufwändig befunden (Janetti et al. (2012)).

Im Vergleich zu zweidimensionalen Simulationsdetails wie einer Gebäudeecke kommen bei Balkenauflagern weitere Aspekte hinzu, die das Nachvollziehen realer Messdaten erschweren: Neben thermischen und hygrischen Einflüssen können auch konvektive Strömungen die Verhältnisse im Zwischenbalkenbereich und in der Balkentasche beeinflussen.

Durch eine Weiterentwicklung von *DELPHIN 6* in den dreidimensionalen Bereich ließen sich die Balkenaufleger genauer untersuchen. Mit der Validierung der Software *DELPHIN* für den Bereich der Balkenaufleger, welche diese Arbeit unterstützt, eröffnen sich weitreichende Möglichkeiten für Variantenstudien, die unterschiedliche Dämmsysteme, Klimabelastungen oder Bestandskonstruktionen umfassen können. Die folgenden Ausführungen und Simulationen basieren auf den in Kapitel 5 vorgestellten Messdaten.

### 6.1 Simulationsprogramm DELPHIN

Für die hygrothermische Analyse von Wand- und Dachaufbauten sind verschiedene Bemessungs- und Simulationsverfahren verfügbar. Während die Bemessungsverfahren von stark vereinfachten Materialeigenschaften und konstanten Klimabedingungen ausgehen, wird bei Simulationsverfahren reales bzw. realitätsnahes Klima und eine aufwändigere Materialmodellierung angewendet.

In Richtlinien verankerte thermische und hygrothermische Nachweis- bzw. Bemessungsverfahren sind beispielsweise

- Das Verfahren zur Bestimmung der Mindestanforderungen an den Wärmeschutz von Bauteilen und Wärmebrücken nach *EN ISO 13788*,
- das hygrothermische Verfahren nach *Glaser (1958)*,

- das hygrothermische Monatsbilanzverfahren nach *EN ISO 13788*, welches im Wesentlichen auf dem *Glaser*-Verfahren aufbaut.

Anhang F der Richtlinie (alten) *EN ISO 13788* oder *ÖNORM EN 15026* beschreiben Eigenschaften fortgeschrittener hygrothermischer Simulationsverfahren, zu denen Softwareprogramme wie *WUFI* (Fraunhofer Institut für Bauphysik) oder *DELPHIN* gehören.

Die aufgezählten Verfahren unterscheiden sich hinsichtlich Eingabe- bzw. Rechenaufwand und Genauigkeit. Während in den oben genannten Bemessungsverfahren noch zum Teil „von Hand“ gerechnet werden kann, ist das bei den Simulationsverfahren nicht mehr möglich. Schließlich sind derartige Simulationsverfahren erst durch die Entwicklung der Rechentechnik und der numerischen Lösungsverfahren möglich geworden. Die Einschränkungen der Bemessungsverfahren sind aufgrund des analytischen Rechenwegs umfangreicher als bei den Simulationsverfahren, deren numerische Lösungsmethoden größere Freiheiten in der physikalischen Modellierung erlauben. Einige Einschränkungen der einfachen Bemessungsverfahren, insbesondere des *Glaser*- und Monatsbilanzverfahrens, werden beispielsweise im Abschnitt 6.3 der *EN ISO 13788* aufgezählt:

- Die Wärmeleitfähigkeit ist nicht feuchteabhängig bzw. die Stoffeigenschaften sind generell nicht veränderlich.
- Die Verwendung von erhöhten Anfangsfeuchten im Material ist nicht möglich.
- Die Flüssigwasserleitfähigkeit und die Feuchtespeicherfähigkeit kann nicht berücksichtigt werden.
- Luftbewegungen können nicht mit einbezogen werden.
- Die Klimarandbedingungen sind nur konstant oder quasi-konstant (Monatsmittelwerte).
- Der Feuchtetransport ist nur eindimensional möglich.
- Schlagregen, Sonneneinstrahlung oder langwellige Abstrahlung können nicht angesetzt werden.

Für diese Arbeit wurde die Software *DELPHIN* verwendet, welche am Institut für Bauklimatik der TU Dresden und der Bauklimatik Dresden Software GmbH entwickelt wird. Die Berücksichtigung dieser Effekte bedingt natürlich eine höhere Ergebnisgenauigkeit, sofern entsprechend genaue Eingabedaten zur Verfügung stehen. Die Berechnungen werden numerisch mit der Finite-Differenzen-Methode gelöst und können auf ein- und zweidimensionale (*DELPHIN* 5) sowie dreidimensionale (*DELPHIN* 6) Konstruktionsdetails angewendet werden. Die größere Freiheit in der Modellierung wird durch einen höheren Aufwand bei der Beschaffung der Eingabewerte zu Materialeigenschaften und Klima erkauft. Die Vielzahl der Ergebnisausgaben zieht auch einen höheren Aufwand bei der Interpretation nach sich.

In Deutschland forciert die neue *DIN 4108-3* den Einsatz von Simulationsprogrammen weiter bzw. werden die Einsatzmöglichkeiten des vereinfachten *Glaser*-Verfahrens stärker begrenzt. Ähnliche Änderungen werden mit dem gegenwärtigen Entwurf der *OENORM B 8110-2* in Angriff genommen.



### 6.1.1 Physikalische Grundlagen von DELPHIN

Ein wichtiger Teil dieser Arbeit ist mit Hilfe der Software *DELPHIN* entstanden, weshalb die Vorgehensweise und die physikalischen und numerischen Hintergründe angeschnitten werden sollen.

Das mit der graphischen Benutzeroberfläche erstellte Modell wird für die numerische Berechnung in kleine, rechteckige Einzelemente unterteilt bzw. diskretisiert. Für die Modellierung stehen deshalb nur rechteckige Volumen zur Verfügung. Die diskretisierten Einzelemente sind als homogenes Material definiert und werden als Referenzvolumen (REV) bezeichnet. Während der Simulation werden für jedes Element zeitlich aufgelöst die miteinander gekoppelten Massen- und Energieerhaltungsgleichungen gelöst, welche die Speicherung von Feuchte und Wärme in Elementen sowie den Transport von Element zu Element berechnen.

Interne Wärmebilanzgleichung für ein Referenzvolumen:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho_{REV}^U = \frac{\partial}{\partial x} (j_{diff}^Q + u_l \cdot j_{conv}^{m_l} + u_g \cdot j_{conv}^{m_g} + h_v \cdot j_{diff}^{m_v}) + \sigma_u^Q \quad (13)$$

Die innere Energiedichte  $\rho_{REV}^U$  in einem diskretisierten Volumenelement auf der linken Seite von (13) enthält die Energiedichte der festen, flüssigen und Gasphase. Ihr stehen der nach dem Ort abgeleitete Wärmestrom  $j_{diff}^Q$ , der mit den Flüssigwasser- und Gas-Anteilen verbundene konvektive Wärmestrom,  $j_{conv}^{m_l}$  und  $j_{conv}^{m_g}$ , sowie der Wärmetransport durch den diffusiven Dampftransport  $j_{diff}^{m_v}$  gegenüber. Konvektive Wärmeflüsse werden nur mit einbezogen, wenn Luftströmungen betrachtet werden. Zu den konvektiven Wärmeflüssen gehören der jeweilige spezifische (innere) Energieinhalt  $u_l$  und  $u_g$ . Der diffusive Wärmefluss  $j_{diff}^{m_v}$  wird mit der im Wasserdampf enthaltenen, spezifischen Enthalpie  $h_v$  multipliziert. Der Einfluss der mitgeführten Enthalpie bzw. Phasenumwandlungsenthalpien wird damit nicht vernachlässigt. Wärmequellen und -senken, die im Element entstehen oder vergehen, werden mit  $\sigma_u^Q$  berücksichtigt. In dieser Gleichung sind die VOC-Anteile (*volatile organic compounds*) und Salze nicht enthalten.

Der Wärmestrom  $j_{diff}^Q$  findet in Form von Wärmeleitung, Wärmestrahlung und konvektivem Transport statt. Innerhalb eines homogenen Materialelements wird die Kapazität aller Wärmetransportarten in der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  zusammengefasst:

$$j_{diff}^Q = -\lambda(w, T) \frac{\partial T}{\partial x} \quad (14)$$

In *DELPHIN* kann die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  in Abhängigkeit vom Wassergehalt  $w$  und von der Temperatur  $T$  berücksichtigt werden. In den Simulationen dieser Arbeit ging nur der Wassergehalt mit einem linearen Ansatz in die Berechnungen mit ein.

$$\lambda(w) = \lambda_{tr} + \lambda_w \cdot w \quad (15)$$

Zu der Wärmeleitfähigkeit des trockenen Materials  $\lambda_{tr}$  wird die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_w$  des im Element enthaltenen Wassergehalts  $w$  addiert. Es stehen auch noch weitere Möglichkeiten des Wärmetransports zur Verfügung, z. B. der langwellige Strahlungsaustausch von gegenüberliegenden Flächen über eine Luftschicht hinweg, welcher hier ebenfalls berücksichtigt wurde.

Die Änderung der Wärmeleitfähigkeit einer Luftschicht geht in Anlehnung an die *ÖNORM EN 673* in die Berechnungen mit ein. Die Wärmeleitfähigkeit wird dabei von der Geometrie des Luftbereichs und den anliegenden Oberflächentemperaturen bestimmt.

Bei der Wärmespeicherung wird nicht nur die Feststoffmatrix, sondern auch die von Wasserdampf oder Flüssigwasser gespeicherte Energie mit einbezogen.

Die Feuchtemassendichte  $\rho_{REV}^{m_{l+v+i}}$  in (16) repräsentiert die zeitliche Änderung von Feuchte in flüssiger und dampfförmiger Form, sowie als Eis. Die rechte Seite in (16) beinhaltet die örtliche Änderung des konvektiven Flüssigwassertransports  $j_{conv}^{m_l}$  sowie des konvektiven und diffusiven Wasserdampfstroms  $j_{conv}^{m_v}$  und  $j_{diff}^{m_v}$ . Quellen und -senken aller drei möglichen Phasenzustände sind mit  $\sigma_{REV}^{m_{w+v+i}}$  zusammengefasst.

Feuchtemassenbilanzgleichung für ein Referenzvolumen:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho_{REV}^{m_{l+v+i}} = - \frac{\partial}{\partial x} (j_{conv}^{m_l} + j_{conv}^{m_v} + j_{diff}^{m_v}) + \sigma_{REV}^{m_{w+v+i}} \quad (16)$$

Der Feuchtettransport wird in zwei bzw. drei Formen unterschieden: In den kapillaren bzw. konvektiven Flüssigwassertransport  $j_{conv}^{m_l}$ , der Dampfdiffusion in Folge einer Differenz des Wasserdampfpartialdrucks  $j_{diff}^{m_v}$  und in den konvektiven Wasserdampftransport  $j_{conv}^{m_v}$  infolge von Luftkonvektion, welcher später erläutert wird. Der konvektive Wasserdampftransport wird wegen seines geringen Einflusses bei Konstruktionen ohne größere (zusammenhängende) Luftschichten normalerweise vernachlässigt.

Für den kapillaren Flüssigwassertransport  $j_{conv}^{m_l}$  wird abweichend von anderen hygrothermischen Modellansätzen das tatsächlich antreibende Potential, das Kapillardruckgefälle  $\partial p_c$  verwendet:

$$j_{conv}^{m_l} = -K_l(w) \left( \frac{\partial p_c}{\partial x} + \rho_l \cdot g \right) \quad (17)$$

In dieser Arbeit wird der Anteil der Schwerkraft  $\rho_l \cdot g$  nicht betrachtet, da er in den hier verwendeten Materialien und Konstruktionen bei der vorherrschenden Materialfeuchte keinen Einfluss hat. Der Kapillardruck  $p_c$  ergibt sich aus dem Flüssigwasserdruck und dem Druck der Gasphase,  $p_l$  und  $p_g$ , wie folgt (siehe auch Bild 38 bzw. Häupl (2008) oder Funk (2011)):

$$p_c = p_l - p_g = \frac{2\sigma}{r} \cdot \cos(\gamma) \quad (18)$$

Die Verwendung von  $p_c$  bietet unter anderem den Vorteil, dass die Schwerkraft oder auch ein Druck infolge von z. B. anliegendem Grundwasser problemlos dazu addiert werden kann. Das

ist bei konkurrierenden theoretischen Modellen nicht möglich. Der Nachteil ist, dass die Funktion der Flüssigwasserleitfähigkeit  $K_l(p_c)$  über mehrere Zehnerpotenzen verläuft, was die numerische Berechnung sehr aufwändig gestaltet. Die Höhe der Flüssigwasserleitfähigkeit  $K_l$  ist abhängig vom Wassergehalt bzw. Kapillardruck. Dabei handelt es sich um eine monoton steigende Funktion.

Messungen vor Ort, in einem Labor oder Einstellungen in der Software werden sehr oft in der relativen Luftfeuchte vorgenommen, die auch für die meisten Anwender eine fassbarere Größe darstellt. Die *Kelvin*-Gleichung verknüpft  $p_c$  mit der relativen Luftfeuchte  $\varphi$ :

$$p_c = \rho_l \cdot T \cdot R_v \cdot \ln(\varphi) \quad (19)$$

Unter der Voraussetzung, dass Luft als ideales, inkompressibles Gas behandelt wird, gilt für den Wasserdampftransport in *DELPHIN*:

$$j_{diff}^{m_v} = - \frac{D_{v,air}(T)}{\mu \cdot R_v \cdot T} \cdot f(\theta_g) \cdot \frac{\partial p_v}{\partial x} \quad (20)$$

Antreibendes Potential ist die Differenz des Wasserdampfdruckgradienten  $\partial p_v$ , wobei der Wasserdampfdruck wiederum neben der Temperatur auch von der Luftfeuchte abhängig ist. Der Diffusionskoeffizient  $D_{v,air}$  ist ebenfalls von der Temperatur, streng genommen aber auch vom Dampfdruck abhängig (siehe *ÖNORM EN ISO 12572*):

$$D_{v,air}(T, p_g) = 0.083 \cdot \frac{p_{g,0}}{p_g} \cdot \left( \frac{T}{273.15} \right)^{1.81} \quad (21)$$

Das Materialverhalten in Gleichung (20) steht lediglich im Nenner in Form von  $\mu$ , dem Wasserdampfdiffusionswiderstandsfaktor. Mit dem Diffusionskoeffizient der Luft ergibt sich der Diffusionskoeffizient des Materials  $D_{v,mat}$ :

$$D_{v,mat} = \frac{D_{v,air}}{\mu} \quad (22)$$

Anders als die Kapillarleitfähigkeit  $K_l$  steigt der Diffusionskoeffizient des Materials  $D_{v,mat}$  im niederfeuchten Bereich zunächst leicht an und fällt anschließend konstant ab. Bei Sättigung beträgt er Null. Weitere Informationen und Diskussionen über das hier nur kurz erläuterte Transportmodell lassen sich *Scheffler (2008)* und *Janssen (2015)* entnehmen.

Für das nicht abgedichtete Balkenaufleger 7 war die Berücksichtigung von Luftströmungen interessant oder vielmehr notwendig. Unter der Annahme, dass in klassischen Baukonstruktionen für die meisten Fälle ein quasi-stationärer Ansatz für die Verteilung des Luftdrucks genügt (*Scheffler (2008)*), erfolgt die Implementierung von Luftströmungen in *DELPHIN* weniger aufwändig.

Luftmassenbilanzgleichung für ein Referenzvolumen:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho_{REV}^{m_a} = - \frac{\partial}{\partial x} (j_{conv}^{m_a}) + \sigma_{REV}^{m_a} \quad (23)$$

In jedem Volumenelement wird dabei der zeitlichen Änderung der Luftmassenspeicherung  $\rho_{REV}^{m_a}$  auf der linken Seite rechtsseitig der konvektive Transport (hier nur in x-Richtung)  $j_{conv}^{m_a}$  zusammen mit einem Term für Quellen und Senken  $\sigma_{REV}^{m_a}$  gegenübergestellt. Mit der Annahme, dass die Gasphase nur aus trockener Luft und Wasserdampf besteht, gilt dann (VOCs vernachlässigt):

$$j_{conv}^{m_a} = c_g^{m_a} \cdot j_{conv}^{m_g} \quad (24)$$

$$\text{mit } c_g^{m_a} = \frac{p_a}{p_v + p_a} \cdot \frac{R_v}{R_a} \quad (25)$$

Dabei steht  $c_g^{m_a}$  für die Luftmassenkonzentration der Gasphase. Laut *EnBewe (2017)* laufen Luftströmungen in Konstruktionen nicht hoch dynamisch, sondern in der Regel langsam und laminar ab, von Ausnahmen wie hinterlüfteten Fassaden oder starker mechanischer Belüftung abgesehen. Die kinetische Energie wird aus diesem Grund vernachlässigt. Die Lufttransportgleichung lässt sich dann stark vereinfachen zu

$$j_{conv}^{m_g} = -K_g(w) \cdot \left( \frac{\partial p}{\partial x} + \rho_g \cdot g \right) \quad (26)$$

Der Transport ist damit in erster Linie von den Luftdruckunterschieden  $\partial_p$  abhängig. Der Auftrieb infolge von Luftdichteunterschieden  $\rho_g \cdot g$  wird in den Simulationen dieser Arbeit vernachlässigt, da er innerhalb eines Balkenauflegers praktisch keinen Einfluss hat. Kapitel 6.5 erläutert den Ansatz nach WTA-MB 6-2, der für den Auftrieb innerhalb des Gebäudes gewählt wurde. Dort wird ebenfalls auf die Luftpermeabilität  $K_g$  der Materialien eingegangen.

Weitere Vereinfachungen sind, dass Verformungen, wie sie bei Holz in Form von Schwinden und Quellen vorkommen können, in den Berechnungen nicht berücksichtigt werden. Ferner wird von einem lokalen thermodynamischen Gleichgewicht ausgegangen.

### 6.1.2 Numerische Berechnungen in DELPHIN

Wegen der Abhängigkeit von verschiedenen Variablen lassen sich die ablaufenden komplexen Vorgänge nur durch ein System partieller Differentialgleichungen lösen. Für die Vereinfachung der Berechnung nimmt *DELPHIN* eine räumliche Diskretisierung mit Hilfe der Finite-Volumen-Methode (FVM) vor. Die partiellen werden damit in gewöhnliche Differentialgleichungen überführt, die lediglich noch eine Zeitableitung enthalten. Damit lassen sich alle Zustandsgrößen, z. B. Temperatur oder Wassermasse, sowie die Transportkoeffizienten für Wärme und Feuchte in jedem Element zu einem bestimmten Zeitpunkt bestimmen. Anhand der Transportpotentiale zwischen (in der Regel) benachbarten Elementen werden dann die Wärme- und Feuchteströme über die Ränder berechnet. Der Solver kann anschließend, unter Berücksichtigung eventuell vorhandener Quellen und Senken, die Änderung der Zustandsgrößen Temperatur und Feuchte in allen diskretisierten Elementen ausgeben.

Die numerische Berechnung hygrothermischer Aufgabenstellungen ist eine Herausforderung, da für die zum Teil recht großen geometrischen Modelle zwei Bilanzgleichungen, Wärme und

Feuchte, pro Element und Zeiteinheit berechnet werden müssen. Wärme und Feuchtevorgänge sind zum einen stark miteinander gekoppelt, zum anderen ist die Feuchtemassenbilanzgleichung durch die Verwendung des Kapillardrucks von ausgesprochen nichtlinear Natur. Erschwerend kommt hinzu, wenn manche implementierten Modelle oder Gegebenheiten über mehrere Elemente wirken, z. B. die langwellige Abstrahlung über Luftschichten hinweg oder wenn hoch feuchteleitfähige Materialien mit hohem Sorptionsvermögen neben nicht feuchteleit- und -speicherfähigen Materialien wie Bitumen grenzen. Während der numerischen Berechnung verursacht das in den großen Matrizen unerwünschte Nebendiagonalen oder unsymmetrische besetzte Hauptdiagonalen. Im Sinne einer raschen Berechnung werden aber immer eng besetzte, möglichst symmetrische Hauptdiagonalen angestrebt. Um auch aufwändige Berechnungen in akzeptabler Zeit zu Ende zu bringen, wurde für *DELPHIN* ein implizites Integrationsverfahren (*Newton-Raphson*) gewählt. Das Berechnungsergebnis wird in jedem Zeitschritt einer Fehlerkontrolle durch den Vergleich mit einer Taylorreihenapproximation unterworfen, welche die Lösung vergangener Zeitschritte beinhaltet. Wird die zumeist sehr niedrige, erlaubte Ergebnistoleranz überschritten wird der Zeitschritt verkleinert, bis hin zu Sekundenbruchteilen, unabhängig von der Gesamtdauer einer Simulation. Wird die Toleranz nicht erreicht, bricht der Solver die Berechnung mit einer Fehlermeldung ab. Mit veränderten Solvereinstellungen lassen sich solche Fälle allerdings meistens weiterrechnen. Trotz der immensen Fortschritte mit dem neu entwickelten Solver kann deshalb eine dreidimensionale 2-Jahres-Simulation mit 250.000 Elementen auf 16 Kernen mehrere Tage dauern.

Bei Berechnungen mit Lufttransport wird das Luftdruckfeld anhand der aktuellen Temperatur- und Feuchteverteilung *ohne* Rückkopplung und nicht in jedem *Iterations*zeitschritt (Sekundenbruchteile), sondern nach jedem *Simulations*zeitschritt (meistens eine Stunde) aktualisiert. Durch den Verzicht auf die zeitliche Ableitung des Luftdruckfeldes wird die Simulationsdauer zumindest in 1D- und 2D-Berechnungen nur wenig unwesentlich erhöht, weil dann für die Berechnung des Luftdruckfeldes ein lineares Gleichungssystem genügt. Auf die Berücksichtigung der Luftströmungen wird noch in Abschnitt 6.5 eingegangen.

### 6.1.3 Validierung der Software DELPHIN

Für den Praxistest neu entwickelter, numerischer Lösungsverfahren ist es üblich, sofern vorhanden, allgemein anerkannte Referenzfälle heranzuziehen, deren Lösung bekannt ist (Benchmarktests). Können die Ergebnisse eines Benchmarktests mit der vorgegebenen Genauigkeit nachvollzogen werden, gilt das in eine Software integrierte Lösungsverfahren für den jeweiligen Bereich als validiert. Das Projekt HAMSTAD (Heat, Air and Moisture STAnDardization, (*Hagentoft et al. (2004)*)) stellte fünf eindimensionale, zum Teil instationäre Testfälle für solche Zwecke zur Verfügung. *Sontag et al. (2013)* beschreibt, wie diese und weitere Benchmarktests aus der ÖNORM EN 15026 (1D, hygrothermisch-instationär) sowie der ÖNORM EN ISO 10211 (2D, thermisch-stationär) in einem automatisierten Prozedere regelmäßig zur Verifizierung der Software *DELPHIN* verwendet werden.

Die Erweiterung der Software *DELPHIN* in den dreidimensionalen Raum im Rahmen des Projektes *EnBewe (2017)* erforderte eine Validierung der weitaus komplexeren hygrothermischen

Numerik, zumal auch anisotroper Energie- und Stofftransport implementiert worden war. Für das anisotrope Modell wurde im genannten Projekt ein nachvollziehbarer Benchmarktest eingeführt und bestanden, der „Academic Timber Beam End Benchmark“ (ATBEB, siehe Bild 106). Dabei wird ein Holzbalken in einer Klimakammer unter isothermen Bedingungen Feuchteveränderungen ausgesetzt. Von dem zunächst an fünf Seiten mit Aluminiumfolie abgedichteten Balken werden in unterschiedlichen Phasen sukzessive die Folien an den Seiten entfernt, wodurch Messwerte für ein, zwei- und dreidimensionalen Transport vorliegen.

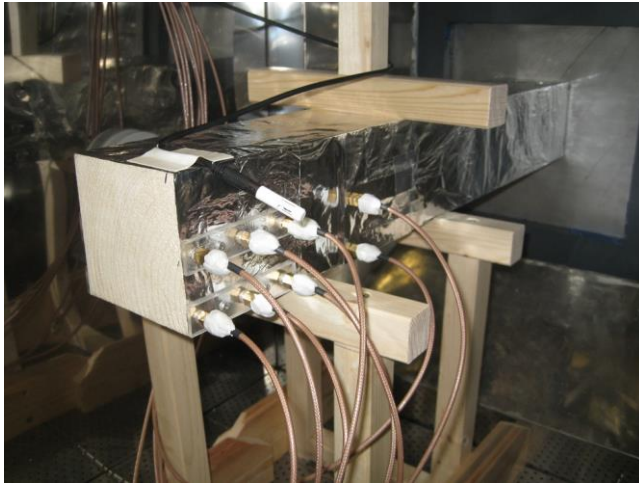


Bild 106 Klimakammer mit dem „Akademischen Balkenkopfstest“ (ATBEB); hier Phase 1 mit eindimensionalem, longitudinalem Transport

Im weiteren Verlauf des Projektes *EnBewe (2017)* ließen sich auch Messungen aus einem Balkenkopfprüfstand mit sechs Balkenauflagern für die erfolgreiche Validierung der Software einsetzen. *Ruisinger et Kautsch (2019)* beschreibt die Überprüfung anhand der beiden allgemein bekannten, stationären, dreidimensionalen Benchmarktests aus dem Anhang C der *ÖNORM EN ISO 10211*. Auch hier war die Übereinstimmung zwischen vorgegebenen und ermittelten Werten sehr gut.

Dieses Kapitel verwertet die detaillierten, in Kapitel 5 besprochenen Messungen hinsichtlich einer komplexen, praxisnahen Validierung der Software.

## 6.2 Weitere verwendete wissenschaftliche Software

### 6.2.1 Heat3 (Lund-Gothenburg Group for Computational Building Physics, Lund, Schweden)

HEAT3 ist ein PC-Programm zur Berechnung dreidimensionaler stationärer und instationärer Wärmeleitung innerhalb von Objekten, die durch ein rechtwinkliges Koordinatensystem beschrieben werden können (*Blomberg (2001)*). Es wird von der Lund-Gothenburg Group for Computational Building Physics an der Lund University (Schweden) entwickelt. HEAT3 löst die Wärmeleitungsgleichungen mit Hilfe der Methode der expliziten finiten Differenzen (FEM). Der Nutzer wählt das Berechnungsnetz, ein stabiles Zeitintervall wird automatisch bestimmt.

Heat3 kann gemäß *ÖNORM EN ISO 10211* als genaues Verfahren eingestuft werden, da die Berechnungsergebnisse der Prüferferenzfälle in der erforderlichen Genauigkeit erhalten werden. HEAT3 wurde zur Laufzeit des Projektes OEKO-ID verwendet, als *DELPHIN* noch nicht in der Lage war, dreidimensionale Berechnungen zu lösen.

### 6.2.2 GenOpt (Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, USA)

GenOpt ist kein Simulationsprogramm, unterstützt jedoch bei der Einschätzung einiger variabler, hygrothermisch relevanter Parameter für die Simulationen (siehe *Wetter (2011)*).

Nahezu alle Parameter, sei es Klima, Material- und Oberflächeneigenschaften oder Übergangsbedingungen unterliegen gewissen Unsicherheiten und Einflüssen bei der Messung. So ergibt sich bei Materialmessungen für fast jeden Kennwert eine mehr oder weniger ausgeprägte Streuung der Messwerte einzelner Probekörper. Genauso können Oberflächeneigenschaften wie der thermische Übergangskoeffizient an einer Wand in Abhängigkeit von der eng begrenzten lokalen Situation vor Ort voneinander bzw. von üblichen Messwerten abweichen. Ist die Differenz zwischen Messwerten und Simulationsergebnissen zu groß, müssen alle diese Parameter auf ihren Einfluss hin untersucht werden.

In den Variantenstudien kristallisieren sich dann für die untersuchten Parameter in der Regel Ergebnisbereiche heraus, die zum einen möglichst eng begrenzt, zum anderen aber in einem sinnvollen Bereich liegen sollten. Indikator für die Güte der gewählten Parameter ist die Differenz zwischen Messdaten und Simulationsergebnis. Für eine möglichst rasche Identifizierung der optimalen Simulationsparameter stellt GenOpt verschiedene Optimierungsalgorithmen zur bereit. Für diese Arbeit wurde der so genannte „GPSPSOCCHJ“-Algorithmus mit den in *Wetter (2011)* empfohlenen Einstellungen verwendet.

Während der Berechnungen optimiert GenOpt eine Kostenfunktion. Das bedeutet normalerweise, dass eine Simulationsausgabe, z. B. ein Energieverbrauch analysiert und sukzessive reduziert wird. Im Rahmen dieser Arbeit ist das nicht möglich, da hier nach jeder Simulation Messdatenverläufe mit Simulationsergebnissen verglichen werden müssen. Deshalb wurde zusätzlich ein Python-Skript geschrieben, das diesen Vergleich ausführt und die Kommunikation zwischen GenOpt und *DELPHIN* übernimmt. Durch die Anpassung der Variablen gemäß des gewählten Optimierungsalgorithmus' in GenOpt wird die Abweichung von Messung und Simulation beständig reduziert. Die zeitlich gemittelte Differenz zwischen Messung und Simulation ist ein transparenter Ausgabewert, an dem sich die Qualität der gefundenen Parameter ablesen lässt.

Für die Reduktion der Kostenfunktion können dabei eine oder mehrere Messdatenreihen gleichzeitig mit den entsprechenden Simulationsergebnissen herangezogen werden. Vielfach wurde festgestellt, dass, wenn nur ein Messsensor herangezogen wird, die Simulation nach der Optimierung für diesen Messsensor sehr gut übereinstimmt. Allerdings weichen dann an den anderen Messpunkten Simulation und Messung stärker voneinander ab. Dies bedingt die Notwendigkeit eines Kompromisses oder einer Priorisierung.

GenOpt wurde ursprünglich für den Bereich der Gebäudeenergie zur Minimierung des Energiebedarfs entwickelt. Die Anwendung von GenOpt in der hygrothermischen Simulation in Verbindung mit einem Python-Skript ist in *Freudenberg et al. (2017)* beschrieben. Aufgrund der veränderten Struktur in *DELPHIN 6* ist es derzeit nur möglich, *DELPHIN 5* Simulationen mit GenOpt zu koppeln. Zudem können nur Einzelwerte variiert werden, hinter denen keine nicht-linearen Funktionen liegen. So lassen sich thermische Übergangswiderstände variieren, genauso wie die Wärmeleitfähigkeit, da hier lineare Funktionen hinterlegt sind, die in *DELPHIN* automatisch generiert werden. Der  $A_w$ - oder  $\mu$ -Wert dagegen können mit GenOpt derzeit nicht bzw. nur mit sehr hohem Aufwand und niedriger Genauigkeit variiert werden. Hier muss bei der Änderung eines Wertes die jeweilige nichtlineare Funktion hoch- oder herunterskaliert werden, was sonst in *DELPHIN* in einer separaten Funktion übernommen wird, die durch GenOpt nicht angesprochen werden kann.  $A_w$ - und  $\mu$ -Werte wurden deshalb auf „herkömmliche“ Art, d. h. manuell, variiert.

### 6.3 Temperatur-Korrektur der Holzfeuchtesensoren

Die Messung der Holzfeuchte auf Basis des elektrischen Leitwiderstandes von Holz ist temperaturabhängig (*Rode et Clorius (2004)*). Aus diesem Grund ist in den Sensoren ein Algorithmus zur Berücksichtigung der Temperaturabhängigkeit implementiert. In den eigentlichen Holzfeuchteelektroden ist keine Temperaturmessung vorgesehen, weshalb die Temperatur in der unmittelbaren Nähe des Holzfeuchtesensors durch einen weiteren Sensor erfasst werden sollte. Im Falle der sehr langen, schräg angebohrten Holzfeuchtesensoren in der Mitte der Balken war das nicht möglich, da den Projektbeteiligten vor Beginn der Messungen noch nicht klar war, an welcher Stelle entlang der ca. 0,4 m langen Sensoren gemessen würde, schließlich konnte sich an den auf der ganzen Länge nicht isolierten Elektroden der Ort der Messung theoretisch ständig ändern. Der Einfachheit halber wurden die Temperatursensoren an den Eintrittspunkt der Holzfeuchteelektroden, in die Ebene der außenseitigen Oberfläche der Dämmplatten bzw. in die Klebemörtelebene, platziert (Bild 107).

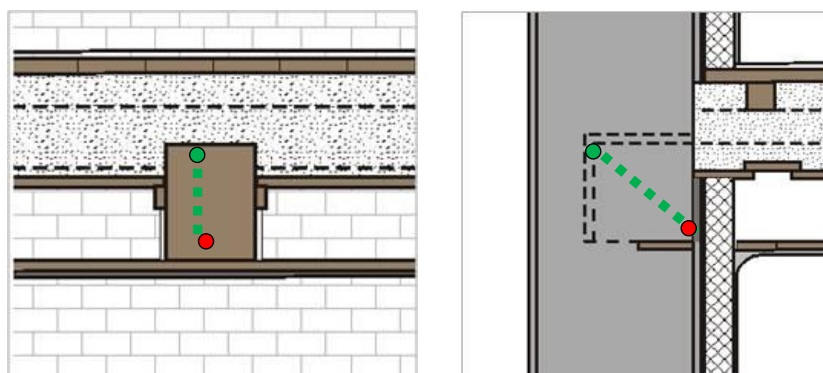


Bild 107 Position des langen Sensors zur Messung der Holzfeuchte (grüne Linie mit Punkt) und Position des dazugehörigen Temperatursensors (roter Punkt)



Wie anhand der Sensoren in Balken 1 in Kapitel 5.7 und durch Simulationen herausgestellt werden konnte, waren die Messwerte des langen Sensors in der Mitte des Balkens grundsätzlich höher als die der nahe an der Innendämmung positionierten Sensoren (Bild 74 und Bild 75). Somit wurde für die Temperaturkorrektur an der falschen Stelle gemessen. Es lag die Vermutung nahe, dass die Deckenbalken nahe dem Stirnholz am feuchtesten waren, da hier die niedrigsten Temperaturen vorlagen und sich der Wasserdampf in der Balkentasche nahe dem Stirnholz konzentrierte (s. Kapitel 5.6.7).

Um die Holzfeuchtemesswerte nachträglich anzupassen, wurde deshalb mit Hilfe von stationären, dreidimensionalen, thermischen Simulationen die Temperaturdifferenz zwischen den Temperatursensoren am Beginn der Holzfeuchtelektroden und an der kältesten Stelle des Balkens, im Stirnholzbereich, ermittelt (s. Bild 108). Sollte sich die tatsächliche Messstelle (zeitweise) näher am Innenraum befinden, liegen die temperaturkorrigierten Werte auf der sicheren Seite.

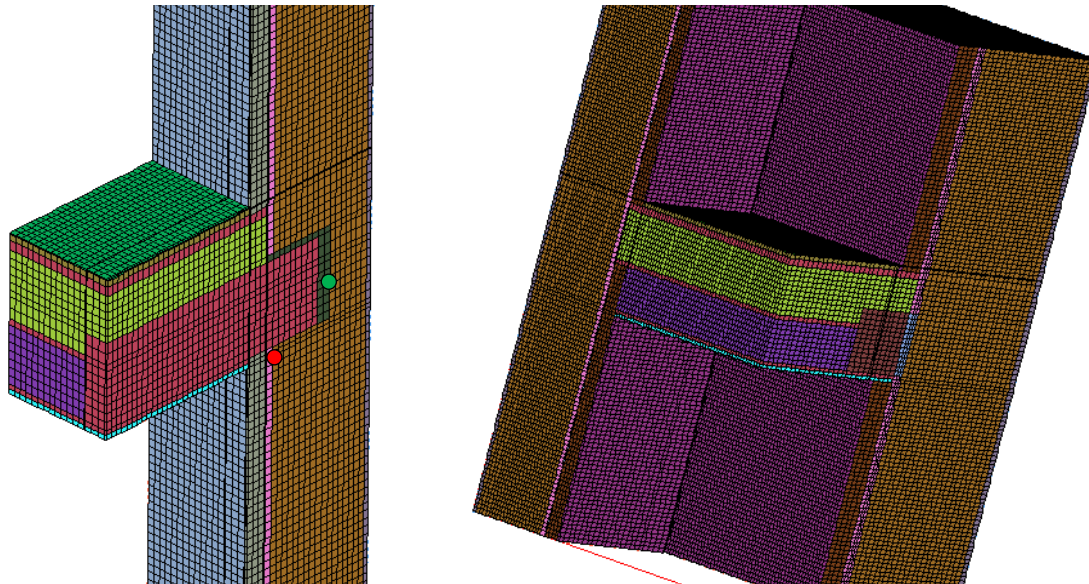


Bild 108 Ausschnitte aus 3D-Simulationen mit Heat3D zur Ermittlung der Temperaturdifferenz zwischen den eingezeichneten Punkten: links: Modell für die Balken 2 bis 7 (Schnitt durch Symmetrieebene), rechts: Modell für Streichbalken

Für die Temperatur-Korrektur wurden drei verschiedene konstruktive Details berechnet:

1. Für die Balken 2 bis 7 eine Konstruktion mit einem mittleren Wert für den Wärmewiderstands des Innendämmsystems (80 mm dick), die Balkenauglerlänge und die Balkenauglertiefe (s. Tab. 30).
2. Für den Streichbalken 1 die konkrete Auflagersituation mit dem dort angebrachten Aufspritz-Zellulose-Dämmsystem.
3. Für den Balken 8 das ungedämmte Referenzfeld mit dessen Auflagersituation.

In einer Serie von stationären Simulationen wurde die Außentemperatur zwischen 20 und -15°C variiert. Da die Temperaturdifferenzen zwischen Stirnholz und Sensor vornehmlich im

Winter sehr hoch sind, wurden für die Temperaturen im Obergeschoß und Dachgeschoß Durchschnittswerte der drei Winter angesetzt, im Obergeschoß 23°C und im Dachgeschoß 19°C. Die Wärmeleitfähigkeit des Deckenbalkens betrug entweder 0,13 W/(m·K), dem Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit für Wärmetransport quer zur Faserrichtung, oder 0,27 W/(m·K) für den Wärmetransport längs der Faserrichtung.

Die unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten wirken sich in Abhängigkeit vom berechneten Detail nur wenig aus: am Stirnholz der Balken 2 bis 7 weichen die Ergebnisse um maximal 0,6 K bei -15°C Außentemperatur ab, am Streichbalken nur um 0,3 K, an Balken 8 allerdings um 1,9 Kelvin. Mit steigender Außentemperatur verringerte sich die Differenz. Da es in der verwendeten Version von HEAT3 nicht möglich war, eine richtungsabhängige Wärmeleitfähigkeit anzugeben, wurden die Ergebnisse mit den unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten gemittelt.

In Tab. 23 sind die Ergebnisse der Simulationen dokumentiert. Es stellte sich ein praktisch linearer Zusammenhang zwischen den unterschiedlichen Außentemperaturen und der Temperaturdifferenz ein, weswegen es genügt nur einen Teil der Ergebnisse in Tabellenform abzubilden. Wie zu sehen ist, unterscheidet sich die Situation zwischen dem Streichbalken und den Balken der gedämmten Felder nicht wesentlich. Die Ergebnisse der gedämmten Balken weichen allerdings stark von den thermischen Verhältnissen an Balken 8 ab, weil dort das Innenklima auf den Temperatursensor direkter einwirken kann.

Tab. 23 Ergebnisse der dreidimensionalen, stationären Simulationen mit Heat3D: Temperaturdifferenz zwischen Temperatursensor und Stirnholz (siehe Bild 108)

Außentemperatur [°C]	20	10	0	-10	-15	Gleichung für $\Delta\theta$ [K]
Temperaturdifferenz [K]						
- (Streich-)Balken 1	0,5	2,2	4,0	5,8	6,7	$-0,176 \theta_{\text{ext}} + 4 \text{ K}$
- Balken 2 bis 7	0,7	3,1	5,5	8,0	9,2	$-0,243 \theta_{\text{ext}} + 5,5 \text{ K}$
- Balken 8	1,3	5,2	9,0	12,9	14,8	$-0,386 \theta_{\text{ext}} + 9 \text{ K}$

Temperatur Obergeschoß 23°C, Dachgeschoßzimmer 19°C

Die Firma Schaller, die nicht Hersteller der Holzfeuchte-Sensoren ist, stellte den in den Messsensoren implementierten Algorithmus für die Berechnung der Temperaturkorrektur zur Verfügung:

1. Umrechnung der gemessenen Holzfeuchte am Stirnholz ( $u_{\text{Stirnholz,gemessen}}$ ) in den gemessenen Wassergehalt:

$$\text{Wassergehalt} = \frac{100 \cdot u_{\text{Stirnholz,gemessen}}}{100 + u_{\text{Stirnholz,gemessen}}} \quad (27)$$

2. Temperaturkompensation und Umrechnung des gemessenen Wassergehalts in die temperaturkorrigierte Holzfeuchte  $u_{\text{Stirnholz,T-korrigiert}}$ :

$$u_{\text{Stirnholz},T\text{-korrigiert}} = \frac{100 \cdot \text{Wassergehalt} \cdot \text{TK}}{100 - \text{Wassergehalt} \cdot \text{TK}} \quad (28)$$

Für den Temperaturkorrekturfaktor TK gilt laut Firma Schaller:

Tab. 24 Temperaturkorrekturfaktor für den Algorithmus zur Berücksichtigung der Temperaturabhängigkeit bei der Verwendung der Holzfeuchte-Messgeräte

Temperatur (°C)	23	10	0	-10	Gleichung
Temperaturkorrekturfaktor TK	1,0	1,16	1,33	1,53	$\text{TK} = 1,3351 e^{-0,013 \theta}$

Nach der Ermittlung der Temperaturdifferenzen mittels HEAT3 zwischen dem Temperatursensor und der äußeren Schicht am Holzbalken (Stirnholz) wurde folgendermaßen vorgegangen:

1. Durch Umstellung des dargestellten Algorithmus wurde die ursprünglich gemessene Holzfeuchte  $u_{\text{Stirnholz,gemessen}}$  berechnet; der Temperaturkorrekturfaktor wurde auf Basis der in der Dämmebene gemessenen Temperatur ermittelt.
2. Auf Grundlage der gemessenen Außentemperaturen und der thermischen 3D-Simulationen wird die „fehlende“ Temperaturdifferenz  $\Delta\theta$  zwischen der Messposition im Bereich des Stirnholzes  $\theta_{\text{Stirnholz}}$  und dem Temperatursensor in der Ebene der Innendämmung  $\theta_{\text{Balken,ID}}$  aus Tab. 23 bestimmt und zur gemessenen Temperatur  $\Delta\theta + \theta_{\text{Balken,ID}}$  hinzuaddiert.
3. Zuletzt wird mit der gemessenen Holzfeuchte ohne Temperaturkorrektur  $u_{\text{Stirnholz,gemessen}}$  und der berechneten Temperatur am Stirnholz  $\theta_{\text{Balken, Stirnholz}}$  die temperaturkorrigierte Holzfeuchte  $u_{\text{Stirnholz},T\text{-korrigiert}}$  am Stirnholz berechnet.

An den Balken 1 und 8 befinden sich je zwei weitere Holzfeuchte-Sensoren ungefähr auf der Ebene der kalten Seite der Innendämmung. Bei diesen Sensoren sind die entsprechenden Temperatursensoren nahe der eingebrachten Holzfeuchte-Messfühler fixiert, weshalb dort eine Temperatur-Korrektur nicht notwendig war.

Im Vergleich von Diagrammen mit reinen Messdaten zu Diagrammen mit temperaturkorrigierten Messdaten fällt bei Letzteren auf, dass die Kurven lebhafter wirken bzw. etwas größere Sprünge aufweisen. Das wird durch die Multiplikation mit dem Temperaturkorrekturfaktor  $\text{TK} > 1$  verursacht, der die Differenzen von einem Messwert zum Nächsten stärker hervorhebt (Bild 73). Die temperaturkorrigierten Diagramme der Holzfeuchten sind in den Bild 73 bis Bild 75 zu sehen.

## 6.4 Einfluss von Schlagregen

Der Einfluss von eindringendem Schlagregen wird in vielen Publikationen immer wieder als entscheidend für die hygrothermische Situation an Balkenköpfen angesehen (*WTA-MB 8-14*,

*Kehl et al. (2013)* u. v. a.). Vollflächig verputzte Außenoberflächen mit wasserhemmend ausgebildetem Putz wirken sich deshalb sehr günstig aus.

Der Außenputz am Testhaus Graz wies dem Augenschein nach keine Risse auf. Der Anschlussbereich an die aufwändige Fensterverzierung war in Teilbereichen schadhaft gewesen und wurde zu Beginn des Projektes ausgebessert. Während dieser Ausbesserungsarbeiten hatte sich ein Stein ohne spezielle Krafteinwirkung aus dem verputzten Mauerwerk gelöst. Weitere derartige Schäden traten nicht noch einmal auf und sind auch seitens der Leitung des Kindergartens nicht bekannt. Über die erwähnten Fehlstellen im Putz kann Schlagregen in die Konstruktion eingedrungen sein, welcher der Festigkeit des Mörtels im Laufe der Zeit zusetzte. Sollte allerdings die Art des Mauermörtels oder der Vermauerung großflächig ähnlicher Qualität sein, spricht dies nicht für deren Güte. Gleichwohl darf angenommen werden, dass ein derart mürbes Mauerwerk mit wenig Bindemittel und nicht vollflächig ausgefüllten Mörtelfugen (Bild 109), diffusionsoffen ausgebildet ist, was sich günstig auf die Situation in den Balkenauf-lagern auswirkt.



Bild 109 Mauerwerksprobekörper aus einem Gebäude mit teilweise gefüllter Mörtelfuge

Von den Fehlstellen und Rissen abgesehen, entscheiden die hygrischen Eigenschaften des Außenputzes über die Menge des eindringenden Schlagregens. Dessen Wasseraufnahmekoeffizient beträgt  $3,84 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$  und der  $\mu$ -Wert 12,2. Der Außenputz wurde mit Anstrich(en) gemessen, wobei der Anstrich beim Wasseraufsaugexperiment, wie auch in der Realität, der Wasserbelastung ausgesetzt war, also die Wasseroberfläche kontaktierte. In der deutschen DIN 4108-3 wird ein Außenputz mit einem derartigen Wasseraufnahmekoeffizienten als ‚wassersaugend‘ bezeichnet und dürfte laut Tabelle 4 der Vorschrift nur in Gebieten oder auf Wänden mit geringer Schlagregenbeanspruchung eingesetzt werden. Auf der anderen Seite weist er für einen Außenputz einen vergleichsweise niedrigen  $\mu$ -Wert von 12,2 auf, weshalb die Wand gut austrocknen kann. Das Stadtgebiet Graz befindet sich mit im langjährigen Mittel über 800 mm/a Niederschlag (Graz-Universität 885 mm/a laut *Auer et al. (2012)*) in einem Gebiet mit hoher Schlagregenbeanspruchung. Die Konstruktion wäre gemäß der einfachen Einteilung der *DIN 4108-3* streng formal nicht genehmigungsfähig. Im Einzelfall ist jedoch entscheidend, wie viel Schlagregen tatsächlich auf eine Wand auftrifft (*Ruisinger et al. (2013)*).



Bild 110 Ansicht der nach Südwestsüd ausgerichteten Fassade am 17. April 2011;

Für die Berechnung der Schlagregenbelastung werden der Niederschlag auf eine horizontale Fläche, die Windgeschwindigkeit und die Windrichtung benötigt. Diese Daten wurden durch die KFU Graz zur Verfügung gestellt (siehe Kapitel 5.2).

Die Windrichtung in Graz wird von der Lage im Murtal und durch das sich südlich anschließende Grazer Becken geprägt. Auch die Höhe des Standortes in Graz übt einen großen Einfluss aus (*Spangl (1995)* und *ZAMG (2019)*). Wegen des von Nordostnord nach Südostsüd verlaufenden Murtals kommen die vorherrschenden Windböen aus diesen Richtungen. In Bild 111 ist die Häufigkeitsverteilung der Windrichtungen für den Standort Graz-Messendorfberg (grüne Kurve) zu ersehen, an dem die Häufigkeitsverteilung noch eindeutiger ist. Der Standort Graz-Uni (KFU, blaue Kurve) ist dem Testhaus sehr nahe (s. 5.2). Der Quellzeitraum der zugrundeliegenden Klimadaten sind die Jahre 1971 bis 2000. Die Fassade mit den Innendämmsystemen weist den Daten zufolge in eine regenarme Richtung ( $\sim 220^\circ$ , Bild 111 rechts). Gleichzeitig wird sie durch einen großen Laubbaum abgeschirmt, der in den Sommer- und frühen Herbstmonaten die Schlagregenbelastung leicht reduziert. In Bild 110 ist der noch unbelaubte Baum zu sehen, der in circa 7 m Entfernung vor der Gebäudeecke, ungefähr in Verlängerung der Ostsüdost ausgerichteten Gebäudeseite wächst und einige Meter über die Oberkante des gedämmten Bereichs im Dachgeschoß hinausragt. Eine nach Südwestsüd ausgerichtete Fassade erhält viel Sonneneinstrahlung, wodurch feuchte Fassaden schneller austrocknen können. Dieser feuchteentlastende Effekt wird wiederum auch durch den Baum zeitweise reduziert.



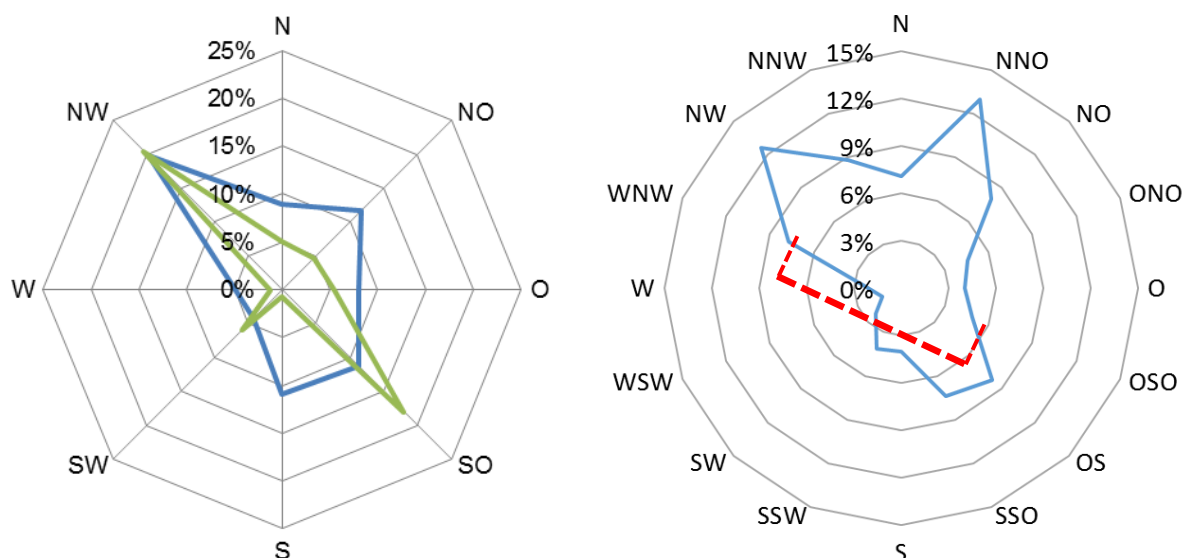


Bild 111 Links Häufigkeitsverteilung der Windrichtung an zwei Grazer Messstationen (ZAMG (2019)), rechts Schlagregenhäufigkeitsverteilung mit der geographischen Ausrichtung der Testwand (KFU Graz/ZAMG vom 1.06.2011 bis zum 01.06.2013)

In Bild 112 sind die Außentemperatur und Luftfeuchte am Ende einiger Auflagertaschen dargestellt, sowie Niederschlagsmengen auf eine horizontale Fläche. Es sind allerdings nur die Niederschlagsereignisse abgebildet, welche, unabhängig von Umströmung oder Regenschutz, aufgrund der Windrichtung bei Windgeschwindigkeiten über 0,1 m/s tatsächlich auf die Testwand auftreten würden. Bei dem abgebildeten Zeitraum handelt es sich um den für die Testwand „regenreichsten“ Zeitabschnitt zwischen September 2011 und April 2012.

In dem untersuchten Zeitraum wurde nicht bzw. erst ab dem 5. Oktober geheizt, sodass Einflüsse des Innenklimas von untergeordneter Bedeutung sind.

Schlagregen, der in einen Wandaufbau eindringt, kann je nach Regendauer und -menge sowie Transportvermögen der Materialien einige Stunden bis Wochen benötigen, bis er ungefähr 0,1 m tief in das Mauerwerk bis zur Ebene der Balkenköpfe vorgedrungen ist.

Aus den Messdaten in Bild 112 ist nur schwerlich zu beurteilen, ob die ungefähr 5 %-ige Erhöhung der Luftfeuchte am Ende der Balkenauflagertaschen am 19./20. September 2011 auf das Regenereignis oder die niedrigeren Außentemperaturen nach dem Regenereignis zurückzuführen ist. Zumindest ist festzustellen, dass die Feuchteerhöhung sehr klein ist. Ein entsprechender Impuls durch das Innenklima (hier nicht abgebildet) war nicht gegeben.

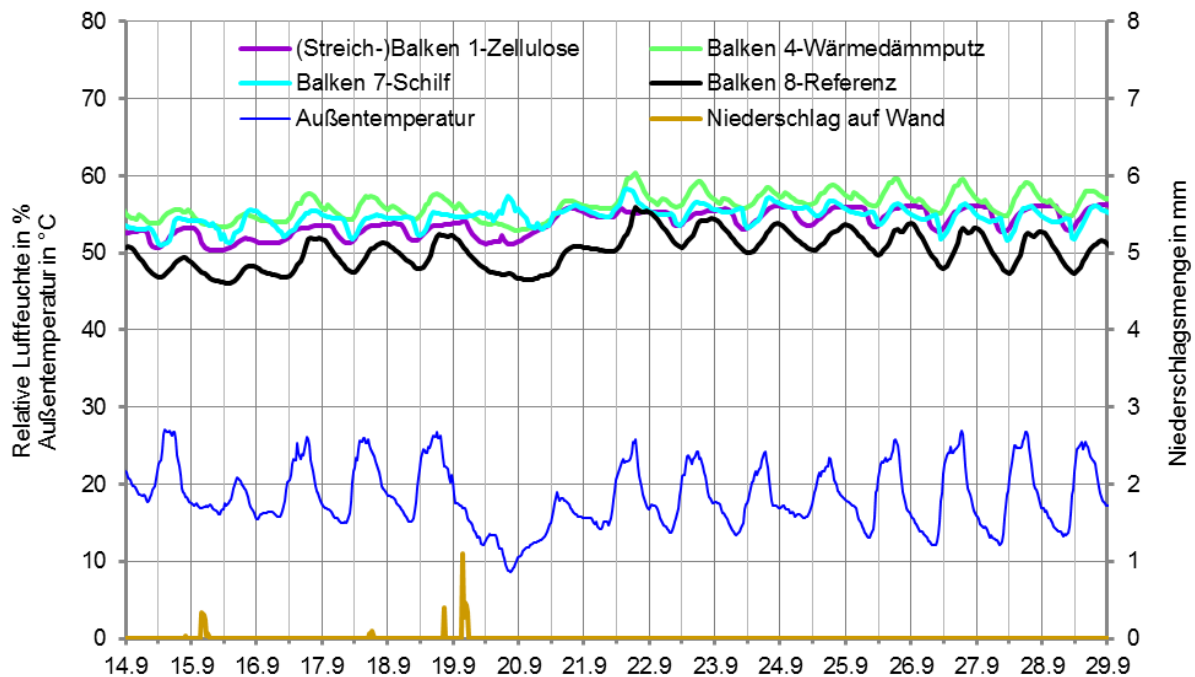


Bild 112 Verlauf der Außentemperatur und der relativen Luftfeuchte im äußeren Bereich einiger Auflagertaschen sowie Niederschlagsmengen (14.9. bis 29.9.2011)

Zu Vergleichszwecken wurden zwei Simulationen mit und ohne Schlagregenbelastung durchgeführt. Bei der simulierten Konstruktion handelt es sich um den mit Perliteplatten gedämmten Wandabschnitt. Das linke Diagramm in Bild 113 belegt die Zunahme der gesamten Feuchtemasse während der Schlagregeneignisse am 18. und 19.9.2011. Das Abtrocknen der aufgenommenen Menge zieht sich bis zum 24. September 2011 hin. Im rechten Diagramm im Bild 113 symbolisieren die vertikalen Linien die Materialschichtgrenzen, auf der linken Seite bzw. der y-Achse befindet sich die Außenoberfläche. Die beiden dicken Linien geben das Profil der relativen Luftfeuchte gegen 6 Uhr früh wieder, kurz nach dem Ende des Schlagregeneignisses. Auch ohne Schlagregen werden für das äußerste Element ca. 93 % Luftfeuchte ermittelt (rote Linie). Die blaue Linie zeigt, dass mit Schlagregeneinfluss zu diesem Zeitpunkt fast die ganze Putzschicht durchfeuchtet ist. Die maximale Ausbreitung wird nach ca. 40 h erreicht (dünne Linien). In ca. 0,1 m Entfernung von der Außenoberfläche, die Balkenaufleger sind ungefähr weitere 0,1 m von dieser Stelle entfernt, beträgt die Erhöhung der Luftfeuchte in den Simulationen weniger als 5 % und ist somit vernachlässigbar.

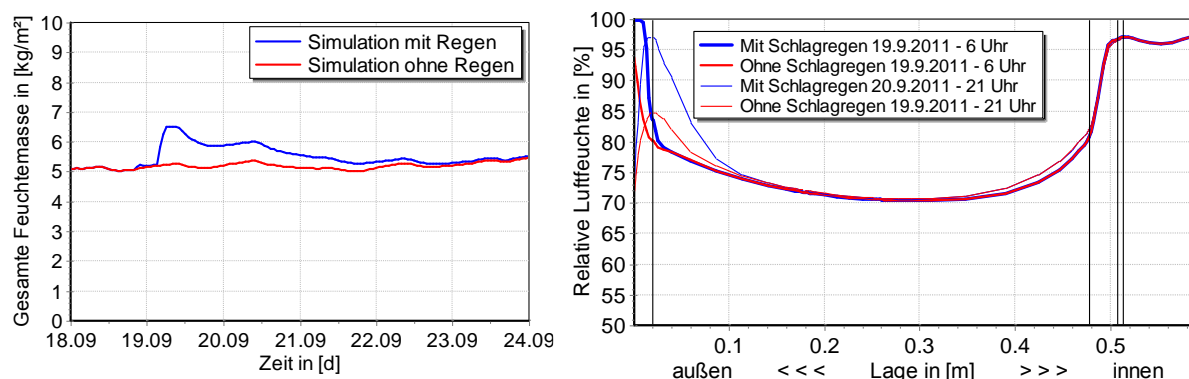


Bild 113 Links gesamte Feuchtemasse mit und ohne Schlagregeneinwirkung; rechts Profile der relativen Luftfeuchte kurz nach dem Schlagregenereignis und ungefähr 1,5 Tage später

Im Zeitraum vom 1. Juni 2011 bis zum 31. Mai 2013 werden von der Testwandoberfläche gemäß des In *DELPHIN* implementierten Modells nur  $8,4 \text{ l/m}^2$  tatsächlich absorbiert. Eine genauere Analyse der Schlagregenmengenverteilung mit Hilfe von Simulationen ergab, dass die nach Nordwestnord ausgerichtete Gebäudewand mit  $35,3 \text{ l/m}^2$  am meisten Schlagregen absorbiert.

Da es sich bei diesem Regenereignis tatsächlich um das „schwerste“ aus südwestsüdlicher Richtung handelte, kann in Zusammenhang mit den Schlussfolgerungen aus Bild 111 und Bild 112 davon ausgegangen werden, dass Schlagregen keine ernsthafte Gefahr für die Balkenauflagertaschen der Testwand darstellte.

## 6.5 Berücksichtigung der Permeabilität der Baumaterialien

Entgegen der landläufig verbreiteten Annahme sind Wandkonstruktionen nicht luftundurchlässig, wie schon *Max von Pettenkofer* zeigte, wenn auch mit fragwürdigen Experimenten (*Künzel (2002)*). Mit Hilfe eines Trichters auf der einen Seite konnte er eine Kerze auf der anderen Seite einer Wand ausblasen, jedoch nur mit einem Druck, wie er in der Realität nicht vorkommt. Richtig ist trotzdem, dass durch das Porengefüge und besonders durch Bauwerksfugen und –risse Luft durch eine Konstruktion strömen kann.

Vor allem Leichtbauten oder historische Mauerwerkskonstruktionen weisen höhere Luftdurchlässigkeiten auf (*Hens et al. (2007)* und *AG Mauerziegel (2000)*). Diese können von vornherein vorhanden gewesen sein, z. B. durch eine schlechte Verarbeitungsqualität, oder physikalische und chemische Umwandlungsprozesse bzw. Naturereignisse verursachten im Lauf der Jahre eine höhere Permeabilität. Messwerte liegen kaum vor und können in situ nur mit hohem Aufwand bestimmt werden (*AG Mauerziegel (2000)*). Die Luftdurchlässigkeit von Wandkonstruktionen (üblicherweise in  $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ ) könnte im Zuge einer Blower-Door-Messung (*ÖNORM EN 13829*) ermittelt werden, wobei sich das Messen der bloßen Wandkonstruktion ohne Fenster und Raumschlüsse schon wegen der unüblichen Anwendung aufwändiger gestaltet. Außerdem würde sich das Messergebnis dann auf die gesamte Wandkonstruktion beziehen und kann nicht auf den Anteil einzelner Schichten aufgeteilt werden, wie z. B. in *Zeller (1995)*.



Die treibende Kraft für die Luftdurchströmung ist die Differenz des Luftdrucks zwischen Innenräumen und Außenklima. Bei Blower-Door-Tests wird ein Differenzdruck von üblicherweise 50 Pa aufgeprägt. In der Realität tritt ein solcher Druckunterschied ohne weitere Einflüsse nicht auf (die Messapparaturen derartiger Drücke sind jedoch weitaus günstiger als die zur Messung geringerer Differenzdrücke). Die Durchlässigkeit, die für eine Konstruktion auf diese Weise ermittelt wird, lässt sich nicht für die im Normalfall auftretenden Druckunterschiede übertragen. Schließlich ist die Luftdurchlässigkeit, wie die meisten Leitfähigkeiten, nicht konstant bzw. linear ansteigend, sondern abhängig von der Höhe des antreibenden Potentials.

Eine Übertragung von Luftdichtheit-Messwerten von einem Gebäude auf ein anderes Gebäude gleicher oder ähnlicher Bauart ist problematisch, da die Luftdichtheit von vielen Faktoren bis hin zu der Arbeitsweise der Handwerker, Erschütterungen oder den klimatischen Verhältnissen abhängig ist. Ohne (viele) weitere Messungen, z. B. in Forschungsprojekten, bleibt dem Abschätzen der Luftdurchlässigkeit weiterhin mehr als nur ein spekulativer Hauch anhaften. Zudem fehlen zum Teil die Angaben zur Messmethode oder zum verwendeten Differenzdruck in den wenigen, vorhandenen Literaturquellen, weswegen auch diesen Werten eine gewisse Skepsis entgegengebracht werden muss. Trotzdem wurden, mangels anderer Quellen, mit Hilfe dieser Literaturangaben und Simulationen den Materialien Luftdurchlässigkeiten zugeordnet. Die anschließende Tabelle führt einige Messwerte für Materialien und Konstruktionen auf, eine Dickenangabe fehlte teilweise in den Quellen.

Tab. 25 Luftdurchlässigkeit und Permeabilität einiger Baustoffe und Konstruktionen mit Angabe der Literaturquelle

Bezeichnung	Permeabilität	Luftdurchlässigkeit ( $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ) und Luftdruckdifferenz	Quelle
Mauerwerk verputzt		0,1 – 2,0 (bei $\Delta p = 50 \text{ Pa}$ )	AG Mauerziegel (2000)
Kalkputz (innen)		0,02 – 0,6 (bei $\Delta p = 50 \text{ Pa}$ )	./.
Veneer wall (Vormauer- schale aus Vollziegeln)	$3.5 \cdot 10^{-5}$ bis $6 \cdot 10^{-3}$ $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}^{0.2})$	2.4 – 127 (bei $\Delta p = 50 \text{ Pa}$ )	Hens et al. (2007)
“Inside leaf with plaster finish” (verputzte, innen liegende Ziegelschale)	$1.0 \cdot 10^{-5}$ $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}^{0.45})$	1.5 (bei $\Delta p = 50 \text{ Pa}$ )	./.
Vollziegelwand, unverputzt, 198 mm, 10 mm Mörtel		0.56 (bei $\Delta p = 10 \text{ Pa}$ )	Hens (2006)
140 mm Hochlochzie- gel, einseitig 10 mm Gipsputz		0.21 (bei $\Delta p = 10 \text{ Pa}$ )	./.

Bezeichnung	Permeabilität	Luftdurchlässigkeit ( $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ) und Luftdruckdifferenz	Quelle
140 mm Hochlochziegel, 10 mm Mörtelfuge, unverputzt		0.4 (bei $\Delta p = 10 \text{ Pa}$ )	./.
Mineralwolle / Zellulosedämmung	$5 \cdot 10^{-5} \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$	k. Angabe	DTU Byg (2013)

Die Tatsache, dass sich während der anfänglichen Bauarbeiten ein Mauerwerksziegel vor dem Balkenkopf ohne größere Krafteinwirkung aus dem Mauerwerk löste, sowie die bei Probenahmen äußerst poröse Erscheinung des Mauermörtels, weist darauf hin, dass es sich beim Testhaus um ein luftdurchlässiges Mauerwerk handelt. Der Luftdurchlässigkeitswert der simulierten Wand bzw. die Permeabilitäten der Bestandmaterialien orientierten sich deshalb an den niedrigeren Literaturwerten aus Tab. 25.

In *DELPHIN* ist ein vereinfachtes Luftströmungsmodell in Form der *Darcy*-Strömung enthalten, welches lediglich stationäre Strömungen inkompressibler Fluide betrachtet. Die Möglichkeit, Auftrieb infolge von Dichteunterschieden der Luft mit zu berücksichtigen, wurde nicht wahrgenommen, da die Simulationsdauer dadurch deutlich ansteigt. Ferner und innerhalb eines eng begrenzten Balkenauflegers nicht mit nennenswertem Auftriebsströmungen zu rechnen ist. Zudem war der Luftdruck den Innen- und Außenoberflächen unmittelbar aufgeprägt worden (s. nächste Seite).

Die Permeabilität kann in *DELPHIN* als ein fixer Wert oder eine Funktion, z. B. in Abhängigkeit vom Wassergehalt oder der Temperatur, definiert werden. Allerdings ist es nicht möglich, eine Abhängigkeit vom anliegenden Druckunterschied anzugeben, was am sinnvollsten wäre. Deshalb wurde entschieden, einen fixen Wert zu wählen, der somit keinen Zweifel über die aktuelle Höhe aufkommen lässt. Für die Festlegung der Permeabilitäten wurden eindimensionale Simulationen der ungedämmten Konstruktion mit *DELPHIN* durchgeführt, in denen die Luftdurchlässigkeit der einzelnen Schichten variiert wurde. Der Außen- und Innenoberfläche waren die gemessenen Klimabedingungen zugeordnet, der Differenzdruck betrug aus Gründen der Vergleichbarkeit 50 oder 10 Pascal. Der Simulationszeitraum umfasste die ersten beiden Jahre der Messungen.

Die folgende Tabelle gibt einige Simulationsergebnisse wieder. Die Ausgabeeinheit der Software *DELPHIN5* ist  $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ , weshalb für die Umrechnung die Dichte der Luft berücksichtigt werden musste. Der in der Software *DELPHIN5* voreingestellte Wert von  $1,205 \text{ kg}/\text{m}^3$  wurde als konstant übernommen.

Tab. 26 Durchschnittlicher Luftfluss bei einigen Simulationen unter Angabe der gewählten Luftdurchlässigkeiten der Bestandsmaterialien; Differenzdruck 50 Pa

Nr.	Luftdurchlässigkeitskoeffizient [s]			Luftfluss [kg/(m <sup>2</sup> ·h)]	Luftfluss [m <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> ·h)]
	Außenputz	Mauerwerk	Innenputz		
1	1,0 e-03	1,0 e-03	1,0 e-04	232,0	192,5
2	1,0 e-04	1,0 e-03	1,0 e-04	188,0	156,0
3	1,0 e-04	1,0 e-04	1,0 e-04	35,3	29,3
4	1,0 e-04	1,0 e-04	1,0 e-05	23,1	19,2
5	1,0 e-05	1,0 e-04	1,0 e-05	18,6	15,4
6	1,0 e-05	1,0 e-05	1,0 e-05	3,5	2,9

Die Vorzugsvariante 6, die in den Simulationen mit Luftdruck, wenn nicht anders angegeben, zur Anwendung kam, entspricht ungefähr den Angaben aus *AG Mauerziegel (2000)*. Für die neu aufgetragenen Schichten der Dämmmaterialien und besonders deren Klebemörtel und Deckputze wurde angenommen, dass deren Luftdurchlässigkeiten niedriger sind. Hier wurden Werte zwischen  $5,0 \cdot 10^{-6}$  und  $1,0 \cdot 10^{-7}$  s angeordnet. Für die Schilfplatten betrug die Luftdurchlässigkeit dagegen  $1,0 \cdot 10^{-4}$  s.

Der Luftdruckunterschied zwischen dem Gebäudeinneren und dem Außenklima ist in der Regel sehr gering und beträgt nur wenige Pascal. Die Messung solcher geringen Druckunterschiede ist nur mit hochpräzisen, kostspieligen Messsensoren möglich, welche im Projekt nicht vorgesehen waren. Für den Differenzdruck mussten deshalb Annahmen getroffen werden.

Ein Modell, welches Druckunterschiede in Folge von thermischem Auftrieb und einer mechanischen Lüftungsanlage innerhalb von Gebäuden berücksichtigt, stellt das *WTA-MB 6-2* vor. Die Berechnung in dieser Arbeit erfolgt nach der daraus abgeleiteten, sinnvolleren Formel:

$$\Delta P = \rho \cdot \frac{T_i - T_e}{T_i} \cdot g \cdot \frac{h}{2} + \Delta P_{mech} \quad (29)$$

wobei  $h$  die Höhe des zusammenhängenden Luftraums, auch über die Etagen hinweg, bedeutet (hier  $h = 12$  m) und  $g$  für die Erdbeschleunigung ( $9,81 \text{ m/s}^2$ ) steht. Beachtet werden sollte, dass es sich in der Formel um die thermodynamische Temperatur in Kelvin handelt. Da an dem untersuchten Gebäude keine Lüftungsanlage vorhanden war, entfällt der mechanisch erzeugte Differenzdruck  $\Delta P_{mech}$ . Im Vergleich zur originalen Formel im *WTA-MB 6-2* wurden hier lediglich im Nenner  $T_i$  und  $T_e$  vertauscht, damit die resultierende Druckdifferenz positiv wird.

Es wurde zugelassen, dass das Luftdruckgefälle, vornehmlich im Sommer, auch nach innen weisen kann, weil es bei diesen Simulationen darum ging, eine reale Situation abzubilden und Undichtigkeiten in Konstruktionen nicht nur in eine Richtung wirken können. Rückströmungen sind im WTA-Merkblatt nicht beabsichtigt, allerdings ist die Zielsetzung des Merkblatts eine andere: ein Ergebnis auf der sicheren Seite. Der Effekt dieser Rückströmung dürfte jedoch

vernachlässigbar sein, wie im folgenden Schaubild mit den Differenzdrücken zu sehen ist: Sie kommt nur selten zustande und die dabei auftretenden Druckdifferenzen sind sehr niedrig (Bild 114).

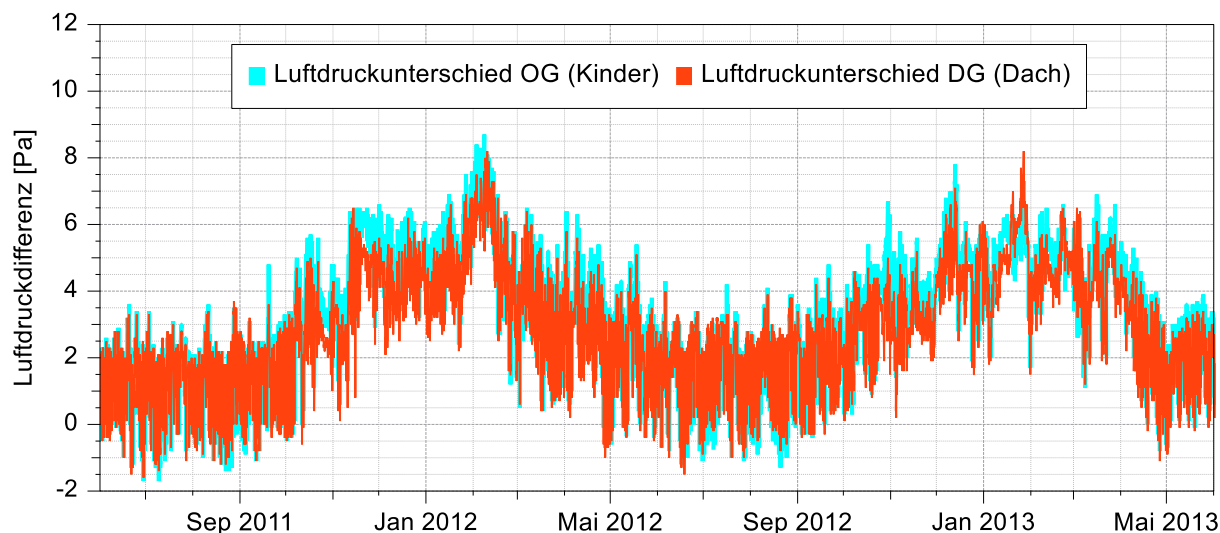


Bild 114 Differenzdruck zwischen Dach-, Obergeschoß und Außenklima gemäß WTA-MB 6-2

## 6.6 Vergleich mit Messungen im eindimensionalen Bereich

Die Qualität der vorliegenden Daten für das Nachvollziehen der Messergebnisse in Simulationen ist differenziert zu bewerten. So sind die Materialeigenschaften der vorhandenen Materialien überwiegend bekannt. Die Komponenten der Innendämmsysteme waren zum Großteil sehr genau untersucht, mit Ausnahme des Lehmklebers und der schwierig zu erfassenden hygri-schen Transportparameter der Schilfplatten. Auch der Bestandsinnenputz und -außenputz sowie die Ziegelsteine wurden im Labor untersucht, die Anzahl der Proben aus der Bestandswand war allerdings gering. Die Eigenschaften des Mauermörtels konnten leider nicht bestimmt werden. Mehrere Versuche der Probenahme des sehr mürben Materials misslangen, weil die Proben zerbröselten.

Um die Unwägbarkeiten, die mit der Messung von Materialeigenschaften, Klima und hyg-rothermischen Zuständen in den Bauteilen verbunden sind, zu minimieren, wurde bei der Nachrechnung der Messungen mit dem Bauteil begonnen, welches die geringste Anzahl solcher Unwägbarkeiten aufweist, dem eindimensionalen Wandaufbau. Dabei standen die Sensoren in der Klebemörtelschicht der Dämmsysteme bzw. im Feld des Wärmedämmputzes und der Aufspritz-Zellulose auf der Bestandsoberfläche und die Oberflächentempersensoren zur Verfügung. Die Messfühler auf der Bestandsoberfläche lagen mit den denen der Innenoberflächentemperaturen auf einer Achse, die Fühler auf der Außenoberfläche etwas darunter. Erst nach den eindimensionalen Querschnitten wurden die anspruchsvolleren Details um die Balkenköpfe simuliert.

Streng genommen ist auch der eindimensionale Wandquerschnitt wegen der Mörtelfugen eine zweidimensionale Konstruktion. Aufgrund der bröseligen Konsistenz des Mauermörtels konnten allerdings keine Probekörper gewonnen werden, sodass keinerlei gemessenen Eigenschaften dazu vorliegen. Insofern würden die Eigenschaften des Mörtels auf bloßer Spekulation basieren und nur den zweifelhaften Anschein höherer Genauigkeit erwecken. Aus diesem Grund wurde darauf verzichtet und die Ziegelsteine mit den Mörtelschichten als ein homogenes Material betrachtet. Damit ließ sich auch ein enormer Zeitgewinn erzielen.

Ebenso wurde das Gesims unterhalb der Messstelle nicht berücksichtigt. In einer 2D-Feldsimulation, in der das Gesims vereinfacht als Rechteck mit großzügig hervorstehenden Dimensionen von 220 \* 180 mm ausgebildet worden war, konnte ein nur untergeordneter Einfluss auf die Werte am Sensor hinter der Innendämmung festgestellt werden: Das Gesims veränderte die Temperatur dort um durchschnittlich 0,06 Kelvin und die relative Luftfeuchte um nur 0,2 %.

### 6.6.1 Verwendung der absoluten Luftfeuchte als Feuchte-Vergleichsgröße

Während die gemessene relative Luftfeuchte nur das Verhältnis zur maximal möglichen Luftfeuchte angibt, zeigt die absolute Luftfeuchte, welche Feuchtemenge tatsächlich in der Luft enthalten ist. Die absolute Luftfeuchte wurde zwar nicht gemessen, lässt sich aber aus der gemessenen relativen Luftfeuchte und Temperatur mit Hilfe des Sättigungsdampfdrucks berechnen. Dazu wird zunächst, wie beispielsweise in *Fischer et al. (2008)* beschrieben, in Abhängigkeit von der Temperatur der Sättigungsdampfdruck  $p_{sat}$  ermittelt:

$$-20\text{ °C} \leq \theta \leq -0,2\text{ °C}: p_{sat} = 4,689\text{ Pa} \cdot \left(1,486 + \frac{\theta}{100\text{ °C}}\right)^{12,3} \quad (30)$$

$$-0,2\text{ °C} < \theta \leq 30\text{ °C}: p_{sat} = 288,68\text{ Pa} \cdot \left(1,098 \cdot \frac{\theta}{100\text{ °C}}\right)^{8,02} \quad (31)$$

Für Temperaturen über 30°C wurde der Sättigungsdampfdruck auch mit Formel (31) bestimmt. Anschließend kann aus dem Wasserdampfpartialdruck  $p_v$  mit der relativen Luftfeuchte  $\varphi$  die absolute Luftfeuchte  $v$  bestimmt werden, wobei die Gaskonstante für Wasserdampf in Luft  $R_v$  416,5 J/kg·K beträgt:

$$p_v = p_{sat} \cdot \frac{\varphi}{100\%} \quad (32)$$

$$v = \frac{p_v}{R_v \cdot T} \quad (33)$$

Im Weiteren wird die absolute Feuchte  $v$  dazu verwendet, um Messwerte mit Simulationsergebnissen zu vergleichen. Die absolute Luftfeuchte vermag die tatsächliche Feuchteverteilung deutlicher darzustellen und es lässt sich besser erkennen, ob Bereiche in der Konstruktion eher von der Außenluft oder Innenluft beeinflusst wurden. Im direkten Vergleich verschiedener absoluter Luftfeuchteverläufe lässt sich auch einfacher darstellen, ob bestimmte Bereiche des Mauerwerks durchlässiger sind als andere.

Durch die Verwendung der absoluten Luftfeuchte wird zudem eine Ursache für zusätzliche Differenzen zwischen Messung und Simulation vermieden, da der Solver von *DELPHIN* zuerst absolute Feuchtemengen in den diskretisierten Elementen berechnet. Mit Hilfe der Temperatur wird dann die absolute in die relative Luftfeuchte umgerechnet. Dabei führen schon geringe Differenzen zwischen gemessenen und berechneten Temperaturen zu größeren Abweichungen der gemessenen und simulierten relativen Luftfeuchte, da die Umrechnung der absoluten in die relative Luftfeuchte stark abhängig von der Temperatur ist. Die Verwendung der absoluten Luftfeuchte eliminiert damit diese Quelle von Differenzen. Weiterhin wird in *DELPHIN* bei der Umrechnung der absoluten in die relative Luftfeuchte auf die Feuchtespeicherfunktion zugegriffen, für die die (obere) Desorptionskurve verwendet wird. Dies führt dazu, dass die dazu „passende“ relative Luftfeuchte die niedrigst mögliche ist. Bei Verwendung der niedrigeren Adsorptionskurve in *DELPHIN* würde bei gleichem Wassergehalt eine höhere relative Luftfeuchte ausgegeben (Hysterese).

### 6.6.2 Einfluss der Deckenbalken auf die Sensoren

Die Sensoren des eindimensionalen Wandaufbaus in der Dämmkleberschicht befanden sich nur ungefähr 0,2 m unterhalb des Deckenbalkens. Um zu überprüfen, inwieweit die Balken innerhalb des Deckenaufbaus auf die hygrothermischen Vorgänge dieser Sensoren Einfluss nahmen, wurden wiederum dreidimensionale, thermische Simulationen mit *HEAT3D* durchgeführt. Für die Simulationen wurde das Feld 2 mit den 80 mm dicken Perliteplatten herangezogen. Die Außen- und Innentemperatur betrug -5 und 20°C.

Der Unterschied zwischen der Sensorposition 0,2 m unterhalb des Deckenbalkens zu einer imaginären Messposition zwischen zwei Balken, ungefähr 0,4 m von der Balkenachse entfernt, betrug demnach weniger als 0,1 Kelvin. Die Wärmeleitfähigkeit des Holzbalkens, unabhängig ob 0,13 oder 0,27 W/(m·K), hatte dabei praktisch keinen Einfluss. Somit muss der Deckenbalken bei den eindimensionalen Simulationen nicht berücksichtigt werden.

### 6.6.3 Validierung der Simulationen im eindimensionalen Bereich

Aufgrund der Fülle der Daten und zur Vermeidung einer gewissen Redundanz konzentrierten sich die Simulationen auf zwei Dämmsysteme, auf die Perlitedämmplatten in Feld 2 und das Schilf in Feld 5. Ein weiterer Vorteil im Feld mit der Perlitedämmplatte war, dass hier besonders wenige Sensoren ausgefallen waren. Bei den Schilfplatten sind deren unkritische Messwerte zwischen Dämmschicht und Bestandskonstruktion bemerkenswert, da von einem derart diffusionsoffenen System mit kaum vorhandenen kapillaren Eigenschaften eigentlich problematische Feuchtemengen erwartet werden. Weiterhin ist im Schilffeld interessant, ob die Messwerte in den unterschiedlich abgedichteten Balkenauflagern per Simulation nachvollzogen werden können. Gegen die Felder 3 (Wärmedämmputz) und 4 (Holzfaserplatte) spricht der Einfluss des Fensters, vor allem im Feld der Holzfaserdämmplatte. Dieser würde die Simulationen aufwändiger und mit mehr Unsicherheiten gestalten. Zudem waren in diesen beiden und Feld 1 mehr als ein Sensor auf der Bestandsoberfläche defekt (ein Problem, das an vergleichbaren Messpositionen häufig in Forschungsprojekten auftritt).

Längere Zeit nahm dabei die Überprüfung der Eignung der vorliegenden Außenklimamessungen in Anspruch. Die am Objekt erfassten Messergebnisse waren zwar lokal erhoben worden, allerdings fehlten die langwellige Abstrahlung sowie Regen- und Winddaten. Außerdem war (selten) ein Ausfall der Sensoren zu verzeichnen, der bis zu mehrere Tage betrug. Die vollständigen Messdaten der Karl-Franzens-Universität waren nicht direkt vor Ort erhoben worden, allerdings betrug die örtliche Differenz nur 1,4 km (s. Kap. 5.2).

Da der vollständige Klimadatensatz mit langwelliger Strahlung, Niederschlag und Wind erst ab Juni bzw. September 2011 vorlag, wurden die Simulationen erst ab dem 1. Juni 2011 begonnen. Dadurch konnten weitere Unwägbarkeiten vermieden werden, wie der Feuchteeintrag durch das Aufbringen der Dämmsysteme und die dabei auftretenden Luftfeuchten von über 90 %, was mit unzuverlässigen Messwerten verbunden ist. Trotzdem blieben die beiden „interessanteren“ Winter mit der hohen Luftfeuchtebelastung erhalten.

Für die Modellierung des Außenklimas wurden hinsichtlich des Strahlungs- bzw. Temperatureinfluss‘ drei Varianten hinsichtlich ihrer Qualität verglichen:

1. Verwendung der kurzwelligen Strahlungsdaten der Schönbrunngrasse, ergänzt durch die langwellige Abstrahlung aus der KFU (Variante ‚horizontales Pyranometer‘). Am 18. Februar 2012 war der SBG-Strahlungssensor von einer waagrechten in eine senkrechte Lage gebracht worden, weswegen in dieser Variante nur der Zeitraum vom 1. Juni 2011 bis zum 18. Februar 2012 getrennt von einer
2. Variante („vertikales Pyranometer“) ausgewertet wurde, die vom 18. Februar 2012 bis zum 31. Mai 2013 dauerte.
3. Verwendung der gemessenen äußeren Oberflächentemperatur („Außenoberflächentemperatur“). Bei dieser Variante wurden langwellige und kurzwellige Strahlung nicht benötigt, dementsprechend war keine eigene Untersuchung bezüglich Absorptions- und Emissionskoeffizienten notwendig, auch der externe thermische Übergangskoeffizient musste nicht betrachtet werden.

Soll in der Simulation einer Außenwand Globalstrahlung angewendet werden, wird dafür korrekterweise die Globalstrahlung verwendet, die wie in Variante 2 senkrecht auf die Wandoberfläche auftrifft und nicht die, die auf eine waagrechte Fläche vor der senkrechten Wand fällt. Entgegen der Erwartungshaltung waren die Ergebnisse mit Variante 1 jedoch besser, wie die Diagramme in Bild 115 und Bild 116 zeigen.

Besonders in den Graphen in Bild 115, die den Sensor in der Klebemörtelschicht betrachten, ist sehr gut erkennbar, dass die Variante 2 (jeweils im rechten Diagramm) mit dem vertikal gelagerten Pyranometer wenig geeignet erscheint, um später die Verhältnisse im Balkenaufleger nachzuvollziehen. Die Linien der anderen beiden Varianten weichen visuell ungefähr mit einem ähnlichen Wert von den Messungen ab.

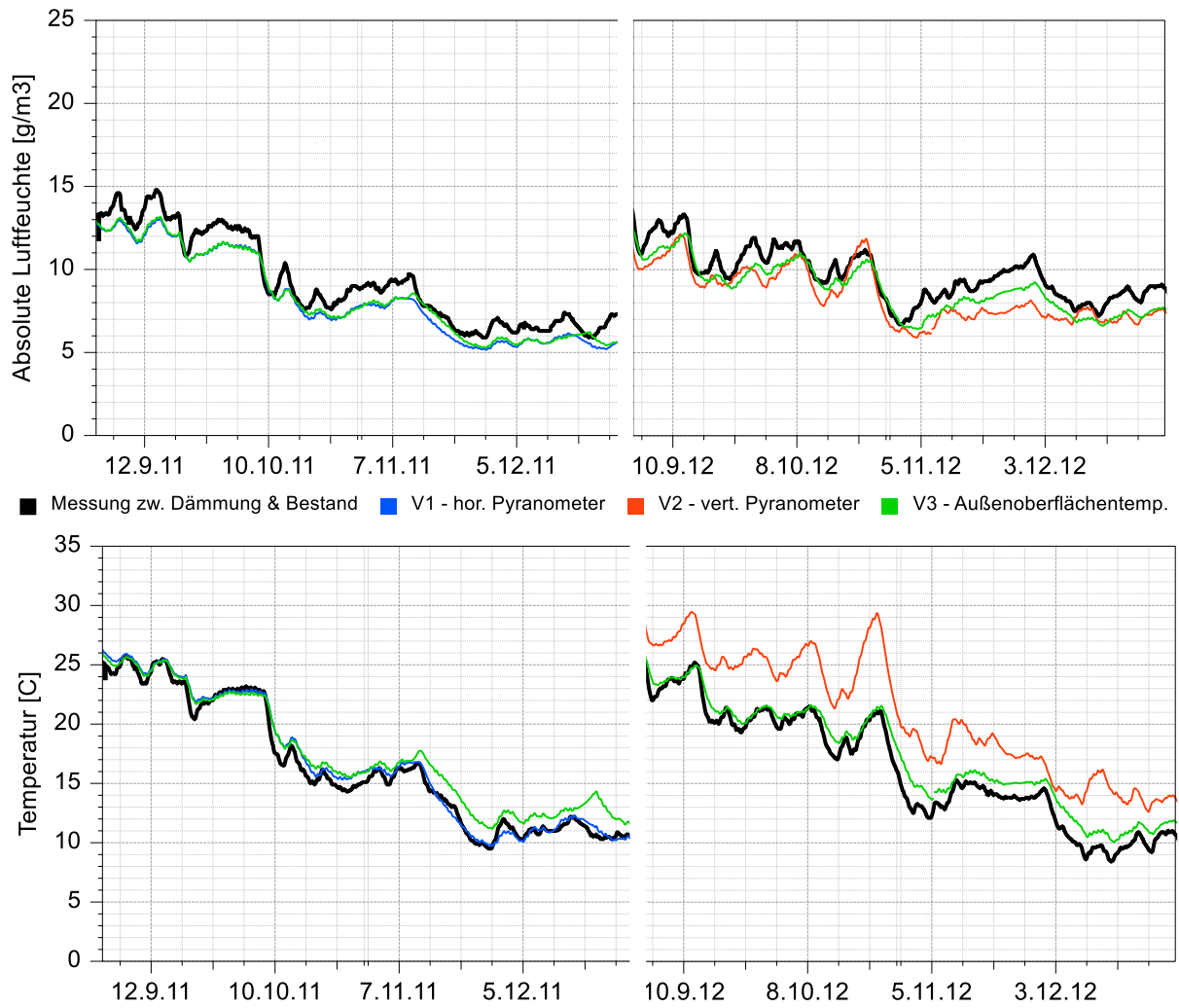


Bild 115 Gemessene und berechnete absolute Luftfeuchten (oben) und Temperaturen (unten) zur Bestimmung der Außenklimamodellierung; Messposition Bestandsoberfläche in Feld 2

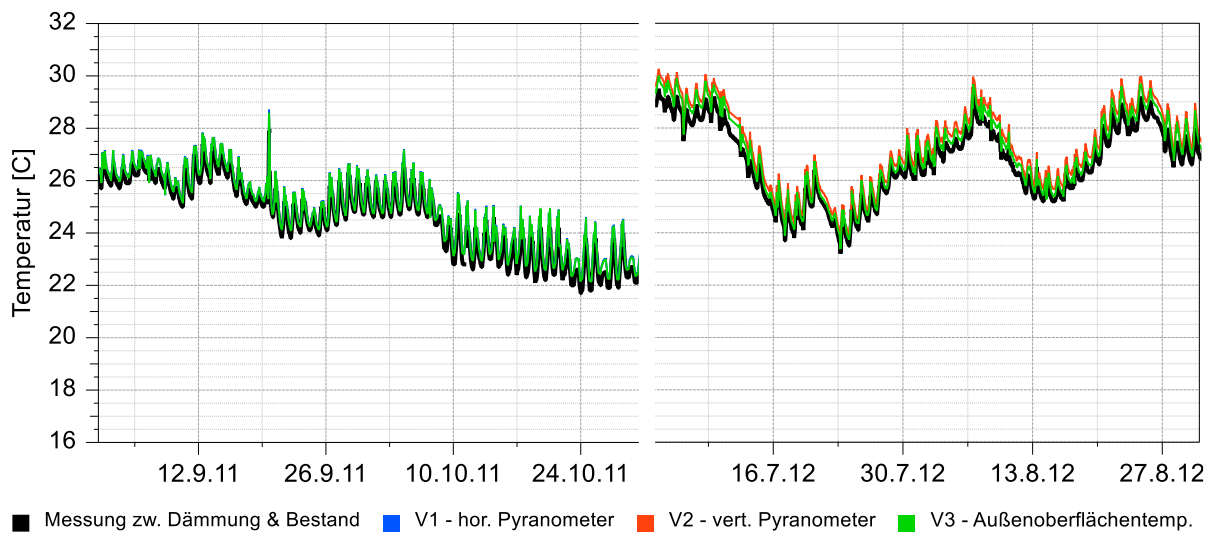


Bild 116 Gemessene und berechnete Innenoberflächentemperaturen in Feld 2



In den folgenden Tabellen, Tab. 27 und Tab. 28, und späteren Beurteilungen wird eine akkurate Bewertung der Übereinstimmung zwischen Messung und Rechnung anhand von drei Werten vorgenommen: Der (empirischen) Standardabweichung  $s$ , die sich aus der Wurzel der Varianz  $\sigma^2$  ergibt (vergleichbar mit der „Methode der kleinsten Quadrate“), und der über die gesamte Simulationsdauer gemittelten, absoluten Differenz zwischen Messwert und Simulationsergebnis, hier mit MD bezeichnet:

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_{Simulation} - x_{messung})^2}{n} \quad (34)$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{Simulation} - x_{messung})^2}{n}} \quad (35)$$

$$MD = \frac{\sum_{i=1}^n |x_{Simulation} - x_{messung}|}{n} \quad (36)$$

Je kleiner ein Wert ist, desto größer ist die erwünschte Übereinstimmung. Zeitpunkte, an denen kein Messwert vorhanden war, wurden von der Berechnung automatisch ausgeschlossen. Die Standardabweichung  $s$  bzw. Varianz  $\sigma^2$  wird in folgenden Kapiteln nur noch beispielhaft aufgeführt, da sie in diesem Anwendungsfall, bei nur gering voneinander abweichenden Datenpaaren, keine notwendigen Zusatzinformationen ergibt.

Hygrothermische Schadensprozesse wie Holzerstörung oder Schimmelpilzwachstum sind biologische Vorgänge, die sich über viele Tage bis Monate hinziehen können. Die Analyse kurzfristiger Abweichungen im Stundenbereich ist deshalb nicht zielführend. Folglich wurde für die Bewertung der Simulationsgüte die über die gesamte Simulationsdauer gemittelte Differenz zwischen Messung und Berechnung  $MD$  in erster Linie herangezogen.

Tab. 27 Bewertung zur Außenklimamodellierung mittels Varianz  $\sigma^2$  und mittlerer Differenz zwischen Messung und Simulation MD; über den gesamten Simulationszeitraum gemittelte Werte (in K oder g/m<sup>3</sup>; ID = Grenzschicht zwischen Bestandsmauerwerk und Dämmsystem)

Variante	Außenoberflächentemperatur		ID Temperatur		ID Abs. Feuchte		Innenoberflächentemperatur	
	$\sigma^2$	MD	$\sigma^2$	MD	$\sigma^2$	MD	$\sigma^2$	MD
V1 - Pyranometer vertikal	9.40	2.05	0.50	0.56	1.40	1.06	0.21	0.41
V2 - Pyranometer horizontal	62.36	6.33	14.61	3.63	1.63	1.07	0.39	0.60
V3 - Außenoberflächentemp.	0.25	0.31	1.07	0.82	1.22	0.95	0.20	0.39

Aus den ermittelten Zahlen in Tab. 27 ergibt sich recht eindeutig, dass Variante 2 nicht geeignet ist. Aus mehreren Gründen wird deshalb im Weiteren die gemessene Temperatur der Außenoberfläche, Variante 3, angesetzt, anstelle von kurz- und langwelliger Strahlung zusammen mit der Außentemperatur (Variante 1 und 2):

- Die Differenz zwischen Messung und Rechnung war an mehreren Messsensoren am kleinsten.

- Durch die Verwendung der Außenoberflächentemperatur fallen Unsicherheiten bezüglich äußerem Wärmeübergangswiderstand  $R_{se}$  oder Absorptions- und Emissionskoeffizient weg, da diese Komponenten nicht benötigt werden.
- Das Pyranometer erwies sich schon zu Beginn der Messungen in der Schönbrunn-gasse als unzuverlässig (Bild 48).
- Bei Variante 2 ergab sich die geringste Abweichung zwischen Messung und Simulation mit einem äußeren Wärmeübergangskoeffizienten von  $2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ , einem absurd niedrigen Wert, der z. B. im DIN-Fachbericht zur Vermeidung von Schimmelwachstum (*DIN 4108-8*) für Innenoberflächen verwendet wird, die mit Möbeln verstellt sind!

Die Abweichungen der Temperaturen der Vorzugsvariante liegen im Bereich der Messgenauigkeit der Sensoren, die berechnete absolute Feuchte je nach Temperatur auch bzw. bei niedrigen Temperaturen leicht darüber.

Zwei weitere mögliche Varianten der Behandlung des Außenklimas wurden verworfen:

- Die Anordnung von diffuser und direkter Strahlung der an der KFU gemessenen Daten: hier müsste zusätzlich der Einfluss der jahreszeitlich unterschiedlichen Verschattung (s. Kapitel 6.4) durch den Baum berücksichtigt werden. Die damit verbundenen Imponderabilien sollten vermieden werden. Weiterhin wiesen die kurzwelligen Strahlungsdaten der KFU teilweise selber mehrtägige Ausfälle auf.
- Die Umrechnung der horizontalen Globalstrahlung auf die direkte und diffuse Strahlung für die Zeit vor dem 18. Februar 2012, als das Pyranometer noch in einer horizontalen Stellung positioniert war. Diese könnten dann der Wandoberfläche zugeordnet werden. Für eine derartige Umrechnung existieren viele wissenschaftliche Rechenmodelle mit Stärken und Schwächen. Das zunächst präferierte Verfahren ist im Anhang A 3 beschrieben. Diese Variante wurde verworfen, als sich u. a. in Testsimulationen herausstellte, dass die Daten des umgelegten Sensors nach dem Februar 2012 keine bessere Übereinstimmung zwischen Messung und Berechnung hervorbrachten.

In den Simulationen zur Auswahl der Außenklimamodellierung wurden alle anderen Simulationsparameter konstant gehalten oder mit Hilfe von GenOpt jeweils so gewählt, dass die Abweichung minimal war. Das betraf die thermischen Übergangswiderstände und die Absorptions- und Emissionskoeffizienten.

Nach der Festlegung der Art der Modellierung des Außenklimas wurden weitere Einflussgrößen überprüft. Vor allem die Materialeigenschaften der Bestandskonstruktion wurden variiert, da hier nur wenige Probekörper vorlagen:

- Wärmeleitfähigkeit ( $\lambda_{10, \text{dry}}$ ):  $\lambda_{\text{Ziegel}}$  zwischen  $0,36$  und  $0,50 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ,  $\lambda_{\text{Perliteplatte}}$  zwischen  $0,043$  und  $0,048 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  und  $\lambda_{\text{Schilf}}$  zwischen  $0,056$  und  $0,066 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ .
- Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl:  $\mu_{\text{Ziegel}}$  zwischen  $8$  und  $18$ ,  $\mu_{\text{Perliteplatte}}$  zwischen  $4$  und  $12$ ,  $\mu_{\text{Schilf}}$  zwischen  $1$  und  $3$ .

- Wasseraufnahmekoeffizient:  $A_{w,Ziegel}$  zwischen 0,1 und 0,5 kg/m<sup>2</sup>s<sup>0,5</sup>.
- Verlauf der Sorptionsisotherme: durch Absenkung der effektiven Porosität  $\theta_{eff}$  von Ziegel, Bestandsinnenputz, Klebemörtel und Dämmung auf einen Wert der ungefähr 20 % über  $\theta_{cap}$  liegt. Nach der Absenkung entspricht die Feuchtespeicherfunktion dem ungefähren Verlauf der im Labor gemessenen Adsorptionskurve.

Eine Änderung dieser charakteristischen Materialkennwerte bewirkt, dass die gesamte dazugehörige Funktion, z. B. die Funktion der Wasserdampfdiffusion, entsprechend nach oben oder unten skaliert wird. Weitere klima- und oberflächenbezogene Parameter, die variiert wurden, waren:

- der innere Wärmeübergangskoeffizient  $h_{si}$  zwischen 7 und 14 W/(m<sup>2</sup>·K),
- die hygrischen Übergangswiderstände  $\beta_{si}$  und  $\beta_{se}$  jeweils zwischen  $1 \cdot e^{-8}$  und  $9 \cdot e^{-7}$  s/m und
- die Anordnung zusätzlicher Widerstände für den Flüssigwasser- ( $1 \cdot e^{13}$  bis  $1 \cdot e^{14}$  m/s) oder Dampffluss ( $s_d = 0,5$  m) auf der Kontaktfläche zwischen Dämmsystem und Bestandsputzoberfläche.

Einige der variierten Werte befinden sich bewusst nicht mehr in einem sinnvollen bzw. üblichen Bereich. Dies geschah zum einen, um GenOpt zu überprüfen, zum anderen um den generellen Einfluss einer Größe zu testen oder um Tendenzen schneller und deutlicher hervorzuheben.

In beiden Feldern 2 und 5 hatten viele der Parameter innerhalb der gewählten Grenzen nur einen untergeordneten Einfluss. In diesem Fall wurden die Labor-Messwerte, übliche Programmvoreinstellungen bzw. Werte aus Richtlinien übernommen, die später aufgeführt werden. Kaum einen Einfluss auf die Werte hinter der Innendämmung hatte beispielsweise die Änderung des  $\mu$ -Werts des Ziegelmauerwerks, der innere hygrische Übergangswiderstand, zusätzliche Widerstände zwischen Dämmsystem und Bestandsputz oder der  $A_w$ -Wert des Ziegelmauerwerks. Die Verwendung einer niedrigen (Ad-)Sorptionsisotherme führte auch nur zu marginal besseren Ergebnissen, weswegen diese Variante ebenfalls nicht verwendet wurde.

In der folgenden Tabelle sind einige Ergebnisse der Vergleiche in den Feldern 2 und 5 aufgeführt (Tab. 28).

Die Abweichungen der Temperaturen der später dokumentierten Vorzugsvariante liegen wieder im Bereich der Messgenauigkeit der Sensoren (Innenoberfläche  $\pm 0,3$  Kelvin, ID-Sensor auf Bestandsoberfläche  $\pm 0,5$  K). Die berechnete absolute Feuchte befindet sich zwar zeitweise über der Messgenauigkeit (Messgenauigkeit: je nach Temperatur 0,3 bis 1,0 g/m<sup>3</sup> Differenz), die Übereinstimmung ist angesichts der Randbedingungen (Altbau, Anzahl der Probekörper, keine Kennwerte für den Mörtel) dennoch als sehr gut zu bezeichnen (s. Bild 117 und Bild 118).

Tab. 28 Bewertung zur Bestimmung von Simulationsparametern mittels Varianz  $\sigma^2$  und gemittelter Differenz zwischen Messung und Simulation MD in den Feldern 2 und 5

Feld 2 (Perlitedämmplatte)	ID Temperatur (K)		ID Abs. Feuchte (g/m <sup>3</sup> )		Innenoberflächen-temperatur (K)	
	$\sigma^2$	MD	$\sigma^2$	MD	$\sigma^2$	MD
Ausgangsvariante	0.97	0.80	1.63	1.11	0.21	0.38
Perliteplatte $\mu$ -Wert= 4	1.00	0.81	1.62	1.10	0.21	0.39
Ziegel $A_w$ -Wert= 0,1 kg/m <sup>2</sup> s <sup>0,5</sup>	0.97	0.80	1.64	1.11	0.21	0.38
Niedrige Sorptionsisotherme	0.94	0.79	1.63	1.11	0.21	0.39
Vorzugsvariante ( $\lambda_{\text{Ziegel}}= 0,4 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ )	0.50	0.56	1.52	1.09	0.20	0.37
$\lambda_{\text{Ziegel}}= 0,4 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ mit Luftdruck	1.00	0.78	1.54	1.07	0.20	0.37
<b>Feld 5 (Schilf)</b>						
Niedrige Sorptionsisotherme	0.45	0.53	2.63	1.46	1.25	0.35
Lehmkleber $\mu= 6$	0.39	0.50	2.70	1.47	1.25	0.34
Vorzugsvariante ( $\lambda_{\text{Ziegel}}= 0,4 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ , $\mu_{\text{Lehmkleber}}= 8$ )	0.28	0.41	2.68	1.47	1.24	0.33
wie Vorzugsvariante mit Luftdruck	0.23	0.38	2.64	1.47	1.24	0.33

Die Linien der Varianten liegen jeweils so nah beieinander, dass sie in einem Diagramm praktisch nicht mehr auseinandergehalten werden können. Da eine möglichst genaue Berechnung von Feuchtespeicherung und Feuchtetransport herausfordernder und zu viel Feuchte substanzschädigender ist als zu viel oder zu wenig Wärme, wird die Übereinstimmung der Feuchte am Sensor auf der Bestandsoberfläche als am Wichtigsten angesehen. Zudem ist bei den gewählten Dämmstärken und üblichen Klimabedingungen Schimmelpilzwachstum auf der Rauminnenoberfläche nicht möglich.

Die Berücksichtigung der Luftpermeabilität führte tendenziell zu einer größeren Abweichung in den eindimensionalen Simulationen, wobei die Werte für die Luftdurchlässigkeit angenommen wurden (s. Abschnitt 6.5).

Die Vorzugsvarianten in den Feldern 2 und 5 beinhalteten folgende Werte:

- Innerer Wärmeübergangskoeffizient  $h_{si}= 9 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ .
- Hygrische Übergangswiderstände  $\beta_{si}= 3e^{-8} \text{ s/m}$  und  $\beta_{se}= 2e^{-7} \text{ s/m}$ .
- Änderungen zu den im Labor gemessenen Materialeigenschaften in Tab. 9 und den Angaben der Hersteller:  $\lambda_{\text{Perliteplatte}}= 0,047 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ,  $\lambda_{\text{Ziegel}}= 0,40 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ,  $\lambda_{\text{Schilf}}= 0,064 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ,  $\mu_{\text{Lehmkleber}}= 8$ .

Die Abweichungen bei den Temperaturen der Vorzugsvariante sind damit im Bereich der Messgenauigkeit der Sensoren, die berechnete absolute Feuchte je nach Temperatur auch bzw. bei niedrigen Temperaturen bewegt sie sich leicht darüber.

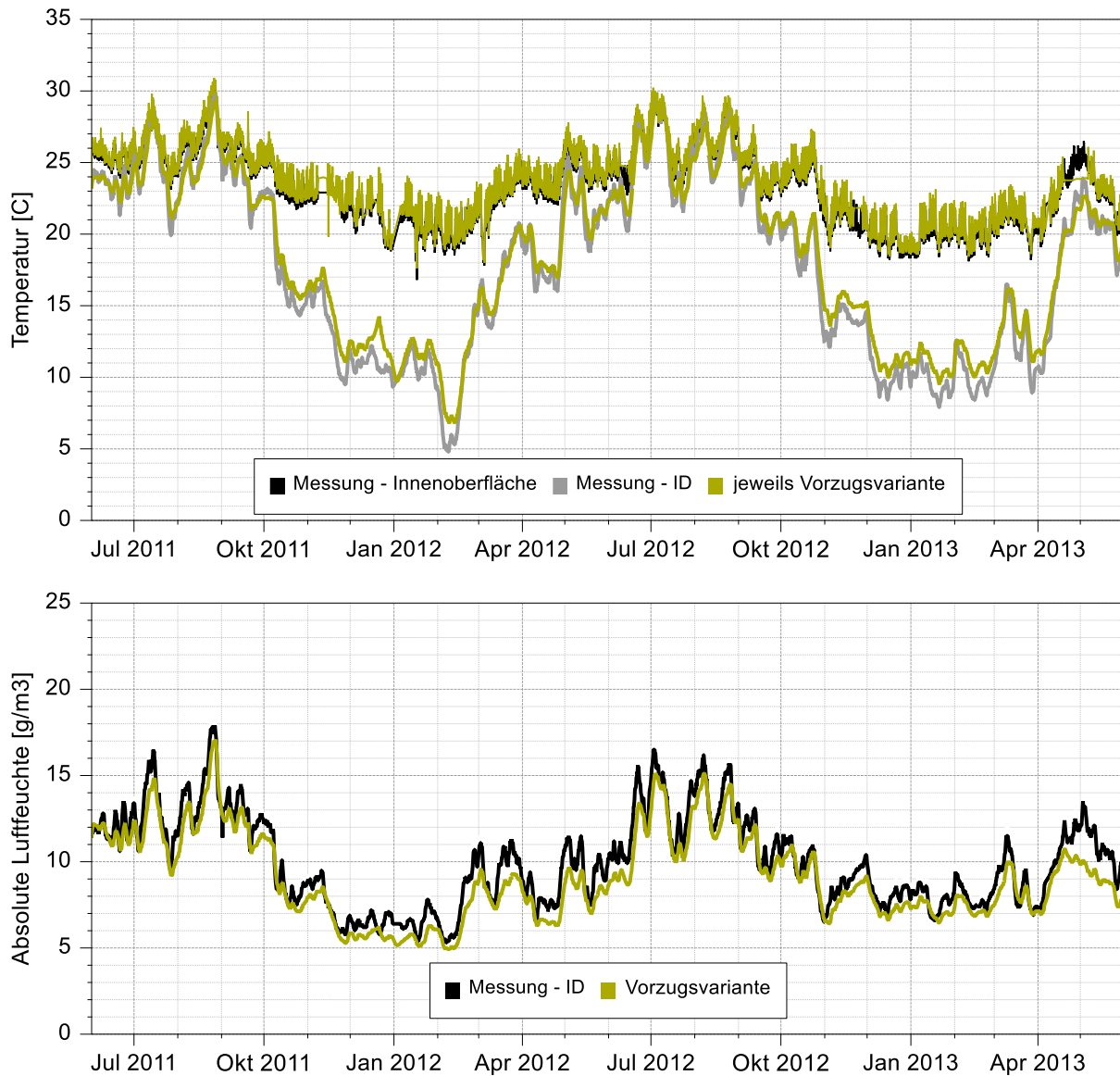


Bild 117 Verlauf der Messwerte und Simulationsergebnisse der Vorzugsvariante im Feld 2; oben Temperaturen auf der Innen- und Bestandsoberfläche, unten absolute Luftfeuchte auf der Bestandsoberfläche

Die Diagramme in Bild 117 und Bild 118 dokumentieren die Qualität der gewählten Parameter bzw. der Simulationssoftware *DELPHIN*. Die Temperaturen stimmen insgesamt ausgezeichnet überein, und auch die Luftfeuchte im Perlitefeld 2 wird sehr gut wiedergegeben. In Feld 5 verläuft die berechnete absolute Luftfeuchte fast durchgängig etwas tiefer als die Messungen, aber mit einem durchschnittlichen Unterschied von unter  $1,5 \text{ g/m}^3$  laut Tab. 28 kann die Übereinstimmung immer noch als sehr gut bezeichnet werden.

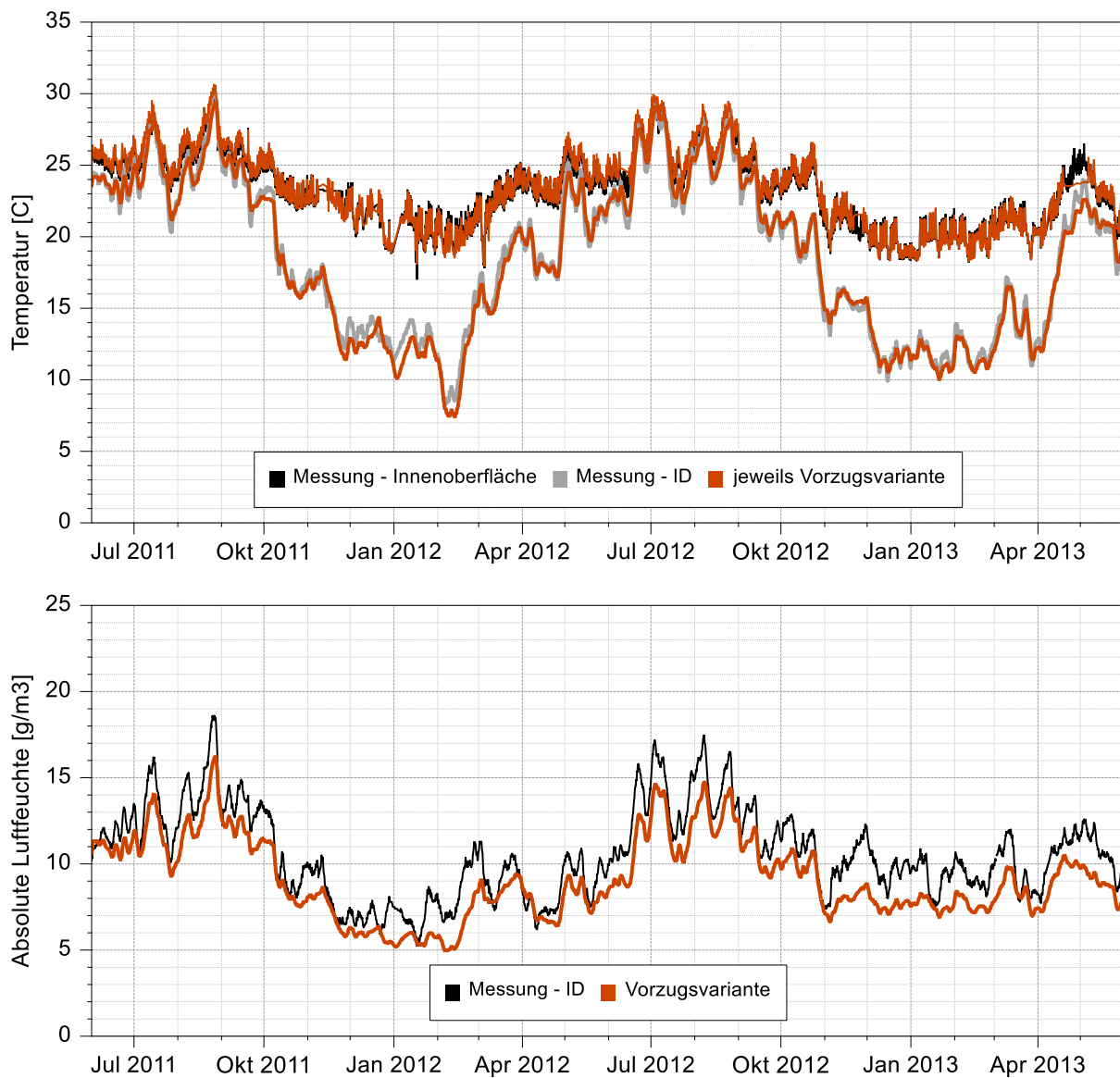


Bild 118 Verlauf der Messwerte und Simulationsergebnisse der Vorzugsvariante im Feld 5: oben Temperaturen auf der Innen- und Bestandsoberfläche, unten absolute Luftfeuchte auf der Bestandsoberfläche

Die charakteristischen Temperatur- und Luftfeuchte-Profile (Minimum, Maximum, Durchschnitt) in Feld 2 und Feld 5 sind kaum voneinander zu unterscheiden, weswegen es als ausreichend erachtet wird, nur die Diagramme für das Feld 5 abzubilden (Bild 119). Wie zu sehen ist, entsteht trotz der sehr hohen Raumlufffeuchte im letzten Winter kein Flüssigwasser im Bereich der Innendämmung (Bild 119 unten). Aufgrund der sehr niedrigen Schlagregenbelastung dringt der Schlagregen kaum über den Außenputz hinaus in das tragende Mauerwerk ein, was besonders deutlich aus den Profilen der absoluten Luftfeuchte hervorgeht (Bild 119 oben rechts). Die großen Sprünge in den Profilen der absoluten Luftfeuchte werden durch das sehr voneinander abweichende Feuchtespeicherverhalten benachbarter Materialien hervorgerufen.

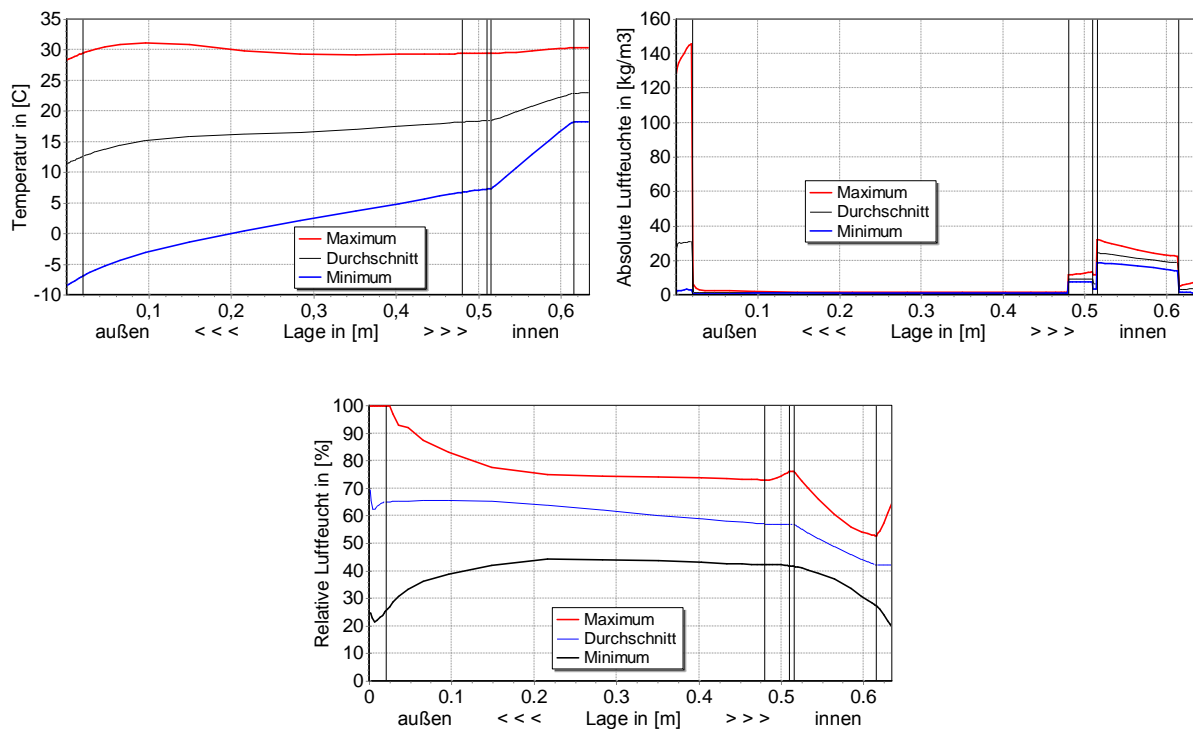


Bild 119 Charakteristische Profile im eindimensionalen Querschnitt von Feld 5 für die Temperatur (links), die absolute Luftfeuchte (rechts) und relative Luftfeuchte (unten); senkrechte Striche kennzeichnen die Grenzschichten zwischen den Materialien

#### 6.6.4 Anmerkungen zu den Holz-Messungen und Holz-Materialdaten

Bei natürlichen Baustoffen wie Holz, oder auch Lehm, liegt eine größere Variabilität der hygrothermischen Eigenschaften vor im Vergleich zu industriell hergestellten Baumaterialien. Der Standort, das lokale Klima, die Nährstoffversorgung, die Astigkeit oder der Trocknungsvorgang: alle diese und weitere Faktoren beeinflussen die Eigenschaften des Baustoffes Holz. Doch selbst bei der Messung von Bauholz vor Ort kann es schon innerhalb eines Balkens zu Abweichungen kommen, wie Erfahrungen aus einem Projekt an der TU Dresden gezeigt hatten *Gnoth et al. (2003b)*. Deshalb ist es möglich, dass die für die Kalibrierung der Holzfeuchte-Messfühler verwendeten Probekörper in ihren hygrothermischen Eigenschaften von denen der vorhandenen Deckenbalken abweichen. Erschwerend kam bei diesem Projekt hinzu, dass von den Holzbalken keine Probenkörper entnommen und gemessen wurden. Das bedeutete, dass zunächst überprüft werden musste, ob ein Materialdatensatz aus der Materialdatenbank geeignet ist.

Mit vergleichenden Simulationen, die hier nicht dokumentiert sind, konnte ein Datensatz identifiziert werden, welcher sowohl innerhalb des Balkens wie auch im umgebenden Balkenaufleger zu guter Übereinstimmung zwischen gemessenen und berechneten Daten führte. Anschließend wurden einzelne charakteristische Materialparameter (Tab. 9) isoliert bzw. in Kombinationen variiert, um die Differenz zwischen Messung und Simulation weiter zu reduzieren. Diese Variation erfolgte in einem physikalisch sinnvollen Rahmen, die Wärmeleitfähigkeit wurde beispielsweise um  $\pm 15\%$  variiert.

Schließlich erwies sich ein Datensatz als passend, der im Rahmen des Projektes *EnBewe (2017)* sehr genau „charakterisiert“ worden war.

## 6.7 Vergleich mit Messungen in Balkenauflagern

Zwei Aspekte stehen in diesem Abschnitt im Vordergrund: zum einen soll wiederum untersucht werden, wie genau die Simulationsergebnisse die Messungen um die Balkenköpfe nachvollziehen. Zum anderen wird der Frage nachgegangen, ob für das 3D-Detail Balkenaufleger 2D-Simulationen ausreichend sind, beziehungsweise, wie 2D-Simulationen modelliert werden können, um die Messergebnisse möglichst genau zu reproduzieren.

Drei Messpunkte stehen in den Balkenauflagern für die Validierung zur Verfügung: Die längeren Schwertsensoren die, nahe am Stirnholz, so weit wie möglich seitlich in das Auflager hineingeschoben worden waren, die Messpositionen seitlich an der Balkenwange, 15 cm von der Oberfläche des Bestandsputzes entfernt und die langen Holzfeuchtesensoren in der Mitte der Deckenbalken (s. Bild 13).

Im Folgenden wird die Variante als Basisvariante benannt, welche die in den eindimensionalen Simulationen als ideal identifizierten Faktoren, Materialeigenschaften und Klimabedingungen betreffend, übernimmt und keine speziellen Modellierungseffekte wie Luftströmungen anwendet.

### 6.7.1 Balkenaufleger 3 in Feld 2 - Perlitedämmplatte

Der Screenshot in Bild 120 zeigt den in der Software *DELPHIN* modellierten, zweidimensionalen Schnitt durch den Balken 3 für das mit Perliteplatten gedämmte Feld.

Die Tiefe des Balkenauflegers und die Abstände richteten sich nach den Messungen vor Ort (Tab. 3). In den langen Auflagern wurde eine Luftschicht von 40 mm Breite vor dem Stirnholz angeordnet. Bei der Einbringung der Sensoren in die Balkenaufleger war in keinem Balkenaufleger festgestellt worden, dass im Laufe der Jahre Schüttung eingedrungen wäre. In den meisten Varianten wurde zwischen der (hier dunkelgrau dargestellten) Schüttung und dem Mauerwerk eine dünne vertikale Luftschicht in der Dicke des Bestandsputzes angeordnet. Durch eine gestrichelte Linie in Bild 120 ist angedeutet, wo die Ebene der Schüttung im Feldbereich bei den dreidimensionalen Simulationen beginnt. Im Feldbereich wurde die Dämmebene durch diese Schüttung und die Dielenbretter unter und über der Schüttung unterbrochen (Bild 13).

Die Auflager der Balken 1 bis 6 waren vom unteren Geschoß her luftdicht verschlossen worden. Trotzdem waren diese Auflager nicht komplett luftdicht abgedichtet, schließlich waren keinerlei Abdichtungsmaßnahmen oberhalb der Einschubdecke ergriffen worden. So konnte zumindest über den Bestandsfußbodenaufbau des Dachgeschoßes - Holzterrazzo auf nebeneinander verlegten Fichtebrettern und Schüttung - Luft über den Deckenaufbau in die Auflager



eindringen. Der dortige Strömungswiderstand ist, wie schon geschildert, nur sehr schwer abzuschätzen, dürfte jedoch geringer gewesen sein als der Widerstand der neu angebrachten Dämmsysteme an der Wand.

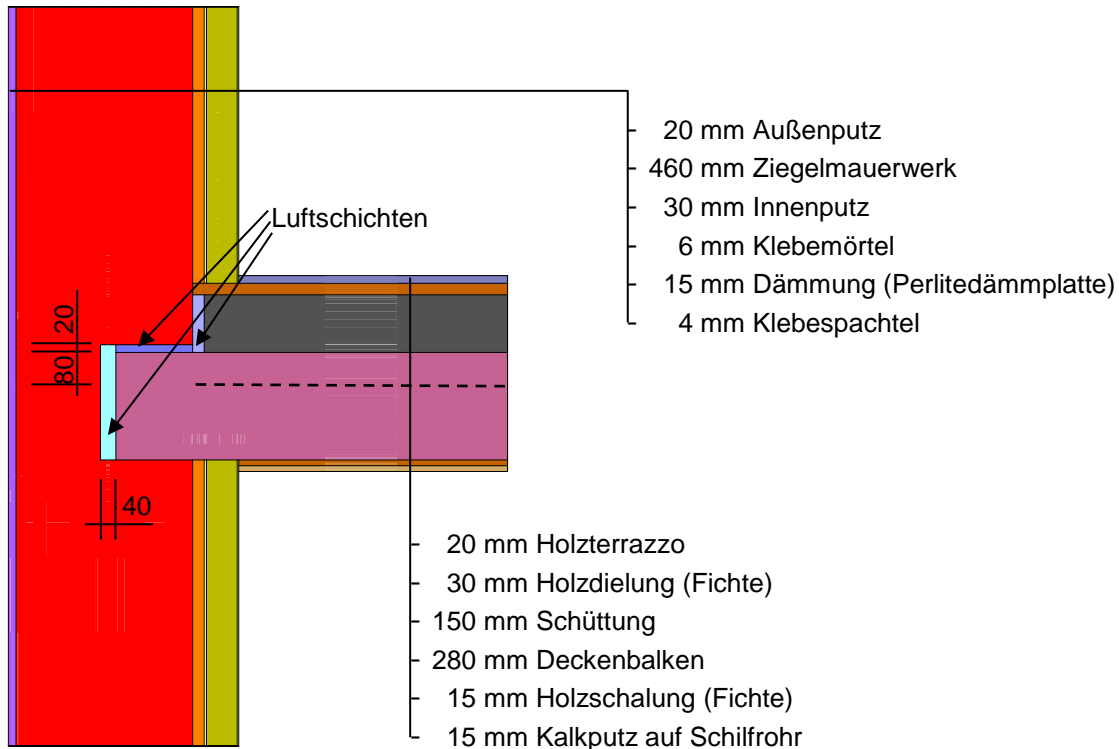


Bild 120 Screenshot der Basisvariante in Feld 2 (Schnitt durch den Balken, Software *DELPHIN*)

Die Felddarstellung der Verteilung der relativen Luftfeuchte ermöglicht es anschaulich zu überprüfen, ob am Stirnholz tatsächlich die feuchteste Stelle ist. Stellvertretend für andere Zeitabschnitte und andere Balken illustriert Bild 121 in der linken Abbildung, wie sich der Holzbalken im Feld 3 ein günstiges, trockeneres Umfeld erschafft. Wegen der sehr hohen Raumlufffeuchte im Dachgeschoß im dritten Winter bildet sich dort um die Klebemörtelschicht eine erhöhte Feuchte im Dachgeschoß aus, die sich nicht bis auf die Ebene der Deckenbalken erstreckt. Bedingt durch die niedrigere Raumlufffeuchte und die höheren Temperaturen im Obergeschoß hebt sich die dortige Kondensationsebene in der Klebemörtelschicht farblich nicht vom Mauerwerk ab.

Die rechte Abbildung zeigt denselben Zeitpunkt mit einer leicht verschobenen, ebenso engen Farbtabelle zwischen 50 und 70% Luftfeuchte. Diese Farbeinteilung hebt hervor, dass im Stirnholzbereich tatsächlich die feuchteste Stelle ist und nicht in der Ebene der Innendämmung, wenngleich auf niedrigem Niveau.

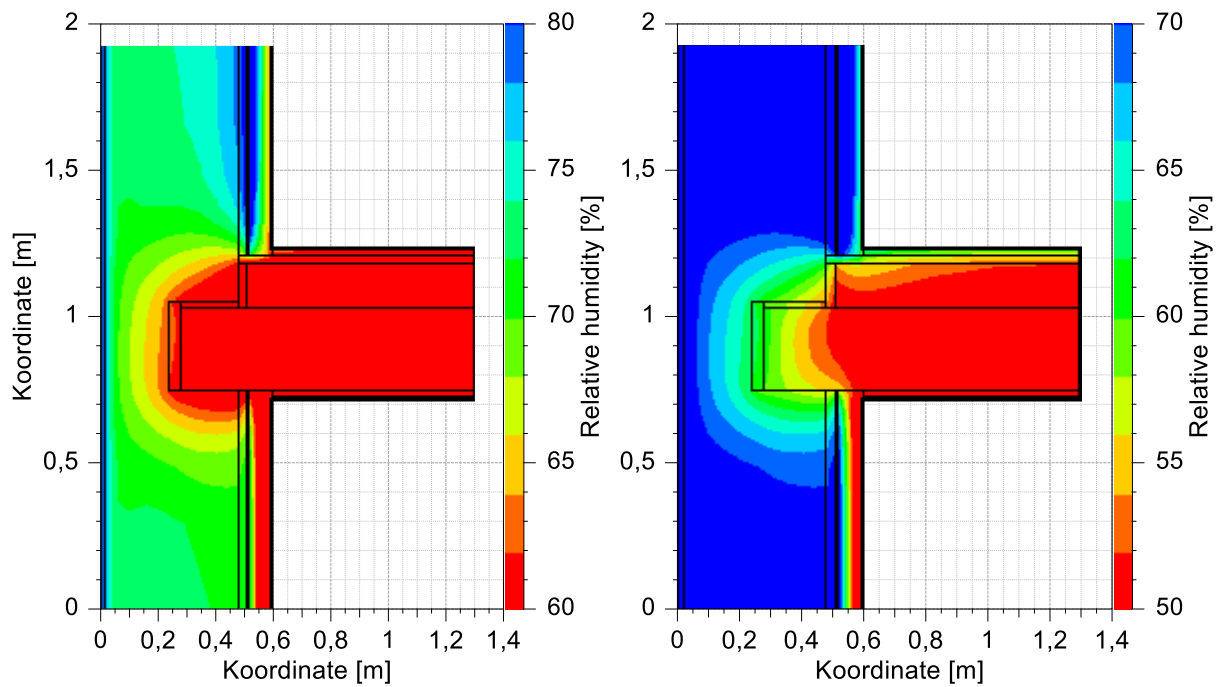


Bild 121 Felder der relativen Luftfeuchte aus 2D-Simulation am 28. Februar 2013; Schnitt durch Balken 3 (Perlitedämmplatte) mit zwei unterschiedlichen Farbtabellen

Im Temperaturfeld (Bild 122) zeichnet sich ein vergleichbarer, warmer Bereich um den Balken nicht ab. Die Temperaturen werden im äußeren Bereich des Mauerwerks nur leicht gebeugt, obwohl es sich in Bild 122 um Momentaufnahmen aus einer 2D-Simulation handelt, in welcher der Einfluss des Balkens deutlicher als in einer 3D-Simulation hervortritt.

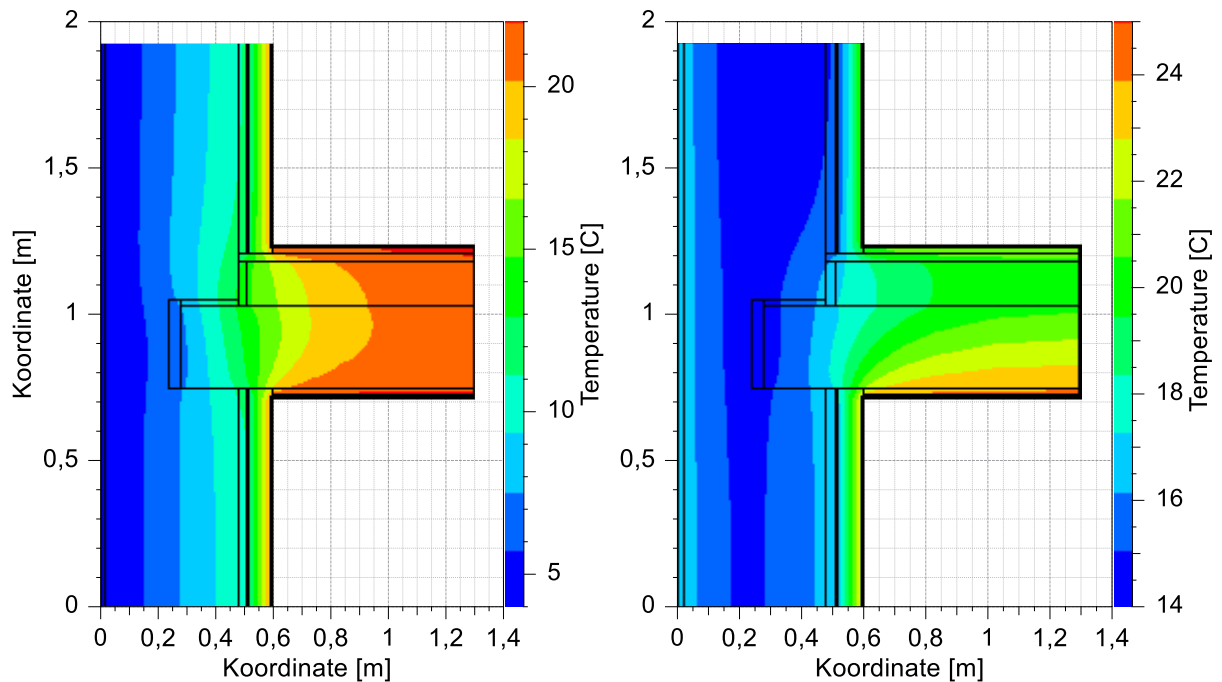


Bild 122 Temperaturfelder an Balken 3 (Perlitedämmplatte): links vom 28. Februar 2013 und rechts vom 10.11.2011 mit zwei unterschiedlichen Farbtabellen

Durch die höhere Dämmwirkung von Luftschicht und Balken werden die Isolinien um wenige Zentimeter nach innen verformt (linkes Bild). Das rechte Temperaturfeld vom 10.11.2011 verdeutlicht die unterschiedlichen Temperaturen in den beiden Geschossen. Im Dachgeschoß war das Mauerwerk zu diesem Zeitpunkt deutlich kühler als im wärmeren Obergeschoß (durchschnittliche Temperaturen im Winter: Dachgeschoß 19,5°C, Obergeschoß 24,5°C).

Mit den in den eindimensionalen Simulationen identifizierten Eingabedaten ist die Übereinstimmung der Temperaturen um den Balkenkopf sehr gut (Bild 123). Die mittlere, absolute Differenz zwischen Messung und Berechnung ( $MD$ ) beträgt an der Messstelle der Balkenwange nur 0,5 Kelvin (Standardabweichung  $s= 0,6$  K, oberes Bild), wobei dieser Wert für die 2D- und 3D-Simulation übereinstimmt. Am Stirnholz sind diese Unterschiede etwas größer und betragen mit der 2D-Simulation 0,6 K ( $s= 0,7$  K).

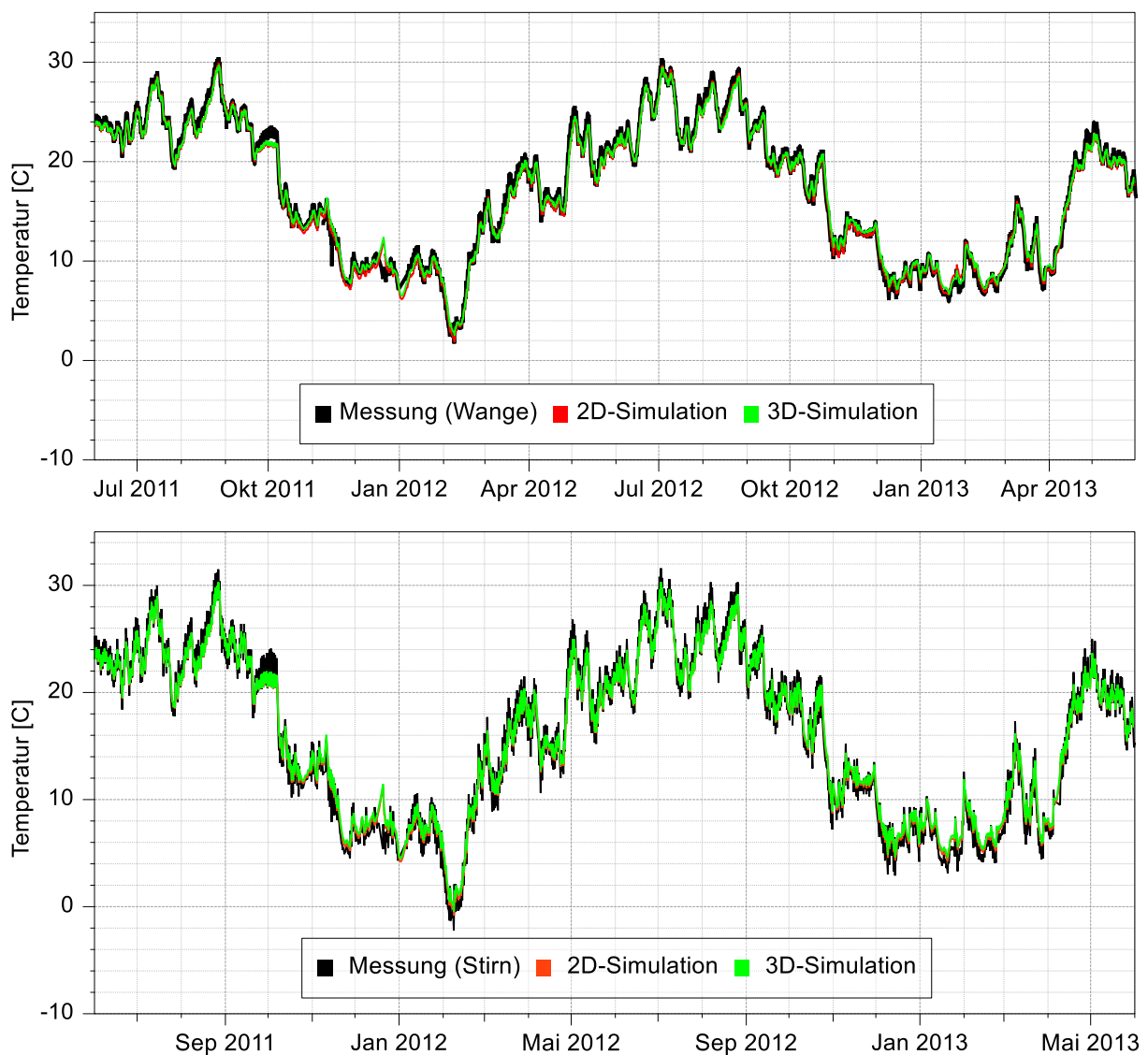


Bild 123 Gemessene und berechnete Temperaturen, oben an der Balkenwange, unten vor dem Stirnholz am Balken 3

Hier kommt es zu der unerwarteten Situation, dass die Ergebnisse der 3D-Simulation mit  $MD = 0,7 \text{ K}$  ( $s = 0,9 \text{ K}$ ) sogar etwas stärker abweichen. Angesichts der Genauigkeit der Sensoren von  $\pm 0,4 \text{ K}$  sind die Ergebnisse nichtsdestotrotz sehr gut. Im Weiteren wird auf die Angabe der Standardabweichung  $s$  oder Varianz  $\sigma^2$  verzichtet, da der Informationsgewinn bei den hier vorliegenden, geringen Abweichungen sehr gering ist. Die Varianz und Standardabweichung finden eine sinnvolle Anwendung, wenn größere, unregelmäßige Streuungen von Messwerten vorliegen, wie bei der Messung von Materialien.

Einige Ergebnisse der absoluten Luftfeuchte an den beiden Messpunkten im Balkenaufleger sind in den Diagrammen in Bild 124 zusammengestellt, in welchen die Abweichungen während der Wintermonate deutlicher hervortreten. Die gemittelte, absolute Differenz während der gesamten Simulationszeit beträgt für die 2D-Basisvariante am Stirnholz  $1,2 \text{ g/m}^3$  und an der Balkenwange  $1,1 \text{ g/m}^3$ . Andere 2D-Varianten, z. B. die Verwendung einer „Schweizer Fichte“ (Name in der *DELPHIN*-Materialdatenbank: Fichtenholz SW Radial, s. Tab. 9) oder das Aufprägen eines Differenzluftdrucks, konnten die Differenz nur um  $0,1 \text{ g/m}^3$  verringern und führten wiederum an anderer Stelle zu Nachteilen (s. u.). Die 3D-Simulation kommt mit jeweils  $0,8 \text{ g/m}^3$  Abweichung an Balkenwange und -stirn auf bessere Werte. Während der Zeiten größerer Abweichungen, ungefähr von November bis März 2012 bzw. Mai 2013, herrschen im Balkenaufleger überwiegend Temperaturen von  $3$  bis  $15^\circ\text{C}$  vor, d. h. die Messgenauigkeit beträgt  $0,3$  (bei  $5^\circ\text{C}$ ) bis  $0,7 \text{ g/m}^3$  (bei  $15^\circ\text{C}$ , Tab. 2). Es muss allerdings eingeschränkt werden, dass diese Messgenauigkeit bei relativen Luftfeuchten über  $95 \%$  nicht mehr gegeben ist (Tab. 2), was konkret bedeutet, dass am Stirnholzsensoren an Balken 3 im Februar 2012 und Mitte Januar bis Ende Februar 2013 (Bild 68) eine niedrigere Messgenauigkeit vorliegt. Anhand der mittleren Abweichung kann deshalb die Übereinstimmung zumindest für die 3D-Simulation immer noch als sehr gut bewertet werden. Auch wenn im Winter die Wachstumsaktivitäten von Holzschädlingen gering sind, sollte beachtet werden, dass die Abweichungen im Sommer viel geringer sind als im Winter. Diese höheren Differenzen im Winter liegen auf der unsicheren Seite, d. h. real wurde eine zwar nur gering höhere, nichtsdestotrotz höhere Feuchte gemessen.

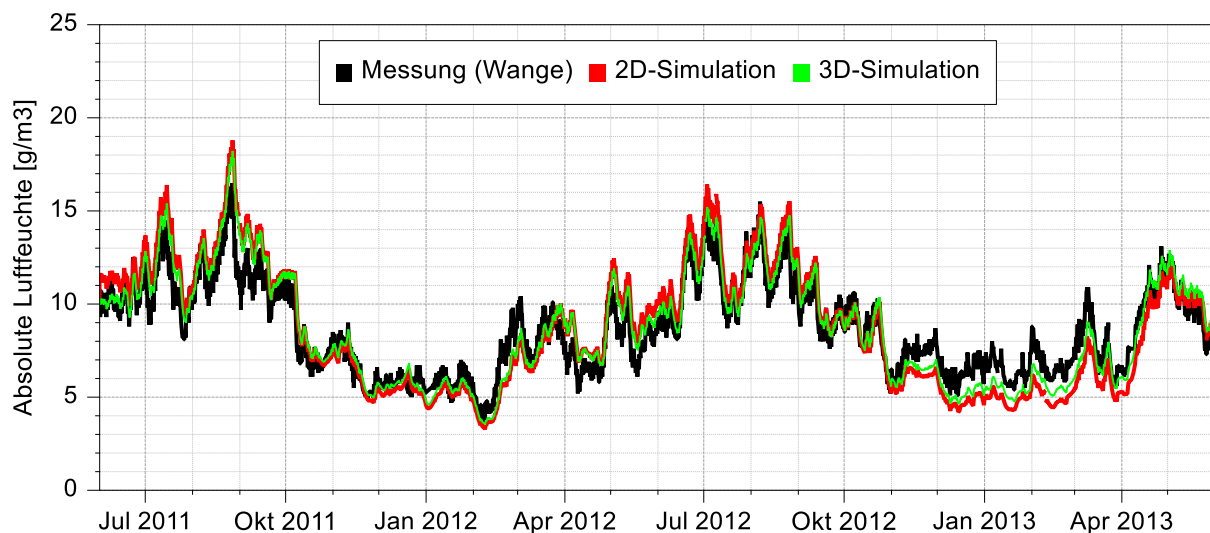


Bild 124 Gemessene und berechnete absolute Luftfeuchte an der Balkenwange

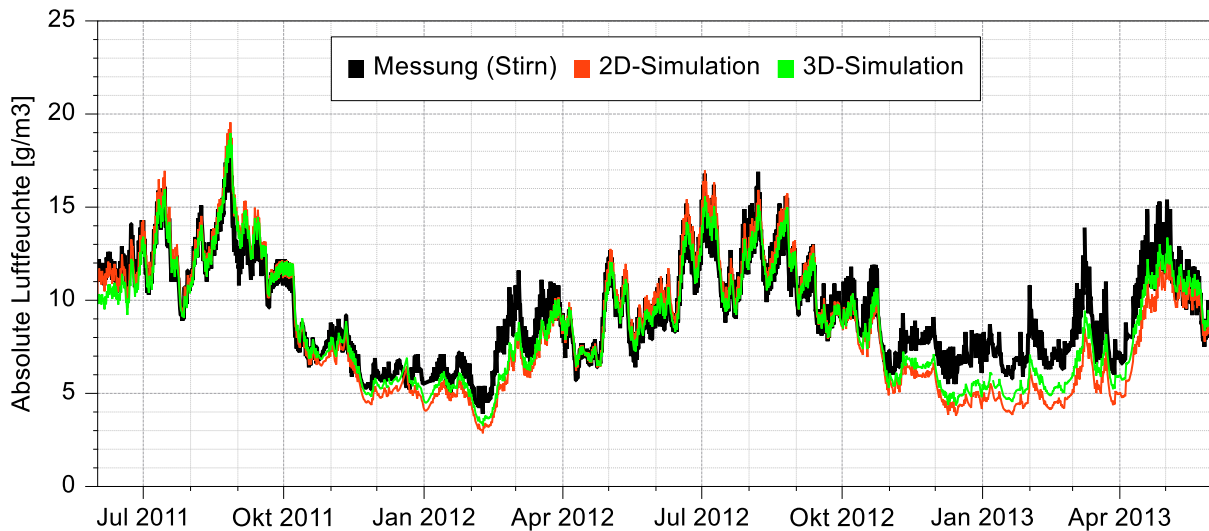


Bild 124 Gemessene und berechnete absolute Luftfeuchte: vorige Seite an der Balkenwange und diese Seite vor dem Stirnholz von Balken 3

Die wichtigste Messgröße in den Balkenauflagern ist die Holzfeuchte, da im Falle von (massivem) Befall mit holzschädigenden Pilzen das statische Versagen des Balkens droht und die Holzfeuchte ein anerkannter Indikator für den möglichen Befall durch holzschädigende Pilze ist.

Bild 125 stellt den Messwerten einige Simulationsvarianten gegenüber. Die mittlere, absolute Differenz gegenüber dem Messwert beträgt für die 2D-Simulation in der besten Variante 0,008 kg/kg und für die 3D-Simulation 0,006 kg/kg (= 0,6 M%), die Abweichungen gegenüber der „temperaturkorrigierten Kurve“ sind jedoch größer: 1,3 (2D) und 1,1 (3D) M%. Demnach ist die gemittelte Übereinstimmung im Deckenbalken ebenfalls sehr gut, vor allem, wenn die Toleranz der Messwerte von  $\pm 0,015$  kg/kg bzw. 1,5 M% berücksichtigt wird.

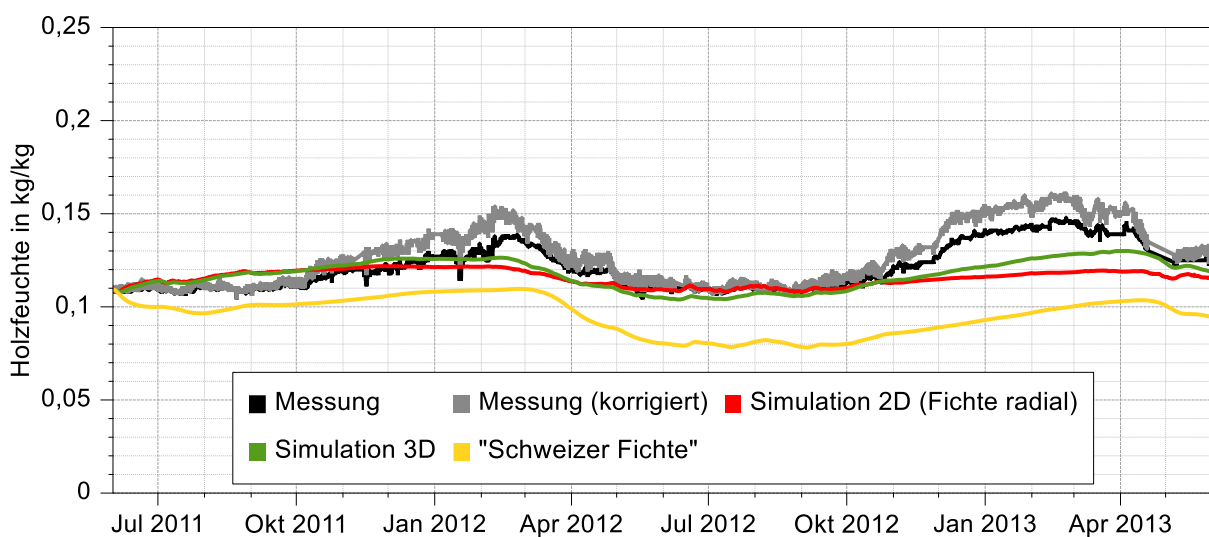


Bild 125 Gemessene, temperaturkorrigierte und berechnete Holzfeuchte in ca. 10 mm Entfernung vom Stirnholz im Balken 3

Die Kongruenz der Kurven kann zwar durch eine 3D-Simulation mit 0,6 M% nicht erhöht werden, immerhin ist die 3D-Simulation in der Lage, die Bewegung der Messkurve besser nachzuzeichnen, da sie stärker in ihrer Höhe variiert. Der Grund dafür ist, dass die Feuchtespeicherkapazität in z-Richtung im Vergleich zur träger verlaufenden 2D-Simulation fehlt. Negativ fällt auch hier auf, dass die berechneten Kurven besonders während höherer Messwerte, im Winter, niedrigere Werte aufweisen, d. h. sie bewegen sich leicht auf der unsicheren Seite.

Versuchsweise wurde der Datensatz einer anderen, so genannten „Schweizer Fichte“ (2D-Simulation, gelbe Linie in Bild 125) für den Deckenbalken eingesetzt, auf den bereits hingewiesen wurde. Damit sind die berechneten Werte inakzeptabel, weil sie durchschnittlich knapp 4 M% zu weit von den Messwerten entfernt und noch dazu im unsicheren Bereich sind. Auf der anderen Seite kann dieser Datensatz die Bewegung der Messkurven besser nachvollziehen. Beide Beobachtungen werden durch die niedrigere, aber im gemessenen Bereich stärker ansteigende Sorptionsisotherme der „Schweizer Fichte“ verursacht.

Um die Übereinstimmung zwischen Messung und Simulationsergebnissen noch weiter zu verbessern, vor allem bezüglich der Holzfeuchte, und um den Einfluss verschiedener Parameter zu untersuchen, wurden an diesem Balken die folgenden Varianten getestet:

- Der Datensatz des Deckenbalkens wurde mit der Transportcharakteristik desselben Holzes, allerdings längs der Faser (in Wuchsrichtung), nicht radial berechnet.
- Der Datensatz des Deckenbalkens wurde mit der Transportcharakteristik desselben Holzes, allerdings in tangentialer Richtung berechnet (u. a.  $\mu = 488$ ).
- Der Datensatz des Deckenbalkens wurde durch eine „Schweizer Fichte“ (Fichtenholz SW radial) ersetzt.
- Der  $\mu$ -Wert des Deckenbalkens der Vorzugsvariante (radialer Datensatz) wurde von 186 auf 100 reduziert.
- Die langwellige Abstrahlung zwischen Holz und umgebenden Mauerwerk im Balkenaufleger wurde nicht berücksichtigt.
- Die vertikale, 30 mm dicke Luftschicht zwischen Schüttung und Bestandsoberfläche wurde durchgehend mit Schüttung befüllt.
- Eine variabler Differenzluftdruck analog zu *WTA-MB 6-2* (Gebäude-, Druckhöhe= 12 m) wurde in beiden Geschoßen angeordnet; den Komponenten des Dämmsystems wurde eine Permeabilität von  $K_G = 5 \cdot 10^{-6}$  s, den Deckenmaterialien von  $K_G = 1 \cdot 10^{-5}$  s zugeordnet.

Allen diesen Varianten war gemeinsam, dass sie nur untergeordneten Einfluss auf die Simulationsergebnisse ausübten, und die mittlere Abweichung um maximal 0,1 Kelvin oder 0,001 g/m<sup>3</sup> (Luft) bzw. 0,1 M% im Holz veränderten. Eine Ausnahme bildete dabei die „Schweizer Fichte“, die zwar in der Luftschicht im Balkenaufleger leicht bessere Ergebnisse hervorrief, allerdings im Holz, wie schon dargelegt, auffällig weit von den Messwerten abwich (Bild 125).

Wurden dem Deckenbalken die Eigenschaften des Holzes längs zur Faser zugewiesen (u. a.  $\mu = 5$  statt 186,  $\lambda_{\text{dry}} = 0,21$  statt  $0,095 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ), erhöhten sich die Temperaturen an der Stirnholz-Messstelle maximal um 0,8 Kelvin und der massebezogene Wassergehalt reduzierte sich maximal um 0,6 kg/kg. In den 3D-Simulationen wurde grundsätzlich mit anisotropen Materialeigenschaften gerechnet.

### 6.7.2 Balkenaufleger 6 in Feld 5 - Schilfplatten

Der grundsätzliche Aufbau der Balkenaufleger im mit Schilf gedämmten Feld 5 gestaltete sich wie folgt:

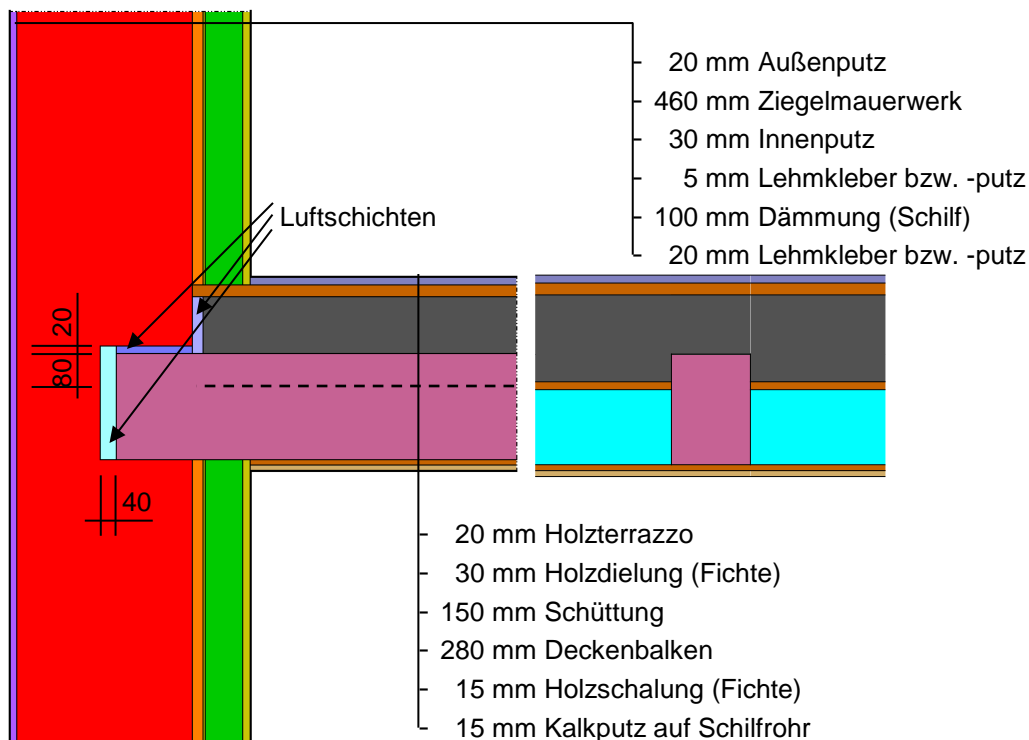


Bild 126 Screenshot der „Basisvariante“ in Feld 5 (Schilf, Screenshot aus *DELPHIN*)

Auch im Screenshot in Bild 126 ist links durch einen Strich angedeutet, wo bei 3D-Simulationen die Schüttung im Feldbereich beginnt. Dort wurde die Dämmebene durch diese Schüttung sowie die Dielenbretter unter und über der Schüttung unterbrochen.

Das Auflager des Balkens 6 ist, genauso wie das des zuvor besprochenen Balkens 3, im unteren Geschoß sehr gut abgedichtet worden (Bild 18). Bei Balken 7 dagegen war entlang der Balkenwange ein Luftspalt von etwa 20 mm Breite zwischen Dämmung und Balken belassen worden, sodass insbesondere beim Vorliegen eines Druckgefälles die Luft aus dem Deckenzwischenraum leichter in das Balkenaufleger strömen konnte. Diese Situation kann in 2D-Simulationen von Balkenköpfen nicht abgebildet werden. Bei 2D-Simulationen, in denen der Schnitt durch den Balken geführt wurde, sind dadurch bei der Berücksichtigung von konvektivem Lufttransport viel größere Widerstände vorhanden: Vom Dachgeschoß her sind entweder das Dämmsystem oder Holzterrazzo, Dielung und Schüttung zu überwinden, bis vor der



Schütteebene eine Luftschicht mit dem Luftraum des Balkenauflegers verbunden ist. Für die Raumluft des unteren Geschoßes ist der Widerstand in den Simulationen viel größer, weil hier nicht nur die Komponenten des Dämmsystems oder die Schichten der unteren Deckenbekleidung dazwischenliegen, sondern vor allem der Deckenbalken selber. In der Realität ist dieser Widerstand aus dem unteren Geschoß natürlich viel kleiner, da im größeren Feldbereich neben dem Balken selbiger problemlos umströmt werden kann.

Um diesen Umstand in den 2D-Simulationen „realitätsnäher“ abzubilden, wurden zwei weitere konstruktive Varianten untersucht, in denen an der Balkenunterseite Luftschichten angeordnet wurden. Der Balken schwebte somit in der Luft, was in der Realität gewisse statische Fragen aufwerfen würde.

Die zwei Varianten veranschaulicht Bild 127. Beim nicht abgedichteten Balkenaufleger 7 kam nur die Variante mit dem durchgehenden Luftspalt (rechte Variante) zur Anwendung, um so die leichte Zugänglichkeit zum dort nicht abgedichteten Auflagerbereich wiederzugeben. Das Foto auf der rechten Seite zeigt den Luftspalt vor dem Anbringen des Dämmsystems. Dieser Luftspalt wurde bei Balken 7 belassen, die Schilfdämmung wurde dort nur bis zu dem Rand des Spalts geführt.

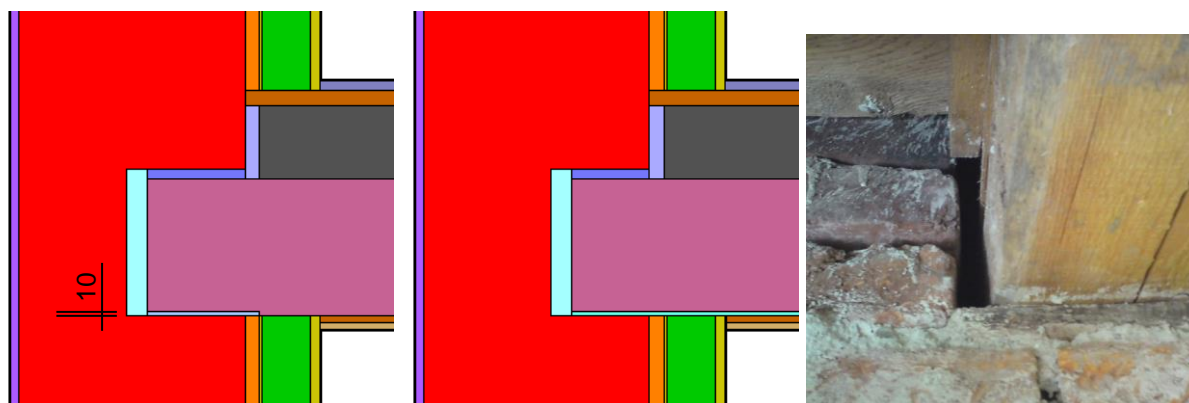


Bild 127 Anordnung unterschiedlich langer Luftkanäle (Höhe= 10 mm) unterhalb des Deckenbalkens für einen größeren Luftkontakt (Balken 6, links) bzw. um die Zugänglichkeit für eindringende Raumluft aus dem unteren Geschoß zu erhöhen (Mitte); links reicht der Luftkanal bis zur Außenkante des Bestandsputzes, in der Mitte ist er durchgehend (nur Balken 7); rechts ein Foto des Luftspalts ohne Dämmung

In beiden Diagrammen von Bild 128 sind die drei enthaltenen Linien kaum voneinander zu unterscheiden. Die über den gesamten Simulationszeitraum gemittelte Abweichung beträgt nur 0,4 bis 0,5 Kelvin, unabhängig davon, ob es sich um eine 2D- oder 3D-Simulation handelt, und ob mit (nicht abgebildet) oder ohne Luftdruckeinfluss. Wie schon im Auflager des dritten Balkens ist die Übereinstimmung zwischen Messung und Berechnung bei den Temperaturen somit außerordentlich gut (Messfühler-Genauigkeit  $\pm 0,4$  K). Die Anwendung einer 3D-Simulation ist folglich für thermische Betrachtungen auch in dem mit Schilf gedämmten Feld nicht notwendig.



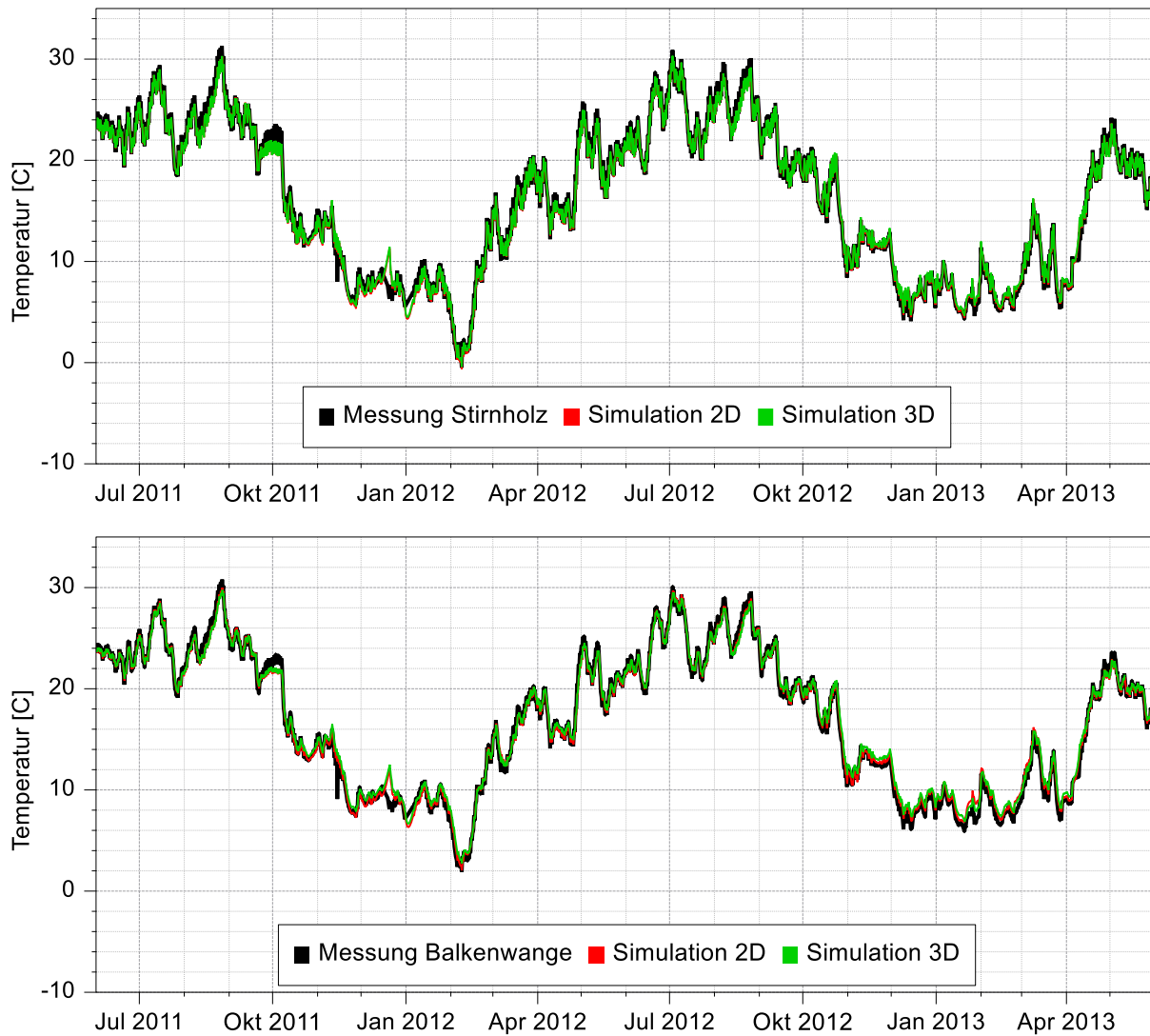


Bild 128 Gemessene und berechnete Temperaturen: oben an der Balkenwange und unten vor dem Stirnholz von Balken 6 (Schilf)

Bei der absoluten Luftfeuchte unterscheiden sich Messung und Simulationsergebnis etwas mehr (Bild 129): Die 2D-Basisvariante um  $1,1 \text{ g/m}^3$  am Stirnholz und  $0,8 \text{ g/m}^3$  an der Balkenwange, die 3D-Simulation um  $0,8 \text{ g/m}^3$  (Stirnholz) und  $0,6 \text{ g/m}^3$  (Balkenwange). Im Gegensatz zu den Temperaturschaubildern in Bild 128 ist hier ein Einfluss zu sehen, wenn der Luftdruckunterschied angesetzt wird (Permeabilität der Schichten unter und über dem Deckenbalken  $K_G = 1 \cdot 10^{-5} \text{ s}$ ): Am Stirnholz ist der Unterschied genauso groß wie bei der 3D-Simulation ( $0,8 \text{ g/m}^3$ ), an der Balkenwange vergrößert er sich durch den Luftdruckunterschied allerdings leicht von  $0,8$  auf  $0,9 \text{ g/m}^3$  (Bild 129 unten). Die Abweichungen zu den Messwerten sind somit ähnlich klein wie in Feld 3 (Messungengenauigkeit bei  $5^\circ\text{C}$   $0,3 \text{ g/m}^3$  und bei  $15^\circ\text{C}$   $0,7 \text{ g/m}^3$ ).

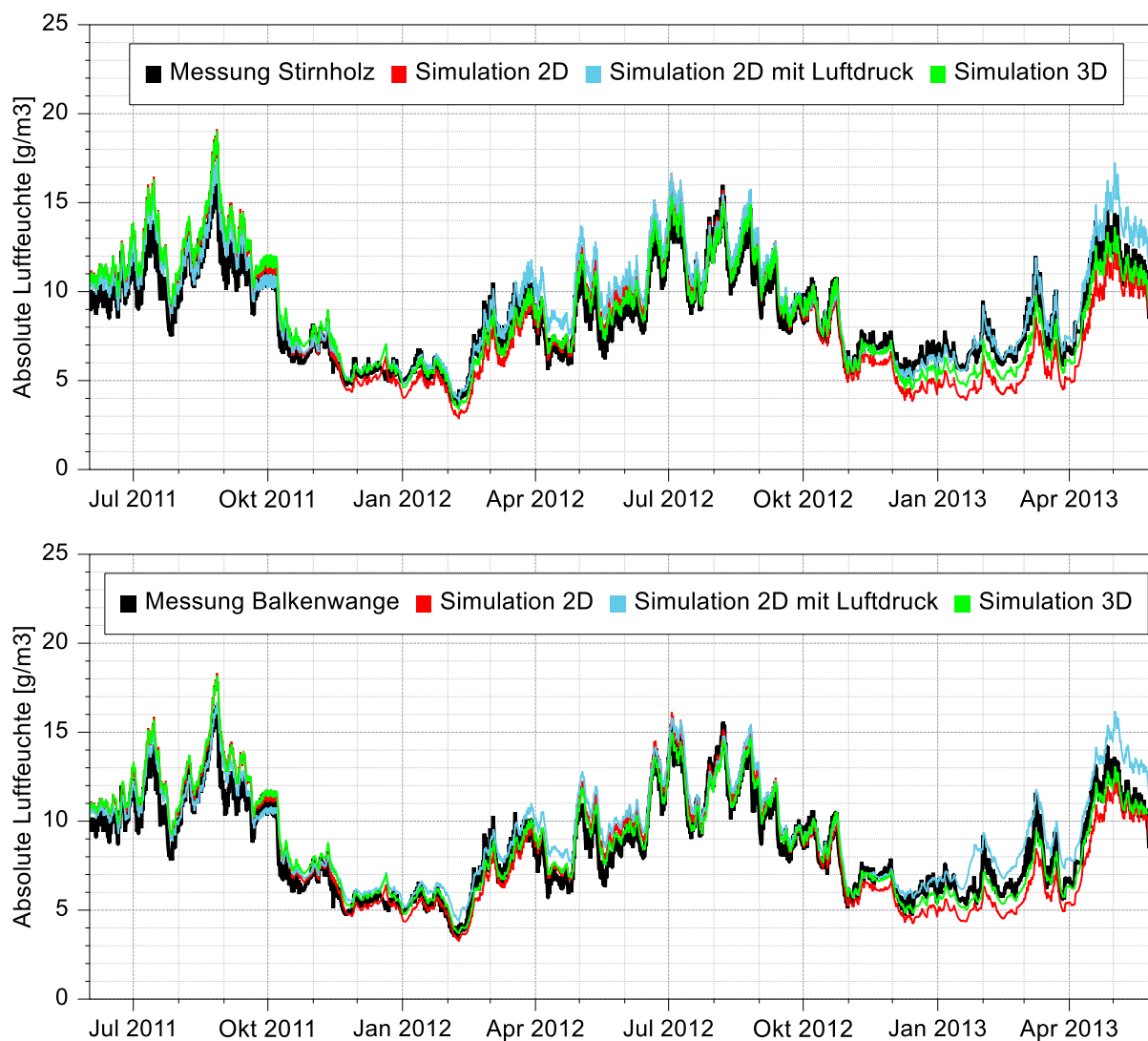


Bild 129 Gemessene und berechnete absolute Luftfeuchte: oben an der Balkenwange und unten am Stirnholz von Balken 6 (Schilf)

Es fällt auf, dass mit Berücksichtigung von Luftströmungen in der 2D-Simulation die Feuchtebelastung vor allem in der Übergangszeit im Frühling, von April bis Mai bzw. Juni, die Feuchte überschätzt, statt unterschätzt wird. Gerade die Übergangszeit ist besonders interessant hinsichtlich möglicher Schimmel oder Pilzschäden, da während dieser Zeit die Temperaturen höher und damit günstiger für das Wachstum von Schädlingen sind. Das leichte Überschätzen des Feuchteintrags ist hinsichtlich einer sicheren Planung deshalb wünschenswert.

In den 3D-Simulationen konnte wegen der extrem langen Simulationsdauer leider kein Luftdruckunterschied angesetzt werden. Es war deshalb leider nicht möglich zu untersuchen, inwieweit 3D-Simulationen unter Berücksichtigung von Luftströmungen die Genauigkeit verbessern können. Die mit solchen Aufgaben verbundenen numerischen Herausforderungen für den Solverkern werden derzeit bearbeitet. Auf der anderen Seite ist bei diesem (teil-)abgedichteten Auflager kein großer Einfluss durch das Anordnen von Luftdruckunterschieden zu erwarten.

Im Diagramm der Holzfeuchte in Bild 130 sticht hervor, dass vor allem bei sehr hohen Raumluftfeuchten im Winter/Frühjahr 2013 die Feuchteentwicklung bei Verwendung von Luftströmungen (blaue Kurve) stark überschätzt wird und somit Luftströmung nicht berücksichtigt werden sollte. Gemittelt über den Simulationszeitraum verlaufen auch alle anderen Simulationen über den gemessenen Feuchtwerten, jedoch nicht so deutlich wie in der 2D-Variante mit Luftdruck: Durchschnittlich übertrafen sowohl die 2D-, als auch die 3D-Variante die unkorrigierte Messkurve um 0,011 kg/kg, die temperaturkorrigierte Kurve um 0,01 bzw. 0,009 kg/kg. Der Holzfeuchteverlauf der Kurve mit Luftereinfluss übersteigt zeitweise die Messgenauigkeit von  $\pm 0,015$  kg/kg im Winter 2012/13 um das Doppelte. Dieser Simulation war die linke Konstruktionsvariante aus Bild 127 zugrunde gelegt.

Das schlechte Abschneiden der Variante mit Luftdruck steht im Gegensatz zu den Ergebnissen am Auflager 3. Dort führte das Anordnen des Luftdruckunterschieds zu keiner nennenswerten Verbesserung oder Verschlechterung. Als Grund hierfür wird vermutet, dass an Balken 6 das „offenporige“ Schilf ( $K_G = 1 \cdot 10^{-4}$  s) dem konvektiven Feuchteeintrag zu wenig Widerstand entgegenstellt. Als nennenswerter Widerstand sind hier nur der Lehmdeckputz ( $K_G = 5 \cdot 10^{-6}$  s) und die Abdichtungsmaßnahmen um den Luftspalt vorhanden.

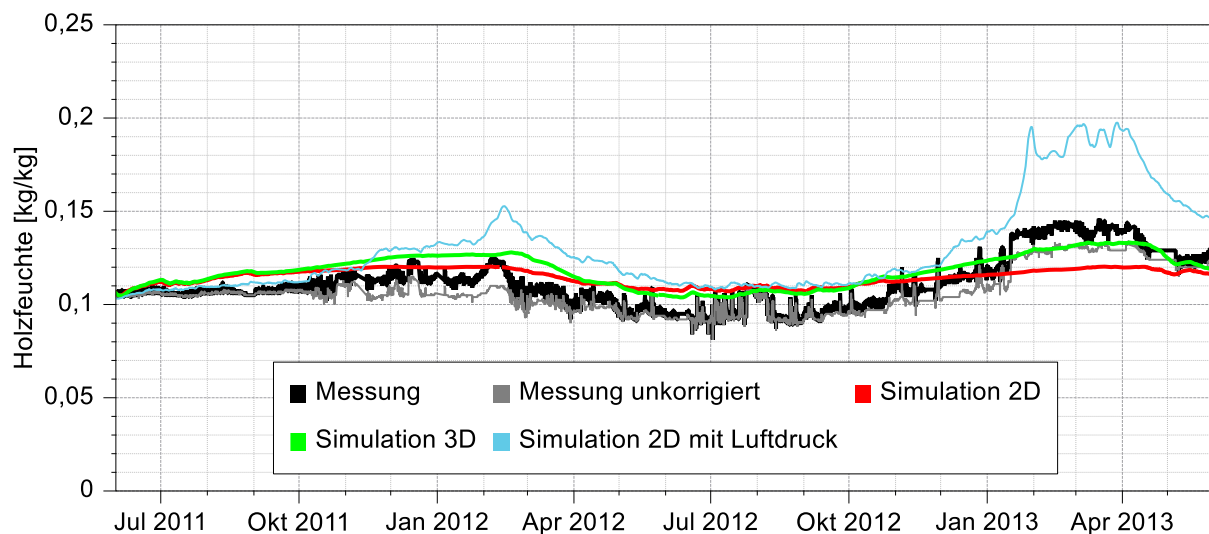


Bild 130 Gemessene, temperaturkorrigierte sowie berechnete Holzfeuchte in ca. 10 mm Entfernung vom Stirnholz in Balken 6 (Schilf)

Versuchsweise war an diesem Balkenaullager auch der  $\mu$ -Wert einiger nicht gemessener Bauteilschichten erhöht worden, um zu überprüfen, wie sich diese Änderungen auf die Feuchtegraphen auswirken:

- $\mu$ -Wert-Änderung der beiden Bretterschichten (Fichte) im Deckenaufbau unter und über dem Balken von  $\mu = 15$  auf 25.
- $\mu$ -Wert-Änderung der Schüttung zwischen und über den Deckenbalken von  $\mu = 5$  auf 7.
- $\mu$ -Wert-Änderung der Holzterrazzschicht im Dachgeschoß von  $\mu = 15$  auf 20.

Diese Modifikationen hatten praktisch keine Auswirkungen auf die Ergebnisse im Balkenaufleger. Ebenso wenig war eine Änderung zu bemerken, wenn, wie schon im Auflager von Balken 3, die langwellige Abstrahlung zwischen Holzbalken und Mauerwerksoberfläche vernachlässigt wurde oder der Deckenbalken als nicht luftdurchlässig definiert war.

Die Verteilung der relativen Luftfeuchte illustriert die durch die Berücksichtigung des Luftdruckunterschieds hervorgerufenen Veränderungen. Im mittleren und rechten Luftfeuchtefeld in Bild 131 ist die stärkere Feuchteentwicklung gut zu erkennen, die sich schräg über dem Balkenaufleger ausbildet, in Richtung des kälteren Wandaufbaus im Dachgeschoß. Wie sich schon in den Diagrammen zur absoluten Luftfeuchte (Bild 129) gezeigt hatte, wird mit dem Luftdruckunterschied mehr Feuchte in die Konstruktion eingebracht. Bild 131 verdeutlicht, dass dies vor allem in der Deckenebene geschieht, da sich der feuchte Bereich weder nach oben noch nach unten nennenswert ausbreiten kann.

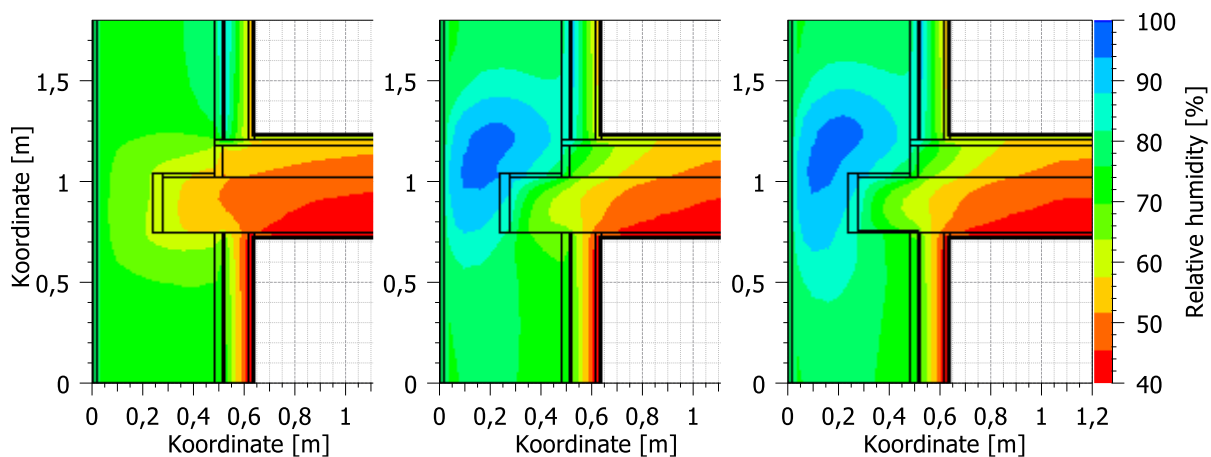


Bild 131 Feld der relativen Luftfeuchte am 28.Februar.2013 von Balkenaufleger 6: links die Basisvariante ohne Luftströmung, in der Mitte mit Luftdruckunterschied, rechts zusätzlich mit „Luftkanal“ unter dem Balken

Das neue Dämmsystem und der relativ konvektionshemmend gewählte Balken ( $K_G = 5 \cdot 10^{-6} \text{ s}$ ) reduzieren das Einströmen der Raumluftfeuchte, wobei zu beachten ist, dass die Feuchtelast aus dem Dachgeschoß größer war (Tab. 15). Die Luftschicht unter dem Balken im Auflagerbereich begünstigt die Ausbreitung der Feuchte, wenn auch nur in geringem Ausmaß (Bild 131 rechts).

Auf die Abbildung der zweidimensionalen Temperaturverteilung der verschiedenen Varianten wurde verzichtet. Wie schon bei den Diagrammen in Bild 128 sind dort visuell weder zwischen den einzelnen Simulationsvarianten von Balkenaufleger 6 noch zwischen den Temperaturfeldern von Auflager 3 und 6 Unterschiede erkennbar. Selbst innerhalb eines Wandaufbaus sind die Unterschiede sehr gering, wie die Ergebnisse aus 3D-Simulationen in Bild 132 vor Augen führen. Diese 3D-Zustandsfelder wurden jeweils mit der Software *Tecplot* (2019) generiert. Wegen der geringen Wärmeleitfähigkeit der Ziegel ist der Einfluss des Holzbalkens auf die Temperaturverteilung in Bild 132 kaum wahrnehmbar. So erkennt man im rechten Schnitt in

Bild 132, in der Feldmitte, eine homogene Temperaturverteilung. Nur auf der Ebene der Schüttung werden die Temperaturisolinien in die Decke hinein gebeugt. Im linken Schnitt, der durch den Deckenbalken führt, ist diese Auswölbung zwar etwas deutlicher aber keinesfalls auffällig ausgeprägt. Die Wärmeleitfähigkeit des Holzbalkens ist im Vergleich zur Luftschicht zwischen den Balken höher, weshalb dieser die Isolinien deutlicher als im Schnitt durch die Feldmitte in die Decke zieht. Auch im Bereich der Luftschicht vor dem Stirnholz werden die Temperaturebenen gekrümmt, jedoch nur sehr leicht. Bei einem größeren Unterschied der Wärmeleitfähigkeiten von Ziegel und Holz würde sich die Position des Balkens deutlicher abzeichnen.

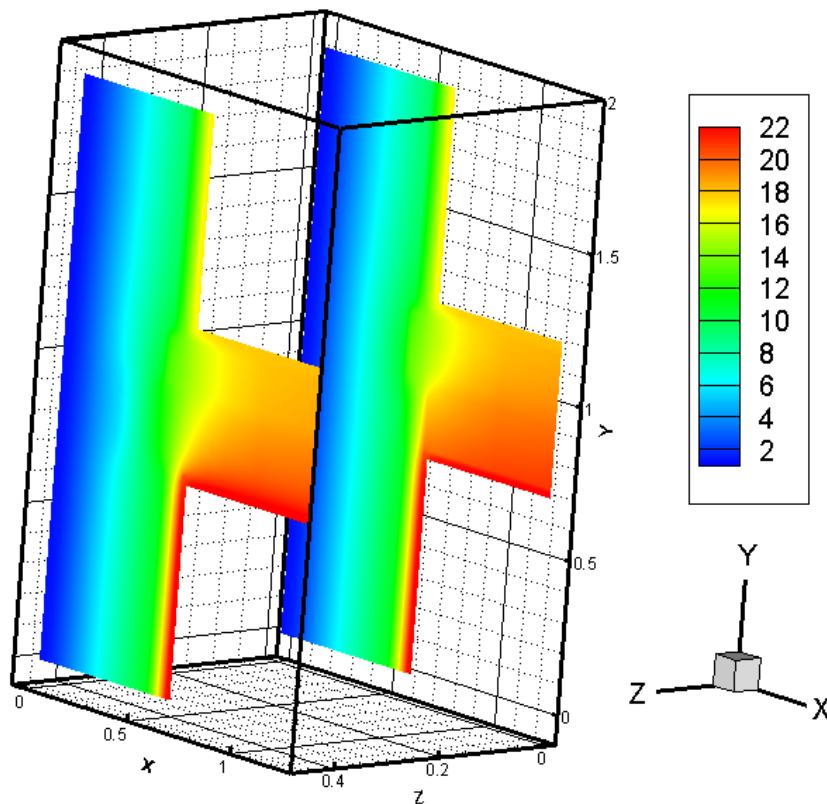


Bild 132 Temperaturfeld am 19. Januar 2013 um Auflager 6 aus einer 3D-Simulation: vorne-links Schnitt durch die Mitte des Balkens, hinten-rechts Schnitt durch das Feld (z-Achse nicht proportional)

Das Luftfeuchtefeld erlaubt eine einfachere Lokalisierung des Holzbalkens, da sich die beiden Schnitte in Feldmitte (rechts-hinten in Bild 133) und durch den Balken (links-vorne) offensichtlich voneinander abheben. Im Bereich des Holzbalkens zieht sich der trockenere (grüne) Bereich bis in das Mauerwerk unter und über dem Holzbalken hinein (unter den Deckenbalken war keine kapillar brechende oder diffusionsdichte Schicht angeordnet). In seinem unmittelbaren Umfeld senkt der Deckenbalken somit die Feuchte ab, mit Ausnahme der Luftschicht vor dem Stirnholz. Dort zieht die kalte Mauerwerksoberfläche gegenüber dem Stirnholz die Feuchte förmlich an. In Feldmitte dagegen ist die Luftschicht zwischen den Deckenbalken vergleichsweise trocken, wobei sich auch hier im kältesten Bereich der Luftschicht der Wasserdampf konzentriert und in die Konstruktion eindringt.

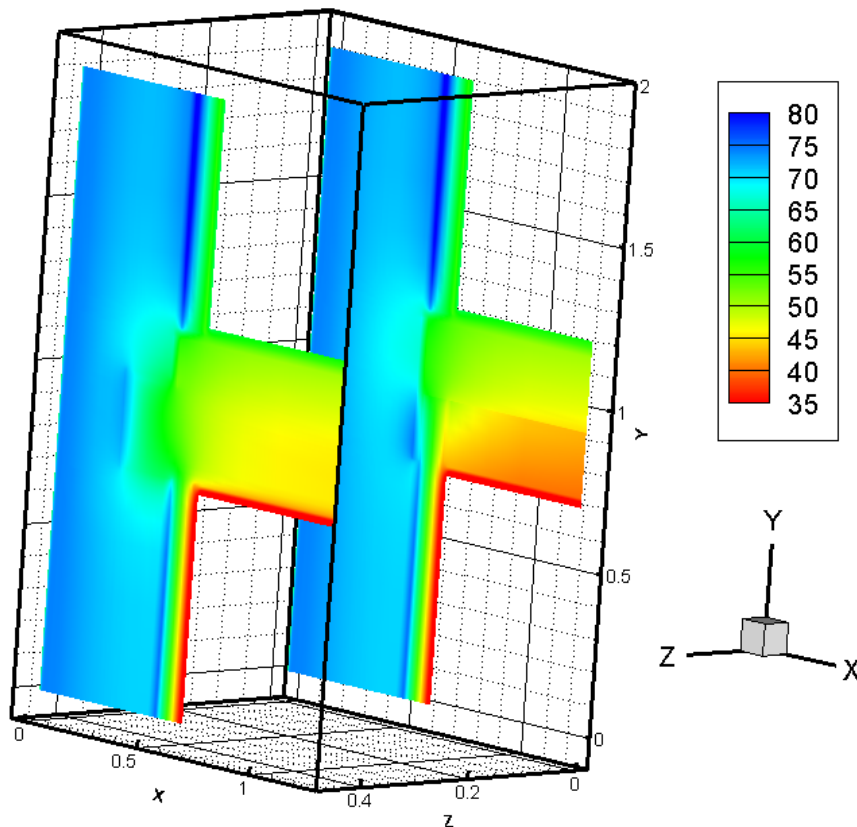


Bild 133 Feld der relativen Luftfeuchte am 19. Januar 2013 am Balkenaufleger 6 aus 3D-Simulation ohne Luftdruckeinfluss: vorne-links Schnitt durch die Mitte des Balkens, hinten-rechts Schnitt durch das Feld (z-Achse nicht proportional)

### 6.7.3 Balkenaufleger 7 in Feld 5 - Schilfplatte

Der prinzipielle Aufbau am Balkenaufleger 7 gleicht dem in Auflager 6 (Bild 126), wobei die Auflagerlänge um 4 cm kürzer ist. Die wichtigere Unterscheidung ist, dass diese Auflagertasche weder im Ober- noch im Dachgeschoß abgedichtet war. Um diese ungehinderte Durchlässigkeit in der Deckenebene in den Simulationen nachzubilden, wurde in fast allen Varianten unter dem Deckenbalken eine 10 mm dicke Luftschicht angeordnet (Bild 127 rechts).

Während der Bau, Nutzungs- oder Renovierungsphase bilden sich in vormals luftdichten Schichten immer wieder Risse und Fugen im Laufe der Zeit aus oder es werden, z. B. durch elektrische Installationen, neue Durchdringungen geschaffen, die nicht ausreichend abgedichtet werden. Deshalb wurde an Auflager 7 zusätzlich eine Variante getestet, bei der eine 1 mm breite, durchgängige Fuge entlang des Deckenwinkels des unteren Geschoßes angebracht worden war. Bei diesem Balkenaufleger spielte aufgrund des nicht abgedichteten Auflagers mehr als bei den anderen die Permeabilität der Materialien eine große Rolle. In einer „hoch permeablen“ Variante wurde deshalb den Materialien eine sehr hohe Luftdurchlässigkeit zugeordnet, um deren Einfluss zu testen. Abgesehen von den Schilfmatten mit  $K_G = 1 \cdot 10^{-4}$  s und den Lehmmaterialien mit  $K_G = 1 \cdot 10^{-5}$  s betrug die Permeabilität der anderen Materialien  $K_G = 5 \cdot 10^{-5}$  s.



Bei fast allen getesteten Varianten wichen die Temperaturen an der Auflagerflanke des Balkens 7 durchschnittlich um denselben Betrag von 0,7 Kelvin von der Messkurve ab (Bild 134). Nur für die 2D-Basisvariante ohne Luftdruckeinfluss (rot) und die Variante mit der sehr hohen Luftpermeabilität (lila) betrug die Differenz 0,9 Kelvin.

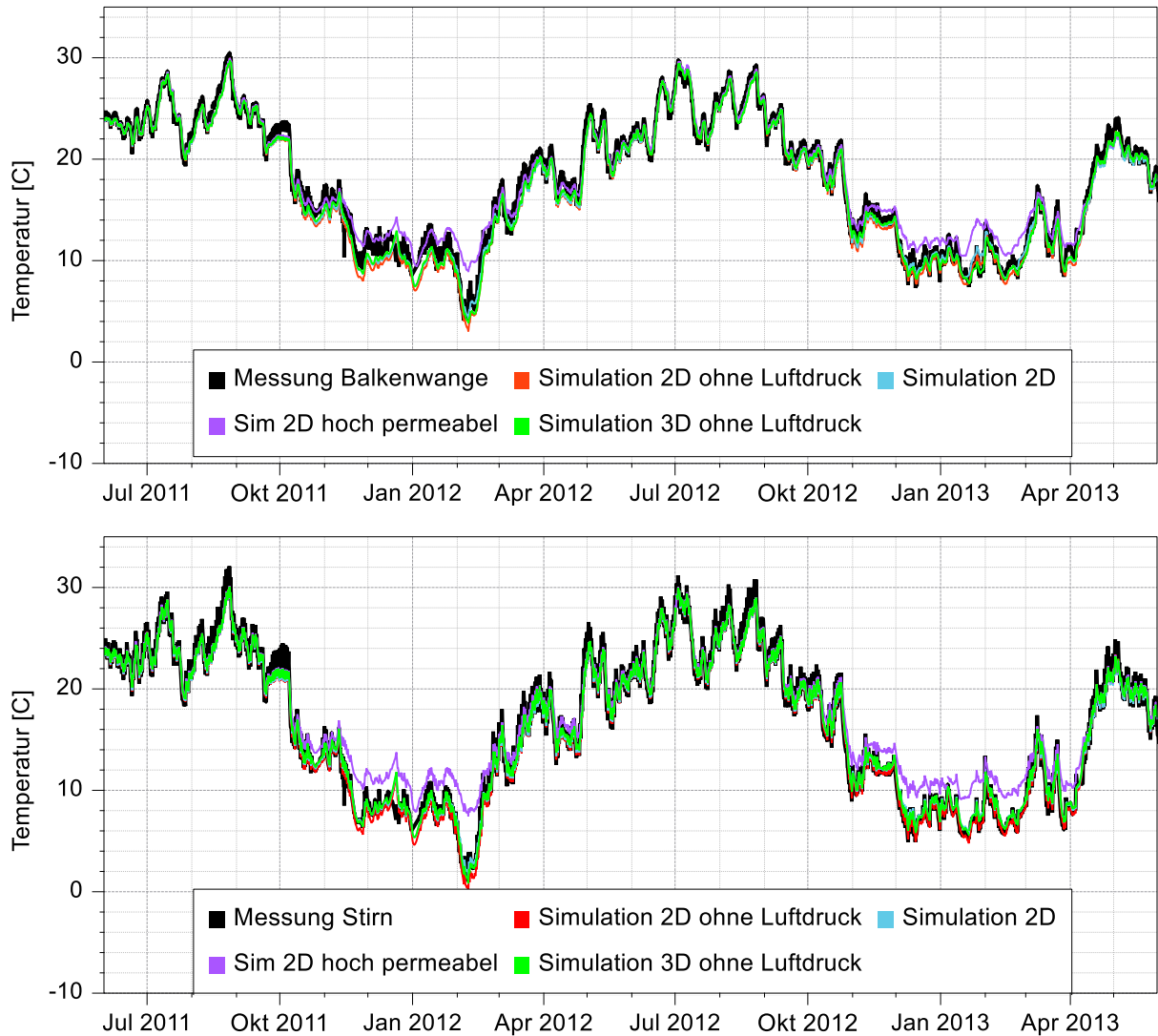


Bild 134 Gemessene und berechnete Temperaturen: oben an der Balkenwange, unten vor dem Stirnholz von Balken 7 (Schilf)

Auch am Stirnholz (Bild 134 oben) war, inklusive der 3D-Simulation, die durchschnittliche Abweichung von den Messwerten am Stirnholz übereinstimmend 0,6 Kelvin. Hier fiel nur die Variante mit der hohen Luftpermeabilität mit einer Differenz von 1,5 Kelvin weit aus dem Rahmen. Bis auf diesen Wert erscheinen alle (mittleren) Differenzen von bis zu 0,9 Kelvin angesichts einer Genauigkeit von  $\pm 0,4$  Kelvin akzeptabel, inklusive des Wertes von 0,9 Kelvin an der Balkenwange für die hoch permeable Konstruktion. Während sich allerdings bei allen anderen Varianten die Differenzen mehr oder weniger über das Jahr verteilen, konzentrieren sich die Unterschiede bei der sehr durchlässigen, lilafarbenen Variante auf den Winter, da der Luft-

druckunterschied zwischen Räumen und Außenklima während der kalten Jahreszeit besonders hoch ist. So kommt es, dass diese spezielle Variante im Winter kurzfristig um bis zu unakzeptable 6 Kelvin abweicht.

Bei der Betrachtung der Feuchte tritt der positive Einfluss der Luftströmung offensichtlich zu Tage, wie in den Diagrammen in Bild 135 deutlich wird. An der Balkenwange (oben) wurde für die 2D-Basisvariante eine Differenz von 1,1, für die 3D-Simulation (ohne Luftdruck) von 0,9 g/m<sup>3</sup> ermittelt. Hier ermöglichten schon die 2D-Varianten durch die Berücksichtigung der Luftströmung eine höhere Genauigkeit von 0,8 g/m<sup>3</sup> mittlerer Differenz. Ein höherer Lufteintrag wirkte sich zusätzlich begünstigend aus: durch die Anordnung einer 1 mm breiten Fuge betrug die mittlere Differenz zu den Messwerten 0,6 g/m<sup>3</sup> (nicht abgebildet), bei der hoch permeablen Konstruktion reduzierte sich die mittlere Differenz sogar auf 0,5 g/m<sup>3</sup>.

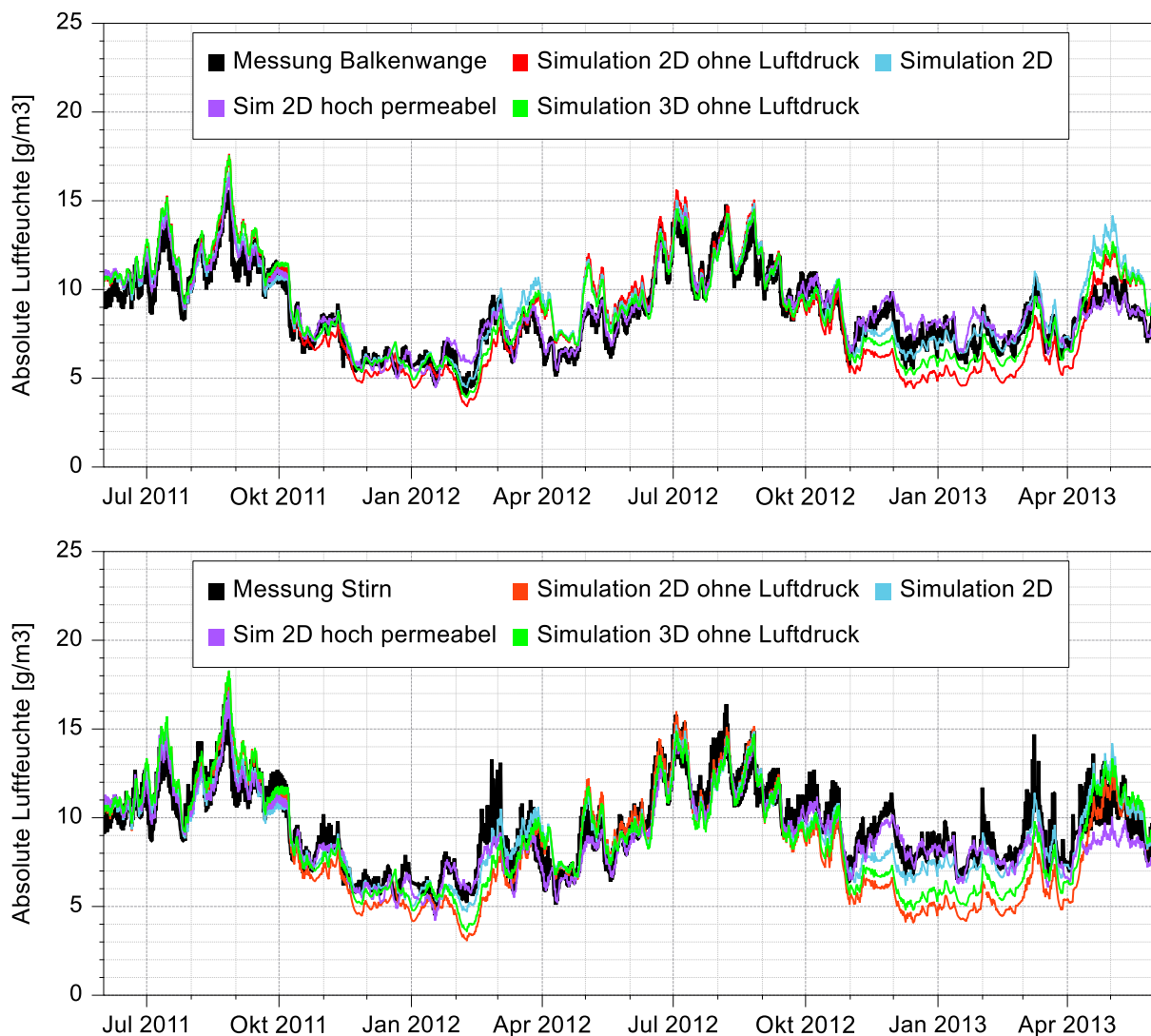


Bild 135 Gemessene und berechnete absolute Luftfeuchte: oben an der Balkenwange, unten am Stirnholz von Balken 7 (Schilf)



Noch größer stellen sich die Vorteile am Stirnholz dar. Ohne Luftdruckeinfluss beträgt die mittlere Differenz 1,5 (2D) bzw. 1,2 g/m<sup>3</sup> (3D), also mehr als an der Balkenwange. Wird der Luftdruck in den Simulationen angesetzt, verringert sich die Differenz auf 0,8 g/m<sup>3</sup>, bei der sehr luftdurchlässigen Variante auf 0,6 g/m<sup>3</sup>. Die Genauigkeit der Sensoren von ungefähr 0,3 bis 0,7 g/m<sup>3</sup> wird durch die Vorzugsvariante mit Luftdruck (blau) nur leicht überschritten.

Wurde bei den Varianten mit Luftdruck keine Luftschicht unterhalb des Deckenbalkens angeordnet, waren die Ergebnisse vergleichbar mit der Basisvariante ohne Luftströmung.

Im Gegensatz zu der Situation an Balkenaufleger 6 führt auch bei Betrachtung der Holzfeuchte die Verwendung von Luftdruck zu besseren Ergebnissen (Bild 136). Für die 2D-Basisvariante ohne Luftdruckeinfluss, aber mit „Luftkanal“ unter dem Deckenbalken (rot), ergab sich eine Abweichung von 0,01 bzw. 0,014 kg/kg (temperaturkorrigierte Messdaten), die höchste Differenz aller Varianten. Die 3D-Simulation (hellgrün) dagegen wich durchschnittlich nur um 0,008 kg/kg (temperaturkorrigiert 0,01 kg/kg) von den Messwerten ab. Die Linien beider Varianten lagen während der kalten Witterungsperioden auf der unsicheren Seite, d. h. unter den Messwerten. Mit Luftdruck betrug die Differenz zwischen Messung und Simulation 0,01 bzw. nur 0,006 kg/kg (2D, blaue Kurve in Bild 136) und die Linien verliefen im Mittel über den Messwerten, auch während der kalten Jahreszeit. Wie schon beim sechsten Auflager verursachte die Anordnung einer durchgehenden, 1 mm breiten Fuge entlang des Deckenwinkels keine signifikante Änderung (nicht abgebildet). Bei der Genauigkeit der Holzfeuchtesensoren von  $\pm 0,015$  kg/kg sind die ermittelten, durchschnittlichen Differenzen als gering zu bewerten (auch an Balken 7 war es wegen der langen Simulationsdauer nicht möglich, 3D-Simulationen mit Luftdruckeinfluss durchzuführen).

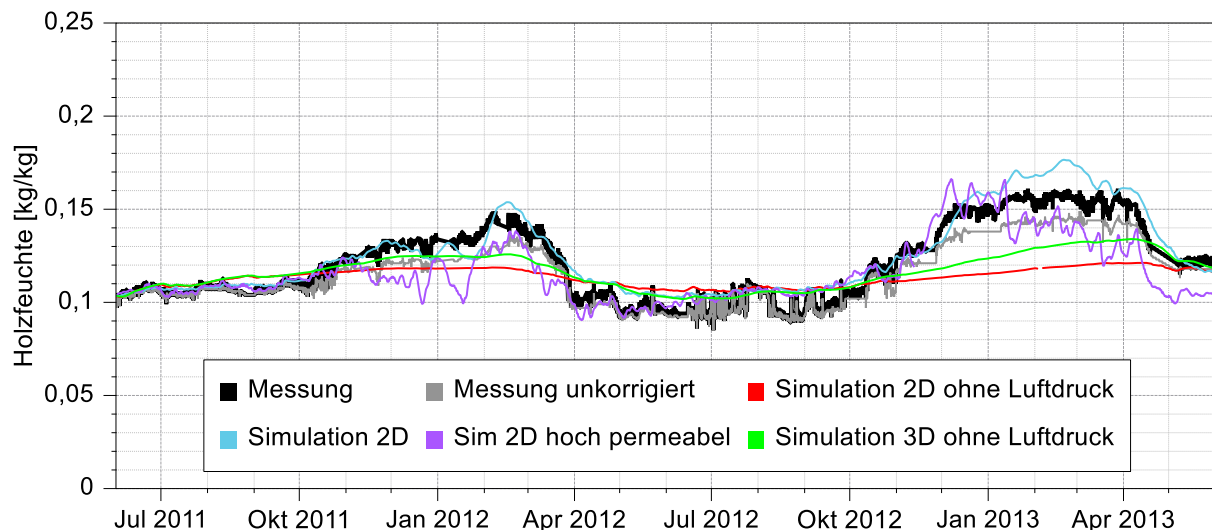


Bild 136 Gemessene, temperaturkorrigierte sowie berechnete Holzfeuchte in ca. 10 mm Entfernung vom Stirnholz in Balken 7 (Schilf)

In Liniendiagrammen lassen sich die eigentlichen Messwerte und Simulationsergebnisse neutral miteinander vergleichen. Dagegen können mit Hilfe von Zustandsfeldern Unterschiede und Vorgänge in der Gesamtkonstruktion besser vermittelt werden. Eindrücklich wird dies in den

Feldern der relativen Luftfeuchte. Beim Vergleich des linken mit dem mittleren Luftfeuchtefeld in Bild 137 wird unverkennbar klar, wie durch die Berücksichtigung der Luftströmung mehr Feuchte in die Konstruktion transportiert wird. Insbesondere der Balken im Auflager und der Bereich im Mauerwerk davor feuchten sichtbar auf.

Bei hoher Permeabilität (rechtes Feld in Bild 137) trocknet der Bereich entlang der durchlässigsten Stelle, der Luftschicht unterhalb des Balkens, offenbar sogar aus, da die anliegenden Schichten aufgewärmt werden. An der Balkenoberseite ist dieser Effekt wegen des höheren Luftwiderstandes der davorliegenden Schichten, der Bodenaufbau im Dachgeschoß und das Dämmsystem, weniger ausgeprägt und das Stirnholz bleibt ähnlich feucht. Die Bestandswand wird in den äußeren Schichten des gut durchlässigen Mauerwerks unverkennbar feuchter: Hier akkumuliert der mittransportierte Wasserdampf im kälteren, äußeren Bereich der Konstruktion. Im Gegensatz zu der mittleren Momentaufnahme in Bild 137 ist dieses Szenario allerdings wegen der hohen Luftdurchlässigkeit nicht realistisch. Diese Feuchteverteilung suggeriert eine Dynamik der ablaufenden Prozesse, die in Außenwänden bei üblichen Klimarandbedingungen übertrieben erscheint. Auf der anderen Seite ist diese Abbildung einer Visualisierung grundsätzlicher Vorgänge dienlich.

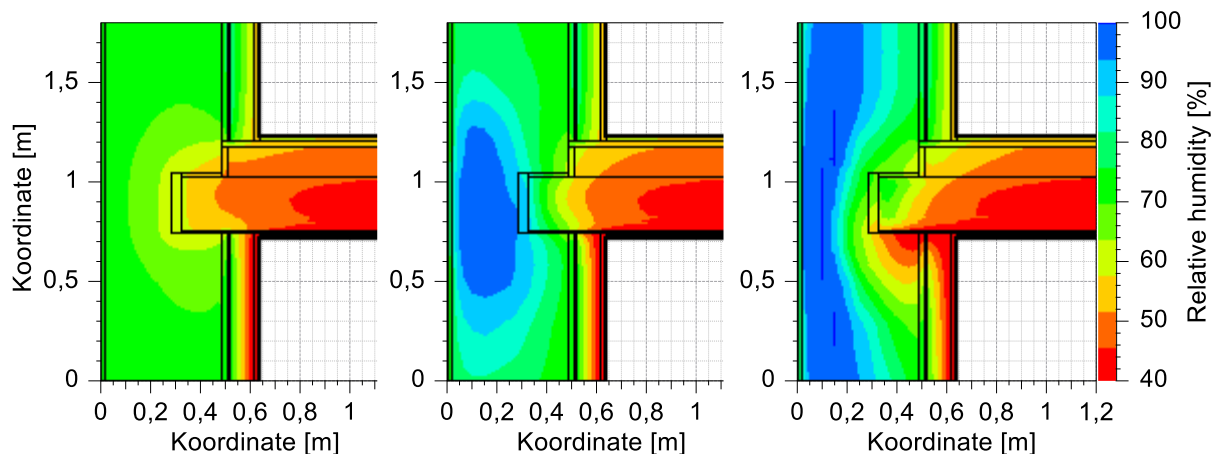


Bild 137 Felder der relativen Luftfeuchte am 19. Januar 2013 von Auflager 7: links die Basisvariante, in der Mitte mit Luftdruckunterschied, rechts mit sehr hoher Permeabilität der Materialien

Bei der Betrachtung der Temperaturfelder in Bild 138 ist der Unterschied zwischen der Basisvariante ohne und der Variante mit Luftströmung weniger augenscheinlich. Lediglich bei der sehr luftdurchlässigen Simulation im rechten Bild zeichnet sich der warm-feuchte Luftstrom ab, der vom unteren Raum her entlang der Luftschicht unter dem Balken die angrenzenden Schichten bis in den unteren Balkenauflegerbereich hin anwärmt. Sogar bis in den eindimensionalen äußeren Mauerwerksbereich der beiden Geschosse werden die Isothermen nach außen verschoben.

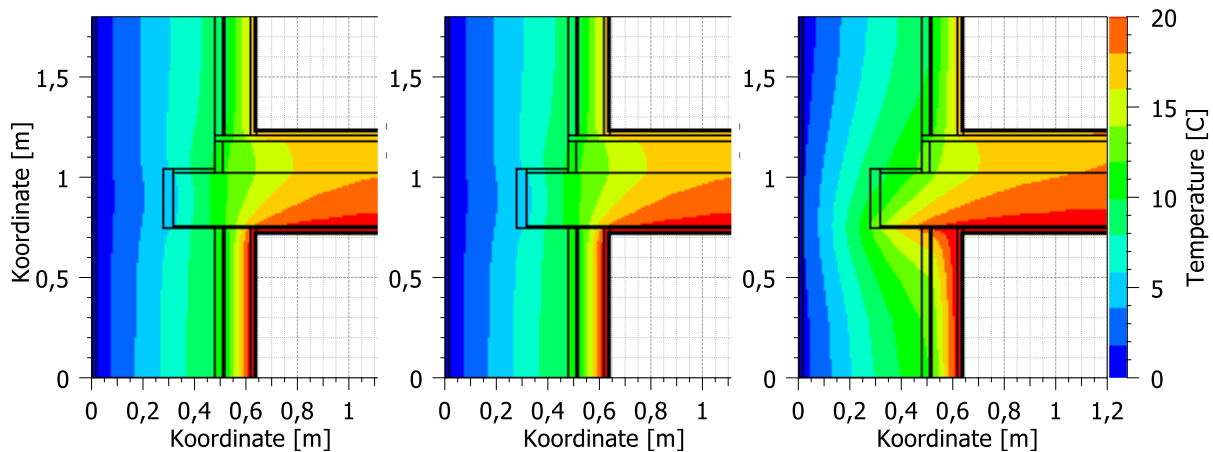


Bild 138 Temperaturfelder am 19. Januar 2013 von Auflager 7: links die Basisvariante, in der Mitte mit Luftdruckunterschied, rechts mit sehr hoher Permeabilität der Materialien

Die Berücksichtigung von Luftströmungen erscheint demzufolge bei Auflagern, die überhaupt nicht abgedichtet sind, als sinnvoll bzw. als notwendig. Dies bezieht sich ausdrücklich auch auf die Anordnung einer statisch unsinnigen Luftschicht unter dem Balken, die auf der anderen Seite in der Lage ist, die Umströmung des Balkens im Feldbereich grob wiederzugeben.

Die Berücksichtigung der Permeabilität hat allerdings auch Grenzen. Wird für die Materialien eine zu hohe Permeabilität gewählt, hier bspw. überwiegend  $K_G = 5 \cdot 10^{-5}$  s, mag die durchschnittliche Differenz an vielen Stellen nominell ähnlich gering sein, der Verlauf einzelner Zustandsgrößen wird jedoch sehr lebhaft und reagiert zu unmittelbar auf Änderungen des Raumluftzustands. Solche hoch permeablen Varianten erscheinen wegen der ohnehin sehr spekulativen Annahmen und der vorgefundenen Temperaturabweichungen deshalb als kaum geeignet.

Die Schaubilder der sehr luftdurchlässigen Simulationsvarianten weisen auf der anderen Seite darauf hin, dass die gezielte Befeuchtung oder Trocknung von Balkenauflagern - abhängig von Raumklima, Luftdruckunterschied und Permeabilität - möglich ist, entsprechende Strömungswege vorausgesetzt.

#### 6.7.4 Zusammenfassung der Vergleiche von Messdaten und Simulationsergebnissen

Die Gegenüberstellung der Messwerte mit den Simulationsergebnissen ergibt für die untersuchten Balkenauger insgesamt eine sehr gute Übereinstimmung. Dies trifft umso mehr zu in Anbetracht der Komplexität des geometrischen Details und ungünstiger Begleitumstände bezüglich nicht bekannter Eigenschaften oder Gegebenheiten, z. B. der Materialeigenschaften der Schüttung auf der Einschubdecke, des Holzterrazzos oder einer inhomogenen Materialschicht wie die nebeneinander verlegten Bretter aus Fichte mit ihren unvermeidlichen Fugen und Rissen.

Die durchschnittlichen Differenzen der Temperaturen, absoluten Luft- und der Holzfeuchte liegen meistens innerhalb der Messgenauigkeit oder im Fall der absoluten Feuchte im Balkenaufleger leicht darüber. Durch die Simulationen konnten die hygrothermischen Vorgänge in und um die Balkenaufleger genau nachvollzogen werden. Sehr hilfreich waren dabei die eindimensionalen Simulationen im Vorfeld, mit deren Hilfe einige Unwägbarkeiten hinsichtlich des Umgangs mit den Klimadaten und der Materialeigenschaften beseitigt oder zumindest gut eingegrenzt werden konnten.

Im Vergleich mit den 2D-Simulationen weisen die Ergebnisse der ungleich aufwändigeren und langwierigeren 3D-Simulationen geringere Abweichungen von den Messwerten auf. Einschränkung muss hinzugefügt werden, dass die Ergebnisse der 2D-Simulationen nur wenig schlechter sind, beziehungsweise sogar gleichwertig, was die Temperaturen betrifft. Im Gegensatz zum Urteil von *Morelli et al. (2010)* kann deshalb festgehalten werden, dass bei konstruktiv und klimatisch ähnlich gelagerten, rein thermischen Fragestellungen 2D-Simulationen von Balkenauflagern ausreichend sind. Die feuchtetechnischen Differenzen sind bei den 2D-Simulationen etwas größer. Bei einer zweijährigen Simulationszeit erscheint eine mittlere, um ca. 0,3 bis 0,5 g/m<sup>3</sup> größere Differenz wenig. Werden jedoch begrenztere Zeiträume ausgewertet, vor allem in der normalerweise kritischeren Kondensationsperiode, können die dann größeren Abweichungen zu Fehleinschätzungen führen.

Bei hygrischen Fragestellungen sind 2D-Simulationen zumindest für überschlägliche Berechnungen ausreichend, sofern entsprechende Simulationsparameter auf der sicheren Seite gewählt werden, z. B. ein etwas erhöhter innerer thermischer Übergangswiderstand oder eine höhere Raumlufftfeuchte. Derartige Sicherheiten sind auch deshalb zu empfehlen, da in der Büropraxis meistens größere Unsicherheiten vorliegen als in dem hier untersuchten Projekt. Ein weiterer, wichtiger Grund für die Anordnung größerer Sicherheiten ist, dass die Feuchteentwicklung im Balkenaufleger durch die Simulationen meistens (leicht) unterschätzt wurde. Die einzigen Ausnahmen bildeten die Simulationen des nicht abgedichteten Balkenauflegers, in denen ein Luftdruckunterschied mitberücksichtigt wurde, was zu einer Überschätzung der Feuchteentwicklung führte.

Aufgrund der unterschiedlich einwirkenden Klimaverhältnisse an Gebäudeecken wird davon ausgegangen, dass für Streichbalken 3D-Simulationen notwendig sind. Dies wird Teil weiterführender Untersuchungen sein.

Im Falle des gut luftdurchlässigen Auflagers von Balken 7 erwies es sich als notwendig, den Luftdruckunterschied mit anzuordnen, hier in Form eines vereinfachten Ansatzes aus *WTA MB 6-2*. Genauso stellte es sich als besser heraus, wenn für solche Auflager in 2D-Simulationen eine durchgehende Luftschicht *unter* dem Balken angeordnet wird, um den Luftbereich *zwischen* den Deckenbalken mit zu berücksichtigen.

Zur Luftdurchlässigkeit von Materialien oder Materialschichten liegen leider kaum Erfahrungen und Messwerte vor, was das Einschätzen der vorhandenen Luftdurchlässigkeit schwierig gestaltete. Die Erfahrungen zeigten, dass die Permeabilität nicht zu hoch gewählt werden sollte, da sonst die hygrothermischen Abläufe außergewöhnlich bzw. unglaublich lebhaft werden.

Ob 3D-Simulationen mit Luftdruckeinfluss noch akkuratere Ergebnisse erzielen als 2D-Simulationen mit Luftdruckeinfluss konnte leider nicht überprüft werden, da derartige 3D-Simulationen derzeit noch zu langwierig sind.

Es soll hier noch einmal betont werden, dass es einer gewissen Erfahrung bedarf, um die Situation am Balkenkopf realitätsnah zu modellieren, da Messwerte zur Verifizierung eigener Annahmen in der Regel kaum vorhanden sind. Umso wichtiger ist es dann andere, tatsächlich beobachtete Phänomene in einem Bestandsgebäude nachbilden zu können, z. B. durchschlagender Regen oder Schimmel in einer Gebäudeecke. Sollten andererseits solche Schäden nicht in der Realität vorgekommen sein, dürfen sie selbstverständlich auch nicht in der Simulation der Bestandssituation auftreten.

### 6.7.5 Einfluss der geographischen Ausrichtung

Das Kapitel 6.4 endete mit der Feststellung, dass die Testwand nur einer sehr geringen Schlagregenbelastung ausgesetzt war. Angesichts der guten Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation ist es deshalb naheliegend, für die geplante Sanierung des Gebäudes zu überprüfen, wie sich die Innendämmsysteme auf der nach Westnordwest ausgerichteten Wand verhalten würden. Hier war die Schlagregenbelastung während der Projektphase höher.

Stellvertretend soll das anhand des Wandaufbaus mit der Perlitedämmplatte in Feld 2 durchgeführt werden.

Trotz höherer eindringender Schlagregenmengen bleibt die Holzfeuchte praktisch unverändert, wie Bild 139 demonstriert. Erstaunlich ist, wie wenig die veränderte Ausrichtung bewirkt, schließlich addiert sich zu der höheren Schlagregenmenge auch ein geringeres Austrocknungspotential, da weniger direkte Sonneneinstrahlung auf die nach Westnordwest ausgerichtete Mauer auftrifft.

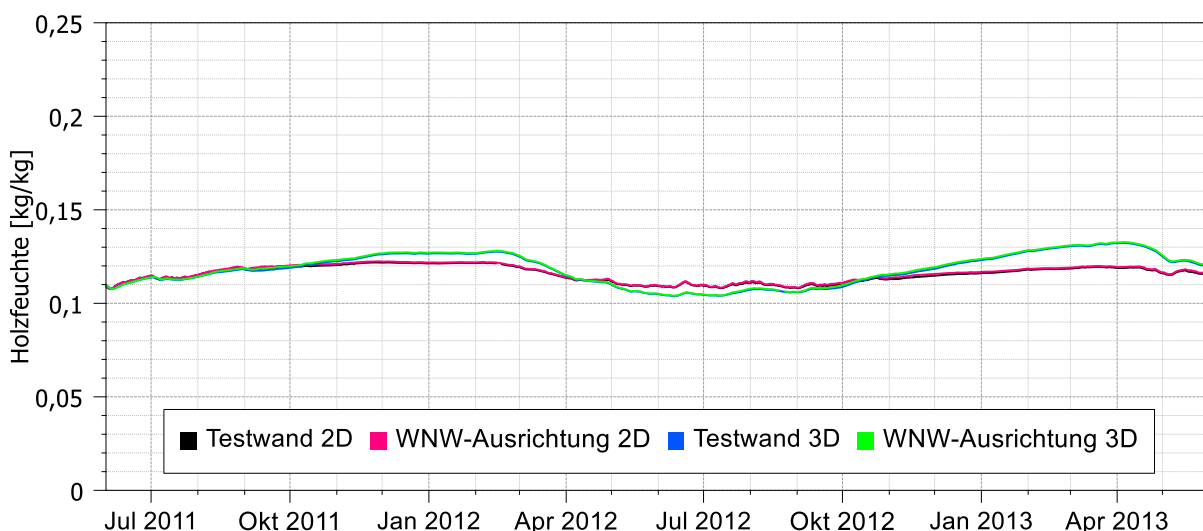


Bild 139 Massebezogene Holzfeuchte am Stirnholz bei originaler und nach Westnordwest ausgerichteter, identischer Wand

Sowohl für die zwei, wie auch die 3D-Simulationen ergeben sich praktisch keine Änderungen. Die Temperaturen verlaufen noch deckungsgleicher und werden deshalb nicht abgebildet.

### 6.7.6 Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit des Mauerwerks

Der im Testhaus vorhandene Ziegel weist eine Wärmeleitfähigkeit auf, die weit unter üblichen, historischen Vollziegeln liegt, die sich meistens zwischen 0,6 bis 0,8 W/(m·K) bewegen. Die hier getroffenen Aussagen zu den Vorgängen in Balkenauflagern lassen sich deshalb nicht ohne weiteres verallgemeinern. In einem nächsten Schritt wurde deshalb der Ziegel des Testhauses durch einen dichteren Ziegel (letztes Material in Tab. 9) mit einer höheren Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_{10,dry}$  von 0,75 statt 0,4 W/(m·K) ersetzt, um anschließend die 2D- und 3D-Berechnungsergebnisse zu vergleichen.

Mit der Änderung der Mauerwerkseigenschaften lagen keine Messwerte zum Vergleich mehr vor, die Übereinstimmung der 2- und 3D-Simulationen musste deshalb losgelöst davon betrachtet werden. Die Auswertung der Ergebnisse erfolgte unter der Prämisse, dass 3D-Simulationen genauere Ergebnisse ergeben und größere Differenzen ein Anzeichen für ungenaue 2D-Simulationen sind. Die folgende Tabelle führt deshalb die Abweichungen zwischen 2D- und 3D-Simulationen auf. Als Bewertungsmaßstab werden drei Ausgabegrößen herangezogen: die Temperatur und die absolute Luftfeuchte vor dem Stirnholz sowie die Holzfeuchte an der oberen, äußeren Balkenecke in ca. 10 mm Tiefe.

Tab. 29 Mittlere, absolute Differenz MD, Standardabweichung s und maximale Differenz  $\Delta_{max}$  zwischen 2D- und 3D-Berechnungsergebnissen mit gemessener und erhöhter Wärmeleitfähigkeit des Mauerwerks

	Temperatur Luft vor Stirnholz (in K)			Abs. Luftfeuchte Luft vor Stirnholz (in g/m <sup>3</sup> )			Holzfeuchte Stirnholz (in M%)		
	MD	s	$\Delta_{max}$	MD	s	$\Delta_{max}$	MD	s	$\Delta_{max}$
$\lambda_{10,dry}= 0,4 \text{ W/m}\cdot\text{K}$	0,28	0,34	0,79	0,47	0,55	1,33	0,37	0,48	1,14
$\lambda_{10,dry}= 0,75 \text{ W/m}\cdot\text{K}$	0,25	0,30	0,71	0,26	0,31	0,77	0,18	0,23	0,53

Der Tab. 29 zufolge lagen die 2D- und 3D-Ergebnisse mit einer höheren Mauerwerks-Wärmeleitfähigkeit näher beieinander als mit der gemessenen Wärmeleitfähigkeit, woraus generell festgestellt werden kann, dass ähnlich gelagerte, dynamische, hygrothermische zweidimensionale Simulationen von Balkenauflagern, mit nur kleinen Abstrichen hinsichtlich der Feuchte, als ausreichend angesehen werden dürfen und dreidimensionale Simulationen nicht zwingend notwendig sind.

### 6.7.7 Schimmelpilzwachstum im Bereich der Zwischendecke

*Saint Gobain (2012)* wies schon vergleichsweise früh darauf hin, dass nach Innendämmmaßnahmen, die nur auf den Raumbooberflächen durchgeführt wurden, Schimmelpilzwachstum im

Bereich zwischen den Deckenbalken möglich sei. In dem legitimen und naturgemäßen Ansinnen Dämmmaterial zu verkaufen, wird vorgeschlagen, in der Deckenebene auch, aber etwas zurückhaltender, d. h. mit einer geringeren Dicke als im Raum, zu dämmen. In dieser Arbeit konnte bereits gezeigt werden, dass der in *Saint Gobain (2012)* geäußerte Hauptgrund, dass der Balkenkopf nicht zu sehr abgekühlt werden dürfe, für die Testwand nicht haltbar ist und für alle anderen Aufgabenstellungen im Vorfeld durch Simulationen untersucht werden kann. In vielen Fällen wird es deshalb unproblematisch sein, die Deckenebene unverändert durchzudämmen. Allerdings dürfen oder wollen viele Bauträger die Deckenebene gar nicht öffnen. Für diese ist die Fragestellung virulenter, wie dick in den Räumen gedämmt werden darf, ohne Schimmelpilzwachstum (oder Holzerstörung in Dielen- und Schalungsbrettern) im Deckenbereich hervorzurufen.

Für die Messstellen im Balkenaufleger war schon in Kapitel 5.11 überprüft worden, ob Schimmelpilzwachstum möglich ist. Naheliegender und für das Raumklima etwas gefährlicher sind allerdings andere Bereiche. Die Innendämmung im Dachgeschoß beginnt auf den Fußbodendielen. Unter den Dielen befindet sich vor dem kleinen, ungedämmten Wandbereich zwischen Dielen und oberer Abschluss der Balkentasche bzw. am Beginn der Schüttung Luft, die viel näher am Raumklima ist als der Balkenkopfbereich im Auflager. Schimmelsporen hätten von dort einen kürzeren Weg bis zum Innenraum (Bild 140). Gleiches würde auch für die Bestandswandoberfläche zwischen den Deckenbalken zutreffen, wenn man, rein spekulativ, für das Testhaus annimmt, dieser Bereich im Deckenaufbau sei nicht gedämmt worden, wie in Bild 140 dargestellt. Diese konstruktive Variante wurde für das Feld 2 per Simulation überprüft mit ansonsten gleichbleibenden Randbedingungen und Materialfunktionen, sowie auch für das ungedämmte Feld 5. Für keine dieser in Bild 140 eingekreisten Oberflächen wurde Schimmelpilzwachstum prognostiziert, trotz der zum Teil hohen Innenraumluftfeuchte. Die Schimmelpilzfreiheit konnte für das Testhaus im Zuge der Abrissarbeiten für den oberen kritischen Bereich in Feld 2 und für das Feld 5 zweifelsfrei verifiziert werden.

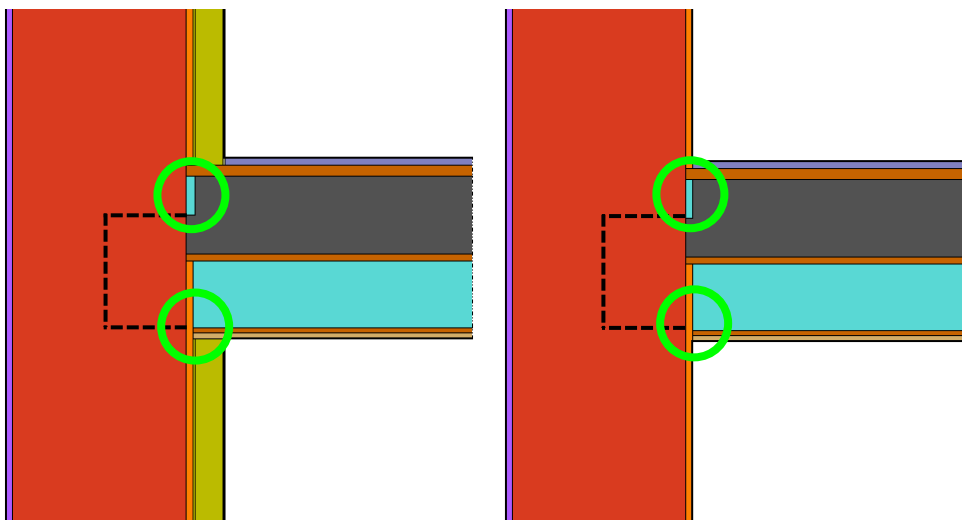


Bild 140 Links Schnitt durch den Feldbereich von Feld 2 *ohne* Dämmung zwischen den Deckenbalken, rechts das (ungedämmte) Feld 5; auf Schimmelpilzwachstum untersuchte Bereiche sind grün umkreist (Screenshot *DELPHIN*)

Dieses Ergebnis für die vergleichsweise unkritische Konstruktion (niedrige Wärmeleitfähigkeit der Ziegel, dickes Mauerwerk) soll für eine vergleichbare, aber häufiger vorkommende Konstruktion durch Simulationen überprüft werden.

Die meisten Bestandsgebäude dürften erfahrungsgemäß mit Ziegeln gebaut worden sein, die (viel) wärmeleitfähiger sind. Dies bestätigt ein Abgleich mit der *DELPHIN*- oder *MASEA*-Datenbank (*MASEA (2019)*). Ebenso kommen dünnere Mauerwerkswände als im vorliegenden Fall sehr häufig vor. Um einen solchen Anwendungsfall zu überprüfen, wurden der Decken- und Außenwandaufbau des Feldes 2 mit 80 mm Perlitedämmplatte aus dem Testhaus sowie die Materialdaten, mit Ausnahme des Mauerwerks, übernommen. Die Dicke des Ziegelmauerwerks maß in diesen Simulationen nur 365 mm und bestand aus einem anderen Altbauziegel aus der *DELPHIN*-Materialdatenbank (ID 538), der schon im vorangegangenen Abschnitt verwendet wurde (letztes Material in Tab. 9). Dieser Ziegel besitzt ungünstigere Eigenschaften. Konkret eine um 70 % höhere Wärmeleitfähigkeit (0,682 statt 0,4 W/(m·K)), einen mehr als doppelt so hohen  $\mu$ -Wert (27,1 statt 12,7) und einen um den Faktor 10 verringerten Wasseraufnahmekoeffizienten.

Es wurde ferner angenommen, dass es bei der Sanierung nicht möglich oder aus Kostengründen nicht gewollt ist, die Decke zu öffnen und unterseitig bis zur Schüttung oder durchgängig zu dämmen (Bild 140 links). In der Literatur wird vor einer solchen, unvollständig gedämmten Ausführung in *Saint Gobain (2012)* (s. Kapitel 2.9) oder, mit ähnlicher Argumentation, in *Munch-Andersen (2008)* gewarnt.

Als Standort wurde die deutsche Testreferenzregion 4 mit dem Referenzstandort Potsdam ausgewählt, für den detaillierte Klimadaten in *DWD (2011)* vorliegen. Die Regendaten, die in der ursprünglichen Veröffentlichung generell fehlen, ließen sich für die entsprechenden Zeiträume und diesen Standort aus dem Datenpool des Deutschen Wetterdienstes (DWD) bereitstellen.

Zusammen mit der gedämmten Konstruktion (Bild 140 links) wurde zu Vergleichszwecken auch die ungedämmte Bestandsituation (Bild 140 rechts) simuliert, was für eine seriöse Abschätzung im Sinne der Plausibilität der Ergebnisse essentiell ist.

Während der Auswertung wurde deutlich, dass in diesem Fall für das prognostizierte Schimmelpilzwachstum weniger die Dämmstoffdicke, sondern vielmehr die Menge des eindringenden Schlagregens entscheidend ist, welche sich durch die Eigenschaften der Außenoberfläche regulieren lässt.

In Bild 141 ist die Entwicklung des Schimmelpilzwachstums anhand des VTT-Schimmelpilzindex während einer Simulationsdauer von vier Jahren abgebildet. Die Sensorposition befindet sich auf der Oberfläche der Bestandswand direkt über dem Anschluss der Unterdecke (je unterer grüner Kreis in Bild 140). Für das VTT-Berechnungsmodell müssen Einstellungen gewählt werden, wie empfänglich eine Oberfläche und die ersten Millimeter des Materials für Schimmelpilze sind. Hier wurde jeweils die höchste der vier Stufen ‚very sensitive‘ festgelegt,



was bedeutet, dass Oberfläche und Material sehr empfänglich sind, z. B. weil die Schimmelpilzsporen von nahrhaftem Staub profitieren.

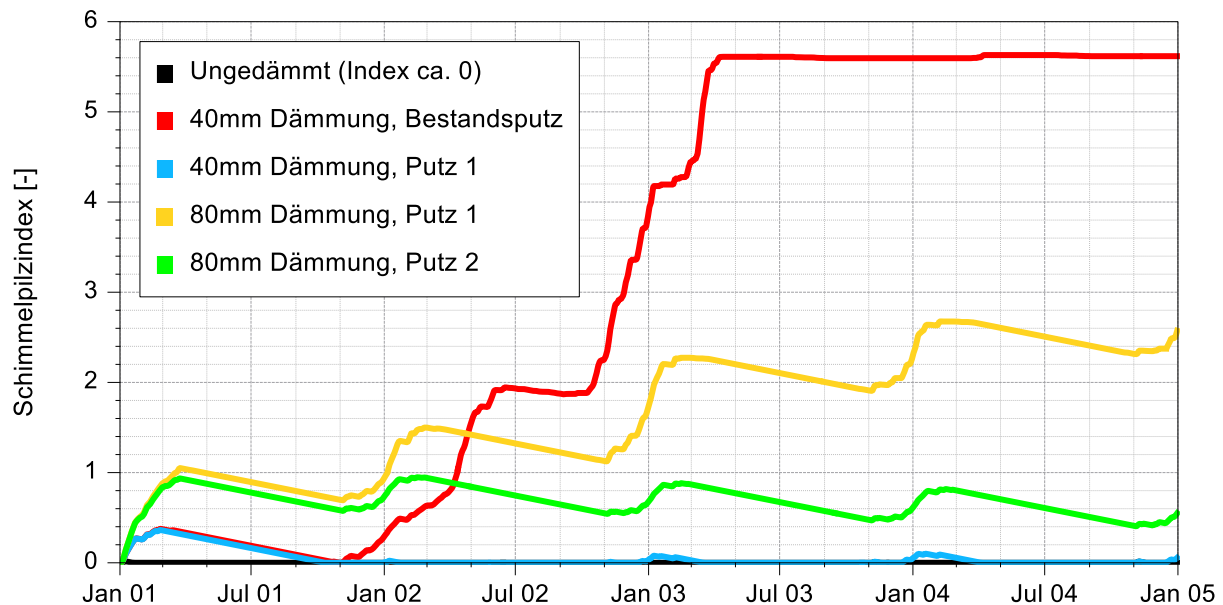


Bild 141 Verlauf des VTT-Schimmelpilzindex auf der Wandoberfläche am Anschluss der Deckenbekleidung in Abhängigkeit von der Dämmdicke und dem Außenputz

Nicht zu sehen ist der Schimmelpilzindex der ungedämmten Bestandskonstruktion, da er bei null verläuft (schwarze Linie in Bild 141). Überraschenderweise war mit nur 40 mm Dämmung bereits nach drei Jahren der maximal mögliche Index von ,6' fast erreicht (rote Linie).

Ursächlich für ein derart kritisches Ergebnis erwies sich die mit  $97,6 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$  weitaus höhere Schlagregenmenge, die in Potsdam jährlich auf die nach Westen ausgerichtete Wand trifft. Das ist ein Vielfaches der Schlagregenmenge der Testwand, welche zwischen 1.6.2011 und 31.05.2013 nur  $8,4 \text{ kg}/\text{m}^2$  betrug. Deshalb wurde der Wasseraufnahmekoeffizient des Bestandsaußenputzes von  $3,9 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  auf  $0,5 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  reduziert („Putz 1“, blaue Linie). Eine solche Verbesserung der Oberflächeneigenschaften ließe sich durch verschiedene Maßnahmen erreichen:

- durch den Ersatz des Außenputzes,
- durch eine neu aufgebrachte Putzschicht oder
- einen hydrophob eingestellten, aber diffusionsoffenen Anstrich.

Allein durch die geringere Menge eindringenden Schlagregens verläuft der Schimmelpilzindex nahe null, wenngleich der Graph nach vier Jahren Simulationsdauer noch eine sehr leicht ansteigende Tendenz aufweist.

Offensichtlich wird dieser Unterschied durch einen Vergleich der Verteilung der relativen Luftfeuchte Anfang März (Bild 142). Während im linken Feld mit dem Bestandsputz die Farbverteilung der Legende nicht mehr geeignet ist, Unterschiede in der Feuchteverteilung der durchfeuchteten Außenwand wiederzugeben, sorgt der neue Putz in der rechten Abbildung zum gleichen Zeitpunkt für weitaus trockenere Verhältnisse.

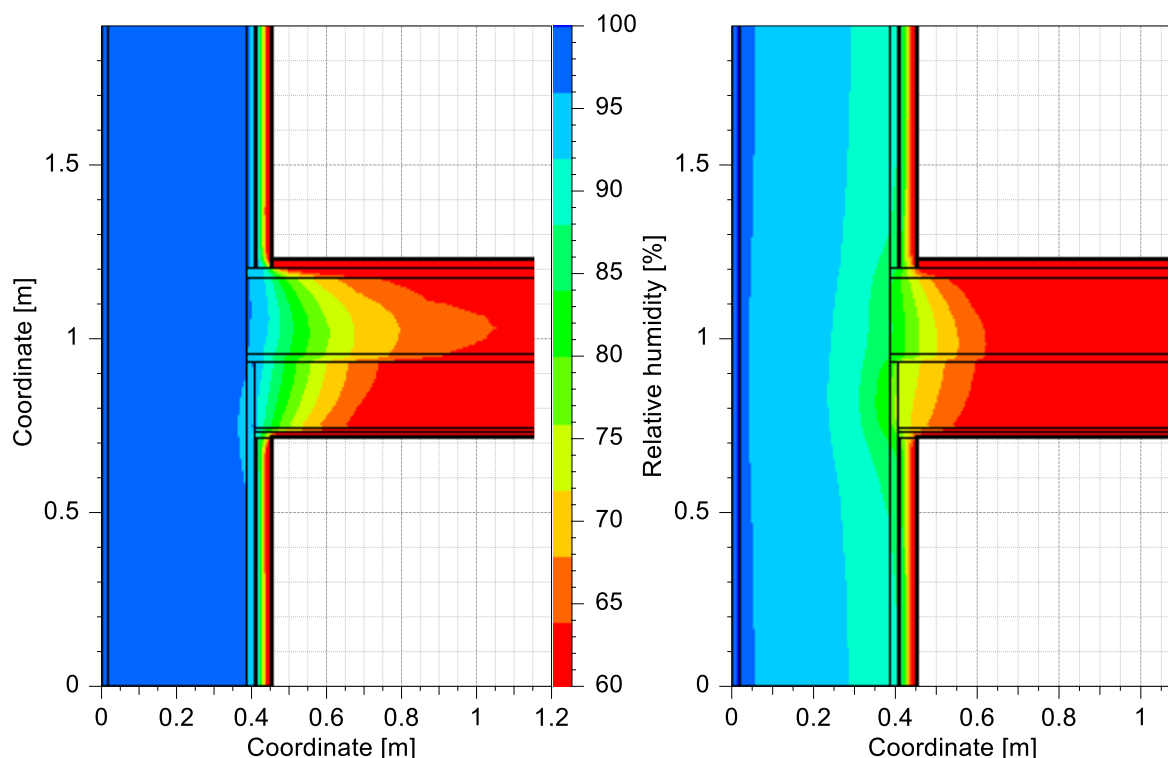


Bild 142 Felder der relativen Luftfeuchte am 6. März des dritten Jahres: links mit Bestandsputz ( $A_w$ -Wert:  $3,9 \text{ kg/m}^2\text{h}^{0,5}$ ), rechts mit neuem Putz ( $A_w$ -Wert:  $0,5 \text{ kg/m}^2\text{h}^{0,5}$ )

Daraufhin wurde die Dämmschichtdicke auf 80 mm Dämmung erhöht (gelbe Linie in Bild 141). Die kühlere Bestandskonstruktion und die verminderte Trocknungsfähigkeit zum Innenraum führen offensichtlich zu einem kontinuierlich ansteigenden Schimmelpilzindex. Nach vier Jahren erreicht er einen Wert von knapp ,3', mithin einen kritischen Wert, mit der erkennbaren Tendenz, weiter anzusteigen.

Wiederum wurde der Wasseraufnahmekoeffizient des Außenputzes reduziert, diesmal in Form von „Putz 2“ (grüne Linie in Bild 141), mit einem  $w$ -Wert von  $0,05 \text{ kg/(m}^2\cdot\text{h)}$ . Damit wird abermals die eindringende Schlagregenmenge abgesenkt und in der Folge bleibt die hellgrüne Linie unter dem Wert ,1'. Zwar steigt diese Variante im ersten Jahr durch die anfänglichen Einschwingvorgänge auf knapp ,1', anschließend aber von Jahr zu Jahr mit sinkender Tendenz, weshalb sich diese Variante als unproblematisch bezeichnen lässt. Mit sehr wasserabweisender Außenoberfläche ist in diesem Fall bei einer Dämmschichtdicke von 80 mm offenbar das Maximum erreicht, welches ohne Dämmung in der Ebene der Zwischendecke angebracht werden darf.

Die Simulationen haben einen sehr großen Einfluss von eindringendem Schlagregen in Verbindung mit Innendämmung auf die Entwicklung von Schimmelpilzen aufgezeigt. Die hohe Sensibilität hinsichtlich eindringenden Schlagregens bestätigt die Einschätzungen anderer Autoren, dass dem Schlagregenschutz bzw. dessen Wiederherstellung eine hohe Priorität eingeräumt werden muss (s. Kapitel 2.4). Des Weiteren sind die Simulationsergebnisse ein eindeutiger Hinweis darauf, dass bei nicht durchgängig gedämmter Innendämmung die

Anschlussbereiche in der Deckenebene zu untersuchen sind und gegebenenfalls die Dicke der Innendämmung begrenzt werden muss.

Einschränkend sei darauf hingewiesen, dass in *Hansen et al. (2019)* und weiteren, darin zitierten Untersuchungen der Einfluss von Schlagregen in Simulationen als zu groß beschrieben wird. *Hansen et al. (2019)* legen die Ergebnisse ihrer Studie dar, in der Schlagregenmengen an Testgebäuden mit berechneten Schlagregenmengen verglichen wurden. Demzufolge würden sowohl semi-empirische Modelle als auch numerische Simulationen die Schlagregenmengen beträchtlich überschätzen.

In *Morelli et Svendsen (2012)* führten die Ergebnisse von Simulationen mit Schlagregen zu der weitreichenden, konstruktiven Empfehlung, einen ungedämmter Bereich von ungefähr 20 cm Breite um den Balken zu belassen. Diese Konstruktionsempfehlungen sind nicht nur wegen den Hinweisen aus *Hansen et al. (2018)* und *Hansen et al. (2019)* zu überdenken, ebenso die in diesem Kapitel dargelegten Ergebnisse lassen solche Detaillösungen fragwürdig erscheinen.



## 7 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

### 7.1 Technologische und ökologische Bewertung der Dämmsysteme

In einem Grazer Testhaus konnten fünf unterschiedliche Dämmsysteme durch den Einbau in einer Außenwand unter identischen Randbedingungen verglichen werden. Die Dokumentation der baupraktischen Erfahrungen beim Einbau und Abriss sowie die Entnahme von Probekörpern vor Ort ermöglichten ein erweitertes Spektrum bei der vergleichenden Bewertung. Die Räumlichkeiten und vorgefundenen Konstruktionen erwiesen sich dabei der Aufgabenstellung entsprechend repräsentativ.

Die Installation und Auswahl der Messtechnik baute auf den bereits vorab erlangten Erkenntnissen des Forschungsprojektes „Zellulose-Innendämmung ohne Dampfsperre“ (*Kautsch et al. (2006)*) auf und erwies sich bis auf geringe Ausfälle als ein stabiles Instrumentarium.

Mit der technisch gewählten Ausführung konnten die vorab geplanten Eigenschaften hinsichtlich Wärmedämmung und Feuchteverhalten generiert werden. Die ausgewählten Dämmsysteme wurden auch entsprechend festgelegter Beurteilungskriterien wie Verarbeitung, Gesundheitsaspekte und ökologischer Kriterien etc. verglichen. In technologischer Hinsicht erwiesen sich zwei Dämmsysteme aus unterschiedlichen Gründen als weniger empfehlenswert. Der Wärmedämmputz konnte vor allem wegen Problemen bei der Einbringung die vom Hersteller angegebene Wärmeleitfähigkeit nicht erreichen. Die Abweichung in der Wärmeleitfähigkeit legt die Vermutung nahe, dass die zugesicherten Materialeigenschaften von Putzen mit den vorliegenden, dämmenden Zuschlagstoffen in Abhängigkeit von der Förderhöhe nicht garantiert werden können. Außerdem dauerte die Austrocknung sehr lange und der Raumverlust war durch die größere Dämmstärke am größten. Das plastische Aufbringen auf unebenen Oberflächen und die maschinelle Verarbeitung birgt jedoch Potential für die Zukunft. Bei der aufgespritzten Zellulose sind die Art der Einbringung und die Schwierigkeiten in Details, wie Fensterleibungen, zu bemängeln und sie erscheint für bewohnte Objekte wegen der Staubentwicklung derzeit als wenig praktikabel. Die Unabhängigkeit von unebenen Oberflächen und die schnelle Verarbeitung großer Flächen können wiederum als positiv vermerkt werden. Für schwierige Details wie die Fensterleibungen wurde die Kombination mit anderen Dämmmaterialien, z. B. Holzweichfaserplatten, angeregt. Die Verarbeitung der anderen Dämmsysteme Schilf, Perliteplatte und Holzweichfaserplatte war unproblematisch.

Hinsichtlich der ökologischen Bewertung schnitt die Schilfdämmung ausgezeichnet ab, hier wurde sogar ein negativer OI3-Index festgestellt. Der OI3-Index der Zellulosedämmung und der Holzweichfaserplatten war ebenfalls günstig. Besonders wegen des höheren Einsatzes an Primärenergie bei der Herstellung schlossen der Wärmedämmputz und die Perliteplatten mit dem höchsten OI3-Index ab.

Nach Ende des ursprünglichen Forschungsprojektes erfolgten die Dokumentation des Rückbaus und die sortenreine Entsorgung der eingesetzten Bausysteme, wobei die im Projekt anfallenden, sehr geringen Massen einer wirtschaftlichen, sortenreinen Trennung entgegenstanden. Die Schilfplatten und der Wärmedämmputz ließen sich besonders einfach zurückbauen. Die Zellulosedämmung, Perlite- und Holzweichfaserplatten hafteten sehr stark an den Bestandsoberflächen, zum Teil ließen sich die Systemkomponenten nicht untereinander trennen, d. h. Deckputze von der Dämmung.

Die Analyse des Bestandes und der verwendeten Materialien ist individuell für jedes Bauwerk systematisch zu erstellen und die zur Verfügung stehenden Methoden auf die vorgefundene Situation anzupassen. Die grundlegenden Voraussetzungen für eine dauerhafte Sanierung sind die Begutachtung des Zustandes der Holzbalkenköpfe, gegebenenfalls die Herstellung einer diffusionsoffenen Innenoberfläche der Bestandsoberfläche durch Abscheren diffusionsdichter Schichten, der konvektionshemmende Verschluss der Balkenauflageröffnungen und eine ausreichend schlagregengeschützte und gleichzeitig möglichst diffusionsoffene Außenwandoberfläche.

## 7.2 Bestimmung der Materialeigenschaften

Alle Materialien der Dämmsysteme und die maßgeblichen Bestandsmaterialien wurden am Bauphysikalischen Forschungs- und Entwicklungslabor des Instituts für Bauklimatik (TU Dresden) eingehend untersucht und anschließend innerhalb des Projekts charakterisiert. Die zur Verfügung gestellten Daten beschreiben die hygrothermischen Eigenschaften der Materialien und sind geeignet für Simulationen mit der Software *DELPHIN* auf wissenschaftlichem Niveau. Dabei wurden Abweichungen zu den Angaben der Materialhersteller festgestellt. Nicht untersucht wurden von den Dämmsystemen die dünne Putzschicht des Wärmedämmputzes und der Lehmkleber bzw. Lehm-Oberputz der Holzweichfaserplatten. In den Simulationen wurden stattdessen die Daten des Klebers der Schilfdämmplatten verwendet bzw. ein vorhandenes Material aus der *DELPHIN*-Datenbank. Für bestimmte Bestandsmaterialien aus dem Deckenaufbau, wie der Schüttung, lagen keine Messungen vor, weswegen deren Eigenschaften angenommen werden mussten.

Durch die Messung der Bestandsmaterialien konnte aufgezeigt werden, dass die Verwendung von Materialkennwerten aus Software oder Richtlinien, hier von Werten aus dem *Baubook (2019)*, zu einer deutlichen Überbewertung des möglichen Einsparpotentials führen kann. Wegen der niedrigen Wärmeleitfähigkeit der Ziegel vor Ort wurde mit den *Baubook (2019)*-Werten das Heizenergie-Einsparpotential um mehr als 10 % überschätzt. Dies kann bei engen vertraglichen Bedingungen und Forderungen zu rechtlichen Auseinandersetzungen führen, weshalb genauere Materialuntersuchungen, zumindest hinsichtlich der Wärmeleitfähigkeit des Bestandsmauerwerks, anzustreben sind.

### 7.3 Hygrothermische Vorortmessungen

In den beiden Testräumen ermittelten ungefähr hundert Sensoren Temperatur, Luftfeuchte und Holzfeuchte an vielen Stellen der Wand- und Deckenkonstruktion sowie von allen angrenzenden Klimabereichen von Oktober 2010 bis Mai 2013. Die aus der Nutzung bedingte Luftfeuchtebelastung war im ersten Winter 2010/11 sehr niedrig. Durch Befeuchter, verschiedene Abdichtungsmaßnahmen der inneren und äußeren Raumhüllen und durch die angenehme Zusammenarbeit mit den Kinderbetreuerinnen konnte die Raumfeuchtebelastung im zweiten Winter auf ein „übliches“ Niveau erhöht werden. Im letzten Winter 2012/13 ließ sich sogar eine sehr hohe Raumfeuchtebelastung erzielen.

Aufgrund hoher Einbaufeuchte und wegen des zeitlich unterschiedlichen Auftrags einzelner Oberputzschichten benötigten die Zellulosedämmung und besonders der Wärmedämmputz eine sehr lange Zeit zum Austrocknen. Im Fall des Wärmedämmputzes zog sich dies bis in den zweiten Winter hin. Die Dämmsysteme mit Schilf, Holzweichfaser- und Perliteplatten zeigten von Beginn an ein konstant unproblematisches Verhalten. Nach dem Austrocknen der Einbaufeuchte erwies sich der Wärmedämmputz jedoch als sehr günstig, was die sehr niedrige Feuchtebelastung in der Dämmung und im Deckenbalken belegte. Ein ungünstiger Zeitpunkt für den Einbau im Spätherbst und Winter ist demzufolge bei Systemen mit hoher Einbaufeuchte zu vermeiden. Ferner sollte für eine ausreichende Trocknung bei solchen Systemen gesorgt werden. In der Zellulosedämmung entstand auch nach der Austrocknungsphase bei sehr hoher Raumfeuchtebelastung immer wieder kurzzeitig Kondensat bzw. 100 % Luftfeuchte, was allerdings wieder austrocknete und auch die Deckenbalken nicht in Mitleidenschaft zog.

Die konvektionshemmende Abdichtung der Auflagertaschen bewirkte eine niedrigere Feuchtebelastung in den Balkenauflagern. Allerdings wich die Feuchtebelastung der abgedichteten und nicht abgedichteten Auflager nur an der Außenfläche der Auflager bzw. in der Nähe des Stirnholzes signifikant voneinander ab, an der Balkenwange in der Mitte der Auflager dagegen kaum. Obwohl am Ende der Auflagertaschen, also in nur wenigen Zentimeter Entfernung vom Stirnholz teilweise über einen längeren Zeitraum hinweg 100 % relative Luftfeuchte gemessen wurden, war die gemessene Holzfeuchte nach dem Abtrocknen der Einbaufeuchte mit maximal 16 M% Holzfeuchte in einem völlig unproblematischen Bereich, mit Ausnahme des Balkens im Feld mit Wärmedämmputz. Dort wurden durch den Einfluss der Einbaufeuchte bis zu 19 M% gemessen. Die hohe Konzentration der Luftfeuchte am Mauerwerk bestätigt, wie wichtig ein Luftspalt vor bzw. um den Balkenkopf ist. Alle Holzbalken reagierten sehr träge auf klimatische Einwirkungen. Dass sich die Holzfeuchte am Stirnholz der einzelnen Balken, den ungedämmten Referenzbalken eingeschlossen, kaum voneinander unterschied, lässt den Schluss zu, dass die Innendämmsysteme in der vorliegenden Einbausituation nur wenig Einfluss auf die Holzfeuchte am Stirnholz ausübten.

Weiterhin wurde festgestellt, dass es am Stirnholz des ungedämmten Referenzbalkens, auch bei Berücksichtigung der Sensorposition, nicht signifikant wärmer war als an den benachbarten, gedämmten Balkenköpfen.

Wenn eine ausreichende Schlagregendichtheit gewährleistet ist, ist der Einbau der Innendämmsysteme demnach als unkritisch anzusehen. Eine Gefährdung von Deckenbalken durch Innendämmung konnte anhand der Messungen in der Schönbrunnstraße 30 ausgeschlossen werden.

Wegen der besonders niedrigen Feuchtwerte und wegen des höheren Wärmeenergieeinsparpotentials empfahl sich in diesem Messprojekt besonders die Perliteplatte und, mit Abstrichen, die Holzweichfaserplatte. Die konvektionshemmende Abdichtung der Auflagertaschen wird empfohlen, wenngleich weniger aufwändige Maßnahmen als die in dem Projekt realisierten notwendig sind. Weiterhin lässt sich aus den Messungen ableiten, dass das Klima im unteren Geschoß einen höheren Einfluss auf das hygrothermische Verhalten im Balkenaufleger ausübt als das des oberen Geschoßes.

Obwohl die sehr hohen Raumluftheuchten im letzten Winter einen gewissen Sicherheitsfaktor bedeuten, dürfen die insgesamt bedenkenlosen Messergebnisse zum derzeitigen Zeitpunkt nicht verallgemeinert werden. Bei der Übertragung auf andere Projekte sind projektspezifische Besonderheiten zu berücksichtigen, die das sehr positive Gesamtergebnis zum Thema Holzbalkendecken und Innendämmung begünstigten. Das sind beispielsweise der diffusionsoffene Ziegel, die relativ dicke Außenwand und der im Prinzip nicht vorhandene Einfluss von Schlagregen.

## 7.4 Hygrothermische Simulationen

Ein wichtiger Teil der Aufgabenstellung bestand darin zu prüfen, ob Messungen in dem vergleichsweise komplexen Detail des Balkenauflegers in innen gedämmten Bestandsgebäuden durch eine Software nachvollzogen werden können. Dies gelang mit der hygrothermische Simulationssoftware *DELPHIN* sehr gut, besonders bezüglich der Temperaturen.

Als sehr hilfreich erwiesen sich dabei vorbereitende eindimensionale Simulationen, in denen Klimarandbedingungen identifiziert und Materialeigenschaften präzisiert werden konnten. In der alltäglichen Büropraxis ist das aufgrund des Fehlens ähnlich detaillierter Informationen nicht möglich. Umso wichtiger ist es, die vorhandenen Verhältnisse korrekt abbilden zu können, z. B. das Vorkommen oder Nichtvorkommen von Schimmel oder holzschädigenden Pilzen an bestimmten Stellen.

Bei nicht konvektionshemmend abgedichteten Balkenauflagern, und mutmaßlich auch ähnlich luftdurchlässigen Konstruktionen, ist es zielführend, Luftströmungen in Form von Differenzdrücken anzusetzen. Gelegentlich lassen sich bei solchen Problemstellungen in einer 2D-Simulation wichtige, real vorhandene Luftströmungswege nicht abbilden, wie hier die Luftschicht zwischen den Deckenbalken. Solche Gegebenheiten sollten dann durch scheinbar „unsinnige“ Lösungen wie eine durchgehende Luftschicht unter einem Balken berücksichtigt werden.

In den in dieser Arbeit untersuchten Fällen führte das Anordnen von Luftdruckunterschieden gemäß *WTA-MB 6-2* meistens zu einer Überschätzung des Feuchteintrags. Die Einschätzung der Luftdurchlässigkeit von Materialien und Materialschichten vor Ort ist dabei sehr



schwierig, da nur vereinzelte Messungen in wenigen wissenschaftlichen Artikeln vorliegen. Eine sehr hohe Permeabilität sollte jedoch nur gewählt werden, wenn es sich tatsächlich um eine sehr luftdurchlässige Konstruktion handelt. In dieser Untersuchung führte eine sehr hohe Permeabilität zu einem außergewöhnlich bewegten, aber unglaubwürdigen Verhalten.

In der Planungspraxis ist es wichtig, mögliche Fehlerquellen zu identifizieren und Schäden vorzusehen, weswegen sich die Simulationsergebnisse auf der sicheren Seite befinden sollten. Hier konnte festgestellt werden, dass die Übereinstimmung überwiegend sehr gut ist, die Ergebnisse allerdings zum Teil leicht auf der unsicheren Seite liegen. Insofern sollten entsprechende Simulationseinstellungen so gewählt werden, dass dies nicht der Fall ist. Dafür bieten sich z. B. eine erhöhte Raumlufffeuchte, ein höherer innerer Wärmeübergangswiderstand oder eine leicht abgesenkte Außentemperatur an.

Aus den vorliegenden Ergebnissen kann geschlossen werden, dass es bei vergleichbaren Aufgabestellungen nicht notwendig ist, 3D-Simulationen durchzuführen, insbesondere bei rein thermischen Simulationen. Die durch 3D-Simulationen erzielten Ergebnisse waren nur wenig genauer als die 2D-Simulationsergebnisse. Jedoch sollten dann bei hygrothermischen Simulationen nicht abgedichteter Auflager die bereits formulierten Empfehlungen eingehalten werden.

Werden die Simulationseinstellungen verantwortungsvoll gewählt, sind hygrothermische Simulationen sehr gut in der Lage, Innendämmmaßnahmen bei Holzbalkendecken zu projektieren und schadenfrei zu halten. Auf diese Weise wird es möglich sein, in vielen Fällen auf chemischen Holzschutz oder anderweitige, aufwändige Maßnahmen, wie die Beheizung von Balkenköpfen, zu verzichten.

Nicht zuletzt kann durch die Demonstration der Eignung der Software eine größere Sicherheit bei der Planung vermittelt werden für die Fälle, in denen z. B. durch Schlagregen eine Schädigung zu befürchten ist. Mit Hilfe hygrothermischer Software kann geklärt werden, ob eine bestimmte Nutzung möglich ist, wie hoch der Wärmewiderstand eines Dämmsystems sein darf oder ob in besonderen Fällen sogar Maßnahmen zur aktiven oder passiven Erwärmung der Balkenaullager angeraten werden müssten. In dieser Arbeit wurde dies am Beispiel von nicht vorhandener Dämmung im Zwischendeckenbereich demonstriert. Es konnte gezeigt werden, dass vor allem die eindringende Schlagregenmenge ausschlaggebend ist für die Dimensionierung der Dämmung in den anliegenden Räumen und dass ein bewusster Verzicht auf eine Dämmung um das Balkenaullager bedenklich ist.



## 8 Summary and Conclusions

### 8.1 Technological and ecological evaluation of insulation systems

In a test house in Graz, five different insulation systems could be compared under identical boundary conditions by installation in an outer wall. The documentation of the practical construction experiences during installation and demolition as well as the sampling on site enabled and extended the spectrum in the comparative evaluation. The rooms and existing constructions proved to be representative in accordance with the task at hand.

The installation and selection of the measuring technology was based on the findings of the research project "Zellulose-Innendämmung ohne Dampfsperre" (*Kautsch et al. (2006)*) and proved to be a stable instrumentarium apart from minor failures.

With the technically chosen design, the previously planned properties with regard to thermal insulation and moisture behaviour could be generated. The selected insulation systems were also compared according to defined criteria such as processing, health aspects and ecological criteria. From a technological point of view, two insulation systems proved to be less recommendable for different reasons. The thermal insulation plaster could not achieve the thermal conductivity values specified by the manufacturer, mainly due to problems during installation. The deviation in thermal conductivity suggests the assumption that the assured material properties of plasters cannot be guaranteed with the existing insulating aggregates depending on the delivery height. In addition, the drying out took a very long time and the loss of space was greatest due to the greater insulation thickness. However, plastic application to uneven surfaces and mechanical processing have potential in the future. In the case of sprayed cellulose, the way in which it is applied and the difficulties in details, such as window reveals, are to be criticised and currently appear to be impracticable for inhabited objects due to the development of dust. The independence from uneven surfaces and the fast processing of large surfaces can again be noted as beneficial. The combination with other insulating materials, e.g. wood fibreboards, was suggested for difficult details such as the window layouts. The processing of the other insulating systems reed, perlite board and wood fibreboard was unproblematic.

With regard to the ecological evaluation, the reed insulation performed excellently and a negative OI3 index was found. The OI3 index of cellulose insulation and wood fibreboards were also favourable particularly because of the higher use of primary energy during production, the thermal insulation plaster and the perlite boards that showed the highest OI3 index.

At the end of the original research project, the deconstruction was documented and the construction systems used were segregated homogeneously by type, whereby the very small masses produced in the project stood in the way of an economical, sorted separation. The reed panels and the thermal insulation plaster were particularly easy to dismantle. The cellulose insulation, Perlite and wood fibreboards adhered very strongly to the existing surfaces, some of the system components could not be separated from each other.

The analysis of the existing structure and the materials used must be carried out systematically for each individual structure and the available methods must be adapted to the situation found on site. The basic prerequisites for a sustainable renovation are the assessment of the condition of the joist ends. If necessary, the creation of a diffusion-open inner surface of the existing wall surface by shearing off the diffusion-tight paint layer or wallpaper has to be established. The convection-inhibiting closure of the beam pocket openings and a sufficiently rain-protected and at the same time as possible diffusion-open outer wall surface is to be aimed at.

### **8.2 Determination of material properties**

All materials of the insulation systems and the relevant existing materials were examined in detail at the Building Physics Research and Development Laboratory of the Institute for Building Climatology (TU Dresden) and subsequently characterised within the project. The data provided describe the hygrothermal properties of the materials and are suitable for simulations with the *DELPHIN* software on a scientific level. Deviations from the data provided by the material manufacturers were detected. Regarding the insulation systems, the thin plaster finish of the thermal insulation plaster and the clay adhesive or finishing plaster of the wood fibreboards were not investigated. In the simulations, the data of the glue of the reed insulation boards or an existing material from the *DELPHIN* database were used instead. For certain existing materials from the ceiling structure, such as the fill, no measurements were available, which is why their properties had to be assumed.

By the measurement of the stock materials it could be shown that the use of material characteristics from software or guidelines, here from values from *Baubook (2019)*, can lead to a clear overestimation of the possible energy saving potential. Due to the low thermal conductivity of the bricks on site, the *Baubook (2019)* values overestimated the heating energy savings potential by more than 10 %. This can lead to legal disputes in the case of narrow contractual conditions and requirements. Therefore, it should be aimed at more precise material investigations, at least with regard to the thermal conductivity of the existing masonry.

### **8.3 Hygrothermal on-site measurements**

In the two test rooms, about one hundred sensors measured temperature, humidity and wood moisture in many areas of the wall and ceiling construction as well as in all adjacent climatic zones from October 2010 to May 2013. The humidity load resulting from the use was very low in the first winter of 2010/11. By means of humidifiers, various sealing measures for the inner and outer room envelopes and pleasant cooperation with the child carers, the room humidity load in the second winter could be increased to a "normal" level. In the last winter of 2012/13, even a very high room humidity load could be achieved.

Due to the high installation humidity and the different application times of finishing coats, the cellulose insulation and especially the thermal insulation plaster needed a very long time to dry

out. In case of the thermal insulation plaster, this dragged on into the second winter. The insulation systems with reed, soft wood fibre and perlite panels showed a constant unproblematic behaviour. However, after the built-in moisture had dried out, the thermal insulation plaster turned out to be very good, which was proven by the very low moisture load in the insulation and ceiling beams. An unfavourable time for installation in late autumn and winter should therefore be avoided for systems with high installation humidity. In addition, sufficient drying should be ensured for such systems. On the other hand, in the cellulose insulation, while very high room humidity loads condensate or 100 % air humidity was repeatedly generated for a short time even after the drying out phase. It dried out again and did not affect the ceiling beams.

The sealing of the support pockets caused a lower moisture load in the joist bearings. However, the moisture load of the sealed and unsealed supports differed significantly only on the outer surface of the supports resp. near the end wood, at the beam cheek in the middle of the supports hardly. Although at the end of the support pockets, only a few centimetres away from the front wood, 100 % relative humidity was partly measured over a longer period of time, the measured and temperature-corrected wood moisture content after drying of the built-in moisture content was at a maximum of 16 M% wood moisture content, a completely unproblematic range. An exception was the beam in the field with thermal insulation plaster, in which up to 19 M% were measured by the influence of the installation moisture. The high concentration of humidity in the masonry confirms how important an air gap is in front of or around the joist end. All wooden beams reacted very slowly to climatic effects. The fact that the wood moisture content at the front wood of the individual beams, including the uninsulated reference beam, hardly differed from each other allows the conclusion that the interior insulation systems had only little influence on the wood moisture content at the front wood in the present installation situation.

Furthermore, it was found that it was no warmer on the end grain of the uninsulated reference beam than on adjacent insulated joist ends, also with consideration of the low sensor position.

If a sufficient driving rain tightness is guaranteed on the main weather side, the installation of the interior insulation systems is to be regarded as uncritical accordingly. The measurements taken at Schönbrunngrasse 30 showed that there was no danger to ceiling beams from internal insulation. Due to the particularly low moisture values and the higher thermal energy saving potential, the perlite board and, with some exceptions, the wood fibreboard are recommended here. The "convection-inhibiting" sealing of the support pockets is advised, although with less costly measures than those implemented in the project. Furthermore, it can be deduced from the measurements that the climate in the lower floor has a higher influence on the hygrothermal behaviour in the beam support than that of the upper floor.

Although the very high room humidity last winter means a certain safety factor, the overall uncritical measurement results must not be generalised at the present time. This is because other project-specific features favoured the positive and uncritical overall result on the subject

of wooden beam ceilings and interior insulation, for example the brick with low heat conductivity but very good liquid water conductivity, the relatively thick outer wall and the low influence of driving rain.

## 8.4 Hygrothermal simulations

An important part of the task was to verify whether measurements in the comparatively complex details of the joist bearings in internally insulated existing buildings could be reproduced by software. This was very successful with the hygrothermal simulation software *DELPHIN*, especially with regard to the temperatures.

Preliminary one-dimensional simulations in which climatic boundary conditions could be determined and material properties specified proved to be very helpful. Due to the lack of similarly detailed information this is not possible in everyday office practice. This makes it all the more important to be able to reproduce the stock situation correctly, e.g. the occurrence or non-occurrence of mould or wood-damaging fungi at certain locations.

With unsealed beam-supports, and presumably also similarly air-permeable constructions, it is expedient to set air-flows in form of difference-pressures. Occasionally, such problems do not allow important, real air flow paths to be reflected in a 2D simulation, such as the air layer between the ceiling beams. Such conditions should then be taken into account by seemingly "illogical" solutions such as a continuous layer of air under a beam in a beam pocket.

In the cases investigated in this work, the arrangement of air pressure differences according to WTA-MB 6-2 mostly led to a slight overestimation of the moisture input. The estimation of the air permeability of materials and material layers on site is very difficult because only isolated measurements are available in a few scientific articles. However, a very high permeability should only be chosen if the construction is actually very permeable to air. In this study, a very high permeability led to an unusually vivid but implausible behaviour.

In planning practice, it is important to identify possible sources of error and foresee damage, so simulation results should have a safety margin. Here it was found that the agreement is predominantly very good, but the results are sometimes slightly on the uncertain side. To this extent, certain simulation parameters should be selected in such a way that this is not the case. For example, an increased room humidity, a higher internal heat transfer resistance or a slightly lower outside temperature are suitable.

From the available results it can be concluded that it is not necessary to carry out 3D simulations for comparable tasks, especially for purely thermal simulations. The results obtained by 3D simulations were only slightly more accurate than the 2D simulation results. However, in case of hygrothermal simulations of unsealed supports, the already formulated recommendations should be followed.

If the simulation settings are chosen responsibly, hygrothermal simulations are very well able to design and to keep damage-free internal insulation measures for wooden beam ceilings and

joist bearings. In this way, it will be possible in many cases to dispense with chemical wood preservation or other complex measures such as the heating of beam heads.

Last but not least, the suitability of the software in practice can provide greater security during planning in cases where, for example, damage is to be feared due to driving rain. With the help of hygrothermal software it can be clarified whether a certain use is possible, how high the thermal resistance of an insulation system may be or whether in special cases actions for active or passive heating of the beam supports should be recommended. In this thesis, this was demonstrated using the example of non-existent insulation in the intermediate ceiling area. It could be shown that above all the penetrating driving rain quantity is decisive for the dimensioning of the insulation of the adjacent rooms and that a conscious relinquishment of insulation around the beam support is questionable.





## 9 Literaturverzeichnis

### Literatur:

- Ahnert et Krause (2009)* : Ahnert A, Krause K H. Typische Baukonstruktionen von 1860 bis 1960 zur Beurteilung der vorhandenen Bausubstanz. Band 2, Huss-Medien GmbH, Berlin, 2009
- AkkPassiv (2005)* : Faktor 4 auch bei sensiblen Altbauten: Passivhauskomponenten + Innendämmung. Protokollband Nr. 32 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser, Passivhaus-Institut Darmstadt, 2005
- Antherm (2019)* : Aktuelle Informationen zur Software Antherm zur Berechnung von Wärmebrücken und Dampfdiffusionsbrücken auf [www.antherm.at](http://www.antherm.at) am 20.09.2019
- Arnold (2016)* : Arnold U. Baulicher Holzschutz – Grundlagen, Planung, Ausführung. Rudolf Müller Verlag, Köln, 2016
- Auer et al. (2012)* : Auer I, Chimani B, Türk K. Klimanormalperiode 1981 – 2010. In: 13. Österreichischer Klimatag, Wien, 2012
- AG Mauerziegel (2000)* : Arbeitsgemeinschaft Mauerziegel (im Bundesverband der Deutschen Ziegelindustrie e.V.). Luftdichtheit in Ziegel-Massivgebäuden, AMz-Bericht 1/2000
- Backstein (2019)* : Überblickinformationen zu Ziegeln auf [de.wikipedia.org/wiki/Backstein](http://de.wikipedia.org/wiki/Backstein) am 20.09.2019
- Baubook (2019)* : Baustoff-Datenbank des Energieinstituts Vorarlberg auf <https://www.baubook.info/> am 20.09.2019
- Bauschaum-Tutorial (2019)* : HouseImprovements. How To Insulate Joist Ends Using Rigid Foam. Auf <https://www.youtube.com/watch?v=Y1gmGCwlJqg> am 20.10.2019
- Bednar (2000)* : Bednar T. Beurteilung des feuchte- und wärmetechnischen Verhaltens von Bauteilen und Gebäuden – Weiterentwicklung der Mess- und Rechenverfahren. Dissertation, Technische Universität Wien, 2000
- Böhning et Schmitz (2011)* : Böhning J, Schmitz H. Altbaumodernisierung im Detail – Konstruktionsempfehlungen. 6. überarbeitete Auflage, Rudolf Müller Verlag, Köln, 2000
- Blomberg (2001)* : Blomberg T. PC-Programm für zweidimensionalen Wärmedurchgang - Handbuch mit Einführung in die theoretischen Grundlagen und Beispielen Version 4.0. 2001, auf [https://www.buildingphysics.com/manuals/heat2\\_5\\_deutsch.pdf](https://www.buildingphysics.com/manuals/heat2_5_deutsch.pdf) am 20.02.2019
- Borsch-Laaks et Walther (2008)* : Borsch-Laaks R, Walther W. Innendämmung mit und ohne Dampfbremse - Teil 1: Erfahrungen aus Langzeitmessungen des Feuchtegehalts. Holzbau 2, S. 39-44, 2008
- BDA Wien (2011)* : Bundesdenkmalamt Wien. Richtlinie Energieeffizienz am Baudenkmal. 2011 auf <https://docplayer.org/125366-Energieeffizienz-am-baudenkmal.html> am 15.03.2019
- Burdine (1953)* : Burdine N T. Relative permeability calculations from pore-size distribution data. Trans. AIME 198, S. 71-78, 1953

- Christensen et Bunch-Nielsen (2009)* : Christensen G, Bunch-Nielsen T. Indvendig Efterisole-  
ring Af Ældre Ydermure. BYG-Erfaringsblad (31). Ballerup: BYG-ERFA, 2009 (Dänisch)
- COMSOL (2019)* : Aktuelle Informationen zur Multipurpose-Software COMSOL Multiphysics®  
auf <https://www.comsol.de/> am 5.3.2019
- Danner (2010)* : Danner H. Ökologische Wärmedämmstoffe im Vergleich 2.0. Landeshaupt-  
stadt München, 2010, auf [https://docplayer.org/6013743-Oekologische-waermedaemm-  
stoffe-im-vergleich-2-0-fachwissen.html](https://docplayer.org/6013743-Oekologische-waermedaemm-<br/>stoffe-im-vergleich-2-0-fachwissen.html) am 20.02.2019
- Delphin (2019)* : Aktuelle Informationen zu DELPHIN. Simulationsprogramm für den gekoppel-  
ten Wärme-, Luft-, Feuchte-, Schadstoff- und Salztransport. Auf [www.bauklimatik-dres-  
den.de](http://www.bauklimatik-dres-<br/>den.de) am 20.10.2019
- Dervishi et Mahdavi (2011)* : Dervishi S, Mahdavi A. Comparison of models for the derivation  
of diffuse fraction of global irradiance data for Vienna Austria. Proceedings 12th Confer-  
ence of International Building Performance Simulation Association, Sydney, S. 765-771,  
2011
- Dumont et al. (2005)* : Dumont R, Snodgrass L, Kokko J, Goth J, Schumacher C. Field Meas-  
urement of Wood Moisture Contents in Wood Joists Embedded in Masonry Exterior Walls.  
Proceedings of the 10th Annual Conference on Building Science and Technology, Ottawa,  
2005
- DTU Byg (2013)* : Danmarks Tekniske Universitet, Institut for Byggeri og Anlæg. Heat and  
mass transfer in buildings. Vorlesungsskript, Course 11122, 2013
- DWD (2011)* : Aktualisierte und erweiterte Testreferenzjahre von Deutschland für mittlere, ext-  
reme und zukünftige Witterungsverhältnisse. Projektbericht 2011, Deutscher Wetterdienst  
(DWD), auf [https://www.bbsr-energieeinsparung.de/EnEVPortal/DE/Regelungen/Testref-  
erenzjahre/Testreferenzjahre/03\\_ergebnisse.html](https://www.bbsr-energieeinsparung.de/EnEVPortal/DE/Regelungen/Testref-<br/>erenzjahre/Testreferenzjahre/03_ergebnisse.html) am 22.8.2019,
- Eicke-Henning (2011)* : Eicke-Henning W. Kleine Geschichte der Dämmstoffe: „Erster Teil“.  
wksb 65, S. 6-34, 2011
- EnBewe (2017)* : Energetisches Bewertungsverfahren für Bestandsgebäude mit Holzbalken-  
decken. Abschlussbericht 2017 auf [https://projektinfos.energiewendebauen.de/pro-  
jekt/software-zur-hygrothermischen-planung-von-baukonstruktionen/](https://projektinfos.energiewendebauen.de/pro-<br/>jekt/software-zur-hygrothermischen-planung-von-baukonstruktionen/)
- Erhorn et al. (1988)* : Erhorn H, Szerman M, Rath J. Wärme- und Feuchteübergangskoeffizien-  
ten in Außenwandoberflächen von Wohnbauten. Bauforschungsbericht F 2110, Fraunhofer-  
Institut für Bauphysik, Stuttgart, 1998
- Ettenauer et al. (2012)* : Ettenauer J D, Piñar G, Lopandic K, Spangl B, Ellersdorfer G, Voitl C,  
Sterflinger K. Microbes on building materials - Evaluation of DNA extraction protocols as  
common basis for molecular analysis. Science of the Total Environment 439, S. 44-53,  
2012
- Fachverband WDVS (2012)* : Fachverband Wärmedämm-Verbundsysteme e.V. (Hrsg.): Tech-  
nische Richtlinie zur Innendämmung von Außenwänden mit Innendämm-Systemen  
(IDS), Planung – Ausführung – Nutzungshinweise. 2012

- Fachverband WDVS (2016)* : Fachverband Wärmedämm-Verbundsysteme e.V. (jetzt Verband für Dämmsysteme, Putz und Mörtel e. V.): Technische Richtlinie zur Dämmung von Außenwänden mit Innendämmsystemen (IDS), Planung – Ausführung – Nutzungshinweise. 2. Auflage, 2016
- FV Innendämmung (2016)* : Fachverband Innendämmung e. V. (Hrsg.). Praxishandbuch Innendämmung. Rudolf Müller Verlag, Köln, 2016
- Fechner et al. (1996)* : Fechner H, Grunewald J, Häupl P, Stopp H, Strangfeld P. Feuchtetransport in kapillarporösen Baustoffen und in Umfassungskonstruktionen. Abschlussbericht zum BMBF-Projekt HAMTIE, TU Dresden, 1996
- Fechner (2002)* : Fechner J (Hrsg.). Altbaumodernisierung - Der praktische Leitfaden. Springer, Wien, 2002
- Feng et Janssen (2016)* : Feng C, Janssen H. Hygric properties of porous building materials (II): Analysis of temperature influence. *Building and Environment* 99, S. 107-118, 2016
- Feng et Janssen (2018)* : Feng C, Janssen H. Hygric properties of porous building materials (III): Impact factors and data processing methods of the capillary absorption test. *Building and Environment* 134, S. 21-34, 2018
- Feng et al. (2019)* : Feng C, Roels S, Janssen H. Impact of frost temperature and moisture content on the frost damage to ceramic bricks. *Draft for Construction and Building Materials*, 2019
- Finkenstein (2003)* : Finkenstein (jetzt Fülle) C. Hygrothermisches Verhalten von Außenwandkonstruktionen mit Innendämmung. Diplomarbeit, Institut für Bauklimatik, TU Dresden, 2003
- Fischer et al. (2008)* : Fischer H M, Freymuth H, Häupl P, Homann M, Jenisch R, Richter E, Stohrer M. Lehrbuch der Bauphysik – Schall-Wärme-Feuchte-Licht-Brand-Klima. 6. Auflage, Vieweg + Teubner Verlag, Wiesbaden, 2008
- Freudenberg et al. (2017)* : Freudenberg P, Ruisinger U, Stöcker E. Calibration of Hygrothermal Simulations by the Help of a Generic Optimization Tool. *Energy Procedia*, Vol 132, S. 405-410, 2017
- Fülle (2011)* : Fülle C. Klimarandbedingungen in der hygrothermischen Bauteilsimulation. Ein Beitrag zur Modellierung von kurzweiliger und langweiliger Strahlung sowie Schlagregen. Dissertation, TU Dresden, 2011
- Funk (2011)* : Funk M. Hysteresis der Feuchtespeicherung in porösen Materialien. Dissertation, TU Dresden 2011
- Glaser (1958)* : Glaser H. Vereinfachte Berechnung der Dampfdiffusion durch geschichtete Wände bei Ausscheidung von Wasser und Eis. *Kältetechnik* 10, Heft 11, S. 358-364 und Heft 12, S. 386-390, 1958
- Gnoth et al. (2003a)* : Gnoth S, Hansel F, Jurk K, Toepel T. Heizungstechnisch gestützte kapillaraktive Innendämmung bei Holzbalkendecken. Forschungsbericht, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2003
- Gnoth et al. (2003b)* : Gnoth S, Hansel F, Jurk K, Toepel T, Strangfeld P, Stopp H. Hygrothermische Untersuchungen der Balkenköpfe von Einschubdecken bei innengedämmten

- Außenwänden unter Einbeziehung der Heizungstechnik. Abschluss-Forschungsbericht, FH Lausitz, Cottbus, 2003
- Gnoth et al. (2005)* : Gnoth S, Jurk K, Strangfeld P. Hygrothermisches Verhalten eingebetteter Holzbalkenköpfe im innengedämmten Außenmauerwerk, Bauphysik 27, Heft 2, S.117-128, 2005
- Grunewald (1997)* : Grunewald J. Diffusiver und konvektiver Stoff- und Energietransport in kapillarporösen Baustoffen. Dissertation, Institut für Bauklimatik, TU Dresden, 1997
- Grunewald et al. (2003)* : Grunewald J, Funk M, Scheffler G, Sladek V, Sladek J. Development of insulation materials with specially designed properties for building renovation, Workpackage 1 - modelling, software development and simulation. Abschlussbericht INSU-MAT Projekt, Workpackage 1, TU Dresden, 2003
- Grunewald et Häupl (2003)* :Grunewald J, Häupl P. Gekoppelter Feuchte-, Luft-, Salz- und Wärmetransport in porösen Baustoffen“ – Bauphysikkalender 2003. Ernst und Sohn, Berlin, S. 377-434, 2003
- Guizzardi et al. (2013)* : Guizzardi M, Carmeliet J, Derome D, Vonbank R. Prevention strategies for risk of moisture related damages due to renovation of historical buildings. In: 2nd Central European Symposium on Building Physics (CESBP) 2013, S. 513-520, 2013
- Gutex (2019)* : <https://holzbau-dnq.de/nachrichten/produktinfos/produktinfos-leser/gutex-bauphysikalisch-sind-holzfaserdaemmplatten-ein-hervorragendes-daemmmaterial-fuer-die-innendaemmung.html> in: Rubrik Leserinfos am 22.2.2019
- Häupl et al. (1988)* : Häupl P, Stopp H, Strangfeld P. Feuchtebestimmung in Umfassungskonstruktionen mit dem Bürocomputer unter Berücksichtigung der kapillaren Leitfähigkeit. Bauzeitung 42, S. 113-119, 1988
- Häupl et al. (1994)* : Häupl P, Stopp H, Strangfeld P, Fechner H. Vergleich gemessener und berechneter Feuchteverteilungen bei innerer Kondensatbildung in Baustoffproben. Bauphysik 16, Heft 5, S. 138-147, 1994
- Häupl et al. (2002)* : Häupl P, Fechner H, Petzold H, Jurk C. Sanierung historischer Gebäude mit Calciumsilikat-Innendämmung. Tagungsband zum 11. Bauklimatischen Symposium Dresden, Eigenverlag TU Dresden, S. 770 – 780, 2002
- Häupl (2010)* : Häupl P. Innendämmung von Außenbauteilen. In Fouad N (Hrsg.). Bauphysikkalender 2010, Ernst und Sohn, Berlin, 2010
- Häupl (2008)* : Häupl P. Bauphysik - Klima, Wärme, Feuchte, Schall. Grundlagen, Anwendungen, Beispiele. Ernst und Sohn, Berlin, 2008
- Hagentoft et al. (2004)* : Hagentoft C-E, Kalagasidis A, Adl-Zarrabi B, Roels S, Carmeliet J, Hens H, Grunewald J, Funk M, Becker R, Shamir D, Adan O, Brocken H, Kumaran K, Djebbar R. Assessment Method of Numerical Prediction Models for Combined Heat, Air and Moisture Transfer in Building Components: Benchmarks for One-dimensional Cases. Journal of Thermal Envelope and Building Science Vol. 7, S. 327-352, 2004
- Hansen et al. (2018)* : Hansen T K, Bjarløv S P, Peuhkuri R H, Harrestrup M. Long term in situ measurements of hygrothermal conditions at critical points in four cases of internally insulated historic solid masonry walls. Energy and Buildings 172, S. 235–248, 2018

- Hansen et al. (2019)* : Hansen T K, Bjarlov S P, Peuhkuri R. The effects of wind-driven rain on the hygrothermal conditions behind wooden beam ends and at the interfaces between internal insulation and existing solid masonry. *Energy & Buildings* 196, S. 255–268, 2019
- Harrestrup et Svendsen (2015)* : Harrestrup M, Svendsen S. Full-scale test of an old heritage multi-storey building undergoing energy retrofitting with focus on internal insulation and moisture, *Building and Environment* 85, S. 123 – 133, 2015
- Harrestrup et Svendsen (2016)* : Harrestrup M, Svendsen S. Internal insulation applied in heritage multi-storey buildings with wooden beams embedded in solid masonry brick façades, *Building and Environment* 99, S. 59 – 72, 2016
- Hasper et al. (2011)* : Hasper W, Kaufmann B, Pfluger R, Feist W. Energetische Sanierung eines denkmalgeschützten Speichergebäudes mit aufgesprühter Zellulose-Innendämmung. Endbericht IEA SHC TASK 37 Subtask C, Förderkennzeichen 03227271B, Passivhaus Institut, 2011
- Heinze et al. (2011)* : Heinze P, Plagge R, Engel J. Dicht von außen, offen von innen. In *B+B Bauen im Bestand*, Rudolf Müller-Verlag, Köln, S. 24-29, 2011
- Hens (2006)* : Hens H. The vapor diffusion resistance and air permeance of masonry and roofing systems. *Building and Environment* 41, S. 745–755, 2006
- Hens et al. (2007)*  
Hens H, Janssens A, Depraetere W, Carmeliet J, Lecompte J. Brick Cavity Walls: A Performance Analysis Based on Measurements and Simulations. *Journal of Building Physics* 31, S. 95 – 124, 2007
- HessMin (2006)* : Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung. Energiespar-informationen 11, Wärmedämmung von Außenwänden mit der Innendämmung, 2006
- Hofmeister (1995)* : Hofmeister G: Bauschäden an Holzbalkendecken in Feuchtraumbereichen. *Bauforschung für die Praxis Band 9*. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 1995
- Holle et al. (2008)* : Holle HJ, Dittert T, Dürr K, Demonstrationsvorhaben "Kleine Freiheit" in Hamburg. Abschlussbericht EnSan-Projekt, Förderkennzeichen 0329750S, Hamburg, 2008
- Huckfeld et Schmidt (2006)* : Huckfeld T, Schmidt O, Hausfäule- und Bauholzpilze - Diagnose und Sanierung. Rudolf Müller Verlag, 2006
- Janetti et al. (2012)* : Janetti M B, Ochs F, Feist W. 3D Simulation of Heat and Moisture Diffusion in Construction. 2012, [https://www.comsol.com/paper/download/83717/janetti\\_paper.pdf](https://www.comsol.com/paper/download/83717/janetti_paper.pdf) am 25.08.2019
- Janssen (2015)* : Janssen H, Vereecken E, Holubek M. A confrontation of two concepts for the description of the overcapillary moisture range: air entrapment versus low capillarity. *Energy Procedia* 78, S. 1490-1494, 2015
- Johansson et al. (2014)* : Johansson P, Geving S, Hagentoft CE, Jelle B P, Rognvik E, Kalagasidis A S, Time B. Retrofitting a brick wall using vacuum insulation panels: measured hygrothermal effect on the existing structure. *NSB* 2014, S. 1269 – 1276, 2014

- Kautsch (2005)* : Kautsch P. Gebäude mit historischen Fassaden - Möglichkeiten und Grenzen der Innendämmung. Tagungsband Ökologische Gebäudesanierung, AEE-INTEC Gleisdorf 2005
- Kautsch et al. (2006)* : Kautsch P, Engl J, Häupl P, Heinz A, Hengsberger H, Lackner W, Petzold H, Plagge R, Schmied R, Skofitsch F, Streicher W. Zellulose-Innendämmung ohne Dampfsperre, Untersuchungen zur grundsätzlichen Eignung aufgespritzter und verputzter Zelluloseschichten. Berichte aus Energie- und Umweltforschung Wien 84/2006, 2006
- Kautsch et al. (2013)* : Kautsch P, Ruisinger U, Hengsberger H, Steinwender H, Dörr G, Kukowetz K, Ettenauer J, Sterflinger K. OEKO-ID - Innendämmungen zur thermischen Gebäudeertüchtigung Untersuchung der Möglichkeiten und Grenzen ökologischer, diffusionsoffener Dämmsysteme. Projekt Nr. 818908, 2013, auf <https://www.energieforschung.at/assets/project/final-report/OEKO-ID-Endbericht-web.pdf> am 25.10.2019
- Kehl et al. (2013)* : Kehl D, Ruisinger U, Plagge R, Grunewald J. Wooden beam ends in masonry with internal insulation – A literature review and simulation on causes and assessment of decay. Tagungsband 2nd Central European Symposium on Building Physics (CESBP), S. 299-304, 2013
- Kehl (2014)* : Kehl D. Holzbalkenköpfe bei innen gedämmtem Mauerwerk – Was können wir aus verschiedenen Projekten lernen? In BuFAS (Hrsg.): 25 Jahre Feuchte und Altbau-sanierung – Tagungsband der 25. Hanseatischen Sanierungstage. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart und Beuth Verlag, Berlin, S. 71–84, 2014
- Knauf (2018)* : Knauf Aquapanel GmbH. Fachwissen wohngesundes Raumklima - Grundlagen, Verarbeitung, Gestaltung. Eigenverlag, 2018
- KnaufAqua (2019)* : Informationen zum Dämmsystem auf [http://www.dieputzer-online.de/html/Knauf\\_TecTem\\_Verarbeiter-Broschuere\\_20150305.pdf](http://www.dieputzer-online.de/html/Knauf_TecTem_Verarbeiter-Broschuere_20150305.pdf) am 20.03.2019
- Kopecky et al. (2017)* : Kopecky P, Stanek K, Bures M, Richter J, Tywoniak J. Experimental investigations of wooden beam ends in masonry with internal insulation. Energy Procedia 132, S. 682-687, 2017
- Korjenic et Dreyer (2003)* : Korjenic A, Dreyer J. Untersuchungen zur thermisch-hygrischen Eignung von Vakuumdämmplatten zur Sanierung von Gebäuden der Wiener Gründerzeit. Bauphysik 2, Heft 6, 2003
- Krebs et Collet (1981)* : Krebs H J, Collet P F. Indvendig Efterisolering: Indmurede Bjælkeenders Fugt 2 Og Temperaturforhold i Etagekryds. 1st ed. Tåstrup: Danish Technological Institute, 1981 (Dänisch)
- Krus et Sedlbauer (2001)* : Krus M, Sedlbauer K. Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen hygrothermisch unter die Lupe genommen. Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Valley/Oberlaidern, 2001
- Künzel (1994)* : Künzel H M. Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten. Dissertation, Fakultät Bauingenieur- und Vermessungswesen, Universität Stuttgart, 1994

- Künzel (2002)* : Künzel H. Bauphysik - Geschichte und Geschichten. Fraunhofer-IRB-Verlag: Stuttgart, 2002
- Künzel (2004)* : Künzel H M. Energetische Altbausanierung durch Innendämmung. WTA-Journal 2, Heft 4, S. 361-374, 2004
- Loga et al. (2003)* : Loga T, Feldmann R, Diefenbach N, Großklos M, Born R. Wiesbaden – Lehrstraße 2 Energetische Modernisierung eines Gründerzeithauses. Institut Wohnen und Umwelt GmbH, Darmstadt, 2003
- Mandl et al. (2001)* : Mandl M, Kautsch P, Hengsberger H, Stuhlbacher A. Grundlegende bauphysikalische und werkstofftechnische Untersuchungen zu aufgespritzten Zellulosedämmschichten mit Putzaufgabe für Außenfassaden. Endbericht 2001 auf [https://online.tugraz.at/tug\\_online/voe\\_main2.getVollText?pDocumentNr=102792&pCurrPk=478](https://online.tugraz.at/tug_online/voe_main2.getVollText?pDocumentNr=102792&pCurrPk=478) am 20.9.2019
- MASEA (2019)* : Materialdatensammlung für die energetische Altbausanierung auf [www.masea-ensan.de](http://www.masea-ensan.de) am 20.9.2019
- Morelli et al. (2010)* : Morelli M, Scheffler G A, Nielsen T R, Svendsen S. Internal Insulation of Masonry Walls with Wooden Floor Beams in Northern Humid Climate. In: Proceedings of Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings XI International Conference in Clearwater Beach, OakRidge National Laboratory, Florida, USA, 2010
- Morelli et Svendsen (2012)* : Morelli M, Svendsen S. Investigation of interior post-insulated masonry walls with wooden beam ends. J. Build. Phys. 36 (3), S. 265 – 293, 2012
- Munch-Andersen (2008)* : Munch-Andersen J. SBI-anvisning 221: Efterisolering af etageboliger, 1st Ed. Chapter: Ældre Muret Byggeri, Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet, 2008 (Dänisch)
- Neiß (1982)* : Neiß J. Numerische Simulation des Wärme- und Feuchtetransports und der Eisbildung in Böden. Fortschritt-Berichte der VDI Zeitschriften, Reihe 3, Nr. 73, München, 1982
- Nicolai (2007)* : Nicolai A. Modelling and Numerical Simulation of Salt Transport and Phase Transitions in Porous Building Materials. Dissertation, Syracuse University (USA), 2007
- Oswald et al. (2011)* : Oswald R, Zöller M, Liebert G, Sous S. Baupraktische Detaillösungen für Innendämmungen (nach EnEV 2009). Bauforschung für die Praxis Band 98, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2011
- Ottinger et al. (2015)* : Ottinger O, Bräunlich K, Kaufmann B. Sanierung der Hohenzollernhöfe: Monitoring und Simulation des Feuchtegehalts in Wandaufbau und Holzbalkenköpfen für vier verschiedene Innendämmsysteme. Endbericht, Passivhaus Institut, Darmstadt, 2015
- Ojanen et al. (2010)* : Ojanen T, Viitanen H, Peuhkuri R, Lähdesmäki K, Vinha J, Salminen K. Mold Growth Modeling of Building Structures Using Sensitivity Classes of Materials. In: Proceedings of Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings XI International Conference in Clearwater Beach, Florida, OakRidge National Laboratory, 2010
- Olefs et al. (2016)* : Olefs M, Baumgartner D J, Obleitner F, Bichler C, Foelsche U, Pietsch H, Rieder H E, Weihs P, Geyer F, Haiden T, Schöner W. The Austrian radiation monitoring

- network ARAD – best practice and added value. *Atmos. Meas. Tech.* 9, S. 1513-1531, 2016
- Peper et al. (2013)* : Peper S, Zeno B, Bangert A, Rupp W. Den Luftstrom unterbinden. *B + B Bauen im Bestand* 6, S. 65-69, 2013
- Plagge et al. (2003)* : Plagge R, Cerny R, Mathiasovsky P. Development of insulation Materials with specially designed properties for building renovation, Workpackage 3 - Laboratory Measurements. Abschlussbericht INSUMAT Projekt, Workpackage 3, TU Dresden, 2003
- Plagge et Heinze (2016)* : Plagge R, Heinze P. Mauerwerksinstandsetzung und hydrophobe Imprägnierung. In Leimer HP (Hrsg.): 32. Internationales WTA-Kolloquium - Bauinstandsetzen und Bauphysik, Fraunhofer IRB Verlag, S. 169-189, 2016
- Prolehm (2019)* : Informationen zum Lehm-Dämmsystem auf <http://www.prolehm.at/> (und [www.rohrwolf.com](http://www.rohrwolf.com)) am 25.10.2019
- Promnitz (1870)* : Promnitz J. Der praktische Zimmermann. Handbuch für Zimmerermeister, Gesellen, Lehrlinge, Bauführer und Architekten. Verlag von G. Knapp, Halle, 1870
- Python (2019)* : Aktuelle Informationen zur Programmiersprache Python: Interpreted, interactive, object-oriented programming language. Auf <https://www.python.org/> am 20.10.2019
- Rasmussen (2010)* : Rasmussen T V. Post-insulation of existing buildings constructed between 1850 and 1920. In: Thermal performance of the exterior envelopes of whole buildings XI, Clearwater Beach, S. 124-135, 2010
- RIBuild (2019)* : Berichte und Informationen zum EU-Forschungsprojekt RIBuild: Robust Internal Thermal Insulation of Historic Buildings. Auf <https://www.ribuild.eu/> am 10.10.2019
- Reindl et al. (1990)* : Reindl D T, Beckman W A, Duffie J A. Diffuse Fraction Correlations. *Solar Energy* 45(1), S. 1-7, 1990
- Richter et Winkelmann-Fouad (2005)* : Richter T, Winkelmann-Fouad S. Anwendung des U-Wertes als Kenngröße für Wärmetransportvorgänge in Cziesielski E (Hrsg.): *Bauphysik-Kalender 2005*, Ernst und Sohn, Berlin, S. 249-295, 2005
- Röfix (2019)* : Informationen zum Dämmsystem auf <https://www.roefix.at/Produkte/Unterputze/Waermedaemmputze/ROeFIX-CalceClima-Thermo-Kalk-Waermedaemmputz> und [www.thermosilit.com](http://www.thermosilit.com) am 10.03.2019
- Saint Gobain (2012)* : Saint Gobain Rigips GmbH, Rigitherm 032 - Die sichere und wirtschaftliche Innendämmung. Eigenverlag, 2012
- Rode et Clorius (2004)* : Rode C, Clorius C O. Modeling of Moisture Transport in Wood with Hysteresis and Temperature-Dependent Sorption Characteristics. *Proceedings Buildings IX*, Clearwater Beach, 5-10 December 2004, Tullie Circle: ASHRAE, 2004
- Roels et al. (2004a)* : Roels S, Carmeliet J, Hens H, Brocken H, Hall C, Plagge R, Cerny R, Pavlik Z, Kumaran K. Interlaboratory comparison of the measurement of basic hygric properties of porous building materials. *Journal of Thermal Envelope and Building Science*, Vol. 27 No. 4, Sage Publications, 2004
- Roels et al. (2004b)* : Roels S, Carmeliet J, Hens H, Pel L, Hall C, Plagge R, Pavlik Z, Cerny R, Kumaran K. A comparison of different techniques to quantify moisture content profiles



- in porous building materials. *Journal of Thermal Envelope and Building Science*, Vol. 27 No. 4, Sage Publications, 2004
- Ronacher (2011)* : Ronacher H. Energie Plus Haus Weber, Berichte aus Energie- und Umweltforschung. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien, 2011
- Ruisinger et Grunewald (2009)* : Ruisinger U, Grunewald J. Feuchteatlas zur Vermeidung planungsbedingter Feuchteschäden - Neue Beurteilungskriterien zur Bewertung innen gedämmter Konstruktionen. Abschlussbericht, TU Dresden, 2009
- Ruisinger et al. (2013)* : Ruisinger U, Kehl D, Plagge R. Untersuchung außenklimatischer Einflüsse auf Wandkonstruktionen. Tagungsband 2. Internationaler Innendämmkongress Dresden, TU Dresden, 2013
- Ruisinger (2015)* : Ruisinger U. Privatgutachten zu einem Schadensfall (unveröffentlicht)
- Ruisinger (2018)* : Ruisinger U. Innendämmung nach WTA. Vortragsunterlagen zu Veranstaltungen am 8. und 18.10.2018 in Frankfurt, 2018
- Ruisinger et Kautsch (2019)* : Ruisinger U, Kautsch P. Über die Notwendigkeit dreidimensionaler, hygrothermischer Simulationen. *Bauphysik* 41, Heft 6, S. 295-301, 2019
- Scheffler (2008)* : Scheffler G A. Validation of hygrothermal material modelling under consideration of the hysteresis of moisture storage. Dissertation, TU Dresden, 2008
- Scheffler (2016)* : Scheffler G. *Bauphysik der Innendämmung*. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2016
- Scheffler et Plagge (2010)* : Scheffler G, Plagge R. A whole range hygric material model: Modelling liquid and vapour transport properties in porous media. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. Vol. 53, 1–3, S. 286-296, 2010
- Schmitz et al. (1989)* : Schmitz H, Böhning J, Krings E. Altbaumodernisierung im Detail – Konstruktionsempfehlungen. Rudolf Müller Verlag, Köln, 1989
- Schneider et al. (2005)* : Schneider U, Brakhan F, Zelger T, Moser W, Bednar T. ALTeS Haus - Barrierefreies Wohnen im GründerzeitPassivHaus. Berichte aus Energie- und Umweltforschung, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien, 2005
- Schneider et al. (2010)* : Schneider U, Bednar T, Sima J, Liebich H A. Baudenkmale im Spannungsfeld von Energieeffizienz und Risikovermeidung. In Fouad N (Hrsg): *Bauphysikkalender 2010*, Ernst und Sohn Verlag, S. 341-368, 2010
- Schuster et al. (1999)* : Schuster G, Szeider G, Wölfel M. Wärmeschutzmaßnahmen an Wohngebäuden. Zentrum für Bauen und Umwelt, Donau-Universität Krems, 1999
- Silberhorn (2010)* : Silberhorn O. Bericht Nr.: 9057/2008. Landesamt für Finanzen, Augsburg, 2010
- Sontag et al. (2013)* : Sontag L, Nicolai A, Vogelsang A. Validierung der Solverimplementierung des hygrothermischen Simulationsprogramms DELPHIN. 2013, auf <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-128968>
- Spangl (1995)* : Spangl W. Messung des Windprofils mittels Akustikradar in Graz. Umweltbundesamt, UBA-Bericht BE-034, Band 034, Wien, 1995
- Staar (2018)* : Staar A. Zum Einsatz von Innendämmsystemen an erhaltenswerten Fassaden mit im Außenmauerwerk eingebundenen Holzbalkenköpfen. Dissertation, BTU Cottbus, 2018

- Stade (1904)* : Stade F. Die Holzkonstruktionen. Reprint der Originalausgabe von 1904. Bechtermünz Verlag München, 1904
- Steico (2019)* : Aktuelle Informationen zum verwendeten Dämmsystem auf <https://www.steico.com/produkte/holzfaser-daemmstoffe/steicointernal/ueberblick/> am 25.10.2019
- Stopp et al. (2010)* : Stopp H, Strangfeld P, Toepel T, Anlauff E. Messergebnisse und bauphysikalische Lösungsansätze zur Problematik der Holzbalkenköpfe in Außenwänden mit Innendämmung. In: Bauphysik 32, S. 61-72, 2010
- Strangfeld et al. (2007)* : Strangfeld P, Stopp H, Jurk K. Hygrothermie von Holzbalkenköpfen in wärmeschutztechnisch sanierten Außenwänden mit erhaltenswerten Fassaden. In: Europäischer Sanierungskalender 2007, Beuth Verlag Berlin, 2007
- Strangfeld et al. (2012)* : Strangfeld P, Staar A, Toepel T. Das hygrothermische Verhalten von Holzbalkenköpfen im innengedämmten Außenmauerwerk. Bausubstanz, Fraunhofer IRB Verlag, H.2, S. 39-45; H3, S.45 -51, 2012
- Straube et Schumacher (2007)* : Straube J, Schumacher C. BSD-114: Interior Insulation Retrofits of Load-Bearing Masonry Walls in Cold Climates. Building Science Digests, 2007
- Tecplot (2019)* : Aktuelle Informationen zur Software Tecplot. CFD-Visualisierungs- und Analyse-Software. Auf [www.tecplot.com](http://www.tecplot.com) am 10.11.2019
- UBA (2017)* : Umweltbundesamt (Hrsg.): Leitfaden zur Ursachensuche und Sanierung bei Schimmelpilz-wachstum in Innenräumen („Schimmelpilzsanierungs-Leitfaden“). Eigenverlag Berlin, 2017, Download unter <http://bit.ly/2dowYYI> am 22.10.2019
- Ueno (2012)* : Ueno K. Masonry Wall Interior Insulation Retrofit Embedded Beam Simulations. BEST3 Conference April 2-4, 2012, Atlanta, USA, 2012
- Ueno et al. (2013)* : Ueno K, van Straaten R, Schumacher C. Interior Insulation of Mass Masonry Walls: Joist Monitoring, Material Test Optimization, Salt Effects. Building America Report – 1307, U.S. Department of Energy, 2013
- Ueno (2015)* : Ueno, K. Analysis of Joint Masonry Moisture Content Monitoring. USA, 2015
- Vereecken et Roels (2017)* : Vereecken E, Roels S. Wooden beam ends in combination with interior insulation: The importance of an airtight sealing. Energy Procedia 13, S. 664 – 669, 2017
- Vereecken et Roels (2019)* : Vereecken E, Roels S. Wooden beam ends in combination with interior insulation: An experimental study on the impact of convective moisture transport. Building and Environment 148, S. 524 – 534, 2019
- Viitanen et al. (2010)* : Viitanen H, Toratti T, Makkonen L, Peuhkuri R, Ojanen T, Ruokolainen L, Räisänen J. Towards modelling of decay risk of wooden materials. In Eur. J. Wood Prod. 68, S. 303–313, 2010
- Vogelsang et al. (2013)* : Vogelsang S, Fechner H, Nicolai A. Delphin 6 Material File Specification. Technischer Bericht, TU Dresden, 2013 auf <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-126274>
- Vogelsang et al. (2014)* : Vogelsang S, Kehl D, Ruisinger U, Meissner F. Three-dimensional HAM transport in timber beam ends – measurements and simulation. 5th German-Austrian Conference of the International Building Performance Simulation Association BauSIM, S. 174-181, 2014

- Warren et al. (2003)* : Warren P, Hens H, Hendriks H, Svendsen H, Rudbeck C , Stopp H, Makela H, Baker P, Saelens D, Grace M, Inoue T. Integral Building Envelope Performance Assessment (Chapter 5), Technical Synthesis Report. IEA ECBCS Annex 32, Faber Maunsell Ltd, Birmingham, 2003
- Wegener (1894)* : Wegener F. Die Arbeiten des Zimmermanns, des Tischlers und des Dachdeckers sowie die Feuerungsanlagen. Ein Handbuch für Maurer-, Zimmermeister und Architekten. Verlag J.J. Arnd, Fulda und Leipzig, 1894
- Wegerer (2010)* : Wegerer P. Beurteilung von Innendämmsystemen – Langzeitmessung und hygrothermische Simulation am Beispiel einer Innendämmung aus Schilfdämmplatten. Diplomarbeit, Technische Universität Wien, 2010
- Wegerer et Bednar (2016)* : Wegerer P, Bednar T. Anordnung und Vorrichtung zum Temperieren von Trankköpfen. Patentnummer AT 510 965, Europäische Patentnummer EP 2511439 B1, 2016
- Wegerer et al. (2012)* : Wegerer P, Neusser M, Bednar T. Auswirkungen der Luft(un)dichtheit auf die Feuchtebelastung von Konstruktionen mit Innendämmsystemen. 7th International Symposium on Building and Ductwork Air Tightness in Practice (BUILDAIR), Stuttgart, 2012
- Wegerer et al. (2017)* : Wegerer P, Bednar T. Hygrothermal performance of wooden beam heads in inside insulated walls considering air flows. Energy Procedia 132, S. 652-657, 2017
- Wetter (2011)* : Wetter M. GenOpt(R) Generic Optimization Program, User Manual, Version 3.1.0, 2011, auf <http://simulationresearch.lbl.gov/GO/download/manual-3-1-0.pdf> am 26.02.2019
- Wirkner (1949)* : Wirkner E. Einmauern von Balkenköpfen. In: Bauzeitung 3 (7), S. 100-101, 1949
- Wufi (2019)* : Aktuelle Informationen zur Software WUFI: Instationäre Berechnung des gekoppelten ein- und zweidimensionalen Wärme- und Feuchtetransports auf [www.wufi.de](http://www.wufi.de) am 20.10.2019
- Xella (2018)* : Xella Deutschland GmbH. Das Dämmbuch, 3. Auflage, Eigenverlag, 2018
- Xu et Häupl (1999)* : Xu Y, Häupl P. Ermittlung des Gefrierpunktes des Wassers im kapillarporösen Stoff mit Hilfe der Saugspannung. Proceedings 10. Bauklimatisches Symposium, TU Dresden, S. 719 - 728, 1999
- ZAMG (2019)* : [www.zamg.ac.at/fix/klima/oe71-00/klima2000/klimadaten\\_oesterreich\\_1971\\_frame1.htm](http://www.zamg.ac.at/fix/klima/oe71-00/klima2000/klimadaten_oesterreich_1971_frame1.htm) am 20.03.2019
- Zeller (1995)* : Zeller J, Dorschky S, Borsch-Laaks R, Feist W. Luftdichtigkeit von Gebäuden - Luftdurchlässigkeitsmessungen mit der Blower Door in Niedrigenergiehäusern und anderen Gebäuden. IWU Darmstadt, 1995
- Zirkelbach et Binder (2011)* : Zirkelbach D, Binder A. Mit neuen Kennwerten genauer rechnen. B+B Bauen im Bestand. 34. Jahrgang, März 2011, S. 42 – 47
- Zöllner et al. (2019)* : Zöllner M, Sous S, Warscheid T. Schimmelinstandsetzung durch Abschottung von Innenräumen. Der Bausachverständige Heft 2, S. 10-17, 2019

### **Richtlinien/Normen:**

---

- DIN 4108-3* : DIN 4108-3:2018: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden, Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz. Beuth Verlag, Berlin
- DIN 4108-8* : DIN-Fachbericht 4108-8:2010: Wärmeschutz und Energie-Einsparung an Gebäuden – Teil 8: Vermeidung von Schimmelpilzwachstum in Wohngebäuden, Berlin: Beuth Verlag
- DIN 68800* : DIN 68800:2012: Holzschutz. Teile 2 und 3. Beuth Verlag, Berlin
- EN 1745* : EN 1745:2002, Mauerwerk und Mauerwerksprodukte - Verfahren zur Bestimmung von wärmeschutztechnischen Eigenschaften. Österreichisches Normungsinstitut, Wien
- EN 13779* : EN 13779:2007: Eingangsparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden – Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik. Österreichisches Normungsinstitut, Wien
- EN ISO 13788* : EN ISO 13788:2001: Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Raumseitige Oberflächentemperatur zur Vermeidung kritischer Oberflächenfeuchte und Tauwasserbildung im Bauteilinneren. Österreichisches Normungsinstitut, Wien
- ÖNORM EN 673* : ÖNORM EN 673:2011: Glas im Bauwesen – Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) – Berechnungsverfahren. Österreichisches Normungsinstitut, Wien
- ÖNORM EN 844* : ÖNORM EN 844:1995: Rund- und Schnittholz - Terminologie. Österreichisches Normungsinstitut, Wien
- ÖNORM B 3802* : ÖNORM B 3802: Holzschutz im Hochbau Teile 1 bis 3. Österreichisches Normungsinstitut, Wien
- ÖNORM EN ISO 7345* : ÖNORM EN ISO 7345:2018: Wärmeverhalten von Gebäuden und Baustoffen - Physikalische Größen und Definitionen. Österreichisches Normungsinstitut, Wien
- ÖNORM B 6015* : ÖNORM B 6015:2009: Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit mit dem Plattengerät, Teile 1 bis 5, Österreichisches Normungsinstitut, Wien
- ÖNORM B 8110-2* : ÖNORM B 8110 Teil 2:2003: Wärmeschutz im Hochbau - Teil 2: Wasserdampfdiffusion und Kondensationsschutz, Österreichisches Normungsinstitut, Wien
- ÖNORM EN ISO 10211* : ÖNORM EN ISO 10211 (2008): Wärmebrücken im Hochbau - Wärmeströme und Oberflächentemperaturen - Detaillierte Berechnungen. Österreichisches Normungsinstitut, Wien
- ÖNORM EN ISO 11274* : ÖNORM EN ISO 11274 (2014). Bodenbeschaffenheit – Bestimmung des Wasserrückhaltevermögens. Österreichisches Normungsinstitut, Wien
- ÖNORM EN ISO 12571* : ÖNORM EN ISO 12571 (2013): Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten – Bestimmung der hygroskopischen Sorptionseigenschaften. Österreichisches Normungsinstitut, Wien
- ÖNORM EN ISO 12572* : ÖNORM EN ISO 12572 (2017): Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit - Verfahren mit einem Prüfgefäß. Österreichisches Normungsinstitut, Wien

- ÖNORM EN ISO 13786 : ÖNORM EN ISO 13786 (2008): Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden – Dynamisch-thermische Kenngröße – Berechnungsverfahren. Österreichisches Normungsinstitut, Wien
- ÖNORM EN 13829 : ÖNORM EN 13829 (2001): Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden - Bestimmung der Luftdurchlässigkeit von Gebäuden – Differenzdruckverfahren. Österreichisches Normungsinstitut, Wien
- ÖNORM EN 15026 : ÖNORM EN 15026 (2007): Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen - Bewertung der Feuchteübertragung durch numerische Simulation, Österreichisches Normungsinstitut, Wien
- ÖNORM EN ISO 15148 : ÖNORM EN ISO 15148 (2016): Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten bei teilweisem Eintauchen, Österreichisches Normungsinstitut, Wien
- SIA 382/1 : SIA 382/1 (2007): Lüftungs- und Klimaanlageanlagen - Allgemeine Grundlagen und Anforderungen, Zürich, SIA - Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein

**Merkblätter der Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V. (WTA-Merkblätter, Fraunhofer IRB-Verlag, München):**

---

- WTA-MB 6-2 : WTA-Merkblatt 6-2-14: Simulation wärme- und feuchtetechnischer Prozesse, 2014
- WTA-MB 6-3 : WTA-Merkblatt 6-3-05: Rechnerische Prognose des Schimmelpilzwachstumsrisikos, 2005
- WTA-MB 6-4 : WTA-Merkblatt 6-4-16: Innendämmung nach WTA I: Planungsleitfaden, 2016
- WTA-MB 6-5 : WTA-Merkblatt 6-5-14: Innendämmung nach WTA II: Nachweis von Innendämmsystemen mittels numerischer Berechnungsverfahren, 2014
- WTA-MB 6-8 : WTA-Merkblatt 6-8-16: Feuchtetechnische Bewertung von Holzbauteilen – Vereinfachte Nachweise und Simulation, 2016
- WTA-MB 8-10 : WTA-Merkblatt 8-10-11: Fachwerkinstandsetzung nach WTA X - EnEV: Möglichkeiten und Grenzen, 2014
- WTA-MB 8-14 : WTA-Merkblatt 8-14-14: Ertüchtigung von Holzbalkendecken nach WTA II: Balkenköpfe in Außenwänden, 2014

## 10 Abbildungsverzeichnis

Bild 1	Beispiel einer fragwürdigen Detaillösung für Balkenaufleger aus <i>Schmitz et al. (1989)</i> .....	5
Bild 2	Testhaus der TU Dresden und FH Cottbus-Senftenberg .....	7
Bild 3	Ausschnitt aus einem Video zur Abdichtung von Balkenköpfen mit PUR-Bauschaum („ <i>Bauschaum-Tutorial (2019)</i> “).....	9
Bild 4	Balkenkopf mit Schadensbild, das an der oberen Außenecke deutlich ausgeprägter ist.....	10
Bild 5	Zwei Abdichtungssysteme und –ebenen an einem Balken: Putzanschlussklebeband und vorkomprimiertes Dichtungsband .....	11
Bild 6	Ein Balkenaufleger mit vorkomprimiertem Dichtungsband, das in der Ecke zusätzlich abgedichtet wurde .....	14
Bild 7	Detailzeichnung einer aktiven Bauteilbeheizung aus <i>Wegerer et Bednar (2016)</i> .....	16
Bild 8	Empfehlung aus einem internen Entwurf des WTA-Merkblatts 8-14 .....	18
Bild 9	Links die Südost-Ansicht des Kindergartens Schönbrunnngasse 30; rechts der Südturm mit den übereinanderliegenden Versuchsräumen im Obergeschoß und Dachgeschoß.....	21
Bild 10	Vertikalschnitt durch die beiden Versuchsräume mit Darstellung der Messfelder und Maße, sowie Fugenbreite und -tiefe in den Balkenauflagern (s. Tab. 3) .....	22
Bild 11	Links Deckenöffnung im Dachgeschoßzimmer und rechts im Obergeschoß.....	24
Bild 12	Spezielle Sensoren zur Holzfeuchtemessung (1.+ 2. von links) und für die Luftfeuchte- und Temperaturmessung (Foto: Schaller GmbH).....	25
Bild 13	Schematische Darstellung der Lage der Messsensoren: oben Schnitt durch die Außenwand in der Feldmitte zwischen den Holzbalken; unten Schnitt durch den Deckenbalken mit Blick auf die Bestandsoberfläche unter Angabe der Messgröße .....	26
Bild 14	Links die maximale Genauigkeit der Feuchtesensoren in Abhängigkeit von der Temperatur, umgerechnet in g/m <sup>3</sup> absoluter Luftfeuchte; rechts die Grenze des zuverlässigen Messbereichs für die Sensoren im Balkenaufleger, d. h. die Kurve entspricht dem temperaturabhängigen Verlauf der relativen Luftfeuchte über 95 % (s. Tab. 2).....	28
Bild 15	Links kombinierte Luftfeuchte-/Temperatursensoren in der Gebäude-Außenkante; rechts diverse Holzfeuchtesensoren an Balken 1.....	28
Bild 16	Links Ansicht der Messfelder vor Aufbringung der Dämmsysteme; rechts Zellulose-Messfeld in der Gebäudeecke, gesehen vom unteren Geschoß mit schon abgedichteten Holzfeuchtesensoren; an der Decke Montageplatten mit der Messelektronik.....	29
Bild 17	Schematische Darstellung der Abdichtungsmaßnahmen: Links Wandquerschnitt und rechts Schnitt durch den Deckenbalken mit Sicht auf die Außenwand .....	31
Bild 18	Links ein Dübel zum Verschließen der Längsrisse und der durch Putzmörtel geschlossene Luftspalt; rechts Abkleben der Kanten zwischen Balken und Einlegeböden zur Wandoberfläche mit Putzanschlussklebeband .....	31
Bild 19	Links Aufspritzen der Zellulosedämmung in Feld 1; in der Mitte Abziehen auf die gewünschte Schichtdicke mit Führungsschienen; rechts die Montage der Perlite-Platten in Feld 2 mit der Position einer „Abklatschbeprobung“ für mikrobiologische Untersuchungen (roter Kreis) ....	32
Bild 20	Links Einbringen der ersten Lage Wärmedämmputz; in der Mitte Aufkleben der Holzweichfaserplatten auf Lehmputz (am Balkenkopf eine „Klebeband-“Manschette für den luftdichten Anschluss); rechts zwei übereinanderliegende, 50 mm dicke Schilfmatten in Lehmputz .....	32

Bild 21	Gesamtansicht der fünf Dämmsysteme im Obergeschoß nach Abschluss der Arbeiten; von links: Zellulose, Perliteplatte, Wärmedämmputz, Holzweichfaserplatten und Schilfmatten ..	33
Bild 22	Zelluloseflocken, Grundlage für die Aufspritz-Zellulose (Quelle: Renocell/Isocell GmbH) ....	36
Bild 23	Perliteplatte TecTem® Insulation Board Indoor ( <i>KnaufAqua (2019)</i> ) .....	37
Bild 24	Thermosilit-Körner im CalceClima® Thermo Kalk-Wärmedämmputz ( <i>Röfix (2019)</i> ) .....	38
Bild 25	Holzweichfaserplatte STEICOtherm internal ( <i>Steico (2019)</i> ) .....	38
Bild 26	Schilfrohrplatte ( <i>Prolehm (2019)</i> ) .....	39
Bild 27	Abbruch Zellulosedämmung: Dämmung löste sich großflächig mit Teilen des Bestandsputzes .....	41
Bild 28	Abbruch Perliteplatte: einzelne Abscherflächen sind links gut sichtbar .....	41
Bild 29	Abbruch Wärmedämmputz .....	42
Bild 30	Abbruch Holzweichfaserplatte .....	42
Bild 31	Abbruch Schilfplatten .....	43
Bild 32	Sensoren nach Entfernen der Schilfdämmung an Auflager 6 .....	44
Bild 33	Auflager 5 nach Entfernen von Dämmung und Dichtband: Holzdübel und Korkfüllmasse kommen zum Vorschein .....	44
Bild 34	Auflager 2: links das Kabel eines Auflagersensors; rechts herunterhängende Kabel weiterer Auflagersensoren .....	45
Bild 35	Blick ins Obergeschoßzimmer nach Abbruch der Innendämmung und Wiederherstellung des ursprünglichen Zustands .....	45
Bild 36	Links Exsikkatoren zur Bestimmung der hygroskopischen Sorptionsisotherme; rechts Druckplattenapparaturen zur Bestimmung der Wasserretention .....	55
Bild 37	Feuchtespeicherfunktion des Ziegels der Schönbrunnegasse 30 mit Messpunkten: links Sorptionsisotherme, rechts die gesamte Funktion, aufgetragen über dem Kapillardruck (Pascal) .....	56
Bild 38	An einer aufsteigenden Wassersäule angreifende Kräfte bzw. Drücke .....	57
Bild 39	Messapparatur zur kontinuierlichen Messung der Wasseraufnahme .....	58
Bild 40	Beispielhafte Wasseraufsaugkurven, deren Form sich nicht der klassischen Aufsaugkurve Typ A (schwarz) fügt und kaum interpretieren lässt (aus <i>Vogelsang et al. (2014)</i> ) .....	59
Bild 41	Verdunstungsapparatur zur kontinuierlichen Bestimmung der Trocknungsgeschwindigkeit (aus <i>Scheffler (2008)</i> ) .....	61
Bild 42	Aus Dampf- und Flüssigwasserleitfähigkeit zusammengesetzte Feuchteleitfunktion $Kl + Kv$ , (analog <i>Scheffler (2008)</i> ) .....	63
Bild 43	Temperaturverläufe außen und innen; Sensorausfälle wurden durch Daten der KFU-Graz ergänzt .....	73
Bild 44	Verlauf der relativen Luftfeuchte außen und innen; Sensorausfälle wurden durch Daten der KFU-Graz ergänzt .....	73
Bild 45	Monatliche Durchschnittswerte für Temperaturen innen und außen (durchgezogen, linke Skala) und Luftfeuchte (gestrichelt, rechte Skala) .....	74
Bild 46	Außenluftfeuchte und Raumlufffeuchten vom 6. September bis 1. Dezember 2010 .....	75
Bild 47	Raumklima und Außentemperatur vom 2.4.2011 bis 16.4.2011 .....	76
Bild 48	Verlauf der Globalstrahlung: Gelb die am Testhaus gemessenen Werte, schwarz Daten der KFU Graz, grün ZAMG-Daten; am 8.2.2012 Umstellung des Sternpyranometers vor Ort .....	78
Bild 49	Verlauf der Globalstrahlung vom 29.7. bis zum 4.8.2011 .....	79
Bild 50	Verlauf der langwelligen Strahlung ab dem 1.6.2011 (Messdaten der KFU Graz/ZAMG) ....	79

Bild 51	Verlauf der Niederschlagsmengen auf eine horizontale Fläche ab dem 1.6.2011 (Messdaten der KFU Graz/ZAMG) .....	80
Bild 52	Verlauf der Windgeschwindigkeit ab dem 1.6.2011 (Messdaten der KFU Graz/ZAMG).....	81
Bild 53	Befeuchter AxAir LBV 45 der Firma Walter Meier GmbH (Foto: Walter Meier GmbH) .....	82
Bild 54	Links Wanddurchbrüche für Messtechnik-Kabel und Wasserversorgungsleitung des Befeuchters, rechts Fensterabdichtung mit (zwei unterschiedlichen) Bändern.....	83
Bild 55	Außen- und Innentemperatur (linke Skala) und Raumlufffeuchte (rechte Skala) im Obergeschoß im Jänner 2012 .....	84
Bild 56	Eine Figur aus Bausteinen verhindert das Schließen der Fensterflügel im OG-Zimmer.....	85
Bild 57	Temperaturverlauf auf der Grenzfläche zwischen Bestandsoberfläche und Dämmsystemen der Balken 1 und 5 .....	88
Bild 58	Temperaturverlauf auf der Grenzfläche zwischen Bestandsoberfläche und Dämmsystemen der Balken 3, 6 und 7 .....	89
Bild 59	Luftfeuchte-Verlauf auf der Grenzfläche zwischen Bestandsoberfläche und Dämmsystemen der (Streich-)Balken 1, 2 und 5 .....	90
Bild 60	Luftfeuchte-Verlauf auf der Grenzfläche zwischen Bestandsoberfläche und Dämmsystemen der Balken 3, 6 und 7 .....	90
Bild 61	Handgerät mit kombiniertem Temperatur-/Luftfeuchtesensor misst im mit Wärmedämmputz gedämmten Feld die Verhältnisse auf der ehemaligen Bestandsoberfläche .....	93
Bild 62	Temperaturen im Luftspalt zwischen Balkenwange und Mauerwerk in 0,15 m Entfernung von der ehemaligen Bestandsoberfläche an Balken 1-4 (gemittelte Tageswerte).....	97
Bild 63	Temperaturen zwischen Balkenwange und Mauerwerk in ungefähr 0,15 m Entfernung von der ehemaligen Bestandsoberfläche an Balken 5-8 (gemittelte Tageswerte).....	98
Bild 64	Tageswerte der Luftfeuchten im Luftspalt zwischen Balkenwange und Mauerwerk in ungefähr 0,15 m Entfernung von der ehemaligen Bestandsoberfläche an Balken 1-4 .....	99
Bild 65	Tageswerte der Luftfeuchten im Luftspalt zwischen Balkenwange und Mauerwerk in ungefähr 0,15 m Entfernung von der ehemaligen Bestandsoberfläche an Balken 5-8 .....	99
Bild 66	Temperaturen in Stirnholznähe (gemittelte Tageswerte an Balken 1-4) .....	101
Bild 67	Temperaturen in den Balkenauflagern in Stirnholznähe an Balken 5-8 (gemittelte Tageswerte) .....	101
Bild 68	Luftfeuchten an Balkenwangen an Balken 1-4 (gemittelte Tageswerte) .....	103
Bild 69	Luftfeuchten an Balkenwangen an Balken 5-8 (gemittelte Tageswerte) .....	103
Bild 70	Verlauf der absoluten Feuchte von beiden Balkenauflassersensoren in unterschiedlichen Tiefen vom 1.8.2012 bis zum 30.5.2013 in den Auflagern 7 und 8 .....	106
Bild 71	Verlauf der absoluten Feuchte an den beiden Sensoren im Balkenauflasser vom 1.8.2012 bis zum 30.5.2013 in den Auflagern 1 (Zellulose) und 6 (Schilf, abgedichtet) .....	106
Bild 72	Holzfeuchte an der „nassesten Stelle“ in allen Balken (Stundenwerte).....	109
Bild 73	Temperaturkorrigierte (Tages-)Werte der Holzfeuchte an der nassesten Stelle in allen Balken, Betriebszeiten der Luftbefeuchter sowie Zeiträume zwischen 95 und 100 % in der Kleberschicht der Dämmsysteme .....	109
Bild 74	Alle Holzfeuchtesensoren an (Streich-)Balken 1 .....	112
Bild 75	Alle Holzfeuchtesensoren an Balken 8 .....	112
Bild 76	Verlauf der Innenoberflächentemperaturen .....	114
Bild 77	Verlauf der Innenoberflächentemperaturen vom 22.1.2012 bis zum 18.2.2012.....	114
Bild 78	Verlauf der Außenoberflächentemperaturen, sowie Innen- und Außentemperatur Anfang Dezember 2012.....	115



Bild 79	Positionen der Oberflächentempersensoren auf der nach Südwestsüd ausgerichteten Außenwand .....	117
Bild 80	Verlauf der Außenoberflächentemperaturen.....	118
Bild 81	Stundenwerte der Temperaturen und der temperaturkorrigierten Holzfeuchte an Balken	1121
Bild 82	Stundenwerte der relativen Luftfeuchte an Balken 1 .....	121
Bild 83	Stundenwerte der Temperaturen und der temperaturkorrigierten Holzfeuchte an Balken	2123
Bild 84	Stundenwerte der relativen Luftfeuchte an Balken 2 .....	123
Bild 85	Stundenwerte der Temperaturen und der temperaturkorrigierten Holzfeuchte an Balken	3125
Bild 86	Stundenwerte der relativen Luftfeuchte an Balken 3 .....	125
Bild 87	Stundenwerte der Temperaturen und der temperaturkorrigierten Holzfeuchte an Balken	4127
Bild 88	Stundenwerte der relativen Luftfeuchte an Balken 4 .....	127
Bild 89	Stundenwerte der Temperaturen und der temperaturkorrigierten Holzfeuchte an Balken	5129
Bild 90	Stundenwerte der relativen Luftfeuchte an Balken 5 .....	129
Bild 91	Stundenwerte der Temperaturen und der temperaturkorrigierten Holzfeuchte an Balken	6131
Bild 92	Stundenwerte der relativen Luftfeuchte an Balken 6 .....	131
Bild 93	Stundenwerte der Temperaturen und der temperaturkorrigierten Holzfeuchte an Balken	7133
Bild 94	Stundenwerte der relativen Luftfeuchte an Balken 7 .....	133
Bild 95	Stundenwerte der Temperaturen und der temperaturkorrigierten Holzfeuchte an Balken	8135
Bild 96	Stundenwerte der relativen Luftfeuchte an Balken 8 .....	135
Bild 97	Luftfeuchte in Stirnholznähe der Balken 6 bis 8, im Dach- und Obergeschoß sowie Außenbereich (rechte Skala) vom 20.10. 2012 bis zum 25.4.2013 (Tagesmittelwerte).....	136
Bild 98	Luftfeuchte an den Balkenwangen der Balken 6 bis 8, im Dach- und Obergeschoß sowie Außenbereich vom 20.10. 2012 bis zum 25.4.2013 (Tagesmittelwerte) .....	138
Bild 99	Holzfeuchte an der nassesten Stelle der Balkenköpfe und Raumluftfeuchte im Dachgeschoß vom 20.10. 2012 bis zum 25.4.2013 (Tagesmittelwerte).....	139
Bild 100	Temperaturen am Stirnholzbereich der Balken 6 bis 8 sowie im Obergeschoß und Außenbereich vom 20.10. 2012 bis zum 25.4.2013 (Tagesmittelwerte) .....	140
Bild 101	Temperaturen an der Balkenwange in Balkenaufleger 6 bis 8 sowie im Obergeschoß und Außenbereich vom 20.10. 2012 bis zum 25.4.2013 (Tagesmittelwerte) .....	140
Bild 102	Absolute Feuchte im Balkenaufleger 6, in beiden Räumen und im Außenbereich vom 20.10.2012 bis zum 20.4.2013 (Tagesmittelwerte).....	141
Bild 103	Absolute Feuchte im Balkenaufleger 7, an der Messposition ‚ID‘, in beiden Räumen und im Außenbereich vom 20.10.2012 bis zum 20.4.2013 (Tagesmittelwerte) .....	142
Bild 104	Gemittelte Tageswerte der absoluten Feuchte im Balkenaufleger 8, in beiden Räumen und im Außenbereich vom 20.10.2012 bis zum 20.4.2013 .....	142
Bild 105	Verlauf des VTT-Schimmelindex‘ auf der Außenfläche von drei Balkenauflagern .....	144
Bild 106	Klimakammer mit dem „Akademischen Balkenkopftest“ (ATBEB); hier Phase 1 mit eindimensionalem, longitudinalem Transport .....	156
Bild 107	Position des langen Sensors zur Messung der Holzfeuchte (grüne Linie mit Punkt) und Position des dazugehörigen Temperatursensors (roter Punkt) .....	158
Bild 108	Ausschnitte aus 3D-Simulationen mit Heat3D zur Ermittlung der Temperaturdifferenz zwischen den eingezeichneten Punkten: links: Modell für die Balken 2 bis 7 (Schnitt durch Symmetrieebene), rechts: Modell für Streichbalken .....	159
Bild 109	Mauerwerksprobekörper aus einem Gebäude mit teilweise gefüllter Mörtelfuge .....	162
Bild 110	Ansicht der nach Südwestsüd ausgerichteten Fassade am 17. April 2011;.....	163

Bild 111	Links Häufigkeitsverteilung der Windrichtung an zwei Grazer Messstationen ( <i>ZAMG (2019)</i> ), rechts Schlagregenhäufigkeitsverteilung mit der geographischen Ausrichtung der Testwand (KFU Graz/ZAMG vom 1.06.2011 bis zum 01.06.2013).....	164
Bild 112	Verlauf der Außentemperatur und der relativen Luftfeuchte im äußeren Bereich einiger Auflagertaschen sowie Niederschlagsmengen (14.9. bis 29.9.2011).....	165
Bild 113	Links gesamte Feuchtemasse mit und ohne Schlagregeneinwirkung; rechts Profile der relativen Luftfeuchte kurz nach dem Schlagregenereignis und ungefähr 1,5 Tage später .	166
Bild 114	Differenzdruck zwischen Dach-, Obergeschoß und Außenklima gemäß <i>WTA-MB 6-2</i> .....	170
Bild 115	Gemessene und berechnete absolute Luftfeuchten (oben) und Temperaturen (unten) zur Bestimmung der Außenklimamodellierung; Messposition Bestandsoberfläche in Feld 2 ...	174
Bild 116	Gemessene und berechnete Innenoberflächentemperaturen in Feld 2 .....	174
Bild 117	Verlauf der Messwerte und Simulationsergebnisse der Vorzugsvariante im Feld 2; oben Temperaturen auf der Innen- und Bestandsoberfläche, unten absolute Luftfeuchte auf der Bestandsoberfläche .....	179
Bild 118	Verlauf der Messwerte und Simulationsergebnisse der Vorzugsvariante im Feld 5: oben Temperaturen auf der Innen- und Bestandsoberfläche, unten absolute Luftfeuchte auf der Bestandsoberfläche .....	180
Bild 119	Charakteristische Profile im eindimensionalen Querschnitt von Feld 5 für die Temperatur (links), die absolute Luftfeuchte (rechts) und relative Luftfeuchte (unten); senkrechte Striche kennzeichnen die Grenzschichten zwischen den Materialien .....	181
Bild 120	Screenshot der Basisvariante in Feld 2 (Schnitt durch den Balken, Software <i>DELPHIN</i> ) ..	183
Bild 121	Felder der relativen Luftfeuchte aus 2D-Simulation am 28. Februar 2013; Schnitt durch Balken 3 (Perlitedämmplatte) mit zwei unterschiedlichen Farbtabelle .....	184
Bild 122	Temperaturfelder an Balken 3 (Perlitedämmplatte): links vom 28. Februar 2013 und rechts vom 10.11.2011 mit zwei unterschiedlichen Farbtabelle .....	184
Bild 123	Gemessene und berechnete Temperaturen, oben an der Balkenwange, unten vor dem Stirnholz am Balken 3 .....	185
Bild 124	Gemessene und berechnete absolute Luftfeuchte: vorige Seite an der Balkenwange und diese Seite vor dem Stirnholz von Balken 3 .....	187
Bild 125	Gemessene, temperaturkorrigierte und berechnete Holzfeuchte in ca. 10 mm Entfernung vom Stirnholz im Balken 3.....	187
Bild 126	Screenshot der „Basisvariante“ in Feld 5 (Schilf, Screenshot aus <i>DELPHIN</i> ).....	189
Bild 127	Anordnung unterschiedlich langer Luftkanäle (Höhe= 10 mm) unterhalb des Deckenbalkens für einen größeren Luftkontakt (Balken 6, links) bzw. um die Zugänglichkeit für eindringende Raumluft aus dem unteren Geschoß zu erhöhen (Mitte); links reicht der Luftkanal bis zur Außenkante des Bestandputzes, in der Mitte ist er durchgehend (nur Balken 7); rechts ein Foto des Luftspalts ohne Dämmung .....	190
Bild 128	Gemessene und berechnete Temperaturen: oben an der Balkenwange und unten vor dem Stirnholz von Balken 6 (Schilf) .....	191
Bild 129	Gemessene und berechnete absolute Luftfeuchte: oben an der Balkenwange und unten am Stirnholz von Balken 6 (Schilf) .....	192
Bild 130	Gemessene, temperaturkorrigierte sowie berechnete Holzfeuchte in ca. 10 mm Entfernung vom Stirnholz in Balken 6 (Schilf) .....	193
Bild 131	Feld der relativen Luftfeuchte am 28.Februar.2013 von Balkenaufleger 6: links die Basisvariante ohne Luftströmung, in der Mitte mit Luftdruckunterschied, rechts zusätzlich mit „Luftkanal“ unter dem Balken .....	194

Bild 132	Temperaturfeld am 19. Januar 2013 um Auflager 6 aus einer 3D-Simulation: vorne-links Schnitt durch die Mitte des Balkens, hinten-rechts Schnitt durch das Feld (z-Achse nicht proportional) .....	195
Bild 133	Feld der relativen Luftfeuchte am 19. Januar 2013 am Balkenaufleger 6 aus 3D-Simulation ohne Luftdruckeinfluss: vorne-links Schnitt durch die Mitte des Balkens, hinten-rechts Schnitt durch das Feld (z-Achse nicht proportional) .....	196
Bild 134	Gemessene und berechnete Temperaturen: oben an der Balkenwange, unten vor dem Stirnholz von Balken 7 (Schilf) .....	197
Bild 135	Gemessene und berechnete absolute Luftfeuchte: oben an der Balkenwange, unten am Stirnholz von Balken 7 (Schilf) .....	198
Bild 136	Gemessene, temperaturkorrigierte sowie berechnete Holzfeuchte in ca. 10 mm Entfernung vom Stirnholz in Balken 7 (Schilf) .....	199
Bild 137	Felder der relativen Luftfeuchte am 19. Januar 2013 von Auflager 7: links die Basisvariante, in der Mitte mit Luftdruckunterschied, rechts mit sehr hoher Permeabilität der Materialien	200
Bild 138	Temperaturfelder am 19. Januar 2013 von Auflager 7: links die Basisvariante, in der Mitte mit Luftdruckunterschied, rechts mit sehr hoher Permeabilität der Materialien .....	201
Bild 139	Massebezogene Holzfeuchte am Stirnholz bei originaler und nach Westnordwest ausgerichteter, identischer Wand .....	203
Bild 140	Links Schnitt durch den Feldbereich von Feld 2 <i>ohne</i> Dämmung zwischen den Deckenbalken, rechts das (ungedämmte) Feld 5; auf Schimmelpilzwachstum untersuchte Bereiche sind grün umkreist (Screenshot <i>DELPHIN</i> ) .....	205
Bild 141	Verlauf des VTT-Schimmelpilzindex auf der Wandoberfläche am Anschluss der Deckenbekleidung in Abhängigkeit von der Dämmdicke und dem Außenputz .....	207
Bild 142	Felder der relativen Luftfeuchte am 6. März des dritten Jahres: links mit Bestandputz ( $A_w$ -Wert: $3,9 \text{ kg/m}^2\text{h}^{0,5}$ ), rechts mit neuem Putz ( $A_w$ -Wert: $0,5 \text{ kg/m}^2\text{h}^{0,5}$ ) .....	208
Bild 143	Steckdosen in Innendämmsystemen: links Gefahr der Kondensation durch vollständige Unterbrechung der Innendämmung; Lösungsmöglichkeiten durch zusätzliche Hinterdämmung (Mitte) oder durch ausreichend dicke Innendämmung bzw. kleiner Einbautiefe (rechts) .....	244

# A Anhang

## A 1 Sensorverteilung in den Auflagern

Balkennummer (von links nach rechts)	Darmsystem	Balkentiefe durch Bohrloch gemessen (in cm, Achtung = Bohrlänge!); für HF-St	max. Montagehöhe Luftfeuchte / Temperatur an der linken Balkenwanne	Mitte Sensor BA-St	Montagehöhe Luftfeuchte/Temperatur an rechter Balkenwanne Sensormitte BA-Wa	Sensortyp																													
						A		B				C				D				E		F						G							
						Nasseste Holzfeuchte - HF-St	Temperatur	Tiefenprofil Holzfeuchte HF-D15	Temperatur	Tiefenprofil Holzfeuchte HF-FD30	Temperatur	Tiefenprofil Holzfeuchte HF-FD30	Temperatur	Luftfeuchte an der Balkenwanne BA-Wa	Temperatur an der Balkenwanne BA-St	Luftfeuchte Nähe Stirnholz im Balkenaufleger BA-Wa	Temperatur Nähe Stirnholz im Balkenaufleger BA-St	Luftfeuchte ID_a	Luftfeuchte ID_b	Temperatur ID_a	Luftfeuchte ID_b	Temperatur ID_b	Oberflächentemperatur_innen	Oberflächentemperatur_außen	Raumluftfeuchte_1.OG	Raumlufttemperatur_1.OG	Raumluftfeuchte_DG	Raumlufttemperatur_DG	Außenluftfeuchte	Außenlufttemperatur	Globalstrahlung				
1	Zellulose (Streichbalken)	30	40	30	40	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		
2	Zellulose	38	35	38	35	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		
3	Perliteplatte	33	30	33	30	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
4	Wärmedämmputz	28.6	33	28.6	33	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
5	Holzweichfaserplatte	26	28	26	28	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
6	Schiff	25.3	29	25.3	29	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
7	Schiff (Anschluss offen)	28.1	35	28.1	35	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
8	Referenz (ungedämmt)	33.6	38	33.6	38	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
						8	8	2	2	2	2	2	2	8	8	8	8	8	8	6	6	6	6	6	6	3	3	1	1	1	1	1	1	1	96
						Sensoren gesamt												Sensoren defekt							7										

Tab. 30 Messstellenübersicht der eingesetzten Sensoren und Lage der Sensoren im Balkenaufleger

## **A 2 Bauteilkatalog**

Der Bauteilkatalog war Teil des ursprünglichen Projekts OEKO-ID (*Kautsch et al. (2013)*) und wird hier verkürzt wiedergegeben.

Im Vergleich zu diffusionsbremsenden oder –dichten Innendämmsystemen sind diffusionsoffene Systeme in der Regel bei der Verarbeitung einfacher zu handhaben. Dennoch ergeben sich bei Bauteilanschlüssen Fragen hinsichtlich der Ausbildung von speziellen Details.

Der Bauteilkatalog umfasst einige Detaillösungen für Innendämmsysteme, z. B. Innenwandanschlüsse, Anschlüsse an Fenster - und analog an Türen - sowie die Problematik der Befestigung von Gegenständen an einer innen gedämmten Wand oder von Steckdosen. Die Aussagen beziehen sich auf die Systeme des Projektes OEKO-ID und behandeln somit zwei unterschiedliche diffusionsoffene Innendämmsysteme: Innendämmungen, welche mit Hilfe von Maschinen aufgebracht werden können (Wärmedämmputz und Zellulose) und plattenförmige Innendämmsysteme (Perliteplatte, Holzweichfaserplatte und Schilf). Auf diffusionsdichte oder mit Folien arbeitende Dämmsysteme sind die nachstehenden Angaben zum Teil nicht geeignet.

### **A 2.1 Innenwandanschlüsse**

In vielen Projekten ist es notwendig, einbindende Innenwände oder (Massiv-) Decken im Außenwandnahen Bereich zu dämmen. In der Regel genügt dazu ein maximal 500 mm breiter Streifen, der auch als Keil ausgebildet werden kann. Eine Keildicke von ungefähr der Hälfte der Innendämmung ist meistens ausreichend. Durch Simulationen kann im Vorfeld überprüft werden, ob eine solche Anschlussdämmung überhaupt notwendig ist und welche Dimensionen genügen, um der Wärmebrücke zu begegnen. Bestimmte Systeme, wie z. B. das Perlitedämmsystem, enthalten spezielle Dämmkeile, sodass sich kein Absatz, jedoch ein schräger Anschluss bildet. Die Verwendung „systemfremder“ Dämmkeile ist teilweise möglich, wobei die Verträglichkeit der Komponenten im Vorfeld zu klären ist. Beispielweise ist es möglich, dass erst nach einer Vorbehandlung des Dämmkeils die Putzschicht des Dämmsystems auf dem Keil ausreichend haftet. Derartige Dämmanschlüsse verändern das Erscheinungsbild im Raum und können zu Problemen im Zusammenhang mit der Inneneinrichtung führen. Es wird deshalb empfohlen, im Bereich dieser Dämmanschlüsse den Bestandputz des einbindenden Bauteils abzuschlagen, sodass der Keil oder der Absatz im ausgebauten Zustand möglichst geringe Auswirkungen hat. Eine andere Möglichkeit besteht darin, Wärmeleitbleche einzusetzen, welche in der Form des „Thermowinkels“ (Fa. Caparol, Farben Lacke Bautenschutz GmbH) für den Einsatz bei Innendämmmaßnahmen optimiert wurden.

### **A 2.2 Steckdosen**

Lassen sich Steckdosen an einer innen gedämmten Außenwand nicht vermeiden, stellen sie ein Problem dar, weil die Dämmebene teilweise oder in voller Dicke unterbrochen wird. Die Steckdose setzt den Wärmewiderstand lokal herab, feucht-warme Raumluft kann in den Steckdoseneinsatz eindringen und kondensiert bei ungünstigen Randbedingungen darin (Bild 143

links). Können Kabel nicht wie bei aufgespritzten Dämmsystemen gut mit Dämmstoff umschlossen werden, bildet sich immer eine Luftschicht entlang der Kabel, durch welche Luft weiter in die Konstruktion einströmen kann. Eine vorgesetzte Installationsebene wird wegen des zusätzlichen Aufwandes und wegen des Flächenverlustes häufig nicht akzeptiert.

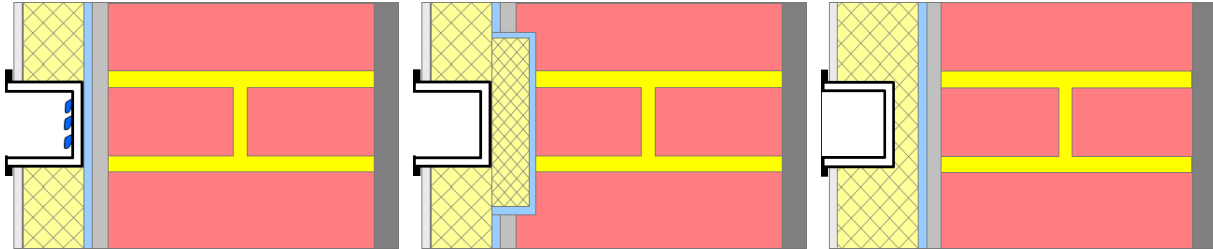


Bild 143 Steckdosen in Innendämmsystemen: links Gefahr der Kondensation durch vollständige Unterbrechung der Innendämmung; Lösungsmöglichkeiten durch zusätzliche Hinterdämmung (Mitte) oder durch ausreichend dicke Innendämmung bzw. kleiner Einbautiefe (rechts)

Je nach Situation wird dadurch nicht automatisch ein Schaden herbeigeführt, besonders bei hohem Dampfdruckgefälle und schlechtem Wärmewiderstand der Bestandskonstruktion oder schlechter Verarbeitung (Luftschichten zwischen Bestand und Dämmung) ist dann jedoch ein lokales Auftreten von Kondensation oder Schimmelpilzen zu befürchten. Die mittlere Lösungsmöglichkeit in Bild 143 ist sicherlich aufwändig, weil eine Vertiefung in der Bestandsmauer ausgestemmt oder gefräst werden muss. Zudem ist die Methode nicht bei dünnen Außenwänden geeignet. Auf der anderen Seite ist dies nur an den wenigen Bereichen für die Steckdose notwendig.

Besonders bei der vergleichsweise einfachen, „herkömmlichen“ Lösung in der rechten Abbildung in Bild 143 ist zu beachten, dass viele Dämmmaterialien von niedriger Dichte und sehr porös sind. Im Lauf der Jahre können sich die Dosen lockern, besonders bei hoher Beanspruchung.

Mittlerweile wurden Steckdosen eingeführt, welche speziell für den Einsatz in Zusammenhang mit Innendämmsystemen entwickelt worden sind („Innendämmungsdose“). Sie enthalten verschiedene Dämmschichten unterschiedlichen Materials, welche Kondensation oder Schimmelpilzwachstum wirksam unterbinden, sind allerdings verhältnismäßig teuer.

### A 2.3 Befestigung von Gegenständen

Für die Befestigung von Gegenständen an innen gedämmten Wänden existieren verschiedene Möglichkeiten, beispielsweise Montagezylinder aus EPS- oder PUR-Hartschaum oder spezielle Dübel. Diese werden in der Dämmung selber verankert. Mit Hilfe von langen Dübeln bzw. Gewindeschrauben lassen sich schwere Lasten durch die Innendämmung im Bestandsmauerwerk verankern. In Einzelfällen kann es dabei vorkommen, dass durch die Wärmebrücke in Form des Befestigungselementes lokal Schimmelpilzwachstum hervorgerufen wird, was durch Simulationen überprüft werden muss.

An Holzleisten, die direkt auf der Bestandswand fixiert werden, lassen sich auch schwere Gegenstände befestigen. Da sie die Dämmung unterbrechen, ist auch hier im Vorfeld auszuschließen, dass dadurch Feuchteschäden hervorgerufen werden.

Für sehr große Lasten sind spezielle, wärmeentkoppelte Bauelemente denkbar, wie sie in ähnlicher Weise für die statische Anbindung von Treppen oder Balkonen verfügbar sind (z. B. von der Firma Dosteba).

### A 3 Umrechnung der Globalstrahlung in direkte und diffuse Strahlung

Bis zum Februar 2012 wurde die Globalstrahlung durch einen horizontal liegenden Sensor erfasst. Für die Umrechnung der Globalstrahlung auf eine Horizontalfläche in eine direkte und diffuse Strahlung, die dann der Wand in den Simulationen zugeordnet werden kann, wurde das im Folgenden beschriebene Vorgehen gewählt.

Fülle (2011) wie auch Dervishi et Mahdavi (2011) befanden für diese Umrechnung das Vorgehen von Reindl et al. (1990) als am Geeignetsten. Ausgehend vom Klarhimmelindex  $k_t$

$$k_t = \frac{Q_{global}}{Q_{extr}} \quad (37)$$

wird der diffuse Anteil  $k_d$  der Globalstrahlung wie folgt berechnet:

$$0 \leq k_t \leq 0,3: \quad k_d = 1,0 - 0,232 \cdot k_t + 0,0239 \cdot \sin(h) - 0,000682 \cdot \theta + 0,0195 \cdot \varphi$$

Bedingung:  $k_d \leq 1,0$  (38)

$$0,3 < k_t < 0,78: \quad k_d = 1,329 - 1,716 \cdot k_t + 0,267 \cdot \sin(h) - 0,00357 \cdot \theta + 0,106 \cdot \varphi$$

Bedingung:  $0,1 \leq k_d \leq 0,97$  (39)

$$\text{für } k_t \geq 0,78: \quad k_d = 0,426 \cdot k_t - 0,256 \cdot \sin(h) + 0,00349 \cdot \theta + 0,0734 \cdot \varphi$$

Bedingung:  $k_d \geq 0,1$  (40)

Anschließend muss der gemessene, direkte Anteil der Globalstrahlung, der auf einer Horizontalfläche gemessen wurde, für die vertikale Wandfläche umgerechnet werden. Dabei wurde vorgegangen, wie in Häupl (2008) oder ähnlich in Fülle (2011), beschrieben. Die Formel

$$G_{dir} = G_{dir,hor} \cdot \left( \cos \alpha + \sin \alpha \cdot \frac{\cos(\alpha - \beta)}{\tan h} \right) \quad (41)$$

wandelt die direkte Sonnenstrahlungswärmestromdichte auf die horizontale Fläche  $G_{dir,hor}$  auf eine beliebig geneigte Bauteilfläche um, wobei die hierfür notwendigen Einzelschritte mit den Worten von Häupl (2008) „etwas aufwändig“ sind.

Argumente für die Berechnungen:

- Breitengrad am Testhaus-Standort =  $47,4^\circ$  und damit  $\chi = 47,4^\circ/180^\circ \cdot \pi = 0,8273$
- Wandneigung  $\alpha = 90^\circ$ , Wandausrichtung  $\beta$
- Erdneigung  $23,5^\circ$

- Äquatorabstand (Deklination) der Sonne:

$$\delta(t) = \frac{23,5^\circ}{180^\circ} \cdot \pi \cdot \sin \left[ \frac{2 \cdot \pi}{T_a} \cdot \left( t + t_a + \frac{T_a}{4} \right) \right] \quad (42)$$

mit der Jahreszeitverschiebung  $t_a = 10$  d und der Jahreslänge  $T_a = 365$  d

- Sonnenhöhenwinkel:

$$h(t) = \text{asin} \left[ \sin(0,8273) \cdot \sin(\delta(t)) - \cos(0,8273) \cdot \cos(\delta(t)) \cdot \cos \left( \frac{2 \cdot \pi}{T_d} \cdot t \right) \right] \quad (43)$$

mit der Tageslänge  $T_d = 1$  d

$h(t)$  nimmt negative Werte an, wenn die Sonne unterhalb des Horizonts ist. Aus diesem Grund wird  $h(t)$  mit der Heavisid'sche Sprungfunktion  $\Phi$  multipliziert, sodass  $h(t)$  minimal den Wert null ergibt:

$$h_3(t) = h(t) \cdot \Phi(h(t)) \quad (44)$$

- Azimutwinkel  $a(t)$  der Sonne:

$$a(t) = \text{asin} \left[ \frac{\cos(\delta(t))}{\cos(h(t))} \cdot \sin \left( \frac{\pi \cdot 2}{T_d} \cdot t \right) \right] \quad (45)$$

$$\text{bzw. } A(t) = \sin(a(t)) \quad (46)$$

Damit  $a(t)$  im Tagesverlauf beständig ansteigt, ist die Verwendung einer Signumfunktion notwendig.



## A 4 Monatliche Klima-Durchschnittswerte

Tab. 31 Monatliche Durchschnittswerte der Temperatur und Luftfeuchte für Dachgeschoß, Kinderzimmer und Außenklima

		Außenklima		Obergeschoß		Dachgeschoß	
		Temp.	RL	Temp.	RL	Temp.	RL
		°C	%	°C	%	°C	%
2010	Sep 10	15,6	80,6	23,2	52,4	21,5	71,9
	Okt 10	9,3	87,0	23,3	38,0	18,3	61,9
	Nov 10	7,8	90,3	22,9	38,0	17,3	62,5
	Dez 10	-1,0	81,8	23,3	19,6	16,4	38,4
2011	Jan 11	0,7	85,4	23,4	18,8	18,6	31,6
	Feb 11	1,0	80,8	23,0	19,2	19,0	29,9
	Mrz 11	7,6	68,3	24,0	23,2	20,5	30,9
	Apr 11	15,0	60,5	24,9	27,9	23,3	32,6
	Mai 11	17,8	68,6	25,6	35,2	24,5	37,1
	Jun 11	20,2	75,7	25,7	44,9	25,5	43,3
	Jul 11	20,8	74,8	26,4	45,2	26,4	44,4
	Aug 11	22,5	78,9	27,6	48,3	27,8	49,1
	Sep 11	19,7	82,0	26,0	48,5	25,9	47,8
	Okt 11	10,8	85,7	24,3	37,8	21,9	44,3
	Nov 11	2,6	90,9	23,7	30,6	19,7	40,0
	Dez 11	0,8	83,4	22,3	30,4	18,7	36,1
2012	Jan 12	-0,2	68,8	21,9	30,9	19,2	35,5
	Feb 12	-2,4	66,9	21,4	38,5	20,2	35,9
	Mrz 12	8,7	56,0	23,2	34,2	22,5	39,6
	Apr 12	10,3	63,6	24,2	28,9	21,9	34,2
	Mai 12	15,1	63,5	25,2	35,7	24,0	36,6
	Jun 12	19,3	71,2	26,1	45,0	26,1	46,6
	Jul 12	20,0	76,5	26,9	49,1	27,3	48,7
	Aug 12	20,8	70,2	27,6	47,7	28,5	49,3
	Sep 12	16,3	78,9	25,2	47,4	24,3	48,5
	Okt 12	9,7	86,9	24,7	40,7	22,3	46,3
	Nov 12	5,8	91,8	22,0	47,7	18,7	55,3
	Dez 12	-0,5	84,7	20,5	46,4	18,4	26,3
2013	Jan 13	-0,3	88,4	21,0	40,9	20,8	57,2
	Feb 13	-0,3	84,4	20,9	40,9	19,2	57,4
	Mrz 13	2,3	78,3	21,7	40,1	20,1	56,7
	Apr 13	9,9	78,6	23,2	36,4	21,6	51,1
	Mai 13	13,1	76,5	23,3	40,4	21,9	47,5

## **A 5 Dissemination - Darstellung der Verbreitungs- und Verwertungsmaßnahmen**

Wegen der praktischen Relevanz des Forschungsgegenstands wurde schon während der Projektphase von OEKO-ID den vorläufigen Ergebnissen ein außerordentlich hohes Interesse entgegengebracht, was sich in der außergewöhnlich hohen Anzahl von nationalen und internationalen Verbreitungs- und Verwertungsmaßnahmen widerspiegelt. Auch an einigen anderen europäischen Einrichtungen wurde und wird an den Wechselwirkungen zwischen Balkenköpfen und Innendämmung geforscht. Dass so hohes Interesse an diesem Projekt besteht, liegt unter anderem an den aussagekräftigen, vielfältigen Messergebnissen und der Verwendung unterschiedlicher Dämmsysteme sowie an der Variation der Einbausituation. Zudem fehlt in anderen Projekten eine vergleichbare, verlässliche Messtechnik.

### **A 5.1 Workshops**

Zusätzlich zu laufenden Abstimmungen innerhalb des Teams des Projektes OEKO-ID fanden folgende Workshops, z.T. unter Einbeziehung von externen Experten statt:

07.12.2010 - Zwischenberichtsworkshop mit Kollegen der TU Dresden/Versuchshaus und IHB

17.11.2011 - Workshop mit allen am Projekt beteiligten Materialherstellern / Versuchshaus und IHB

21.05.2012 - Workshop mit den Projektpartnern / TU Graz, IHB

### **A 5.2 Zusammenarbeit mit anderen Projekten**

Weiters erfolgte ein ständiger Wissens- und Erfahrungsaustausch mit folgenden Projekten:

- „denkMALaktiv“ (DMA): beschäftigt sich unter der wissenschaftlichen Leitung der TU Graz mit der „Sanierung alter, denkmalgeschützter Gebäude auf Aktivhausstandard“. Die praktischen Messungen finden am selben Testhaus statt.
- „Energetische Bewertungsverfahren für Bestandsgebäude mit Holzbalkendecken“: unter Beteiligung der Institut für Bauklimatik (TU Dresden), Fraunhofer Institut für Bauphysik und Hochschule Lausitz in Senftenberg/Cottbus werden an einem Messstand an der TU Dresden und in einem Testhaus in Drebkau bzw. der Alten Schäfflerei in Benediktbeuern die hygrothermischen Verhältnisse in Balkenköpfen untersucht sowie ein Prognosemodell für Holzschädlinge entwickelt
- „Langzeitüberwachung der hygrothermischen Situation an Holzbalkenköpfen im Herrenschießhaus, Nürnberg, Untere Talgasse 8 – im Auftrag des Hochbauamtes Nürnberg“: In einer Zusammenarbeit zwischen der Hochschule Lausitz (jetzt: Brandenburgische Technische Universität Cottbus) und dem Hochbauamt Nürnberg wurden in einem historischen Objekt mehrere Holzbalkenköpfe überwacht. Die Außenwände waren mit mehreren Innendämmsystemen versehen.

- *RIBuild (2019)* ist ein europäisches Forschungsprojekt, welches zum Ziel hat, Richtlinien für die Innendämmung von historischer Bausubstanz zu entwickeln. Die geplante Projektlaufzeit sind die Jahre 2016 bis Ende 2019. Die Erfahrungen im Aufbau von Balkenkopfmessständen und deren Instrumentierung sowie der Simulation von Balkenköpfen wurden den nationalen und internationalen Projektpartnern vermittelt.

### A 5.3 Vorträge auf (Fach-)Tagungen und Konferenzen

Einer breiteren Öffentlichkeit wurden die Ergebnisse aus dem Projekt OEKO-ID bislang auf den folgenden Veranstaltungen und Seminaren vorgestellt:

- DI H. Hengsberger: „Innendämmung - Möglichkeiten und Grenzen“ in der Architektenkammer Salzburg am 15.06.2010
- DI H. Hengsberger bei den 9. Schönauer Expertentagen 18./19.11.2010
- DI H. Hengsberger „Innendämmung bei Bestandsobjekten - Möglichkeiten und Grenzen diffusionsoffener System“ anlässlich des 9. Österreichischen Altbautags in Salzburg am 25.11.2010
- **DI U. Ruisinger** „Der Balkenkopf und die Innendämmung“ auf dem 2. Internationaler Holzbauphysikkongress Holzschutz und Bauphysik am 10.2.2011 in Leipzig
- DI H. Steinwender „Innendämmung bei Bestandsobjekten - Möglichkeiten und Grenzen diffusionsoffener Systeme“, Arbeitskreis Energiekonzepte, Österreichischer Städtebund in Bregenz am 7.4.2011
- **DI U. Ruisinger** „Der Balkenkopf und die Innendämmung“ auf der 6. Fachtagung 2011 der Zimmererinnung Dresden in Dresden-Briesnitz am 9. April 2011
- **DI U. Ruisinger** „Holzbalkendecken bei Innendämmmaßnahmen, Umgang mit Problembereichen“ auf dem 1. Internationaler Innendämmkongress am 20. Mai 2011 in Dresden
- **DI U. Ruisinger** „Umgang mit Problembereichen - Holzbalkendecken bei Innendämmmaßnahmen: Monitoringergebnisse aus einem Grazer Testhaus“ bei der Tagung des Sachverständigen – Verband Mitte e.V. am 19.08.2011 am Seddiner See
- Vortrag + Posterpräsentation DI H. Hengsberger auf der Internationalen Konferenz für hochwertige energetische Sanierung von großvolumigen Gebäuden zum Plusenergiegebäude (ökosan) am 28.-30. 9.2011 in Graz
- **DI U. Ruisinger** „Balkenköpfe und Innendämmung“ auf den 22. Hanseatische Sanierungstage in Heringsdorf (Usedom) am 4.11.11
- **DI U. Ruisinger** „Fachgerechte Sanierung: Holzbalkendecken bei Innendämmung - Umgang mit Problembereichen“ auf der Hochbautagung in der Albrechtsburg Meißen am 10.11.2011 vom Landesverband Sächsischer Bauinnungen des Sächsischen Baugewerbeverband e.V.
- **DI U. Ruisinger** „Wie vertragen sich Holzbalkendecken und Innendämmung?“ auf der 4. Energieeffizienztagung Bauen + Modernisieren in Hannover am 12.11.2011

- DI H. Hengsberger „Innendämmung bei Bestandsobjekten - Möglichkeiten und Grenzen diffusionsoffener System“ am 10. Österreichischer Altbautag in Salzburg 24. November 2011
- Prof. DDr. P. Kautsch „Projekt ÖKO-ID - Diffusionsoffene Innendämmsysteme und Holzbalkenköpfe auf dem Prüfstand“ auf der Tagung des Österreichischer Städtebund in Wels am 19.4.2012
- Prof. DDr. P. Kautsch „Brauchen wir zukünftig noch Heizungsanlagen?“ auf dem Branchentreff 2012 in Pinkafeld am 2.2.2012
- **DI U. Ruisinger** „Balkenköpfe und Innendämmung“ auf der 41. Norddeutschen Holzschutzfachtagung am 1.3.2012 in Schwerin
- **DI U. Ruisinger** „Balkenköpfe und Innendämmung“ auf der 41. Norddeutschen Holzschutzfachtagung am 2.3.2012 in Rostock
- **DI U. Ruisinger** „Innendämmung bei Balkenköpfen in Außenwänden“ auf dem B+B Baudialog Innendämmung in Köln am 4.10.2012
- **DI U. Ruisinger** „Innendämmung bei Holzbalkendecken“ auf der 2. Tagung Nutzerorientierte Bausanierung am 18.10.2012 in Weimar
- **DI U. Ruisinger** „Gefährdung von Holzbalkendecken durch energetische Sanierung“ auf der Herbsttagung des Verbandes der Restauratoren im Zimmererhandwerk am 20.10.2012 in Erfurt
- Prof. DDr. P. Kautsch „Projekt ÖKO-ID - Diffusionsoffene Innendämmsysteme und Holzbalkenköpfe auf dem Prüfstand“ auf der Fachtagung „GovernEE Energy Day“ für Energieeffizienz und Denkmalschutz 25.10.2012 in Graz
- **DI U. Ruisinger** „Innendämmung, Holzbalkenköpfe und Kastenfenster in der Sanierung“ auf der Bauphysiktagung 2012 am 15.11.2012 in Graz
- DI H. Steinwender und DI G. Dörr im Haus der Baubiologie am 26.11.2012 in Graz
- Prof. DDr. P. Kautsch „Holzbalkenköpfe und diffusionsoffene Innendämmungssysteme - Projekt ÖkoID 2012“ am 11. Österreichischer Altbautag 29. November 2012 in Salzburg
- **DI U. Ruisinger** „Balkenköpfe in Außenwänden“ auf der Holzschutztagung des Sächsischen Holzschutzverbandes am 16.03.2013 in Leipzig
- Prof. DDr. P. Kautsch „Kastenfensterlaibung und Holzbalkenkopf mit Innendämmung – zwei Detailpunkte im Fokus“ auf dem 2. Internationalen Innendämmkongress am 13. April 2013 in Dresden
- **DI U. Ruisinger** “Long-term measurements and simulations of five internal insulation systems and their impact on wooden beam heads” auf dem 2nd Central European Symposium on Building Physics (CESBP) am 9. bis 11. September 2013 in Wien
- **DI U. Ruisinger** „Innendämmung und Holzbalkendecken - eine Gefahr? Aktueller Forschungsstand, aktueller Stand WTA Merkblatt! Und was bedeutet das für die Praxis?“ Architektenkongress Innendämmung am 17. Oktober 2013 in Neumarkt (Oberpfalz)
- **DI U. Ruisinger** „Innendämmung und Holzbalkendecken - eine Gefahr? [...] Praxis?“, Architektenkongress Innendämmung 2013 am 24. Oktober 2013 in Celle

- **DI U. Ruisinger** „Innendämmung und Holzbalkendecken - eine Gefahr? [...] Praxis?“, Architektenkongress Innendämmung 2013 am 5. November 2013 in Düsseldorf
- Prof. DDr. P. Kautsch „Messungen und Simulationen von fünf Innendämmsystemen und deren Einfluss auf Holzbalkenköpfe“ auf der Bauphysiktag Kaiserslautern 2013 am 27. und 28. November 2013
- **DI U. Ruisinger** „Holzbalkendecken – eine Herausforderung für die Innendämmung?“, Caparol Werkstofftag 2014 in Ober-Ramstadt am 6. November 2014
- Prof. DDr. P. Kautsch, DI Stefan Holper, DI U. Ruisinger „Kastenfensteranschlüsse im Franziskanerkloster Graz und Erfahrungen bei Holzbalkendecken mit Innendämmung“ auf dem 3. Internationalen Innendämmkongress am 20. Juni 2015 in Dresden
- **DI U. Ruisinger** „Innendämmung - Grundlagen, Anwendung und Anschlussproblematiken“, EIPOS-Tagesseminar am 11.09.2015 in Dresden
- **DI U. Ruisinger** „Innendämmung - Grundlagen, Anwendung und Anschlussproblematiken“, EIPOS-Tagesseminar am 23.09.2016 in Dresden
- **DI U. Ruisinger** „Holzbalkendecken bei Innendämmung“ auf Tagung Komplexe energetische Sanierung von Baudenkmalen am 23.11.2016 in Leipzig
- **DI U. Ruisinger** „Innendämmung - Grundlagen, Anwendung und Anschlussproblematiken“, EIPOS-Tagesseminar am 14.12.2016 in Dresden
- **DI U. Ruisinger** „Innendämmung - Systeme und Materialien“, 15. Forum Energie und Bau in Hannover am 22. Februar 2017
- **DI U. Ruisinger** „Innendämmung - Grundlagen, Anwendung und Anschlussproblematiken“, EIPOS-Tagesseminar am 31.05.2017 in Dresden
- **DI U. Ruisinger** „Innendämmung - Grundlagen, Anwendung und Anschlussproblematiken“, EIPOS-Tagesseminar am 08.03.2018 in Dresden
- **DI U. Ruisinger** „Holzbalkenköpfe und Innendämmung“, WTA-Tag 2018 am 02.03.2018 in Quedlinburg
- **DI U. Ruisinger** „Innendämmung nach WTA“, WTA-Tagesseminar am 02.05.2018 in der Probstei Johannesburg
- **DI U. Ruisinger** „Sind Holzbalkendecken durch Innendämmung gefährdet?“, 12. Energieberater-Expertentreff am 06.09.2018 in der Handwerkskammer Dresden
- **DI U. Ruisinger** „Innendämmung nach WTA“, Tagesseminar im Hochbauamt Frankfurt am 08.10.2018 in der Frankfurt
- **DI U. Ruisinger** „Innendämmung nach WTA“, Tagesseminar (No. 2) im Hochbauamt Frankfurt am 18.10.2018 in der Frankfurt
- **DI U. Ruisinger** „Holzbalken und Innendämmung - (k)ein Widerspruch?“, Multipor Fachseminar „Innendämmung im Baudenkmal“ auf der Denkmalmesse Leipzig am 09.11.2018
- **DI U. Ruisinger** „Einbau von Balkenköpfen“, 28. Holzschutztagung 2019 in Leipzig am 16.03.2019
- **DI U. Ruisinger** „Holzbalken im Außenmauerwerk“, EIPOS-Fortbildung Sachverständiger für Schäden an Gebäuden – Stufe II in Dresden am 22.03.2019

## A 5.4 Publikationen

Folgende Print-Publikationen in Zeitschriften, Büchern oder Tagungsbänden berichten zentral über das Projekt OEKO-ID unter Beteiligung des Verfassers:

Ruisinger U, Kautsch P, Hengsberger H: „Holzbalkendecken bei Innendämmmaßnahmen, Umgang mit Problembereichen“, Tagungsband 1. Internationaler Innendämmkongress, TU Dresden 2011, S. 119-126

Ruisinger U, Kautsch P, Hengsberger H: Wie vertragen sich Holzbalkendecken und Innendämmung? Tagungsband zur 4. EffizienzTagung Bauen und Modernisieren am 11. und 12. November 2011, Hannover (Eigenverlag)

Ruisinger U, Kautsch P, Plagge R: „Balkenköpfe und Innendämmung“ in BUFAS e.V., (Hrsg.): Wärmeschutz und Altbausanierung, Beuth Verlag Berlin 2011, S. 91-104

Ruisinger U: „Risikofaktor Balkenkopf? Holzbalkendecken und die Innendämmung“, Holzbau Heft 01/2011, S. 18-22

Ruisinger U: „Der Balkenkopf und die Innendämmung“ in AKÖH (Hrsg.): Tagungsband zum 2. Internationaler Holzbauphysikkongress Holzschutz und Bauphysik, Leipzig 2011, S. 34-37

Ruisinger U, Kautsch P, Plagge R: „Balkenköpfe und Innendämmung“ Tagungsband zur 41. Norddeutschen Holzschutzfachtagung, Eigenverlag 2012, S. 62-74

Ruisinger U, Kautsch P, Plagge R: „Und es funktioniert doch“, B+B Magazin 4 (2012), S. 56-59

Grobbauer M, Kautsch P, Ruisinger U: Wärmeschutz – aktuelle Problematiken bei historischen Objekten in Denkma(i)l - Initiative Denkmalschutz 11 (2012), S. 24-26

Ruisinger U: „Innendämmung bei Holzbalkendecken“ in: Völker V, Kornadt O (Hrsg.): Schriftenreihe der Professur Bauphysik Band 4, 2. Tagung Nutzerorientierte Bausanierung, Verlag der Bauhausuniversität Weimar, 2012, S. 101-105

Grobbauer M, Ruisinger U: Innendämmung, Holzbalkenköpfe und Kastenfenster in der Sanierung im Tagungsband der Bauphysiktagung 2012, Eigenverlag

Ruisinger U: “Long-term measurements and simulations of five internal insulation systems and their impact on wooden beam heads” proceedings 2nd Central European Symposium on Building Physics (CESBP) 2013 in Wien, p. 313-319

Kautsch P, Ruisinger U: „Messungen und Simulationen von fünf Innendämmsystemen und deren Einfluss auf Holzbalkenköpfe“ im Tagungsband der Bauphysiktage Kaiserslautern 2013

Kehl D, Ruisinger U: „Holzbalkenköpfe im Mauerwerk – Was strömt denn da? Holzbau Die Neue Quadriga 5/2013, S. 39-42

Bishara A, Ruisinger U, Plagge R: Planing of Interventions - Hygrothermal Simulation, in Troi A, Bastian Z: Energy Efficiency Solutions for Historic Buildings - A Handbook, Birkhäuser Verlag GmbH, 2014, S. 105-118

Kautsch P, Holper D, Ruisinger U. „Kastenfensteranschlüsse im Franziskanerkloster Graz und Erfahrungen bei Holzbalkendecken mit Innendämmung“, Tagungsband zum 3. Internationalen Innendämmkongress, TU Dresden, 2015

Ruisinger U et al. „Holzbalkenaufleger in historischem Mauerwerk: Analyse, Bewertung und energetische Sanierung mittels Innendämmung“ in Jäger W (Hrsg.): Mauerwerkskalender 2016, Ernst und Sohn, 2016, S. 351-381

Arnold U, Ruisinger U: Innendämmung bei Holzbalkendecken – Regeln für eine schadensfreie Sanierung in Weller B, Horn S (Hrsg.): Denkmal und Energie 2016, Springer Vieweg, 2016, S.65-78

Energetische Bewertungsverfahren für Bestandsgebäude mit Holzbalkendecken, Abschlussbericht, <https://projektinfos.energiewendebauen.de/projekt/software-zur-hygrothermischen-planung-von-baukonstruktionen/>, Abschlussbericht TU Dresden 2017

Unter Mithilfe des Verfassers flossen die Erfahrungen des Projektes OEKO-ID (*Kautsch et al. (2013)*) zudem in die Ausarbeitung des WTA- Merkblatt 8-14 „Ertüchtigung von Holzbalkendecken nach WTA II - Balkenköpfe in Außenwänden“, mit ein. Dieses Merkblatt wird unter Mitwirkung des Verfassers ab 2020 überarbeitet werden. Die Überarbeitung wird durch die Ergebnisse dieser Arbeit maßgeblich mitbestimmt werden.