



OEKO-ID - Innendämmungen zur thermischen Gebäudeertüchtigung

**Untersuchung der Möglichkeiten und Grenzen
ökologischer, diffusionsoffener Dämmsysteme**

Endbericht Oktober 2013



Projektleitung:

Univ.-Prof. DDr. Peter Kautsch
DI Ulrich Ruisinger
DI Herwig Hengsberger

Institut für Hochbau und Bauphysik
Technische Universität Graz
Lessingstraße 25/3, 8010 Graz
Inffeldgasse 24, 8010 Graz
www.ihb.tugraz.at
T: +43.316.873.6240
F: +43.316.873.6740
E: kautsch@tugraz.at

Projektpartner:

Arch. DI Hartwig Steinwender
Ing. Günter Dörr
Karl Kukowetz

Haus der Baubiologie Graz
Moserhofgasse 37, 8010 Graz,
www.haus-der-baubiologie.at
T: +43.316.475363
F: +43.316.475363-14
E: office@haus-der-baubiologie.at

Priv.-Doz. Dr. Katja Sterflinger
Mag. Jörg Ettenauer

Institut für Angewandte Mikrobiologie
Universität für Bodenkultur Wien
Muthgasse 18, 1190 Wien
www.boku.ac.at/iam
T: +43.1.36006.6260
F: +43.1.3697615
E: Katja.Sterflinger@boku.ac.at

OEKO-ID wird im Rahmen der Programmlinie „Neue Energien 2020“ vom Klima- und Energiefonds gefördert und von der Steiermärkischen Landesregierung sowie vom Bundesministerium für Unterricht, Kunst und Kultur kofinanziert.

Inhaltsverzeichnis

1	Technisch-wissenschaftliche Beschreibung der Arbeit	4
1.1	Projektabriss	4
2	Testhaus und energetische Sanierung	6
2.1	Literaturrecherche	6
2.2	Auswahl der Dämmsysteme.....	7
2.3	Planung Versuchsgebäude	8
2.4	Adaptierung Versuchsgebäude	8
2.5	Vorbereitende Arbeiten	10
2.6	Installation Messtechnik	11
2.7	Montage der Dämmsysteme	14
2.8	Baupraktische Erfahrungen im Spiegel des WTA-Merkblatts E-8-14	18
2.9	Beschreibung der verwendeten Dämmsysteme	20
2.10	Bewertung der verwendeten Dämmstoffe bezüglich der Verarbeitung	26
2.11	Vergleich der Dämmsysteme bezüglich OI3- Index.....	29
2.12	Erfahrungen beim Rückbau und der Entsorgung.....	31
2.13	Zusammenfassung der Eigenschaften der Dämmsysteme	39
2.14	Reduzierung der Transmissionswärmeverluste durch Innendämmmaßnahmen.	41
3	Hygrothermische Materialkennwerte und -funktionen.....	43
3.1	Materialuntersuchungen	43
3.2	Beprobung	44
3.3	Messverfahren	45
3.4	Verifizierungsexperimente: kontinuierliche Wasseraufnahme und Abtrocknung.....	52
3.5	Erstellung von Materialfunktionen	53
3.6	Zusammenfassung der Eigenschaften der Materialien und Innendämmsysteme ...	62
4	Mikrobiologische Untersuchungen und Methodenentwicklung	67
4.1	Vorgehen	67
4.2	Ergebnisse	75
5	Hygrothermische Vor-Ort-Messungen	81
5.1	Auswertung der Messdaten.....	81

5.2	Außen- und Raumklima.....	82
5.3	Temperatur und Luftfeuchte auf der Bestandsoberfläche	94
5.4	Temperatur und Luftfeuchte in der Mitte der Balkentasche	105
5.5	Temperatur und Luftfeuchte vor dem Stirnholz	109
5.6	Holzfeuchtemessungen.....	115
5.7	Oberflächentemperaturen	121
5.8	Temperatur- und Feuchteprofile an den Balken	125
5.9	Abdichtung der Balkenauflagertaschen	140
5.10	Mögliches Schimmelpilzwachstum in den Balkenauflagern	147
5.11	Konvertieren und Auswerten der Messungen	149
5.12	Resümee der hygrothermischen Messungen	149
6	Hygrothermische Simulationen	152
6.1	Verwendete Simulationsprogramme	152
6.2	Temperatur-Korrektur der Holzfeuchtesensoren	154
6.3	Einfluss von Schlagregen.....	158
6.4	Berücksichtigung der Permeabilität der Baumaterialien.....	162
6.5	Simulation der Messergebnisse	166
6.6	Simulation der Grenzsicht Dämmsystem/ Bestandskonstruktion.....	168
6.7	Simulation eines Balkenkopfs	170
7	Dissemination - Darstellung der Verbreitungs- und Verwertungsmaßnahmen	174
7.1	Workshops.....	174
7.2	Zusammenarbeit mit anderen Projekten.....	175
7.3	Vorträge auf (Fach-)Tagungen und Konferenzen.....	175
7.4	Publikationen	178
8	Zusammenfassung.....	180
8.1	Technologische und ökologische Bewertung der Dämmsysteme.....	180
8.2	Bestimmung der Materialeigenschaften.....	181
8.3	Mikrobiologische Untersuchungen und Methodenentwicklung	181
8.4	Hygrothermische Vorortmessungen.....	182
8.5	Hygrothermische Simulationen	183
8.6	Dissemination	184

9	Literaturverzeichnis	185
10	Unterschrift	192
A1	Anhang zum Abschnitt 2 Versuchsaufbau	193
A2	Anhang zum Abschnitt 4 - Mikrobiologische Untersuchungen	194
A3	Abdruck der Publikationen in internationalen wissenschaftlichen Zeitschriften	208
A4	Bauteilkatalog	230
A5	Monatliche Klima-Durchschnittswerte	247

1 Technisch-wissenschaftliche Beschreibung der Arbeit

1.1 Projektabriss

1.1.1 Ausgangssituation/Motivation des Projektes

Im Zuge der weltweiten Bestrebungen zur Energieeinsparung kommt der thermischen Erüchtigung bestehender Bausubstanz besondere Bedeutung zu. Dabei bieten Innendämmungen die technisch sinnvolle Möglichkeit, den U-Wert bestehender, ggf. denkmalgeschützter Außenwände um rund 50 – 80 % zu senken, die behaglichkeitsrelevanten inneren Oberflächentemperaturen zu erhöhen und das Risiko von Schimmelpilzbefall der Wandoberflächen zu reduzieren.

Neben den bereits seit längerem bekannten Ausführungen mit innen liegender Dampfbremse oder dampfdichten Dämmstoffen verfolgen neuere, diffusionsoffene Konstruktionen das Ziel, schädliche Wasserdampfkondensation unter Ausnutzung der hohen Sorptions- und kapillaren Leitfähigkeit des Dämmmaterials zu vermeiden. Vergleichende, belastbare Daten zu neueren Innendämmsystemen insbesondere im Hinblick auf die Problematik der Holzbalkenköpfe fehlen allerdings fast vollständig und gelangen erst neuerdings verstärkt in den Fokus.

Das Projekt verfolgt daher das Ziel, diffusionsoffene Innendämmsysteme produktneutral zu analysieren und feuchtetechnisch kritische Anschlüsse von Innenwänden und Holzbalkendecken weiter zu entwickeln. Da in Zukunft der Nachhaltigkeit von Bausystemen besonderes Augenmerk zu schenken sein wird, kommt der ökologischen Unbedenklichkeit der Dämmsysteme besondere Bedeutung zu.

Dabei baut das Projekt OEKO-ID unter anderem auf den Ergebnissen der Vorgängerprojekte „Grundlegende bauphysikalische und werkstofftechnische Untersuchungen zu aufgespritzten Zellulosedämmschichten mit Putzauflage für Außenfassaden“ sowie „Zellulose-Innendämmung ohne Dampfsperre“ auf, welche im Rahmen der Programmlinie „Haus der Zukunft“ durchgeführt wurden [Kautsch et al. 2006].

Weiter wird innerhalb des Projektes eine molekularbiologische Methode zum Nachweis und zur Quantifizierung von mikrobiologischem Befall an Baumaterialien entwickelt und kommt als Werkzeug für das Monitoring zum Einsatz. Diese Entwicklung stellt eine richtungsweisende Innovation im Bereich der Baubiologie dar, da sie den zuverlässigen und reproduzierbaren Nachweis der gesamten Population von Mikroorganismen mit minimalen Probenmengen, also nahezu zerstörungsfrei, ermöglicht.

1.1.2 Zielsetzungen des Projektes

Ziel des Projektes ist neben der grundlegenden Analyse und Weiterentwicklung der für Innendämmungen tendenziell problematischen Bauteilanschlüsse wie Übergänge zu Holzbalkendecken, Zwischenwänden, Fenster- und Türleibungen, die produktneutrale Beurteilung der Verwendung von ökologisch unbedenklichen 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.

Weiters sollen die Möglichkeiten und Grenzen des Einsatzes hygrothermischer Simulationsberechnungen untersucht werden, um die Auswirkungen zukünftiger Innendämmmaßnahmen ohne aufwändige Messungen abschätzen zu können und die Verbreitung dieser anspruchsvollen Maßnahme zur Energieeinsparung zu unterstützen.

Als Ergebnis des Projektes sollen Lösungen für feuchtetechnische Problempunkte sowie ein Konzept in Form von Präsentationsvorlagen für den aktiven Wissenstransfer zu Entscheidungsträgern und Ausführenden vorliegen.

Eine weitere Zielsetzung des Projektes ist die Entwicklung und Optimierung molekularbiologischer Methoden für baubiologische Untersuchungen. Bei herkömmlichen Untersuchungen an Baumaterialien bzw. Dämmsystemen werden überwiegend klassische Kultivierungsversuche angewandt um Schimmelpilze und Bakterien aus den Proben zu isolieren. Neben dem Vorteil, dass lebende Mikroorganismen erhalten werden, haben diese Verfahren jedoch gravierende Nachteile: zum einen werden relativ große Probenmengen benötigt, sodass zerstörungsfreie Entnahmen nahezu unmöglich sind. Zum anderen sind diese Kultivierungsversuche sehr zeit-intensiv. Der dritte, sehr entscheidende Nachteil sind die Selektivität und die Detektionsgrenzen dieser Methoden. Viele Untersuchungen haben gezeigt, dass durch klassische Kultivierung nur ca. 15 % der tatsächlich vorhandenen Pilze kultiviert werden können. Im Fall von Bakterien liegen die Schätzungen sogar bei nur ca. 1 %. Die große Innovation in diesem Projekt ist der Versuch die Mikroorganismen über deren DNA nachzuweisen. Mit Hilfe dieser molekularbiologischen Methode kann ein wesentlich größerer Anteil der tatsächlich vorhandenen Mikroorganismen nahezu zerstörungsfrei detektiert werden.

1.1.3 Aufbau und Methodik des Projektes

- AP 1 Literaturrecherche, Ökologische Bewertung und Auswahl Dämmsysteme (siehe Abschnitte 2.2 und 2.9 bis 2.12)
- AP 2 Planung Versuchsgebäude und Konzeption Messtechnik (siehe Abschnitt 2.3)
- AP 3 Adaptierung Versuchsgebäude (siehe Abschnitt Abb. 2)
- AP 4 Installation Messtechnik und Applikation Dämmsysteme (siehe Abschnitte 2.6 und 2.7)
- AP 5 Betrieb Versuchsgebäude und hygrothermische Messungen (siehe Abschnitt 5)
- AP 6 Bestimmung Materialkennwerte (siehe Abschnitt 3)
- AP 7 Hygrothermische Simulationsberechnungen (siehe Abschnitt 6)
- AP 8 Mikrobiologische Untersuchungen und Methodenentwicklung (siehe Abschnitt 4)

AP 9 Dissemination (siehe Abschnitt 7)

AP 10 Projektsteuerung und Berichtswesen

Von besonderer Bedeutung war die Akquise zweier übereinander liegender Versuchsräume mit einer ausreichend großen Anzahl von Holzbalken, welche auf derselben Außenwand aufliegen, wobei über einen Zeitraum von zumindest zwei Jahren weder die Außenwand noch die Raumnutzung für das Projekt nachteilig verändert werden durften.

2 Testhaus und energetische Sanierung

2.1 Literaturrecherche

In der Literatur wird auf die nicht unbeträchtlichen Herausforderungen hingewiesen, die Innendämmungen an Planung und Ausführung stellen und insbesondere der luftdichte Anschluss der Dämmebene an durchdringenden Bauteilen wie z. B. Holzbalkendecken, gefordert (siehe z. B. [Hessisches Ministerium 2006]). Um die Holzbalkenköpfe vor zu großer Feuchtigkeitsbelastung zu bewahren, werden unterschiedliche Maßnahmen vorgeschlagen.

Vor über 100 Jahren beschäftigte sich [Stade 1904] ausführlich mit Holzbalkenköpfen und empfahl eine Luftumspülung, die eine um die Holzbalken *„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. Zu dieser Zeit existierte allerdings noch nicht die Verunsicherung, die durch das Aufkommen vermehrter Innendämmmaßnahmen entstand. Kapillaraktive Innendämmungen und Softwarewerkzeuge zu deren Berechnung wurden erstmals an der TU Dresden untersucht bzw. mit entwickelt (z. B. [Fechner et al. 1996]). [Gnoth et al. 2005] und [Loga et al. 2003] griffen den Zusammenhang zwischen Innendämmung und Holzbalkendecken innerhalb von Forschungsprojekten in größerem Umfang auf und konstatierten den untersuchten Innendämmkonstruktionen ein unkritisches Verhalten. Allerdings war der Wärmewiderstand der Innendämmsysteme gering. Die aus den Untersuchungen erwachsenen Empfehlungen sind zum Teil sehr aufwändig. Der [Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser 2005] legt ausgesprochen aufwändige Dichtungsmaßnahmen mit Bitumen oder Dispersionsanstrichen nahe, [Stopp et al. 2010] und [Häupl 2010] plädieren für eine Wärmezufuhr über verschiedene Arten von „Heat-Pipes“ oder bewussten Wärmebrücken. [Ronacher 2011] dagegen schlägt das Abschneiden der Holzbalken und eine komplette Änderung der Auflagerkonstruktion vor. Auch das [WTA Merkblatt 6-4] spricht zwar von der Gefahr des Wärmebrückeneffektes von Holzbalken, gibt aber keine Lösungsvorschläge an. Auch sind trotz einiger Projekte, die sich mit der Messung der hygro-thermischen Situation im Bereich der Holzbalkenköpfe befassen (z. B. [Silberhorn 2008]), keine vergleichenden Untersuchungen der Auswirkungen von unterschiedlichen Innendämmsystemen auf die Holzbalken bekannt.

Neuere Bemühungen konzentrieren sich stärker auf die computertechnische Simulation des konstruktiven Details und auf Versuchsaufbauten in Laboren [Kehl et al. 2013b]. Einige wenden zweidimensionale Computerprogramme an, ohne sie anhand von Messungen einer realen Situation überprüfen zu können (z. B. [Morelli 2010] oder [Ueno 2012]), oder sie sind mit einem impraktikablem Zeitaufwand bezüglich Softwareumgebung und Zeitaufwand für die Simulationen verbunden [Janetti et al. 2011]. Vielversprechende Laborversuche unter kontrollierten Klimabedingungen sind ermutigend [Guizzardi et al. 2013], der vereinfachte und konstruktiv idealisierte Versuchsaufbau unter vergleichsweise konstanten Klimabedingungen lassen eine Übertragbarkeit auf reale Verhältnisse jedoch nur sehr eingeschränkt zu.

In der Recherche konnte festgestellt werden, dass vergleichende, belastbare Daten zu neueren Innendämmsystemen kaum vorhanden sind. Daher wurde bei der Auswahl der Dämmsysteme neben der ökologischen Qualität besonderes Augenmerk auf ein ausgewogenes Verhältnis von industriell vorgefertigten, plattenförmigen oder vor Ort aufgespritzten und anorganischen bzw. organischen Materialien gelegt. Eine Auswahl der verwendeten und weiter führenden Literatur befindet sich unter Abschnitt 9.

2.2 Auswahl der Dämmsysteme

Ein Ziel des Projektes war die produktneutrale Beurteilung der Verwendung ökologisch unbedenklicher Baustoffe. Im Hinblick auf eine möglichst große Bandbreite unterschiedlicher Konstruktionen und Materialien wurden folgende Dämmsysteme ausgewählt. Die angegebene Wärmeleitfähigkeit λ entsprechen den von den Herstellern angegebenen derzeitigen Rechenwerten:

- 80 mm aufgespritzte Zellulose ($\lambda = 0,052 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$) + Kalkzementputz – organisch
- 80 mm Perliteplatten ($\lambda = 0,045 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$) + Deckputz/Spachtelung - mineralisch
- 120 mm Thermosilitputz ($\lambda = 0,075 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$) + Deckputz - mineralisch
- 60 mm Holzweichfaserplatten ($\lambda = 0,041 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$) + Lehmputz - organisch
- 100 mm Schilf ($\lambda = 0,060 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$) + Lehmputz - organisch

Der Thermosilitputz wird im vorliegenden Bericht auch häufig als Wärmedämm- bzw. Dämmputz bezeichnet.

Die Dämmstoffdicken der einzelnen Materialien wurden in einem ersten Schritt auf die Zielvorgabe, den damals vermuteten U-Wert der bestehenden Außenwand von ca. $1,16 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ auf rund die Hälfte zu verringern, ausgelegt. Im nächsten Schritt bildeten die verfügbaren Dimensionen der plattenförmigen Materialien 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 zu hoch war und korrigiert werden musste. Darauf wird in einem späteren Kapitel eingegangen.

2.3 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 Schönbrunnngasse 30, 8043 Graz, akquiriert werden. Das Objekt soll in naher Zukunft generalsaniert werden, wobei im Idealfall die Erkenntnisse des Forschungsprojektes umgesetzt werden.



Abb. 1 Südost-Ansicht Kindergarten / Kinderkrippe Schönbrunnngasse 30

Abb. 2 Südturm mit dem unteren Versuchsraum im 1. Obergeschoss und dem oberen Versuchsraum im Dachgeschoss

2.4 Adaptierung Versuchsgebäude

Das Objekt weist zwei übereinander liegende Räume mit dazwischen liegender Holztramdecke sowie entsprechend langer Außenwand auf, sodass alle fünf Dämmsystem-Felder mindestens einen Holzbalken in derselben Außenwand enthielten und zudem ein Referenzfeld für die Messung eines ungedämmten Balkenfeldes zur Verfügung stand. Sechs verschiedene Wandaufbauten mit 8 Balken konnten so beprobt werden (Abb. 3). Balken 9 wurde nicht mit Messtechnik versehen (Tab. 1). Abb. 3 dokumentiert die Breite und Zuordnung der Dämmsysteme. Ferner sind die Auflagertiefen angegeben sowie die Breite des Luftspalts unterhalb der Einschubdecke. Die Breiten der Luftspalten sind umlaufend unregelmäßig gemauert und unterscheiden sich teilweise schon auf einer Seite des Balkens.

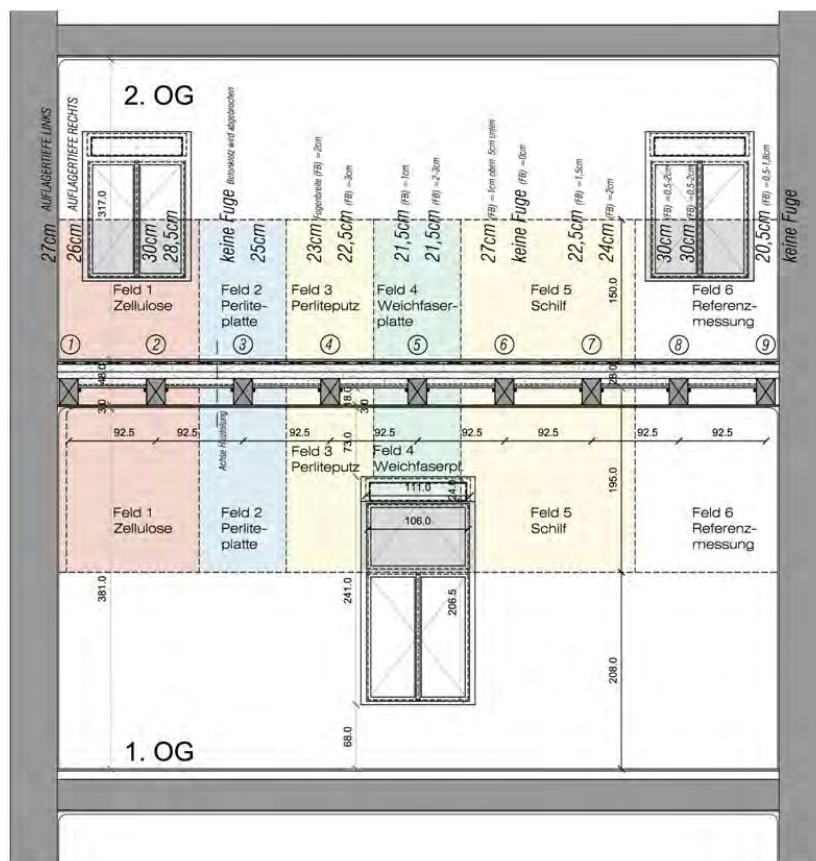


Abb. 3 Vertikalschnitt durch die beiden Versuchsräume mit Darstellung der Messfelder und Maße

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 Gebäudeecke ist durch niedrigere Temperaturen gekennzeichnet und hat damit ein höheres Kondensationsrisiko
2	3	Perliteplatte	
3	4	Thermosilitputz	
4	5	Holzweichfaserplatte	
5	6 & 7	Schilf	enthält mit Balken 6 eine hier „konventionelle“, d.h. nur im OG maximal gegenüber dem Dämmsystem abgedichtete Balkentasche und mit Balken Nr. 7 den Sonderfall eines nicht abgedichteten Balkens, zu dem das Dämmsystem 20-30 mm Abstand hält, s. Abschnitt 2.7
6	8	- (keine)	Unveränderter, „historischer“ Wandaufbau mit nicht abgedichtetem Auflager wie Balken Nr. 7

Im Weiteren werden die beiden Zimmer lediglich mit Obergeschoss, dort werden werktags Kinder betreut, und Dachgeschoss bezeichnet.

2.5 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 Nuttschicht, einem ca. 20 mm starken Holzterrazzo geklebt worden war. Darunter befinden sich 30 mm dicke Holzdielen, die auf in Ziegelschutt und Kalkresten schwimmende Polsterhölzer genagelt wurden. Der Ziegelschutt wurde entlang der Wand so weit entfernt bis zwei Deckenbalken und somit die Spannrichtung der Decke sichtbar wurde (Abb. 4). Diese Öffnung wurde wieder mit dem ausgelösten Material geschlossen.



Abb. 4 Links Deckenöffnung im Dachgeschosszimmer (DG) und rechts im Zimmer des Obergeschosses (OG)

In weiterer Folge wurde die Decke über die gesamte Wandbreite von unten geöffnet. In keinem Luftspalt um den Balkenkopf wurde unterseitig des Einschubs Schüttung 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 Hohlraum und die unverputzte Wandfläche zw. den Balken und die Stülp-schalung als Einschnittdecke sichtbar. Die Anzahl aller Balken konnte mit 9 Balken bestätigt werden (Abb. 4).

Als Vorbereitung des Untergrundes war es notwendig, den fehlenden Putz zwischen den Balken bis zur Einschnittdecke mit einem Kalkputz zu ergänzen. Selbst dünne Farbschichten

auf den Wandoberflächen können durch ihre Feuchtetransporteigenschaften das hygromische Verhalten entscheidend beeinflussen. Die im Laufe der Zeit aufgetragenen Farbschichten wurden deshalb auf der gesamten Wandoberfläche abgeschert. So war das hygromische Verhalten besser zu fassen.

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 um eine übergreifende Ausbreitung von mikrobiologischen Stoffen zu verhindern.

2.6 Installation Messtechnik

Das Messkonzept sah sieben Sensortypen mit insgesamt 96 Einzelsensoren vor. Dabei waren je zwei sehr dünne, kombinierte Luftfeuchte-/Temperaturfühler (Sensoren ‚ID‘, Abb. 5 ganz rechts) pro Innendämmsystem an der Grenzschicht zwischen Bestandsmauerwerk und Dämmsystem, ca. 200 mm unter der Deckenuntersicht platziert (Abb. 7 und Abb. 9). Zwei weitere, ebenfalls speziell entwickelte, kombinierte Luftfeuchte-/Temperatur-sensoren wurden an den Wangen jedes Holzbalkens mittels spezieller Edelstahleinschlaghülsen, einmal in der maximalen Tiefe der Balkennische, in der Nähe der Stirnseite der Deckenbalken (Sensoren ‚BA-St‘) und einmal 150 mm von der Bestandsputzoberfläche entfernt an der Balkenwange (Sensoren ‚BA-Wa‘), montiert (von links Sensoren Nr. 5 und 6 in Abb. 5).



Abb. 5 Spezielle Sensoren zur Holzfeuchtemessung (1.+ 2. von links) und für die Luftfeuchte- und Temperaturmessung

Zusätzlich sind kombinierte Luftfeuchte- / Temperatursensoren in den beiden Innenräumen und im Außenbereich angeordnet sowie Oberflächentemperatursensoren. Die Holzfeuchte wurde durch getaktete Messung des elektrischen Widerstandes zwischen zwei Einschlag Elektroden gemessen. In allen Balken an der potentiell nassesten Stelle (Sensoren ‚HF-St‘) und in den Balken 1 und 8 jeweils in einer Tiefe von 15 und 30 mm von der seitlichen Außenfläche ungefähr in der Ebene der Innendämmung (Sensoren ‚HF-ID15‘ bzw. ‚HF-ID30‘, Abb. 5 ganz links und Abb. 8). Die Sensoren ‚HF-St‘ bestanden aus ungefähr 0,4 m langen Stahlelektroden, welche in vorgebohrte Löcher eingetrieben wurden. Da die Decken über die gesamte Länge nur von unten geöffnet wurden, setzten die Sensoren ‚HF-St‘ an der Balken-

unterseite in der Ebene der Innendämmung an und führten dann schräg nach oben bis zum Stirnholz. Da an der Balkenunterseite gegebenenfalls noch Feuchte aus dem Mauerwerk aufgenommen wird, wäre eine Sensorführung vom Dachgeschoss schräg nach unten wünschenswert gewesen.

Die Widerstandsmessungen erfassten den geringsten Widerstand zwischen den Elektroden, sodass immer die „nasseste Stelle“ gemessen wurde. Durch die Länge der Sensoren kann allerdings nicht genau bestimmt werden, wo genau diese Stelle sich befindet. Einige Sensoren wurden entsprechend den speziellen Anforderungen des Projekts von der Fa. Humimeter / Schaller GmbH entwickelt (Nr. 5, 6 und 8 von links in Abb. 5). Eine Übersichtstabelle mit den eingesetzten Sensoren befindet sich im Anhang (siehe Tab. 26).

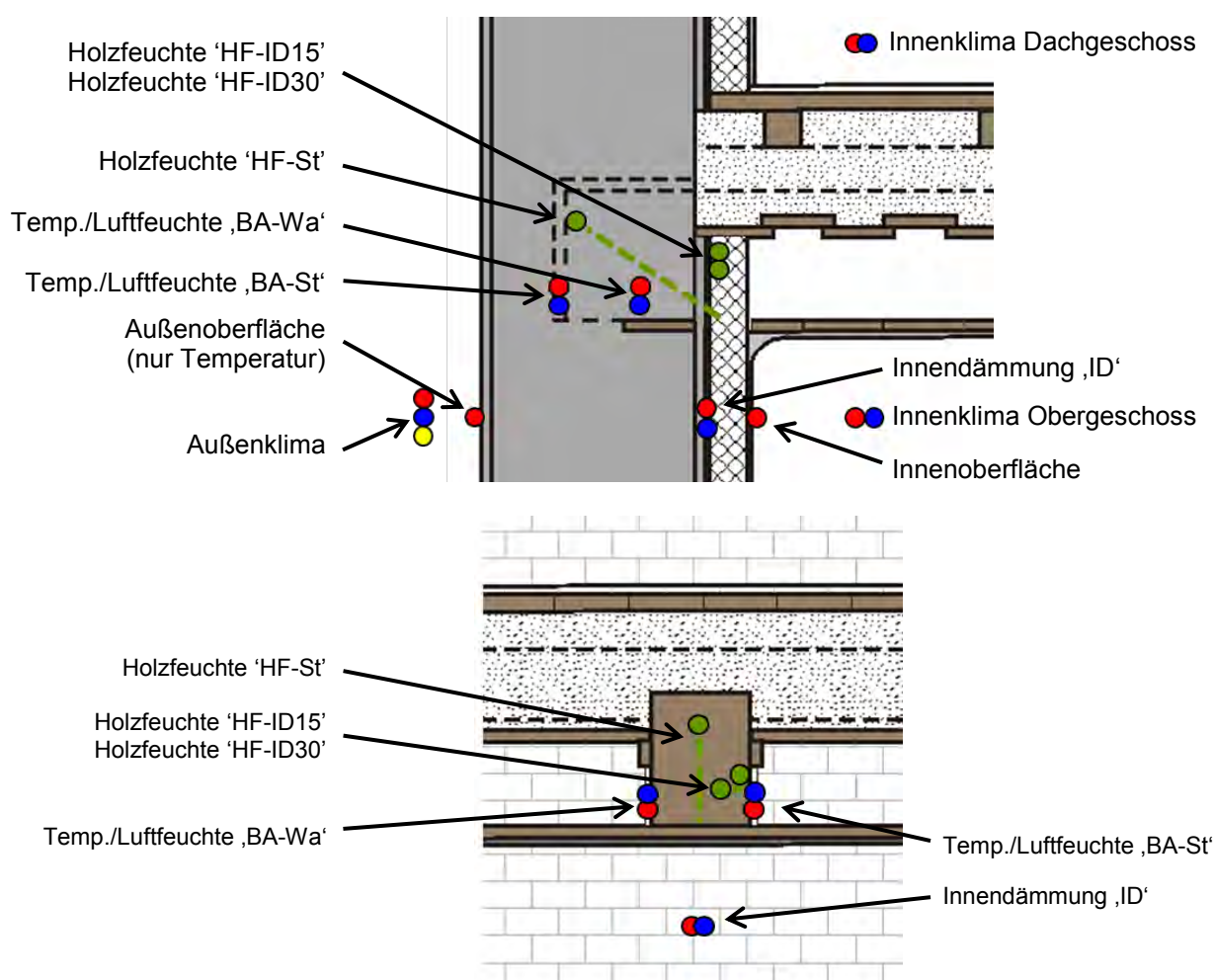


Abb. 6 Schematische Darstellung der Lage der Messsensoren: oben Schnitt durch die Außenwand und Feldmitte zwischen den Holzbalken, unten Schnitt durch den Deckenbalken mit Blick auf die Bestandsoberfläche. 'HF-St': Holzfeuchte am Stirnholz, 'HF-ID15/30': Holzfeuchte in der Ebene der Innendämmung in 15/30 mm Tiefe, 'BA-Wa': Temperatur/Luftfeuchte im Balkenaufleger an der Balkenkopfwanne, 'BA-St': Temperatur/Luftfeuchte im Balkenaufleger nahe des Balkenkopf-Stirnholz, 'ID': Temperatur/Luftfeuchte zwischen Bestandsputzoberfläche und Innendämmsystem (rot: Temperatur, blau: relative Luftfeuchte, grün: Holzfeuchte, gelb: Globalstrahlung)

Alle Messdaten wurden kontinuierlich im 5-Minuten-Takt ausgelesen und vor Ort im Obergeschoss aufgezeichnet. Die Auswertung in Kapitel 5 erfolgt auf der Grundlage von Stundenwerten, bei den klimatischen Randbedingungen auf der Grundlage von halbstündlichen Werten. Per GSM-Modem wurden die Daten an einen Server der TU Graz übermittelt und dort ebenfalls gespeichert. Der gesamte Versuchsaufbau konnte somit fernüberwacht werden.

Um konvektive Einflüsse nicht einseitig zu verändern, wurden die Sensoren im Luftspalt um den Holzbalken auf beide Luftschlitze neben den Balken aufgeteilt. War das nicht möglich, wurden sie in den gleichen Luftschlitz eingebracht.

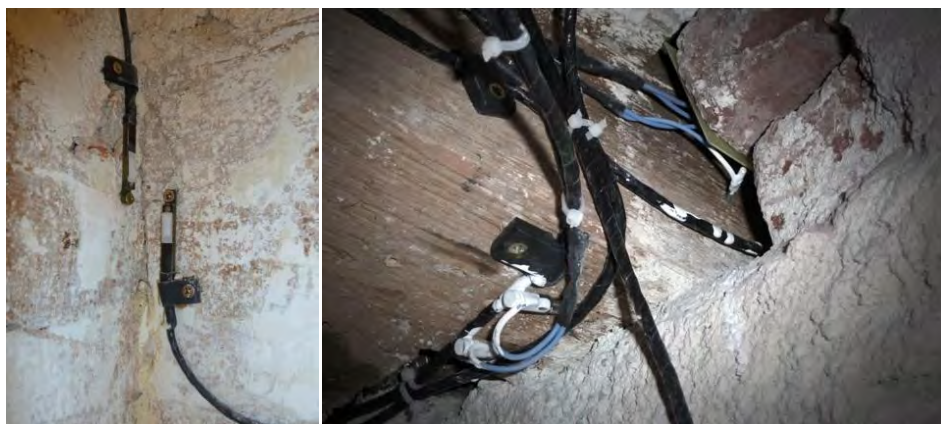


Abb. 7 Kombinierte Luftfeuchte-/Temperatur-Flächensensoren ID vor der Montage des Dämmsystems, hier in der Gebäude-Außenkante im Zellulosefeld

Abb. 8 Balken 8 mit Holzfeuchtesensoren 'HF-St' (unten in Balkenmitte) sowie 'HF-ID15' und 'HF-ID30' an der rechten Balkenwange; zu sehen sind auch Kabel zum Sensor 'BA-Wa' und nach unten zum Luftfeuchte-/Temperatur-Flächensensor 'ID'.



Abb. 9 Zellulose-Messfeld mit abgedichteten Holzfeuchtesensoren (,HF-St'), kombinierten Luftfeuchte / Temperaturfühlern (,ID') und Montageplatten mit der Messelektronik

Abb. 10 Installierte Messfelder vor Aufbringung der Dämmsysteme

Die tief in die Balkentasche eingebrachten Sensoren ‚BA-St‘ wurden so weit wie möglich in den Luftspalt geschoben. Es ist aber nicht bekannt, ob sie an der Stirnseite der Balkentasche positioniert werden konnten oder ob sie nur bis zu einer Mörtelnase oder einem vorspringenden Ziegel reichen. Die anschließende Tab. 2 fasst die Einschubtiefe dieser Sensoren, gemessen von der ehemaligen Innenputz-Bestandsoberfläche sowie die Auflagerlänge der Holzbalken in der Balkentasche mit den Breiten der Fugen an der Balkenwange zusammen.

Tab. 2 Auflagerlänge der Holzbalken in der Balkentasche, Fugenbreiten an der Balkenwange und maximale Einschubtiefen der Sensoren ‚BA-St‘ 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

2.7 Montage der Dämmsysteme

Zur Installation der Messtechnik musste die Deckenuntersicht parallel zur Außenwand geöffnet werden. Vor dem Abdichten der Balkenauflagertaschen wurden zunächst die langen Holzfeuchtesensoren ‚HF-St‘ gedämmt und extra versiegelt.

Die Wandoberfläche zwischen den Deckenbalken war im ursprünglichen Zustand nicht verputzt. Im Zuge der Abdichtungsmaßnahmen wurde deshalb der Bereich zwischen den Balken verputzt und der Luftspalt am Balkenaufleger oberflächlich mithilfe eines Gewebepandes verschlossen (Abb. 12). Längsrisse im Deckenbalken wurden mittels einer Schablone im Riss angebohrt und das Bohrloch mit Leim und einem Rundholzdübel ausgefüllt. Bohrlochtiefe und Bohrlochdurchmesser richteten sich nach der Risstiefe und Rissbreite (Abb. 11 und Abb. 12). Zusätzlich wurden die Risse mit Dichtmasse (dauerelastische Korkfüllmasse) ausgefüllt. Nachdem der Beginn der Auflagertaschen verputzt war, wurden die Kanten um die Deckenbalken und zwischen Einlegeboden und Wand mit einem Putzanschlussband (verwendetes Produkt: Contega PV / ProClima) abgeklebt und das Netz in den Putz bzw. Kleber des jeweiligen Dämmsystems eingespachtelt (Abb. 13). Dieses Vorgehen wurde nur an den ersten sechs Balken von der Deckenunterseite her durchgeführt. Am siebenten, mit Schilf gedämmten Balken wurde darauf verzichtet. Zwischen Schilfmattendämmung und Holzbalken wurde hier bewusst ein Spalt von ungefähr 20 bis 30 mm Breite belassen. So

konnte bei den Balken 7 und 8 die Luft aus den Balkenzwischenräumen ungehindert in die Balkenauflagertaschen strömen.

Die Abdichtungsmaßnahmen wurden sehr sorgfältig ausgeführt, um Konvektion vom Obergeschoss in das Balkenaufleger völlig zu unterbinden. Die mehrstufigen Maßnahmen waren durchaus zeitaufwändig, wurden jedoch vom wissenschaftlichen Personal des Projektes, mithin „engagierten Laien“ ausgeführt. Pro Balkenkopf haben alle Dichtungsmaßnahmen ungefähr eine gute Stunde Zeit in Anspruch genommen. Entsprechend ausgebildete Profesionisten wären sicherlich in der Lage gewesen, die Arbeiten weitaus schneller zu erstellen. Inwieweit zudem weniger aufwändige Maßnahmen genügen könnten wird zu einem späteren Zeitpunkt diskutiert.

Im Dachgeschoss dagegen, in der Ebene der Schüttung und darüber, wurden keinerlei Abdichtungsmaßnahmen ergriffen. Eine derartige Einbausituation, die z. B. bei Eigentumswohnungen vorkommen kann, liegt auf der sicheren Seite, da die Balkenaufleger so nur unvollständig bzw. teilweise abgedichtet werden. Entlang der innen gedämmten Wand wurde in einem ungefähr 0,3 m breiten Streifen der PVC-Belag zurückgeschlagen bzw. von dem Holzterazzo getrennt. Nachdem die Holzterazzoschicht auf einer Breite von ca. 0,2 m entfernt wurde, war ausreichend Platz für das Anbringen der Innendämmung vorhanden. Fehlstellen in der Dielung, die im Rahmen der Erkundung entfernt worden waren, wurden durch neue Bretter ersetzt. Die Innendämmsysteme begannen im Dachgeschoss auf der Holzdielung, die auf den schwimmenden Polsterhölzern befestigt war. Nach Fertigstellung der Dämmungen wurden PVC und Teppich wieder zurückgeschlagen.

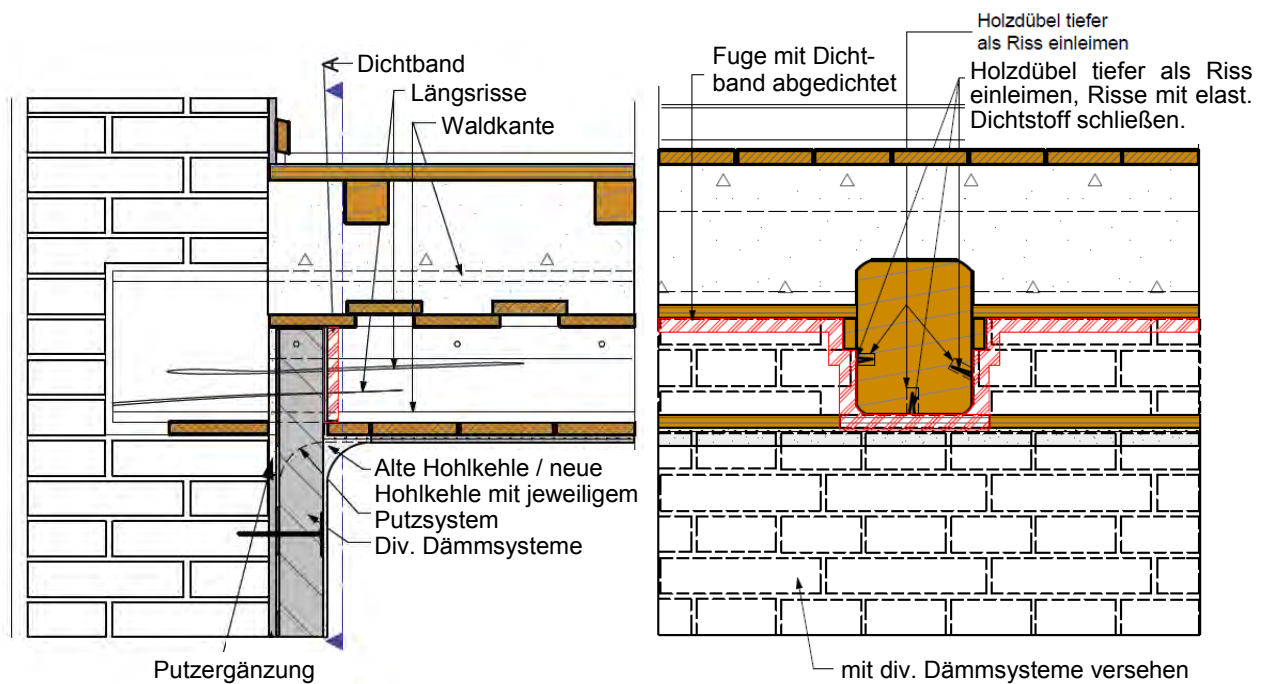


Abb. 11 Wandquerschnitt links und Schnitt durch den Deckenbalken rechts: Schematische Darstellung der Abdichtungsmaßnahmen



Abb. 12 Dübel zum Verschließen der Längsrisse und mit Putz geschlossener Luftspalt

Abb. 13 Abkleben der Kanten zwischen Balken und Einlegeböden zur Wandoberfläche mit Putzanschlussband

Im weiteren Verlauf wurden die einzelnen Dämmsysteme durch Personal der Hersteller- bzw. Vertreiberfirmen montiert und nach entsprechender Austrocknungszeit der Deckenhohlraum geschlossen und die ursprünglich vorhandene Hohlkehle am Übergang zwischen Wand und Decke wieder hergestellt.

Der Zeitpunkt des Einbaus der Innendämmungen ist mit Anfang September in bauphysikalischer Hinsicht ungünstig und befindet sich damit „auf der sicheren Seite“, da die warme Sommerperiode mit günstigen Austrocknungsbedingungen fast vorüber ist. Die Wärmedämmung kühlt 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 gerne mit der „thermischen Antriebskomponente“ beschrieben, welcher bei Innendämmungen geringer sei. Eine zusätzliche Abkühlung durch niedrige Außentemperaturen im Herbst und Winter verstärkt diesen Effekt.

Bei Anschlüssen an Fensterstöcke wurden die Fugen zum Mauerwerk ebenfalls luftdicht abgeklebt und ein Putzanschlussprofil eingebaut, siehe hierzu das Kapitel zu den Bauteilanschlüssen im Anhang.

Nachfolgende Abbildungen zeigen die Montage der Dämmsysteme in der Reihenfolge der Balkennummern von links nach rechts.



Abb. 14 Feld 1, Balken 1 & 2: Aufspritzen der bindemittelverstärkten Zellulosedämmung

Abb. 15 Feld 1, Balken 1 & 2: „Abziehen“ auf die gewünschte Schichtdicke

Abb. 16 Feld 2, Balken 3: Montage der Perlite-Platten; „Abklatschbeprobung“ für die mikrobiologischen Untersuchungen im roten Kreis („3“)



Abb. 17 Feld 3, Balken 4: Montage Thermosilitputz; hier die erste von zwei Lagen

Abb. 18 Feld 4, Balken 5: Holzweichfaserplatten in Lehmputz; Balkenkopf mit Manschette zum luftdichten Anschluss an die Dämmebene, die Sensoren ‚ID‘ sind zu sehen

Abb. 19 Feld 5, Balken 6 und 7: Zwei übereinander liegende 50 mm dicke Schilfmatten in Lehmputz



Abb. 20 Gesamtansicht der Dämmsysteme nach Abschluss der Arbeiten im Obergeschoss; von links: Zellulose, Perliteplatte, Thermosilitputz, 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.

2.8 Baupraktische Erfahrungen im Spiegel des WTA-Merkblatts E-8-14

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

In Kürze wird der Entwurf eines WTA-Merkblattes [WTA E-8-14] erscheinen, welches die möglichen Einbausituationen von Holzbalkenköpfen bei Außen- und Innendämmungen erörtert und auf die möglichen Gefahren bei Innendämmungen hinweist. An der Erstellung

fehlen aber solche Angaben in den historischen Plänen, was die Anzahl der Löcher für die Endoskopie erhöht.

Nach Ansicht der Verfasser wäre ein ergänzender Hinweis 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 (lt. WTA-Merkblatt „gebrauchstauglich“) trocken
- in Anbetracht der Situation vor Ort waren die Voraussetzungen für einen ausreichenden Schlagregenschutz wegen der Ausrichtung und wegen des Außenputzes gut. Fehlstellen im Bestandsaußenputz wurden ertüchtigt.

Wären vor dem Einbau einer Innendämmung schon kritische Feuchtigkeitswerte vorhanden gewesen, hätten die Ursachen erhoben und beseitigt (undichte Blechanschlüsse bei Gesimsen, 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 Merkblatt E-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 betragen soll. Eine kapillare Trennung von Balkenunterseite und Mauerwerk, z. B. in Form einer bituminösen Schicht, war allerdings nicht vorhanden. Da der Balkenkopf ursprünglich luftumspült war und keine Schüttung in die Auflagertaschen vorgefunden wurde, war diese Empfehlung per se erfüllt. Seitliche und obere Fugen sind gemäß WTA-Merkblatt mit vorkomprimierten Dichtbändern oder Hinterstopfung mit anschließendem Mörtelverstrich „konvektionshemmend“ zu schließen. Auch diese Empfehlung wurde 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 allerdings komplett nicht abgedichtet (Balken 7 und 8) sowie alle Balkenaufleger 1 bis 6 oberhalb der Schüttung ebenfalls nicht verschlossen, was im weiteren mit teilabgedichtet bezeichnet wird.

2.9 Beschreibung der verwendeten Dämmsysteme

Dieser Abschnitt beschreibt verschiedene Aspekte der eingesetzten Dämmsysteme. Bei der Beschreibung wurde zum Teil auf Informationen der Hersteller zurückgegriffen.

2.9.1 Aufspritz-Zellulose

Produktname/Hersteller: Aufgespritzte Zellulose Renocell / Isocell GmbH.

Materialbasis: Zelluloseflocken werden aus Altpapier, vorwiegend Zeitungen und Magazine, hergestellt, womit ein Beitrag zur Entlastung der Umwelt geleistet wird. Die Cellulose wird in situ beim Aufsprühen in einer speziellen Sprühpistole mit Kleber vermischt. Der Dämmstoff weist laut Herstellerangaben eine „hohe Lebensdauer“ auf.

Verarbeitung: Den bestehenden Putz auf Tragfähigkeit und Hohlstellen überprüfen, hohl liegenden Verputz, evtl. vorhandene Tapeten und Fliesen abscheren bzw. abschlagen. Nach grober Staubreinigung alle sichtbar bleibenden Bauteile, wie Öffnungen, Holzbalken, etc. mit Planen abkleben, wonach die eigentlichen Dämmarbeiten beginnen können. Es entstehen keine zusätzlichen Kosten für Ebenheitsschichten. Fensteranschlüsse sind mit speziellen Putzklebebandern herzustellen. Nach dem Aufsprühen des Zellulose-Leimgemisches wird mittels spezieller Abziehlehren eine einheitliche Dicke und Ebenheit hergestellt. Nach Austrocknung der Dämmschicht (hier ca. 2 Monate) Aufbringen des Innenputzes.

Gesundheit: Kleinere Zellulosefasern können lungengängig sein. Durch sachgerechte Verarbeitung und Beachtung der Atemschutzempfehlungen (Atemschutzmaske, Lüften nach Einbringung) sind keine Gesundheitsgefährdungen zu erwarten. Auch die Drucker-schwärze hat keine negative Auswirkung auf die Gesundheit.

Brandschutz: Laut Prüfverfahren wird die Zellulose gemäß DIN EN 13501-1 als B – s2 d0, schwerentflammbar ohne brennendes Abtropfen, eingestuft. Sie ist nur brennbar bei direkter Beflammung. Dabei verkohlt die Zellulose oberflächlich, dickere Schichten verschwelen nur langsam. Nach dem Beflammen verlöschen die Flammen sofort (keine eigene Brennbarkeit). Es entstehen ähnliche Zersetzungsrückstände wie bei der Verbrennung von Holz: CO₂, CO, Wasser und additivabhängige Stoffe. Diese Additive, vor allem Borsalze, werden zunehmend durch Ammoniumphosphate als Flammschutzmittel ersetzt, da letztere umweltverträglicher und ungefährlicher für den Anwender sind (Bewertung des Umweltbundesamtes, UBA-Texte 25/01: Anwendung unproblematisch).

Ökologische Bewertung: Die Herstellung von Zelluloseflocken erfordert nur geringe Mengen Primärenergie, Umweltbelastungen entstehen beim Transport. Die Entsorgung ist durch thermische Verwertung oder - bei boratfreiem Material (Ammoniumsulfat als Brandschutz) - Kompostierung möglich. Die Umweltbelastung wird als gering eingestuft. [79]

Quellen der Produktbeschreibung: [80], [81]



Abb. 21 Zelluloseflocken [81]

2.9.2 Perliteplatte

Produktname/Hersteller: TecTem® Insulation Board Indoor / Knauf Aquapanel GmbH

Materialbasis: Perliteplatten bestehen aus expandiertem Perlit, mineralischem Kleber und Verdicker. Gemahlene Rohperlit expandiert unter Hitze und wird mit Kleber und Verdicker vermischt, gepresst und getrocknet. Der diffusionsoffene Baustoff hat eine hohe kapillare Leitfähigkeit.

Verarbeitung: Voraussetzung ist ein tragfähiger, ebener Untergrund, der frei von Ausblühungen und schädlichen Beschichtungen ist. Aufsteigende Feuchtigkeit darf nicht vorhanden sein. Größere Unebenheiten sind mit Kalkzementmörtel eben zu putzen, stark saugende oder unregelmäßig saugende Untergründe sind zu grundieren, Dispersionsfarben und Gipsputz sind zu entfernen. Der Kleberauftrag erfolgt vollflächig mindestens 5 mm dick auf die Platten und wird mit einer 10 mm Zahntraufel durchgekämmt. Die Platten werden im Verband versetzt mit knirsch gestoßenen Fugen. Nach dem Trocknen des Klebers kann die Fläche mit einem Schleifbrett egalisiert werden. Fugen über 2 mm sind mit TecTem®-Füllmörtel zu schließen. An Wandaußenecken dürfen überstehende Platten nach Aushärten (ein bis zwei Tage) des Klebers abgeschnitten werden. Nach vollflächiger Grundierung wird der Flächenspachtel händisch oder maschinell aufgetragen und mit 8 mm Zahntraufel durchgekämmt. Das TecTem®-Gewebe wird oberflächennah eingebettet und nochmals mit Flächenspachtel dünn überzogen. Die Gesamtdicke des armierten Flächenspachtels beträgt 4-5 mm. Für Farbbeschichtungen werden Kalk-, Silikatfarben oder leichten Papiertapeten empfohlen.

Gesundheit: Auf Grund des hohen pH-Wertes ist das System laut Herstellerangaben schimmelresistent. Durch Staubablagerungen auf der Wandoberfläche und chemische Prozesse geht diese Schimmelresistenz allerdings im Lauf der Zeit verloren. Der Baustoff ist faserfrei. Ein "natureplus"-Zertifikat belegt u.a. gesundheitliche Unbedenklichkeit.

Brandschutz: Nach DIN EN 13501-1 wird die Perliteplatte als Klasse A1 nicht brennbar bzw. ohne brennbare Bestandteile eingestuft.

Ökologische Bewertung: Der Baustoff ist rein mineralisch und wird laut Zertifikaten von "Eco-Institut", "natureplus" und "Blauer Engel" als umweltfreundlich und schadstofffrei eingestuft. Er ist vollständig recyclingfähig.

Quelle der Produktbeschreibung: Knauf Perlite [82]



Abb. 22 Perliteplatte [82]

2.9.3 Thermosilit-Dämmputz

Produktname/Hersteller: CalceClima® Thermo / RÖFIX AG

Materialbasis: Der Wärmedämmputz ist ein mineralischer Baustoff (Fertigmörtel), welcher aus natürlichem hydraulischen Kalk, Luftkalk, Kalkbrechsand und Thermosilit (wärmedämmender, geschlossenzelliger Leichtzuschlag auf Silikatbasis) besteht. Durch die geschlossenzellige Oberfläche der einzelnen Thermosilitkörner ist für das Mischen des Putzes ein sehr geringer Wasserbedarf notwendig. Der Putz besitzt laut Hersteller hydrophobe (wasserabweisende) und gleichzeitig dampfdiffusionsoffene Eigenschaften. Der Putz ist für die Innen- und Außenanwendung (mit Ausnahme des Sockelbereiches) geeignet.

Verarbeitung: Auf den tragfähigen Untergrund wird der Dämmmörtel in Schichten von max. 40-50 mm pro Arbeitsgang mit einer Putzmaschine aufgetragen und mit der Kardätsche nach Ansteifen des Mörtels abgezogen. Wie bei der Aufspritz-Zellulose entfällt damit ein unter Umständen notwendiges Herstellen einer Ausgleichsschicht. Vor Aufbringen der zweiten Schicht (Standzeit 5 Tage / cm) wird die Oberfläche aufgeraut und die zweite Schicht aufgebracht. Nach Abtrocknen der zweiten Schicht wird der Feinputz händisch aufgebracht. Ist dieser trocken, kann der Anstrich mit diffusionsoffenen Farben erfolgen. Wegen der Vergleichbarkeit der Dämmsysteme wurden im Fall Schönbrunnngasse 30 die empfohlenen Schichtdicken überschritten und auch die Standzeiten aus Termingründen nicht eingehalten.

Gesundheit: Durch die hydrophobe Eigenschaft wird laut Herstellerangaben einer Schimmelbildung vorgebeugt. Durch Staubablagerungen auf der Wandoberfläche und chemische Prozesse geht diese Schimmelresistenz allerdings im Lauf der Zeit verloren. Der Mörtel ist frei von Kunststoffdispersion und Fasern.

Brandschutz: Laut EN DIN 13501-1 wird der Thermosilitputz in die Brandschutzklasse A1, nicht brennbar (ohne brennbare Bestandteile), eingestuft.

Ökologische Bewertung: Während der Expansion von Thermosilit wird nur Wasserdampf an die Umgebungsluft abgegeben, wodurch es zu keinen schädlichen Emissionen kommt. Das Material ist leicht zu recyceln, da es auf verschiedene Weise, z. B. als Granulat zur Bodenverbesserung bei zu lehmigen / tonigen Böden wiederverwertet werden kann.

Quellen der Produktbeschreibung: RÖFIX AG [83]

Dullinger GesmbH [84]

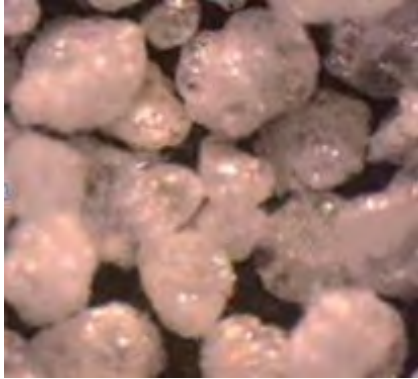


Abb. 23 Thermosilit-Körner

2.9.4 Holzweichfaserplatte

Produktname/Hersteller: STEICOtherm internal / Steico SE

Materialbasis: Im Nassverfahren hergestellte Holzweichfaserplatten werden aus Hack-schnitzeln von Nadelholz-Restholz hergestellt (DIN 68755). Nach thermisch-mechanischer Zerfaserung der Resthölzer wird der mit Wasser verdünnte Faserbrei gesiebt, die Fasern zu Vlies verarbeitet, gepresst und getrocknet. Platten mit mehr als 20 mm Stärke werden von dem Hersteller des verwendeten Produkts durch Verklebung mehrerer Platten hergestellt. Die Platten haben ein poröses Fasergefüge, das Dampfdif-fusion begünstigt. Der Baustoff zeichnet sich durch ein vergleichsweise höheres Feuch-tepuffervermögen und eine höhere Wärmespeicherkapazität aus. Im Trockenverfahren hergestellten Holzweichfaserplatten werden beispielsweise PU-Harze beigemischt. Das Nassverfahren erfordert bei der Herstellung einen weitaus höheren Energieaufwand, je-doch sind diese Platten feuchteresistenter und demzufolge besser geeignet als diffusi-onsoffene Innendämmung.

Verarbeitung: Der Untergrund muss tragfähig und frei von sperrenden oder trennenden Beschichtungen sowie eben sein. Stark saugende Untergründe sind zu grundieren. Aus-gleichsschichten d < 10 mm müssen vorher austrocknen. Lehmkleber (der Firma CLAY-TEC e. K.) wird einseitig vollflächig aufgetragen und mit 10 mm Zahntraufel durchge-kämmt, angesetzt und fest angedrückt. Alternativ kann der Kleberauftrag auf Wand und Platte erfolgen, mit einer Zahntraufel 5-6 mm durchgekämmt. Auch ein Ansetzen in pasti-sches Mörtelbett d > 10 mm Lehmputz ist möglich. Die Platten werden auf Massivunter-gründen mit Schraubdübeln (der Firma CLAYTEC e. K.) befestigt. Die Verankerungstiefe in Massivbaustoffen beträgt ≥ 60 mm. Jede Platte wird an mindestens zwei Punkten be-festigt.

Beim Versetzen in ein Mörtelbett muss dieses bei der Weiterbearbeitung ausreichend fest sein. Fugen von mehr als 1-2 mm Breite werden mit Lehmkleber oder Lehm-Oberputz fein ausgespachtelt. Für den Verputz müssen die Platten staubfrei sein, sie werden aber nicht vorgehäst. Die Platten werden meist mit zwei jeweils 2-3 mm dicken Lagen aus nicht zu steifem Lehm-Oberputz fein verputzt. In die noch ausreichend feuchte Oberfläche der ersten Lage ist ein Armierungsgewebe einzuarbeiten.

Anmerkung: Claytec vertreibt seine Produkte neuerdings nur mit der Holzweichfaserplatte Pavadentro, einem Produkt der Firma PAVATEX SA. STEICO bietet sowohl Kalk- als auch Lehmputz als Beschichtungsmöglichkeit an, wobei für Lehm Claytec als Beispiel angeführt ist.

Gesundheit: Die im hergestellten Nassverfahren Holzweichfaserplatten weisen einen sehr niedrigen Klebstoffanteil (Weißleim PVAC) auf und haben ein sehr hohes Feuchtepuffervermögen, was sich positiv auf das Raumklima auswirkt. Die in den entsprechenden Produktdatenblättern aufgelisteten Inhalts- und Einsatzstoffe sind human toxisch als unbedenklich einzustufen.

Brandschutz: Das Brandverhalten wird gemäß DIN 13501-1 als Baustoffklasse E, normalentflammbar, eingestuft.

Ökologische Bewertung: Der Dämmstoff ist laut Hersteller gut recycelbar. Plattenreste und Abfälle lassen sich wieder vollständig in den Produktionsprozess einfügen oder kompostieren sowie thermisch verwerten. Holzweichfaserplatten bestehen aus nachwachsenden Rohstoffen, die in ausreichendem Maße vorhanden sind.

Quellen der Produktbeschreibung: [85], [86]



Abb. 24 Holzweichfaserplatte [86]

2.9.5 Schilfrohrplatte

Produktname/Hersteller: Schilfrohr Dämmplatten / PROLEHM FRAUWALLNER KG

Materialbasis: Der Rohstoff für die Dämmplatten wird aus den Stängeln des Schilfrohres (*Phragmites australis*) gewonnen. Es wächst in Flachwasserbereichen bis 1 m Tiefe stehender oder langsam fließender Gewässer. In Österreich ist das größte und genutzte Schilfvorkommen am Neusiedlersee. Die Schilfernte erfolgt im Winter, wenn der See zugefroren ist. Sie stellt eine notwendige Maßnahme dar, um einer weiteren Eutrophierung des Sees mit Nährstoffen entgegenzuwirken. Die Herstellung der Platten ohne chemische Bindemittel erfolgt durch Binden der parallel ausgerichteten Schilfhalme mit verzinktem Eisendraht.

Verarbeitung: Der Untergrund muss tragfähig und frei von sperrenden Beschichtungen sein um einen hygrischen Kontakt zu ermöglichen. Der Lehmkleber wird mit der Putzmaschine aufgetragen, bei glatten Untergründen in ca. 5 mm Dicke, bei sehr unebenen in bis zu 20 mm Dicke). Nach dem Ansetzen der ersten Dämmplattenlage wird diese sofort mit Tellerdübeln fixiert. Danach kann sofort die zweite Lage, eventuell mit einer Lehmkle-

berzwischenicht, verlegt und verdübelt werden. Darauf folgt der Lehmunterputz, der ungefähr 14 Tage trocknen muss, bevor der Lehmfeinputz mit Gewebearmierung aufgetragen werden kann.

Gesundheit: Bei Schilf und dem Deck-Lehmputz handelt es sich um Naturprodukte, welche keine weiteren, gesundheitsschädlichen Zusätze enthalten.

Brandschutz: Aufgrund des hohen Kieselsäureanteils ist die Brandklasse und das Brandverhalten nach DIN 4102 als B2 klassifiziert. [87]

Ökologische Bewertung: Bei der Schilfrohrplatte handelt es sich um ein Naturprodukt ohne chemische Zusätze. Bei der Herstellung und Nutzung entstehen keine Emissionen und Produktionsabfälle. Die Kompostierung ist unproblematisch. Der Baustoff weist einen sehr niedrigen Primärenergiegehalt (PEI) auf.



Abb. 25 Schilfrohrplatte [87]

2.10 Bewertung der verwendeten Dämmstoffe bezüglich der Verarbeitung

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

2.10.1 Aufspritz-Zellulose

Wegen der Verarbeitung der Aufspritz-Zellulose erscheint sie für bewohnte Kleinbaustellen im Altbestand einerseits wegen der Schmutz- und Staubentwicklung, die bei der Applikation entsteht, andererseits 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 Ausbildung von Außenecken, z. B. bei Fensterleibungen, ist jedoch eine Herausforderung an den Verarbeiter und muss auch von einem Spezialisten mit Geduld ausgeführt werden, da die weiche Zellulose-Masse immer wieder abbricht. Die Führung des Hobels mit dem überschüssigen Material ist in der Leibung unhandlich. Entsprechend den Erfahrungen im

Testhaus könnte die Ausbildung der Leibungsdämmung mit einer Holzweichfaserplatte die Verarbeitung erleichtern.

2.10.2 Perliteplatte

Eine Voraussetzung ist ein ebener und tragfähiger Untergrund, damit es zu einem vollflächigen hygrischen Kontakt kommt. Bei nicht vollflächigem Kontakt besteht die Gefahr erhöhter Flüssigwassermengen. 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. Die Bearbeitung der Platten und Zuschnitte sind leicht mit Holzbearbeitungswerkzeugen vorzunehmen. Eckausbildungen 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 konstanter Wärmewiderstand garantiert.

2.10.3 Wärmedämmputz

Der Auftrag des Thermosilitputzes wurde als Maschinenputz in zwei Schichten à ca. 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. Wie später ausgeführt wird, war der Wärmedämmputz durch eine sehr lange Austrocknungsdauer gekennzeichnet. Es wird vermutet, dass sich Verglasungseffekte an der Oberfläche der ersten Schicht negativ auswirkten und ein rasches Abtrocknen verzögerten bzw. behinderten. Nach Aussage des Verarbeiters wurde diese Schicht vor Aufbringen der zweiten Putzlage aufgeraut, dennoch zeigen die Messungen eine sehr lange Austrocknungszeit. Beim Transport des Mörtels durch die Schläuche in höher liegende Geschosse werden offenbar die Thermosilit-Körner des Zuschlages auf dem Weg durchs Rohr teilweise zerrieben, wodurch die Dichte des Mörtels zu- und die Porosität abnehmen. Die Messungen haben gegenüber den Herstellerangaben von 250 kg/m^3 eine Dichte von 650 kg/m^3 ergeben. Um die Eigenschaften des Materials nicht zu verändern erscheint die Aufbringung von Hand deshalb als empfehlenswert. Die Kosten für die Verarbeitung erhöhen sich damit aber erheblich. Die Möglichkeit, den Mischer und die Pumpe näher an das jeweilige Geschoss zu positionieren wäre mit den vor Ort ausgeführten Geräten unpraktikabel gewesen. Mittlerweile wird vom Hersteller die Wärmeleitfähigkeit mit $0,1 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ angegeben. [88]

2.10.4 Holzweichfaserplatte

Wie bei der Perliteplatte ist hier ein ebener, tragfähiger Untergrund Voraussetzung für einen vollflächigen hygrischen Kontakt zwischen Innendämmung und Mauerwerk. Am vorhandenen Objekt war bereits ein Untergrund vorhanden, der den Anforderungen des Herstellers genügte, weshalb nicht erst eine Ausgleichsschicht angebracht und deren Trocknung abgewartet werden musste. Das Innendämm-System besteht aus Lehmkleber, Weichfaserplatte, Lehmunterputz, Armierungsgewebe, und Lehmfeinputz. Die Bearbeitung der Platten und Zuschnitte sind mittels Holzbearbeitungswerkzeugen leicht durchführbar. Der Feuchteintrag durch den Lehmputz hält sich durch die geringe Dicke von ca. 10 mm in Grenzen und ergibt ein selbstregulierendes System. Die Wartezeit vor Aufbringen des Feinputzes beträgt 1 Woche bis 10 Tage. Sofort nach dem Aufbringen der Dämmschicht wird mit einem Zahnpachtel der Kleber in einer horizontalen Rillenstruktur aufgebracht. Nach einer Trocknungsphase von einer Woche wird die Fläche mit einer Glasfaserarmierung genetzt und das Netz mit Lehmputz eingeputzt. Danach bedarf es nochmals einer Trockenzeit von einer Woche um den Oberputz aufbringen zu können. Alle drei beschriebenen Schichten haben eine Schichtstärke von ca. 3 mm.

Die industrielle Fertigung des Plattenmaterials garantiert einen konstanten Wärmewiderstand.

2.10.5 Schilfplatte

Die Ausführung erfolgte in zwei Schichten von jeweils 50 mm Dicke mit Lehmkleber als hygri-schem Kontakt. 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. Die Platten wurden gemäß den Verarbeitungsempfehlungen horizontal verlegt, um einerseits eine bessere Putzhaftung zu erreichen und um andererseits eine 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 ist durch die Bindung der Platten mit verzinktem Stahldraht schwieriger als bei homogenen Plattenmaterialien.

Die Austrocknungszeit ist durch den ca. 20 mm dicken Lehm-gro-putz 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.

Für die Konstruktionen mit Lehmputzen 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 noch mit Acryl

geschlossen werden kann. 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.

2.11 Vergleich der Dämmsysteme bezüglich OI3- Index

Die ökologische Bewertung der eingesetzten Baumaterialien erfolgt über den OI3-Index. Dieser Index wird für die thermische Gebäudehülle inklusive der Trenndecken in diversen Fördermodellen der Bundesländer zur Berechnung der zuerkannten Ökopunkte verwendet. Als ökologisch geprüfte Baustoffe werden in der Eigenheim-Wohnbauförderung in einigen Bundesländern und bei der klima:aktiv-Haus-Zertifizierung Baustoffe anerkannt, welche mit einem der folgenden Prüfzeichen ausgezeichnet sind:

- natureplus (www.natureplus.org)
- IBO Prüfzeichen (www.ibo.at)
- Österreichisches Umweltzeichen (www.umweltzeichen.at)

Der OI3-Index (OI3_{Kon}) setzt sich aus 3 Komponenten zusammen:

1. dem eingesetzten nicht erneuerbaren Primärenergiegehalt (PEI_{ne} - Primary Energy Input),
2. dem Versauerungspotential (AP - Acidification Potential), da jede Produktion eine Versauerung der Böden durch Emissionen bewirkt und
3. dem Treibhauspotenzial (GWP - Global Warming Potential)

Diese Komponenten werden zu je 1/3 gewichtet. Je niedriger der OI3-Index desto geringer ist die zu erwartende Umweltbelastung durch die Errichtung des Gebäudes. Die Werte für die einzelnen Komponenten in Tab. 3 und für den OI3_{Kon} (Tab. 4) wurden am Österreichischen Institut für Baubiologie und Bauökologie (IBO GmbH, 1090 Wien) ermittelt.






Tab. 3 Primärenergiegehalt, Versauerungspotential und Treibhauspotenzial der Bestandskonstruktion und Innendämmsysteme

Variante	PEI _{ne} [MJ/m ²]	AP [kg SO ₂ eq./m ²]	GWP [kg CO ₂ eq./m ²]
VO – Bestandskonstruktion	2.191,2	0,50	179,6
V1 – Zellulose	93,1	0,03	1,1
V2 – Perliteplatte	418,5	0,06	23,4
V3 – Dämmputz	328,2	0,08	30,2
V4 – Holzweichfaser	149,7	0,04	-7,6
V5 – Schilfplatte	47,9	0,01	-29,6

Der Leitfaden zur Ermittlung des OI3-Index steht auf der Homepage des Österreichischen Instituts für Bauen und Ökologie (IBO) zur Verfügung (www.ibo.at).

Nachfolgend wird der $\Delta OI3_{Kon}$ angegeben, der sich auf jeweils 1 m² des Innendämmsystems bezieht (Tab. 4). Die Bestandswand, mit Innen- und Außenputz, hat einen OI3-Index von 133,8. Daraus wurden die Gesamt-OI3_{Kon}-Indizes in der unteren Zeile der folgenden Tabelle ermittelt.

Tab. 4 OI3-Index für einen Quadratmeter des Innendämmsystems ($\Delta OI3_{Kon}$) und für einen Quadratmeter des Innendämmsystems mit der Bestandskonstruktion ($OI3_{Kon}$)

					
System	Zellulose	Perliteplatte	Dämmputz	Holzfaserdämmung	Schilf
$\Delta OI3_{Kon}$	10,0	25,5	26,5	9,2	-1,4
$OI3_{Kon}$	143,7	159,3	160,3	143,0	132,3

Hier wird ersichtlich, dass die organischen Dämmungen gegenüber den mineralischen einen geringeren OI3-Index aufweisen. Der Grund ist im Ökoindikator der nicht erneuerbaren Primärenergie PEI_{ne} und vor allem im Treibhauspotential der Materialien zu finden. Die negativen GWP-Werte für Schilf und die Holzweichfaserplatten resultieren aus der CO₂-Bindung des Schilfes und der Bäume während der Wachstumsphase und aus dem geringen CO₂-Verbrauch bei der Produktion.

Die Bestimmung des $OI3_{Kon}$ bzw. des $\Delta OI3_{Kon}$ versetzt durch die Zusammenfassung des Treibhaus- und Versauerungspotentials sowie des Verbrauchs an nicht-erneuerbaren Energieressourcen in die Lage, die bedeutendsten Umwelteinwirkungen im Bauwesen während der Baustoffproduktion zu quantifizieren. Baustoffe auf nachwachsender bzw. mineralischer Basis ohne aufwändige Bearbeitung weisen im Allgemeinen geringeren Ressourcen- und Energieverbrauch und weniger umweltschädliche Emissionen auf, als Baustoffe, die auf Erdölprodukten basieren und aufwändig in Produktion und Herstellung sind.

Bei den untersuchten Innendämmsystemen zeichnen sich vor allem Zellulose und Holzweichfaser durch einen niedrigen $\Delta OI3_{Kon}$ aus. Schilf erreicht sogar einen negativen $\Delta OI3_{Kon}$ -Index und ist daher als besonders ökologisch zu beurteilen.

2.12 Erfahrungen beim Rückbau und der Entsorgung

Es wurde vorab mit dem Nutzer vereinbart, nach dem Projektabschluss die Räumlichkeiten in den ursprünglichen Zustand rückzuführen und die applizierten Dämmsysteme wieder abzubereiten. Diese Forderung bietet über die generierten Messergebnisse hinaus empirisch gewonnene Erkenntnisse über die einzelnen Dämmsysteme, im Sinne von sortenreinem Abbruch und Reversibilität und der möglichen Wiederherstellung des ursprünglichen Zustandes, die vor allem bei denkmalgeschützter Bausubstanz eine anzustrebende Eigenschaft für jegliche Ertüchtigung darstellt.

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 den konkreten Fall und die gesetzlich vorgeschriebene Trennung entsprechend der Mengenschwellen erläutert, die insbesondere durch den Einsatz der gewählten selektiven Abbruchmethode realisiert werden kann. Maßgebend dafür ist, die möglichst hochwertige Verwertung 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, beispielsweise wenn die Haftzugfestigkeit zwischen Dämmsystem und Bestandputz größer war als die Haftzugfestigkeit zwischen Bestandputz und Mauerwerk.

2.12.1 Zellulose

Zunächst wurde versucht, den Putz durch Klopfen 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 nicht getrennt werden. Durch das seitliche Einrammen und Aushebeln des Spatens 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 am vorliegenden Objekt ohne größeren Aufwand folglich nicht möglich. Die Wiederherstellungsmaßnahmen des ursprünglichen Zustandes waren hier am aufwändigsten, was wahrscheinlich auch auf die Qualität des Bestandputzes in diesem Feld zurückzuführen ist. Unter Umständen hat die hohe Einbaufeuchte die Haftfestigkeit des Bestandputzes negativ beeinflusst, was mit einer Kalkwassertränkung des Putzes hätte gemindert werden können.

Die empirisch olfaktorische Diagnose ergab keine auffallenden Gerüche.

Im Falle einer Entsorgung in Österreich erfolgt die Zuordnung der Dämmstoffprodukte zu einer Abfall-Schlüsselnummer (ASN) entsprechend ÖNORM S2100 "Abfallkatalog".

- ASN 18407 „Rückstände aus der Altpapierverwertung“
- ASN 91101 „Siedlungsabfälle und ähnliche Gewerbeabfälle“

Im Fall einer Entsorgung in Deutschland erfolgt die Zuordnung gemäß EWC (European Waste Catalogue) zu folgenden Abfallcodes:

- Code 171604 Dämmmaterial. Dieser Code ist zu verwenden, wenn größere Mengen der Dämmstoffe als Monofraktion vorliegen.
- Code 170904, Gemischte Bau- und Abbruchabfälle. Dieser Code ist zu verwenden, wenn die Dämmmaterialien in einer Mischung mit sonstigen Bau- und Abbruchabfällen vorliegen.
- Code 200301, Gemischte Siedlungsabfälle. Dieser Code ist zu verwenden, wenn die Dämmmaterialien in kleiner Menge als Teilfraktion von Siedlungsabfall vorliegen, insbesondere als Abfall von privaten Haushalten.



Abb. 26 Abbruch der Zellulosedämmung: die Dämmung löste sich großflächig als ganze Platte mit dem Bestandsputz

2.12.2 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 kann man erkennen, dass sich die Platte nur durch stückweises Abscheren mit einem Spaten löste.

Eine Trennung des Dämmsystem-Oberputzes von der Dämmplatte war nicht möglich und wird unabhängig von der Größe der zu entsorgenden Masse beurteilt.

Folgende Hinweise zur Entsorgung gemäß den behördlichen Vorschriften werden vom Hersteller angegeben:

- Beseitigungsverfahren/Verwertungsverfahren gemäß Richtlinie 2008/98/EG Beseitigungsverfahren: D 9 Chemisch/physikalische Behandlung

- Verwertungsverfahren: R 5 Recycling/Rückgewinnung von anderen anorganischen Stoffen Gefahrenrelevante Eigenschaften des Abfalls gemäß Anhang III Richtlinie 2008/98/EG

Gemäß Empfehlung des Herstellers gilt für derlei Abfälle § 3 (1) des (deutschen) Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes. Die Zuordnung der Abfallschlüsselnummer ist branchen- und prozessspezifisch durchzuführen. Die folgenden Abfallschlüssel können im Einzelfall durchaus ergänzt bzw. verändert werden: Abfallschlüssel: 17 06 04 Abfallbezeichnung: Dämmmaterial mit Ausnahme desjenigen, das unter 17 06 01 und 17 06 03 fällt.

Die empirisch olfaktorische Diagnose ergab keine auffallenden Gerüche.



Abb. 27 Abbruch der Perliteplatte: die einzelnen Abscherflächen in der Kleber- und Dämmschicht des Spatens sind links gut zu erkennen

2.12.3 Dämmputz

Der Abbruch erfolgte mit dem Spaten, indem versucht wurde zwischen ursprünglichem Putz und Dämmung den Spaten einzutreiben und die Dämmung abzuhebeln. Wie man am Bild erkennen kann, löste sich die gesamte Dämmung vollkommen durch Aufgehen einer Fuge und brach in Stücken von der Wand. Die Haftung der Dämmung war mitunter so stark, dass der mürbe Bestandputz teilweise mit abgezogen wurde.

Wegen der Ausgangsmaterialien des Dämmputzes besteht hier keine Notwendigkeit der sortenreinen Trennung des Deckputzes und der Dämmung. Der Abbruch ist der Abfallart Bauschutt (SN 31409) zuzuordnen.

Die empirisch olfaktorische Diagnose ergab keine auffallenden Gerüche.



Abb. 28 Abbruch des Dämmputzes: bereits beim ersten Versuch ging zwischen Dämmung und Bestandputz eine Fuge auf, die Dämmung konnte in großen Stücken abgelöst werden

2.12.4 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 in Stücken 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 der mit der Zahnspachtel aufgebraachte Kleber vollkommen auf der ursprünglichen Putzschicht. In weiterer Folge wurde der Kleber mit einem Spachtel vom Untergrund abgeschabt.

Eine sortenreine Trennung war bei dem gewählten Aufbau nur sehr eingeschränkt möglich, da der Dünnputz beim Abbruch auf dem Putzträger verblieb. Für Reststoffe auf der Baustelle ist der Europäischen Abfallkatalog/Abfallverzeichnis-Verordnung-(EAK/AVV-)Schlüssel 170201 anzusetzen. Dieser gilt bei Abbruch und Rückbau von Holzwerkstoffen und behandeltem Vollholz ohne schädliche Verunreinigungen.

Grundsätzlich ist es richtig, dass Holzweichfasern bei entsprechender Zerkleinerung und Durchsetzung mit Grüngut kompostierfähig sind. Kompostieranlagen dürfen auf Grund geltender Verordnungen Holzweichfaserplatten jedoch nicht annehmen. Der Gesetzgeber gibt derzeit keine Möglichkeit einer für die Kompostierung angemessenen Deklaration.

Kompostieranlagen dürfen nur Material aus der Deklarationsgruppe 02 (Abfälle aus Landwirtschaft, Gartenbau, Teichwirtschaft, Forstwirtschaft, Jagd und Fischerei sowie der Herstellung und Verarbeitung von Nahrungsmitteln) annehmen.

Für die Entsorgung sind Holzweichfaserplatten nach der EAK Verordnung vom 13.09.96 und der AVV-Verordnung vom 10.09.01 mit dem Abfallschlüssel 030105 gekennzeichnet. Die Abfallbezeichnung gilt für Sägemehl, Späne, Holz, Spanplatten und Furniere. Der Schlüssel

wird für Holzreststoffe aus der Holzbe- und -verarbeitung angesetzt. Für Reststoffe von Baustellen ist der EAK / AVV Schlüssel 170201 anzusetzen. Dieser ist ebenso bei Abbruch und Rückbau gegeben. Dieser gilt für Holz, wie z. B. Holzwerkstoffe und behandeltes Vollholz ohne schädliche Verunreinigungen. Bei thermischer Entsorgung ist auf die Eignung des Heizkessels zu achten.

Für Heizungskessel (Stückgutheizkessel) liegt eine Zulassung nach der Bundesimmissionschutz Verordnung (BImSchV) vor. Entsprechend der Einstufung gemäß BImSchV in festgelegte Klassen dürfen die den jeweiligen Klassen zugeordneten Stoffe verbrannt werden.

Die empirisch olfaktorische Diagnose ergab keine auffallenden Gerüche.



Abb. 29 Abbruch der Holzweichfaserplatte: links ist die gute Haftung des Dünnputzes auf der Holzweichfaserplatte zu sehen. In weiterer Folge stückweiser Abbruch und das Haftenbleiben von Materialstücken auf der Wand

2.12.5 Schilf

Der Abbruch erfolgte in mehreren Schritten. Als erstes wurde der Lehmputz an der Wand mit dem Spaten abgeklopft und am Armierungsgewebe von den Dämmplatten gezogen. Dann wurde händisch und auch mit Zuhilfenahme des Spatens die obere Schilfplatte ausgehebelt und abgezogen. Bei der unteren Schicht wurde ebenso vorgegangen. Großteils wurden die mechanischen Befestigungen mit aus der Wand gezogen, was im vorliegenden Fall sicher auch daher rührte, dass keine Metalldorne vom Verarbeiter 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.

Die empirisch olfaktorische Diagnose ergab beim Abbruch keine auffallenden Gerüche. Im Vorfeld waren am 7. Mai 2013 Proben für den Nachweis von Schimmelpilzen entnommen worden, um zu überprüfen, ob sich nach der Winterperiode mit den hohen Raumlufffeuchten Schimmelpilze gebildet hätten. Dafür waren mit einem Lochbohrer je zwei Materialproben im Ober- und Dachgeschoss 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 Hochsilo lässt Rückschlüsse auf eine biologische Aktivität zu. Er war im Dachgeschoss mit der sehr hohen Raumluff-

feuchte während des Winters ausgeprägt wahrzunehmen, im Obergeschoss dagegen nur schwach. Beim Abbruch im August 2013 war er nicht mehr festzustellen.

Die Schilfplatten konnten vollständig wieder von Kleber und Putz getrennt werden und könnten in Recycling-Börsen (z. B. www.recycling.or.at) zur Wiederverwertung angeboten werden. Die sortenreine Trennung dieses Aufbaus erscheint nicht nur hier sondern auch für größere Flächen als wirtschaftlich praktikabel. Es konnte der höchste Grad an Reversibilität festgestellt werden.

Die zugehörige Abfallart ist Gewerbemüll/organischer Restmüll (SN 91101).

Für eine reine biologische Kompostierung müsste zusätzlich das bindende Drahtgeflecht von den Schilfhalmen entfernt werden.



Abb. 30 Links zeigt den verputzten Zustand. Anschließend wurde der Lehmputz von der Schilfdämmung geklopft und mit dem Armierungsgewebe vollständig abgezogen. In weiterer Folge Auslösen der Schilfplatten und Abscheren des Lehmklebers vom Untergrund.

2.12.6 Auslösen der Sensoren

Die luftdichte Verklebung der Balkenauflagertaschen war bei der Öffnung augenscheinlich voll funktionstüchtig und wies beim Abbruch sehr hohe Haftzugfestigkeiten auf (Abb. 31). Die Abdichtungsbänder konnten zwischen den Balken teilweise nicht abgezogen werden. 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 bergen.

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 Dämmung und bestehendem Putz konnten auch bei allen Dämmungen unversehrt ohne weitere Schädigung demontiert werden.



Abb. 31 Schilfdämmung: links Luftfeuchte-/Temperatur-Sensor am Übergang Bestandputz-Dämmung, rechts oben Abziehen des Putzanschlussbandes bei luftdichtem Verschluss an Balken 6, rechts unten die beiden Nagelköpfe der Holzfeuchtemessung



Abb. 32 Holzweichfaserplatte nach Entfernen von Dämmung und Dichtband: Verschluss eines Risses mit einem eingeleimten Holzdübel und dauerelastischer Dichtmasse



Abb. 33 Zellulosedämmung: links Kabel des rechten Temperatur/Luftfeuchte ‚BA-St‘ Sensor noch in Balkentasche, rechts herunterhängende Kabel der Luftfeuchte-/Temperatur-Sensoren ‚BA-St‘, ‚BA-Wa‘ nach Herausziehen der Sensoren

2.12.7 Putz- und Malerarbeiten

Die beschädigten Wandflächen wurden punktuell mit Kalkputz ausgebessert. Wie vormals wurde der Deckenhohlraum wieder mit Holzbrettern bis zur Wand geschlossen. Nach der mechanischen Befestigung eines Ziegelputzgewebes auf den Brettern konnte wieder eine Hohlkehle ausgebildet werden, welche 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.

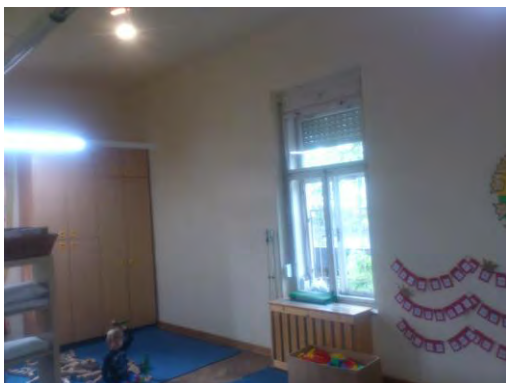


Abb. 34 Bild aus dem Obergeschoss nach Abbruch der Innendämmung im Kindergarten

2.13 Zusammenfassung der Eigenschaften der Dämmsysteme

Die nachfolgende Tabelle (Tab. 5) stellt einige für die Anwendung relevante Aspekte der im Projekt verwendeten Dämmsysteme gegenüber.

Tab. 5 Tabellarischer Vergleich der verwendeten Dämmsysteme, Einschätzungen beziehen sich auf die Erfahrungen im Testhaus

System	Zellulose	Perliteplatte	Thermosilit-putz	Holzweich-faserplatte	Schilfrohr-dämmplatte
Material	organisch	mineralisch	mineralisch	organisch	organisch
Applikation	aufspritzen	kleben	aufspritzen	kleben + dübeln	kleben + dübeln
Konstruktionsdicken in mm laut Hersteller	9,3	9,0	12,4	7,7	12,4
U-Wert nach Herstellerangaben in W/(m ² ·K)	0,332	0,312	0,373	0,345	0,324
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, schwierige Eckausbildung	gering	mittel, Förderlänge begrenzt	mittel	mittel
Schmutzfaktor	hoch	gering	mittel	mittel	mittel
Befestigungsmöglichkeiten	Bilder, Spiegel direkt, Regale, Wandschränke etc. ja nach Gewicht in tragender Wand (siehe Bauteilkatalog im Anhang)				
E-Stecker und Schalterdosen	Verlängern und am Mauerwerk befestigen				
$\Delta OI3_{Kon}$ -Index (nur Innendämmsystem)	10,0	25,5	26,5	9,2	-1,4
Reversibilität	Mäßig, große Mengen anhaftenden Bestandsputzes	Mittel, Kleber vom Bestandsputz nur schwer zu trennen	Gut, der Putz löste sich als Ganzes von der Wand	Mittel, Kleber vom Bestandsputz nur schwer zu trennen	sehr gut, bis auf Dübellöcher keine Beschädigung am Bestand

System	Zellulose	Perliteplatte	Thermosilit-putz	Holzweichfaserplatte	Schilfrohrdämmplatte
Trennbarkeit der Komponenten	nur zum Teil möglich	nicht möglich	nicht notwendig	nicht möglich	möglich
Recycling	Putz: mineral. Bauschutt, Zellulose recyclebar	Mineral. Bauschutt	Mineral. Bauschutt	Kompostierbar	Kompostierbar und recyclebar

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 Ebenflächigkeit 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 Renocell-Putz aufgebracht werden konnte. Hier war vor allem die Verschmutzung der Umgebung sehr hoch. Auch die Austrocknungsdauer war länger wie bei den Plattenwerkstoffen, jedoch noch sehr viel zügiger wie bei dem 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 konnte von den Platten ohne Schwierigkeiten durch Abklopfen entfernt werden, so dass die Schilfplatten nach Entfernen der Dübel zur Gänze wiedergewonnen werden konnten und als solche anderweitig wieder eingebaut werden könnten. Andererseits schienen die Verarbeiter das Dämmsystem nicht korrekt angebracht zu haben. Bis auf die Dübellöcher blieb die Wand unversehrt, was bei denkmalgeschützten Objekten von Vorteil ist, wenn der ursprüngliche Zustand wieder hergestellt werden kann.

2.14 Reduzierung der Transmissionswärmeverluste durch Innendämmmaßnahmen

In den folgenden Tabellen / Diagrammen ist dargestellt, wie sich die Innendämmmaßnahmen auf den Transmissionswärmeverlust auswirken. Hier sind drei Außentemperaturszenarien dargestellt mit jeweils konstanter Innentemperatur von 20 °C. In der Spalte HGD sind die für den Standort Graz ausgewiesenen Heizgradtage (Summe der täglichen Temperaturdifferenzen aller Heiztage zwischen Innentemperatur und mittlerer Tagesaußentemperatur niedriger als 12°C = Heizgrenze über die gesamte Heizperiode) angeführt und auf dieser Basis der Transmissionswärmeverlust in Kilowattstunden pro Jahr und m2 angegeben. Die Differenz zwischen ungedämmter und gedämmter Wand ergibt die Energieeinsparung.

Der U-Wert der Bestandswand hat sich auf Grund der aus den Untersuchungen der TU Dresden gewonnenen Materialkennwerte verbessert. Das im Versuchsobjekt verbaute Ziegelmaterial ist poröser und damit leichter als die im Baubook (Datenbank für Baustoffe vom Energieinstitut Vorarlberg) angegebenen Werte, wodurch sich für die gedämmten Konstruktionen U-Werte ergeben, die unter 0,35 W/m2K liegen.

Tab. 6 Innentemperatur jeweils 20°C, 3 unterschiedliche Außentemperaturen, Energieeinsparung ermittelt auf Grund der Heizgradtage am Standort Graz, Schönbrunnngasse 30 mit den tatsächlichen Wärmeleitfähigkeiten

	U-Wert	$\theta_{\text{extern}} -10,5^{\circ}\text{C}$	$\theta_{\text{extern}} -2,5^{\circ}\text{C}$	$\theta_{\text{extern}} 7,5^{\circ}\text{C}$	3588 HGD	Einsparung	
Temperaturdifferenz $\theta_{\text{ext}} - \theta_{\text{int}}$		$\Delta t 30,5^{\circ}\text{C}$	$\Delta t 22,5^{\circ}\text{C}$	$\Delta t 12,5^{\circ}\text{C}$			
Einheit	W/(m ² ·K)	W/m2	W/m2	W/m2	kWh/(a·m ²)	kWh/(a·m ²)	%
Dämmsystem							
- (ungedämmt)	0.708	21.6	15.9	8.9	2.54		
Zellulose (d= 80 mm)	0.336	10.2	7.6	4.2	1.21	1.33	52.5
Perliteplatte (d= 80 mm)	0.312	9.5	7.0	3.9	1.12	1.42	55.9
Dämmputz (d= 120 mm)	0.331	10.1	7.4	4.1	1.19	1.35	53.2
Holzweichfaser (d= 60 mm)	0.345	10.5	7.8	4.3	1.24	1.30	51.3
Schilf (d= 100 mm)	0.324	9.9	7.3	4.1	1.16	1.38	54.2

Tab. 7 Innentemperatur jeweils 20°C, 3 unterschiedliche Außentemperaturen, Energieeinsparung ermittelt auf Grund der Heizgradtage am Standort Graz, Schönbrunngrasse 30 mit den Wärmeleitfähigkeiten aus dem Baubook

	U-Wert	$\theta_{\text{extern}} -10,5^\circ\text{C}$	$\theta_{\text{extern}} -2,5^\circ\text{C}$	$\theta_{\text{extern}} 7,5^\circ\text{C}$	3588 HGD	Einsparung	
Temperaturdifferenz $\theta_{\text{ext}} - \theta_{\text{int}}$		$\Delta t 30,5^\circ\text{C}$	$\Delta t 22,5^\circ\text{C}$	$\Delta t 12,5^\circ\text{C}$			
Einheit	W/(m ² ·K)	W/m ²	W/m ²	W/m ²	kWh/(a·m ²)	kWh/(a·m ²)	%
Dämmsystem							
- (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	65.5
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. 6 und Tab. 7 führt vor Augen, wie weit die tatsächliche Situation von einem Berechnungsergebnis abweichen kann, welches auf zweifellos korrekten, aber eben im vorliegenden Fall nicht zutreffenden, Literaturwerten beruht. Zur Erstellung der Tab. 7 wurden für die Wärmeleitfähigkeiten die Baubook-Werte verwendet. Der damit berechnete U-Wert der Bestandskonstruktion von 1,176 W/(m²·K) liegt 66 % über dem realen Wert von 0,708 W/(m²·K) aus Tab. 6. Der höhere U-Wert aus dem Baubook führt zwar zu einer höheren Sicherheit bei hygrothermischen Berechnungen, gleichzeitig werden damit aber die möglichen Energieeinsparungen überschätzt. Die durchschnittliche, zu erwartende Einsparung an Heizenergieverlusten beträgt bei den gewählten klimatischen Randbedingungen mit den tatsächlichen Wärmeleitfähigkeiten bei 53 %, mit den offiziellen Werten werden dagegen 66 % prognostiziert.

3 Hygrothermische Materialkennwerte und -funktionen

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

Gleichzeitig steigen jedoch mit einer breiteren Anwendung auch die Anforderungen an die Genauigkeit der verwendeten Modelle und Daten. Während die spezifischen äußeren Gegebenheiten einer Bauteilsimulation wie Anfangszustand oder Klimarandbedingungen recht zuverlässig bestimmbar sind und auch die zur Verfügung stehenden Rechenverfahren bei gleichem Input vergleichbare Ergebnisse liefern (siehe EU-Projekt HAMSTAD [Roels et al. 2004a und 2004b]), stellen vor allem die verwendeten Materialdaten ein entscheidendes Qualitätsmerkmal für die Simulationsergebnisse dar. Da die Kosten für umfassende Materialuntersuchungen recht hoch sind, 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.

Die wichtigsten hygrothermischen Materialkennwerte sind in Tab. 11 aufgeführt. In Tab. 12 sind die Schichtaufbauten der einzelnen Dämmsysteme zusammengetragen, sowie die sich daraus ergebenden Wärmewiderstände und s_d -Werte der Gesamtsysteme. Als Grundlage dienten in dieser Tabelle die Angaben der Materialhersteller.

3.1 Materialuntersuchungen

Zur hygrothermischen Charakterisierung eines Baustoffes sind Messdaten der entsprechenden Speicher- und Transportkoeffizienten erforderlich. Eine Liste der erforderlichen Experimente, der daraus ableitbaren Materialparameter, ihre symbolische Bezeichnung und die dazugehörige physikalische Einheit listet Tab. 8 auf.

Tab. 8 Liste der Basisexperimente einschließlich der daraus ableitbaren Materialparameter

Experiment	Messbare / ableitbare Parameter	Symbol	Physikalische Einheit
Wärmeflussmessung	Wärmeleitfähigkeit des trockenen Materials	λ	W / (m·K)
Calorimeter	Spez. Wärmekapazität des trockenen Materials	c_p	J / (kg·K)
Dichtebestimmung, Heliumpycnometrie	Rohdichte, Reindichte (Matrixdichte), Porosität	ρ_s ρ_m Φ	kg / m ³ kg / m ³ m ³ / m ³
Feuchteretention	Feuchtegehalt über dem	$\theta_i(p_c)$	m ³ / m ³

Experiment	Messbare / ableitbare Parameter	Symbol	Physikalische Einheit
Kapillardruck			
Feuchtesorption	Feuchtegehalt über der relativen Luftfeuchte	$\theta_i(\phi)$	m^3 / m^3
Wasseraufnahmeexperiment	Feuchtegehalt in Abhängigkeit von der Zeit,	$\theta_i(t)$	m^3 / m^3
	Wasseraufnahmekoeffizient, kapillarer Feuchtegehalt	A_w θ_{cap}	$kg / (m^2 \cdot s^{0,5})$ m^3 / m^3
Trocknungsexperiment	Feuchtegehalt in Abhängigkeit von der Zeit	$\theta_i(t)$	m^3 / m^3
Dampfdiffusionsmessungen	Dry-cup/Wet-cup Dampfdiffusionswiderstände	μ_{dry}	-
		μ_{wet}	-
Strömungsmessungen an gesättigten Proben	Flüssigwasserleitfähigkeit bei Sättigung	$K_l(\theta_{eff})$	s

3.2 Beprobung

Die Messung der relevanten Materialeigenschaften erfordert den Einsatz zahlreicher Messmethoden, die in der Regel unterschiedliche Probendimensionen, Abdichtungstechniken oder Messzellen benötigen. Zur Beprobung werden daher die Probekörper randomisiert aus einer Materialcharge entnommen und in einem Probenkollektiv mit einer gewissen Anzahl von Wiederholungen zusammengestellt. Ein typisches Kollektiv gibt Tab. 9 wieder.

Tab. 9 Beispiel für die Probenauswahl eines Probenkollektiv

Probengröße	Wiederholungen
Prismen 70 x 70 x 30 mm	8
Prismen 40 x 40 x 10 mm	64
Prismen 100 x 100 mm	3-5
Prismen 100 x 200 mm	3-5
Scheiben mit 50 mm Ø x 10 mm	10
Scheiben mit 200 mm Ø x 10 mm und 200 mm Ø x 50 mm	3-5
Scheiben mit 70 mm Ø x 30 mm und 70 mm Ø x 50 mm	8
Scheiben mit 100 mm Ø x 20 mm und 100 mm Ø x 50 mm	3-5

Nach der Beprobung sind vor der eigentlichen Messung weitere Arbeitsschritte erforderlich:

- Metrische Messung der Probengeometrien zur Berechnung der Flächen und Volumina, welche nach einigen Experimenten bei schwind- und quellfähigen Materialien wie Holz wiederholt werden muss,

- Bestimmung der Trockenmassen der Proben nach einer materialabhängigen Trocknung (z. B. Ziegel $T_{\max} = 105^{\circ}\text{C}$, Gipsputz $T_{\max} = 45^{\circ}\text{C}$), temperatursensitive Materialien werden am Ende der Experimente getrocknet,
- Präparation von Probekörpern; z. B. Einbau der Körper in Acrylfließzellen, laterale Probenabdichtung, Bohrung von Hohlräumen für die Aufnahme von Sensoren, etc.
- Bestimmung der Gesamtmassen der Proben nach der Präparation.
- Probenkonditionierung; Lagerung der Probekörper bei den erforderlichen experimentellen Bedingungen, z. B. kapillare Aufsättigung der Proben auf speziellen Keramiken, Lagerung bei bestimmten Luftfeuchten für die Wasseraufnahme, bzw. Wasserdampfdiffusion, etc.

3.3 Messverfahren

Die vorkonditionierten Proben werden in den Messablauf des IBK-Labors eingeschleust, um die relevanten hygrothermischen Kennwerte zu messen.

3.3.1 Rohdichte oder Trockenraumdichte

Als Rohdichte oder Trockenraumdichte, ρ , bezeichnet man die Dichte eines porösen Festkörpers, die definiert ist als das Verhältnis von Masse der trockenen Festsubstanz und dem eingenommenen Raumvolumen, bestehend aus Feststoff inklusive Porenraum der Materialprobe [kg/m^3]. Die Trockenmasse wird durch Trocknung auf Gewichtskonstanz bei einer definierten Temperatur ermittelt. Die jeweilige Trocknungstemperatur richtet sich nach der Art des Materials und variiert zwischen 40°C und 105°C .

3.3.2 Feststoffdichte, Totale Porosität

Die Messung beginnt mit der Lagerung der Proben in einem entlüfteten, mit Wasser gefüllten Exsikkator. Zusätzlich wird ein Vakuum angelegt und die Luft aus dem System entfernt, wobei die Probe für über 24 Stunden im Exsikkator verbleibt. Die offene Porosität berechnet sich über:

$$\Phi_o * \rho_w = \frac{m_w - m_d}{V} \quad (1)$$

Wobei m_d [kg] der Masse der trockenen Probe, m_w [kg] der Masse der feuchten Probe, V [m^3] dem Volumen der Probe, ρ_w [kg/m^3] der Dichte von Wasser und Φ_o [m^3/m^3] der Porosität entspricht.

Beim zweiten Verfahren wird die Reindichte oder Feststoffdichte mit dem Heliumpycnometer bestimmt. Die Feststoffdichte ρ_m , auch als Partikeldichte bezeichnet, entspricht der Dichte der festen Matrix und berechnet sich aus dem Verhältnis der Gesamtmasse des Feststoffs bezogen auf das Feststoffvolumen ohne Porenräume [kg/m^3]. Die Feststoffdichte wird mit

einem kommerziellen Heliumpycnometer bestimmt. Im Messgerät sind zwei Kammern vorhanden, eine davon mit variablem Volumen. Zu Messbeginn wird das Volumen der unbefüllten Probenkammer auf die gleiche Größe der Referenzkammer eingestellt. Dazu wird mit Hilfe von Hubkolben in beide zuvor evakuierte Kammern die gleiche Menge Helium eingebracht und das Volumen der veränderlichen Kammer so eingestellt, dass in beiden Kammern der gleiche Druck vorliegt. Zur Messung wird Helium verwendet, da es als inertes Gas den kleinsten Molekulardurchmesser besitzt und alle zugänglichen Hohlräume einer Probe erfasst. Anschließend wird die Probenkammer mit dem Prüfgut befüllt, wieder evakuiert und dann die gleiche Menge Helium wie vorher eingebracht. Um in beiden Kammern nun den gleichen Druck zu erreichen, muss das Volumen der Prüfkammer um das Volumen des reinen Feststoffes des Prüfgutes vergrößert werden. Dividiert man die Masse der Probe durch das so bestimmte Reinvolumen, erhält man die Reindichte.

Die Porosität, Φ [m^3/m^3] berechnet sich über das Substanzvolumen aus Trockenraumdichte und Feststoffdichte. Sie beschreibt den gesamten, zur Verfügung stehenden Porenraum.

$$\Phi = 1 - \frac{\rho_d}{\rho_m} \quad (2)$$

Hierbei sind ρ_d [kg/m^3] die Trockenraumdichte/Rohdichte, ρ_m [kg/m^3] die Feststoffdichte/Reindichte und Φ [m^3/m^3] die Porosität.

3.3.3 Offene Porosität

Die offene Porosität, Φ [m^3/m^3 bzw. Vol%] ist definiert als Verhältnis der für Wasser zugänglichen, offenen Poren bezogen auf das Gesamtvolumen der Probe.

3.3.4 Freie Wasseraufnahme

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

3.3.5 Spezifische Wärmekapazität

Die spezifische Wärmekapazität als Stoffkenngröße gibt an, wie groß die Wärmemenge ist, die 1 kg eines Stoffes aufnimmt oder abgibt, wenn dessen Temperatur um 1 K erhöht oder gesenkt wird. Die Einheit für die spezifische Wärmekapazität c_p unter konstantem Druck ist $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$.

3.3.6 Wärmeleitfähigkeit

Die Wärmeleitfähigkeit ist eine charakteristische Stoffeigenschaft und eine wichtige Basisgröße bei der Beurteilung des thermischen und hygri-schen Verhaltens von Baustoffen und ganzer Konstruktionen. Unter Wirkung eines Temperaturgefälles erfolgt der Transport von Wärme durch die Feststoffmatrix durch den Vorgang der Wärmeleitung von Stoffteilchen zu

Stoffteilchen. Während bei festen Körpern die Bewegungsenergie der um mittlere Lagen schwingenden Teilchen weitergegeben wird, ändern bei Flüssigkeiten und Gasen die einzelnen Teilchen ihre Lage zueinander.

Die Wärmeleitfähigkeit ist von verschiedenen Einflussfaktoren abhängig. Bei nichtmetallischen Stoffen stellt die physikalische und chemische Struktur eine entscheidende Einflussgröße dar. Die Wärmeleitfähigkeit ist im Allgemeinen roh-dichte- und temperaturabhängig. Bei wasseraufnahmefähigen Stoffen beeinflusst auch deren Wassergehalt die Wärmeleitung. Als Stoffkennwert ist die Wärmeleitfähigkeit ausschließlich experimentell bestimmbar.

Die Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit kann nur nach indirekten Messmethoden erfolgen, also aus einer Beziehung zwischen der Wärmeleitfähigkeit und anderen Größen, die messtechnisch direkt zugänglich sind. Es ergibt sich daraus ein im Wesentlichen für alle Messverfahren gleiches Messprinzip. Demnach werden in der entsprechenden Probe der Wärmestrom und die maßgebende Temperaturdifferenz bestimmt. Zusätzlich sind die Probenabmessungen festzustellen. Der Wärmestrom oder die Wärmestromdichte werden aus der elektrischen Heizleistung abgeleitet oder mit Hilfe von Wärmestrommessern bestimmt. Die Temperaturmessung erfolgt mittels Thermoelementen oder Widerstandsthermometern.

Die Wärmeleitfähigkeit liefert die Energiemenge, die durch eine definierte Materialdicke bei einem definierten Temperaturgradienten transportiert werden kann [W/(m·K)]. Zur Messung kommt in aller Regel die Wärme-Puls-Technologie zum Einsatz. Dazu wird ein definierter Wärmepuls über einen elektrischen Heizwiderstand in einer Sonde erzeugt und in den Probenkörper eingeleitet. Die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit basiert hier auf periodischen Temperaturmessungen als Funktion der Zeit einer 10 bis 15 mm mächtigen Materialprobe und der in den jeweiligen Zeitintervallen gemessenen Wärmeströme.

Darüber hinaus wird die Wärmeleitfähigkeit für unterschiedliche Bewertungsstandards ausgewiesen:

- λ_{23-80} , Rechenwert mit Feuchtefaktor $f_u = 0,8$ und Bezugsfeuchtegehalt $u = 0,03$ kg/kg
- λ_{trocken} , Heat-Puls-Technik mit Plattensensoren

3.3.7 Wasserretention (nach ISO 11 274)

Die Feuchtespeicherung wird abhängig von der zum Einsatz kommenden Messmethode in einen hygroscopischen und einen überhygroscopischen Anteil differenziert.

Zur Bestimmung der überhygroscopischen Feuchtespeicherung werden die Materialproben nach der kapillaren Wassersättigung auf keramischen Platten platziert und über angelegte Kapillardrucke entwässert. Abhängig vom angelegten Kapillarpotential unterscheidet man die Messverfahren in Hängende Wassersäule (0-30 hPa), Unterdruckapparatur (30-750 hPa) und Druckplattenapparatur (30-15000 hPa).

Zur Messung der Wasserretention werden die zuvor gesättigten Proben stufenweise über steigende Kapillarpotentiale entwässert. Nach dem Erhalt eines kapillaren Gleichgewichtes

bei einer Druckstufe wird der Feuchtegehalt der Materialproben gravimetrisch bestimmt. Die Proben werden anschließend wieder auf der Keramik platziert und eine nächst höhere Druckstufe angelegt. Zunehmende Kapillarpotentiale führen zu abnehmenden Wassergehalten und liefern eine Desorptionscharakteristik. Umgekehrt führen abnehmende Kapillardrücke zu steigenden Wassergehalten und liefern eine Adsorptionscharakteristik der Feuchtespeicherung im überhygroskopischen Bereich.



Abb. 35 Druckplattenapparaturen zur Bestimmung der Wasserretention von kapillarporösen Baustoffen

3.3.8 Hygrische Sorptionsisotherme (nach DIN EN ISO 12 571)

Zur Bestimmung der hygroskopischen Feuchtespeicherung werden die Proben nach dem Abschluss der Vorkonditionierung (Dauer: ca. 2 Monate) bei einer relativen Luftfeuchte von 100 % in einem Exsikkator mit K_2SO_4 bei 96,7 % relativer Feuchte gelagert. Nach dem Erhalt statischer Gleichgewichtsbedingungen wird der Wassergehalt gravimetrisch bestimmt und die Proben werden in einer weiteren Luftfeuchtestufe konditioniert. Durch eine stufenweise Konditionierung mit jeweils niedrigeren relativen Luftfeuchten werden die Proben sukzessive entwässert. Abnehmende Luftfeuchten mit immer trockner werdenden Proben liefern die Desorptionscharakteristik, steigende Luftfeuchten mit wachsenden Feuchtegehalten liefern eine Adsorptionscharakteristik. Eine Differenzierung in eine Ad- und Desorption ist besonders für die Beurteilung der feuchtepuffernden Eigenschaften relevant.

Die Wasserretention und die hygrische Sorptionsisotherme zusammen liefern die gesamte Feuchtespeicherfunktion. Deren Verknüpfung erfolgt über die *Kelvin*-Gleichung unter Verwendung von Gleichung 3 nach:

$$\varphi = e^{-\frac{2\sigma}{r\rho_w R_v T}} \tag{3}$$

wobei R_v der allgemeinen Gaskonstanten [Ws/(kg·K)] und T der Temperatur in [K] entspricht. Die Parameter σ und ω korrespondieren mit der Oberflächenspannung [Pa/m] und dem

Kontaktwinkel an der Grenzfläche zwischen Wasser und Festphase. ρ_w ist die Dichte des Wassers [kg/m^3] und die relative Luftfeuchte φ [-]. Die Konvertierung von relativer Luftfeuchte in Kapillardruck erfolgt über den Porenradius mit:

$$\psi = \frac{c}{r} \quad \text{mit} \quad c = \frac{2\sigma \cos \omega}{g\rho_w} \quad (4)$$

wobei ψ dem Kapillardruck [Pa] entspricht. c ist äquivalent der kapillaren Steighöhe, r multipliziert mit der Konstanten von $\sim 9.81 \cdot 10^{-3}$ repräsentiert einen Äquivalentporenradius [cm] und g ist die Gravitation [m/s].

3.3.9 Wasseraufnahmekoeffizient (nach EN ISO 15148)

Die Feuchtebewegungen in einem kapillarporösen Baustoff sind eine Kombination von dampfförmigen und flüssigen Feuchteströmen. Diese Feuchteströme stehen mit Temperatur-Dampfdruck- und Kapillardruckgradienten sowie anderen Eigenschaften der unterschiedlichen Baustoffe in einer komplexen Wechselbeziehung. Zur Bestimmung dieser Transporteigenschaften kommen experimentell zwei prinzipielle Messmethoden zum Einsatz.



Abb. 36 Automatische Messapparatur zur Bestimmung der kontinuierlichen Wasseraufnahme und der kapillaren Sättigung von kapillar-porösen Baustoffen.

Bei hohen relativen Luftfeuchten erfolgt der gesamte Feuchtetransport dominant in der Flüssigphase. Dieser Fall liegt vor, wenn ein Baustoff in Wasser getaucht oder auch durch Schlagregen stärker befeuchtet wird. Der Wasseraufnahmekoeffizient charakterisiert dabei die Eigenschaft eines weitgehend trockenen Baustoffes, Wasser von der Oberfläche her aufzusaugen und flüssiges Wasser in tiefer liegenden Porenraum zu transportieren. Wäh-

rend der Messung durchläuft die Materialprobe unterschiedliche Feuchtezustände. Folglich ändern sich die Transportgradienten, was zu kontinuierlich abnehmenden Flüssen führt. Der Wasseraufnahmekoeffizient entspricht daher der Steigung der Wasseraufnahmekurve bezogen auf die Quadratwurzel der Zeit und wird üblicherweise in $\text{kg}/(\text{m}^2\text{s}^{0.5})$, bzw. $\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{h}^{0.5})$ angegeben. Am Ende des Wasseraufnahmeexperimentes stellt sich in einer Probe ein typischer Feuchtegehalt ein, der als kapillarer Wassergehalt $\theta_{\text{cap}} [\text{m}^3/\text{m}^3]$ bezeichnet wird.

Die experimentelle Apparatur besteht aus:

- einer Klimakammer mit einer vertikal justierbaren Wasserwanne, wo die Temperatur konstant und die relative Luftfeuchte über 97 % gehalten werden kann,
- der Materialprobe mit einer speziellen Halterung zur präzisen Platzierung der Probe auf der Wasseroberfläche,
- einer Digitalwaage (± 0.01 g) mit Halterung, die eine kontinuierliche Messung ermöglicht während die Probe unter der Waage hängt und
- einem Datenlogger und Computer zur automatischen Registrierung der Wägedaten sowie der Klimabedingungen relative Luftfeuchte und Temperatur innerhalb der Kammer.

Die zeitabhängige Wasseraufnahme der Materialprobe wird über die Probenhalterung an die Waage weitervermittelt und vom Logger aufgezeichnet. Die Ankopplung der Probe an die Wasseroberfläche erfolgt über einen Justierlift. Während sich Probe und Wasserwanne in der Klimakammer befinden, sind Waage und Datenlogger zum Feuchteschutz außerhalb platziert.

Vor der Messung werden die Proben ausgemessen, getrocknet und deren Volumen sowie deren Masse bestimmt. Abhängig vom Material kommen Proben von 20 bis 100 mm Höhe zum Einsatz. Zur Gewährleistung eines eindimensionalen, vertikalen Transportes sind die Proben lateral versiegelt, wobei spezielle Beschichtungen, Epoxidharz und/oder Aluminiumfolie verwendet werden. Anschließend werden die Proben über 14 Tage in Exsikkatoren bei einer relativen Luftfeuchte von 33 % gelagert. Zum Messbeginn wird eine nicht luftdichte Folie auf der Probenoberfläche befestigt. Damit wird eine Befeuchtung des Materials von oben während der Messung in der 97 % feuchten Kammer verhindert. Dann wird die Probenhalterung mit der Materialprobe auf die Halterung in der Kammer platziert und die Kammer geschlossen. Nach der Aktivierung des Datenloggers wird der Wannenslift zur Probe hin bewegt bis die Wasserfüllung Kontakt mit der Materialprobe hat. Während der gesamten Wasseraufnahmemessung werden Wasserwanne und Probenhalterung stabil belassen. Die Daten der Waage und der relative Luftfeuchte-/Temperatursensor werden kontinuierlich abgefragt. Bei Messende wird der Wassergehalt der Probe gravimetrisch gemessen und zur Kalibrierung des Wasseraufnahmeexperimentes verwendet.

3.3.10 Wasserdampfdiffusionswiderstand (nach EN ISO 12572)

Bei geringen relativen Luftfeuchten erfolgt der Feuchtetransport dominant durch die Wasserdampfdiffusion. Mit Hilfe des sogenannten „Dry-Cup-Verfahrens“ im Feuchtigkeitsbereich zwischen 0 bis 50 % relativer Luftfeuchte kann diese Diffusion gemessen werden. Bei höheren Luftfeuchten bis etwa 95 % treten gleichzeitig dampfförmige und flüssige Feuchteströme auf. Dieser zunehmende Flüssigtransport bewirkt einen exponentiellen Anstieg der Diffusion und kann bei einem Feuchtigkeitsbereich zwischen 50 bis 100 % relativer Luftfeuchte über das „Wet-Cup-Verfahren“ (als auch noch weiteren Zwischenstufen) gemessen werden.

Tab. 10 Verwendete Sorbentien zur Realisierung konstanter Randbedingungen während der Messungen

Sorbens	Relative Luftfeuchte von Trocknungsmittel und Salzlösung [%]
Silica Gel	3 - 5
Magnesiumchlorid	32,9
Natriumchlorid	75,4
Ammonium-Di-Hydrogenphosphat	93,0
Kaliumsulfat	97,4

Die Messungen erfolgen unter isothermen Bedingungen. Dazu wird eine plattenförmige Probe des zu prüfenden Materials als oberer Abschluss auf ein Gefäß aufgesetzt und dampfdicht mit dem Gefäßrand verbunden. Im Gefäß wird durch ein Trocknungsmittel oder eine geeignete gesättigte Salzlösung eine konstante relative Luftfeuchtigkeit eingestellt. Zur Messung werden die Gefäße in einen Klimaraum mit konstanter Temperatur und Luftfeuchte gebracht. Unter dem Einfluss des Wasserdampfdruckgefälles zwischen den an die Probenoberfläche angrenzenden Lufträumen diffundiert der Wasserdampf durch die Proben hindurch. Nach Einstellen eines stationären Gleichgewichtes ergibt sich eine pro Zeiteinheit konstante Gewichtsänderung des Messgefäßes, welche dem Diffusionsstrom bei dem angelegten Luftfeuchtegradienten entspricht. Während der Messung wird die gesamte Masse des Gefäßes periodisch gemessen. Nach dem Erreichen stationärer Bedingungen, die mit einer zeitkonstanten Gewichtsänderung einhergehen, kann der Wasserdampfdiffusionswiderstand, μ , nach folgender Gleichung berechnet werden:

$$\mu = \frac{1}{s} \left(p_a * A * \frac{p_1 - p_2}{j} - s_a \right) \tag{5}$$

Hierbei repräsentieren die Parameter s [m] die Dicke des Probekörpers, p_a [kg/(m·h·Pa)] die Wasserdampfpermeabilität von Luft, A [m²] die Fläche der Probe, s_a [m] die mittlere Schichtdicke der Luftschicht zwischen Probekörper und Sorbens. Die Parameter p_1 und p_2 [Pa] definieren den Wasserdampfdruck an der Probenoberseite und an der Probenunterseite.

te und j [kg/h] beschreibt den Wasserdampfdiffusionsstrom. Entsprechend obiger Angaben kann der μ -Wert bezüglich des Feuchtebereichs, z. B. μ_{wet} , näher spezifiziert werden.

Zur Bestimmung des Wasserdampfdiffusionswiderstands von Baustoffproben ist die Kenntnis der Wasserdampfpermeabilität von Luft erforderlich, die über die nachfolgende Gleichung berechnet werden kann.

$$p_a = \frac{0.083}{R_D T} \frac{p_0}{p} \left(\frac{T}{273} \right)^{1.81} \quad (6)$$

Darin sind R_D [Nm/(kg·K)] die Gaskonstante von Wasserdampf mit 462 Nm/(kg·K), T [K] die absolute Temperatur und P_0 [hPa] der atmosphärischer Druck bei Standardbedingungen von 1013.25 hPa.

3.4 Verifizierungsexperimente: kontinuierliche Wasseraufnahme und Abtrocknung

Die Qualität hygrothermischer Bauteilsimulationen hängt in hohem Maße von der Genauigkeit der verwendeten Materialfunktionen ab. Daher ist es wichtig, diese Funktionen anhand von Wasseraufnahme- und Trocknungsexperimenten zu kalibrieren. Dafür werden allerdings umfangreiche Messdaten einschließlich aller Anfangs-, Rand- und Übergangsbedingungen in möglichst dichter zeitlicher Auflösung benötigt.

Das Trocknungsverhalten von Baustoffen wird stark von den geometrischen und klimatischen Verhältnissen beeinflusst. Daher ist stets eine Abhängigkeit der Messdaten von diesen Bedingungen vorhanden. Das zusätzliche Erfassen der Randbedingungen während der Messung erlaubt eine deutlich verbesserte Interpretierbarkeit der ermittelten Daten und ermöglicht dadurch die Verwendung zur Verifizierung von Materialfunktionen durch inverse Modellierung.

Die Leitfunktionen (siehe Kapitel 3.5) enthalten zwei Parameter, die der Kalibrierung des Materialmodells an den Laborexperimenten dienen. In beiden Fällen der Kalibrierung werden die Parameter in der numerischen Simulation variiert bis eine ausreichende Übereinstimmung zwischen Simulation und Experiment gegeben ist. Die Anpassungsparameter dienen der Skalierung der Transportparameter im kapillaren und hygrischen Feuchtebereich. Mit diesen können beide Funktionen, die Flüssigwasserleitfähigkeit und der Dampfdiffusionskoeffizient skaliert werden. Dies geschieht u.a. anhand des Trocknungsexperimentes.



Abb. 37 Verdunstungsapparatur zur kontinuierlichen Bestimmung der Trocknungsgeschwindigkeit und des Trocknungsverlaufs von kapillar-porösen Baustoffen und zur Verifizierung von Materialfunktionen.

Zur Kontrolle des überhygroskopischen Feuchtebereiches dient die Simulation des Aufsaugversuches. Dazu wird ein in seinen Abmessungen den Proben im Labor entsprechender Körper modelliert und an seiner Unterseite mit Wasser beaufschlagt. Die Wasseraufnahme wird über die Zeit ausgegeben und mit den Messdaten aus dem Labor verglichen. Die Leitfunktion wird dabei über die beiden Funktionsparameter und variiert, bis Messung und Rechnung die gewünschte Übereinstimmung zeigen.

3.5 Erstellung von Materialfunktionen

Die hygrothermische Bauteilsimulation bzw. Feuchte- und Wärmetransportberechnungen basieren auf der numerischen Lösung von gekoppelten Differentialgleichungen mit feuchte- und temperaturabhängigen Transport- und Speicherkoeffizienten. Die Laborexperimente hingegen liefern Basiskennwerte (oder -parameter), die einer Interpretation bedürfen, um als Parameter der Transport- und Speicherkoeffizienten verwendet werden zu können. Die Interpretation der Laborkennwerte zur Generierung von Materialfunktionen, welche die Materialeigenschaften adäquat beschreibenden, ist die wesentliche Aufgabe der Materialmodellierung. Das Materialmodell umfasst ein Set von Materialfunktionen einschließlich der Material- und Modellparameter. Die Anwendung des Materialmodells erfolgt notwendigerweise in drei Stufen: Modellierung, Kalibrierung und Validierung.

1. Modellierung - Anwendung geeigneter Materialfunktion auf die im Labor gemessenen Materialdaten
2. Kalibrierung - Bestimmung interner, „nicht sichtbarer“ Funktionsparameter durch Simulation von Laborexperimenten und deren Optimierung
3. Validierung - Vergleich zwischen gemessenem und berechnetem Materialverhalten anhand von Experimenten, die nicht zur Kalibrierung herangezogen wurden

Im Rahmen des vorliegenden Projektes OEKO-ID wird ein am IBK entwickeltes Materialmodell verwendet. Dieses „Ingenieurmodell zur hygrothermischen Materialcharakterisierung“ ermöglicht die Verknüpfung komplexer, aus thermodynamischen Grundlagen abgeleiteten Funktionen mit einfachen, aus der Ingenieurpraxis bekannten Kennwerten. Das Materialmodell besitzt den Vorteil der einfachen Handhabung und der Erweiterbarkeit auf andere Problemstellungen, da es keinen prinzipiell einschränkenden Voraussetzungen bezüglich der Modellierung von Transportvorgängen unterliegt.

Im Ergebnis steht ein im gesamten Feuchtebereich kalibriertes, auf thermodynamischen Grundlagen basierendes Transportmodell für den gekoppelten Flüssigwasser-, Wasserdampf- und Wärmetransport. Das Modell ist für die wissenschaftliche Weiterentwicklung zugänglich und wurde z. B. auf den Salztransport und Salzkristallisationsprozesse erweitert [Nicolai 2007]. Die Anpassungsgenauigkeit kann durch eine erweiterte, über die Mindestanforderungen hinausgehende Bestimmung von Messdaten entsprechend erhöht werden.

Das Ingenieurmodell zur hygrothermischen Materialcharakterisierung besitzt eine Reihe interner Funktions- und Materialparameter. Die internen Funktionsparameter werden durch Kalibrierung bestimmt. Dem Nutzer sichtbar ist ein Mindestsatz an Messdaten, die als Basisparameter bezeichnet werden. Basisparameter sind: Trockenraumdichte, Porosität, Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität, freier Sättigungsfeuchtegehalt und Ausgleichsfeuchte bei 80% relativer Luftfeuchte, Wasseraufnahmekoeffizient, Dampfdiffusionswiderstandsfaktor (dry-cup Wert μ_{dry}) und Trocknungskoeffizient. Mit diesem Satz an Basisparametern ist es möglich, das Materialverhalten grundlegend zu beschreiben und Sensitivitätsanalysen bzgl. einzelner Parameter durchzuführen.

Vergleichsmessungen international renommierter Bauphysiklabors haben gezeigt, dass der derzeitige Stand der Normen nicht ausreicht, um qualitativ hochwertige Messungen abzusichern. Die Ergebnisse differierten stark von Labor zu Labor, stärker als die festgestellte Inhomogenität der Materialeigenschaften. Das lässt den Schluss zu, dass die Resultate zu sehr von den individuellen Entscheidungen der ausführenden Personen abhängen und, in letzter Konsequenz, dass demnach die Normen überarbeitungsbedürftig sind. Die Basisparameter stellen daher eine Mindestanforderung an die durchzuführenden Laborexperimente dar. Zusätzliche Messungen erhöhen deutlich die Genauigkeit der Materialcharakterisierung des Ingenieurmodells und lassen daher auch präzisere Simulationsergebnisse erwarten, beispielsweise durch zusätzliche Messpunkte auf der Feuchtespeicherfunktion im Retentions- und Sorptionsfeuchtebereich, Permeabilitätsmessungen nahe Sättigung, wet-cup Dampfdiffusionsmessungen und die Bestimmung des Trocknungsverlaufes insbesondere im zweiten Trocknungsabschnitt. Die zusätzlichen Messpunkte fließen in das Materialmodell ein und präzisieren die physikalischen Modellvorstellungen.

3.5.1 Physikalisch basierte Materialfunktionen und deren Anpassung

Das „Ingenieurmodell zur hygrothermischen Materialcharakteristik“ beinhaltet die Ableitung und Definition der Materialfunktionen sowie die Vorschriften zu deren Anpassung und Kalib-

rierung, wobei eine Unterscheidung in die Funktionen für die Feuchtespeicherung und den Feuchtetransport vorgenommen wird.

Die Feuchtespeicherfunktion setzt sich aus der im hygroskopischen Feuchtebereich bestimmten Sorptionsisotherme und der im überhygroskopischen Bereich gemessenen Saugspannungskurve zusammen und lässt sich als eine durchgängige Funktion angeben. Die Transportfunktionen für flüssiges Wasser und Wasserdampf werden daraus abgeleitet und anhand weiterer Experimente kalibriert, wie z. B. durch das Trocknungsexperiment.

3.5.2 Anpassung der Feuchtespeicherfunktion

Für den Verlauf der Feuchtespeicherfunktion wird ein multimodaler Funktionsansatz verwendet, der sich aus der Summe gewichteter Einzelfunktionen mit einer entsprechenden Anzahl freier Parameter zusammensetzt. Diesem Ansatz liegt eine logarithmisch Gauß-normalverteilte Porenradienverteilung zu Grunde, deren Integral der Feuchtespeicherfunktion entspricht. Die Anpassung erfolgt an die Messwerte der Feuchtespeicherung im hygroskopischen und überhygroskopischen Feuchtebereich, wobei die Modalität und die daran gekoppelte Anzahl freier Parameter anzugeben sind.

$$\frac{\partial}{\partial pC} \theta_l(pC) = \sum_{i=1}^N \frac{\theta_i}{2\pi S_i} \cdot \exp \left(-\frac{pC - pC_i}{2S_i^2} \right)^2 \quad (7)$$

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

Hierbei entsprechen die Parameter pC [log Pa] dem Logarithmus des Kapillardruckes, θ_l [m³/m³] dem Volumenanteil der Flüssigphase, N der Modalität (Peak-Anzahl in der Porenvolumenverteilungskurve). S_i [-] ist die Standardabweichung, pC_i [log Pa] der Logarithmus der Kapillardrücke an den Peakpositionen mit θ_i [m³/m³] dem charakteristischen gemessenen volumetrischen Wassergehalt. Erforderlich ist der Parameter der Gauß-Normalverteilung.

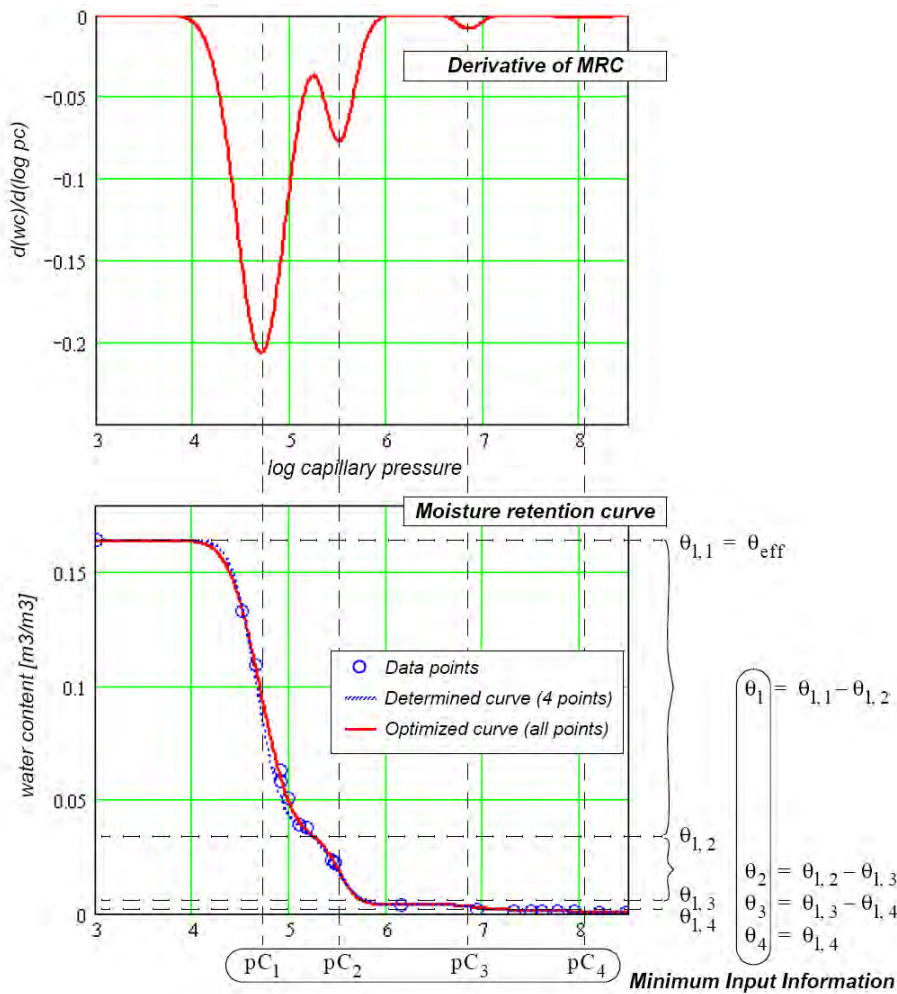


Abb. 38 Feuchtespeicher- (unten) und Porenvolumenverteilungsfunktion (oben) eines Ziegels. Die Peaks (pC) liefern die Porenradienmaxima und deren Wassergehaltsverteilungen identifizieren die korrespondierenden Porenvolumina

Ein Beispiel für die Anpassung der obigen Gleichung an gemessenen Daten zeigt Abb. 38. Diese repräsentiert die integrale Feuchtespeicherfunktion (unten) nebst ihrer Ableitung (oben). Auch wird ersichtlich, dass eine zunehmende Anzahl von Datenpunkten die Genauigkeit der Funktionalisierung fördert.

3.5.3 Modellansatz für Flüssigwasserleitfähigkeit

Zur Ableitung der Transportfunktionen für Flüssigwasser und Wasserdampf aus der Porenstruktur werden zwei Modelle miteinander kombiniert. Die Flüssigwasserleitfähigkeit wird, basierend auf dem Porenmodell von Haagen-Poseuille und die Feuchteleitfähigkeit über das Porenmodell nach [Burdine 1953] aus der Porenstruktur abgeleitet. Die Summation über alle Poren liefert die Flussdichte des flüssigen Wassers in Abhängigkeit vom größten Wasser gefüllten Kapillarradius. Der Term vor dem Potentialgradient beschreibt die Flüssigwasserleitfähigkeit des Porensystems.

$$j_k^{m_l} = - \frac{\rho_l}{8 \cdot \eta_{a_l}} \cdot \tau \cdot \int_{R_{min}}^R \pi \cdot r^4 \cdot \frac{dn}{dr} \cdot dr \cdot \rho_l \cdot g_k + \frac{\partial p_c}{\partial x_k} \tag{9}$$

Die dazugehörigen Parameter sind wie folgt definiert:

- r [m] Kapillarradius
- ρ_l [kg/m³] Dichte von Wasser
- η_l [kg/(m·s)] kinematische Viskosität
- N [-] Modalität (Anzahl der Peaks in der Funktion)
- η_l [kg/(m·s)] kinematische Viskosität
- σ_i [N/m] Oberflächenspannung von Wasser
- g, g_k [m/s²] Gravitation
- j_k^{ml} [kg/(m²·s)] Flüssigwasserflussdichte
- p_c [Pa] Kapillardruck
- τ [-] Tortuosität
- $n(r)$ [-] differentielle Porenradienverteilungsfunktion
- θ_i [m³/m³] volumetrischer Wassergehalt
- X_k [m] Raumkoordinate

Wird der obige Ausdruck in Bezug zur Umkehrfunktion der Feuchtespeicherung dargestellt, ergibt sich daraus die Feuchteleitfähigkeit als eine Funktion des Wassergehaltes

$$K_{pm}(\theta_1) = \frac{\rho_l}{8\eta_l} \cdot \tau \cdot \int_{\theta_{dry}}^{\theta_1} \left(\frac{2\sigma_l \rho_l g}{p_c(\theta_1)} \right)^2 \cdot d\theta_1 \quad (10)$$

mit der Flüssigwasserleitfähigkeit K_{pm} , abgeleitet aus dem Porenmodell. Aufgrund der vereinfachenden Annahmen im Hagen-Poiseuilleschen Ansatz mit kreisrunden, parallelen Poren wird das obige Modell keine exakten absoluten Leitfähigkeiten liefern. Jedoch kann die Verteilung der relativen Feuchteleitfähigkeit über das gesamte Porenspektrum ermittelt werden. Daher wird die obige Funktion normalisiert und als relative Funktion abgebildet. Anschließend wird die relative Funktion mit Hilfe gemessener Wasserleitfähigkeiten skaliert und liefert eine, sich an der Porenstruktur orientierende Feuchtetransportfunktion.

Die Leitfunktion knüpft im überhygroskopischen Bereich an die Dampfdiffusionsmessungen bei höheren Luftfeuchten (μ_{wet}) an und wird im Bereich der kapillaren Sättigung durch weitere Feuchteleitfähigkeitsmesswerte (Darcy-Leitfähigkeit) ergänzt. Die Genauigkeit der Funktionalisierung steigt mit der Anzahl der zur Verfügung stehenden Leitfähigkeitswerte

$$K_r(\theta_1) = \frac{K_{pm}(\theta_1)}{K_{pm}(\theta_{cap})} = \frac{\int_{\theta_{dry}}^{\theta_1} \frac{1}{p_c(\theta_1)^2} d\theta_1}{\int_{\theta_{dry}}^{\theta_{cap}} \frac{1}{p_c(\theta_1)^2} d\theta_1} \quad (11)$$

$$K_1(\theta_1) = K_r(\theta_1) \cdot K_{cap} \quad (12)$$

Das vorgestellte Porenmodell beschreibt in sehr einfacher Weise den Flüssigtransport im Porensystem. Es wird z. B. immer eine vollständig vernetzte Flüssigphase vorausgesetzt, die ein kontinuierliches kapillares Fließen ermöglicht. Dabei handelt es sich um vorwiegend parallelen Flüssigwasser- und Dampftransport. Diese Voraussetzungen treffen sicherlich im oberen kapillaren bzw. gesättigten Feuchtebereich zu. Unterhalb des kapillaren Bereiches allerdings kann die Flüssigphase vorwiegend in Form von Flüssigkeitsinseln vorliegen, die kapillar nicht miteinander verbunden sind, d.h. die nur über die Dampfphase kommunizieren können. In diesem Fall spricht man von vorwiegend seriellen Flüssigwasser- und Dampftransport, der im Vergleich zum parallelen Transport in der Gasphase leistungsfähiger, dagegen in der Flüssigphase wesentlich weniger leistungsfähig ist. Es ist also zu erwarten, dass die Volumenanteile, in denen paralleler Transport stattfindet, mit dem Wassergehalt zunehmen und die Volumenanteile mit seriellem Transport entsprechend abnehmen.

Da Flüssig- und Dampftransport gemeinsam zu betrachten sind, findet eine Kopplung zu einem Modell in Form eines seriellen und parallelen Flüssigwasser- und Dampftransportes statt, welches die Einflüsse der über die Gasphase und den Oberflächenfilm kommunizierenden Flüssigkeitsinseln beschreibt. Es erlaubt die Modellierung der Feuchteabhängigkeit des Dampftransportes und liefert zusätzlich eine Skalierungsfunktion für die Flüssigwasserleitfähigkeit im hygroskopischen und angrenzenden überhygroskopischen Bereich, deren physikalische Ursache in der Unterbrechung des kapillaren Flüssigwassertransportes von Flüssigkeitsinseln besteht.

3.5.4 Modellansatz für Wasserdampfdiffusion

Ein Modell zur Beschreibung des seriellen und parallelen Flüssigwasser- und Dampftransportes (SP-Modell), welches dieses Verhalten auf der Basis der einfachen bekannten Standardparameter berücksichtigt, lässt sich wie in Abb. 39 skizzieren. Das SP-Modell setzt dabei ein poröses Material mit Volumenanteilen voraus, in denen serieller und paralleler Flüssigwasser- und Wasserdampftransport stattfindet. Sowohl die seriellen als auch die parallelen Bereiche besitzen Poren entsprechend der Porenvolumenverteilungsfunktion des Materials. Zur Veranschaulichung ist das Porenvolumen im Bild rechts ohne Feststoffmatrix schematisch in Porenbereiche unterteilt dargestellt. Der betrachtete Ausschnitt des trockenen porösen Materials besitzt in seriellen und parallelen Bereichen gemeinsam den resultierenden Dampfdiffusionskoeffizienten. Für einen bestimmten Wassergehalt ergibt sich in den parallelen Porenbereich nach dem im vorangegangenen Abschnitt erläuterten Porenmodell die Flüssigwasserleitfähigkeit. Die Abhängigkeit des Dampfdiffusionskoeffizienten vom Feuchtegehalt erschließt sich über die anschließende Skizze Abb. 40.

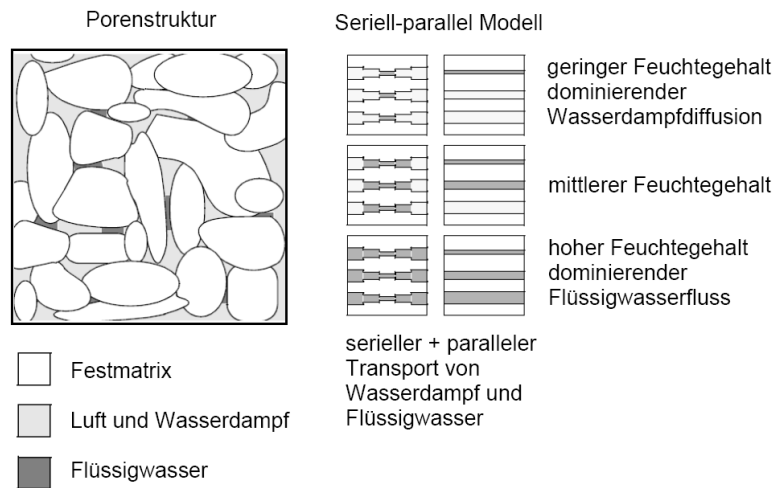


Abb. 39 Kapillare Kondensation in porösen Materialien: flüssiges Wasser akkumuliert zuerst in Mikroporen (links), Unterschiede bei kapillaren Kondensationsprozessen zwischen seriell und parallel strukturierten Porendomänen des Porenvolumens (rechts).

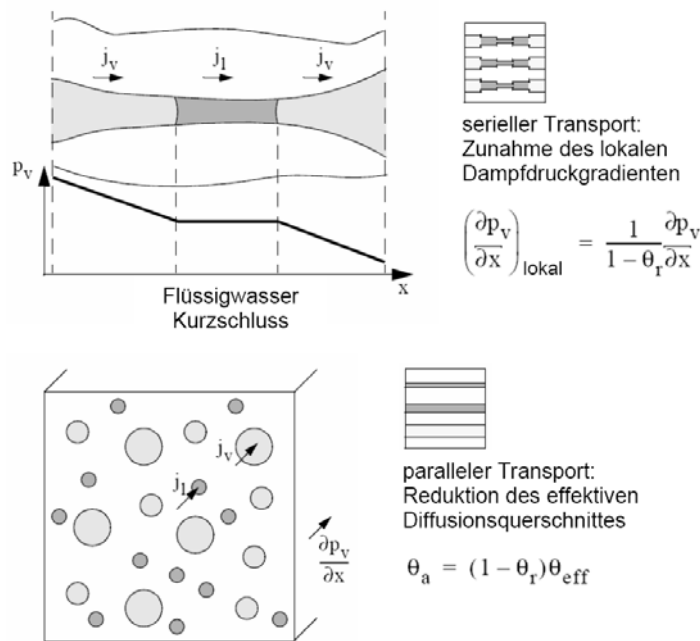


Abb. 40 Mechanismen des Seriell- und Parallelfusses: (oben) Wasserdampfdiffusion mit dem Beiträgen der Kondensation, Flüssigwasserfluss und Evaporation an der anderen Seite der lokalen Wasserphase; (unten) Dampfdiffusion mit und ohne Beteiligung der flüssigen Phase jedoch mit Reduktion des effektiven Diffusionsquerschnittes in Form von Kapillarwasser.

In den Volumenanteilen mit seriellm Transport diffundieren Dampfmoleküle durch den luftgefüllten Porenraum auf beiden Seiten einer Flüssigkeitsinsel vom höheren zum geringeren Dampfdruck. Kapillare Kondensation findet dabei an dem der höheren Dampfdruckseite zugewandten Kapillarmeniskus statt, am gegenüberliegenden Kapillarmeniskus verdunsten

zum gleichen Zeitpunkt äquivalenten Anteile von Wassermolekülen. Zwischen den beiden Kapillarmenischen wird das Wasser in der Flüssigphase transportiert. Setzt man sofortigen Druckausgleich in der Flüssigkeitsinsel voraus, wirkt diese als „Kurzschluss“ in Bezug auf die Dampfdiffusion, d.h., der Dampfdruck über beiden Kapillarmenischen ist gleich groß. Dadurch wird der lokale Dampfdruckgradient (im luftgefüllten Porenraum auf beiden Seiten einer Flüssigkeitsinsel) größer, was zu einer Erhöhung der Dampfdiffusionsstromdichte führt. Unter seriellen Fließbedingungen sind Flüssigwasser- und Dampfdiffusionsstromdichte gleich groß und können wie folgt beschrieben werden.

In den wassergefüllten Poren der seriellen Bereiche ist der Dampf Widerstand sehr viel kleiner als in den luftgefüllten Poren. Der Dampfdruckgradient wird deshalb dort als Null angenommen. Für den seriellen Bereich wird eine mittlere Dampfdruckänderung angesetzt. Der Dampfstrom für die in Serie stehenden Bereiche kann in Abhängigkeit des Dampfdruckgradienten angeschrieben werden.

$$g = D_v \cdot \frac{1}{1 - \theta_r} \frac{1}{(1 - p)} \cdot \frac{dp_{vs}}{dx} \quad \text{serieller Dampfstrom} \quad (13)$$

Diesem wird der Feuchtefluss im parallel geschalteten Bereich gegenübergestellt.

$$g = D_v \cdot (1 - \theta_r) \cdot \frac{1}{p} \cdot \frac{dp_{vp}}{dx} + K_1(\theta_l) \cdot \frac{1}{p} \cdot \frac{dp_{cp}}{dx} \quad \begin{matrix} \text{paralleler Dampf- und} \\ \text{Flüssigwasserfluss} \\ \text{Dampfstrom} \end{matrix} \quad (14)$$

- p [-] Anteil paralleler Bereiche am Gesamtsystem
- p_{vs}, p_{vp} [Pa] Dampfdruck im seriellen und parallelen Bereich
- p_{cp} [Pa] Kapillardruck im parallelen Bereich
- θ_r [-] relativer Wassergehalt mit $\theta_r = \frac{\theta_l}{\theta_{max}}$

Der Gesamtfeuchtestrom setzt sich nach dem Gleichsetzen der beiden Gleichungen aus dem seriellen und parallelen Anteil zusammen. Die Differenz des Dampfdruckes im parallelen Bereich lässt sich dabei als Differenz zwischen Gesamtstrom und seriellen Bereich $dp_{vp} = dp_v - dp_{vs}$ beschreiben

$$D_v(1 - p) \frac{1}{p} \cdot \frac{dp_{vp}}{dx} = D_v \cdot (1 - \theta_r) \cdot \frac{1}{p} \cdot \frac{dp_v}{dx} - D_v \cdot (1 - \theta_r) \cdot \frac{1}{p} \cdot \frac{dp_{vs}}{dx} \quad (15)$$

mit

$$\frac{1}{p} \cdot \frac{dp_{cp}}{dx} \rightarrow \frac{dp_c}{dx} \quad (16)$$

Durch Umstellung nach dem unbekanntem seriellen Dampfstrom ergibt sich

$$D_v \cdot dp_{vs} = \left(D_v \cdot \frac{1 - \theta_r}{p} \cdot dp_v + K_l(\theta_l) \cdot dp_c \right) \cdot \frac{1}{\left[\frac{1}{(1 - \theta_r) \cdot (1 - p)} + \frac{1 - \theta_r}{p} \right]} \quad (17)$$

Die in eckigen Klammern stehenden Ausdrücke repräsentieren die Skalierfunktionen des Flüssigwasser- und Dampftransportes in Abhängigkeit vom relativen Wassergehalt und vom Anteil parallel strukturierter Bereiche am Gesamtsystem. Sie lassen sich herausnehmen und vereinfachen. Mit ihnen werden die Koeffizienten für flüssigen und gasförmigen Feuchtetransport multipliziert.

$$f_v = \frac{1 - \theta_r}{[p + (1 - \theta_r)^2 \cdot (1 - p)]} \quad \text{Skalierungsfaktor (SK) Dampftransport} \quad (18)$$

$$f_l = \frac{1}{\left[1 + \frac{(1 - \theta_r)^2 \cdot (1 - p)}{p} \right]} \quad \text{SK Flüssigwassertransport} \quad (19)$$

Der Anteil parallel strukturierter Bereiche, p , ist nicht konstant, sondern in Abhängigkeit zum Wassergehalt definiert. Befindet sich nur wenig Wasser im Porensystem, gibt es auch nur wenige Verbindungen zwischen einzelnen Flüssigkeitsbereichen. Ein Paralleltransport ist kaum möglich. Nimmt jedoch der Wassergehalt zu, füllen sich die Poren und es entstehen zunehmend mehr Bereiche, in denen paralleler Feuchtetransport möglich ist. Zur Beschreibung der Feuchteabhängigkeit des Parameters p wird mit h ein Anpassungsparameter eingeführt, der mit dem relativen Wassergehalt verknüpft ist. Der Parameter h ist materialabhängig und wird durch inverse Modellierung mit Hilfe der numerischen Simulation aus dem Trocknungsversuch bestimmt:

$$p \theta_r, h = \theta_r^h \quad (20)$$

h [-] materialabhängiger Anpassungsparameter

3.5.5 Kalibrierung des Materialmodells und der Materialfunktionen

Aus den oben beschriebenen physikalischen Modellansätzen ergeben sich feuchteabhängige Transportfunktionen. Die Dampfdiffusivität folgt aus der Dampfdiffusion durch Luft, abgemindert mit dem Dampfdiffusionswiderstand des trockenen Materials, μ_{dry} , und multipliziert mit dem entsprechenden Anteil aus dem seriell-parallel Modell.

$$D_v(\theta_r, T) = \frac{D(T)}{\mu_{dry}} \cdot \frac{1 - \theta_r}{[\theta_r^h + (1 - \theta_r)^2 \cdot (1 - \theta_r^h)]} \quad (21)$$

Aus der Multiplikation der relativen Flüssigwasserleitfähigkeit, $K_r(\theta_l)$, aus dem Porenmodell mit der gemessenen Leitfähigkeit bei Sättigung, K_s , und der Verknüpfung nach dem seriell-parallel Modell folgt die Flüssigwasserleitfähigkeit.

$$K_l(\theta_l) = K_r(\theta_l) \cdot K_s \cdot K_{l\text{-corr}} \cdot \frac{1}{\left[1 + \frac{(1 - \theta_r)^2 \cdot (1 - \theta_r^h)}{\theta_r^h} \right]} \tag{22}$$

Die Leitfunktionen enthalten die beiden Parameter, h und $K_{l\text{-corr}}$, die jeweils an verschiedenen Experimenten anzupassen sind. Der Parameter $K_{l\text{-corr}}$ dient der Korrektur der Flüssigwasserleitfähigkeit im hochfeuchten Bereich. Der den Aufsaugversuch maßgeblich bestimmende Feuchtebereich ist der Bereich nahe der kapillaren Sättigung, θ_{cap} , der unmittelbar aus dem Wasseraufnahmeexperiment abgeleitet wird. Mit Hilfe des Parameters h kann der niederfeuchte Bereich unabhängig angepasst werden. Dies geschieht anhand des Trocknungsversuches.

3.6 Zusammenfassung der Eigenschaften der Materialien und Innendämmsysteme

Die anschließende Tab. 11 gibt die charakteristischen Messwerte der Materialien wieder und stellt die gemessenen bzw. berechneten Werte den Angaben der Materialhersteller gegenüber. Das effektive Porenvolumen Θ_{eff} in Tab. 11 ist der Wassergehalt zu Beginn der Desorptionskurve (Abtrocknungskurve). Θ_{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. 11 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	Wasseraufnahmekoeffizient	μ - Wert
Symbol	ρ	c	λ	$\Theta_{eff}(\Theta_{80})$	A_w	μ
Einheit	kg / m ³	J / (kg·K)	W / (m·K)	Vol%	kg / (m ² ·s ^{0,5})	-
Bestand: Außenputz	1470	730	0,45	29,8 (4,8)	0,064	12,2
Bestand: Holzterrazzo	800	1000	0,4	30,2 (1,1)	0,100	10
Bestand: Innenkalkputz	1420	600	0,5	36,9 (1,7)	0,057	20,9
Bestand: Kalkputz auf Schilf	1300	1050	0,45	39,0 (1,5)	0,060	6

	Dichte	Spez. Wärmekapazität	Rechenwert der Wärmeleitfähigkeit	Effektives Porenvolumen	Wasseraufnahmekoeffizient	μ - Wert
Symbol	ρ	c	λ	$\Theta_{eff}(\Theta_{80})$	A_w	μ
Einheit	kg / m ³	J / (kg·K)	W / (m·K)	Vol%	kg / (m ² ·s ^{0,5})	-
Bestand: Schüttung	1100	850	0,55	35,0 (1,4)	0,050	7
Bestand: Ziegel	1610	880	0,40	30,0 (0,2)	0,453	12,7
Fichte	500	2000	quer: 0,13 längs: 0,27	69,5 (7,5)	0,058	200 / 10 (oh./mit Riss)
Holzweichfaserdämmplatte	160 / 160	2100 / 1662	0,041	80,0 (1,8)	0,008 / 0,003	5 / 3,5
HWFD - Putz & Kleber	1600	1000	0,73	30,0 (1,4)	0,120	10
Schilf	140 / 300	2100	0,061	90,0 (3,4)	längs: 0,083	3
Schilf - Lehmputz & -kleber	1700 / 1670	840	0,81	28,0 (1,3)	0,250	10 / 10,3
TecTem-Klebespachtel	1500 / 1315	860	0,9 / 0,497	27,7 (7,4)	0,005	30 / 18,7
TecTem (Perlite-dämmplatte)	100	1640	0,045	73,8 (0,3)	1,981	5-6 / 8
TecTem (Flächenspachtel)	1500 / 1090	1360	0,411	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

Die im Deckenaufbau vorliegenden Materialschichten wurden nicht untersucht, dazu zählen die Schüttung oder die Holzterrazzoschicht. Diese Materialfunktionen wurden für die Simulation abgeschätzt. Wegen der Fugen und Risse in Verbretterungen wurde der μ-Wert einer solcher Schichten auf 10 heruntersetzt.

Nachfolgend in Tab. 12 sind die Schichtaufbauten der einzelnen Dämmsysteme zusammengetragen, sowie die sich daraus ergebenden Wärmewiderstände, s_d -Werte und die wirksame Wärmespeicherkapazität c_{wirk} der Gesamtsysteme. Die Bedeutung dieser konstruktionsbezogenen Kennwerte wird im Anschluss dargelegt. Als Grundlage dienten die am IBK-Materiallabor der TU Dresden gemessenen μ-Werte, c-Werte sowie die Wärmeleitfähigkeiten nach Angaben der Materialhersteller.

Tab. 12 Wärmewiderstand, s_D -Wert und wirksame Wärmekapazität der einzelnen Dämmsysteme; die Wärmeleitfähigkeiten und μ -Werte entsprechen den gemessenen Angaben der Hersteller

Feld 1 (Balken 1&2) - Zellulose	Einheit	Dicke m	λ W/(m·K)	μ -Wert -	C J/(kg·K)	R_{IDS} m ² ·K/W	s_D -Wert m	C_{wirk} kJ/(m ² ·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
					Σ:	1,722	0,27	52,9
Feld 2 (Balken 3) - Perliteplatte								
	TecTem Klebespachtel	0,006	0,9	18,7	860	0,007	0,1122	6,8
	TecTem Insulation-Board	0,08	0,045	8	1640	1,778	0,64	13,1
	TecTem Flächenspachtel	0,004	0,411	16,6	1360	0,010	0,0664	5,9
					Σ:	1,794	0,82	34,4
Feld 3 (Balken 4) - Dämmputz								
	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
					Σ:	1,269	0,86	58,7
Feld 4 (Balken 5) - Holzweichfaserplatte								
	Claytec Lehmkleber	0,004	0,73	10	900	0,005	0,04	6,1
	Steico Holzweichfaserplatte	0,06	0,041	3,5	1660	1,463	0,21	15,9
	Claytec Lehmputze	0,013	0,73	10	900	0,018	0,13	19,9
					Σ:	1,487	0,38	61,5
Feld 5 (Balken 6&7) - Schilfplatte								
	Lehmkleber	0,004	0,81	10,3	840	0,005	0,04	-
	Schilfplatte	0,1	0,061	3	2100	1,639	0,30	50,4
	2 Lagen Lehmputz	0,02	0,81	10,3	840	0,025	0,21	28,1
					Σ:	1,669	0,55	78,5

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, und damit der höchste Nutzerkomfort. 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 überprüft werden kann.

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 Wasserdampftransport durch ein Material- oder Konstruktionsaufbau. Ein hoher s_d -Wert zeigt an, dass wenig Wasserdampf durch ein Material diffundieren kann. Bei einer Innendämmung bedeutet das, dass wenig Feuchte aus dem Raum in eine Konstruktion diffundieren kann und dort eventuell auskondensiert. 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 aus. Demzufolge wäre bei den Feldern mit Holzweichfaserplatte und besonders mit Schilfdämmung mit einer „schnellen“ Reaktion auf hohe Raumfeuchtebelastungen zu rechnen. Feuchteansammlungen (Flüssigwasser) 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 Zellulose, Perliteplatte und Wärmedämmputz ist aufgrund der höheren s_d -Werte zu erwarten, dass die eingebrachte Feuchte im Vergleich zu den Schilf und Holzweichfaserplatten langsamer austrocknen würde. Die Perliteplatten werden allerdings mit wenig Feuchte eingebracht und verfügen zudem über eine hohe Flüssigwasserleitfähigkeit.

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 ρ - in Anlehnung an ÖNORM EN ISO 13786 bildet die Fähigkeit der jeweiligen Konstruktion ab, Wärmebelastungen der Raumluft abzumildern bzw. zu verzögern. Dabei werden nur die „wirksamen“, ersten zehn Zentimeter des Bauteils berücksichtigt („10-cm-Regel“).

$$C_{\text{wirk}} = \sum_k c_k \rho_k d_k \quad \text{in } J/(m^2 \cdot K) \quad (23)$$

Konstruktionen mit hoher Wärmekapazität können plötzlich auftretende Temperaturspitzen in der Raumluft besser abpuffern. Innendämmsysteme koppeln die Raumluft von den in der Regel gut Wärme speichernden Schichten des historischen Wandaufbaus ab. Ein sehr hoher Wärmewiderstand der sehr porösen Dämmstoffe sorgt für niedrige Heizenergieverluste, andererseits senkt er das Wärmepuffervermögen ab. Dicke, schwere Putzschichten auf Dämmsystemen erhöhen die wirksame Wärmespeicherkapazität. Wegen der dicken Lehmdeckschicht und der günstigen Eigenschaften ist die Wärmekapazität der Schilfdämmung mit 78,5 kJ/(m²·K) mehr als doppelt so groß wie die des Perlitefeldes (Tab. 12). Auch die Holzweichfaserplatten und der Wärmedämmputz schneiden mit 61,5 und 58,7 kJ/(m²·K) gut ab. Zum Vergleich: die wirksame Wärmekapazität der Bestandskonstruktion beträgt 120,5 kJ/(m²·K), die einer konventionellen Innendämmung mit doppelt beplankter Mineralwolle-dämmung WLG 040 ungefähr nur 22,4 kJ/(m²·K).

3.6.1 Bestandsmaterialien

Die Geometrie der Ziegel konnten anhand einer Öffnung in der Westwand des Dachgeschosszimmers erfasst werden: Das nicht maßhaltige Format, 275 mm x 130 - 135 mm x 65 mm stimmt nicht mit üblichen Formaten überein, wie sie z. B. auf [75] zu finden sind. Die Dicke des Putzes auf der Innenseite ist sehr unterschiedlich. 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. Für die Berechnungen der U-Werte wurde deshalb ein Mittelwert von 37 mm gewählt. Die gemessene Dicke des Außenputzes betrug 20 mm.

Wie im Verlauf der Materialmessungen festgestellt wurde, handelt es sich bei dem vorhandenen Mauerwerksziegel um einen sehr porösen, außergewöhnlich Flüssigwasser leitfähigen Mauerwerksziegel. Abweichend von den ersten Annahmen erfolgte im Verlauf der Materialmessungen eine deutliche Korrektur der angenommenen Wärmeleitfähigkeit des vorhandenen Mauerwerksziegels. Der ursprünglich errechnete U-Wert der Bestandswand wurde von 1,19 W/(m²·K) auf 0,708 W/(m²·K) berichtigt.

3.6.2 U-Wert der Bestandskonstruktion und der einzelnen Wandaufbauten

Die Messung realer Heizenergieverluste war nicht Gegenstand des Projektes gewesen und sollte mit Hilfe von Wärmestromplatten gemessen werden. Berechnete U-Werte können aber als brauchbarer Indikator für die zu erwartenden Heizenergieverluste herangezogen werden [Richter und 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 von Materialien ermitteln. Messung und Simulationsergebnisse müssen dabei übereinstimmen. Tab. 13 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 vorliegen und wegen der Wärmebrücke zusätzliche, schwierig einzuschätzende Randbedingungen einen Einfluss auf die hygrothermischen Verhältnisse ausüben.

Tab. 13 Mit den Bemessungswerten der Materialhersteller berechnete, „offizielle“ U-Werte und anhand der Simulationsergebnisse/Messergebnisse berechnete U-Werte

Dämmsystem	U-Werte [W/(m ² ·K)]	"offiziell"	berechnet
Feld 1 (Balken 2) - Zellulose		0,317	0,332
Feld 2 (Balken 3) - Perliteplatte		0,310	0,312
Feld 3 (Balken 4) - Wärmedämmputz		0,317	0,373
Feld 4 (Balken 5) - Holzweichfaserplatte		0,342	0,345
Feld 5 (Balken 6 & 7) - Schilfplatte		0,322	0,324

4 Mikrobiologische Untersuchungen und Methodenentwicklung

Die Motivation und auch die Zielsetzung des Arbeitspaketes sind die Entwicklung und Optimierung molekularbiologischer Methoden für baubiologische Untersuchungen. Bei den herkömmlichen Untersuchungen an Baumaterialien bzw. Dämmsystemen werden überwiegend klassische Kultivierungsversuche angewandt, um Schimmelpilze und Bakterien aus Proben zu isolieren. Ein großer Vorteil klassischer Kultivierungsversuche ist die Tatsache, dass lebende Mikroorganismen erhalten werden. Die Nachteile dieses Untersuchungsansatzes sind jedoch gravierend.

1. Es werden relativ große Probenmengen, meistens im Gramm-Bereich, benötigt, so dass eine zerstörungsfreie Entnahme am jeweiligen Beprobungsort nahezu unmöglich ist.
2. Kultivierungsversuche sind sehr zeitintensiv: zum einen kann das Wachstum der Mikroorganismen mehrere Wochen in Anspruch nehmen und die folgende Herstellung von Reinkulturen kann ebenfalls die Versuchsdauer noch um Wochen bzw. Monate verlängern.
3. Der sehr entscheidende Nachteil der klassischen Kultivierung ist deren Selektivität und die Detektionsgrenzen.

Viele Untersuchungen haben gezeigt, dass durch klassische Kultivierung nur ca. 10 % der tatsächlich vorhandenen Pilze kultiviert werden können. Im Fall von Bakterien liegen die Schätzungen sogar bei nur ca. 1 %, die man durch Kultivierung erhält. Die Selektivität der verwendeten, standardisierten Kultivierungsmedien erlaubt nur das Wachstum eines Bruchteils der tatsächlich vorhandenen Mikroorganismen.

Die große Innovation in diesem Projekt ist der Versuch, die Mikroorganismen über deren DNA nachzuweisen. Mit Hilfe von molekularbiologischen Methoden kann so ein größerer Anteil der tatsächlich vorhandenen Mikroorganismen detektiert werden.

4.1 Vorgehen

Zunächst wird mit Hilfe von klassischen Kultivierungsversuchen die mikrobielle Ausgangssituation in dem Versuchsgebäude bestimmt. Im Verlauf des Projektes werden dann die Methoden zur Gewinnung der DNA (DNA-Extraktion) aus Baumaterialien und deren Vervielfältigung mittels PCR (Polymerase-Ketten-Reaktion) bzw. qPCR (quantitative PCR) optimiert.

Probekörper der projektrelevanten Materialien (Aufspritz-Zellulose, Perliteplatte, Thermosilitputz, Holzweichfaserplatte und Schilfplatte mit Lehmputz) werden dann mit definierten Mengen einer Sporensuspension innenraumrelevanter Schimmelpilze beimpft und in der Klimakammer bebrütet. Nach sechsmonatiger Inkubation werden Proben dieser Versuchskörper entnommen und die DNA mit Hilfe der optimierten Extraktionsmethode aus den Materialien

isoliert. Anschließend werden vergleichende Bestimmungen der Biomasse in den Materialien, mittels quantitativer real-time PCR (qPCR) mit universellen Pilzprimern, und der Aktivität der Pilze - Keimfähigkeit, Bestimmung der Kolonie-Bildenden-Einheiten (KBE) bzw. CFU (colony forming unit) durchgeführt.

Die vergleichenden Bestimmungen der Biomasse und deren Aktivität werden ebenfalls mit Proben aus dem Versuchsobjekt zu zwei unterschiedlichen Zeitpunkten des Projektverlaufs durchgeführt.

4.1.1 Probenahme

Die erste Probenentnahme erfolgte am 2. Oktober 2010. In den Versuchsräumen im ersten und zweiten Dachgeschoss des Kindergartens in der Schönbrunnngasse 30 wurden von drei Probeorten pro Stockwerk mehrere Proben entnommen. Mit Skalpell, Meisel und Hammer wurde Probenmaterial in Plastikverschlussbeuteln bzw. Falcon-Röhrchen gesammelt, wobei akkurat auf eine sterile Arbeitsweise geachtet wurde. Eine Auflistung der gesammelten Proben, deren Herkunftsort, Abnahmetechnik und ungefähre Menge enthält Tab. 27. Die Fotos Abb. 114 bis Abb. 119 zeigen die sechs verschiedenen Probeorte in den beiden Versuchsräumen. Von jeder Probe wurden jeweils zwei Aliquots entnommen, wobei ein Aliquot (Teilportion der gesamten Probe) vor Ort in Trockeneis gelagert wurde und in weiterer Folge für die Isolierung der DNA verwendet wurde. Das zweite Aliquot wurde bei Raumtemperatur gelagert und für die anschließenden ersten Kultivierungsversuche verwendet.

Die zweite Probenentnahme in der Schönbrunnngasse 30 erfolgte am 19. März 2012. In den Versuchsräumen im ersten und zweiten Obergeschoss wurden von jedem Dämmsystem drei Proben entnommen. Hierfür wurde die oberste Putzschicht entfernt um vom eigentlichen Dämmmaterial Proben entnehmen zu können. Mit Hilfe einer handelsüblichen Bohrmaschine und einem Bohraufsatz mit ca. 30 mm Durchmesser wurden je drei Löcher in die Putzschicht bis zur Mitte des jeweiligen Dämmsystems gebohrt. Anschließend wurde aus dem Bohrloch Probenmaterial genommen und in sterilen Falcon-Röhrchen gesammelt. Um die weiteren Messergebnisse nicht zu beeinflussen, wurden die durch die Probenentnahme entstandenen Löcher in den Putzschichten mit Fertigspachtelmasse (Molto, Reparatur Moltofill für innen) verschlossen. Die je drei Proben von jedem Dämmsystem wurden im Labor vereinigt, homogenisiert und anschließend für die drei verschiedenen Analysemethoden verwertet:

1. Kultivierungsversuche und die Bestimmung der Kolonie-Bildenden Einheit (KBE) durch Ausschütteln der Proben,
2. die DNA Extraktion Messung der DANN-Menge und
3. für die quantitative molekulare Analyse mittels qPCR verwendet.

Die dritte Probenentnahme erfolgte am 7. Mai 2013, wobei wie bei der 2. Probenentnahme vorgegangen wurde. Von dem Aufspritz-Zellulose-Dämmsystem konnte aus dem 1. Obergeschoss keine Probe entnommen werden.

4.1.2 Klassische Kultivierung

Ausschütteln der Proben

Die bei Raumtemperatur gelagerten Probenaliquots wurden unter sterilen Bedingungen in einem Handmörser mit einem Pistill bis zur Quarzkorngröße zerkleinert. Ein Gramm Probenmaterial wurde anschließend in sterilen 50 ml Falcon-Röhrchen mit 10 ml steriler 0,001 % Tween80 Lösung (in 0.9 % NaCl) vermischt und bei Raumtemperatur eine Stunde lang auf einem Rundschtüttler (IKA® KS 4000 ic control) mit 160 rpm (Rotationen pro Minute) ausgeschüttelt. Tween ist ein Detergenz, das der Ablösung der Zellen vom Substratum dient. Anschließend wurden 100 µl aus dem Überstand der Lösungen entnommen und 2 Verdünnungsstufen (Faktor 10) in 0.9 % NaCl hergestellt. Jeweils 100 µl von der 10⁰-, 10⁻¹- und 10⁻²-Verdünnung wurden auf Petrischalen mit zwei unterschiedlichen Medien ausgestrichen. Bei den verwendeten Medien handelt es sich um DG18 und Malz-Extrakt-Agar, dem zwei Antibiotika (Ampicillin, Stock (Stammlösung): 100 µg/ml, und Streptomycin, Stock: 25 mg/ml) zugegeben wurden, um das Wachstum von Bakterien zu unterdrücken. Die Platten wurden mit Parafilm verschlossen und bei Raumtemperatur inkubiert. Über einem Zeitraum von drei Wochen erfolgte eine tägliche Kontrolle, angewachsene Pilzkolonien wurden mittels der Drei-Punkt-Überimpfungstechnik auf neue Platten überimpft. Dieser Vorgang wurde sooft wiederholt, bis man Reinkulturen der Pilze erhielt. Eine vorläufige Charakterisierung der isolierten Pilze auf Gattungsebene mittels morphologischer Analyse kann für die jeweiligen Proben Tab. 28 entnommen werden. Die Isolate wurden in weiterer Folge dokumentiert, abfotografiert und Dauerkulturen hergestellt, die bei -80°C in der hauseigenen Stammsammlung von Schimmelpilzen konserviert werden.

Isolierung von Pilzen von Abklatschplatten

Bei den Probenahmen wurden ebenfalls zwei unterschiedliche Abklatschplatten der Firma heipa (Dr. Müller GmbH) verwendet. Diese DG18- bzw. Malz-Extrakt-Abklatschplatten fanden auf jedem Beprobungsort Anwendung, um die an der Oberfläche wachsenden Pilze zu isolieren. Nach einigen Tagen Inkubationszeit bei Raumtemperatur konnten man ein Pilzwachstum feststellen und wie bereits unter dem vorangegangenen Abschnitt „Ausschütteln der Proben“ beschrieben, wurden von den Abklatschplatten die Pilze auf neue Platten mit dem entsprechenden Medium überimpft um Reinkulturen zu erhalten. Eine Auflistung der isolierten Pilze ist in Tab. 29 dargestellt.

Aufgrund großen Zeitdrucks bei der Probenahme und bereits geöffneter DG18-Abklatschplatten – die bereits etwas eingetrocknet waren – konnten mit diesen Platten an den Probenorten 1, 2, 6, 6H und 6M keine Analysen durchgeführt werden.

4.1.3 Vergleich verschiedener DNA-Isolierungsmethoden

Im Laufe des Projektes wurde eine Evaluierung und Optimierung verschiedener DNA-Extraktionsmethoden für drei häufig verwendete Baumaterialien durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen wurden in einer wissenschaftlichen Publikation zusammenge-

fasst, die bereits in dem Journal „Science of the Total Environment“ veröffentlicht wurde. Eine Kopie der Publikation ist im Anhang beigefügt (Abschnitt A2, [Ettenauer et al. 2012]). In diesem Abschnitt wird der experimentelle Aufbau dieser Optimierungsversuche kurz beschrieben. Details zu den einzelnen Arbeitsschritten und den unterschiedlichen Reaktionsansätzen kann man dem „Materials and Methods“-Abschnitt der genannten Publikation im Anhang entnehmen.

Um eine optimale Methode für die Isolierung von Pilz-DNA aus Baumaterialien zu finden, wurden als Vorversuch bis zu 19 verschiedene DNA-Extraktionsmethoden verglichen (siehe Tabelle 1 der Publikation). Die 19 untersuchten Protokolle wurden in der Publikation auf nur 13 signifikant unterschiedliche Methoden reduziert. Als entscheidende Kriterien für die Bestimmung der besten DNA-Isolierungsmethode für die drei untersuchten Baumaterialien wurden die folgenden Parameter herangezogen:

- DNA-Menge,
- DNA-Reinheit,
- Visualisierung der DNA auf Agarosegelen,
- Vervielfältigung der DNA mit Hilfe von PCR und
- Denaturierende-Gradienten-Gel-Elektrophorese(DGGE)-Analyse, eine spezielle Form der Elektrophorese, bei der DNA-Fragmente gleicher Länge aber unterschiedlicher Sequenz aufgetrennt werden können. Mit Hilfe dieser Technik kann die Komplexität von mikrobiellen Gemeinschaften eines Habitats als sogenannter „Fingerabdruck“ abgebildet werden.

Die Methode, mit der die größten DNA-Mengen mit den geringsten Verunreinigungen (Huminsäuren, Polymeraseinhibitoren, etc.) erhalten werden, die eine Visualisierung der DNA auf Agarosegelen erlaubt und die positive Ergebnisse bei den PCR-Amplifikationstest liefert sowie ein vollständiges, mikrobielles Gemeinschaftsprofil bei der DGGE-Analyse zeigt, wurde anschließend verwendet, um in den projektrelevanten Proben mit Hilfe von molekularen Methoden das Vorkommen und die Aktivität der vorhandenen Pilze zu bestimmen.

Isolierungsmethoden und Probenmaterial

Bei diesen Versuchsreihen wurden drei kommerziell erhältliche DNA-Extraktions-Kits für Bodenproben mit vier empirischen Methoden verglichen, die bereits vielfach erfolgreich für die DNA-Isolierung verwendet wurden. Bei allen Methoden wurden verschiedene Parameter variiert um die Extraktionseffizienz zu steigern. Bei den drei kommerziellen DNA-Kits wurden zusätzlich zu dem vom Hersteller empfohlenen Protokoll ebenfalls Änderungen vorgenommen.

Das Prinzip alle Extraktions-Kits beruht auf einer Kombination aus mechanischer und chemischer Lyse (Auflösung der äußeren Zellmembran und Freisetzung der genetischen Erbinformation) der Zellen. Dies kann mit Keramik- und Quarzkugeln gefüllten Röhren geschehen,

die das Gesteinsmaterial fein zermahlen, alternativ ist die Anwendung eines sogenannten Bead-Beaters (FastPrep® FP120 Cell Disrupter) möglich. Folgende kommerzielle Kits wurden verglichen: der FastDNA® SPIN Kit for Soil (MP Biomedicals), der UltraClean® Soil DNA Isolation Kit (MO BIO Laboratories, Inc) und der PowerSoil® DNA Isolation Kit (MO BIO Laboratories, Inc).

Die anderen DNA-Isolierungstechniken beruhen überwiegend auf einer chemischen Lyse, wobei die Zellen meist geringeren mechanischen Scherkräften ausgesetzt sind. Für eine genaue Beschreibung der Methoden sei auf den Vordruck der Publikation im Anhang bzw. [Ausubel et al. 1991], [Schabereiter-Gurtner et al. 2001], [Sert und Sterflinger 2010] und [Van den Ende und de Hoog 1999] verwiesen.

Als Probenmaterial für die verschiedenen Isolierungsversuche fiel die Wahl auf drei typische Baumaterialien gewählt, die alle Schimmelpilzbefall zeigten. Bei den verwendeten Materialien handelte es sich um konventionellen Wandputz aus einem privaten Weinkeller bzw. einer Garage, roten Ziegelstein aus einem Weinkeller und mit Schimmelpilzen befallene Gipskartonplatten.

Eine ausreichende Menge Probenmaterial wurde unter sterilen Bedingungen zerkleinert und homogenisiert. Für jedes Material und jede Methode wurden drei verschiedene Probenmengen, 50 mg, 100 mg und 250 mg (jeweils Dreifachansätze) für die DNA-Extraktion eingewogen.

Bestimmung der DNA Konzentration und Reinheit

Die Menge und Qualität der DNA wurden mit Hilfe des NanoDrop®-Spektrophotometer ND-1000 (peqLab Biotechnologie, GmbH) bzw. durch Elektrophorese auf 1,5 %igen Agarosegelelen bestimmt. Anschließend wurden die Mittelwerte und Standardabweichungen der DNA-Konzentrationen aus drei Messungen für jedes Triplikat der Probenmenge von allen Methoden berechnet und die Ergebnisse in Nanogramm (ng) gewonnener DNA pro Gramm Probenmaterial umgerechnet. Durch Messung der Absorption der DNA Extrakte bei 260 und 280 nm und Bestimmung des Koeffizienten A_{260}/A_{280} kann die Reinheit der DNA abgeschätzt werden. Eine A_{260}/A_{280} -Ratio von ca. 1,8 bis 2,0 ist ein Indiz für reine DNA. Werte darunter zeigen Verunreinigungen mit Phenol, Huminsäuren und anderen Kontaminationen; Werte über 2,2 dagegen deuten auf Salzurückstände aus dem Probenmaterial bzw. dem verwendeten Extraktionspuffer hin. Die Absorptionsmessungen (ebenfalls Triplikat-Messungen) wurden ebenfalls mit dem NanoDrop-Spektrophotometer durchgeführt.

Von jedem Triplikat jeder Probenmenge wurden 20 µl zusammengemischt (gepoolte) und für die weiteren Untersuchungen in ein 1,5 ml Eppendorf-Röhrchen transferiert. Diese gepoolte DNA wurde für eine weitere Qualitätsprüfung durch die Agarose-Gelelektrophorese verwendet.

Hierfür wurde die extrahierte DNA der drei Probenmengen jeder Extraktionsmethode auf einem 1,5%igem Agarosegel unter Spannung gesetzt, durch das Agarosegel laufen gelassen, danach mit Ethidiumbromid angefärbt und abschließend unter UV-Licht visualisiert.

DNA Vervielfältigung und Erstellung genetischer Fingerabdrücke

Es schloss sich ein Test an, der überprüfte, ob die vermischten Aliquots (20 µl) extrahierter DNA der Triplikate aller Methoden durch PCR-Reaktionen vervielfältigt werden kann. Hierzu wurden jeweils 4 verschiedene Oligonukleotid-Paare – ein Bakterienprimerpaar (341f/907r) und drei Pilzprimerpaare (ITS1/ITS2, ITS3/ITS4 und ITS1/ITS4) - verwendet, um jeweils konservierte Regionen der im Extrakt enthaltenen Bakterien- bzw. Pilz-DNA zu amplifizieren. Die Kontrolle der Amplifikation erfolgte durch Visualisierung der vervielfältigten DNA auf 2 %igen Agarosegelen mittels Elektrophorese.

Um einen genetischen Fingerabdruck der mikrobiellen Gemeinschaft der Bakterien bzw. Pilze in der Probe zu erhalten und um etwaige Unterschiede durch die verschiedenen Extraktionsmethoden festzustellen, wurde eine DGGE-Analyse durchgeführt. Hierfür wurde ein kleiner Bereich der bereits amplifizierten DNA (ITS1/ITS4 bzw. 341f/907r) ein weiteres Mal vervielfältigt, die Proben konzentriert, auf denaturierenden Acrylamidgelen aufgebracht und unter Spannung für 6 Stunden laufen gelassen. Nach Färbung der Gele in der Ethidiumbromid-Lösung wurden die DNA-Banden der Mikroorganismen unter UV-Licht visualisiert. Die Ergebnisse der unterschiedlichen Methoden und Proben wurden am Computer verglichen.

Eine statistische Analyse in Form einer Varianzanalyse (ANOVA mit 3 Variablen) wurde für alle erhaltenen Ergebnisse von Herrn Dr. Bernhard Spangl vom Institut für angewandte Statistik der Universität für Bodenkultur durchgeführt.

4.1.4 Biologische Aktivität - Mikrobielles Wachstum auf den projektrelevanten Proben

Die bauseits aus den gleichen Chargen der Dämmmaterialien hergestellten Probekörpern für die labortechnischen Untersuchungen wurden für die Inkubation in der Klimakammer in ca. 0,1 x 0,1 m große Blöcke weiter zerteilt. Die oberste Verputzschicht auf allen Probekörpern wurde entfernt, sodass das eigentliche Dämmsystem direkt mit Pilzen beimpft werden konnte.

Drei, in Innenräumen häufig vorkommende Pilze wurden ausgewählt, um sie auf die Dämmmaterialien aufzubringen und deren Wachstum bei idealen Bedingungen zu untersuchen. Bei den, aus der hauseigenen Stammsammlung (www.acbr-database.at) entnommenen, Pilzen handelt es sich um *Cladosporium cladosporioides* (MA 1610 – im Weiteren mit ‚A‘ bezeichnet), *Aspergillus niger* (MA 1615 – ‚B‘) und *Penicillium chrysogenum* (MA 1701 – ‚C‘). Alle kryokonservierten Pilze wurden von -150°C auf Malz-Extrakt-Agar-Medium transferiert, um das Wachstum und die Reinheit der Kulturen zu überprüfen. Anschließend wurden die Pilze bei Raumtemperatur inkubiert bis von den Kulturen ausreichend Sporen geerntet werden konnten. Nach der Abnahme der Pilzsporen unter sterilen Bedingungen mit einem Drigalskispatel bzw. Skalpell von der Oberfläche der Pilzkulturen wurden sie in sterile 50 ml Falcon-Röhrchen in Saline (0,9 % NaCl) überführt. Mit Hilfe einer Thoma-Kammer, eines

Durchlichtmikroskops (Olympus BX51) und der Formel (24) wurden die Sporenkonzentrationen in den Suspensionen berechnet. Durch jeweilige Verdünnung der Suspension mit 0,9 %iger NaCl-Lösung ließ sich eine Konzentration von 105 Sporen/ml einstellen. Zusätzlich wurden von jeder Sporensuspension 10 ml entnommen und eine Mischung aller drei Pilzsuspensionen hergestellt (,D').

$$\text{Gesamtsporenzahl pro ml} = \frac{\text{Anzahl ausgezählte Sporen} \times 400 \times 10^4}{\text{Zahl ausgezählte Kleinquadrate}} \times \text{potenzieller Verdünnungsfaktor} \quad (24)$$

Vor dem Beimpfen der Probekörper mit den Pilzsporen wurden von jedem Dämmmaterial Probenaliquots als Referenz (Nullkontrolle) genommen. Auf den Probekörpern wurden mit einem Faserschreiber 50 x 50 mm große Quadrate markiert und diese mit je 1 ml der Sporensuspensionen ,A' bis ,D' beimpft. Es folgte eine sechsmonatige Bebrütung der Dämmmaterialien in einer Weiss-Klimakammer WKL 100, bei 28°C und 90 % relativer Luftfeuchtigkeit. Das Wachstum wurde während dieser Zeit durch visuelle Inspektion kontrolliert. Nach Ablauf des halben Jahres wurde unter sterilen Bedingungen die oberste Schicht der beimpften Quadrate bis zu einer Tiefe von 5 mm abgenommen und in 50-ml Falcon-Röhrchen gesammelt. Nach Homogenisierung aller genommenen Proben durch 15-minütiges vortexen wurden Probenaliquots für die DNA-Extraktion (je 100 mg) und das Ausschütteln der Proben (je 1 g) eingewogen wurden. Die Isolierung der DNA erfolgte mit dem FastDNA® SPIN Kit for Soil gemäß den Angaben des Herstellers.

Für die Bestimmung des Pilz-Wachstums mittels Keimzahlbestimmung wurde die Kolonie-Bildende-Einheit (KBE) durch das Koch'sche Spatelplattenverfahren durch Probenausschütteln bestimmt. Ein Gramm Probenmaterial wurde hierfür in sterilen 100 ml Erlenmeyerkolben mit 50 ml steriler 0,001 % Tween80 Lösung (in 0.9 % NaCl) vermischt und bei Raumtemperatur eine Stunde lang auf einem Rundschüttler ausgeschüttelt (170 rpm). Hundert Mikroliter aus dem Überstand der Lösungen wurden entnommen und 2 Verdünnungsstufen (Faktor 10) in 0.9 % NaCl hergestellt. Jeweils 100 µl der 10⁰, 10⁻¹ und 10⁻²-Verdünnung wurden auf je zwei Malz-Extrakt-Agar Platten, denen das Antibiotikum Streptomycin [Stock: 25 mg/ml] zugegeben wurden, ausplattiert. Darauf wurden die mit Parafilm verschlossenen Platten bei Raumtemperatur inkubiert und die angewachsenen Pilzkolonien täglich gezählt. Anschließend ließ sich die KBE pro Gramm Probenmaterial mit der Formel (25)] berechnen.

$$\text{Lebendkeimzahl in KBE pro g} = \text{Mittelwert ausgezählte Pilze} \times 10 \times \text{Menge Tween80} \times \text{Verdünnung} \quad (25)$$

Die erhaltenen Ergebnisse sind in Tab. 31 und Tab. 32 bzw. graphisch in Abb. 120 dargestellt.

4.1.5 Quantitative real-time PCR

Im letzten Projektabschnitt wurde die molekulare quantitative Analyse der DNA aus den Proben weitergeführt. Für die sogenannte quantitative real-time PCR wurden die allgemei-

nen Pilzprimer, Act512_forward (5'-ATGTGCAAGGCCGGTTTCGC-3) und Act783_reverse (5'-TACGAGTCCTCCTGGCCCAT-3', [Carbone et Kohn 1999]) verwendet. Diese amplifizieren ein 302 Nukleotide langes Fragment des „single-copy-gens“ ActinA, das nur als eine Kopie in der gesamten Erbinformation der Pilze vorkommt.

Alle Reaktionen wurden in einem BioRad CFX96™ Real-time Detection System durchgeführt. Dieses Gerät misst die Fluoreszenz, die von einem DNA-bindenden Reagenz (SYBR-green), das sich in doppelsträngige DNA einlagert, emittiert wird. Dadurch kann die im Idealfall stattfindende Verdopplung der DNA-Menge bei jedem Reaktionszyklus in Echtzeit verfolgt werden. Ein 20 µl großer Reaktionsansatz setzte sich aus 10 µl SensiMix Plus™ SYBR Kit (Bioline), 1 µl 50 mM MgCl₂, 0,5 µl Primer (je 0,25 µl von Act512f und Act783r; [Stock: 10 pmol/µl]), 6,5 µl ultra-reines Wasser und 2 µl der extrahierten, verdünnten DNA zusammen. Die DNA aller Proben wurde zuvor auf die gleiche Ausgangskonzentration (3,5 ng/µl) verdünnt.

Das Thermocycling Programm für die Vervielfältigung bestand aus den folgenden Temperaturschritten: 95°C für 10 Minuten für die anfängliche Denaturierung der DNA-Doppelhelix (Doppelstrangtrennung) und Aktivierung des Enzyms DNA-Polymerase (vervielfältigt die DNA-Stränge), danach 40 Zyklen: 95°C für 15 Sekunden (DNA-Denaturierung), 61°C für 20 Sekunden (für die spezifische Bindung der verwendeten Primer an deren komplementäre Abschnitte auf den DNA-Einzelsträngen) und 72°C für 15 Sekunden (spezifische Vervielfältigung der DNA-Abschnitte durch die DNA-Polymerase). Die Fluoreszenz der amplifizierten DNA wurde am Ende jedes der 40 Zyklen bei 72°C gemessen und an einem zusätzlichen Messpunkt bei 80°C für 1 Sekunde. Am Schluss der Reaktion wurde eine Schmelzkurvenanalyse durchgeführt, bei der die Temperatur in 0,5 K Schritten von jeweils 5 Sekunden Länge von 60 auf 95°C ansteigt. Bei jedem 0,5 K Schritt wurde die emittierte Fluoreszenz gemessen. Diese Schmelzkurvenanalyse zeigt an, ob das gewünschte spezifische PCR Produkt gebildet wurde und ob noch zusätzliche unerwünschte Produkte oder Primer-Dimere, die die Reaktionseffizienz mindern, in der Reaktion erhalten wurden.

Um die ursprüngliche Konzentration der DNA in der Probe bestimmen zu können, ist es unerlässlich, die gemessenen Werte mit bekannten Konzentrationen zu vergleichen. Hierfür wurden Standardkurven erstellt, bei denen 10-fach Verdünnungen der gewünschten Genfragmente bzw. PCR-Produkte der genomischen DNA in bekannter Konzentration vervielfältigt wurden (10^0 - 10^{-10}). Diese PCR-Produkte wurden in einer konventionellen PCR-Reaktion generiert: 100 µl PCR-Reaktionsvolumen enthalten 50 µl 2x PCR Master Mix (Promega, Mannheim, Deutschland) [50 units/ml of TaqDNA Polymerase in einem beiliegendem Reaktionspuffer (pH 8,5), 400 µM dATP, 400 µM dGTP, 400 µM dCTP, 400 µM dTTP, 3 mM MgCl₂], je 1 µl der beiden Actin-Primer, 43 µl ultra-reines Wasser und 5 µl DNA-Template von MA1615 *Aspergillus niger* als Positivkontrolle. Das folgende Amplifikationsprogramm wurde verwendet: 95°C für 3 Minuten zur Denaturierung der DNA, gefolgt von 30 Zyklen mit jeweils 95°C für 30 Sekunden, 55°C für 30 Sekunden und 72°C für 30 Sekunden. Ein abschließender Elongationsschritt bei 72°C für 1 Minute vervollständigte alle PCR Produkte.

Die amplifizierte DNA wurde mit Hilfe des QIAquick PCR Purification kits (QIAGEN) gereinigt und die Konzentration mittels NanoDrop spektrophotometrisch bestimmt. Die Länge und Identität des amplifizierten DNA-Fragments wurde durch Sequenzierung überprüft. Hierfür wurden 20 µl des gereinigten PCR-Produktes an die Firma GATC-Biotech (www.gatc-biotech.com) gesendet. Die erhaltene Basenpaarabfolge (Sequenz) konnte anschließend mit Hilfe des BLAST-Programmes [Altschul et al. 1997] in der Online-Datenbank NCBI (National Centre for Biotechnology Information) gesucht und mit bekannten Einträgen verglichen werden. Die Menge an Doppelstrangmolekülen in den PCR Produkten und der verdünnten Standards kann über die Formel (26)

$$\text{Moleküle pro } \mu\text{l} = \frac{a}{\text{PCR Produktlänge} \times 660} \times 6,022 \times 10^{23} \quad (26)$$

berechnet werden, wobei a die PCR-Produktkonzentration (in µg/µl), 660 die durchschnittliche molekulare Masse eines Basenpaares und $6,022 \times 10^{23}$ die molare Konstante [Le Calvez et al. 2009]) sind.

Die Erstellung der Standards und alle weiteren Pipettier-Arbeiten für die quantitative PCR erfordern höchste Genauigkeit und Präzession. Die erstellten Standardverdünnungen, 10^0 bis 10^{-10} , entsprechen einer ActinA-Kopienanzahl von 10^{12} bis 10^2 pro µl Standardlösung. Für die quantitative real-time PCR wurden jeweils die Standardverdünnungen 10^{-4} bis 10^{-10} (in Triplikaten) und die auf 3,5 ng/µl verdünnten DNA-Extrakte der Proben (ebenfalls in Triplikaten) mit dem Reaktionsansatz vermischt und in 96-well PCR Platten geladen.

Die Menge an neu synthetisierten DNA-Fragmente während der sich wiederholenden Reaktionszyklen konnte durch die fortlaufende Einlagerung des DNA-bindenden Reagenz (SYBR-green) und die dadurch emittierte Fluoreszenz der Proben in Echtzeit gemessen werden. Die im Gerät gespeicherten Fluoreszenzdaten wurden anschließend computertechnisch analysiert. Die DNA-Konzentration der ursprünglichen Proben ließ sich automatisch von der Precision Melt Analysis™ Software (BioRad) mit den Standards vergleichen, berechnen und direkt vom Gerät ablesen. Die erhaltenen Actin-Kopie Zahlen in den Proben wurden noch auf 1 Gramm Probenmaterial hochgerechnet und sind in Tab. 32 und Abb. 122 dargestellt.

4.2 Ergebnisse

4.2.1 Klassische Kultivierung

Ausschütteln der Proben

Von den einundzwanzig genommenen Proben der beiden Versuchsräume und den beiden zusätzlichen Proben, die Herr Dipl.-Ing. Herwig Hengsberger nachträglich dem Labor zukommen ließ, konnten insgesamt 383 Reinkulturen isoliert werden. Diese Isolate wurden aufgrund deren Morphologie in sieben Gattungen mit jeweils unterschiedlichen Phänotypen eingeteilt. Mehr als die Hälfte der Isolate (51,4%) konnte der Gattung *Penicillium* zugeordnet werden. 28,9% der Reinkulturen wurden als Spezies der Gattung *Exophiala* und anderen so

genannten schwarzen Hefen und microcolonialen Pilzen (MCF) identifiziert. Zusätzlich konnten in den Proben noch Vertreter der Gattungen *Altanaria* (1%), *Cladosporium* (5,7%), *Sporotrix* (1,6%), *Fusarium* (0,5%) und *Mucorales* (1%) kultiviert werden. Von den Proben 1A, 4A und 4B konnten sowohl auf DG18- als auch auf Malz-Extrakt-Medium keine Pilze kultiviert werden. Eine genaue Auflistung der Isolate sind in Tab. 28 zu finden.

Isolierung von Pilzen von Abklatschplatten

Die Anzahl (845 Isolate) und Diversität der isolierten Pilze von den Abklatschplatten übertrifft die Zahlen der Isolate, die durch Ausschütteln der Proben gewonnen wurden. Im Gegensatz zu der zuerst angewandten Methode konnte keine klar dominierende Gattung identifiziert werden. Mit 27,2 % und 25,3 % stellen Vertreter der Gattung *Cladosporium* bzw. *Penicillium* den größten Anteil aller Reinkulturen dar. Die Gattungen *Mucorales* (7 %), *Altanaria* (5,3 %), *Aureobasidium* (1,8 %), *Fusarium* (4,9 %), *Epicoccum* (10,1 %), *Eurotium* (6,2 %) und *Sclerotium* (1,5 %) konnten als weitere vorkommende Schimmelpilze identifiziert werden. Ein großer Anteil der isolierten Pilze (10,8 %) konnte durch morphologische Methoden nicht identifiziert werden. Die häufig vertretene Gattung der *Exophiala* ließ sich von den Abklatschplatten nicht kultivieren. In Tab. 29 im Anhang sind alle Isolate und deren Gliederung zu den unterschiedlichen Gattungen aufgelistet.

Nur von den Abklatschplatten konnten Spezies der Gattungen *Aureobasidium*, *Epicoccum*, *Eurotium* und *Sclerotium* isoliert werden, wohingegen Vertreter der *Sporotrix* nur durch Ausschütteln der Proben erhalten wurden.

Die Tab. 30 zeigt eine Zusammenfassung aller, durch Ausschütteln und von Abklatschplatten kultivierten Pilze und deren Phänotypen für die jeweiligen Beprobungsorte. 33,5 % aller Pilzisolat konnten der Gattung *Penicillium* zugeordnet werden. *Cladosporien* stellen mit 20,5 % aller Reinkulturen die zweithäufigste Gattung dar. Weiters wurden die Gattungen *Altanaria* (4 %), *Aureobasidium* (1,2 %), *Fusarium* (3,5 %), *Epicoccum* (6,9 %), *Eurotium* (4,2 %) *Exophiala* – MCF (9 %), *Sclerotium* (1,1 %), *Sporotrix* (0,5 %) und *Mucorales* (5,1 %) aus den Proben isoliert. 10,4 % aller Reinkulturen konnten morphologisch nicht eindeutig identifiziert werden.

Die identifizierten Pilze vom Bestandsmauerwerk, vor Installation der Dämmsysteme, sind weder pathogen, noch produzieren sie gesundheitsschädliche Mykotoxine, das sind Stoffwechselprodukte, die toxisch wirken können. Da jedoch einige sporenbildende Arten detektiert wurden, kann eine allergene Wirkung auf sensitive Personen nicht ausgeschlossen werden.

4.2.2 DNA-Isolierung

Vergleich und Optimierung verschiedener DNA-Isolierungsmethoden

Ein Vergleich verschiedener Methoden zur Extraktion von DNA aus homogenisierten Probenmaterial von unterschiedlichen Baumaterialien konnte in diesem Projekt durchgeführt werden. Alle Ergebnisse sind ausführlich in der im Anhang angeführten Publikation [Ettenau-

er et al. 2012] „Microbes on building materials – evaluation of DNA extraction protocols as common basis for molecular analysis“ beschrieben, weshalb im Anschluss nur eine kurze Zusammenfassung erfolgt.

Mit allen untersuchten Methoden konnte aus allen Probenmengen der drei Materialien DNA isoliert werden. Die Messung der DNA-Konzentration (NanoDrop) ergab jedoch sehr unterschiedliche Werte:

- Alle drei verwendeten, kommerziell erhältlichen Extraktions-Kits lieferten bei allen Materialien die niedrigsten Werte (siehe Tabellen 2-4 der Publikation Ettenauer et al. 2012).
- Alle Methoden, bei denen die DNA über eine Säule extrahiert oder anschließend gereinigt wurde, lieferten die geringsten DNA-Konzentrationen im Test.
- Die empirischen Isolationsprotokolle erzielten die höchste DNA Konzentrationen (bis zu drei Zehnerpotenzen höhere Mengen), wobei die gewonnene DNA-Menge meist nicht mit der eingesetzten Probenmenge korrelierte. So konnte beobachtet werden, dass bei fast allen Methoden die größten DNA-Mengen aus 50 mg extrahiert werden konnten.

Methoden, die sehr hohe DNA-Konzentrationen lieferten zeigten meist deutliche Verunreinigung der DNA, die zu anschließenden Problemen bei der Visualisierung und Amplifizierung der DNA führte. Die geringen DNA-Mengen der kommerziellen Isolierungs-Kits zeigten dagegen einen sehr hohen Reinheitsgrad und lieferten positive Ergebnisse bei den anschließenden Tests. Bei der DGGE-Analyse konnte festgestellt werden, dass positive Ergebnisse der PCR-Reaktionen die Voraussetzung für einen kompletten Fingerabdruck der mikrobiellen Gemeinschaft sind.

Die optimale Methode für die Extraktion von DNA aus Baumaterialien ist der FastDNA® SPIN Kit for Soil:

- Dieses Protokoll lieferte zwar relativ geringe DNA Mengen, jedoch konnte diese hochmolekulare DNA durch ihrer Reinheit überzeugen.
- Als einzige der 19 untersuchten Methoden konnte mit diesem kommerziellen Extraktionskit bei allen Visualisierungs- und Amplifikationstests positive Ergebnisse erzielt werden.
- Das erhaltene DGGE-Bandenprofil zeigt ein komplettes Abbild der mikrobiellen Gemeinschaft (siehe Figur 1A und B der Publikation).

DNA-Isolierung aus den Probekörpern und den Proben aus dem Versuchshaus

In weiterer Folge wurde diese DNA-Extraktionsmethode erfolgreich für die Isolierung von DNA aus den Proben des Versuchshauses und der Probekörper angewendet. Die Mittelwerte von Triplikat-Messungen der DNA-Konzentration sind in Tab. 31 und Tab. 32 angeführt und in Abb. 121 graphisch dargestellt. Die gewonnenen DNA-Mengen reichen von $3,97 \times 10^3$ ng pro g Probenmaterial von Probe 3a (Thermosilitputz-Probekörper, inkubiert in der Klimakammer mit *Cladosporium cladosporioides*), bis $1,99 \times 10^4$ ng/g von Probe 5 (Schilfplatte mit

Lehmputz aus dem Dachgeschoss des Versuchshauses von der zweiten Probenentnahme). Die gemessenen DNA-Konzentrationen aus der Holzweichfaser- und der Schilfplatte mit Lehmputz nahmen von der zweiten zur dritten Probenentnahme wieder stark ab. Im Fall der Schilfplatten erreichten sie Werte vergleichbar mit denen der anderen drei Materialien, wohingegen die DNA-Konzentrationen in der Holzweichfaserplatte noch immer auf einem höheren Niveau lagen.

Generell konnten die größten DNA-Mengen aus der Holzweichfaserplatte und der Schilfplatte mit Lehmputz gewonnen werden. Vor allem in den mit innenraumrelevanten Pilzen inkubierten Probekörpern dieser beiden Dämmmaterialien konnten sehr hohe DNA-Konzentrationen festgestellt werden ($1,27 \times 10^4$ – $1,93 \times 10^4$). Die Proben der zweiten Entnahme in dem Versuchshaus zeigten ebenso relativ hohe Nukleinsäurekonzentrationen, die jedoch bis zur dritten Probenentnahme wieder sanken. Diese Werte deuten aber nicht direkt auf ein hohes Vorkommen von Pilzen und deren DNA hin, da die gemessenen DNA-Mengen sich sowohl aus vorhandener Bakterien-, Pilz-, Pflanzen-, als auch tierischer DNA zusammensetzt und nur als ein sehr genereller Indikator für mikrobielles Wachstum angesehen werden kann.

4.2.3 Biologische Aktivität - Mikrobielles Wachstum auf projektrelevanten Proben

Die Kolonie-Bildende-Einheiten der Proben aus dem Versuchshaus und aus der Klimakammer wurden in den Ausschüttelversuchen bestimmt. Die berechneten Werte sowie die DNA-Konzentrationen nach der Extraktion sind in Tab. 31 und Tab. 32 beziffert und in Abb. 121 dargestellt.

Nach sechsmonatiger Inkubation in der Klimakammer konnten von allen Probekörpern Pilze durch Ausschütteln der Proben isoliert werden. Die Keimzahl der Pilze lag zwischen $2,5 \times 10^3$ und $1,97 \times 10^6$. Das stärkste Pilzwachstum konnte auf den Holzweichfaserplatten (4) festgestellt werden, gefolgt von den Schilfplatten mit Lehmputz (5), der Perliteplatte (2), der Aufspritz-Zellulose (1) und dem Thermosilitputz (3). Die Nullkontrollen aller untersuchten Probekörper zeigten kein Pilzwachstum.

Von den Materialien (1) bis (3) aus beiden Räumen des Versuchshauses konnten bei der zweiten Probenentnahme ebenfalls keine Pilze isoliert werden. Bei der dritten Probenentnahme wurden von diesen drei Materialien nur in der Probe der Perliteplatte vom Dachgeschoß Pilze detektiert (KBE $2,5 \times 10^2$). Dieses Pilzwachstum von der Perliteplatte-Probe liegt aber deutlich - ein bis zwei Zehnerpotenzen – unter den KBE-Werten der Holzweichfaserplatte und der Schilfplatte mit Lehmputz und kann durch eine erhöhte Raumlufffeuchte in den Wintermonaten im 1.Stockwerk erklärt werden. Eine andere Erklärung wäre eine Kontamination dieser Probe bei der Entnahme, durch verunreinigte Behälter, im Labor, etc. Aus den Proben der 2. und 3. Entnahme im Versuchshaus ließen sich von der Holzweichfaserplatte und den Schilfplatten mit Lehmputz aus beiden Stockwerken wachstumsfähige Kolonien anzüchten (KBE von $1,5 \times 10^3$ bis $4,7 \times 10^4$ bzw. $6,0 \times 10^3$ bis $1,63 \times 10^4$). Die KBE dieser beiden Materialien liegen unter den Werten der in der Klimakammer, bei optimalen Wachs-

tumsbedingungen, inkubierten Materialien. Die Keimzahl auf der Holzweichfaserplatte liegt um 2 bis 3 Zehnerpotenzen unter dem Wert der Probekörper und im Fall der Schilfplatten mit Lehmputz um eine Zehnerpotenz (siehe Tab. 32 und Abb. 120). Trotz einer sehr hohen Raumlufffeuchte im dritten Winter kann eine Abnahme der KBE bei dem Schilf-Lehm System konstatiert werden. Dagegen wurde ein auffallender Anstieg der KBE in der Holzweichfaserplatte verzeichnet. Der Anstieg fällt allerdings in beiden Stockwerken in ähnlichem Maß an, woraus sich schließen lässt, dass die außergewöhnlich hohe Raumlufffeuchte im Dachgeschoss keinen Einfluss hatte und der Anstieg in erster Linie materialbedingt war. Diese hohe Luftfeuchtigkeit im dritten Winter hatte jedoch keine Auswirkungen auf die KBE der Aufspritz-Zellulose (1), der Perliteplatte (2) und des Thermosilitputz (3) im Dachgeschoss des Versuchshauses, wo kein Pilzwachstum entdeckt wurde.

Diese Versuche zur Bestimmung der biologischen Aktivität auf den verschiedenen Dämmmaterialien mit Hilfe von selektiven klassischen Kultivierungsversuchen bewiesen, dass unter optimalen Wachstumsbedingungen in der Klimakammer auf allen untersuchten Materialien durchaus Pilze wachsen können. Dagegen zeigen die Werte für die Kolonie-Bildende-Einheit stark unterschiedliche Ergebnisse für die verwendeten Materialien. Von den Proben aus dem Versuchshaus konnten jeweils nur von der Holzweichfaserplatte und den Schilfplatten mit Lehmputz Pilze kultiviert werden. Auf den weiteren Dämmsystemen des Versuchshauses wurde keine biologische Aktivität festgestellt. Eine etwaige Erklärung für das geminderte Wachstum auf den Materialien (1) bis (3) können die chemische Zusammensetzung der verwendeten Dämmstoffe und etwaige Additive, die speziell das mikrobielle Wachstum verhindern oder minimieren sollen, geben. Die Selektivität der klassischen Kultivierung ist ein weiterer Grund für diese Ergebnisse. Die verwendeten Standardmedien zur Pilzisolierung erlauben nur die Kultivierung eines kleinen Ausschnitts der tatsächlich vorhandenen Pilz-Flora.

Um umfangreichere Kultivierungsergebnisse zu erzielen und um genauere KBE für alle Materialien zu erhalten – d.h. um die Detektionsgrenze der Kultivierungsversuche zu erhöhen und die gegebene Selektivität durch die Verwendung von zwei Standardmedien zu erniedrigen - müsste man für jedes Dämmmaterial eine Vielzahl von speziellen Nährmedien erstellen, die die natürlichen Nährstoffressourcen auf dem jeweiligen Dämmmaterial besser widerspiegeln. Anschließend müsste man verschiedene Probenansätze mit entsprechend größeren Probenmengen erstellen und diese unter verschiedenen Bedingungen inkubieren. Die dadurch erhaltenen Kultivierungsergebnisse und KBE würden die tatsächliche mikrobielle Flora auf den Materialien besser widerspiegeln, wären aber keineswegs vollständig, da sich einige Organismen in einem nicht-wachstumsfähigem Dauerstadium befinden, oder die gewählten Kultivierungsbedingungen noch immer nicht ideal für deren Wachstum im Labor wären. Dieser große Nachteil der klassischen Kultivierungsversuche kann nur durch die Verwendung von modernen molekularen Methoden umgangen werden, mit denen auch sich in einem Ruhestadium befindliche Organismen und nicht kultivierbare Mikroben über deren DNA detektiert werden können – vorausgesetzt, es wurde eine optimale Methode zur Isolierung der DNA aus dem jeweiligen Material angewandt.

4.2.4 Quantitative real-time PCR

Um die Limitierungen der klassischen Kultivierungsversuche zu umgehen und um eindeutige Aussagen als durch die gewonnenen DNA-Mengen aus den Proben zu erhalten, wurden in diesem Projekt molekularbiologische Methoden angewandt um ein komplettes Abbild der mikrobiellen Pilz-Flora auf den verwendeten Dämmsystemen zu erhalten. Hierfür konnte die molekulare Quantifizierung der Pilze über deren DNA mittels real-time PCR nach einer Vielzahl von Vorversuchen optimiert und in dem letzten Projektabschnitt mit den vorhandenen Proben aus dem Versuchshaus und den Probekörpern erfolgreich durchgeführt werden.

Die erhaltenen Ergebnisse sind in Tab. 32 aufgelistet und in Abb. 122 grafisch dargestellt. Dieses moderne, molekulare Analyseverfahren erlaubte die Detektion von Pilzen in allen getesteten Proben. Im Gegensatz zur Keimzahlbestimmung konnte mit dieser Methode auch Pilzaktivität in den Nullkontrollen der Probekörper festgestellt werden ($6,3 \times 10^3$ bis $4,4 \times 10^4$ Kopien des Actin-Gens bzw. Pilze pro g Probenmaterial). Die molekulare Analyse mittels real-time PCR erwies sich somit gegenüber den verwendeten mikrobiologischen Methoden als überlegen an. Die Anzahl an Pilzen in den beimpften Probekörpern ist in nahezu allen getesteten Materialien höher als in den genommenen Proben vom Versuchshaus. Nur bei der Schilfplatte mit Lehmputz konnten in dem Gebäude zwei bzw. drei Jahre nach Versuchsbeginn höhere Ergebnisse festgestellt werden, was in Zusammenhang mit der höheren Luftfeuchte in den Räumen stehen könnte. Die erhöhte Raumlufffeuchte im dritten Winter des Versuchszeitraums führte im Dachgeschoss bei einigen Dämmsystemen zu einer stärkeren Pilzaktivität. So konnte auch bei dem Thermosilitputz in den Proben vom Dachgeschoss der dritten Probenentnahme erhöhte Pilzkonzentrationen festgestellt werden. Die Holzweichfaserplatte-Proben aus dem Versuchshaus zeigten ebenfalls erhöhte Pilzkonzentrationen, wobei auch hier, die Luftfeuchte im dritten Winter eine logische Erklärung liefert. Im Vergleich zu den anderen Materialien zeigten die Aufspritz-Zellulose und die Perliteplatte keine signifikant erhöhte mikrobielle Aktivität. Die mit Abstand höchste Pilzaktivität wurden in den Probekörpern der Holzweichfaserplatte detektiert ($1,59 \times 10^6$ – $7,3 \times 10^6$). Generell reichte die Kopienzahl des Actin-Gens bzw. die Zahl an Pilzen in den Proben von $4,28 \times 10^3$ bis $7,3 \times 10^6$ Kopien pro g Probenmaterial, wobei die Detektionsgrenze des Ansatzes bei $5,35 \times 10^4$ Kopien pro g liegt. Diese Limitierung und die sehr gering vorhandenen Mengen an Pilz-DNA in den Proben führten dazu, dass die erhaltenen Ergebnisse vieler Proben nah an der Detektionsgrenze oder darunter lagen (Tab. 32). Dieses Ergebnis zeigt wiederum, dass die Kontaminationen mit Pilzen in den Proben sehr gering sind und die getesteten Dämmsysteme keine optimalen Wachstumsbedingungen für Pilze darstellen. Dieses neue Analyseverfahren zeigt den Bruchteil an wachstumsfähigen Pilzen in einer Probe viel eindeutiger als die Keimzahlbestimmung mittels klassischer Kultivierung und gibt Rückschlüsse auf den Anteil an Pilz-DNA in der gesamten isolierten DNA-Menge. Die erforderlichen Probenmengen für eine quantitative Analyse mittels qPCR liegen im mg-Bereich, wodurch ist eine nahezu zerstörungsfreie Probenentnahme möglich.

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 beigetragen hat.

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 5.3 bis 5.7 sollen einen Überblick über die Messdaten an bestimmten Positionen vermitteln. 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 dann in einem späteren Kapitel diskutiert.

Hinsichtlich der gelegentlichen Verwendung von Abkürzungen für die einzelnen Messstellen sei auf Abb. 6 verwiesen oder auf folgende tabellarische Kurzfassung:

Tab. 14 Kurzbezeichnung und Beschreibung der einzelnen Messpositionen

Bezeichnung	Beschreibung
ID	Grenzfläche/-schicht zwischen Dämmsystem und Bestandskonstruktion
BA-St	Sensoren, die so tief wie möglich in den Luftspalt neben dem Holzbalkenkopf platziert wurden
BA-Wa	Sensoren in der Mitte der Balkentasche, 0,15 m von der Bestandsoberfläche
HF-St	Holzfeuchte an der „nassesten Stelle“ bzw. im oberen Bereich
HF-ID15 / HF-ID30	Holzfeuchte in der Ebene der Innendämmung in 15 / 30 mm Tiefe

5.2 Außen- und Raumklima

Die folgenden beiden Abbildungen dokumentieren die Stundenwerte von Temperatur und relativer Luftfeuchte des Außenklimas und der beiden Räume. Der Übersichtlichkeit halber zeigt die anschließende Abb. 43 die Monatsmittelwerte. Zusätzlich gibt die Tab. 33 im Abschnitt A5 des Anhangs die Monatsmittelwerte tabellarisch wieder. Der Messzeitraum umfasste den 5. September 2010 bis zum 17. Juni 2013.

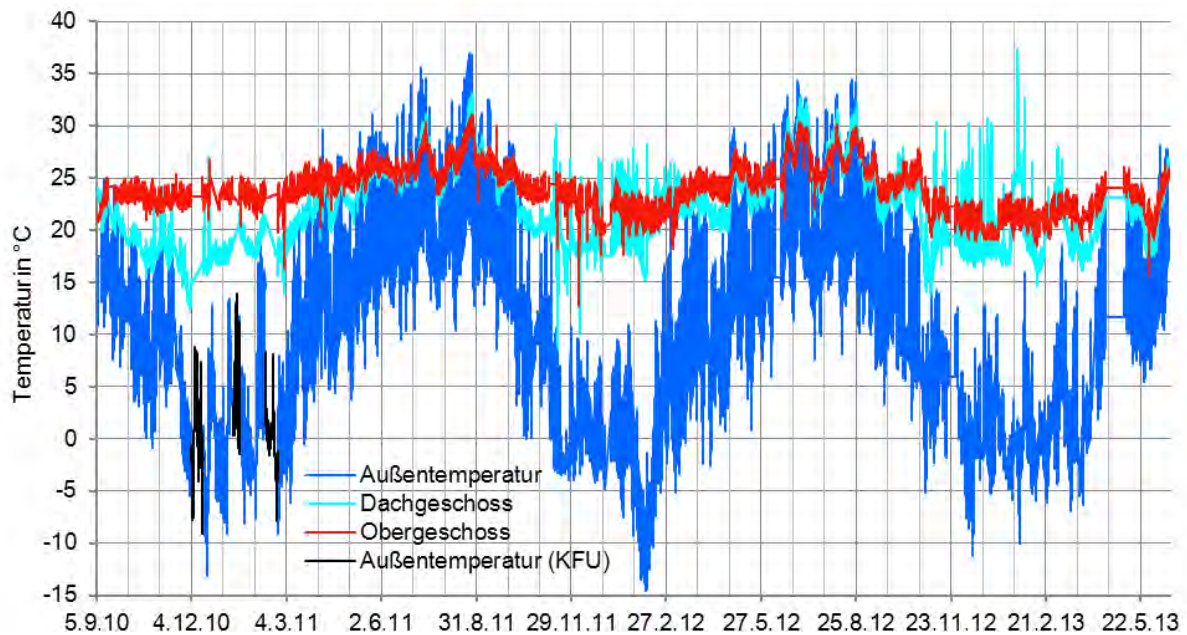


Abb. 41 Temperaturverlauf: außen (blau), Obergeschoss (rot) und Dachgeschoss (hellblau), Sensorausfälle wurden durch Klimadaten der nahe gelegenen Messstation der Karl-Franzens-Universität (KFU) Graz ergänzt (schwarz)

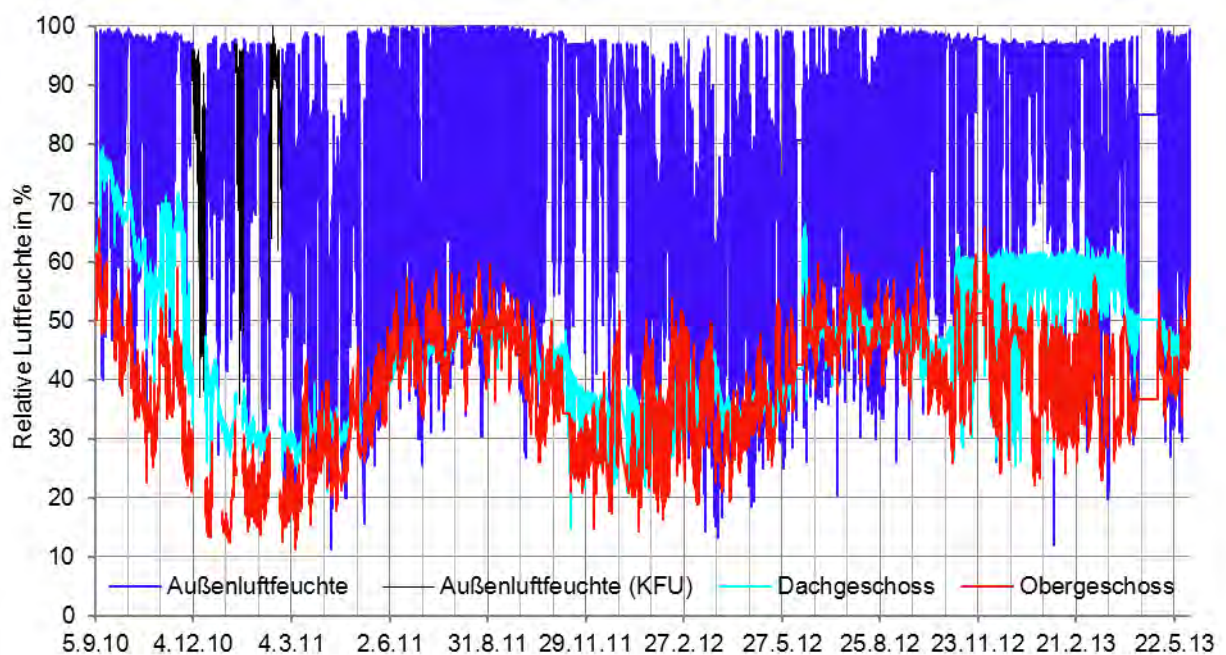


Abb. 42 Verlauf der relativen Luftfeuchte: außen (blau), Obergeschoss (rot) und Dachgeschoss (DG-hellblau), Sensorausfälle wurden durch Klimadaten der nahegelegenen Messstation der Karl-Franzens-Universität ergänzt (schwarz)

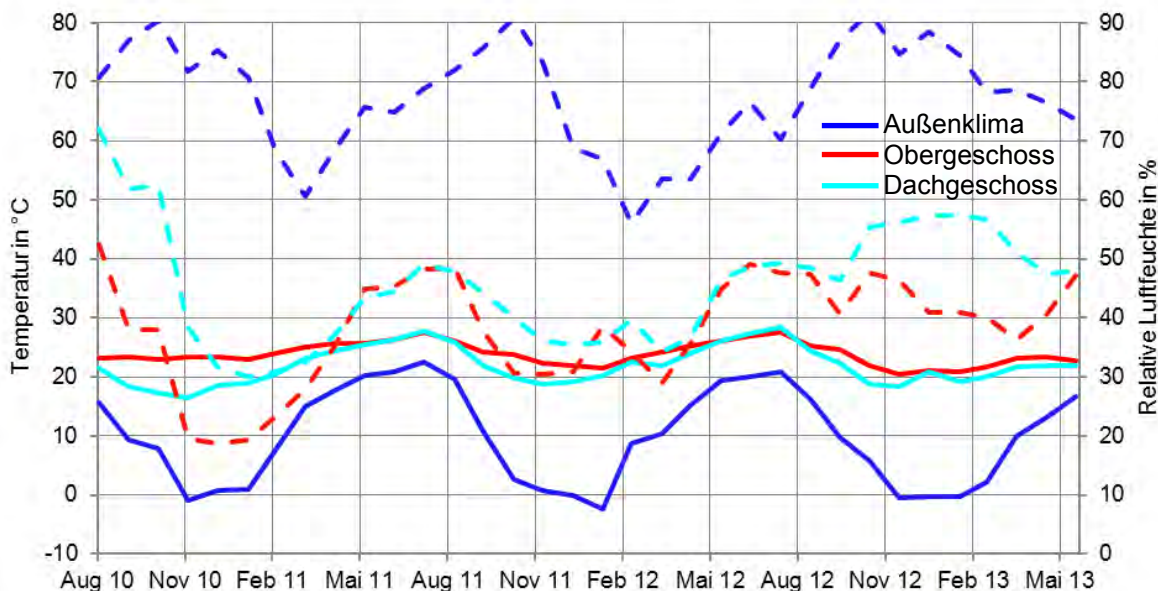


Abb. 43 Monatliche Durchschnittswerte als Tabelle und Diagramm für Temperatur (jeweils durchgezogen, linke Skala) und Luftfeuchte (jeweils gestrichelt, rechte Skala): Dachgeschoss, Obergeschoss und Außenklima

Während der Projektdauer bewegte sich die Außentemperatur mit durchschnittlich 9,8°C etwas über dem langjährigen Mittel der Jahre 1971 bis 2000 von 9,4°C [90]. Der Winter 2012/13 (Oktober bis März) mit einer Durchschnittstemperatur von 2,8°C sowie der Sommer 2011 (April bis September) mit einer Durchschnittstemperatur von 19,3°C erwiesen sich als die extremsten Trocknungs- bzw. Kondensationsperioden. Die Durchschnittstemperaturen der Winter 2010/11 und 2011/12 betragen 4,2 und 3,4°C, des Sommers 2012 17,0°C. Im kältesten Monat, Februar 2012 ($\bar{\varnothing}$: -2,4°C), kam es zu einer längeren kalten Periode mit bis zu -15°C.

Im Obergeschoss waren die Innenraumtemperaturen vergleichsweise konstant und fielen vom ersten zum zweiten Winter ab. Sie sanken von 23,3°C im Winter 2010/11 über 22,8°C auf 21,8°C im Winter 2012/13.

Durch den Einsatz eines mobilen, elektrisch betriebenen Heizkörpers im Zimmer des Dachgeschosses konnte die Durchschnittstemperatur im Winter 2011/12 konstanter auf etwas über 20,4°C bzw. 19,9°C im letzten Winter stabilisiert werden, nachdem sie im ersten Winter 2010/11 nur 18,3°C betragen hatte.

Der Verlauf der relativen Außenluftfeuchte zeigt einen typischen, sehr unruhigen Verlauf (Abb. 42). Die Außenluftfeuchte ist während der Kondensationsperiode von untergeordneter Bedeutung, da derartig kalte Luft nur sehr wenig absolute Feuchte speichern kann. Aus

diesem Grund ist in den meisten Luftfeuchte-Diagrammen dieses Berichtes die Außenluftfeuchte nicht mit angegeben. Bei 0°C bedeutet eine Steigerung von 50 auf 80% Luftfeuchte einen Sprung im *absoluten* Feuchtegehalt von 2,4 auf 3,9 g/m³. Bei 20°C dagegen würde sich durch einen solchen Sprung in der *relativen* Luftfeuchte die *absolute* Feuchte von 8,6 auf 13,8 g/m³ erhöhen. Entscheidend an der winterlichen Außenluft ist, dass sie im Verhältnis zur Raumluft weit weniger Feuchte enthält. Daraus resultiert ein Wasserdampfdruckgefälle, das einen Dampftransport von innen nach außen auslöst.

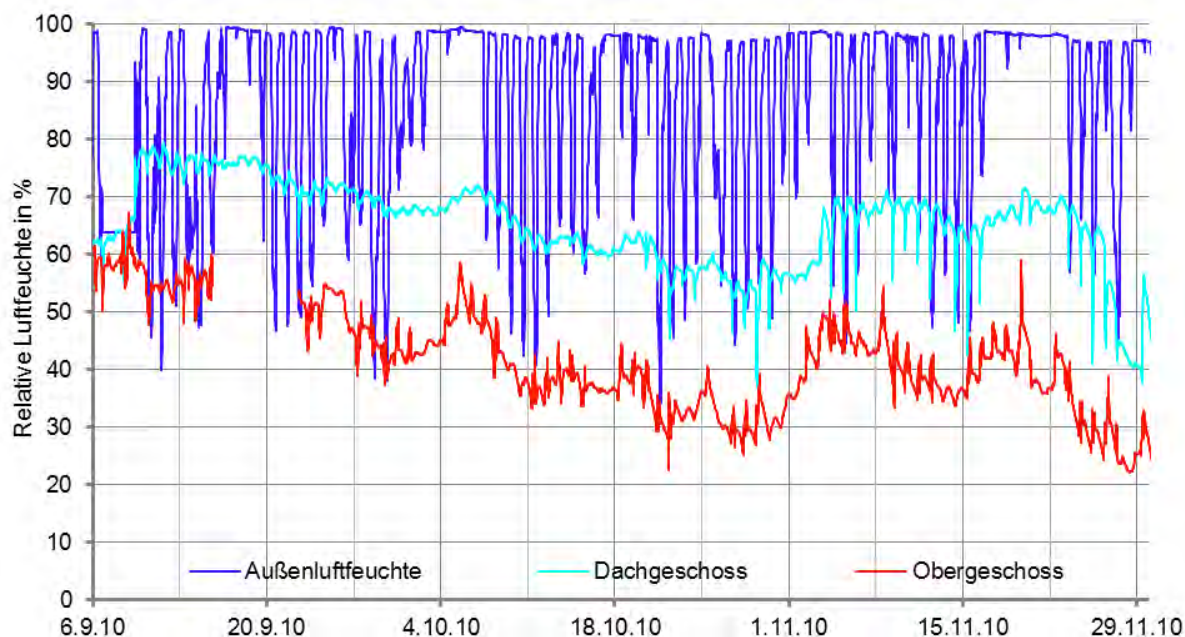


Abb. 44 Außenluftfeuchte und Raumluftfeuchten vom 6. September bis 1. Dezember 2010

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 beispielsweise auf knapp 80 % an, ebenso um den 5. Oktober oder Anfang November (Abb. 44). In diesen Zeiträumen wurde die zweite Lage Wärmdämmputz aufgebracht bzw. auf den Holzweichfaserplatten oder der Zellulose-Dämmung ist der Putz angebracht worden. Auffallend ist, dass die Luftfeuchte im Dachgeschoss während dieser Bauphase weit über der Luftfeuchte im Obergeschoss verläuft. Ein Hinweis darauf, dass im Dachgeschoss weniger gelüftet wurde und die Temperaturen niedriger waren.

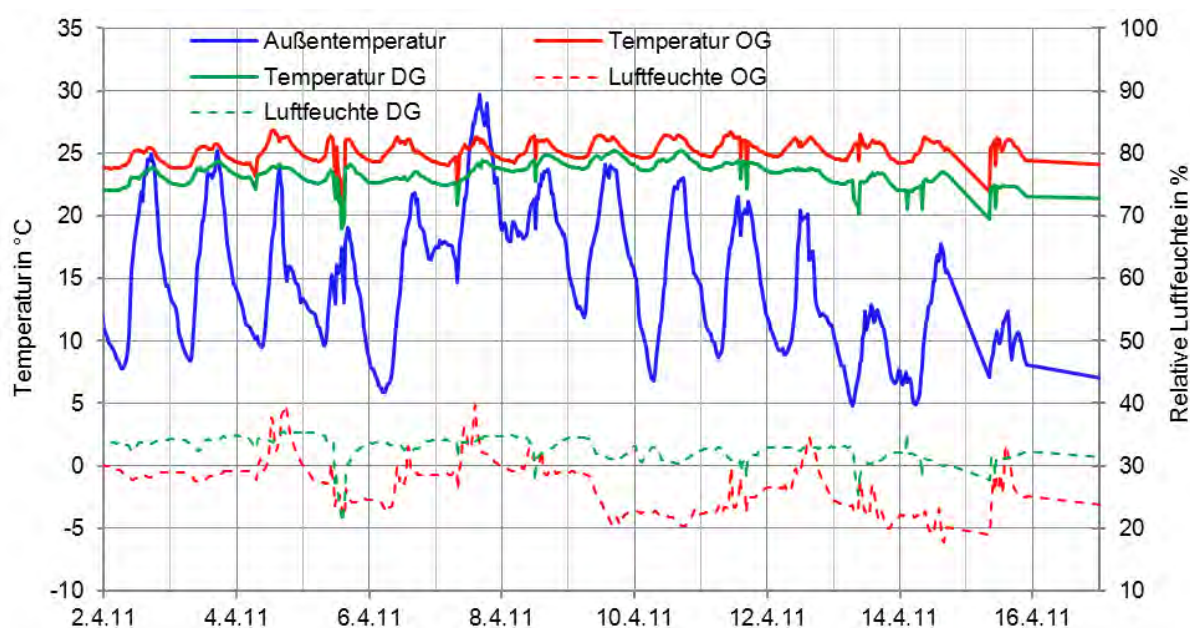


Abb. 45 Raumklima und Außentemperatur vom 2.4.2011 bis 16.4.2011

Die Decke zwischen den beiden Zimmern scheint das Raumklima des Dachgeschosszimmers vom Obergeschoss hygrisch zu entkoppeln. Die Luftfeuchtespitzen im Obergeschoss am 4., 6. und 7. April zeichnen sich ebenso wenig in der Luftfeuchte des Dachgeschosses ab, wie die hohen Schwankungen zwischen 10. bis 16. April 2011 (Abb. 45). Die Temperaturen beider Räume scheinen in gleicher Weise vom Gang der Außentemperatur beeinflusst.

Die Innenraumluftfeuchte im Obergeschosszimmer startete im September 2010 von einem hohen Ausgangspunkt, sank aber in den Wintermonaten stark ab (Abb. 43). In den Monaten Oktober 2010 bis März 2011 betrug die durchschnittliche Raumluftfeuchte 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 aktiven Lüften durch die Kindergärtnerinnen im Obergeschoss führt die undichte Gebäudehülle (unsanierte Kastenfenster) dem Gebäude im Winter nutzerunabhängig viel trockene Außenluft zu.
- Hohe Innenraumtemperaturen.
- Bei den Begehungen standen immer praktisch alle Türen offen und im Zimmer im Obergeschoss spielten zeitweise nur einige Kinder. Im Raum selber fällt wahrscheinlich nur wenig Luftfeuchte an, diese wird durch den ständigen Luftaustausch mit den anderen Räumen weiter gesenkt. Auch wird das Foyer, welches über mehrere Etagen verläuft, vermutlich viel Feuchte aus den Räumen aufnehmen.
- 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. 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 [58] 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. auch in [68]). Dieser Richtwert wird im Winter 2011/12 deutlich unterschritten, was für Kinder mit Atemwegserkrankungen, wie beispielsweise Asthma, problematisch sein kann. Derart niedrige Luftfeuchtwerte in Verbindung mit hohen Raumtemperaturen sind insofern für Kinder wie Betreuer in der Tageseinrichtung sicherlich 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 W/m^2 zu niedrig waren, weshalb das Sternpyranometer am 13.4.2011 ausgetauscht wurde. Der Ausfall der Außenklimadaten konnte durch eine nahegelegene Klimamessstation kompensiert werden, welche die Daten erfreulicherweise unkompliziert und unentgeltlich zur Verfügung stellte. In einer Entfernung von ungefähr 1,4 km und einem Höhenunterschied von ungefähr 50 m zum Testhaus befindet sich eine Wetterstation der Karl-Franzens-Universität (KFU) Graz, welche Teil eines Messnetzes der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik in Wien (ZAMG) ist und die Daten über eine Standleitung weiterleitet. Dank der örtlichen Nähe und ähnlichen Topologie kann davon ausgegangen werden, dass sich die Wetterverhältnisse an den beiden Standorten nicht wesentlich unterscheiden. Die Ergänzungen des Außenklimas sind in den Abb. 41, Abb. 42 und Abb. 46 in schwarz dargestellt.

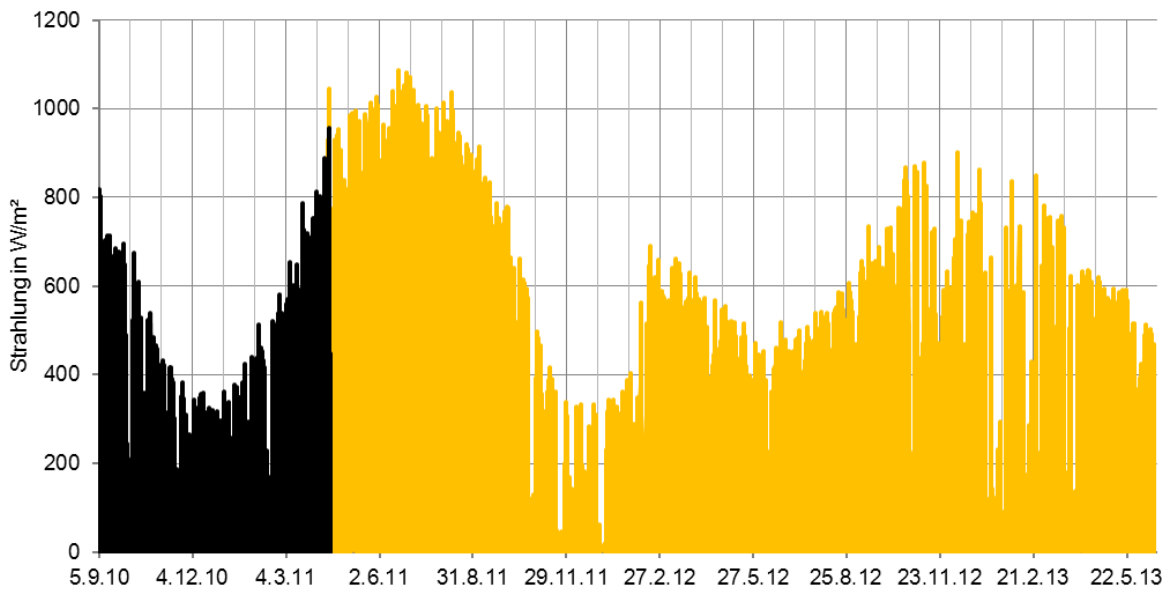


Abb. 46 Jahrgang der Strahlung: Gelb die am Testhaus gemessenen Werte, schwarz die Werte der nahe gelegenen Universitätsmessstation (30-Minuten-Werte); am 8.2.2012 wurde das Sternpyranometer von einer horizontalen in eine vertikale Stellung gebracht

Die an beiden Stationen gemessenen Werte unterschieden sich wenig. Die Spitzenwerte am Testhaus übersteigen die Messwerte an der Karl-Franzens-Universität an den meisten Tagen um ungefähr 10 %, bedingt z. B. durch stärkere Luftverschmutzung. Wegen der Eigenverschattung der Südwestwand wiederum stiegen täglich erst nach ungefähr 9.30 Uhr die Werte stark an, nachdem die Sonne auch diese Wand beschien. In den Simulationen wurden die unterschiedlichen Datenquellen wegen des ausgleichenden Effekts gleichberechtigt behandelt.

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.

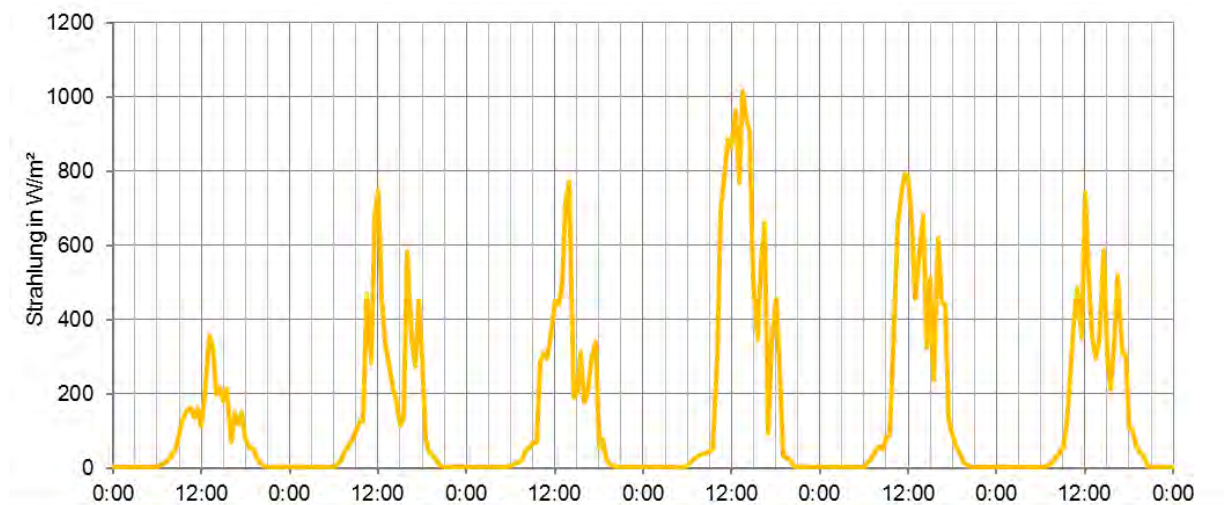


Abb. 47 Verlauf der Globalstrahlung vom 29.7. bis zum 4.8.2011

Der Tagesverlauf der Globalstrahlung ist hinsichtlich der abschirmenden Wirkung eines Laubbaums aufschlussreich. Abb. 103 zeigt den Baum, der in ungefähr 7 m Entfernung vor der Gebäudeecke, ungefähr in Verlängerung der Ost-südost ausgerichteten Gebäudeseite, wächst. In Abb. 47 ist der Verlauf der Globalstrahlung während einiger Sommertage zu sehen. Am steilen Anstieg der Strahlung gegen 11:15 Uhr ist zu sehen, dass zu diesem Zeitpunkt die Sonnenstrahlung auf die Fassade mit der Testwand auftrifft. Das Maximum wird in Abhängigkeit von der Bewölkung zwischen 12 und 14 Uhr erreicht. Ab ungefähr 14 Uhr wird der Strahlungsverlauf häufig unruhig. Gegen 18 Uhr kommt die tiefer stehende Sonne in den Bereich der Bäume, welche sich an der Grundstücksgrenze zur Schönbrunn-gasse befinden.

Wie noch später erläutert wird, konnte mit Hilfe von Daten der Messstation der Karl-Franzens-Universität geklärt werden, dass eindringender Schlagregen keinen signifikanten Auswirkungen auf die Messungen hat.

5.2.1 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.
- Reduktion des Feuchteflusses nach außen: Abdichtung der inneren Fensterebene.
- Reduktion des Feuchteflusses nach innen: beweglicher Vorhang im Obergeschosszimmer, Schließen der Zimmertüre während der Nacht und an Wochenenden und Abdichtung von Bauwerks-Undichtigkeiten im Dachgeschoss (Wanddurchdringungen für Versorgungsleitungen und Stromkabel des Projektes).

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

Mobile Luftbefeuchter

Für die Befeuchtung der Räume wurden im Ober- und Dachgeschosszimmer jeweils ein Befeuchter AxAir LBV 45 der Firma Walter Meier (Klima Deutschland) GmbH aufgestellt. 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 könnten, wurde der Befeuchter im Spielzimmer des Obergeschosses auf ein extra angefertigtes Podest in ungefähr 2 m Höhe aufgestellt. Dieser Befeuchter stand zur Sicherheit zusätzlich in einer Plastikwanne.



Abb. 48 Befeuchter AxAir LBV 45 der Firma Walter Meier GmbH

Die Befeuchter sind gemäß den Herstellerangaben für Räume bis 350 m³ geeignet, die maximale Befeuchtungsleistung liegt bei 45 l/Tag. Das Volumen der beiden Zimmer beträgt ungefähr 115 m³, sodass die Geräte ausreichend sein sollten. Die Steuerung der Befeuchter ermöglicht laut Herstellerangaben eine Soll-Raumlufffeuchte von ungefähr 40 bis zu 70 % bzw. permanenten Betrieb. Drei verschiedene Lüftergeschwindigkeiten gestatten unterschiedliche Wasserdampfproduktionsraten. Die Kontrolle kann durch externe Hygrostate erfolgen, welche bei Unterschreitung der eingestellten Raumlufffeuchte die Befeuchter einschalteten.

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

Tab. 15 Eingestellte Soll-Raumlufffeuchte 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 %

Wegen steigender Außentemperaturen wurden die Befeuchter Mitte März 2012 deaktiviert. Da sich auf dem stehenden Wasser der Vorratsbehälter Schimmel bilden kann, wurden die Luftbefeuchter aus Hygienegründen vom 21.3. bis 24.3. auf volle Leistung gestellt. Die nahezu geleerten Vorratsbehälter ließen sich dann leichter reinigen. Anfang April 2013 wurde analog vorgegangen.

Reduktion der Feuchtediffusion nach innen und außen

Mit den Betreuerinnen wurde vereinbart, dass die Zimmertüre zum Testraum des Obergeschosses nachts und an Wochenenden geschlossen bleiben sollte. Die Einhaltung konnte nicht überwacht werden. Es ließ sich aber häufig beobachten, dass während der Befeuch-

tungsphasen die Luftfeuchte an einigen Wochenenden kontinuierlich zunahm und am Montagmorgen wieder schlagartig abnahm (siehe unten).

Nachdem sich nach Beginn der maschinellen Befeuchtung im Jänner 2011 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, die einen reduzierten Luftaustausch ermöglichten.



Abb. 49 Links Wanddurchbrüche für Kabel der Messtechnik und für die Wasserversorgungsleitung des Befeuchters, rechts Abdichtung mit (zwei unterschiedlichen) Fensterabdichtungsbändern

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 (Abb. 49). Die Fugen der Türe sowie die innere Ebene der Kastenfenster wurden mit speziellem Dichtungsband versehen.

5.2.2 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. 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 nicht vollständig ab.

Tab. 16 Mittelwerte der Raumtemperatur und Raumlufffeuchte während der kältesten Wintermonate Dezember bis März

Zeitraum	Obergeschoss		Dachgeschoss	
	Einheit	[°C / %rL]	Einheit	[°C / %rL]
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

Tab. 16 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 33 % erhöht werden, im Dachgeschoß von 33 auf 37 %. Diese Werte mögen für winterliche Raumlufffeuchten üblich sein, innerhalb des Projektes sind sie im Sinne einer Auslotung der Grenzen der Dämmsysteme nicht ausreichend. Da laut Herstellerangaben weit höhere Luftfeuchten möglich sein sollen, musste die tatsächliche Luftfeuchte aufgrund einer hohen Lüftungsrate zustande gekommen sein.

Anhand des Raumklimas im Obergeschoss war deutlich zu sehen, ob die Zimmertür tatsächlich geöffnet oder geschlossen war, oder ob die Befeuchter funktionierten bzw. verstärkt gelüftet wurde.

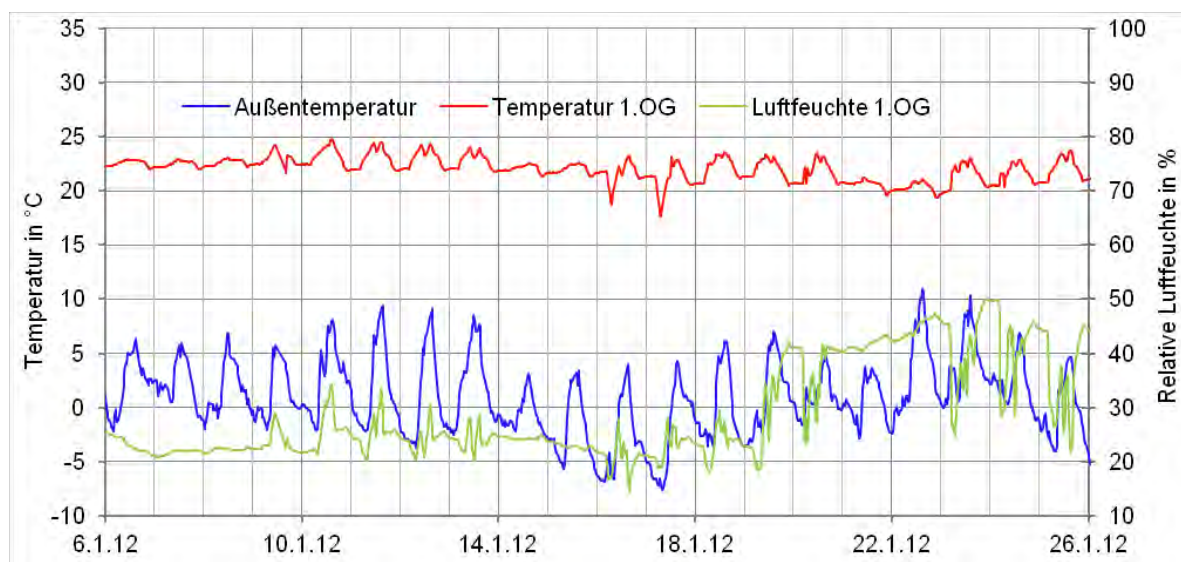


Abb. 50 Außentemperatur (blau, linke Skala) und Raumklima im Obergeschoss (rot und grün) im Jänner 2012

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 (Abb. 50). 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 Abb. 50 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.

Morgens, gegen fünf Uhr wechselt die Heizanlage in den Tagmodus und beginnt die Luft aufzuwärmen, weshalb die relative Luftfeuchte sinkt. 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. Abb. 51 dokumentiert, dass auch tagsüber immer wieder die Fenster geöffnet wurden.



Abb. 51 Eine Figur aus Bausteinen verhindert das Schließen der Fensterflügel im Zimmer des Obergeschosses am 8. Februar 2012

Obwohl die Sollraumluftfeuchte des Hygrostats ab Mitte Jänner 2012 auf 60 % Luftfeuchte eingestellt war, konnten nicht mehr als etwas über 50 % Luftfeuchte erreicht werden. Ein Grund dafür war, dass die Lüftergeschwindigkeit im Obergeschoss wegen der hohen Lärmentwicklung nicht auf hohe Leistung gestellt werden konnte, da dort eine Kindergruppe nach dem Mittagessen regelmäßig einen Mittagsschlaf hielt. Auch im Dachgeschoss konnten nur durchschnittlich 37 % (Jänner bis März) erreicht werden, obwohl die höchste Lüftergeschwindigkeit eingestellt war. Ein Teil der dort produzierten Feuchte konnte dort durch neu gebildete Risse in der Türe des Dachgeschosses entweichen.

5.2.3 Weitere Maßnahmen zur Erhöhung der Raumlufffeuchte in der dritten Kondensationsperiode

Um in der letzten Kondensationsperiode die Luftfeuchten in den Räumen weiter zu erhöhen, wurden 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 Rollokasten 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 Lüftungsvorgänge unternähmen, wenn sich Tauwasser gebildet hatte.

Aufgrund der Probleme beim Erreichen höherer Raumlufffeuchten wurden die Steckerhygrostate in einer Klimakammer des Instituts für Hochbau (TU Graz) bei 50 % Luftfeuchte überprüft. Für die beiden Tests wurden die vier Hygrostate mit Nummern versehen. Die Klimaverhältnisse im Klimaraum wurden zusätzlich mit Hilfe eines Schleuderpsychrometers überprüft.

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. 17 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	Lufttemperatur	Luftfeuchte
23.10.2012	43,0	53,3	58,7	-	20,6	52
24.10.2012	23,8	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. Als Schlussfolgerung musste auch weiterhin durch häufige Kontrolle per GSR-Modem die Raumlufffeuchten überprüft werden, um gegebenenfalls die Soll-Raumlufffeuchte der Befeuchter manuell zu steuern.

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

Aus Tab. 16 geht hervor, dass die Maßnahmen im letzten Winter 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 Raumluftfeuchte stellten sich im weiteren Verlauf als sehr aufschlussreich für die Beurteilung der Innendämmsysteme heraus.

5.3 Temperatur und Luftfeuchte auf der Bestandsoberfläche

Mit Hilfe der Temperatur- und Luftfeuchtesensoren auf der ehemaligen Bestandsoberfläche kann beispielsweise festgestellt werden, ob Flüssigwasser entsteht, oder, wenn Temperatur-Oberflächensensoren angeordnet sind, ob der Wärmewiderstand eines Dämmsystems tatsächlich dem von den Herstellern angegebenen entspricht. Da auch bei Sensoren hoher Qualität in gesättigten Materialien zu befürchten ist, dass die Messfühler Schaden nehmen, wurden diese in jedem Dämmsystem gedoppelt. Die Sensor-Paare befinden sich ungefähr 0,25 m unterhalb der Balken, wie in Abb. 6 oder Abb. 14 dargestellt ist. Die Sensoren im Feld 1 (Streichbalken) sind in der Zimmerecke angeordnet (siehe Abb. 7).

Trotz gedoppelter Sensoren fielen unglücklicherweise im mit Wärmedämmputz versehenen Feld 3 beide Luftfeuchtesensoren und beide Temperatursensoren an Balken 2 (Zellulose) aus. Alle anderen ausgefallenen Sensoren konnten durch die Dopplung kompensiert werden. Tab. 26 im Anhang führt die verschiedenen Sensoren auf. Die Wandoberfläche an Balken 8 ist nicht gedämmt, weshalb dort keine entsprechenden Messfühler angebracht worden sind. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind die Temperatur- und Luftfeuchtesensoren auf der Bestandsoberfläche 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 beieinander liegen, können Abweichungen der Sensoren durch Messtoleranzen oder lokal leicht unterschiedliche Einbausituationen entstehen.

Bedingt durch die verschiedenen Eigenschaften ergeben sich vor allem während der Kondensationsperiode 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 Besprechung auf die winterlichen Verhältnisse.

5.3.1 Temperaturverlauf, Balken 1 bis 7

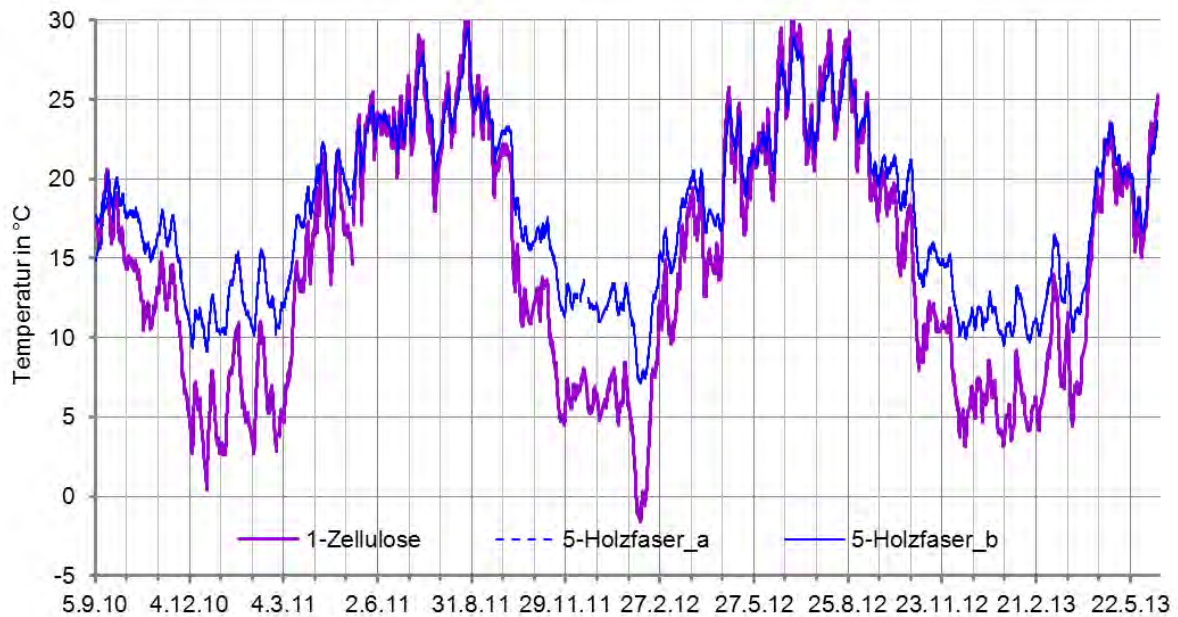


Abb. 52 Temperaturverlauf auf der Grenzfläche zwischen der Bestandsoberfläche und dem Dämmsystem der Balken 1 (Zellulose, Balken 2 defekt) und Balken 5 (Holzweichfaserplatte)



Abb. 53 Temperaturverlauf auf der Grenzfläche zwischen der Bestandsoberfläche und dem Dämmsystem der Balken 3 (Perliteplatte), 6 und 7 (Schilf)

Die Temperaturen auf der Grenzschicht zwischen der ehemaligen Bestandsoberfläche und der kalten Seite des Dämmsystems veranschaulichen die Diagramme in Abb. 52 und Abb. 53. 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 prinzipiell so eintrat. Lediglich der in der Gebäudeecke platzierte Sensor (Abb. 52, lila gestrichelt) verläuft sogar im Sommer etwas abgesetzt von den übrigen Kurven. Durch die Position in der geometrischen Wärmebrücke unterscheiden sich die dortigen Temperaturen um bis zu 8 K während der kalten Witterungsperioden.

In den Sommermonaten sind nur minimale Differenzen zwischen den anderen Sensoren auszumachen. Auch in den Wintermonaten existieren nur geringe Unterschiede zwischen den einzelnen Dämmsystemen. Nur beide Sensoren im Feld der Perlitedämmplatten zeigen Temperaturen, die maximal knapp 3 Kelvin unterhalb der anderen Temperaturen verlaufen. Der Wärmewiderstand der Perlitedämmplatten ist zwar am größten (Tab. 13), die Höhe der Temperaturabweichung ist angesichts der geringen Wärmewiderstandsdifferenzen allerdings etwas höher als erwartet.

Bei Außentemperaturen bis zu -15°C wird in der Raumecke sogar der Gefrierpunkt freier Wasseroberflächen mit -2°C unterschritten. Über das Auftreten von Frost bzw. Frostschäden in Baumaterialien oder an ehemaligen Bestandsoberflächen existieren kaum Untersuchungen, welche Ursache und Wirkung mittels physikalischer Formeln verknüpfen. Es ist aber bekannt, dass in Baumaterialien in Abhängigkeit von der Porenstruktur und dem Wassergehalt eine Absenkung der Tautemperatur stattfindet [Xu et Häupl 1999, Neiß 1982]. Demnach kann sich in Baumaterialien erst ab Temperaturen unter -5°C Frost bilden, wobei dies von weiteren Faktoren wie vorhandenen Strukturschäden, z. B. Hohlräumen oder Rissen, abhängig ist. Da bei der Anbringung der Zellulose hohlraumfrei gearbeitet wurde, besteht hier somit keine Frostgefahr. Zudem verfügt Zellulose über einen sehr großen Porenraum und ist ein vergleichsweise flexibles Material.

5.3.2 Luftfeuchte Feld 1, Streichbalken 1 (Zellulose)

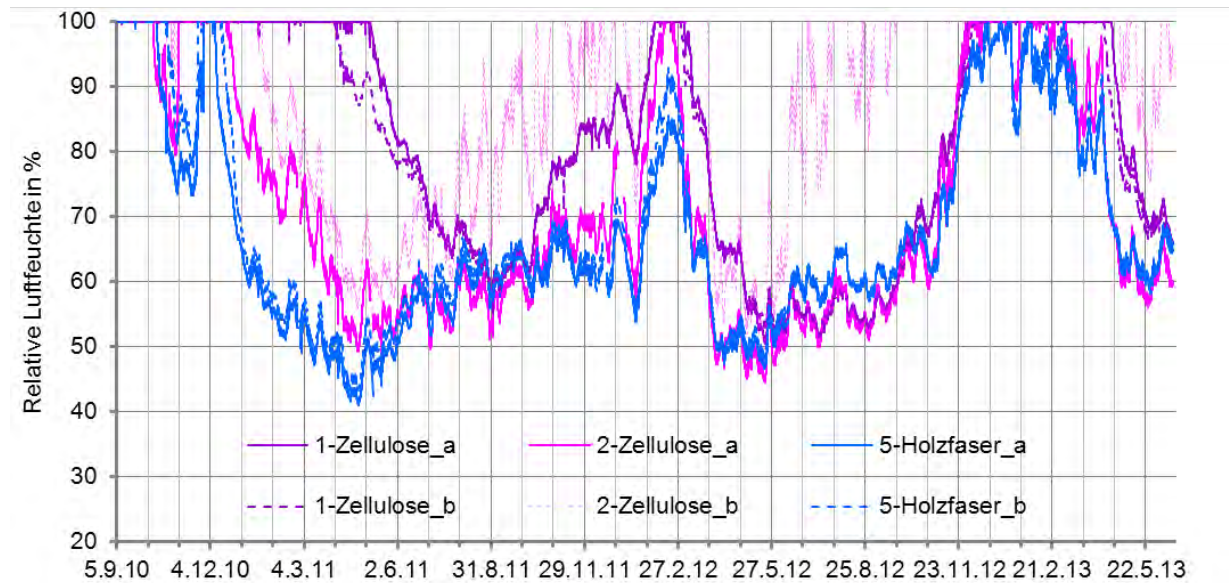


Abb. 54 Verlauf der Luftfeuchte auf der Grenzfläche zwischen der Bestandsoberfläche und dem Dämmsystem der (Streich-)Balken 1 und 2 (je Zellulose) und Balken 5 (Holzweichfaserplatte)

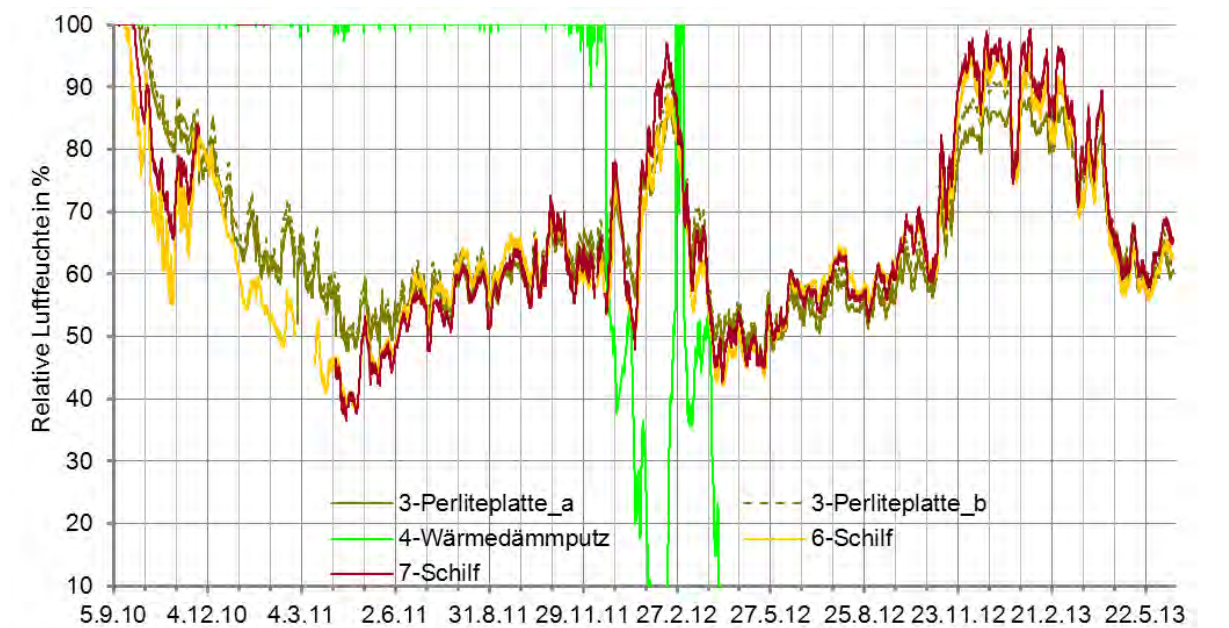


Abb. 55 Verlauf der Luftfeuchte auf der Grenzfläche zwischen der Bestandsoberfläche und dem Dämmsystem der Balken 3 (Perliteplatte), 6 und 7 (Schilf)

Alle Dämmmaterialien enthalten entweder selber eine hohe Einbaufeuchte (Aufspritz-Zellulose und Wärmedämmputz) oder sind auf einer klebenden, gesättigten Schicht verlegt (Perlitedämmplatten, Holzweichfaserplatte, Schilf), selbst bei den angedübelten Schilfplatten. Daher beginnen alle Luftfeuchtekurven bei 100 % Luftfeuchte und trocknen unterschiedlich

langsam ab (Abb. 54 und Abb. 55). Bei gleicher Bestandskonstruktion und identischen Klimarandbedingungen bestimmt somit die Feuchteleitfähigkeit eines Dämmsystems maßgeblich die Trocknungsgeschwindigkeit.

Die Aufspritz-Zellulose ist besonders diffusionsoffen und sollte deshalb schnell abtrocknen können (Abb. 54: violett, voll und gestrichelt). Mit der Dämmung wird aber eine sehr hohe Menge an Anmachwasser eingebracht, welche entsprechend länger zum Austrocknen benötigt. Es wurde auch bei kleinflächigen Probenahmen festgestellt, dass die Dicke des Deckputzes 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 beträgt die Dicke uneinheitliche 20 bis 32 mm. Ein höherer Diffusionswiderstand der dickeren Putzschicht verlangsamt die Austrocknung. Die Temperatur- und Luftfeuchteverhältnisse erfahren zudem in einer Zimmerecke eine zusätzliche Belastung durch ihre besondere Lage in der geometrischen Wärmebrücke. Die Messwerte dieser Sensoren 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 Messsensoren sind derart aufgebaut, dass die Luftfeuchte innerhalb einer (geschützten) metallenen Hülle am Kopf der Sensoren gemessen wird. Aus Beobachtungen voran gegangener Projekte [Kautsch et al. 2006] wird vermutet, dass das 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 messtechnischen Grund am Balken 1 spricht auch der um einen Monat verschobene Beginn des Abtrocknens der beiden Luftfeuchtefühler im ersten Winter. Schließlich sind im zweiten Winter zwischen den beiden Sensoren in der Zimmerecke kaum Unterschiede zu erkennen. Die genannten Gründe erklären das sieben- bzw. achtmonatige Verharren auf 100 % Luftfeuchte.

Wegen der Lage in der Wärmebrücke steigt die Luftfeuchte schon Mitte August 2011 wieder an und es bildet sich von Jänner 2012 bis Anfang Februar 2012 wieder Kondensat. Dass auch in der Zimmerecke die Einbaufeuchte keine Rolle mehr spielt, wird dadurch deutlich, dass die Zimmerecke viel rascher von Anfang Februar bis Anfang März 2012 wieder auf ungefähr 75 % Luftfeuchte abtrocknet. Bereits im Mai werden die anderen Kurven „erreicht“.

Im letzten Winter 2012/13 wurden wegen der hohen Raumlufffeuchte fast fünf Monate durchgehend 100 % Luftfeuchte gemessen. Anders als die übrigen ‚ID‘-Sensoren sinkt die relative Luftfeuchte während dieses Winters nicht kurzzeitig ab. Der durch die Wärmebrücke verzögerte Abtrocknungsprozess führt 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 bei einer so langen Befeuchtung keine Feuchteschäden in der Zellulose auftreten. Während eine Zellulose-Einblasdämmung bis zu einem gewissen Grad verklumpen und seine ursprünglichen Materialeigenschaften verlieren würde, befinden sich in der Aufspritz-Zellulose stützende Komponenten, die die Struktur und Eigenschaften auch bei hoher Feuchteeinwirkung erhalten. In der Dämmung enthaltene Borate sorgen dafür, dass Pilze nicht wachsen können.

5.3.3 Luftfeuchte Feld 1, Balken 2 (Zellulose)

Der magenta-gestrichelte Graph in Abb. 54 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 ist (Abb. 54: magenta Linie). Anfang November zeigt ein erneutes Ansteigen auf 100 % relativer Luftfeuchte an, dass der Oberputz auf die Zellulose aufgebracht wurde. Der laut Herstellerangabe nur 13 mm, real mindestens teilweise dickere Oberputz bringt wiederum Feuchte in das System und reduziert durch seinen Diffusionswiderstand die Abtrocknung. Im Vergleich mit den Holzweichfaserplatten trocknet 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 hat. Erst nach ungefähr eineinhalb Monaten fällt die Luftfeuchte wieder unter 100 %. Die durch den Putz verursachte Phase hoher Feuchte hält aus den erwähnten Gründen (Einbaufeuchte, dickere Putzschicht) 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, wird durch die angestiegene Raumlufffeuchte verursacht (Abb. 42). Auch wenn durch die Befeuchter noch nicht die gewünschte Luftfeuchtebelastung produziert werden konnte, kommt es mit deren Einsatz trotzdem zu einem sichtbaren Anstieg in allen Dämmsystemen. Bei zusätzlich sehr kalten Außentemperaturen erreicht die Luftfeuchte zwischen Zellulose und Bestandputz als einzige am 13. Februar 2012 wieder 100 %. Schon nach einer Woche trocknet die Bestandputzoberfläche aber wieder sehr schnell ab. Anfang März werden bei der Zellulose wieder ähnliche Werte um 80 %, wie bei allen anderen Dämmsystemen gemessen.

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

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

5.3.4 Feld 2, Balken 3 - Perlitedämmplatte

Die beiden Luftfeuchte-Messfühler ‚ID‘ der Perlitedämmplatten zeichneten sehr ähnliche Werte auf und unterscheiden sich nur bei hoher Luftfeuchte im Winter, z. B. Mitte Februar 2012, um maximal 5 % (Abb. 55: ocker durchgezogen und gestrichelt). Die Perlitedämmplatten verfügen nach der Zellulosedämmung und dem Wärmedämmputz über den nominell höchsten Diffusionswiderstand, gleichzeitig ist der Wärmewiderstand am Höchsten. Der höhere Wärmewiderstand kühlt das Bestandsmauerwerk stärker aus, und ein kühleres Bauteil trocknet tendenziell langsamer aus. Aus diesen beiden Gründen entwich die Feuchte aus diesem Dämmsystem im ersten Winter vergleichsweise langsam, ungefähr 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 betragen 91 und 93 % relativer Luftfeuchte und trockneten schnell ab. Offenbar konnten die eindringenden Feuchtemengen durch dieses Dämmsystem am besten kompensiert werden.

5.3.5 Feld 3, Balken 4 - Wärmedämmputz

Beide Luftfeuchte-Sensoren unter dem Wärmedämmputz gaben über 1 Jahr lang fast permanent 100 % Luftfeuchte an (Abb. 55: grün). Einer der Sensoren zeichnete ab Ende November 2011 einen unrealistischen Verlauf auf und maß ab Anfang März 2012 nur 0 %. Es wurde deshalb angenommen, 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, sodass ein Messfühler bis auf die Tiefe der stationären Sensoren eingebracht werden konnte (Abb. 56).



Abb. 56 Ein Handgerät mit Temperatur/Luftfeuchtesensor misst im mit Wärmedämmputz gedämmten Feld die Verhältnisse auf der ehemaligen Bestandsoberfläche

Die Ränder wurden abgedichtet und nach bereits kurzem Angleich ergab die Messung 94,7 % relativer Luftfeuchte (Abb. 56). Zu diesem Zeitpunkt herrschten bei den anderen Feldern ungefähr 60 %. Es kann davon ausgegangen werden, dass durch die Reibungswärme beim Bohren des Lochs und durch die kurzzeitige Öffnung die Oberflächen innerhalb des Lochs leicht abtrockneten. Das ausgebohrte Material wurde in ein Kunststoffsackerl verpackt und wies laut Fa. Schaller 99,5 % Feuchte auf. Insofern bestätigt die gemessene Luftfeuchte die Werte der stationären, mutmaßlich 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 können, alldieweil die Holzfeuchte (Abb. 68) in diesem Feld seit Ende 2011 ähnliche Messwerte aufweist wie bei den anderen Systemen. Es kann deshalb nur gemutmaßt werden, dass die Luftfeuchten zwischen Wärmedämmputz und Bestandsputz am Höchsten gewesen sind.

Der Hersteller führte das ungünstige Austrocknungsverhalten auf die Dicke des Wärmedämmputzes zurück, welcher normalerweise nur in Dicken bis 0,1 m aufgetragen wird. Ferner sei die Abtrocknungszeit von ungefähr 3 Wochen zwischen den beiden Aufträgen wegen der Abläufe in der Bauphase zu kurz gewesen. Es wurde zusätzlich vermutet, dass sich zwischen den beiden Dämmschichten eine Verglasungsschicht ausgebildet hat, welche den Dampftransport und damit den Austrocknungsprozess verlangsamt.

5.3.6 Feld 4, Balken 5 - Holzweichfaserplatte

Der Verlauf beider Sensoren ist bei niedrigen und mittleren Luftfeuchten ungefähr gleich. Nur bei sehr hohen feuchten unterscheiden sich die Messwerte um bis zu 5 %, bzw. nach Anbringung des Putzes um 7 % (Abb. 54 blau durchgezogen und gestrichelt). Der Wärmewiderstand des Innendämmsystems mit den Holzweichfaserplatten ist zwar am geringsten,

allerdings betrug die Dicke der Dämmplatten nur 60 mm. Das Entweichen der Einbaufeuchte benötigt ähnlich lange wie bei der Zellulose- und Perlitedämmung, bis Anfang Oktober 2010. Das Aufbringen des Deckputzes Mitte November verursacht einen erneuten Anstieg auf 100 % relative Luftfeuchte. Dieser Zustand dauert allerdings nur ein bzw. zwei Wochen an. Innerhalb von ungefähr einem Monat sinkt die relative Luftfeuchte auf der ehemaligen Bestandsoberfläche von 100 auf ca. 60 % ab. Das Abtrocknungsverhalten der Holzweichfaserplatten nach dem Aufbringen der Putzschicht ist somit besser als das der Zellulosedämmung. Die Kombination aus geringem Wärmewiderstand (nur 60 mm Dicke) und geringstem Diffusionswiderstand (Tab. 12) wirkt sich günstig auf das Trocknungsverhalten aus. Im zweiten Winter überschreitet einer der Sensoren für einen kurzen Zeitraum knapp 90 % Luftfeuchte, während mit dem anderen nur 85 % erreicht werden. Trotz Raumbefeuchtung und niedriger Außentemperaturen entsteht kein Kondensat. Damit verhalten sich die Holzweichfaserplatten ähnlich günstig wie die Perliteplatten. Erst im dritten Winter bei hoher Raumfeuchtebelastung werden immer wieder 100 % Luftfeuchte erreicht, wenngleich nicht so häufig und anhaltend wie bei der Zellulosedämmung.

Die ‚ID‘-Messfühler befanden sich 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.

5.3.7 Feld 5, 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, jeweils unter einem Balken, angebracht waren. Nur für kurze Zeit, um den 17.2.2012 betrug der Abstand leicht unterhalb 8 % relativer Luftfeuchte.

Der Luftfeuchteverlauf unter den Schilfdämmplatten überrascht insofern, dass er sehr niedrig ist, obwohl die Konstruktion nicht dem Stand der Technik entspricht (Abb. 55: hellblau und sonnengelb). Eine diffusionsoffene, nicht kapillaraktive Innendämmung mit einem s_d -Wert von 0,34 m und einem Wärmewiderstand von 1,7 (m²·K)/W wird üblicherweise mit einer Dampfbremse in Form einer Folie oder eines diffusionshemmenden Putzes ausgeführt. Während der Kondensationsperiode diffundiert Wasserdampf durch den Putz und die Dämmung und kann als Flüssigwasser auf der ehemaligen Bestandsoberfläche ausfallen. Bei flächig anfallendem Flüssigwasser wirkt sich die Flüssigwasserleitfähigkeit des Schilfes parallel zur Wandoberfläche bzw. in Halmrichtung nicht entspannend aus, da die Flüssigwasserleitfähigkeit kapillar nicht weg von der Bestandswand geleitet werden kann. Vermutlich gleicht der hier verwendete Lehmkleber die geringe Flüssigwasserleitfähigkeit des Schilfes aus. Zusätzlich verfügt Schilf über eine höhere Feuchtepufferkapazität als beispielsweise die Dämmstoffe Perlite und Zellulose.

Allerdings reagierten die Sensoren im Schilffeld schneller als die anderen Systeme auf eine höhere Raumfeuchtebelastung durch ansteigende Messwerte. Der Vorteil eines derart diffu-

sionsoffenen Systems wiederum ist, dass das Bestandsmauerwerk und das unter Umständen vorhandene Flüssigwasser schnell wieder nach innen diffusiv abtrocknen können.

Anhand von Abb. 55 kann tatsächlich eine sehr rasche 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 ,ID'-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 an der TU Wien [55].

5.3.8 Zusammenfassung

Die Temperaturen an den ,ID'-Sensoren zwischen Bestandsputz und Dämmsystemen verlaufen sehr ähnlich. Lediglich hinter dem System mit dem höchsten Wärmewiderstand, den Perliteplatten, liegen während der Heizperiode niedrigere Temperaturen vor.

Beim Vergleich der Luftfeuchte-,ID'-Sensoren werden die höchsten Luftfeuchten bei der Zellulosedämmung festgestellt. Die hohe Einbaufeuchte der Dämmung und die später folgende Einbaufeuchte des Deckputzes lässt im ersten Winter einen ungünstigeren Verlauf als die anderen Dämmsysteme erkennen. Für den Wärmedämmputz kann aufgrund der vorhandenen, zum Großteil aber sicherlich falschen Messwerte, aufgrund einer einzelnen händischen Messung und wegen der noch folgenden Besprechung der Holzfeuchte vermutet werden, dass ein ebensolches oder kritisches Verhalten im ersten Jahr nach Anbringung der Dämmung auftrat. Es erscheint deshalb zweckmäßig, bei diesen beiden Systemen mit hoher Einbaufeuchte von einem noch späteren Einbau im Oktober bis Jänner abzuraten. Auf ausreichendes Lüften nach der Anbringung sollte in besonderem Maß geachtet werden.

Die „trockenen“ Dämmstoffe Schilf, Perlitedämmplatten und Holzweichfaserplatten stellen sich bezüglich dieser Messstelle als günstigere Innendämmsysteme heraus, da sie zu Beginn schnell abtrocknen und auch bei hoher Raumfeuchtebelastung nur vorübergehend bzw. nie 100 % Luftfeuchte aufweisen. Die niedrigsten Luftfeuchten werden hinter den Perlitedämmplatten gemessen. Die Messwerte auf der Grenzfläche zwischen Dämmsystem und Bestand sind bei den Schilfplatten etwas günstiger als bei den Holzweichfaserplatten.

Der gemessene günstige Luftfeuchteverlauf, selbst bei hoher Raumfeuchtebelastung, war bei den Schilfdämmplatten nicht erwartet worden, da die kapillare Leitfähigkeit in Richtung des Dampfstroms äußerst gering ist. Dies wird vermutlich durch die hohe Flüssigwasserleitfähigkeit des Lehmklebers ausgeglichen, sowie die im Vergleich höhere Feuchtespeicherung.

5.4 Temperatur und Luftfeuchte in der Mitte der Balkentasche

Die kombinierten Temperatur-/Luftfeuchtefühler (BA-Wa) befanden sich an einer Balkentasehenseite bzw. Wange des Balkens, ungefähr 0,15 m entfernt von der Bestandsputzoberfläche.

5.4.1 Temperaturen

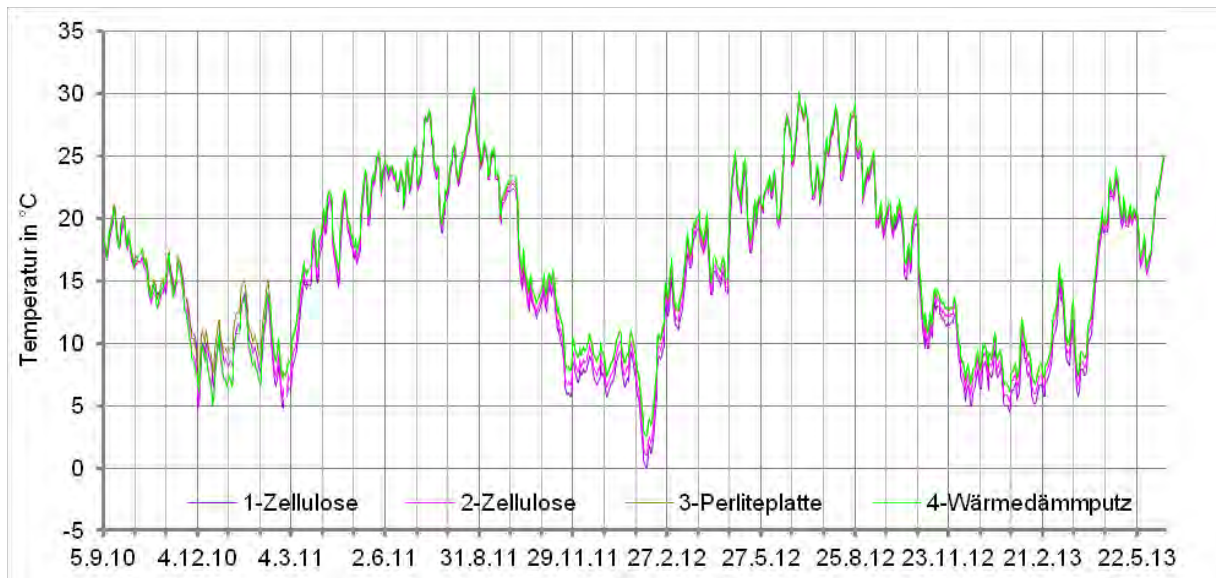


Abb. 57 Temperaturen im Luftspalt zwischen Balkenwange und Mauerwerk in ungefähr 0,15 m Entfernung von der ehemaligen Bestandsoberfläche (BA-Wa, Tageswerte): Zellulose, Perliteplatte und Wärmedämmputz

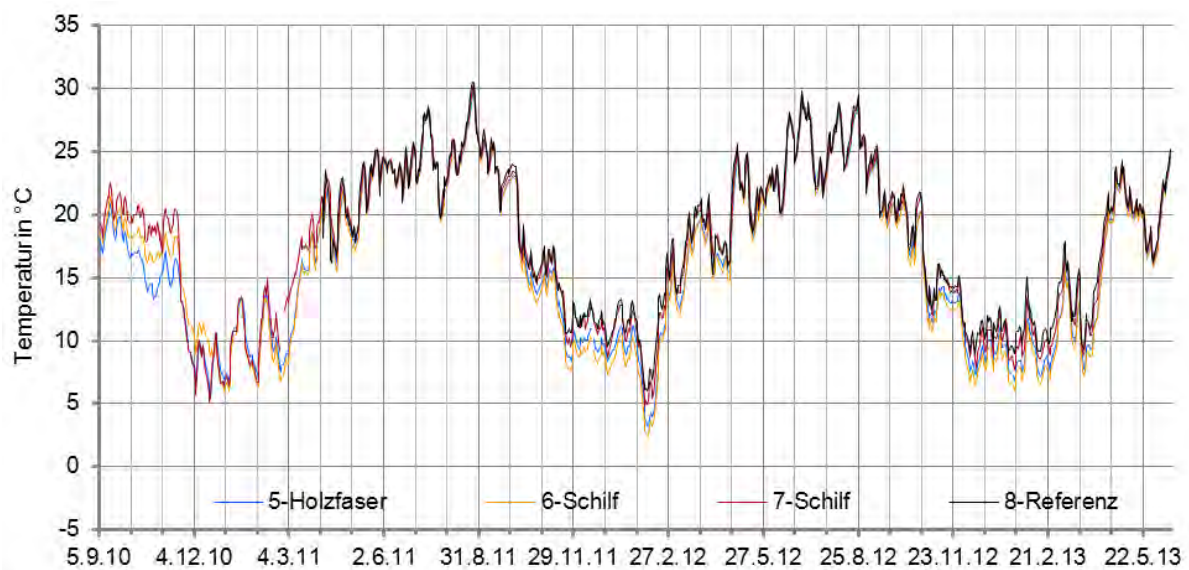


Abb. 58 Temperaturen im Luftspalt zwischen Balkenwange und Mauerwerk in ungefähr 0,15 m Entfernung von der ehemaligen Bestandsoberfläche (BA-Wa, Tageswerte): Holzweichfaser, Schilf, Referenzbalken

Wie auch schon bei den Temperaturen auf der Bestandsoberfläche unterscheiden sich die Temperaturen nur während der kalten Witterungsperiode. Abb. 57 illustriert, dass sich die beiden Zellolesensoren während des ersten Winters von den anderen gemessenen Stellen weniger deutlich absetzen 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 beträgt die Differenz zu dem Balkenaufleger der Perliteplatte und dem Wärmedämmputz bis zu 3 Kelvin. Der Unterschied wird sicherlich durch den hohen Wärmewiderstand der Zelloledämmung, und im Falle des Streichbalkens von der Wärmebrücke, verursacht. Weiters kommen die Montagetiefen der Sensoren (Tab. 26) in Betracht, die bei den Zelloledbalken größer sind als bei den anderen teilabgedichteten Balken 3 bis 6. Letzteres deutet darauf hin, dass die Materialschichtdicken, und damit auch der Wärmewiderstand, zwischen Außenluft und den Balkenauflagern 1 und 2 geringer sind.

In der Mitte der Auflager der Balken 3 bis 6 unterscheiden sich die Temperaturen auch im Winter nur unwesentlich, nur der Verlauf der nicht abgedichteten Auflager 7 und 8 setzt sich davon ab (Abb. 57 und Abb. 58). In der Balkentasche des ungedämmten Referenzfeldes sind die Temperaturen immer am Höchsten. Wegen der Darstellung als Tageswerte ist kaum zu sehen, dass die Linie des Referenzbalkens lebhafter verläuft 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 bewirkt auch im Auflager des nicht abgedichteten „Schilfbalkens“ höhere Temperaturen wie in den restlichen gedämmten Feldern. Eine genauere Diskussion des Unterschiedes zwischen abgedichteten und nicht abgedichteten Balkenauflagern erfolgt in Kapitel 5.9.

5.4.2 Luftfeuchten

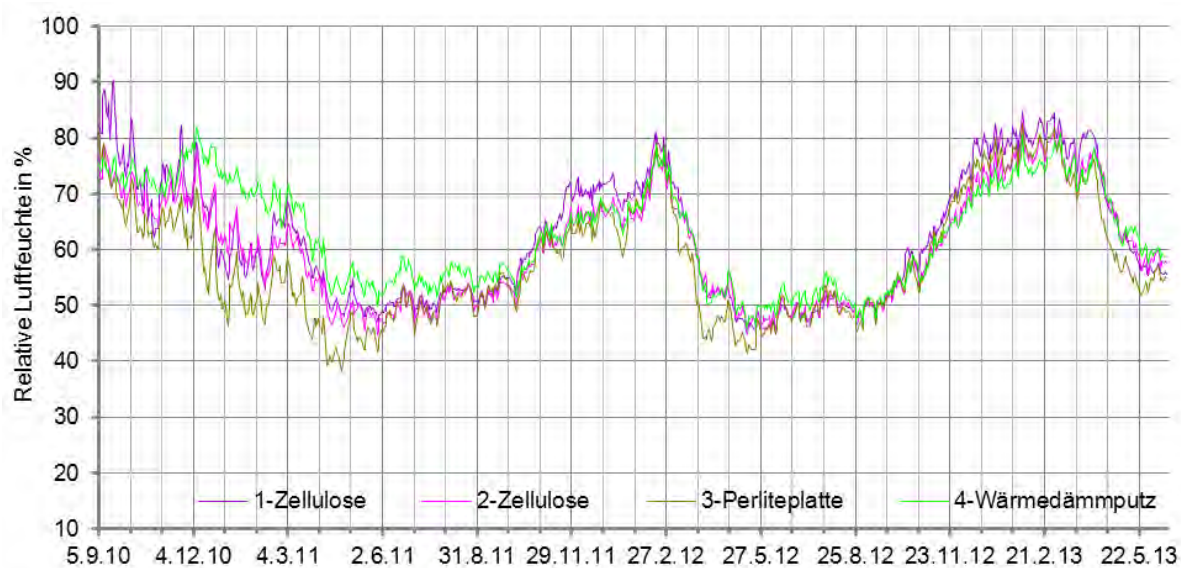


Abb. 59 Tageswerte der Luftfeuchten im Luftspalt zwischen Holzbalken-Seitenfläche und Mauerwerk in ungefähr 0,15 m Entfernung von der ehemaligen Bestandsoberfläche: Zellulose, Perliteplatte und Wärmedämmputz

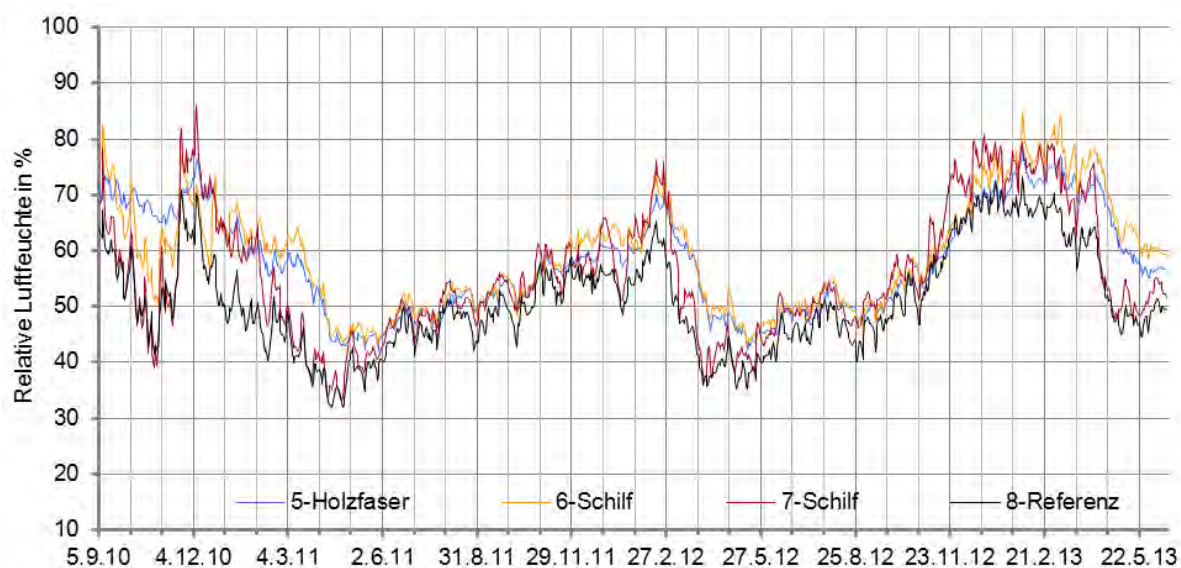


Abb. 60 Tageswerte der Luftfeuchten im Luftspalt zwischen Holzbalken-Seitenfläche und Mauerwerk in ungefähr 0,15 m Entfernung von der ehemaligen Bestandsoberfläche: Holzweichfaser, Schilf und Referenzfeld

Von einem sichtbar erhöhtem, durch Einbaufeuchte bedingten Level fangen alle Kurven an bis Mitte November 2010 abzusinken, bis dann durch die Einbaufeuchte der Putze und den Einfluss des strengeren Außenklimas die Luftfeuchte wieder zu steigen beginnt (Abb. 59 und Abb. 60). Ab Mitte November sinken die Temperaturen unter 5°C und darunter. (Abb. 42). Doch selbst kurz nach dem Anbringen aller Dämmsysteme oder bei hoher Raumfeuchtebelastung sind an keinem dieser ‚BA-Wa‘-Messfühler kritische Luftfeuchten festzustellen. Am

Streichbalken werden im September 2010 nur kurz 90 % Luftfeuchte überschritten, danach beträgt der Maximalwert 84 % (abgedichtetes Schilfauflager). Nach dem Abklingen des Einflusses der Einbaufeuchte im Sommer 2011 spannt sich eine Bandbreite zwischen den Auflagern von minimal 10 % Luftfeuchte im Sommer bis 25 % im Winter zwischen den Varianten auf.

5.4.3 Luftfeuchte Feld 1 , Balken 1 & 2 (Zellulose)

Zu Beginn der Aufzeichnungen und auch in den folgenden Wintern zählte der Luftfeuchteverlauf an der Wange des Balkens 1 immer zu den höchsten. 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 bilden sich allerdings weniger deutlich wie in den nicht abgedichteten Balkentaschen ab (Abb. 59 und Abb. 60).

5.4.4 Luftfeuchte Feld 3 , Balken 4 (Wärmedämmputz)

Trotz der ungünstigen Lage in der Gebäudeecke übersteigt 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 These, dass an der ehemaligen Bestandsoberfläche des Feldes mit Wärmedämmputz sehr lange hohe Feuchte auftrat. Besonders in den ersten Monaten des Jahres 2011 verläuft die Kurve der Luftfeuchte des Wärmedämmputzes offensichtlich über den anderen. Erst im August erreicht der Luftfeuchteverlauf des Wärmedämmputzes die anderen Linien. Auffallend ist auch, dass in den Wintern 2011/12 und 2012/13 der Graph des Wärmedämmputzes langsamer ansteigt, anschließend aber ebenso langsam wieder absinkt. Dem Wärmedämmputz kann somit ein hygriech trüges Verhalten nach dem Abtrocknen der Einbaufeuchte attestiert werden. Dieser Verlauf ist dem höheren Diffusionswiderstand und dem besonderen Speicherverhalten des Putzes geschuldet.

5.4.5 Luftfeuchte Feld 2, 4 & 5, Balken 3, 5 & 6 (Perlite-, Holzweichfaserplatte, Schilf)

Die Dämmsysteme mit Perlite- (Balken 3) und Holzweichfaserplatten (Balken 5) verursachen vergleichsweise niedrige Luftfeuchten und verlaufen sehr ähnlich. Der Gang der Luftfeuchte an der Wange des teilabgedichteten Balkens 6 (Schilf) orientiert sich ebenfalls sehr stark an dem günstigen Verlauf der Holzweichfaser- und Perliteplatten und ist ebenso unkritisch.

5.4.6 Luftfeuchte Feld 5 & 6, Balken 7 & 8 (Schilf, ungedämmt)

Der Verlauf in der nicht abgedichteten Balkentasche des Balkens 7 (Schilf) ist sehr wechselhaft. Winters feuchtet die Luft um den Sensor am Stärksten auf, sommers sinkt sie am weitesten ab. Nach der Abtrocknungsphase werden Ende Oktober sogar nur 35 % Luftfeuchte gemessen, anschließend schnellt die Luftfeuchte auf 91 % hoch (jeweils Stundenwerte!), dem zwar höchsten gemessenen Wert an dieser Stelle, wenngleich unkritisch in Hinsicht auf holzerstörende Pilze. Lediglich neben dem Referenzbalken wurden in den Sommermonaten

tiefere Feuchtwerte ermittelt. Wegen der fehlenden Abkühlung der Bestandwand bleibt der Referenzbalken auch im Winter am trockensten.

5.5 Temperatur und Luftfeuchte vor dem Stirnholz

Die in diesem Abschnitt beschriebenen flachen Sensoren wurden in den Spalten der Balkenaufleger so tief wie möglich eingebracht. Die genauen Einbautiefen führt Tab. 26 auf.

5.5.1 Temperatur

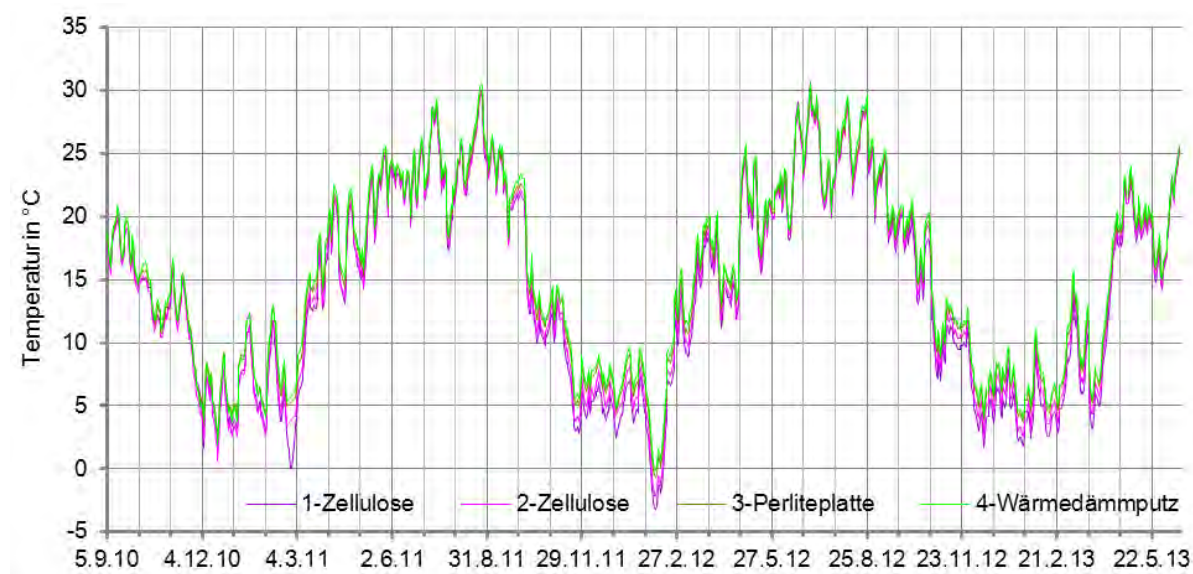


Abb. 61 Temperaturen im Balkenaufleger in Stirnholznähe (Tageswerte): Zellulose, Perliteplatte und Wärmedämmputz

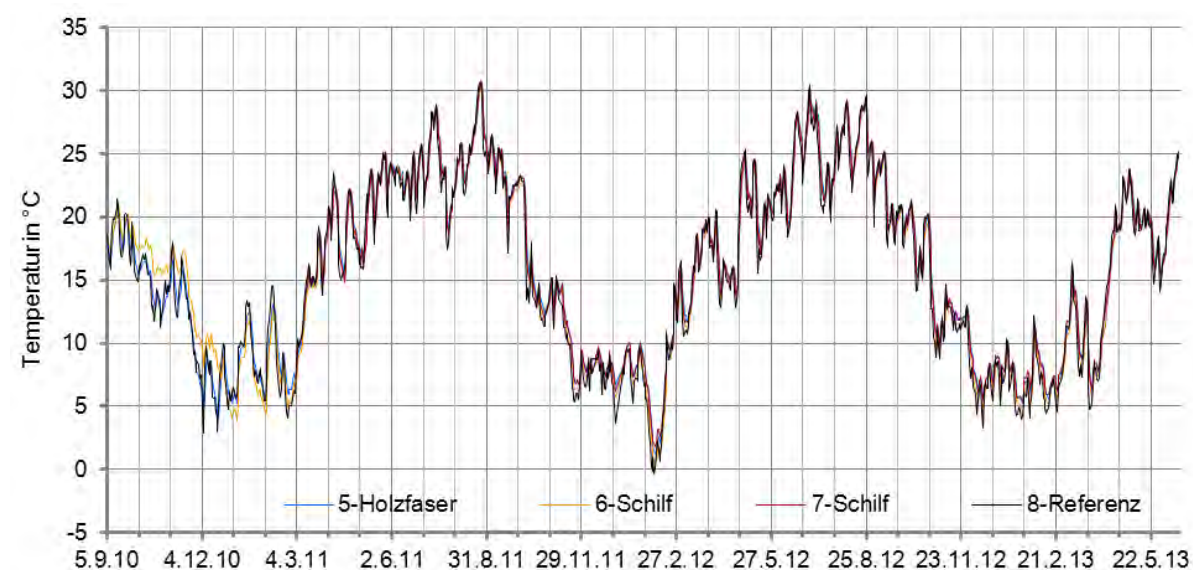


Abb. 62 Temperaturen im Balkenaufleger in Stirnholznähe (Tageswerte): Holzweichfaser, Schilf und Referenzfeld

Diese Sensoren befinden sich nahe an der Außenoberfläche, wo der thermische Einfluss der Dämmsysteme geringer als bei den bereits besprochenen Sensoren ist. In den Abb. 61 und Abb. 62 sind deshalb die Abweichungen der Kurven untereinander im Winter geringer wie an der Balkenwange (Abb. 57 und Abb. 58). Die beiden Sensoren an der Balkenwange (BA-Wa und BA-St) sind im Mittel um ca. 0,18 m versetzt und jeweils durch den Luftspalt um den Balkenkopf „verbunden“.

Die niedrigsten Temperaturen werden 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 steckenden Sensoren und den hohen Wärmewiderstand der Dämmung verwiesen. Alle restlichen Messkurven unterscheiden sich um weniger als 2 Kelvin, trotz der nicht konvektionsdichten Ausführung des Luftspaltanschlusses an den Balken 7 und 8.

Das horizontale Temperaturgefälle, welches sich in den Winterperioden 2011/12 und 2012/13 (Dezember bis Ende März) zwischen den beiden Messstellen 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 Referenzbalken 4 Kelvin. Hier scheint ein Zusammenhang zu dem Abstand der Sensoren untereinander zu bestehen (Tab. 26), denn die Balkenaufleger mit den kleinsten Messfühlerabständen von unter 0,15 m, Balken 5 und 6, weisen den geringsten Temperaturunterschied auf. Auffällig ist ebenso, dass gerade an den nicht abgedichteten Auflagern die Temperaturdifferenz am größten ist, besonders am Referenzbalken, obwohl an Streichbalken 1 der Abstand der Sensoren untereinander noch größer ist.

5.5.2 Luftfeuchte

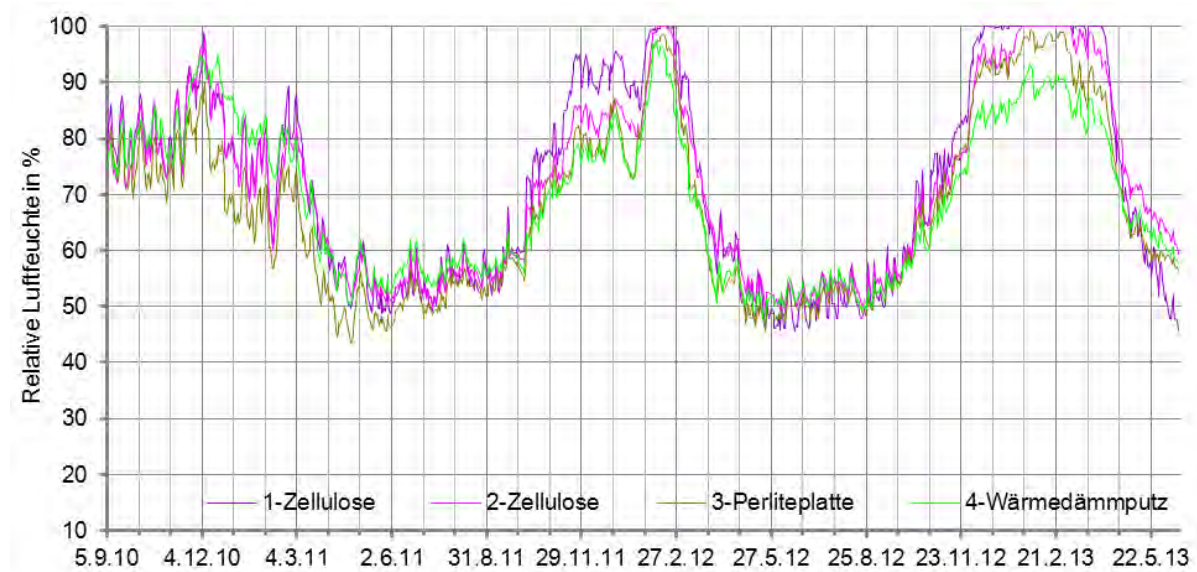


Abb. 63 Luftfeuchten an der Balkentaschenseite vor dem Stirnholz (Tageswerte): Zellulose, Perliteplatte und Wärmedämmputz

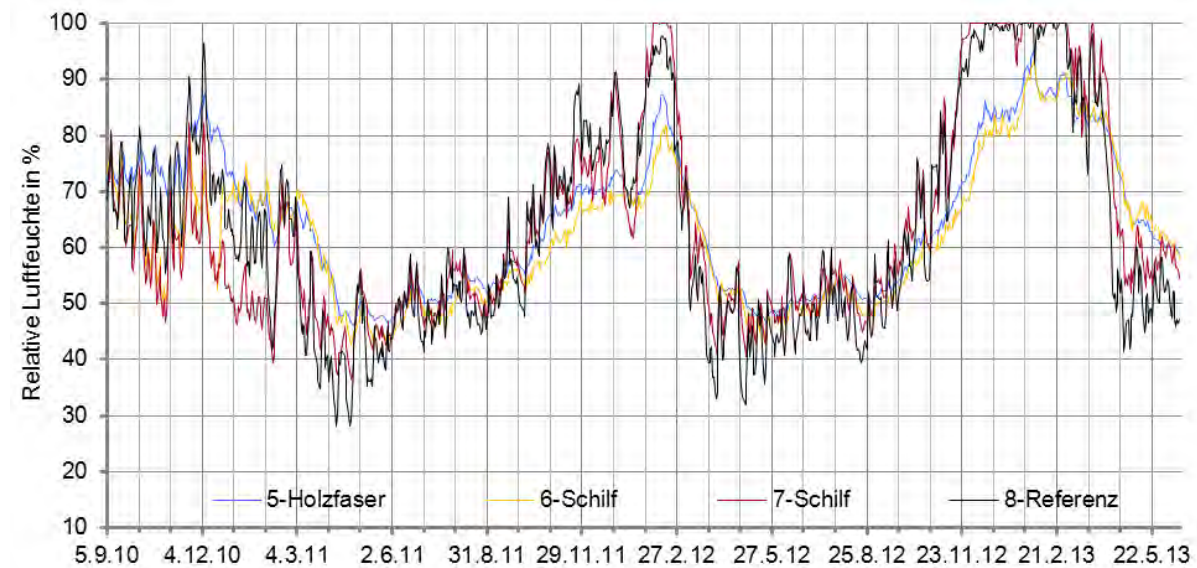


Abb. 64 Luftfeuchten an der Balkentaschenseite vor dem Stirnholz (Tageswerte): Holzweichfaser, Schilf und Referenzfeld

Im Gegensatz zu den Temperaturen differieren die relativen Luftfeuchten im Winter sehr weit voneinander (Abb. 63 und Abb. 64). Besonders im dritten Winter ist der Einsatz des Luftbefeuchters sehr gut zu sehen. Im Sommer bewegen sich mit Ausnahme des Referenzbalkens alle Kurven zwischen rund 40 und 60 % Luftfeuchte.

Mit der im vorigen Absatz festgestellten Temperaturdifferenz wächst auch die Feuchtebelastung am Stirnholz der Balken. So bleiben vor allem die Felder 4 bis 6 vergleichsweise tro-

cken, an den anderen Stirnenden werden zum Teil über einen längeren Zeitraum hinweg bedenkliche 100 % Luftfeuchte gemessen.

5.5.3 Luftfeuchte Feld 1 , Balken 1 & 2 (Zellulose)

An den Balken des Zellulosefeldes ist das Feuchteniveau im Winter vergleichsweise hoch. Die Luftfeuchte verbleibt aber Anfang Dezember 2010 nur für gut einen Tag auf 100 %. Im Auflager des Streichbalkens beginnt die Feuchte schon ab Mitte September 2011 wieder schnell anzusteigen und erreicht immer wieder 95 % Luftfeuchte, im 2. Balkenaullager 85 %. Doch erst im Februar 2012, bei sehr kalten Außentemperaturen um -10°C und darunter, bildet sich für ungefähr drei Wochen Kondensat, 95% relativer Luftfeuchte werden für ungefähr einen Monat überschritten (Balken 2: eine Woche Kondensat, drei Wochen über 95 %). Im letzten Winter ermittelt der ‚BA-St‘-Sensor für 3,5 Monate fast durchgehend 100 % Luftfeuchte, in Balkenaullager 2 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 trocknet die überhygroskopische Feuchte anschließend sehr schnell wieder aus.

5.5.4 Luftfeuchte Feld 2 & 3, Balken 3 & 4 (Perliteplatte, Wärmedämmputz)

An Balken 3 (Perliteplatte) steigt die Luftfeuchte im ersten Winter nur für einen Tag über 90 %, im zweiten und dritten Winter werden 100 % nicht ganz erreicht. In der Balkentasche des mit Wärmedämmputz gedämmten Feldes entsteht zwar nur kurz überhygroskopische Feuchte über 95 %, die hellgrüne Line trocknet aber langsamer ab und mischt sich erst wieder Anfang März 2011 unter die anderen Kurven. Im zweiten Winter werden im Wärmedämmputz maximal 98 % Luftfeuchte erfasst, welche ebenso zügig wie bei den anderen Sensoren abnehmen. Bis in den Herbst 2012 verlaufen die ‚BA-St‘-Sensoren an den Balken 3 und vier sehr ähnlich. Offenbar wirkt sich der getrocknete Dämmputz sehr positiv auf die hygrothermischen Verhältnisse aus, denn im dritten Winter wurden dort sehr niedrige maximale Luftfeuchten aufgezeichnet.

5.5.5 Luftfeuchte Feld 4 & 5, Balken 5 & 6 (Holzweichfaserplatte, Schilf)

Am unkritischsten verläuft die Luftfeuchte an den Balken 5 (Holzweichfaser) und 6 (Schilf, teilabgedichtet), was unter anderem der Tatsache geschuldet sein mag, dass hier die Balkenaullager weniger tief sind (Tab. 26). Im ersten Winter sind die Luftfeuchten hier wegen der geringen Einbaufeuchte und der fehlenden Befeuchtung sehr niedrig. Beide Kurven verlaufen besonders konstant, mit Maximalwerten im Winter von 91 und 92 % Luftfeuchte.

Da in den teilabgedichteten Balkenaullagern 5 und 6 ein auffallend langsamerer Luftfeuchteanstieg im Vergleich zu den anderen teilabgedichteten Balkenaullagern im November 2012 zu bemerken ist, könnte vermutet werden, dass diese besonders gut abgedichtet wurden. Beim Abbau wurde allerdings kein Unterschied in der Ausführungsqualität bemerkt. Denkbar wäre, dass in den beiden Auflagern die Luftdurchlässigkeit vom Dachgeschoss her geringer ist. Diese wurde bei den Bauarbeiten leider nicht dokumentiert.

5.5.6 Luftfeuchte Feld 5 & 6, Balken 7 & 8 (Schilf, Referenzfeld)

Am Stirnholz des Balkens 7 (Schilf, nicht abgedichtet) bietet sich in den beiden kalten Witterungsperioden ein unterschiedliches Bild. Bei niedriger Raumfeuchtebelastung aus dem Zimmer im Obergeschoss steigt die Feuchte im ersten Winter kaum über 80 % und verzeichnet damit die niedrigsten Feuchtwerte. Im zweiten Winter dagegen, bei eigentlich „normaler“ Raumfeuchtebelastung, entsteht für einen Zeitraum von zwei Wochen durchgehend Kondensat. Die Zustände hoher Feuchtebelastung halten jedoch nur kurz an. Dies gilt auch für den Referenzbalken 8, wo die Luftfeuchte einen ähnlichen, wechselhaften Verlauf nimmt. Im Auflager des Balkens 8 sind im Sommer sehr niedrige Luftfeuchten zu verzeichnen, und im zweiten Winter, für einen kürzeren Zeitraum als in Balken 7, Kondensat. Für den dritten Winter ist die Situation in Stirnholznähe ähnlich kritisch zu bewerten wie am Streichbalken: sehr lang anhaltende, überhygroskopische Feuchte. Im ungedämmten Feld werden 100 % Luftfeuchte zwar nicht durchgängig gemessen, im kälteren Schilfauflager hingegen bleiben mit kurzer Unterbrechung 100 % für ungefähr 3 Monate erhalten.

Die Situation in den Balkenauflagern 6, 7 und 8 wird zu einem späteren Zeitpunkt noch einmal beleuchtet.

Bemerkenswert ist der große Unterschied der relativen Luftfeuchte zwischen den beiden Sensoren in der Balkentasche, obwohl die Entfernung nur 0,13 bis 0,25 m beträgt. Für die Monate Jänner und Februar 2012 lässt er sich folgendermaßen beziffern:

Tab. 18 Durchschnittliche Differenz der relativen Luftfeuchte zwischen den Sensoren ‚BA-St‘ und ‚BA-Wa‘ in den Balkentaschen 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 Zellulosedämmung, auffällig niedrig dagegen am Balken 5 und besonders 6.

Die Gleichgewichtsfeuchte zu einer Luftfeuchte von 90 % beträgt für Fichtenholz ungefähr 20 % Holzfeuchte, wobei die Feuchtespeicherung in Holz sehr stark variieren kann. Insofern sind die Messwerte am Ende des Balkenauflagers von mehr als 90 % problematisch, da sich in unmittelbarer Entfernung die feuchtesensiblen Holzbalken befinden.

5.5.7 Absolute Feuchtemengen im Balkenauflager

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.

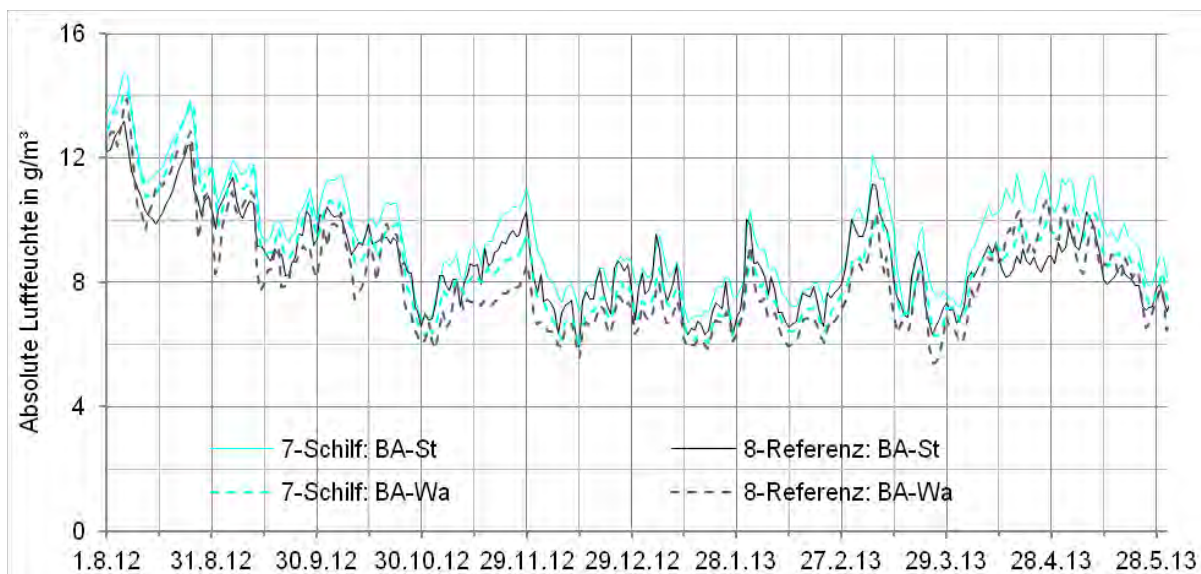


Abb. 65 Verlauf der absoluten Feuchte an den beiden Sensoren im Balkenaufleger in unterschiedlichen Tiefen vom 1.8.2012 bis zum 30.5.2013 in den Auflagern 7 (Schilf, nicht abgedichtet) und 8 (Referenzbalken, nicht abgedichtet)

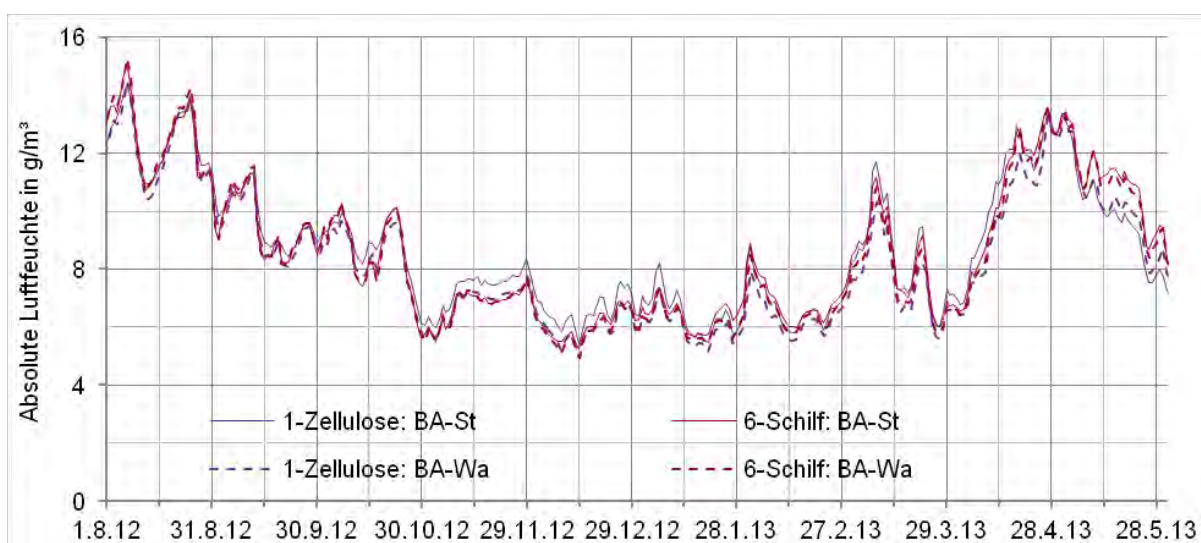


Abb. 66 Verlauf der absoluten Feuchte an den beiden Sensoren im Balkenaufleger in unterschiedlichen Tiefen vom 1.8.2012 bis zum 30.5.2013 in den Auflagern 1 (Zellulose) und 6 (Schilf, abgedichtet)

Beim Vergleich von Abb. 65 und Abb. 66 wird augenfällig, dass der Verlauf der absoluten Luftfeuchte in den nicht abgedichteten Balkenauflagern höher und lebhafter ist wie in den vom unteren Raum her konvektionshemmend ausgebildeten Balkenauflagern. Gleichfalls ist zu erkennen, dass der Wasserdampf in den Auflagern 7 und 8 unterschiedlicher verteilt ist als in den Auflagern des Streichbalkens und des teilabgedichteten Auflagers des Schilffeldes. Vom Dezember 2012 bis Ende März 2013 beträgt die durchschnittliche Differenz zwischen den Sensoren ‚BA-St‘ und ‚BA-Wa‘ in den Auflagern 7 und 8 1,0 bzw. 0,9 g/m³ und im Auflager des Streichbalkens mit 0,6 g/m³ etwas weniger. In den teilabgedichteten Aufla-

gern 3 (nicht abgebildet) oder 6 ist der ermittelte Unterschied dagegen geringer und macht nur $0,3 \text{ g/m}^3$ aus. Demnach führt die konvektionsoffene Ausgestaltung des Auflagerbereichs nicht nur zu einer insgesamt höheren Feuchtebelastung, sondern auch zu einer stärkeren Konzentration der Feuchte im äußeren Bereich.

5.5.8 Zusammenfassung der Messungen in der Luft der Balkenauflager

Innerhalb der Balkenauflager besteht ein auffallend großes Gefälle bezüglich der relativen Luftfeuchte. Während in der Mitte der Balkenauflager praktisch nie mehr als 85 % relativer Luftfeuchte gemessen wurden, bildet sich am Ende der Balkenauflager in den nicht abgedichteten Auflagern 7 und 8 sowie denen der Zellulose bei hoher Raumfeuchtebelastung und niedrigen Außentemperaturen teilweise über mehrere Monate hinweg Kondensat. Die Temperaturen an den beiden Messpositionen unterscheiden sich dabei um ungefähr 2 Kelvin, im Auflager des Referenzfeldes um 4 Kelvin. Eine derart hohe gemessene Luftfeuchte über einen längeren Zeitraum ist für sich betrachtet zunächst als kritisch hinsichtlich einer möglichen Holzschädigung anzusehen.

5.6 Holzfeuchtemessungen

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

Nach entsprechend langer und hoher Feuchtebelastung bei ausreichenden Temperaturen können Holzfäulepilze einen Abbau der Holzmasse verursachen. Neben der Stabilitätsgefährdung, der allgemeinen Wertminderung von Objekten können Holzfäulepilze auch eine Gefahr für empfindliche Personen darstellen, wenn die Sporen in die Raumluft gelangen. Für die Beurteilung einer möglichen Schädigung muss zuerst die Entwicklung der Holzfeuchte in Betracht gezogen werden. In Normen wird im Sinne der Vorbeugung von Holzfeuchteschäden pauschal ein Grenzwert von 20 % Holzfeuchte gefordert, der einzuhalten sei ([60], [64]). 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. Erst oberhalb des Fasersättigungspunktes kann bspw. der gefährlichste biologische Holzschädling, der Echte Hausschwamm (*serpula lacrymans*) auskeimen, was einer Holzfeuchte von 26 – 28 % entspricht [Huckfeld et Schmidt 2006].

Hinsichtlich der spezifischen Verhältnisse und der Wahrscheinlichkeit für Holzschädigung wurde ein Modell maßgeblich an der VTT (Technical Research Centre of Finland) unter Leitung von Hannu Viitanen entwickelt. Viitanen widmet sich seit den frühen 1990-er Jahren der Erforschung von bauschädlichen Pilzen und fasst seine Versuchsergebnisse in empirischen Formeln zusammen. Für die Holzzerstörung gehen der zeitliche Verlauf der wichtigsten begrenzenden Faktoren, Temperatur und Feuchteangebot in die Berechnung ein ([Viitanen et al. 2010]).

Das Schädlingsprognosemodell unterscheidet zwei Phasen:

- die Zeit bis zur Auskeimung und
- die durch das Wachstum des Schädlings zerstörte Holzsubstanz.

Erst, wenn für eine ausreichend lange Zeit die klimatischen Gegebenheiten ausreichend für das Auskeimen des holzerstörenden Pilzes gewesen sind, beginnt die Schädigung in Form von Holzabbau. Viitanens Modell gibt den Holzmasseverlust in Masseprozent für Kiefernholz wieder. Dabei kennzeichnet ein Wert über 0 beginnende Holzerstörung.

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 nicht darauf angewendet werden.

5.6.1 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 6.2). Aus den Gründen, die in 6.2 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. Abb. 63 und Abb. 64) fällt auf, dass die Holzfeuchte weitaus träger auf klimatische Einwirkungen reagiert. Ein Vergleich der Kennwerte, die den Feuchtetransport in Tab. 11 beschreiben, μ -Wert und A_w -Wert, offenbart, dass die Kennwerte in beiden Fällen den der anderen Materialien zum Teil um ein vielfaches übersteigt bzw. unterbietet, was die Trägheit erklärt.

Bei der Messung der Holzfeuchte kam es immer wieder zu auffälligen Sprüngen 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 5.11 näher eingegangen.

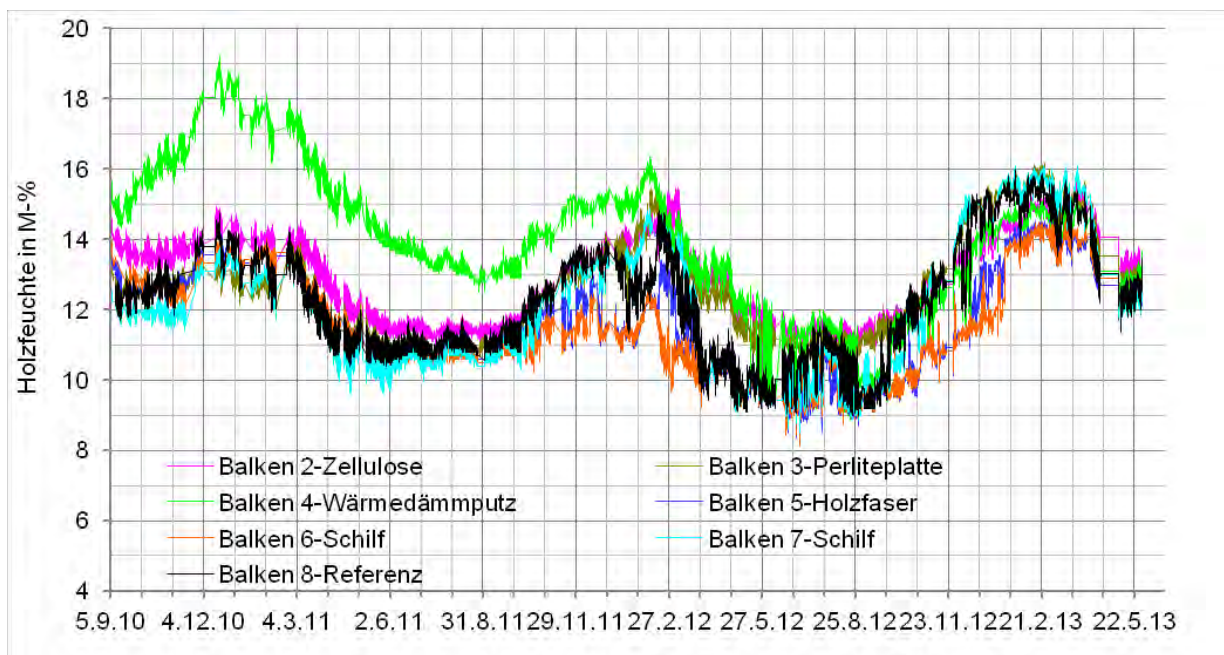


Abb. 67 Stundenwerte der Holzfeuchte an der „nassesten Stelle“ in allen Balken

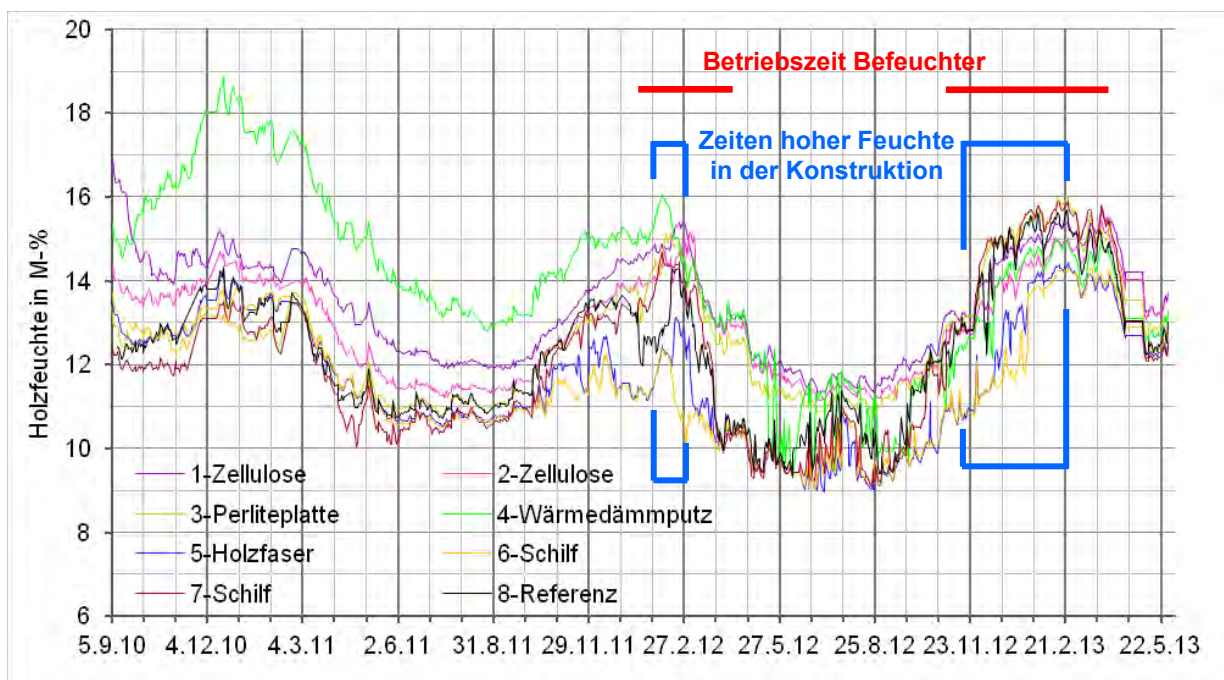


Abb. 68 Holzfeuchte an der nassesten Stelle in allen Balken; temperaturkorrigierte (Tages-)Werte und Betriebszeiten der Luftbefeuchter sowie Zeiträume mit ‚ID‘-Luftfeuchten zwischen 95 und 100 %

An allen Balken, mit Ausnahme des vierten (Wärmedämmputz), sinkt der Wassergehalt an der nassesten Stelle zunächst ab (Abb. 68). Der Trocknungsprozess setzt sich bis Ende Oktober 2010 fort. Dann verharren die Holzfeuchtekurven auf einem ungefähr gleichbleibenden Level bis in den März 2011 bzw. zeigen ein leichtes Maximum im Dezember 2010. Im folgenden Sommer 2011 trocknen alle Balken weiter aus, und bewegen sich um 11 M-%. Die

Balken im Zellulosefeld setzen sich mit Werten um 11,5 (Balken 2) und 12 M-% leicht ab, der mit Wärmedämmputz gedämmte Balken 4 sinkt nur kurz unter 13 M-%. Ab September 2011 beginnen die gemessenen Holzfeuchten wieder etwas anzusteigen. Während des zweiten Winters (November 2011 bis März 2012) treten zwischen den einzelnen Dämmvarianten große Unterschiede auf. Mit der Annahme, dass bei den unruhigeren Kurven die jeweils höheren Werte korrekt sind, betragen die niedrigsten Maximalwerte 12,5 bis 13 M-% im Feld mit Holzweichfaserplatten und teilabgedichtetem Schilfaulager, der höchste Werte wurde für das Balkenaufleger im Feld mit Wärmedämmputz ermittelt: 16,1 M-%. Alle anderen maximalen Holzfeuchtwerte, einschließlich des ungedämmten Feldes, betragen zwischen 14,3 und 15,4 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 führt. 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 sind. Nachdem dieser Balkenkopf 4 Ende Februar 2012 auf das Niveau der anderen abgetrocknet war, sind die Messwerte aller 'HF-St'-Sensoren in Anbetracht der Messungenauigkeiten und der nicht identischen Balkenkopfsituationen vergleichsweise ähnlich. Trotz anhaltend sehr hoher Raumluftfeuchte im Dachgeschoss und hoher Luftfeuchte im Obergeschoss werden im letzten Winter 16 M-% nicht überschritten. Die Differenz der Maximalwerte Mitte Februar 2013 beträgt nur gut 1,5 M-%.

Eine besondere Gefährdung der Balkenköpfe in nicht abgedichteten Auflagern kann hier nicht festgestellt werden. Zwar nimmt 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.

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.

In Abb. 68 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 reagieren die Holzbalken zwar auf die hohe Feuchtebelastung, dies aber ausgesprochen träge und unaufgeregt.

5.6.2 Holzfeuchtemessungen auf der Ebene der ehemaligen Bestandsoberfläche

Mit Hilfe dieser vier Sensoren sollte untersucht werden, ob die Holzfeuchte entlang der langen Sensoren, und damit mutmaßlich in der Nähe des Stirnholzes, oder auf der Ebene der Innendämmung höher ist. Da im Fall der HF-ID-Sensoren die Temperaturmessung in unmittelbarer Nähe der Holzoberfläche erfolgt, ist die Holzfeuchte dort höher als in der Innendämmung.

telbarer Nähe der Messfühler vorgenommen worden war, war hier keine Temperaturkorrektur notwendig.

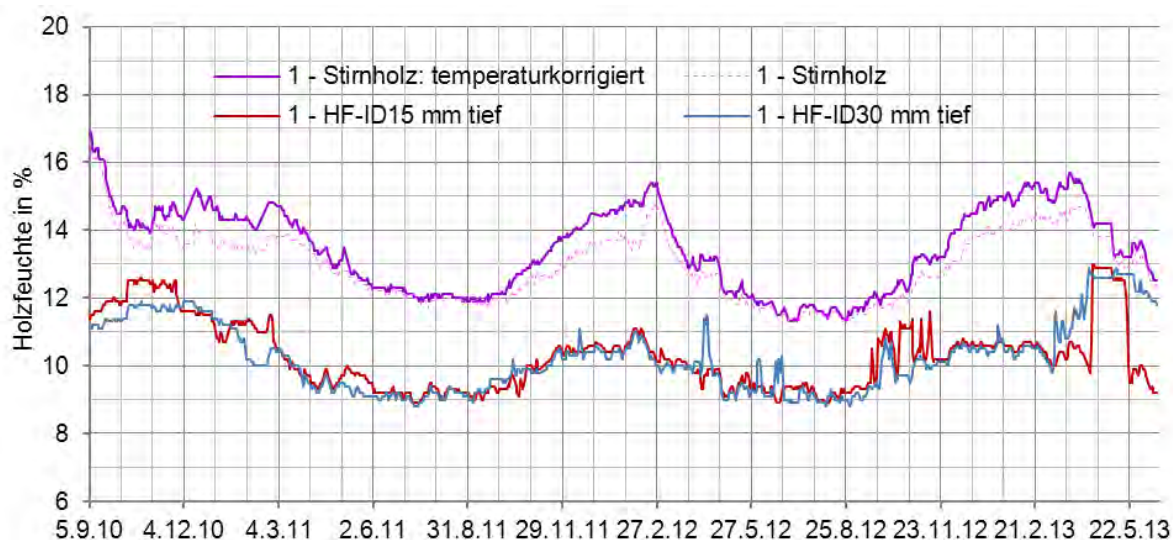


Abb. 69 Gemessene Holzfeuchte an (Streich-)Balken 1 am Stirnholz und in zwei unterschiedlichen Tiefen (15 und 30 mm, 'HF-ID15' und 'HF-ID30') auf der Ebene der ehemaligen Bestands-oberfläche; rosa-gestrichelt der nicht-temperaturkorrigierte, tatsächlich gemessene Verlauf der Holzfeuchte am Stirnholz



Abb. 70 Gemessene Holzfeuchte an (Referenz-)Balken 8 am Stirnholz und in zwei unterschiedlichen Tiefen (15 und 30 mm) auf der Ebene der Bestands-oberfläche; grau-gestrichelt der nicht-temperaturkorrigierte, tatsächlich gemessene Verlauf der Holzfeuchte am Stirnholz

Anhand von Abb. 69 und Abb. 70 lässt sich eindeutig erkennen, dass die in den langen Sensoren gemessene Holzfeuchte die der Sensoren auf der Ebene der Innendämmung übersteigt. Angesichts der anhaltend hohen Luftfeuchte auf der ehemaligen Bestands-oberfläche in der Gebäudeecke von Beginn der Messungen bis in den April/Mai 2011 (Abb. 54) ist das bemerkenswert. Auch im letzten Winter, als mehrere Monate lang an den ‚ID‘-Sensoren im Gebäudeeck 100 % Luftfeuchte gemessen worden waren, bewegen sich die

HF-ID-Messfühler eindeutig unterhalb der Holzfeuchtemessung in der Nähe des Stirnholzes, obwohl sich die HF-ID-Sensoren näher an den ‚ID‘-Sensoren zwischen Bestandsoberfläche und Innendämmsystem befinden. Offensichtlich ändern sich die hygrothermischen Verhältnisse in der Nähe der Deckenbalken in größerem Umfang. Der Holzbalken nimmt im Raum die Wärme auf, leitet sie in den Auflagerbereich, schafft sich so durch seine Wärmebrückenwirkung ein günstigeres Umfeld. Die Sprünge in den Graphen der HF-ID- Sensoren, die ab dem Herbst 2012 auftraten, sind Zeichen einer beginnenden Unzuverlässigkeit der Sensoren. Der gut übereinstimmende Verlauf von ‚HF-ID15‘ und ‚HF-ID30‘ bis zum Herbst 2012 dagegen spricht für deren Verlässlichkeit bis zu diesem Zeitpunkt.

Am nicht abgedichteten Balken des ungedämmten Referenzfeldes stellt sich die Situation zunächst weniger eindeutig dar, weil der Messfühler ‚HF-ID15‘ von Beginn an uneindeutige Messwerte mit ausgeprägten Sprüngen aufzeichnete (Abb. 70). Beim Vergleich mit Abb. 69 liegt die Vermutung nahe, dass der jeweils tiefere Verlauf der braunen Linie der Realität näher kommt, da die blaue Linie ‚HF-ID30‘ gleichmäßiger zwischen ungefähr 9 und 10 M-% verläuft. Dass die Sensoren in der Ebene der Innendämmung im ungedämmten Referenzfeld sich etwas niedriger bewegen wie im Streichbalken, ist wegen der zusätzlichen Feuchtebelastung und der Abkühlung durch die Innendämmung schlüssig. Wegen der fehlenden Innendämmung ist im Feld des Referenzbalkens der Unterschied zwischen Stirnholz und der Temperaturmessstelle des Sensors ‚HF-St‘ besonders groß. Deshalb sind die Unterschiede zwischen gemessener und temperaturkorrigierter Kurve ‚HF-St‘ größer als bei den anderen Balken.

Zu den Sprüngen im Verlauf der Holzfeuchte, besonders der Linie ‚HF-ID15‘ in Abb. 70, sei noch einmal auf das Kapitel 5.11 verwiesen.

5.6.3 Zusammenfassung zu den Holzfeuchtemessungen

In Anbetracht der hohen Feuchtebelastung aus den Räumen in den beiden Winterperioden 2011/12 und 2012/13 und der damit verbundenen Kondensatbildung in einigen Innendämmsystemen sind die gemessenen Holzfeuchten mit maximal 16,2 M-% (temperaturkorrigiert) nach Abtrocknen der Einbaufeuchte niedrig. Lediglich im Balkenkopf des Feldes mit Wärmedämmputz und mit Abstrichen im Streichbalken wurden im ersten Winter längere Zeiten mit höheren Holzfeuchten gemessen. Nach dem zweiten Winter bewegten sich alle gemessenen Holzfeuchten relativ gleichförmig. Werden die Imponderabilien bei derartigen Messungen und die unterschiedliche Detaillierung der Balkenaufleger berücksichtigt, 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-% erscheint ausreichend. Anhand von Messungen am Streichbalken konnte herausgearbeitet werden, dass die Holzfeuchte am Stirnholz größer ist als in der Ebene der Innendämmung.

Die Balkenköpfe in den, vom Obergeschoss her, nicht abgedichteten Auflagern feuchten im Winter zwar schneller aber nicht übermäßig auf. Insofern erscheint eine Abdichtung der

Auflagertasche nach wie vor als sinnvoll, schließlich kann in einer ungünstigeren Gemengelage, wie z. B. bei dünneren Außenwänden mit wärmeleitfähigeren Ziegeln, eine höhere Feuchtebelastung im Auflager auftreten. Jedoch kann aus den Messungen geschlossen werden, dass eine weniger aufwändige Abdichtung des Auflagers ausreichend ist.

Trotz der hohen Raumlufffeuchte im letzten Winter darf die Einschätzung, dass die im Projekt OEKO-ID verwendeten oder ähnliche Dämmsysteme sich analog verhalten würden und demnach als unproblematisch anzusehen sind, zum derzeitigen Zeitpunkt nicht verallgemeinert werden. Projektspezifische Besonderheiten beispielsweise der wenig wärmeleitfähige, aber sehr flüssigwasserleitfähige Ziegel, die relativ dicke Außenwand und der geringe Einfluss von Schlagregen sprechen dagegen.

5.7 Oberflächentemperaturen

5.7.1 Außenoberflächentemperaturen

Die externen Oberflächentemperaturen werden nicht nur von der Innendämmung beeinflusst. Stärkeren Einfluss üben die Sonneneinstrahlung und weitere Faktoren wie die Verschattung durch Vegetation oder Schmuckelemente der Fassade, die Oberflächenrauigkeit oder –farbe aus. In der Schönbrunnstraße 30 sind die Sensoren wegen der aufwändigen Fensterverkleidung ungefähr 0,9 m unterhalb der ‚ID‘- bzw. Innenoberflächen-Temperaturmessfühler und nur ca. 0,4 m über der Unterkante der Dämmfelder fixiert, sodass der nicht gedämmte Bereich im Obergeschoss die Unterschiede zwischen den Außenoberflächentemperaturen ausgleichend beeinflussen kann.



Abb. 71 Positionen der Oberflächentempersensoren auf der nach Südwestsüd ausgerichteten Außenwand

Anhand Abb. 71 ist zu sehen, dass der mittlere Sensor in Feld 3 (Wärmedämmputz) auf einem anderen Putz angebracht war wie die übrigen Messfühler. Hier waren die Fenster

nachträglich vermauert worden. Die Annahme liegt nahe, dass diese Ziegel andere Eigenschaften aufweisen wie die originalen Mauerwerksziegel. Ferner ist zu berücksichtigen, dass die Schmuckelemente für kurze Zeit jeden frühen Nachmittag kurzzeitig den Sensor über Balken 8 verschatten, im Gegensatz zu dem Fühler über Balken 2. Ebenso kann der von den anderen Sensoren etwas entfernter liegende Sensor im ungedämmten Referenzfeld 6 anders verschattet werden.

Die Sensoren auf der Außenoberfläche wurden nachträglich im April 2011 montiert und in Betrieb genommen.

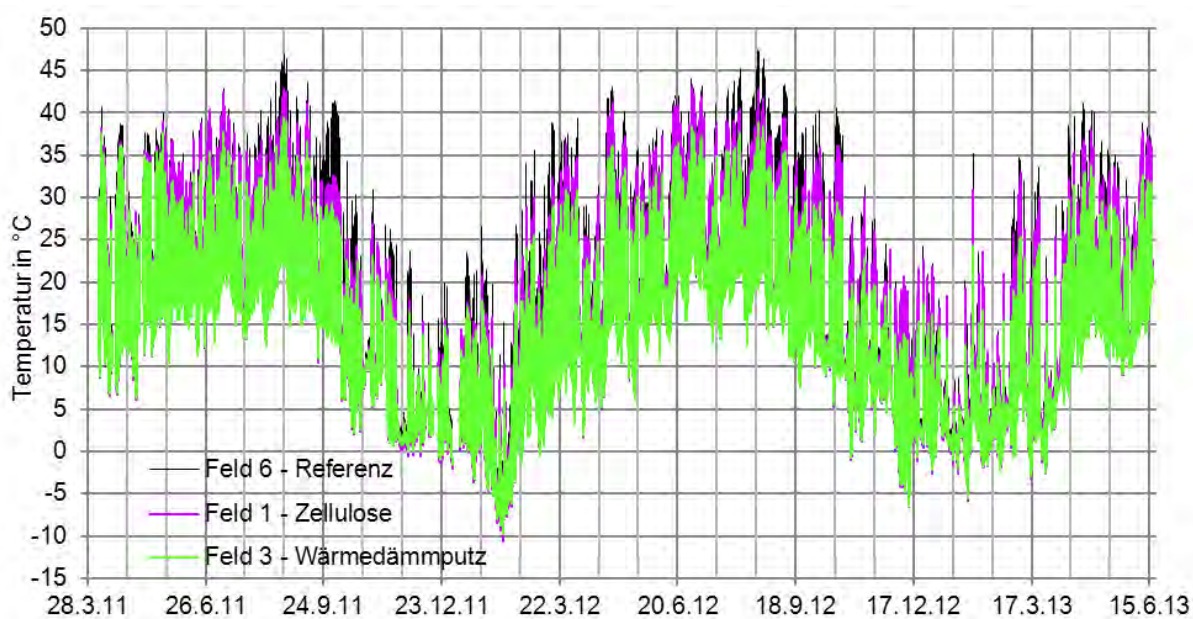


Abb. 72 Verlauf der Außen-Oberflächentemperaturen in Feld 1 an Balken 2 (Zellulose, lila), Feld 4 (Wärmedämmputz, hellgrün) und im nicht gedämmten Feld 6 (schwarz)

Dass solche Einflüsse vorhanden sein müssen, ist an den großen Unterschieden in den Tageshöchsttemperaturen zu sehen (Abb. 72). Die Temperaturen am Sensor des Balkens 4 sind auffällig niedrig, was wahrscheinlich an dem unterschiedlichen Putz und Mauerwerksziegel liegen kann. Die Tageshöchsttemperaturen in den Feldern 1 und 6 verlaufen größtenteils ähnlich, wobei im Referenzfeld 6 die höheren Temperaturen erreicht werden. Im September/Oktober 2011 waren die Temperaturen im Feld 6 weitaus höher als in den anderen beiden Feldern. Ein Grund hierfür, wie beispielsweise eine temporäre Baustelleneinrichtung vor den anderen Sensoren o.ä., ist nicht bekannt.

Tagsüber ist aufgrund der Sonnenstrahlung der Einfluss der Dämmsysteme als gering einzuschätzen. Nachts treten die systemspezifischen Unterschiede zwar stärker hervor, jedoch sind die Temperaturunterschiede viel geringer.

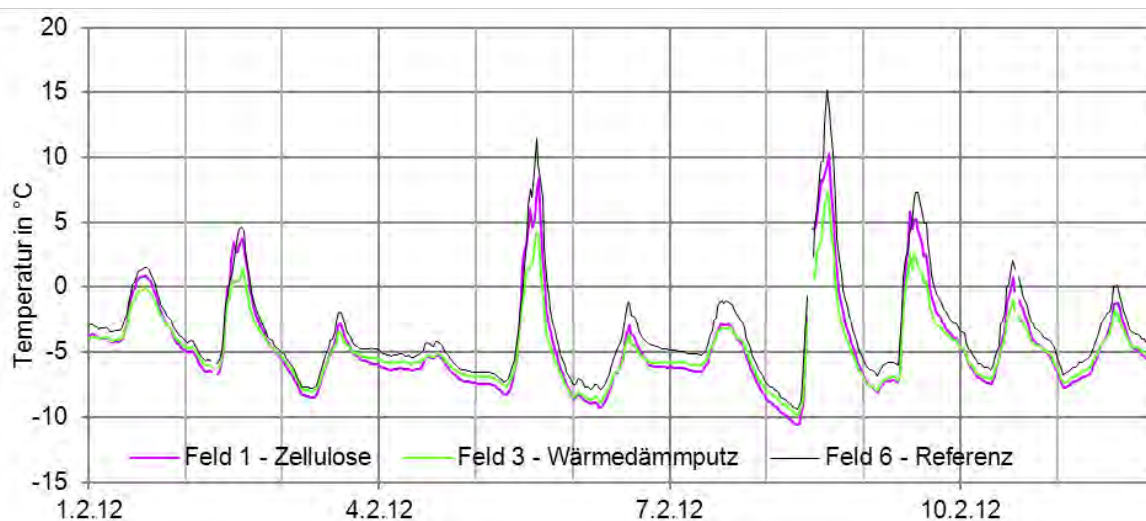


Abb. 73 Verlauf der Außen-Oberflächentemperaturen in Feld 1 an Balken 2 (Zellulose, lila), Feld 4 (Wärmedämmputz, hellgrün) und im nicht gedämmten Feld 6 (schwarz) im Februar 2012

Die Abb. 73 zeigt einen kürzeren Zeitausschnitt. Während der Sommermonate, wenn Innen-dämmkonstruktionen generell nur sehr geringen Einfluss auf die Außenoberflächentemperaturen ausüben, sind die Nachttemperaturen zwischen den einzelnen Messpositionen fast identisch und unterscheiden sich um weniger als einem Kelvin. Im Winter sind die Unterschiede nur wenig größer. Bei nächtlichen Außentemperaturen unter -10°C differieren die Oberflächentemperaturen zwischen Feld 1 und 3 sowie Feld 6 um maximal 2 K, wobei es im Zellulosefeld mit dem höheren Wärmewiderstand kälter ist als im mit Wärmedämmputz gedämmten Feld.

5.7.2 Innenoberflächentemperaturen

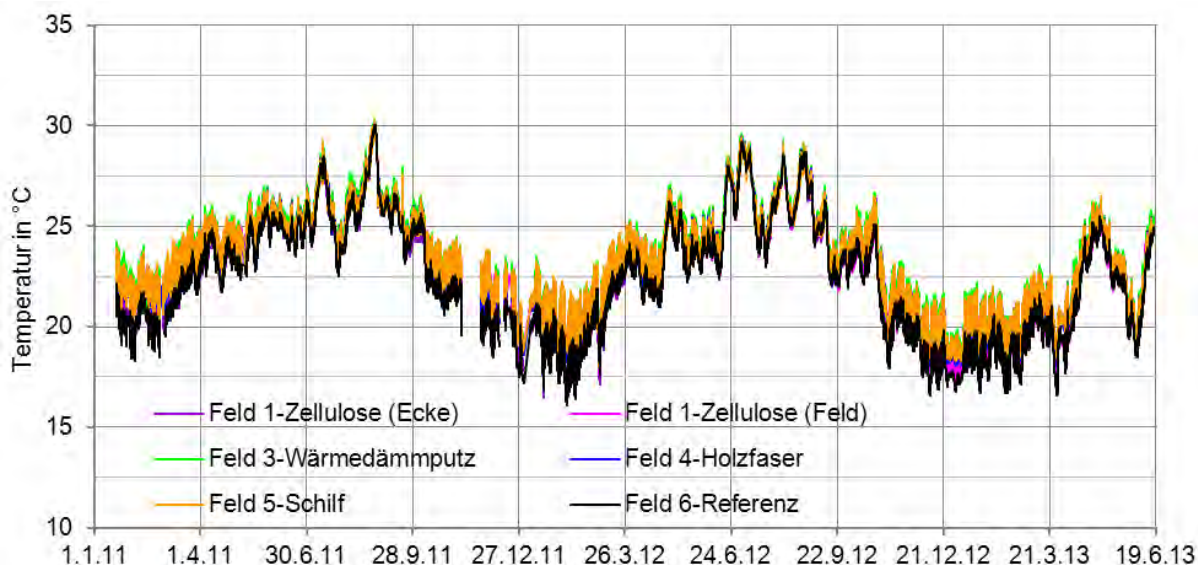


Abb. 74 Verlauf der Innen-Oberflächentemperaturen in der Zimmerecke (violett), unter Balken 2 (Zellulose, magenta), im Feld 3 (Wärmedämmputz, hellgrün), Feld 4 (Holzweichfaser, blau), Feld 5 (Schilf, orange) und im nicht gedämmten Feld 6 (schwarz)

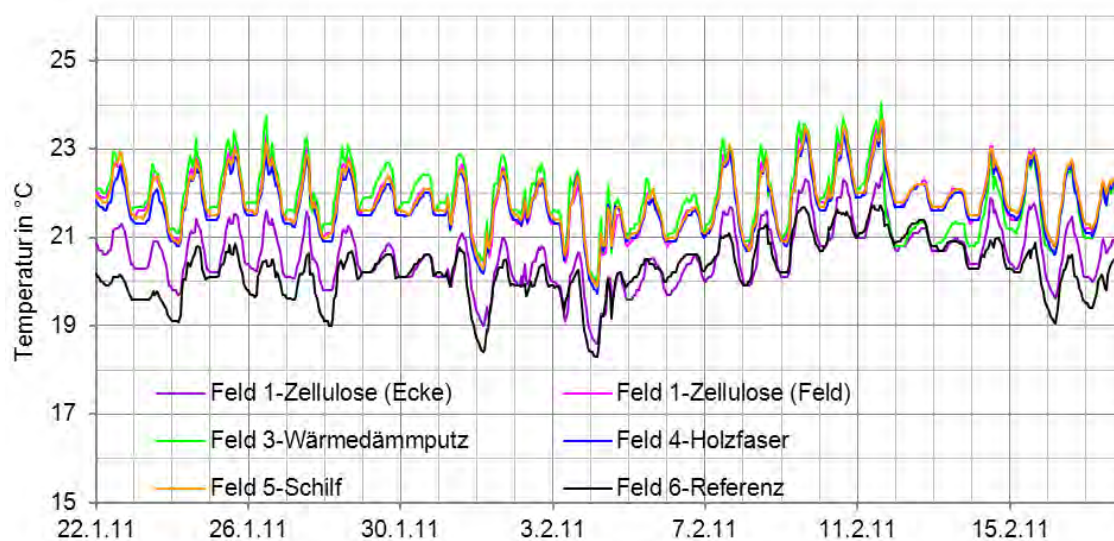


Abb. 75 Verlauf der Innen-Oberflächentemperaturen vom 22.1.2012 bis zum 18.2.2012

In Abb. 75 ist exemplarisch vom 22.1.2012 bis zum 18.2.2012 der Temperaturverlauf auf den Innenoberflächen der verschiedenen Dämmsysteme abgebildet. Die durchschnittlichen Innenoberflächentemperaturen während des kältesten Monats, Februar 2012, betragen:

Tab. 19 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

Entsprechend der Wärmewiderstände der Dämmsysteme gestalten sich die Oberflächentemperaturen (Tab. 19). Am Wärmsten war es auf der Schilf- und Zellulosedämmung, es folgen der Wärmedämmputz und die Holzweichfaserplatte. Aus Kostengründen wurde auf Feld 2 (Perliteplatte) kein weiterer Sensor angebracht, da dies auch einen weiteren Datenlogger an der Messanlage erfordert hätte. Die Differenz zwischen Referenzfeld und Zellulose- bzw. Schilffeld beträgt weniger als 2 K. Abb. 75 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.

Die Unterschiede von weniger als 2 K zwischen gedämmten und ungedämmten Temperatursensoren könnten so verstanden werden, dass die durch Dämmung erzielbaren Heizenergieverluste nur gering seien. Unter anderem 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.

5.8 Temperatur- und Feuchteprofile an den Balken

Im Sinne einer zugänglicheren Interpretation der Messdaten sind die Außentemperatur und die Raumluftfeuchte im Obergeschoß in transparenten Farben mit angegeben. Bei allen Kurven handelt es sich um Stundenwerte.

5.8.1 Profile im Feld 1, Balken 1 & 2 (Zellulose)

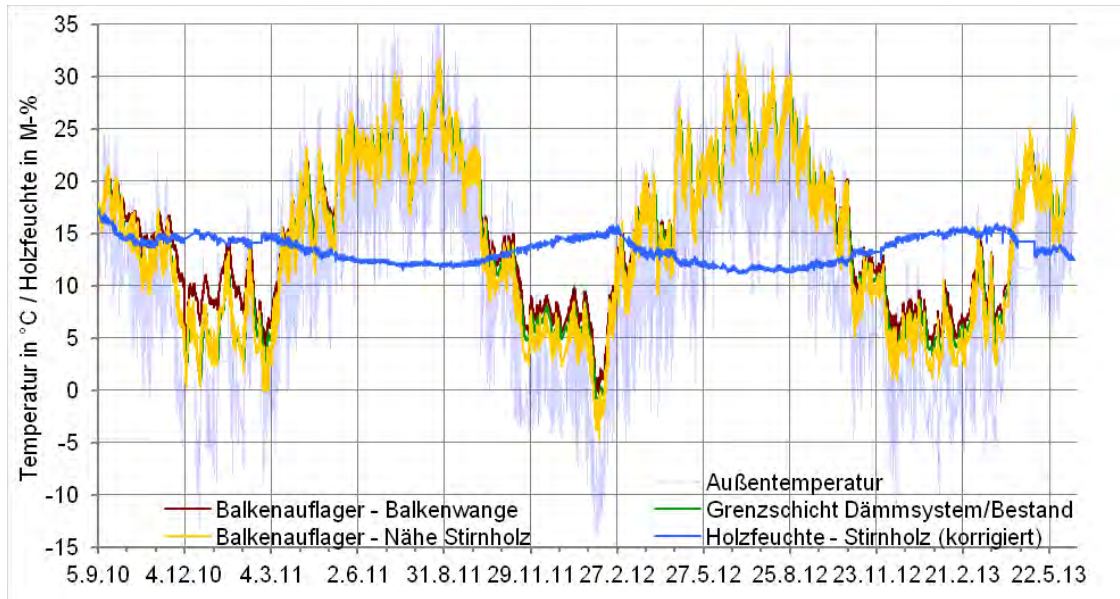


Abb. 76 Stundenwerte der Temperaturen und der Holzfeuchte an Balken 1: ehemalige Wandoberfläche (grün), Balkenwange (braun), neben der Stirnfläche des Balkens (gelb), temperaturkorrigierte Holzfeuchte (blau) und Außentemperatur (blau transparent)

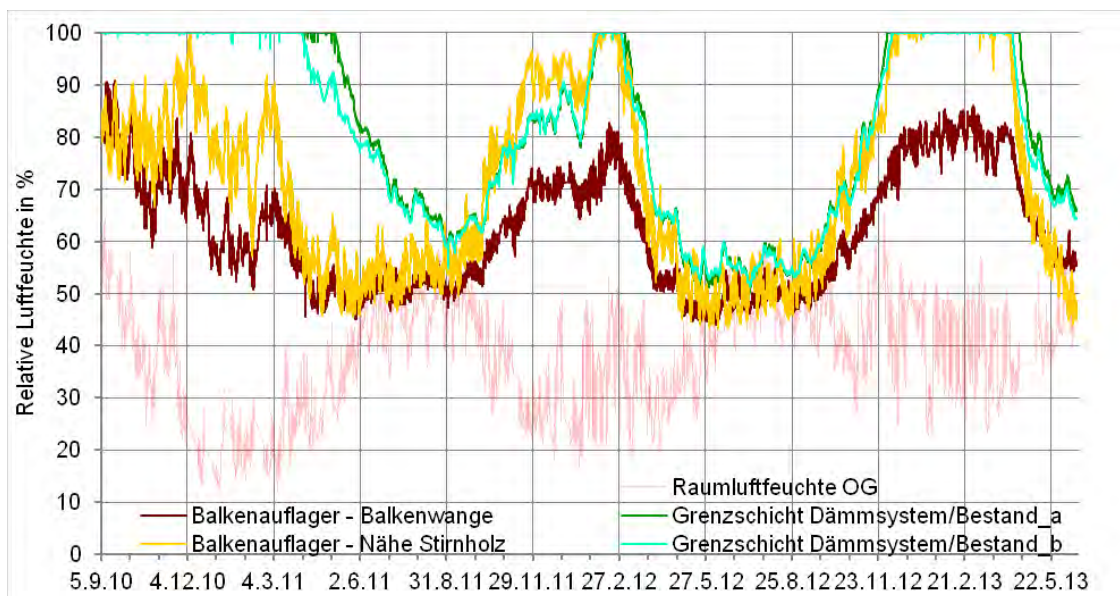


Abb. 77 Stundenwerte der relativen Luftfeuchte an Balken 1: ehemalige Wandoberfläche (grün & hellblau), Balkenwange (braun), neben der Stirnfläche des Balkens (gelb) und Raumluftfeuchte im OG (rot transparent)

Im ersten Winter 2010/11 herrschen an der Bestandswandoberfläche noch ähnliche Temperaturen wie im äußeren Bereich des Balkenaufagers, in Abb. 76 lassen sie sich kaum unterscheiden. Deutlich abgesetzt davon bewegen sich die Temperaturen an der Balkenwange um bis zu 6 K höher. Dies kann durch die Einbaufeuchte bedingt sein, welche durch die höhere Wärmeleitfähigkeit der feuchten Zellulose den Sensor in der Balkenwange etwas mehr erwärmt, denn im zweiten und dritten Winter sind die Unterschiede weniger deutlich. Die niedrigste Temperatur beträgt $-4,7^{\circ}\text{C}$.

Der Streichbalken weist eine im Vergleich etwas erhöhte Anfangsfeuchte auf, die im Verlauf des ersten Sommers auf 12 M-% Holzfeuchte absinkt und sich im Weiteren gleichmäßig und von der zwischenzeitlich hohen Raumlufffeuchte scheinbar unbeeindruckt zwischen 12 und gut 15 M-% bewegt.

Innerhalb der Balkentasche kommt es im zweiten Winter trotz eines geringeren Temperaturunterschiedes (Abb. 76) zu größeren Abweichungen der Luftfeuchte (Abb. 77). 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 offenbar bei sehr kalten Außentemperaturen nahe der Außenoberfläche, während an der Balkenwange noch eine unauffällige Luftfeuchte registriert wurde. Im Winter 2012/13 ist dieses Verhalten noch ausgeprägter zu beobachten. Die Austrocknungsdauer der beiden Luftfeuchtefühler auf der Bestandskonstruktion beginnt im Frühjahr 2011 um einen Monat verzögert. Ab Juni 2011 verlaufen beide ‚ID‘-Sensoren nahezu synchron. In der zweiten und dritten kalten Witterungsperiode tritt zeitgleich mit der Auflagertaschenaußenseite auch an der Grenzfläche zwischen Dämmsystem und Bestand Kondensat auf.

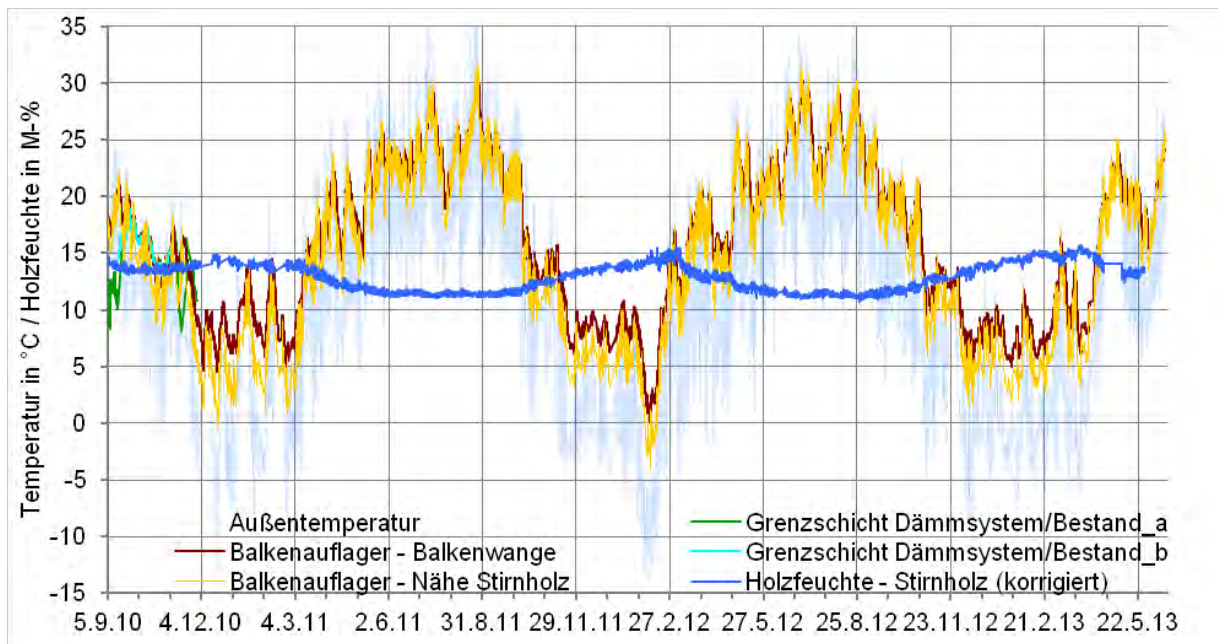


Abb. 78 Stundenwerte der Temperaturen und der Holzfeuchte an Balken 2: ehemalige Wandoberfläche (grün & hellblau), Balkenwange (braun), neben der Stirnfläche des Balkens (gelb), temperaturkorrigierte Holzfeuchte (blau) und Außentemperatur (blau transparent)

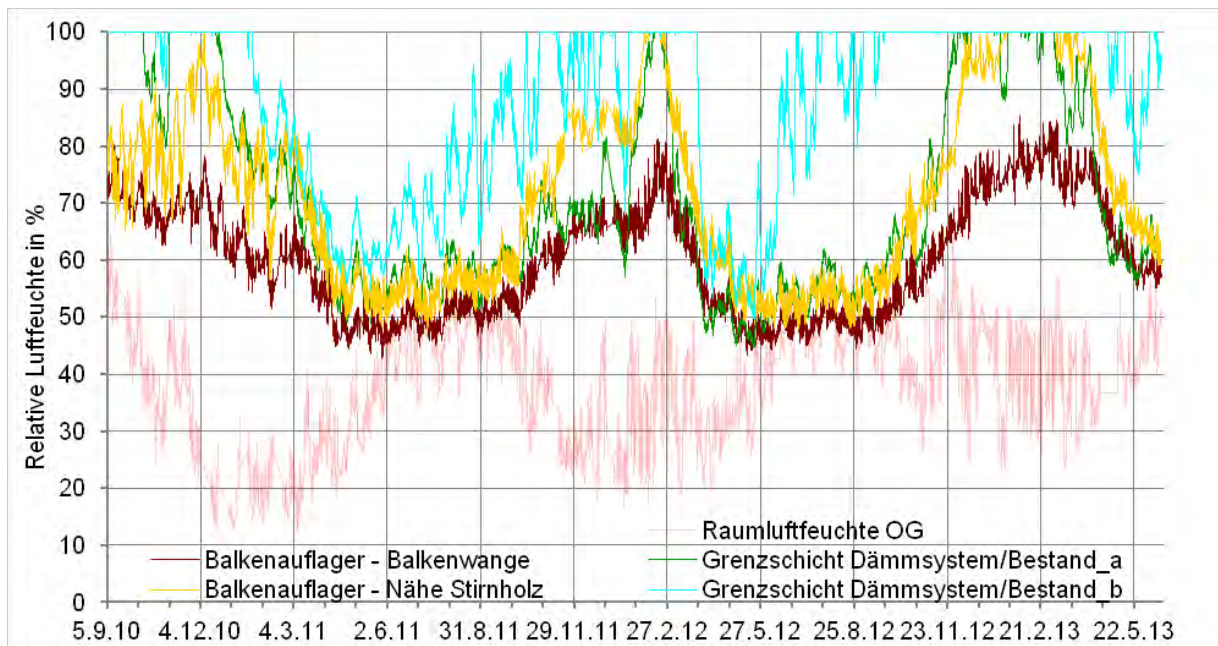


Abb. 79 Stundenwerte der relative Luftfeuchte an Balken 2: ehemalige Wandoberfläche (grün & hellblau), Balkenwange (braun), neben der Stirnfläche des Balkens (gelb) und Raumlufffeuchte im OG (rot transparent)

Wie schon am Streichbalken unterscheiden sich die Temperaturkurven an der Balkenwange bei niedrigeren Außentemperaturen im ersten Winter mehr als in der zweiten Kondensationsperiode (Abb. 78). Im Auflager des zweiten Balkens werden minimal $-4,0^{\circ}\text{C}$ erreicht. Da es im letzten Winter zu keiner ausgeprägten Kältephase wie im Februar 2012 kommt, sinken die Temperaturen nicht unter 2°C . Typisch für winterliche Verhältnisse scheinen Temperaturen zwischen 2 und 10°C zu sein. Die Sensoren auf der Grenzfläche zwischen Dämmsystem und Bestand fielen ab November 2010 aus.

Auf die Bildung von Tauwasser im Februar 2012 reagiert die Holzfeuchte (nicht temperaturkorrigiert) an der nassesten Stelle ('HF-St') um ca. 2 Wochen zeitversetzt mit einer Erhöhung um ungefähr 1 M-%. Zwischen den Winterperioden 2011/12 und 2012/13 steigt die Luftfeuchte trotz hoher Raumlufffeuchten kaum (um ca. 0,5 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 auftreten. Maximal wurden ca. 15,5 M-% Holzfeuchte gemessen.

An Balken 2 ist die durch das Aufbringen des Oberputzes eindringende Feuchte Anfang November 2011 gut erkennbar (Abb. 79, grün & hellblau): Beide 'ID'-Sensoren messen 100 % Luftfeuchte. Die Darstellung aller Profile macht allerdings auch deutlich, dass der hellblaue 'ID'-Sensor angesichts des häufig hohen und sehr unruhigen Verlaufs defekt sein muss (Abb. 55). Die zwei folgenden Kondensat-Phasen im Februar 2012 und Winter 2012/13 decken sich wieder gut mit den Perioden hoher Luftfeuchte am äußeren Ende des Balkenaufagers (BA-St). Trotz Einbaufeuchte und der längeren Phase hoher Feuchte am 'ID'-Sensor kommt es am Ende der Balkentasche im ersten Winter dagegen „nur“ zu 98 % Luftfeuchte. Die Einbaufeuchte durch Dämmung und Putz übt demnach einen geringeren Einfluss als die hohe Raumlufffeuchte aus. An der Balkenwange werden 80 % Luftfeuchte insgesamt nur sporadisch überschritten.

5.8.2 Profile im Feld 2, Balken 3 (Perliteplatte)

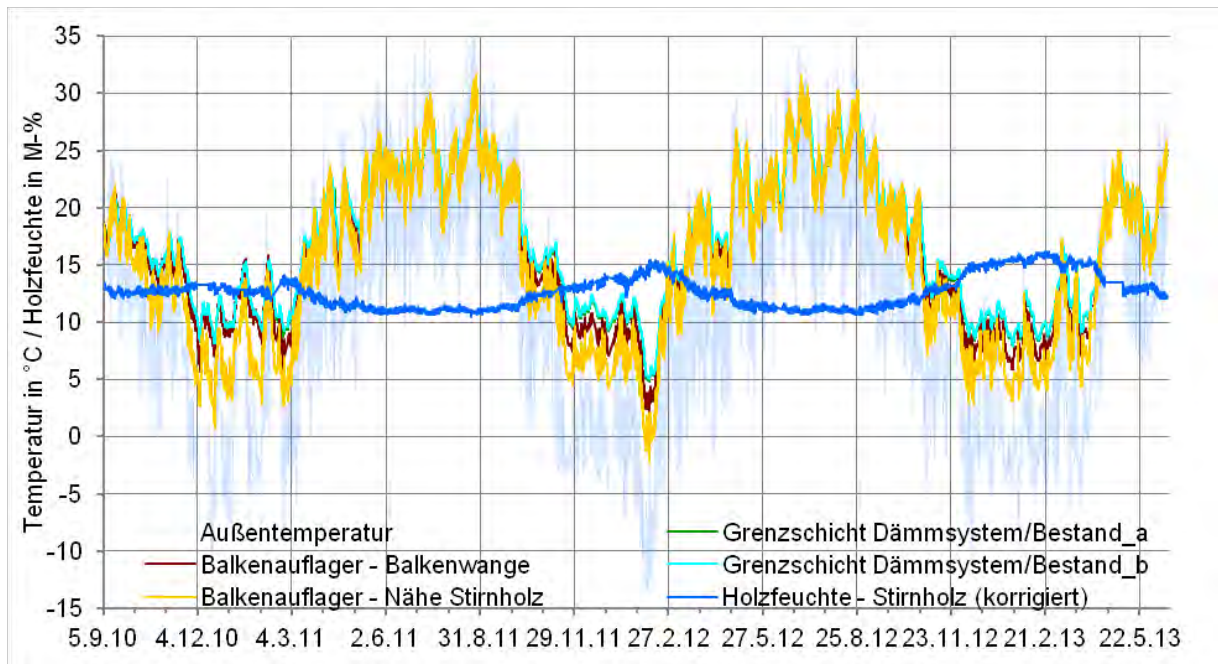


Abb. 80 Stundenwerte der Temperaturen und der Holzfeuchte an Balken 3: ehemalige Wandoberfläche (grün & hellblau), Balkenwange (braun), neben der Stirnfläche des Balkens (gelb), temperaturkorrigierte Holzfeuchte (blau) und Außentemperatur (blau transparent)

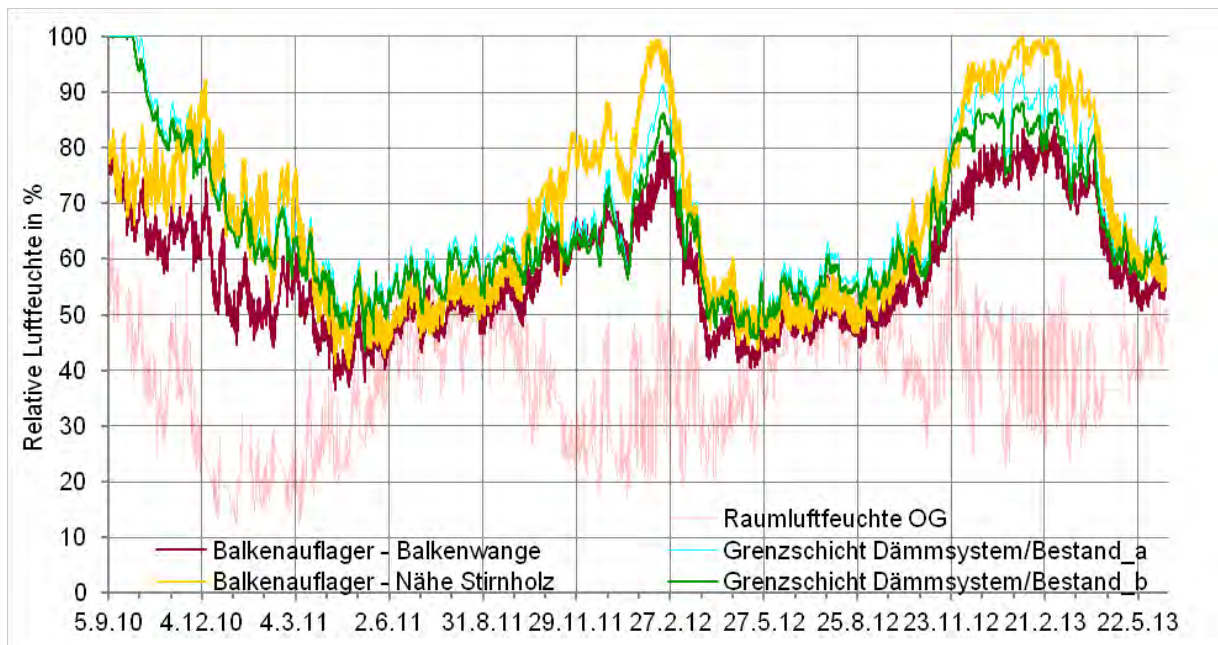


Abb. 81 Stundenwerte der relative Luftfeuchte an Balken 3: ehemalige Wandoberfläche (grün & hellblau), Balkenwange (braun), neben der Stirnfläche des Balkens (gelb) und Raumlufffeuchte im OG (rot transparent)

Im zweiten Balken zeigt sich eine analoge Temperaturentwicklung in den beiden Jahren wie bei dem Balken in Feld 1 (Abb. 80). Bis auf sehr kalte Witterungsperioden verlaufen die ,ID'-Temperatursensoren fast deckungsgleich mit den Messfühlern im Balkenaufleger und sind deshalb größtenteils verdeckt (grün und hellblau). Trotz des hohen Wärmewiderstands der Innendämmung ist die Minimaltemperatur am Stirnholz „nur“ $-2,2^{\circ}\text{C}$, da diese Balkentasche nicht so tief ist.

An Balken 3 kann ein gleichmäßiger Holzfeuchteverlauf mit maximal 16,2 M-% (temperaturkorrigiert) im Februar 2012 konstatiert werden (Abb. 80, blau). Im Auflager des Feldes 2 beeinflusst die Raumlufffeuchte die Holzfeuchte stärker als in Feld 1 mit Zellulose: in den drei aufeinanderfolgenden kalten Witterungsperioden steigt mit der Raumlufffeuchte die maximale Holzfeuchte von 14,1 über 15,5 auf 16,2 M-% Holzfeuchte sukzessive an.

Auf der kalten Seite der Innendämmung (Abb. 81, grün und hellblau) verbleibt bis Anfang Oktober 2010 Flüssigwasser. Nach dem zügigen Abtrocknen folgt ein unproblematischer Luftfeuchteverlauf, im zweiten Winter werden 90 % Luftfeuchte von einem Messfühler nur für einige Tage überschritten. In der Kondensationsperiode 2012/13 bewegt sich ein Sensor häufiger über 90 bis maximal 94 % Luftfeuchte, anders wie in den Auflagern des ersten Feldes (Zellulose) steigt die Feuchtebelastung hinter der Perliteplatte nicht so hoch wie am Ende des Balkenauflegers (BA-St). Beide ,ID'-Sensoren verlaufen nahezu synchron, nur bei Luftfeuchten ab 80 % Luftfeuchte weichen sie um ungefähr 5 % ab.

An der Stirnseite der Balkentasche kommt es im Februar 2012 fast zu Kondensatausfall, 100 % werden aber ebenso wenig wie im folgenden Winter gemessen (Abb. 81, gelb). An der Balkenwange dagegen werden wieder nur ca. 80 % erreicht.

5.8.3 Profile im Feld 3, Balken 4 (Wärmedämmputz)

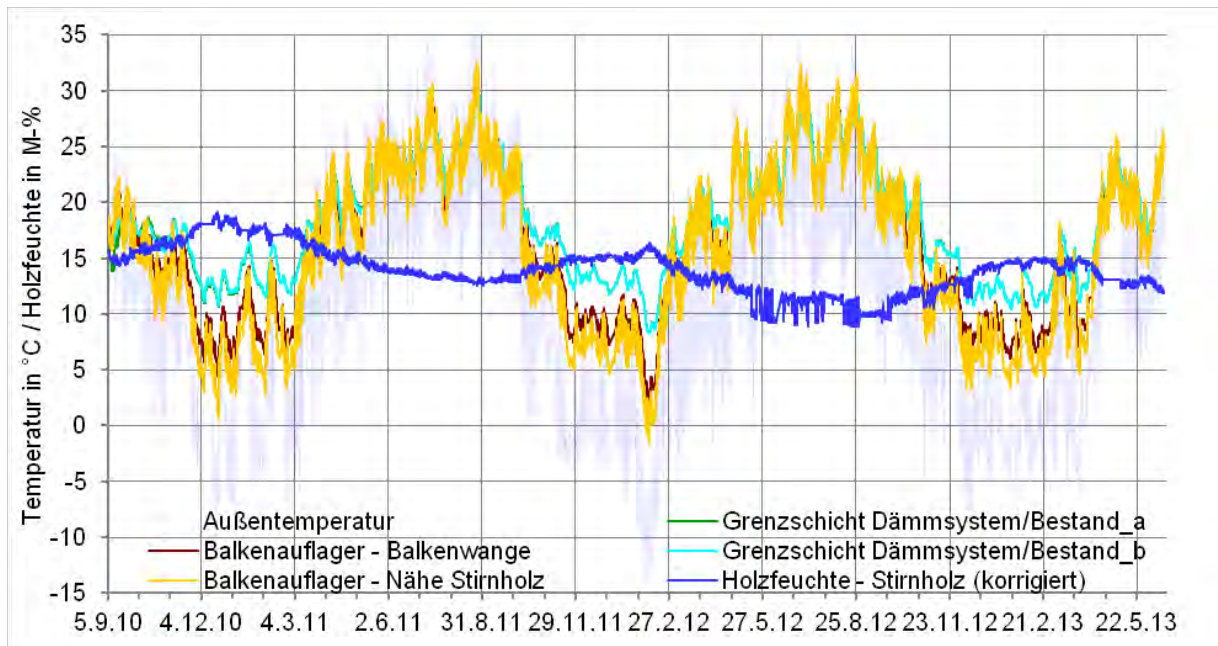


Abb. 82 Stundenwerte der Temperaturen und der Holzfeuchte an Balken 4: ehemalige Wandoberfläche (grün & hellblau), Balkenwange (braun), neben der Stirnfläche des Balkens (gelb), temperaturkorrigierte Holzfeuchte (blau) und Außentemperatur (blau transparent)

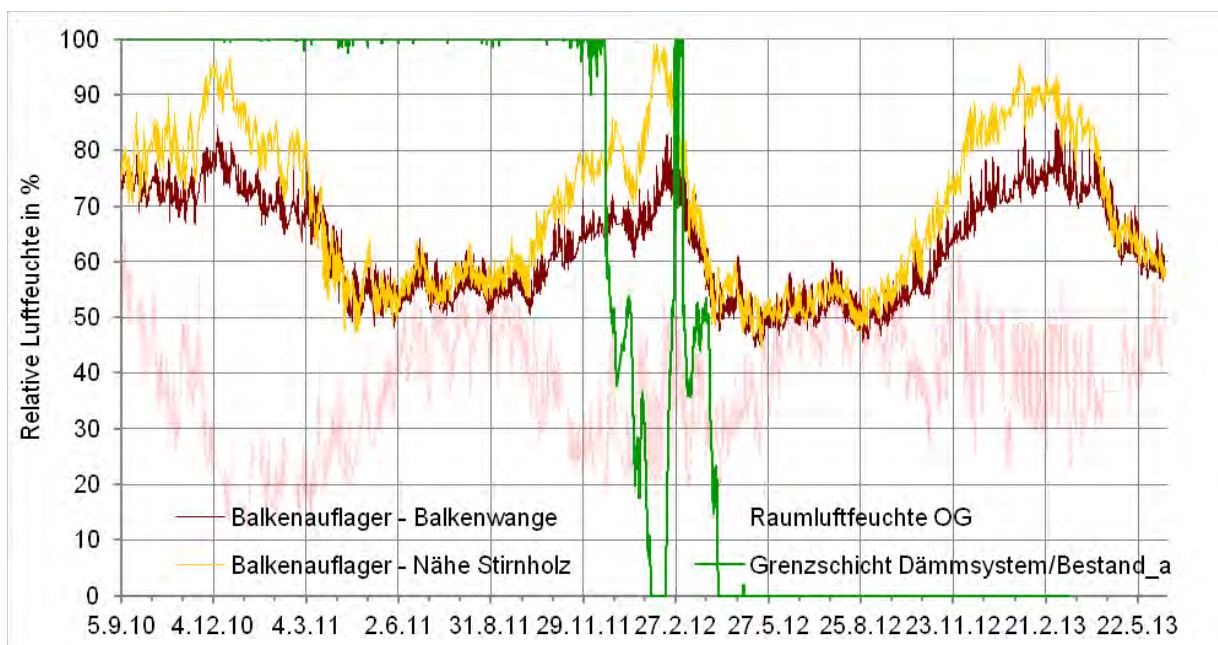


Abb. 83 Stundenwerte der relative Luftfeuchte an Balken 4: ehemalige Wandoberfläche (grün), Balkenwange (braun), neben der Stirnfläche des Balkens (gelb) und Raumluftfeuchte im OG (rot transparent)

Abweichend von den bisher skizzierten thermischen Verhältnissen an den Balken weichen die ‚ID‘-Temperatursensoren nicht nur bei sehr tiefen Temperaturen unter -5° bis -10°C von dem Sensor an der Balkenwange ab, sondern bewegen sich schon im Herbst weit darüber (Abb. 82, grün und hellblau). Wahrscheinlich wird dies durch den geringen Wärmewiderstand der Dämmung verursacht, der eine gleichmäßigere Temperaturverteilung im Wandquerschnitt bewirkt. Die niedrigste Temperatur in der Nähe des Stirnholzes beträgt $-1,6^{\circ}\text{C}$. Der Unterschied zwischen den Temperaturfühlern im Auflager ist dagegen geringer.

Die Kurve der Holzfeuchte in Abb. 82 entwickelt sich spiegelbildlich zur Kurve in Abb. 80. Während die Holzfeuchte im Feld der Perliteplatte von Jahr zu Jahr mit der Feuchtebelastung aus dem Raum ansteigt, sinkt die (temperaturkorrigierte) Holzfeuchte von maximal 19,2 über 16,4 auf 15,2 M-% (Stundenwerte). Zusammen mit dem Gang der Luftfeuchte im Luftspalt um den Balkenkopf (Abb. 83) lässt sich konstatieren, dass sich der Einsatz von Wärmedämmputz nach dem Abtrocknen der Einbaufeuchte im Dämmsystem-Vergleich tendenziell positiver auf die Verhältnisse im Balkenaufleger auswirkt, da sich die konstruktiven Randbedingungen nicht sehr unterscheiden (Tab. 26, Tab. 2). Einschränkend muss hinzugefügt werden, dass der Anschluss des Balkenauflegers im Dachgeschoss nicht dokumentiert ist. Unter Umständen wirken sich die konstruktiven Verhältnisse im vierten Auflager günstiger auf die hygrothermischen Verhältnisse aus als in den anderen, z. B. dem dritten Auflager.

Auch an Balken 4 bildet sich weder im zweiten noch im dritten Winter Tauwasser an den Ziegeloberflächen der Auflagertasche (Abb. 83, gelb). Nachdem sie im Winter 2011/12 noch ähnlich hoch wie im Feld der Perliteplatte verläuft (Abb. 81), sinkt sie demgegenüber sogar im letzten Winter ab. Die Luftfeuchte an der Balkenwange (braun) zeigt wieder einen unproblematischen Verlauf. Abb. 83 zeigt noch einen der beiden defekten ‚ID‘-Luftfeuchtesensoren (grün).

5.8.4 Profile im Feld 4, Balken 5 (Holzweichfaser)

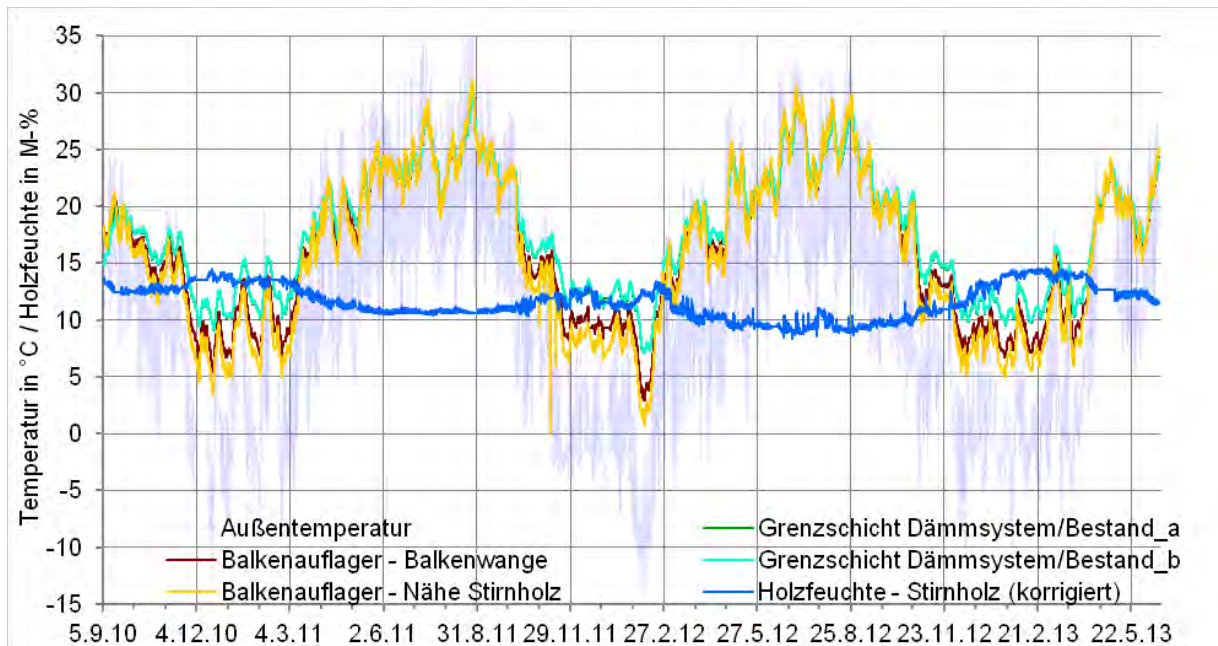


Abb. 84 Stundenwerte der Temperaturen und der Holzfeuchte an Balken 5: ehemalige Wandoberfläche (grün), Balkenwange (braun), neben der Stirnfläche des Balkens (gelb), temperaturkorrigierte Holzfeuchte (blau) und Außentemperatur (blau transparent)

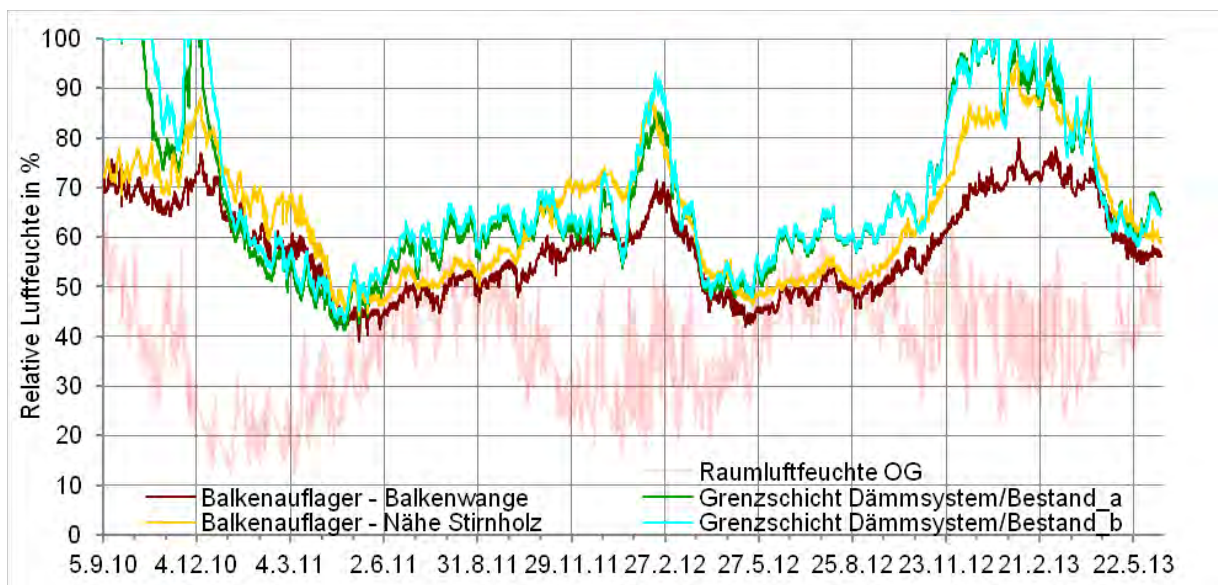


Abb. 85 Stundenwerte der relative Luftfeuchte an Balken 5: ehemalige Wandoberfläche (grün & hellblau), Balkenwange (braun), neben der Stirnfläche des Balkens (gelb) und Raumlufffeuchte im OG (rot transparent)

Wie auch schon in Feld 3 (Balken 4, Wärmedämmputz), welches nur über eine geringere Dämmwirkung verfügt, weichen auch die ‚ID‘-Temperatursensoren hinter der Holzweichfaserdämmung (Abb. 84, grün und hellblau) stärker von dem Fühler an der Balkenwange ab als an den Balken 1 bis 3, wahrscheinlich ebenso bedingt durch die Auflagergeometrie und dem geringeren Wärmewiderstand der Dämmung. Im kompaktesten Balkenaufleger (Tab. 26) differieren die Temperaturen nur wenig. Die niedrigste Temperatur beträgt im Februar 2012 0,7°C.

Der niedrige Holzfeuchteverlauf (temperaturkorrigiert, in Abb. 84 blau) wird sicherlich auch dadurch verursacht, dass die dünne Holzweichfaserplatte die Bestandskonstruktion nicht so stark abkühlt wie die Zellulosedämmung oder die Perliteplatte und dass der Balken nicht so tief in die Wand einbindet. Dennoch ist er erstaunlich niedrig. Der höchste gemessene Wert beträgt 14,6 M-%. Inwieweit die Bewertung dieses Dämmsystems zusätzlich von der besonderen Lage über dem Fenster profitiert, muss noch untersucht werden.

Beide ‚ID‘-Luftfeuchte-Sensoren stimmen sehr gut überein, ausgenommen zu Zeiten tiefer Temperaturen bzw. hoher Feuchte, und dokumentieren einen insgesamt unkritischen Luftfeuchteverlauf auf der kalten Seite der Dämmung (Abb. 85, grün und hellblau), wenngleich durch die hohe Raumlufffeuchte im Winter 2012/13 immer wieder 100 % Luftfeuchte erreicht werden. Die durch die Applikation des Oberputzes eindringende Feuchte (100 % Luftfeuchte) im November 2010 trocknet rasch wieder ab und im zweiten Winter beträgt die Luftfeuchte nur für ungefähr eine Woche am Sensor ‚ID‘ mehr als 90 %. Der Gang der Luftfeuchte am Holzbalken ist sehr niedrig. Bis auf zwei kurze Ausnahmen im Jänner und Februar 2013 überschreitet keine Sensorposition 90 % Luftfeuchte. Anders als bei der Perliteplatte ist die Feuchtebelastung an der Grenzfläche der Dämmung zur Bestandskonstruktion auffallend höher als im Balkenaufleger bei der Stirnholzfläche (gelb).

5.8.5 Profile im Feld 5, Balken 6 (Schilf)

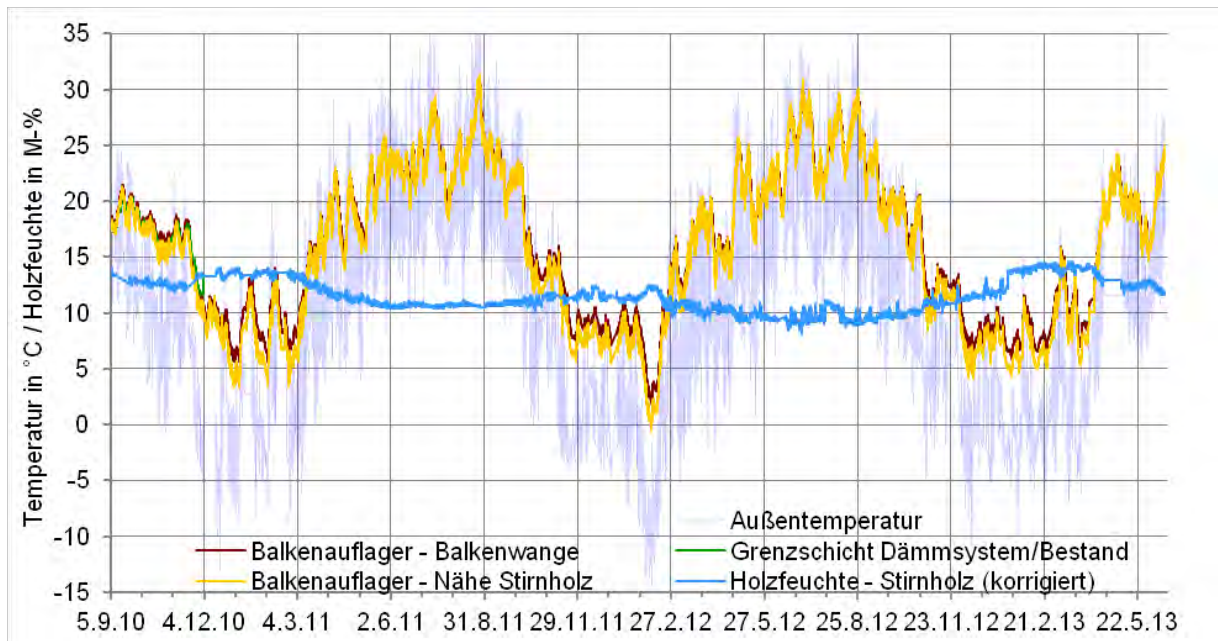


Abb. 86 Stundenwerte der Temperaturen und der Holzfeuchte an Balken 6: ehemalige Wandoberfläche (grün), Balkenwange (braun), neben der Stirnfläche des Balkens (gelb), temperaturkorrigierte Holzfeuchte (blau) und Außentemperatur (blau transparent)

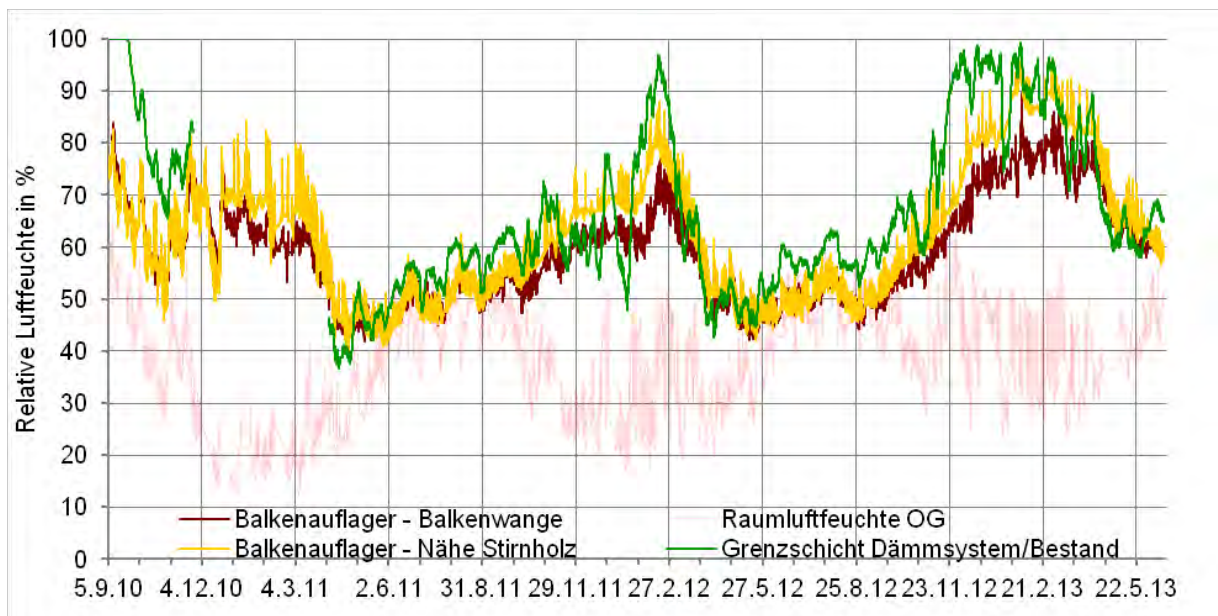


Abb. 87 Stundenwerte der relative Luftfeuchte an Balken 6: ehemalige Wandoberfläche (grün), Balkenwange (braun), neben der Stirnfläche des Balkens (gelb) und Raumlufffeuchte im OG (rot transparent)

Die Differenzen zwischen den einzelnen Sensoren im Balkenaufleger sind ausgesprochen gering, auch bei niedrigen Außentemperaturen (Abb. 86, gelb und braun). Unter Umständen erleichtert die bis zu 50 mm breite Fuge die Luftzirkulation um den Balkenkopf (Tab. 26). Leider war der ‚ID‘-Sensor nur bis Anfang Dezember 2010 funktionsfähig. Die minimale Temperatur beträgt $-0,5^{\circ}\text{C}$.

Der Gang der Holzfeuchte (temperaturkorrigiert, in Abb. 86 blau) ist unkritisch. Der gleichmäßige Verlauf erreicht sein Maximum im Februar 2013 mit 14,6 M-%.

Der ‚ID‘-Luftfeuchte-Sensor fiel von Ende November 2010 bis Anfang April 2011 aus (Abb. 87, grün). Noch im September 2010 sinkt die Luftfeuchte unter 100 % und unterschreitet im November bereits 70 % Luftfeuchte, bis sie wieder wegen des angebrachten Oberputzes ansteigt. Im zweiten Winter sind die Auswirkungen hoher Raumlufffeuchte Ende Dezember 2011 und im Februar 2012 im Verbund mit niedrigen Außentemperaturen gut zu sehen. Im Bereich des Lehmklebers kommt es fast zur Bildung von Flüssigwasser. Die Kurve der Luftfeuchte steigt im letzten Winter mit dem Einschalten des Befeuchters zwar sprunghaft an, 100 % Luftfeuchte werden jedoch nicht gemessen. Sonst war ein niedriger, unproblematischer Verlauf festzustellen. Die Abweichungen zwischen den beiden Messfühlern in der Balkentasche sind 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.

5.8.6 Profile im Feld 5, Balken 7 (Schilf)

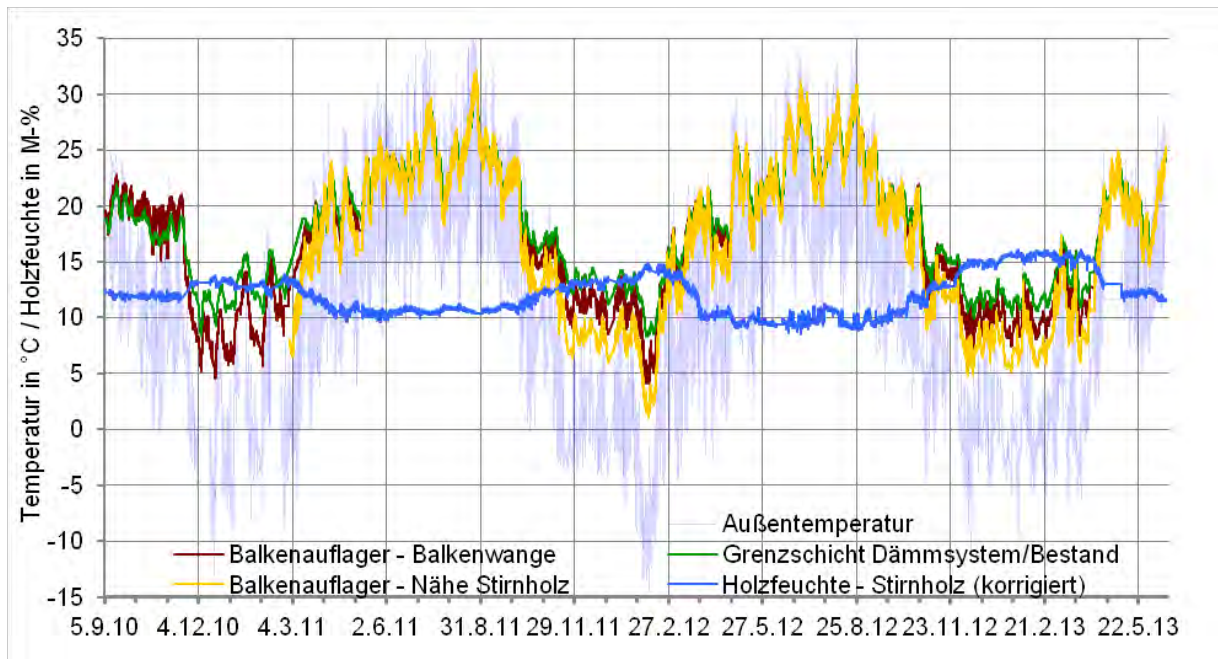


Abb. 88 Stundenwerte der Temperaturen und der Holzfeuchte an Balken 7: ehemalige Wandoberfläche (grün), Balkenwange (braun), neben der Stirnfläche des Balkens (gelb), temperaturkorrigierte Holzfeuchte (blau) und Außentemperatur (blau transparent)

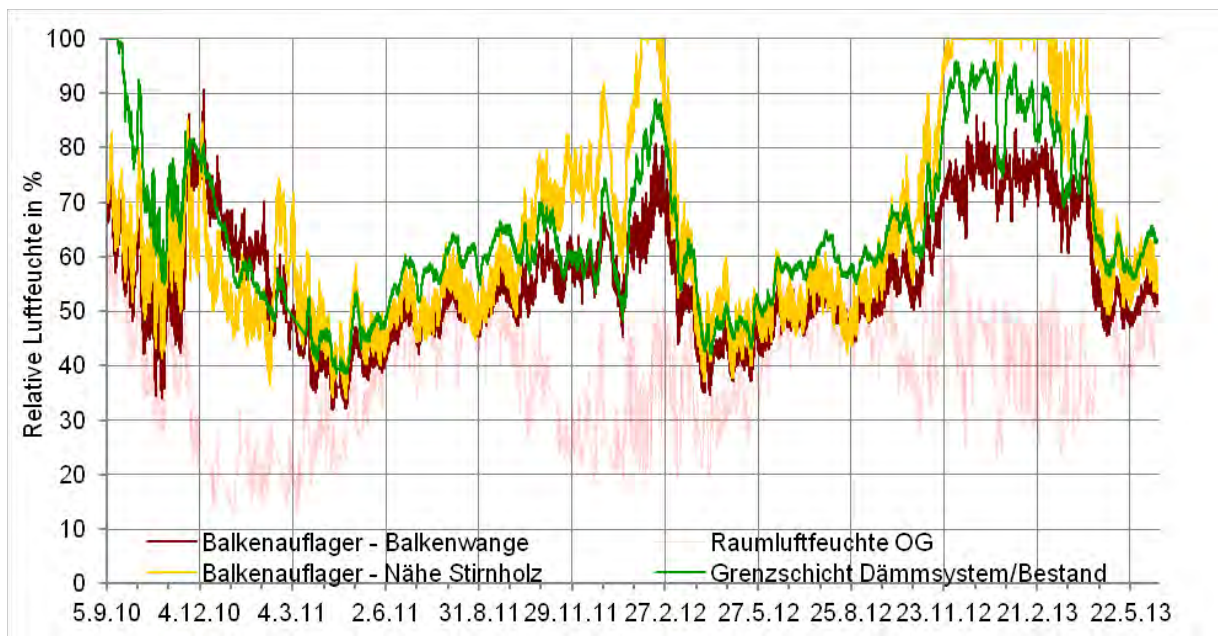


Abb. 89 Stundenwerte der relative Luftfeuchte an Balken 7: ehemalige Wandoberfläche (grün), Balkenwange (braun), neben der Stirnfläche des Balkens (gelb) und Raumlufffeuchte im OG (rot transparent)

Während des ersten Winters ist der Abstand zwischen der Temperatur an der Grenzfläche Dämmsystem/Bestand (Abb. 88, 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). Im zweiten Winter ist das Temperaturgefälle nicht so gering wie an Balken 6 (Abb. 86), die mögliche „Durchlüftung“ aus dem Zwischendeckenbereich sorgt nicht für eine homogenere Temperaturverteilung. Sie ist allerdings insgesamt etwas höher als im teilabgedichteten Auflager. So beträgt die niedrigste gemessene Temperatur im Februar 2012 1°C, im Balkenaullager 6 wurde als niedrigste Temperatur -0,5°C ermittelt. Der Temperaturverlauf an Balken 6 ist also niedriger, obwohl der Sensor an Balken 7 ungefähr 60 mm tiefer eingeschoben werden konnte (Tab. 26).

Die Holzfeuchte (temperaturkorrigiert, in Abb. 88 blau) steigt aufgrund der Raumfeuchtebelastung kontinuierlich an: der höchste Wert im ersten Winter beträgt 13,8, 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.

Wie schon an Balken 6 beobachtet, reagiert die Luftfeuchte am ‚ID‘-Sensor schnell auf klimatische Einflüsse aus dem Raum (Abb. 89, grün), im Winter 2012/13 bleibt die Luftfeuchte dennoch unterhalb 96 % Luftfeuchte. Die fehlende Abdichtung des Luftspaltes um den Balkenkopf führt dazu, dass der Sensor am Ende der Balkentasche (gelb) auffällig agiert. Das wird besonders gut sichtbar im Februar 2012, als bei sehr kalten Außentemperaturen die Luft am Ende der Balkentasche ausgesprochen schnell aufweicht und wieder abtrocknet. Dies trifft jedoch nicht auf die Luftfeuchte auf der Balkenwange zu. Auch die Feuchte scheint nicht gleichmäßig verteilt, sondern sich nahe der Außenseite zu konzentrieren: Bei hoher Raumluftfeuchte Ende Dezember 2011 werden 90 % Luftfeuchte am Messpunkt ‚BA-St‘ überschritten, an ‚BA-Wa‘ bleibt die Feuchte unter 70 % und im Februar 2012 bilden sich für zwei Wochen Oberflächenkondensat an der Außenseite des Balkenaullagers, während in ungefähr 0,2 m Entfernung von diesem Sensor nur 80 % erreicht werden.

5.8.7 Profile im Feld 6, Balken 8 (ungedämmtes Referenzfeld)

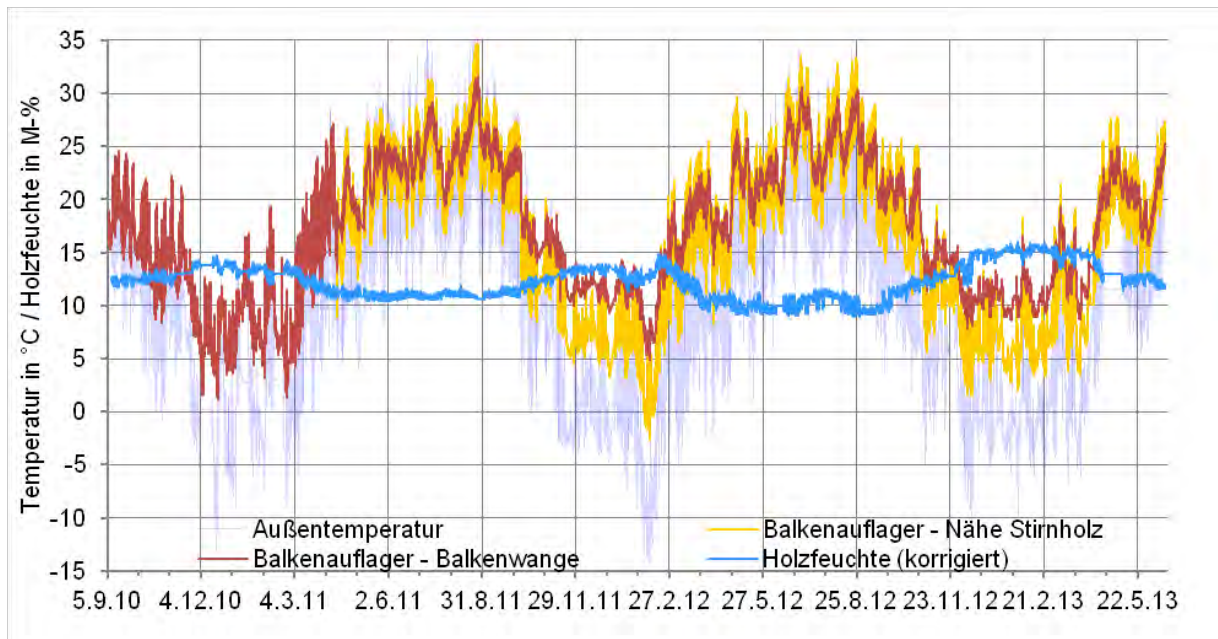


Abb. 90 Stundenwerte der Temperaturen und der Holzfeuchte an Balken 8: Balkenwange (braun), neben der Stirnfläche des Balkens (gelb), temperaturkorrigierte Holzfeuchte (blau) und Außentemperatur (blau transparent)

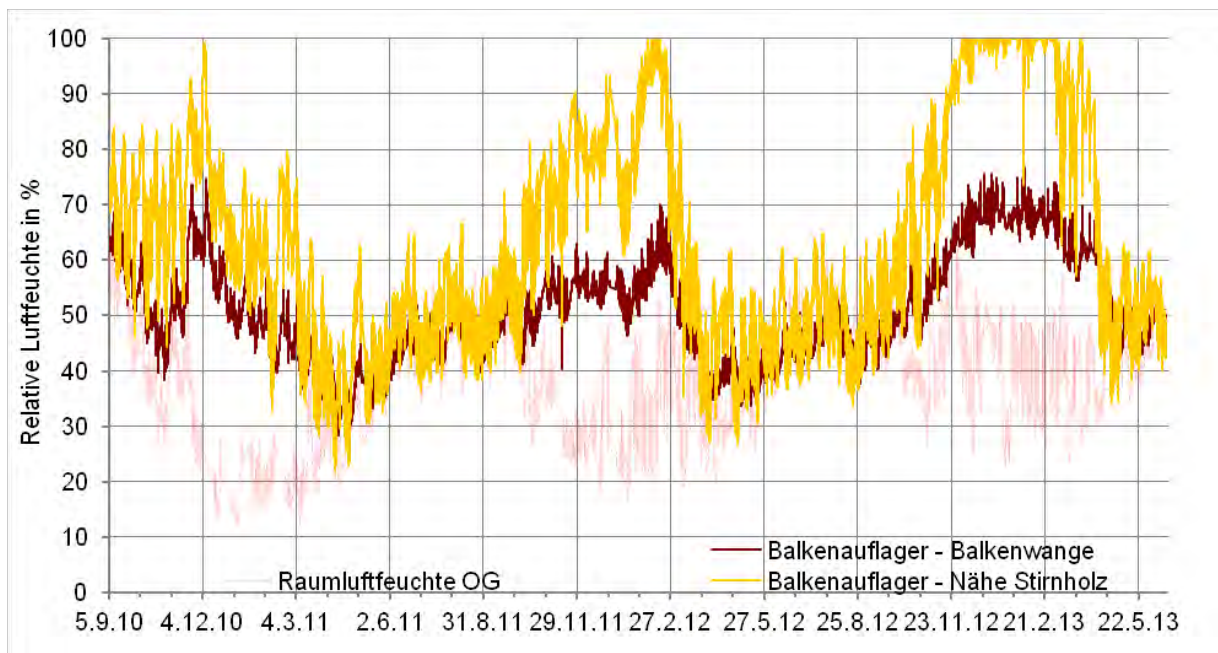


Abb. 91 Stundenwerte der relative Luftfeuchte an Balken 8: ehemalige Wandoberfläche (grün & hellblau), Balkenwange (braun), neben der Stirnfläche des Balkens (gelb) und Raumlufteuchte im OG (rot transparent)

Schon bei der Gegenüberstellung der Temperaturen ‚Ba-St‘ in der Nähe des Balkenkopfes (Abb. 64) war aufgefallen, dass die Temperaturen im ungedämmten Feld ausgesprochen lebhaft verlaufen, auch im Vergleich zu Balkenaufleger 7. Durch die Darstellung der Stundenwerte in Abb. 90 tritt dies noch deutlicher hervor (gelb), auch im Vergleich zur Balkenwange (braun). Besonders ausgeprägt ist dieses Verhalten offenbar 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 ist $-2,6^{\circ}\text{C}$, was etwas verwundert, da am ebenfalls nicht abgedichteten aber gedämmten Balken 7 $+1^{\circ}\text{C}$ als niedrigste Temperatur verzeichnet wurde. Zu bedenken ist dabei die konstruktive Gestaltung des Auflagers, bzw. reicht der Sensor ‚Ba-St‘ mit 0,38 m besonders weit in das Auflager hinein.

Die höchste gemessene Differenz zwischen den beiden nur knapp 0,2 m entfernten Temperaturfühlern beträgt 7,8 K im Februar 2012. Im ebenfalls nicht abgedichteten siebenten Auflager (Schilf) beträgt der Unterschied noch 4,5 K, im teilabgedichteten sechsten Auflager (Schilf) nur 2,4 K.

Die Holzfeuchte (temperaturkorrigiert, in Abb. 90 blau) verläuft ausgesprochen gleichmäßig und reagiert kaum auf den unruhigen Verlauf der Luftfeuchte oder Temperatur im Balkenaufleger. Der Maximalwert von 16,0 M-% wird wieder im Februar 2013 erreicht.

Die hohen Temperaturunterschiede sind dafür verantwortlich, dass es zu sehr großen Differenzen der relativen Luftfeuchte innerhalb der Balkentasche kommt (Abb. 91, gelb und braun). Während am Sensor ‚BA-Wa‘ (braun) nur sehr kurzzeitig im ersten Winter 70 % Luftfeuchte überschritten wurden, und in den folgenden Winterperioden höchstens 75 %, bildet sich am Sensor ‚Ba-St‘ (gelb) im zweiten Winter vereinzelt und im dritten Winter sehr häufig Oberflächenkondensat. Im Gegensatz zu dieser Messposition im nicht abgedichteten Schilfaufleger (Abb. 89) verharrt die Luftfeuchte jedoch nicht bei 100 % Luftfeuchte, sondern sinkt immer wieder ab. Dies könnte ein Grund dafür sein, dass die Holzfeuchte nicht so hoch ist wie im siebenten Auflager.

5.9 Abdichtung der Balkenaufлагertaschen

Der diffusionsoffene Anschluss der Innendämmung an den Balken 7 bzw. das Belassen des offenen Auflagers an Balken 8 hat zur Folge, dass die Temperatur und Luftfeuchte in den Balkentaschen schneller und offensichtlicher auf klimatische Veränderungen im Obergeschoss reagieren. Unter anderem Luftdruckdifferenzen und die temperaturabhängige Differenz des Wasserdampfteildruckes zwischen Räumen und Außenbereich verursachen im Winter üblicherweise einen Wasserdampftransport von innen nach außen und folglich auch von den Räumen in die Balkenaufleger. Dieses Phänomen trat besonders deutlich auf, wenn die Luftbefeuchter betrieben wurden.

Mit der Befeuchtung der Luft wurde am 2. November 2012 begonnen. Dies lässt sich leicht am Gang der Luftfeuchte im Obergeschoss erkennen (Abb. 92, hellblau), ebenso das Ende

der aktiven Befeuchtung Anfang April 2013. Die mittleren Temperaturen der beiden Räume befinden sich während dieser Zeit in einem üblichen Bereich, zumindest die mittlere Luftfeuchte im Obergeschoss war deutlich von der Befeuchtung geprägt (1. OG: 21,2°C und 43,1 %, DG: 19,4°C und 56,6 %, Außentemperatur: 1,5°C).

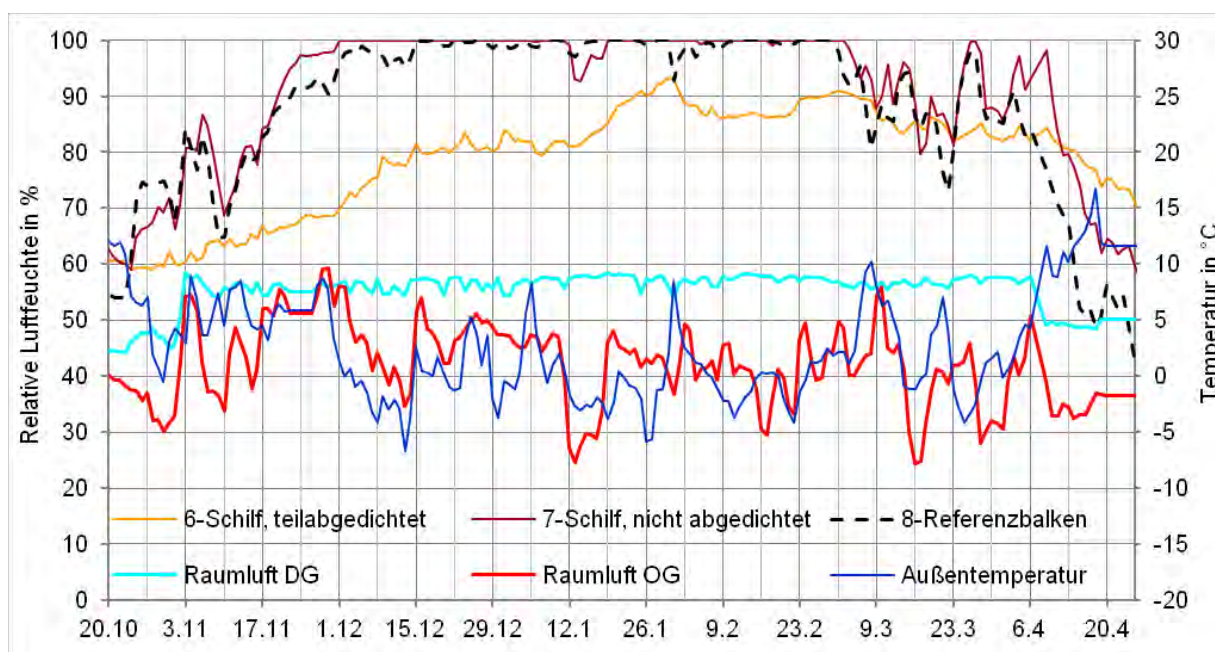


Abb. 92 Tageswerte der Luftfeuchte in Stirnholznähe (BA-St) 6 bis 8 und im Dach-(hellblau) - und Obergeschoss sowie Tageswerte der Außentemperatur (blau) vom 20.10. 2012 bis zum 25.4.2013

In Abb. 92 ist der Gang der Luftfeuchten auf der Außenseite der Balkentaschen von drei Deckenbalken in unmittelbarer Nähe zum Stirnholz (BA-St) dargestellt. Sehr deutlich treten darin die Differenzen zwischen den unterschiedlich abgedichteten Balkentaschen zutage. Die mittleren Luftfeuchten sind um den 20. Oktober 2012 noch ungefähr gleich. Doch schon ohne Luftbefeuchtung reagieren die Auflager in klimatechnischer Hinsicht unterschiedlich auf einen kontinuierlichen Abfall der Außentemperatur (Abb. 92, blau) vom 20. bis zum 30. November 2012 auf ungefähr 0°C. Die Luftfeuchte im teilabgedichteten Auflager 6 (orange) bleibt praktisch unverändert, in den nicht abgedichteten Auflagern dagegen nimmt sie bereits zu, besonders im Referenzfeld (in Abb. 92 schwarz gestrichelt). Kurz danach springt die Luftfeuchte in den nicht abgedichteten Auflagern auf über 80 % an, als die Befeuchter in beiden Räumen eingeschaltet wurden (braun und schwarz). Interessant ist, dass die Feuchte um den 5. November auf einmal wieder deutlich abfällt, obwohl der Befeuchter im Dachgeschoss bis in den April 2013 bei voller Leistung fast 60 % Raumlufftfeuchte konstant hält. Dies genügt offensichtlich nicht, um das Luftfeuchteniveau in den Auflagern 7 und 8 zu halten. Vielmehr fällt sie analog zur Raumlufftfeuchte im Obergeschoss (rot) wieder ab. Letzteres wurde durch gelegentliche Ausfälle des Befeuchters im Obergeschoss und durch Lüften verursacht, denn nach Auskunft der Kindergärtnerinnen wurden Luftfeuchten über ungefähr 50 % als unangenehm hoch empfunden, weshalb offensichtlich am 5. November, einem Montag, morgens zunächst gelüftet wurde. Erst als sich in den folgenden Tagen die Feuchte

im Obergeschoss tendenziell wieder erhöht, und besonders während niedriger Außentemperaturen ab Ende November, werden 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 fällt die mittlere Raumlufffeuchte von 45 auf unter 30 % ab, worauf die Luftfeuchte in beiden nicht abgedichteten Balkentaschen zeitweise sinkt, obwohl zeitgleich auch die Außentemperatur abnimmt. Erst als die Raumlufffeuchte im Obergeschoss wieder ansteigt, wird wieder die maximale Luftfeuchte von 100 % registriert. Das wärmere Balkenaufleger 8 feuchtet offenbar langsamer auf und trocknet schneller ab, wie sich ab März 2013 im Vergleich mit Auflager 7 (Schilf, in Abb. 92 braun) erkennen lässt.

Während der hohen Feuchtebelastung in den nicht abgedichteten Auflagern bietet sich im teilabgedichteten Auflager 6 (gelb) ein ganz anderes Bild. Viel gemächlicher und gleichmäßiger nimmt dort die Luftfeuchte zu. Das Klima im Auflager scheint weitgehend entkoppelt vom Klima des Obergeschosses zu sein, denn im gelben Graph bildet sich das kurzzeitige Auf und Ab aus dem Obergeschoss nicht ab. Statt über einen längeren Zeitraum hinweg 100 % beträgt die höchste Luftfeuchte nur kurzzeitig 93 %. Die verzögerte Auffeuchtung korrespondiert zu einer verzögerten Abtrocknung. So stellen sich an den ‚Ba-St‘-Messfühler beider nicht abgedichteten Auflager nach dem Abschalten der Befeuchter viel schneller 60 % Luftfeuchte ein, als an den Messfühlern im sechsten Auflager.

Gleichwohl spielen sich die hohen Luftfeuchten nur am Ende des Auflagers ab. An der Messposition ‚BA-Wa‘ sind die Messungen weit weniger kritisch.

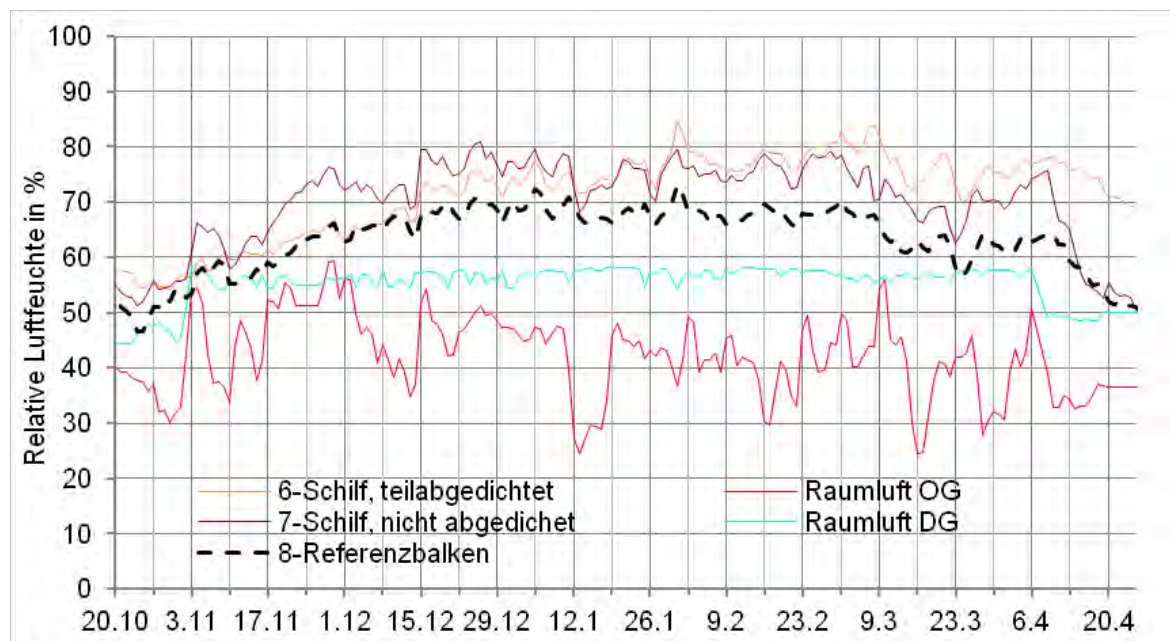


Abb. 93 Tageswerte der Luftfeuchte an den Balkenwangen (BA-Wa) 6 bis 8 und im Dach- (hellblau) - und Obergeschoss sowie Tageswerte der Außentemperatur (blau) vom 20.10. 2012 bis zum 25.4.2013

Hier erweist sich das abgedichtete Schilf-Auflager (gelb) als das am höchsten belastete, wengleich die Messwerte mit maximal 84 % völlig unproblematisch sind (Abb. 93).

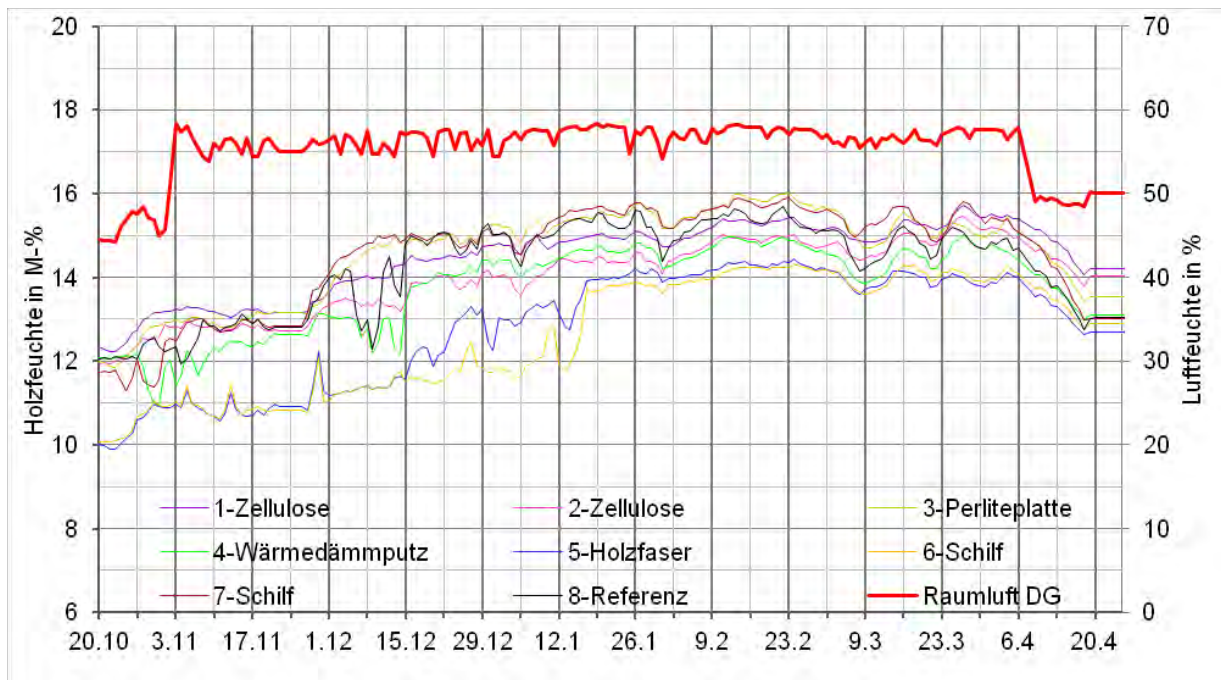


Abb. 94 Holzfeuchte in den Balkenköpfen bzw. an der nassesten Stelle ('HF-St') und Raumluftfeuchte im Dachgeschoss vom 20.10. 2012 bis zum 25.4.2013 (Tagesmittelwerte)

Wegen der Trägheit des Holzes wirken sich die hohen Luftfeuchten kaum auf die Holzfeuchte am Stirnholz der Balken aus (Abb. 94). Erst mit den sinkenden Außentemperaturen Ende November 2012 setzt 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 setzen sie sich nicht von den anderen Linien ab. Die durch innere Feuchtelast und niedrigen Außentemperaturen ausgelöste Steigerung in den Holzfeuchtekurven im Zeitraum vom 2. November 2012 bis zum 8. April 2013 beläuft sich auf ungefähr 3 M-%.

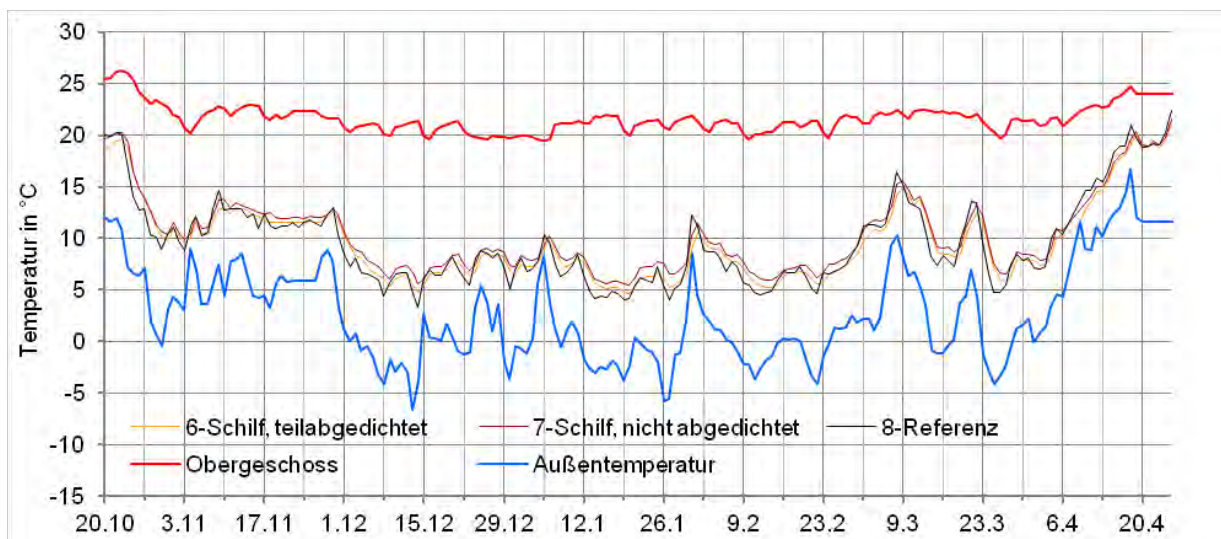


Abb. 95 Temperatur am Ende der Balkenauglagentaschen 6 bis 8 sowie Temperatur im Obergeschoss und Außenbereich vom 20.10. 2012 bis zum 25.4.2013 (Tagesmittelwerte)

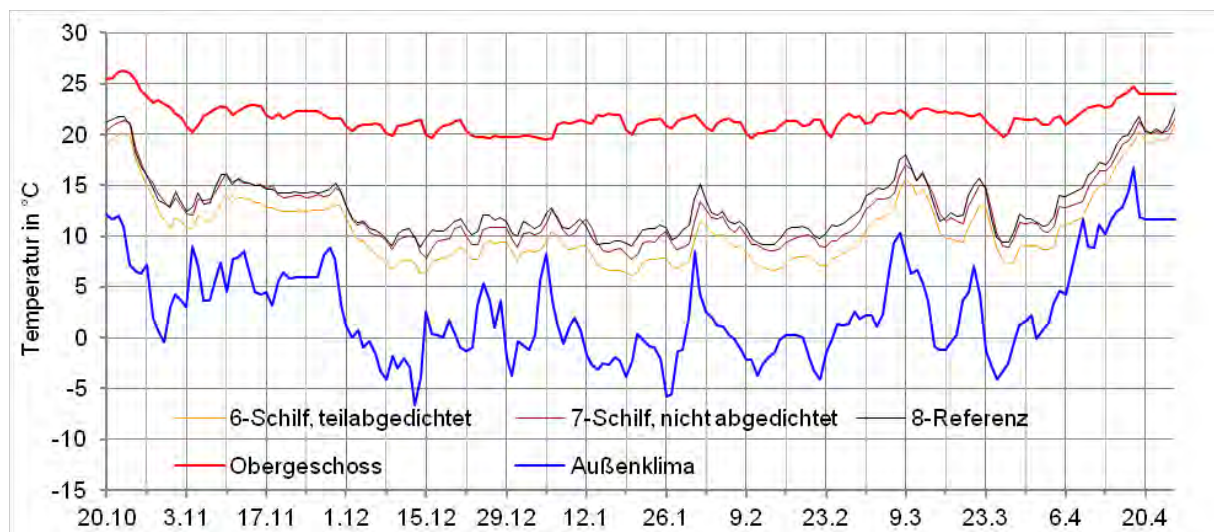


Abb. 96 Temperatur in der Mitte der Balkenaullager 6 bis 8 sowie Temperatur im Obergeschoss und Außenbereich vom 20.10. 2012 bis zum 25.4.2013 (Tagesmittelwerte)

Immer wieder werden in der Praxis Balkentaschen nicht abgedichtet mit dem Argument, den Balkenkopfbereich durch einströmende Raumluft aufwärmen zu wollen. 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°C im Februar 2012 maximal knapp 2 K. Während im teilabgedichteten Balkenaullager 6 dabei durchschnittlich 77 % Luftfeuchte gemessen wurden, bildete sich hingegen im nicht abgedichteten Balkenaullager 2011/12 immer wieder Kondensat. In den kältesten Monaten Dezember 2012 bis Ende Februar 2013 beläuft sich die Temperaturdifferenz zwischen den Messpositionen ‚Ba-St‘ auf nur 0,7 K und lässt sich in Abb. 95 kaum ausmachen. Erkennbarer ist sie an der Balkenwange, in der Mitte der Balkenaullagertasche (BA-Wa, Abb. 96): 1,8 K. Die größere Temperaturerhöhung ist an dieser Stelle jedoch weniger wichtig, da die größere Feuchtebelastung am Stirnende vorherrscht. Offensichtlich war die aufgrund der „Luftumspülung“ höhere Temperatur in den nicht abgedichteten Balkenaullagern nicht groß genug, um die Feuchtebelastung zu senken.

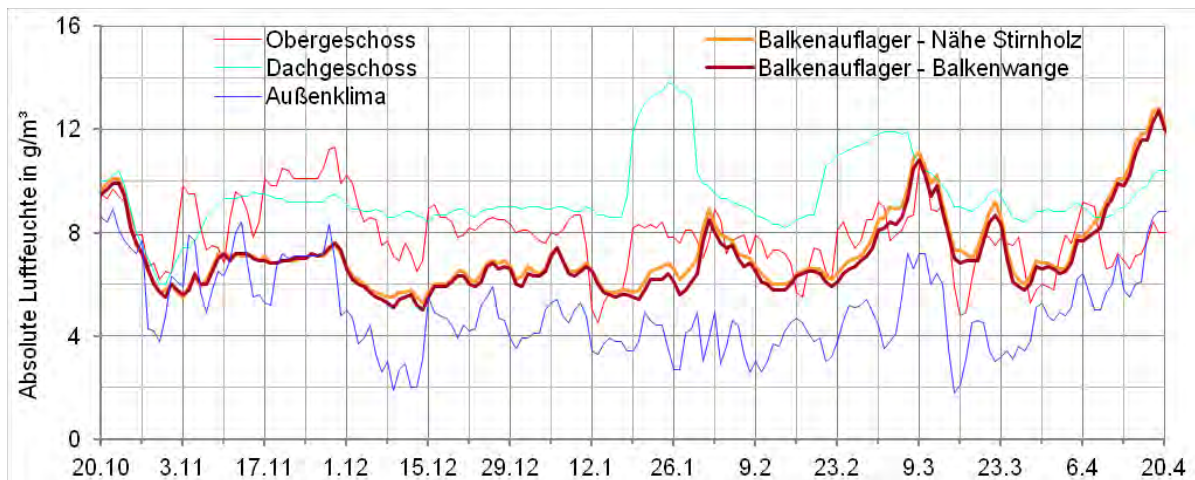


Abb. 97 Gemittelte Tageswerte der absoluten Feuchte im Balkenaufleger 6, in beiden Räumen und des Außenklimas vom 20.10.2012 bis zum 20.4.2013

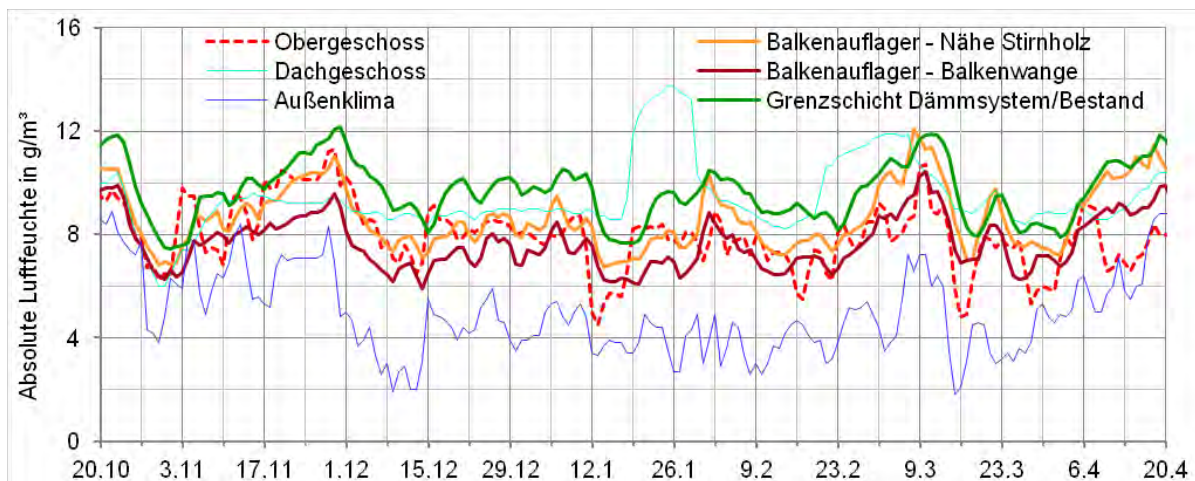


Abb. 98 Gemittelte Tageswerte der absoluten Feuchte im Balkenaufleger 7, an der Messposition ‚ID‘, in beiden Räumen und des Außenklimas vom 20.10.2012 bis zum 20.4.2013

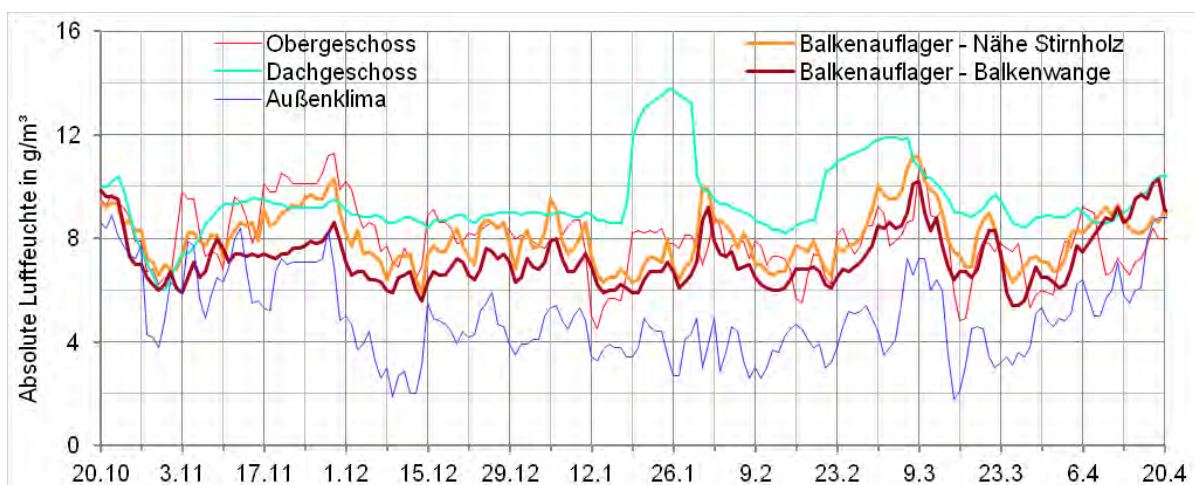


Abb. 99 Gemittelte Tageswerte der absoluten Feuchte im Balkenaufleger 8, in beiden Räumen und des Außenklimas vom 20.10.2012 bis zum 20.4.2013

Die Diagramme mit der Verteilung der absoluten Luftfeuchte bestätigen die vorherigen Aussagen. Im sechsten Balkenaufleger herrscht im näher untersuchten Zeitraum eine relativ homogene Feuchteverteilung vor (Abb. 97). Wie die relative ist die absolute Feuchtemenge in der Nähe des Stirnholzes (in Abb. 97 gelb) ebenfalls fast durchgängig größer als an der Balkenwange (braun), allerdings nur um $0,2 \text{ g/m}^3$ (November bis Ende Februar). Die absolute Feuchtemenge steigt während der Zeit hoher relativer Feuchte kaum an, die Zunahme der relativen Feuchte ist demnach in erster Linie auf die niedrigeren Außentemperaturen zurückzuführen. Durch die Abdichtung zum Obergeschoss (hellblau) 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 scheint sich ebenso wenig im Lauf der absoluten Feuchte niederzuschlagen wie eine weitere derartige Phase ab 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 (Abb. 98). Die beiden Linien bewegen sich zwischen November und Ende Februar mit einem Abstand von durchschnittlich $1,0 \text{ g/m}^3$. Die starke Kopplung an das Außenklima bleibt allerdings in abgeschwächter Form bestehen. So nimmt Ende November die absolute Luftfeuchte im siebenten Auflager stärker zu als im sechsten, andererseits fällt die Feuchtemenge am 11. Jänner nicht übermäßig ab, als im Obergeschoss die absolute Feuchte von knapp 9 auf $4,5 \text{ g/m}^3$ sinkt. Erstaunlich ist, dass die absolute Feuchte auf der kalten Seite des Dämmsystems so hoch ist (Abb. 98, grün). Bis auf kurze Ausnahmen ist die absolute Feuchtemenge hier am höchsten, da Lehmkleber und Bestandsputz viel Feuchte speichern. Dabei ist zwischen grüner und brauner Linie eine größere Parallelität festzustellen, als zwischen den beiden Linien im Balkenaufleger, gelb und braun.

Im Referenzfeld (Abb. 99) beläuft 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 etwas stärker das Mikroklima im Auflager als im teilabgedichteten Feld 6.

Eine direkte Gegenüberstellung der absoluten Luftfeuchte an der Messposition ‚Ba-St‘ in den Auflager 6 und 7 zeigt, das zwischen November 2012 und Ende Februar 2013 die absolute Luftfeuchte im nicht abgedichteten Balken im Mittel um $1,8 \text{ g/m}^3$ höher verläuft. Folglich verursacht die fehlende Abdichtung auch eine spürbar höhere absolute Feuchtelast im Balkenaufleger. Hauptsächlich die Dämmung dürfte dafür verantwortlich sein, 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.

5.10 Mögliches Schimmelpilzwachstum in den Balkenauflagern

Mit Hilfe des Postprozessors der Software Delphin5 kann überprüft werden ob unter den klimatischen Randbedingungen in den balkenauflagern Schimmelpilzwachstum möglich wäre. Das implementierte Schimmelpilzprognosemodell wurde wie das Modell zur Holzzerstörung 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 Luftfeuchte ein. Ferner muss die Anfälligkeit der Materialoberfläche und des Untergrundes angegeben werden. Als Ergebnis der Berechnungen wird ein Schimmelindex von 0 bis 6 ausgegeben, dessen Bedeutung in Tab. 20 erläutert wird.

Tab. 20 Schimmelindex nach dem VTT-Modell zur Prognose von Schimmelpilzwachstum

Schimmelindex	Bedeutung
0	Kein Wachstum
1	Entdecktes mikroskopisches Wachstum, stellenweise beginnendes Wachstum, wenige Hyphen
2	Entdeckbares mikroskopisches Wachstum, mehrere Kolonien von Hyphen haben sich gebildet
3	Wachstum ist mit freiem Auge zu sehen, Mycel bedeckt weniger als 10% der Fläche (beginnende Sporenbildung) ODER entdeckbares mikroskopisches Wachstum, weniger als 50% sind bedeckt
4	Wachstum ist mit freiem Auge zu sehen, Mycel bedeckt ca. 10-50% der Fläche ODER entdeckbares mikroskopisches Wachstum, mehr als 50% sind bedeckt
5	Wachstum ist mit freiem Auge zu sehen, stellenweise starkes Wachstum oder Mycel bedeckt mehr als 50%
6	Sehr starkes Wachstum, Mycel bedeckt nahezu 100%

Zu beachten ist, dass die potentiell gesundheitsgefährdende Sporenbildung erst ab einem Index von ‚3‘ einsetzt.

Getrennt für beide Messpositionen im Auflager wurde der Schimmelindex berechnet. Die Anfälligkeit der Materialoberfläche und des Untergrundes wird in vier Stufen eingeteilt, wobei hier die zweithöchste, ‚sensitiv‘ (Anfälligkeitsstufe 2: „Hobelmateriale, papierbeschichtete Produkte, Holzwerkstoffe“) gewählt wurde. Dem liegt eine Annahme auf der sicheren Seite zugrunde dergestalt, dass sich noch während der Bauzeit oder in den Jahren danach organisches Material in den Auflagern abgesetzt hat. Da im Verlauf des zweiten Jahres grundsätzlich oft ein Zuwachs im Schimmelindex festgestellt wurde, wird der maximale Schimmelindex für die ersten beiden und das dritte Jahr getrennt angegeben.

Tab. 21 Maximaler Schimmelindex in den Auflagern

Balkennr. - Dämmsystem	Stelle im Auflager	1./2. Jahr	3. Jahr
1-Zellulose	Stirn	0.1	0.1
	Wange	1.2	3.0
2-Zellulose	Stirn	0	0
	Wange	0.5	2.2
3-Perliteplatte	Stirn	0	0
	Wange	0.4	1.7
4-Dämmputz	Stirn	0	0
	Wange	0.5	0.5
5-Holzweichfaser	Stirn	0	0
	Wange	0	0.5
6-Schilf	Stirn	0	0
	Wange	0	0.4
7-Schilf	Stirn	1.2	1.4
	Wange	0.7	3.6
8-Referenz	Stirn	0	0
	Wange	0.3	2.7

Die höheren Luftfeuchten aber niedrigeren Temperaturen am Ende der Auflagertaschen führen offenbar dazu, dass sich dort seltener oder gar nicht Schimmelpilz bilden kann (Tab. 21). Ein Schimmelindex von 3 wurde nur in den nicht abgedichteten Auflagern detektiert, sowie an der Balkenwange des Streichbalkens. 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.

Zu diskutieren ist allerdings, inwieweit ein mögliches Schimmelpilzwachstum in den Auflagern überhaupt relevant ist, selbst bei den nicht abgedichteten Auflagern. Die im Auflagerbereich vorherrschenden (Kriech-)Strömungsgeschwindigkeiten und die konstruktiven Hindernisse zwischen Innenraum und Auflager stellt höchstwahrscheinlich eine nicht überwindbare Barriere für Schimmelpilzsporen dar.

5.11 Konvertieren und Auswerten der Messungen

Für das Projekt OEKO-ID wurde eine Vielzahl von Messsensoren eingesetzt, 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 möglich, wobei bei älteren Versionen die Beschränkung der bearbeitbaren Zeilen auf 32000 zu gering ist. Auch eine neuere Version von Microsoft Excel kam 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 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, unter Umständen komfortablere Auswertungssoftware, wie beispielsweise Microsoft Access, zu verwenden.

Besonders aufwändig ist die Beurteilung der Holzfeuchtesensoren, worauf schon in Abschnitt 5.6 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 zum Teil korrigiert. 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 und gegebenenfalls korrigierten Daten sind in Excel-Dateien dokumentiert und können eingesehen werden.

5.12 Resümee der hygrothermischen Messungen

Bezüglich des Raumklimas während der Kondensationsperioden wurde festgestellt, dass die Temperaturen im Zimmer des 1. Obergeschoss im Vergleich zu üblichen Wohnräumen etwas wärmer, im Dachgeschoß dagegen kälter waren. Im ersten Winter 2010/11 waren die Luftfeuchten ausgesprochen niedrig, weshalb in den folgenden Kondensationsperioden Befeuchter verwendet und Abdichtungsmaßnahmen vorgenommen wurden. Da in der zweiten Kondensationsperiode die gewünschte Raumfeuchte nicht erreicht werden konnte, wur-

den im Oktober 2012 weitere, umfangreichere Abdichtungsmaßnahmen ausgeführt, welche schließlich im Winter 2012/13 zu der gewünschten, hohen Feuchtelast führten.

Aufgrund der Einbaufeuchte wurden im ersten Winter in der Zellulosedämmung sehr lange 100 % Luftfeuchte gemessen. Dagegen war eine kurze Zeit von zwei bis drei Wochen im zweiten Winter mit 100 % Luftfeuchte, und vor allem im letzten Winter 2012/13 auf die hohe Raumluftfeuchte verbunden mit niedrigen Außentemperaturen zurückzuführen. Der Austrocknungsprozess des Wärmedämmputzes dauerte vermutlich bis in den Herbst 2011 hinein. Dies konnte nur aus der Beurteilung anderer Messfühler und einer Handmessung geschlossen werden, da beide Luftfeuchtesensoren in dieser Kondensationsebene z.T. keine bzw. unplausible Daten lieferten. Nachweislich in der Zellulosedämmung und vermutlich im Feld mit Wärmedämmputz wurde am häufigsten eine Luftfeuchte von 100 % festgestellt. 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 (frühen) Sommer scheinen die anderen Systeme mit Holzweichfaser, Schilf und Perliteplatte besser geeignet. Nach dem Abtrocknen der Einbaufeuchte wiederum erwies sich der Wärmedämmputz als unproblematisch.

Die anderen Dämmsysteme mit Perliteplatten, Holzweichfaser und Schilf überzeugten durch vergleichsweises schnelles Austrocknen und hygrothermisch unproblematisches Verhalten.

Alle gemessenen Holzfeuchten waren zum Großteil weit unterhalb einschlägiger Grenzwerte für Auskeimung und Wachstum. Selbst wenn 100 % relativer Luftfeuchte für längere Zeiträume in den Dämmsystemen oder am Stirnende der Auflagertasche festgestellt wurden, schlug sich dies kaum in der Entwicklung der Holzfeuchten 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 (Balkentasche). Die Holzbalken reagierten zeitlich stark verzögert und mit nur leichter Erhöhung der Holzfeuchte. Die Holzfeuchte im Stirnbereich des Streichbalkens war höher als in der Ebene der Innendämmung, obwohl in nur 0,2 m Entfernung für längere Zeit 100 % Luftfeuchte gemessen worden waren. Holzbalken scheinen sich u. a. durch eine Wärmebrückenwirkung hygrothermisch günstige Verhältnisse zu schaffen.

Der Wärmedämmputz mit Thermosilit wies eine ungewöhnlich lange Austrocknungszeit von ungefähr über einem Jahr auf und erreichte die mit Abstand höchsten Holzfeuchtwerte bis zu 19 M-% (temperaturkorrigiert). Nach der langen Abtrocknungsphase bewegte sich die Holzfeuchte im Durchschnitt der anderen Kurven.

Das Balkenaufleger in einem mit Schilf gedämmten Feld war nicht abgedichtet, was eine signifikant höhere Luftfeuchtebelastung in der Balkentasche nach sich zog. Die Balkenaufleger sollten deshalb konvektionshemmend abgedichtet sein, sodass keine konvektive Verbindung zwischen Balkenaufleger und Balkenzwischenraum besteht. In den nicht abgedichteten Auflagern und dem Streichbalken wurde an einer Messposition mögliches Schimmelpilzwachstum mit Sporenbildung prognostiziert.

In den nicht abgedichteten Balkenauflagern wurde eine höhere absolute und vor allem relative Luftfeuchte festgestellt. Die höhere Feuchtebelastung schlug sich allerdings kaum auf die Holzfeuchte am Balkenkopf nieder. Derzeit wird trotzdem empfohlen, die Balkentaschen abzudichten, das Abdichten des unteren Luftspaltes erscheint bei vergleichbaren Balkenauflagern und ohne eindringenden Schlagregen ausreichend zu sein. Aufwändige Detaillösungen zur Abdichtung, wie sie vom [Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser 2005] für diffusionsdichte Innendämmsysteme vorgeschlagen wurden, erscheinen bei diffusionsoffenen, kapillar aktiven Dämmsystemen als nicht notwendig. Offenbar werden im Testhaus die Feuchteverhältnisse in den nicht abgedichteten Balkentaschen in höherem Maß vom Raumklima des unteren Geschosses bestimmt. 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 Dichtigkeit 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 zweidimensionale Softwareprogramme wie Delphin5 oder WUFI zum Einsatz ([76] und [77]). Bei Balkenauflagern handelt es sich allerdings um dreidimensionale Konstruktionsdetails, die zweidimensional nicht adäquat abgebildet werden können. Auf den Bau spezialisierte, marktverfügbare, dreidimensionale Programme wie Heat3 [Blomberg 2001] oder Antherm ([78]) erfassen nur thermische Prozesse bzw. Wasserdampfdiffusion. Praktikable Software für hygrothermische, dreidimensionale Simulationen mit der Möglichkeit einer Erweiterung Richtung Luftströmungen steht am Markt noch nicht zur Verfügung. Ansätze zur dreidimensionalen Modellierung fehlt noch eine ausführliche Validierung der implementierten Modelle oder ist am Markt nicht verfügbar ([Wegerer 2010]). Die Adaptation multifunktionaler Softwaretools an Baubelange ist anspruchsvoll und zeitaufwändig [Janetti et al. 2011]. Zudem sind dreidimensionale Simulationen mit einem höheren Eingabe-, Berechnungs- und Auswertungsaufwand verbunden.

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

Innerhalb des Projektes waren die Messreihen mit Hilfe der Software Delphin5 nachzuvollziehen, um die Simulationsmodelle anhand der Messdaten zu validieren. Damit eröffnen sich weitreichende Möglichkeiten für Variantenstudien, welche unterschiedliche Dämmsysteme, Klimabelastungen oder Bestandskonstruktionen umfassen. Die folgenden Ausführungen basieren auf den sehr umfangreichen Messdaten aus Kapitel 5 bzw. werden weitere Simulationen auch nach Projektende im Rahmen einer Dissertation weitergeführt.

6.1 Verwendete Simulationsprogramme

6.1.1 Delphin5 (Institut für Bauklimatik Dresden, TU Dresden)

Für die hygrothermische Analyse von Wand- und Dachaufbauten stehen verschiedene Bemessungs- und Simulationsverfahren zur Verfügung. Während die Bemessungsverfahren von stark vereinfachten Materialeigenschaften und konstanten Klimabedingungen ausgehen, wird bei Simulationsverfahren in der Regel 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 DIN 4108-2 bzw. EN ISO 13788,
- das hygrothermische, so genannte Glaser-Verfahren und

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

Anhang F der Richtlinie EN ISO 13788 beschreibt Eigenschaften fortgeschrittener hygrothermischer Simulationsverfahren, zu denen Softwareprogramme wie WUFI (Fraunhofer Institut für Bauphysik) oder Delphin5 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 durch die Vielzahl der Rechenoperationen nicht mehr möglich. Schließlich sind die Simulationsverfahren erst durch die Entwicklung der Rechentechnik und der numerischen Lösungsverfahren möglich geworden. Die Einschränkungen der Bemessungsverfahren sind aufgrund der analytischen Lösungsmethoden umfangreicher als bei den Simulationsverfahren, deren numerische Lösungsmethoden größere Freiheiten in der physikalischen Modellierung erlauben. Einige Einschränkungen der Bemessungsverfahren, insbesondere des Glaser- und Monatsbilanzverfahrens werden beispielsweise im Abschnitt 6.3 der EN ISO 13788 aufgezählt, so z. B.

- die Wärmeleitfähigkeit ist nicht feuchteabhängig bzw. 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 und
- Schlagregen, Sonneneinstrahlung oder langwellige Abstrahlung kann nicht angesetzt werden.

Die Berücksichtigung dieser Effekte in Delphin5 bedingt natürlich eine potenziell höhere Genauigkeit, wenn entsprechend genaue Eingabedaten zur Verfügung stehen. Die Berechnungen werden numerisch mit der Finite-Differenzen-Methode gelöst und können auf zweidimensionale und rotationssymmetrisch dreidimensionale Konstruktionsdetails angewendet werden. Die größere Freiheit in der Modellierung wird aber durch einen höheren Aufwand bei der Beschaffung der Eingabewerte (Konstruktion, Materialkennwerte, Klima) erkaufte. Die Vielzahl der Ergebnisausgaben bedeutet auch einen höheren Aufwand bei der Auswertung.

Delphin5 kann gemäß EN ISO 10211 als genaues Verfahren eingestuft werden, da die Berechnungsergebnisse der Prüferferenzfälle erhalten werden.

6.1.2 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]. HEAT3 löst die Wärmeleitungsgleichungen mit Hilfe der Methode der expliziten finiten Differenzen (FEM). Der Nutzer wählt das Berechnungsnetz; das stabile Zeitintervall wird automatisch bestimmt. Es wird von der Lund-Gothenburg Group for Computational Building Physics an der Lund University (Schweden) entwickelt.

Heat3 kann gemäß EN ISO 10211 als genaues Verfahren eingestuft werden, da die Berechnungsergebnisse der Prüferferenzfälle erhalten werden.

6.2 Temperatur-Korrektur der Holzfeuchtesensoren

Die Messung der Holzfeuchte auf Basis des elektrischen Leitwiderstandes von Holz ist temperaturabhängig [Rode et Clorius 2004]. Das bedeutet, dass der elektrische Impuls eines Sensors bei unterschiedlichen Temperaturen letztlich unterschiedliche Holzfeuchten angibt. Dafür ist in den Sensoren ein Algorithmus zur Berücksichtigung der Temperaturabhängigkeit implementiert. In den eigentlichen Holzfeuchteelektroden ist keine Temperaturmessung vorgesehen, weshalb sie in der unmittelbaren Nähe des Holzfeuchtesensors erfasst werden muss. Im Falle der sehr langen Holzfeuchtesensoren durch die Mitte des Balkens war das nicht möglich, da nicht vorherzusehen war, an welcher Stelle entlang der ca. 0,35 m langen Sensoren gemessen wird, schließlich kann sich der Ort der Messung stetig ändern. Der Einfachheit halber wurden die Temperatursensoren an den Beginn der Holzfeuchteelektroden, in die Ebene der außenseitigen Oberfläche der Dämmplatten bzw. in die Klebemörtel-ebene, platziert (Abb. 100).

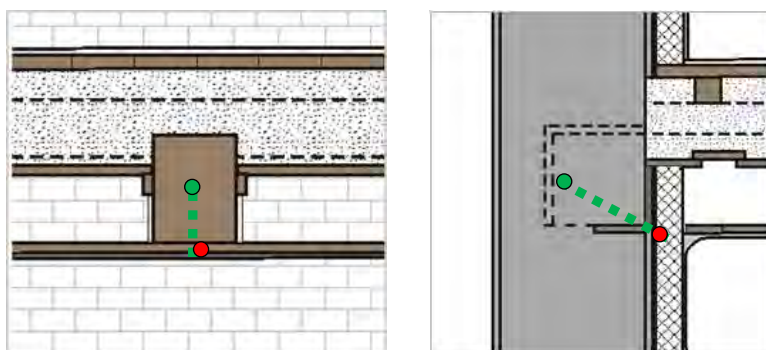


Abb. 100 Position des langen Sensors zur Messung der Holzfeuchte (HF-St, grün) und des Temperatursensors (rot)

Wie anhand der Sensoren in Balken 1 in Kapitel 5.6 herausgestellt werden konnte, waren die Messwerte des langen Sensors ‚HF-St‘ in der Mitte des Balkens grundsätzlich höher als die der nahe an der Innendämmung positionierten Sensoren ‚ID‘ (Abb. 69 und Abb. 70). Somit

wurde für die Temperaturkorrektur an der falschen Stelle gemessen. Es lag die Vermutung nahe, dass die Deckenbalken nahe dem Stirnholz am feuchtesten sind, da hier die niedrigsten Temperaturen vorlagen und sich der Wasserdampf in der Balkentasche nahe dem Stirnholz konzentriert (s. Kapitel 5.5.7).

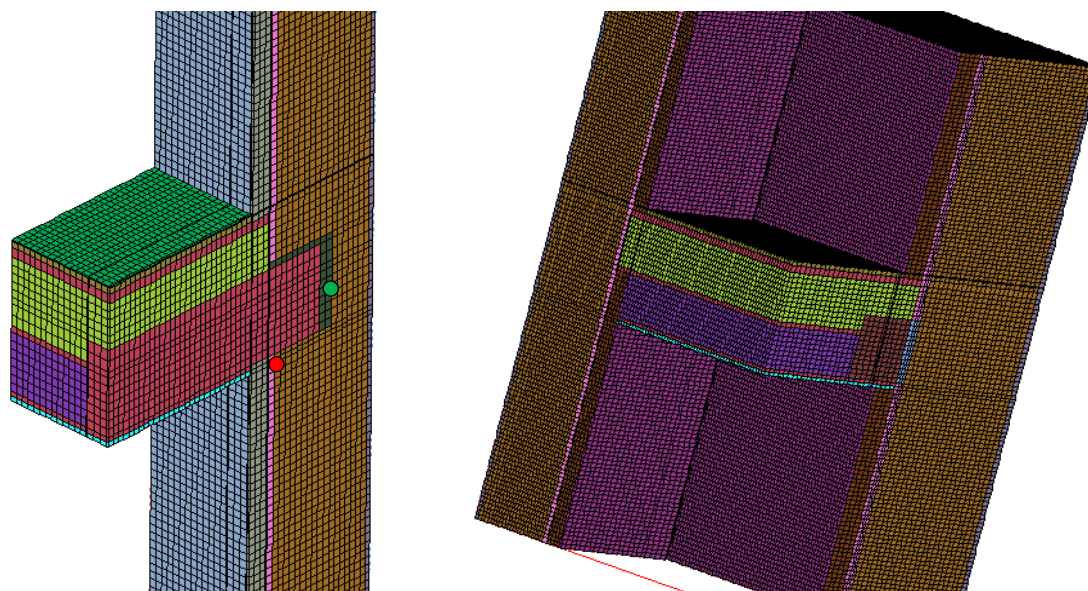


Abb. 101 Ausschnitte aus dreidimensionalen Simulationen mit Heat3D zur Ermittlung der Temperaturdifferenz zwischen den eingezeichneten Punkten: links: Modell für Balken 2 bis 7 (Schnitt durch Symmetrieebene), rechts: Modell für Streichbalken

Um die Holzfeuchtemesswerte nachträglich zu kalibrieren, 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, dem Stirnholz, ermittelt (s. Abb. 101). Sollte sich die tatsächliche Messstelle (zeitweise) näher am Innenraum befinden, liegen die temperaturkorrigierten Werte auf der sicheren Seite.

Dafür wurden drei verschiedene konstruktive Details berechnet:

1. Für die Balken 2 bis 7 eine Konstruktion mit durchschnittlichen Werten hinsichtlich des Wärmewiderstands des Innendämmsystems (80 mm dick), Balkenauglerlänge und der Balkenauglertiefe (s. Tab. 26).
2. Für den Streichbalken 1 die konkrete Auglersituation mit dem dort angebrachten Aufsprit-Zellulose-Dämmsystem.
3. Für den Balken 8 das ungedämmte Referenzfeld mit dessen konkreter Auglersituation.

Die Außentemperatur wurde 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 De-

ckenbalkens betrug in einem Set von Simulationen 0,13 W/(m·K), dem Berechnungswert der Wärmeleitfähigkeit für Wärmetransport quer zur Faserrichtung, und 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 K. Mit steigender Außentemperatur verringert sich die Differenz. Da es in der vorliegenden Version von HEAT3 nicht möglich war, eine richtungsabhängige Wärmeleitfähigkeit anzugeben, wurden die Ergebnisse mit beiden Wärmeleitfähigkeiten gemittelt.

In Tab. 22 sind die Ergebnisse der stationären Simulationen dokumentiert. Es stellte sich ein praktisch linearer Zusammenhang zwischen den unterschiedlichen Außentemperaturen und der Temperaturdifferenz ein, weswegen nur ein Teil der Ergebnisse abgebildet ist. Wie zu sehen ist, unterschied sich die Situation zwischen dem Streichbalken und den Balken der gedämmten Felder nicht wesentlich. Die Ergebnisse weichen allerdings stark von den thermischen Verhältnissen an Balken 8 ab, weil dort das Innenklima auf den Temperatursensor noch stärker einwirken kann.

Tab. 22 Ergebnisse der dreidimensionalen stationären Simulationen mit Heat3D: Temperaturdifferenz zwischen Temperatursensor und Stirnholz (siehe Abb. 101)

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 Herstellerfirma der verwendeten Messtechnik, Firma Schaller, stellte den in den Messensoren implementierten Algorithmus für die Berechnung der Temperaturkorrektur zur Verfügung:

1. Umrechnung gemessene Holzfeuchte am Stirnholz $u_{\text{Stirnholz,gemessen}}$ >> Wassergehalt (gemessen):

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

2. Temperaturkompensation & Umrechnung Wassergehalt (gemessen) >> temperaturkorrigierte Holzfeuchte $u_{\text{Stirnholz,T-korrigiert}}$:

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

Für den Temperaturkorrekturfaktor TK gilt laut der Firma Schaller:

Tab. 23 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	$TK = 1,3351 e^{-0,013 \theta}$

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 mutmaßlichen Messposition im Bereich des Stirnholzes $\theta_{\text{Stirnholz}}$ und dem Temperatursensor in der Ebene der Innendämmung $\theta_{\text{Balken,ID}}$ aus Tab. 22 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 $u_{\text{Stirnholz,T-korrigiert}}$ 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 eine Temperatur-Korrektur dieser Messreihen 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 > 1 verursacht, der die Differenzen von einem Messwert zum Nächsten hervorhebt (Abb. 68). Die temperaturkorrigierten Diagramme der Holzfeuchten sind in den Abb. 68 bis Abb. 70 zu sehen.

6.2.1 Einfluss der Balkenköpfe auf die ‚ID‘-Sensoren

Als erster Schritt zur Simulation der Messdaten wurden die quasi-eindimensionalen Messbereiche in der Höhe der ‚ID‘-Sensoren simuliert. Die Simulation eines Schnittes durch einen Balkenkopf ist aufgrund der höheren Anzahl diskretisierter Elemente langwieriger als eine Simulation, in welcher der Schnitt durch das Feld zwischen den Balkenköpfen geführt wird. Um zu überprüfen, inwieweit der Deckenbalken noch auf die hygrothermischen Vorgänge an den ‚ID‘-Sensoren Einfluss nimmt, die sich nur ungefähr 0,2 m unterhalb des Balkens befinden, wurden wiederum dreidimensionale, thermische Simulationen 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 ,ID'-Sensorposition 0,2 m unterhalb des Deckenbalkens zu einer Messposition zwischen den Balken, ungefähr 0,45 m von der Balkenachse entfernt, betrug weniger als 0,1 Kelvin. Die Wärmeleitfähigkeit des Holzbalken, 0,13 oder 0,27 W/(m·K), hatte dabei praktisch keinen Einfluss. Somit ist im Bereich der ,ID'-Sensoren zwischen Dämmsystem und Bestandskonstruktion der Einfluss der Deckenbalken unerheblich.

6.3 Einfluss von Schlagregen

Der Einfluss von eindringendem Schlagregen wird in mehreren Publikationen immer wieder als entscheidend für die hygrothermische Situation an Balkenköpfen angesehen (WTA E-8-14 [74] und [Kehl et al. 2013b]). Vollflächig verputzte Außenoberflächen mit wasserhemmend ausgebildetem Putz wirken sich deshalb sehr günstig aus.

Für die aufwändige Messung des Schlagregens stand keine Technik zur Verfügung. Mit Hilfe von Klimadaten der Karl-Franzens-Universität Graz (siehe 5.2) konnte der Einfluss von Schlagregen näher untersucht werden.

Der Außenputz am Testhaus Graz wies dem Augenschein nach keine Risse auf. Anschlussbereiche an das Fenstersims waren schadhaft gewesen und wurden zu Beginn des Projektes ausgebessert. Während der Ausbesserungsarbeiten hatte sich ein Stein gelöst. Vergleichbare Schäden traten nicht noch einmal auf und sind auch nicht seitens der Leitung des Kindergartens bekannt. Sollte allerdings die Art des Mauermörtels oder der Vermauerung großflächig ähnlicher Qualität sein, spricht dies nicht für die Qualität der Vermauerung. Gleichwohl darf angenommen werden, dass eine derartige Vermauerung, mit fehlendem oder ausgewaschenem Bindemittel oder nicht vollflächig ausgefüllten Mörtelfugen (Abb. 102), diffusionsoffen ausgebildet ist, was sich grundsätzlich günstig auf die Situation in den Balkenauflagern auswirkt.



Abb. 102 Mauerwerksausschnitt mit nur teilweise aufgefüllter Mörtelfuge

Entscheidend für die Menge eindringenden Schlagregens sind die Eigenschaften des Außenputzes. Dessen Wasseraufnahmekoeffizient beträgt $0,064 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{0,5})$, der μ -Wert 12,2. Der Außenputz wurde mit Anstrich(en) gemessen, wobei der Anstrich beim Wasseraufsaugexperiment, wie auch in der Realität, der Wasserbelastung ausgesetzt war bzw. die Wasseroberfläche kontaktierte. In DIN 4108-3 wird ein derartiger Außenputz als ‚wassersaugend‘ bezeichnet ist und darf laut Tabelle 4 nur in Gebieten oder auf Wänden mit geringer Schlagregenbeanspruchung eingesetzt werden. Graz befindet sich mit durchschnittlich 830,6 mm/a in einem Gebiet mit hoher Schlagregenbeanspruchung ($> 800 \text{ mm/a}$). Die Konstruktion wäre gemäß der einfachen Einteilung der DIN 4108-3 nicht geeignet. Entscheidend ist jedoch, wie viel Regen tatsächlich auf eine Wand auftrifft ([Ruisinger et al. 2013]).



Abb. 103 Ansicht der nach Südwestsüd ausgerichteten Fassade des Testhauses vom 17. April 2011

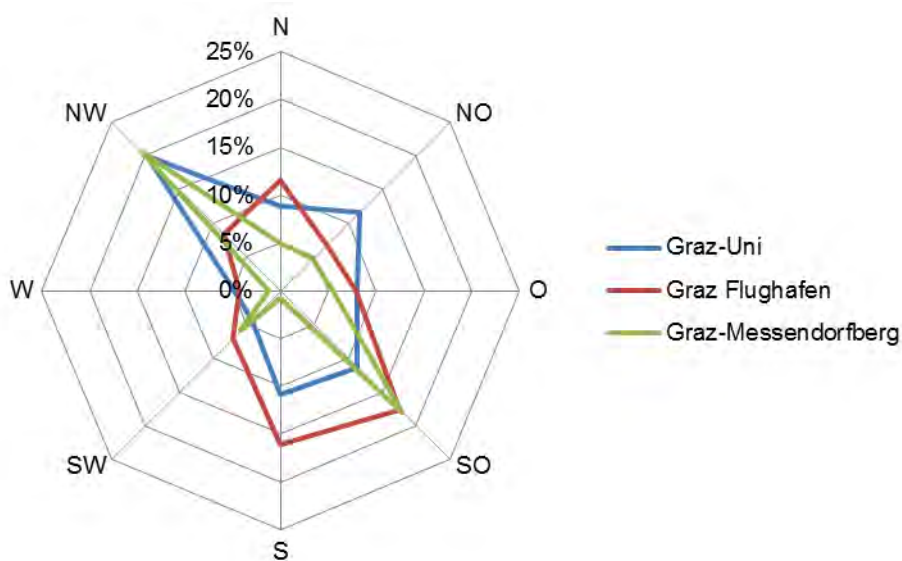


Abb. 104 Häufigkeitsverteilung der Windrichtung in drei Grazer Messstationen auf Basis von Klimadaten der Jahre 1971 bis 2000 der ZAMG [90]

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 hohen Einfluss aus ([Bundesministerium für Umwelt 1995] und [90]). Wegen des von Nordostnord nach Südostsüd verlaufenden Murtals kommen die vorherrschenden Windböen aus diesen Richtungen. Aus Abb. 104 ist die Häufigkeitsverteilung der Windrichtungen für drei Grazer Standorte zu ersehen, wobei der Standort Graz-Uni (KFU) dem Testhaus am Nächsten ist (siehe 5.2). Die Fassade mit den Innendämmsystemen ist demzufolge in eine vergleichsweise regenarme Richtung (~ 200°) ausgerichtet. Gleichzeitig wird sie durch einen großen Laubbaum abgeschirmt, der besonders in den Sommer- und frühen Herbstmonaten die Schlagregenbelastung reduziert. In Abb. 103 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 Innendämmung im Dachgeschoss hinausragt. Eine SWS-ausgerichtete Fassade erhält viel Sonneneinstrahlung, wodurch feuchte Fassaden schneller austrocknen können. Genauso wie der Laubbaum die Fassade vor Schlagregen schützt, reduziert er allerdings auch die Sonneneinstrahlung auf die Fassade, somit scheinen die positiven die negativen Effekte des Laubbaums aufzuheben.

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

In Abb. 105 sind die Außentemperatur und relative 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 auftreffen 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.

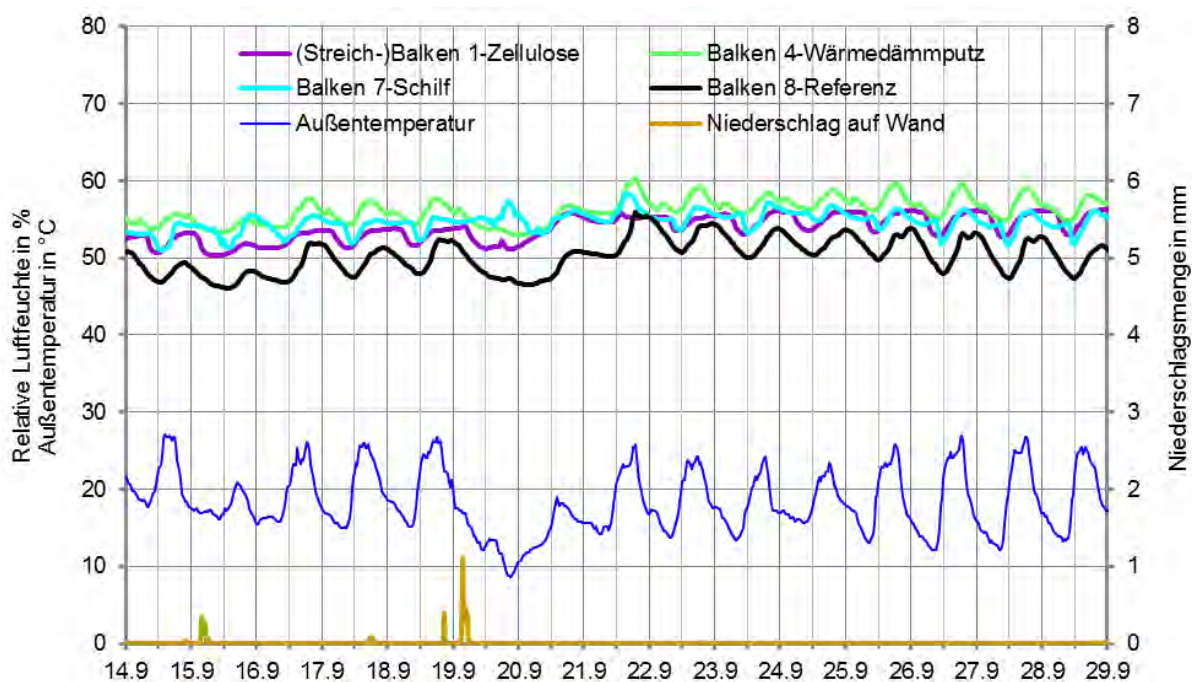


Abb. 105 Verlauf von Außentemperatur (dünne blaue Linie) und relativer Luftfeuchte im äußeren Bereich einiger Auflagertaschen sowie Niederschlagsmengen, die bei Geschwindigkeiten über 0,1 m/s auf die Testwand auftreffen würden vom 14.9.2011 bis zum 29.9.2011

In Konstruktionen eindringender Regen 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 Balkenköpfen vorgedrungen ist.

Aus den Messungen in Abb. 105 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. Zu Vergleichszwecken wurden zwei Simulationen mit und ohne Schlagregenbelastung durchgeführt.

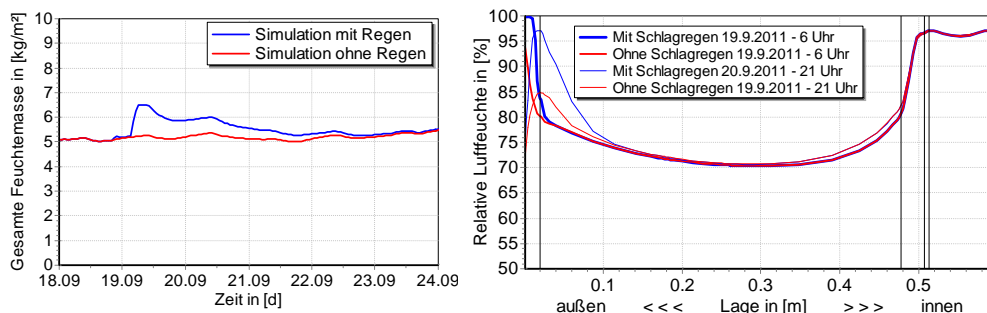


Abb. 106 Links gesamte Feuchtemasse (gasförmig, flüssig und fest) mit und ohne Schlagregeneinwirkung; rechts Profile der relativen Luftfeuchte kurz nach Schlagregenereignis und ungefähr 1,5 Tage später

Bei der simulierten Konstruktion handelt es sich um den mit Perliteplatten gedämmten Wandabschnitt. Das linke Diagramm der Abb. 106 belegt eindeutig die Zunahme der gesamten Feuchtemasse während des Schlagregenereignisses am 19.9.2011. Das Abtrocknen der aufgenommenen Menge zieht sich bis zum 24. September 2011 hin. Im rechten Diagramm 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 Schlagregenereignisses. 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 ungefähr 0,1 m Entfernung von der Außenoberfläche, also ungefähr in der Ebene der Balkentaschen, beträgt die Erhöhung der Luftfeuchte in den Simulationen weniger als 5 % und ist somit in diesem Fall vernachlässigbar.

Da es sich bei diesem Regenereignis tatsächlich um das „schwerste“ aus südwestsüdlicher Richtung kommende für einen Zeitraum von über einem halben Jahr handelte, kann davon ausgegangen werden, dass Regen nur vereinzelt und nicht sonderlich ausgeprägt die hygrothermischen Bedingungen in den Balkenauflagertaschen beeinflusste.

6.4 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 H 2002]. Auch durch das Porengefüge und besonders durch Bauwerksfugen und -risse kann Luft durch eine Konstruktion strömen.

In den Simulationen der Situation um die Balkenköpfe zeigte sich bald, dass ohne Verwendung eines Modells zur Berücksichtigung der Strömungsverhältnisse keine ausreichende Übereinstimmung zwischen Messung und Rechnung erzielt werden könnte. Da die Luft-

durchlässigkeit der Materialien unbekannt war, wurden mit Hilfe von Literaturangaben und Simulationen den Materialien Luftdurchlässigkeiten zugeordnet.

Vor allem Leichtbauten oder historische Mauerwerkskonstruktionen weisen höhere Luftdurchlässigkeiten auf ([Hens et al. 2007] und [Arbeitsgemeinschaft Mauerziegel 2000]). Höhere Luftdurchlässigkeiten 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 ([Arbeitsgemeinschaft Mauerziegel 2000]). Die Luftdurchlässigkeit von Wandkonstruktionen (üblicherweise in $m^3/m^2 \cdot h$) kann im Zuge einer Blower-Door-Messung (ÖNORM EN 13829) ermittelt werden, wobei sich das Messen der bloßen Wandkonstruktion ohne Fenster und Raumanschlüsse schon wegen der unüblichen Anwendung aufwändiger gestaltet. Das Messergebnis bezieht sich auf die gesamte Wandkonstruktion und kann nicht auf den Anteil einzelner Schichten aufgeteilt werden. Die treibende Kraft für die Luftdurchströmung ist die Differenz des Luftdrucks zwischen den Innenräumen und dem Außenklima. Bei Blower-Door-Tests wird ein zusätzlicher Differenzdruck aufgeprägt, üblicherweise 50 Pa. 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 Messmethode mancher Kennwerte aus der Literatur ist unbekannt, weshalb den Werten Skepsis entgegen gebracht werden muss.

Eine Übertragung von Luftdichtheit-Messwerten von einem Gebäude auf ein anderes gleicher oder ähnlicher Bauart ist äußerst problematisch, da die Luftdichtheit von vielen Faktoren bis hin zu der Arbeitsweise der Handwerker abhängig ist. Die folgende Tabelle führt einige Messwerte für Materialien und ganze Konstruktionen auf: Ein Bericht der [Arbeitsgemeinschaft Mauerziegel 2007] gibt beispielsweise für verputztes Mauerwerk bei einem Differenzdruck von 50 Pa eine Luftdurchlässigkeit von 0,1 – 2,0 $m^3/(m^2 \cdot h)$ an.

Tab. 24 Luftdurchlässigkeit und Permeabilität einiger Baustoffe und Konstruktionen mit Angabe der Literaturquelle

Bezeichnung	Permeabilität in $kg/(m^2 \cdot s \cdot Pa)$	Luftdurchlässigkeit ($m^3/(m^2 \cdot h)$)	Quelle
Mauerwerk verputzt		0,1 – 2,0 ($\Delta p = 50 Pa$)	[Arbeitsgemeinschaft Mauerziegel 2007]
Kalkputz (innen)		0,02 – 0,6 ($\Delta p = 50 Pa$)	. / .
„Veneer wall“ (dt. Holzständerwand mit vorgesetztem MW)	$3.5 \cdot 10^{-5} - 6 \cdot 10^{-3}$	2.4 – 127 ($\Delta p = 50 Pa$)	[Hens et al. 2007]
“Inside leaf with plaster finish”	$1.0 \cdot 10^{-5}$	1.5 ($\Delta p = 50 Pa$)	. / .

Bezeichnung	Permeabilität in kg/(m ² ·s·Pa)	Luftdurchlässigkeit (m ³ /(m ² ·h))	Quelle
Vollziegelwand, unverputzt, 198 mm, 10 mm Mörtel		0.56 (Δp= 10 Pa)	[Hens 2006]
Hochlochziegel, einsei- tig 10 mm Gipsputz, 140 mm, 10 mm Mörtel		0.21 (Δp= 10 Pa)	. / .
Hochlochziegel, unverputzt, 140 mm, 10 mm Mörtel		0.4 (Δp= 10 Pa)	. / .
Mineralwolle / Zellulosedämmung	5·10 ⁻⁵ kg/(m ² ·s·Pa)		DTU Byg

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 minimalen Werten aus der Literatur.

Für die Festlegung der Permeabilitäten aller Schichten wurden eindimensionale Simulationen der ungedämmten Konstruktion mit Delphin5 durchgeführt, in denen die Permeabilitäten der einzelnen Schichten variiert wurden. Der Außen- und Innenoberfläche waren die gemessenen Klimabedingungen zugeordnet, der Differenzdruck betrug aus Gründen der Vergleichbarkeit 50 Pascal. Der Simulationszeitraum umfasste die ersten beiden Jahre.

Die folgende Tabelle gibt einige Simulationsergebnisse wieder. Die Ausgabeinheit der Software Delphin5 ist kg/(m²·h), weshalb für die Umrechnung die Dichte der Luft berücksichtigt werden musste. Der in der Software Delphin5 voreingestellte Wert von 1,205 kg/m³ wurde als konstant übernommen.

Tab. 25 Durchschnittlicher Luftfluss bei einigen Simulationen unter Angabe der gewählten Luftdurchlässigkeiten der Bestandmaterialien; Differenzdruck 50 Pa

Nr.	Luftdurchlässigkeitskoeffizient [s]			Luftfluss [kg/(m ² ·h)]	Luftfluss [m ³ /(m ² ·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

	Luftdurchlässigkeitskoeffizient [s]			Luftfluss [kg/(m ² ·h)]	Luftfluss [m ³ /(m ² ·h)]
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	3.51	2.9

Die Vorzugsvariante 6, die in weiteren Simulationen zur Anwendung kam, entspricht den minimalen Werten aus [Arbeitsgemeinschaft Mauerziegel 2000]. Für die inneren, neu aufgebraachten Schichten der Dämmsysteme Zellulose, Perlite, Wärmedämmputz und besonders deren Klebemörtel und Deckputze, wurde angenommen, dass deren Luftdurchlässigkeiten weitaus niedriger sind. Hier wurden Werte zwischen $1.0e^{-7}$ und $1.0e^{-8}$ s angeordnet. Für Holzweichfaserplatten und Schilf betragen die Luftdurchlässigkeiten $5.0e^{-5}$ bzw. $1.0e^{-6}$ s.

Der Luftdruckunterschied zwischen dem Gebäudeinneren und dem Außenklima ist in der Regel sehr gering und beträgt nur wenige Pascal. Die Messung solch geringer Druckunterschiede ist nur mit hochpräzisen, kostspieligen Messsensoren möglich, welche im Projekt nicht vorgesehen waren. Für den Differenzdruck mussten deshalb Annahmen getroffen werden. Auch in der Praxis liegen solche Messdaten in aller Regel nicht vor, schon gar nicht bei geplanten Baumaßnahmen.

Um in OEKO-ID Herangehensweisen bezüglich des Differenzdruckes zu untersuchen, die auch in der Praxis realisiert werden können, wurden mehrere einfache Ansätze überprüft:

- Luftdruckunterschied als Funktion des Wasserdampfdruckgefälles
- Luftdruckunterschied als Funktion des Temperaturgefälles
- Luftdruckunterschied als Funktion des Temperaturgefälles und der (vereinfachten) Strömungsverhältnisse im Gebäude

Winddruck und –sog auf Fassaden wird bei keinem der Ansätze berücksichtigt. Die Differenzen werden getrennt für jeden Raum ermittelt.

Bei dem Luftdruckunterschied in Abhängigkeit vom Wasserdampfdruckgefälle wurde ein Differenzdruck berechnet, der auf der Differenz des Wasserdampfdruckes der Luft basiert. Der Wasserdampfdruck mit üblichen Werten zwischen 500 und 2.000 Pa bildet nur einen kleinen Teil des gesamten Luftdruckes (um 100.000 Pa). Deshalb stellt dies eine diskutierbare Herangehensweise dar, welche sich auf der anderen Seite ohne Probleme nachvollziehen lässt.

In [Fischer et al. 2008][14] beispielsweise ist beschrieben, wie aus Temperatur und relativer Luftfeuchte der Wasserdampfdruck der Luft, oder Partialdruck, gebildet wird. Zunächst wird aus der (gemessenen) Temperatur der Sättigungsdampfdruck Luft berechnet:

$$\begin{aligned}
 -20^{\circ}\text{C} < \theta < -0,2^{\circ}\text{C}: p_s &= 4,689 \text{ Pa} \cdot 1,486 + \frac{\theta}{100^{\circ}\text{C}}^{12,3} \\
 -0,2^{\circ}\text{C} < \theta < 30^{\circ}\text{C}: p_s &= 288,68 \text{ Pa} \cdot 1,098 + \frac{\theta}{100^{\circ}\text{C}}^{8,02}
 \end{aligned}
 \tag{29}$$

Anschließend muss nur noch der Sättigungsdampfdruck mit der jeweiligen Luftfeuchte φ multipliziert werden: $p = p_s \cdot \varphi$

Bei der Berechnung des Luftdruckunterschieds auf der Basis des Temperaturgefälles $\theta_e - \theta_i$ wird lediglich der Temperaturgradient zwischen den einzelnen Räumen und der Außentemperatur berechnet. Anschließend wird der Verlauf skaliert, sodass beispielsweise einem Temperaturunterschied von 30 K eine Druckdifferenz von 10 Pascal zugeordnet wird. Für den Sommer ergibt dies oft eine negative Druckdifferenz, die allerdings im Vergleich zum Winter klein ist.

Wird der Luftdruckunterschied auf Basis des Temperaturgefälles und der (vereinfachten) Strömungsverhältnisse im Gebäude berechnet, geht noch der thermische Auftrieb innerhalb des Gebäudes mit ein. Die Berechnung erfolgt nach folgender Formel:

$$\Delta p = \rho \cdot \frac{\theta_e - \theta_i}{\theta_i} \cdot g \cdot \frac{h}{2}
 \tag{30}$$

wobei h die Höhe des zusammenhängenden Luftraums (geöffnete Türen etc.) bedeutet und g die Erdbeschleunigung (9,81 m/s²) darstellt.

6.5 Simulation der Messergebnisse

Die Ausgangslage für die (Nach-)Simulationen der Messergebnisse ist differenziert zu bewerten. So sind die Materialeigenschaften der vorhandenen Materialien überwiegend bekannt. Insbesondere die relevanten Komponenten der Innendämmsysteme sind sehr gut untersucht, mit Ausnahme des Lehmklebers und die schwierig zu erfassenden hygrischen Transportparameter der Schilfplatten. Auch Innenputz, Außenputz und Ziegel wurden eingehend untersucht, die Anzahl der Proben der Bestandswand war allerdings gering. Die Eigenschaften des Mörtels konnten leider nicht bestimmt werden. Mehrere Versuche der Probenahme des sehr zerbrechlichen Materials misslangen.

6.5.1 Konstruktion

Nach einer Entnahme von Ziegelproben im Dachgeschoss konnten deren Geometrie gemessen werden: 130(135) x 275 mm. Die Messungen der Putzschichten ergaben unterschiedliche Dicken. Im Obergeschoss betrug die Dicke des Innenputzes 25 mm, im Dachgeschoss dagegen 50 mm. Dabei besteht der Innenputz im Dachgeschoss aus zwei Schichten: eine, dem Augenschein nach 45 mm dicke, poröse Schicht, und eine dichtere Schicht von 5 mm Dicke.

6.5.2 Vorgehen

Für die Nachrechnung der Messungen mussten zunächst die Klimakomponenten und die Messdaten aus den Konstruktionen in für Delphin verarbeitbare Formate gebracht werden.

Wegen der geringen Unterschiede waren zunächst (quasi-)eindimensionale Simulationen ausreichend, um die thermischen Übergangswiderstände zu bestimmen und die Materialkennwerte zu überprüfen. Vor allem die Materialeigenschaften der Bestandskonstruktion wurden variiert, da hier nur wenige Materialproben vorlagen.

Folgende Materialparameter wurden in diversen Kombinationen mit einer Abweichung von ungefähr 20 % variiert:

- Wärmeleitfähigkeit λ ,
- Wärmekapazität c ,
- Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ ,
- Wasseraufnahmekoeffizient A_w und
- Porosität θ_{por} .

Eine Änderung dieser charakteristischen Materialkennwerte bewirkt, dass die gesamte dazugehörige Funktion, z. B. die Funktion der Wasserdampfdiffusion, entsprechend nach oben oder unten skaliert wird.

Klimabezogene und oberflächenbezogene Parameter der Materialoberflächen wurden ebenfalls variiert:

- Thermische Übergangswiderstände R_{si} und R_{se} ,
- Kurzwelliger Absorptionsfaktor a und
- Langwelliger Emissionskoeffizient ε .

Weiters wurden die geometrischen Modelle leicht verändert, z. B. wurden vereinfachte Gesimse um die Fenster modelliert.

Um die Unwägbarkeiten, die mit der Messung von Materialeigenschaften, Klima und hygrothermischen Zuständen in den Bauteilen verbunden sind, zu minimieren, wurde bei der Simulation der Messungen mit den Querschnitten begonnen, welche die geringste Anzahl solcher Unwägbarkeiten aufweisen. Deshalb konzentrierten sich zunächst die Bemühungen um die ‚ID‘-Sensoren bzw. Oberflächentempersensoren. Hier können die Eigenschaften der Dämmmaterialien und des Bestandsmauerwerks genauer überprüft werden. Im Anschluss daran wurden anspruchsvollere Details um die Balkenköpfe simuliert.

6.5.3 Zu Abweichungen zwischen gemessener Holzfeuchte und Simulation

An den Holzbalken wurden keine Proben für Messungen entnommen. Gerade bei natürlichen Baustoffen wie Lehm oder Holz kommt eine größere Variabilität der hygrothermischen Eigenschaften im Vergleich zu industriell hergestellten Baumaterialien vor. Der Standort, das lokale Klima, die Nährstoffversorgung, die Astigkeit, der Trocknungsvorgang, alle diese und weitere Faktoren beeinflussen die Eigenschaften des Baustoffes Holz. Es ist deshalb mög-

lich, dass die für die Kalibrierung der Holzfeuchte-Messfühler verwendeten Probekörper in ihren hygrothermischen Eigenschaften von denen der vorhandenen Deckenbalken abweichen. Doch selbst bei der Messung von Bauholz vor Ort kann es innerhalb eines Balkens zu größeren Abweichungen kommen, wie Erfahrungen aus einem Projekt an der TU Dresden zeigten [Gnoth et al. 2003b].

Für die Simulationen standen mehrere Fichte-Materialdatensätze zur Disposition, welche in der Datenbank von Delphin5 implementiert waren oder im Rahmen des Projektes "charakterisiert" und anschließend ebenfalls variiert wurden.

Mit einigen vergleichenden Simulationen wurde zunächst der Datensatz identifiziert, welcher sowohl innerhalb des Balkens selber, wie auch in der unmittelbaren Umgebung, zur besten Übereinstimmung zwischen berechneten und simulierten Daten führte. Anschließend wurden einzelne Materialparameter isoliert und 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.

6.6 Simulation der Grenzschicht Dämmsystem/ Bestandskonstruktion

Beispielhaft für die Simulation der 'ID'-Sensoren in der Grenzschicht zwischen dem Dämmsystem und der Bestandskonstruktion seien hier Simulationsergebnisse zu den 'ID'-Sensoren im Feld 5 mit Schilfdämmung vorgestellt.

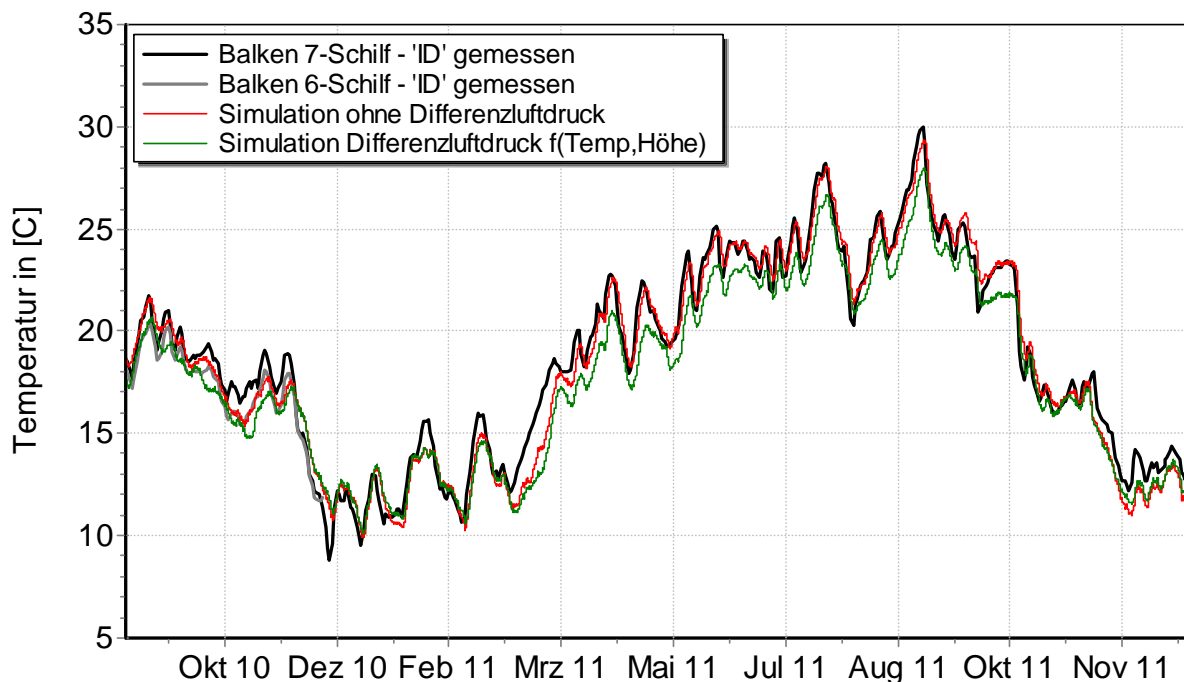


Abb. 107 Gemessene und berechnete Temperaturen (Tageswerte) für die Messposition 'ID' im Feld 5 (Schilf) vom 5.9.2010 bis zum 20.12.2011

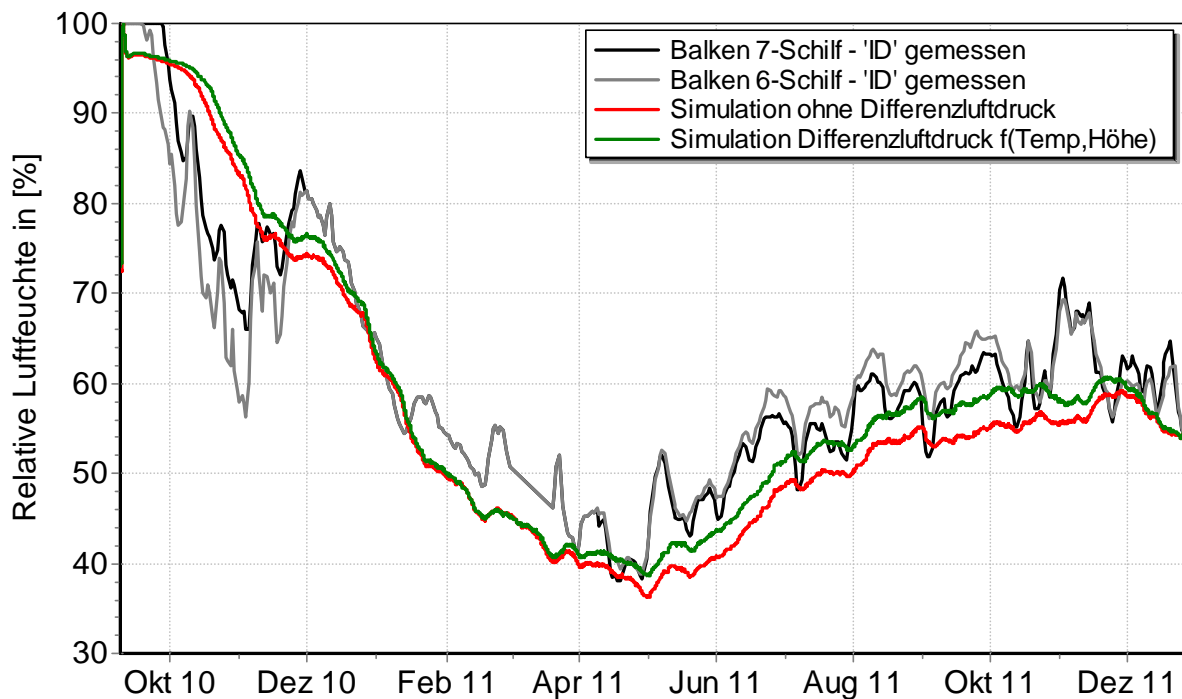


Abb. 108 Gemessene und berechnete relative Luftfeuchte (Tageswerte) für die Messposition ‚ID‘ im Feld 5 (Schilf) vom 5.9.2010 bis zum 20.12.2011

Die Diagramme in den Abb. 107 und Abb. 108 enthalten neben den gemessenen Temperaturen (jeweils grau und schwarz) die Ergebnisse von zwei Simulationen, in denen ohne (rot) und mit Berücksichtigung von Lufttransportprozessen (grün) gerechnet wurden. Der abgebildete Simulationszeitraum erstreckt sich vom 5. September 2010 bis zum 20. Dezember 2011. Der aufgeprägte Differenzdruck wurde aus den Temperaturen und dem thermischen Auftrieb (Gleichung 30) gebildet. Die Übereinstimmung der Temperaturen ist sehr gut (Abb. 107). Werden in den Simulationen nur die gemessenen Klima- und Materialdaten verwendet, unterscheiden sich die Graphen von Messung und Simulation selten um mehr als ein Kelvin (rot). Die Berücksichtigung des Luftdruckunterschieds verursacht fast durchgängig niedrigere Temperaturen, sodass die Differenz zu den gemessenen Linien größer wird (grün). Besonders bei steigenden Temperaturen reagiert die Simulation um ungefähr einen bis zwei Tage zeitverzögert, sodass die Differenz zu den gemessenen Linien um einen weiteren Kelvin wächst.

Anders stellt sich die Ergebnisse beim Vergleich der relativen Luftfeuchten dar (Abb. 108). Im Großen und Ganzen wird die Entwicklung der Messkurven von beiden simulierten Kurven nachvollzogen, wengleich etwas zeitverzögert und mit zu niedrigen Luftfeuchten. Der Beginn der Austrocknungsphase der Einbaufeuchte zieht sich länger hin, nach dem Aufbringen der Oberputze im November 2010 verlaufen alle Kurven allerdings relativ simultan. Ab dem Frühling 2011 kommt es dann wieder zu etwas größeren Abweichungen. Die häufigen, dynamischen Bewegungen der steigenden Messkurven werden ansatzweise und zeitverzögert nachvollzogen. Im Gegensatz zu den Temperaturen führt hier die Verwendung des Lufttransportmodells (grün) zu größerer Übereinstimmung als die bloße Verwendung der Klima-

und Materialdaten (rot). Mit permeablen Materialien steigt die Luftfeuchte an den ID-Sensoren schneller an und der der Abstand zu den gemessenen Linien verringert sich.

Die weiterführenden Simulationen werden sich in der Zukunft auf die Dynamik der Feuchtetransportprozesse fokussieren. Die Variation charakteristischer Transportparameter wie der A_w -Wert oder der μ -Wert zeitigten bislang keine Verbesserungen.

6.7 Simulation eines Balkenkopfs

Um das hygrothermische Verhalten im Bereich des Balkenkopfs wirklichkeitsnah abzubilden, wurden verschiedene Konstruktionsvarianten modelliert, in denen Luftschichten unterschiedlicher Geometrie angeordnet wurden. Abb. 109 zeigt die Konstruktion des Balkenkopfs im Referenzfeld, wobei in dieser Variante vor der grauen Schüttung eine großzügig bemessene Luftschicht angeordnet wurde.

Bei Luftschichten werden in Delphin5.8 die langwellige Abstrahlung von gegenüber liegenden Flächen berücksichtigt. Die Änderung der Wärmeleitfähigkeit der Luft geht in Anlehnung an die EN 673 in die Berechnungen mit ein. Die Wärmeleitfähigkeit wird dabei von der Geometrie des Luftbereichs und den anliegenden Oberflächentemperaturen bestimmt.

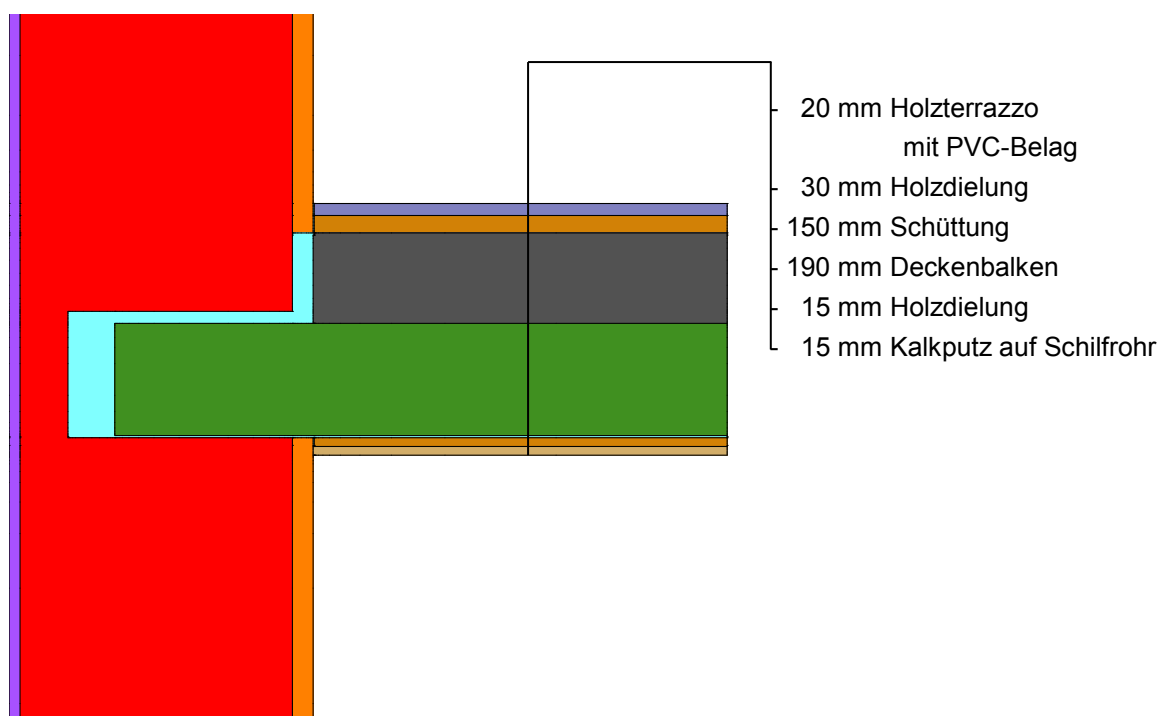


Abb. 109 Screenshot einer Konstruktionsvariante der Balkenkopfsituation des Referenzfeldes (Software Delphin5)

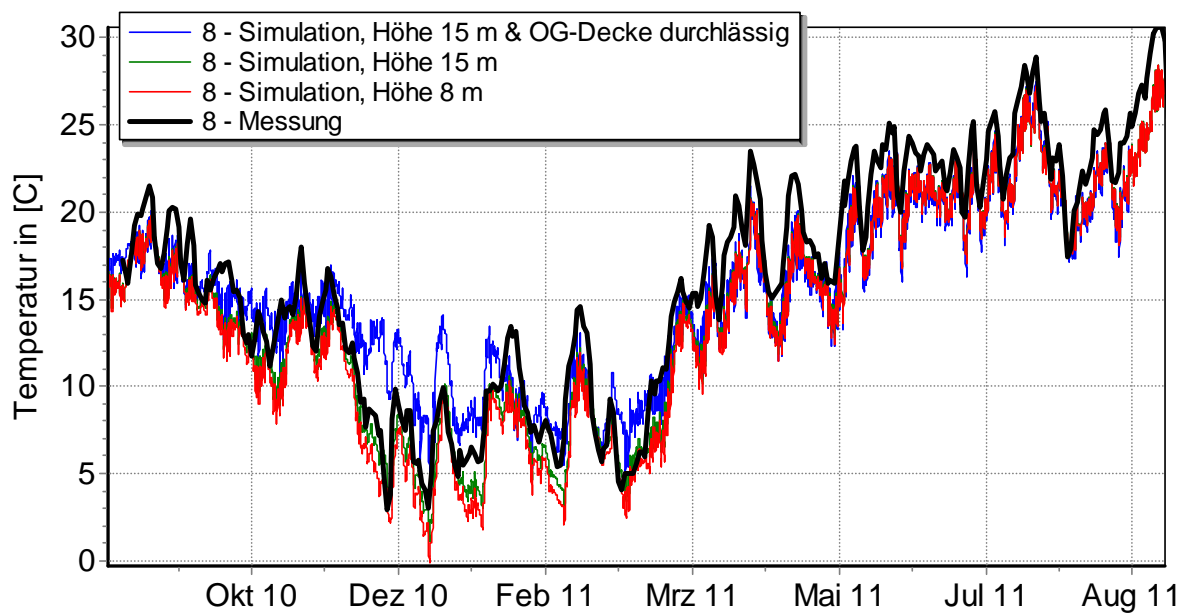


Abb. 110 Gemessene (Tageswerte) und berechnete Temperaturen für die Messposition vor dem Stirnholz (BA-St) im Referenzfeld 8 vom 5.9.2010 bis zum 1.9.2011

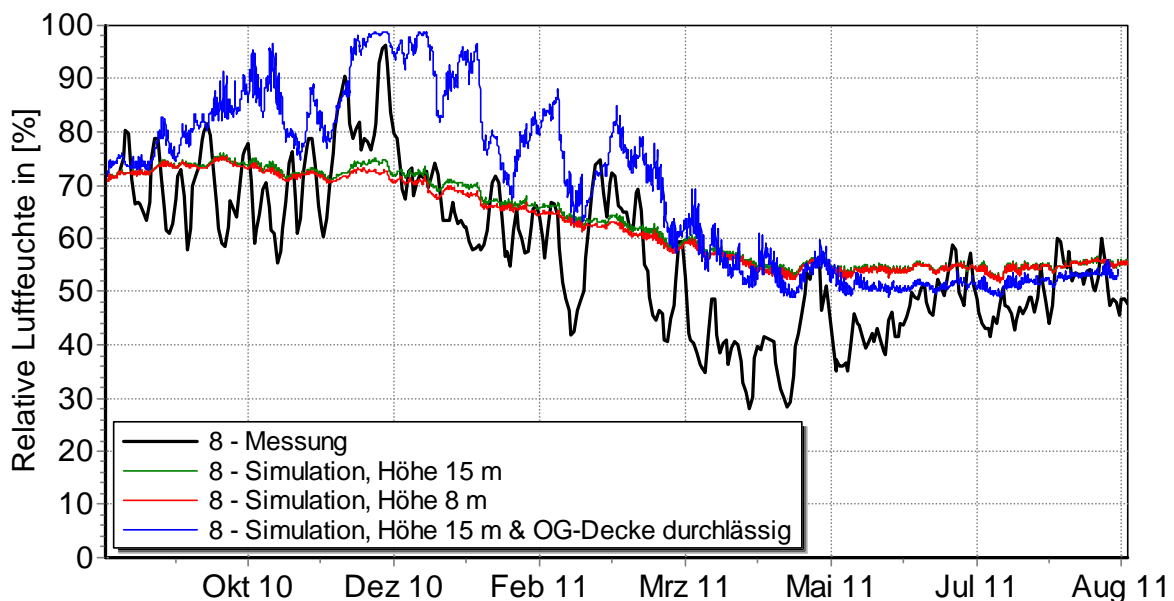


Abb. 111 Gemessene (Tageswerte) und berechnete Luftfeuchten für die Messposition vor dem Stirnholz (BA-St) im Referenzfeld 8 vom 5.9.2010 bis zum 1.9.2011

Die Abb. 110 stellt einige Varianten dar, in denen der Luftdruckgradient aus den Temperaturdifferenzen und dem thermischen Auftrieb im Gebäude berechnet wurde. Variiert wurden die Höhe des verbundenen Luftraums sowie die Luftdurchlässigkeit der Deckenbekleidung im Obergeschoss. Eine Höhe von 15 m kommt den realen Verhältnissen des Testhauses sicherlich näher, wobei durch die vielen Gänge und die große Aula eine korrekte Abschätzung schwierig ist. Der Ansatz mit einer Höhe von 15 m (grün) führt offensichtlich zu besseren Ergebnissen wie eine Variante mit nur 8 m Höhe (rot). Der geringere thermische Auftrieb

bei 8 m Höhe führt zu geringeren Luftdruckdifferenzen, wodurch dem Bereich vor dem Stirnholz zu wenig Wärme zugeführt wird. Die gewählte Permeabilität in Verbindung mit den Luftschichten für die Deckenbekleidung im Obergeschoß war wiederum zu hoch, da die höhere Durchlässigkeit während der Wintermonate die Temperaturen vor dem Balkenkopf zu stark erwärmt (blau). Während die Temperaturen der Simulationen den Messwerten schon recht nahe kommen, differieren bei der Luftfeuchte Messung und Rechnung noch auf unterschiedliche Weise (Abb. 111). Die rote und grüne Linie weichen nur wenig voneinander ab, aber anscheinend ist die Kopplung zum Raumklima bzw. Außenklima zu gering, da die Luftfeuchten viel zu gleichmäßig verlaufen und kaum auf klimatische Einwirkungen zu reagieren scheinen. Mit einer Erhöhung der Durchlässigkeit der Deckenbekleidung des Obergeschosses wird die fehlende Kopplung hergestellt, sie zieht jedoch in der blau dargestellten Variante zu einem zu hohen Feuchteeintrag in den Luftspalt.

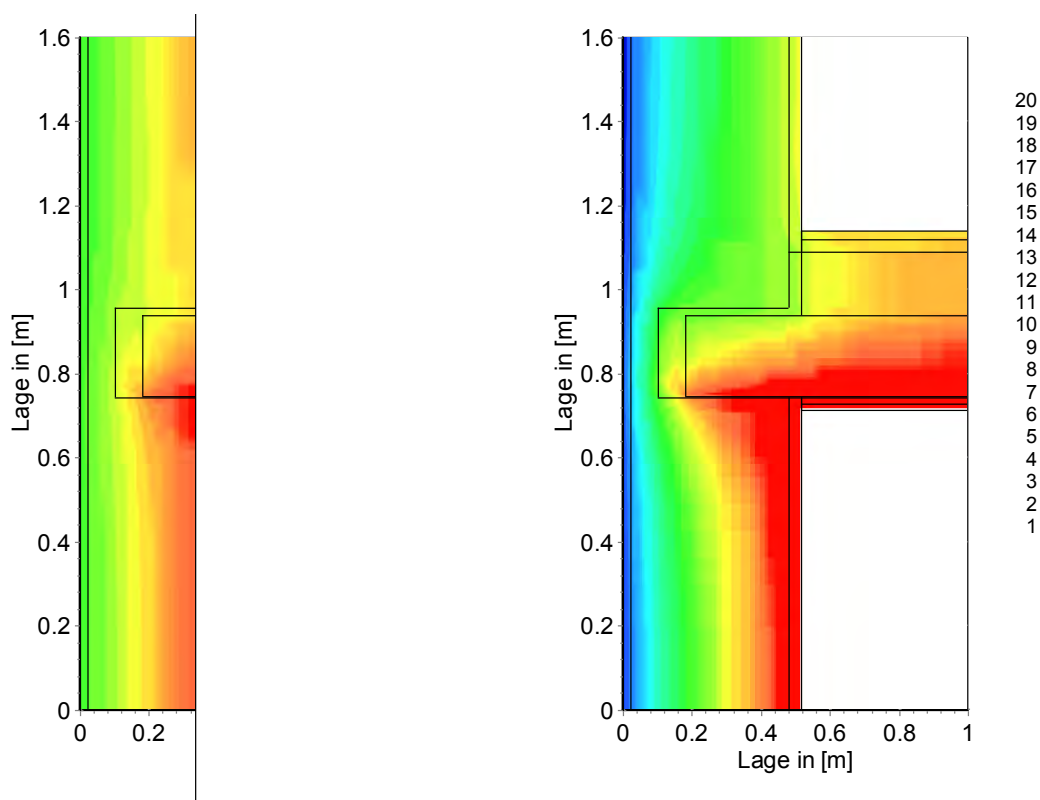


Abb. 112 Links Temperaturfeld am 7.11.2010 (12 Uhr), rechts am 10.12.2010 (0 Uhr); Luftdruckdifferenz mit $h=15\text{m}$ berechnet, durchlässige Deckenbekleidung im Obergeschoss

Aus Abb. 112 geht hervor, wie das Klima aus dem Obergeschoss die klimatischen Verhältnisse im Balkenaufleger des Referenzfeldes bestimmt. Besonders gut sichtbar ist dieses Phänomen in der rechten Abbildung. Bei Außentemperaturen um 0°C breitet sich die Wärme entlang der Unterkante des Deckenbalkens in Richtung Balkenaufleger aus. In der Luftschicht vor dem Stirnholz steigt die Wärme auf und beeinflusst auch sichtbar das Mauerwerk bis in die Außenputzschicht.

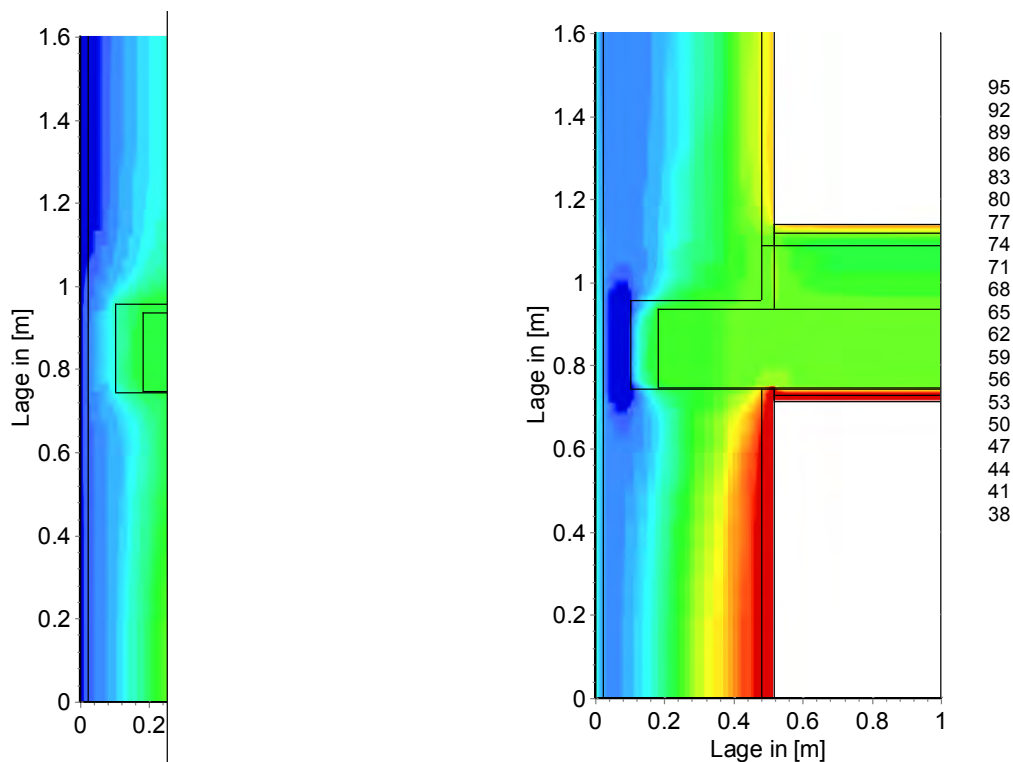


Abb. 113 Links Feld der relativen Luftfeuchte am 7.11.2010 (12 Uhr), rechts am 10.12.2010 (0 Uhr); Luftdruckdifferenz mit $h=15\text{m}$ berechnet, durchlässige Deckenbekleidung im Obergeschoss

Durch die zu hohe Durchlässigkeit der Deckenbekleidung im Obergeschoss kann das Balkenaufleger sowohl getrocknet wie auch befeuchtet werden, wie Abb. 113 bildhaft darstellt. Im linken Bild, gegen Mittag des 7. Novembers 2010, wird der Bereich im Mauerwerk zwischen Balkenaufleger und Außenoberfläche durch den indirekten Eintrag aus der Raumluft des Obergeschosses getrocknet. In der rechten Momentaufnahme, am 10. Dezember 2010, feuchtet der Mauerwerksbereich vor dem Stirnholz eindrucksvoll auf.

Die bisherigen Simulationen konnten keine ausreichende Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation herstellen. Bei der Modellierung derartiger Vorgänge besteht deshalb noch weiterer Forschungsbedarf, welcher im Rahmen einer Dissertation fortgesetzt wird.

7 Dissemination - Darstellung der Verbreitungs- und Verwertungsmaßnahmen

Wegen der praktischen Relevanz des Forschungsgegenstands wurde OEKO-ID schon während der Projektphase 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 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 Messtechnik.

Im Laufe der Vortragsreihen wurden die Präsentationen fortlaufend verfeinert und liegen nun für unterschiedliche Zielgruppen in Deutscher und Englischer Sprache vor.

7.1 Workshops

Zusätzlich zu laufenden Abstimmungen innerhalb des Projektteams fanden folgende Workshops, z.T. unter Einbeziehung von externen Experten statt:

03.08.2009 - Startworkshop / Franziskanerkloster Graz

09.03.2010 - Startworkshop / Versuchshaus Schönbrunnngasse 30, Graz

12.04.2010 - Projektvorstellung im Bundesministerium für Unterricht, Kunst und Kultur /

Min.-Rat. Dr. Bruno Maldoner

21.06.2010 - Workshop Messtechnik / Versuchshaus Schönbrunnngasse 30

08.07.2010 - Workshop Dämmsysteme / TU Graz, IHB - Institut für Hochbau und Bauphysik

04.08.2010 - Workshop Installation Messtechnik / TU Graz, IHB

09.08.2010 - Workshop mit Holzbau-SV Prof. Maizenowitsch / TU Graz, IHB

09.09.2010 - Workshop Messsoftware / Versuchshaus Schönbrunnngasse 30, Graz

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

7.2 Zusammenarbeit mit anderen Projekten

Weiters erfolgt 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.
- „Energetisches 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 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.

7.3 Vorträge auf (Fach-)Tagungen und Konferenzen

Einer breiteren Öffentlichkeit wurde OEKO-ID auf folgenden Veranstaltungen vorgestellt:

- DI H. Hengsberger: „Innendämmung - Möglichkeiten & 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
- Mag. J. Ettenauer auf dem internationalen Kongress „Techno Heritage – International Congress on Science and Technology for the Conservation of Cultural Heritage“ 2.-5. 10. 2012 in Santiago de Compostela (Spanien). Der Abstrakt befindet sich im Anhang (siehe A2).
- 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 & 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
- Prof. Dr. K. Sterflinger „Schimmelpilze in Innenräumen und an Bauteiloberflächen – to kill or not to kill“ 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 „Wooden beams and internal insulation“ auf dem DissertantInnenseminar am 31.1.2012 in Graz
- DI U. Ruisinger „Balkenköpfe in Außenwänden“ auf der Holzschutztagung des Sächsischen Holzschutzverbandes am 16.03.2013 in Leipzig
- Mag. J. Ettenauer auf dem internationalen Kongress „European Geoscience Union - General Assembly 2013“ (EGU) in Wien (Division Energy, Resources and the Environment, ERE, 7.-12. April 2013). Der Abstrakt befindet sich im Anhang (siehe A2)
- 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?“ auf dem Architektenkongress Innendämmung 2013 am 24. Oktober 2013 in Celle

Bereits vereinbart:

- DI U. Ruisinger „Innendämmung und Holzbalkendecken - eine Gefahr? [...] Praxis?“ auf dem 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 Bauphysiktagung Kaiserslautern 2013 am 27. und 28. November 2013

7.4 Publikationen

Folgende Print-Publikationen in Zeitschriften, Büchern oder Tagungsbänden berichten zentral über das Projekt OEKO-ID:

Hengsberger H: Dämm-Feldversuch, a3B:Tec (9/2010), S. 40-41

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 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 Denkm(a)i| - Initiative Denkmalschutz 6 (2012) (im Druck)

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

Ettenauer JD, Piñar G, Lopandic K, Spangl B, Ellersdorfer G, Voitl C, Sterflinger K: Microbes on building materials * evaluation of DNA extraction protocols as common basis formolecular analysis. Science of the Total Environment, 2012 Vol. 439, p 44-53

Grobbauer M, Ruisinger U: Innendämmung, Holzbalkenköpfe und Kastenfenster in der Sanierung im Tagungsband der Bauphysiktagung 2012, Eigenverlag

Ettenauer JD, Sterflinger K: Schimmilpilze in Innenräumen und an Bauteiloberflächen – to kill or not to kill? in: Tagungsband der Bauphysiktagung 2012, Eigenverlag

Ettenauer JD, Piñar G, Kautsch P, Sterflinger K: "Bio-susceptibility of thermal insulation systems used for historical buildings", Publikation der Kongressvorträge, Taylor & Francis, A.A. Balkema Publishers – Taylor & Francis, The Netherlands, Spring 2013

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

Sterflinger K, Ettenauer J, Piñar G. Bio-susceptibility of materials and thermal insulation systems used for historical buildings. In Energy Procedia 40, 499-506 (2013). Eine Kopie befindet sich im Anhang (siehe P2)

Kautsch P, Ruisinger U: „Messungen und Simulationen von fünf Innendämmsystemen und deren Einfluss auf Holzbalkenköpfe“ im Tagungsband der Bauphysiktagung Kaiserslautern 2013 (in Vorbereitung)

Kehl D, Ruisinger U: „Holzbalkenköpfe im Mauerwerk – Was strömt denn da? HOLZBAU 1/2013 (in Vorbereitung)

Unter Mithilfe von DI U. Ruisinger flossen die Erfahrungen dieses Projektes zudem in die Ausarbeitung eines WTA-Merkblattes ein: WTA- Merkblatt E-8-14 „Ertüchtigung von Holzbal-kendecken nach WTA II - Balkenköpfe in Außenwänden“, WTA Publications 2013 (im Druck)

8 Zusammenfassung

8.1 Technologische und ökologische Bewertung der Dämmsysteme

Die unterschiedlichen Dämmsysteme konnten durch den Einbau in einem Raum, über die erlangten baupraktischen Erfahrungen und die Probenentnahmen vor Ort, direkt und unter gleichen Konditionen verglichen werden. Die Räumlichkeiten und vorgefundenen Konstruktionen erwiesen sich der Aufgabenstellung entsprechend repräsentativ. Über die technisch gewählte Ausführung konnten die vorab geplanten Kennwerte generiert werden. xxx

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.

Die Analyse des Bestandes und der verwendeten Materialien ist individuell für jedes Bauwerk systematisch zu erstellen und die verwendeten 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 des Putzes durch Abscheren der Farbschichten, der konvektionshemmende Verschluss der Balkentaschenöffnungen und eine schlagregendichte und diffusionsoffene Außenwandoberfläche.

Die ausgewählten Dämmsysteme wurden entsprechend festgelegter Beurteilungskriterien wie Verarbeitungs-, Gesundheits-, Brandschutz- und ökologische- Kriterien etc. verglichen. In technologischer Hinsicht erwiesen sich zwei Dämmsysteme aus unterschiedlichen Gründen als weniger empfehlenswert. Der Wärmedämmputz konnte vor allem aus Gründen der Einbringung die vom Hersteller angegebenen Werte 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 ist 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 ist die Art der Einbringung und die Schwierigkeiten in Details, wie Fensterleibungen, zu bemängeln und erscheint für bewohnte Objekte wegen der Staubentwicklung derzeit als wenig praktikabel. Die Unabhängigkeit von unebenen Oberflächen kann wiederum als positiv vermerkt werden. Die Verarbeitung der anderen Dämmsysteme Schilf, Perliteplatte und Holzweichfaserplatte war unproblematisch.

Hinsichtlich der ökologischen Bewertung schnitt die Schilfdämmung ausgesprochen gut ab, hier wurde sogar ein negativer OI3-Index festgestellt. Der OI3-Index der Zellulosedämmung und der Holzweichfaserplatten war ebenfalls günstig. Besonders wegen des höheren Einsatz-

zes an Primärenergie bei der Herstellung schlossen der Wärmedämmputz und die Perliteplatten mit dem höchsten OI3-Index ab.

Abschließend wurde nach Projektende noch der Rückbau und die sortenreine Entsorgung der eingesetzten Bausysteme dokumentiert, wobei die im Projekt anfallenden geringen Massen einer wirtschaftlichen, sortenreinen Trennung entgegenstanden. Die Schilfplatten und der Wärmedämmputz ließen sich besonders einfach rückbauen. Die Zellulosedämmung, Perlite- und Holzweichfaserplatten hafteten sehr stark an den Bestandsoberflächen.

Ein Vergleich von Berechnungsereignissen zum Heizenergie-Einsparpotential ergab, dass die Verwendung offizieller „Baubook“-Materialkennwerte zu einer zu hohen Einschätzung des möglichen Einsparpotentials führen kann. Mit den offiziellen Werten wurde das Heizenergie-Einsparpotential gegenüber den realen Werten um über 10 % überschätzt.

8.2 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. Die zur Verfügung gestellten Daten beschreiben die hygrothermischen Eigenschaften der Materialien und sind geeignet für Simulationen mit der Software Delphin5 auf wissenschaftlichem Niveau. Dabei wurden Abweichungen zu Angaben der Materialhersteller festgestellt. Nicht untersucht wurden von den Dämmsystemen die dünne Putzschicht des Wärmedämmputzes und der Lehmkleber bzw. Oberputz der Holzweichfaserplatten. In den Simulationen werden stattdessen die Daten des Klebers der Schilfdämmplatten verwendet bzw. ein vorhandenes Material aus der Delphin5-Datenbank.

8.3 Mikrobiologische Untersuchungen und Methodenentwicklung

Die Ergebnisse dieses Projektteiles zeigen, dass aufgrund der durchgeführten Untersuchungen:

- Bestimmung der Keimzahlen durch klassische Kultivierungsversuche,
- Optimierung der DNA-Isolierung und anschließende Messung der DNA-Konzentrationen aus den Proben, und
- der detaillierten quantitativen molekularen Analyse zur Bestimmung der Pilzanzahl in den Proben,

die getesteten Dämmsysteme eine sehr unterschiedliche biologische Affinität und Aktivität aufweisen:

- Aus mikrobiologischer Sicht ist der Thermosilitputz am unbedenklichsten und stellt ein sehr feindliches Habitat für Pilze dar. Dieser Dämmputz erzielte bei allen Untersuchungen die besten Ergebnisse: nur sehr wenige Pilze konnten auf diesem Materi-

al kultiviert werden; die isolierten DNA-Mengen waren am Geringsten und es wurde auch die niedrigste biologische Aktivität mittels qPCR festgestellt.

- Die Aufspritz-Zellulose, Perliteplatte und Schilfplatte mit Lehmplatz folgen dem Thermosilitplatz, wobei eine genaue Abstufung schwierig ist, da jedes Material bei den unterschiedlichen Versuchen seine Stärken und Schwächen zeigte. Aufgrund der real-time PCR-Ergebnisse von den Proben der dritten Probenentnahme sind die Aufspritz-Zellulose und die Perliteplatte gegenüber der Schilfplatte mit Lehmplatz in der praktischen Anwendung leicht zu favorisieren, da sie keine signifikante Aktivitätssteigerung aufgrund der erhöhten Raumluftfeuchte im dritten Winter zeigten.
- Das aus mikrobiologisch-hygienischer Sicht am Wenigsten geeignete Dämmsystem ist die Holzweichfaserplatte. Dieses Material zeigte die mit Abstand höchsten Kolonie-Bildenden-Einheiten. Es konnte eine sehr große DNA-Menge isoliert werden, in der anschließend die größte mikrobielle Aktivität in Form von Pilzen festgestellt wurde.

In diesem Projekt wurde erfolgreich gezeigt, dass molekularbiologische Methoden auch für baubiologische Untersuchungen angewendet werden können. Dieser moderne Methodenansatz bietet große Vorteile gegenüber der klassischen Detektion von Mikroorganismen mittels Kultivierungsversuchen. Es werden nur sehr geringe Probenmengen benötigt (Milligramm-Bereich) wodurch eine minimal-invasive Entnahme am Beprobungsort möglich ist. Die Analysezeit ist wesentlich geringer als bei Kultivierungsversuchen wie auch die Selektivität des Verfahrens. Mit Hilfe von klassischen Kultivierungsversuchen kann nur ein kleiner Bruchteil der tatsächlich vorhandenen Bakterien und Pilze erfasst werden. Schnelle und sensitive molekulare DNA-Techniken, die hauptsächlich PCR-basiert sind, ermöglichen die Identifizierung der kompletten Diversität an Mikroorganismen ohne vorhergehende Kultivierung.

Der erste Schritt für eine erfolgreiche und komplette Analyse einer Mikroflora ist die Wahl einer am besten für das jeweilige Material geeigneten DNA-Isolierungsmethode. Diese Methode soll die effektive Lyse aller Zellen und Sporen garantieren und eine qualitativ hochwertige DNA mit wenigen Verunreinigungen liefern, um weitere molekulare Analysetechniken zu ermöglichen und in weiterer Folge auch aussagekräftige und korrekte Ergebnisse zu liefern. Für diesen Zweck wurden im Rahmen dieses Projektes verschiedene DNA-Extraktionsmethoden verglichen. Als optimale Methode für die Isolierung von DNA aus Baumaterialien erwies sich der FastDNA® SPIN Kit for Soil. Diese Methode erlaubt eine effiziente Isolierung von DNA aus verschiedensten Baumaterialien und konnte in weiterer Folge erfolgreich für alle untersuchten Dämmsysteme angewendet werden.

8.4 Hygrothermische Vorortmessungen

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 Zusammenarbeit mit den Kindergärtnerinnen konnte die Raum-

feuchtebelastung im zweiten Winter auf ein „übliches“ Niveau erhöht werden, im letzten Winter 2012/13 konnte eine sehr hohe Raumfeuchtebelastung erzielt werden.

Aufgrund hoher Einbaufeuchte und wegen des zeitlich unterschiedlichen Auftrags einzelner Schichten benötigten die Zellulosedämmung und der Wärmedämmputz eine sehr lange Zeit zum Austrocknen. Im Fall des Wärmedämmputzes zog sich dies bis in den zweiten Winter. Die Dämmsysteme mit Schilf, Holzweichfaser- und Perliteplatten zeigten hierbei ein günstigeres Verhalten. Nach dem Austrocknen der Einbaufeuchte erwies sich der Wärmedämmputz jedoch als sehr günstig, da hier mit die niedrigsten Feuchtebelastung in der Dämmung gemessen wurden. In der Zellulosedämmung dagegen entstand bei hoher Raumfeuchtebelastung immer wieder Kondensat bzw. 100 % Luftfeuchte.

Die Abdichtung der Auflagertaschen bewirkte eine niedrigere Feuchtebelastung im Balkenaufleger. Nur am Ende der Auflager wich die Feuchtebelastung signifikant voneinander ab. 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 und temperaturkorrigierte Holzfeuchte nach dem Abtrocknen der Einbaufeuchte mit maximal 16 M-% Holzfeuchte in einem unproblematischen Bereich. Mit Ausnahme des Balkens im Feld mit Wärmedämmputz, in dem zu Beginn bis zu 19 M-% gemessen wurden, reagierten alle Holzbalken sehr träge auf klimatische Einwirkungen.

Wenn auf der Hauptwetterseite eine ausreichende Schlagregendichtheit gewährleistet ist, ist der Einbau der Innendämmsysteme demnach als unkritisch anzusehen. Wegen der besonders unkritischen Werte und wegen des höheren Einsparpotentials empfiehlt sich hier die Perliteplatte und mit Abstrichen die Holzweichfaserplatte. Die „konvektionshemmende“ Abdichtung der Auflagertaschen unterhalb der Einschnittdecke wird empfohlen, wenngleich mit weniger aufwändigen Maßnahmen als die in dem Projekt realisierten.

Obwohl die zum Teil sehr hohen Raumlufffeuchten im letzten Winter einen gewissen Sicherheitsfaktor bedeuten, dürfen die insgesamt unkritischen Messergebnisse zum derzeitigen Zeitpunkt nicht verallgemeinert werden. Denn andere projektspezifische Besonderheiten begünstigten das positive und unkritische Gesamtergebnis zum Thema Holzbalkendecken und Innendämmung, beispielsweise der wenig wärmeleitfähige, aber sehr flüssigwasserleitende Ziegel, die relativ dicke Außenwand und der geringe Einfluss von Schlagregen.

8.5 Hygrothermische Simulationen

Mittels der zweidimensionalen, hygrothermischen Software Delphin5 sollen die Messdaten nachvollzogen werden. Dazu wird die Temperaturkorrektur der Holzfeuchtemessdaten erläutert. Durch Messungen und Simulationen kann gezeigt werden, dass Schlagregen keinen relevanten Einfluss auf die Messdaten ausübt. Das Vorgehen bei den Simulationen und der Umgang mit den Permeabilitäten der Konstruktionen und Materialien werden aufgezeigt

sowie Beispiele zur Nachrechnung der Messdaten dargelegt. Die Simulationen werden im Rahmen einer Dissertation weitergeführt.

8.6 Dissemination

Schon während der Laufzeit des Projektes wurde eine konstant sehr hohe Anzahl von Vorträgen gehalten sowie Publikationen verfasst. Zusammen mit den im Weiteren geplanten Aktivitäten beweisen sie, dass das Forschungsprojekt OEKO-ID bezüglich der Relevanz als auch der Qualität ein ungebrochenes Interesse bei Fachpublikum aber auch Laien weckt. Neben deutschsprachigen Fachzeitschriften für am Bau tätige Menschen hatten auch Bemühungen zur Veröffentlichung in internationalen Wissenschaftszeitschriften Erfolg.

Die Nachfragen im Anschluss an Präsentationen konzentrierten sich oft um die Abdichtung der Auflagertaschen sowie um die Thematik, ob im Bereich zwischen den Deckenbalken gedämmt werden solle oder nicht bzw. wie in Regionen mit hoher Schlagregenbeanspruchung vorgegangen werden solle.

9 Literaturverzeichnis

Literatur:

- [1] [Altschul et al. 1997] Altschul et al.: Gapped BLAST and PSI-BLAST: a new generation of protein database search programs. *Nucleic Acids Res.* 25, pp. 3389-3402, 1997
- [2] [Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser 2005]: Protokollband Nr. 32: Faktor 4 auch bei sensiblen Altbauten: Passivhauskomponenten + Innendämmung. Passivhaus-Institut Darmstadt 2005, S. 80-81
- [3] [Arbeitsgemeinschaft Mauerziegel 2000] (im Bundesverband der Deutschen Ziegelindustrie e.V.) 2010. *Luftdichtheit in Ziegel-Massivgebäuden*, AMz-Bericht 1/2000
- [4] [Ausubel et al. 1991] Ausubel F M, Brent R, Kingston R E, Moore D D, Seidman J G, Smith J A, Struhl K: Current protocols in molecular biology. In Wiley J. and Sons (Ed.). New York, 1991
- [5] [Blomberg 2001] Blomberg T, 2001: PC-Programm für zweidimensionalen Wärmedurchgang - Handbuch mit Einführung in die theoretischen Grundlagen und Beispielen Version 4.0, http://www.buildingphysics.de/manuals/heat3_4_deutsch.pdf
- [6] [Bundesdenkmalamt Wien 2011]: Richtlinie Energieeffizienz am Baudenkmal, Wien, 2011
- [7] [Bundesministerium für Umwelt 1995]: Messung des Windprofils mittels Akustikradar in Graz, Umweltbundesamt, Wien, 1995
- [8] [Burdine 1953] Burdine N T: Relative permeability calculations from pore-size distribution data. *Trans. AIME* 198, pp 71-78, 1953
- [9] [Carbone et Kohn 1999] Carbone I, Kohn L: A method for designing primer sets for speciation studies in filamentous ascomycetes. *Mycologia* 91 (3), pp. 553-555, 1999
- [10] [Erhorn et al. 1988] Erhorn H, Szerman M, Rath J: Wärme- und Feuchteübergangskoeffizienten in Außenwandecken von Wohnbauten, Bauforschungsbericht F 2110, Fraunhofer-Institut für Bauphysik Stuttgart 1988
- [11] [Ettenauer et al. 2012] Ettenauer J et al: Microbes on building materials - Evaluation of DNA extraction protocols as common basis for molecular analysis. *Sci. Tot. Environ.* 439, pp. 44-53, 2012
- [12] [Fechner et al. 1996] Fechner H, Grunewald J, Häupl P, Stopp H, Strangfeld P, Feuchtettransport in kapillarporösen Baustoffen und in Umfassungskonstruktionen, Abschlußbericht zum BMBF-Projekt HAMTIE, TUD 1996, Helsinki, Sept. 1996
- [13] [Fechner 2002] Fechner J (Hrsg): Altbaumodernisierung - Der praktische Leitfaden, Springer, Wien, 2002

- [14] [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
- [15] [Gnoth et al. 2003a] Gnoth S, Hansel F, Jurk K, Toepel T: Heizungstechnisch gestützte kapillaraktive Innendämmung bei Holzbalkendecken, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2003
- [16] [Gnoth et al. 2003b] Gnoth S, Hensel F, Jurk K, Toepel T, Strangfeld P, Stopp H, 2003b: Hygrothermische Untersuchungen der Balkenköpfe von Einschubdecken bei innendämmten Außenwänden unter Einbeziehung der Heizungstechnik. Abschluss-Forschungsbericht, FH Lausitz, Cottbus, 2003
- [17] [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“ im Tagungsband 2nd Central European Symposium on Building Physics (CESBP) 2013 pp 299-304, pp 513-520
- [18] [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, 2002
- [19] [Häupl 2010] Häupl P: Innendämmung von Außenbauteilen, in Bauphysikkalender 2010, Fouad N (Hrsg.), Ernst und Sohn, Berlin
- [20] [Haugland et al. 1999] Haugland R A, Heckmann J L, Wamer L J: Evaluation of different methods for the extraction of DNA from fungal conidia by quantitative competitive PCR analysis. J. Microbiol. Methods (37) 1999: pp 165-176
- [21] [Hens 2006] Hens H: The vapor diffusion resistance and air permeance of masonry and roofing systems, Building and Environment (41) 2006: pp. 745–755
- [22] [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) 2007: pp. 95 - 124
- [23] [Hessisches Ministerium 2006] Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung 2006: Energiespar-informationen 11, Wärmedämmung von Außenwänden mit der Innendämmung, 09/2006
- [24] [Huckfeld et Schmidt 2006] Huckfeld T, Schmidt O: Hausfäule- und Bauholzpilze - Diagnose und Sanierung, Rudolf Müller Verlag, 2006
- [25] [Janetti et al. 2012] Janetti M B, Ochs F, Feist W: 3D Simulation of Heat and Moisture Diffusion in Constructions, , <http://www.comsol.com/papers/10921/> am 30.10.2012 15:00
- [26] [Kautsch 2005] Kautsch P: Gebäude mit historischen Fassaden - Möglichkeiten und Grenzen der Innendämmung, Tagungsband Ökologische Gebäudesanierung, AEE-INTEC Gleisdorf, 2005

- [27] [Kautsch et al. 2006] Kautsch P et al: Zellulose-Innendämmung ohne Dampfsperre, Untersuchungen zur grundsätzlichen Eignung aufgespritzter und verputzter Zelluloseschichten, Berichte aus Energie- und Umweltforschung Wien 84/2006
- [28] [Kehl et al. 2013a] Kehl D, Ruisinger U, Plagge R, Grunewald J: Holzbalkenköpfe bei innen gedämmtem Mauerwerk - Ursachen der Holzzerstörung und Beurteilung von Holz zerstörenden Pilzen, Tagungsband 2. Internationaler Innendämmkongress Dresden, TU Dresden, 2013
- [29] [Kehl et al. 2013b] 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), 2013: pp 299-304,
- [30] [Krus et Sedlbauer 2001] Krus M, Sedlbauer K: Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen hygrothermisch unter die Lupe genommen, Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Valley/Oberlindern 2001
- [31] [Künzel H 2002] Künzel, H.: Bauphysik - Geschichte und Geschichten, Fraunhofer-IRB-Verlag: Stuttgart 2002
- [32] [Le Calvez et al. 2009] Le Calvez T, Burgaud G, Mahe S, Barbier G, Vandenkoornhuysen P: 1 Fungal diversity in a deep-sea hydrothermal ecosystem. Appl. Environ. Microbiol. (75) 2009: pp 6415-6421
- [33] [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
- [34] [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, 2011
- [35] [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.
- [36] [Nicolai 2007] Nicolai A: Modelling and Numerical Simulation of Salt Transport and Phase Transitions in Porous Building Materials, Dissertation, Syracuse University (USA) 2007
- [37] [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

- [38] [Plagge et al. 2003] Plagge R, Cerny R, Matiasovsky, 2003: Laboratory measurements. In: Development of insulation materials with specially designed properties for building renovation, EU-Projekt, TU Dresden, 2003
- [39] [Rode et Clorius 2004] Rode C, Clorius C O: Modeling of Moisture Transport in Wood-with Hysteresis and Temperatura-Dependent Sorption Characteristics. proceedings Buildings IX, Clearwater Beach, 5-10 December 2004, Tullie Circle: ASHRAE
- [40] [Ronacher 2001] Ronacher H: Energie Plus Haus Weber, Berichte aus Energie- und Umweltforschung 04/2011
- [41] [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 & Sohn, Berlin, pp 249-295
- [42] [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 & Building Science, Vol. 27 No. 4, Sage Publications 2004
- [43] [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 & Building Science, Vol. 27 No. 4, Sage Publications 2004
- [44] [Ruisinger et Grunewald 2009] Ruisinger U, Grunewald J, 2009: Feuchteatlas zur Vermeidung planungsbedingter Feuchteschäden -Neue Beurteilungskriterien zur Bewertung innen gedämmter Konstruktionen, Abschlussbericht 2009
- [45] [Ruisinger et al. 2013] Ruisinger U, Kehl D, Plagge R: Untersuchung außenklimatischer Einflüsse auf Wandkonstruktionen. Tagungsband 2. Internationaler Innendämmkongress Dresden, TU Dresden, 2013
- [46] [Schabereiter-Gurtner et al. 2001] Schabereiter-Gurtner C, Piñar G, Lubitz W, Rölleke S: Analysis of fungal communities on historical church window glass by denaturing gradient gel electrophoresis and phylogenetic 18S rDNA sequence analysis. J.Microbiol.Methods. (47) 2001: pp. 345-354
- [47] [Schuster et al. 1999] Schuster G, Szeider G, Wölfl M: Wärmeschutzmaßnahmen an Wohngebäuden, Zentrum für Bauen und Umwelt, Donau-Universität Krems, 1999
- [48] [Sert et Sterflinger 2010] Sert H B, Sterflinger K: A new *Coniosporium* species from historical marble monuments. Mycol Progress (9) 2010: pp 353-359
- [49] [Silberhorn 2008] Silberhorn O: Landesamt für Finanzen, Augsburg, Bericht Nr.: 9057/2008
- [50] [Stade 1904] Stade F: Die Holzkonstruktionen, Reprint der Originalausgabe von 1904, Bechtermünz Verlag München, 1997

- [51] [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 33/2010
- [52] [Ueno 2012] Ueno K: Masonry Wall Interior Insulation Retrofit Embedded Beam Simulations, BEST3 Conference April 2-4, 2012, Atlanta
- [53] [Van den Ende et de Hoog 1999] Van den Ende A H G, de Hoog G S: Variability and molecular diagnostics of the neurotropic species *Cladophialophora bantiana*. Stud Mycol 1999 (43): pp 151-62
- [54] [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. 2010 (68): pp 303–313
- [55] [Wegerer 2010] Wegerer P: Beurteilung von Innendämmsystemen – Langzeitmessung und hygrothermische Simulation am Beispiel einer Innendämmung aus Schilfdämmplatten, Diplomarbeit, Technische Universität Wien, 2010
- [56] [Wirkner 1949] Wirkner E: Einmauern von Balkenköpfen in: Bauzeitung 3 (7) 1949: S. 100-101
- [57] [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

Richtlinien/Normen:

- [58] EN 673 (2011): Glas im Bauwesen – Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) – Berechnungsverfahren. DIN-Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin
- [59] DIN 4108-03 (2001): Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden, Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz. DIN-Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin
- [60] DIN 68800: Holzschutz Teile 1 bis 3. DIN-Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin
- [61] EN 13779 (2007): Eingangsparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden – Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik. DIN-Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin
- [62] EN ISO 13788 (2001): Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Raumseitige Oberflächentemperatur zur Vermeidung kritischer Oberflächenfeuchte und Tauwasserbildung im Bauteilinneren. DIN-Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin
- [63] ÖNORM EN 673 (2011): Glas im Bauwesen – Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) – Berechnungsverfahren. Österreichisches Normungsinstitut, Wien

- [64] ÖNORM B 3802: Holzschutz im Hochbau Teile 1 bis 3. Österreichisches Normungsinstitut, Wien
- [65] ÖNORM EN ISO 10211 (2008): Wärmebrücken im Hochbau - Wärmeströme und Oberflächentemperaturen - Detaillierte Berechnungen. Österreichisches Normungsinstitut, Wien
- [66] ÖNORM EN ISO 13786 (2008): Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden – Dynamisch-thermische Kenngröße – Berechnungsverfahren. Österreichisches Normungsinstitut, Wien
- [67] ÖNORM EN 13829 (2001): Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden - Bestimmung der Luftdurchlässigkeit von Gebäuden – Differenzdruckverfahren. Österreichisches Normungsinstitut, Wien
- [68] SIA 382/1 (2007): Lüftungs- und Klimaanlage - Allgemeine Grundlagen und Anforderungen, Zürich, SIA - Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein

Merkblätter der Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V. (WTA-Merkblätter):

- [69] WTA 6-1, Leitfaden für hygrothermische Simulationsberechnung, Ausgabe: 2001/D
- [70] WTA 6-2, Simulation wärme- und feuchtetechnischer Prozesse, Ausgabe: 2001/D
- [71] WTA 6-3, Rechnerische Prognose des Schimmelpilzwachstumsrisikos, Ausgabe: 2005/D
- [72] WTA 6-4, Innendämmung nach WTA I, Planungsleitfaden, Ausgabe: 2009/D
- [73] WTA 8-5, Fachwerkinstandsetzung nach WTA V, Innendämmungen, Ausgabe: 2008/D
- [74] WTA E-8-14, Balkenköpfe in Außenwänden, Merkblatt E 8-14 (Entwurf, noch nicht veröffentlicht)

Internetquellen

- [75] de.wikipedia.org/wiki/Backstein (Zugriff am 27.09.2012)
- [76] www.wufi.de
- [77] www.bauklimatik-dresden.de
- [78] www.antherm.at
- [79] http://www.abfallwirtschaft.steiermark.at/cms/dokumente/10024917_45536/9397cb5d/3.8_Zellulose_Alpapierflocken_V3.pdf am 23.10.2013

- [80] www.ecobine.de bzw. Herbert Danner, Baubiologe (IBN), Bauzentrum München, Ökologische Wärmedämmstoffe im Vergleich 2.0, Juni 2010, S. 38, 39, 57 am 30.10.2012
- [81] www.abfallwirtschaft.steiermark.at/cms/dokumente/10024917_45536/9397cb5d/3.8_Zellulose_Alpapierflocken_V3.pdf am 30.10.2012
- [82] KnaufPerlite http://www.knauf-perlite.de/PDF/Knauf_TecTem_Verarbeiter-Broschuere_120924.pdf und <http://www.knauf-erlite.de/produkte/tectem.html#downloads> am 2.10.20123
- [83] www.roefix.at/var/fixitgruppe/storage/ilcatalogue/files/pdf/Technisches_Merkblatt_R%C3%96FIX_CalceClima%C2%AE_Thermo_Kalk-W%C3%A4rmed%C3%A4mmputz_DC0011849.PDF am 16.09.2013
- [84] www.thermosilit.com (Dullinger GesmbH am 30.10.2012)
- [85] www.gutex.de (Gutex Holzfaserplattenwerk GmbH am 30.10.2012)
- [86] <http://www.steico.com/produkte/ueberblick.html> (Steico SE am 30.10.2012)
- [87] www.rohrwolf.com/
- [88] www.roefix.at/Produkte/Sanier-und-Renovierprodukte/Oekologische-Produkte/ROeFIX-CalceClima-R-Thermo-Kalk-Waermedaemmputz
- [89] Bau Natürlich, Schmidt und Rosman OG, Maria Theresia-Park 30, 7111 Parndorf
- [90] www.zamg.ac.at/fix/klima/oe71-00/klima2000/klimadaten_oesterreich_1971_frame1.htm am 12.09.2013

10 Unterschrift

Ich bestätige, dass der Bericht vollinhaltlich durch die Partner des Projektes akzeptiert wurde.

Graz, 31.10.2013

Univ.-Prof. DDr. Peter Kautsch

Ort, Datum

Unterschrift und Stempiglie des Antragstellers (Koordinators)

A2 Anhang zum Abschnitt 4 - Mikrobiologische Untersuchungen

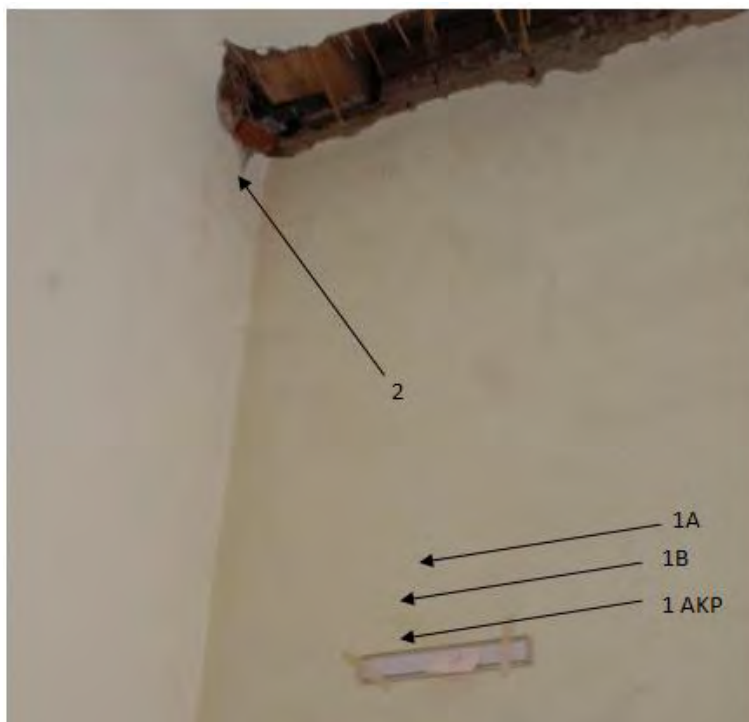


Abb. 114 Probenort 1: Außenwand - Mauer- bzw. Wandprobe in ca. 2 m Höhe

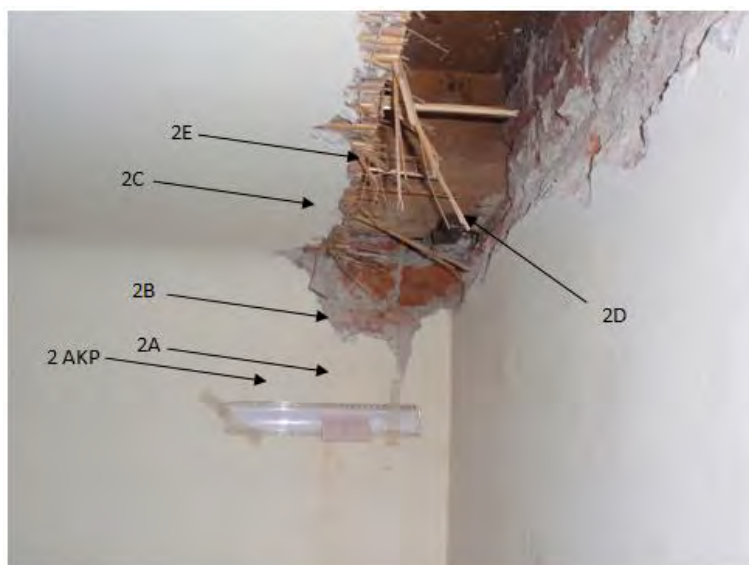


Abb. 115 Foto 2. Probenort 2: Außenwand – Gebäudewinkel im Deckenbereich in ca. 3-3.5m Höhe

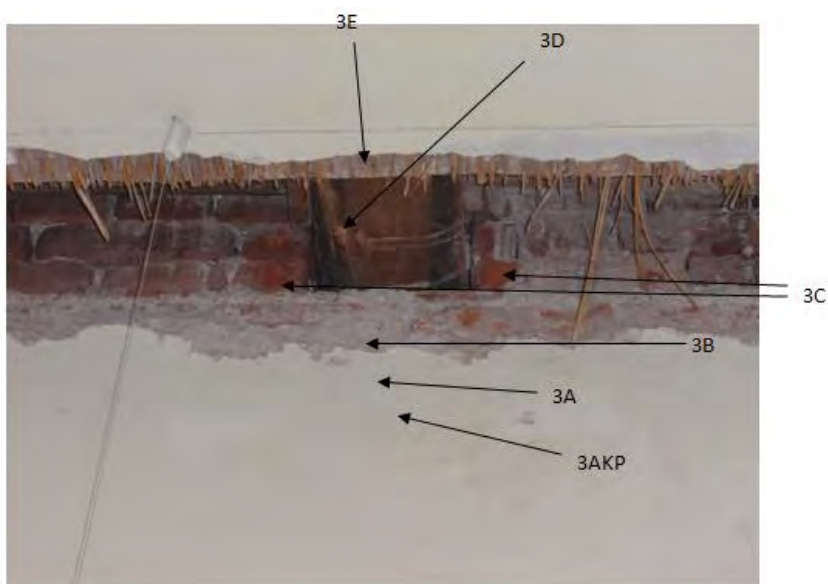


Abb. 116 **Foto 3.** Probenort 3: Außenwand – rechte Seite des Zimmers im Deckenbereich in ca. 3-3.5m Höhe

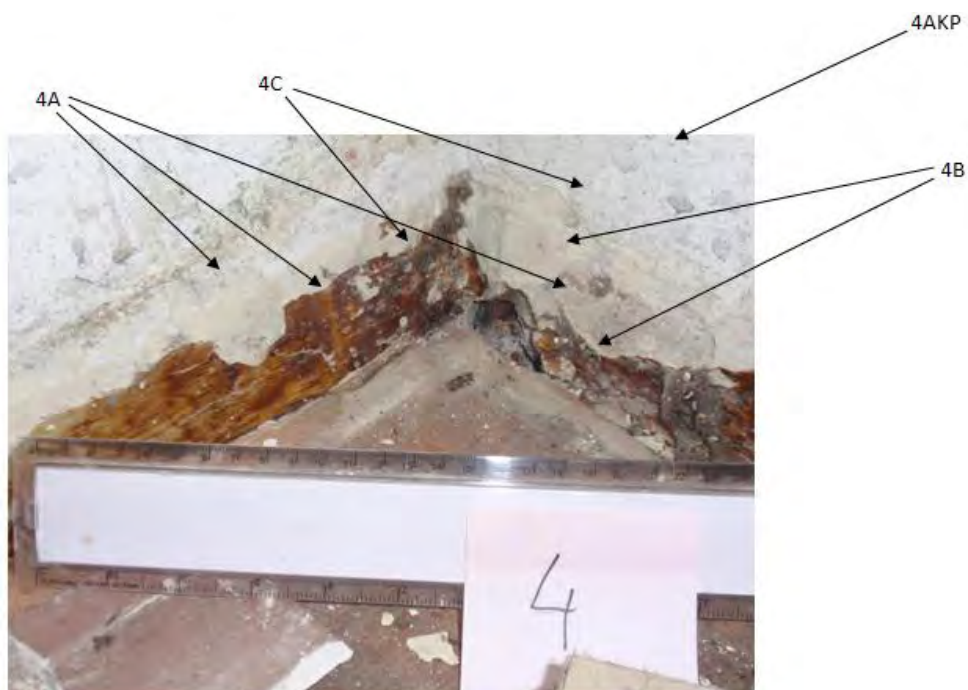


Abb. 117 **Foto 4.** Probenort 4: Außenwand – linke Ecke im DG-Fußbodenbereich – sehr poröse Wand (feucht)



Abb. 118 **Foto 5.** Probenort 5: Außenwand – linke DG-Raumhälfte im Bereich eines Heizkörperrohres, das in den Boden führte – sehr poröse Wand (feucht)

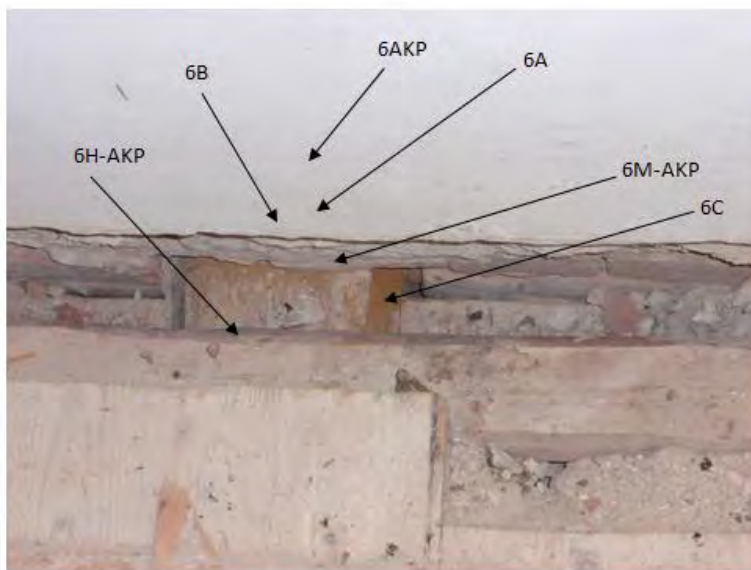


Abb. 119 **Foto 6.** Probenort 6: Außenwand – rechter Bereich des DG-Zimmers – entspricht derselben Lage wie der Probenort 3 – wieder Fußbodenbereich, an dem die Decke geöffnet wurde

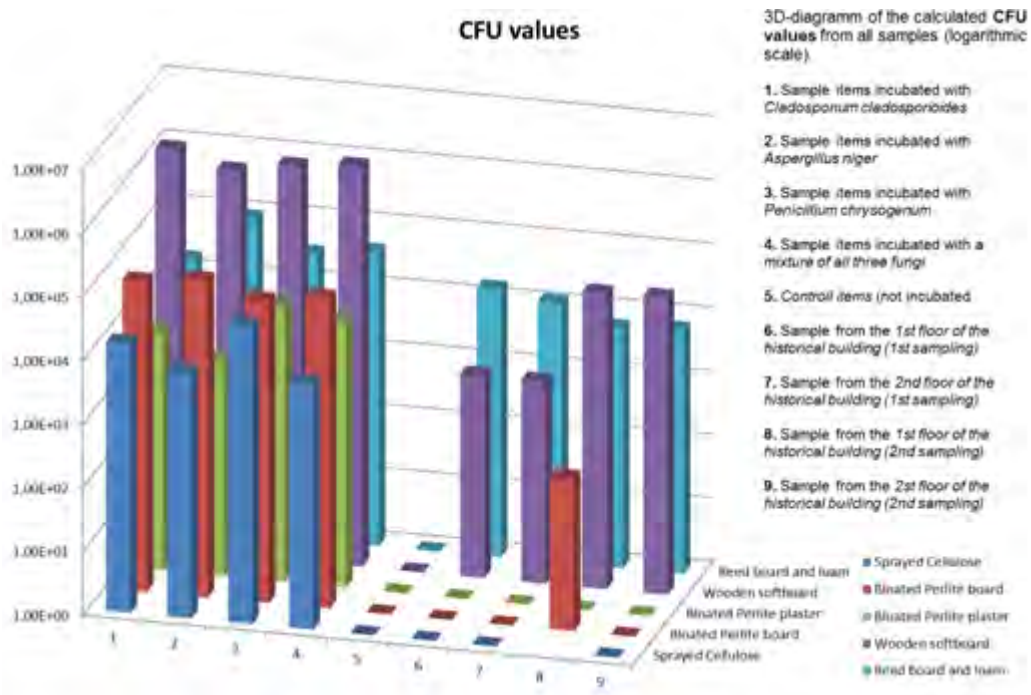


Abb. 120 3D-Diagramm der KBE-(CFU-) Werte auf einer logarithmischen Skala. Probekörper, die mit *Cladosporium cladosporioides* inkubiert wurden (1), mit *Aspergillus niger* (2), mit *Penicillium chrysogenum* (3), mit einer Mischung aller drei Pilzsporensuspensionen (4), Nullkontrollen, die weder beimpft noch inkubiert wurden (5), Proben aus dem 1. OG des Versuchshauses von der zweiten Probenentnahme (6), aus dem Dachgeschoss von der zweiten Probenentnahme (7); Proben aus dem 1. OG des Versuchshauses von der dritten Probenentnahme (8), Proben aus dem Dachgeschoss des Versuchshauses von der dritten Probenentnahme (9)

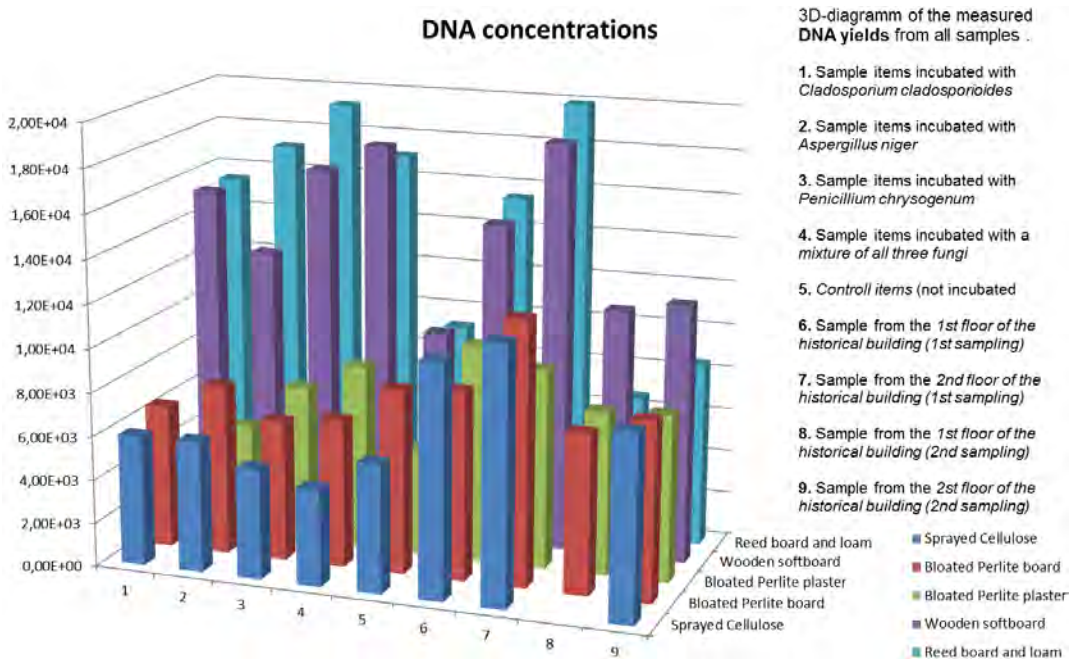


Abb. 121 3D-Diagramm der gemessenen DNA-Konzentrationen. Probekörper, die mit *Cladosporium cladosporioides* inkubiert wurden (1), mit *Aspergillus niger* (2), mit *Penicillium chrysogenum*

(3), mit einer Mischung aller drei Pilzsporensuspensionen (4), Nullkontrollen, die weder beimpft noch inkubiert wurden (5), Proben aus dem 1. OG des Versuchshauses von der zweiten Probenentnahme (6), aus dem Dachgeschoss von der zweiten Probenentnahme (7); Proben aus dem 1. OG des Versuchshauses von der dritten Probenentnahme (8), Proben aus dem Dachgeschoss des Versuchshauses von der dritten Probenentnahme (9)

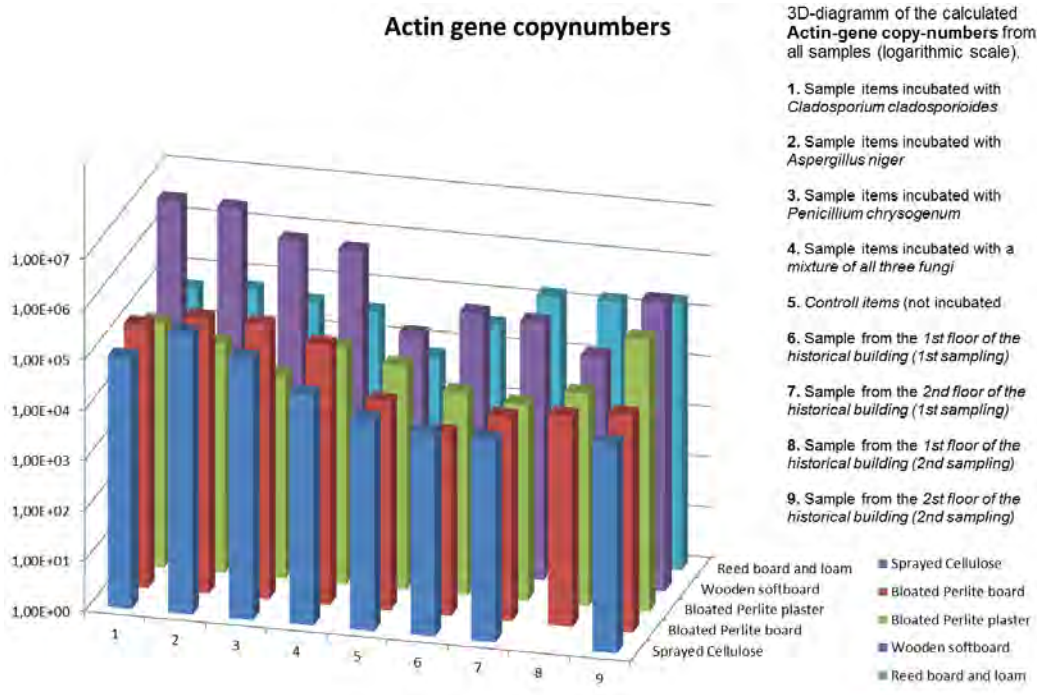


Abb. 122 3D-Diagramm der Aktin-Gen-Kopienanzahl bzw. der aktiven Pilze auf einer logarithmischen Skala. Probekörper, die mit *Cladosporium cladosporioides* inkubiert wurden (1), mit *Aspergillus niger* (2), mit *Penicillium chrysogenum* (3), mit einer Mischung aller drei Pilzsporensuspensionen (4), Nullkontrollen, die weder beimpft noch inkubiert wurden (5), Proben aus dem 1. OG des Versuchshauses von der zweiten Probenentnahme (6), aus dem Dachgeschoss von der zweiten Probenentnahme (7); Proben aus dem 1. OG des Versuchshauses von der dritten Probenentnahme (8), Proben aus dem Dachgeschoss des Versuchshauses von der dritten Probenentnahme (9)

Tab. 27 Beschreibung der entnommen Proben zur Bestimmung des mikrobiologischen Ist-Zustandes

Probenahme in der Schönbrunnngasse 30, Graz – 2. Oktober 2010

1. Obergeschoss

Probenort 1 (Abb. 114)

Außenwand - Mauer- bzw. Wandprobe in ca. 2 m Höhe

Proben-Bezeichnung	Probenart/Abnahmetechnik
1A	Wandputz mit Hammer abgeschlagen und in Plastikbeutel gesammelt. Tiefe ca. 20 bis 30 mm, Menge ca. 5 bis 10 cm ²

1B	Gelbe Wandfarbe mit darunterliegender weißen Grundierung mit Skalpell von der Wand abgeschabt (ca. 10 cm ²) in 50 ml Falcon Tube (ca. 1 bis 2 g)
-----------	--

Probenort 2 (Abb. 115)

Winkel der Gebäudeecke - Deckenbereich in ca. 3 bis 3.5 m Höhe

2A	Gelbe Wandfarbe mit darunterliegender weißen Grundierung mit Skalpell von der Wand abgeschabt (ca. 10 cm ²) in 50 ml Falcon Tube (ca. 1 bis 2 g)
2B	Wandputz mit Hammer abgeschlagen und in Plastikbeutel gesammelt. Tiefe ca. 20 bis 30 mm, Menge ca. 5 bis 10 cm ²
2C	Stück des Deckenverputzes aus der Ecke (ca. 10 cm ² und ca. 20 bis 30 mm dick) mit Hammer aus der Decke gebrochen und in Plastikbeutel gesammelt
2D	Kleine Holzstücke (ca. 10 bis 50 mm Länge und 1 bis 5 mm Durchmesser) des äußersten Deckenbalkens mit Skalpell abgeschnitten und in Plastikbeutel gesammelt
2E	Kleine Schilfstücke der Schilfdeckenschicht aus der Ecke mit Skalpell abgeschnitten und in Plastikbeutel gesammelt; ca. 40 bis 100 mm lange Schilfstücke

Probenort 3 (Abb. 116)

Außenwand – rechte Zimmerseite im Deckenbereich in ca. 3 bis 3.5 m Höhe

3A	Gelbe Wandfarbe mit darunterliegender weißen Grundierung mit Skalpell von der Wand abgeschabt (ca. 10 cm ²) in 50 ml Falcon Tube (ca. 1 bis 2 g)
3B	Wandverputz mit Hammer abgeschlagen und in Plastikbeutel gesammelt. Tiefe ca. 20 bis 30 mm, Menge ca. 5 bis 10 cm ²
3C	Oberflächenmaterial von roten Ziegelsteinen mit dem Meißel in ein Falcon-Tube abgeschabt (ca. 2 bis 3 g)
3D	Kleine Holzstücke (ca. 10 bis 50 mm Länge und 1 bis 5mm Durchmesser) des äußersten Deckenbalkens mit Hammer und Meißel abgestemmt und in Falcon-Tube gesammelt
3E	Kleine Schilfstücke der Schilfdeckenschicht aus der Ecke mit Skalpell abgeschnitten und in Falcon-Tube gesammelt; ca. 50 bis 100 mm lange Schilfstücke

Dachgeschoss

Probenort 4 (Abb. 117)

Winkel der Gebäudeecke –Fußbodenbereich; sehr poröse Wand (feucht)

4A	Wandfarbe mit Resten des Linoleumbodens bzw. des Klebers mit dem Skalpell von der Wand abgebrochen, auf Papiertuch gesammelt und von dort in ein Falcon-Tube transferiert (ca. 10 cm ²)
4B	Wandmaterial (Putz) von der Mauer abgeschlagen/abgebrochen, auf Papiertuch gesammelt und in Falcon-Tube transferiert
4C	Größere Stücke der Wand mit dem Meißel abgebrochen, über Papiertuch auffangen und in Falcon-Tube transferiert

Probenort 5 (Abb. 118)

Außenwand – linke Raumhälfte im Bereich eines Heizkörperrohres, das in den Boden führte – sehr poröse Wand (feucht)

5A	Wandfarbe mit Resten des Linoleumbodens bzw. des Klebers mit dem Skalpell von der Wand abgebrochen, auf Papiertuch gesammelt und von dort in ein Falcon-Tube transferiert (ca. 10 cm ²)
5B	Wandmaterial (Putz) von der Mauer abgeschlagen/abgebrochen, auf Papiertuch gesammelt und in Falcon-Tube transferiert
5C	Größere Stücke der Wand mit dem Meißel abgebrochen, über Papiertuch aufgefangan und in Falcon-Tube transferiert

Probenort 6 (Abb. 119)

Außenwand – rechter Zimmerbereich – Lage wie Probenort 3 – Fußbodenbereich bei Deckenöffnung

6A	Wandfarbe mit Resten des Linoleumbodens bzw. des Klebers mit dem Skalpell von der Wand abgebrochen, auf Papiertuch gesammelt und von dort in ein Falcon-Tube transferiert (ca. 10 cm ²)
6B	Wandmaterial (Putz) von der Mauer abgeschlagen/abgebrochen, auf Papiertuch gesammelt und in Falcon-Tube transferiert
6C	Holzprobe eines darunterliegenden Holzbalken der Zwischendecke (Vergleich Probe 3D) – mit dem Meißel einige Stücke gelöst. Teilweise angemoderter Holzbalken. Holzfasern und Holzstaub mit Pinzette und Spatel in einen Plastikbeutel transferiert
6H	Abklatschplatte vom Holzdeckenbalken
6M	Abklatschplatte von der Innenseite der offenen Decke
7 - 12	Abklatschplatten (jeweils DG18- und Malzextrakt-Medium) die nachträglich zur ersten Probenahme, von Herrn Dipl.-Ing. Herwig Hengsberger genommen wurden
13, 14	Probenmaterial, das nachträglich zur ersten Probenahme, von Herrn Dipl.-Ing. Herwig Hengsberger vom Lehm-Schilfdämmmaterial bei der Applikation der Dämmstoffe genommen wurde

Tab. 28 Reinkulturen, die durch Ausschütteln der Probe isoliert werden konnten

Probe Gattung	1B	2A	2B	2C	2D	2E	3A	3B	3C	3D	3E	4C	5A	5B	5C	6A	6B	6C	13	14	Summe Σ
	<i>Altanaria</i>							4													
<i>Cladosporium</i>							2	18				1	1								22 (5,7%)
<i>Exophiala – black MCF</i>		8	8	11	6			5	8	6	5	6	15	6	8	4	8	7			111 (28,9%)
<i>Fusarium</i>											2										2 (0,5%)
<i>Penicillium</i>	4		4				57		21		57	10	2	14			2	26			197 (51,4%)
<i>Sporotrix Ophiostoma</i>		6																			6 (1,6%)
<i>Zygomycete Mucorales</i>																			3	1	4 (1%)
Unidentifiziert	5		6		5	1	1					5	8				1	4	1		37 (9,7%)
Summe Σ	9	14	18	11	11	1	64	23	29	6	64	22	26	20	8	4	11	37	4	1	383 (100%)

Tab. 29 Reinkulturen, die von Abklatschplatten isoliert werden konnten

Probe Gattung	1	2	3	4	5	6	6H	6M	7	8	9	10	11	12	Summe Σ
<i>Altanaria</i>			1		9		15	13	5			2			45 (5,3%)
<i>Aureobasidium</i>	4			3	1		4					3			15 (1,8%)
<i>Cladosporium</i>	7	10	3	75	40	1	30	10	28	7	17	2			230 (27,2%)
<i>Fusarium</i>		9											4	28	41 (4,9%)
<i>Epicoccum</i>	31				10		40		4						85 (10,1%)
<i>Eurotium</i>	2			4	40		4		2						52 (6,2%)
<i>Penicillium</i>	2	4	46	50	7	8	22	8	2	32	7	26			214 (25,3%)
<i>Sclerotium</i>							5	8							13 (1,5%)
<i>Zygomycete Mucorales</i>	3	2		2			7			5	4	12	14	10	59 (7%)
Unidentifiziert	40	9	6	3	8	4	2	11		5		1		2	91 (10,8%)
Summe Σ	89	34	56	137	115	13	129	50	41	49	28	46	18	40	845 (100%)

Tab. 30 Zusammenfassung aller isolierten Pilze für die jeweiligen Beprobungsorte

Gattung Phänotypen		Probe														Summe Σ
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
<i>Altanaria</i>	10			5		9	28	5			2					49 (4%)
<i>Aureobasidium</i>	3	4			3	1	4				3					15 (1,2%)
<i>Cladosporium</i>	53	7	10	23	76	41	41	28	7	17	2					252 (20,5%)
<i>Fusarium</i>	12		9	2								4	28			43 (3,5%)
<i>Epicoccum</i>	11	31				10	40	4								85 (6,9%)
<i>Eurotium</i>	8	2			4	40	4	2								52 (4,2%)
<i>Exophiala</i> <i>- black MCF</i>	3		33	24	6	29	19									111 (9%)
<i>Penicillium</i>	89	6	8	181	60	23	66	2	32	7	26					411 (33,5%)
<i>Sclerotium</i>	1						13									13 (1,1%)
<i>Sporotrix</i> <i>Ophiostoma</i>	1		6													6 (0,5%)
<i>Zygomycete</i> <i>Mucorales</i>	8	3	2		2		7		5	4	12	14	10	3	1	63 (5,1%)
<i>Unidentifiziert</i>	33	45	21	7	8	16	22		5		1		2	1		128 (10,4%)
Summe Σ	232	98	89	242	159	169	244	41	49	28	46	18	40	4	1	1228 (100%)

Tab. 31 Berechnete Werte für Kolonie-Bildende-Einheit (KBE) der Probekörper aus Klimakammer, Nullkontrollen und Proben vom Versuchshaus. Angegebene Werte für DNA-Konzentration sind gerundete Mittelwerte von Triplikat-Messungen mit NanoDrop-Spektrophotometer. Proben ohne Wachstum sind mit „k. W.“ gekennzeichnet. (1) Aufspritz-Zellulose, (2) Perliteplatte, (3) Thermosilitputz, (4) Holzweichfaserplatte, (5) Schilfplatte mit Lehmputz, (R1) Probe aus dem Referenzfeld im OG vom Mauerputz, (R2) Probe aus Referenzfeld im DG vom Mauerputz, (A) MA 1610 *Cladosporium cladosporioides*, (B) MA 1615 *Aspergillus niger*, (C) MA 1701 *Penicillium chrysogenum*, (D) Mischung aller drei Pilzsporensuspensionen. **A.** Probekörper Tab. 32 aus Klimakammer; **B.** Probekörper 4 und 5 aus Klimakammer und Nullkontrollen der Probekörper vor Beimpfen; **C.** Proben aus Versuchshaus (zweite Probenentnahme).

A	Probekörper														
	1A	1B	1C	1D	1	2A	2B	2C	2D	2	3A	3B	3C	3D	3
KBE	1,7 x10 ⁴	7,25 x10 ³	4,93 x10 ⁴	7,0 x10 ³	1,09 x10 ⁵	7,58 x10 ⁴	9,68 x10 ⁴	5,7 x10 ⁴	7,5 x10 ⁴	7,5 x10 ³	5,5 x10 ³	2,5 x10 ³	2,1 x10 ⁴	1,45 x10 ⁴	5,0 x10 ²
[DNA] ng/g	5,97 x10 ³	6,0 x10 ³	5,04 x10 ³	4,43 x10 ³	4,94 x10 ³	6,57 x10 ³	7,77 x10 ³	6,43 x10 ³	6,75 x10 ³	5,02 x10 ³	3,97 x10 ³	5,13 x10 ³	7,25 x10 ³	8,48 x10 ³	7,43 x10 ³

B	Probekörper										Nullkontrollen				
	4A	4B	4C	4D	4	5A	5B	5C	5D	5	1	2	3	4	5
KBE	1,97 x10 ⁶	1,1 x10 ⁶	1,6 x10 ⁶	1,95 x10 ⁶	9,83 x10 ⁵	1,73 x10 ⁴	9,4 x10 ⁴	3,18 x10 ⁴	4,2 x10 ⁴	4,45 x10 ⁴	k. W.	k. W.	k. W.	k. W.	k. W.
[DNA] ng/g	1,54 x10 ⁴	1,27 x10 ⁴	1,67 x10 ⁴	1,8 x10 ⁴	1,39 x10 ⁴	1,54 x10 ⁴	1,72 x10 ⁴	1,93 x10 ⁴	1,71 x10 ⁴	1,89 x10 ⁴	5,88 x10 ³	8,43 x10 ³	4,94 x10 ³	9,58 x10 ³	9,21 x10 ³

C	Proben Graz 1. Obergeschoss						Proben Graz Dachgeschoss					
	1/1	2/1	3/1	4/1	5/1	R1	1/2	2/2	3/2	4/2	5/2	R2
KBE	k. W.	k. W.	k. W.	1,5 x10 ³	1,63 x10 ⁴	1,25 x10 ³	k. W.	k. W.	k. W.	1,5 x10 ³	1,2 x10 ⁴	k. W.
[DNA] ng/g	1,07 x10 ⁴	8,63 x10 ³	9,97 x10 ³	1,48 x10 ⁴	1,55 x10 ⁴	1,35 x10 ⁴	1,18 x10 ⁴	1,21 x10 ⁴	9,14 x10 ³	1,87 x10 ⁴	1,99 x10 ⁴	1,18 x10 ⁴

Tab. 32 Berechnete Werte für Kolonie-Bildende-Einheit (KBE), gemessene Werte DNA-Menge (gerundete Mittelwerte von Triplikat-Messungen) und Kopienzahl Aktin-Gens (gerundete Mittelwerte von Triplikat-Messungen) der Klimakammer -Probekörper, Nullkontrollen und Proben vom Versuchshaus. Zusätzlich Angabe der Gültigkeit der qPCR Resultate bzgl. Detektionsgrenze mit (+) für positive und (-) für negative Ergebnisse. (1) Aufspritz-Zellulose, (2) Perliteplatte, (3) Thermosilitputz, (4) Holzweichfaserplatte, (5) Schilfplatte mit Lehmputz, (a) MA 1610 *Cladosporium cladosporioides*, (b) MA 1615 *Aspergillus niger*, (c) MA 1701 *Penicillium chrysogenum*, (d) Mischung aller drei Pilzsporensuspensionen. (PK) Klimakammer-Probekörper; (PK-NK) Probekörper - nicht beimpfte Nullkontrollen; (2PN-1 bzw. -2) Proben aus Versuchshaus von der 2. Entnahme im ersten bzw. Dachgeschoß; (3PN-1 bzw. -2) Proben aus Versuchshaus von der 3. Entnahme im ersten bzw. Dachgeschoß

	Probe	KBE	DNA-Menge	Kopienzahl	Validity
PK	1a	1,70E+04	5,97E+03	9,71E+04	+
PK	1b	7,25E+03	6,00E+03	3,80E+05	+
PK	1c	4,93E+04	5,04E+03	1,53E+05	+
PK	1d	7,00E+03	4,43E+03	3,79E+04	-
PK-NK	I	0,00E+00	5,88E+03	1,55E+04	-
2PN-1	1_1_I	0,00E+00	1,07E+04	1,08E+04	-
2PN-2	1_2_I	0,00E+00	1,18E+04	1,00E+04	-
3PN-1	1_1_II				
3PN-2	1_2_II	0,00E+00	8,46E+03	1,44E+04	-
PK	2a	7,58E+04	6,57E+03	1,67E+05	+
PK	2b	9,68E+04	7,77E+03	2,93E+05	+
PK	2c	5,70E+04	6,43E+03	2,73E+05	+
PK	2d	7,50E+04	6,75E+03	1,45E+05	+
PK-NK	II	0,00E+00	8,43E+03	1,40E+04	-
2PN-1	2_1_I	0,00E+00	8,63E+03	4,28E+03	-
2PN-2	2_2_I	0,00E+00	1,21E+04	1,14E+04	-
3PN-1	2_1_II	2,50E+02	7,31E+03	1,53E+04	-
3PN-2	2_2_II	0,00E+00	8,16E+03	2,07E+04	-
PK	3a	5,50E+03	3,97E+03	7,20E+04	+
PK	3b	2,50E+03	5,13E+03	3,57E+04	-
PK	3c	2,10E+04	7,25E+03	1,06E+04	-
PK	3d	1,45E+04	8,48E+03	4,81E+04	-
PK-NK	III	0,00E+00	4,94E+03	2,79E+04	-
2PN-1	3_1_I	0,00E+00	9,97E+03	1,01E+04	-
2PN-2	3_2_I	0,00E+00	9,14E+03	7,72E+03	-

	Probe	KBE	DNA-Menge	Kopienzahl	Validity
3PN-1	3_1_II	0,00E+00	7,48E+03	1,63E+04	-
3PN-2	3_2_II	0,00E+00	7,64E+03	2,58E+05	+
PK	4a	1,97E+06	1,54E+04	7,30E+06	+
PK	4b	1,10E+06	1,27E+04	6,52E+06	+
PK	4c	1,60E+06	1,67E+04	1,91E+06	+
PK	4d	1,95E+06	1,80E+04	1,59E+06	+
PK-NK	IV	0,00E+00	9,58E+03	4,40E+04	-
2PN-1	4_1_I	1,50E+03	1,48E+04	1,49E+05	+
2PN-2	4_2_I	1,50E+03	1,87E+04	1,28E+05	+
3PN-1	4_1_II	4,45E+04	1,14E+04	3,49E+04	-
3PN-2	4_2_II	4,70E+04	1,18E+04	5,55E+05	+
PK	5a	1,73E+04	1,54E+04	5,11E+04	-
PK	5b	9,40E+04	1,72E+04	6,21E+04	+
PK	5c	3,18E+04	1,93E+04	4,51E+04	-
PK	5d	4,20E+04	1,71E+04	3,78E+04	-
PK-NK	V	0,00E+00	9,21E+03	6,30E+03	-
2PN-1	5_1_I	1,63E+04	1,55E+04	3,43E+04	-
2PN-2	5_2_I	1,20E+04	1,99E+04	1,61E+05	+
3PN-1	5_1_II	6,00E+03	6,62E+03	1,62E+05	+
3PN-2	5_2_II	6,75E+03	8,44E+03	1,97E+05	+
	Detektions- grenze			5,35E+04	

A3 Abdruck der Publikationen in internationalen wissenschaftlichen Zeitschriften

Abstrakt A1 der mündlichen Präsentation auf dem internationalen Kongress in Santiago de Compostella (Spanien)

Bio-susceptibility of thermal insulation systems used for historical buildings

Jörg Ettenauer¹, Guadalupe Piñar¹, Peter Kautsch², Katja Sterflinger¹

¹ University of Natural Resources and Life Sciences, Institute of Biotechnology (VIBT)

Muthgasse 11, A-1190 Vienna, Austria, e-mail: joerg.ettenauer@boku.ac.at; guadalupe.pinar@boku.ac.at; katja.sterflinger@boku.ac.at

² Technical University of Graz, Institute for Structural Engineering, Lessingstrasse 25, A-8010 Graz, Austria, email: kautsch@ihb.tugraz.at

In historical buildings of Northern countries high levels of energy are necessary to reach comfortable temperatures especially during the cold season. For this reason historical buildings are now also included in country specific regulations and ordinances to enhance the “energy efficiency”. Since an exterior insulation - as it is commonly used for modern architecture - is incompatible with monument protection, several indoor insulation systems based on historical and ecological materials, are on the market that should improve the thermic performance of a historical building. However, using organic materials as cellulose, loam, weed or wood, bears the risk of fungal growth and thus may lead to health problems in indoor environments. For this reason five different ecological indoor insulations systems were tested for their bio-susceptibility against various fungi both under natural conditions - after 2 years of installation in an historical building - and under laboratory conditions with high levels of relative humidity. Fungal growth was evaluated by classical isolation and cultivation as well as by molecular methods. The materials turned out to have a quite different susceptibility towards fungal contamination. Whereas insulations made of bloated Perlite (plaster and board) did not show any fungal growth after 2 years of exposition, the historical insulation made of loam and weed had high cell counts of various fungi. In laboratory experiments, wooden softboard represented the best environment for fungal growth. As a result from this study, plaster and board made of bloated Perlite are presented as being the most appropriate materials for thermal insulation at least from the microbiological and hygienic point of view. For future investigations and for the monitoring of fungi in insulation and other building materials we suggest a molecular biology approach with a common protocol for quantitative DNA-extraction and amplification.

A2: Abstrakt der mündlichen Präsentation auf dem internationalen Kongress in Wien (Österreich)

Geophysical Research Abstracts

Vol. 15, EGU2013-7477, 2013

EGU General Assembly 2013

© Author(s) 2013. CC Attribution 3.0 License.

Bio-susceptibility of materials and thermal insulation systems used for historical buildings

Katja Sterflinger, *Joerg Ettenauer*, and Guadalupe Pinar

University of Natural Resources and Applied Life Sciences, ACBR, Vienna, Austria (katja.sterflinger@boku.ac.at)

In historical buildings of Northern countries high levels of energy are necessary to reach comfortable temperatures especially during the cold season. For this reason historical buildings are now also included in country specific regulations and ordinances to enhance the “energy – efficiency”. Since an exterior insulation – as it is commonly used for modern architecture - is incompatible with monument protection, several indoor insulation systems based on historical and ecological materials, are on the market that should improve the thermic performance of a historical building. However, using organic materials as cellulose, loam, weed or wood, bears the risk of fungal growth and thus may lead to health problems in indoor environments. For this reason 5 different ecological indoor insulations systems were tested for their bio-susceptibility against various fungi both under natural conditions – after 2 years of installation in an historical building – and under laboratory conditions with high levels of relative humidity. Fungal growth was evaluated by classical isolation and cultivation as well as by molecular methods. The materials turned out to have a quite different susceptibility towards fungal contamination. Whereas insulations made of bloated Perlite (plaster and board) did not show any fungal growth after 2 years of exposition, the historical insulation made of loam and weed had high cell counts of various fungi. In laboratory experiments wooden softboard represented the best environment for fungal growth. As a result from this study, plaster and board made of bloated Perlite are presented as being the most appropriate materials for thermal insulation at least from the microbiological and hygienic point of view. For future investigations and for the monitoring of fungi in insulation and other building materials we suggest a molecular biology approach with a common protocol for quantitative DNA-extraction and amplification.

P1: Kopie der Publikation „Bio-susceptibility of thermal insulation systems used for historical buildings“ in Science and Technology for the Conservation of Cultural Heritage.

Bio-susceptibility of thermal insulation systems used for historical buildings

J.D. Ettenauer, G. Piñar & K. Sterflinger

Department of Biotechnology, University of Natural Resources and Life Sciences, Vienna, Austria

P. Kautsch

Institute for Structural Engineering, Technical University of Graz, Graz, Austria

ABSTRACT: In historical buildings of Northern countries high levels of energy are necessary for reaching comfortable temperatures. For this reason several indoor insulation systems based on historical and ecological materials are on the market that should improve the thermic performance. However, using organic materials bears the risk of fungal growth. Therefore, five ecological indoor insulations systems were tested for their bio-susceptibility against various fungi both under natural- and under laboratory conditions. Fungal growth was evaluated by cultivation as well as by molecular methods. The materials turned out to have a different susceptibility towards fungal contamination. Whereas insulations made of bloated Perlite (plaster and board) did not show any fungal growth under natural exposition, loam and weed had high cell counts. In laboratory experiments, wooden soft-board represented the best environment for fungal growth. As a result, bloated Perlite is the most appropriate material for thermal insulation from the microbiological point of view.

1 INTRODUCTION

The ongoing climate change calls for necessary changes of human behavior and -living. In colder European climate zones, thermal insulation of houses is self-evident to reduce the amount of energy for heating. Exterior insulations systems are frequently applied on modern, newly built houses and Styrofoam is the most common exterior insulation system. However, a high percentage of our living houses are historical buildings under preservation order. These buildings are now included in country specific regulations and ordinances to enhance the “energy efficiency”. Since an exterior insulation is incompatible with monument protection, alternative insulation techniques have to be applied. Historical, organically and ecological insulation materials, such as bloated Perlite, cellulose, loam, reed, weed or wood are on the market but the risk of these materials is a possible microbial contamination through bacteria and fungi. Microbial growth on building materials is a problem that has been known for a long time, but floods, wet years, thermal modernization, air-conditioning systems, construction or material faults, poor and improper ventilation are major reasons for an increase of the relative air humidity and dampness of surfaces (Samson *et al.*, 2010). These climatic conditions foster microbial growth (Sterflinger 2010). The properties and the common occurrence of microorganisms contribute to the fact that they represent the most frequent cause of bio-deterioration of building materials (Piñar & Sterflinger 2009). Furthermore, a worldwide phenomenon called sick building syndrome – SBS - (Sykes, 1988) has been confirmed as a recognizable disease by the World Health Organization (Aki-menko *et al.*, 1986). All these properties and effects of microbial growth call for the need to gain more insight into the micro-biota inhabiting the different construction materials.

Nowadays, the isolation and identification of microorganisms still sticks to classical culture-based methods to estimate microbial contamination in buildings. Cultivation allows a quantitative and qualitative assessment of the environment. Nevertheless, the dramatic changes in microbiology over the past 20 years have developed fast and sensitive technologies that can be applied for studying microbial communities without the need for cultivation (Hill *et al.*, 2000). The first crucial step for a successful and complete analysis of the micro-biota is the choice of an appropriate DNA isolation method (Martin-Laurent *et al.*, 2001).

In this study 5 ecological indoor insulation materials were tested for their bio-susceptibility. The materials were investigated both under natural conditions - after 2 years of installation in an historical

building - and under laboratory conditions. Therefore, samples items of all materials were inoculated with 3 commonly indoors occurring fungi and treated in a climate chamber for half a year. After this incubation time small samples were taken for cultivation- and molecular analyses. The colony forming units of each material were determined as well as DNA was extracted and evaluated by Nano Drop measurements. The same procedure was performed with samples taken from the historical house. In order to apply an appropriate DNA extraction method for the insulation materials we evaluated up to 13 direct - *in situ* DNA extraction methods with 3 typically used building materials. Attention at the evaluation of these protocols was focused on the parameters: 1) the quantity and 2) the quality of the DNA; 3) visualization of the extracted DNA; and 4) the ability of the DNA to be amplified in different PCR reactions. Additionally, the amplified PCR products were analysed by Denaturing Gradient Gel Electrophoresis (DGGE) in order to compare the community fingerprints obtained from the different isolation methods and sample amounts.

2 METHODOLOGY

2.1 Classical Cultivation studies

Five indoor insulation materials – bloated Perlite (plaster and board), loam and reed, wooden soft-board and sprayed cellulose – were evaluated. Therefore, small areas (5x5 cm) of the test items were inoculated with each 1 ml of 4 spore solutions from 3 commonly indoors occurring fungi (ACBR-Culture Collection, www.acbr-database.at: *Cladosporium cladosporioides*, *Aspergillus niger* and *Penicillium chrysogenum*, and a mixture of all 3). For 6 months, the samples were incubated in a climate chamber at 28°C and 90% relative humidity. Afterwards, samples from the surface were removed for cultivation and molecular analysis. Similar, 2 years after installation of the insulation systems in the historical building, samples were taken and 1 g of each material was shaken in 100 ml Erlenmeyer flasks, filled with 50 ml Tween 80 for 1 hour at room temperature on a rotary shaker (170 rpm). Hundred Microliter of each solution of a dilution series (10^0 - 10^{-3}) were plated on each two Malt-extract-agar plates (MEA) supplemented with 20 µl Streptomycin (Stock: 25 mg/ml) to inhibit bacterial growth. The plates were incubated at room temperature and fungal growth was checked every day. Colonies on the plates were counted to finally calculate the colony forming units (CFU) for each material.

2.2 Molecular analyses

In order to extract DNA from the insulation material an appropriate isolation method had to be found to overcome the biases commonly occurring during DNA extraction from building materials. Therefore, 3 commercial DNA extraction kits for soils and four standard DNA extraction protocols were tested with common plaster, red brick and gypsum cardboard (Ettenauer *et al.*, 2012). Each material was ground, homogenized and 3 different samples amounts (50, 100 and 250 mg; each in triplicate) were weighed for each extraction protocol. After DNA extraction, the DNA yield and –purity (A260/A280 ratio) were assessed using the Nano Drop spectrophotometer. Therefore, from all triplicates the DNA concentration and –purity was measured thrice and mean values and standard deviations were calculated. Afterwards, the triplicates were pooled and electrophoresed on 1.5 % agarose gels. Further, the pooled DNA was used for PCR reactions with 3 fungal ITS primer pairs (ITS1/ITS4, ITS1/ITS2 and ITS3/ITS4) and 1 bacterial 16S rRNA primer set (341f/907r). Amplification products were assessed by visualization on 2% agarose gels. Genetic fingerprinting using DGGE analysis was performed with fungal and bacterial PCR fragments. According to the results obtained from these criteria (DNA-quantity, -quality, agarose gel electrophoresis, PCR- and DGGE results) the methods that worked better were identified and continually eliminated others that did not work as well.

According to the results from the comparative extraction study the most suitable method was used for the isolation of DNA from all samples of this study. Hundred milligram of each insulation material were used for the DNA extraction.

3 RESULTS AND DISCUSSION

3.1 Classical Cultivation studies

Fungal colonies growing on MEA plates derived from the insulation materials were counted and the CFU values were calculated. Figure 1a shows the calculated CFU-values.

After 6 months incubation under optimal growing conditions, fungal colonies were detected on all test items. The CFU values ranged from 5.0×10^2 to 1.97×10^6 . The distinct strongest fungal growth was found on the wooden cardboard samples (CFU: 9.83×10^5 to 1.97×10^6). On reed boards with loam, bloated Perlite boards and sprayed cellulose, germination numbers of about 2 orders of magnitude lower were calculated. The best results, with the lowest CFU values (2.5×10^3 to 2.1×10^4) were found on the bloated Perlite plaster.

From the *in-situ* samples only on the wooden soft-board and reed board with loam a few fungal colonies germinated. The CFU values ranged from 1.5×10^3 to 1.63×10^4 . No fungal growth was observed on the other materials. The control samples of all materials, taken before the inoculation with fungal spores did not show any fungal growth at all.

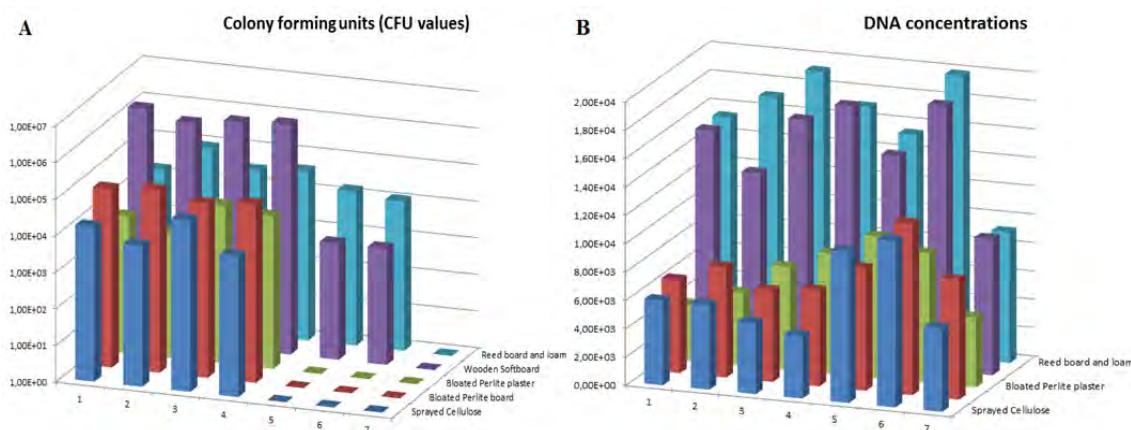


Figure 1. 3D diagrams showing (a) the CFU values on a logarithmic scale and (b) the DNA yields. Sample items incubated with *Cladosporium cladosporioides* (1), with *Aspergillus niger* (2), with *Penicillium chrysogenum* (3), with a mixture spores (4), samples from the 1st floor (5), and the 2nd floor of the building (6); not incubated control items (7).

3.2 Molecular analyses

All 13 extraction methods allowed the isolation of DNA from all sample amounts of all 3 building materials. However, Nano Drop measurement for the DNA concentration showed very divergent values. All 3 kits delivered the lowest DNA yields (Fig. 2a). Protocols including a purification step using columns or spin filters yielded drastically lower DNA amounts than standard methods using phenol/chloroform precipitation. A lot of DNA is lost, whereas purity measurements, visualization and PCR analysis showed that many contaminants could be eliminated. The standard protocols showed the highest DNA yields. Up to 3 orders of magnitude more DNA could be isolated from the same sample amounts. However, they also had lowered A260/A280 ratios revealing impurities that co-precipitated with the nucleic acid (Fig. 2c). These findings were confirmed by negative results obtained from electrophoresis and PCR analysis.

The DNA yield did not correlate to the sample amounts. All methods gained more DNA from the 50 mg samples than from the 100 or 250 mg samples (Fig. 2b). This is due to the ratio: used sample amount versus added buffer volume for the extraction. Small buffer volumes are not enough to reach the whole sample material, when the sample material exceeds >100 mg. As a consequence the enclosed DNA in the material cannot be extracted completely. The DGGE results clearly demonstrated that the fingerprints were not influenced by the extraction methods, provided that the extraction allowed successful PCR amplification. The results further showed that fingerprints obtained from the 50 mg subsamples of homogenized sampling material represented the whole inhabiting microbial community.

The FastDNA Spin kit was the only method that revealed positive results for all parameters of all 3 building materials. Therefore, this method was applied for the samples and allowed the isolation of DNA from all tested insulation materials (Fig. 1b).

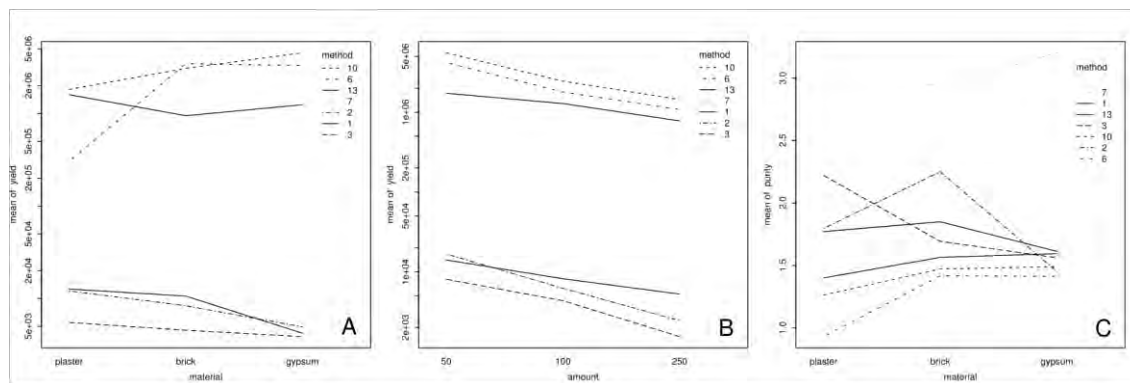


Figure 2. Interaction plots of the mean values for measurement variables yield and purity of corresponding factor combinations are displayed and linked by profile lines for each method. (a) Mean values for yield of the factor combination material and method. (b) Mean values for yield of the factor combination sample amount and method. (c) Mean values for purity of the factor combination material and method.

CONCLUSIONS

From the microbiological and hygienically point of view, plaster and board made of bloated Perlite are presented as being the most appropriate materials for thermal indoor insulation. The FastDNA Spin kit for soil (MP Biomedicals) is the method of choice for DNA extraction from construction materials. We recommend the standard application of this kit for molecular ecology analysis of building materials in order to set standards in the assessment of microbial community analysis and to allow comparisons of results between different laboratories.

REFERENCES

- Akimenko, V.V., Anderson, I., Lebovitz, M.D. & Lindvall T.1986. The sick building syndrome. *Indoor Air* 6. Stockholm: Swedish Council for Building Research. p. 87–97.
- Ettenauer, J.D., Piñar, G., Lopandic, K., Spangl, B., Ellersdorfer, G., Voitl, C. & Sterflinger, K. 2012. Microbes and building materials – evaluation of DNA extraction protocols as common basis for molecular analysis. *Sci. Total Environ.* in press, DOI 10.1016/j.scitotenv.2012.09.005.
- Hill, G.T., Mitkowski, N.A., Aldrich-Wolfe, L., Emele, L.R., Jurkonie, D.D. & Ficke, A. 2000. Methods for assessing the composition and diversity of soil microbial communities. *Appl. Soil. Ecol.* 15:25-36.
- Martin-Laurent, F., Philippot, L., Hallet, S., Chaussod, R., Germon, J.C. & Soulas, G. 2001. DNA extraction from soils: old bias for new microbial diversity analysis methods. *Appl. Environ. Microbiol.* 67:2354–2359.
- Ogram, A. 2000. Soil molecular microbial ecology at age 20: methodological challenges for the future, *Soil Biol. & Biochem.* 32:1499-1504.
- Piñar, G. & Sterflinger, K. Microbes and building materials. Cornejo, D.N., Haro, J.L. (ed.) 2009. *Building Materials: Properties, Performance and Applications*. New York: Nova Sci. Publ. Inc. 163-188.
- Samson, R.A., Houbraken, J., Thrane, U., Frisvad, J. & Andersen, B. 2010. *Food and indoor fungi*. Utrecht: CBS.
- Sterflinger, K. 2010. Fungi: Their role in deterioration of Cultural heritage. *Fungal Biol. Rev.* 24:47-55. doi:10.1016/j.fbr.2010.03.003.
- Sykes, J.M. 1988. Sick Building Syndrome: A Review, Health and Safety Executive, *Specialist Inspector Rep.* No. 10.

P2: Kopie der Publikation „Bio-susceptibility of materials and thermal insulation systems used for historical buildings” in *Energy Procedia* 40 (2013) pp. 499-506.

European Geosciences Union General Assembly 2013, EGU

Division Energy, Resources & the Environment, ERE

Bio-susceptibility of materials and thermal insulation systems used for historical buildings

Katja Sterflinger^a, Jörg Ettenauer^{a1}, Guadalupe Piñar^a

^a*University of Natural Resources and Applied Life Sciences, ACBR, Muthgasse 18, Vienna 1190, Austria*

Abstract

Several indoor insulation systems based on ecological materials as cellulose, perlite, wooden softboard and reed board with loam, were tested for their susceptibility against fungi under natural- and laboratory conditions. Fungal growth was evaluated by cultivation- and molecular methods. The materials showed a different bio-susceptibility: whereas insulations made of wood and reed with loam had high cell counts, perlite did not show any fungal growth. Therefore, from the microbiological point of view, plaster and board made of perlite are most suitable for thermal insulation. Furthermore, for future applications we suggest a DNA-extraction protocol for microbial ecology studies of construction materials.

© 2013 The Authors. Published by Elsevier Ltd.

Selection and/or peer-review under responsibility of the GFZ German Research Centre for Geosciences

Bio-susceptibility; building materials; colony forming units; DNA extraction; fungi; insulation materials

1. Introduction

The signs of the ongoing climate change on our planet are clearly visible and the need for changes of human behaviour and -living are urgently necessary. In Northern European regions and the colder climate zones, thermal insulation of newly built houses is more and more becoming self-evident to reduce the necessary amount of energy for heating of those buildings. Exterior insulation systems are frequently applied on modern, newly built houses and styrofoam is the most common exterior insulation material on the market. However, a very high percentage of our living houses are historical buildings and are under preservation order. These buildings are now also included in country specific regulations and ordinances to enhance the “energy efficiency”. Since an exterior insulation is incompatible with monument protection, alternative insulation techniques have to be applied. Various different indoor insulation systems are on the market and in the past years historical, organic and ecological insulation materials, such as cellulose, loam, weed or wood, have been exploited from construction companies.

The risk of these ecological materials is a possible contamination through microorganisms (bacteria and fungi). Microbial growth on building materials is a problem that has been known for a long time, but in the recent years it has drawn more attention. Floods, wet years, thermal modernization of residential buildings, air-conditioning systems, construction or material faults, poor and improper ventilation are the major reasons for an increase of the relative air humidity and dampness of surfaces [1]. These climatic conditions foster microbial

* Corresponding author. Tel.: +43-1-47654-6935; fax: +43-1-369-7615.
E-mail address: joerg.ettenauer@boku.ac.at.

growth in our living environment, on building materials and increase the risks for fungi contaminations [2, 3 and 4]. The properties and the common occurrence of bacteria and fungi contribute to the fact that these microorganisms represent the most frequent cause of biodeterioration of building materials [5]. Biodegradation of buildings is caused by physical processes and also chemical processes through bio-corrosion. Furthermore, a worldwide phenomenon called sick building syndrome – SBS – [6] has been confirmed as a recognizable disease by the World Health Organization [7]. The sick building syndrome is a complex combination of nonspecific ailments associated with an individual's working place or residence that has become contaminated with any number of harmful agents. The causes for this syndrome are manifold and microorganisms can affect human health in different ways. All these properties and effects of microbial growth call for the need to gain more insight into the microbial communities inhabiting the different construction materials.

Nowadays, the isolation and identification of microorganisms, especially of fungi, still sticks to the use of traditional culture-based methods to estimate microbial contamination in buildings. These classical cultivation techniques allow a quantitative and qualitative assessment of the investigated environment and represent an important methodology in this field. Nevertheless, microbiology has dramatically changed over the past 20 years and developed new technologies that can be applied for studying microbial communities. Therefore, molecular DNA and phylogenetic techniques have provided means that allow the identification of organisms without the need for cultivation [8, 9, 10 and 11]. Fast and sensitive alternatives to classical cultivation techniques are polymerase chain reaction (PCR)-based techniques that offer an opportunity to analyse the full diversity of microbial communities. The first step for a successful and complete analysis of the inhabiting micro-biota of a certain environment is the choice of an appropriate nucleic-acid isolation method [12, 13 and 14].

In this study five different indoor insulation materials based on ecological materials were tested for their bio-susceptibility. The selected materials were investigated for their affinity to various fungi both under natural conditions - after 2 years of installation in an historical building - and under laboratory conditions with high levels of relative humidity. Therefore, samples items from all insulation materials were inoculated with three commonly indoors occurring fungi and treated in a climate chamber for half a year. After this incubation time, small sample amounts were taken for classical cultivation- and molecular biological analyses. The colony forming units (CFU) of each material were determined and DNA was extracted and evaluated by Nano Drop measurements. The same procedure was performed with samples taken from a historical house, in which the same insulation materials were already installed two years before.

In order to apply an appropriate extraction method to isolate DNA directly from insulation materials and to overcome any biases at the first crucial step of molecular analyses, we evaluated up to thirteen direct - in situ DNA extraction methods.

As basis, three commercial DNA extraction kits for soils and four standard DNA extraction protocols were chosen. These techniques incorporate a combination of mechanical, chemical and also enzymatic lysis of the cells. The extraction methods were applied to three different sample aliquots of three typically used building materials – common plaster, red brick and gypsum cardboard. Attention at the evaluation of these protocols was focused on three different parameters: 1) the quantity of the isolated DNA; 2) the quality of the extracted nucleic acid; and 3) the ability of the DNA to be amplified in different PCR reactions using one universal bacterial primer pair and three fungal primer sets. Additionally, the amplified PCR products were analysed by Denaturing Gradient Gel Electrophoresis (DGGE) in order to compare the community fingerprints obtained from the different isolation methods. According to the results obtained from these criteria we identified the methods that worked better and continually eliminated others that did not work as well in order to find a standard DNA extraction method for molecular analysis which should be applied for construction materials.

2. Methodology

2.1. Classical cultivation studies

In this project five different indoor insulation materials – bloated perlite plaster, bloated perlite board, loam and reed, wooden softboard and sprayed cellulose – were evaluated. Therefore, small areas (5x5 cm) of the test items (~ 10x10 cm in size) were inoculated with each 1 ml of 4 different spore solutions (10^5 spores/ml) from 3 commonly indoors occurring fungi - taken from the ACBR culture collection (<http://www.acbr-database.at>): *Cladosporium cladosporioides* (MA 1610 – further named A), *Aspergillus niger* (MA 1615 – B) and *Penicillium chrysogenum* (MA 1701 – C), and a mixture of all three (D). These samples were incubated in a climate chamber at 28°C and 90% relative humidity for a period of 6 months. Afterwards, the surface area (to a depth of ~ 0.5 cm) was removed for cultivation and molecular analysis.

Similar investigations were performed with samples of each insulation material; collected two years after installation of the insulation systems, from the tentative historical building and were investigated in the laboratory.

On Gram of each material was shaken in 100 ml Erlenmeyer flasks, filled with 50 ml Tween 80 for 1 hour at room temperature in a rotary shaker (170 rpm). Hundred microliter of each solution of a dilution series (10^0 - 10^{-3}) were plated on each two Malt-extract-agar (MEA) plates supplemented with 20 μ l Streptomycin [stock: 25 mg/ml] to inhibit bacterial growth. The plates were incubated at room temperature and fungal growth was checked every day. Colonies on the plates were counted to finally calculate the colony forming units for each material.

2.2. Molecular analyses

In order to extract the DNA from the tested insulation material and analyse the fungal DNA in the samples an appropriate DNA isolation method had to be found to overcome the biases commonly occurring during DNA extraction from building materials.

Therefore, up to 13 different DNA extraction methods were evaluated for three typically used building materials: common plaster, red brick and gypsum cardboard [15]. Each material was ground in liquid nitrogen using a sterile mortar and pestle, homogenized in Falcon tubes and three different samples amounts, 50 mg, 100 mg and 250 mg (each in triplicate) were weighed for each extraction protocol.

After DNA extraction, the DNA yield and –purity (A260/A280 ratio) were assessed using the Nano Drop spectrophotometer. Therefore, from all triplicate sample amounts from all methods the DNA concentration and –purity was measured thrice and the mean values and standard deviations derived from 9 measurements were calculated. Afterwards, from each triplicate of each sample amount, 20 μ l of the extracted DNA were pooled and the extracted DNA was visualized on 1.5 % agarose gels by electrophoresis. Further, the pooled DNA was used as template for PCR reactions with three different fungal ITS (Internal Transcribed Spacer region) primer combinations (ITS1/ITS4, ITS1/ITS2 and ITS3/ITS4) and for one PCR with bacterial 16S rRNA primers (341f/907r). All amplification products were assessed by visualization of the DNA on 2% agarose gels. Additionally, genetic fingerprinting using DGGE analysis was performed with fungal and bacterial PCR fragments in order to compare the community fingerprints obtained from the different isolation methods. According to the results obtained from these criteria (DNA-quantity, -quality, agarose-gel-electrophoresis, PCR- and DGGE results) the methods that worked better were identified and continually eliminated others that did not work as well in order to find a standard DNA extraction method for molecular analysis which should be applied for construction materials.

Out of the results from these comparative extraction trails the most suitable DNA extraction method was used for the isolation of DNA of the insulation materials from the tentative building and the sample items from the climate chamber. Hundred milligram of each material were weighed into Lysing Matrix E tubes. The DNA extraction was done using the Fast DNA Spin Kit for Soil according to the manufacturer's instructions (MP Biomedicals). The DNA yield and purity were assessed using the Nano Drop spectrophotometer. The mean values of the DNA concentrations of triplicate measurements were calculated, see Fig 1b.

3. Results and Discussion

3.1. Classical cultivation studies

The fungal colonies growing on MEA plates derived from the test items and also from the samples taken from the experimental setup in the historical building were counted and the colony forming unit for each sample was calculated, see Fig 1a.

After six months of incubation under optimal growing conditions, on all test items fungal colonies were detected. The calculated CFU values ranged from 5.0×10^2 to 1.97×10^6 . The strongest fungal growth was detectable on the wooden cardboard samples with CFU values between 9.83×10^5 and 1.97×10^6 . On reed boards with loam, bloated perlite boards and sprayed cellulose, germination numbers of about 2 orders of magnitude lower were calculated. The best results, with the lowest CFU values (2.5×10^3 to 2.1×10^4) were found on the bloated perlite plaster.

From the in-situ samples of wooden softboard and reed board with loam a few fungal colonies germinated. The CFU values ranged from 1.5×10^3 to 1.63×10^4 . On the other materials no fungal growth was observed.

The control samples of all materials, taken before the inoculation with fungal spores showed no fungal growth.

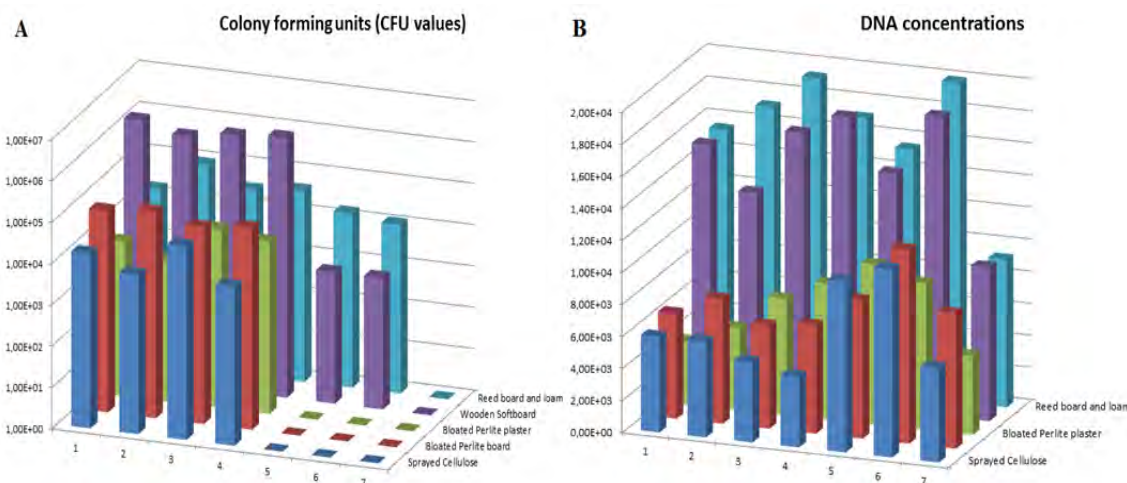


Fig. 1. 3D diagrams showing (a) the CFU values on a logarithmic scale; (b) the DNA yields. Sample items incubated with *Cladosporium cladosporioides* (1), with *Aspergillus niger* (2), with *Penicillium chrysogenum* (3), with a mixture of spores (4), samples from the 1st floor (5), and the 2nd floor of the building (6); not incubated control items (7).

3.2. Molecular analyses

In order to find an ideal method for the extraction of DNA from building- and insulation materials an evaluation of 13 different isolation techniques was performed. With all DNA extraction protocols it was possible to isolate DNA from different sample amounts of all three building materials. However, Nano Drop measurement for the DNA concentration showed very divergent values. All three commercially available extraction kits delivered the lowest amounts of DNA for all tested materials, see Fig 2a. Similar results were observed for those methods that included a step where the DNA was extracted or purified using a filter or silica-column. The standard extraction protocols yielded the highest DNA concentrations. Up to 3 orders of magnitude more DNA could be isolated from the same sample amounts. These fluctuations can be explained by drawbacks occurring with Nano Drop measurements, when contaminations like protein, phenol, humic acid impurities, and other contaminants from the building materials or buffer residues, also strongly absorb at 260 nm, see Fig 2c. Furthermore, our data showed that the extracts of all standard extraction protocols that included a precipitation step using ethanol had very high DNA concentrations. However, they also had lowered A260/A280 ratios (1.3-1.6) revealing impurities that co-precipitated with the extracted nucleic acid. These findings were additionally confirmed by negative results obtained by electrophoresis and PCR analysis. Therefore, it is very doubtful if the measured DNA concentration represented the real DNA content in the solution. Interestingly, similar A260/A280 ratios from different methods led to different PCR amplification results, which can be explained by the presence of PCR inhibitors.

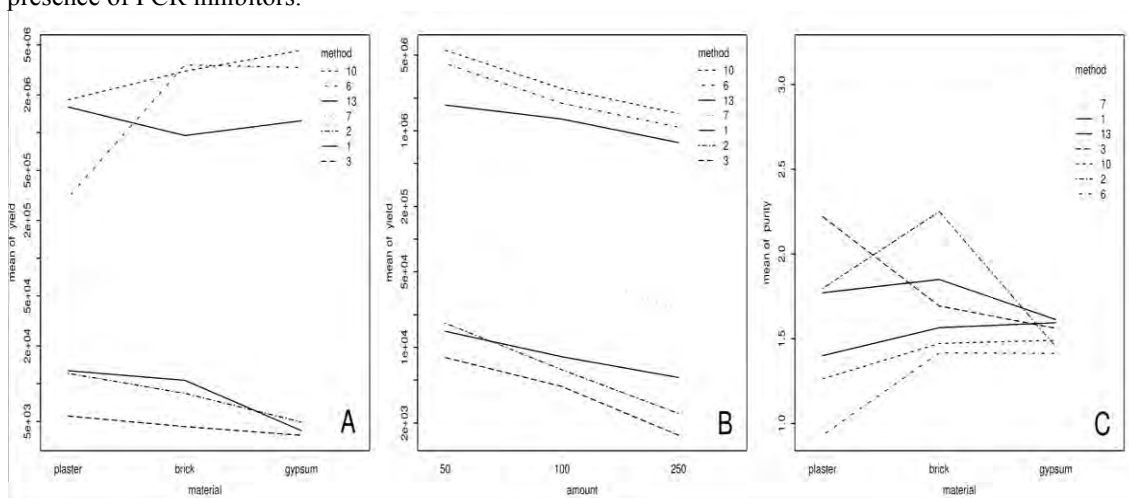


Fig. 2. Interaction plots of the mean values for measurement variables yield and purity of corresponding factor combinations are displayed and linked by profile lines for each method. (a) Mean values for yield of the factor combination material and method; (b) Mean values for yield of the factor combination sample amount and method; (c) Mean values for purity of the factor combination material and method.

Concerning the material amounts tested (50, 100 and 250 mg) one could expect to gain the higher DNA yield from the larger sample amounts. This theory did not hold true for any of the tested methods, see Fig 2b. More often the smallest sample amount (50 mg) yielded the highest DNA concentration. This can be explained by the ratio of the used sample amount versus the added buffer volume used for the extraction of the DNA. Small extraction buffer volumes are not enough to reach the whole sample material, when the sample material exceeds >100 mg. Especially, fine grounded sample powder from building materials strongly absorbs the buffer and the mixture does not represent a homogenous liquid suspension. Additionally, shaking on an incubator or vortexing are not enough rigorous strategies to completely homogenize the material. Sample amounts >100 mg overextend the capacities of some of the extraction procedures tested. As a consequence the enclosed DNA in the material cannot be extracted completely, which represents a great bias of the approach.

The DGGE fingerprints of the bacterial and fungal micro-biota were carried out in order to evaluate if the community profiles, including the quantity and the quality of the bands, were influenced by the extraction methods used and by the amount of sample material used for extraction. The results of our study clearly demonstrated that the fingerprints were not influenced by the extraction methods, provided that the extraction allowed successful PCR amplification. The results further showed that microbial fingerprints obtained from the smallest sample amounts represented the whole inhabiting community. Therefore, when greater amounts of sample material are available, we recommend the careful homogenization of the samples and the further use of small subsamples from this homogenate for DNA extraction and community analysis. Similar procedures were suggested by Litchfield et al. [16] and Terry et al. [17].

In general, protocols which include an additional purification step using columns or commercial kits yielded drastically lower DNA amounts than the standard extraction methods using a phenol/chloroform purification of the DNA. DNA is lost during the application of these spin filters, whereas purity measurements, visualization and PCR analysis showed that a great amount of contaminants could be eliminated through the purification with these columns. Zhou et al. [18] and Miller et al. [19] already demonstrated for many soil and sediment types that high-throughput DNA purification procedures that imply mini-columns, spin-filters or gel-extraction kits are able to sufficiently reduce or eliminate PCR inhibitors from DNA extracts.

One goal of this study was the development of a universally adaptable DNA extraction and purification method for all commonly used building materials. This extraction technique would be a great step forward to establish molecular techniques for assessing the microbial ecology of construction materials. Such a standard protocol would be a great benefit toward the introduction of automated procedures in building microbiology that further allows a subsequent inter-laboratory comparison of results. This standard protocol should 1) be equally efficient for all building materials; 2) effectively lyse all target organisms; 3) allow the processing of multiple samples simultaneously in a short time [20]; 4) generate a sufficient amount of high-molecular weight DNA, respectively RNA, out of very small sample amounts; 5) include a purification procedure that removes any contaminating substances that could disturb further molecular applications; 6) and be appropriate for all standard laboratory techniques.

4. Conclusions

From the microbiological and hygienically point of view, plaster and board made of bloated perlite are presented as being the most appropriate materials for thermal indoor insulation. The FastDNA Spin kit for soil (MP Biomedicals) is the method of choice for DNA extraction from construction materials. We recommend the standard application of this kit for molecular ecology analysis of building materials in order to set standards in the assessment of microbial community analysis and to allow comparisons of results between different laboratories.

References

- [1] Piñar G, Sterflinger K. Microbes and building materials. In: Cornejo DN, Haro JL, editors. *Building Materials: Properties, Performance and Applications*, New York: Nova Science Publishers Inc; 2009, p. 163-88.
- [2] Samson RA, Houbraken J, Thrane U, Frisvad J, Andersen B. *Food and indoor fungi*. Utrecht: CBS; 2010.
- [3] Sterflinger K. Fungi: Their role in deterioration of Cultural heritage. *Fungal Biol Rev* 2010;**24**:47-55.
- [4] Sterflinger K. Schimmelpilze im Innenraum – Möglichkeiten, Grenzen und Notwendigkeit der Behandlung. In: *Tagungsband Wiener Holzschutztag 2011*, Wien: Holzforschung Austria; 2012, p. 38-40.
- [5] May E, Lewis FJ, Pereira S, Tayler S, Seaward MRD, Allsopp D. Microbial deterioration of building stone: a review. *Biodeterior Abstr* 1993;**7**:109-23.

- [6] Sykes JM. Sick Building Syndrome: A Review. In: *Specialist Inspector Reports No. 10*; London: Health and Safety Executive, Technology Division; 1988.
- [7] Akimenko VV, Anderson I, Lebovitz MD, Lindvall T. The sick building syndrome, In: *Indoor Air, Vol. 6. Evaluations and Conclusions for Health Sciences and Technology*; Stockholm: Swedish Council for Building Research; 1986, p. 87–97.
- [8] Hill GT, Mitkowski NA, Aldrich-Wolfe L, Emele LR, Jurkonie DD, Ficke A, et al. Methods for assessing the composition and diversity of soil microbial communities. *Appl Soil Ecol* 2000;**15**:25-36.
- [9] Hugenholtz P, Pace NR. Identifying microbial diversity in the natural environment: a molecular phylogenetic approach. *Trends Biotechnol* 1996;**14**:190–7.
- [10] Hugenholtz P, Goebel BM, Pace NR. Impact of culture-independent studies on the emerging phylogenetic view of bacterial diversity. *J Bacteriol* 1998;**180**(18):4765-74.
- [11] Pace NR, Stahl DA, Lane DJ, Olsen GJ. The analysis of natural microbial populations by ribosomal RNA sequences. *Adv Microbiol Ecol* 1986;**9**:1–55.
- [12] Martin-Laurent F, Philippot L, Hallet S, Chaussod R, Germon JC, Soulas G, et al. DNA extraction from soils: old bias for new microbial diversity analysis methods. *Appl Environ Microbiol* 2001;**67**:2354–59.
- [13] Niemi RM, Heiskanen I, Wallenius K, Lindström K. Extraction and purification of DNA in rhizosphere soil samples for PCR-DGGE analysis of bacterial consortia. *J Microbiol Meth* 2001;**45**:155–65.
- [14] Stach JEM, Bathe S, Clapp JP, Burns RG. PCR-SSCP comparison of 16S rDNA sequence diversity in soil DNA obtained using different isolation and purification methods. *FEMS Microbiol Ecol* 2001;**36**:139–51.
- [15] Ettenauer JD, Piñar G, Lopandic K, Spangl B, Ellersdorfer G, Voithl C, et al. Microbes and building materials – evaluation of DNA extraction protocols as common basis for molecular analysis. *Sci Total Environ* 2012;**439**:44-53.
- [16] Litchfield CD, Rake JB, Zindulis J, Watanabe RT, Stein DJ. Optimization of procedures for the recovery of heterotrophic bacteria from marine sediments. *Microb Ecol* 1975;**1**:219-33.
- [17] Terry TA, Cassel DK, Wollum AG. Effects of soil sample-size and included root and wood on bulk-density in forested soils. *Soil Sci Soc Am J* 1981;**45**:135-38.
- [18] Zhou J, Bruns MA, Tiedje JM. DNA recovery from soils of diverse composition. *Appl Environ Microbiol* 1996;**62**:316-22.
- [19] Miller DN, Bryant JE, Madsen EL, Ghiorse WC. Evaluation and optimization of DNA extraction and purification procedures for soil and sediment samples. *Appl Environ Microbiol* 1999;**65**:4715-24.
- [20] Ogram A. Soil molecular microbial ecology at age 20: methodological challenges for the future, *Soil Biol & Biochem* 2000;**32**:1499-504.

P3. Kopie der Publikation Ettenauer JD, Piñar G, Lopandic K, Spangl B, Ellersdorfer G, Voitl C, et al. Microbes and building materials – evaluation of DNA extraction protocols as common basis for molecular analysis. *Science of the Total Environment* 2012; pp. 439:44-53.

Science of the Total Environment 439 (2012) 44–53



Contents lists available at SciVerse ScienceDirect

Science of the Total Environment

journal homepage: www.elsevier.com/locate/scitotenv



Microbes on building materials – Evaluation of DNA extraction protocols as common basis for molecular analysis

Jörg D. Ettenauer ^{a,*}, Guadalupe Piñar ^a, Ksenija Lopandic ^a, Bernhard Spangl ^b, Günther Ellersdorfer ^a, Christian Voitl ^a, Katja Sterflinger ^a

^a VIBT-BOKU, University of Natural Resources and Life Sciences, Department of Biotechnology, Muthgasse 11, A-1190 Vienna, Austria

^b University of Natural Resources and Life Sciences, Department of Landscape, Spatial and Infrastructure Science, Institute of Applied Statistics and Computing (IASC), Gregor Mendel-Str. 33, A-1180 Vienna, Austria

HIGHLIGHTS

- ▶ Up to thirteen extraction methods were evaluated with three building materials.
- ▶ Plaster, red brick and gypsum cardboard were chosen as representative materials.
- ▶ DNA yield, DNA purity and PCR amplifiability were the decisive parameters.
- ▶ The results from the DNA yield showed fluctuations of up to 3 orders of magnitude.
- ▶ The FastDNA Spin kit is the best DNA isolation method for building materials.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 17 April 2012

Received in revised form 6 September 2012

Accepted 6 September 2012

Available online xxx

Keywords:

Building materials
DNA extraction
DNA purity
DNA yield
PCR

ABSTRACT

The study of microbial life in building materials is an emerging topic concerning biodeterioration of materials as well as health risks in houses and at working places. Biodegradation and potential health implications associated with microbial growth in our residues claim for more precise methods for quantification and identification. To date, cultivation experiments are commonly used to gain insight into the microbial diversity. Nowadays, molecular techniques for the identification of microorganisms provide efficient methods that can be applied in this field. The efficiency of DNA extraction is decisive in order to perform a reliable and reproducible quantification of the microorganisms by qPCR or to characterize the structure of the microbial community. In this study we tested thirteen DNA extraction methods and evaluated their efficiency for identifying (1) the quantity of DNA, (2) the quality and purity of DNA and (3) the ability of the DNA to be amplified in a PCR reaction using three universal primer sets for the ITS region of fungi as well as one primer pair targeting the 16S rRNA of bacteria with three typical building materials – common plaster, red brick and gypsum cardboard. DNA concentration measurements showed strong variations among the tested methods and materials. Measurement of the DNA yield showed up to three orders of magnitude variation from the same samples, whereas A260/A280 ratios often prognosticated biases in the PCR amplifications. Visualization of the crude DNA extracts and the comparison of DGGE fingerprints showed additional drawbacks of some methods. The FastDNA Spin kit for soil showed to be the best DNA extraction method and could provide positive results for all tests with the three building materials. Therefore, we suggest this method as a gold standard for quantification of indoor fungi and bacteria in building materials.

© 2012 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

“Everything is everywhere, but the environment selects” is a statement that arose out of the microbiological work from Beijerinck and van de Knoniklijke (1913) and Baas Becking (1934) at the edge of

the 19th to the 20th century. Microbial growth on building materials is a problem that has been known for a long time, but in the recent years it has drawn more attention. Floods, wet years, thermal modernization of residential buildings, air-conditioning systems, construction or material faults, and poor and improper ventilation are the major reasons for an increase of the relative air humidity and dampness of surfaces (Samson et al., 2010). These climatic conditions foster microbial growth in our living environment, on building materials and increase the risks for mold contaminations (Piñar and Sterflinger, 2009; Samson et al., 2010; Sterflinger, 2010, 2012). The properties and the common occurrence of bacteria and fungi contribute to the fact that these microorganisms

* Corresponding author. Tel.: +43 1 47654 6935; fax: +43 1 3697615.

E-mail addresses: joerg.ettenauer@boku.ac.at (J.D. Ettenauer), Guadalupe.Pinar@boku.ac.at (G. Piñar), Ksenija.Lopandic@boku.ac.at (K. Lopandic), Bernhard.Spangl@boku.ac.at (B. Spangl), Guenther.Ellersdorfer@boku.ac.at (G. Ellersdorfer), Christian.Voitl@boku.ac.at (C. Voitl), Katja.Sterflinger@boku.ac.at (K. Sterflinger).

represent the most frequent cause of biodeterioration of building materials (May et al., 1993; Piñar and Sterflinger, 2009). Biodegradation of buildings is caused by physical processes that affect the stability of the materials and also by chemical processes through biocorrosion such as oxidation, hydration reactions and dissolution and solubilization of material components. Degradation of construction material occurs through microbially produced substrate-specific enzymes or biogenic acids. Microbial excretion products can result in biopitting, and chemical changes in the material surface can moreover lead to the formation of crusts and the release of gases (Warscheid and Braams, 2000). Additionally microorganisms represent a serious health hazard for the residents (Gutarowska and Piotrowska, 2007; Samson et al., 1994). A worldwide phenomenon called sick building syndrome – SBS (Sykes, 1988) – has been confirmed as a recognizable disease by the World Health Organization (Akimenko et al., 1986). The sick building syndrome is a complex combination of nonspecific ailments associated with an individual's working place or residence that has become contaminated with any number of harmful agents. The causes for this syndrome are manifold but we focus in this study on the serious contaminants presented by microbial growth, especially fungal contamination – commonly referred to as mold (Crook and Burton, 2010). Microorganisms can affect human health in different ways: they can lead to allergic reactions due to allergens and spores released from fungi; can cause toxic effects by microbial toxins or cell components; can rarely have an infectious impact, especially on immune-suppressed people; and microorganisms can also represent an odor nuisance and esthetical annoyance. All these properties and effects of microbial growth call for the need to gain more insight into the microbial communities inhabiting the different construction materials.

Nowadays, the isolation and identification of microorganisms, especially of fungi, still stick to the use of traditional culture-based methods to estimate microbial contamination in buildings. These classical cultivation techniques allow a quantitative and qualitative assessment of the investigated environment and represent an important methodology in this field. Nevertheless, the dramatical changes in microbiology over the past 20 years have developed new technologies that can be applied for studying microbial communities. Typically, by using standard techniques with laboratory media, it is estimated that only a small minority of about 1% of the total bacterial and up to 10% of the fungal population observable in nature can be cultured (Amann et al., 1995). Therefore, molecular DNA and phylogenetic techniques have provided means that allow the identification of organisms without the need for cultivation (Hill et al., 2000; Hugenholtz and Pace, 1996; Hugenholtz et al., 1998; Pace et al., 1986). Fast and sensitive alternatives to classical cultivation techniques are polymerase chain reaction (PCR)-based techniques that offer an opportunity to analyze the full diversity of microbial communities. The first step for a successful and complete analysis of the inhabiting microbiota of a certain environment is the choice of an appropriate nucleic-acid isolation method (Martin-Laurent et al., 2001; Niemi et al., 2001; Stach et al., 2001). The efficiency of cell lysis, the quality and quantity of the extracted nucleic acid, its degree of purification and its size are crucial for the success of further molecular analysis. Building materials are, to a certain extent, comparable to soils and sediments because of their complex compositions. They represent systems containing various substances that co-extract with DNA, such as heavy metals, pigments, humic acids and chemical additives (Holben et al., 1988; Möhlenhoff et al., 2001; Rochelle et al., 1992; Wilson, 1997). The removal of these substances is one out of many critical steps in the extraction of nucleic acids that can lead to great biases during the PCR amplification. The heterogeneity of soils and sediments led to the establishment and publication of a huge number of different methods for the extraction of total microbial community DNA (Holben, 1994; Ogram et al., 1987; Picard et al., 1992; Sayler et al., 1992; Smalla et al., 1993; Steffan et al., 1988; Zhou et al., 1996).

To our knowledge, DNA extraction from construction materials was to date never the goal of any microbial ecology study. Therefore,

in this study we evaluated up to thirteen direct-in situ DNA extraction methods. As basis, three commercial DNA extraction kits for soils and four standard DNA extraction protocols were chosen. These techniques incorporate a combination of mechanical, chemical and also enzymatic lysis of the cells. Additionally, modifications were introduced in some protocols. The extraction methods were applied to three different sample aliquots of three typically used building materials – common plaster, red brick and gypsum cardboard. Attention at the evaluation of these protocols was focused on three different parameters: 1) the quantity of the isolated DNA; 2) the quality of the extracted nucleic acid; and 3) the ability of the DNA to be amplified in different PCR reactions using one universal bacterial primer pair and three fungal ITS-primer sets. Additionally, the amplified PCR products were analyzed by denaturing gradient gel electrophoresis (DGGE) in order to compare the community fingerprints obtained from the different isolation methods. According to the results obtained from these criteria we identified the methods that worked better and continually eliminated others that did not work as well in order to find a standard DNA extraction method for molecular analysis which should be applied for construction materials.

2. Materials and methods

2.1. Sampling and sample preparation

In this study three commonly used building materials, plaster, red brick and gypsum cardboard, were investigated. Samples of the building materials were taken from a private house and the adjacent wine cellar in Baumgarten (Lower Austria). All samples showed a heavy fungal contamination. Sampling was done using a sterile scalpel or an ethanol-flamed hammer and a chisel to remove the material from the walls and collected it in sterile plastic bags. The transport and storage of the sampling material till further processing were done at room temperature.

In the laboratory, samples were ground for 2 min in liquid nitrogen using a sterile mortar and pestle, collected in a sterile 50 ml falcon tube and homogenized by manual shaking. Three different sample amounts of each material, 50 mg, 100 mg and 250 mg (each in triplicate), were weighed in a Sartorius precision scale for each extraction method. From that point on, to set an equal starting point for all aliquots of all extraction methods, the tubes were either immediately processed or stored at -20°C . The resulting nine samples for each method were further subjected to the different DNA extraction methods as described below.

2.2. DNA extraction methods

In this study all evaluated methods are based on the direct in situ lysis of microbes in the material. Three different DNA extraction kits and four commonly used standard DNA extraction protocols were each applied and compared with each other. In order to maximize the yield, increase the purity and enhance the ability to amplify the extracted DNA, some modifications were introduced and evaluated with at least one of the three building materials. For the plaster samples all methods described below were applied. Out of these 13 methods the most promising 7 extraction protocols, marked with a bold number in Table 1, were further used for the other two building materials, red brick and gypsum cardboard. The extracted DNA from all methods was stored till further analysis at -20°C .

1. The FastDNA® SPIN Kit for Soil from MP Biomedicals, (Illkirch, France) was applied according to the manufacturer's instructions. The kit combines a mechanical, using bead beating, and chemical lysis of the cells. After removal of the soil residues, cell debris and lysing matrix, the DNA is purified with a silica-based GENECLAN® procedure using spin filters. After a washing step the DNA is finally eluted in DNase/pyrogen-free water.
2. The UltraClean® Soil DNA Isolation Kit from MO BIO Laboratories, Inc., (Carlsbad, CA) was used according to the manufacturer's

Table 1
Overview of the different extraction methods used for the three building materials. For details of the extraction protocols see the Materials and methods section. Methods indicated with bold numbers were applied for all building materials.

Method	Short description of the used protocols
1	FastDNA® SPIN Kit for Soil from MP Biomedicals: according to the manufacturer's instructions
2	UltraClean® Soil DNA Isolation Kit from MO BIO Laboratories, Inc.: according to the manufacturer's instructions
3	PowerSoil® DNA Isolation Kit from MO BIO Laboratories, Inc.: according to the manufacturer's instructions
4	Modified PowerSoil® DNA Isolation Kit protocol I as recommended by Mag. Günther Ellersdorfer and the kit manual.
5	Modified PowerSoil® DNA Isolation Kit protocol II as recommended by Mag. Günther Ellersdorfer and the kit manual.
6	Protocol of Ausubel et al. (1991).
7	Protocol of Claudia Schabereiter-Gurtner et al. (2001) with a purification step using the QIAamp Viral RNA Mini Kit with the same modifications as introduced by Schabereiter-Gurtner et al. (2001).
8	Modification I of protocol 7: without the QIAamp Viral RNA Mini Kit purification. Instead the DNA was precipitated in ethanol (96%).
9	Modification II of protocol 7: instead of the QIAamp Viral RNA Mini Kit purification, the DNA was purified using the QIAamp PCR Purification Kit.
10	Modified protocol of Sert and Sterflinger (2010).
11	Modification of protocol 10: protocol 10 was performed using the following buffer with an increased concentration of sodium chloride: extraction buffer II: 50 mM Tris-HCl, 250 mM NaCl, 50 mM EDTA and 0.3% SDS (w/v), pH 8.0.
12	Modified CTAB protocol (van den Ende and de Hoog, 1999).
13	Modification of protocol 12: protocol 12 was applied with a similar CTAB buffer II, that has the double Tris and a 10 fold higher EDTA concentration: 200 mM Tris-HCl, 200 mM EDTA, 8.2% NaCl (w/v), 2% CTAB, 0.8% β-mercaptoethanol (v/v), pH 8.0.

instructions. The general principal of the kit is to lyse the microorganisms by a combination of heat, detergent and also mechanical action against beads using a vortex. DNA released from the lysed cells is further bound to a silica membrane in a spin filter format. The filter is washed and the DNA is recovered in a supplied buffer. The kit contains a special inhibitor removal solution for the removal of humic acids and other disturbing substances.

- The PowerSoil® DNA Isolation Kit from MO BIO Laboratories, Inc., was applied according to the manufacturer's instructions. The general principle resembles the UltraClean kit (method 2). A special solution is included which allows the removal of humic substances, respectively brown color from even the most difficult soil types.
- Modified PowerSoil® DNA Isolation Kit protocol I: the sample material in the tubes with the supplied buffer was first heated up to 65 °C for 10 min without shaking. After a bead beating step for 45 s at a speed of 5 (meters per second) the protocol was followed according to the manufacturer's manual till point 7. Further at each step the whole supernatant was transferred and so not the fully recommended amount of the next kit solution could be added.
- Modified PowerSoil® DNA Isolation Kit protocol II: To the sample material 60 µl of the C1 kit-solution, containing SDS and other disruption agents required for the complete cell lysis, were added and the tubes with the supplied buffer were incubated for 10 min at 65 °C with agitation (800 rpm). The further DNA extraction was done as described in method 4.
- The protocol of Ausubel et al. (1991) was used as the sixth extraction method. It was originally designed for the extraction of DNA from pure bacterial cultures and was now tested for its ability to gain mixed genomic DNA from building materials.
- The protocol of Schabereiter-Gurtner et al. (2001) was originally used to extract the DNA from objects of art and stone material. The extracted DNA was also purified using the QIAamp Viral RNA Mini Kit (QIAGEN GmbH, Hilden, Germany) with the same modifications as introduced by Schabereiter-Gurtner et al. (2001).
- Modification I of protocol 7: method 7 was applied without the QIAamp Viral RNA Mini Kit. Instead the DNA was precipitated

overnight at 4 °C in 2 volumes (~300–700 µl) of ethanol (96%). The next day, the sample was centrifuged for 5 min at 13,200 rpm, the ethanol was discarded and the DNA pellet was dried at 40–50 °C. The DNA was re-suspended in 100 µl ultra-pure water (Sigma).

- Modification II of protocol 7: another variation of method 7 was tested: Instead of the purification with the QIAamp Viral RNA Mini Kit the DNA was purified with the QIAamp PCR Purification Kit (QIAGEN GmbH, Hilden, Germany).
- Modified protocol of Sert and Sterflinger (2010): this method which was originally used as a routine method for DNA extraction from pure fungal strains was also tested. To the weighted sample amount in a 1.5 ml bead beater tube, 0.4 g glass beads (0.75–1 mm, Carl Roth GmbH Co.KG, Karlsruhe, Germany) and 500 µl extraction buffer I [50 mM Tris-HCl, 150 mM NaCl, 50 mM EDTA and 0.3% SDS (w/v), pH 8.0] were added. After vortexing, the sample was processed two times in the Fast Prep FP120 Ribolyzer for 40 s at a speed of 6 (m/s). Between these ribolyzing steps the sample was incubated at 65 °C for 1 h at 800 rpm. After centrifugation for 10 min at 10,400 rpm (all centrifugation steps at room temperature), the supernatant was transferred into a new microfuge tube. Further DNA extraction was done with 1:1 vol (500 µl) chloroform-isoamyl alcohol (24:1 v/v; Roth). During vortexing a white interface formed and after centrifugation for 5 min at 13,200 rpm the aqueous supernatant was transferred into a new tube. This step was repeated using the same volume (1:1 vol) of phenol/chloroform/isoamyl alcohol (25:24:1, v/v; Roth). After a centrifugation step (5 min at 13,000 rpm), the supernatant was transferred into a new microfuge tube. Two volumes (~1000 µl) of ethanol (96%; –20 °C) were added and the DNA was precipitated overnight at 4 °C. The next day the sample was centrifuged for 5 min at 13,200 rpm, the ethanol was discarded and the pellet was dried at 40–50 °C. The DNA was re-suspended in 100 µl autoclaved ultra pure water from Sigma.
- Modification of protocol 10: additionally the extraction protocol 10 was performed using the following buffer with an increased concentration of sodium chloride: extraction buffer II: 50 mM Tris-HCl, 250 mM NaCl, 50 mM EDTA and 0.3% SDS (w/v), pH 8.0.
- Modified CTAB protocol (van den Ende and de Hoog, 1999). This method was also applied for the building materials. To the sample material 0.4 g glass beads (0.75–1 mm) and 500 µl CTAB buffer I [100 mM Tris-HCl, 20 mM EDTA, 8.2% NaCl (w/v), 2% CTAB, 0.8% β-mercaptoethanol (v/v), pH 8.0] were added. A short vortexing step was followed by bead beating in the Fast Prep FP 120 Ribolyzer for 45 s at a speed of 5 (m/s). Afterward the sample was heated on a thermoblock for 10 min at 65 °C without shaking. 500 µl chloroform-isoamyl alcohol (24:1 v/v) was added. The sample solution was vortexed for 2 s and further centrifuged for 5 min at 13,200 rpm at room temperature. The aqueous supernatant was transferred into a new microfuge tube, 2 volumes (~800–1000 µl) of ethanol (96%; –20 °C) were added and the DNA was precipitated overnight at 4 °C. After a centrifugation step (5 min at 13,200 rpm) the ethanol was discarded. The DNA pellet was washed with 500 µl ice-cold ethanol (96%) and dried on the thermoblock at ~50 °C. The DNA pellet was re-suspended in 100 µl ultra-pure water from Sigma.
- Modification of protocol 12: method 12 was applied with a similar CTAB buffer II, that had the double Tris- and a 10 fold higher EDTA concentration: 200 mM Tris-HCl, 200 mM EDTA, 8.2% NaCl (w/v), 2% CTAB, and 0.8% β-mercaptoethanol (v/v), pH 8.0. This buffer, without β-mercaptoethanol, was already used by van den Ende and de Hoog (1999).

2.3. Estimation of DNA concentration and purity

The concentration and quality of the DNA preparations were estimated by a NanoDrop spectrophotometer and by electrophoresis on 1.5% agarose gels. Measurements were assessed using a NanoDrop® ND-1000 spectrophotometer (peqLab Biotechnology GmbH, Linz, Austria).

The analyses were performed according to the manufacturers' protocol and the extracted DNA of all triplicate sample amounts from all methods was measured thrice. Mean values were calculated for each sample amount. The purity of the extracted DNA was assessed by measuring the A260/A280 absorbance ratio which indicates the presence of impurities as protein, phenol, humic acids or other contaminants that strongly absorb at or near 280 nm. From each triplicate of each sample amount, 20 µl of the extracted DNA was pooled and transferred into a new microfuge tube. Additional spectrophotometric concentration measurements were performed with the pooled samples (data not shown) that were further used for the electrophoresis and for the PCR amplifications. Eight microliters of the pooled extracted DNA was run on 1.5% (w/v) agarose gels at 110 V for 40 min, stained in an ethidium bromide solution [1 µg/ml; stock: 10 mg/ml] for 20 min and visualized with an UVP documentation system (BioRad Transilluminator, Universal Hood; Mitsubishi P93D-printer).

2.4. Polymerase chain reaction and electrophoresis

2.4.1. PCR amplification of bacterial 16S rRNA fragments

For all PCR reactions 2 × PCR Master Mix from Promega [50 units/ml of TaqDNA polymerase supplied in an appropriate reaction buffer (pH 8.5), 400 µM dATP, 400 µM dGTP, 400 µM dCTP, 400 µM dTTP, 3 mM MgCl₂] was diluted 1 × and 12.5 pmol/µl of each primer (stock: 50 pmol/µl) was added. To amplify the eubacterial 16S rRNA fragments, a PCR amplifying the nucleotide positions 341–926 of the *Escherichia coli* 16S rRNA gene, was carried out with the forward primer 341f (Muyzer et al., 1993) and the reverse primer 907r (Teske et al., 1996). In a total volume of 25 µl, 400 µg/ml BSA (stock: 20 mg/ml; Roche, Diagnostics GmbH, Germany) and 2.5 µl DNA template were added. The PCR was performed in a MJ Research PTC-200 Peltier thermal cycler with the thermocycling program described by Schabereiter-Gurtner et al. (2001). Eight microliters of each PCR product was run on a 2% (w/v) agarose gel as described above. For each Master Mix, positive (DNA of *Bacillus pumilus* added as template) and negative controls (no DNA added) were carried out to ensure the proper amplification of bacterial DNA in the PCR reaction and to exclude the possibility of false-positive results through cross-contaminations.

All PCR products were assessed by visualization of the DNA on agarose gels. A eubacterial PCR product was assigned positive if a DNA band corresponding to an approximately 585-bp long amplicon was detected.

2.4.2. PCR amplification of fungal ITS region fragments

As for the amplification of bacterial 16S rRNA the 2 × PCR Master Mix from Promega and the same primer concentration (12.5 pmol/µl) were used. Three different primer combinations were selected to amplify the ITS1, ITS2 or both regions. Primer pairs ITS1f/ITS2r and ITS3f/ITS4r were chosen to amplify smaller fragments (~300 bp), corresponding to either the ITS1 or ITS2 region, which is usually used for DGGE analysis. Fragments of about 450–600 bp in size, corresponding to the ITS1 and the ITS2 region and the 5.8S rRNA gene between them, were amplified with the primers ITS1f and ITS4r (White et al., 1990). The 25 µl PCR reactions were carried out with 400 µg/ml BSA (stock: 20 mg/ml) and 2.5 µl DNA template. All PCR reactions were conducted with the following thermocycling program: 5 minute denaturation at 95 °C, followed by 35 cycles of 1 minute denaturation at 95 °C, 1 minute primer annealing at 55 °C and 1 minute extension at 72 °C. Five minutes at 72 °C was used as a final extension step. As described for the amplification of bacterial DNA, 8 µl of the PCR products was analyzed by agarose gel electrophoresis and each PCR reaction included a positive (DNA of *Alternaria alternata*) and a negative control.

2.5. DGGE analysis

For DGGE analysis a semi-nested PCR was performed in a total volume of 100 µl (2 × 50 µl reaction size), each with 3 µl of PCR products from the

first amplification as template (from PCR performed with primers ITS1 and ITS4 for fungi). Genetic fingerprinting was done as described by Ettenauer et al. (2010). Briefly, a semi-nested PCR was performed with primers having a GC-clamp attached (Muyzer et al., 1993). Primers 341GC (Muyzer et al., 1993) and 518r (Neefs et al., 1990), as well as primers ITS1-GC and ITS2 (Michaelsen et al., 2006) were used for the bacterial and fungal DNA amplification, respectively. The same thermocycling program as described for the first round was used for the amplification of the 16S rDNA fragments. For the amplification of the fungal DNA the thermocycling program described by Michaelsen et al. (2006) was used. The fingerprinting of the bacterial community was performed in a linear chemical gradient ranging from 30 to 55% (100% denaturant contains 7 M urea and 40% v/v formamide). For the fungal DGGE analysis an acrylamide gradient from 25 to 50% was applied. DGGE was carried out as described by Muyzer et al. (1993), using a DCODE™-System (Bio-Rad) in 0.5 × TAE buffer (20 mM Tris, 10 mM acetate, 0.5 mM Na₂EDTA; pH 8.0). The gels were run at a constant temperature of 60 °C, at 200 V for 3.5 h with the bacterial samples and for 6 h with the fungal DNA. The visual comparison of the different DGGE profiles from different sample amounts and extraction methods was done on the computer.

2.6. Statistical analysis

A 3-way ANOVA model was used to test for the material, amount and method effects, written in the form

$$Y_{ijkl} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_k + (\alpha\beta)_{ij} + (\alpha\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + \epsilon_{ijkl}$$

with the grand mean μ and the main effects α_i , β_j , and γ_k , reflecting changes in the response variable due to material, amount, method and interactions $(\alpha\beta)_{ij}$, $(\alpha\gamma)_{ik}$, and $(\beta\gamma)_{jk}$, and ϵ_{ijkl} as the error term. The model was calculated for measurement variables 'DNA yield' and 'DNA purity'.

For comparisons of significant differences Tukey's 'honest significant difference' post-hoc method (Miller, 1981) was applied.

p-Values smaller than 0,05 were regarded as statistically significant. All statistical analyses were carried out with R (R Development Core Team, 2011).

3. Results

The suitability of the extraction methods was evaluated based on the following parameters: 1) DNA quantity; 2) DNA purity; and 3) DNA amplifiability.

3.1. The plaster material

All 13 DNA extraction methods were conducted with the plaster material in order to make a pre-selection prior to analyzing the other two building materials. The results shown in Table 2 reveal that the amount of DNA extracted from the plaster material greatly varied between the investigated sample amounts. Surprisingly, from a 50 mg sample, the highest DNA yield was obtained (2.7×10^6 ng DNA per gram sample material with method 10), whereas, from 250 mg, the lowest DNA concentration was isolated (2.4×10^3 ng/g with methods 3 and 9). The three commercial DNA extraction kits (methods 1, 2 and 3) allowed a DNA recovery ranging from 2.4×10^3 to 2.3×10^4 ng/g. The modifications, heating and shaking with the buffer, introduced to the PowerSoil DNA isolation kit (methods 4 and 5) did not lead to distinct changes in the DNA yield, nor in the PCR amplification tests. Only the A260/A280 ratios were slightly decreased and in the 250 mg samples an appreciable increase of the DNA amount, compared to the manufacturers' manual (method 3) could be achieved. Therefore, we decided to continue working with the standard protocol of this kit (method 3). Method 6, the DNA extraction protocol of Ausubel et al. (1991), yielded moderate DNA

J.D. Ettenauer et al. / Science of the Total Environment 439 (2012) 44–53

Table 2
Summary of the results obtained from the thirteen methods evaluated with the plaster samples. The given numbers for the DNA yield (ng/g) and DNA purity (A260/A280 ratio) are rounded mean values of triplicate measurements with the NanoDrop spectrophotometer and rounded values for the standard deviation. For the visualization of the DNA on agarose gels and the PCR products the table shows if all three sample amounts or only certain sample lots (50, 100 and 250 mg) were detectable after electrophoresis and ethidium bromide staining.

Plaster	Sample lot	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
DNA yield	50 mg	1.9 × 10 ⁴ ± 3.9 × 10 ³	2.3 × 10 ⁴ ± 2.5 × 10 ³	9.1 × 10 ³ ± 2.1 × 10 ³	7.9 × 10 ³ ± 2.5 × 10 ³	7.2 × 10 ³ ± 2 × 10 ³	1.5 × 10 ⁵ ± 4.7 × 10 ⁴	1.3 × 10 ⁵ ± 6.7 × 10 ⁴	1 × 10 ⁶ ± 9.1 × 10 ⁵	1.1 × 10 ⁴ ± 1.1 × 10 ³	2.7 × 10 ⁶ ± 2.7 × 10 ⁵	2.5 × 10 ⁶ ± 7 × 10 ⁵	3.5 × 10 ⁵ ± 1 × 10 ⁵	2.4 × 10 ⁵ ± 5.4 × 10 ⁴
	100 mg	1.2 × 10 ⁴ ± 1.5 × 10 ³	9.9 × 10 ³ ± 1.5 × 10 ³	5.1 × 10 ³ ± 7.5 × 10 ²	5.9 × 10 ³ ± 1.4 × 10 ³	3.9 × 10 ³ ± 1.3 × 10 ³	3 × 10 ⁵ ± 4.4 × 10 ⁴	6.5 × 10 ⁴ ± 3.2 × 10 ³	7.3 × 10 ⁵ ± 4.2 × 10 ⁴	9 × 10 ³ ± 2 × 10 ³	1.6 × 10 ⁶ ± 3.8 × 10 ⁵	1.9 × 10 ⁶ ± 3.3 × 10 ⁵	5.5 × 10 ⁵ ± 9.8 × 10 ⁴	1.5 × 10 ⁵ ± 9.9 × 10 ⁴
	250 mg	7.5 × 10 ³ ± 2.8 × 10 ²	3.8 × 10 ³ ± 4.5 × 10 ²	2.4 × 10 ³ ± 2.6 × 10 ²	3.6 × 10 ³ ± 3.2 × 10 ²	3.7 × 10 ³ ± 1.1 × 10 ³	4.6 × 10 ⁵ ± 5.7 × 10 ⁴	2.4 × 10 ⁴ ± 7.2 × 10 ³	3.3 × 10 ⁵ ± 1.3 × 10 ⁴	3 × 10 ⁵ ± 1.05 × 10 ⁵	2.4 × 10 ³ ± 1.2 × 10 ³	1.2 × 10 ⁶ ± 5.9 × 10 ⁴	8.5 × 10 ⁵ ± 1.2 × 10 ⁵	4.3 × 10 ⁵ ± 3.4 × 10 ⁴
DNA purity	50 mg	1.73 ± 0.4	1.83 ± 0.1	2.48 ± 0.72	1.4 ± 0.41	1.95 ± 0.8	0.77 ± 0.17	2.95 ± 0.2	1.05 ± 0.02	2.29 ± 0.43	1.24 ± 0.11	1.02 ± 0.07	1.32 ± 0.51	1.4 ± 0.06
	100 mg	1.78 ± 0.14	1.8 ± 0.27	2.14 ± 0.59	1.19 ± 0.19	2.25 ± 1.32	0.97 ± 0.12	2.97 ± 0.18	1.15 ± 0.02	1.82 ± 0.18	1.19 ± 0.08	1.09 ± 0.15	1.32 ± 0.54	1.42 ± 0.07
Visualization PCR	50 mg	1.8 ± 0.1	1.76 ± 0.26	2.04 ± 0.87	1.52 ± 0.37	1.86 ± 0.29	1.06 ± 0.21	3.04 ± 0.16	1.18 ± 0.04	1.72 ± 0.45	1.36 ± 0.03	1.26 ± 0.05	1.31 ± 0.1	1.39 ± 0.04
	250 mg	All	All	All	All	250	None	None	All	None	None	None	None	None
341f/907r	All	All	All	All	All	All	50, 100	All	None	All	50, 100	50, 100	50, 100	250
	All	All	All	All	All	All	50	All	None	All	50	50, 100	None	250
	All	All	All	All	All	All	None	All	None	All	50	50	None	250
ITS1/ITS2	All	All	All	All	All	All	None	All	None	All	None	None	None	None
	All	All	All	All	All	All	None	50	None	All	None	None	None	None
ITS3/ITS4	All	All	100, 250	250	250	250	None	50	None	All	None	None	None	None
	All	All	100, 250	250	250	250	None	50	None	All	None	None	None	None

concentrations (1.5 × 10⁵–4.6 × 10⁵ ng/g). The assessment of the DNA purity by the A260/A280 ratio (0.77 to 1.06) revealed impurities that led to biases in the amplification analysis where only bacterial 16S rDNA and ITS1/ITS4 fragments were amplifiable. The protocol of Schabereiter-Gurtner et al. (2001) was applied in three different versions (methods 7–9): 1) the original version with the additional QIAamp Viral RNA Mini Kit purification (method 7); 2) without any purification (method 8) and 3) using the QIAamp PCR Purification Kit (method 9). The resulting DNA content of the extracts from the three methods showed strong variations. Without any purification, the samples had the highest DNA amount (3.3 × 10⁵–1 × 10⁶ ng/g), whereas the eluents after the QIAamp Viral RNA Mini Kit only contained 2.4 × 10⁴–1.3 × 10⁵ ng/g of DNA and the yield further decreased when the QIAamp PCR Purification Kit was applied (2.4 × 10³–1.1 × 10⁴ ng/g). Methods 7 and 9, that included an additional purification of the DNA did not display any bands after visualization, but improved the quality of the DNA and further provided positive amplification results with all tested primer pairs. However, the extracts from the original protocol (method 7) showed A260/280 ratios of almost 3, whereas in samples from method 8 the ratios were around 1.15. The high DNA concentrations from method 8 allowed the visualization of DNA on agarose gels, whereas the impurities strongly inhibited all further amplification trails. Method 7, the original protocol of Schabereiter-Gurtner et al. (2001), was selected for further evaluation with the other materials, because of the good DNA yields and positive PCR results with all primers tested. Methods 10 and 11 are both modified versions of the protocol of Sert and Sterflinger (2010). Plaster samples treated with protocols 10 and 11 yielded on average the highest DNA concentrations of all tested methods (Table 2). Method 10 showed values from 1.2 × 10⁶ to 2.7 × 10⁶ ng/g and method 11 yielded 8.5 × 10⁵–2.5 × 10⁶ ng/g. No significant difference was observed in the quality of the DNA from these two methods. Protocols 12 and 13 include modifications of the method described by van den Ende and de Hoog (1999) and they differed in the chemical composition of the used extraction buffers. DNA yields from method 12 ranged from 3.5 × 10⁵ to 5.5 × 10⁵ ng/g, whereas with method 13 9.8 × 10⁵–2.4 × 10⁶ ng/g of DNA was recovered. Additionally, the last method showed a higher quality of DNA and allowed the amplification with more primer pairs than method 12.

The DGGE fingerprints of the bacterial and fungal micro-biota were carried out in order to evaluate if the community profiles, including the quantity and the quality of the bands, were influenced by the extraction methods used and by the amount of sample material used for extraction. The results of our study – examples of DGGE fingerprints are shown in Fig. 1 – clearly demonstrated that the fingerprints were not influenced by the extraction methods, provided that the extraction allowed successful PCR amplification.

3.2. The red brick material

Based on the results derived from the plaster extractions, we selected methods 1–3, 6, 7, and 10–13 for the isolation of DNA from red brick. Results are shown in Table 3. For this material the three commercial kits (methods 1–3) resulted in DNA yields ranging from 1.2 × 10³ to 1.9 × 10⁴ ng/g. From the commercial kits, the extracts from the FastDNA kit (method 1) showed the highest DNA yields (7 × 10³–1.5 × 10⁴ ng/g) and the best quality – A260/A280 ratios ranging from 1.74 to 1.91 – and further allowed the amplification with all primer sets. By contrast, the two kits from MO BIO (methods 2 and 3) did not generate satisfactory results in all evaluated parameters (Table 3). Astonishingly, with protocol 6 of Ausubel et al. (1991), 1.6 × 10⁶–6.5 × 10⁶ ng/g of DNA was obtained from the same sample amounts, that is up to three decimal powers more DNA than from methods 1–3. However, the DNA extracts contained impurities that strongly inhibited the PCR tests. Positive results were only obtained from the 50 mg samples tested with the ITS1/ITS2 primer pair. With protocol 7 of Schabereiter-Gurtner et al. (2001) moderate DNA amounts (1.8 × 10⁴–9.4 × 10⁴ ng/g) with higher A260/A280 ratios (around 2.9) were obtained, as observed for the

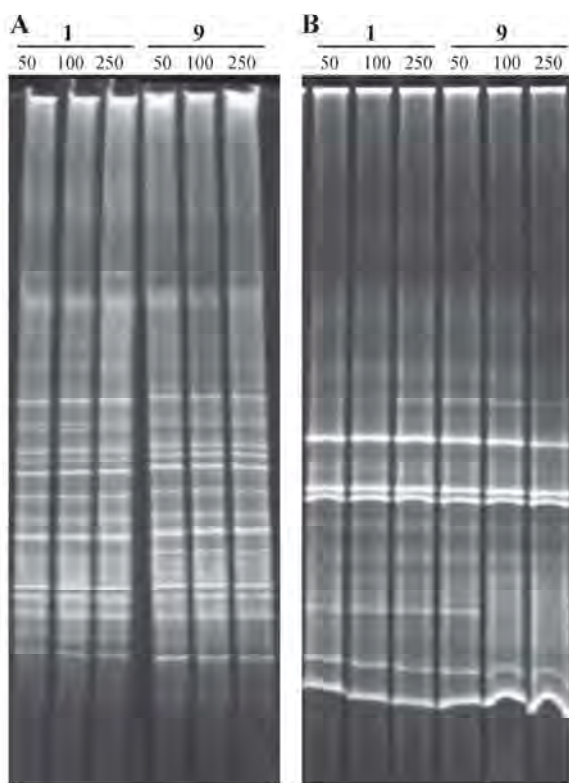


Fig. 1. Representative examples of bacterial and fungal fingerprints obtained from the plaster material. The banding patterns of the three tested sample amounts (50, 100 and 250 mg) from the FastDNA Spin kit for soil (method 1) and the protocol from Schabereiter-Gurtner et al. (2001) with the additional QIAamp PCR purification kit (method 9) are shown. Both methods revealed positive PCR amplification results for 16S rDNA and ITS1/ITS4 fragments. A. Bacterial community fingerprints. B. Fungal fingerprints.

plaster material. However, these high values did not lead to any disadvantages in the amplification analysis. The DNA quality and quantity from the extracts obtained with methods 10 and 11 were similar to those of method 6. The low quality of DNA of these methods (ranging from 1.6×10^6 to 5.3×10^6 ng/g for both methods, with A260/A280 ratios

from 1.45 to 1.5) did not have such drawbacks in the polymerase chain reaction as in the case of method 6 and they showed positive amplification results (Table 3). Finally, the results obtained from the modified protocols (methods 12 and 13) of Sert and Sterflinger (2010) showed similarities to those obtained from the plaster material. Method 13 allowed the recovery of nearly one decimal power more DNA than method 12. The A260/A280 ratios of the extracts from both methods were not significantly different with the exception of the 50 mg sample (1.33 versus 1.86 for methods 12 and 13, respectively). Nevertheless, both methods showed negative results with the four tested primer pairs. Therefore, for the last construction material only method 13 was further evaluated.

The DGGE analysis of the red brick samples led to the same conclusions as for the plaster material. Similarly, the extraction protocols that provided positive amplification results were able to display a complete community fingerprint with all three sample amounts (data not shown).

3.3. The gypsum cardboard material

Our previous results reduced the number of methods to only seven, which were applied for the gypsum cardboard samples (Table 4). The three commercial kits (methods 1–3) just delivered DNA yields ranging from 1.1×10^3 to 9.1×10^3 ng/g and A260/A280 ratios from 1.36 to 1.76. With the FastDNA kit PCR products with all four primer pairs were obtained. However, by using the UltraClean and PowerSoil kits positive results were obtained from PCR reactions with the bacterial and fungal ITS1/ITS4 primers. NanoDrop measurements with protocol 6 (Ausubel et al., 1991) showed high DNA concentrations ranging from 1.2×10^6 to 5.9×10^6 ng/g, but the impurities (A260/A280 ratios 1.39–1.44) did not allow an amplification with any tested primer set. Method 7 showed moderate DNA yields (1.8×10^4 – 9.1×10^4 ng/g) with very high A260/A280 ratios (3.17–3.22), as previously observed in the other two materials. These impurities resulted in drawbacks in the PCR analysis, where only with bacterial primers could PCR products be obtained. Method 10 gained the highest DNA amounts from the gypsum cardboard. The DNA concentration of 1.4×10^6 – 8.9×10^6 ng/g represents up to three decimal powers more DNA than from the commercial kits. The A260/A280 ratio revealed some contaminations in the extracts that strongly influenced the PCR assays. Finally, method 13 displayed relatively high DNA yields (7.7×10^5 – 1.7×10^6 ng/g). The A260/A280 ratios resembled those of method 10. However, negative PCR results were obtained with all four primer pairs tested.

DGGE results derived from the gypsum cardboard samples were in agreement with those obtained from the first two building materials. Methods producing positive results for the amplification with the

Table 3

Summary of the results obtained from the nine methods evaluated with the red brick samples. The given numbers for the DNA yield (ng/g) and DNA purity (A260/A280 ratio) are rounded mean values of triplicate measurements with the NanoDrop spectrophotometer and rounded values for the standard deviation. For the visualization of the DNA on agarose gels and the PCR products the table shows if all three sample amounts or only certain sample lots (50, 100 and 250 mg) were detectable after electrophoresis and ethidium bromide staining.

Red brick	Sample lot	1	2	3	6	7	10	11	12	13	
DNA yield	50 mg	$1.5 \times 10^4 \pm 2.9 \times 10^3$	$1.9 \times 10^4 \pm 2 \times 10^3$	$7.6 \times 10^3 \pm 1.4 \times 10^3$	$6.5 \times 10^6 \pm 9.7 \times 10^5$	$9.4 \times 10^4 \pm 2.1 \times 10^4$	$5 \times 10^6 \pm 3.9 \times 10^5$	$5.3 \times 10^6 \pm 3.1 \times 10^5$	$6.1 \times 10^5 \pm 1.3 \times 10^5$	$1.1 \times 10^6 \pm 1.7 \times 10^5$	
		$1 \times 10^4 \pm 1.1 \times 10^3$	$4.6 \times 10^3 \pm 1.3 \times 10^3$	$4.8 \times 10^3 \pm 6.3 \times 10^2$	$2.2 \times 10^6 \pm 3.9 \times 10^5$	$4.8 \times 10^4 \pm 1.1 \times 10^4$	$2.5 \times 10^6 \pm 3.3 \times 10^5$	$2.9 \times 10^6 \pm 2.9 \times 10^5$	$4.2 \times 10^5 \pm 5.2 \times 10^4$	$1.1 \times 10^6 \pm 2.6 \times 10^5$	
	100 mg	$7 \times 10^3 \pm 1 \times 10^3$	$2 \times 10^3 \pm 6.5 \times 10^2$	$1.2 \times 10^3 \pm 4.6 \times 10^2$	$1.6 \times 10^6 \pm 1.2 \times 10^5$	$1.8 \times 10^4 \pm 3.8 \times 10^3$	$1.7 \times 10^6 \pm 5.5 \times 10^5$	$1.6 \times 10^6 \pm 2.7 \times 10^4$	$3.1 \times 10^5 \pm 4.9 \times 10^4$	$5.9 \times 10^5 \pm 6 \times 10^4$	
		250 mg	1.9 ± 0.35	2.41 ± 0.71	1.86 ± 0.84	1.45 ± 0.06	2.92 ± 0.29	1.47 ± 0.05	1.47 ± 0.06	1.33 ± 0.17	1.86 ± 0.16
	DNA purity	100 mg	1.91 ± 0.25	2.04 ± 0.52	1.59 ± 0.57	1.4 ± 0.08	2.94 ± 0.29	1.45 ± 0.03	1.48 ± 0.03	1.35 ± 0.18	1.42 ± 0.07
		250 mg	1.74 ± 0.26	2.3 ± 0.62	1.63 ± 0.61	1.4 ± 0.07	2.97 ± 0.47	1.5 ± 0.07	1.48 ± 0.02	1.38 ± 0.05	1.41 ± 0.05
Visualization PCR	All	All	None	50, 100	None	None	None	None	None	None	
	341f/907r	All	All	All	None	All	All	All	None	None	
	ITS1/ITS4	All	All	All	None	All	250	None	None	None	
	ITS1/ITS2	All	All	All	50	All	All	All	None	None	
	ITS3/ITS4	All	None	100	None	All	None	None	None	None	

Table 4

Summary of the results obtained from the seven methods evaluated with the gypsum cardboard samples. The given numbers for the DNA yield (ng/g) and DNA purity (A260/A280 ratio) are rounded mean values of triplicate measurements with the NanoDrop spectrophotometer and rounded values for the standard deviation. For the visualization of the DNA on agarose gels and the PCR products the table shows if all three sample amounts or only certain sample lots (50, 100 and 250 mg) were detectable after electrophoresis and ethidium bromide staining.

Gypsum cardboard	Sample lot	1	2	3	6	7	10	13
DNA yield	50 mg	$8.4 \times 10^3 \pm 4.7 \times 10^3$	$9.1 \times 10^3 \pm 2.4 \times 10^3$	$7.5 \times 10^3 \pm 3 \times 10^3$	$5.9 \times 10^6 \pm 1.1 \times 10^5$	$9.1 \times 10^4 \pm 6.7 \times 10^3$	$8.9 \times 10^6 \pm 1.7 \times 10^6$	$1.7 \times 10^6 \pm 1.6 \times 10^5$
	100 mg	$3 \times 10^3 \pm 9.4 \times 10^2$	$4.1 \times 10^3 \pm 1 \times 10^3$	$3.1 \times 10^3 \pm 1.3 \times 10^3$	$2.8 \times 10^6 \pm 1.1 \times 10^5$	$4.5 \times 10^4 \pm 1.3 \times 10^3$	$3.2 \times 10^6 \pm 4.2 \times 10^5$	$1.2 \times 10^6 \pm 3.4 \times 10^4$
	250 mg	$1.3 \times 10^3 \pm 3.9 \times 10^2$	$1.6 \times 10^3 \pm 4.6 \times 10^2$	$1.1 \times 10^3 \pm 5.8 \times 10^2$	$1.2 \times 10^6 \pm 2.8 \times 10^4$	$1.8 \times 10^4 \pm 8.5 \times 10^2$	$1.4 \times 10^6 \pm 4.6 \times 10^5$	$7.7 \times 10^5 \pm 5.1 \times 10^4$
DNA purity	50 mg	1.43 ± 0.35	1.5 ± 0.24	1.43 ± 0.31	1.44 ± 0.01	3.22 ± 0.46	1.55 ± 0.04	1.63 ± 0.11
	100 mg	1.76 ± 0.49	1.5 ± 0.64	1.7 ± 0.62	1.41 ± 0.02	3.17 ± 0.23	1.48 ± 0.03	1.6 ± 0.03
	250 mg	1.65 ± 0.5	1.36 ± 0.32	1.56 ± 0.84	1.39 ± 0.01	3.22 ± 0.37	1.45 ± 0.06	1.55 ± 0.04
Visualization PCR	50	None	None	None	None	None	None	None
341f/907r	All	All	250	None	All	None	None	None
ITS1/ITS4	All	All	250	None	None	None	None	None
ITS1/ITS2	All	None	None	None	None	None	None	None
ITS3/ITS4	All	None	None	None	None	None	None	None

different primer sets further delivered reliable fingerprints of the inhabiting bacterial and fungal communities (data not shown).

3.4. Statistical results

The statistical analysis using a 3-way ANOVA model showed that regarding the measurement variable 'yield' all treatment factors and all interactions showed significant effects (all p-values smaller than 0.0001). The homogeneous subgroups in Table 5 are indicated by small letters.

Regarding the measurement variable 'purity' the treatment factors 'material' and 'method' showed significant effects (both p-values smaller than 0.0001), whereas the treatment factor 'amount' was not significant. The interactions containing the factor 'material', i.e., interactions between 'material' and 'amount' and between 'material' and 'method', also showed significant effects (p = 0.0342 and p < 0.0001, respectively). The homogeneous subgroups may also be found in Table 5.

4. Discussion

Analyzing microbial communities in building materials is the basis for a series of implications like: 1) assessment of material deterioration; 2) development and testing of anti-microbial treatments e.g. biocides and 3) evaluation of health risks for humans in indoor environments (Piñar and Sterflinger, 2009). The first crucial step in the DNA based assessment of microbial communities is a quantitative and reproducible extraction of nucleic acid. Variations in the efficiency of cell lysis, DNA yield and purity can fundamentally affect the success of analytical techniques such as PCR, hybridization, cloning or analysis of a metagenome (Bertrand et al., 2005; Picard et al., 1992; Straub et al., 1994; Young et al., 1993). In this way, biases can be introduced, which dramatically affect the success of microbial community analysis and hinder inter-laboratory comparisons (Kang and Mills, 2006; Krsek and Wellington, 1999; Rainley et al., 1994; Ranjard et al., 2003; von Wintzingerode et al., 1997).

The DNA extraction protocols used in this study generally comprise combinations of different mechanical, chemical and also enzymatic lysing procedures. Generally, a variation of the commonly used working steps for DNA extraction is included in these methods. Mechanical

breakage of the cells – additionally to the grinding with liquid nitrogen – is done by bead beating, vortexing or freezing and thawing. The chemical composition of the extraction buffers includes SDS, CTAB, high salt concentrations, EDTA, β-mercaptoethanol and also enzymes like lysozyme or proteinase K. Purification steps included in the protocols usually comprise phenol–chloroform precipitation or different kit purifications using spin filters or carrier RNA. DNA-precipitation is done using 96%-ethanol.

The commercial kits were evaluated with all three building materials, due to their worldwide availability and the guaranteed constant composition of the supplied solutions without the possibility of contaminations. The other extraction protocols where reaction buffers are prepared individually always imply the risk for operator specific mistakes. On the other hand they represent a good possibility to reduce costs in everyday laboratory work.

The order of the three evaluated building materials was determined by the occurrence of these materials, wherein plaster covers most masonries, red brick is a historically old and very commonly used building material and gypsum cardboard is more commonly used in modern buildings.

The results of our study show that the differences in extraction methods are extreme: although DNA was extracted with all the methods tested, the DNA yields of 1 g building material varied from 1.1×10^3 to 8.9×10^6 ng. As an example, from a 50 mg plaster material extracted with method 5 only 7.2×10^3 ng/g of DNA was obtained, whereas from the same amount of plaster material method 10 allowed the recovery of 2.7×10^6 ng/g of DNA, which is nearly 3 orders of magnitude more. Similar results were observable with the 100 mg and 250 mg samples and also with the other materials. Thus, these data evidence the necessity to introduce standardized methods.

Methods 1–3, 7 and 13 resulted in the highest DNA concentrations from the plaster material, whereas methods 6 and 10 gained more DNA from the red brick and gypsum cardboard samples (Fig. 2A, p < 0.0001). The quantity of DNA extracted from the samples of one building material strongly varied by using the different tested methods. Especially the commercial extraction kits resulted in relatively low DNA yields that were close to the detection limit (2 ng/μl) of the NanoDrop instrument (Tables 2–4). Protocols 6–13 delivered up to 3 orders of magnitude more DNA from the same sample amount than the commercial kits. For instance, the highest DNA concentration obtained with a commercial kit from the 50 mg gypsum cardboard samples was 9.1×10^3 ng/g using the UltraClean DNA Isolation Kit (method 2). On the other hand with the extraction protocol 10 it was possible to gain 8.9×10^6 ng/g of DNA from the same sample lot. These fluctuations can be explained by drawbacks occurring with NanoDrop measurements, when contaminations like protein, phenol, humic acid impurities, and other contaminants from the building materials or buffer residues, also strongly absorb at

Table 5

Homogeneous subgroups generated by the statistical program R. The small letters a, b, c and d represent homogeneous groups, ab is another homogeneous group that cannot be grouped to either group a or to group b.

Method	1	2	3	6	7	10	13
DNA yield	a	a	a	c	a	d	b
DNA purity	c	c	c	a	d	ab	b

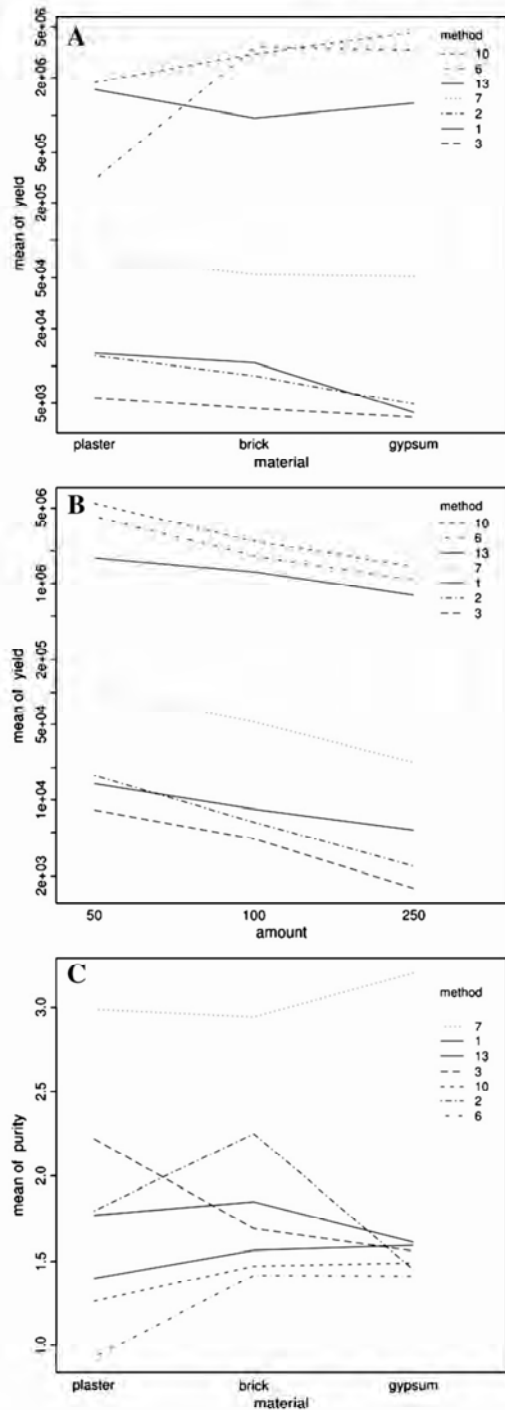


Fig. 2. Interaction plots of the mean values for measurement variable yield and purity of corresponding factor combinations are displayed and linked by profile lines for each method. A. Mean values for the yield of the factor combination material and method. B. Mean values for the yield of the factor combination sample amount and method. C. Mean values for purity of the factor combination material and method.

260 nm (Fig. 2C, $p < 0.0001$). Furthermore, our data showed that the extracts of all standard extraction protocols that included a precipitation step using ethanol had very high DNA concentrations. However, they also had lowered A260/A280 ratios (1.3–1.6) revealing impurities that co-precipitated with the extracted nucleic acid. These findings were additionally confirmed by negative results obtained by electrophoresis and PCR analysis. Therefore, it is very doubtful if the measured DNA concentration represented the real DNA content in the solution. The very high A260/280 ratios obtained with the protocol of Schabereiter-Gurtner et al. (2001; method 7), from all three building materials could be due to high salt residues as remains from the high salt concentrations in the extraction buffer used. These salt impurities did not lead to biases in the PCR analysis of the plaster and red brick samples. Only the amplification tests from the gypsum cardboard material were negative using the fungal primer pairs. Interestingly, similar A260/A280 ratios from different methods led to different PCR amplification results, which can be explained by the presence of PCR inhibitors (e.g. methods 8 and 11; 10, 12 and 13 from the plaster material; methods 6, 10–13 for the red brick samples; methods 2, 3 and 13 from the gypsum cardboard samples).

Concerning the material amounts tested (50, 100 and 250 mg) one could expect to gain the higher DNA yield from the larger sample amounts. This theory did not hold true for any of the tested methods (Fig. 2B, $p < 0.0001$). More often the smallest sample amount (50 mg) yielded the highest DNA concentration. This can be explained by the ratio of the used sample amount versus the added buffer volume used for the extraction of the DNA. For instance, in protocol 7, which was developed for small samples (1–2 mg) obtained from objects of art (Schabereiter-Gurtner et al., 2001), a very small buffer volume (~100 μ l extraction buffer, according to the author's instructions) is added at the beginning of the extraction procedure. The small volume is not enough to reach the whole sample material, when the sample material exceeds >100 mg. Generally, protocol 7 delivered very good results, but the abilities of this method were overextended by the sample volumes tested in this study. Especially finely grounded sample powder from building materials strongly absorbs the buffer and the mixture does not represent a homogenous liquid suspension. Additionally, shaking on an incubator or vortexing is not an enough rigorous strategy to completely homogenize the material. According to the manuals, the commercial kits are suitable for ≤ 250 mg (PowerSoil DNA Isolation kit), ≤ 500 mg (FastDNA Spin kit) and 250–1000 mg (UltraClean Soil DNA Isolation kit) of sample material. Thus, the tested sample volumes did not really challenge the kit-capacities. Just to mention, it is not possible to increase the buffer volumes, due to the limiting size of the tubes (1.5–2 ml) used for the extraction. In general, our study shows that the ratio sample amount versus the added buffer volume is an important factor for the DNA yield obtained. Sample amounts >100 mg overextend the capacities of some of the extraction procedures tested. As a consequence the enclosed DNA in the material cannot be extracted completely, which represents a great bias of the approach.

The DGGE analysis performed in this study further showed that microbial fingerprints obtained from the smallest sample amounts represented the whole inhabiting community. Therefore, when greater amounts of sample material are available, we recommend the careful homogenization of the samples and the further use of small subsamples from this homogenate for DNA extraction and community analysis. Similar procedures were suggested by Litchfield et al. (1975) and Terry et al. (1981) for marine sediments and forest soil, respectively.

In general, protocols which include an additional purification step using columns or commercial kits yielded drastically lower DNA amounts than the standard extraction methods using a phenol/chloroform purification of the DNA. DNA is lost during the application of these spin filters, whereas purity measurements, visualization and PCR analysis showed that a great amount of contaminants could be eliminated through the purification with these columns. Zhou et al. (1996) and Miller et al. (1999) already demonstrated for many soil and sediment types that

high-throughput DNA purification procedures that imply mini-columns, spin-filters or gel-extraction kits are able to sufficiently reduce or eliminate PCR inhibitors from DNA extracts. The results obtained from the plaster material with the protocol of Schabereiter-Gurtner et al. (2001) and its two modified versions (methods 7–9) corroborated these findings.

The goal of this study was the development of a universally adaptable DNA extraction and purification method for all commonly used building materials. This extraction technique would be a great step forward to establish molecular techniques for assessing the microbial ecology of construction materials. Such a standard protocol would be a great benefit toward the introduction of automated procedures in building microbiology that further allow a subsequent inter-laboratory comparison of results. This standard protocol should 1) be equally efficient for all building materials; 2) effectively lyse all target organisms; 3) allow the processing of multiple samples simultaneously in a short time (Ogram, 2000); 4) generate a sufficient amount of high-molecular weight DNA, respectively RNA, out of very small sample amounts; 5) include a purification procedure that removes any contaminating substances that could disturb further molecular applications; 6) and be appropriate for all standard laboratory techniques.

Out of the thirteen evaluated methods, the FastDNA Spin kit for soil revealed the best results for all three building materials. The use of this kit enabled the isolation of DNA from each tested material. The DNA obtained showed a very high quality compared to that isolated with the other methods. Contrary to other protocols that showed higher DNA concentrations (e.g. methods 6–13) this method allowed a clear visualization on agarose gels. Furthermore, the FastDNA Spin kit for soil delivered positive amplification results from all sample amounts from each construction material. The DGGE fingerprints obtained with this method represented the complete microbial diversity present in the sample material and comparison with the banding patterns from other methods showed that no DNA bands were missing. The incorporated ribolyzing step of the FastDNA Spin kit led to the complete lysis of all bacterial and fungal cells and, therefore, only this kit allowed the amplification with bacterial and all fungal primers (Tables 2–4). Finally, the usage of this commercial extraction kit minimizes the risk for contaminations and it represents a relatively quick DNA extraction procedure.

5. Conclusions

The results of this study clearly show that the FastDNA Spin kit for soil from MP Biomedicals is the method of choice for DNA extraction from construction materials. We recommend the standard application of this commercial kit for molecular ecology analysis of building materials in order to set standards in the assessment of microbial community analysis and to allow comparisons of results between different laboratories.

We declare that this study was not influenced by financial or commercial interests and that we are in no relationship with any of the companies mentioned above.

References

Akimenko VV, Anderson I, Lebovitz MD, Lindvall T. The sick building syndrome. *Indoor Air*, 6. Stockholm: Swedish Council for Building Research; 1986. p. 87–97.
 Amann RI, Ludwig W, Schleifer KH. Phylogenetic identification and in situ detection of individual microbial cells without cultivation. *Microbiol Rev* 1995;59:143–69.
 Ausubel FM, Brent R, Kingston RE, Moore DD, Seidman JG, Smith JA, et al, editors. *Current protocols in molecular biology*. New York: Wiley J. and Sons; 1991.
 Baas Becking LGM. *Geobiologie of inleiding tot de milieukunde*. The Hague, the Netherlands: Van Stockum WP & Zoon; 1934 (in Dutch).
 Beijerinck MW, van de Koninglijke J. *De infusies en de ontdekking der bacterien*. Akademie van Wetenschappen, Muller, Amsterdam: Müller editor. 1913.
 Bertrand H, Poly F, Van VT, Lombard N, Nalin R, Vogel TM, et al. High molecular weight DNA recovery from soils prerequisite for biotechnological metagenomic library construction. *J Microbiol Methods* 2005;62:1–11.
 Crook B, Burton N. Indoor moulds, sick building syndrome and building related illness. *Fungal Biol Rev* 2010;24:106–13. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fbr.2010.05.001>.
 Ettenauer J, Sterflinger K, Piñar G. Cultivation and molecular monitoring of halophilic microorganisms inhabiting an extreme environment presented by a salt-attacked monument. *Int J Astrobiol* 2010;9(1):59–72.

Gutarowska B, Piotrowska M. Methods of mycological analysis in buildings. *Build Environ* 2007;42:1843–50.
 Hill GT, Mitkowski NA, Aldrich-Wolfe L, Emele LR, Jurkonie DD, Ficke A, et al. Methods for assessing the composition and diversity of soil microbial communities. *Appl Soil Ecol* 2000;15:25–36.
 Holben WE. Isolation and purification of bacterial DNA from soil. In: Weaver RW, editor. *Methods of soil analysis*, vol. Part 2. Soil Sci Soc Am, Inc; 1994. p. 727–51.
 Holben WE, Jansson JK, Chelm BK, Tiedje JM. DNA probe method for the detection of specific microorganisms in the soil bacterial community. *Appl Environ Microbiol* 1988;54:703–11.
 Hugenholtz P, Pace NR. Identifying microbial diversity in the natural environment: a molecular phylogenetic approach. *Trends Biotechnol* 1996;14:190–7.
 Hugenholtz P, Goebel BM, Pace NR. Impact of culture-independent studies on the emerging phylogenetic view of bacterial diversity. *J Bacteriol* 1998;180(18):4765–74.
 Kang S, Mills AL. The effect of sample size in studies of soil microbial community structure. *J Microbiol Methods* 2006;66:242–50.
 Krsek M, Wellington EMH. Comparison of different methods for the isolation and purification of total community DNA from soil. *J Microbiol Methods* 1999;39:1–16.
 Litchfield CD, Rake JB, Zindulis J, Watanabe RT, Stein DJ. Optimization of procedures for the recovery of heterotrophic bacteria from marine sediments. *Microb Ecol* 1975;1:219–33.
 Martin-Laurent F, Philippot L, Hallet S, Chaussod R, Germon JC, Soulas G, et al. DNA extraction from soils: old bias for new microbial diversity analysis methods. *Appl Environ Microbiol* 2001;67:2354–9.
 May E, Lewis FJ, Pereira S, Taylor S, Seaward MRD, Allsopp D. Microbial deterioration of building stone: a review. *Biodeterior Abstr* 1993;7:109–23.
 Michaelsen A, Pinzari F, Ripka K, Lubitz W, Piñar G. Application of molecular techniques for identification of fungal communities colonising paper material. *Int Biodeter Biodegr* 2006;58:133–41.
 Miller Jr RG. *Simultaneous statistical inference*. 1st ed. Springer Series in Statistics; 1981.
 Miller DN, Bryant JE, Madsen EL, Ghiorse WC. Evaluation and optimization of DNA extraction and purification procedures for soil and sediment samples. *Appl Environ Microbiol* 1999;65:4715–24.
 Möhlenhoff P, Müller L, Gorbushina AA, Petersen K. Molecular approach to the characterization of fungal communities: methods for DNA extraction, PCR amplification and DGGE analysis of painted art objects. *FEMS Microbiol Lett* 2001;195:169–73.
 Muyzer G, De Waal EC, Uitterlinden AG. Profiling of complex microbial populations by denaturing gradient gel electrophoresis analysis of polymerase chain reaction-amplified genes coding for 16S rRNA. *Appl Environ Microbiol* 1993;59:695–700.
 Neefs JM, Van de Peer Y, Hendriks L, De Wachter R. Compilation of small ribosomal subunit RNA sequences. *Nucleic Acids Res* 1990;18:2237–317.
 Niemi RM, Heiskanen I, Wallenius K, Lindström K. Extraction and purification of DNA in rhizosphere soil samples for PCR-DGGE analysis of bacterial consortia. *J Microbiol Methods* 2001;45:155–65.
 Ogram A. Soil molecular microbial ecology at age 20: methodological challenges for the future. *Soil Biol Biochem* 2000;32:1499–504.
 Ogram A, Saylor GS, Barkay T. The extraction and purification of microbial DNA from sediments. *J Microbiol Methods* 1987;7:57–66.
 Pace NR, Stahl DA, Lane DJ, Olsen GJ. The analysis of natural microbial populations by ribosomal RNA sequences. *Adv Microbiol Ecol* 1986;9:1–55.
 Picard C, Ponsionnet C, Paget E, Nesme X, Simonet P. Detection and enumeration of bacteria in soil by direct DNA extraction and polymerase chain reaction. *Appl Environ Microbiol* 1992;58:2717–22.
 Piñar G, Sterflinger K. *Microbes and building materials*. In: Cornejo DN, Haro JL, editors. *Building materials: properties, performance and applications*. New York: Nova Science Publishers Inc.; 2009. p. 163–88.
 R Development Core Team. *R: a language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0 <http://www.R-project.org/2011>.
 Rainley FA, Ward N, Sly LI, Stackebrandt E. Dependence of the taxonomic composition of clone libraries for PCR amplified, naturally occurring 16S rDNA on the primer pair and the cloning system used. *Experientia* 1994;50:789–801.
 Ranjard L, Lejon DPH, Mougel C, Schehrer L, Merdinoglu D, Chaussod R. Sampling strategy in molecular microbial ecology: influence of soil sample size on DNA fingerprinting analysis of fungal and bacterial communities. *Environ Microbiol* 2003;5:1111–20.
 Rochelle PA, Fry JC, Parkes RJ, Weightman AJ. DNA extraction for 16S gene analysis to determine genetic diversity in deep sediment communities. *FEMS Microbiol Lett* 1992;100:59–66.
 Samson RA, Flannigan B, Flannigan M, Verhoeff A, Adan OCG, Hoekstra ES. Health implication of fungi in indoor environments. Elsevier Publishers; 1994.
 Samson RA, Houbraken J, Thrane U, Frisvad J, Andersen B. *Food and indoor fungi*. Utrecht: CBS; 2010.
 Saylor GS, Fleming JT, Applegate B, Werner C. Nucleic acid extraction and analysis: detecting genes and their activity in the environment. In: Wellington EMH, van Elsas JD, editors. *Genetic interactions among microorganisms in the natural environment*. Pergamon Press; 1992. p. 237–57.
 Schabereiter-Gurtner C, Piñar G, Lubitz W, Rölleke S. An advanced strategy to identify bacterial communities on art objects. *J Microbiol Methods* 2001;45:77–87.
 Sert HB, Sterflinger K. A new *Coniosporium* species from historical marble monuments. *Mycol Prog* 2010;9:353–9.
 Smalla K, Creswell N, Mendonca-Hagler LC, Wolters A, van Elsas JD. Rapid DNA extraction protocol from soil for polymerase chain reaction-mediated amplification. *J Appl Bacteriol* 1993;74:78–85.
 Stach JEM, Bathe S, Clapp JP, Burns RG. PCR-SSCP comparison of 16S rDNA sequence diversity in soil DNA obtained using different isolation and purification methods. *FEMS Microbiol Ecol* 2001;36:139–51.

- Steffan RJ, Goksoyr J, Bej AK, Atlas RM. Recovery of DNA from soils and sediments. *Appl Environ Microbiol* 1988;54:2908–15.
- Sterflinger K. Fungi: their role in deterioration of cultural heritage. *Fungal Biol Rev* 2010;24:47–55. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fbr.2010.03.003>.
- Sterflinger K. Schimmelpilze im Innenraum – Möglichkeiten, Grenzen und Notwendigkeit der Behandlung. Tagungsband Wiener Holzschutztage 2011, Holzforschung Austria, Wien; 2012. p. 38–40.
- Straub TM, Pepper IL, Abbaszadegan M, Gerba CP. A method to detect enteroviruses in sewage sludge-amended soil using the PCR. *Appl Environ Microbiol* 1994;60:1014–14.
- Sykes JM. Sick building syndrome: a review, health and safety executive, specialist inspector rep no. 10; 1988.
- Terry TA, Cassel DK, Wollum AG. Effects of soil sample-size and included root and wood on bulk-density in forested soils. *Soil Sci Soc Am J* 1981;45:135–8.
- Teske A, Wawer C, Muyzer G, Ramsing NB. Distribution of sulphate-reducing bacteria in a stratified fjord (Mariager Fjord, Denmark) as evaluated by most-probable-number counts and DGGE of PCR-amplified ribosomal DNA fragments. *Appl Environ Microbiol* 1996;62:1405–15.
- Van den Ende AHG, de Hoog GS. Variability and molecular diagnostics of the neurotropic species *Cladophialophora bantiana*. *Stud Mycol* 1999;43:151–62.
- von Wintzingerode F, Göbel UB, Stackebrandt E. Determination of microbial diversity in environmental samples: pitfalls of PCR-based rRNA analysis. *FEMS Microbiol Rev* 1997;21:213–29.
- Warscheid T, Braams J. Biodeterioration of stone: a review. *Int Biodeter Biodegr* 2000;46:343–68.
- White TJ, Bruns T, Lee S, Taylor JW. Amplification and direct sequencing of fungal ribosomal RNA genes for phylogenetics. In: Innis MA, Gelfand DH, Sninsky JJ, White TJ, editors. *PCR protocols: a guide to methods and applications*. New York: Academic Press Inc.; 1990. p. 315–22.
- Wilson IC. Inhibition and facilitation of nucleic acid amplification. *Appl Environ Microbiol* 1997;63:3741–51.
- Young CC, Burghoff RL, Keim LG, Minak-Bernero V, Lute JR, Hinton SM. Polyvinylpyrrolidone-agarose gel electrophoresis purification of polymerase chain reaction-amplifiable DNA from soil. *Appl Environ Microbiol* 1993;59:1972–4.
- Zhou J, Bruns MA, Tiedje JM. DNA recovery from soils of diverse composition. *Appl Environ Microbiol* 1996;62:316–22.

A4 Bauteilkatalog

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 detaillierten Bauausführung.

Der Bauteilkatalog umfasst einige Detaillösungen für Innendämmsysteme, wie 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 Zeichnungen 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 Innendämmungen (Perliteplatte, Holzweichfaserplatte und Schilf).

A4.1 Anmerkungen zu den Zeichnungen

Innenwandanschlüsse

Projektbezogen kann es notwendig werden, einbindende Innenwände oder (Massiv-) Decken im außenwandnahen Bereich zu dämmen. In der Regel genügt ein maximal 500 mm breiter Streifen, der auch als Keil ausgebildet werden kann. 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 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 sie können zu Problemen im Zusammenhang mit der Inneneinrichtung führen. Es wird deshalb empfohlen, im Bereich dieser Dämmanschlüsse den Bestandputz abzuschlagen, sodass der Keil oder der Absatz im ausgebauten Zustand möglichst geringe Auswirkungen hat.

(Kasten-)Fensteranschlüsse

Bei der Abbildung der Kastenfensteranschlüsse sind scheinbar unterschiedliche Ziegelformate abgebildet. Dies rührt daher, dass die Ziegel im Sturzbereich aufrecht verbaut wurden, um eine Gewölbewirkung herzustellen. Bei dem dünnen Ziegel im Parapetbereich handelt es sich um einen Dachziegel. Beides sind übliche, handwerkliche Verfahrensweisen zur Zeit der Erstellung des Kindergartens.

Steckdosen

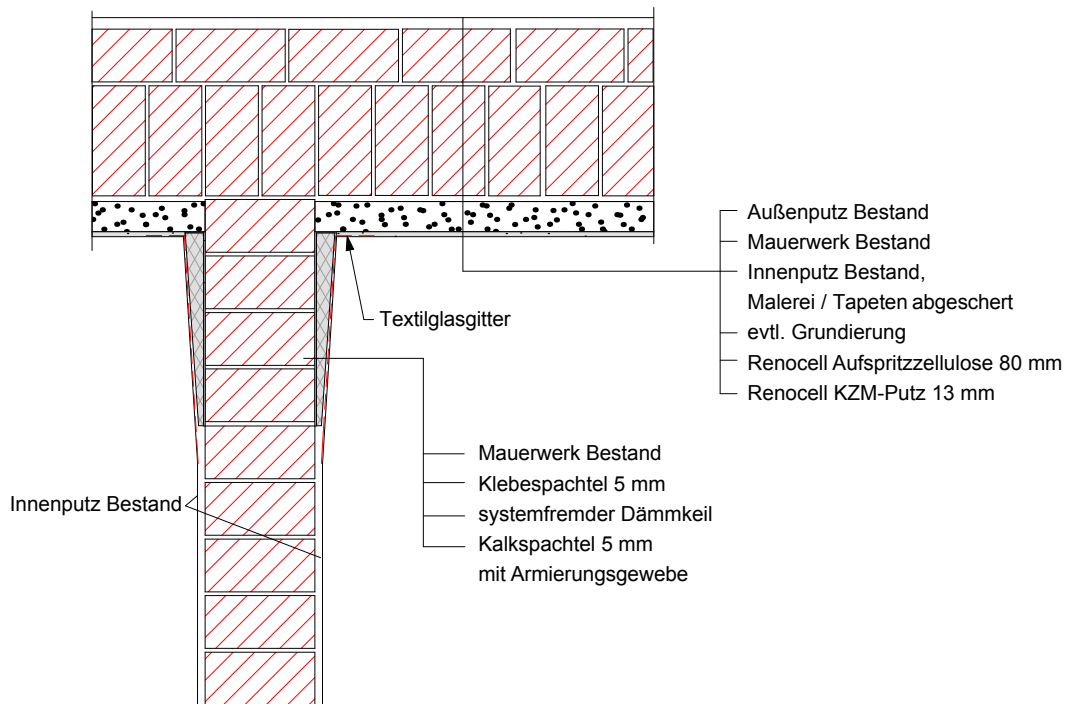
Lassen sich Steckdosen an einer innen gedämmten Außenwand nicht vermeiden, stellen sie ein Problem dar, weil die Dämmebene teilweise oder in voller Dicke unterbrochen wird. Können Kabel nicht wie bei aufgespritzten Dämmsystemen gut mit Dämmstoff umschlossen

werden, bildet sich immer eine Luftschicht entlang der Kabel, durch welche Luft weiter in die Konstruktion einströmen kann. Eine vorgesezte Installationsebene wird wegen des zusätzlichen Aufwandes und wegen des Flächenverlustes häufig nicht akzeptiert. Die Steckdose setzt den Wärmewiderstand lokal herab, feucht-warme Raumluft kann in den Steckdoseneinsatz eindringen und kondensiert darin. 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. In Kürze werden Steckdosen eingeführt, welche speziell für den Einsatz in Zusammenhang mit Innendämmsystemen entwickelt worden sind. Sie enthalten verschiedene Dämmschichten unterschiedlichen Materials, welche Kondensation oder Schimmelpilzwachstum wirksam unterbinden. Die abgebildeten Lösungen sind aufwändiger, da diese neuartigen Steckdosen zu Projektabschluss noch nicht erhältlich waren.

Befestigung von Gegenständen

Für die Befestigung von Gegenständen bei innen gedämmten Wänden existieren noch weitere Systeme, beispielsweise Montagezylinder aus EPS- oder PUR-Hartschaum. Derzeit sind diese allerdings nicht für die Systeme des Projektes OEKO-ID zugelassen.

1 Innendämmung mit Zellulose einbindende Zwischenwand, Horizontalschnitt



Verarbeitungsempfehlung

Sämtliche Malereischichten oder Tapeten sind abzuscheren, diffusionshemmende oder sperrende Anstriche sind abzubeizen. Bei einbindenden Innenwänden durch Simulation überprüfen, ob Dämmkeile notwendig sind. Wenn ja, ist der Putz abzuschlagen und eine plane Fläche herzustellen (Glattstrich). Die Dimensionierung erfolgt entsprechend der Simulationsergebnisse. Dieser Bereich ist nach dem Aufbringen der Zellulosedämmung von Zelluloseresten zu reinigen.

Nach dem Abbinden bzw. Austrocknen der Zellulose werden die Dämmkeile nach Herstellervorschrift montiert und der Grobputz auf die Zellulose aufgebracht. Im Zuge der Feinputzherstellung wird ein Textilglasgitter im Bereich der Dämmkeile, ca. 100 mm über das Dämmelement hinausragend eingelegt, um die Anschlussfugen zu armieren.

Farbbeschichtung mit diffusionsoffenen mineralischen Farben.

Fassade auf Schäden und ausreichende Schlagregendichtheit prüfen!

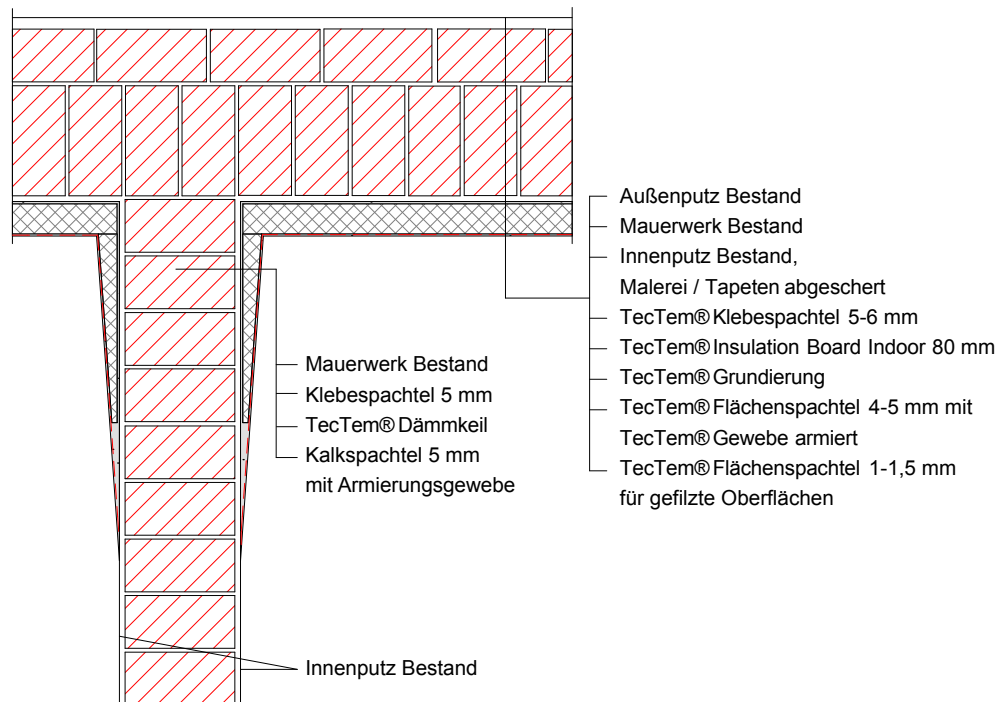
Dämmsystem: **Zellulose, einbindende Zwischenwand**

1

OEKO-ID - Möglichkeiten und Grenzen ökologischer, diffusionsoffener Innendämmsysteme



2 Innendämmung mit Perliteplatte einbindende Zwischenwand, Horizontalschnitt



Verarbeitungsempfehlung

Sämtliche Malereischichten oder Tapeten sind abzuscheren, diffusionshemmende oder sperrende Anstriche sind abzubeizen. Der Putz ist auf Tragfähigkeit zu prüfen, Hohlstellen sind abzuschlagen und mit Kalkzementmörtel zu verputzen. Größere Unebenheiten als 5 mm sind mit Kalkzementmörtel (KZM) auszugleichen.

Danach wird der Klebespachtel auf die TecTem-Platten mit der Zahntraufel (mind. 10 x 10 mm) 5 mm dick aufgetragen und die Platten im liegenden Verband mit mind. 200 mm Fugenversatz an die Wand appliziert. Allfällige Versätze bei den Plattenstößen (Überzähne) können nach Abbinden des Klebers mit dem Schleifbrett egalisiert werden.

Bei einbindenden Innenwänden durch Simulation überprüfen, ob Dämmkeile notwendig sind. Wenn ja, ist es zweckmäßig, im Anschlussbereich den Putz abzuschlagen und einen Glattstrich anzubringen, damit die Ebenheit der Wandoberfläche möglichst wenig beeinträchtigt wird. Die Dimensionierung der Dämmkeile erfolgt entsprechend der Simulationsergebnisse.

Zur Haftvermittlung wird die gesamte Fläche grundiert und nach Trocknung der Grundierung, frühestens nach 3 Stunden, kann der Auftrag des Flächenspachtels erfolgen. Nach Durchkämmen mit der Zahntraufel 8 x 8 mm wird das TecTem Gewebe eingebettet. Es soll im oberen Drittel zu liegen kommen. Nochmaliges dünnes Aufziehen von Flächenspachtel und Fertigstellen der Oberfläche.

Fassade auf Schäden und ausreichende Schlagregendichtheit prüfen!

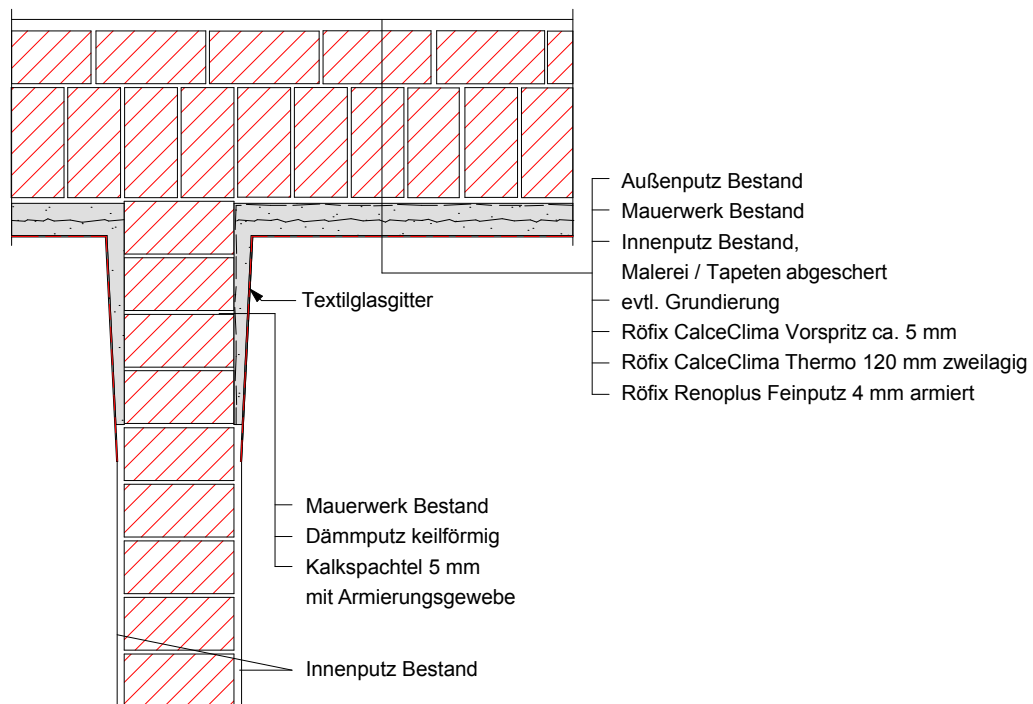
Dämmsystem: **Perliteplatte, einbindende Zwischenwand**

2

OEKO-ID - Möglichkeiten und Grenzen ökologischer, diffusionsoffener Innendämmsysteme



3 Innendämmung mit Dämmputz einbindende Zwischenwand, Horizontalschnitt



Verarbeitungsempfehlung

Bei einbindenden Zwischenwänden durch Simulation überprüfen, ob Dämmkeile notwendig sind. Wenn ja, ist der Putz abzuschlagen, wo eine keilförmige Ausbildung des Dämmputzes erfolgt, um der Wärmebrückenbildung entgegenzuwirken. Die Dimensionierung der Dämmkeile erfolgt entsprechend der Simulationsergebnisse.

Beim Aufbringen der zweiten Putzlage an der Außenwand nach ausreichender Trockenzeit (1 Wo / cm) wird auch der Dämmputzkeil hergestellt. Davor ist die erste Putzlage aufzurauen, um die Dampfdurchlässigkeit eventueller Verglasungsschichten zu erhöhen.

Das Textilglasgitter mit ca. 100 mm Überstand über den Bestandsputz wird in den Feinputz eingebettet. Farbbeschichtung mit diffusionsoffenen mineralischen Farben.

Fassade auf Schäden und ausreichende Schlagregendichtheit prüfen!

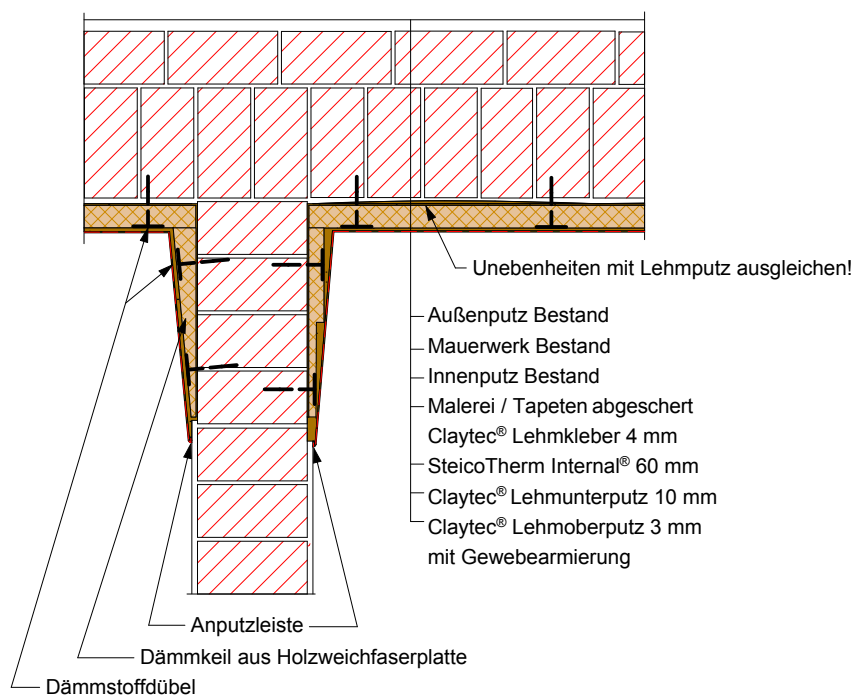
Dämmsystem: **Dämmputz, einbindende Zwischenwand**

3

OEKO-ID - Möglichkeiten und Grenzen ökologischer, diffusionsoffener Innendämmsysteme



4 Innendämmung mit Holzweichfaserplatte einbindende Zwischenwand, Horizontalschnitt



Verarbeitungsempfehlung

Der Lehmkleber benötigt einen rauen Untergrund. Nach dem Abscheren der Malerei oder Tapete ist der Putz auf Tragfähigkeit zu prüfen und ggf. aufzurauen, Gipsputz muß entfernt werden, Hohlstellen sind abzuschlagen und mit Kalkzementmörtel zu verputzen. Größere Unebenheiten als 5 mm sind mit Lehmputz auszugleichen.

Nach dem Abtrocknen der Ausgleichslage wird der Lehmkleber auf die Rückseite der Holzweichfaserplatten aufgetragen, mit der 10 mm Zahntraufel durchgekämmt und die Platten im Verband unter Vermeidung von Kreuzfugen (Versatz mind. 250 mm) mit der Feder nach oben an die Wand appliziert. Wandecken sind verzahnt auszubilden.

Bei einbindenden Zwischenwänden durch Simulation prüfen, ob Dämmkeile erforderlich sind. Wenn ja, in diesem Bereich den Verputz abschlagen und die Dämmkeile mit Lehmkleber ansetzen. Die Dimensionierung erfolgt entsprechend der Simulationsergebnisse. Die Dämmkeile an der einbindenden Wand können entweder mit der Bandsäge aus den HWF-Platten geschnitten oder abgetrept in 20 mm Stufen hergestellt werden. Ein Tag nach Aufbringen der Platten werden sie mit Dämmstoffdübeln mechanisch befestigt.

Danach wird der Lehmgrundputz aufgebracht und nach dessen Trocknung eine dünne Lage Lehmfeinputz, in die das Bewehrungsgitter eingebettet wird. Darüber nochmals eine dünne Lage Feinputz und Fertigstellung der Oberfläche.

An Außenecken sind Gewebewinkel einzubauen, Leibungsputz ist mit Anputzleisten auszuführen.

Farbeschichtung mit diffusionsoffenen mineralischen Farben.

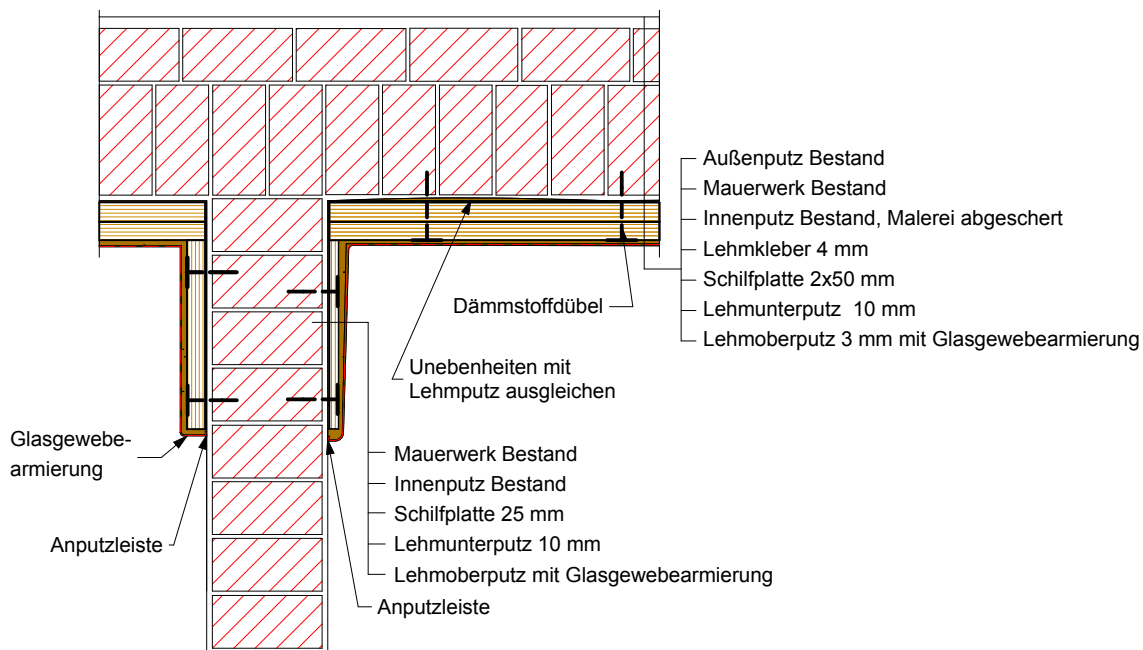
Fassade auf Schäden und ausreichende Schlagregendichtheit prüfen!

Dämmsystem: Holzweichfaser, einbindende Zwischenwand	4
---	----------

OEKO-ID - Möglichkeiten und Grenzen ökologischer, diffusionsoffener Innendämmsysteme



5 Innendämmung mit Schilfplatten einbindende Zwischenwand, Horizontalschnitt



Verarbeitungsempfehlung

Der Lehmkleber benötigt einen rauen Untergrund. Nach dem Abschieren der Malerei oder Tapete, ist der Putz auf Tragfähigkeit zu prüfen und ggf. aufzurauen, Gipsputz muß entfernt werden, Hohlstellen sind abzuschlagen und mit KZM zu verputzen. Größere Unebenheiten als 5 mm sind mit Lehmputz auszugleichen.

Bei einbindenden Zwischenwänden durch Simulation prüfen, ob Dämmkeile erforderlich sind. Wenn ja, in diesem Bereich den Verputz abschlagen und die Dämmplatten entsprechend der Simulationsergebnisse 25 oder 50 mm dick mit Lehmkleber ansetzen.

Nach dem Abtrocknen der Ausgleichsschicht wird auf die Schilfplatten Lehmkleber aufgebracht und die Platten im Verband mit horizontaler Halmrichtung mit Dämmstoffdübeln an die Wand gedübelt. Danach wird die zweite Lage Schilfplatten trocken mit Dämmstoffdübeln auf der ersten Lage unter Vermeidung von durchgehenden Fugen verlegt (Dübel müssen im Mauerwerk verankert sein!). Anschließend kann der Lehmgrubputz mit ca. 10 mm Schichtdicke von Hand oder mit der Maschine aufgebracht werden.

Nach erfolgter Durchtrocknung (ca. 1 mm / Tag) wird der Lehmfeinputz dünn aufgetragen, das Bewehrungsgewebe eingelegt und nochmals dünn mit Lehmfeinputz beschichtet. Nach Ansteifen des Feinputzes kann die Oberfläche fertiggestellt werden.

Farbbeschichtung mit diffusionsoffenen mineralischen Farben.

Fassade auf Schäden und ausreichende Schlagregendichtheit prüfen!

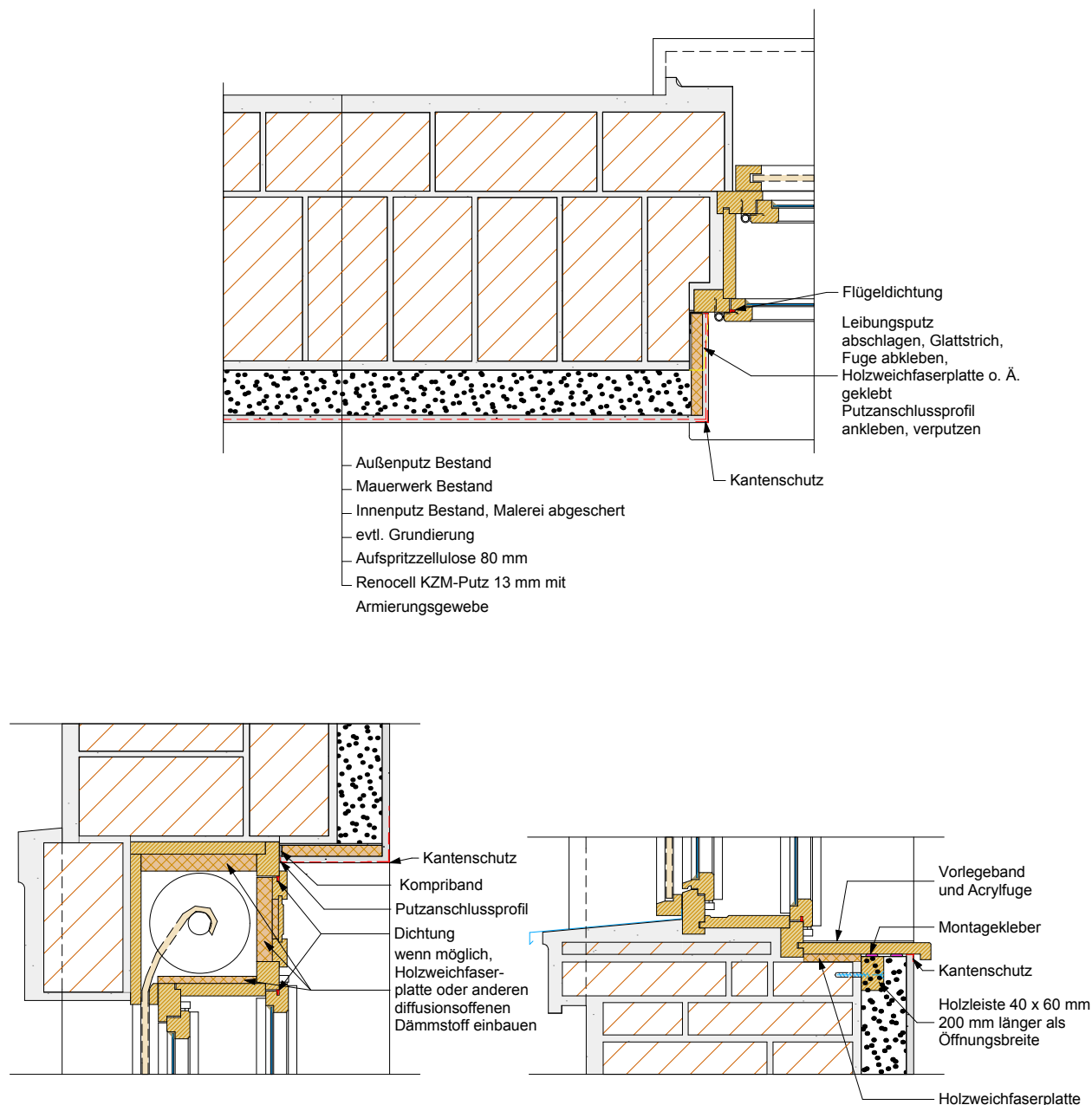
Dämmsystem: **Schilfplatte, einbindende Zwischenwand**

5

OEKO-ID - Möglichkeiten und Grenzen ökologischer, diffusionsoffener Innendämmsysteme



6 Kastenfensteranschluss mit Zellulose Anschluss seitlich, oben und unten



Abbruch Innenfensterbank und Abstemmen des Leibungsputzes erforderlich. Anbringen einer neuen Innenfensterbank mit Holzunterkonstruktion und unterseitigem Feuchtigkeitsschutz (nur bei Massivholzfensterbänken erforderlich).

Fassade auf Schäden und ausreichende Schlagregendichtheit prüfen!

Dämmsystem: **Zellulose, Kastenfensteranschluss**

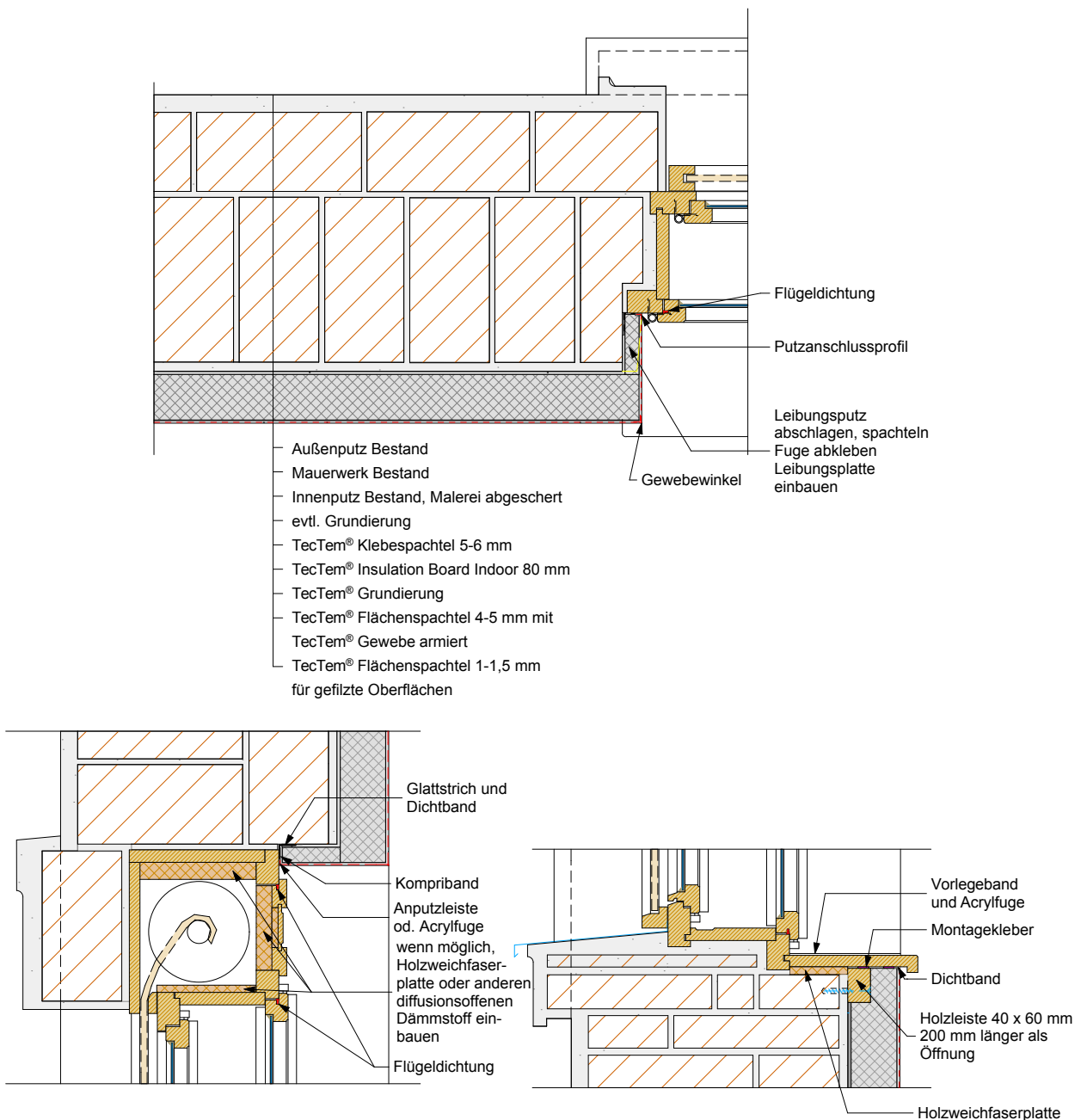
6

OEKO-ID - Möglichkeiten und Grenzen ökologischer, diffusionsoffener Innendämmsysteme



7 Kastenfensteranschluss mit Perliteplatten

Anschluss seitlich, oben und unten



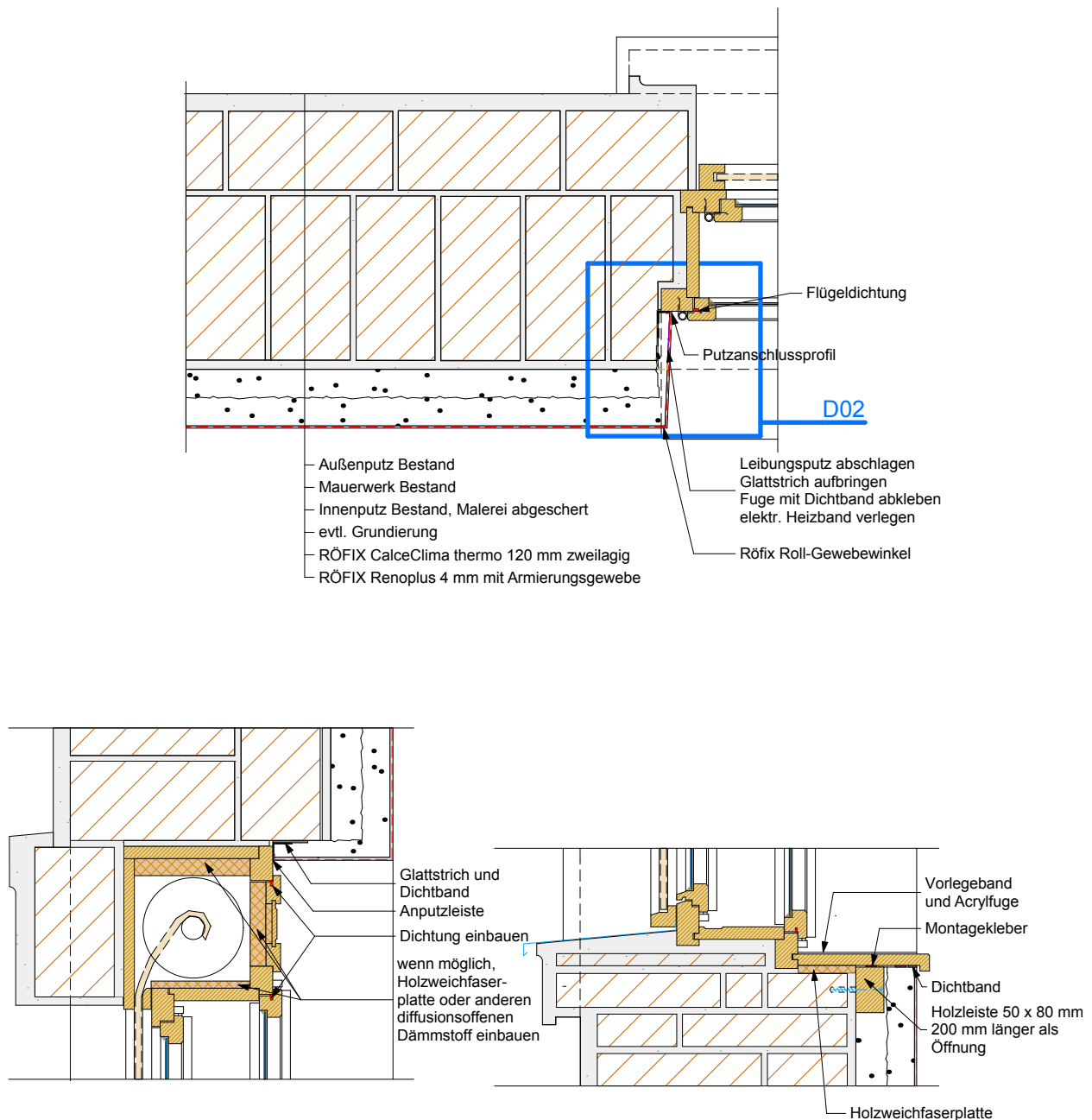
Abbruch Innenfensterbank und Abstemmen des Leibungsputzes erforderlich
Anbringen einer neuen Innenfensterbank mit Holzunterkonstruktion

Fassade auf Schäden und ausreichende Schlagregendichtheit prüfen!

Dämmsystem: Perliteplatte, Kastenfensteranschluss	7
--	----------

OEKO-ID - Möglichkeiten und Grenzen ökologischer, diffusionsoffener Innendämmsysteme

8 Kastenfensteranschluss mit Dämmputz Anschluss seitlich, oben und unten



**Abbruch Innenfensterbank und Abstemmen des Leibungsputzes erforderlich
Anbringen einer neuen Innenfensterbank mit Holzunterkonstruktion und unter-
seitigem Feuchtigkeitsschutz (nur bei Massivholzfensterbänken erforderlich)**

Fassade auf Schäden und ausreichende Schlagregendichtheit prüfen!

Dämmsystem: **Dämmputz, Kastenfensteranschluss**

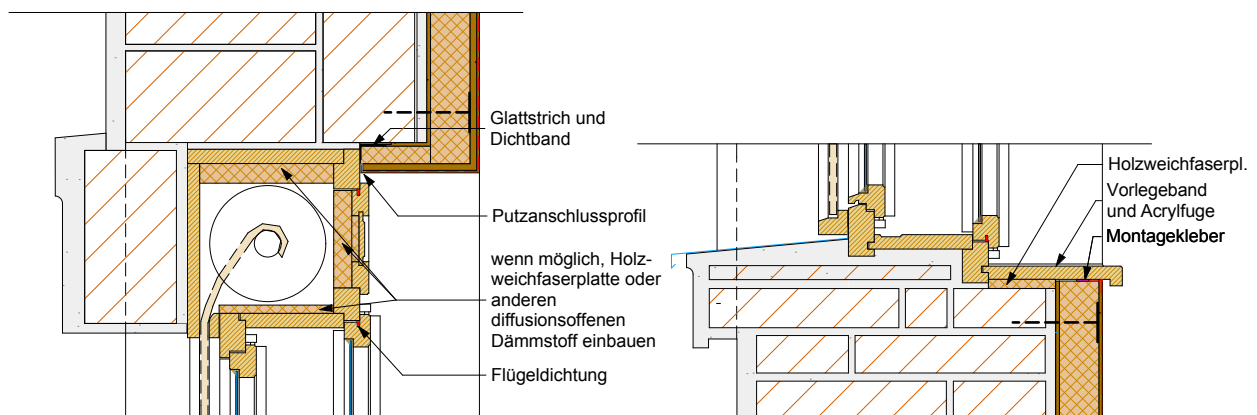
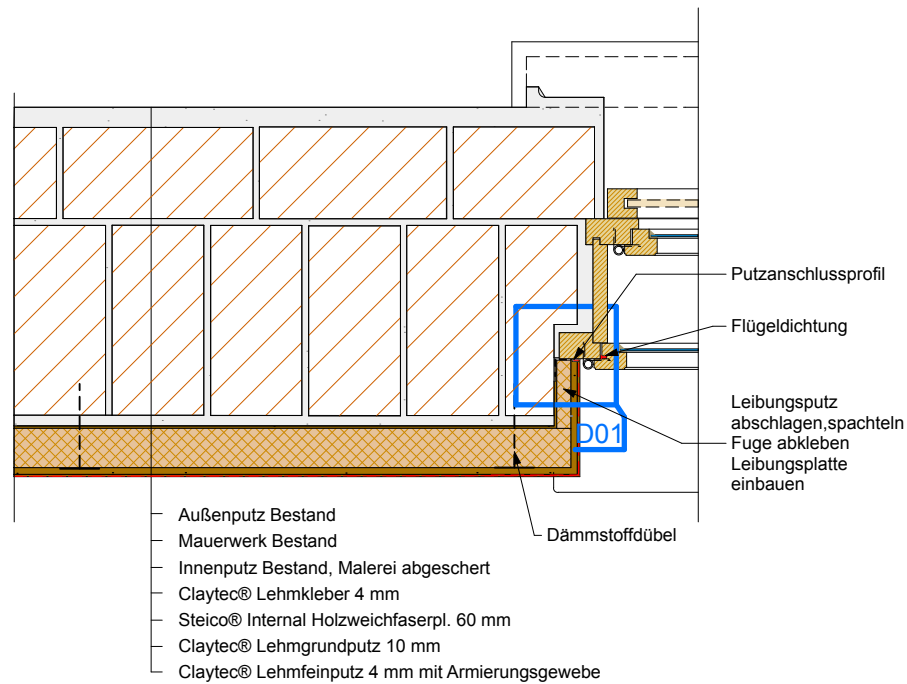
8

OEKO-ID - Möglichkeiten und Grenzen ökologischer, diffusionsoffener Innendämmsysteme



9 Kastenfensteranschluss mit Holzweichfaserplatte

Anschluss seitlich, oben und unten



Abbruch Innenfensterbank und Abstemmen des Leibungsputzes erforderlich
Anbringen einer neuen Innenfensterbank mit Montagekleber

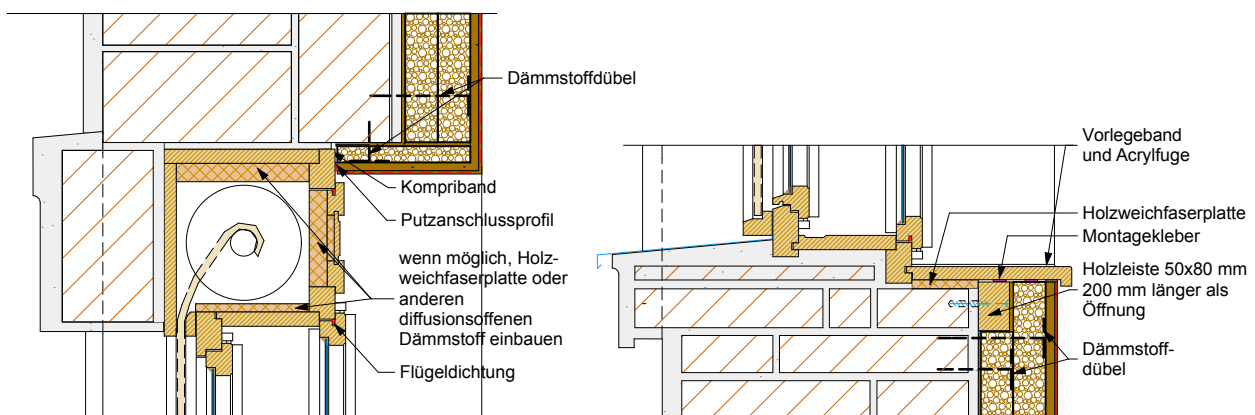
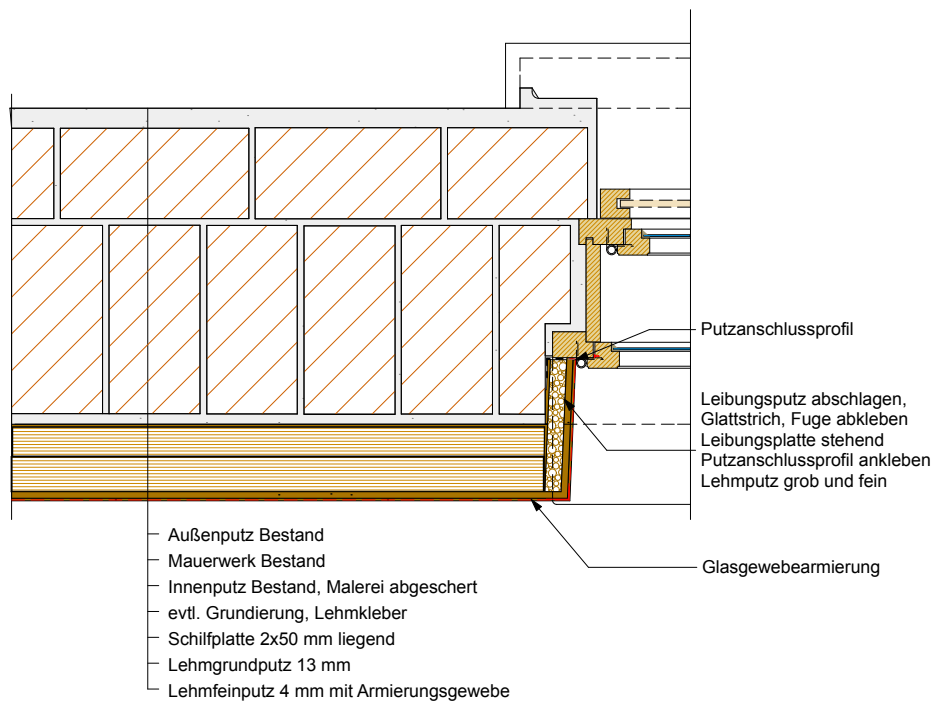
Fassade auf Schäden und ausreichende Schlagregendichtheit prüfen!

Dämmsystem: **Holzweichfaserpl., Kastenfensteranschluss** 9

OEKO-ID - Möglichkeiten und Grenzen ökologischer, diffusionsoffener Innendämmsysteme  

10 Kastenfensteranschluss mit Schilfplatten

Anschluss seitlich, oben und unten



**Abbruch Innenfensterbank und Abstemmen des Leibungsputzes erforderlich
Anbringen einer neuen Innenfensterbank mit Holzunterkonstruktion**

Fassade auf Schäden und ausreichende Schlagregendichtheit prüfen!

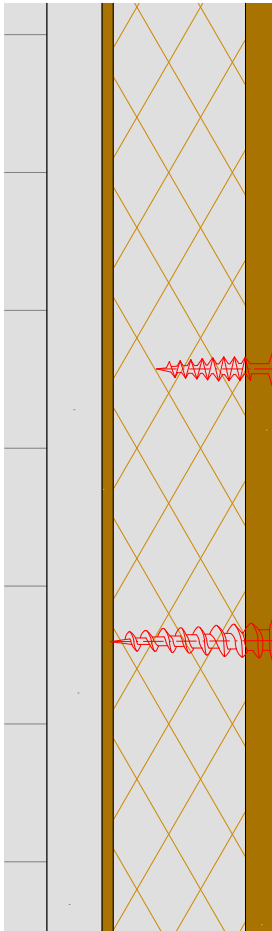
Dämmsystem: **Schilfplatte, Kastenfensteranschluss**

10

OEKO-ID - Möglichkeiten und Grenzen ökologischer, diffusionsoffener Innendämmsysteme



11.1 Befestigung von Lasten



Dübel zur Befestigung von leichten Lampen, Bildern, Bewegungsmeldern, etc.

Längen 50, 85, 120, 155 mm,
für Spanplattenschrauben \varnothing 4.5 bis 5.0 mm
z. B.: Fischer A-Isol

Dübel zur Befestigung von leichten Gegenständen. Längen 55 und 85 mm, für Holz- bzw.

Stockschrauben \varnothing 8 bzw. 10 mm
z. B.: Fischer Isol

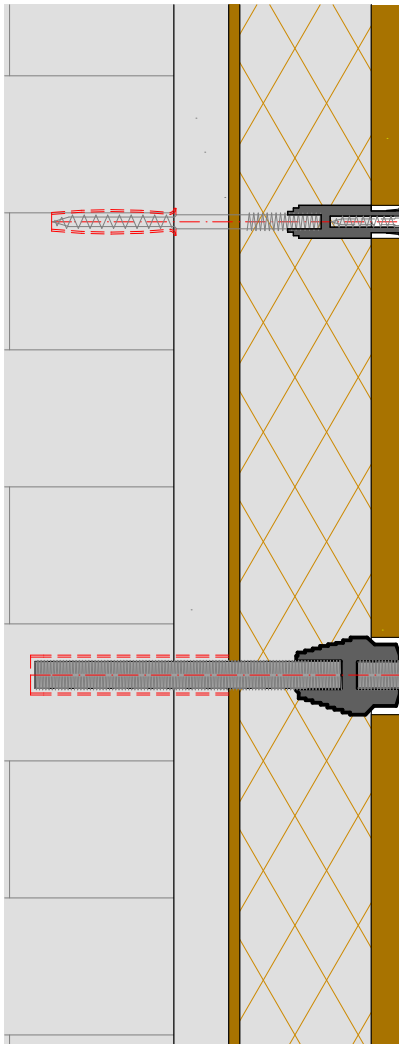
Befestigungsmittel für leichte Gegenstände

11.1

OEKO-ID - Möglichkeiten und Grenzen ökologischer, diffusionsoffener Innendämmsysteme



11.2 Befestigung von Lasten



Mittlere Lasten: Abstandsmontagesystem mit thermischer Trennung

Verankerung im Bestandsmauerwerk. Für den Einsatz von 6 mm Spanplattenschrauben, 6,3 mm Blechschrauben, M6, M8, M10
Der Anti-Kälte-Konus fräst sich beim Eindrehen in den Dämmstoff.
z.B.: Fischer Thermax 8 und 10 mm

Schwere Lasten: Abstandsmontagesystem 12 und 16 mm zum Einkleben

Für Nutzlängen von 60 bis 200 mm und Lasten wie Hängeschränke, etc.
z.B.: Fischer Thermax 12 und 16 mm

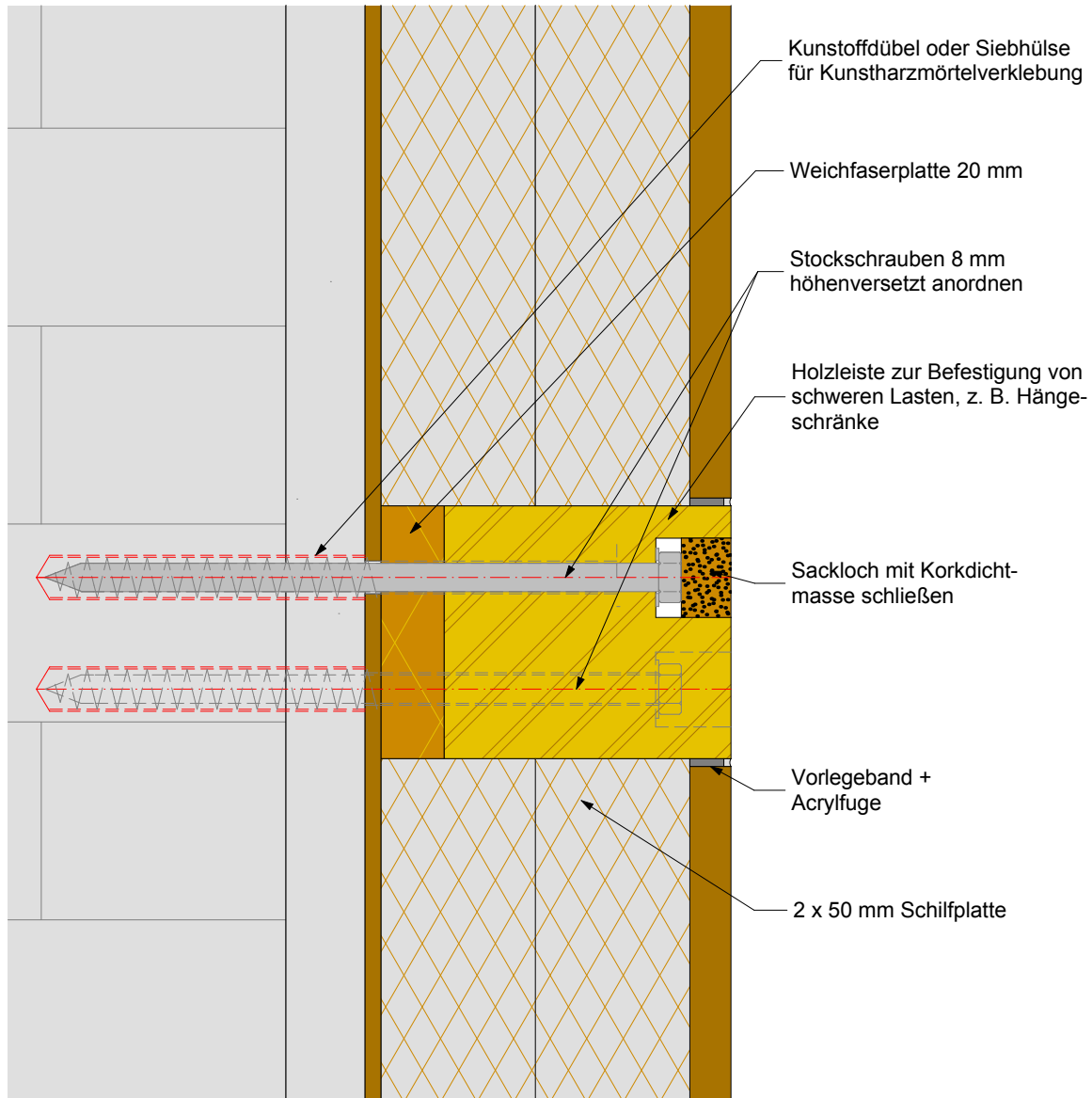
Befestigung mittlere u. schwere Lasten

11.2

OEKO-ID - Möglichkeiten und Grenzen ökologischer, diffusionsoffener Innendämmsysteme



11.3 Befestigung von Lasten



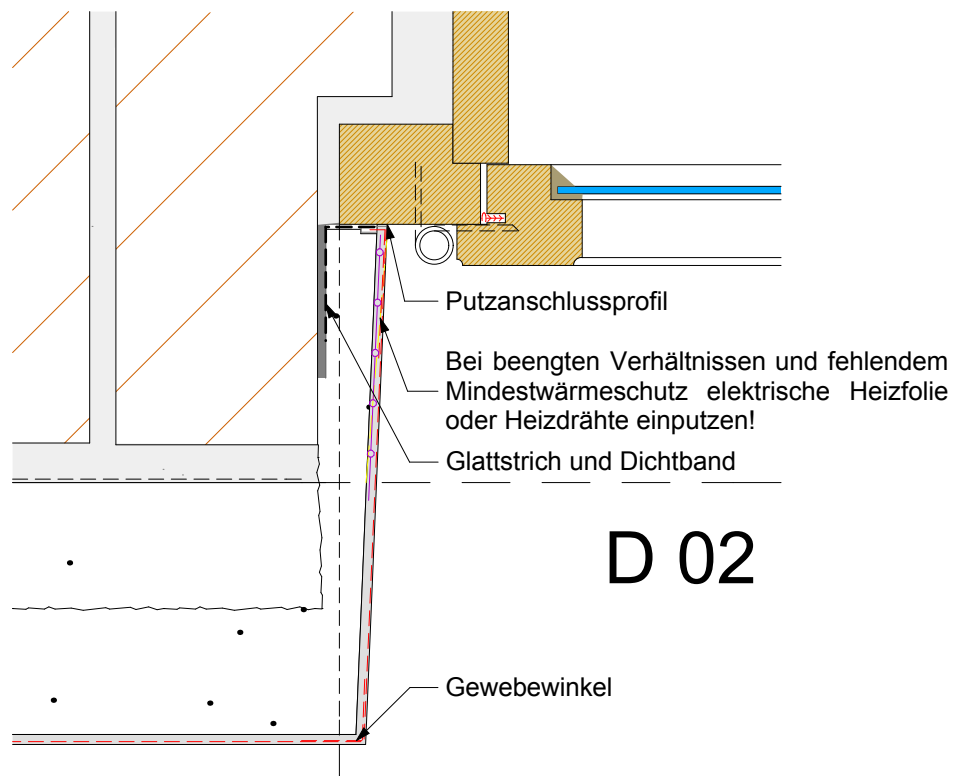
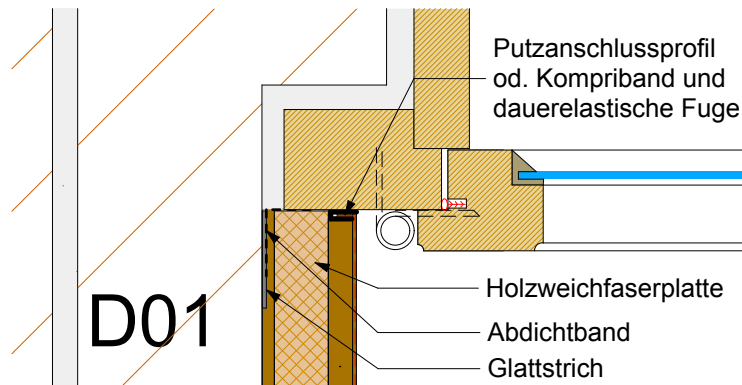
Schwerlastbefestigung bei Schilfdämmung

11.3

OEKO-ID - Möglichkeiten und Grenzen ökologischer, diffusionsoffener Innendämmsysteme



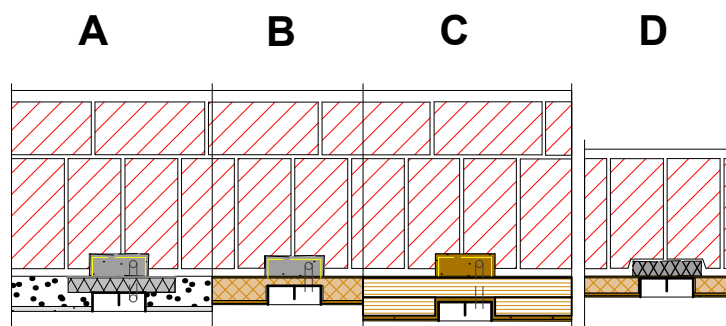
12 Detailanschlüsse Fensterleibung



<p>Detail 01 & 02, Anschluss Fensterleibung</p>	<p>12</p>
<p>OEKO-ID - Möglichkeiten und Grenzen ökologischer, diffusionsoffener Innendämmsysteme</p>	



13 Steckdosenmontage



A:

Bei aufgespritzten Systemen (Zellulose, Dämmputz) alte Steckdosen abmontieren und Leitungen den Anforderungen entsprechend verlängern. Entstandenen Hohlraum mit Dämmputz verputzen.

Steife Dämmplatte in der erforderlichen Dicke (Systemdicke minus Dosentiefe) mittels Klebemörtel befestigen, UP(Unterputz) -Dose montieren, Kabel von unten oder seitlich zuführen, Kabeldurchführung abdichten, Dämmsystem aufspritzen.

B:

Bei Dämmplattensystemen (Perliteplatte, Holzweichfaser) alte Steckdosen abmontieren und Leitungen entsprechend verlängern. Entstandenen Hohlraum mit Dämmputz verputzen oder mit Weichzellschaum ausschäumen.

Dämmplatten entsprechend der UP-Dosentiefe ausschneiden und UP-Dosen einkleben, Kabeldurchführung von hinten, dabei das durchgeführte Kabel abdichten.

C:

Beim System Schilfplatte 2-lagig wie unter Punkt A und B vorgehen, jedoch Hohlraum mit Lehmputz verputzen.

Durchführung des Kabels durch die erste Plattenlage, Befestigung der Platte durch Dübelung. Öffnung für die UP-Dose in die Platte der 2. Lage schneiden, Montage der UP-Dose lagegerecht durch Einkleben mittels Lehmmörtel, Kabeldurchführung von hinten Abdichtung der Kabeldurchführung.

D:

Sonderfall nicht ausreichender Wärmeschutz im Bereich der Dose: Zur Verhinderung von Tauwasserausfall in den Steckdosen, Mauerwerk ausstemmen und Dämmplatte einkleben.

Sollen Steckdosen an anderen Stellen der Wand als den bestehenden verlegt werden, sind die Leitungen bei aufgespritzten Systemen am besten auf dem Bestandsputz zu verlegen, bei Plattensystemen unter dem Bestandsputz.

A5 Monatliche Klima-Durchschnittswerte

Tab. 33 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