

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Abschlussbericht

EnOB - Energetisches Bewertungsverfahren für Bestandsgebäude mit Holzbalkendecken

Projektnummer:

0329663N/P/O

Laufzeit:

01.02.2012 bis 31.09.2016



Technische Universität Dresden
Institut für Bauklimatik (IBK)



Fraunhofer Institut für Bauphysik
Holzkirchen
Institut für Bauphysik (IBP)



Brandenburgische Technische Universität
Fachgebiet Bauphysik und Gebäudetechnik

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Vorwort

Im Zuge einer energetischen Gebäudemodernisierung von historischen Bauwerken sind aufgrund strukturierter Fassaden oder stadtbildprägendem Charakter übliche Außendämmsysteme oft nicht anwendbar. Um den Heizenergieverbrauch solcher Bauten trotzdem zu senken, ist in vielen Fällen nur eine Innendämmung möglich. Viele Bauvorhaben beweisen bereits, dass bei guter bauphysikalischer Planung Innendämmung funktioniert. Dennoch bestehen bei Planenden und Ausführenden Bedenken, dass Holzbalken, die die Innendämmung durchdringen und im Mauerwerk aufliegen, durch holzerstörende Pilze gefährdet werden. Zur Untersuchung des Gefährdungspotentials von Holzbalkenköpfen durch eine Innendämmung wurde das Forschungsvorhaben *Energetisches Bewertungsverfahren für Bestandsgebäude mit Holzbalkendecken* initiiert. Ziel ist es, Planenden und Ausführenden mehr Sicherheit im Umgang mit Holzbalkendecken im innengedämmten Außenmauerwerk zu vermitteln. Im Rahmen des Projektes wurden deshalb schwerpunktmäßig folgende Aspekte untersucht: Analyse von Referenzobjekten mit unterschiedlichen Innendämmsystemen und Einbausituationen der Holzbalkenköpfe in Hinblick auf ihr Schadenspotential. Bestimmung von Wachstumsvoraussetzungen holzerstörender Pilze mithilfe von Laboruntersuchungen und Entwicklung eines Prognosemodells anhand der bestimmten Isoplethenbereiche. Die Erweiterung einer bestehenden hygrothermischen Software in den dreidimensionalen Bereich für die frühzeitige Identifizierung von kritischen Bereichen und Klimabedingungen. Aufbau eines Holzbalkenkopfprüfstandes zur detaillierten Erfassung aller hygrothermischen Vorgänge im Mauerwerk und im Balkenkopf sowie zum Vergleich verschiedener Innendämmsysteme unter definierten Bedingungen. Resultierend aus den Ergebnissen wurden praktikable Maßnahmen zur Vermeidung von Schäden in Holzbalkendecken erarbeitet.

INHALTSVERZEICHNIS

I. Kurzdarstellung	1
I.1 Aufgabenstellung	1
I.2 Voraussetzungen für das Vorhaben	2
I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens	3
I.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand	5
4.1 Holzbalkenköpfe im Außenmauerwerk	5
4.2 Kategorisierung der holzerstörenden Pilze	6
4.3 Pilzprognosewerkzeuge	9
4.4 Hygrothermische Simulationsmodelle	11
I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen	13
II. Eingehende Darstellung.....	15
II.1 Vorhabensziele, Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse	15
1.1 Vorhabensziele	15
1.2 Bestandsanalyse und Objektuntersuchungen.....	15
1.3 Laboruntersuchungen	86
1.4 Erweiterung des hygrothermischen Simulationsmodells.....	152
1.5 Prognosewerkzeuge für holzerstörende Pilze	195
1.6 Wissenstransfer in die Praxis	225
II.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.....	226
II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	227
II.4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse.....	228
4.1 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten	228
4.2 Wissenschaftliche und technische Erfolgsaussichten	228
4.3 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit	229
II.5 Fortschritt Dritter während der Laufzeit	230
II.6 Erfolgte und geplante Veröffentlichung der Ergebnisse	235
Literaturverzeichnis	239
Anhang	247

I. Kurzdarstellung

I.1 Aufgabenstellung

Ziel des Forschungsvorhabens war die Minderung von Unsicherheiten bei der Bewertung von Innendämmmaßnahmen in Gebäuden mit Holzbalkendecken mittels einer systematischen Analyse der klimatischen und baukonstruktiven Verhältnisse an verschiedenartigen Deckenbalkenanschlüssen. Die Untersuchung beinhaltete, neben Messungen an Bestandsgebäuden und Prüfständen, gezielte Laborversuche zur Bestimmung der Materialeigenschaften und der Resistenz von Bauholz gegen holzerstörende Pilze sowie die Entwicklung entsprechender Berechnungswerkzeuge. Zusammenfassend waren im Projektverlauf folgende Arbeiten notwendig:

- Messung und Analyse der Klimabedingungen und Materialeigenschaften an Holzbalkenköpfen bestehender Gebäude und daraus resultierender Maßnahmen zur Schadensvermeidung
- Laboruntersuchungen zur Bestimmung der anisotropen hygrothermischen Materialeigenschaften von Hölzern sowie der Wachstumsvoraussetzungen holzerstörender Pilze
- Entwicklung eines Prognosewerkzeugs für holzerstörende Pilze
- Weiterentwicklung eines hygrothermischen Simulationsmodells für die Vorhersage der klimatischen Verhältnisse am Holzbalkenkopf sowie dessen Erweiterung auf dreidimensionale Probleme

I.2 Voraussetzungen für das Vorhaben

Zu Beginn des Projektes standen bereits Simulationswerkzeuge für die Bearbeitung hygrothermischer Fragestellungen zur Verfügung. Die Entwicklung innerhalb des Projektes baute daher gezielt auf bereits vorhandenen Modellierungsansätzen auf. Sowohl das Institut für Bauklimatik (IBK) als auch das Institut für Bauphysik (IBP) verfügen über langjährige Kompetenzen im Bereich der Modellierung und programmtechnischen Umsetzung gekoppelter hygrothermischer Transportprozesse. Neben der wissenschaftlichen Modellentwicklung wird auch auf eine nutzerfreundliche Eingabeoberfläche geachtet. Beispiele für häufig in Lehre, Forschung und Praxis genutzte Simulationsprogramme sind DELPHIN und WUFI.

Bereits existierende Prüfstände an allen Forschungseinrichtungen wurden in den Projektverlauf integriert. Der Prüfstand am IBP für die systematische Bestimmung der Resistenz von Baumaterialien gegen unerwünschtes Wachstum von Mikroorganismen war Voraussetzung für die Bestimmung der Pilzresistenzen unterschiedlicher Holzarten. Für erste Überprüfungen des erweiterten Rechenmodells (Berücksichtigung der Anisotropie von Holz für den gekoppelten Wärme- und Feuchtetransport) konnte der Differenzklimaprüfstand des IBK genutzt werden.

Die Expertise des IBK auf dem Gebiet der Materialuntersuchung und –charakterisierung bildete die Grundvoraussetzung für die Bestimmung der anisotropen Materialeigenschaften des Baustoffes Holz.

Alle Projektpartner konnten vielseitige Erfahrungen in der Betreuung von Testhäusern und der anschließenden Datenauswertung vorweisen. Der Brandenburgischen Technischen Universität (BTU) standen in ausgewählten Objekten umfangreiche baukonstruktive Varianten an Holzbalkendecken im Bestand und in der Planungsphase zur Verfügung. Damit war die Voraussetzung für Untersuchungen unterschiedlicher klimatischer Randbedingungen bei verschiedenen Fassadenausführungen und Balkenauflagern gegeben.

I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das als Verbundprojekt geplante Forschungsvorhaben wurde als solches erfolgreich durchgeführt. Die Bearbeitung der einzelnen, gemäß dem Antrag festgelegten, Arbeitspakete erfolgte schwerpunktmäßig durch die dafür vorgesehenen Projektpartner. Die BTU Cottbus-Senftenberg wurde mit der Auswertung bestehender Literatur bezüglich der Problemstellung von Holzbalkenköpfen im Mauerwerk und der Analyse bestehender Referenzobjekte sowie von Testhäusern betreut. Durch das Fraunhofer IBP konnte, aufbauend auf eigenen Untersuchungen zum Wachstum holzerstörender Pilze, ein Prognosewerkzeug entwickelt werden. Aus den Arbeiten am IBK resultierten die Weiterentwicklung eines hygrothermischen Simulationsmodells zur Vorhersage der klimatischen Verhältnisse am Holzbalkenkopf und der damit eng verbundene Aufbau eines Prüfstandes zur labortechnischen Untersuchung verschiedener Einbauvarianten von Holzbalkenköpfen im innengedämmten Mauerwerk. Während regelmäßig stattfindender Projekttreffen wurden das weitere Vorgehen abgesprochen, Problemstellungen diskutiert sowie Veröffentlichungen vorbereitet. Über die gesamte Laufzeit erfolgte ein regelmäßiger Austausch der einzelnen Partner. Der als gemeinsame Aufgabe verstandene Wissenstransfer in die Praxis erfolgte im Rahmen zahlreicher wissenschaftlicher und technischer Veröffentlichungen sowie durch Beiträge auf Fachkonferenzen.

Der Beginn des Projektes erfolgte mit einer leichten Verzögerung im Februar 2012. Pünktlich mit Projektstart konnte mit den Arbeiten zur Literaturschau, den Objektuntersuchungen, den Laborexperimenten zu Anisotropie und Pilzwachstum sowie ersten Teilen der Modellimplementierung begonnen werden. Mit Abschluss des ersten Projektjahres konnte auf Grundlage der Literaturstudien ein Konstruktionskatalog angelegt werden, der als Basis für eine Onlinedatenbank – bzw. Befragung unter Planenden und Ausführenden dient. Die Aufzucht erster Prüfpilze verlief vielversprechend und die Adaption der bestehenden Anlage für weitere Versuche konnte durchgeführt werden. Mithilfe einer umfangreichen Literaturrecherche wurde ein erstes Isoplethenbereichmodell generiert. Erste Parameter für die anisotrope Materialcharakterisierung von Holz konnten erfasst und in das dafür vorgesehene Datenmodell überführt werden. Parallel erfolgte die Durchführung von Modelltests.

Im zweiten Projektjahr 2013 werden die begonnen Arbeiten fortgeführt. Die eingerichtete Onlinedatenbank zu Holzbalkenköpfen stößt auf reges Interesse in der Praxis und leistet somit einen wichtigen Beitrag zur Erarbeitung von Thesen zu Schadensmechanismen und erster Lösungsansätze. Trotz der Erfolge im langwierigen Prozess der Pilzaufzucht kommt es nicht, wie erhofft, zur Bildung von Fruchtkörpern. Um Verzögerungen im Projektverlauf zu vermeiden, wird auf einen alternativen Ansatz umgestellt. Parallel wird der ursprüngliche Ansatz weiter verfolgt. Die Charakterisierung der, mittels Literaturstudien und Befragung von Baupraktikern, ausgewählten Hölzer ist abgeschlossen. Die Materialdaten stehen nun für die Modellüberprüfung zu Verfügung. Aus Mangel an Validierungsszenarien für anisotrope hygrothermische Materialmodelle wird ein eigener Benchmark entwickelt. Die ersten Ergebnisse sind vielversprechend. Bei den Prüfstandsplanungen zum Test der Holzbalken

kommt es, aufgrund interner Umstrukturierungsprozesse, seitens der TU Dresden zu Behinderungen.

Im Verlauf des dritten Projektjahres 2014 werden die Objektuntersuchungen fortgeführt. Durch die Auswertung weiterer Literaturquellen wird eine Verfeinerung des Isoplethenbereichmodells erreicht. Die Anzucht der Prüfpilze zeigt Erfolge und es kommt zu Fruchtkörperwachstum. Die zeitgleiche Störung der Messtechnik im Versuchsaufbau zum metabolischen Nachweis des Pilzwachstums führt zu einem länger andauernden Ausfall der Messungen. Die Implementierungen für die Erweiterung des hygrothermischen Berechnungsmodells können abgeschlossen werden. Parallel dazu verlaufen weitere Validierungsexperimente mittels des eigenen Benchmarks. Ergänzende Messungen zu den am zukünftigen Prüfstand verbauten Materialien werden durchgeführt. Dessen Planung und Aufbau kann durch die Zuteilung der Räumlichkeiten im Oktober fortgesetzt werden. Zusätzlich erfolgt eine Forschungsk Kooperation mit der Technischen Universität Dänemark mit dem Ziel des Aufbaus einer größeren Datenbasis zu Materialkennwerten und Validierungsszenarien für die neu implementierten Berechnungsmodelle.

Die beschriebenen Verzögerungen können über den restlichen Verlauf des Projektes nicht mehr aufgeholt werden. Es wird deswegen eine kostenneutrale Laufzeitverlängerung bis September 2016 genehmigt. Das vierte Projektjahr wird zur Fortführung der Arbeiten in allen noch nicht abgeschlossenen Bereichen genutzt. Der Holzbalkenkopfprüfstand kann aufgebaut werden. Aufgrund von Verzögerungen im Trocknungsprozess können die Innendämmsysteme erst im vierten Quartal angebracht werden. Eine messtechnische Begleitung erfolgt bereits ab einem früheren Zeitpunkt. Diese Messungen bilden die Datengrundlage für erste Validierungsläufe. Zudem kommt es in diesem Jahr zu einer weiteren Forschungsk Kooperation auf internationaler Ebene. Zusammen mit insgesamt zehn Projektbeteiligten aus sieben Ländern ist das IBK Teil des EU-weiten Forschungsprojektes *RIBuild*, mit der Zielstellung einen Planungsleitfaden für die Sanierung historischer Gebäude mit Innendämmsystemen zu entwickeln.

Das Mehr an Zeit kann im letzten Projektjahr 2016 für weiterführende Untersuchungen an den Referenzobjekten und Testhäusern genutzt werden. Die Laborexperimente zum Wachstum holzzerstörender Pilze erzielen aussagekräftige Messreihen und das Isoplethenbereichmodell wird weiter verfeinert. Eine erste Anwendung des Modells führt zu vielversprechenden Ergebnissen, bedarf aber weiterer Untersuchungen. Am Holzbalkenkopfprüfstand werden die Testszenarien für die Validierung des Simulationsmodells umgesetzt. Der erste Vergleich der Mess- und Simulationsergebnisse resultiert in einer guten Übereinstimmung. Für eine umfassendere Auswertung der zahlreichen Messergebnisse bedarf es jedoch mehr Zeit.

Im September 2016 konnten die Projektergebnisse einem interessierten Fachpublikum im Rahmen der Abschlussveranstaltung zum Forschungsprojekt in Dresden vorgestellt werden.

I.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand

Holzbalkendecken sind ein wesentlicher Bestandteil des Primärtragwerks von Gebäuden. Schäden, die zu einem Verlust der Tragfähigkeit der Deckenkonstruktion historischer Bauwerke führen können, treten häufig im Bereich des Balkenaufagers in der Außenwand auf. Dem Holzbalkenkopf kommt somit bei der Planung und Ausführung von Sanierungsmaßnahmen an Gebäuden eine besondere Bedeutung zu. Problematisch ist zudem die bedingte Revisionierbarkeit des Auflagerbereiches.

4.1 Holzbalkenköpfe im Außenmauerwerk

Bei Sanierungsmaßnahmen werden oft schadenfreie Holzbalkendecken, Decken mit einzelnen geschädigten Balkenköpfen oder Holzbalkendecken mit gleichmäßigem Schadensbild an allen Balkenköpfen vorgefunden. Hilfestellungen beim Umgang mit Balkenköpfen in Außenwänden gibt das Merkblatt 8-14 [48] der Wissenschaftlich-Technischen-Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege (WTA). Es enthält u.a. Hinweise zur Bestandsuntersuchung und Schadensbeurteilung und gibt Anweisungen zur Instandsetzung der Konstruktion.

Nach DIN 68800 ist eine ausreichende Sicherheit zum Vermeiden des Pilzbefalls an Holzbauteilen gegeben, wenn eine Obergrenze von 20 % Holzfeuchte nicht überschritten wird [3]. Für die Entwicklung benötigen holzzerstörende Pilze jedoch eine Holzfeuchte über der Fasersättigung, die je nach Holzart variiert. Diese Annahme wird jedoch verschiedentlich hinterfragt (z.B. [8], [23]) und sollte daher überprüft werden.

Der Einsatz von Innendämmsystemen zur energetische Sanierung von Gebäuden mit erhaltenswerten Fassaden ist in den vergangenen Jahren vielfach untersucht worden. Das hygrothermische Verhalten einer innengedämmten Außenwand lässt sich mit numerischen Simulationen voraussagen [49]. Die Applikation der Innendämmung führt dazu, dass die Außenwand tiefer temperiert wird und die eindringende Feuchte verzögert abtrocknet. Das Holz des Balkenaufagers ist somit einer höheren Feuchtebelastung ausgesetzt als vor der Sanierungsmaßnahme. Mit zunehmendem Einsatz von Innendämmsystemen verstärkt sich die Suche nach dauerhaft schadensfreien Lösungen für die Balkenkopfproblematik.

Messungen zum hygrothermischen Verhalten an Holzbalkenköpfen in innengedämmten Außenwänden werden in verschiedenen Sanierungsobjekten wissenschaftlich begleitet [51]-[55]. Bei der Forschung steht die Untersuchung der Wirkung klimatischer und baukonstruktiver Einflussfaktoren auf die Entwicklung der Holzfeuchte im Vordergrund: Unterschiedliche Fassadenoberflächen, verschiedene Deckenkonstruktionen und Ausführungen des Balkenaufagers sowie Anschlussvarianten der Innendämmung werden betrachtet. Lösungsansätze mit gezielten Wärmeenergieeinträgen über eine schaltbare Vor- und Rückklaufleitung stehen seit dem Jahr 2000 an einem klinkersichtigen Gebäude in Senftenberg im Land Brandenburg unter Beobachtung [51].

Beim konvektiven Feuchtetransport besteht hinsichtlich quantitativer Aussagen zur Feuchtebelastung aufgrund von Falschluftrömungen ein dringlicher Nachholbedarf. Die Aussagen der Experten bleiben widersprüchlich und zeigen die Komplexität der Sachlage. Beim Nachrüsten einer Innendämmung zeichnet sich jedoch die Forderung nach einem möglichst luftdichten Einbau ab [48], [56]. In dem Beitrag werden unter Beachtung des Kenntnisstandes 2013 Schlussfolgerungen für die praktische Arbeit benannt. Hierbei spielen die Luftdurchlässigkeiten von Bauteilschichten aus Putz und Mauerwerk eine wichtige Rolle sowie die damit einhergehenden Luftwechselzahlen und weniger die tatsächlichen strömungstechnischen Vorgänge und thermodynamischen Zustände. Die Bearbeitung der Thematik wird erschwert durch nur teilweise abgeschlossene Hohlräume schwankender Größe vor den Balkenköpfen mit sorptiv wirksamer Umgebung, unterschiedliche zeitabhängige Gesamtluftdruckdifferenzen, nutzerabhängige Partialdruckdifferenzen des Wasserdampfes und dreidimensionale Vorgänge bei veränderlichen Temperaturgradienten. Eine gute Ausgangslage bietet die Dissertation von Gnoth [57]. Deren Erkenntnisstand mittels experimenteller und theoretischer Untersuchungen fortzuführen ist.

Erfahrungen und Literaturlauswertungen zeigen, dass die Ursachen der Holzerstörung am Balkenkopf oft auf eine erhöhte Schlagregenbelastung oder einen mangelnden Schlagregenschutz zurückzuführen sind [58]. Steinsichtige Fassaden sind besonders schlagregenempfindlich [51]. Putzfassaden ermöglichen je nach Zusammensetzung des Mörtels einen guten Schlagregenschutz. Deren Schlagregensicherheit kann jedoch durch Rissbildungen und Ausführungsmängel beeinträchtigt werden. Umfangreiche, langjährige Untersuchungen in der Freiland-Versuchsstelle des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik IBP in Holzkirchen belegen, dass die Eigenschaften des Putzes an der Fassade maßgeblich von den Bedingungen während des Putzens beeinflusst werden. Die Saugfähigkeit hängt vom Putzgrund und von den Feuchteverhältnissen während der Putzerhärtung ab [59]. Im Rahmen einer Forschungsarbeit an der BTU Cottbus-Senftenberg wird die Wasseraufnahme und das Abtrochnungsverhalten der Putzfassade eines denkmalgeschützten, in der Bauphase befindlichen Sanierungsobjektes untersucht [60].

4.2 Kategorisierung der holzerstörenden Pilze

In der Natur leisten holzabbauende Pilze essentielle ökosystemare Funktionen. Ohne Holzabbau und somit Rückführung der Holzsubstanz in den Kohlenstoffkreislauf gäbe es z.B. keine Wälder. Insgesamt gibt es weltweit eine sehr große Vielzahl an Pilzen, die jeweils unter bestimmten Randbedingungen bestimmte Pflanzenteile mit Lignocellulose umsetzen können. Ein kleiner Teil davon kann jedoch in Gebäuden und Konstruktionen Probleme verursachen, da durch deren Aktivität die statische Funktion und Sicherheit maßgeblich beeinträchtigt werden kann. Holzerstörende Pilze mit Gebäuderelevanz finden sich vorwiegend in der taxonomischen Gruppe der Ständerpilze (Basidiomyceten), ein sehr geringer Anteil der gebäudeimmanenten Holzerstörer wird den Schlauchpilzen zugeordnet. Die wenigsten Organismen können die Holzsubstanz komplett umsetzen, je nach Enzymausstattung werden unterschiedliche Bestandteile der Holzsubstanz besonders effektiv umgesetzt. Der vollständige Abbau von Holz in der Natur erfolgt daher in einer

Aufeinanderfolge unterschiedlicher „Arbeitsgruppen“ (Konsortien). Neben Cellulose enthält die Holzsubstanz in der Regel auch noch Hemicellulosen und Lignin, wobei die Cellulosebestandteile aufgrund ihrer Faserstruktur in besonderer Weise für die Elastizität und die Ligninbestandteile für die Festigkeit verantwortlich sind. Cellulose und Hemicellulosen stellen Polysaccharide dar, die prinzipiell von vielen Mikroorganismen angegriffen werden können. Lignin besteht vorwiegend aus Phenylpropankörpern und gehört zu den am schwersten abbaubaren natürlichen Substanzen. Aufgrund der Abbaumechanismen (umgesetzte Hauptbestandteile) werden unterschiedliche Formen der Holzfäule unterschieden: Braunfäule, Weißfäule und Moderfäule.

Braunfäule

Bei der Braunfäule wird in erster Linie die Cellulose/Hemicellulose abgebaut und das Lignin bleibt (teilweise) erhalten. Das Holz nimmt eine dunkelbraune Färbung an und es entsteht eine typische querrissige Struktur (Würfelbruch). Auffallend sind der Verlust an Masse und der statischen Belastbarkeit. Im fortgeschrittenen Stadium lässt sich das Holz zwischen den Fingern zu Pulver zerreiben. Der Großteil der Holzschäden in Gebäuden wird durch Braunfäule verursacht. Wichtige gebäuderelevante Braunfäuleerreger sind z.B. Echter Hausschwamm (*Serpula lacrymans*, früher *Merulius lacrymans*), Wilder Hausschwamm (*Serpula himantoides*, früher *Merulius himantoides*), Kellerschwämme (*Coniophora* spp.) (Abb. 1), Porenschwämme bzw. Weiße Porenschwämme (*Antrodia* spp., *Oligoporus* spp.), Muschelkrempling oder Grubenschwamm (*Tapinella* bzw. *Paxillus panuoides*), Blättlinge (*Gloeophyllum* spp., früher *Lenzites* spp.) und Fältlingshäute (*Leucogyrophana* spp.). Aufgrund seiner Eigenschaften kommt dem Hausschwamm (*Serpula lacrymans*) eine Sonderstellung zu. Er kann offenbar schon bei relativ niedrigen Holzfeuchten wachsen. Eine möglichst genaue Bestimmung seiner Grenzbedingungen ist daher ein wichtiger Bestandteil des gegenständlichen Projektes. Der Hausschwamm kann nahezu trockenes Holz angreifen, wenn in einem „naheliegenden“ Bereich höhere Feuchte verfügbar ist und er kann sich durch Stränge über weite Strecken ausbreiten und dabei auch holzfreie Stoffe viele Meter überwachsen (z.B. auch Mauerwerk). Neben Holz kann dieser Pilz auch andere cellulosehaltige Substanzen wie z.B. Tapeten, Bücher, oder sogar Kartoffeln angreifen. Gutes Wachstum des Hausschwammes wird durch die Nähe von alkalischen Baustoffen wie Mörtel, Putz u.a. gefördert. Durch die alkalischen Bestandteile dieser Baustoffe wird die von ihm produzierte Oxalsäure neutralisiert und es wird angenommen, dass dieser Vorgang auch ein Grund dafür ist, dass der Echte Hausschwamm fast ausschließlich in Gebäuden vorkommt. Der Pilz ist auf eine sauerstoffreiche Umgebung angewiesen, reagiert aber sehr empfindlich auf Luftzug. Er entwickelt sich daher z.B. gerne hinter Wandverkleidungen, in Zwischendecken und unter Dielungen, wo er oft sehr lange unentdeckt bleibt.



Abb. 1 Holzbalken mit Braunfäuleerreger *Coniophora* sp.

Weißfäule

Bei der Weißfäule wird vorwiegend das Lignin der Holzsubstanz abgebaut und Cellulose reichert sich an. Es handelt sich dabei um den einzigen bekannten natürlichen Prozess, bei dem Organismen Lignin umsetzen können und er ist nur unter den Ständerpilzen der Klasse Agaricomycetes („Blätterpilze“) zu finden. Symptome sind vor allem die Weißfärbung, Zerkleinerung und ein anfänglich schleichender Verlust an Stabilität. Im Gebäude treten Weißfäuleerreger nur selten auf. Sie sind typischerweise unter natürlichen Bedingungen im Wald anzutreffen. Typische Weißfäulepilze mit Gebäuderelevanz sind z.B. Ausgebreiteter Hausporling bzw. Eichenporling (*Donkioporia expansa*), Großporiger bzw. Zimtbrauner Feuerschwamm (*Phellinus contiguus*) und Sternsetenpilze (*Asterostroma* spp.).

Moderfäule

Bei der Moderfäule wird vorwiegend der Celluloseanteil der Holzsubstanz abgebaut und das Lignin bleibt wie bei der Braunfäule weitgehend erhalten, auch das Erscheinungsbild ist ähnlich und es bildet sich schließlich ein Würfelbruch aus. Moderfäule kann nur bei andauernd hoher Feuchtigkeit stattfinden und stellt einen vergleichsweise langsamen Prozess dar. Die Oberfläche ist entsprechend der hohen Feuchtigkeit meistens eher modrig und weich bis schmierig, daher auch die englische Bezeichnung „soft-rot“. Bei diesem Prozess sind im Gegensatz zu den vorher genannten Holzfäulearten vorwiegend Pilze involviert, die heute zu den Schlauchpilzen (Ascomyceten) gezählt werden, landläufig aber gewöhnlich oft Schimmelpilze oder Bläuepilze genannt werden. Typische Vertreter von so genannten Schimmelpilzen und Bläuepilzen, die aufgrund ihrer Enzymausstattung bei hoher Feuchtigkeit einen langsamen Holzabbau in Form einer Moderfäule bewerkstelligen können sind z.B. Arten in den Gattungen *Chaetomium*, *Trichoderma*, *Phialophora* und *Paecilomyces*.

Nach Literaturangaben gibt es mehr als 300 unterschiedliche gebäuderelevante holzerstörende Pilzspezies, von denen sogenannte „Leitpilze“ deutlich häufiger vorkommen [6], [7]. Entsprechend [8] werden

- *Serpula lacrymans* (Echter Hausschwamm, Braunfäule bzw. Trockenfäule),
- *Coniophora puteana* (Kellerschwamm, Braunfäule),
- *Donkioporia expansa* (Hausporling, Weißfäule) und
- *Antrodia spp.* (Weißer Porenschwamm, Braunfäule)

als die vier häufigsten Pilzformen in Zusammenhang mit dokumentierten Schadensfällen in der Bundesrepublik Deutschland genannt. *Serpula lacrymans* mit 40 % ist dabei in Mittel- und Nordeuropa der am häufigsten vorgefundene Holzerstörer [7]. In Norwegen sind entsprechend

- *Antrodia spp.*,
- *Coniophora puteana*,
- *Serpula lacrymans* und
- *Gloeophyllum sepiarium* (Braunfäule)

die vier häufigsten Taxa bei Schadensfällen [9]. Alle diese Pilze zeichnen sich durch eine besonders große Zerstörungskraft aus. In Gebäuden wird derzeit offenbar eine Verschiebung des Artenspektrums zu Pilzen mit höheren Feuchtigkeitsansprüchen beobachtet [7], was mit dem verstärkten Wärmeschutz in Altbauten in Verbindung gebracht wird. Dadurch wird zusätzlich deutlich, dass für diesen Bereich dringend ein leistungsfähiges Prognosewerkzeug erforderlich ist. Zu den unterschiedlichen ökophysiologischen Randbedingungen, die ein Wachstum von holzerstörenden Pilzen ermöglichen, gibt es eine große Anzahl oft widersprüchlicher Literatur. Gerade auch aus diesem Grund soll durch begleitende Messungen im Rahmen des Vorhabens nach Möglichkeit eine Klärung der Verhältnisse herbeigeführt werden.

4.3 Pilzprognosewerkzeuge

Für die rechnerische Prognose der Wachstumswahrscheinlichkeit von Schimmelpilzen in Abhängigkeit der realen instationären Randbedingungen an der Oberfläche oder im Bauteil haben sich im Wesentlichen zwei Berechnungsmodelle länderübergreifend durchgesetzt. Im skandinavischen Raum und in den USA wird vor allem das Modell von Viitanen eingesetzt, während in anderen europäischen und außereuropäischen Ländern vor allem das biohygrothermische Modell von Sedlbauer Anwendung findet. Die Grundlage der Entwicklung der Schimmelpilz-Vorhersagemodelle bildeten die wissenschaftlichen Untersuchungen zahlreicher Forscher während der letzten Jahrzehnte (z.B. [10]-[14]). Unter Verwendung dieser Untersuchungsergebnisse und eigener Laboruntersuchungen sind diese Verfahren entwickelt worden [15]-[17]. Beim von Sedlbauer in [15] beschriebenen biohygrothermischen Modell WUFI®-Bio beschreiben sogenannte Isoplethensysteme die Abhängigkeit der Sporenkeimung bzw. des Myzelwachstums von der Oberflächentemperatur und –feuchte. Um den Einfluss des Substrats, also des Untergrundes oder ggf. eventueller

Verunreinigungen, auf die Schimmelpilzbildung berücksichtigen zu können, wurden Isoplethensysteme für drei unterschiedliche Substratgruppen vorgeschlagen:

0 = optimaler Nährboden,

I = biologisch gut verwertbar,

II = biologisch kaum verwertbare Substrate.

Um die wesentliche Einflussgröße auf die Auskeimung, nämlich die bei bestimmten Temperaturen verfügbare Feuchte, bauphysikalisch korrekt zu beschreiben, wurde das biohygrothermisches Modell entwickelt, bei dem eine Modellspore zugrunde gelegt wird. Dabei wird der Feuchtehaushalt einer Spore in Abhängigkeit von instationären Randbedingungen rechnerisch ermittelt und es kann somit auch ein zwischenzeitliches Austrocknen der Pilzsporen berücksichtigt werden.

Die Grundlagen des Mould-Growth-Models wurden von Viitanen und Ritschkoff in [18] unter Laborbedingungen entwickelt. Auf Basis dieser Ergebnisse wurden Regressions-Modelle als Grundlage für ein mathematisches Modell entwickelt. Sowohl vorgegebene, stationäre Randbedingungen als auch periodische Feuchtigkeitsbelastungen und die Auswirkungen von Holzarten und Oberflächenqualitäten sind in diesem Modell als Randbedingung auswählbar. Die Studien dazu wurden ausschließlich im Labor durchgeführt. Dieses Modell wird ebenfalls kontinuierlich weiterentwickelt (z.B. [17], [19]), unter anderem wurden die Verzögerung des Schimmelwachstums durch schwankende Feuchtebedingungen und weitere Materialien implementiert. Die Ergebnisausgabe erfolgt in Form des Mould-Indexes, der auf einer prozentualen Flächenbelegung, ergänzt um eine verbale Beschreibung, beruht:

0 = kein Wachstum

1 = ein wenig Wachstum (mikroskopisch)

2 = mäßiges Wachstum (mikroskopisch) Bedeckung > 10 %

3 = wenig sichtbares Wachstum

4 = sichtbares Wachstum

5 = Bedeckung > 50 %

6 = dichte Bedeckung 100 %

Die Unterschiede zwischen beiden Modellen sind in den jeweilig gewählten Ansätzen begründet. Das VTT-Modell ist ein rein empirisches Modell, ausschließlich basierend auf Laboruntersuchungen. Dem biohygrothermische Verfahren liegt dagegen ein physikalisch begründetes Modell zugrunde. Bei diesem Modell stehen verschiedene Substratgruppen zur Auswahl, die auch um spezielle gemessene Materialsubstratgruppen erweitert werden können. Beim Viitanen-Modell kann nur zwischen zwei Holzarten oder mineralischem Substrat unterschieden werden. Im Gegensatz zum biohygrothermischen Modell kann beim Viitanen-Modell unter ungünstigen Bedingungen das berechnete Wachstum abnehmen. Beim biohygrothermischen Modell ergibt sich zu diesen Zeiten ein Wachstumsstillstand. Im Viitanen-Modell steigt je nach Klimarandbedingung das prognostizierte

Schimmelpilzwachstum nicht über einen Grenzwert, während bei WUFI-BIO®, das Wachstum zunimmt so lange es die Randbedingungen zulassen.

Das Ergebnis des in [15] beschriebenen biohygrothermischen Modells ist ein allerdings wenig anschauliches Schimmelpilzwachstum in Millimetern. Da der Mould-Index wesentlich anschaulicher ist, erfolgte in einer späteren Arbeit [20] eine Übertragung des Wachstums in Millimeter, in den *Viitanen*-schen Mould-Index. Diese Übertragung erfolgt auf Basis vergleichender rechnerischer Untersuchungen der an Innenoberflächen auftretenden Randbedingungen, die mit dem am IBP entwickelten hygrothermischen Simulationsverfahren WUFI® durchgeführt wurden. Die damit berechneten Oberflächenbedingungen dienen als Eingangsgröße für das biohygrothermische Modell und das VTT-Modell, das von Viitanen für diese Untersuchungen zur Verfügung gestellt wurde.

Bei den an Innenoberflächen auftretenden Schimmelpilzen stehen vor allem gesundheitliche und bei Bewuchs auf Außenfassaden ästhetische Aspekte im Vordergrund. Holzerstörende Pilze greifen dagegen die Substanz des Baustoffs (Abbau von Lignocellulose) an und können langfristig zum Versagen der Konstruktion führen. Sowohl im Neubaubereich als auch im Bestand entsteht durch derartige Zerstörungsprozesse ein enormer wirtschaftlicher Schaden [21]. Wie bei den Schimmelpilzen liegen für holzerstörende Pilze ebenfalls zahlreiche Untersuchungen und Experimente zum Wachstum solcher Pilze und der Holzabbaugeschwindigkeiten bei unterschiedlichen Randbedingungen vor (Literaturstudie [6]). Allerdings sind oftmals die hygrothermischen Verhältnisse an den untersuchten Proben zu wenig genau dokumentiert, sodass daraus leider kein Modell abgeleitet werden kann. Viitanen et al haben ein empirisches Modell für holzerstörende Pilze [22] entwickelt, das auf Laborversuchen basiert und nicht mit Praxisversuchen validiert ist. Zudem gilt es nur für technisch getrocknetes Holz, sodass es für historische Holzbalkendecken, die natürlich getrocknet wurden, nicht oder nur sehr eingeschränkt anwendbar ist.

4.4 Hygrothermische Simulationsmodelle

Simulationsmodelle speziell für wärme- und feuchtetechnisch gekoppelte Bauteilsimulationen werden seit über 20 Jahren entwickelt und haben sich im praktischen Einsatz bewährt ([43], [44]). Die DIN EN 15026 [45] sowie das WTA-Merkblatt 6-2 [4] beschreiben die Eigenschaften und Anforderungen an derartige Simulationssoftware. Unter Einbezug von dynamischen Klimakomponenten, wie Temperatur, Luftfeuchte, Strahlung, Regen und auch Luftdruck lassen sich eindimensionale Wandaufbauten und konstruktive Details realitätsnah abbilden.

Bisher beschränkten sich die spezialisierten Programme auf den ein- und zweidimensionalen Bereich, der für die meisten Fälle in der Praxis genügt. Um kritische Zustände an Balkenkopfauflagern identifizieren zu können reichen zweidimensionale Modelle jedoch nicht aus. Ein beispielhafter Vergleich von Messung und Rechnung legt nahe, dass reale Einbausituationen mit den Effekten der Luftströmung durch Risse im Holzbalken, Fugen und Anschlüssen sowie der freien Konvektion in Hohlräumen nicht oder nur unzureichend wiedergegeben werden können [46]. Ebenso kann durch die derzeitige Software Anisotropie

nur bezüglich des Wärmetransports erfasst werden. Innerhalb des Projektes wird deshalb auch die dreidimensionale Erweiterung des hygrothermischen Simulationsmodelles [47] unter Einbeziehung anisotroper Eigenschaften verwirklicht.

I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Seitens der BTU Cottbus-Senftenberg wurde das Ingenieurbüro für Tragwerksplanung und Bauphysik Bark über einen Unterauftrag in die Projektbearbeitung mit einbezogen. Unterstützende Tätigkeiten bestanden unter anderem in einer umfassenden Bestandsanalyse von Balkenköpfen unterschiedlichster Einbausituationen und der Erarbeitung von Sanierungsvarianten.

Die geplante Kooperation des IBK mit dem Architekturbüro Hainz im Rahmen des Sanierungsobjektes „Prälatenhaus Meißen“ konnte nicht realisiert werden. Im Zuge der baudiagnostischen Untersuchungen am Objekt wurden schützenswerte Wandmalereien aufgenommen, die die Umsetzung einer Innendämmlösung und den Einbau eines umfassenden Monitoringsystems verhinderten.

Auf internationaler Ebene konnte eine Zusammenarbeit zwischen dem IBK und der Dänischen Technischen Universität etabliert werden. Die in Dänemark errichteten Testaufbauten dienen ebenfalls der Erforschung des Einflusses von Innendämmsystemen auf das hygrothermische Gleichgewicht des Mauerwerks. Die verwendeten Materialien wurden im Labor des IBK charakterisiert und für eine Validierung des Rechenmodells aufbereitet. Die erweiterte Datengrundlage ermöglicht eine umfassendere Überprüfung der neu implementierten Modellierungsansätze. Zudem erfolgten weitere Kooperationen mit anderen Forschungseinrichtungen im Rahmen des EU-Projektes *RIBuild*.

II. Eingehende Darstellung

II.1 Vorhabensziele, Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

Im Folgenden werden die im Rahmen des Forschungsprojektes erzielten Fortschritte und Ergebnisse detailliert dargestellt. Der Verbundcharakter des Projektes spiegelt sich auch in der Darstellung wieder. Eine Unterteilung nach Projektpartnern erfolgt nicht.

1.1 Vorhabensziele

Ziel des Forschungsvorhabens war die Minderung von Unsicherheiten bei der Bewertung von Innendämmmaßnahmen in Gebäuden mit Holzbalkendecken mittels einer systematischen Analyse der klimatischen und baukonstruktiven Verhältnisse an verschiedenartigen Deckenbalkenanschlüssen. Die Untersuchung beinhaltete, neben Messungen an Bestandsgebäuden und Prüfständen, gezielte Laborversuche zur Bestimmung der Materialeigenschaften und der Resistenz von Bauholz gegen holzerstörende Pilze sowie die Entwicklung entsprechender Berechnungswerkzeuge. Zusammenfassend waren im Projektverlauf folgende Arbeiten notwendig:

- Messung und Analyse der Klimabedingungen und Materialeigenschaften an Holzbalkenköpfen bestehender Gebäude und daraus resultierender Maßnahmen zur Schadensvermeidung
- Laboruntersuchungen zur Bestimmung der anisotropen hygrothermischen Materialeigenschaften von Hölzern sowie der Wachstumsvoraussetzungen holzerstörender Pilze
- Entwicklung eines Prognosewerkzeugs für holzerstörende Pilze
- Weiterentwicklung eines hygrothermischen Simulationsmodells für die Vorhersage der klimatischen Verhältnisse am Holzbalkenkopf sowie dessen Erweiterung auf dreidimensionale Probleme

1.2 Bestandsanalyse und Objektuntersuchungen

Anhand der Bestandsanalyse und der Literaturlauswertung wird ein Überblick über die im historischen Gebäudebestand erhaltenen Holzbalkendecken und deren konstruktive Eigenschaften gegeben. Die detaillierten Untersuchungen der Bestandskonstruktion und deren Schäden ermöglichen Rückschlüsse über Schadenursachen. Mit den messtechnisch gestützten Objektuntersuchungen kann der schadenfreie Einsatz von Innendämmsystemen an Gebäuden mit Holzbalkendecken dokumentiert werden. Fassaden mit unterschiedlicher

Schlagregensicherheit, an verschiedenen Standorten und individuellen städtebaulichen Situationen ermöglichen die Bewertung des hygrothermischen Verhaltens unter verschiedenen Einflussfaktoren.

1.2.1 Konstruktionsdetails und Bauschäden

In der Fachliteratur des 19. Jahrhunderts für das Zimmererhandwerk finden sich Empfehlungen zur Ausführung und Bemessung von Holzbalkendecken. U.a. beschreibt Friedrich Wegener in einem 1894 erschienen Lehrbuch die Herstellung von Balkenlagen [75]. Die Bezeichnung der Balken in Abhängigkeit ihrer Lage und Funktion wird dabei definiert und Hinweise zur Balkenabmessung und zum Abstand der einzelnen Deckenbalken gegeben. Hinsichtlich der Raumbildung zwischen der Balkenlage unterscheidet er Decken mit Einschubbrettern und Decken mit ganzem und halbem Windelboden. Der Windelboden besteht aus Strohlehm umwickelten Staken. Über dem Einschub Brett wird ein Stroh-Lehm-Gemisch aufgetragen und der bis zur Oberkante des Balkens verbleibende Raum mit trockenem Sand oder Lehm aufgefüllt. Die Holzbalken liegen im Mauerwerk auf Mauerlatten aus Holz mit Abmessungen von höchstens 13/13 cm auf. Nach [75] werden sie jedoch „... in neuerer Zeit fast überall fortgelassen.“

Die konstruktiven Eigenschaften von Holzbalkendecken behandeln R. Ahnert und K.-H. Krause in *„Typische Baukonstruktionen von 1860 bis 1960 zur Beurteilung der vorhandenen Bausubstanz“*. Band 2 enthält eine umfangreiche Auswertung der Bauordnungen, Normen und Baubestimmungen des 19. und 20. Jahrhunderts und der Baufachliteratur dieser Zeit. Frühe Bauordnungen geben u.a. Hinweise zur statischen Bemessung der Balkenlage, zur Ausführung des Balkenzwischenraumes und dessen Auffüllung. Die 1920 veröffentlichte Normung DIN 104 *Holzbalkendecken für Kleinhäuser* gehört zu den ersten Normen der Bautechnik, die in Deutschland herausgegeben wurden [76]. Die Bedeutung der Holzbalkendecke im Bauwesen der damaligen Zeit wird dadurch bestätigt. Innerhalb des in [76] betrachteten Zeitraumes ist das häufigste Auflager für die Balken der Geschosslagen das Auflager auf Mauerwerk. In den dort ausgewerteten Literaturquellen wird die Ausführung des Balkenaufagers – in Hinblick auf den Schutz vor Baufeuchte aus dem Mauerwerk - vielfach behandelt. Danach ist die Ausmauerung des Balkenaufagerbereiches mit einem ca. 2–4 cm Abstand zum Holz auszuführen. Gilly empfiehlt 1801 eine Ausmauerung des den Balkenkopf umgebenden Mauerwerks mit Lehm anstelle von Kalkmörtel [77]. Im Handbuch *„Der Praktische Zimmermann“* von 1870 gibt J. Promnitz ebenfalls diese Empfehlung [78]. Die Forderung nach einem stirnseitigen Luftspalt finden sich in den baupolizeilichen Vorschriften der Berliner Baupolizei von 1931 [76].

Die Entwicklung der konstruktiven Eigenschaften von Holzbalkendecken vollzieht sich im Laufe der Zeit u.a. aufgrund erhöhter Anforderungen an den Schallschutz und den Brandschutz. So werden für den in [76] betrachteten Zeitraum 10 Varianten des Deckenaufbaus unterschieden. Neben den vorgestellten historischen Deckenkonstruktionen als Einschubdecken und Windelbodendecken werden übliche Deckenkonstruktionen des 20. Jahrhunderts vorgestellt.

Grundlage für die Planung von Sanierungsmaßnahmen bildet eine möglichst genaue Kenntnis der Baukonstruktion des Gebäudes. Konstruktive Eigenschaften und Materialeigenschaften des Bestandes sind zu dokumentieren. Abb. 2 zeigt links den zur Begutachtung und zur Installation der Messtechnik freigelegten Auflagerbereich der Holzbalkendecke im Testhaus Schule Drebkau. Die Holzbalkendecke stammt aus dem Jahr 1793 und ist schadenfrei im Original erhalten geblieben. Die Abbildung rechts zeigt, die Wiederherstellung des angrenzenden Mauerwerks nach historischem Vorbild und entsprechend der Bestandskonstruktion. Zwischen dem Mauerwerk und dem Holz liegt ein ca. 2 cm breiter Spalt, der einen direkten Kontakt zwischen dem feuchten Mauerwerk und dem Holz unterbindet. Bei Schließen der Deckenebene wird dieser Spalt mit feinem Sand aus der Deckenfüllung oder mit wärmedämmenden Schüttungen verfüllt. An der Stirnseite des Balkenkopfes bleibt ein Luftspalt erhalten.



Abb. 2 Balkenaufleger auf einer Mauerlatte in einer Außenwand aus Vollziegelmauerwerk.

Schadenfreie Balkenköpfe und extrem geschädigte Balkenlagen können gleichermaßen vorkommen. Die Gefahr von Fäulnis und Hausschwamm bei ungenügender Austrocknung war frühzeitig bekannt [76]. Mögliche Quellen der Feuchtigkeit sind u.a. die Einbaufeuchte der Holzbalken, die Baufeuchte aus Steinfeuchte und Anmachwasser sowie während der Bauzeit eindringendes Regenwasser. Ebenso werden die im Mauerwerk aufsteigende, von der Wetterseite in das Mauerwerk eindringende und im Mauerwerk kondensierende Feuchte benannt. Vor einer Deckenfüllung aus Bauschutt anstelle von Sand oder Lehm wird in [75] abgeraten, da mit Hausschwamm belastetes Material enthalten sein könnte. Heute werden die Baufeuchte in der Neubauphase, ein mangelnder Schlagregenschutz, eine undichte Regenentwässerung bzw. Dachhaut sowie aus Feuchträumen eindringendes Wasser als Hauptursachen für Schäden an Holzbalken angesehen [58].

1.2.2 Datenerhebung zu Holzbalkendecken im Bestand

Für das Erlangen der erforderlichen Kenntnis der Deckenkonstruktionen in Bestandsbauten wurde eine Datenerhebung initiiert. Mit einer Analyse von baukonstruktiven Details in Gebäuden mit Holzbalkendecken, die für eine energetische Sanierung in Frage kommen, sollte u.a. die Variationsvielfalt der Gebäudetypen und deren Wand-, Decken- und Auflagerkonstruktionen dokumentiert werden. Die Erhebung erfolgte anhand eigener Objektuntersuchungen und über eine Umfrage bei Architekten, Planern,

II.1 Vorhabensziele, Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

Holzsachverständigen und holzverarbeitenden Handwerksbetrieben. Neben den Einbausituationen wurden klimatische Bedingungen der Gebäudestandorte, Schäden an den Holzbalkendecken und deren mögliche Ursachen sowie die Häufigkeit des Auftretens von holzerstörenden Pilzen und Insekten nachgefragt. Die Projekte konnten und können unter www.holzbalkendatenbank.de online in eine Datenbank eingegeben werden.

Die Häufigkeit der Auflagersituationen wird analog [79] für die in Abb. 3 dargestellten Auflagertypen abgefragt. Die Abfrage ist nicht auf Gebäude mit Mauerwerkswänden beschränkt, sondern ermöglicht u.a. auch die Erfassung von Fachwerkgebäuden.

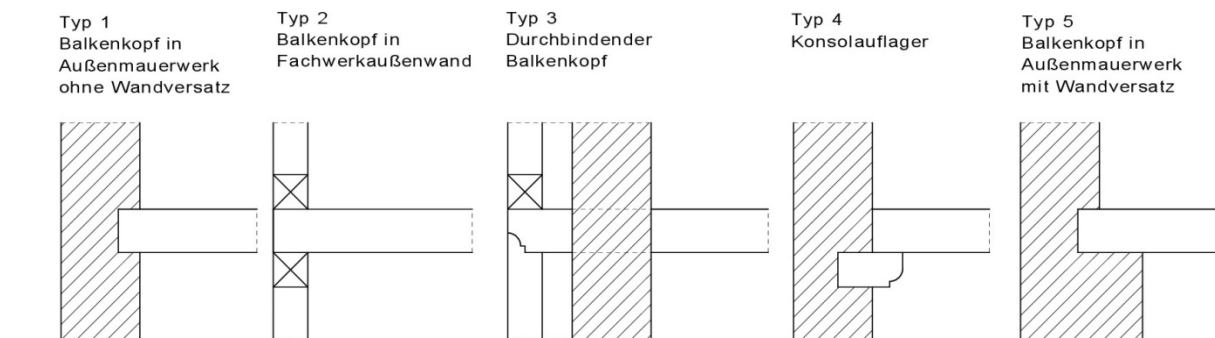


Abb. 3 Klassifizierung der konstruktiven Ausbildung des Auflagers.

Ergänzend erfasst die Erhebung:

- Holzart der Balkenlage
- Vorhandensein/Holzart der Mauerlatte
- Balkenlage unterseitig offen sichtbar oder geschlossen
- Deckenzwischenraum mit Lehmstaken oder Einschubbrett
- Luftspalt stirnseitig und/oder seitlich des Balkenkopfes
- Einbindetiefe des Balkenkopfes im Außenmauerwerk
- Baukonstruktive Eigenschaften der Fassade (Material, Wandaufbau, etc.)
- Städtebauliche Lage und Fassadenausrichtung

Die Onlinedatenbank ermöglichte die Eingabe jedes einzelnen Balkenkopfes einer Balkenlage, aber auch die Zusammenfassung des gesamten Auflagerbereiches. Die Himmelsrichtung der Balkenlage ist für die Beurteilung der Schlagregenbeanspruchung notwendig.

Vollständige Datensätze liegen über die im Rahmen des Forschungsprojektes untersuchten Holzbalkendecken vor. Anhand der vorliegenden Daten konnte kein eindeutiger Zusammenhang zwischen der örtlichen Lage des Gebäudes in einer Region mit einer bestimmten Schlagregenbeanspruchung und der Schadenhäufigkeit festgestellt werden. Individuelle Faktoren der Nutzung und der örtlichen Umgebung beeinflussen das Auftreten von Schäden an Holzbalkendecken stärker als die durchschnittlichen Schlagregenmengen einer Region. Abb. 4 zeigt einen zerstörten Balkenkopf einer im Rahmen des Projektes detailliert dokumentierten Holzbalkendecke. Ursache des Schadens ist die jahrzehntelange

Feuchtebelastung aus Kondenswasser an einer gusseisernen Abwasserleitung. Alle anderen Balkenköpfe in diesem Sanitärraum und alle weiteren Balkenköpfe der Geschossdecke sind schadenfrei.



Abb. 4 Zerstörter Balkenkopf im Sanitärbereich eines um 1850 errichteten Gebäudes.

1.2.3 Messtechnische Untersuchungen an Objekten mit Holzbalkenköpfen

Messtechnische Untersuchungen an Sanierungsobjekten und die Erfassung detaillierter Konstruktionsdetails sind für einen wissenschaftlichen Erkenntnisgewinn zur Holzbalkenproblematik unerlässlich. Für die Bewertung des hygrothermischen Verhaltens der Holzbalkenköpfe stehen verschiedene Testhäuser zur Verfügung. Sie unterscheiden sich in der Art und im Material der Außenwand bzw. der Fassadenoberfläche, in den konstruktiven und klimatischen Randbedingungen und in der Ausführung der Balkenaufleger.

Das hygrothermische Verhalten von Balkenköpfen wird von einer Vielzahl von Randbedingungen beeinflusst [80]. Dazu gehören die konstruktiven Eigenschaften des Auflagerbereiches, die Materialeigenschaften der verwendeten Baustoffe, die Außenklimabedingungen sowie die von der Nutzung bestimmten Innenklimabedingungen. Maßgeblich für den schadenfreien Einsatz von Innendämmsystemen ist die Schlagregensicherheit der Fassade. Untersucht wurden Holzbalkendecken in Objekten mit Sichtmauerwerk aus Sandstein und Ziegel sowie Fassaden mit verputztem Vollziegelmauerwerk. Darüber hinaus erfolgten Untersuchungen an einer sanierten Holzbalkendecke in einer Fachwerkkonstruktion mit Vormauerung und Putzfassade.

Zur Erfassung des für die Schadenfreiheit der Holzbalkenköpfe maßgebenden Verlaufs der Holzfeuchte werden in den untersuchten Objekten verschiedene Messverfahren eingesetzt. Die Methoden werden im Abschnitt 1.3.1 näher erläutert.

Im Folgenden werden für die untersuchten Objekte die konstruktiven und bautechnischen Randbedingungen des Gebäudes und der Holzbalkendecke sowie die Bewertung der

Entwicklung der Feuchte im Balkenkopf nach der Applikation eines Innendämmsystems vorgestellt. In einer Zusammenfassung werden die wichtigsten Randbedingungen, Besonderheiten des jeweiligen Objektes und die Erkenntnisse dargelegt. Eine Analyse der umfangreichen hygrothermischen Messungen wurde im Rahmen der Dissertation „*Zum Einsatz von Innendämmsystemen an erhaltenen Fassaden mit im Außenmauerwerk eingebundenen Holzbalkenköpfen*“ von A. Staar erarbeitet. In den Referenzgebäuden durchgeführte Experimente zu Feuchteinträgen über Luftströmungen, untersuchte konstruktive Maßnahmen und Energieeinträge sind darin ebenfalls dokumentiert und ausgewertet.

1.2.3.1 Sandsteinfassade – Herrenschießhaus Nürnberg

Das ehemalige Herrenschießhaus Nürnberg, ein denkmalgeschütztes Renaissancegebäude, das 1582-1583 errichtet wurde, nutzt die Stadt Nürnberg seit 1905 als städtisches Bildungszentrum. Abb. 5 zeigt die Südfassade, in der sich die mit Messtechnik ausgestatteten Balkenköpfe befinden.



Abb. 5 Herrenschießhaus Nürnberg – Südfassade.

Die Decke über dem Kellergeschoss ist eine Gewölbedecke, die Holzbalkendecken liegen über dem Erdgeschoss und über dem Obergeschoss zum nicht ausgebauten Dachraum. An den massiven Sandsteinwänden wurde eine Innendämmung aus Kalziumsilikat mit 6 cm Stärke eingebaut. Die Anforderungen der Energieeinsparverordnung 2009 (an ein Bestandsgebäude) werden beim Primärenergiebedarf um rund 20 % und beim spezifischen Transmissionswärmeverlust um rund 31 % unterschritten [53]. In der Tab.1 sind die wesentlichen Objektdaten der vorhandenen Bausubstanz, der Konstruktion des Auflagerbereiches und die installierte Messtechnik zusammengefasst.

Tab. 1 Herrenschießhaus Nürnberg – Zusammenstellung der Objektdaten.

Allgemeine Angaben zum Objekt	
Baujahr/Denkmalstatus	1582-1583/Einzeldenkmal
Fassade	Sandsteinmauerwerk
Städtebauliche Lage/Nutzung	freistehend/Bildungszentrum, Lesesaal
Holzbalkendecke	
Alter/Schäden	Bauzeit des Gebäudes im Original erhalten/keine
Konstruktion	Deckenbalken mit Einschubbrett und Füllung
Balkenaufleger	Balkenkopf auf einer Mauerlatte
Holzart	Eiche
Lage der untersuchten Holzbalken	Südfassade in der Decke über dem Erdgeschoss und der Decke über dem Obergeschoss
Beginn der Messungen	2009 (während der Sanierungsarbeiten)
Innendämmsystem	
Material	Kalziumsilikat
Dämmschichtdicke	6 cm
Balkenkopfpräparationen	
Balken EG 6	Falschlufteintrag, Balkenkopfanschluss mit 1 cm Luftspalt, so dass ein Luftverbund zur Unterdecke vorhanden ist
Balken EG 7	Heizrohranschluss, Vor- und Rücklaufleitung verlaufen unmittelbar am Balkenkopf
Balken EG 9 und 10	Referenzbalken ohne zusätzliche Maßnahmen
Balken EG 14	Dämmstreifen aus XPS stirnseitig eingeschoben
Balken OG 5 und 9	Decke zum Dachboden
Messungen des hygrothermischen Verhaltens und der Klimarandbedingungen	
Kombinierte Temperatur- und Luftfeuchtesensoren	im Stirnholz des Balkenkopfes und im Luftspalt an der Stirnseite an allen Balkenköpfen
Holzfeuchtemessung (Leitfähigkeitsmethode)	Balken EG 6
Innenklima	Raumtemperatur, rel. Luftfeuchte
Außenklima	Temperatur, rel. Luftfeuchte, Regensor

Abb. 6 zeigt den Verlauf der im Stirnholz der Balkenköpfe in der Erdgeschossdecke gemessenen relativen Porenluftfeuchte. Mit Beginn der Gebäudenutzung stellt sich im Stirnholz ein gleichmäßiger Jahresgang zwischen 40-65 % r.F. ein, was einer Holzfeuchte unter 12 M.-% entspricht. Der Verlauf der Feuchte im Holz zeigt ein Maximum zum Jahreswechsel und folgt damit der Feuchte der Außenluft. Insgesamt verlaufen alle

Holzfeuchten der Balkenköpfe stets im risikofreien Bereich. Anhand des Verlaufs der Messwerte, die sehr nah beieinander liegen, wird deutlich, dass mit den Sanierungsarbeiten an diesem Bauwerk nur eine geringe Menge an Baufeuchte eingetragen wurde. Signifikante Unterschiede im Verlauf der Feuchte infolge der Balkenkopfpräparationen sind nicht festzustellen.

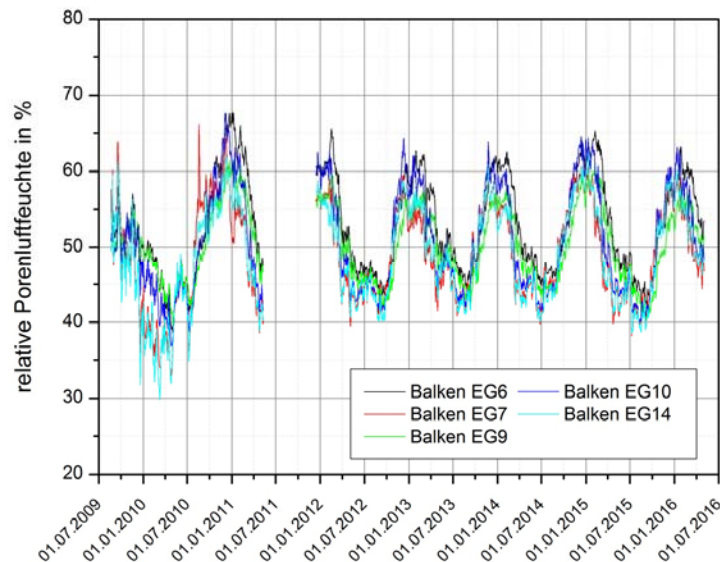


Abb. 6 Herrenschießhaus Nürnberg – Verlauf der relativen Porenluftfeuchte im Stirnholz der Balkenköpfe in der Decke über dem Erdgeschoss.

1.2.3.2 Klinkersichtmauerwerk – Bahnmeistergasse

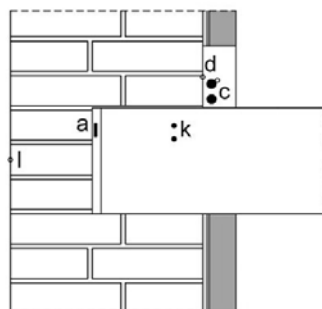
Die Langzeitmessungen in einem Bürogebäude in der Bahnmeistergasse in Senftenberg zeigen u.a. den Einfluss von Regenereignissen auf die Feuchteentwicklung in Balkenköpfen bei einer steinsichtigen Fassade. Es handelt sich um einen zweigeschossigen, unterkellerten Mauerwerksbau mit ausgebautem Dachboden. Die Fassade besteht im Erdgeschoss aus Klinkersichtmauerwerk, im Obergeschoss und an den Giebelseiten aus einem mineralischen Glattputz mit klinkersichtigen Gestaltungselementen, Abb. 7. In der Geschossdecke zwischen dem Erd- und Obergeschoss werden vier Balkenköpfe im Bereich des Sichtmauerwerks in der nach Nordwesten orientierten Außenwand einschließlich der Vor- und Rücklaufleitungen der Heizung messtechnisch überwacht. Abb. 8 zeigt in einem Vertikalschnitt des Auflagerbereiches den Anschluss der Innendämmung und die Lage der Sensorik. Die Innendämmung ist im Decke-Wand-Ichsel zur Installation der Vor- und Rücklaufleitungen der Heizung 8-10 cm ausgespart worden. Am Balkenkopf H4 befindet sich ein Bypass, über den die Wärmezufuhr aus den Heizungsrohren unterbrochen werden kann.



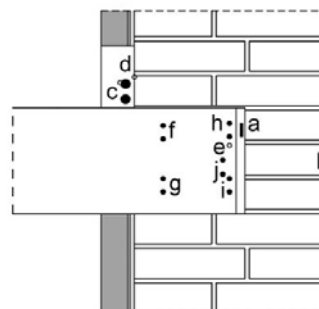
Abb. 7 Fassade des Bürogebäudes in der Bahnmeistergasse in Senftenberg.

Holzbalken 4

Ansicht linke Seite



Ansicht rechte Seite



a	phi3k_H4	d	T1pt_H4	g	X2_H4	j	X5_H4
a	T3k_H4	e	T2pt_H4	h	X3_H4	k	X6_H4
c	T0NC_H4	f	X1_H4	i	X4_H4	l	T4pt_H4

Abb. 8 Lage der Sensoren am Balkenkopf H4; a: kombinierter Sensor für Temperatur- und relative Luftfeuchte, c-e: Temperaturfühler, g-l: Elektrodenpaare zur Holzfeuchtemessung.

In der Tab. 2 sind die wesentlichen Objektdaten der vorhandenen Bausubstanz, der Konstruktion des Auflagerbereiches und die installierte Messtechnik zusammengefasst.

II.1 Vorhabensziele, Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

Tab. 2 Bahnmeistergasse Senftenberg – Zusammenstellung der Objektdaten.

Allgemeine Angaben zum Objekt	
Baujahr/Denkmalstatus	Um 1900/kein Einzeldenkmal
Fassade	Ziegelsichtmauerwerk/Putz
Städtebauliche Lage/Nutzung	freistehend/Büronutzung
Holzbalkendecke	
Alter/Schäden	Bauzeit des Gebäudes im Original erhalten/keine
Konstruktion	Balkenzwischenraum nicht dokumentiert
Balkenaufleger	Balkenkopf im Mauerwerk ohne Wandversatz
Holzart	Kiefer
Lage der untersuchten Holzbalken	Nordwestfassade in der Decke über dem Erdgeschoss
Beginn der Messungen	2000 (nach Abschluss der Sanierungsarbeiten)
Innendämmsystem	
Material	Kalziumsilikat
Dämmschichtdicke	5 cm
Balkenkopfpräparationen	
Balken H 1 – H3	Vor- und Rücklaufleitungen der Heizung in einer Aussparung der Innendämmung über dem Fußboden
Balken H 4	Mit Bypass zur Unterbrechung der Wärmezufuhr
Messungen des hygrothermischen Verhaltens und der Klimarandbedingungen	
Kombinierte Temperatur- und Luftfeuchtesensoren	im Luftspalt an der Stirnseite an 4 Balkenköpfen
Holzfeuchtemessung (Leitfähigkeitsmethode)	Je Balkenkopf an 6 Messstellen
Temperatursensoren	Temperatursensoren an verschiedenen Punkten der Konstruktion und der Rohrleitungen

Der Verlauf der Holzfeuchte in Abb. 9 zeigt, dass die Balkenköpfe infolge eingebrachter Baufeuchte kurzzeitig Werte über 20 M.-% erreichen und bis 2004 mit jahreszeitlichen Schwankungen stetig austrocknen.

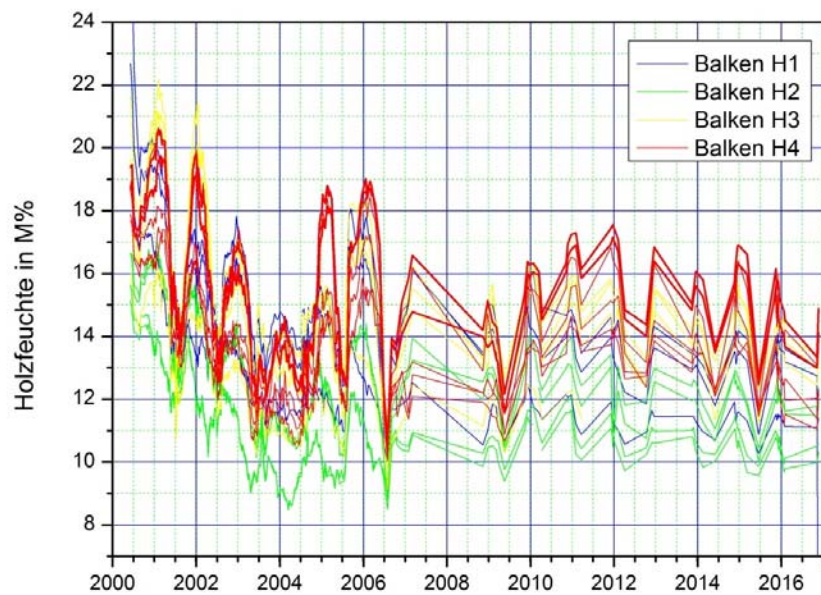


Abb. 9 Verlauf der Holzfeuchte an den Balkenköpfen H1-H4.

Im Jahr 2005 findet im August ein Schlagregenereignis statt, das an allen vier Balkenköpfen zu einem massiven Anstieg der Holzfeuchte führt [51]. Die im Luftraum an der Stirnseite des Balkenkopfes gemessene Feuchte steigt dabei schlagartig von 50 % auf 80-90 % an. Bis zum Jahresende 2005 bleibt dieses hohe Feuchteniveau erhalten. Während bei den Balkenköpfen H1-H3 nach dem Einsetzen des Heizbetriebes die Holzfeuchtwerte wieder abfallen, steigen sie an allen Messstellen des Balkenkopfes H4 bis nach dem Jahreswechsel weiter an. Durch einen regelbaren Bypass war während der Gesamtzeit die Vorlaufschleife am Balkenkopf H4 abgesperrt. Messtechnisch wird der positive Einfluss des Wärmeenergieeintrages aus der Vor- und Rücklaufleitung der Heizung auf die Feuchteminderung an den Balkenköpfen nachgewiesen. Der zusätzliche Wärmeverlust der gezielten Wärmebrückenwirkung wird mit 10 % bezogen auf die Außenwandinnendämmung eingeschätzt [81].

Ein kritisches Niveau der Holzfeuchte im Balkenkopf stellt sich langfristig trotz der schlagregenempfindlichen Fassade aus Sichtmauerwerk nicht ein. Die relative Luftfeuchte im stirnseitigen Luftspalt steigt in regenreichen Sommermonaten, wie im August 2009, Juni 2010 und im August 2013, übermäßig an, ohne dass daraus Holzfeuchtezunahmen resultieren.

1.2.3.3 Putzfassade (Mauerwerk) – Schule Drebkau

Im Februar 2011 ist im denkmalgeschützten Schulgebäude aus dem Jahr 1793 nach einer umfassenden energetischen Sanierung der Schulbetrieb wieder aufgenommen worden. Zu diesem Zeitpunkt beginnt auch die Untersuchung von 30 im Mauerwerk eingebundenen Holzbalkenköpfen in zwei Klassenzimmern und einem Flur. Die städtebauliche Lage des Gebäudes zeigt Abb. 10. Während die Südwestfassade aufgrund des Standortes am

II.1 Vorhabensziele, Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

Marktplatz frei besonnt wird, erfährt die Nordostfassade eine Verschattung aus dem dreigeschossigen Erweiterungsbau.



Abb. 10 Schulgebäude Drebkau – Bild links: Nordostfassade, Bild rechts: Südwestfassade.

In der Tab. 3 sind die wesentlichen Objektdaten der vorhandenen Bausubstanz, der Konstruktion des Auflagerbereiches und die installierte Messtechnik zusammengefasst.

Tab. 3 Schule Drebkau – Zusammenstellung der Objektdaten.

Allgemeine Angaben zum Objekt	
Baujahr/Denkmalstatus	1793/Einzeldenkmal
Fassade	Vollziegelmauerwerk mit Putz
Städtebauliche Lage/Nutzung	freistehend/Grundschule/Nordostfassade durch Erweiterungsbauten verschattet
Holzbalkendecke	
Alter/Schäden	Bauzeit des Gebäudes im Original erhalten/keine
Konstruktion	Deckenbalken mit Lehmstaaken und Füllung aus Sand
Balkenauflager	Balkenkopf auf einer Mauerlatte
Holzart	Kiefer
Lage der untersuchten Holzbalken	Südwestfassade und Nordostfassade in der Decke über dem Erdgeschoss
Beginn der Messungen	2011 (mit Beginn der Nutzung)
Innendämmsystem	
Material	Perlite
Dämmschichtdicke	8 cm

Balkenkopfpräparationen	
Deckenanschluss Variante I	Innendämmung wird an der Außenwand über die Deckenebene geführt
Deckenanschluss Variante II	Innendämmung stößt ober- und unterseitig an die Deckenebene
Balken S01, S15, S16, N01	Referenzbalken ohne Klimaboden
Balken S02, S07, N02, N07, S17, S21	Perliteschüttung im Hohlraum zwischen Mauerwerk und Holz
Balken S03, S05, N03, N05	Heat-Pipe beidseitig je 3 Stück am Balkenkopf
Balken S04, S20, N04	Wärmebrücke Vollziegelkranz
Balken S06, S18, S19, N06	Klimaboden ohne zusätzliche Maßnahmen
Balken S08, S10, S22-S24, N08, N10	Klimaboden mit zusätzlichem Heizkreis
Messungen des hygrothermischen Verhaltens und der Klimarandbedingungen	
Kombinierte Temperatur- und Luftfeuchtesensoren	im Stirnholz des Balkenkopfes und im Luftspalt an der Stirnseite an allen Balkenköpfen
Holzfeuchtemessung (Leitfähigkeitsmethode)	Balken S06, S16
Innenklima	Raumtemperatur, rel. Luftfeuchte
Außenklima	Temperatur, rel. Luftfeuchte, Regensensor, Strahlungssensor jeweils auf der Südwest- und der Nordostfassade

Der Zustand des Vollziegelmauerwerks erfordert zunächst eine Mauerwerkssanierung, da der Bestand teilweise massive Rissbildungen, u.a. aufgrund von Mauerwerksschwächungen für Rohrleitungen, aufweist. Vor der Applikation der Innendämmung wird ein Egalisierungsputz aufgebracht. Trotz des sorgfältigen Schutzes der Balkenköpfe aufgrund der installierten Messtechnik, steigt die Feuchte in den Balkenköpfen unter dem Einfluss der Baufeuchte deutlich an. Anhand der Gegenüberstellung des Verlaufs der im Holz gemessenen relativen Porenluftfeuchte an jeweils 10 Messstellen auf der Nordost- und der Südwestseite in Abb. 11 werden Unterschiede im Austrocknungsprozess deutlich. Die Balkenköpfe in der verschatteten Nordostfassade trocknen deutlich langsamer aus. Während auf der Südwestseite der Trocknungsprozess nach 3 Jahren abgeschlossen ist, wurde auf der Nordostseite nach nunmehr 5 Jahren noch kein Gleichgewichtszustand erreicht.

II.1 Vorhabensziele, Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

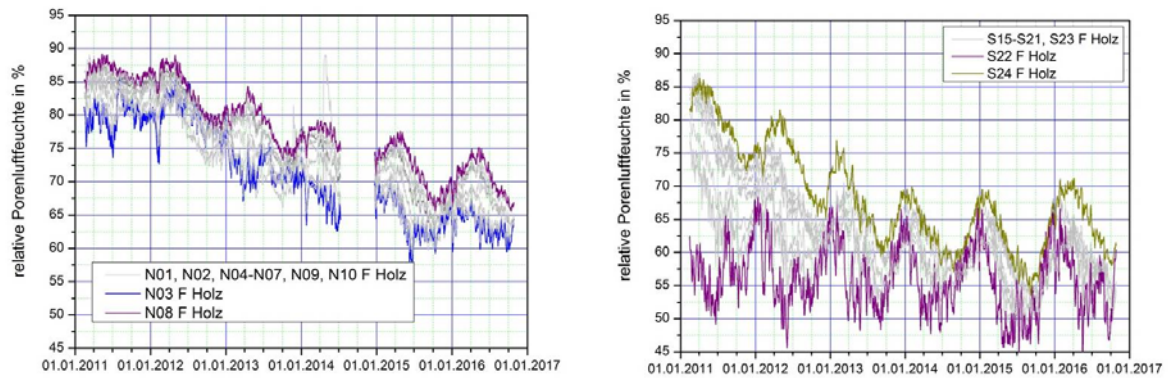


Abb. 11 Gegenüberstellung der Tagesmittelwerte der im Stirnholz gemessenen relativen Porenlufftfuchte – Bild links: Flur, Nordostfassade; Bild rechts: Klassenzimmer, Südwestfassade.

Der Strahlungseinfluss zeigt sich auch im Verlauf der im Balkenkopf gemessenen Temperatur in Abb. 12. Dargestellt sind die Tagesmittelwerte des Jahres 2015 an allen Messpunkten der Klassenzimmer auf der Südwestseite und im Flur auf der Nordostseite.

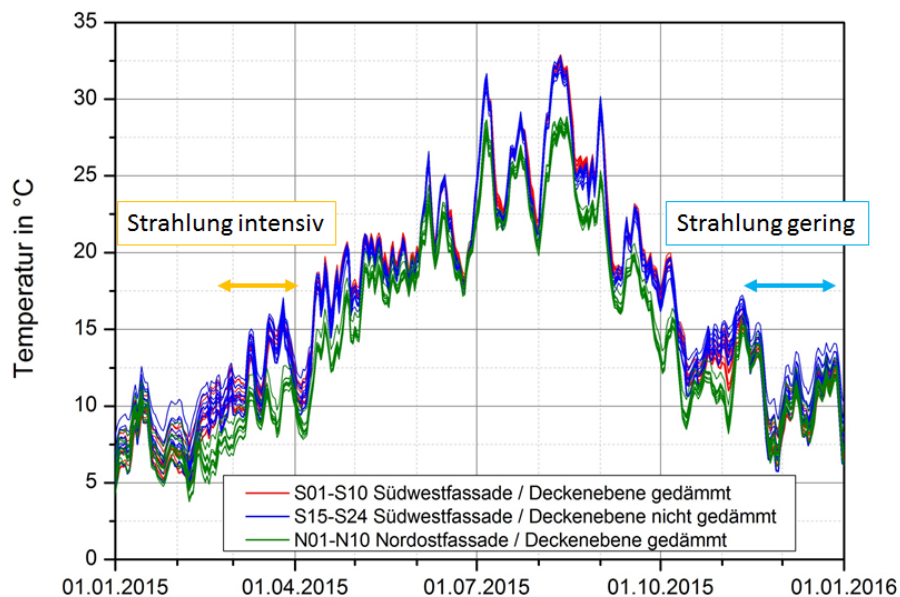


Abb. 12 Schulgebäude Drebkau – Verlauf der im Stirnholz der Balkenköpfe gemessenen Temperatur.

Im Januar und Dezember 2015 ist der Strahlungseinfluss gering. Die Temperaturen liegen zu diesem Zeitpunkt in einem Wertebereich von 3 K. Im unteren Bereich verlaufen, grün dargestellt, die Temperaturen an den Balkenköpfen der Nordostfassade, da die Raumtemperatur aufgrund der Nutzung als Flur mit 18 °C unter der Raumtemperatur in den Klassenzimmern liegt. Unter dem Einfluss der Sonnenstrahlung steigt die Temperatur in den Balkenköpfen der Südwestfassade in beiden Klassenzimmern im Februar und März 2015 deutlich an. Dabei stellt sich bei beiden konstruktiven Varianten das gleiche

Temperaturniveau ein. An diesem Objekt ist der thermische Einfluss aus einer gedämmten oder ungedämmten Deckenebene somit unwesentlich.

Anhand der Feuchteverläufe in Abb. 13 wird deutlich, dass an den Referenzbalken, die nicht dem thermischen Einfluss eines Klimabodens unterliegen, gleichermaßen ein stetiger Trocknungsprozess stattfindet.

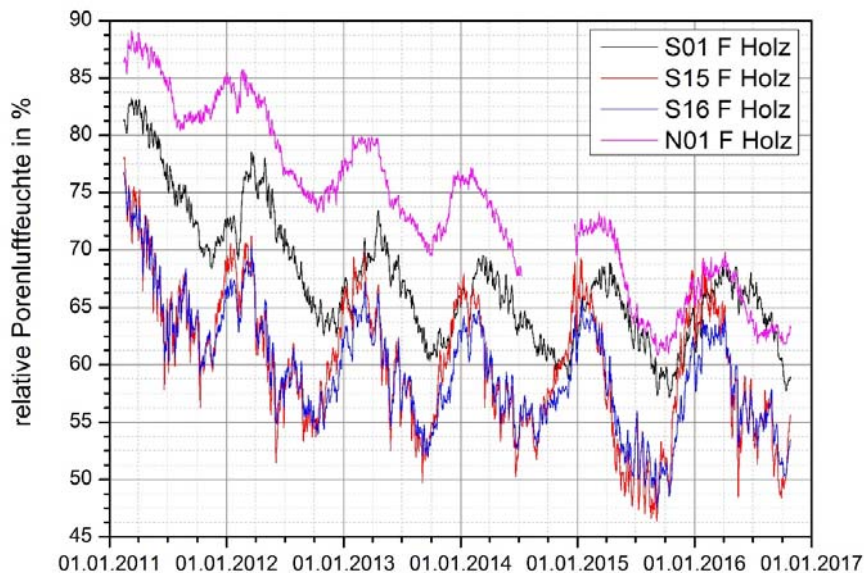


Abb. 13 Schulgebäude Drebkau – Referenzbalken - Verlauf der im Stirnholz der Balkenköpfe gemessenen relativen Porenlufffeuchte.

Der Verlauf der Feuchteentwicklung an den Balkenköpfen mit einer Wärmebrücke aus einem Vollziegelkranz in Abb. 14 und an den mit einer Perliteschüttung ausgeführten Balkenköpfen in Abb. 15 zeigt, dass die Ausgangsfeuchte maßgeblich das hygrothermische Verhalten beeinflusst. Sobald sich der Gleichgewichtszustand eingestellt hat, stellt sich an allen Balkenköpfen ein vergleichbares Feuchteniveau ein.

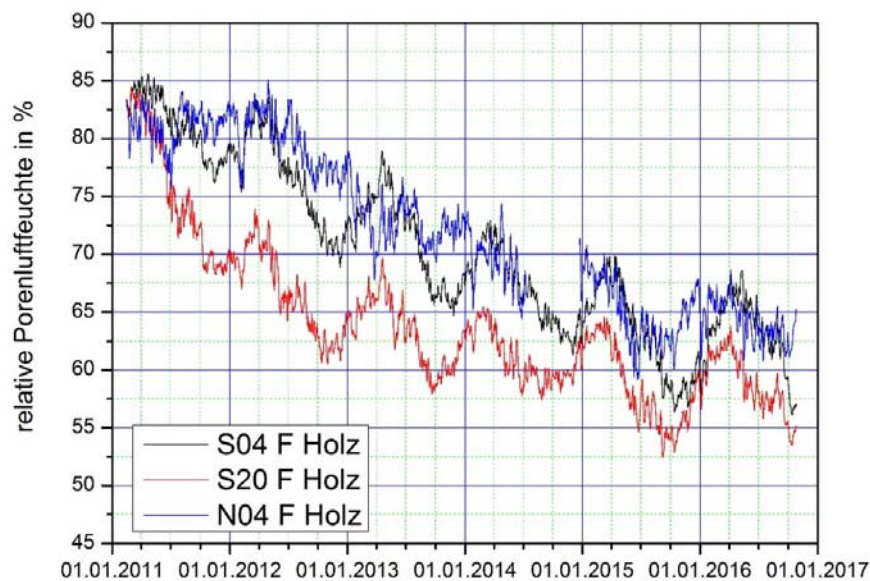


Abb. 14 Schulgebäude Drebkau – Variante Ziegelkranz – Verlauf der relativen Porenluftfeuchte im Stirnholz der Balkenköpfe.

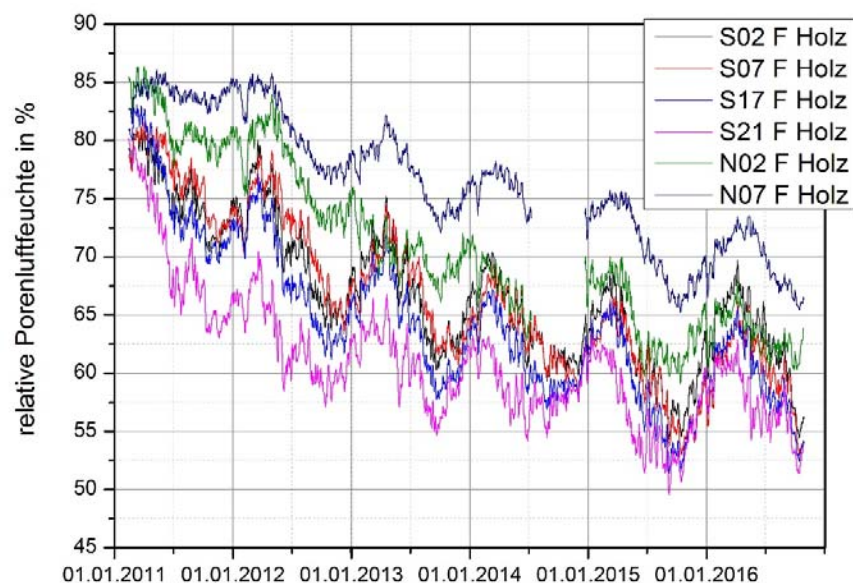


Abb. 15 Schulgebäude Drebkau - Variante Perliteschüttung - Verlauf der relativen Porenluftfeuchte im Stirnholz der Balkenköpfe.

In Abb. 16 ist der Feuchteverlauf der Referenzbalken und der Balkenköpfe, die dem Einfluss des Klimabodens unterliegen, dargestellt. Das Ausgangsniveau ist an den Referenzbalken um ca. 10 % r.F. geringer. Nach dem Abklingen der Baufeuchte stellt sich ein vergleichbares Feuchteniveau ein, wobei der Referenzbalken in den Wintermonaten ein höheres Maximum erreicht und in den Sommermonaten stärker austrocknet.

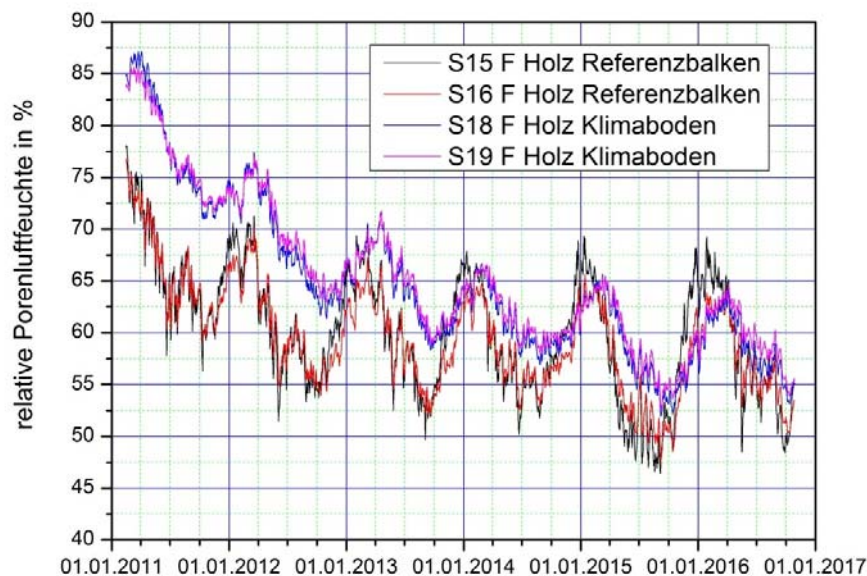


Abb. 16 Schulgebäude Drebkau – Vergleich der Varianten Referenzbalken und Klimaboden – Verlauf der relativen Porenlufftfuchte im Stirnholz der Balkenköpfe.

Abb. 17 zeigt die anhand der Sorptionsisothermen berechneten Monatsmittelwerte der Holzfeuchte im Stirnholz der Balkenköpfe S01-S10. Unmittelbar nach dem Abschluss der Sanierungsarbeiten liegt die Holzfeuchte in einem Bereich von 13-19 M.-%. Das jährliche Maximum verringert sich um 1-2 M.-% bis der Gleichgewichtszustand erreicht ist. Mit einer Holzfeuchte von 10-14 M.-% weisen alle Balkenköpfe auch im 6. Jahr nach der Applikation der Innendämmung ein unkritisches Feuchteniveau auf.

Im Ergebnis der Untersuchungen an diesem Objekt ist festzustellen, dass die Baufeuchte auch nach der Applikation des Innendämmsystems stetig austrocknet. Dieses Verhalten tritt bei allen untersuchten Balkenkopfpräparationen auf. Der Strahlungseinfluss auf besonnten Fassaden begünstigt die Trocknung, ebenso wie Wärmeenergieeinträge [82]. Seit der Inbetriebnahme des Schulgebäudes vollzieht sich im inngedämmten Außenmauerwerk ein stetiger Austrocknungsprozess. Die Holzfeuchte liegt in allen Balkenköpfen, unabhängig von der Balkenkopfpräparation, auf einem unkritischen Niveau.

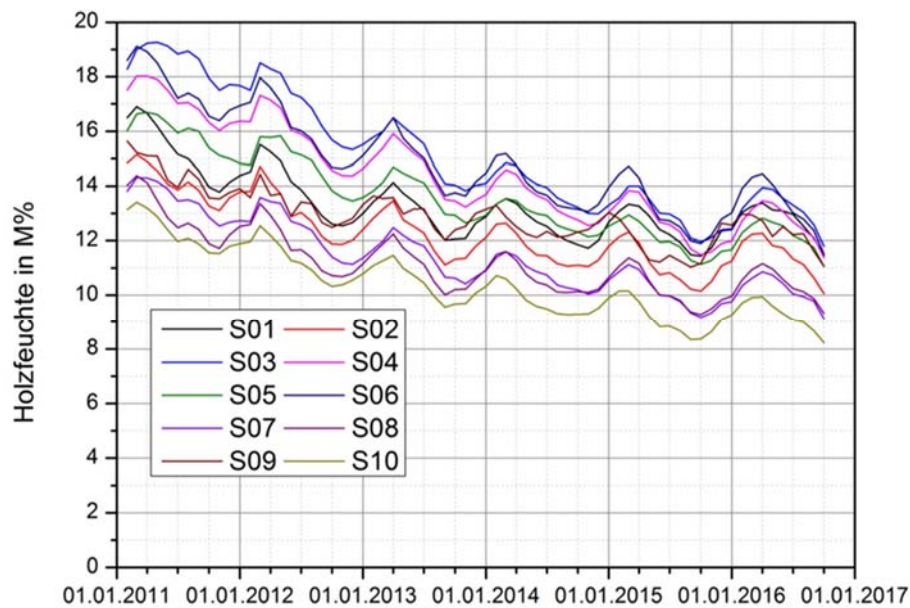


Abb. 17 Schulgebäude Drebkau – Verlauf der anhand der Sorptionsisotherme berechneten Holzfeuchte an den Balkenköpfen S01–S10.

1.2.3.4 Putzfassade (Fachwerk mit Vormauerung) – Schloss Drebkau

Das Schloss Drebkau hat seinen Ursprung am Standort einer Ritterburg aus dem 13. Jahrhundert. In Umbauphasen während des 18. Jahrhunderts und Erweiterungsbauten im 19. Jahrhundert entstand das heutige Schloss, das derzeit zu einem Verwaltungssitz umgebaut wird, Abb. 18. Mit einer Fachwerkkonstruktion mit Vormauerung unterscheidet sich diese Außenwandkonstruktion von den anderen untersuchten Objekten. Die hygrothermischen Messungen werden an vier nach dem Betaverfahren erneuerten Balkenköpfen und an einem Balkenkopf aus Altholz als Referenzbalken durchgeführt. Der Referenzbalken liegt ohne statische Funktion in der Außenwand auf. Er dient u.a. dem Vergleich unterschiedlicher Verfahren der Holzfeuchtemessung.



Abb. 18 Schloss Drebkau, Südseite.

In der Tab. 4 sind die wesentlichen Objektdaten der vorhandenen Bausubstanz, der Konstruktion des Auflagerbereiches und die installierte Messtechnik zusammengefasst.

Tab. 4 Schloss Drebkau – Zusammenstellung der Objektdaten.

Allgemeine Angaben zum Objekt	
Baujahr/Denkmalstatus	Um 1776/Anbauten 1850/Einzeldenkmal
Fassade	Fachwerkkonstruktion mit Vormauerung und Putz
Städtebauliche Lage/Nutzung	freistehend/Baustelle für zukünftigen Verwaltungssitz
Holzbalkendecke	
Alter/Schäden	Bauzeit des Gebäudes im Original erhalten/alle Balkenköpfe massiv geschädigt/Austausch erforderlich
Konstruktion	Deckenbalken mit Einschubbrett und Füllung
Balkenauflager	Balkenköpfe im Beta-Verfahren erneuert, Auflager auf Stahlbetonriegel in der sanierten Fachwerkkonstruktion
Holzart	Kiefer
Lage der untersuchten Holzbalken	Nordostfassade in einem Messraum auf der Baustelle
Beginn der Messungen	2013
Innendämmsystem	
Material	XPS (Extrudierter Polystyrolschaum)
Dämmschichtdicke	8 cm
Balkenkopfpräparationen	
Balken B2-B5	Erneuerte Balkenköpfe
Balken RB	Referenzbalken aus Altholz der vorhandenen Decke
Messungen des hygrothermischen Verhaltens und der Klimarandbedingungen	
Kombinierte Temperatur- und Luftfeuchtesensoren	im Stirnholz des Balkenkopfes, Luftspalt an der Stirnseite
Holzfeuchtemessung (Leitfähigkeitsmethode)	Balken RB
Innenklima	Raumtemperatur, rel. Luftfeuchte
Außenklima	Wetterstation auf dem Schlosshof

Abb. 19 zeigt den Verlauf der im Stirnholz der Balkenköpfe gemessenen relativen Porenluftfeuchte. In 2013/2014 steht die Konstruktion unter dem Einfluss der Baufeuchte aus Sanierungsmaßnahmen im Gebäude, die an diesem Objekt nicht zu einem Feuchteanstieg in kritische Bereiche führt.

In einem Benetzungsexperiment wird auf einer ca. 10 m² großen Fläche mit einer definierten Wassermenge, die drucklos über einen Zeitraum von 4 Wochen im November bzw.

Dezember 2014 auf die Fassade aufgebracht wird, u.a. der Einfluss auf Holzbauteile in der innengedämmten Außenwand betrachtet [83]. Nach Beendigung der Befeuchtung steigt die Porenluftfeuchte im Stirnholz der Balkenköpfe bis über 90 % an und erreicht damit ein kritisches Niveau. Während der anschließenden Trocknungsphase wird innerhalb von drei Monaten der unkritische Ausgangszustand erreicht. Ein Unterschied im Trocknungsverhalten der nach dem Betaverfahren erneuerten Balkenköpfe und dem Altholz ist nicht signifikant.

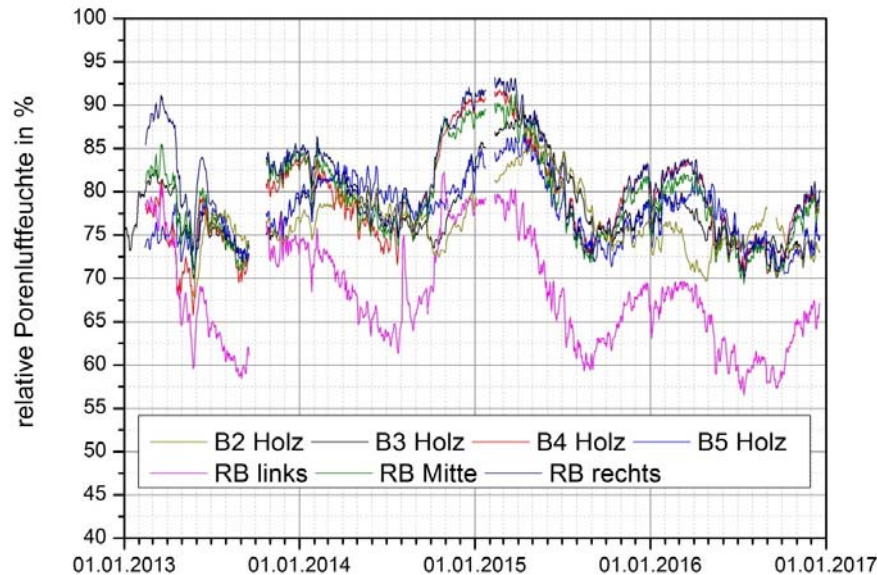


Abb. 19 Schloss Drebkau - Verlauf der relativen Porenluftfeuchte im Stirnholz der Balkenköpfe.

1.2.3.5 Alte Schäfflerei Benediktbeuern

Die Luftaufnahme in Abb. 20 zeigt das über 1250 Jahre alte Kloster Benediktbeuern, in dem seit 1930 die Salesianer Don Boscos wirken. Die Alte Schäfflerei (roter Kreis in Abb. 20) ist Teil des ehemaligen Handwerkerbezirks im Kloster Benediktbeuern und stammt aus der zweiten Hälfte des 18. Jahrhunderts. Sie wird als Anschauungsobjekt im Sinne einer «gläsernen Baustelle» denkmalfachlich und unter energetischen Gesichtspunkten instand gesetzt. Die breite Palette der Möglichkeiten zur Altbausanierung und Denkmalpflege soll genauso wie innovative Technologien zur Energieeffizienz und nachhaltigen Sanierung beispielhaft an dem denkmalgeschützten Gebäude demonstriert werden.



Abb. 20 Luftaufnahme der Klosteranlage mit der Alten Schäferei, deren Lage durch den roten Kreis gekennzeichnet ist.

Abb. 21 zeigt eine Winteraufnahme aus dem März 2016 mit dem großen Kopfbau und dem im Bild links zu sehenden daran angeschlossenen Nordbau der Alten Schäferei.



Abb. 21 Fotografische Ansicht der Alten Schäferei mit dem großen Kopfbau und dem im Bild links zu sehenden daran angeschlossenen Nordbau.

Holzbalkendecke im Kopfbau der Alten Schöfflerei

Bei der Öffnung der Holzbalkendecke der alten Schöfflerei des Klosters Benediktbeuern zeigte sich, dass fast alle Holzbalkenköpfe massiv von holzerstörenden Pilzen befallen waren (Abb. 22).



Abb. 22 Ansicht einer ausgeführten Überblattung mit darüber liegendem originalem Holzbalkenkopf (links) und weiterer stark von holzerstörenden Organismen beschädigter Balkenköpfe.

Dabei scheint dieses Problem schon deutlich früher zu Tage getreten zu sein, denn bei den meisten Balkenköpfe wurde im Zuge einer früheren Sanierung versucht, die Statik wieder dadurch sicher zu stellen, dass die Balken durch einen von außen eingebrachten Metallschuh unterseitig gestützt wurden (Abb. 23). Da dieser Metallschuh in der Wand bis zum Außenputz durchgezogen wurde, resultierte darin eine maßgebliche Wärmebrücke, die eine weitere Auffeuchtung und Zerstörung des Balkenkopfes mit sich brachte. Schlussendlich mussten nahezu alle Holzbalkenköpfe grundlegend saniert werden. Dies bot die Möglichkeit, an einem Gebäude unterschiedliche Sanierungstechniken zu erproben und messtechnisch zu begleiten.



Abb. 23 Ansicht des Holzbalkenkopfes mit altem eingebauten Metallschuh zur statischen Unterstützung der geschädigten Holzbalkenköpfe.

Abb. 24 zeigt beispielhaft die Arbeiten der Zimmerer beim Ausbau der geschädigten Balkenköpfe und Abb. 25 bei der Erstellung der Überblattung des vorhandenen Holzbalkenreststückes.



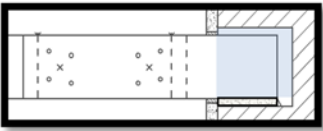
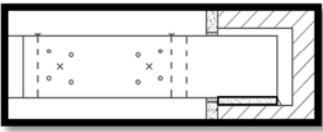
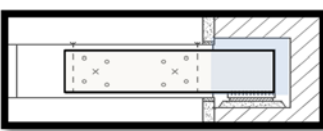
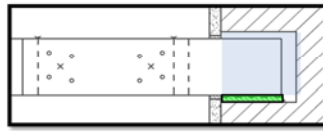
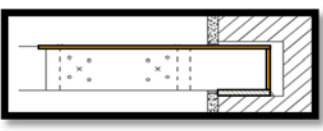
Abb. 24 Beispielhafter Ausbau des Holzbalkenkopfes.



Abb. 25 Arbeiten zur Überblattung des alten Holzbalkens.

Es wurden insgesamt 24 zerstörte Holzbalkenköpfe saniert. Dabei waren 6 unterschiedliche Sanierungsvarianten geplant, die sich vor allem in der Art der Dämmung, im Auflager und in den Hohlräumen um den Balkenkopf unterscheiden. Im Nachhinein zeigte sich, dass die Varianten nicht immer so ausgeführt wurden wie geplant. Aus diesem Grund kommen zu den geplanten Varianten noch drei Untervarianten hinzu (Vergl. Tab. 5).

Tab. 5 Ausgeführte Sanierungsvarianten für die Holzbalkenköpfe mit unterschiedlichen Auflagern, Dämmausführungen und daraus resultierenden thermischen und hygrischen Besonderheiten. Mit aufgelistet ist die Art der eingebauten Sensorik.

Var	Schematische Darstellung	Sanierung	Auflager	Dämmung/ Luftspalt	Besonderheiten Auflager	Sensorik
1		Überblattung	Mörtelbett	Rundum Dämmung / Kein Luftspalt	Guter thermischer und hygrischer Kontakt	Holzfeuchte ; Temperatur
1b		Überblattung	Mörtelbett	Keine Dämmung/ Luftspalt	Guter thermischer und hygrischer Kontakt	Holzfeuchte ; Temperatur
2		Schlitzeblech	Mörtelbett	Rundum Dämmung / Kein Luftspalt	thermischer Kontakt	Holzfeuchte
2b		Schlitzeblech	Mörtelbett	Keine Dämmung/ kein Luftspalt	thermischer Kontakt	Holzfeuchte
3		Überblattung	Nanogel	Keine Dämmung/ Luftspalt	weder thermischer noch hygrischer Kontakt	Holzfeuchte ; Temperatur
4		Überblattung	Elastomer	Keine Dämmung/ Luftspalt	Guter thermischer Kontakt	Holzfeuchte ; Temperatur
4		Überblattung	Elastomer	Keine Dämmung/ kein Luftspalt	Guter thermischer Kontakt	Holzfeuchte ; Temperatur
5		Überblattung	Nanogel	Rundum Dämmung / Kein Luftspalt	weder thermischer noch hygrischer Kontakt	Holzfeuchte ; Temperatur
6		Überblattung + Kupferplatte	Mörtelbett	Keine Dämmung/ Luftspalt	Guter thermischer und hygrischer Kontakt	Holzfeuchte ; Temperatur

II.1 Vorhabensziele, Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

Variante 1, die sogenannte Überblattung, stellt die häufigste Art der Balkenkopfsanierung dar. Hier wurde der angegriffene Holzbalkenkopf großzügig abgeschnitten und durch neues Holz ersetzt. In der Außenwand dient ein Mörtelbett als Auflager. Abgesehen von der Unterseite befindet sich um den Balkenkopf herum, sowie an der Stirnseite, eine Mineralwolledämmung. Dies bedeutet, dass der Balkenkopf unterseitig einen guten thermischen, aber auch kapillaren, Kontakt zur Außenwand hat.

Die fotografische Ansicht in Abb. 26 zeigt Variante 1 mit Überblattung, Mörtelbett als Auflager und eine rund um den Balkenkopf angebrachte Dämmung.



Abb. 26 Variante 1 mit Überblattung, Mörtelbett als Auflager und eine rund um den Balkenkopf angebrachte Dämmung.

Zusätzlich wurde als abweichende Variante 1b eine Variante mit Überblattung, Mörtelbett als Auflager aber ohne umlaufende Dämmung realisiert. Dabei wurde darauf geachtet, dass zwischen Balkenkopf und Mauerwerk ein Luftspalt verbleibt (Abb. 27).



Abb. 27 Variante 1b mit Überblattung, Mörtelbett als Auflager aber ohne umseitige Dämmung.

Bei Variante 2 wurde der zerstörte Holzbalkenkopf abgeschnitten und ein Schlitzblech daran befestigt, das als neues Wandauflager auf einem Mörtelbett aufliegt (Abb. 28).



Abb. 28 Ansicht der Sanierungsvariante 2 mit Schlitzblech im eingebauten Zustand vor dem Verschließen der Maueröffnung.

Um das Schlitzblech herum wird eine Box aus Gipskarton aufgebaut, die dann mit Mineralwolle gefüllt und anschließend verschlossen wird (Abb. 29).



Abb. 29 Aufbau einer Box um das Schlitzblech der Variante 2 herum, die dann mit Mineralwolle gefüllt (links) und anschließend verschlossen wird (rechts).

Zusätzlich ist auch eine Variante aufgebaut worden, bei der keine Dämmung um das Blech herum eingebaut wurde. Hier wurde aus nahe liegenden Gründen auch kein Luftspalt zwischen Schlitzblech und Mauerwerk gelassen (Abb. 30)



Abb. 30 Ansicht der Sanierungsvariante 2 mit Schlitzblech, aber ohne Dämmung.

Variante 3 unterscheidet sich von Variante 1 in der Art der Auflage. Durch Verwendung einer hochdämmenden hydrophoben Aerogelmatte ist weder ein relevanter thermischer noch ein hygrischer Kontakt zum Mauerwerk gegeben. Um den Balkenkopf herum befindet sich keine Dämmung aber ein Luftspalt zum Mauerwerk. In Abb. 31 ist die Aerogelmatte unterhalb des Balkenkopfes gut zu erkennen.



Abb. 31 Variante 3 mit Überblattung und Aerogelmattenauflager. Um den Balkenkopf herum befindet sich keine Dämmung aber ein Luftspalt zum Mauerwerk.

Bei Variante 4 ist durch die Verwendung eines Elastomerauflagers zwar ein thermischer Kontakt gegeben aber kein hygrischer. Dies stellt die einzige Variante dar, bei der keinerlei Dämmstoff am Balkenkopf eingesetzt wird (Abb. 32).



Abb. 32 Variante 4 mit Überblattung und Elastomerauflager. Um den Balkenkopf herum befindet sich keine Dämmung aber ein Luftspalt zum Mauerwerk.

Als zusätzliche Variante 4b wurde auf den Luftspalt um den Balkenkopf herum verzichtet. In Abb. 33 ist deutlich die enge Anbindung an das Mauerwerk bzw. den Mörtel zu erkennen.



Abb. 33 Variante 4b mit Überblattung und Elastomerauflager. Um den Balkenkopf herum befindet sich keine Dämmung und in diesem Fall auch kein Luftspalt zum Mauerwerk.

Variante 5 zeichnet sich dadurch aus, dass nicht nur, wie bei Variante 3, eine Aerogelauflagermatte eingesetzt wird. Hier wird zusätzlich der Holzbalkenkopf wie bei Variante 1 und 2 rundum gedämmt. Die Aerogelmatten sind in Abb. 34 gut zu erkennen. Bei keiner anderen Variante ist ein derart geringer Einfluss der Außenwand auf den Balkenkopf zu erwarten.



Abb. 34 Variante 5 mit Überblattung, Aerogelmatte als Auflager und Dämmung rund um den Balkenkopf.

Bei Variante 6 wird dagegen ein gänzlich anderer Weg beschritten. Hier wird oberseitig eine 5 mm starke Kupferplatte aufgebracht, die vorne abgewinkelt ist, um auch die Stirnseite des Balkenkopfs abzudecken. Diese Kupferplatte reicht etwa 50 cm von der Außenwand weg in den Raum. Hinter dieser Sanierungsvariante steckt die Idee, eine künstliche Wärmebrücke zu erzeugen, die durch passive Wärmezufuhr für geringere Holzfeuchten sorgt. Wie aus Abb. 35 ersichtlich mussten für die Holzfeuchtemessungen die entsprechenden Bohrungen in der Kupferplatte vorbereitet werden.



Abb. 35 Variante 6 mit Überblattung und Mörtelbett als Auflager. Um den Balkenkopf befindet sich keine Dämmung, aber es ist als künstliche Wärmebrücke eine Kupferplatte angebracht, die zur Abdeckung der Stirnseite abgewinkelt ist.

Abb. 36 zeigt den Lageplan der Deckenbalken. In fetter Schrift ist die Sanierungsvariante mit aufgeführt und darüber die Bezeichnung. Jede Sanierungsvariante ist jeweils mit zwei Exemplaren auf der Nord- und auf der Südseite eingebaut worden. Sanierungsvariante 4, die Überblattung mit Elastomerauflager ohne Dämmung des Luftraums, wurde jeweils dreimal verbaut.

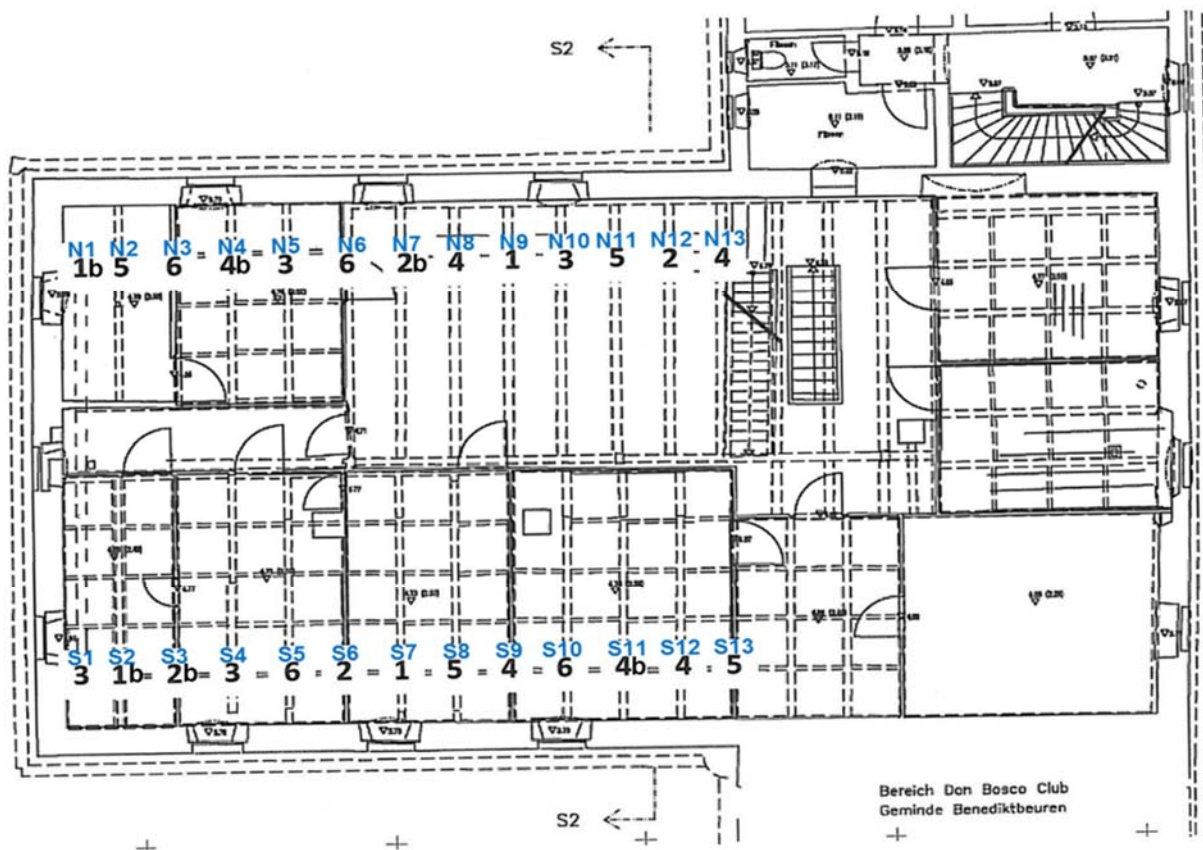


Abb. 36 Lageplan der Deckenbalken mit Angabe der zugehörigen Sanierungsvariante (schwarze Zahlen) und der Bezeichnung (blaue Beschriftung).

Bei allen Holzbalken wird die Holzfeuchte sowohl oberflächennah als auch in der Tiefe gemessen. Dazu wurden, wie bei der Holzfeuchtemessung üblich, jeweils zwei Edelstahlschrauben mit definiertem Abstand zueinander in die Holzbalken verschraubt und mit Messkabeln versehen. Für die oberflächennahe Messung wurden kurze Schrauben verwendet. Für die Erfassung der Holzfeuchte im Kern des Balkens wurden lange Schrauben eingesetzt, die außer im Bereich der Spitze mit einem Schrumpfschlauch isoliert wurden, um unbeeinflusst von der Feuchte im oberen Bereich möglichst nur die Kernfeuchte zu erfassen. In Abb. 37 ist die Ausführung der Holzfeuchtemessung beispielhaft dargestellt. Die Holzfeuchte wird in regelmäßigen Zeitabständen mit einem Messgerät auf Basis einer Widerstandsmessung von Hand gemessen, da eine automatische Erfassung der Holzfeuchte sehr aufwändig ist und die zu erfassenden Feuchtetransportvorgänge langsam ablaufen. An jeweils einem Balkenkopf auf der Nordseite wurde für jede Sanierungsvariante, außer Variante 2, die Balkenkopftemperatur auf der Stirnseite mit erfasst.



Abb. 37 Einbau der Holzfeuchtefühler für die Erfassung der oberflächennahen Feuchte (hier mit 48 nummeriert) und der Kernfeuchte des Balkenkopfes (Nr. 50).

Im Rahmen der energetischen Sanierung werden die Außenflächen mit einer Innendämmung versehen. Das Spektrum der untersuchten Dämmmaterialien reicht von traditionell bis innovativ: An den Innenwänden der Schäflerei finden sich althergebrachte Schilfrohrmatten ebenso wie kapillaraktive Mineralschaumplatten, die eingedrungene Feuchtigkeit zurück in den Innenraum transportieren sollen. Auch zwei hochdämmende Aerogel-Dämmputze werden einbezogen. Im IBP wurde zusammen mit dem Erfinder Herr Theuerkorn auch das patentierte Plattenmaterial aus Rohrkolben (lat. Typha) mit entwickelt: Es besitzt eine gute Dämmwirkung, ist von Natur aus schimmelresistent und bestens gegen Feuchtigkeit gerüstet. Neben den als Platten oder Putz aufgetragenen Dämmstoffen wurden auf der Südseite auch Schütt- und Einblasdämmstoffe hinter vorgeständerten Wandaufbauten appliziert. Auf der Ostseite wurde erst im September 2015 eine Innendämmung aus gemauertem Ziegel mit Perlitfüllung aufgebaut, die allerdings für diesen Beitrag ohne Belang ist, da auf dieser Seite keine in die Untersuchungen einbezogenen Balkenköpfe vorhanden sind. Abb. 38 zeigt die eingebauten Innendämmvarianten mit Angabe des Dämmstoffmaterials und des Einbauzeitpunktes.

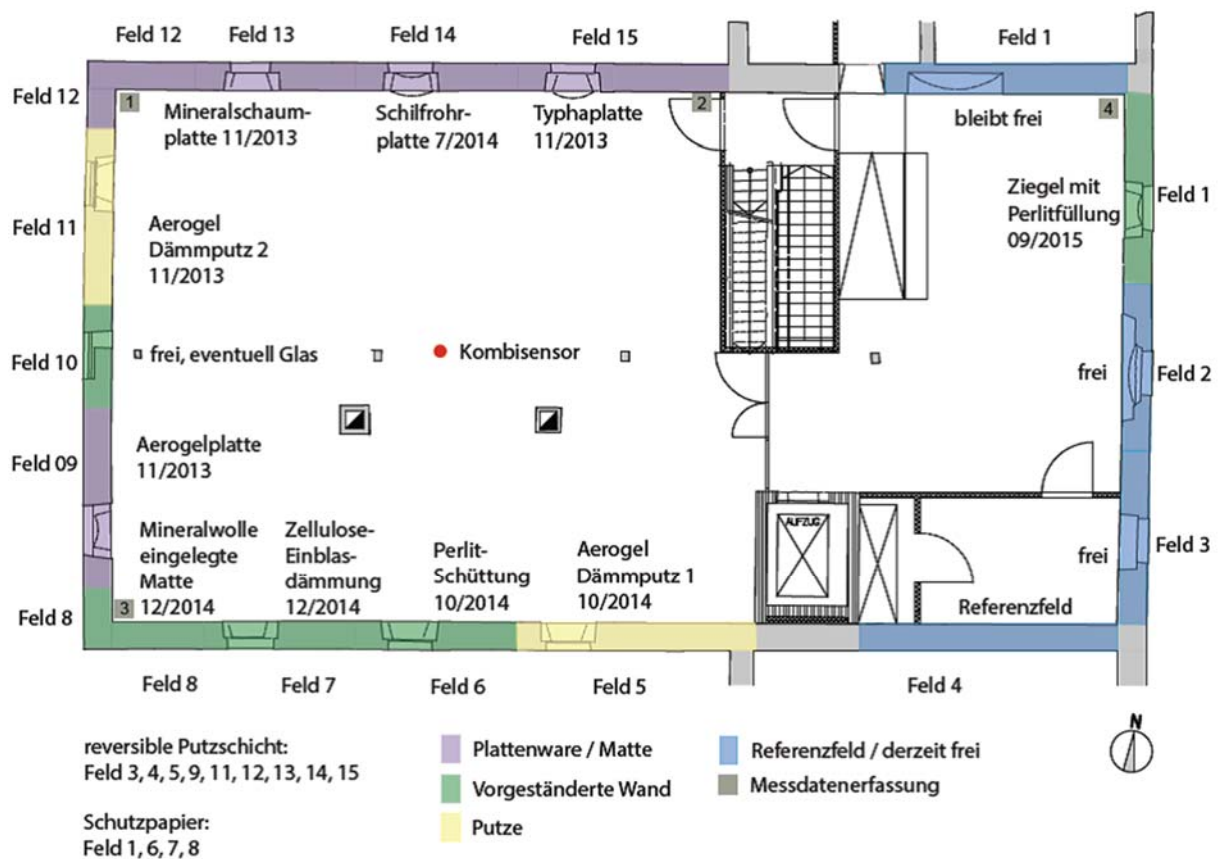


Abb. 38 In der Alten Schäfflerei eingebaute Innendämmvarianten mit Angabe des Dämmstoffmaterials und des Einbaupunktes.

Da bei der Alten Schäfflerei demonstriert werden soll, wie eine energetische Sanierung möglichst ohne Verlust an erhaltenswerter Substanz erfolgen kann, wurde bei der Applikation auf eine reversible Anbringung der Innendämmsysteme Wert gelegt. Dazu wurde als Untergrund für die Innendämmungen ein spezielles Putzsystem entwickelt, das möglichst auch nach Jahren noch schadensfrei vom Originaluntergrund entfernt werden kann. Auf dieses System können dann die Innendämmungen in bewährter Art und Weise vollflächig aufgeklebt werden. Bei den Schütt- und Einblasdämmstoffen hinter der vorgeständerten Wand ist eine derartige Schicht nicht erforderlich, hier wird die Originaloberfläche lediglich durch zwei Lagen Japanpapier geschützt.

Dachbalken im Kopfbau der Alten Schäfflerei

Bei der Abdeckung des Daches im Kopfbau der Alten Schäfflerei zeigte sich, dass auch hier einige Holzbalkenköpfe geschädigt waren. Insgesamt war aber der Zustand der Balkenköpfe wesentlich besser als bei der darunter liegenden Deckenlage. Dies ist sicher in der deutlich günstigeren Situation dieser Balkenköpfe begründet. Für die vereinzelt geschädigten Holzbalkenköpfe sind wahrscheinlich lokale Undichtheiten des Daches die Ursache. Im Gegensatz zu den Holzbalken der Deckenlage können hiermit auch alte ungeschädigte Holzbalkenköpfe in die Untersuchungen einbezogen werden. Abb. 39 zeigt die Ansicht der

Balkenköpfe nach Abdeckung des Daches auf der Südseite. Nur wenige Balkenköpfe sind so geschädigt, dass eine Sanierung erforderlich ist.



Abb. 39 Ansicht der Balkenköpfe nach Abdeckung des Daches auf der Südseite.

Auf der Nordseite sind deutlich mehr Holzbalkenköpfe geschädigt, aber auch hier konnten einige erhalten bleiben. Eine Ansicht der Balkenköpfe nach Abdeckung des Daches auf der Nordseite zeigt Abb. 40. Hier sind bereits einige Holzbalkenköpfe saniert.



Abb. 40 Ansicht der Balkenköpfe nach Abdeckung des Daches auf der Nordseite. Hier sind bereits einige Holzbalkenköpfe saniert.

Die Holzbalken an der Nordwest- und der Südwestaußenecke zeigen beide einen massiven Feuchteschaden, wie aus Abb. 41 ersichtlich. Dies ist sicher in der typischen Wärmebrückeneigenschaft der Außenecke mitbegründet.



Abb. 41 Ansicht der stark geschädigten Balkenköpfe an der Nordwest- (linkes Bild) und der Südwestaußenecke (rechtes Bild).

II.1 Vorhabensziele, Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

Auf beiden Dachseiten wurden für die Messung des Verlaufs der Holzfeuchte je vier alte unsanierte und vier sanierte Holzbalkenköpfe ausgewählt. Die Messungen erfolgen hier ganz analog wie bei den Deckenbalken, mit je einer Widerstandsmessung oberflächennah und einer in der Tiefe. Die Messschrauben wurden aufgrund der anderen Zugänglichkeit nicht von oben sondern seitlich in die Balken gesetzt (Abb. 42).



Abb. 42 Ansicht der Balkenköpfe auf der Südseite mit seitlich angebrachten Messschrauben zur Ermittlung der Holzfeuchten im oberflächennahen Bereich und im Balkenkopfkern, an neu sanierten und an alten unsanierten Balkenköpfen.

Ergebnisse der Untersuchungen

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Untersuchungen zunächst für die Holzbalkendecke im Kopfbau der Alten Schäferei dargestellt und beschrieben. Im Anschluss daran folgt die Beschreibung der Ergebnisse für die Dachbalken der alten Schäferei.

Holzbalkendecke im Kopfbau der Alten Schäferei

Die gemessenen Verläufe der Holzfeuchten werden über den gesamten Messzeitraum von vier Jahren dargestellt. Dabei ist die Periode des Einbaus der sanierten Holzbalkenköpfe (bis Mitte Mai 2012, einschließlich des Verschließens der Öffnungen) hellblau hinterlegt und der Zeitpunkt ab Inbetriebnahme der Beheizung (ab Mitte November 2013) orange. Ab dem schraffierten Bereich wurde der Innenraum auf konstant 50 % r.F. befeuchtet. Die Kennzeichnung der Messstellen erfolgt dabei analog der Nummerierung in Abb. 36 (N1-N13) mit anschließender Angabe der Sanierungsvariante (1-6) und des Messortes (HFO = Holzfeuchte Oberfläche; HFT = Holzfeuchte in der Tiefe).

Für die Sanierungsvariante 1, die Überblattung mit Mörtelaufleger und umseitiger Dämmung ohne Luftspalt, zeigt Abb. 43 den Verlauf der Holzfeuchte über vier Jahre. Ausgehend von ca. 22-27 M.-% trocknen die Balkenköpfe über den gesamten Zeitraum mit nur geringen jahreszeitlichen Schwankungen kontinuierlich ab und erreichen zu Ende der Messperiode Werte von 12-17 M.-%. Tendenziell liegen die Messwerte des Balkens auf der Südseite etwas niedriger als auf der Nordseite.

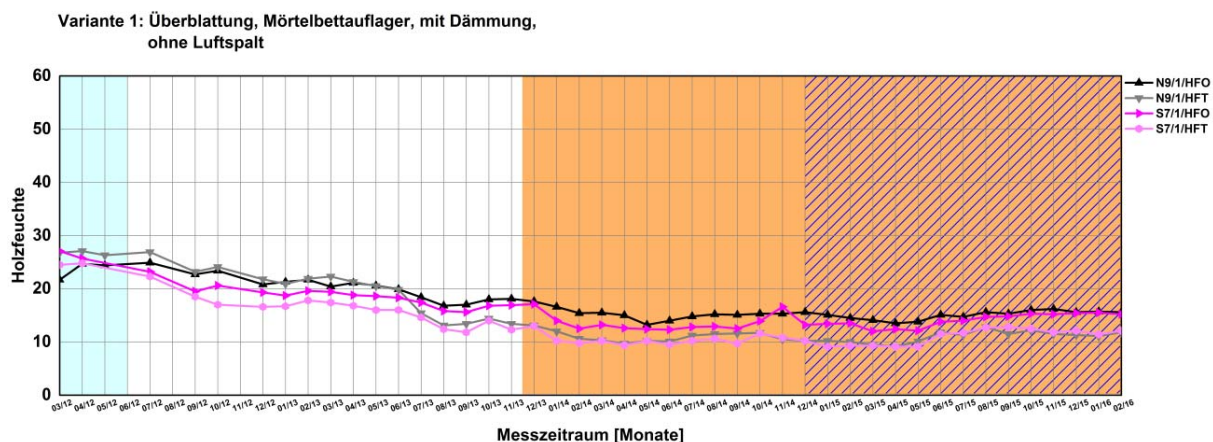


Abb. 43 Zeitverläufe, der an den Balkenköpfen gemessenen Holzfeuchten der Sanierungsvariante 1 für die Süd- und Nordseite über einen Zeitraum von vier Jahren.

Für die Sanierungsvariante 1b, die Überblattung mit Mörtelaufleger ohne Dämmung aber mit Luftspalt, zeigt Abb. 44 den Verlauf der Holzfeuchte über vier Jahre. Ausgehend von ca. 20-27 M.-% trocknen auch hier die Balkenköpfe über den gesamten Zeitraum kontinuierlich ab und erreichen zu Ende der Messperiode Werte von 10-17 M.-%. Hier zeigt der Balkenkopf N12/1 oberflächennah zunächst nur eine geringfügige Abtrocknung, um dann von April bis August 2014 sehr schnell von 19 auf unter 10 M.-% abzutrocknen. Tendenziell liegen die Messwerte dieses Balkens auf der Südseite etwas höher als auf der Nordseite.

II.1 Vorhabensziele, Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

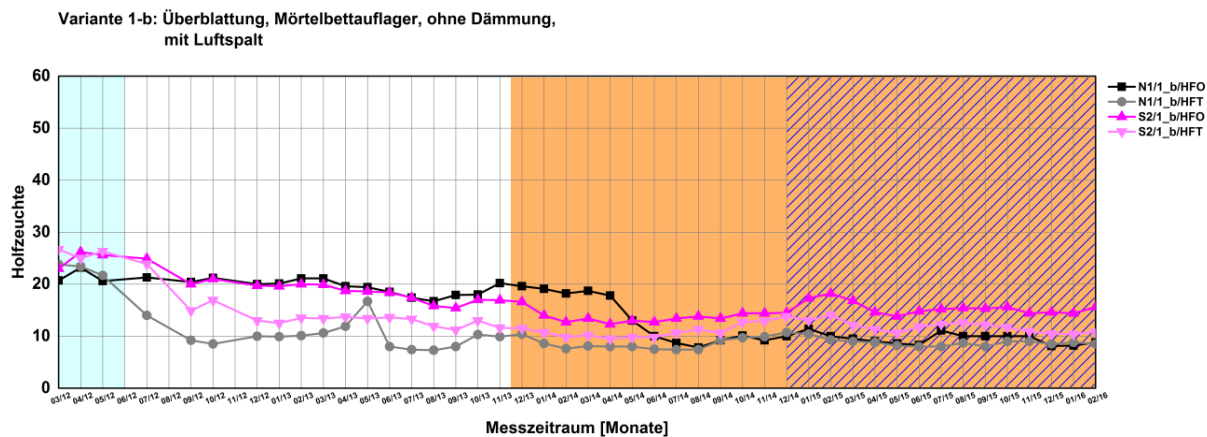


Abb. 44 Zeitverläufe der an den Balkenköpfen gemessenen Holzfeuchten der Sanierungsvariante 1b für die Süd- und Nordseite über einen Zeitraum von vier Jahren.

Bei der Sanierungsvariante 2 starten die gemessenen Holzfeuchten, mit Ausnahme der Oberflächenfeuchtemessung von N12, auf die später eingegangen wird, bei 19-25 M.-% (Abb. 45). Hier findet in den ersten gut anderthalb Jahren nur eine sehr geringfügige Trocknung statt. Mit Beginn der Beheizung ist dagegen eine sehr schnelle Trocknung auf unter 15 M.-% zu beobachten. Diese schnelle Abtrocknung betrifft auch Variante N12/2/HFO, welche um mehr als 30 M.-% auf knapp unterhalb 20 M.-% abtrocknet. Diese im Vergleich zu Variante 1 deutlich stärkere Beschleunigung der Trocknung ist zu erwarten, da diese bei Variante 2 nicht am metallenen „Balkenkopf“ stattfindet, sondern am Ende des verbliebenen Balkens und damit im Fußbodenbereich des Raumes.

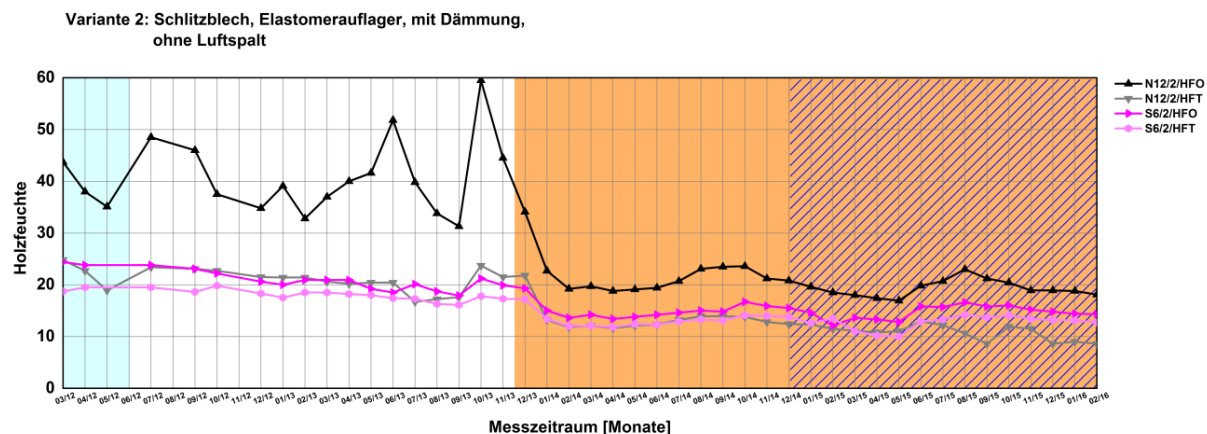


Abb. 45 Zeitverläufe der an den Balkenköpfen gemessenen Holzfeuchten der Sanierungsvariante 2 für die Süd- und Nordseite über einen Zeitraum von vier Jahren.

Variante 2b, die Schlitzblechvariante ohne umseitige Dämmung des Schlitzbleches (Abb. 46), zeigt ein nahezu gleiches Verhalten wie Variante 2 mit Dämmung. Die Wärmebrückenwirkung des Schlitzbleches auf das Ende des verbliebenen Balkens scheint somit vernachlässigbar gering zu sein.

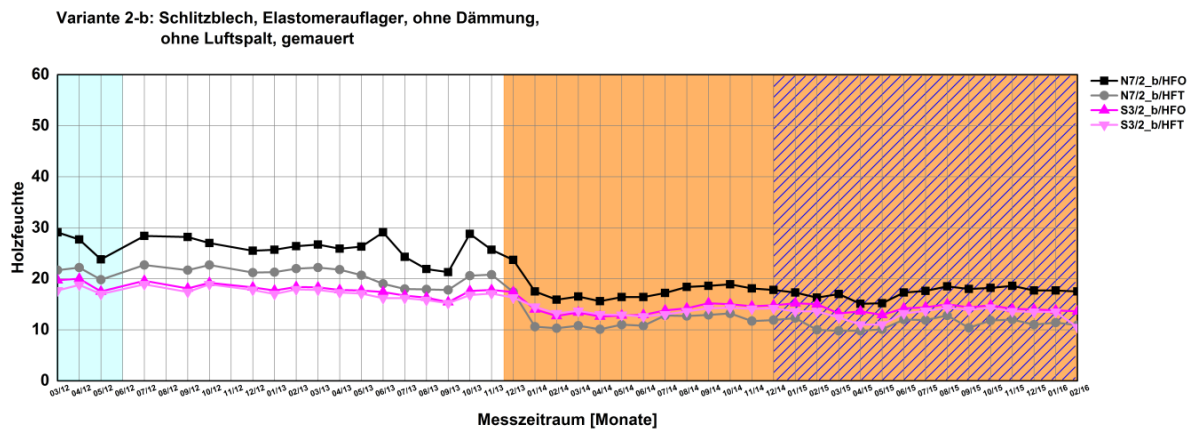


Abb. 46 Zeitverläufe der an den Balkenköpfen gemessenen Holzfeuchten der Sanierungsvariante 2b, die keine Dämmung um das Schlitzblech aufweist, für die Süd- und Nordseite über einen Zeitraum von vier Jahren.

Bei Sanierungsvariante 3, der Überblattung mit Nanogelauflager und ungedämmten Luftspalt um den Balkenkopf, findet im Balkenkopf S4 und N5 in den ersten 4 Monaten zunächst eine geringe Auffeuchtung statt (Abb. 47). In der Folge trocknen alle Balkenköpfe langsam kontinuierlich ab und erreichen gegen Ende der Messperiode Werte von unter 20 M.-%. Auf das deutlich abweichende Verhalten von N5 wird später eingegangen.

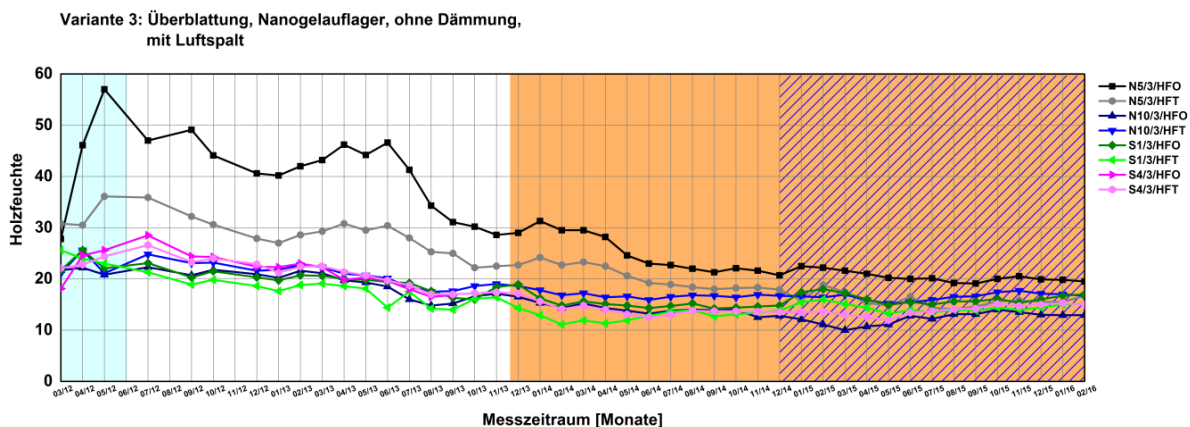


Abb. 47 Zeitverläufe der an den Balkenköpfen gemessenen Holzfeuchten der Sanierungsvariante 3 für die Süd- und Nordseite über einen Zeitraum von vier Jahren.

Bei der mit einem Elastomer als Auflager versehenen Variante 4, die keine umseitige Dämmung besitzt, fällt N13 dadurch auf, dass anfänglich ein deutlicher Anstieg des Wassergehaltes von ca. 24 M.-% auf 33 M.-% in der Tiefe und 38 M.-% oberflächennah zu beobachten ist (Abb. 48). Von da an findet, wie auch bei den anderen Holzbalkenköpfen dieser Sanierungsvariante, ein kontinuierliches Abtrocknen auf 16-11 M.-% statt.

II.1 Vorhabensziele, Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

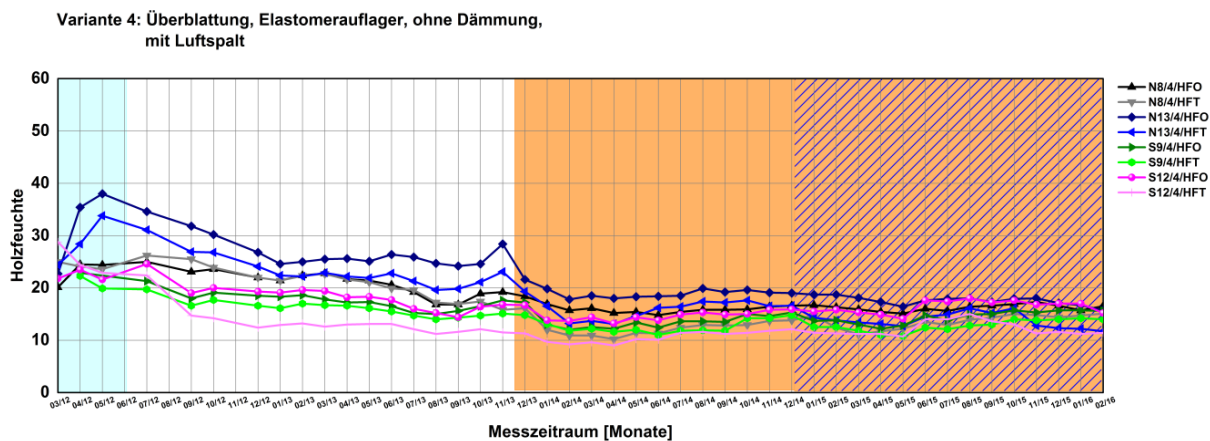


Abb. 48 Zeitverläufe der an den Balkenköpfen gemessenen Holzfeuchten der Sanierungsvariante 4 für die Süd- und Nordseite über einen Zeitraum von vier Jahren.

Bei der Sanierungsvariante 4b, Balkenkopf ohne Luftspalt eingebaut, ist dagegen ein völlig anders Verhalten zu beobachten (Abb. 49). Hier findet, ausgehend von etwa 20 M.-%, in den ersten zwei Monaten eine deutliche Auffeuchtung statt. Dabei werden hohe Wassergehalte von bis über 60 M.-% erreicht. Danach findet in den nächsten vier Monaten eine deutliche Abtrocknung statt, gefolgt von einer langsameren. Zum Ende der Messperiode trocknen die Balkenköpfe auch bei dieser Variante auf um die 15 M.-% und in einem Fall unter 10 M.-% ab.

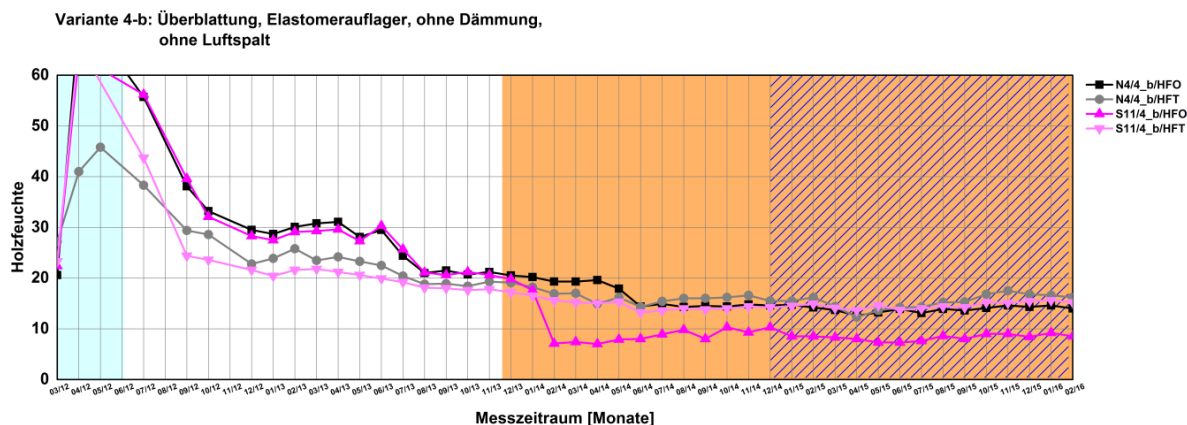


Abb. 49 Zeitverläufe der an den Balkenköpfen gemessenen Holzfeuchten der Sanierungsvariante 4b ohne Luftspalt für die Süd- und Nordseite über einen Zeitraum von vier Jahren.

Bei Variante 5, Nanogeldämmung um den Balkenkopf und als Auflager, findet in den ersten zwei Monaten zunächst eine geringfügige Auffeuchtung statt (Abb. 50). Im Anschluss daran trocknen die Balkenköpfe kontinuierlich ab und erreichen alle Werte von deutlich unterhalb 20 M.-%. Eine Ausnahme bildet Balkenkopf S13 mit seiner deutlichen Auffeuchtung in den ersten anderthalb Jahren. Eine Begründung dafür erfolgt später.

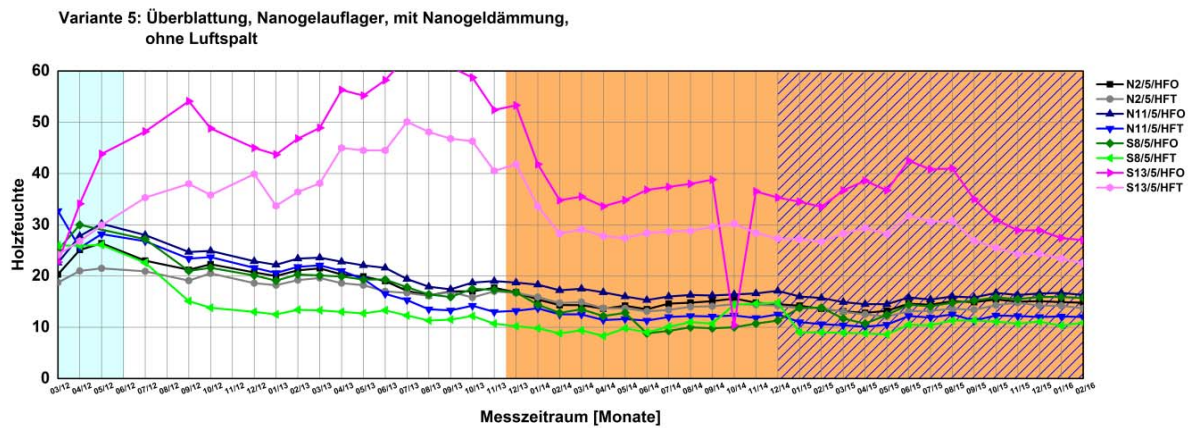


Abb. 50 Zeitverläufe der an den Balkenköpfen gemessenen Holzfeuchten der Sanierungsvariante 5 für die Süd- und Nordseite über einen Zeitraum von vier Jahren.

Variante 6 (Abb. 51), bei der ein abgewinkeltes Kupferblech als künstliche Wärmebrücke zur Erhöhung der Temperatur am Balkenkopf eingesetzt wurde, zeigt bei allen Balkenköpfen ein kontinuierliches Austrocknen. Ausgehend von 20-29 M.-% trocknen alle Köpfe bis auf eine Feuchte von um die 15 M.-% aus.

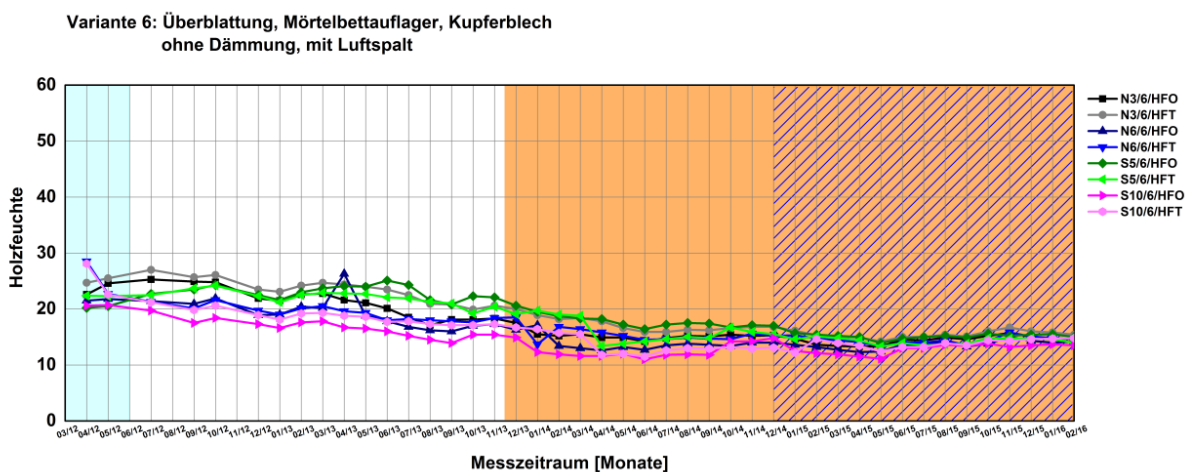


Abb. 51 Zeitverläufe der an den Balkenköpfen gemessenen Holzfeuchten der Sanierungsvariante 6 für die Süd- und Nordseite über einen Zeitraum von vier Jahren.

Im Folgenden werden alle Sanierungsvarianten zum besseren Vergleich in einem Diagramm dargestellt. Dabei sind die Zeitpunkte des Einbaus der Sanierungs-Varianten und der Innendämmsysteme, des Starts der Beheizung und der Befeuchtung des Raums genauso mit eingezeichnet wie die Sanierung des Außenputzes zur Verringerung der Schlagregenaufnahme der Westfassade. Hier werden auch die in ihrem Feuchteverhalten besonders auffälligen Balkenköpfe genauer betrachtet und die dafür wahrscheinlich verantwortlichen Ursachen beschrieben. Abb. 52 zeigt die Verläufe der oberflächennah gemessenen Holzfeuchten (oben) und der im Kernbereich gemessenen (unten) für alle sanierten Holzbalkenköpfe auf der Nordseite.

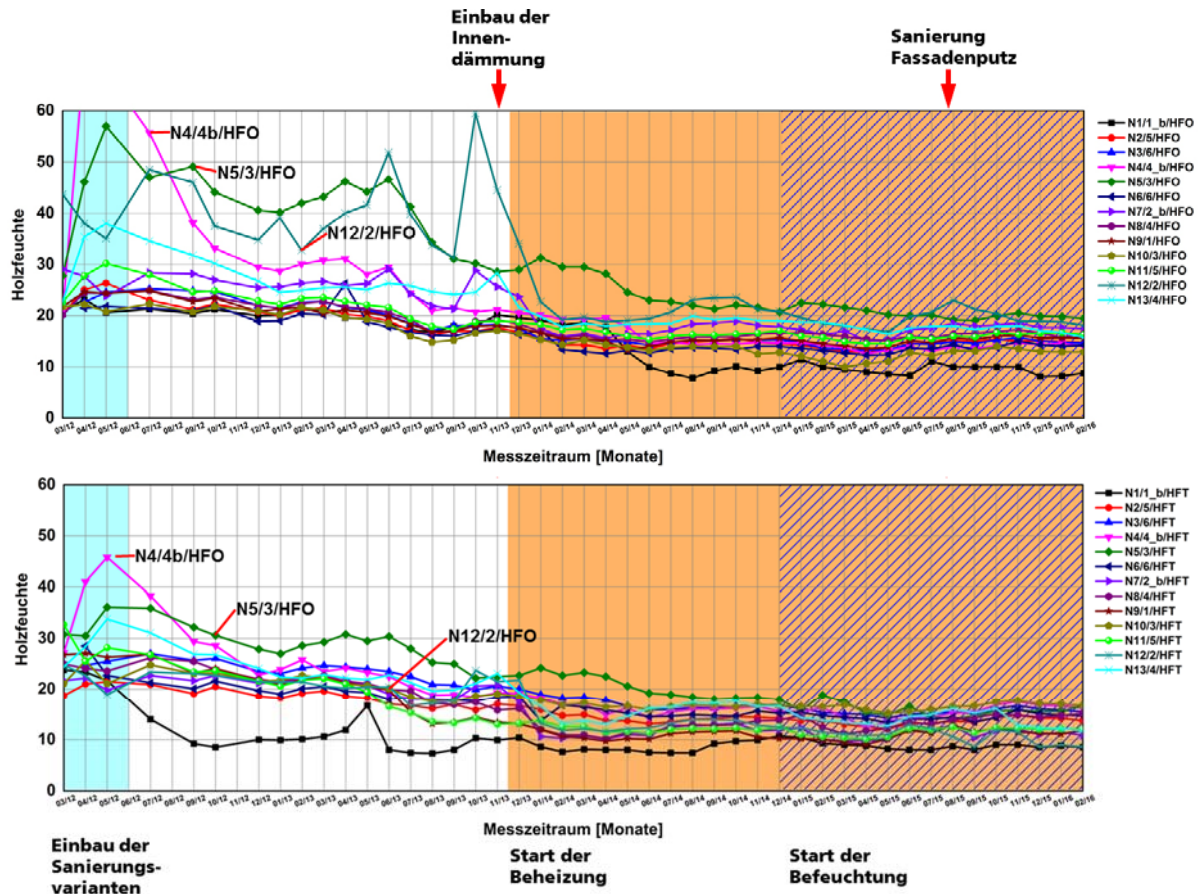


Abb. 52 Zeitverläufe der an den Balkenköpfen gemessenen Holzfeuchten auf der Nordseite. Für den oberflächennahen Bereich (oben) und für den Kernbereich (unten).

Werden die oberflächennah gemessenen Holzfeuchten betrachtet, wird ersichtlich, dass die Anfangsfeuchte zwischen ca. 20-30 M.-% liegt. Auffällig sind dabei die Varianten N4/4/HFO, N5/3/HFO und N12/2/HFO. Bei Variante N4/4b/HFO steigt die Holzfeuchte anfangs sehr stark an und erreicht oberflächennah Werte von über 60 M.-%. Dies dürfte darin begründet sein, dass hier beim Einbau der Balken zwar auf Elastomer aufliegt, zur Füllung der Öffnung aber rundherum eine große Mörtelmenge und damit Einbaufeuchte eingebracht wurde (Vergl. Abb. 33). Im Laufe des Sommers findet aber eine schnelle Abtrocknung statt. In etwas abgeschwächter Weise wird in der Tiefe dieses Holzbalkenkopfes das gleiche Anfangsverhalten gemessen. Bei Variante N5/3 dürfte das anfängliche Ansteigen der Holzfeuchte ebenfalls in der hohen eingebrachten Einbaufeuchte begründet sein (Abb. 53). Allerdings findet hier ein deutlich langsames Abtrocknen statt. Bei Variante N12/2 handelt es sich um die Sanierungsvariante mit Schlitzblech. Hier wird bereits zu Beginn eine hohe Holzfeuchte von über 40 M.-% gemessen und es findet über eine längere Periode keine merkliche Abtrocknung statt, wobei erstaunlich große Feuchteschwankungen auftreten. Beim Einbau wird das Schlitzblech in Dämmung eingebettet (Abb. 29), die dann mit einer Gipskartonschicht abgedeckt wird. Eine Auffeuchtung durch Einbaufeuchte ist hier eigentlich ebenso wenig zu erwarten wie eine merkliche Wärmebrückenwirkung durch das Schlitzblech.



Abb. 53 Einbausituation der Variante N5/3 mit viel Mörtel am Balkenkopf.

In der unbeheizten Periode trocknen auf der Nordseite mit Ausnahme der drei bereits genannten Varianten alle Balkenköpfe bis auf Holzfeuchten von 20 M.-% und darunter aus. Dies gilt sowohl in Bezug auf die oberflächennah gemessenen Feuchten als auch für die im Balkenkopf kern. Auf der nordorientierten Wand wurden im November 2013 die mineralische kapillaraktive Dämmplatte sowie die Typhaplatte aufgebracht. Die bei deren Applikation eingebrachte Feuchte macht sich bei den meisten Balkenkopfvarianten durch ein leichtes Ansteigen der gemessenen Holzfeuchten bemerkbar, etwas augenscheinlicher bei den Oberflächenfeuchten. Ein deutlicher Anstieg wird bei den gemessenen Oberflächenfeuchten von N12/2 und N7/2, beide Varianten versehen mit Schlitzblech, erkennbar. Dies ist sicher darin begründet, dass hier das Holzende und damit die Messstellen nicht im Außenwandaufbau sondern noch innerhalb des Innenraumes liegen. Es ist deshalb nicht überraschend, dass sie besonders stark und schnell auf, den in der Applikation begründeten, starken Anstieg der Raumluftfeuchte reagieren. Mit Beginn der Beheizung findet ein weiteres leichtes Absinken der Holzfeuchte statt. Auffällig ist, das nun geänderte Verhalten von N12/2 bei der Oberflächenfeuchte. Diese reiht sich in die anderen ein und zeigt im Gegensatz zu davor keine auffälligen Schwankungen mehr. Offensichtlich waren die Raumlufttemperaturschwankungen und die damit verbundenen Änderungen der Raumluftfeuchte ursächlich für das im Vergleich gänzlich andere Verhalten.

In Abb. 54 ist der Verlauf der am Balkenkopf gemessenen Temperaturen dargestellt. Im Gegensatz zur Winterperiode laufen die Temperaturen aller vermessenen Varianten im Sommer nahezu gleich. Für den ausgewählten Zeitraum im Winter (Abb. 55) lassen sich die einzelnen Varianten in ihrem Temperaturverhalten deutlich unterscheiden. Die niedrigsten Temperaturen werden bei den zwei Varianten ohne Dämmung um den Balkenkopf

gemessen (Sanierungsvariante 3 und 4). Eine deutlich höhere Temperatur ergibt sich bei der Sanierungsvariante 1 mit Mörtelbettauflager aber Mineralwolledämmung um den Balkenkopf. Variante 5 unterscheidet sich davon durch das Auflager aus Dämmmatte mit Nanogel, wodurch eine weitere Erhöhung der Holzbalkenkopftemperatur bewirkt wird. Die höchste Temperatur ergibt sich bei der Variante mit dem Kupferblech, obwohl hier die Luftspalte um den Balkenkopf ungedämmt blieben. Hier macht sich die Wirkung der künstlichen Wärmebrücke eindeutig positiv bemerkbar.

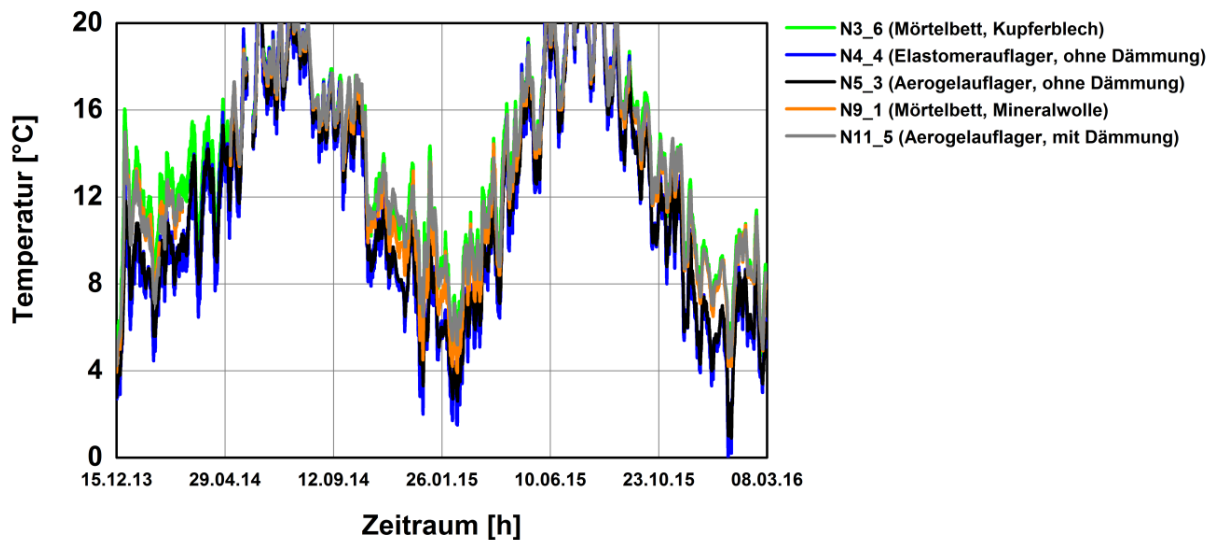


Abb. 54 Verlauf der am Balkenkopf über etwas mehr als zwei Jahresperioden gemessenen Temperaturen.

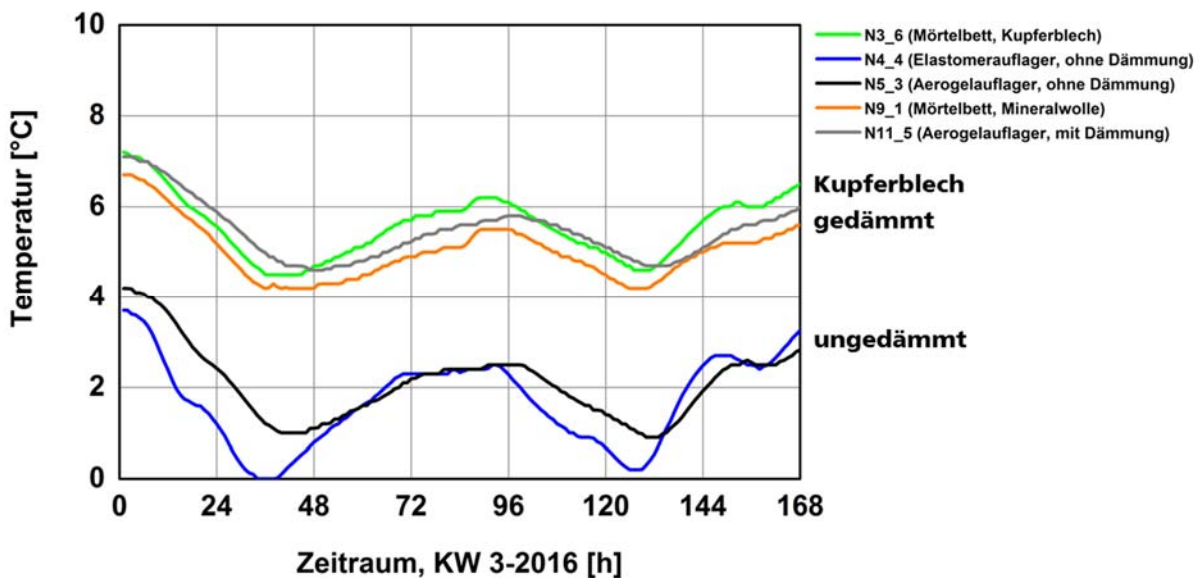


Abb. 55 Verlauf der am Balkenkopf gemessenen Temperaturen für die relativ kalte dritte Kalenderwoche im Januar 2016.

Auf der Südseite (Abb. 56) sind zwei Balkenköpfe in ihrem Verhalten besonders auffällig. Beim Balkenkopf S11/4 ist ein starker Anstieg der Holzfeuchte zu beobachten, der mit über 60 M.-% im April 2012 seinen Höhepunkt erreicht. Anschließend findet aber eine kontinuierliche Abtrocknung statt. Im Balkenkopfinneren ergibt sich in leicht abgeschwächtem Maße das gleiche Verhalten. Wird die Einbausituation des Balkens betrachtet (Abb. 57), wird schnell klar, dass hier eine besonders große Menge an Einbaufeuchte eingebracht wurde, womit diese anfängliche Auffeuchtung nachvollziehbar ist.

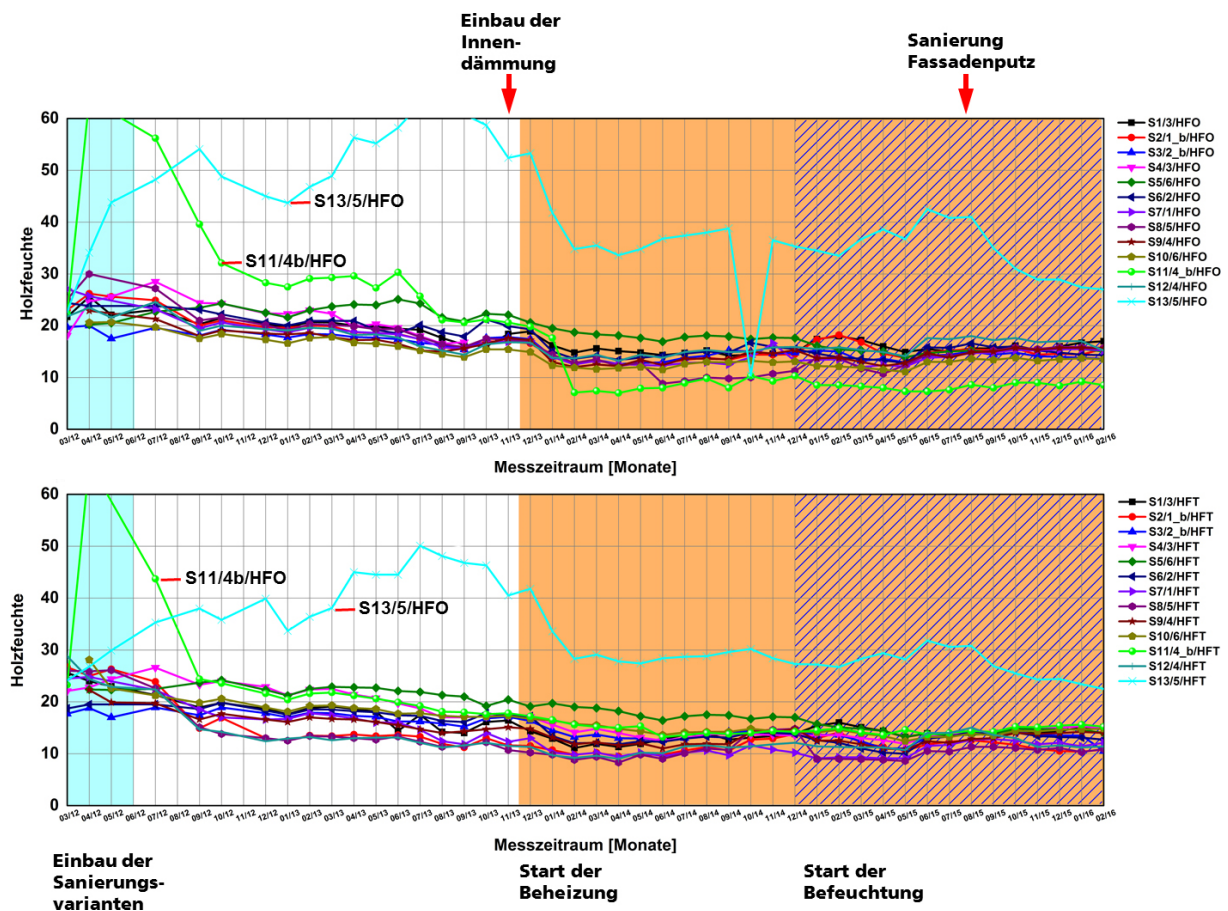


Abb. 56 Zeitverläufe der an den Balkenköpfen gemessenen Holzfeuchten auf der Südseite. Oben sind die Messwerte für den oberflächennahen Bereich und im unteren Diagramm für den tieferen Bereich dargestellt.



Abb. 57 Einbausituation der Variante S11/4. Hier erfolgte eine besonders großzügige Mauerwerksöffnung mit dementsprechend üppiger Ausmauerung unter Verwendung größerer Mengen feuchten Mörtels.

Beim Balkenkopf S13/5 ergibt sich dagegen ein völlig anderes Verhalten. Hier nimmt die Holzfeuchte langsam aber über einen längeren Zeitraum deutlich zu, mit einem Maximum von über 60 M.-% in den Sommermonaten Juli bis September 2014, also mehr als ein Jahr nach Einbau des überplatteten Balkenkopfes. Im Balkenkopffinnern werden zwar nur maximal 50 M.-% erreicht, es zeigt sich aber das gleiche zeitliche Verhalten. Bei der Ursachenanalyse hat sich herausgestellt, dass dieser Balkenkopf genau in der Ecke zum angrenzenden Jugendtreff liegt (Abb. 36), der in diesem Zeitraum ebenfalls saniert wurde. Direkt an dieser Ecke befand sich ein undichtes Fallrohr, das über einen längeren Zeitraum eine kontinuierliche Befeuchtung des Mauerwerks verursachte und damit auch die Feuchte des Holzbalkenkopfes massiv beeinflusste. Nach der Reparatur des Fallrohres scheint hier die Trocknung nur ganz langsam abzulaufen.

Insgesamt ergibt sich auf der Südseite ein ähnliches Verhalten, wie auf der Nordseite. Auch hier ist mit Beginn der Einbauarbeiten für die Innendämmungen im Oktober/ November 2013 ein leichter Feuchteanstieg zu beobachten, obwohl zu diesem Zeitraum auf der Südseite noch keine Innendämmungen verbaut wurden. Dies zeigt, dass hier als Hauptbefeuchtungsmechanismus die durch Einbau der Innendämmungen erhöhte Raumluftfeuchte ursächlich war. Folgerichtig macht sich zwar der Einbau des Aerogelputzes auf der Südseite im Oktober 2014 als Feuchteanstieg bemerkbar, nicht aber die Installation der Trockenbauvarianten mit Zellulose-Einblasdämmung und Perlitschüttung im Dezember 2014. Alle Balkenköpfe auf der Südseite trocknen bis auf die erwähnten kurzfristigen Feuchteerhöhungen kontinuierlich ab und erreichen Holzfeuchten von unter 20 M.-%. Sie liegen damit erwartungsgemäß etwas niedriger als auf der Nordseite. Die einzige Ausnahme bildet hier der Balkenkopf S13/5, bei dem fast vier Jahre nach der Sanierung oberflächennah immer noch Holzfeuchten von merklich über 30 M.-% gemessen

werden. Im Balkenkopfkern liegen zu diesem Zeitpunkt auch noch Feuchten von nur wenig unterhalb dieser 30 M.-% vor. Leider ist dieser Balkenkopf für eine nähere Untersuchung der Ursachen zurzeit nicht erreichbar.

Für einen besseren Vergleich des Einflusses der unterschiedlichen Sanierungsvarianten wurden deren Verläufe gemittelt (Abb. 58). Bei dieser Mittelwertbildung wurden die oben beschriebenen „Ausreißer“ nicht berücksichtigt.

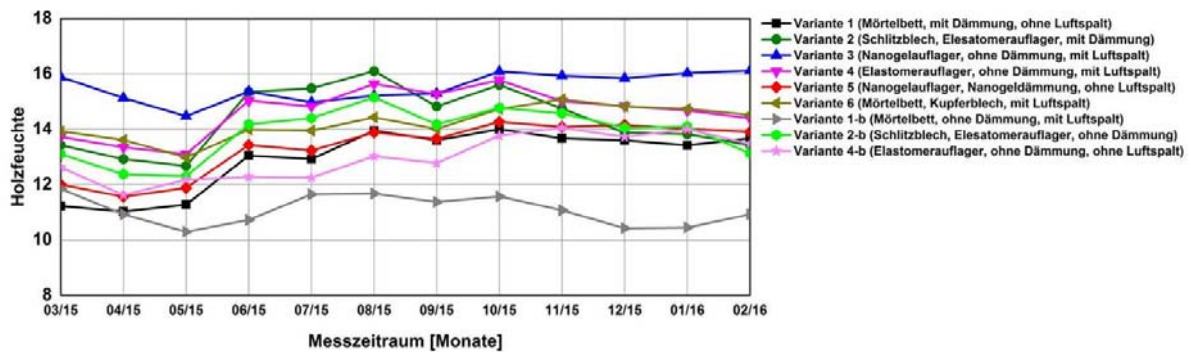


Abb. 58 Verlauf der Mittelwerte der einzelnen Sanierungsvarianten.

Es lässt sich erkennen, dass bei allen Balkenköpfen der Wassergehalt das ganze Jahr über unterhalb von 16 M.-% liegt, also in einem völlig unkritischen Bereich. Tendenziell gibt es einen leichten Anstieg von Mai auf Juni 2015. Die höchste Feuchte weist dabei Variante 2 mit Schlitzblech auf. Bei dieser Variante ist genaugenommen kein echter Vergleich möglich, da hier prinzipbedingt die Messstellen nicht innerhalb des Mauerwerks sondern im raumseitigen Balkenbereich liegen. Die geringste Feuchte zeigt Variante 1b ohne Dämmung und mit Luftspalt. Alle anderen Varianten liegen in einem engen Bereich nahe beieinander, mit Endwerten von 13-14 M.-%.

Insgesamt stimmen die Ergebnisse im Großen und Ganzen mit den Erwartungen überein, der Einfluss der unterschiedlichen Auflagervarianten und seitlichen Dämmungen des Kopfes ist aber deutlich geringer ausgeprägt als erwartet. Dies kann darin begründet sein, dass erst eine relativ kurze Messperiode vorliegt, bei der eine Befeuchtung im Innenraum gegeben ist. Bis dahin war die Feuchtelast äußerst gering und hauptsächlich durch die Feuchteabgabe weniger Personen während der Baumaßnahmen sowie dem etwas größeren Feuchteeintrag durch die Applikation der Innendämmungen bestimmt.

Zur Überprüfung wurde für drei dieser Varianten versucht, den Verlauf des Wassergehaltes im Balkenkopf mithilfe von WUFI®-2D nachzurechnen. Als Randbedingungen dienten dazu die in der Nähe gemessenen Verläufe des Außenklimas und das gemessene Innenklima. Die Berechnungen wurden für Variante 1b, Variante 3 und Variante 5 durchgeführt. Dabei zeigen sich bei Variante 1b deutlich geringere Schwankungen. Insgesamt verlaufen die berechneten Kurven genau innerhalb der gemessenen (Abb. 59).

II.1 Vorhabensziele, Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

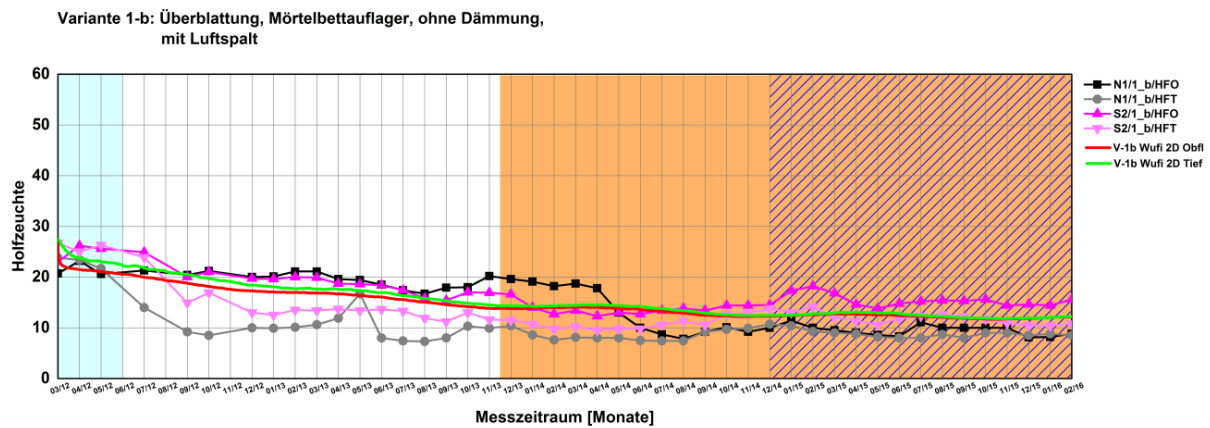


Abb. 59 Verlauf der berechneten Wassergehalte im Kern (grüne Linie) und in Oberflächennähe (rote Linie) des Balkenkopfes der Sanierungsvariante 1b im Vergleich zu den Messwerten.

Bei Variante 3 mit Nanogelauflager ergibt sich ein ähnliches Bild. Dabei liegen die berechneten Kurven aber leicht unterhalb der gemessenen (Abb. 60), die „Ausreißer“-Kurven ausgenommen.

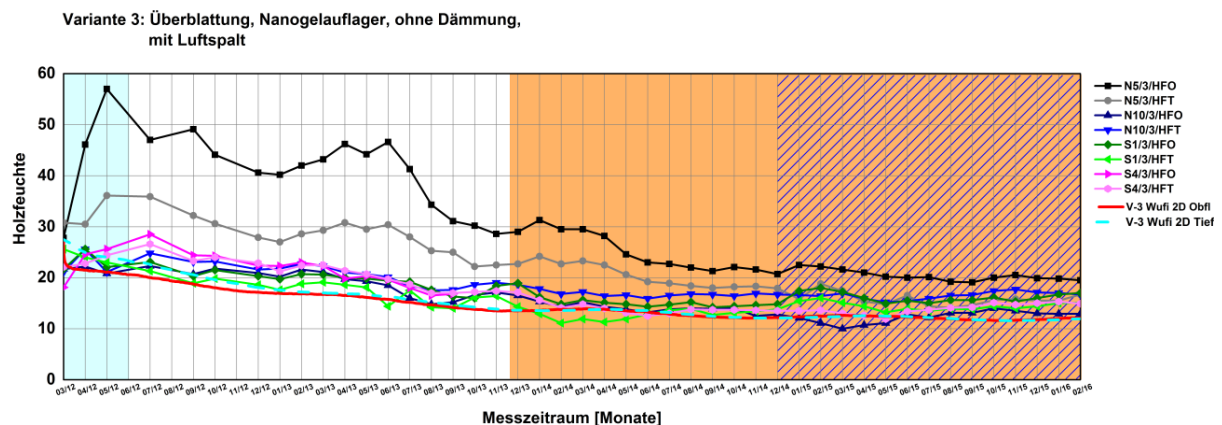


Abb. 60 Verlauf der berechneten Wassergehalte im Kern (blaue Linie) und in Oberflächennähe (rote Linie) des Balkenkopfes der Sanierungsvariante 3 im Vergleich zu den Messwerten.

Bei Variante 5 liegen die berechneten Kurven, bis auf die Anfangsperiode bzw. ab Mitte 2013, genau im Pulk der gemessenen Verläufe, den von außen durch das Fallrohr befeuchteten Balkenkopf ausgenommen (Abb. 61).

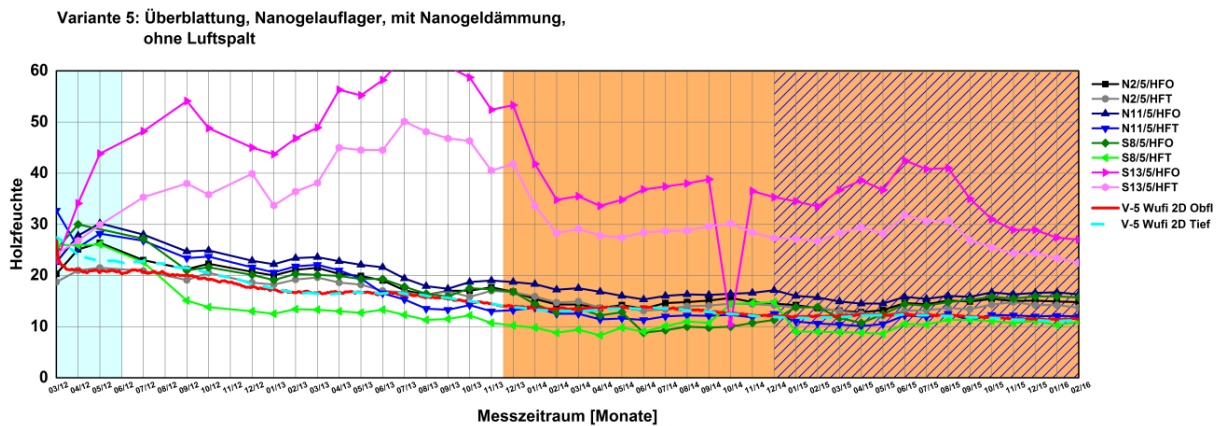


Abb. 61 Verlauf der berechneten Wassergehalte im Kern (blaue Linie) und in Oberflächennähe (rote Linie) des Balkenkopfes der Sanierungsvariante 5 im Vergleich zu den Messwerten.

Im Folgenden sind nur die berechneten Kurven dargestellt. Abb. 62 zeigt die Temperaturverläufe der drei berechneten Varianten. In den Sommermonaten sind kaum Unterschiede zu erkennen. In den Wintermonaten zeigt sich dagegen die Art der Sanierung. Die niedrigsten Minimaltemperaturen weist Variante 1b auf, bei der der Balkenkopf ungedämmt ist und auf einem Mörtelbett aufliegt. Variante 3, die sich von Variante 1 nur durch das Auflager auf einer dämmenden Aerogelmatte unterscheidet, zeigt geringfügig höhere Minimaltemperaturen. Merklich höhere Minimaltemperaturen ergeben sich dagegen für Variante 5, bei der der Balkenkopf rundherum mit einer Aerogelmatte gedämmt ist.

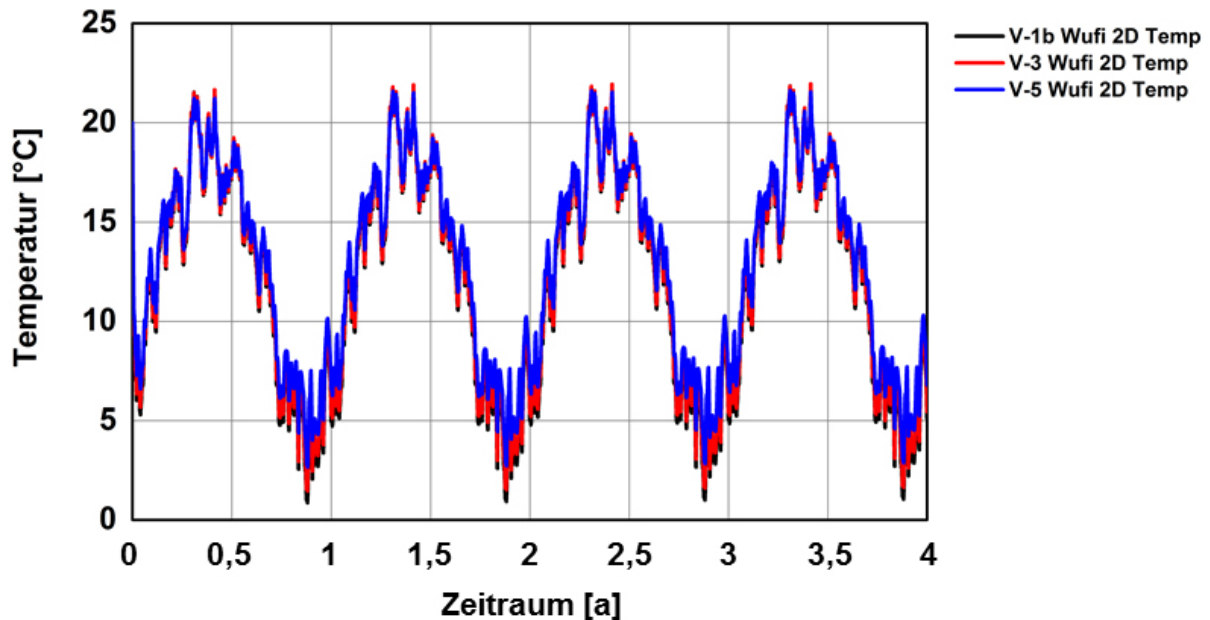


Abb. 62 Verlauf der mit WUFI®-2D berechneten Temperaturen für die drei Sanierungsvarianten.

Mit Blick auf die mit WUFI®-2D berechneten Verläufe der Holzfeuchten (Abb. 63), zeigen sich nur in den ersten ein bis zwei Jahren merkbliche Unterschiede, die aber vor allem in den

unterschiedlichen Anfangsfeuchten begründet sind. Danach zeigen sich bis auf geringe zeitliche Verschiebungen kaum noch Unterschiede zwischen den drei berechneten Varianten. Dies deckt sich gut mit den beschriebenen Messergebnissen. Der vorab erwartete deutliche Einfluss der Art der Balkenkopfsanierung scheint nur in sehr geringem Umfang gegeben zu sein.

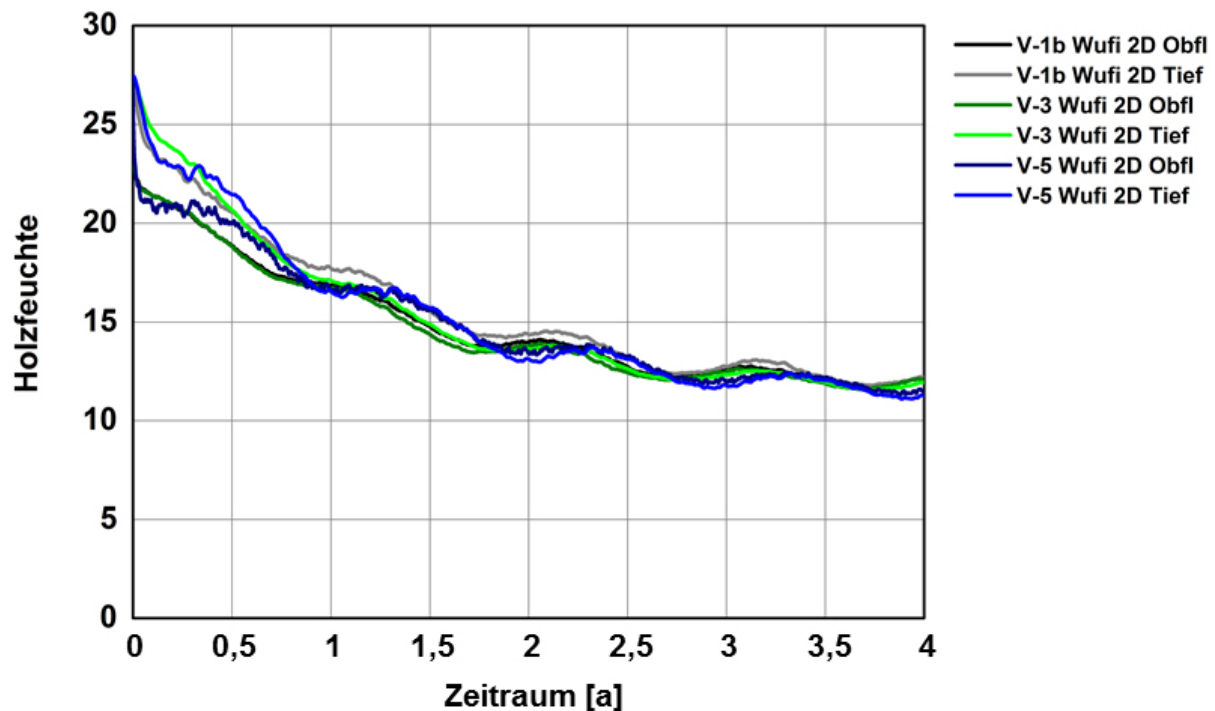


Abb. 63 Verlauf der mit WUFI®-2D berechneten Holzfeuchten für die drei Sanierungsvarianten.

Dachbalken im Kopfbau der Alten Schöfferei

In Abb. 64 ist für die Südseite des Kopfbaus der Alten Schöfferei der Verlauf der Holzfeuchte dargestellt. Hier ist nur eine sehr geringe Abhängigkeit des Feuchtegehaltes von der Jahreszeit erkennbar. Bei allen Balkenköpfen schwanken die Wassergehalte um die 20 M.-%, oder knapp darunter. Dies gilt sowohl für die oberflächennah gemessenen Feuchten als auch für die im Kernbereich. Die einzige Ausnahme bildet hier „Balken, neu 1, Süd, Tief“, bei dem der Wassergehalt deutlich tiefer liegt. Insgesamt liegen die Wassergehalte der alten Balkenköpfe tendenziell geringfügig höher.

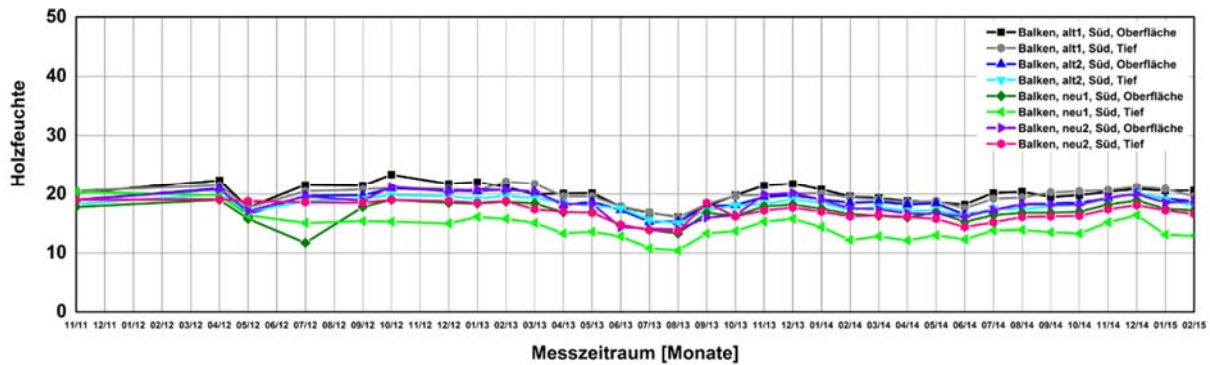


Abb. 64 Verlauf der an den Dachbalken im Kopfbau auf der Südseite gemessenen Holzfeuchten für einen Zeitraum von etwas mehr als drei Jahren.

Auf der Westseite (Abb. 65) ergibt sich, abgesehen von der etwas größeren Streuung der Anfangswassergehalte, nahezu das gleiche Bild. Auch hier liegen die Wassergehalte in der Winterzeit um die 20 M.-% und sinken in den Sommermonaten auf 15 M.-% oder knapp darunter.

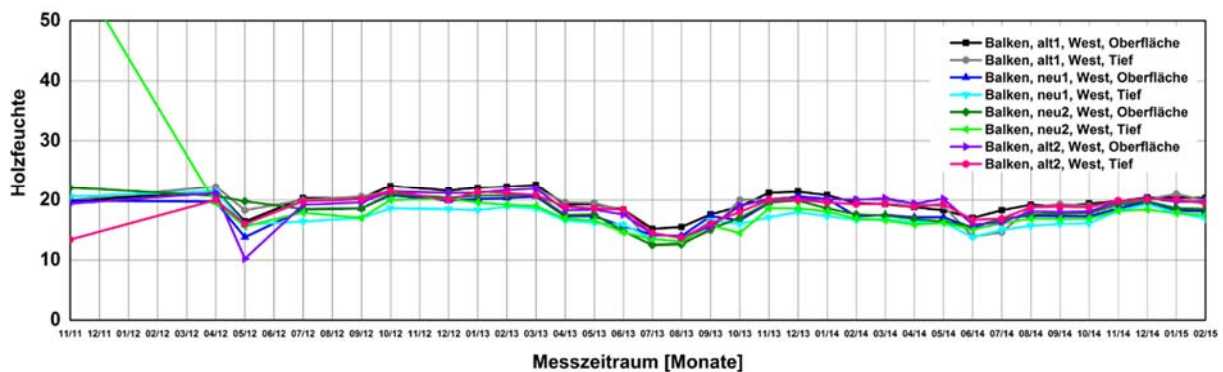


Abb. 65 Verlauf der an den Dachbalken im Kopfbau auf der Westseite gemessenen Holzfeuchten für einen Zeitraum von etwas mehr als drei Jahren.

Insgesamt zeigen die Messwerte für die Holzfeuchte der Dachbalken der Alten Schäferei sowohl für die Südseite als auch für die Westseite ein völlig unspektakuläres Bild. Der Jahresgang ist nur sehr schwach ausgeprägt und mit um die 20 M.-% im Winter und um die 15 M.-% im Sommer wird es, solange die Dacheindeckung unbeschädigt bleibt, keinerlei Feuchteschäden geben. Dies ist sicher auch darin begründet, dass das Dach auch nach der Sanierung ein Kaltdach geblieben ist, das vom Stockwerk darunter gut abgedämmt ist und in das nur eine geringfügige zusätzliche Feuchtelast durch die Nutzung (z.B. bei Dachführungen) eingebracht wird.

1.2.3.6 Freilandversuchsgelände Holzkirchen

Im Freigelände des Fraunhofer-Institutes für Bauphysik (IBP) in Holzkirchen befindet sich ein Gebäude mit Flachdach auf dessen Attika ein gedämmtes Flachdachelement aufgesetzt ist. In einem Abstand von ca. 0,8 m darunter befindet sich eine Holzbalkenkonstruktion mit der Querschnittsdimension $12 \times 18 \text{ cm}^2$ der Balken und 3 cm Holzschalung. Unterhalb dieser Konstruktion sind bis ca. 2 m von den Holzbalkenköpfen entfernt, für die im Folgenden beschriebenen Untersuchungen, zwei Kammern aus Holzwerkstoffplatten (OSB) errichtet worden, die getrennt temperiert und befeuchtet werden können. Abb. 66 zeigt die Südwest-Ansicht des Versuchsgebäudes mit Flachdachelement auf der Attika des Flachdaches. Es ist die nach Süden gewandte Stirnseite des Flachdachelementes mit rotbrauner Bitumenabdichtung zu sehen. Abb. 67 skizziert im Schnittbild den schematischen Aufbau und die Lage der Messräume unterhalb der Holzbalkendecke. Außerdem sind weitere Versuchsräume im Erdgeschoss und ein sich zwischen Flachdach und Holzbalkendecke aufspannender Luftraum abgebildet.



Abb. 66 SW-Ansicht des Versuchsgebäudes im Freigelände des Fraunhofer-Institutes für Bauphysik in Holzkirchen mit Flachdachelement auf der Attika des Flachdaches.

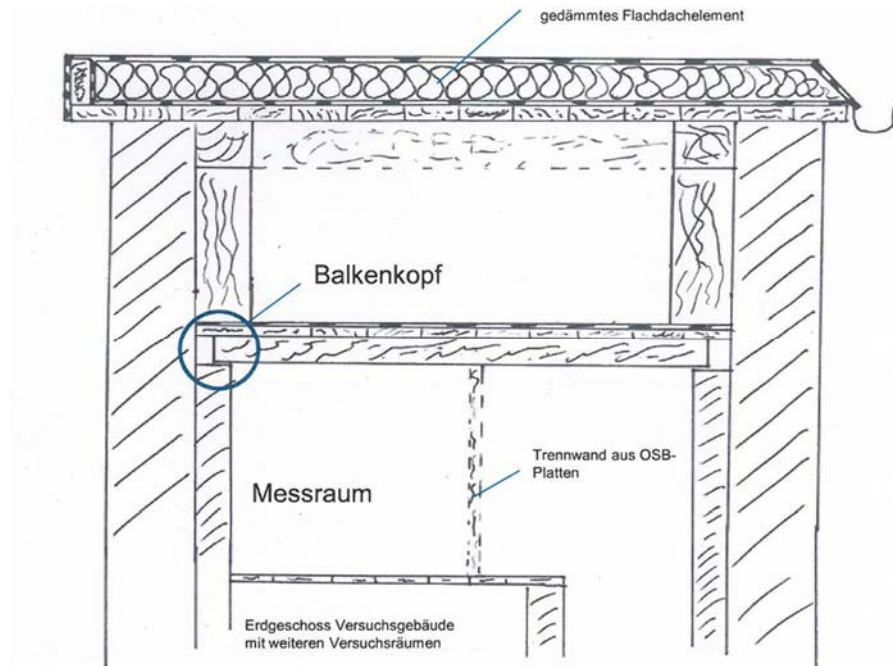


Abb. 67 Schematische Schnittskizze der Anordnung der Messräume unterhalb der Holzbalkendecke.

Abb. 68 zeigt die untere Ansicht der Holzbalkendecke vor Errichtung der Messräume. In Abb. 69 ist der unbeheizte Luftraum oberhalb der Messräume dokumentiert. Um einen Wärmeeintrag in die Wand der Attika während der Heizperiode zu verhindern, wird diese und der Balkenkopfbereich der Decke mit 5 cm dicken EPS-Platten bis zum Umbau im Oktober 2014 gedämmt (Abb. 69).



Abb. 68 Ansicht der Unterseite der Holzbalkendecke vor dem Einbau der Messräume und der Sensorik.



Abb. 69 Unbeheizter Luftraum oberhalb der Holzbalkendecke mit Tragkonstruktion für das auf der Attika montierte Flachdach.

Die Erstellung der Messräume fand im Dezember 2013 statt (Abb. 70). Die Abb. 71 zeigt die Ansicht der fertigen Trennwand eines Messraumes mit einer durch ein OSB-Plattenstück verschließbaren Schlupföffnung. Das gesamte Gebäude wird während der Heizperiode durch eine Warmwasserheizung auf 19-22 °C temperiert. Die Regelung der Raumlufttemperatur in den einzelnen Messräumen erfolgt mithilfe von auf dem Boden aufliegenden Heizmatten. Ziel ist die Einhaltung einer Temperatur von ca. 20 °C. Die Befeuchtung wird über Geräte mit Verdunstungsprinzip umgesetzt. Die Unterschiede in den Zielwerten der relativen Luftfeuchte für beide Messräume, Raum 1-R1 40 % r.F. und Raum 2-R2 60 % r.F. werden durch eine Regelung von Rotronik mithilfe von kapazitiven Luftfeuchtesensoren und einer entsprechenden Software realisiert.



Abb. 70 Beginn der Erstellung der Messräume aus Holzwerkstoffplatten (OSB) im Winter 2013.



Abb. 71 Ansicht der fertigen Trennwand eines Messraumes mit einer durch ein OSB-Plattenstück verschließbaren Schlupföffnung

An den Balkenköpfen in beiden Messräumen können mit hohen Freiheitsgraden Versuche durchgeführt werden, da die darunter liegenden Versuchsräume als „Haus in Haus“-System davon weitgehend getrennt sind. In jeder dieser Kammern stehen sechs Balkenköpfe, die in die Ziegelaußenwand einbinden, zur Verfügung. Bei jedem Balkenkopf werden die Holzfeuchten oberflächennah und in Balkenmitte erfasst. In Tab. 6 sind die unterschiedlichen Einbauvarianten für die Räume 1 und 2 aufgeführt: Balkenkopf ringsum seitlich komplett mit mineralischem Baukleber abgedichtet (R1/B6; R2/B1), mit Fugen zum Mauerwerk (hier künstlich erzeugt, R1/B4; R2/B2), mit erzwungener Konvektion (über kleine Membranpumpen, R1/B3+B5; R2/B3) sowie mit Wärmebrücke zum Innenraum über Aluminiumblech (R1/B1; R2/B4) Zusätzlich wird bei je einem Balken mit 2 mm Fugen (R1/B2) sowie bei erzwungener Konvektion (R2/B5) der Balkenkopf seitlich und stirnseitig gedämmt. Raum 1 wird mit einer normalen Feuchtelast (konstant 40 % r.F.) und Raum 2 mit einer erhöhten Feuchtelast (konstant 60 % r.F.) belegt. Bei der erzwungenen Konvektion wird mit der Membranpumpe ein Luftstrom von 4 m³/h und m Fugenlänge erzeugt.

Tab. 6 Übersicht der in beiden Messräumen ausgeführten Balkenkopfdetails.

Raum 1-R1 (20 °C, 40 % r.F.)	
Balken, Innenansicht von links nach rechts	
Bezeichnung	Varianten
Balken 1	Aluminiumblech
Balken 2	gedämmte Ausführung + 2 mm Fuge
Balken 3	gedämmte Ausführung + erzwungene Konvektion
Balken 4	2 mm Fuge
Balken 5	erzwungene Konvektion
Balken 6	abgedichtet
Raum 2-R2 (20 °C, 60 % r.F.)	
Balken, Innenansicht von links nach rechts	
Bezeichnung	Varianten
Balken 1	abgedichtet
Balken 2	2 mm Fuge
Balken 3	erzwungene Konvektion
Balken 4	Aluminiumblech
Balken 5	gedämmte Ausführung + 2 mm Fuge
Balken 6	Referenz im Kaltdachbereich

Die Abbildungen 72 bis 78 zeigen die Ansichten der Ausführungen mit Nummerierung der Balkenköpfe gemäß Tab. 6 im Raum 1 mit niedriger Feuchtelast. Bei Balken 1 im Raum 1 mit „Aluminiumblech“ wurde, um Wärme vom Raum zum Balkenkopf zu übertragen, seitlich ein 3 mm starkes Aluminiumblech angebracht (Abb. 72). Balken 2 im Raum 1 (Abb. 73) wurde als „gedämmte Ausführung mit 2 mm Fuge“ ausgeführt. Der Balkenkopf ist stirnseitig und seitlich gedämmt. Dabei wurde absichtlich eine Fuge von 2 mm zum Holz hergestellt. Gewährleistet wurde die Fuge durch einen später wieder entfernten Blechstreifen (im Bild noch zu erkennen). Der Balken 5 in Raum 2 wurde in gleicher Weise ausgeführt. Der Balken 3 (Abb. 74) im Raum 1 wurde als „gedämmte Ausführung mit erzwungener Konvektion“ durch eine Membranpumpe realisiert. Es handelt sich um eine Ausführung wie bei Balken 2 jedoch mit zusätzlich beidseitig des Balkens verlegten Schläuchen zum Einbringen feuchter Innenraumlufte in den Balkenkopfbereich. In Abb. 74 ist zusätzlich die hintere Messstelle zur Erfassung der Oberflächenfeuchte des Balkenkopfes, vor Montage der seitlichen Dämmung, zu sehen. Auf diese Ausführung wurde in Raum 2 verzichtet. Abb. 75 zeigt die Ansicht der Ausführung des Balken 4 im Raum 1 mit „2 mm Fuge“: Analog dazu wurde im Raum 2 der Balken 2 ausgeführt. Die Ansicht der Ausführung des Balkens 5 im Raum 1 mit erzwungener „Konvektion“ durch eine Membranpumpe ist in Abb. 76 dargestellt. Zur bereits bestehenden Einbausituation des Balkens wurden auf beiden Seiten des Balkens zur Einführung von Schläuchen entsprechende Bohrungen angebracht. Analog wurde im Raum 2 der Balken 3 ausgeführt. Abb. 77 zeigt die Ansicht der Membranpumpe für die erzwungene Konvektion mit 4 m³/h und Meter Fugenlänge bei den Balken 3 und 5 in Raum 1. Die jeweiligen Balken in Raum 2 wurden mit einer baugleichen Membranpumpe ausgestattet. Die Ansicht der Ausführung des Balkens 6 im Raum 1 mit Baukleber „abgedichtet“ ist in Abb. 78 zu sehen. Analog wurde im Raum 2 der Balken 1 ausgeführt.

Im Raum 2 mit hoher Feuchtelast sind somit die Balkenköpfe, mit Ausnahme der gedämmten Ausführung mit erzwungener Konvektion, analog zu Raum 1 ausgeführt. Ferner befindet sich in Raum 2 noch ein sogenannter „Referenzbalken“ (Balken 6, ohne Abbildung), der sich am Rand zu einem angrenzenden Umkehrdach im Kaltbereich befindet.



Abb. 72 Ansicht der Ausführung des Balkens 1 im Raum 1 mit „Aluminiumblech“.



Abb. 73 Ansicht der Ausführung des Balkens 2 im Raum 1 als „gedämmte Ausführung mit 2 mm Fuge“.



Abb. 74 Ansicht der Ausführung des Balkens 3 im Raum 1 als „gedämmte Ausführung mit erzwungener Konvektion“ durch eine Membranpumpe.



Abb. 75 Ansicht der Ausführung des Balkens 4 im Raum 1 mit „2 mm Fuge“; analog wurde im Raum 2 der Balken 2 ausgeführt.



Abb. 76 Ansicht der Ausführung des Balkens 5 im Raum 1 mit erzwungener „Konvektion“ durch eine Membranpumpe.

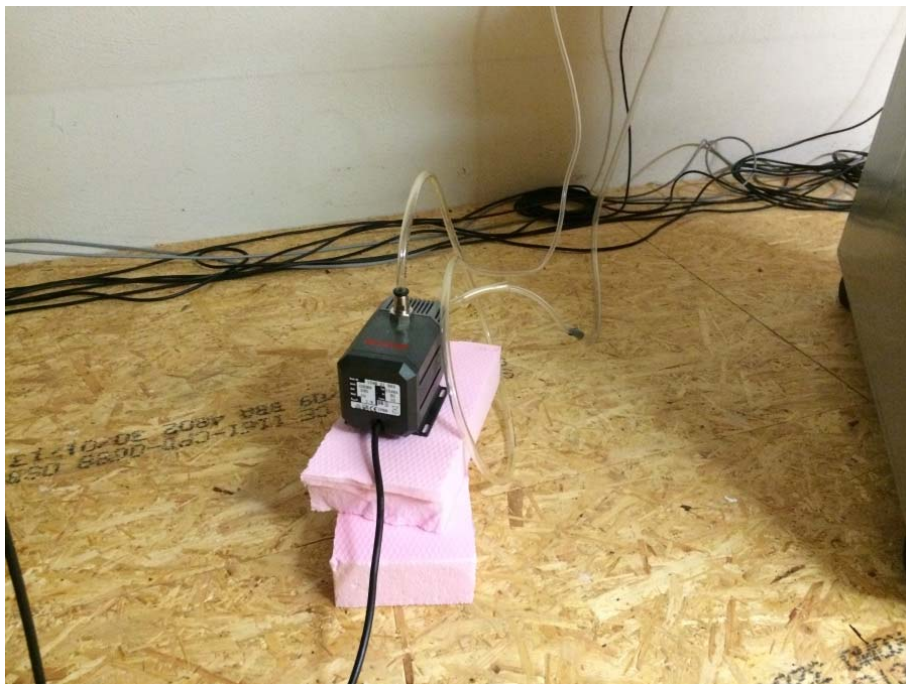


Abb. 77 Ansicht der Membranpumpe für Konvektion mit 4 m³/h und Meter Fugenlänge bei den Balken 3 und 5 im Raum 1.

II.1 Vorhabensziele, Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse



Abb. 78 Ansicht der Ausführung des Balkens 6 im Raum 1 mit Baukleber „abgedichtet“.

Zur kontinuierlichen Registrierung der Messwerte diente eine vom Unternehmen Ahlborn Mess- und Regelungstechnik GmbH angebotene Messeinrichtung mit Datenlogger und speziell darauf abgestimmten Messmodulen zur Erfassung der Holzfeuchtwerte an den Messpunkten (Abb. 79 und Abb. 80).



Abb. 79 Ansicht des pro Messstelle eingesetzten Holzfeuchtemessmoduls (Modell FHS 636 MFS1).



Abb. 80 Ansicht des Datenloggers (unten), eines Holzfeuchtemessmoduls (oben links) sowie der Mess- und Steuereinheit für die Herstellung der Feuchtelast (oben rechts) im Raum 1.

In Abb. 80 ist neben dem Datenlogger am Boden zusätzlich (rechts oben) die Mess- und Steuereinheiten zur Regulierung und Erfassung der relativen Luftfeuchte des Unternehmens Rotronik Messgeräte GmbH zu erkennen. Die Abb. 81 zeigt einen der in beiden Räumen aufgestellten Befeuchter mit Reservoir und Verdunstungsprinzip (rotierende Walze), der zusammen mit der angesprochenen Regeleinheit die unterschiedlichen Feuchtelasten in den Räumen gewährleistet. Ferner ist die am Boden liegende Heizmatte zu sehen, die über eine handelsübliche Regelung für eine weitgehend konstante Temperierung in den Wintermonaten sorgt.



Abb. 81 Blick in einen der beiden Messräume. Links im Vordergrund ist der Raumluftbefeuchter zu sehen. Rechts davon liegt die Heizmatte zur Temperierung des Raumes.

Vor dem Anbringen der Innendämmung zeigen Berechnungen, dass die Dämmung oberhalb der Balkenebene gemäß Abb. 69 zwar zu einer Erhöhung der Holzfeuchte führt, aber die dortige Innendämmung der Außenwand eher kontraproduktiv ist. Gemäß den Berechnungen wird der größte Effekt zur Auffeuchtung mit einer möglichst kapillaraktiven diffusionsoffenen Innendämmung bei gleichzeitiger Entfernung der vorhandenen Innendämmung oberhalb des Messraumes erzielt. Deshalb wurde die Innendämmung oberhalb des Messraumes im Oktober 2014 wieder entfernt und in den zwei Prüfräumen eine Innendämmung angebracht. In Abb. 82 ist der Beginn des Einbaues der Innendämmung (8 cm starke Mineralschaumplatten, WLG 040) mit Baukleber auf die Außenwand des Raumes 1 zu sehen. Bei diesen Umbaumaßnahmen konnte die vereinzelt defekte Sensorik der Holzfeuchtemodule durch Erneuerung der Kontaktstellen ersetzt werden. Zusätzlich wurde die komplette Unterseite der Holzbalkendecke mit einer Dämmung aus 2 cm starken, mit Wasserdampf diffusionsoffenen Dämmplatten aus Mineralwolle versehen, um den Wärmeeintrag vom Raum zu minimieren. Ein Feuchteinbruch aufgrund unerwarteter Undichtigkeiten im Dachaufbau des Gebäudes führte zeitweise zu hohen Luftfeuchten in der Testhalle, sodass in Raum 1, bis zur Reparatur und dem Ablüften der Feuchte, die 40 % r.F. zum Teil nicht eingehalten werden konnten.



Abb. 82 Beginn des Einbaus der Innendämmung aus 8 cm starken Mineralschaumplatten (WLG 040) in Raum 1 Anfang Oktober 2014.

Die Abb. 83 zeigt den Blick in Raum 1 mit an der Außenwand angebrachter Innendämmung aus 8 cm starken Mineralschaumplatten (WLG 040) und der Beplankung der Holzbalkendecke mit 2 cm Mineralwolleplatten (WLG 040). Links im Vordergrund ist der Luftbefeuchter und rechts unten die Heizmatte zur Klimatisierung des Raumes zu sehen. Vor der Innendämmung sind die Holzfeuchtemessmodule von vier Balken erkennbar.



Abb. 83 Blick in Raum 1 mit an der Außenwand angebrachter Innendämmung und Beplankung der Holzbalkendecke mit 2 cm starken Mineralwolleplatten.

Messergebnisse

In Abb. 84 sind die zeitlichen Verläufe der Stundenmittelwerte der Raumlufthtemperaturen (oberes Diagramm) und der Verlauf der relativen Luftfeuchten (unteres Diagramm) der beiden Testräume für den Zeitraum 15. Dezember 2013 bis 8. März 2016 dargestellt. Der Zeitraum des Einbaues der Innendämmung im Oktober 2014 ist in beiden Diagrammen blau hinterlegt.

Es sind zunächst die jahreszeitlich bedingten Schwankungen der Raumlufthtemperaturen und relativen Raumlufthfeuchten mit Beheizung und Befeuchtung in den Wintermonaten und „freies Gleiten“ des Raumklimas in den Sommermonaten erkennbar. Dabei sind sowohl die mittleren Raumlufthtemperaturen und die dazugehörigen relativen Luftfeuchten im Sommer höher, als im Winter. Im Winter sollten die mittleren Raumlufthtemperaturen und relativen Luftfeuchten im Raum 1 bei 20 °C/40 % r.F. und im Raum 2 bei 20 °C/60 % r.F. liegen.

In den Wintermonaten herrschen mittlere Raumlufthtemperaturen von ca. 21,5 °C im Raum 1 (rote Linie) und ca. 20 °C im Raum 2 (orange Linie). In den Sommermonaten stellen sich dann Raumlufthtemperaturen bis über 26 °C ein. Vor Einbau der Innendämmung waren die beiden Räume im Spätsommer und September 2014 nicht temperiert. Im September 2015 kam es zu einem kurzen Ausfall der elektrischen Beheizung.

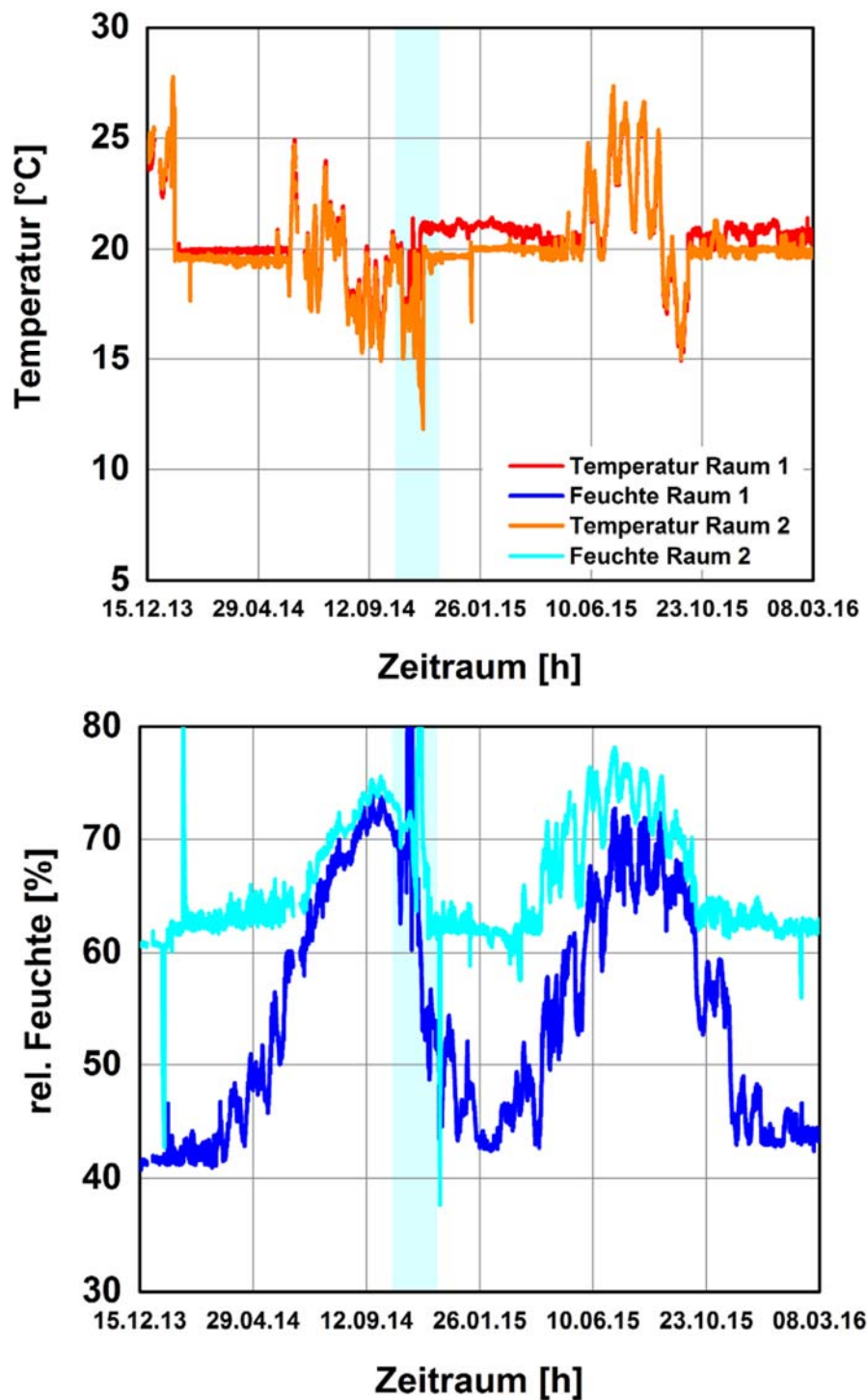


Abb. 84 Zeitliche Verläufe der Stundenmittelwerte der Raumlufttemperaturen, oberes Diagramm, von Raum 1 (rot) und Raum 2 (orange) sowie der relativen Luftfeuchten, unteres Diagramm, von Raum 1 (dunkelblau) und Raum 2 (hellblau) vom 15. Dezember 2013 bis 8. März 2016. Der Zeitraum des Einbaus der Innendämmung im Oktober 2014 ist hellblau hinterlegt.

Die zeitlichen Verläufe der Stundenmittelwerte der relativen Luftfeuchte in den beiden Räumen stellt das untere Diagramm in Abb. 84 dar. In Raum 1 (dunkelblaue Linie) sollte in

den Wintermonaten die relative Luftfeuchte bei 40 % liegen. Im Mittel stellten sich zwischen 42-45 % r.F. im Raum 1 in den drei Winterperioden ein. Ein Feuchteinbruch durch unerwartete Undichtigkeiten im Dachaufbau des Gebäudes führte zeitweise zu hohen Luftfeuchten in der Testhalle. Somit konnte trotz Ablüften die Zielgröße von 40 % r.F. im Raum 1 in den Wintermonaten nicht eingehalten werden. Durch den Einbau der Innendämmung im Oktober 2014 stieg die relative Luftfeuchte im Raum 1 kurzfristig sogar auf über 50 % an. Im Raum 2 (hellblaue Linie) sollten in den Wintermonaten höhere Feuchten von ca. 60 % herrschen. Im Mittel stellten sich zwischen 60-63% r.F. im Raum 2 in den drei Winterperioden ein. Der Einbau der Innendämmung wirkte sich nicht auf die Raumluftheuchte in Raum 2 aus.

In Abb. 85 sind die zeitlichen Verläufe der mit den Holzfeuchtemessmodulen ermittelten Holzfeuchten der Balkenkopfausführungen gemäß Tab. 6 im Raum 1 (20°C/40% r. F.) dargestellt. Der Zeitraum des Einbaus der Innendämmung im Oktober 2014 ist hellblau hinterlegt. Im gesamten Messzeitraum liegen die Holzfeuchten unter 20 M-%. Dabei liegen die Werte nach dem Einbau der Innendämmung im Oktober 2014 für ca. 1 Jahr höher als ohne Innendämmung. Jedoch erreicht selbst an der Oberfläche bei Balken 2 die Holzfeuchte nur Werte bis maximal 19 M-%. Im darauf folgenden Winter treten nur kurzfristig Holzfeuchten von etwas über 15 M-% auf. Bis Ende der Messperiode im März 2016 liegen die Holzfeuchten nur noch zwischen 6-14 M-%. Die Messmodule für die Erfassung der Holzfeuchte der tief in die Balkenköpfe geschraubten Elektroden für die Balken 1 und 2 (schwarze und dunkelblaue Linie) fielen zeitweise aus. Beim Einbau der Innendämmung erfolgte eine erneute Fixierung der Kontakte, was sich zunächst nur bei Balken 1 bemerkbar machte. Das Holzfeuchtemessmodul für die Holzfeuchte des Balkens 2 nahm die Messung aus unerfindlichen Gründen jedoch erst wieder im Spätwinter 2015 auf. Am Anfang der Messperiode ab Dezember 2015 bis zum Einbau der Innendämmung im Oktober 2014 verlaufen alle übrigen Holzfeuchten der Balkenköpfe im Bereich von nahe 6 M-% bis ca. 14 M-%. Hierbei lassen sich insgesamt die höchsten Holzfeuchten an den Oberflächen der Balken 1 (mit Aluminiumblech) und 2 (mit Dämmung + Fuge) von 11-14 M-% feststellen.

Nach dem Einbau der Innendämmung erhöhen sich die Holzfeuchten der Balkenköpfe bei allen Ausführungen, wobei die stärksten Anstiege bei der Oberfläche des Balkens 2 (Dämmung + Fuge) und in der Tiefe bei Balken 5 (erzwungene Konvektion) zu verzeichnen sind. Kurz nach dem Einbau der Innendämmung ist die Holzfeuchte in der Tiefe des Balkenkopfes 5 sogar am höchsten und liegt bei ca. 15 M-%. Im letzten Winter bis zum Ende der Messperiode verlaufen alle Holzfeuchten im Bereich zwischen 10-15 M-%. Dabei liegen die Balkenkopffeuchten der Balken 1 und 2 (Aluminiumblech, Dämmung + Fuge) an der Oberfläche am höchsten und in den tieferen Messstellen am niedrigsten. Die Holzfeuchte in der Tiefe der Balkenköpfe bei den Balken 5 (mit erzwungener Konvektion) und 1 (mit Aluminiumblech) erreichen dann mit ca. 13 M-% gleich niedrige Werte. Insgesamt ist die Streubreite der Messwerte nach Einbau der Innendämmung etwas höher, als davor.

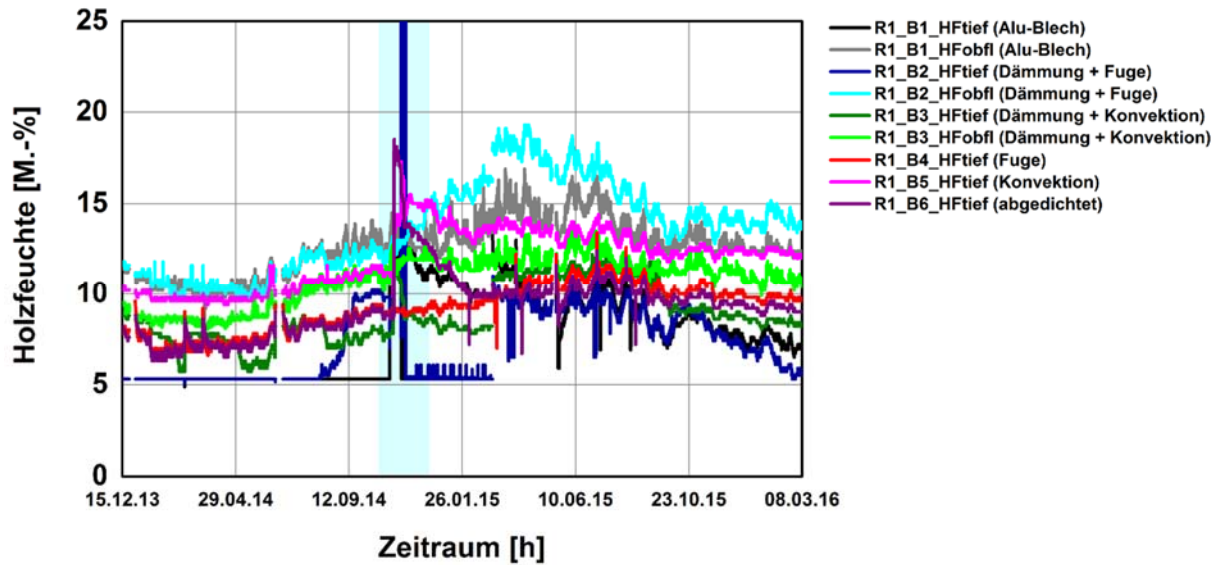


Abb. 85 Zeitliche Verläufe der mit speziellen Messmodulen kontinuierlich gemessenen Holzfeuchten für die Ausführungen der Balkenköpfe gemäß Tab. 6 im Raum 1 mit niedriger Feuchtelast (20 °C/40 % r.F.).

Abb. 86 zeigt die zeitlichen Verläufe der mit den Holzfeuchtemessmodulen ermittelten Holzfeuchten der Balkenkopfausführungen gemäß Tab. 6 im Raum 2 (20 °C/60 % r.F.) im Messzeitraum. Der Zeitraum des Einbaus der Innendämmung im Oktober 2014 ist hellblau hinterlegt. Im gesamten Messzeitraum liegen auch im Raum 2, mit höherer Feuchtelast als Raum 1, die Holzfeuchten unter 20 M.-%. Auch hier liegen nach dem Einbau der Innendämmung im Oktober 2014 die ermittelten Holzfeuchten höher als vor dem Einbau. Es treten danach trotz dem Einbringen der Einbaufeuchte durch die Innendämmung und der höheren Feuchtelast nur maximale Holzfeuchtwerte von 18 M.-% auf.

Die ausgefallenen Messmodule zur Erfassung der Holzfeuchte in der Tiefe der Balkenköpfe 1 und 2 (abgedichtet und Fuge) wurden beim Einbau der Innendämmung im Oktober 2014 durch erneute Installation der Kontakte in Stand gesetzt.

Mit Beginn der Messperiode bis zum Einbau der Innendämmung liegen die Holzfeuchtwerte in der Tiefe beim Balken 4 (Aluminiumblech) und an der Oberfläche des Balkens 5 (mit Dämmung + Fuge) mit Werten bis 13 M.-% am höchsten. Die Werte an den Messpunkten in der Tiefe der Balken 3, 5 und 6 (erzwungene Konvektion, Dämmung + Fuge sowie Referenzbalken zum Kaltdach) sind mit 6-11 M.-% am niedrigsten. Alle Messwerte der anderen Ausführungen verlaufen dazwischen.

Nach dem Einbau der Innendämmung im Oktober 2014 steigen die Holzfeuchtwerte zunächst auf maximal 18 M.-% an. Die Werte des in Stand gesetzten Holzfeuchtemessmoduls in der Tiefe bei Balken 2 (mit Fuge) sind am niedrigsten und liegen bereits über vier Monate vor Ende der Messperiode unter 10 M.-%. Die Holzfeuchte in der Tiefe des Referenzbalkens steigt kontinuierlich von Werten unter 10 M.-% zu Beginn auf Maximal-Werte ca. ein halbes Jahr nach Einbau der Innendämmung von über 15 M.-% an. Danach sinkt die Holzfeuchte des Referenzbalkens wieder und weist zum Ende der Messperiode ca. 5 M.-% höhere Holzfeuchten als zu Beginn der Messreihe auf. Ein ähnliches

Ergebnis ergibt sich in der Tiefe des Balkens 4 (mit Aluminiumblech). Die Anfangswerte bewegen sich bei 10 M-%, am Ende liegen sie bei 15 M-%. Bei der Ausführung mit erzwungener Konvektion liegen in der Tiefe des Balkens 3 (rosa Linie) zu Beginn die niedrigsten und zum Ende der Messperiode mit die höchsten Holzfeuchtemesswerte vor.

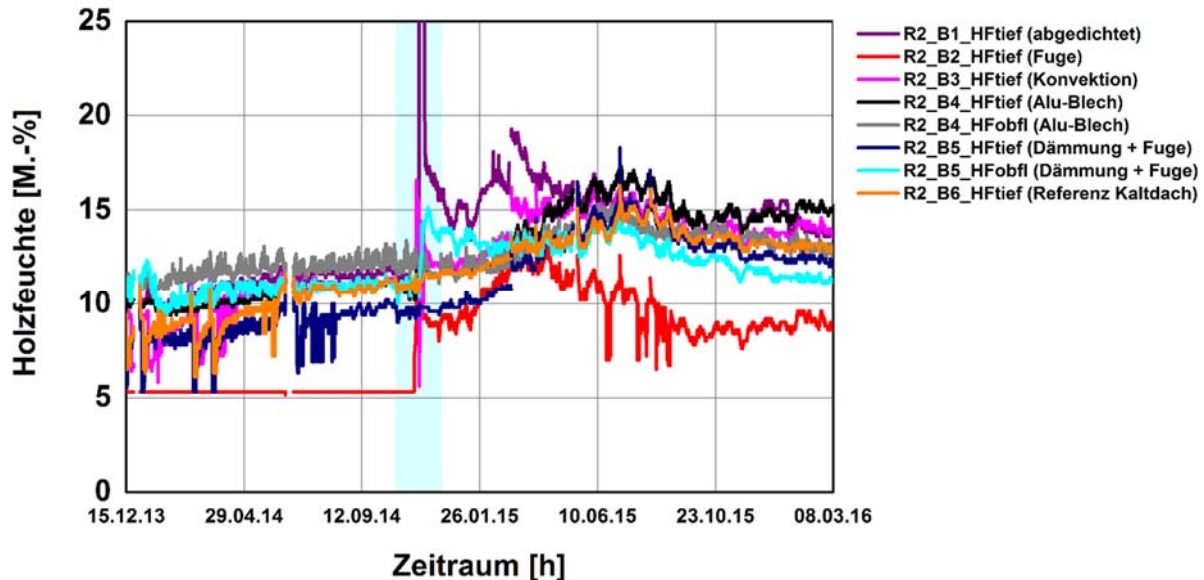


Abb. 86 Zeitliche Verläufe der mit speziellen Messmodulen kontinuierlich gemessenen Holzfeuchten für die Ausführungen der Balkenköpfe gemäß nach Tab. 6 im Raum 2 mit höherer Feuchtelast (20 °C/60 % r.F.).

Bewertung der Messergebnisse

Die Messungen zeigen einen Einfluss der erzwungenen Konvektion bei Raum 2 mit 60 % r.F., dagegen nur einen vernachlässigbaren Einfluss bei Raum 1 mit 40 % r.F. Allerdings sind die Holzbalkenköpfe insgesamt - auch im Raum 2 mit hoher Feuchtelast - mit immer unterhalb von 18 M.-% trocken geblieben. Der Einbau der Innendämmung sowie sonstige Maßnahmen, bspw. der Rückbau der Dämmung oberhalb der Decke und das Anbringen von Dämmplatten aus Mineralwolle unterhalb der Holzbalken in den Messräumen zur Reduzierung der Wärmezufuhr zu den Balkenköpfen, nimmt keinen starken Einfluss auf die Holzfeuchteverläufe der Balkenköpfe im Messzeitraum.

Die gesamten Maßnahmen führten zu einem Anstieg der Holzbalkenkopffeuchten, wenn auch auf niedrigen Niveau. Die höchsten Feuchten ergeben sich bei den Varianten mit erzwungener Konvektion und denen mit offener Fuge und umseitiger Dämmung sowie überraschenderweise bei der Ausführung mit Aluminiumblech in der Tiefe des Balkens 4 im Raum 2. Die Holzfeuchten liegen aber in niedrigen und somit unkritischen Bereichen. Es werden zwar nach den Umbaumaßnahmen, mit u.a. Einbau einer Innendämmung, sowohl oberflächennah sowie in der Tiefe kurzfristig Werte von bis zu 18 M.-% erreicht, aber die Messungen zeigen zum Ende der Messreihe eine Stabilisierung der Holzfeuchte auf 15 M-% und darunter. Obwohl in den Sommermonaten die Raumlufffeuchte in beiden Räumen auf über 70 % r.F. anstieg, findet aufgrund der höheren Außentemperatur wieder eine Abtrocknung statt.

Zur weiteren Klärung wurden deshalb zweidimensionale Berechnungen mit verschiedenen Lösungsvarianten durchgeführt. Abb. 87 zeigt die mit WUFI® 2D berechneten Verläufe der Holzfeuchten am Balkenkopf für die Ausgangssituation im Raum 2 mit höherer Feuchtelast (20 °C/60 % r.F.) sowie im Vergleich dazu den Einfluss einer Innendämmung und der Dämmung des Dachraumes. Die Berechnungen wurden mit der zum Teil sehr niedrig vorgefundenen Anfangsfeuchte von 6 M.-% gestartet. Es ist erkennbar, dass auch ohne Dämmmaßnahme die Holzfeuchte mit jahreszeitlichen Schwankungen, bei diesem zugrunde gelegten Innenklima, langsam ansteigt. Allerdings nur mit einem Anstieg von ca. 0,2 M.-% pro Jahr. Aus dem Einbau einer Innendämmung resultiert eine beschleunigte Auffeuchtung, die mit zusätzlicher Dämmung des Dachraums an Wirkung gewinnt. Allerdings ergibt sich auch damit zwischen dem zweiten und dritten Winter nur eine Steigerung der Holzfeuchte von etwas weniger als 1 M.-%.

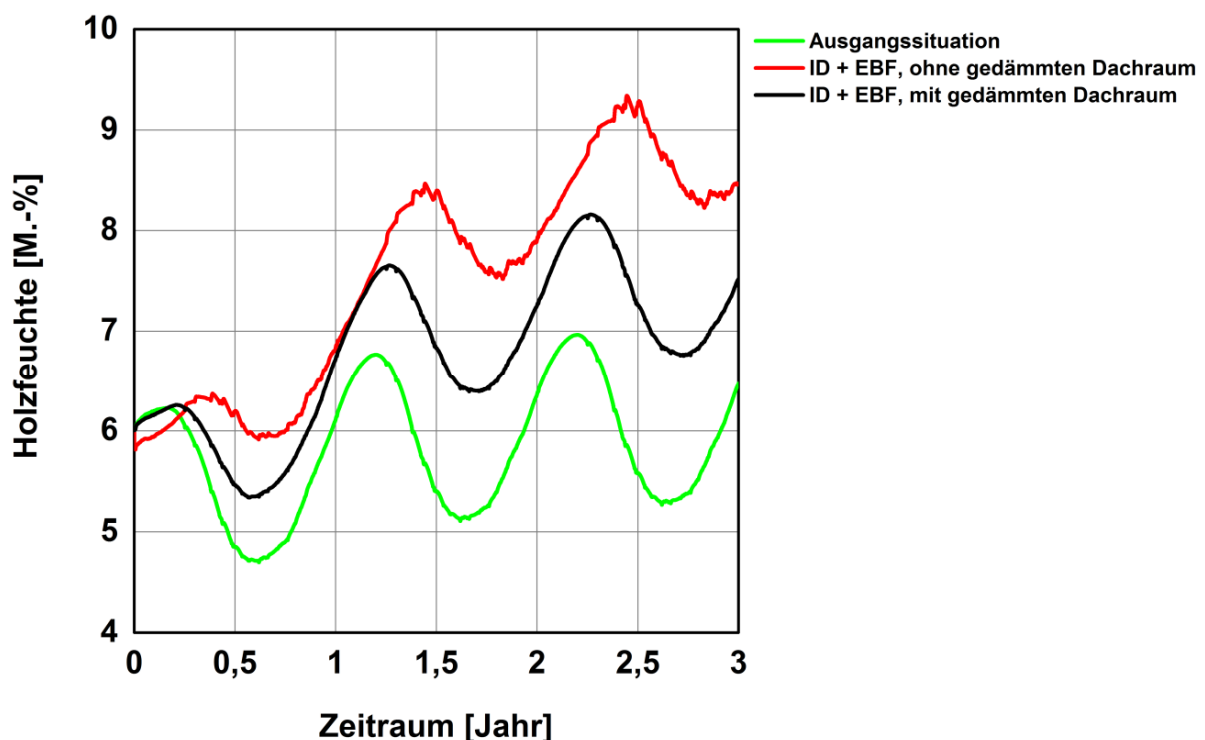


Abb. 87 Mit WUFI® 2D berechnete Verläufe der Holzfeuchte am Balkenkopf für die Ausgangssituation im Raum 2 mit höherer Feuchtelast (20 °C/60 % r. F.) sowie im Vergleich dazu der Einfluss einer Innendämmung und der Dämmung des Dachraumes.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass alle eingeleiteten Maßnahmen, einschließlich der Innendämmung oder der erzwungenen Konvektion am Balkenkopf mit warmfeuchter Innenluft, überraschenderweise, nur zu einem geringfügigen, unkritischen Anstieg der Holzfeuchte in den Balkenköpfe führen. Dies wird tendenziell durch die durchgeführten Berechnungen bestätigt, welche belegen, dass bei den Holzbalkenköpfen an diesem Gebäude keine Holzfeuchtezunahme innerhalb der Projektlaufzeit erzielbar ist, die zu einem kritischen Zustand hinsichtlich des Risikos holzerstörender Pilze führt.

1.3 Laboruntersuchungen

Im folgenden Abschnitt werden unterschiedliche Methoden zur Messung der Materialfeuchte diskutiert. Des Weiteren werden die Untersuchung holzerstörender Pilze sowie die Bestimmung anisotroper Materialeigenschaften beschrieben. Abschließend erfolgt die Erläuterung eines Messkonzeptes bzw. –aufbaus, inklusive Datenauswertung, zur Erfassung der hygrothermischen Situation an Balkenkopfdetails im innengedämmten Mauerwerk unter Laborbedingungen.

1.3.1 Methodenvergleich zur Messung von Materialfeuchten

Für die Erfassung des Feuchtegehalts innerhalb von Holzkonstruktionen kommen die direkte Messung der Holzfeuchte nach dem Leitfähigkeitsprinzip und die Messung der relativen Porenluftfeuchte gleichermaßen zur Anwendung. Kombinierte Temperatur- und Porenluftfeuchtefühler sind kostengünstig und erlauben eine hinreichend genaue Platzierung der Messstelle. Für die Leitfähigkeitsmessung ist es erforderlich zwei Elektroden in das Holz einzuschlagen bzw. einzuschrauben, was je nach Umfang der Öffnung des Balkenaufagers nicht immer möglich ist. Die Umrechnung der gemessenen Porenluftfeuchte in Holzfeuchte erfolgt anhand der im Labor ermittelten individuellen Sorptionsisotherme. Dazu wird bereits bei der Installation der Messfühler in den Testhäusern das Bohrmehl einer Sackbohrung für jede Messstelle sorgfältig entnommen, analysiert und die Sorptions-/Desorptionsisotherme bestimmt. Für die Rationalisierung dieser Arbeit steht ein halbautomatisch arbeitendes Prüfsystem der SPS-Reihe zur Bestimmung der Wasserdampfsorption zur Verfügung, Abb. 88.



Abb. 88 Tischgerät mit großem Probendurchsatz zur rationalen Bestimmung des sorptiven Verhaltens von Baustoffen gegenüber Wasserdampf.

Damit lassen sich gleichzeitig mehrere Proben bzgl. ihrer Massenänderung auf dem segmentweise drehend weiterschreitenden Probesteller in einer definierten Wasserdampfatmosfera über eine hochempfindliche Waage messen. Die Zyklenzahl der sprunghaften Änderungen relativer Luftfeuchten, bei ebenfalls wählbarer, konstanter Temperatur ist vorab einzustellen, wobei als Abbruchkriterium eine anzusetzende Masseänderung zwischen den Probemessungen wirkt.

Die Messmethode der Hygrometrie findet ihre Grenzen bei stark dynamischen Vorgängen, hier sollte die Leitfähigkeitsmethode vorgezogen werden. Handelt es sich um träge Feuchtelaständerungen, wie dies bei eingebetteten Holzbalkenköpfen meist angenommen werden darf, besitzt die Hygrometrie nicht nur finanzielle Vorteile. Abb. 89 enthält einen Vergleich zwischen beiden Messverfahren für gemessene Materialfeuchten einer Holzprobe bei angelegtem Feuchtesprung.

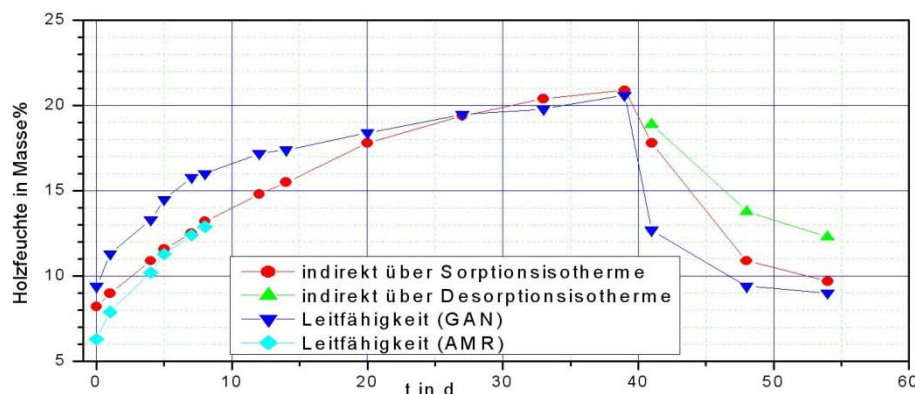


Abb. 89 Methodenvergleich gemessener Materialfeuchten einer Holzprobe zwischen Hygrometrie und klassischer Leitfähigkeitsmethode.

1.3.2 Geschädigte Hölzer

1.3.2.1 Beschädigter Holzbalkenabschnitt

Die Technische Universität Cottbus-Senftenberg stellte für eine Praxisuntersuchung einen beschädigten Holzbalkenabschnitt exemplarisch zur Verfügung.

Die mikroskopische Untersuchung bestätigte, dass es sich bei dem vorliegenden Holzbalkenabschnitt um Kiefernholz handelt. Im Radialschnitt zeigen sich im zentralen Bereich des Kreuzungsfeldes Fenstertüpfel, typisch für die Gattung *Pinus*. Im Randbereich des Holzstrahls sind typische Holzstrahltracheiden mit Zackenwänden zu erkennen (Abb. 90). Im Tangentialschnitt sind Holzstrahlen als perlenschnurartige Gebilde erkennbar, mit einem (für *Pinus* – wohl spätholzbedingt – etwas klein geratenen) Harzgang (Abb. 91).

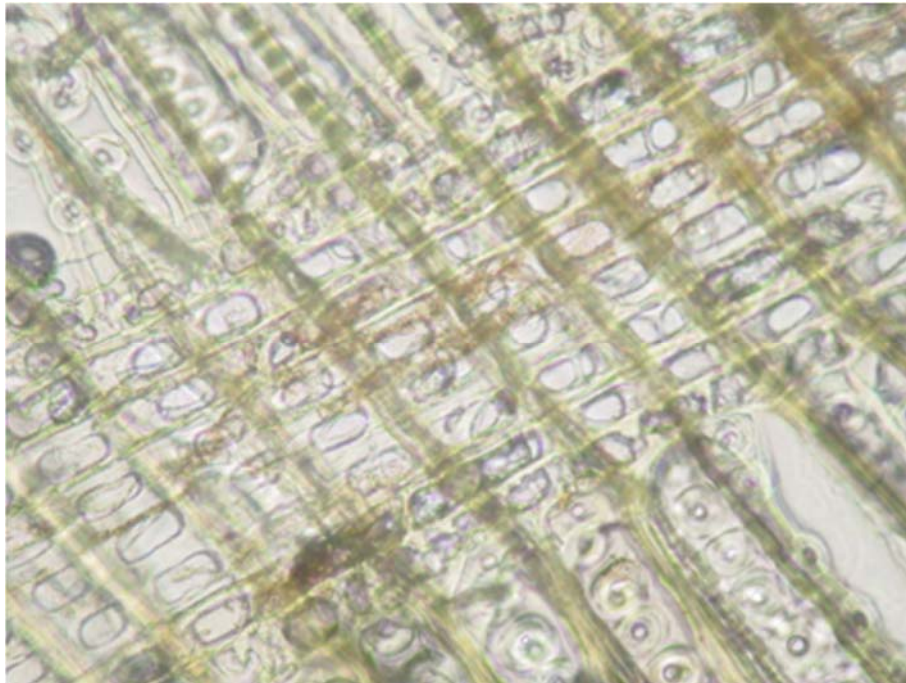


Abb. 90 Radialschnitt: Kreuzungsfeld im Frühholz.

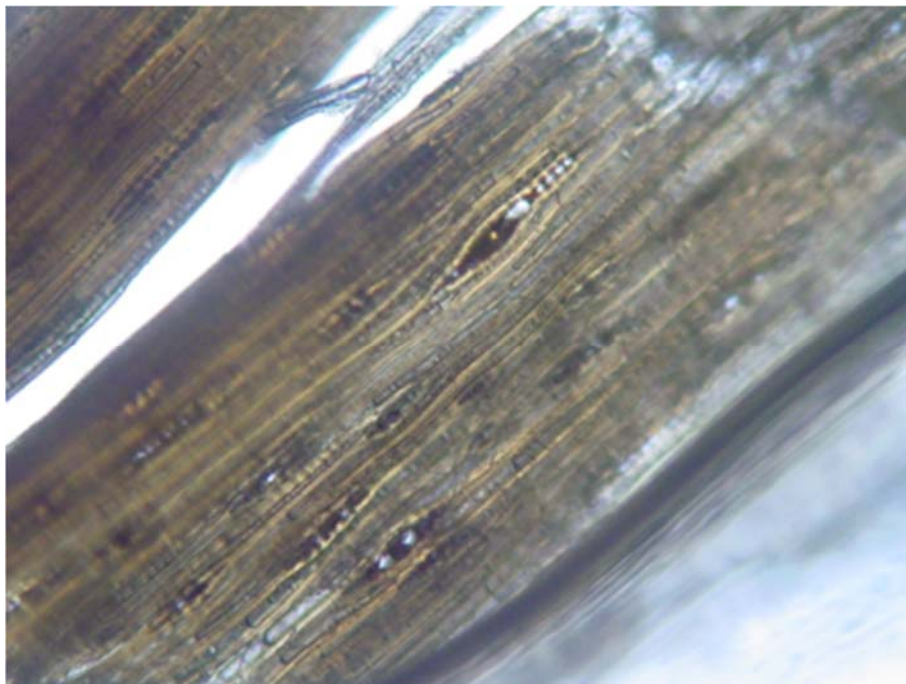


Abb. 91 Tangentialschnitt: Spätholzbereich.

Das Kiefernholz weist einen drastischen Befall durch Hausbock (*Hylotrupes bajulus*) auf (Abb. 92). Darüber hinaus zeigen sich deutlich weitere Käferspuren (Holzwurm, *Anobium* sp.), Braunfäule und Schimmelpilze (Abb. 93).



Abb. 92 Befall durch den Hausbock (*Hylotrupes bajulus*).



Abb. 93 Käferspuren (Holzwurm, *Anobium sp.*), Braunfäule und Schimmelpilze.

1.3.2.2 Beschädigtes Holz (Fichte, Braunfäule) von einem Bauvorhaben

Im Rahmen der Untersuchung von beschädigtem Holz eines Bauvorhabens (Fichte, Braunfäule) wurde dem IBP eine Probe eines mutmaßlich holzzerstörenden Pilzes zur Verfügung gestellt. Die Detailuntersuchung zeigte, dass es sich bei der vorliegenden Probe um einen verschimmelten Fruchtkörper eines holzzerstörenden Pilzes handelte (Abb. 94).



Abb. 94 Verschimmelter Fruchtkörper eines holzerstörenden Pilzes.

Bei der mikroskopische Untersuchung können neben einem *meruloiden Hymenium* typische Sporen identifiziert werden (Abb. 95), was einen eindeutigen Befund zuließ: Es handelt sich um Reste des Hausschwamms, *Serpula lacrymans*.

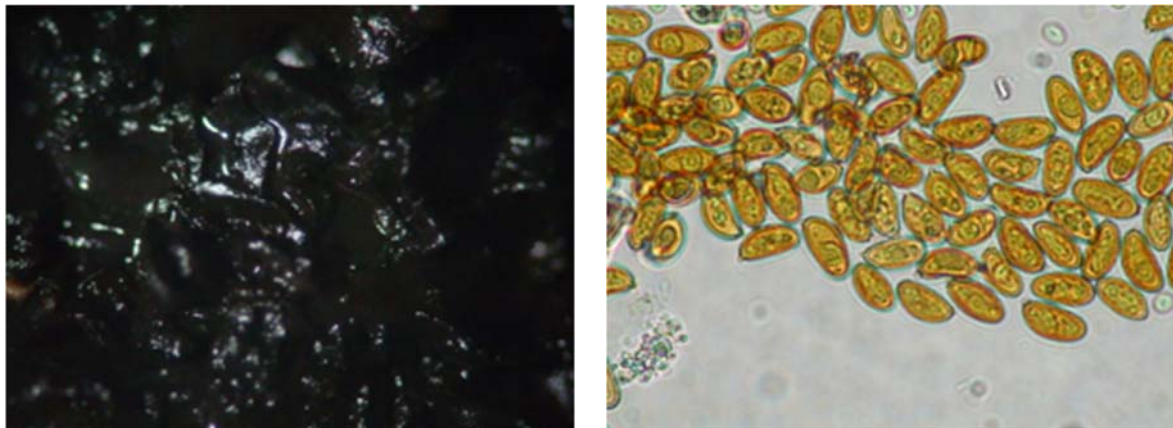


Abb. 95 Links: *Meruloides Hymenium*. Rechts: Sporen typisch *Serpula lacrymans*, Hausschwamm.

1.3.3 Bestimmung anisotroper Materialeigenschaften von Hölzern

Eine Reihe von Materialien, die häufig in Konstruktionen der Gebäudehülle angewendet werden, weisen aufgrund ihres natürlichen oder künstlichen Entstehungsprozesses anisotrope Materialeigenschaften auf. Bei Holz unterscheiden sich die Eigenschaften in den drei anatomischen Grundrichtungen des Holzes, axial, radial und tangential, zum Teil deutlich. Verantwortlich dafür ist der heterogene zelluläre Aufbau von Holz. Dampfdiffusion und kapillarer Flüssigwassertransport differieren in Abhängigkeit von der Richtung um über zwei Zehnerpotenzen, was bisher in den meisten hygrothermischen Simulationsmodellen nicht berücksichtigt wurde. Genau in den Auflagertaschen kommen aber die unterschiedlichen Transportrichtungen zum Tragen und beeinflussen dort in bislang nicht geklärter Weise die Feuchtespeicherung und den -transport.

Die Anisotropie zeichnet sich weiter dafür verantwortlich, dass Hölzer z.B. ein richtungsabhängiges ungleichmäßiges Schwinden und Quellen während der Trocknung und Befeuchtung aufzeigen. Deshalb verursacht die Anisotropie auch die Rissneigung von verbautem Holz. Die zeitlich sich verändernden Dimensionen der Probekörper sollten in die bestehenden Messverfahren aufgenommen werden, was eine Modifikation der Messverfahren erforderlich macht.

Ziel des Teilprojektes war es, geeignete Materialfunktionen relevanter Holzarten bereit zu stellen, mit deren Hilfe richtungsabhängige Transportprozesse für quellende und schwindende Balkenmodelle berechnet werden können.

Die Erzeugung der Materialfunktionen folgt dem in [65] beschriebenen Verfahren. In Erweiterung dieses Verfahrens wurde jeweils ein Satz von Materialproben erstellt, welcher die Berücksichtigung jeder Materialrichtung ermöglicht. Wegen der langsamen Feuchtetransportgeschwindigkeit in radialer Richtung wurde diese Richtung für isotrope Simulationen als Referenz verwendet.

1.3.3.1 Auswahl der Hölzer

Nach Auskunft von Zimmermännern und Bausachverständigen werden für Holzbauteile der Gebäudehülle in erster Linie Fichte und Tanne verwendet. Seltener zum Einsatz kommen Kiefer oder Lärche sowie Eiche. Wegen der Ähnlichkeit von Fichte und Tanne einerseits und Kiefer und Lärche andererseits sowie wegen des höheren Preises von Lärche wurde entschieden, Fichte, Kiefer und Eiche näher zu untersuchen.

Das Holz wurde sehr sorgfältig hinsichtlich seiner regionalen Herkunft (im Falle des IBK, Sachsen) und besonders nach dem Trocknungsprozess des frisch geschnittenen Holzes ausgewählt. Es wurde darauf geachtet, dass es sich um „typische“ Holzchargen handelt, wie sie auf Baustellen häufig vorkommen könnten. Deshalb wurde bspw. nicht Holz von einer besonders hohen Höhenlage verwendet, welches langsamer wächst und damit dichter ist. Die Trocknung der Hölzer erfolgte bei 70 °C.

II.1 Vorhabensziele, Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

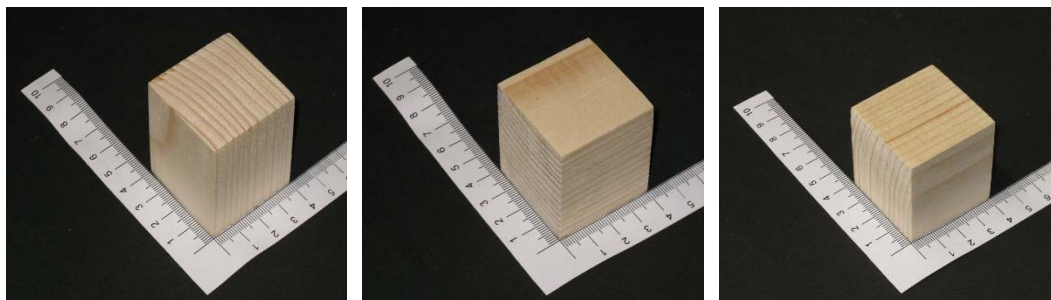


Abb. 96 Beispiele für Fichte-Probekörper (von links nach rechts): longitudinal, radial, tangential.

Die Probekörper wurden so zugeschnitten, dass die Lage aller Jahresringe möglichst eindeutig nur einer Transportrichtung zugeordnet werden kann. Während der Transportexperimente waren vier Seiten der Probekörper dampf- und flüssigwasserdicht abgedichtet (Abb. 96).

Sofern vorhanden, wurden die grundlegenden Materialeigenschaften in Übereinstimmung mit internationalen Richtlinien gemessen. Tab. 7 führt charakteristische, hygrische Materialeigenschaften für Eiche, Fichte und Kiefer in longitudinaler, radialer und tangentialer Materialrichtung auf. Die darauf folgende Tab. 8 enthält die Desorptionswerte der Sorptionsisotherme, d.h. ursprünglich gesättigte Materialproben werden nach und nach getrocknet. Im überhygroskopischen Bereich der Saugspannungskurve werden Druckplattentöpfe zur Messung des Wassergehalts verwendet, der hygroskopische Bereich der Sorptionsisotherme wird mithilfe von Exsikkatoren ermittelt. Die Größenänderungen infolge von Schwinden und Quellen wurden erfasst und bei den Volumengehalten berücksichtigt.

Tab. 7 Charakteristische, hygrische Materialeigenschaften von Fichte, Kiefer und Eiche mit ρ - Rohdichte, θ_{por} - Porosität, θ_{80} - Wassergehalt bei 80 % r.F., μ_{dry} - Wasserdampfdiffusionswiderstandsfaktor (dry cup), A_w - Wasseraufnahmekoeffizient und K_i - Flüssigwasserleitfähigkeit nahe der Sättigung.

Probekörper		ρ [kg/m ³]	θ_{por} [Vol.-%]	θ_{80} [Vol.-%]	μ_{dry} [-]	A_w [kg/m ² ·s ^{0,5}]	K_i [s]
Fichte	long.	394	72,8	6,6	4,6	0,012	$2,0 \cdot 10^{-10}$
	radial				186,1	0,012	$1,8 \cdot 10^{-10}$
	tang.				487,7	0,005	$9,2 \cdot 10^{-10}$
Kiefer	long.	554	65,4	7,1	4,5	0,017	$7,4 \cdot 10^{-10}$
	radial				384,1	0,016	$1,0 \cdot 10^{-10}$
	tang.				222,9	0,001	$9,8 \cdot 10^{-10}$
Eiche	long.	581	68,4	9,1	8,3	0,008	$1,1 \cdot 10^{-09}$
	radial				129,5	0,003	$1,4 \cdot 10^{-11}$
	tang.				230,7	0,002	$5,4 \cdot 10^{-12}$

Tab. 8 Desorptionskurve der Sorptionsisotherme (Einheit: %) von Fichte, Kiefer und Eiche.

Sorptionsisotherme [%]	Fichte [m³/m³]	Kiefer [m³/m³]	Eiche [m³/m³]
97,4	0,105	0,115	0,255
96,0	0,102	0,113	0,159
90,0	0,080	0,088	0,104
84,7	0,071	0,079	0,103
75,4	0,062	0,067	0,080
58,2	0,048	0,053	0,059
43,2	0,044	0,049	0,058
32,9	0,030	0,031	0,031

Die Rohdichte und Feuchtespeichereigenschaften wie die Porosität θ_{por} und der Wassergehalt bei 80 % relativer Luftfeuchte sind unabhängig von der Richtung. Bei dem Kieferholz handelte es sich um vergleichsweise dichte Probekörper. Die in diesem Projekt gemessenen Speicherkennwerte liegen prinzipiell im üblichen Bereich.

Landläufig ist die Annahme verbreitet, dass der Wärme- wie Feuchtetransport in Holzlängsrichtung (longitudinal) ausgeprägter ist als in radialer und tangentialer Richtung, welche ungefähr ähnliche Transporteigenschaften aufweisen sollen. Gemessen an diesen Meinungen sind die Messergebnisse überraschend. Zunächst ist auffallend, dass sich der A_w -Wert der verschiedenen Transportrichtungen kaum unterscheidet (Tab. 7). Zudem ist er in radialer Richtung ähnlich groß wie in longitudinaler Richtung mit Ausnahme der Eiche, deren Zellaufbau als Laubbaum von dem Zellaufbau der Nadelhölzer abweicht. Demnach vollzieht sich die Ausbreitung von Flüssigwasser in Fichte- und Kiefer-Holzbalken längs und quer zur Faser fast identisch. Quer zur Faser überlagern sich radiale und tangentielle Prozesse.

Bezüglich des Wasserdampftransportes ist die Richtungsabhängigkeit dagegen sehr groß. Das Transportpotential in longitudinaler Richtung übertrifft bei weitem das der anderen Richtungen, wobei Eiche longitudinal mit 8,3 den größten μ -Wert aufweist, in den anderen Richtungen allerdings den geringsten oder annähernd geringsten μ -Wert. Bei den Nadelhölzern sind zum einen die besonders großen μ -Wert-Unterschiede quer zur Wuchsrichtung bemerkenswert. Zum anderen wurde mit ca. 488 der höchste μ -Wert bei Fichte in tangentialer Richtung gemessen, wohingegen bei Kiefer und auch Eiche, der höchste μ -Wert in radialer Richtung auftritt, obwohl beides Nadelhölzer sind. Die Ursachen für diese überraschenden Unterschiede bei den Transportkennwerten waren nicht Gegenstand dieses Forschungsprojektes.

1.3.3.2 Erstellung der Materialfunktionen

Um eine anisotrope DELPHIN-Materialdatei erstellen zu können wurde das Verfahren von [66] erweitert.

Im üblichen Verfahren wird die gesamte Feuchtespeicherfunktion iterativ an alle Messpunkte der Saugspannungskurve und Speicherisotherme angepasst, die durch Messungen in Druckplattenapparaten und Desikkatoren erfasst wurden (Abb. 97). Da für die

Berücksichtigung der Hysterese noch kein praktikables Modell existiert, wurden für die Generierung der Materialfunktionen nur Desorptionsdaten verwendet.

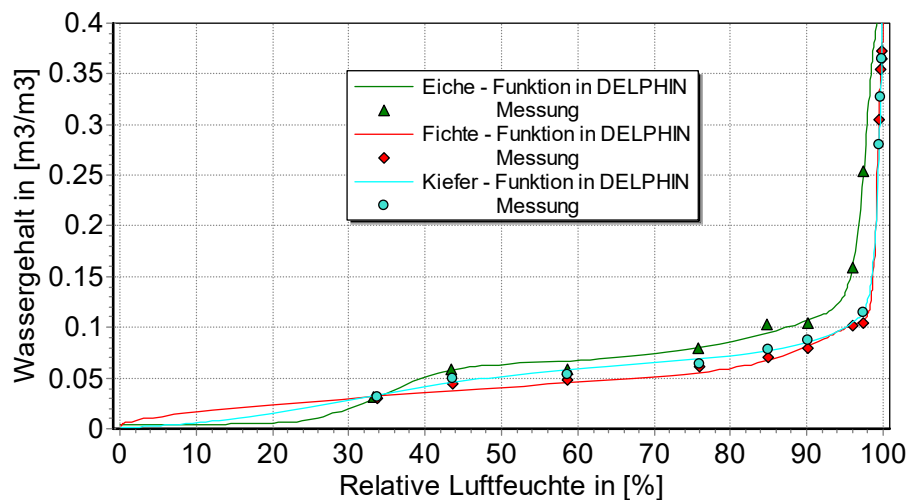


Abb. 97 Sorptionsisotherme mit den Punkten der Saugspannungskurve im hochfeuchten Bereich.

Eine gute Übereinstimmung wird durch das Anpassen von so genannten Modalitäten, die durch einen Kapillardruck und Wassergehalt in ihrer Position festgelegt werden und deren Standardabweichung bekannt ist, erzielt. Die Anzahl der Modalitäten richtet sich nach den jeweiligen Erfordernissen. In einem zweiten Schritt werden die Flüssigwasser- und Wasserdampftransportfunktion ($K_\ell(\theta_\ell)$, $K_v(\theta_\ell)$) zur angepassten Feuchtespeicherfunktion generiert.

Die Summe beider Funktionen $K_{\ell+v}(\theta_\ell)$ muss monoton ansteigen und die gemessenen μ -Werte und Flüssigwasserleitfähigkeiten berühren. Um eine gute Übereinstimmung mit den beiden Validierungsexperimenten (Wasseraufnahmeversuch und Trocknungsversuch) zu erhalten, kann die Steigung der Feuchteleitfunktion $K_{\ell+v}$ partiell iterativ angepasst werden, bis eine ausreichende Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation vorliegt (Abbildungen 98 bis 100 für Fichte).

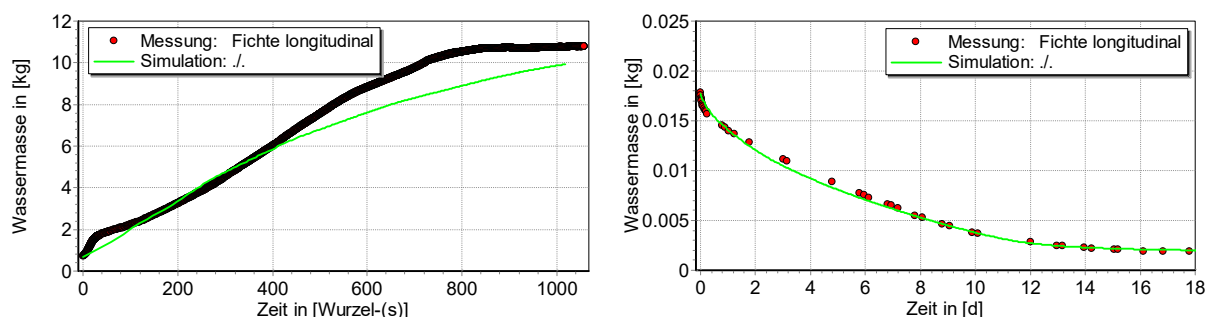


Abb. 98 Messung und Simulation des Wasseraufnahme-(links) und Trocknungsexperiments (rechts) für longitudinalen Transport in Fichte.

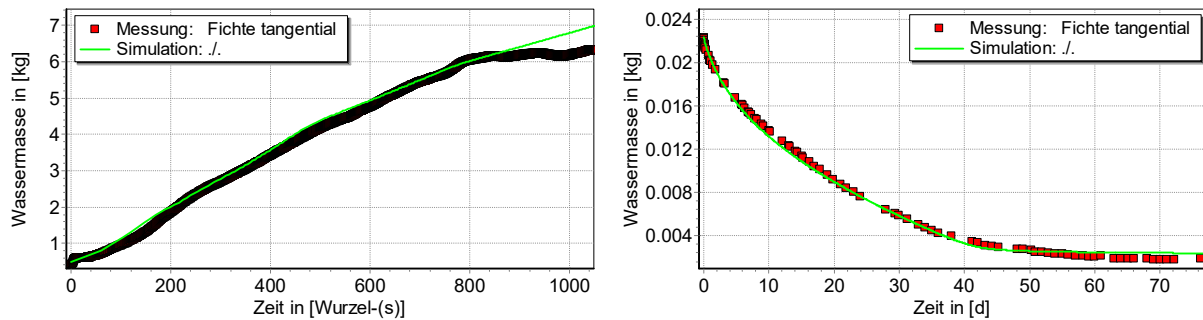


Abb. 99 Messung und Simulation des Wasseraufnahme-(links) und Trocknungsexperiments (rechts) für tangentialen Transport in Fichte.

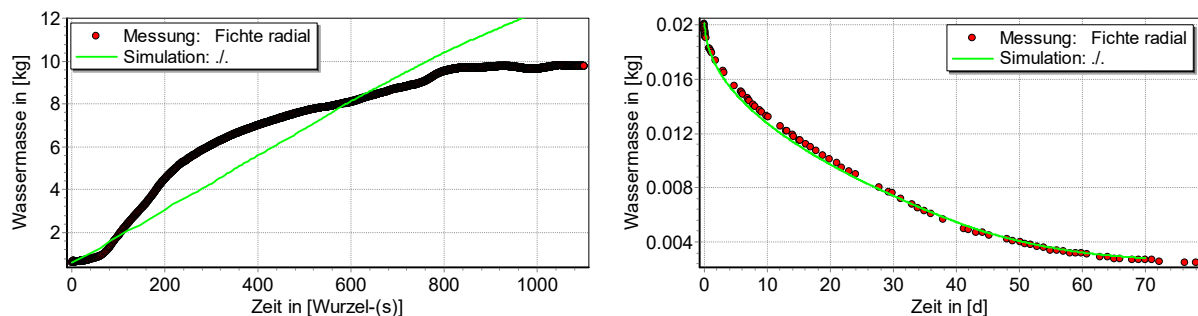


Abb. 100 Messung und Simulation des Wasseraufnahme-(links) und Trocknungsexperiments (rechts) für radialen Transport in Fichte.

Es ist zu beachten, dass $K_\ell(\theta_\ell)$ und $K_v(\theta_\ell)$ getrennt behandelt werden. Nachdem die Anpassungsprozedur abgeschlossen ist, werden alle Materialfunktionen und charakteristischen Materialkennwerte in einer DELPHIN 6-Materialdatei abgelegt. Das Format solcher Dateien wird in [63] beschrieben.

Kritische Anmerkungen zum Wasseraufnahmeexperiment

Die diversen Richtlinien (z.B. [70]) zur Bestimmung der Wasseraufnahme wurden in erster Linie im Zusammenhang mit mineralischen Materialien entwickelt. Trotz der speziellen Eigenschaften von Holz wie Schwinden und Quellen und einer besonders inhomogenen Struktur zeigt die Anwendung dieses Verfahrens auf Holz in diesem Projekt in den meisten Fällen eine gute Übereinstimmung zwischen den Messungen und Validierungssimulationen (Abbildungen 98 bis 100).

Wasseraufnahmekoeffizienten (A_w - oder w -Werte) sind bei Feuchtetransportsimulationen ein wichtiger Eingabe- oder Bewertungswert. Sie werden durch Extrapolation aus Wasseraufnahmeexperimenten gebildet. Eine „ideale“ Wasseraufnahmekurve, wie sie gemäß den Richtlinien meistens zu erwarten ist, steigt zu Beginn linear an und geht dann recht abrupt in ein Plateau über (schwarze Linie in Abb. 101).

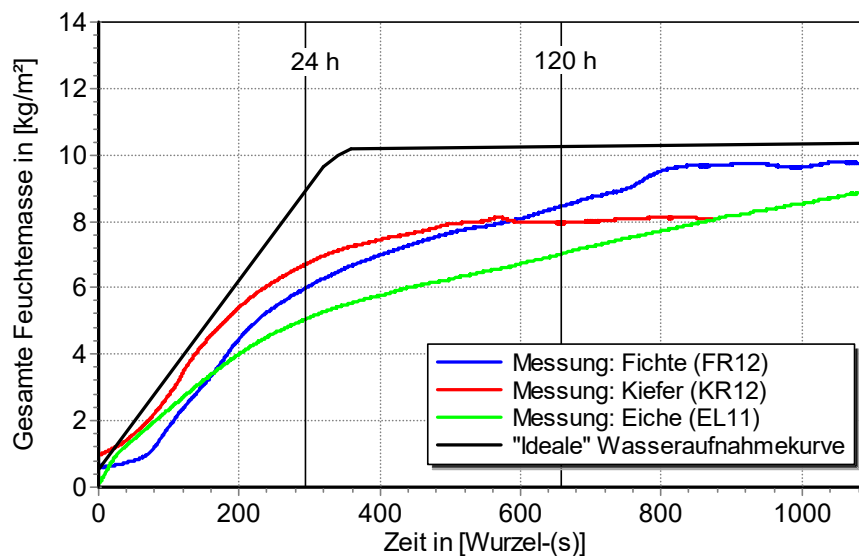


Abb. 101 Eine „ideale“ Wasseraufnahmekurve im Vergleich mit realen Kurven verschiedener Holzarten.

Werden beide Teile, lineare Zunahme und Plateau, zu zwei Geraden abstrahiert, schneiden sich diese Geraden in einem Punkt. Die Steigung der Geraden vom Beginn der Wasseraufnahme bis zum Schnittpunkt ergibt den A_w -Wert.

Diese gegenwärtig praktizierte Methode ist für viele traditionelle, poröse Materialien gut geeignet. Im Falle von quellenden Materialien, wie z.B. Holz oder auch Kalksandstein, ändert sich die Porengeometrie während der Wasseraufnahme weshalb sich, unter anderem, eine nicht lineare Wasseraufsaugkurve ergibt („Bogenlampe“, Vergl. der Kurven für Kiefer und Eiche in Abb. 101). Daraus ergibt sich, dass sich aus Wasseraufnahmekurven von Holz oder anderen quellenden Materialien nicht ohne weiteres zwei charakteristische, lineare Funktionen ableiten lassen. Auch bei bestimmten mineralischen Materialien, wie Zementputzen konnte dieses Verhalten beobachtet werden.

Internationale Richtlinien ([70], etc.) bieten nur eine Lösung für lineares Sorptionsverhalten und beschäftigen sich nur unzureichend mit nicht-linearen Kurven, was zu deutlichen Fehleinschätzungen führen kann. Generell wird dort für nicht-lineare Kurven der Schnittpunkt auf 24 h festgelegt, obwohl der Wasseraufnahmeprozess immer noch andauern kann, wie in Abb. 101 zu sehen ist. Abgesehen von der Streuung der Eigenschaften natürlicher Materialien oder dem Einfluss des Quellens ist diese Inkonsistenz verantwortlich für hohe Abweichungen der A_w -Werte aus verschiedenen Quellen. Sie erklären auch die Unterschiede zwischen Literaturwerten und eigenen Messwerten aus Tab. 7. Messungen von [84] unterstützen diese These: dort wird eine untere und obere Grenze eines A_w -Bereiches für einzelne Holzarten im ersten Trocknungsabschnitt angegeben. Dabei wird der Trend zu nicht-linearem Verhalten im Plateau-Bereich aufgrund von Quellvorgängen sichtbar. Offensichtlich sind eine neue, praktikable Beschreibung des Flüssigwasser-Transportverhaltens oder zumindest eine neue Methode zur Bestimmung von A_w -Werten solcher Materialien notwendig.

1.3.4 Messungen am Holzbalkenkopfprüfstand unter Laborbedingungen

Am Institut für Bauklimatik wurde ein Prüfstand zum Test der klimatischen Verhältnisse am Holzbalkenkopf errichtet. Dieser Prüfstand ermöglicht die messtechnische Untersuchung von drei verschiedenen Innendämmsystemen (PUR-Hybridplatte, Kalziumsilikatplatte und Mineraldämmplatte) mit jeweils zwei Verschiedenen Einbauvarianten für den Balkenkopf sowie jeweils einem ungestörten Wandaufbau. Es ergeben sich daraus insgesamt neun Messstrecken.

Auf der Kaltseite des Prüfstandes wird ein künstliches Außenklima erzeugt und auf der Warmseite ein künstliches Raumklima. Die Bedingungen sind beidseitig regulierbar.

Die Erkenntnisse aus dem Messaufbau dienen zwei Zwecken. Unter kontrollierten Laborbedingungen werden Referenzfälle für die Validierung der Software DELPHIN geschaffen, d.h. für vorgegebene Randbedingungen werden die Ergebnisse der hygrothermischen Simulation mit den Messergebnissen verglichen. So können Abweichungen identifiziert und die Berechnungsmodelle gegebenenfalls angeglichen werden. Zweitens dient der Prüfstand dem Vergleich der gewählten Innendämmsysteme untereinander. In diesem Rahmen wird der Einfluss der Einbaufeuchte, kritischer Kalt- und Warmseitenbedingungen sowie der jeweiligen Balkenkopf einbauvariante untersucht.

Ausgehend davon lassen sich folgende Zielstellungen formulieren:

- Erfassung und Analyse der detaillierten hygrothermischen Prozesse im ungestörten Wandaufbau und am Holzbalkenkopf (zzgl. Durchströmung) in Abhängigkeit selbst definierter Kalt- und Warmseitenrandbedingungen
- Vergleich des Einflusses unterschiedlicher Einbauvarianten für den Holzbalkenkopf in Abhängigkeit selbst definierter Kalt- und Warmseitenrandbedingungen
- Vergleich des Einflusses unterschiedlicher Dämmsysteme mit unterschiedlicher Wärmeleitfähigkeit, Diffusionsoffenheit und Kapillaraktivität in Abhängigkeit selbst definierter Kalt- und Warmseitenrandbedingungen
- Vergleich der Ergebnisse bzw. Verifizierung der hygrothermischen Bauteilsimulation für verschiedene Detaillierungsstufen (z.B. 1D, 2D, 3D) mit den Messergebnissen
- Kalibrierung des hygrothermischen Berechnungsverfahrens mithilfe der Messungen

1.3.4.1 Aufbau des Prüfstandes

Als Standort wurden die neuen Laborräumlichkeiten des Instituts gewählt. Um möglichst stabile Umgebungsbedingungen zu gewährleisten befindet sich der Prüfstand in einem separat abgetrennten Raum im Kellergeschoss.

Die Abb. 102 enthält eine Grundriss- und Schnittdarstellung des Prüfstandes. Es ist zu erkennen, dass Warm- und Kaltseite jeweils unterschiedliche Hüllkonstruktionen aufweisen. Beiden Seiten gemein ist die Umschließung mittels eines Holzständerbauwerkes mit OSB 4-Plattenbeplankung. Der hohe Bindemittelanteil sorgt für einen hohen Wasserdampfdiffusionswiderstand und hohe Luftdichtigkeit. Zusätzlich wurden die Stoßfugen mit Dichtbändern versiegelt und Bauteilanschlüsse mit vorkomprimierten Dichtbändern

abgedichtet. Im Kaltseitenbereich wurde das Dämmniveau durch eine 12 cm starke PUR-Platte (BauderPIR FA, $\lambda=0,024 \text{ W/mK}$) mit beidseitiger Aluminiumdeckschicht erhöht. Die thermische und hygrische Entkopplung der Mauerwerkswand erfolgt durch einen 10 cm Schaumglassockel. Beide Kammern (Warmklima- und Kaltklimakammer) verfügen über separate Zugänge. Die Prüfwand ist horizontal in drei Abschnitte sowie vertikal in zwei Abschnitte (oben, unten) für die Balkenköpfe und einen Abschnitt für den ungestörten Wandaufbau (Mitte) unterteilt. Sie erstreckt sich über eine Breite von 3 m sowie eine Höhe von 2,5 m. Die Behandlung der Balken unterscheidet sich jeweils zwischen dem unteren und dem oberen Bereich in Bezug auf die Abdichtung zum Innenraumklima. Dabei wurde weitestgehend der Empfehlung des im jeweiligen Prüffeld verwendeten Dämmstoffherstellers gefolgt. Die Tiefe von Warm- und Kaltseitenkammer beträgt jeweils ca. 1,5 m.

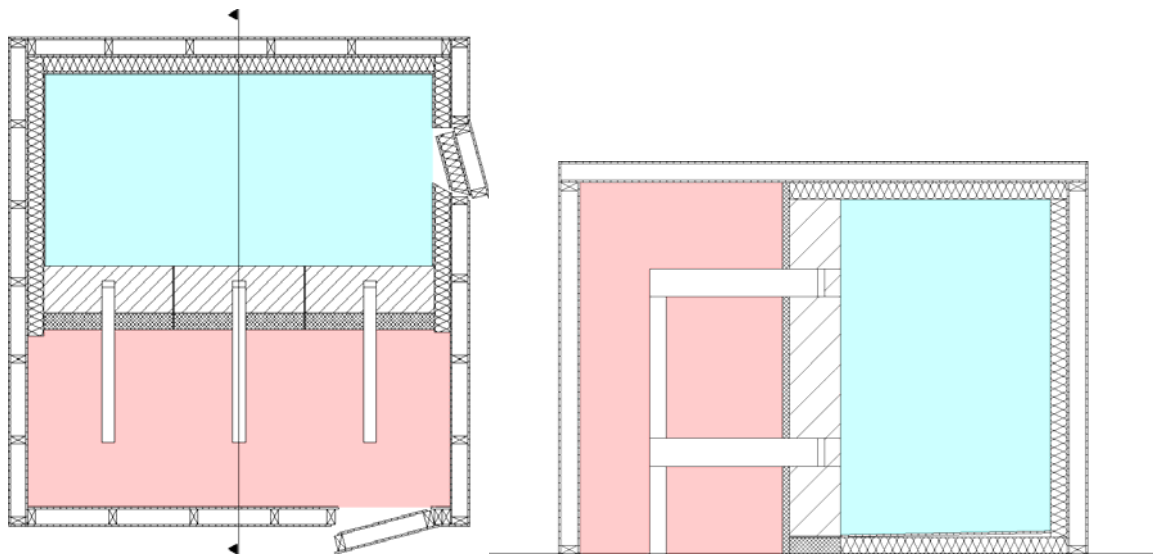


Abb. 102 Grundriss (links) und Schnitt (rechts) der Prüfkammer zum Test der Balkenköpfe und Dämmvarianten. Die Warmseitenkammer ist hellrot hinterlegt, die Kaltseitenkammer hellblau.

Die Warmseitenkammer (Abb. 103, rechts) kann bei Bedarf mit einem Heizstrahler und einem Befeuchter ausgestattet werden. Im Normalfall handelt es sich aber um eine passive Klimaregulierung, die von den nahezu konstanten Bedingungen (23 °C und 40-50 % r.F.) in den Laborräumen abhängig ist. In der Kaltseitenkammer (Abb. 103, links) befinden sich neben der Heiz- und Kühleinheit (Heizleistung: 2,0 kW, Kühlleistung 2,2 kW) auch ein System zur Be- und Entfeuchtung. Für eine homogenere Durchmischung des Luftvolumens wurden zusätzliche Ventilatoren installiert. Die Regelung der Temperatur ist in den Grenzen von -10 bis 25 °C möglich. Für die relative Feuchte ergibt sich ein Rahmen von 20-90 %.



Abb. 103 Blick in die Kaltseite mit verbauter Sensorik und Klimatechnik (links), Blick auf die Warmseite mit den sechs Balkenkopfdetails und der Datenaufzeichnung (rechts).

Die Prüfwand wurde vertikal und horizontal in jeweils drei Prüfabschnitte, d.h. insgesamt in neun Prüfabschnitte, unterteilt. Die im Grundriss zu erkennende horizontale Unterteilung in drei Prüfabschnitte entspricht den unterschiedlichen Dämmvarianten mit PUR-Hybrid-, Kalziumsilikat- und Mineraldämmplatten. Für jede der gewählten Dämmvarianten wurden die vom Hersteller empfohlenen Kombinationsprodukte für Klebemörtel und Innenputz verwendet (Abb. 104). Die Höhenunterteilung der Prüfabschnitte entspricht der Unterteilung in einen ungestörten Wandabschnitt (Mitte) sowie zwei Varianten von Balkenkopfeinbindungen (obere und untere Variante). Die horizontal benachbarten Prüfabschnitte sind durch eine Dampfsperre sowie einen Dämmstreifen voneinander getrennt. In der Vertikalen erfolgte keine Unterteilung.

II.1 Vorhabensziele, Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

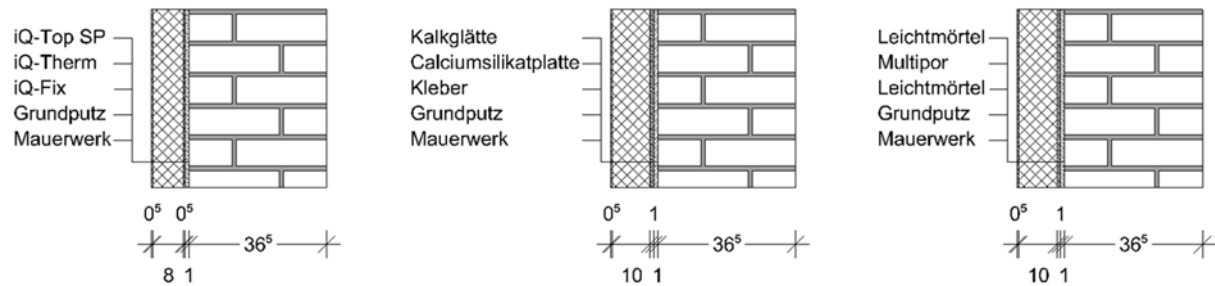


Abb. 104 Darstellung der Wandaufbauten für die PUR-Hybridplatte, Kalziumsilikatplatte und Mineraldämmplatte mit den jeweils zugehörigen Systemprodukten und Materialschichtdicken.

Beschreibung des Mauerwerks

Die Basiskonstruktion stimmt in allen Prüfabschnitten überein. Es handelt sich um ein Ziegelsichtmauerwerk bestehend aus Ziegeln im deutschen Normalformat (11,5x7,1x24 cm), welches in Kreuzverband von 1,5 Steinen Mauerstärke errichtet wurde. Die Stoß- und Lagerfugen wurden mit einem Kalkzementmörtel und einer Schichtdicke von 1 cm bzw. 1,2 cm ausgeführt. Entgegen landläufiger Praxis wurden Lager- und Stoßfugen vollflächig verfugt („akademisches Mauerwerk“). So sollen unkontrollierbare Einflüsse durch Luftströmungen innerhalb des Mauerwerks minimiert werden mit dem Ziel einer besseren Vergleichbarkeit der Mess- und Simulationsergebnisse. Um einen gleichmäßigen Untergrund für die Dämmstoffplatten zu schaffen, wurde auf allen Feldern der gleiche Ausgleichsputz aufgebracht. Dieser bildet die Grundlage für die drei aufgetragenen Dämmsysteme, welche ihrerseits aus einem Klebemörtel, den eigentlichen Dämmstoffplatten sowie einem innenseitigen Putz (einschließlich Armierungsgewebe) bestehen.

Tab. 9 Eigenschaften der Materialien im Mauerwerk.

Materialname	ρ Dichte [kg/m³]	λ Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	μ Dampfdiffusionswiderstandsfaktor [-]	A_w Wasser- aufnahme- koeffizient [kg/m²s ^{0,5}]	θ_{80} Wasser- gehalt bei 80 % r.F. [m³/m³]	θ_{eff} Effektives Poren- volumen [m³/m³]
Ziegel	1843	0,938	15	0,2189	0,001	0,288
Mörtel	1878	0,803	37	0,0361	0,060	0,223
Ausgleichsputz	995	0,220	11	0,0212	0,078	0,331

Das bauphysikalische Verhalten der Baustoffe kann zunächst in eine thermische und eine hygrische Reaktion unterteilt werden. Beiden Teilen liegen die entsprechenden Materialeigenschaften aus Tab. 9 zu Grunde, welche das Transport- und Speicherverhalten beeinflussen.

Die thermische Reaktion eines Materials wird maßgeblich durch die Materialkennwerte Wärmespeicherkapazität c (Speicherung) und Wärmeleitfähigkeit λ (Transport) bedingt. Der erste Kennwert ergibt sich aus der spezifischen Wärmespeicherkapazität sowie der entsprechenden Kenngröße, i.d.R. der Dichte ρ . Da sich die spezifische

Wärmespeicherkapazität von Baustoffen kaum unterscheidet und überwiegend in einem Bereich von ca. 800 J/kgK liegt, ist meist die Dichte der aussagekräftigere Kennwert für die Wärmespeicherkapazität. Unter den aufgelisteten Materialien der Prüfwand und auch im Vergleich zu anderen Baustoffen zeigen Ziegel und Mörtel die höchste Dichte. Es folgt daraus, dass das Speicherverhalten, welches sich unter anderem in einer zeitlichen Verzögerung und einer Amplitudendämpfung der schwankenden Klimarandbedingungen äußert, vor allem durch das Mauerwerk bestimmt wird. Der Transportkennwert Wärmeleitfähigkeit bestimmt den thermischen Widerstand einer Wandkonstruktion. Für das Mauerwerk ist dieser Widerstand verhältnismäßig gering, d.h. die innerhalb des Mauerwerks erreichbare Temperaturspreizung stellt sich entsprechend gering dar. Der Kennwert Wärmeleitfähigkeit stellt eine Vereinfachung physikalischer Prozesse dar und ist in der Realität temperatur- und wassergehaltsabhängig. Die Abhängigkeit vom Wassergehalt ist zum Teil erheblich größer und wird vor allem durch die Porenstruktur bestimmt. Grundsätzlich schließen poröse Baustoffe entsprechend ihrer absoluten Porosität Luft im Porensystem ein. Wird diese Luft bei Befeuchtung des Baustoffes durch Wasser ersetzt, so steigt auch die mittlere Wärmeleitfähigkeit des Baustoffes, da Wasser eine erheblich höhere Wärmeleitfähigkeit (0,560 W/mK) aufweist als ruhende Luft (0,026 W/mK). Dieser Befüllungsprozess ist nur für jene Poren möglich, welche für Flüssigwasser zugänglich sind. Dieser Volumenanteil am Gesamtvolumen des Baustoffs ist in der zuvor aufgeführten Tab. 9 als effektives Porenvolumen gelistet und beträgt für das Mauerwerk ca. 25 %. Wird die Wärmeleitfähigkeit des trockenen Baustoffes sowie des Wassers volumenanteilig gemittelt, so ergibt sich, unter der Annahme einer vollständigen Wasserfüllung des effektiven Porenvolumens, eine Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit von 0,800 auf 0,920 W/mK für den Mörtel und von 0,940 auf 1,100 W/mK für den Ziegel. Dieser Sättigungseinfluss ist noch erheblicher für die Wärmespeicherkapazität des Baustoffs und führt nahezu zu einer Verdopplung (Ziegel: 1770 J/kgK, Mörtel: 1470 J/kgK), wenn das gesamte effektive Porenvolumen wassergefüllt ist. Auf der Grundlage dieser Betrachtung ist bei Flüssigwassersättigung des Mauerwerks mit einer deutlichen Vergrößerung der Speicherkapazität zu rechnen.

Die thermischen Kennwerte eines Baustoffes können in der so genannten Temperaturleitfähigkeit bzw. thermischen Diffusivität a ($= \lambda/c$) zusammengefasst werden. Dieser Kennwert beschreibt die Eignung eines Materials zur Übertragung thermischer Signale. Die Temperaturleitfähigkeit nimmt mit ansteigender Wärmeleitfähigkeit und abnehmender Speicherkapazität zu. Für die Mehrheit der Baustoffe lässt sich jedoch resümieren, dass eine hohe Wärmeleitfähigkeit mit einer hohen Speicherkapazität einhergeht und sich damit die Temperaturleitfähigkeit gesättigter Baustoffe untereinander kaum unterscheidet. Bei einer Auffeuchtung können sich die Eigenschaften entsprechend des Verhältnisses der Stoffkennwerte zu Wasser verschieben. So führt eine Sättigung des o.g. Mauerwerks überproportional zu einem Anstieg der Wärmespeicherkapazität und folglich zu einer Abnahme der Temperaturleitfähigkeit um ca. die Hälfte im Vergleich zum trockenen Baustoff.

Die oben aufgeführte Darstellung der Zusammenhänge stellt eine starke Vereinfachung dar. Bei realen Be- und Entfeuchtungsvorgängen von Baustoffen spielen weitaus komplexere

Vorgänge eine Rolle. Eine saubere und vollständige Beschreibung dieser Vorgänge bzw. der zu Grunde liegenden physikalischen Gesetzmäßigkeiten und der Materialstrukturen ist bislang nicht bekannt. Die verfügbaren Ansätze beschreiben den Feuchtetransport in porösen Materialien eher phänomenologisch mithilfe von Transport- und Speicherkennwerten bzw. Funktionen mit den dazugehörigen Transportpotenzialen. In diesem Sinne wird bspw. der Wasserdampftransport über die treibende Kraft des Partialdampfdruckgradienten bzw. des Luftdruckgradienten initiiert. Die treibenden Kräfte des Flüssigwassertransports sind entsprechend Kapillardruckgradient, Schwerkraft sowie ebenfalls Luftdruckgradient. Die erforderlichen Transport- und Speicherfunktionen sind bspw. für den Dampftransport die Dampfleitfähigkeit und für den Flüssigwassertransport die Flüssigwasserleitfähigkeit, auch wenn diese Unterteilung diskutabel ist. Eine Darstellung dieser beiden Funktionen enthält die Abb. 105.

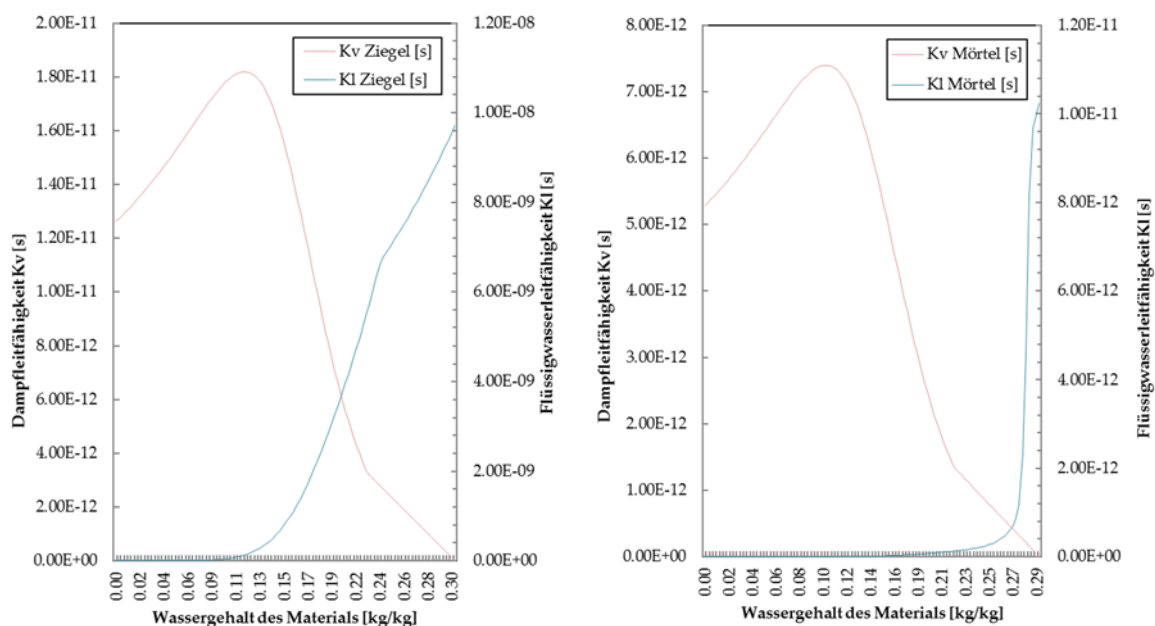


Abb. 105 Flüssigwasserleitfähigkeit K_l (rechte Skala) und Dampfleitfähigkeit K_v (linke Skala) für den im Prüfstand eingesetzten Vollziegel (links) und Mörtel (rechts).

Zwei wesentliche Erkenntnisse lassen sich aus diesen Diagrammen schlussfolgern. Erstens ist die Flüssigwasserleitfähigkeit um mindestens eine Zehnerpotenz höher als die Dampfleitfähigkeit, wobei der Unterschied für den Ziegel sogar drei Zehnerpotenzen beträgt. Zweitens ist sowohl die Flüssigwasserleitfähigkeit, als auch die Dampfleitfähigkeit des Ziegels erheblich höher als jene des Mörtels. Darüber hinaus ist ersichtlich, dass die Flüssigwasserleitfähigkeit an unterschiedlichen Punkten des Materialfeuchtegehaltes sprunghaft zunimmt, d.h. der Mörtel erreicht eine, dem Ziegel adäquate, Flüssigwasserleitfähigkeit erst ab einem deutlich höheren Wassergehalt nahe der Sättigung. Dieser Umstand muss im Zusammenhang mit der Porenstruktur und dem damit verbundenen Befeuchtungsvorgang im Material gesehen werden. So ist eine optimale Flüssigwasserleitfähigkeit erst dann möglich, wenn die Porenwände über einen geschlossenen Wasserfilm verfügen. Dieser Zustand ist von mehreren Faktoren, u.a. der Porenvolumenverteilung, abhängig.

Aus den Leitfähigkeitskurven der Abb. 105 ist ersichtlich, dass die Transportkapazität eines Baustoffs vom Wassergehalt des Materials abhängig ist. In trockenen Materialien findet vornehmlich Dampftransport statt, während in nahezu gesättigten Materialien Flüssigwassertransport vorherrscht. Der Verlauf der Kurven lässt Rückschlüsse auf das Feuchtespeicherverhalten zu und umgekehrt. Diese Speicherefähigkeit kann in Form von Retentionskurven bzw. Sorptionsisothermen beschrieben werden, wobei die relative Luftfeuchte des Umgebungsklimas bzw. ein anliegender Kapillardruck mit dem sich im Baustoff einstellenden Wassergehalt ins Verhältnis gesetzt wird (Abb. 106). Beide funktionellen Zusammenhänge (Feuchtegehalt über der relativen Luftfeuchte und Feuchtegehalt über dem Kapillardruck) sind über die *Kelvin*-Gleichung ineinander überführbar.

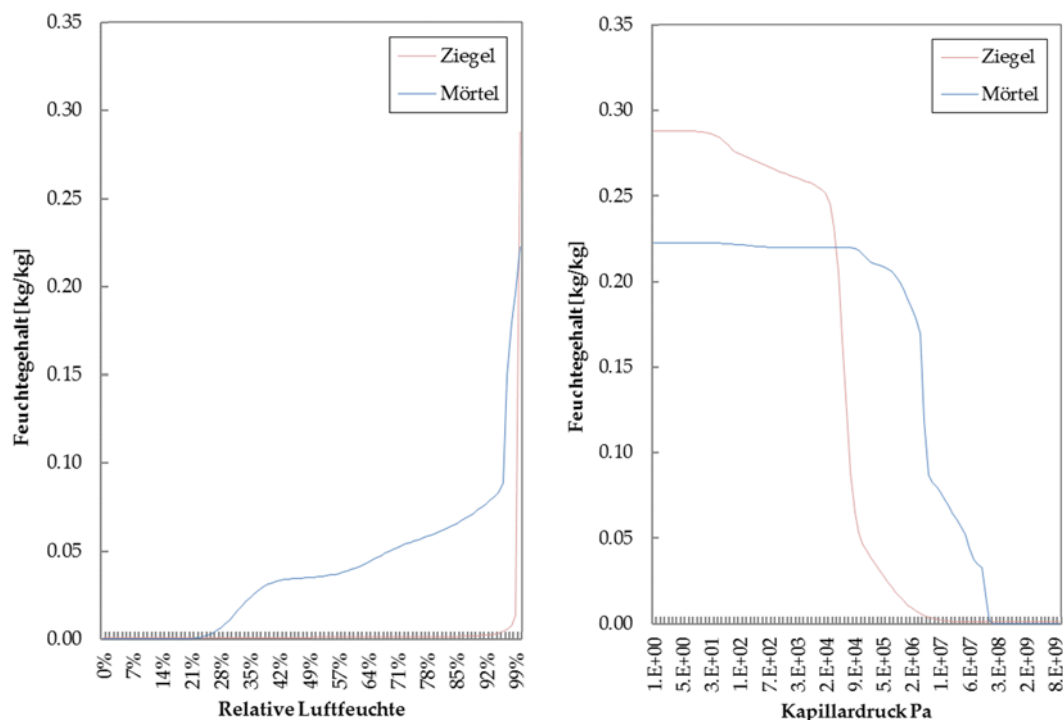


Abb. 106 Feuchtespeicherfunktion in Form der Sorptionsisothermendarstellung (links) und Retentionskurvendarstellung (rechts), jeweils für Ziegel und Mörtel.

Die Retentionskurven enden auf dem Niveau des effektiven Porenvolumens. Da dieses für den Ziegel (0,288 kg/kg) etwas höher als für den Mörtel (0,223 kg/kg) ist, besteht eine höhere absolute Speicherefähigkeit für Flüssigwasser im Ziegel. Ferner ist zu schlussfolgern, dass der Befeuchtungsvorgang bei zunehmendem Feuchteniveau der Umgebung im Mörtel eher (ca. 25 %) einsetzt als im Ziegel (über 95 %).

Das hygrische Reaktionsverhalten eines Baustoffes kann nicht adäquat zum thermischen Verhalten über eine Diffusivität zusammengefasst werden. Es lassen sich jedoch aus den aufgeführten Speicher- und Transportfunktionen feuchtebereichsabhängige Aussagen treffen. So ist das trockene Mauerwerk relativ diffusionsoffen, wodurch das Dampftransportpotenzial des Ziegels deutlich über dem des Mörtels liegt. Ist das Mauerwerk stark befeuchtet, so kann innerhalb des Ziegels eine effektive Flüssigwasserleitfähigkeit

erfolgen, während die Fugen ein deutlich geringeres Transportvermögen aufweisen und damit die Verteilung innerhalb des Mauerwerks verzögern.

Da im Prüfstand keine Beregnungsanlage vorhanden ist und während der anfänglichen Trocknungsphase nicht mit Kondensatausfall zu rechnen ist, kommt zunächst nur die Einbaufeuchte als Flüssigwasserquelle in Betracht. Im Gegensatz dazu sind unter praktischen Bedingungen neben der Einbaufeuchte vor allem Regenwasser, drückendes Grundwasser oder aufsteigende Erdreichfeuchte relevant. Im Falle der Einbaufeuchte im Prüfstand sind zwei Quellen vorhanden, zunächst aus den vorgehängten Ziegeln (besserer Haftverbund mit dem Mörtel) und dem Mauerwerksmörtel, später aus dem Ausgleichsputz und dem Klebemörtel sowie abschließend aus dem Innenputz. Aus den Materialkennwerten dieses Mörtels ist ersichtlich, dass eine Austrocknung des Mauerwerks über Mörtelfugen hinweg nur zögerlich erfolgen kann, da sowohl Flüssigwassertransport- als auch Dampftransportkapazität im Mörtel relativ gering sind. Das ist in Bezug auf die erhöhte Einbaufeuchte keine wünschenswerte Materialeigenschaft, zeigt jedoch in Bezug auf Schlagregenschutz seine Berechtigung.

Innendämmsysteme

Auf die Basiskonstruktion der Prüfwand wurde in drei nebeneinanderliegenden Feldern ein jeweils anderes Dämmsystem aufgebracht. Die Dämmsysteme bestehen aus einem Klebemörtel zur Befestigung der Platten an der Wand, dem eigentlichen Dämmstoff sowie innenseitig einem Abschlussputz.

Die ausgewählten Dämmsysteme repräsentieren, in Bezug auf den Wärme- und Feuchtetransport, drei unterschiedliche Typen. Der im zweiten Feld verwendete Dämmstoff, Kalziumsilikat, stellt einen stark flüssigwasserleitfähigen (kapillaraktiven) und wasserdampfdurchlässigen Dämmstoff dar. Im dritten Feld wurden wenig flüssigwasserleitfähige, dafür aber ebenfalls dampfdurchlässige Minerale Dämmplatten aufgebracht. Das erste Prüffeld wurde mit einem vergleichsweise dampfbremsenden und wenig kapillar leitfähigen Dämmstoff, PUR-Hybridplatte, versehen. Die wichtigsten Kennwerte enthält Tab. 10.

Tab. 10 Materialeigenschaften der Innendämmplatten.

Materialname	ρ Dichte [kg/m ³]	λ Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	μ Dampfdiffusionswiderstandsfaktor [-]	A_w Wasser- aufnahme- koeffizient [kg/m ² s ^{0,5}]	θ_{80} Wasser- gehalt bei 80 % r.F. [m ³ /m ³]	θ_{eff} Effektives Poren- volumen [m ³ /m ³]
PUR-Hybridplatte (Feld 1)	55	0,031	63	0,003	< 0,001	0,093
Kalziumsilikat (Feld 2)	190	0,059	3,6	0,766	0,007	0,916
Minerale Dämm- platte (Feld 3)	100	0,039	3	0,006	0,005	0,128

Aus der Übersicht ist zu erkennen, dass ein Material in der Dichte heraussticht, die Kalziumsilikatplatte weist eine deutlich höhere Dichte als die anderen beiden Dämmplatten auf. Die Dichte der aufgeführten Dämmplatten stimmt prinzipiell mit den Niveaus der Wärmeleitfähigkeiten überein. Unter den Kennwerten fallen darüber hinaus ein deutlich erhöhter Dampfdiffusionswiderstand für die PUR-Hybridplatte sowie ein deutlich erhöhter Wasseraufnahmekoeffizient für die Kalziumsilikatplatte auf. Im Vergleich dazu stellt sich der Ausgleichsfeuchtegehalt bei 80 % (θ_{80}) relativer Luftfeuchte, ein Einzelkennwert aus den Sorptionsisothermen, gering dar. Das effektive, d.h. wasserzugängliche, Porenvolumen der Dämmstoffe unterscheidet sich ebenfalls stark. Den geringsten Wert weist die PUR-Hybridplatte auf, den höchsten die Kalziumsilikatplatte. Diese Reihenfolge stimmt mit der Reihenfolge der θ_{80} -Werte überein, jedoch nicht mit den A_w -Werten (Wasseraufnahmekoeffizienten). Das lässt sich damit begründen, dass im zweiten Wert, neben der Feuchtespeicherfähigkeit des Materials, auch die Flüssigwasserleitfähigkeit eingeht.

Ein wesentlicher Aspekt im Vergleich der drei Dämmsysteme ist in Bezug auf das thermische bzw. energetische Verhalten die feuchteabhängige Wärmeleitfähigkeit. Ausgehend von einem vereinfachten stationären Fall stellt sich dieser als Folge der relativen Luftfeuchte der am Bauteil anliegenden Luft ein. Dieser Zusammenhang ist in den Sorptionsisothermen der Baustoffe dargestellt. Unter der Annahme, dass bei einer Befeuchtung das eingeschlossene Luftvolumen mit einer mittleren Wärmeleitfähigkeit von ca. 0,026 W/mK durch Wasser mit einer Wärmeleitfähigkeit von ca. 0,560 W/mK ersetzt wird und die resultierende Wärmeleitfähigkeit volumenanteilig gemittelt werden kann, ergibt sich in Übereinstimmung mit den Sorptionsisothermen eine feuchteabhängige Wärmeleitfähigkeitskurve.

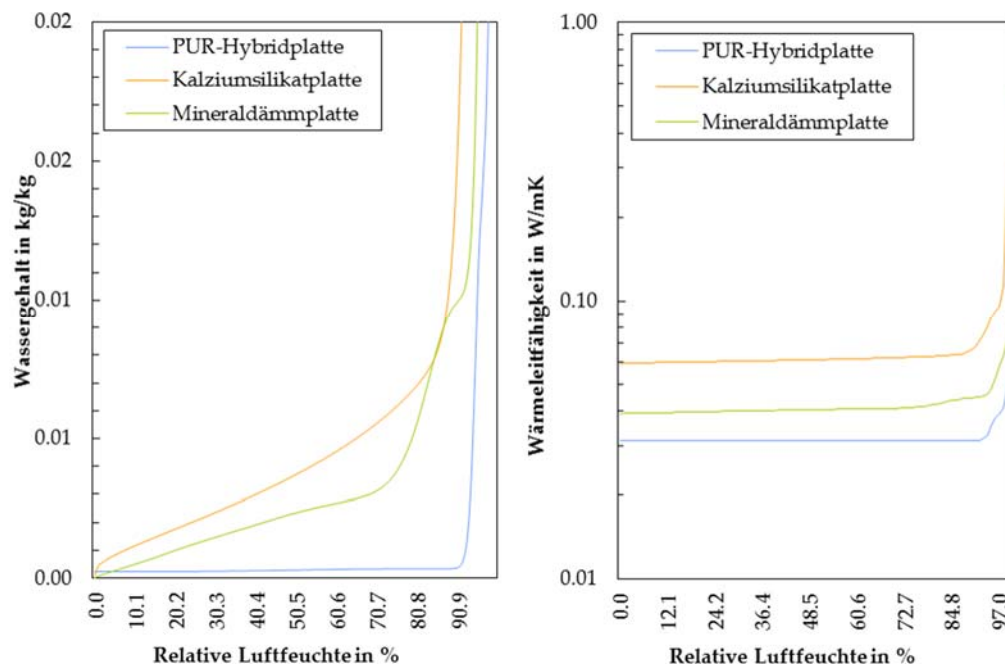


Abb. 107 Sorptionsisotherme der drei Dämmstoffe im Vergleich (links) und die daraus berechnete feuchtegehaltsabhängige Wärmeleitfähigkeit (rechts).

Aus Abb. 107 kann die Erwartung abgeleitet werden, dass bei erhöhtem Wassergehalt der Dämmstoffe, wie er bspw. in Form von Einbaufeuchte oder Kondensat auftritt, vor allem die Wärmeleitfähigkeit der Kalziumsilikatplatte ansteigt. Infolge der höchsten Wärmeleitfähigkeit, der drei Innendämmstoffe, ist in diesem Prüffeld mit dem höchsten Temperaturniveau hinter der Dämmschicht (Kaltseite) und dem geringsten Temperaturniveau auf der Warmseite der Dämmung zu rechnen. Im Gegensatz dazu ist für den Dämmstoff der PUR-Hybridplatte kaum mit einem Verlust der Dämmwirkung bei Befeuchtung der Konstruktion zu rechnen.

Andererseits verfügen die beiden weniger kapillaraktiven Dämmstoffe (Mineraldämmplatte und PUR-Hybridplatte) im Falle einer Feuchtequelle im Bauteil über ein deutlich reduziertes Spannungspotenzial, da im Falle der PUR-Hybridplatte weder Flüssigwasser noch Wasserdampf effektiv verteilt werden können und im Falle der Mineraldämmplatte hauptsächlich eine Entspannung über den Wasserdampftransport möglich ist. Es ist daher, in Bezug auf die Einbaufeuchte, insbesondere für das Prüffeld mit der PUR-Hybridplatte, ein langanhaltend hohes Feuchteniveau zu erwarten.

Prüffeld 1 – PUR-Hybridplatte

Im ersten Prüffeld wurde die PUR-Hybridplatte iQ-Therm der Firma Remmers angebracht. Die Dämmplatten bestehen hauptsächlich aus PUR (Polyurethan) und weisen Löcher mit 4 mm Durchmesser im Abstand von 40 mm auf, welche mit einem mineralischen Baustoff auf Kalziumsilikatbasis verfüllt sind. Dementsprechend zeigt der Dämmstoff eine sehr geringe Wärmeleitfähigkeit von ca. 0,031 W/mK. Reines PUR weist je nach Dichte und Verarbeitung eine Wärmeleitfähigkeit von 0,022-0,030 W/mK auf, für Kalziumsilikat ab circa 0,060 W/mK. Daraus erklärt sich der hohe Volumenanteil an PUR und die somit dominierenden Materialeigenschaften. Aufgrund dieser Dominanz ergibt sich, trotz der kapillaraktiven Durchdringungen, ein hoher Diffusionswiderstand. Für reines PUR liegt der Wasserdampfdiffusionswiderstandsfaktoren bei 40–200. Ebenso ist damit der geringe Wasseraufnahmekoeffizient ($0,774 \text{ kg/m}^2\text{h}^{0,5}$) zu erklären, da kapillarer Transport ausschließlich über die mineralischen Durchdringungen möglich ist. Die Berechnung des U-Wertes des Dämmstoffsystems lässt sich Tab. 11 entnehmen.

Tab. 11 Schichtaufbau der Wand im Prüffeld 1: PUR-Hybridplatte (Werte für trockene Materialien).

Materialschicht	Dicke d [m]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK]	Durchlasswiderstand R [m ² K/W]
(Warmseitenübergang)			0,130
Innenputz: iQ-Top SP	0,005	0,478	0,010
Dämmstoff: iQ-Therm	0,080	0,031	2,581
Klebemörtel: iQ-Fix	0,005	0,497	0,010
Ausgleichsputz: Remmers GP	0,010	0,220	0,045
Ziegel	0,365	0,938	0,389
(Kaltseitenübergang)			0,04
Wärmedurchgangswiderstand der Konstruktion			3,205
Wärmedurchgangskoeffizient der Konstruktion			0,312 W/m ² K

Prüffeld 2 – Kalziumsilikatplatte

Der zweite Dämmstoff, die Klimaplatte WF der Firma Calsitherm, basiert auf Kalziumsilikat und ist ein homogenes, mineralisches Material aus natürlichen Rohstoffen wie Sand und Kalk. Eine Besonderheit liegt in der hohen Flüssigwasserleitfähigkeit. Die Wärmeleitfähigkeit wird vom Hersteller mit 0,059 (trockenes Material) und 0,062 W/mK (Rechenwert) beziffert. Die erforderliche Dämmstoffdicke zum Erreichen der gleichen Dämmwirkung ist damit, im Vergleich zur PUR-Hybridplatte, fast doppelt so hoch, weshalb dieses Prüffeld über einen geringeren Gesamtwärmedurchgangswiderstand als die übrigen beiden Prüffelder verfügt. Die Wasserdampfdurchlässigkeit der Kalziumsilikatplatte ist relativ hoch, die Diffusionswiderstandsfaktoren liegen bei 4. Der Baustoff verfügt damit über ein hohes Trocknungspotenzial, sowohl über Dampfdiffusion als auch über Flüssigwasserleitung. Der Systemaufbau sowie der Wärmedurchgangskoeffizient lassen sich Tab. 12 entnehmen.

Tab. 12 Schichtaufbau der Wand im Prüffeld 2: Kalziumsilikatplatte (Werte für trockene Materialien).

Materialschicht	Dicke d [m]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK]	Durchlasswiderstand R [m ² K/W]
(Warmseitenübergang)			0,130
Innenputz: KP-Kalkglätte	0,005	0,600	0,008
Dämmstoff: Klimaplatte	0,100	0,059	1,695
Klebemörtel: KP-Kleber	0,010	0,600	0,017
Ausgleichsputz: Remmers GP	0,010	0,220	0,045
Ziegel: Schlagmann	0,365	0,938	0,389
(Kaltseitenübergang)			0,04
Wärmedurchgangswiderstand der Konstruktion			2,324
Wärmedurchgangskoeffizient der Konstruktion			0,430 W/m ² K

Prüffeld 3 – Minerale Dämmplatte

Im Prüffeld 3 ist die Minerale Dämmplatte Multipor der Firma Xella angebracht, einem ebenfalls mineralischen Dämmstoff. Er weist dickenabhängig eine moderate Wärmeleitfähigkeit von 0,042 bis 0,045 W/mK auf und liegt damit zwischen Kalziumsilikatplatte und PUR-Hybridplatte. Die erforderliche Dämmstoffdicke zum Erreichen des gleichen Wärmedurchgangswiderstands wie bei der PUR-Hybridplatte ist entsprechend höher. Die Minerale Dämmplatte ist durch einen, im Vergleich zu Kalziumsilikat, kleinen Wasseraufnahmekoeffizienten von 0,360 kg/m²h^{0.5} charakterisiert. Das effektive Porenvolumen der Minerale Dämmplatte ist etwas höher als jenes der PUR-Hybridplatte, die Dampfdurchlässigkeit ist vergleichbar mit jener von Kalziumsilikat (Dampfdiffusionswiderstandsfaktor von ungefähr 4). Die Wärmeleitfähigkeiten der einzelnen Schichten sowie der daraus resultierende U-Wert sind in Tab. 13 aufgeführt.

II.1 Vorhabensziele, Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

Tab. 13 Schichtaufbau der Wand im Prüffeld 3: Mineraldämmplatte (Werte für trockene Materialien).

Materialschicht	Dicke d [m]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK]	Durchlasswiderstand R [m ² K/W]
(Warmseitenübergang)			0,130
Innenputz: Leichtmörtel	0,005	0,180	0,028
Dämmstoff: Multipor	0,100	0,039	2,564
Klebemörtel: Leichtmörtel	0,010	0,180	0,056
Ausgleichsputz: Remmers GP	0,010	0,220	0,045
Ziegel	0,365	0,938	0,389
(Kaltseitenübergang)			0,04
Wärmedurchgangswiderstand der Konstruktion			3,252
Wärmedurchgangskoeffizient der Konstruktion			0,308 W/m ² K

Die aufgeführten U-Werte werden in der Praxis wegen des Feuchteinflusses in der Regel nicht erreicht, lassen sich aber besser vergleichen. Die in den Tabellen aufgeführten Wärmeleitfähigkeiten gelten für trockene Materialien. Im Prüfstand sind nach der Einbauphase hohe Feuchtezustände in den Mörtel- und Putzschichten zu erwarten, welche auch zu einer Befeuchtung benachbarter Schichten führen können. Dies wird durch die Verwendung einer linear, mit dem Wassergehalt ansteigenden Wärmeleitfähigkeit berücksichtigt.

1.3.4.2 Messstrecken und Nomenklatur der Sensoren

In der Prüfwand sowie in den angrenzenden Kammern (Warm- und Kaltseite) wurden unterschiedliche Sensoren des Unternehmens Ahlborn Mess- und Regelungstechnik GmbH zur Aufzeichnung der Zustände und Ströme verbaut. Die Art der Sensoren unterscheidet sich in Hinblick auf die erfassten physikalischen Größen sowie auf den Messbereich und die Messgenauigkeit. Einen Überblick der verbauten Sensortypen gibt Tab. 14.

Tab. 14 Liste der eingesetzten Sensortypen mit den wichtigsten Kennwerten.

Sensortyp	Messprinzip	Messbereich	Messgenauigkeit	Kommentar
Temperatursensor	NTC-Sensor (Thermistor)	-20 – 100 °C	-20 – 0 °C: $\pm 0,4$ K 0 – 70 °C: $\pm 0,1$ K > 70 °C: $\pm 0,6$ K	Ahlborn NTC FN 0001K
Kombinierter Sensor Temperatur und rel. Luftfeuchte	CMOSens	5 – 98 % r.F. -20 – 60 °C	10 – 90 % r.F.: 1,8 % bei 25 °C 10 – 40 °C: $\pm 0,4$ K -20 – 80 °C: $\pm 1,3$ K	Ahlborn FHAD 46, Raumklimasensoren
Kombinierter Sensor Temperatur und rel. Luftfeuchte	Kapazitiver bzw. NTC-Sensor (Type N)	-30 – 100 °C 0 – 100 % r.F.	-20 – 0 °C: $\pm 0,4$ K 0 – 70 °C: $\pm 0,1$ K > 70 °C: $\pm 0,6$ K < 90 % r.F.: ± 2 %	Ahlborn FHA 646 R, eingebaute Sensoren
Kombinierter Sensor Temperatur und Luftgeschwindigkeit	Thermo- anemometer	-20 – 70 °C 0,08 – 2 m/s 700 – 1100 mbar	0 – 50 °C: $\pm 0,7$ K $\pm 0,04$ m/s + 1 % v MW 0 – 65 °C: $\pm 2,5$ mbar	Ahlborn FVAD 35 TH4
Wärmestrom		-40 – 80 °C	5 % (23 °C)	Ahlborn FQA 118
Holzfeuchtesensor	Kapazitiver Sensor	5 – 50 M.-% (23 °C) 0 – 80 °C 0 – 90 % r.F.	Auflösung von 0,1 % und Reproduzierbarkeit von 1 %	Ahlborn FHA 636 MFS1, Temperaturkorrektur erforderlich

Die Datenerfassung erfolgt innerhalb der Prüfwand auf insgesamt neun Messstrecken bzw. Messbereichen. Diese lassen sich jeweils in eine Messstrecke für die obere und untere Balkenköpflage sowie eine mittige Messstrecke für die Erfassung des ungestörten Wandaufbaus unterteilen. Die im Einzelnen verbauten Sensoren der Messstrecken sind in den nachfolgenden Absätzen aufgelistet und dargestellt.

Neben den neun Wandmessstrecken sind auch Sensoren in der Warm- und Kaltseitenkammer verbaut worden. Diese dienen der Erfassung des Höhenprofils der Kammerluft. Zusätzlich wurden auf der Kaltseite auch die Oberflächentemperaturen der Umgrenzungsflächen gemessen. Die Bezeichnungen sowie die Sensortypen sind in den Tabellen 15 und 16 aufgeführt.

II.1 Vorhabensziele, Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

Tab. 15 Liste der Sensoren in der Kaltseitenkammer.

Sensor - ID	Beschreibung	Sensortyp
TRaO, HRaO	Luftzustand im oberen Bereich der Kammer	TH_D
TRaM, HRaM	Luftzustand im mittleren Bereich der Kammer	TH_D
TRaU, HRaU	Luftzustand im unteren Bereich der Kammer	TH_D
TRaD	Oberflächentemperatur der Decke	T_NTC
TRaSW	Oberflächentemperatur der Seitenwand	T_NTC
TRaRW	Oberflächentemperatur der Rückwand	T_NTC

Tab. 16 Liste der Sensoren in der Warmseitenkammer.

Sensor - ID	Beschreibung	Sensortyp
TRiO, HRiO	Luftzustand im oberen Bereich der Kammer	TH_D
TRiM, HRiM	Luftzustand im mittleren Bereich der Kammer	TH_D
TRiU, HRiU	Luftzustand im unteren Bereich der Kammer	TH_D

Die Messstrecken (Abb. 109) im Prüffeld 1 (PUR-Hybridplatte) stellen den Basissatz an Sensoren dar. Der Mittelteil beinhaltet eine Wärmestrommessplatte (WFP1) an der warmseitigen Oberfläche der Wand, welche mit ca. 2 mm Putz bedeckt ist. In unmittelbarer Nähe auf der Putzoberfläche befindet sich ein Temperatursensor (TIDO1). An der Berührungsebene zwischen Innendämmung und Basiskonstruktion, exakter innerhalb der Klebemörtelschicht, ist ein kombinierter Temperatur- und Feuchtesensor (TIDE1, HIDE1) untergebracht. Darüber hinaus befindet sich in der Mitte des Mauerwerks ein kombinierter Sensor zur Erfassung von Temperatur und relativer Luftfeuchte (TWM1, HWM1). Dieser ist innerhalb einer Lagerschicht des Mauerwerks eingebettet. Abb. 108 zeigt einen kombinierten Sensor für Temperatur und relative Luftfeuchte. Die lilafarbene Abdeckung auf der Spitze dient dem Schutz vor Verunreinigungen. Sie ist aus einem diffusionsoffenem Stoff gefertigt, um eine Verfälschung der Messwerte zu vermeiden. Des Weiteren wurde bei der Verlegung der Leitungen darauf geachtet, diese so lange wie möglich in gleicher Tiefe zur Messposition zu führen, um die thermische Beeinflussung der Messwerte durch das Sensorkabel zu verringern.



Abb. 108 Links kombinierter Sensor für Temperatur und relative Luftfeuchte mit Schutzkappe und rechts Temperatursensor nahe der Kaltseitenoberfläche.

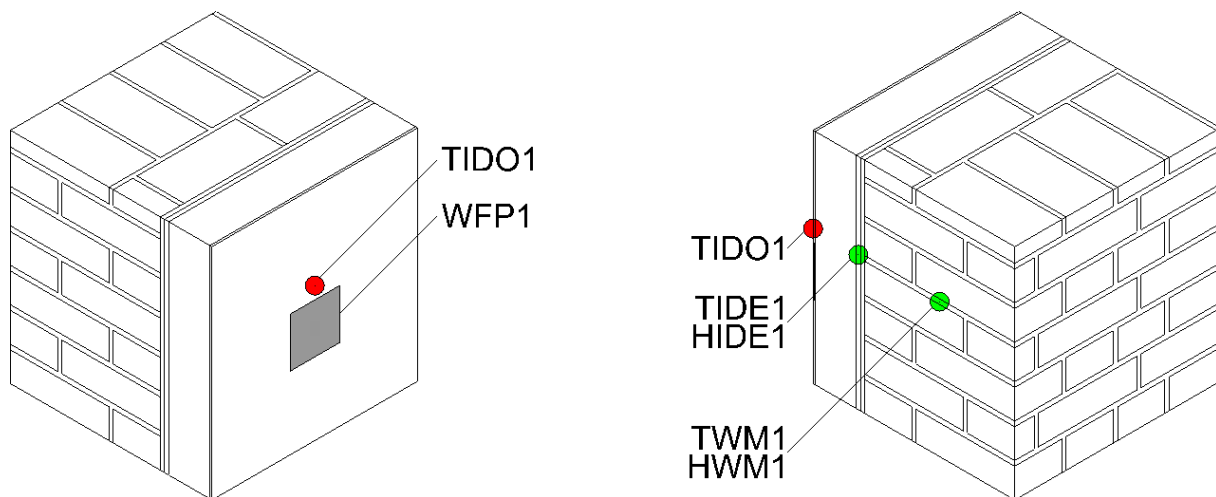


Abb. 109 Messstrecken im ungestörten Wandaufbau in Prüffeld 1. Grau die Wärmestromplatte, rot die Temperatursensoren, grün die kombinierten Temperatur- und Luftfeuchtesensoren.

Die Messstrecken im Balkenkopfbereich (Abb. 110) umfassen ein größeres Spektrum an Positionen und erfassten Messgrößen. So ist ein Sensor zur Erfassung der Temperatur und relativen Luftfeuchte am Ende des Balkens innerhalb des Stirnholzbereiches, ca. 5 mm unter der Oberfläche, (TBKSH1, HBKSH1) und ein Sensor zur Erfassung der Oberflächentemperatur am Balkenkopfende (TBK1) eingebracht. Der Sensor im Stirnholzbereich wurde mittels einer Schrägbohrung eingebracht, die anschließend mit Silikon gegen das Eindringen von Luft aus dem Warmseitenbereich abgedichtet wurde. Ferner ist von Interesse, wie sich das Mauerwerk auf der dem Balkenkopf gegenüberliegenden Seite verhält. Hierfür enthält die Balkenkopftasche einen Kombisensor (TBKT1, HBKT1), welcher sich auf der Mauerwerksoberfläche innerhalb der Lagerfuge befindet. Ein weiterer Sensor ist in gleicher Höhe auf der, dem Kaltseitenklima zugewandten, Mauerwerksoberfläche angebracht (TWA1). Die angegebenen Sensoren sind sowohl in der oberen (letzter Buchstabe der Sensorkennung „O“), als auch in der unteren Balkenlage (letzter Buchstabe der Sensorkennung „U“) vorhanden.

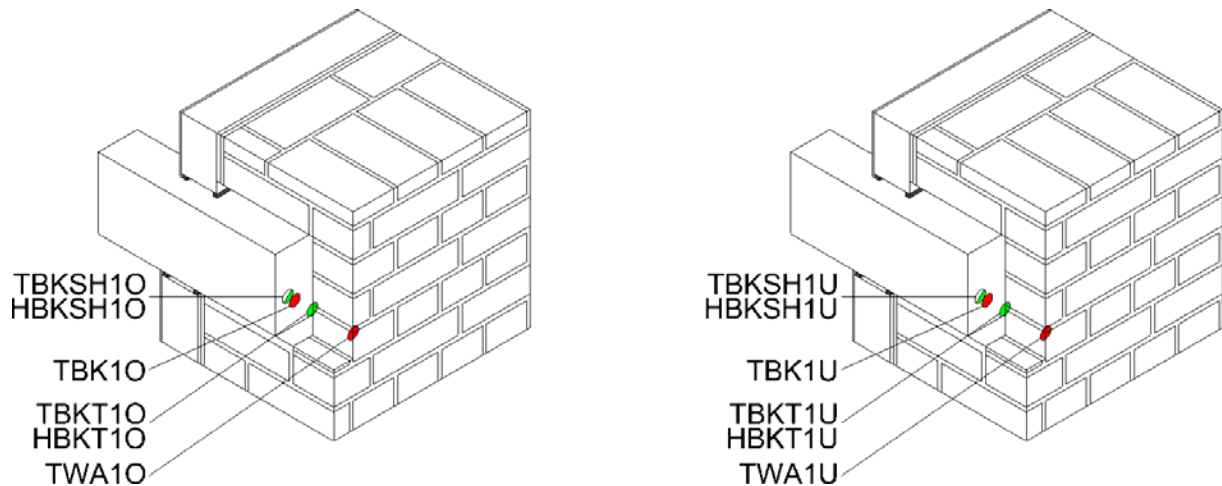


Abb. 110 Messstrecken am oberen (links) und unteren (rechts) Balkenkopf in Prüffeld 1, rot die Temperatursensoren, grün die kombinierten Temperatur- und Luftfeuchtesensoren.

Die Balkenköpfenden im ersten Prüffeld wurden durch das Anbringen einer doppelten Lage vorkomprimierten Fugendichtbandes (Abb. 111) zwischen Innendämmsystem und Balken vom Warmseitenklima entkoppelt. Zur Erzielung genauer und ungestörter Messergebnisse wurde an dieser Stelle bewusst von der in der Praxis üblich Ausführung mit einer einfachen Lage Fugendichtband abgewichen. Der Balkenkopf selbst wurde mittels einer PE-Folie auf der Auflagerfläche vor hygrischen Einflüssen aus dem Mauerwerk im Auflagerbereich geschützt. Dieses Verfahren wurde auch in den Prüffeldern 2 und 3 angewandt.



Abb. 111 Links Ausführung einer doppelten Abdichtungsebene und rechts der hygrischen Entkopplung in Feld 1. Rechts ist ebenfalls der kombinierte Sensor für Temperatur und relative Luftfeuchte in der Lagerfuge zu erkennen.

Die jeweiligen Sensorkennungen inklusive Erläuterungen sind in Tab. 17 aufgeführt.

Tab. 17 Liste der Sensoren in Prüffeld 1 (PUR-Hybridplatte).

Sensor - ID	Erläuterung	Sensortyp
Oberes Prüffeld (Balkenkopf mit zwei vorkomprimierten Fugendichtbändern)		
TWA10	Temperatur in der Lagerfuge des Mauerwerks, 5 mm hinter der Oberfläche zur Kaltseitenkammer	T_NTC
TBKT10, HBKT10	Temperatur und relative Luftfeuchte in der Lagerfuge des Mauerwerks, auf der dem Balkenkopf zugewandten Mauerwerksoberfläche	TH_NTC
TBK10	Oberflächentemperatur des Stirnholzes	T_NTC
TBKSH10, HBKSH10	Temperatur und relative Luftfeuchte im Stirnholzbereich, ca. 5 mm hinter der Holzoberfläche	TH_NTC
Mittleres Prüffeld (ungestörter Wandaufbau)		
TWM1, HWM1	Temperatur und relative Luftfeuchte in der Mitte des Mauerwerks, in der Lagerfuge	TH_NTC
TIDE1, HIDE1	Temperatur und relative Luftfeuchte an der Kontaktfläche zwischen Dämmstoff und Basiskonstruktion, in Klebemörtelschicht	TH_NTC
WFP1	Wärmestrom auf Innenoberfläche	TF_D
TIDO1	Oberflächentemperatur der Warmseite	T_NTC
Unteres Prüffeld (Balkenkopf mit zwei vorkomprimierten Fugendichtbändern)		
TWA1U	Temperatur in der Lagerfuge des Mauerwerks, 5 mm hinter der Oberfläche zur Kaltseitenkammer	T_NTC
TBKT1U, HBKT1U	Temperatur und relative Luftfeuchte in der Lagerfuge des Mauerwerks, auf der dem Balkenkopf zugewandten Mauerwerksoberfläche	TH_NTC
TBK1U	Oberflächentemperatur des Stirnholzes	T_NTC
TBKSH1U, HBKSH1U	Temperatur und relative Luftfeuchte im Stirnholzbereich, ca. 5 mm hinter der Holzoberfläche	TH_NTC

Prüffeld 2 umfasst die gleiche Sensorausstattung wie Prüffeld 1 und zusätzlich eine detailliertere Erfassung der Temperatur- und Feuchtesituation (volumetrische Holzfeuchte) um den Auflagerbereich des Balkenkopfes und des Balkenkopfes selbst (Tab. 18).

Im ungestörten Mauerwerk wurde die Messstrecke um einen Sensor nahe der Oberfläche zur Kaltseite ergänzt (TWA2, HWA2). Die erweiterte Ausstattung ist in der nachfolgenden Abb. 112 dargestellt.

II.1 Vorhabensziele, Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

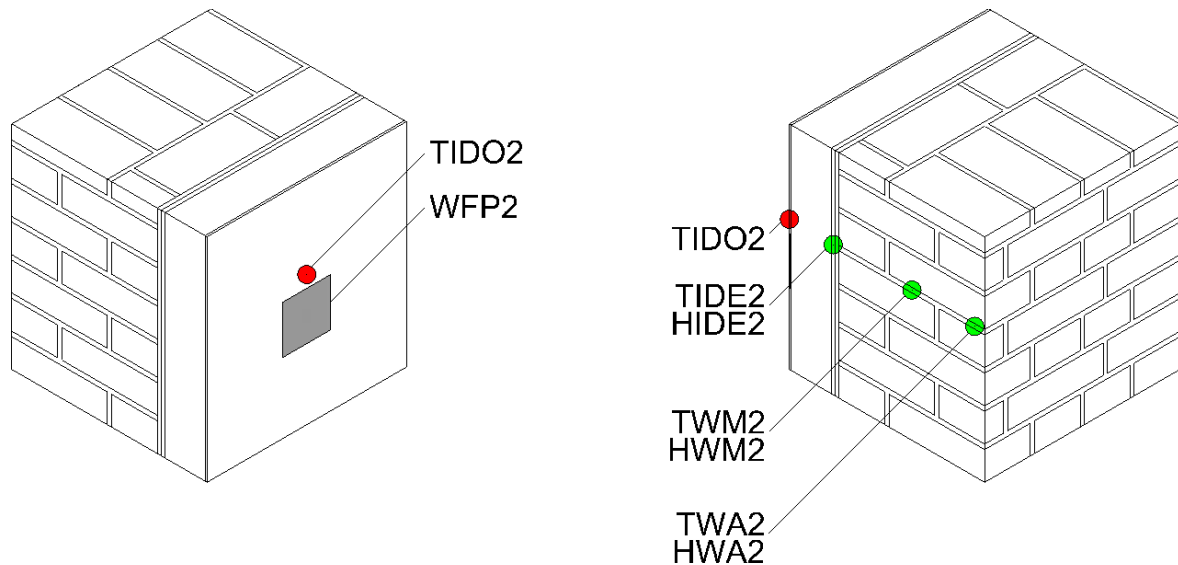


Abb. 112 Messstrecken im ungestörten Wandaufbau in Prüffeld 2. Grau die Wärmestromplatte, rot die Temperatursensoren, grün die kombinierten Temperatur- und Luftfeuchtesensoren.

Die Messung der Holzfeuchte wird im Prüffeld 2 über einen Holzfeuchtesensor realisiert. Dieser ist in einem Abstand von ca. 2 cm ausgehend von der Stirnholzoberfläche des Balkenkopfendes (HFBK2O, HFBK2U) untergebracht (Abb. 113). Dem Messprinzip liegt die Leitwertmethode zu Grunde. Hierzu wurden im Abstand von 2,5 cm quer zur Faserrichtung zwei Edelstahl-Stockschrauben 4 cm tief in das Holz eingebracht. Mit der Änderung der Materialfeuchte ändert sich auch die elektrische Leitfähigkeit des Materials. Aufgrund der Temperaturabhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit wird an gleicher Stelle die Temperatur gemessen und die Messwerte entsprechend korrigiert.



Abb. 113 Messung der Holzfeuchte und der Stirnholzoberflächentemperatur (BK, links), Vorbereitung für Einbringen des kombinierten Sensors im Stirnholzbereich (BKSH, rechts).

Neben der detaillierteren Holzfeuchtemessung wurden weitere Messpunkte unterhalb des oberen Balkenkopfendes und oberhalb des unteren Balkenkopfendes ergänzt. Diese befinden sich im oberen Feld 5 cm unterhalb des Holzbalkendetails in der Klebemörtelebene (TIDEBU2O, HIDEBU2O) sowie auf der Putzoberfläche zur Warmseite (TIDOB2U) und im unteren Feld ca. 7 cm oberhalb des Holzbalkendetails ebenfalls in der Klebemörtelebene (TIDEB2U, HIDEBO2U) und auf der Putzoberfläche (TIDOB2U). Die genauen Positionen können den Abbildungen 115 und 116 entnommen werden.

Die Abkopplung der Balkenkopfenden vom Warmseitenklima erfolge im Prüffeld 2 in der oberen Balkenlage (Abb. 114, rechts) mit einem vorkomprimierten Dichtband in der Fuge zwischen Dämmstoff und Balkenkopf sowie einem Putzanschlussklebeband um den Balken. In der unteren Lage (Abb. 114, links) wurde bewusst auf das Putzanschlussband verzichtet und lediglich ein vorkomprimiertes Dichtband eingesetzt.



Abb. 114 Abdichtungsvarianten der Balkenkopftasche in Prüffeld 2.

II.1 Vorhabensziele, Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

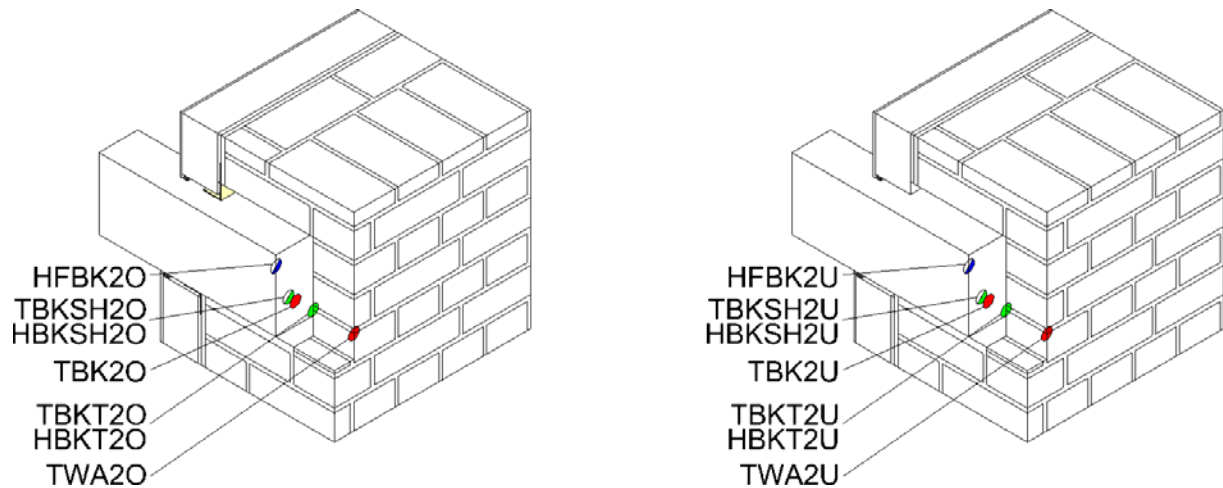


Abb. 115 Messstrecken am oberen (links) und unteren (rechts) Balkenkopf in Prüffeld 2, rot die Temperatursensoren, grün die kombinierten Temperatur- und Luftfeuchtesensoren und blau die Holzfeuchtemessung.

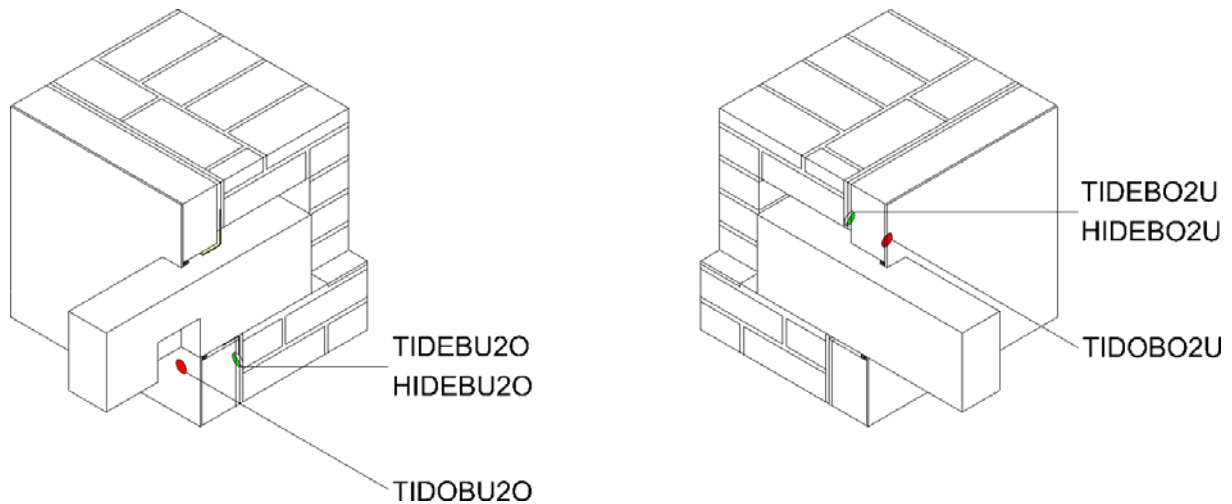


Abb. 116 Zusätzliche Sensoren unterhalb des oberen Balkenkopfes (links) und oberhalb des unteren Balkenkopfes (rechts) in Prüffeld 2.

Tab. 18 Liste der Sensoren in Prüffeld 2 (Kalziumsilikatplatte).

Sensor - ID	Erläuterung	Sensortyp
Oberes Prüffeld (Balkenkopf mit vorkomprimiertem Fugendichtband und Putzanschlussband)		
TWA2O	Temperatur in der Lagerfuge des Mauerwerks, 5 mm hinter der Oberfläche zur Kaltseitenkammer	T_NTC
TBKT2O, HBKT2O	Temperatur und relative Luftfeuchte in der Lagerfuge des Mauerwerks, auf der dem Balkenkopf zugewandten Mauerwerksoberfläche	TH_NTC
TBK2O	Oberflächentemperatur des Stirnholzes	T_NTC
TBKSH2O, HBKSH2O	Temperatur und relative Luftfeuchte im Stirnholzbereich, ca. 5 mm hinter der Holzoberfläche	TH_NTC
HFBK2O	Massebezogener Feuchtegehalt des Holzes ca. 2 cm hinter der Stirnholzoberfläche	MC_D
TIDEBU2O, HIDEBU2O	Temperatur und relative Luftfeuchte ca. 5 cm unterhalb des Balkendetails in der Klebermörtelschicht des Innendämmsystems	TH_NTC
TIDOB2O	Temperatur und relative Luftfeuchte ca. 5 cm unterhalb des Balkendetails an der Warmseitenoberfläche des Innendämmsystems	T_NTC
Mittleres Prüffeld (ungestörter Wandaufbau)		
TWA2, HWA2	Temperatur und relative Luftfeuchte in der Lagerfuge des Mauerwerks ca. 2,5 cm hinter der Kaltseitenoberfläche	TH_NTC
TWM2, HWM2	Temperatur und relative Luftfeuchte in der Mitte des Mauerwerks, in der Lagerfuge	TH_NTC
TIDE2, HIDE2	Temperatur und relative Luftfeuchte an der Kontaktfläche zwischen Dämmstoff und Basiskonstruktion, in Klebemörtelschicht	TH_NTC
WFP2	Wärmestrom auf Innenoberfläche	TF_D
TIDO2	Oberflächentemperatur der Warmseite	T_NTC
Unteres Prüffeld (Balkenkopf mit vorkomprimiertem Fugendichtband)		
TWA2U	Temperatur in der Lagerfuge des Mauerwerks, 5 mm hinter der Oberfläche zur Kaltseitenkammer	T_NTC
TBKT2U, HBKT2U	Temperatur und relative Luftfeuchte in der Lagerfuge des Mauerwerks, auf der dem Balkenkopf zugewandten Mauerwerksoberfläche	TH_NTC
TBK2U	Oberflächentemperatur des Stirnholzes	T_NTC
TBKSH2U, HBKSH2U	Temperatur und relative Luftfeuchte im Stirnholzbereich, ca. 5 mm hinter der Holzoberfläche	TH_NTC
HFBK2U	Massebezogener Feuchtegehalt des Holzes ca. 2 cm hinter der Stirnholzoberfläche	MC_D
TIDEB2U, HIDEB2U	Temperatur und relative Luftfeuchte ca. 7 cm unterhalb des Balkendetails in der Klebermörtelschicht des Innendämmsystems	TH_NTC
TIDOB2U	Temperatur und relative Luftfeuchte ca. 7 cm unterhalb des Balkendetails an der Warmseitenoberfläche des Innendämmsystems	T_NTC

Im Prüffeld 3 (Mineraldämmplatte) wurden weitere Sensoren ergänzt (Tab. 19 sowie Abbildungen 118 und 119). Zur Untersuchung des Strömungsverhaltens innerhalb der Balkenkopftaschen wurden Thermoanemometer verbaut (VAMLS3O, TAMLS3O für die obere Balkenkopftasche und VAMLS3U, TAMLS3U für die untere Balkenkopftasche). Zusätzlich wurden Sensoren zur Aufzeichnung der thermischen und hygrischen Zustände im

II.1 Vorhabensziele, Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

Seitenbereich des Balkenkopfes (TLS3O, HLS3O, TLS3U, HLS3U) sowie im Auflagerbereich eingebracht (TMB3O, HMB3O, TMB3U, HMB3U, TBO3O, HBO3O, TBO3U, HBO3U).

Die Messstrecke im Mittelbereich des Prüffeldes 3 (ungestörter Wandaufbau) enthält den gleichen Sensorsatz wie die mittlere Messstrecke in Prüffeld 2.

Die Balkenkopfenden im Prüffeld 3 unterscheiden sich in ihrer Einbindung erheblich. Der obere Balkenkopf wurde nicht abgedichtet, stattdessen wurde eine umlaufende Fuge von 10 mm ausgebildet. Am unteren Balkenkopf kommt, gemäß den Herstellerangaben, ein aufgefaserter Hanfdämmstreifen als Abdichtung zum Einsatz. Für die künstliche Erzeugung von Undichtigkeiten wurden verschließbare Röhrchen mit einem Durchmesser von 2 bzw. 5 mm in das Mauerwerk eingebracht. In den Holzbalken wurde ein ebenfalls verschließbarer künstlicher Riss mit einer Breite von 3 mm und einer Tiefe von 4 cm eingebracht (Abb. 117). Während der Versuche wurde der verschlossene Riss durch Klebeband abgedichtet.



Abb. 117 Röhrchen zur Erzeugung gewollter Undichtigkeiten (links) und verschließbare Nut als idealisierter Riss (rechts).

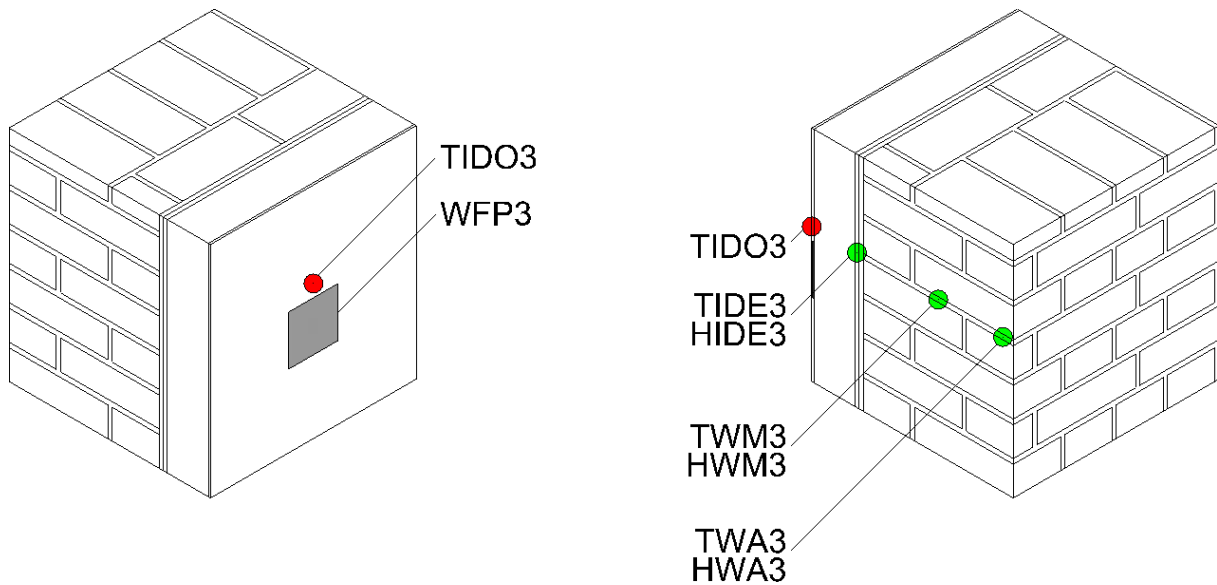


Abb. 118 Messstrecken im ungestörten Wandaufbau in Prüffeld 3. Grau die Wärmestromplatte, rot die Temperatursensoren, grün die kombinierten Temperatur- und Luftfeuchtesensoren.

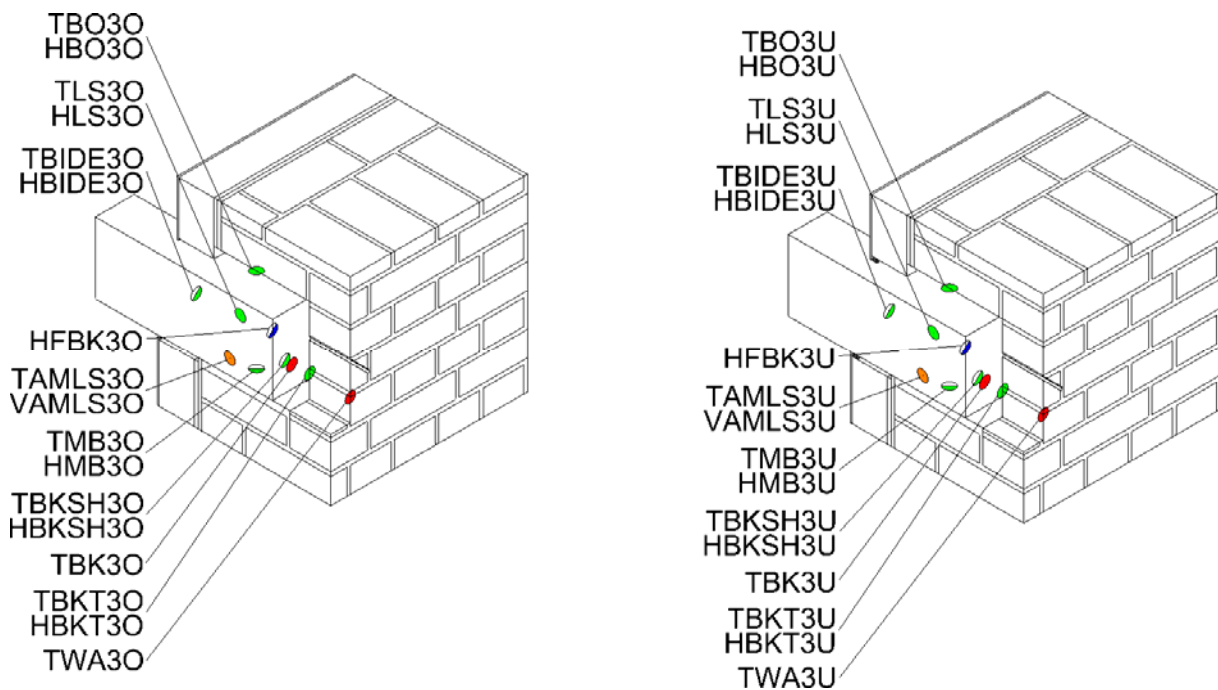


Abb. 119 Messstrecken am oberen (links) und unteren (rechts) Balkenkopf in Prüffeld 3, rot die Temperatursensoren, grün die kombinierten Temperatur- und Luftfeuchtesensoren, blau die Holzfeuchtemessung und orange die Strömungsmessung.

II.1 Vorhabensziele, Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

Tab. 19 Liste der Sensoren in Prüffeld 3 (Minerale Dämmplatte).

Sensor – ID	Erläuterung	Sensortyp
Oberes Prüffeld (Balken Kopf unbehandelt, d.h. offen)		
TWA3O	Temperatur in der Lagerfuge des Mauerwerks, 5 mm hinter der Oberfläche zur Kaltseitenkammer	T_NTC
TBKT3O, HBKT3O	Temperatur und relative Luftfeuchte in der Lagerfuge des Mauerwerks, auf der dem Balken Kopf zugewandten Mauerwerksoberfläche	TH_NTC
TBK3O	Oberflächentemperatur des Stirnholzes	T_NTC
TBKSH3O, HBKSH3O	Temperatur und relative Luftfeuchte im Stirnholzbereich, ca. 5 mm hinter der Holzoberfläche	TH_NTC
HFBK3O	Massebezogener Feuchtegehalt des Holzes ca. 2 cm hinter der Stirnholzoberfläche	MC_D
TAMLS3O, VAMLS3O	Temperatur und Luftgeschwindigkeit in der Balken Kopftasche (Seitenbereich der Balken Kopftasche)	TV_D
TBO3O, HBO3O	Temperatur und relative Luftfeuchte in der Stoßfuge des Mauerwerks oberhalb des Balken Kopfes	TH_NTC
TMB3O, HMB3O	Temperatur und relative Luftfeuchte im Balken Kopfaufleger (Mörtelschicht)	TH_NTC
TLS3O, HLS3O	Temperatur und relative Luftfeuchte in der Balken Kopftasche (Seitenbereich der Balken Kopftasche)	TH_NTC
TBIDE3O, HBIDE3O	Temperatur und relative Luftfeuchte im Balken Kopf (in Dämmstoffebene)	TH_NTC
Mittleres Prüffeld (ungestörter Wandaufbau)		
TWA3, HWA3	Temperatur und relative Luftfeuchte in der Lagerfuge des Mauerwerks ca. 2,5 cm hinter der Kaltseitenoberfläche	TH_NTC
TWM3, HWM3	Temperatur und relative Luftfeuchte in der Mitte des Mauerwerks, in der Lagerfuge	TH_NTC
TIDE3, HIDE3	Temperatur und relative Luftfeuchte an der Kontaktfläche zwischen Dämmstoff und Basiskonstruktion, in Klebemörtelschicht	TH_NTC
WFP3	Wärmestrom auf Innenoberfläche	TF_D
TIDO3	Oberflächentemperatur der Warmseite	T_NTC
Unteres Prüffeld (Balken Kopf abdichtung mittels Hanfstreifen)		
TWA3U	Temperatur in der Lagerfuge des Mauerwerks, 5 mm hinter der Oberfläche zur Kaltseitenkammer	T_NTC
TBKT3U, HBKT3U	Temperatur und relative Luftfeuchte in der Lagerfuge des Mauerwerks, auf der dem Balken Kopf zugewandten Mauerwerksoberfläche	TH_NTC
TBK3U	Oberflächentemperatur des Stirnholzes	T_NTC
TBKSH3U, HBKSH3U	Temperatur und relative Luftfeuchte im Stirnholzbereich, ca. 5 mm hinter der Holzoberfläche	TH_NTC
HFBK3U	Massebezogener Feuchtegehalt des Holzes ca. 2 cm hinter der Stirnholzoberfläche	MC_D
TAMLS3U, VAMLS3U	Temperatur und Luftgeschwindigkeit in der Balken Kopftasche (Seitenbereich der Balken Kopftasche)	TV_D
TBO3U, HBO3U	Temperatur und relative Luftfeuchte in der Stoßfuge des Mauerwerks oberhalb des Balken Kopfes	TH_NTC

Sensor – ID	Erläuterung	Sensortyp
TMB3U, HMB3U	Temperatur und relative Luftfeuchte im Balkenkopfaufleger (Mörtelschicht)	TH_NTC
TLS3U, HLS3U	Temperatur und relative Luftfeuchte in der Balkenkopftasche (Seitenbereich der Balkenkopftasche)	TH_NTC
TBIDE3U, HBIDE3U	Temperatur und relative Luftfeuchte im Balkenkopf (in Dämmstoffebene)	TH_NTC

Messdatenaufbereitung

Neben der Messdatenerfassung wurden auch für die Datenaufzeichnung Geräte des Unternehmens Ahlborn Mess- und Regelungstechnik GmbH eingesetzt. Das Prinzip des verwendeten Systems besteht darin, dass die Sensoren und Geräte über herstellerspezifische Stecker mit einem programmierbaren Datenträger (EEPROM) angeschlossen sind und damit die hinterlegten Messgrößen (einschließlich Fühlerbezeichnung, u.a.) passgenau erfasst und evtl. mit Korrekturrechnungen (z.B. jegliche Kalibrierkurven, bei volumetrischer Feuchtemessung bspw. über die Temperatur) versehen werden können.

Die Datenerfassung erfolgt lokal auf Datenloggern (ALMEMO 8590). Diese werden in regelmäßigen Zeitabständen über einen Rechner ausgelesen und nach einer ersten Überprüfung auf einem Server in xlsx-Format (MS Excel) gespeichert. Aus diesen Datensätzen erfolgt die explorative und beschreibende (deskriptive) Datenanalyse. Bei der explorativen Datenanalyse werden die Messdaten grafisch dargestellt und allgemeine Zusammenhänge, Fehler etc. ermittelt. Im Rahmen der beschreibenden Datenanalyse werden aus den Ausgangsdatsätzen Einzeldatsätze (z.B. je Sensor, je Jahr) erstellt und mit statistischen Kennwerten (z.B. Standardabweichungen oder Kennwerte der Häufigkeitsverteilung) versehen. Diese Einzeldatsätze sind wiederum Grundlage der Erstellung von Diagrammen und weiteren Dateiformaten (z.B. DELPHIN-Dateien *.ccd und *.out). Eine schematische Darstellung der Messdatenaufbereitung ist in Abb. 120 dargestellt.

II.1 Vorhabensziele, Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

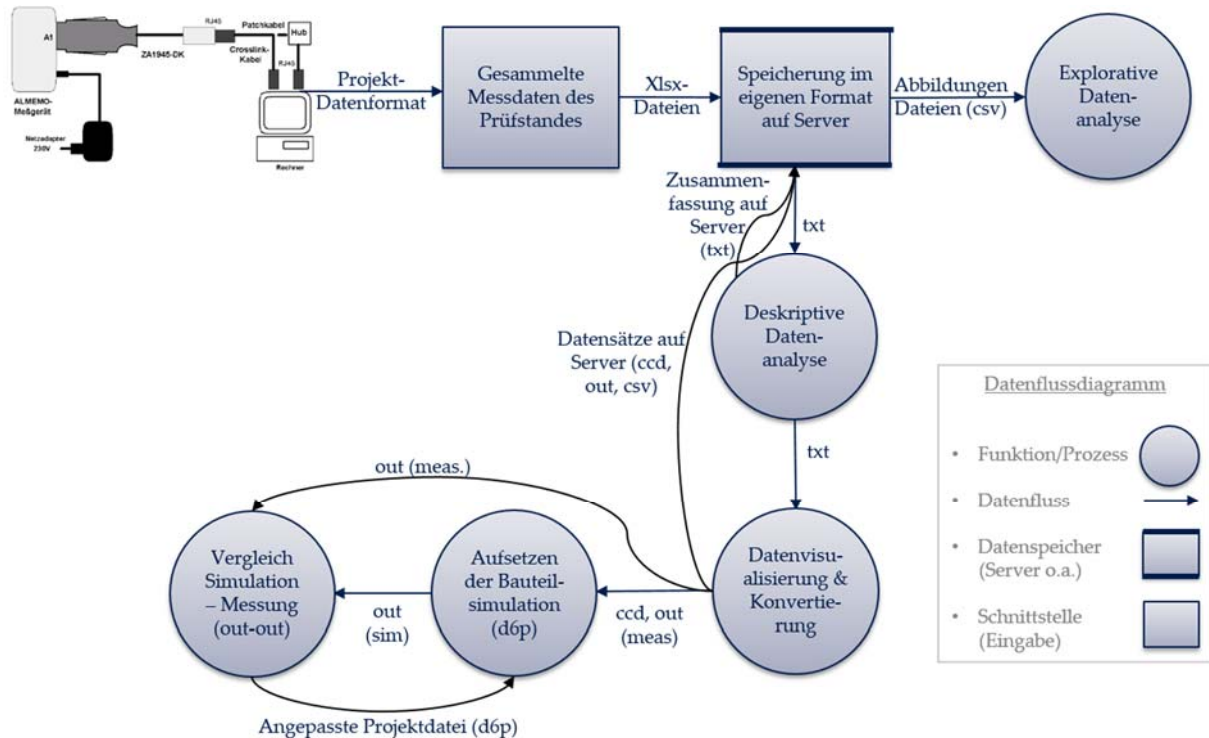


Abb. 120 Datenflussschema für die Erfassung und Aufbereitung der Messdaten.

1.3.4.3 Klimabedingungen

Für die erzeugten Klimarandbedingungen auf der Warm- und Kaltseite der Prüfwand gibt es unterschiedliche Szenarien und Zielstellungen. Zu Beginn der Messphase wurde eine Vorkonditionierung gefahren. Diese diente dem Trocknen der Basiskonstruktion, d.h. dem Abführen der Einbaufeuchte aus dem Mauerwerk. Da die drei Prüffelder mit den jeweiligen Dämmsystemen zeitlich gestaffelt angebracht wurden, ergaben sich unterschiedlich lange Trocknungsphasen für die einzelnen Felder. Im ersten Prüffeld (PUR-Hybridplatte) wurde die Dämmung Ende August 2015 aufgebracht, im Abstand von etwa vier Monaten erfolgten die übrigen beiden Prüffelder (November und Dezember 2015). Es ist folglich für das erste Prüffeld mit einer höheren Einbaufeuchte aufgrund der kürzeren Austrocknungsphase zu rechnen.

Neben der Trocknungsphase wurden unterschiedliche Szenarien von Kalt- und Warmseitenklima getestet. Für die Auswertung sollen aus der gesamten Messphase drei kürzere Phasen (Tab. 20) näher betrachtet werden.

Die erste Phase ist dem Januar 2016 entnommen in welcher, ausgehend von einem hohen Temperaturniveau von ca. 19,5 °C, eine Temperaturabsenkung auf -10 °C bei einer relativen Luftfeuchte von ca. 45 % über einen Zeitraum von etwa sechs Tagen durchgeführt wurde. Anschließend erfolgte wieder eine Anhebung der Kaltseitentemperatur auf 20 °C und der relativen Luftfeuchte auf 55 %. Diese Phase wird nachfolgend als stationäre Messphase (Phase 1) bezeichnet.

Eine weitere Phase (Phase 2) wurde im Februar 2016 aufgezeichnet. Sie wird nachfolgend als oszillierende Phase bezeichnet. Während dieses Zeitabschnitts wurde die Kaltseitentemperatur über mehrere Tage hinweg jeweils für 12 Stunden auf 5 °C und anschließend für weitere 12 Stunden auf 19 °C gehalten. Die relative Luftfeuchte bewegte sich in diesem Zeitraum zwischen 50-65 %.

Die dritte Phase ist nachfolgend als Stufenklimaphase (Phase 3) benannt. Sie beginnt mit einer Kaltseitentemperatur von ca. 20 °C. Diese wird für vier Tage konstant gehalten und dann für sieben Tage auf 5 °C abgesenkt. Schlussendlich erfolgt eine viertägige Absenkung auf 0 °C. Die relative Luftfeuchte bewegt sich während dieser Stufenklimaphase auf der Kaltseite zwischen 60-80 %.

Tab. 20 Übersicht der Auswertungsphasen mit den Einzelkennwerten für die Kaltseite der Prüfkammer.

Phase	Start: Datum/Zeit	Ende: Datum/Zeit	Lufttemperatur auf der Kaltseite	Relative Luftfeuchte auf der Kaltseite
Stationär Januar 2016	18.01.2016 17:00	20.01.2016 17:00	19 °C (±1,5 K)	55 % (±7 %)
	20.01.2016 17:00	26.01.2016 09:30	-10 °C (±1 K)	45 % (±5 %)
	26.01.2016 09:30	02.02.2016 16:00	19 °C (±1,5 K)	55 % (±7 %)
Oszillierend Februar 2016	08.02.2016 17:00	09.02.2016 07:00	5 °C (±1,5 K)	55-65 % (±5 %)
	09.02.2016 07:00	10.02.2016 17:00	19 °C (±1,5 K)	50-55 % (±5 %)
	Wiederholt für acht Tage (letzter Tag: 16.02.2016)			
Stufenklima Juni 2016	17.06.2016 09:00	21.06.2016 17:00	20 °C (±1,5 K)	70 % (±5 %)
	21.06.2016 17:00	28.06.2016 19:00	5 °C (±1,5 K)	60-80 % (±10 %)
	28.06.2016 19:00	03.07.2016 19:00	0 °C (±1,5 K)	60-80 % (±5 %)

Stationäre Auswertungsphase

Die stationäre Auswertungsphase wurde im Januar 2016 über einen Zeitraum von fünf Tagen, zuzüglich der davorliegenden Abkühlphase und der nachfolgenden Aufwärmphase, durchgeführt. Die Anfangsbedingungen waren auf der Kaltseite 19°C und 55% relative Luftfeuchte sowie auf der Warmseite 20 °C und 20 % relative Luftfeuchte. Die Temperatur wurde anschließend auf -10 °C (Kaltseite) gesenkt.

Die Diagramme der Temperatur- und Feuchteverläufe zeigen sehr große kurzzeitige Schwankungen. Beides ist auf die Regelung der Klimatechnik zurückzuführen. Das Warmseitenklima wurde während der Testphase nicht aktiv gesteuert und ergibt sich aus dem den Prüfstand umgebenden Klima des Laborgebäudes, welches relativ konstant auf 20°C geheizt wurde.

Da die Prüffelder lediglich einen Monat vor der stationären Auswertungsphase fertiggestellt wurden, ist während dieser Phase mit einer erhöhten Feuchtelast aus der Einbaufeuchte der Wand und der Dämmsysteme zu rechnen. Das ist sowohl eine Erklärung für die instabilen Temperatur- und Feuchteverhältnisse in der Kaltseitenkammer, als auch für den konstanten Anstieg der relativen Luftfeuchte in der Warmseitenkammer.

Aufgrund der intermittierenden Betriebsweise der Klimatechnik ergeben sich durchschnittliche Standardabweichungen von ca. 2 °C für die Temperatur und ca. 10 % für

II.1 Vorhabensziele, Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

die relative Luftfeuchte. Zu beachten ist die periodische Enteisung des Kältereisters während der Frostphase. Da diese Schwankungen eine Interpretation der Messergebnisse erschweren, insbesondere im Vergleich mehrerer Sensoren miteinander, wurden die Messergebnisse in zwei Formen dargestellt. Es werden jeweils die Originaldatensätze und die über 50 Werte (5-Minuten-Intervall) geglätteten Kurven abgebildet.

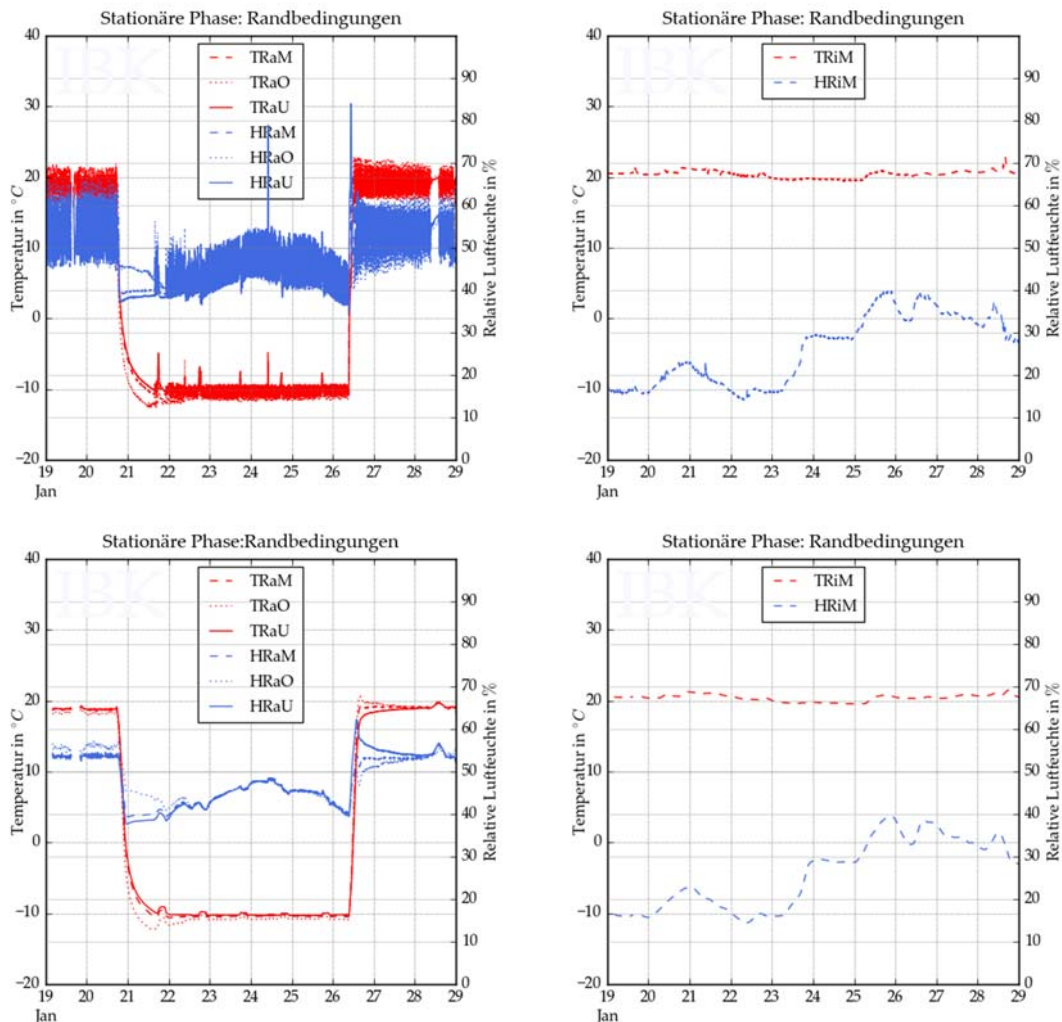


Abb. 121 Stationäre Auswertungsphase im Januar 2016: Temperatur und relative Luftfeuchte im Originalverlauf auf der Kaltseite (links oben) und auf der Warmseite (rechts oben) sowie geglätteter Verlauf auf der Kaltseite (links unten) und auf der Warmseite (rechts unten).

Aus der Abb. 121 der geglätteten Kurven des Kaltseitenklimas ist sehr gut der Temperatur- und Feuchteunterschied über die Höhe zu erkennen. Während des Temperaturwechsels ist dieser besonders groß, gleicht sich aber während der konstanten Phasen nahezu an. Gleiches gilt für die Unterschiede im Feuchteniveau.

Oszillierende Auswertungsphase

Während dieser Phase wurden die Kaltseitenbedingungen in einem 12-Stunden-Intervall jeweils von 19 °C Lufttemperatur auf ca. 5 °C abgesenkt. Diese Temperaturschwankungen erforderten eine große Ent- bzw. Befeuchtungsleistung durch die Anlage. Bei Betrachtung der Abb. 122 fallen die Abweichungen der Temperatur und relativen Luftfeuchte für die Kühlphase auf. Diese sind durch eine sich einstellende Temperaturschichtung innerhalb der Kaltseitenkammer begründet.

Die Bedingungen in der Warmseitenkammer sind verhältnismäßig stabil mit einer Temperatur von etwa 22 °C und einer relativen Luftfeuchte von ca. 30 %.

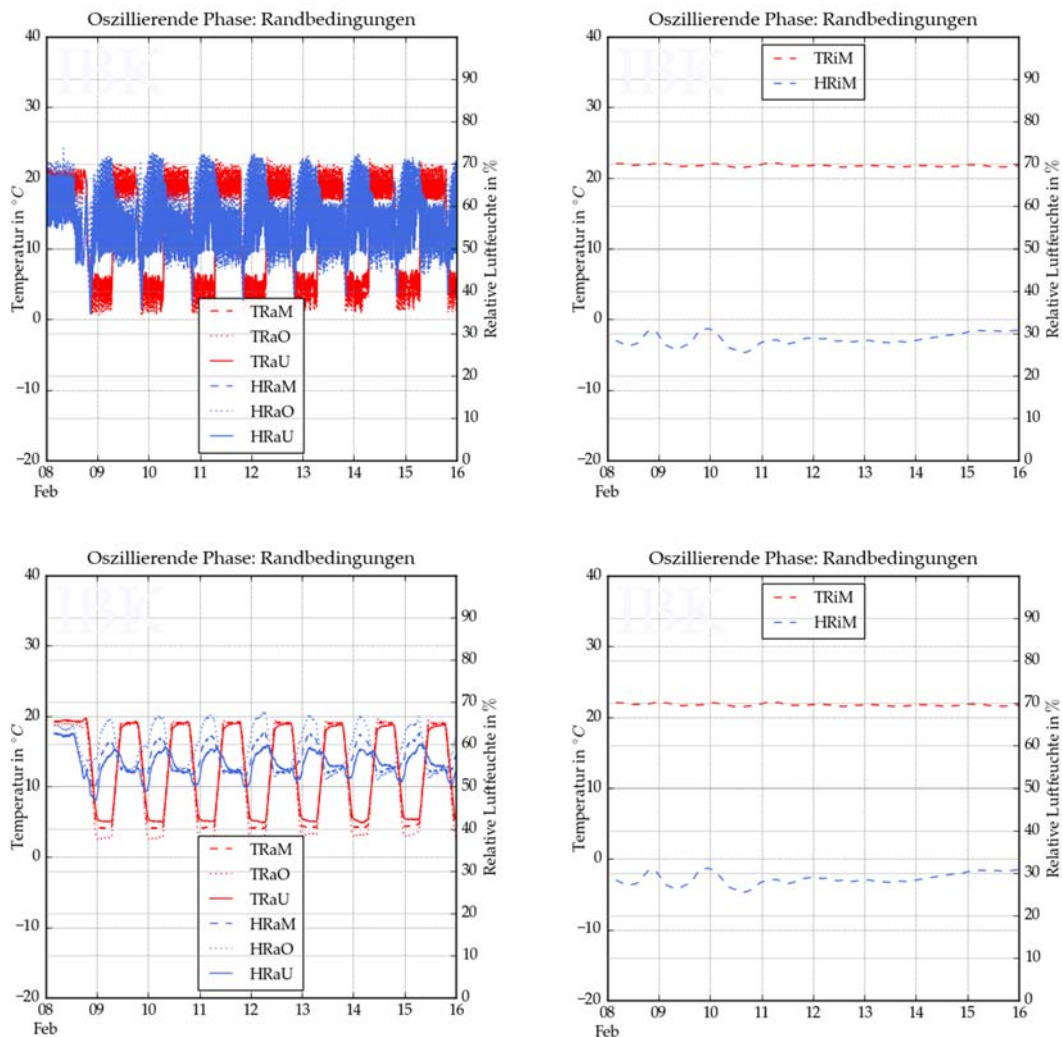


Abb. 122 Schwankende Auswertungsphase im Februar 2016: Temperatur und relative Luftfeuchte im Originalverlauf auf der Kaltseite (links oben) und auf der Warmseite (rechts oben) sowie geglätteter Verlauf auf der Kaltseite (links unten) und auf der Warmseite (rechts unten).

Auswertungsphase Stufenklima

Die dritte Auswertungsphase fand im Juni/Juli 2016 statt. Dabei wurde das Temperaturniveau auf der Kaltseite jeweils über einen längeren Zeitraum auf drei verschiedenen Stufen von 20 °C (70 % r.F.) über vier Tage, 5 °C (60 % r.F.) über sieben Tage sowie 0 °C (60 % r.F.) über vier Tage gehalten. Auch während dieser Phase kommt es zu starken Schwankungen in der Kaltseitenkammer, was ebenfalls auf die intermittierende Betriebsweise der Anlage zurückzuführen ist (Abb. 123).

Das Warmseitenklima weist, aufgrund einer vorangegangenen Trocknungsphase, anfänglich ein wesentlich höheres Temperaturniveau (ca. 35 °C) als in den vorherigen Phasen auf. Während der Stufenphase wurde aktiv befeuchtet um ein kritisches Innenklimaszenario (geringe Außentemperaturen bei hohen Feuchtelasten im Innenraum) abzubilden. Aus diesem Grund tritt auch hier eine erhebliche Schwankung des Feuchteniveaus auf.

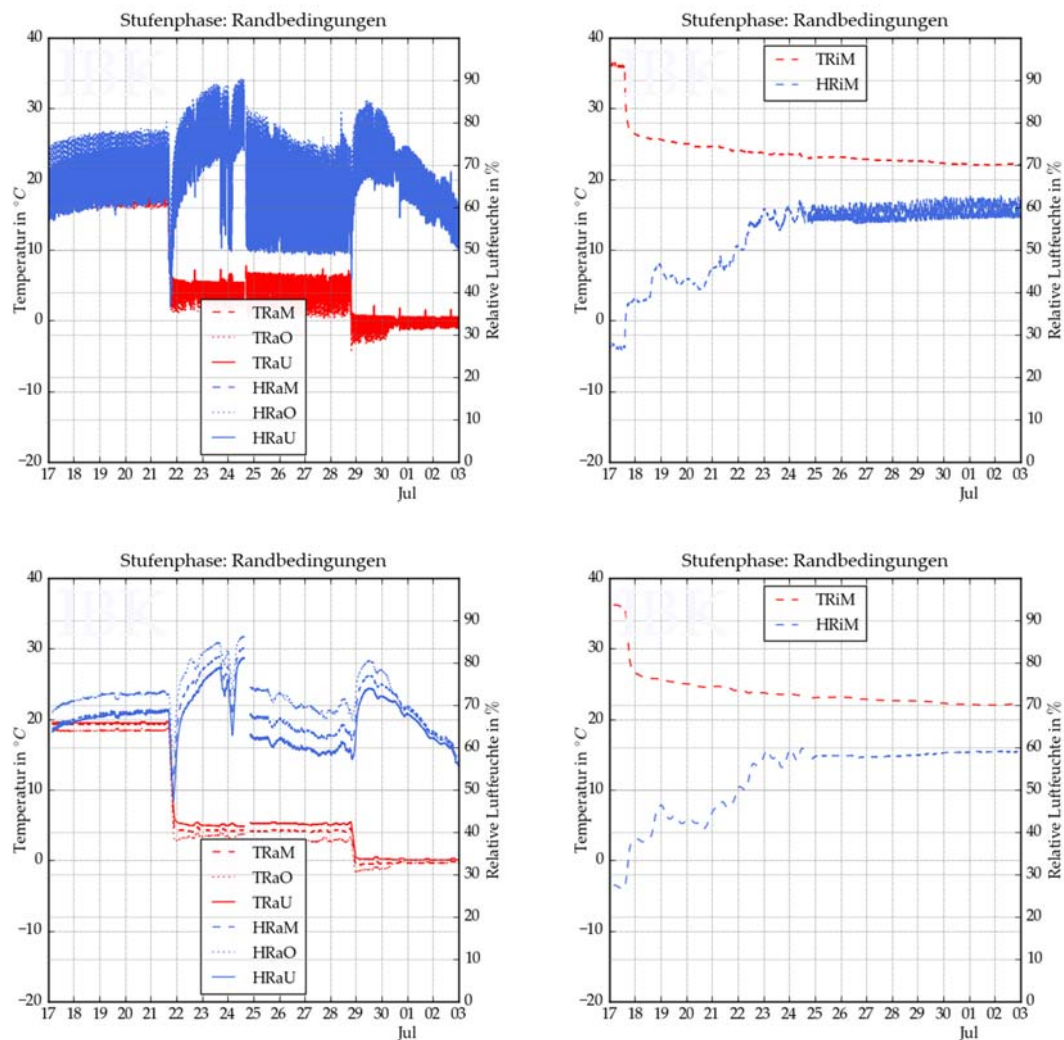


Abb. 123 Stufenphase im Juni/Juli 2016: Temperatur und relative Luftfeuchte im Originalverlauf auf der Kaltseite (links oben) und auf der Warmseite (rechts oben) sowie geglätteter Verlauf auf der Kaltseite (links unten) und auf der Warmseite (rechts unten).

Absolute Feuchte

Aufgrund der Temperaturabhängigkeit der relativen Luftfeuchte wurde für einige der nachfolgenden Auswertungen die absolute Feuchte gewählt. Insbesondere für Sensoren in ähnlichen Einbausituationen, die unterschiedlichen Temperaturniveaus ausgesetzt sind, erweist sich der Vergleich der absoluten Feuchte als sinnvoll. Als Beispiel sind an dieser Stelle die Sensoren zur Erfassung des Raumlufzustandes auf der Kaltseite oder in der Kontaktschicht zwischen Mauerwerk und Innendämmsystem zu nennen.

In Abb. 124 ist der angesprochene Sachverhalt gut zu erkennen. Links die stark schwankenden Werte der relativen Luftfeuchte und rechts der einheitliche Verlauf der absoluten Feuchte für die Sensoren des Kaltseitenklimas.

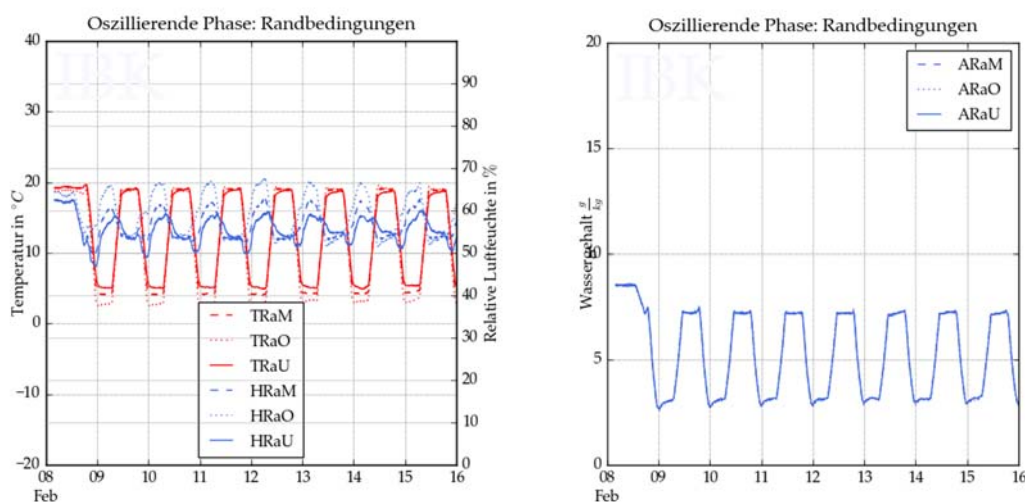


Abb. 124 Oszillierende Auswertungsphase: Vergleich zwischen relativer Luftfeuchte (links) und absoluter Feuchte (rechts).

1.3.4.4 Berechnung der Übergangskoeffizienten

Neben der Temperatur und relativen Luftfeuchte in den Kammern ist auch die Kenntnis über die Luftgeschwindigkeit an den Prüfstandsoberflächen von Bedeutung. Beides bedingt die thermischen und hygrischen Übergangskoeffizienten an der Oberfläche der Prüfwand.

Für Standardberechnungen von Konstruktionen, welche eher Vergleichszwecken dienen, beinhaltet die Norm EN ISO 6946 [72] praxistaugliche Werte. Der Übergangskoeffizient für die Wandinnenseite wird darin mit $6-10 \text{ W/m}^2\text{K}$ angegeben. Für eine Wandaußenseite sind Werte von ca. $25 \text{ W/m}^2\text{K}$ aufgeführt. Beide Empfehlungen beziehen sich auf den kombinierten, d.h. strahlungsaustausch- und konvektionsabhängigen Übergangskoeffizienten. Dabei beträgt der konvektive Anteil auf der Außenseite (Kaltseite) einer Wand, je nach anliegender Luftgeschwindigkeit v , $4+4 \cdot v \text{ [W/m}^2\text{K]}$. Bei einer mittleren Luftgeschwindigkeit von 4 m/s ergibt sich somit ein konvektiver Übergangskoeffizient von $20 \text{ W/m}^2\text{K}$, welcher dem Strahlungsanteil von $5 \text{ W/m}^2\text{K}$ deutlich überwiegt.

Auf der Kaltseite der Prüfwand wurde keine kontinuierliche Messung der Luftgeschwindigkeit durchgeführt. Es ist zudem nicht bekannt, ob der vereinfachte Normansatz auch auf eine

solche Prüfkammer übertragbar ist. In der Prüfkammer wird ebenfalls eine erhöhte Luftgeschwindigkeit, durch die drei Ventilatoren (Durchmesser 25 cm) des Kältereisters sowie einen separaten Ventilator (Durchmesser 40 cm) zur Luftumwälzung, erzeugt. Zur Abschätzung des konvektiven Übergangskoeffizienten wurde aus diesem Grund eine in-situ Messung durchgeführt. Dafür wurde die Verteilung der Luftgeschwindigkeit an der Kaltseitenoberfläche der Prüfwand mit einem mobilen Messgerät (Thermoanemometer) erfasst. Die Messung der Luftgeschwindigkeit direkt hinter den Ventilatoren ergab Werte von 2,3-2,5 m/s für die kleinen Ventilatoren und 4,5 m/s für den großen Ventilator. Die gemittelte Luftgeschwindigkeit auf der Wandoberfläche über alle Messpunkte beträgt 0,2 m/s, die Oberflächenverteilung stellt sich darüber hinaus wie in Abb. 125 dar.

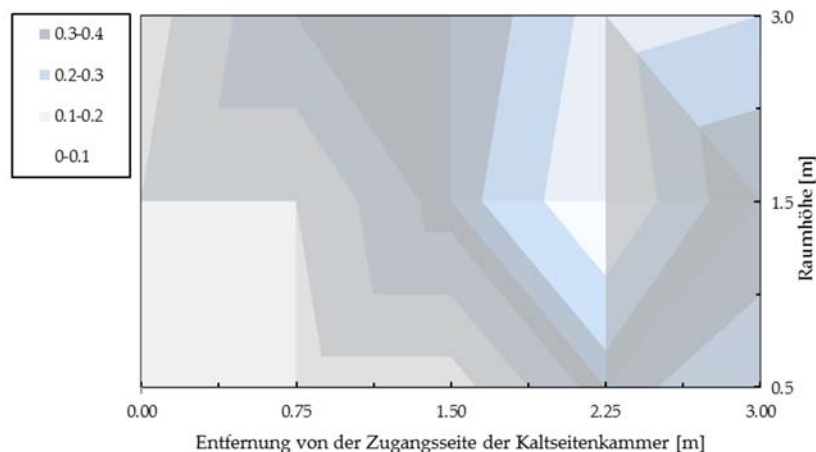


Abb. 125 Vor-Ort (in-situ) Messung der Luftgeschwindigkeit auf der Kaltseitenoberfläche der Prüfwand. Die Abszisse gibt die Breite (linkes Ende entspricht der Zugangsseite) der Prüfwand, die Ordinate die Höhe der Prüfwand an.

Eine gute Annäherung an diese Messergebnisse kann über den folgenden empirischen Ansatz [73] erreicht werden. Dieser gibt die in einer Entfernung x vom Ventilator auftretende Luftgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Anschlussleistung q , der Distanz x und der Luftauslassfläche A des Lüfters an:

$$v(x) = \frac{1,3 \cdot q}{A + 10 \cdot x^2}, \text{ [m/s]}$$

Eine Berechnung nach diesem Ansatz ergibt für den großen Ventilator (Anschlussleistung ca. 140 W, maximaler Förderstrom 6000 m³/h) eine geschätzte Luftgeschwindigkeit zwischen 0,15-0,25 m/s in einer Entfernung vom Luftauslass von 0,9-1,3 m.

Mit diesen Eingangswerten wurde eine erste Abschätzung von 9 W/m²K hinsichtlich des konvektiven und radiativen Wärmeübergangskoeffizienten vorgenommen. Aufgrund des geringen Raumvolumens, einer nur in Ausnahmefällen genutzten Heizquelle und der Einbauten im Innenklimabereich, betrug die erste Abschätzung für den inneren Wärmeübergangskoeffizienten 5 W/m²K. Aus dem konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten kann über die *Lewis-Relation* [73] auch der Feuchteübergangskoeffizient ermittelt werden.

Tab. 21 Übersicht der, um die angepassten Übergangskoeffizienten korrigierten, Wärmedurchgangskoeffizienten der Prüffelder.

	PUR-Hybridplatte (Prüffeld 1)	Kalziumsilikatplatte (Prüffeld 2)	Minerale Dämmplatte (Prüffeld 3)
$R_{si}=0,13 \text{ m}^2\text{K/W}$, $R_{se}=0,04 \text{ m}^2\text{K/W}$ Wärmeleitfähigkeiten der trockenen Baustoffe	0,312 W/m ² K	0,430 W/m ² K	0,308 W/m ² K
$R_{si}=0,13 \text{ m}^2\text{K/W}$, $R_{se}=0,04 \text{ m}^2\text{K/W}$ Wärmeleitfähigkeiten der Baustoffe bei einer Umgebungsfeuchte von 95 %	0,344 W/m ² K	0,562 W/m ² K	0,361 W/m ² K
$R_{si}=0,2 \text{ m}^2\text{K/W}$, $R_{se}=0,11 \text{ m}^2\text{K/W}$ Wärmeleitfähigkeiten der trockenen Baustoffe	0,299 W/m ² K	0,406 W/m ² K	0,295 W/m ² K
$R_{si}=0,2 \text{ m}^2\text{K/W}$ and $R_{se}=0,11 \text{ m}^2\text{K/W}$ Wärmeleitfähigkeiten der Baustoffe bei einer Umgebungsfeuchte von 95 %	0,328 W/m ² K	0,521 W/m ² K	0,343 W/m ² K

Aus der Übersicht in Tab. 21 ist zu erkennen, dass sich der Wärmedurchgang der Prüffelder je nach angesetzten Bedingungen im Verhältnis zueinander verschieben kann. Diese Strahlungs- und Konvektionsbedingungen unterliegen zudem zeitlichen und örtlichen Änderungen. Damit ist eine exakte Prognose des Prüfwandverhaltens nur bedingt möglich.

1.3.4.5 Auswertung der Messungen

Die Ausgangsbedingungen im Prüfstand stellen einen sehr kritischen Fall dar, der in der Praxis selten auftritt. So wurde das Mauerwerk unmittelbar vor dem Anbringen der Dämmsysteme errichtet. Die Einbaufeuchte ist entsprechend hoch. In der Praxis wird Innendämmung im Zuge einer Sanierung vornehmlich auf Bestandsmauerwerk aufgebracht, d.h. das Mauerwerk weist eine geringe bis keine Einbaufeuchte, wohl aber Feuchte aus anderen Quellen (z.B. Niederschlag, aufsteigende Feuchte) auf. Je nach Dämmsystem empfehlen die Hersteller bestimmte Feuchtebelastungen der Ausgangskonstruktion, um Schädigungen auszuschließen.

Im Gegensatz zur Einbaufeuchte aus dem Mauerwerk ist auch in der Praxis mit Einbaufeuchte aus dem Innendämmauftrag zu rechnen. Die im Prüfstand verwendeten Dämmplatten wurden alle mittels Klebemörtel auf der Prüfwand aufgebracht und anschließend mit der systemzugehörigen Deckschicht (Putz oder Kalkglätte) versehen. Zusätzlich kann bei Wandoberflächen im Bestand auch die Erneuerung oder der erstmalige Auftrag eines Ausgleichsputzes nötig werden, der mit einer entsprechenden Einbaufeuchte verbunden ist.

Die zeitlichen Abläufe bei der Errichtung des Prüfstandes sind in Tab. 22 aufgelistet.

Tab. 22 Wesentliche Schritte der Bauarbeiten am Prüfstand.

Bauarbeiten am Prüfstand	Zeitraum
Errichtung des Mauerwerks	April 2015
Einbau der Klimatechnik	Juni 2015
Ausgleichsputz auf Warmseite des Mauerwerks	August 2015
Dämmsystem im Prüffeld 1 – PUR-Hybridplatte	August 2015
Dämmsystem im Prüffeld 2 – Kalziumsilikatplatte	November 2015
Dämmsystem im Prüffeld 3 – Minerale Dämmplatte	Dezember 2015

Mauerwerk

Die Abb. 126 zeigt den Verlauf der Temperatur und der relativen Luftfeuchte in der Mitte des Ziegelmauerwerks für die drei Prüffelder. Die Erfassung der Messwerte erfolgte in einer Lagerfuge. Aus Abb. 126 (stationäre Phase) ist zu erkennen, dass das Feuchteniveau für alle Sensoren bei 100 % liegt. Offensichtlich hatte trotz der anfänglichen Trocknungsphasen mit beidseitig hohen Temperaturen und aktiver Entfeuchtung der Raumluft die Trocknung noch nicht die Mauerwerksmitte erreicht.

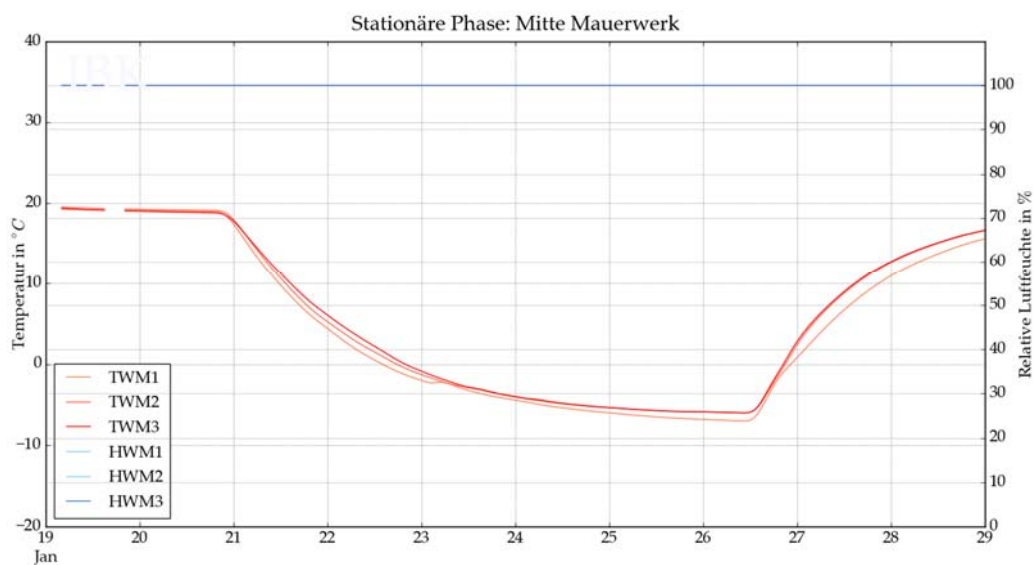


Abb. 126 Temperatur (rot) und relative Luftfeuchte (blau) in der Mitte des Mauerwerks in allen drei Prüffeldern im Vergleich während der stationären Auswertungsphase.

Auch in den folgenden Auswertephase 2 und 3 verblieb das Feuchteniveau bei 100 % r.F. Lediglich zum Ende der Stufenphase im Juli 2016 ist eine leichte Absenkung im Feld 3 (Minerale Dämmplatte) zu erkennen (Abb. 127). Zurückzuführen ist dies sowohl auf die längste Trocknungsphase des Mauerwerks vor Anbringen des Dämmsystems, als auch auf die hohe Diffusionsoffenheit der Minerale Dämmplatte.

Es war davon ausgegangen worden, dass das gemessene Temperaturniveau in der Wand das Verhältnis der berechneten U-Werte zueinander widerspiegelt.

Da sich dieses Verhältnis zumindest zwischen der PUR-Hybridplatte und der Mineraldämmplatte je nach Übergangsbedingungen und Feuchtegehalt der Baustoffe ändern kann, besteht die grundlegende Erwartung lediglich in einem deutlich höheren Temperaturniveau für Kalziumsilikat im Vergleich zu den anderen beiden Prüffeldern.

Die gemessenen Temperaturkurven beginnen auf einem einheitlichen Temperaturniveau und befinden sich in den Abbildungen 126 und 127 innerhalb der angegebenen Messungenauigkeit der Sensoren. Sie lassen zu diesem Zeitpunkt keine Rückschlüsse auf die Dämmwirkung des jeweiligen Systems für die Wandmitte zu. Während des Temperaturabsenkungsvorganges kommt es im Prüffeld 1 am schnellsten und stärksten zur Abkühlung. Das Temperaturniveau bleibt in diesem Feld auch zum Ende der stationären Auswertungsphase 1 am niedrigsten. Prüffeld 2 und 3 zeigen lediglich zu Beginn der Abkühlung in der ersten Phase einen Unterschied, Feld 3 kühlt schneller aus als Feld 2. Trotz des unterschiedlichen Wärmewiderstands liegen beide Kurven praktisch übereinander. Gleiches gilt auch für die oszillierende und die Stufenphase in Abb. 127. In der Mitte des sehr wärmeleitfähigen Mauerwerks ist der Einfluss des Dämmsystems gesunken.

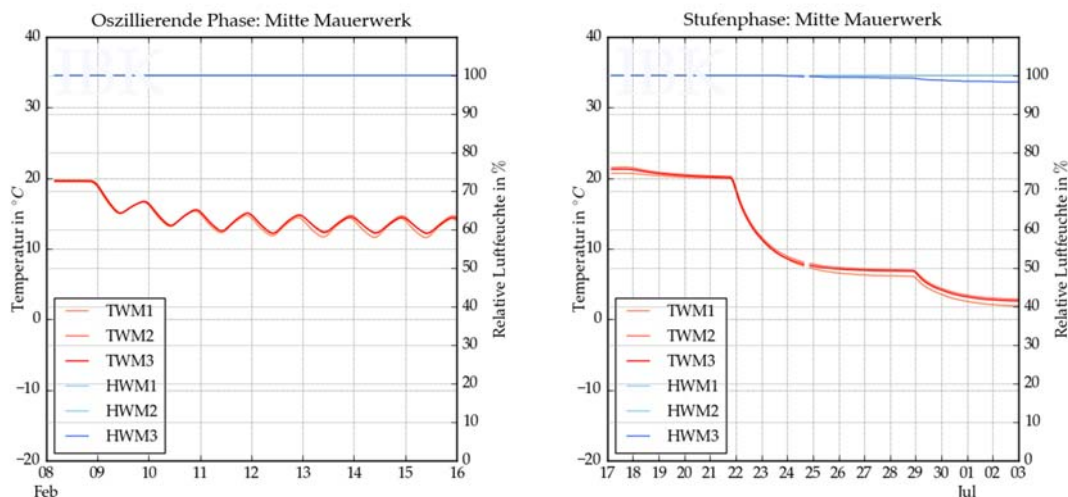


Abb. 127 Temperatur (rot) und relative Luftfeuchte (blau) im Mauerwerk während der Testphase 2 (oszillierende Phase) und 3 (Stufenphase).

Kontaktfläche Mauerwerk – Innendämmung (Klebemörtelschicht)

In allen drei mittigen Messstrecken zur Erfassung des ungestörten Wandaufbaus sind Sensoren innerhalb der Klebemörtelschicht untergebracht. Diese Ebene stellt die potenzielle Kondensatebene dar, während typischer Winterbedingungen wird wegen des großen Temperaturgefälles und der Diffusionsoffenheit der Dämmebene zuerst hier der Taupunkt der Luft erreicht. Dies ist unter anderem davon abhängig, wie hoch der Wassergehalt der durch die Wand hindurchdiffundierenden Luft ist. Befinden sich auf der Raumseite der Dämmschicht diffusionshemmende oder –sperrende Baustoffschichten, ist die Wahrscheinlichkeit geringer. Der im Prüffeld 1 gewählte Dämmstoff PUR-Hybridplatte weist einen deutlich höheren Diffusionswiderstand auf als die Dämmstoffe in Prüffeld 2 und 3. Es

handelt sich jedoch auch um den Dämmstoff mit der geringsten Wärmeleitfähigkeit und dem damit verbundenem größten Temperaturgefälle innerhalb der Dämmschicht.

In der Auswertung der Messwerte ist neben diesem potenziellen Kondensatausfall auch die eingebrachte Einbaufeuchte zu betrachten. In allen Prüffeldern wurde mit der Klebemörtelschicht auch eine erhebliche Befeuchtung in dieser Ebene bewirkt. Diese Feuchte kann über zwei Mechanismen entweichen, den Flüssigwassertransport (kapillare Leitung) und die Diffusion. Die Prozesse können in beide Richtungen, d.h. zur Kaltseite und zur Warmseite hin, stattfinden, wenn ein Kapillardruck- bzw. Partialdampfdruckgefälle vorliegt. Ein kapillar gut leitfähiger Dämmstoff existiert lediglich in Prüffeld 2 mit Kalziumsilikat. Die übrigen Dämmstoffe sind wenig flüssigwasserleitfähig. Da das Mauerwerk von der Außenoberfläche her zunehmend austrocknet, kann über diese Bereiche die Trocknung nur auf diffusivem Weg erfolgen, welcher bei weitem nicht so effektiv ist wie die Kapillarleitung. Aus diesem Grund nimmt die Geschwindigkeit der Trocknung stetig ab. Gleiches gilt auch für die weiter innen liegenden, trockenen Bereiche der Dämmung. Das Trocknungspotenzial für Feld 2 (Kalziumsilikatplatte, $\mu = 3,6$) und 3 (Mineralewolleplatte, $\mu = 3$) ist aufgrund des geringen Diffusionswiderstandes am höchsten und für Feld 1 (PUR-Hybridplatte, $\mu = 27$) am geringsten.

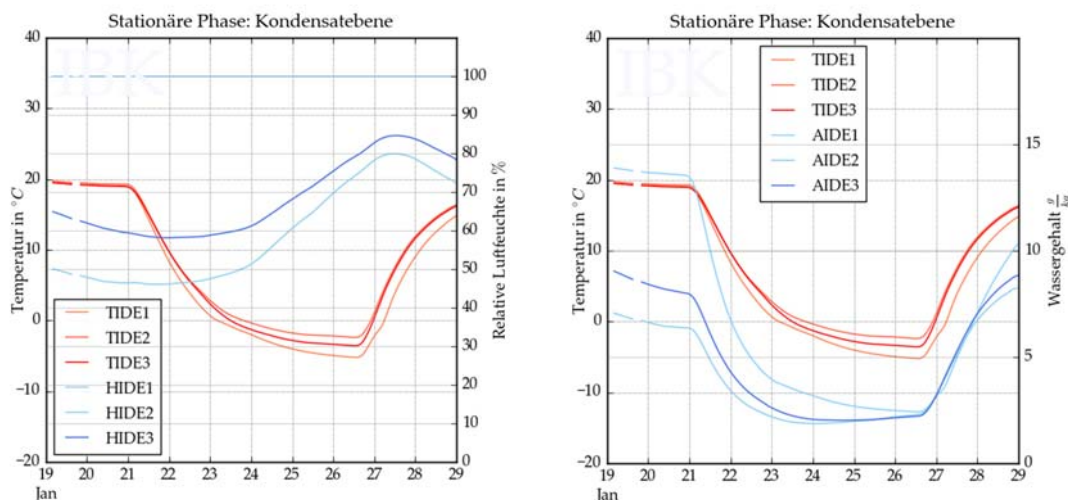


Abb. 128 Darstellung der Temperatur und der relativen Luftfeuchte (links) sowie der Temperatur und der absoluten Luftfeuchte (rechts) für die erste Auswertungsphase. Die Legendeneinträge mit dem ersten Buchstaben A bezeichnen die berechnete absolute Luftfeuchte.

In der Abb. 128 sind die Verläufe der Temperatur sowie der relativen und absoluten Luftfeuchte für die erste Auswertungsphase dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die schlagartige Absenkung der Kaltseitentemperatur für die PUR-Hybridplatte die schnellste und stärkste Abkühlung hinter der Dämmschicht hervorruft. Dies lässt sich damit erklären, dass der Wärmedurchlasswiderstand der PUR-Hybridplatten-Dämmschicht am größten ist und damit ein größerer Temperaturgradient innerhalb der Dämmschicht existiert. Neben dem Wärmedurchlasswiderstand kommt für eine Temperaturänderung auch die thermische Speicherkapazität (Dichte des Dämmstoffes) zum Tragen. Diese ist für die PUR-Hybridplatte

deutlich geringer. Die Kalziumsilikatplatte und die Mineraldämmplatte zeichnen sich folglich für eine größere thermische Trägheit und ein höheres Temperaturniveau innerhalb der Kontaktfläche verantwortlich. Im Übrigen entspricht das Temperaturniveau in den Prüfkonstruktionen an diesem Messpunkt der Reihenfolge, welche aus dem Vergleich der trockenen U-Werte aus Tab. 21 zu erwarten war, d.h. die Kalziumsilikatplatte weist das höchste Temperaturniveau auf, da der Wärmedurchlasswiderstand für dieses Material am geringsten ist.

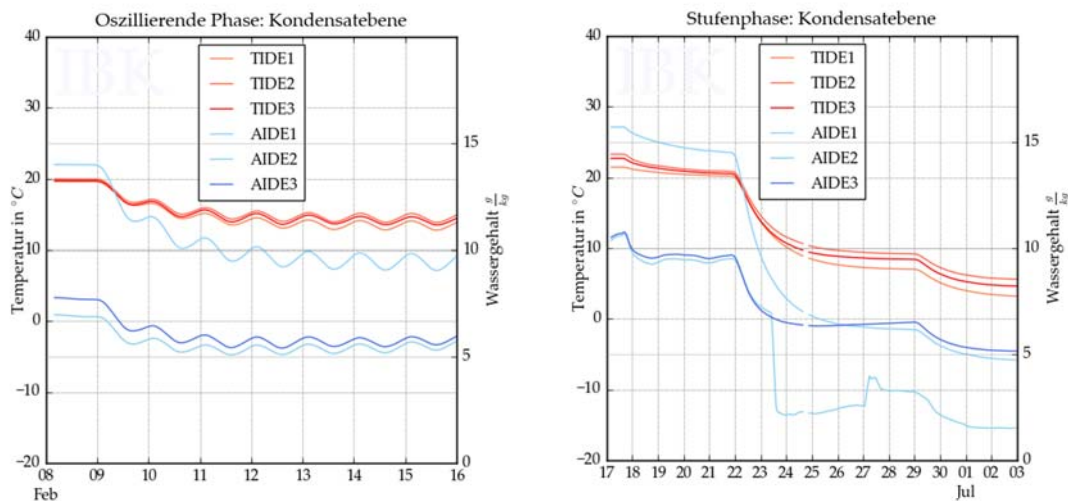


Abb. 129 Verlauf der Temperatur und der absoluten Luftfeuchte für Auswertungsphase 2 (oszillierende Phase, links) und 3 (Stufenphase, rechts).

Die Feuchtekurven der Abbildungen 128 und 129 sind sowohl als Verläufe der relativen Luftfeuchte als auch als Verläufe der absoluten Luftfeuchte dargestellt. Da die unterschiedlichen Temperaturniveaus einen Vergleich der relativen Luftfeuchte erschweren, ist diese Zweiteilung erforderlich. Die Anordnung der relativen Feuchtekurven zeigt, dass das Ausgangsfeuchteniveau bei nahezu gleichem Temperaturniveau der Konstruktionen sehr unterschiedlich ist. Die Kurven der relativen Luftfeuchte der PUR-Hybridplatte (HIDE1) und der Mineraldämmplatte (HIDE3) zeigen sich fast deckungsgleich, während die relative Luftfeuchte für die Kalziumsilikatplatte (HIDE2) deutlich, d.h. ca. 15 % unterhalb dieser Verläufe liegt. Mit dem Absenken der Temperatur in der Konstruktion reduzieren sich die Abstände und gleichen sich in Bezug auf die absolute Luftfeuchte zwischen dem 26. und 27. Januar an. Das höchste Feuchteniveau weist, absolut gesehen, das PUR-Hybridplatten Prüffeld (AIDE1) auf. Als Ursachen hierfür kommen zwei Umstände in Frage. Erstens ist in diesem Prüffeld die Trocknungsphase für die Ausgangskonstruktion am kürzesten und zweitens ist, wie bereits im vorherigen Abschnitt erwähnt, für die PUR-Hybridplatten das geringste Austrocknungspotenzial vorhanden. Aus dem großen Austrocknungspotenzial der Kalziumsilikatplatte in Bezug auf Dampfdiffusion und Flüssigwasserleitfähigkeit resultiert das geringste Feuchteniveau in der Klebemörtelschicht in Prüffeld 2.

Auch in den beiden anderen Auswertungsphasen ist die erläuterte Anordnung der Feuchteniveaus vorherrschend, wobei sich die absoluten Luftfeuchten von Feld 2 und 3 noch stärker aneinander angleichen und etwa um einen Wassergehalt von 5 g_{Wasser}/kg_{Luft} unterhalb

des Feldes 1 liegen. Je niedriger die Temperatur im Bauteil ist, desto geringer fällt der Unterschied zwischen den drei Konstruktionen aus. Er erreicht zum Ende der dritten Phase (Stufenphase im Juni/Juli 2016) eine nahezu vollständige Angleichung. Zu diesem Zeitpunkt ist der Sättigungswassergehalt von 4–6 °C warmer Luft bei etwa 5-6 g/kg erreicht. Der Sprung im Feuchteverlauf für Feld 2 in Abb. 129 rechts lässt sich durch einen kurzzeitigen Ausfall des Sensors erklären.

Kaltseitenoberfläche

Sensoren für die oberflächennahe Erfassung der Temperatur und relativen Luftfeuchte auf der Kaltseite der Prüfwand wurden in Prüffeld 2 und 3 installiert. Die Sensoren wurden in der Lagerfuge des Mauerwerks in einer Tiefe von ca. 2,5 cm eingebettet.

Die Unterschiede in den Temperaturkurven (Abb. 130) fallen marginal aus. Feld 2 (Kalziumsilikatplatte: TWA2) zeigt dabei eine Verzögerung des Abkühlvorgangs im Vergleich zu Feld 3 (Minerale Dämmplatte), dies führt zeitweise zu einem Temperaturunterschied von 1-2 K. Es ist anzunehmen, dass diese Verzögerung eine Folge der deutlich höheren Dichte der Kalziumsilikatplatte im Vergleich zur Minerale Dämmplatte, und somit einer erheblich größeren Speicherkapazität, sowie der höheren Wärmeleitfähigkeit ist. Im übrigen Verlauf sind beide Kurven nahezu deckungsgleich.

Das Feuchteniveau auf der Kaltseite der Mauer ist im Gegensatz zum Feuchteniveau in der Kleberebene etwas höher für die Kalziumsilikatplatte als für die Minerale Dämmplatte. Dieser Unterschied beläuft sich auf maximal 1-2 g/kg während der Phasen höherer Mauerwerkstemperaturen in Abb. 131.

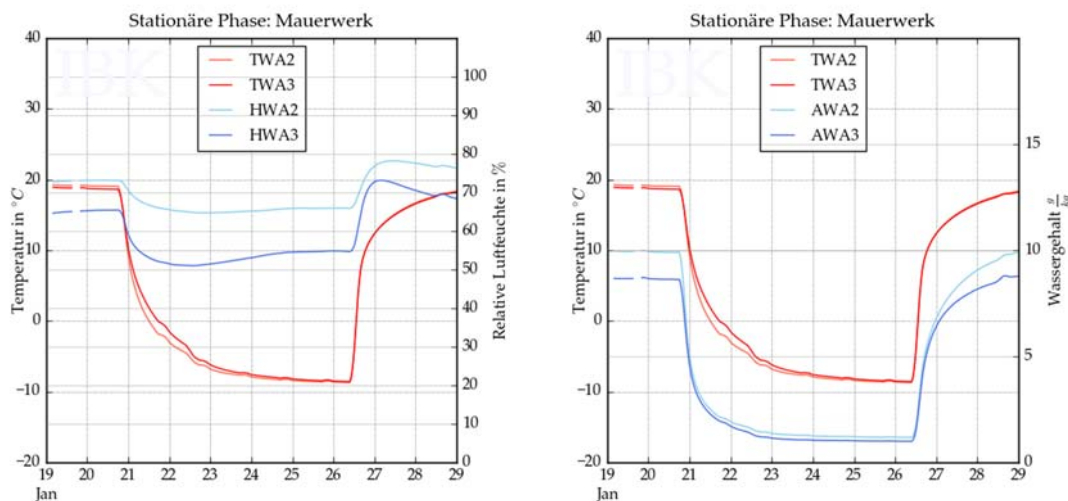


Abb. 130 Temperatur und relative (links) bzw. absolute (rechts) Luftfeuchte nahe der Kaltseitenoberfläche im Mauerwerk während der stationären Auswertungsphase.

Trotz sinkender Temperaturen ändert sich die relative Luftfeuchte nur moderat, weil die absolute Feuchte durch das entstandene Dampfdruckgefälle nach außen entweicht und an der Messstelle wie die Temperaturen absinkt (Abb. 130, rechts).

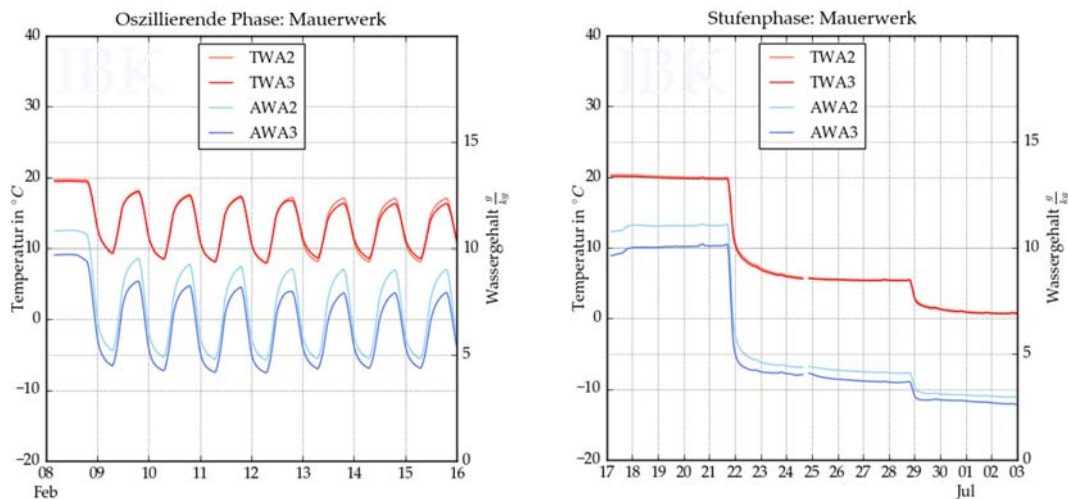


Abb. 131 Temperatur und relative (links) bzw. absolute (rechts) Luftfeuchte nahe der Kaltseitenoberfläche im Mauerwerk während der Auswertehasen 2 (oszillierende Phase) und 3 (Stufenphase).

Warmseitenoberfläche

Die Oberfläche zur Warmseitenkammer hin wurde in allen drei Prüffeldern mit einer Wärmestrommessplatte und einem Temperatursensor ausgestattet. Die Wärmestrommessplatten wurden in die Oberfläche eingebettet, d.h. sie wurden mit einer 1-2 mm starken Putz- bzw. Kalkglätteschicht bedeckt. Der Temperatursensor befindet sich direkt auf der Oberfläche. Aus den Messreihen der Wärmestrommessplatten kann, unter Kenntnis der Temperaturdifferenz zwischen Warm- und Kaltseite, der „reale“ Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert) berechnet werden. Durch den Vergleich der Werte mit den stationären U-Werten lassen sich Rückschlüsse auf die tatsächlichen Übergangskoeffizienten bzw. auf den Einfluss von Beladungs- und Entladungsvorgängen der Prüffelder ziehen.

II.1 Vorhabensziele, Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

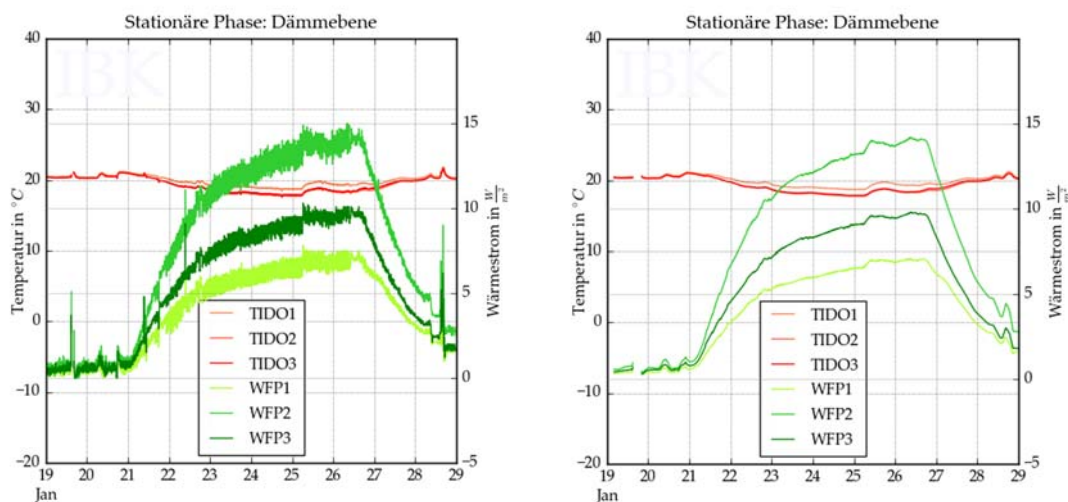


Abb. 132 Gemessene Verläufe des Wärmestroms (grün) und der Temperatur (rot) an der Oberfläche zur Warmseitenkammer für die erste Auswertungsphase (stationäre Phase) als Originalverlauf (links) und als geglätteter Verlauf (rechts).

Während nahezu stationärer Verhältnisse für den letzten Abkühlungstag (25. Januar) in Abb. 132 lassen sich an Hand der mittleren Lufttemperaturdifferenz zwischen der Kalt- (-10,73 °C) und Warmseite (19,65 °C) die tatsächlichen U-Wert berechnen und mit den theoretischen U-Werten vergleichen.

Tab. 23 Vergleich der U-Werte aus den Trockenbaustoffwerten und aus den Messergebnissen der Wärmestromplatten für den 25. Januar.

Prüfabschnitt	U-Wert, berechnet [W/m ² K]	Wärmestrom, gemessen [W/m ²]	U-Wert, gemessen [W/m ² K]
Prüffeld 1: PUR-Hybridplatte	0,31	6,31	0,21
Prüffeld 2: Kalziumsilikatplatte	0,43	12,80	0,42
Prüffeld 3: Minerale Dämmplatte	0,31	8,76	0,29

Aus dem Kurvenverlauf der Wärmeströme ist bereits die Reihenfolge des Wärmedämmverhaltens der Innendämmsysteme zu entnehmen. So lässt sich der höchste Wärmestrom für die Kalziumsilikatplatte (Prüffeld 2), gefolgt von der Minerale Dämmplatte (Prüffeld 3) und der PUR-Hybridplatte (Prüffeld 1) feststellen.

Neben den absoluten Beträgen der Wärmeströme ist in Abb. 132 auch ein qualitativer Unterschied im Anstieg der Wärmestromkurven zu erkennen. Dieser Anstieg bestimmt, wie schnell sich im Bauteil stationäre Verhältnisse einstellen. Je flacher der Anstieg, desto schneller kommt es innerhalb des Bauteils zur Abkühlung, d.h. Bauteile mit einer geringeren Speicherkapazität zeigen auch einen geringeren Anstieg der Wärmestromkurve.

Die Berechnung der U-Werte für den ausgewählten Tag in Tab. 23 zeigt für die PUR-Hybridplatte deutlich geringere Werte als aus der stationären Berechnung zu erwarten waren. Dafür kommen unterschiedliche Ursachen in Frage. Erstens weichen realer und idealisierter U-Wert aufgrund der realen Übergangswiderstände, der realen

Baustofffeuchten, ungerechtfertigten Zuschlägen bei Zulassung der Dämmmaterialien sowie der geometrisch und produktionsbedingten Unregelmäßigkeiten voneinander ab. Zweitens kann die Wahl dieses einen Tages mit seinen nicht ganz stationären Bedingungen zu leichten Abweichungen führen. Werden die U-Werte während der Auswertungsphase 2 (oszillierende Phase) ermittelt, zeigen sich allerdings auch keine erheblichen Unterschiede (Vergl. Tab. 24). Ebenso verhält es sich für einen ausgewählten Tag der Stufenphase (Abb. 133). Bei derartigen Abweichungen kommt auch ein Defekt der Wärmestromplatte in Betracht. Dieser kann erst im Zuge einer Nachkalibrierung überprüft werden, nach Abbau der Dämmung.

Tab. 24 Gemessene Wärmeströme und daraus ermittelte U-Werte für ausgewählte Zeitabschnitte der zweiten und dritten Auswertungsphase.

Prüfabschnitt	Oszillierende Phase		Stufenphase	
	Wärmestrom, gemessen [W/m ²]	U-Wert, gemessen [W/m ² K]	Wärmestrom, gemessen [W/m ²]	U-Wert, gemessen [W/m ² K]
Prüffeld 1: PUR-Hybridplatte	2,19	0,22	4,25	0,23
Prüffeld 2: Kalziumsilikatplatte	4,31	0,44	8,23	0,44
Prüffeld 3: Mineraldämmplatte	2,88	0,29	5,74	0,31

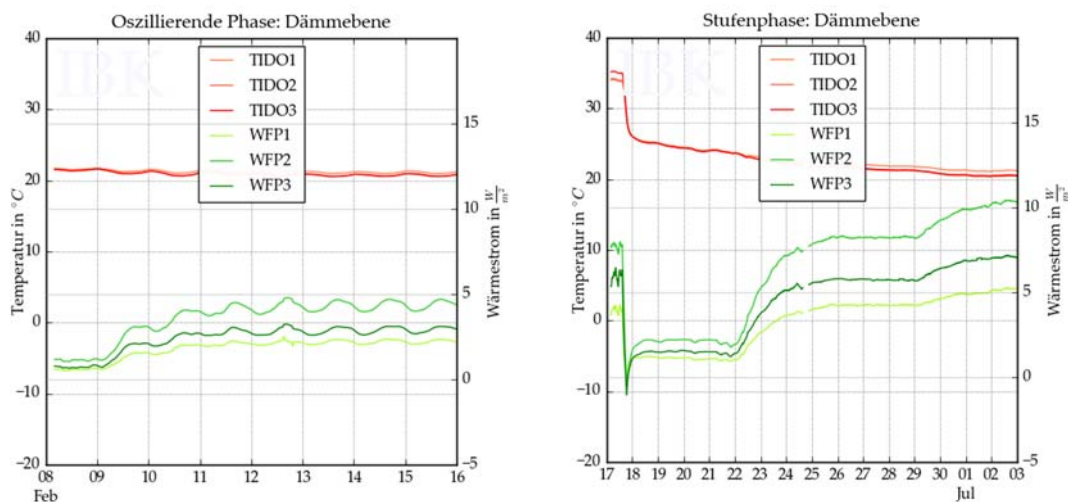


Abb. 133 Temperatur und Wärmestrom für die zweite (links) und dritte (rechts) Auswertephase.

Zusammenfassend lässt sich eine gute Übereinstimmung der gemessenen und berechneten U-Werte für die Kalziumsilikatplatte und Mineraldämmplatte feststellen. Für die PUR-Hybridplatte fällt der U-Wert jedoch deutlich geringer aus, als zu erwarten war. Die genauen Gründe konnten bisher nicht ermittelt werden und erfordern nach dem Abbau der Dämmung eine genauere Untersuchung, welche die speziellen Materialeigenschaften und die Wärmestromplatte umfassen wird.

Balkenköpfe

Neben den Messstrecken im ungestörten Bauteil wurden umfangreiche Messungen in den sechs Auflagerbereichen durchgeführt. Die Abdichtung der Balkenköpfe gegenüber dem Warmseitenklima erfolgte in verschiedenen Ausführungen. Es sollte ermittelt werden, welche hygrothermische Reaktion infolge veränderter Randbedingungen auf der Warm- und Kaltseite die Varianz des Abdichtkonzeptes am Balkenkopf und in der Balkenkopftasche hervorruft.

In allen drei Feldern wurden Messungen der Temperatur und relativen Luftfeuchte im Stirnholzbereich durchgeführt. Diese eignen sich für einen Vergleich des hygrothermischen Verhaltens der Balkenköpfe. In der Abb. 134 sind diese Ergebnisse jeweils für die unteren (links) und oberen (rechts) Balkenköpfe dargestellt.

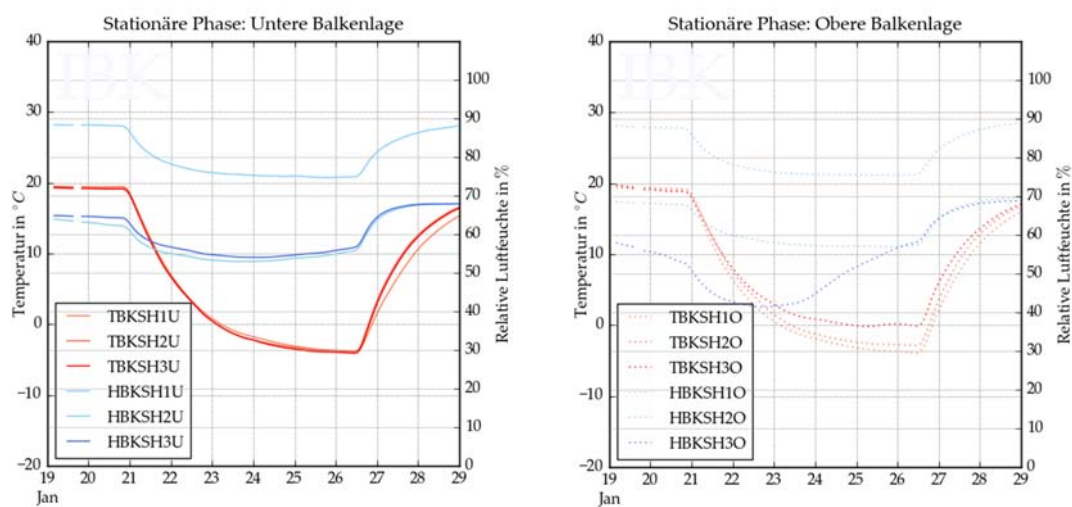


Abb. 134 Temperatur und relative Luftfeuchte im Stirnholz der unteren (links) und oberen (rechts) Balkenköpfe für die stationäre Auswertephase.

Die Temperaturkurven der unteren Balkenköpfe zeigen eine gute Übereinstimmung in Bezug auf den Verlauf (Abb. 134, links). Einzig am Balkenkopf des Feldes 1 (PUR-Hybridplatte, TBKSH1U) ist eine leichte Verzögerung des Abkühl- und Aufheizvorgangs im Vergleich zu den anderen Balkenköpfen zu erkennen. Daraus ist zu schlussfolgern, dass die Abdichtungen des in zwei Ebenen verlegten Dichtbandes (Feld 1), des einfachen Dichtbandes (Feld 2) und des Hanfbandes (Feld 3), bezogen auf die Temperaturen im Stirnholzbereich, qualitativ einen ähnlichen Effekt bewirken.

Dem gegenüber zeigt sich im Verlauf der relativen Luftfeuchte ein Herausstechen des Balkens in Feld 1 (HBKSH1U), der beinahe einen Wert von 90 % r.F. erreicht. Eine relative Luftfeuchte von 90 % und mehr über einen längeren Zeitraum hinweg ist als kritisch zu bewerten [1]. Ein Zusammenhang ist hier in dem deutlich höheren Anfangsfeuchteniveau und dem das Trocknungsverhalten verlangsamenen Dämmstoff zu sehen. Für Feld 2 und 3 lassen sich nur geringe Unterschiede im Feuchteverlauf, der insgesamt als unkritisch zu bewerten ist, erkennen.

An den oberen Balkenkopftaschen wurden andere Abdichtungsvarianten untersucht (Abb. 134, rechts), die deutlich größere Unterschiede in den Temperatur- und Feuchteverläufen erkennen lassen. Der größte Unterschied besteht hier in der Kombination eines Putzanschlussklebebandes und eines Fugendichtbandes für Feld 2 und den gänzlichen Verzicht auf eine Abdichtung in Feld 3 mit quasi direkter Kopplung an das Innenraumklima. In Feld 1 wurde die Abdichtungsvariante beibehalten, weswegen für beide Balken Verlauf und Höhe fast identisch sind.

Grundsätzlich lässt sich für den Stirnholzbereich des oberen Balkens in Feld 1 das höchste Feuchteniveau feststellen. Auch hier nähert sich die relative Luftfeuchte den 90 % r.F. an. Bezüglich der Temperatur stellen sich für Feld 1 nur geringe Unterschiede ein. Auch für Feld 2 zeigen sich ähnliche Verläufe. Anders sieht es für Feld 3 aus. Die fehlende Abdichtung und der damit verbundene Austausch der Luft im Auflager mit dem Innenklima resultiert in einem deutlich höheren Temperaturniveau für den Stirnholzbereich. Die relative Luftfeuchte nimmt auffallend schnell zu, weil feuchtere Innenraumluft nachtransportiert wird. Die Darstellung der absoluten Feuchte in Abb. 135 gibt Aufschluss über die tatsächlichen Feuchtemengen im Stirnholzbereich.

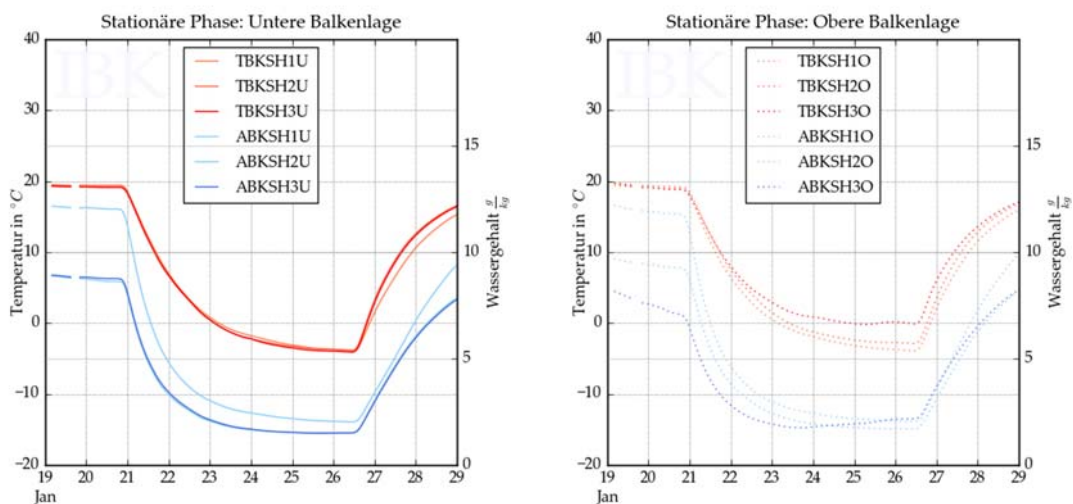


Abb. 135 Temperatur und absolute Feuchte im Stirnholz der unteren (links) und der oberen (rechts) Balkenköpfe für die stationäre Auswertungsphase.

Der Balkenkopf im Prüffeld 1 (PUR-Hybridplatte) zeigt sowohl relativ als auch absolut das höchste Feuchteniveau, wegen der grundsätzlich höheren Feuchte im umgebenden Mauerwerk und dem geringeren Austrocknungspotential. Erstaunlich ist, dass die absolute Feuchte hier schnell auf ein ähnliches Niveau absinkt wie in den anderen Feldern. Die Feuchte wird bei länger anhaltendem Temperaturgefälle dem Stirnholz durch die kurze (longitudinale) Entfernung zur Auflagerluft und das Dampfdruckgefälle quasi entzogen. Am unkritischsten verhalten sich die Balkenköpfe im Prüffeld 3 (Minerale Dämmplatte).

II.1 Vorhabensziele, Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

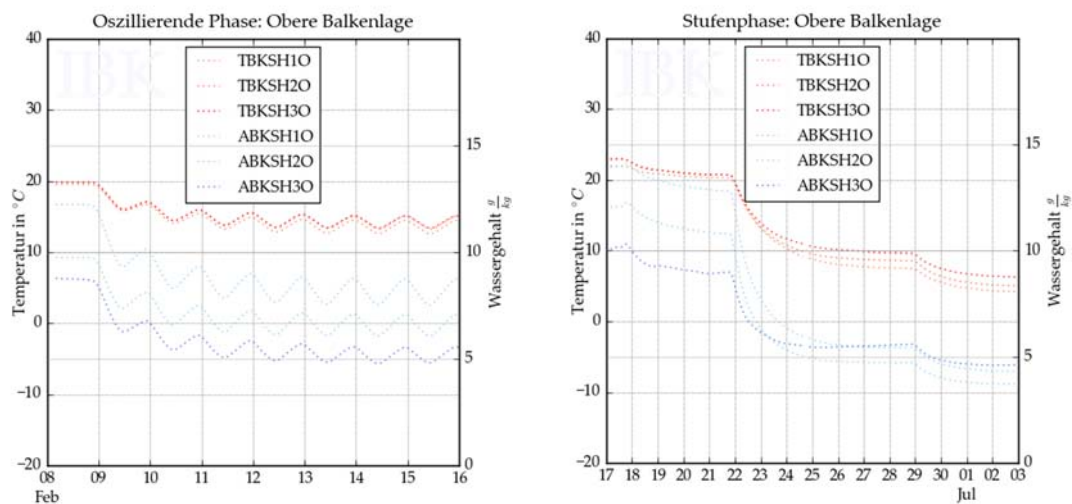


Abb. 136 Temperatur und absolute Feuchte im Stirnholz der oberen Balkenköpfe für die oszillierende Auswertungsphase (links) und für die Stufenphase (rechts).

Auch für die anderen Auswertungsphasen kann diese Grundaussage bestätigt werden, d.h. auch hier beginnt das offene Balkenkopffeld im Prüffeld 3 (Minerale Dämmplatte) auf dem niedrigsten Feuchteniveau. Die offene Bauweise führt wegen des nur moderaten Temperaturgefälles innen-außen bei einem Anstieg der Innenraumluftfeuchte zu keiner Reaktion am oberen Balkenkopf (Vergl. Abb. 135 mit Abb. 136, rechts). Der Abfall der absoluten Feuchte in Abb. 136 (rechts) setzt sich mit der einsetzenden Befeuchtung (Abb. 123, rechts) lediglich nicht fort. Unter diesen Voraussetzungen erweisen sich die Abdichtungsvarianten in Feld 1 und 2 als etwas günstiger.

Neben der Messung der Temperatur und relativen Luftfeuchte wurden für das Prüffeld 2 und 3 auch Messungen der Holzfeuchte im Stirnholzbereich durchgeführt. Zu beachten sind die Positionen der Messung in Abb. 137. Im Gegensatz zur kombinierten Messung von Temperatur und relativer Luftfeuchte im unteren Bereich des Stirnholzes erfolgt die Messung der Holzfeuchte im oberen Bereich. Im unteren Messbereich ist mit Temperatureinflüssen aus der Auflagersituation und im oberen mit einem etwas besseren Feuchte- und Temperatureaustausch des Balkenkopfes mit dem Luftvolumen der Tasche zu rechnen.

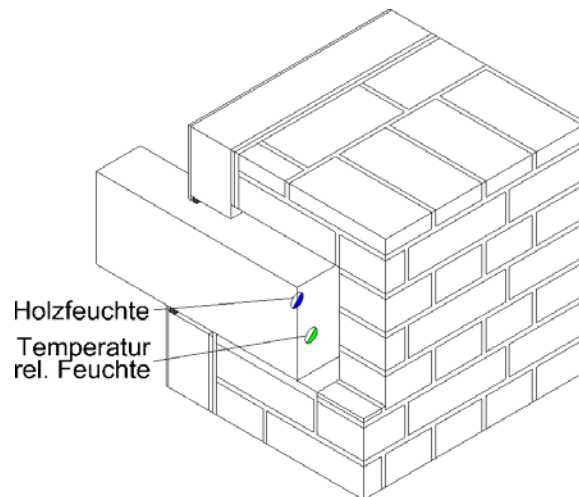


Abb. 137 Positionen der Feuchtemessung am Balkenkopf im Stirnholzbereich.

Die gemessene massenbezogene Holzfeuchte ist unter Praktikern ein üblicher Kennwert. (Fichten-)Holz mit einem Feuchtegehalt unter 5-6 % wird als sehr trocken klassifiziert und mit einem Feuchtegehalt über 30 % als fasergesättigt. Üblicherweise wird für Bauholz eine Holzfeuchte von 6 bis 20 % als unproblematisch angesehen. Die volumetrische Holzfeuchte gibt das Volumen des im Holz enthaltenen Wassers in Bezug auf das Volumen des trockenen Holzes an. Dieser Wert kann mittels Dichtekennwerten in die massenbezogene Holzfeuchte umgerechnet werden. Allerdings entspricht die so ermittelte volumetrische Holzfeuchte nicht der tatsächlichen Holzfeuchte, da beim Holz auch ein Schwind- und Quellprozess initiiert wird. Dieser kann, je nach Wuchsrichtung und Typ des Holzes eine Volumenänderung von bis zu 10 % betragen.

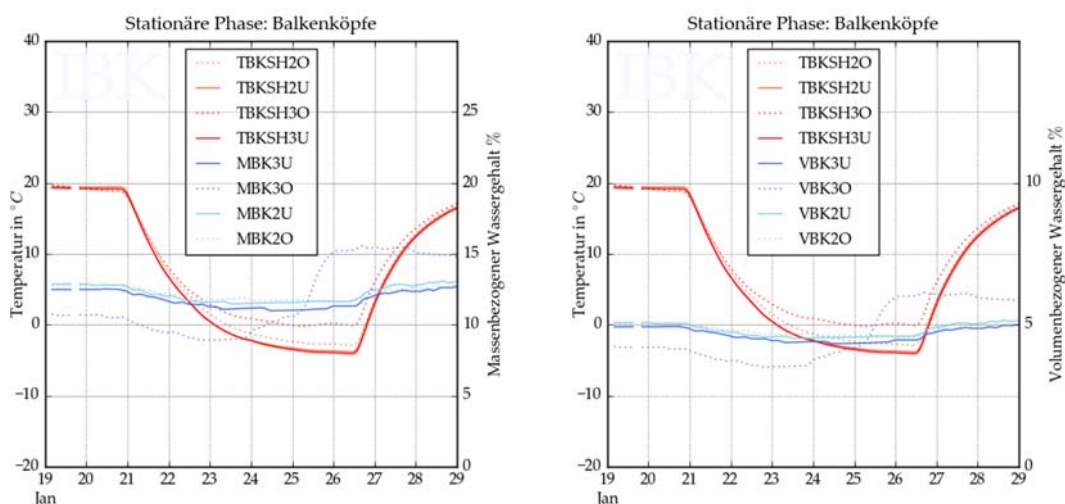


Abb. 138 Holzfeuchtemessung im Balkenkopf der Prüffelder 2 und 3. Gemessene, auf die Trockenmasse bezogene Wassermasse im Holz (links) und das auf das Trockenvolumen bezogene Wasservolumen im Holz (rechts).

Die gemessenen massenbezogenen Holzfeuchten in den Abbildungen 138 und 139 sind demnach für die Balkenköpfe im Prüffeld 2 (Kalziumsilikatplatte) und für den unteren

Balkenkopf im Prüffeld 3 (Mineraldämmplatte) als unkritisch einzustufen. Sie bewegen sich relativ konstant auf einem Niveau zwischen 13-15 %.

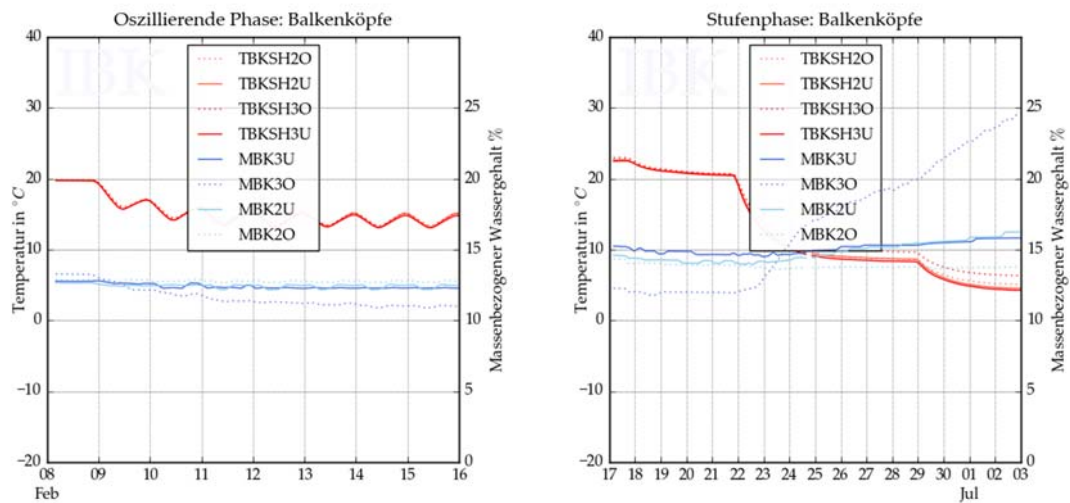


Abb. 139 Holzfeuchtemessung im Balkenkopf der Prüffelder 2 (Kalziumsilikatplatte) und 3 (Mineraldämmplatte). Dargestellt ist die auf die Trockenmasse bezogene Wassermasse im Holz für die Auswertungsphase 2 und 3.

Im Gegensatz dazu zeigt sich in der offenen Balkenkopftasche eine sehr hohe Schwankung der Holzfeuchte und der höchsten Feuchteknwerte. Sie übersteigt in Phase 3 während der hohen Feuchtebelastung auch den als unkritisch einzustufenden Bereich und nimmt zum Ende der Stufenphase Werte von fast 25 % an.

Andererseits zeigen sich für die harmonisch schwankenden Bedingungen in Auswertungsphase 2 die geringsten Feuchtwerte (Abb. 139, links). Darüber hinaus ist noch einmal anzumerken, dass das Feuchteniveau der offenen Balkenkopftasche immer vom trockensten Zustand startet. Es ist daher nicht von einem grundsätzlich erhöhten Risiko für den Balkenkopf auszugehen insofern sich Trocknungs- und Befeuchtungsphasen abwechseln und keine zu hohe Feuchtebelastung aus dem Innenraum vorliegt.

Insgesamt ist festzustellen, dass die Balkenköpfe mit zunehmender Ankopplung an das Raumklima (Grad der Luftdurchlässigkeit der Abdichtungsvariante steigt) auch zunehmenden Feuchteschwankungen unterworfen sind. Dies ist sowohl im Verlauf der relativen Luftfeuchte als auch im Verlauf der massenbezogenen Holzfeuchte zu erkennen. Demgegenüber ist die Entkopplung der Balkenköpfe vom Raumklima mit einer Erhöhung der Temperaturschwankungen und insgesamt einem geringeren Temperaturniveau im Holz und in der Balkenkopftasche (Luftraum) verbunden. Dieser Unterschied im Temperaturniveau beträgt für die Lufttasche selbst während der Testphasen im Prüfstand bis zu 5 °C (Phase 1) bzw. 3 °C (Phase 3), wie nachfolgende Diagramme (Abb. 140) veranschaulichen. Die Temperaturunterschiede im Stirnholz fallen etwas geringer aus.

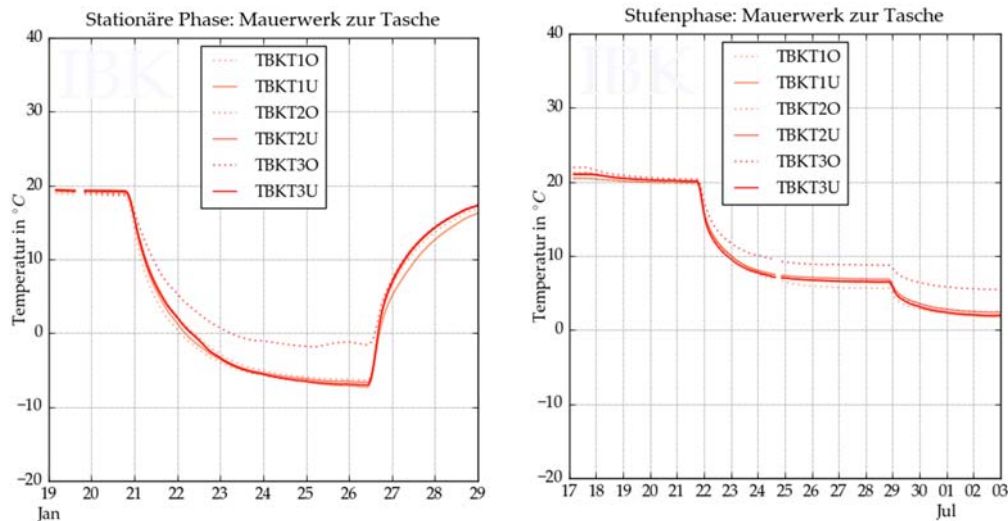


Abb. 140 Temperatur auf der zur Balkenkopftasche zugewandten Seite des Mauerwerks. Dargestellt sind die Verläufe aller Balkenkopffelder für die Phase 1 (links) und die Phase 3 (rechts).

Bemerkenswert ist, wie gering die Temperaturunterschiede zwischen den übrigen, in unterschiedlicher Form abgedichteten, Balkenköpfen ausfallen. So liegen die Kurven aller anderen Balkenfelder nahezu deckungsgleich mit kurzfristigen Differenzen von höchstens 2 K und mittleren Differenzen von unter 1 K (Abb. 141).

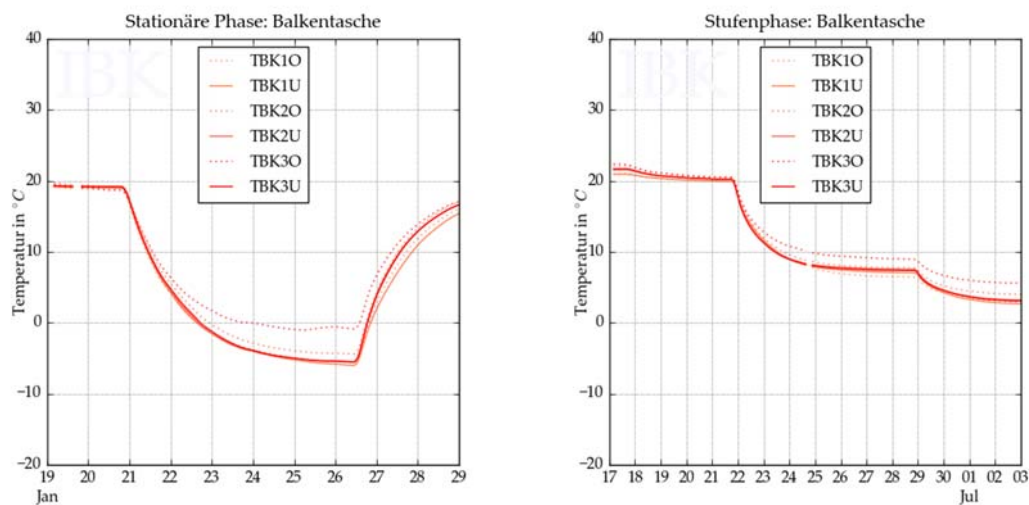


Abb. 141 Temperatur auf der Stirnholzoberfläche. Dargestellt sind die Verläufe aller Balkenkopffelder für die Phase 1 (links) und die Phase 3 (rechts).

Aus dem Vergleich der Kombinationssensoren im Stirnholz aller Balkenköpfe ergibt sich die Erkenntnis, dass das Temperaturniveau der Balkenköpfe umso höher ist, je offener die Balkenaufleger gestaltet sind. Im Gegensatz zur Praxis sind im Prüfstand jedoch alle „Deckenbalken“ nicht innerhalb eines Deckenaufbaus, d.h. es ist ohnehin mit einer stärkeren Abkopplung vom Raumklima zu rechnen. In diesem Fall würden sich auch im offenen Balkenkopffeld ein stärker verzögerter Verlauf und ein leicht abgesenktes Temperaturniveau

zeigen. In den anderen Abdichtungsvarianten würde sich mutmaßlich kaum ein Unterschied ergeben, da diese bereits stark entkoppelt sind.

Der Vergleich der Messergebnisse der Feuchte (relativ und absolut) mit der massebezogenen Holzfeuchtemessung zeigt, dass eine Auswertung der relativen Luftfeuchte aus den Kombisensoren hier ein eindeutigerer Indikator für die massenbezogene Holzfeuchte ist, als die absolute Luftfeuchte. Die Auswertung der relativen Luftfeuchte veranschaulicht, ebenso wie die Messung der massebezogenen Holzfeuchte, dass der offene Balkenkopf am schnellsten und stärksten auf die Veränderungen des Umgebungsklimas reagiert, allerdings vor allem während trockener und warmer Phasen auf einem niedrigeren Feuchteniveau verläuft. Demgegenüber waren im geschlossenen Balkenkopf in Feld 1 (PUR-Hybridplatte) geringere Schwankungen bei einem durchgängig hohen Feuchteniveau zu verzeichnen.

Es überrascht, dass die Oberflächenfeuchte zum Teil sehr schnell den Sättigungspunkt erreicht (bereits am 22. Januar), die Balkenköpfe diesen Zustand hingegen (bis auf Feld 3) nicht widerspiegeln (Vergl. Abb. 138 und Abb. 139 mit Abb. 142), worauf später noch einmal eingegangen wird. Ein ähnliches Verhalten war schon in [55] beobachtet worden.

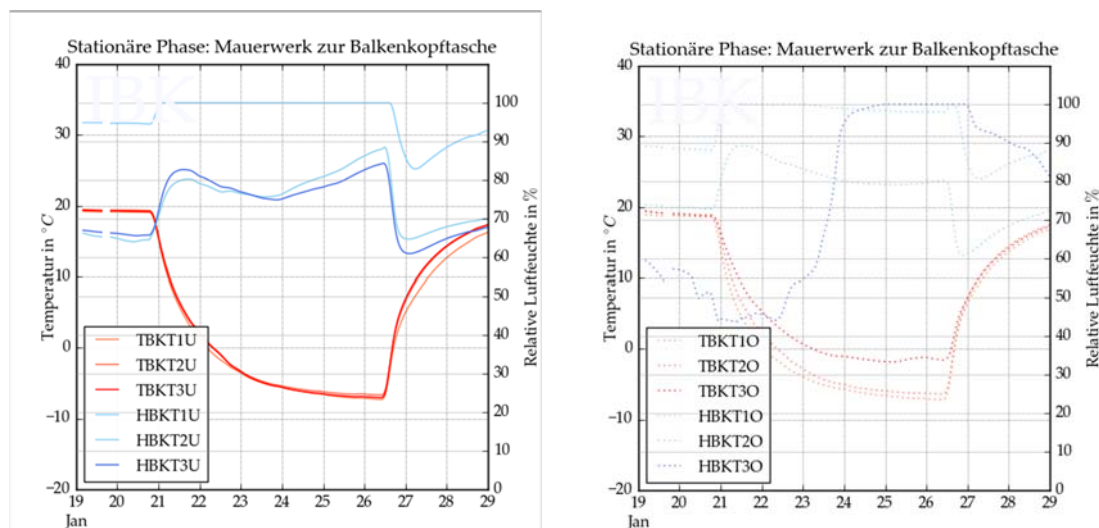


Abb. 142 Temperatur und relative Luftfeuchte für die Temperatursensoren auf der zur Balkenkopftasche zugewandten Fläche des Mauerwerks in der oberen (links) und der unteren (rechts) Balkenlage für Feld 1 bis 3 in Phase 1.

Neben der Reaktion der Balkenköpfe auf ein Absinken der Außenlufttemperatur gibt es auch raumklimabedingte Risikofaktoren. So stellt sich insbesondere für den offenen Balkenkopf die Frage, wie schnell die Holzfeuchte bei einem Anstieg der relativen Luftfeuchte im Innenraum kritische Werte erreicht. Zur näheren Betrachtung dieser Zusammenhänge wird eine weitere Auswertungsphase hinzugezogen (Abb. 143). Die zuvor erläuterten Phasen sind hierfür nicht geeignet, da die Raumluftfeuchte entweder kontinuierlich angehoben wurde oder bei konstanten Werten belassen wurde. Die zusätzliche Phase erstreckt sich über den März 2016. Nachfolgend sind die Kalt- und Warmseitenbedingungen dargestellt.

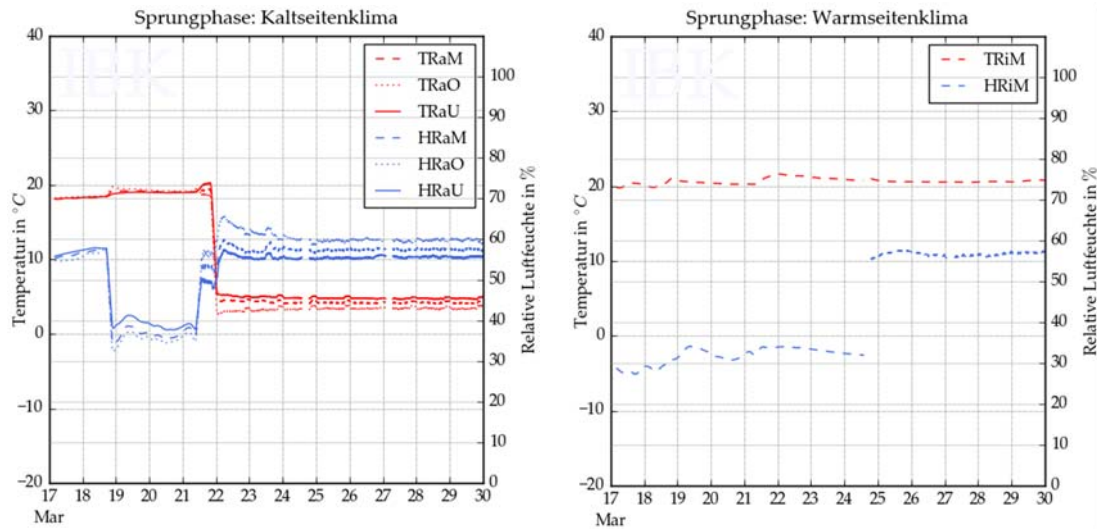


Abb. 143 Temperatur und relative Luftfeuchte für Kalt- und Warmseitenklima für die zusätzliche Auswertungsphase im März 2016. Bei der Installation des Befeuchters auf der Warmseite musste kurzfristig der Strom abgestellt werden, daher fehlt ein kurzes Zeitintervall (Anstieg der relativen Luftfeuchte am 24. März).

Während dieser Phase wird am 22. März die Kaltseitentemperatur sprunghaft von ca. 20 °C auf ca. 5 °C abgesenkt. Gleichzeitig erfährt die relative Luftfeuchte auf der Kaltseite einen Anstieg von ca. 40 % auf etwa 60 %. Auf der Warmseite der Prüfkammer wurde eine konstante Raumlufttemperatur von 20 °C beibehalten. Die relative Luftfeuchte wurde dort am 24. März sprunghaft von ca. 35 % auf etwa 55 % angehoben.

Für diese gewählte Phase lassen sich die zeitliche Wirkung von Kaltseitentemperaturabsenkung und später folgender Warmseitenfeuchteerhöhung sehr gut ablesen.

Die Reaktion der Holzbalkentemperaturen ist ausschließlich Folge der Temperaturabsenkung auf der Kaltseite (Abb. 144). Diese macht sich sofort in allen Balkenfeldern bemerkbar und bewirkt eine rapide Temperaturabsenkung über einen Zeitraum von ca. vier Tagen. Die erreichte Endtemperatur ist in allen Balkenfeldern ähnlich mit Unterschieden unter 2 K und einem mittleren Temperaturniveau von ca. 8-9 °C. Erwartungsgemäß weist dabei der unabgedichtete Holzbalken aufgrund der stärkeren thermischen Ankopplung an das Warmseitenklima das höchste Temperaturniveau auf. Darüber hinaus bewirkt die Temperaturabsenkung auch eine Reduktion der Luftfeuchte in den Balkenköpfen, da wie schon anhand von Abb. 136 erläutert, dem Stirnholz offenbar bei hohem Dampfdruckgefälle die Feuchte entzogen wird. Der geringe longitudinale Diffusionswiderstand von Holz und die Nähe des Messpunktes zur Luftschicht begünstigt die Feuchteverteilung hin zum Mauerwerk. Diese erscheint unabhängig von der Abdichtungsart und vom Dämmsystem und zeigt in allen Feldern nahezu den gleichen Anstieg.

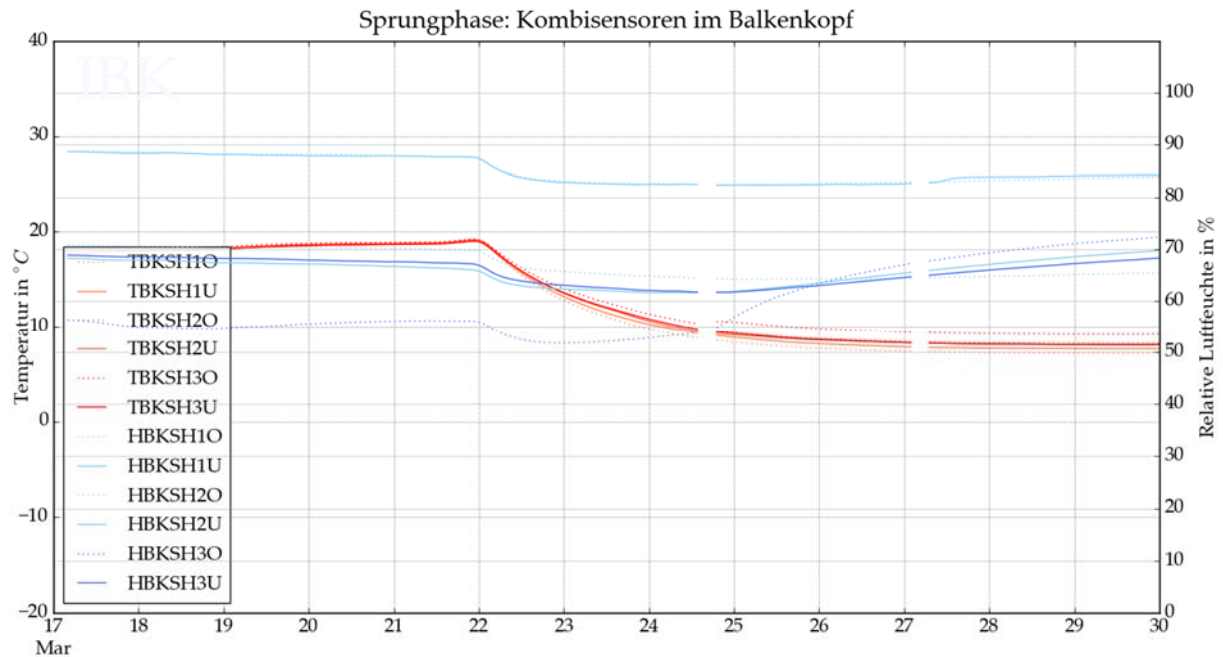


Abb. 144 Temperatur und relative Luftfeuchte für die Kombisensoren im Stirnholz der Balkenköpfe während der Auswertungsphase 4 in allen Feldern.

Der Anstieg der relativen Luftfeuchte am 24. März auf der Warmseite zeichnet sich in der relative Luftfeuchte der Balkenkopftaschen ab. Die Abdichtungsvarianten sind infolge dessen sehr gut unterscheidbar (Abb. 144). Den geringsten Anstieg (ca. 0,5 % r.F. pro Tag) zeigen die stark abgedichteten Balkenköpfe im Feld 1 (doppeltes Fugendichtband), gefolgt (ca. 1 % r.F. pro Tag) vom oberen Balkenkopf in Feld 2 (einfaches Fugendichtband mit Putzanschlussband). Einen leicht erhöhten Anstieg lassen die unteren Balkenköpfe in Feld 2 (einfaches Fugendichtband) und Feld 3 (einfaches Hanfdichtband) mit einem Anstieg von ca. 1,5 % r.F. pro Tag erkennen. Den mit Abstand höchsten Anstieg weist das offene Balkenfeld (Feld 3 oben) mit einem Anstieg von bis zu 10 % r.F. pro Tag am ersten Tag nach der Erhöhung der Warmseitenluftfeuchte auf.

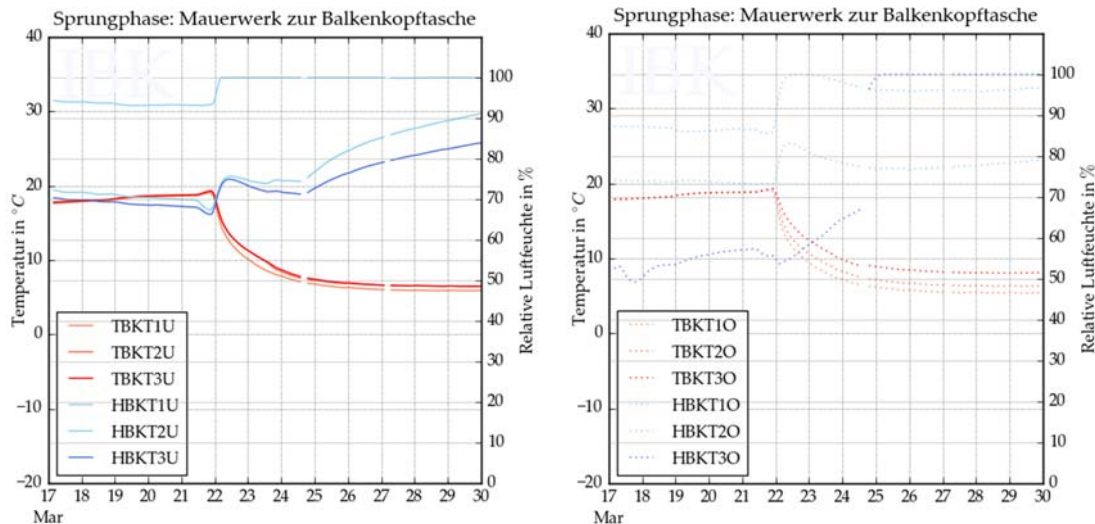


Abb. 145 Temperatur und relative Luftfeuchte für die Kombisensoren auf der zur Balkentasche zugewandten Seite des Mauerwerks für die untere (links) und obere (rechts) Balkenlage während der Sprungphase.

Qualitativ ähnlich stellt sich die Situation an der hinteren Vertikalfläche der Auflagertasche dar. Auch hier ist infolge des Kaltseitensignals ein prompter Abfall der Temperatur zu erkennen. Dieser fällt erwartungsgemäß größer aus als im Holz. Ebenso ist das Warmseitensignal am Mauerwerk durch den Anstieg der relativen Luftfeuchte erkennbar. Im Unterschied zur Stirnholzfeuchte steigt die Feuchtekurve infolge der kalten Mauerwerksoberfläche rapide an. In beiden Balkenkopftaschen des Feldes 1 wird der Sättigungsgrad erreicht. Die relative Luftfeuchte verbleibt dort für ca. einen Tag und sinkt dann wieder kontinuierlich ab. Ebenso verhält es sich in den anderen Balkenkopffeldern, d.h. einem kurzen rapiden Anstieg von ca. 8 % r.F. und dem Verbleib auf diesem Niveau für einen Tag folgt eine kontinuierliche Reduktion der Luftfeuchte bis die Erhöhung der Luftfeuchte auf der Warmseite erkennbar wird. In diesem Moment kommt es zu einer Umkehr des Verhaltens. Aufgrund der direkten Kopplung der oberen Balkenkopftasche in Feld 3 an das Warmseitenklima ist ein dramatischer Anstieg der Feuchte bis zur Sättigung feststellbar. In allen anderen Taschen wird dieses Signal durch die Abdichtungskonzepte stark gedämpft. Für den in Abb. 145 nicht dargestellten Trocknungsprozess kommt es abermals zur Umkehr der Verhältnisse. Die offene Balkenkopftasche bietet hier das größte Trocknungspotential. Die Reaktion infolge des Warmseitensignals zeigt sich auf der Oberfläche des Mauerwerks deutlich verstärkt, d.h. die Unterschiede im Anstieg zwischen den einzelnen Abdichtungsvarianten sind hier deutlich höher als im Stirnholzbereich.

Zur näheren Betrachtung von Luftströmungen innerhalb der Balkenkopftasche wurden variable Risse im Holz der Balkenköpfe in Feld 3 installiert. Hierbei handelt es sich um künstliche Risse (eingesägte Vertiefungen), welche bei Bedarf geöffnet oder geschlossen werden können. Ziel dieser Ausstattung war es, Erkenntnisse zum Zusammenhang zwischen der Riss-Öffnungsfläche, den Randbedingungen und den sich einstellenden Luftgeschwindigkeiten zu ziehen. Beispielhaft ist in Abb. 146 ein Messdatenausschnitt mit geöffnetem Riss für den unteren Balken dargestellt.

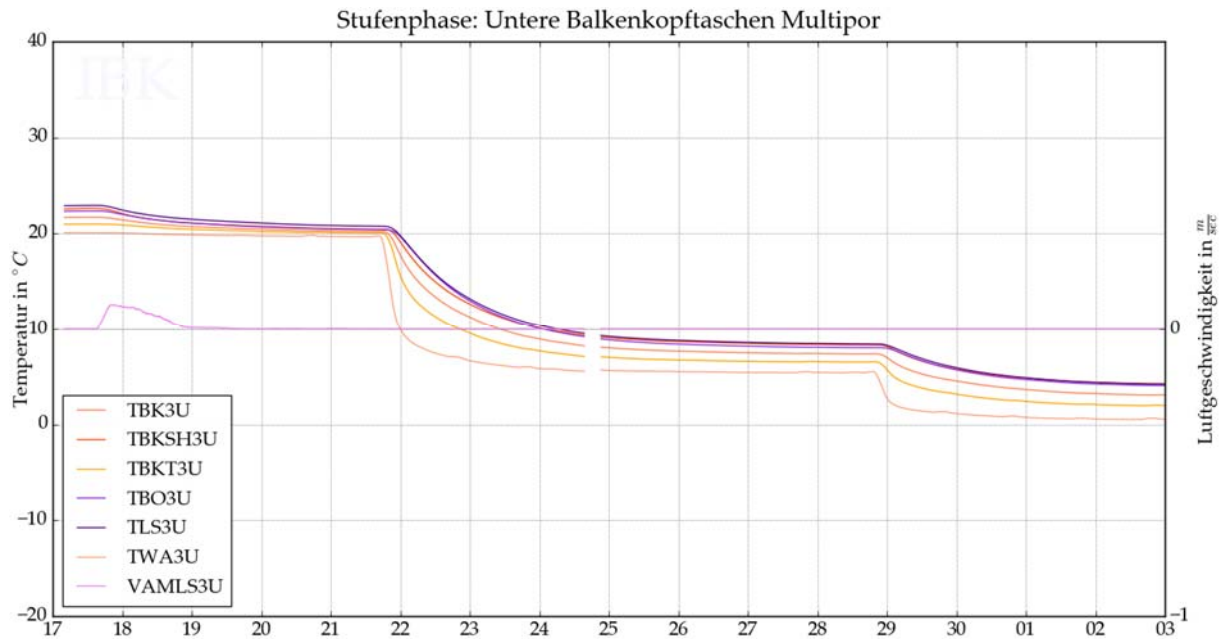


Abb. 146 Temperaturen an unterschiedlichen Positionen um den Balkenkopf herum und Luftgeschwindigkeit bei geöffnetem Riss für den unteren Balkenkopf in Feld 3 (Mineraldämmplatte) für die Auswertungsphase 3 (Stufenphase).

Am unteren Balkenkopf haben sich während der verschiedenen Testphasen nur sehr geringe Auswirkungen auf die Luftgeschwindigkeit in der Tasche gezeigt. In der Balkenkopftasche des oberen Feldes blieb eine Reaktion gänzlich aus, da hier der Luftaustausch über eine deutlich größere Fläche stattfindet. Auch zusätzliche Messungen im März 2017 mit einem definierten Unterdruck auf der Warmseite brachten keine systematischen Erkenntnisse wie Abb. 147 zeigt.

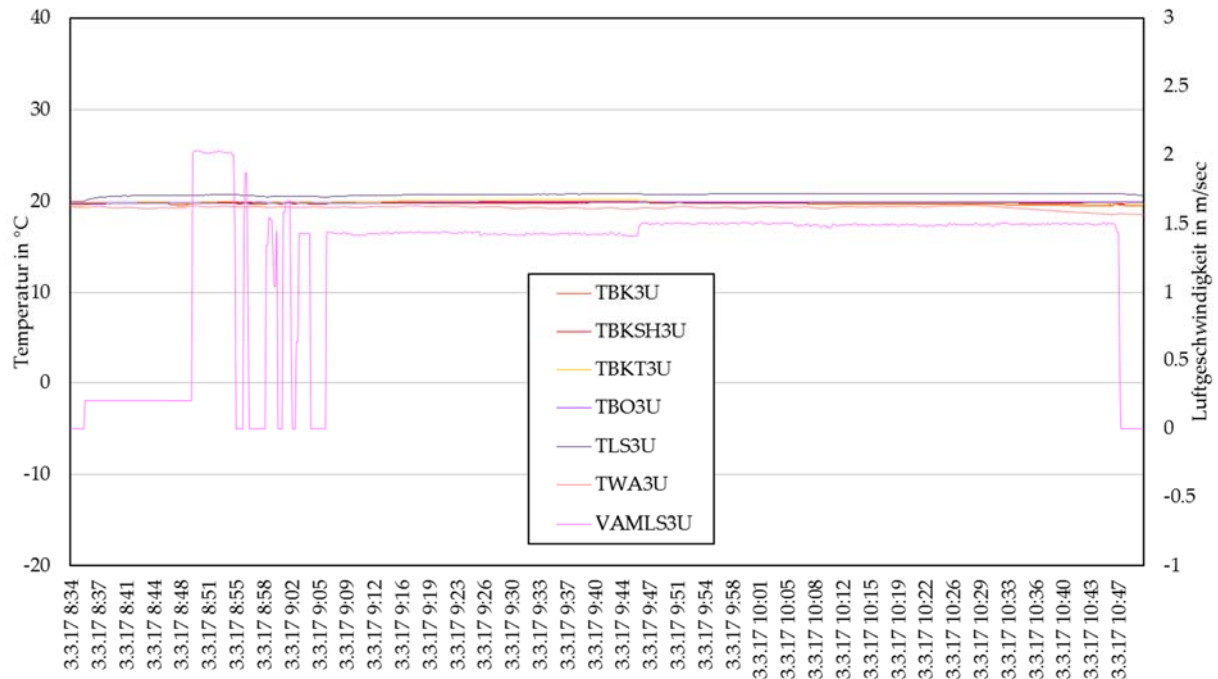


Abb. 147 Temperaturen an unterschiedlichen Positionen um den Balkenkopf herum und Luftgeschwindigkeit bei geöffnetem Riss für den unteren Balkenkopf in Feld 3 (Mineraldämmplatte) für eine Testphase im März 2017 mit Unterdruck auf der Warmseite.

Es ergibt sich aus diesen Messungen die Erkenntnis, dass Forschungsbedarf für einen solchen Versuchsaufbau mit aufgeprägten Druckdifferenzen besteht. Für den existierenden Prüfkammeraufbau bestehen zu viele Unsicherheitsfaktoren, da bspw. keine vollständig luftdichten Kammern ausgeführt wurden. Zudem müsste kammerseitig und nicht lokal (wie im durchgeführten Test) der Über- bzw. Unterdruck aufgeprägt werden können.

1.3.4.6 Zusammenfassung und Ausblick Messdatenauswertung

Die Messungen am Holzbalkenkopfprüfstand ergaben wichtige Erkenntnisse zum hygrothermischen Verhalten der unterschiedlichen Dämmsysteme PUR-Hybridplatte, Kalziumsilikatplatte und Mineraldämmplatte sowie zum Verhalten der unterschiedlich abgedichteten Balkenkopftaschen und dem damit verbundenen Risiko für einen Holzfeuchteanstieg im Balkenkopf selbst. Die vergleichenden Betrachtungen erfolgten für drei ausgewählte Prüfphasen, in welchen kontrollierte Klimarandbedingungen auf der Warm- und Kaltseite der Prüfwand angesetzt wurden.

Aus dem Vergleich der Dämmsysteme ließ sich sehr gut der Einfluss der Materialcharakteristik auf das thermische Verhalten sowie das Be- und Entfeuchtungsverhalten der Wände erkennen. So zeigten die instationären U-Werte einen recht geringen Einfluss vom Wassergehalt der Dämmstoffe, da die Dämmsysteme und das Mauerwerk größtenteils mittlere Luftfeuchten aufwiesen. Allerdings ist ein erheblicher Anteil der geringen instationären U-Werte auch auf die höheren Übergangswiderstände an der Oberfläche der Warm- und Kaltseite der Prüfkammer zurückzuführen (kein Wind, reduzierte Abstrahlung). Darüber hinaus zeigte sich ein stark unterschiedliches thermisches Dämpfungsvermögen, welches klar auf die verschiedenen Dichten bzw. Wärmespeicherkapazitäten der Dämmsysteme zurückzuführen ist. Insgesamt lässt sich schlussfolgern, dass das Dämmsystem der PUR-Hybridplatte eine sehr gute Dämmwirkung zeigt, andererseits sehr geringes thermisches Dämpfungsvermögen und stark verzögernd auf den Austrocknungsvorgang der Einbaufeuchte (Ausgleichsputz, Klebemörtel) wirkt, da sowohl die Flüssig- als auch die Dampfleitfähigkeit gering sind. Demgegenüber handelt es sich bei der Kalziumsilikatplatte um einen Dämmstoff mit moderater Dämmwirkung, relativ hohem thermischem und hygrichem Pufferverhalten sowie einem sehr günstigen Austrocknungsverhalten für die Einbaufeuchte, da sowohl Flüssigwasser- als auch Dampfleitfähigkeit relativ hoch sind. Die Mineraldämmplatte weist eine gute Dämmwirkung auf und ermöglicht eine moderate Austrocknung der Konstruktion über Dampfdiffusion. Auch das Pufferverhalten dieses Baustoffes ist moderat.

Im Vergleich der unterschiedlich abgedichteten Holzbalkenköpfe ist eine Auswirkung auf das Temperaturniveau und das Feuchteniveau zu erkennen, ebenso auf die Sensitivität gegenüber Raumklimaschwankungen und länger anhaltenden Kälteperioden. So zeigt der offene Holzbalken (keine Abdichtungsmaßnahmen) eine starke Empfindlichkeit gegenüber längeren Kälteperioden und hohen Werten der Warmseiten-Raumluchtfeuchte in Form eines rapiden Anstiegs der Holzfeuchte. Im Gegensatz dazu allerdings auch eine starke Reduktion der Holzfeuchte während warmen Phasen und Phasen mit geringer Raumluchtfeuchte auf der Warmseite. Die übrigen Abdichtungsvarianten lassen ein ähnliches Verhalten bezüglich des Temperatur- und Feuchteanstiegs infolge der gewählten Szenarien erkennen. Das absolute Feuchteniveau des Prüffeldes mit PUR-Hybridplatten sticht heraus, was auf den frühen Einbau des Dämmsystems und das verminderte Austrocknungsverhalten zurückzuführen ist.

Für die Praxis ergibt sich daraus die Empfehlung, das Balkenaufleger moderat abzudichten, wenngleich dichte Varianten wie zwei vorkomprimierte Dichtungsbänder oder Putzanschlussklebebänder nicht notwendig sind, ein „konvektionshemmender“ Anschluss

[48] genügt. Einschränkend muss erwähnt werden, dass die reale Belastung von Fassaden insbesondere durch eindringenden Schlagregen, höher sein kann. Die hier untersuchten Fälle beziehen sich auf Wände mit geringer Schlagregenbeanspruchung oder mit ausreichendem Schlagregenschutz. Für Holzbalken in Gebäuden ist eine weniger exponierte Einbausituation gegeben, da zumindest oberseitig ein Fußbodenaufbau vorhanden ist, in der Regel auch eine Deckenverkleidung.

In einigen Punkten besteht jedoch auch hier noch ein Handlungs- bzw. Forschungsbedarf, z.B. die Bereitstellung allgemein verbindlicher Schlagregendaten. Zudem sind insbesondere bei Schlagregeneinwirkung auch die Eigenschaften der äußeren Baustoffschichten im Falle einer Hydrophobierung oder anderweitigen Oberflächenbehandlung adäquat zu berücksichtigen.

Der Rahmen des vorliegenden Projektes ist für eine allumfassende Betrachtung dieser Faktoren nicht ausreichend. Aus diesem Grund wurde das Projekt dafür genutzt, internationale Kooperationen mit anderen Forschungseinrichtungen zu initiieren. Hierbei sind vor allem die neun Partner im europäischen Forschungsprojekt *RIBuild* zu nennen. In diesem Projekt sollen die erwähnten Forschungsfelder und zusätzliche Themen (Lebenszyklusbetrachtung, weitere Dämmstoffe und Basiskonstruktionen u.a.) unter der Verwendung der in diesem Projekt gewonnenen Messdaten und Erkenntnisse bearbeitet werden.

1.4 Erweiterung des hygrothermischen Simulationsmodells

Die grundlegenden Überlegungen für die Erweiterung der Berechnungsroutinen der Software DELPHIN sowie deren Implementierung werden im Folgenden diskutiert. Hierzu zählen die Berücksichtigung des anisotropen Materialverhaltens von Holz, die Berücksichtigung von Luftströmungen sowie die Erweiterung des hygrothermischen Modells auf dreidimensionale Problemstellungen. Abschließend erfolgt eine Gegenüberstellung der Berechnungsergebnisse mit den in Abschnitt 1.3.4 ausgewerteten Messdaten.

1.4.1 Hintergrund und Stand der Entwicklung zu Projektbeginn

Die Simulationssoftware DELPHIN ist das Ergebnis langjähriger Forschungs- und Entwicklungsarbeit am Institut für Bauklimatik der TU Dresden. Im Kern ist die Software ein Wärme- und Feuchtetransportmodell, zwischenzeitlich erweitert um Salz- und Schadstofftransport. Die Entwicklung geht bis auf die Diplomarbeit von Prof. J. Grunewald und der Software DIM 1 aus dem Jahr 1991 zurück. Seit diesem ersten eindimensionalen Transportmodell erfolgte eine Erweiterung auf 2D-Geometrien in DIM 2. Es folgte die Software DIM 3, welche wie die Vorgängerversionen ausschließlich aus einem Rechenkern bestand. In den Jahren 1999 bis 2001 wurde eine Programmoberfläche für die Benutzer-Dateneingabe (DELPHIN Preprozessing) und eine Ergebnisauswertung geschrieben (PostProc). Diese Kombination aus drei Softwareprogrammen resultierte dann in der Veröffentlichung der Software DELPHIN (DELPHIN 4).

2003 sollte das bestehende DELPHIN-Modell um eine grundlegend neue Art der Salztransportmodellierung erweitert werden. Zu diesem Zeitpunkt war die Implementierung der Software an einem Punkt angekommen, bei dem fundamentale Neuerungen sowohl das Datenmodell und Algorithmen betreffend, wie auch Oberflächenerweiterungen nur noch aufwändig möglich waren. Daher begann 2003 im Rahmen der Doktorarbeit von A. Nicolai eine grundlegende Neuentwicklung des Datenmodells, Rechenkerns und zuletzt der Programmoberfläche unter Verwendung des noch neuen C++ Standards und der Borland VCL Bibliothek. Diese Software wurde und wird kontinuierlich weiterentwickelt und DELPHIN 5 entspricht aktuell immer noch dem Stand der Technik als eines der fortschrittlichsten Wärme- und Feuchtetransportmodelle der Welt.

Während der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten im „Dynamisches Raummodell“-Projekt wurde am IBK eine neue Solverarchitektur für große dynamische Bilanzgleichungssysteme entwickelt. Diese wird in allen seither entwickelten Simulationsprogrammen des IBK, d.h. THERAKLES (Raummodell/Gebäudesimulation), HAJAWEE (detailliertes Raummodell) und NANRAD (Mehrzonen-Gebäudeenergiesimulation) verwendet. Damit das Transportmodell DELPHIN von den technischen Möglichkeiten der neuen Plattform profitieren kann, vor allem von dem deutlich beschleunigten numerischen Rechenverfahren, wurde 2010 mit der Portierung der physikalischen Gleichungen in das neue „semi-generische Simulationsframework für Transportprozesse in porösen Medien“ begonnen. Zu Beginn dieses Forschungsprojektes war die Portierung noch nicht abgeschlossen und die

Funktionalität des numerischen Rechenkerns begrenzt auf den Stand der DELPHIN 5 Software, wie nachfolgend beschrieben.

1.4.2 Physikalisches Modell

1.4.2.1 Überblick

DELPHIN beinhaltet ein umfangreiches physikalisches Modell zur Beschreibung von Wärme-, Feuchte- und Stofftransportprozessen in porösen Medien. Die Grundlage bilden dynamische Massen- und Energieerhaltungsgleichungen. Dazu wird das mikroskopisch inhomogene Material zunächst als homogenes Material aufgefasst, welches bei typischen Baumaterialien eine sinnvolle Vereinfachung darstellt. In diesem Material werden nun raum aufgelöst Energiedichten und Feuchtemassendichten bilanziert. Die im Material gespeicherte Energie und Feuchtemasse kann sich durch Transportprozesse, wie z.B. Wärmeleitung, Dampfdiffusion und kapillarem Flüssigwassertransport ändern. Die konkreten Gleichungen, welche Speicherung und Transportprozesse beschreiben, zeichnen das physikalische Transportmodell aus.

1.4.2.2 Wärme- und Feuchtespeicherung

Ein Material speichert Wärme sowohl in der trockenen Feststoffmatrix, als auch im Wasser und Gas des Porenraumes. Vor allem bei hochporösen Baustoffen ist die im Wasser gespeicherte Wärmemenge signifikant. Eine Erhöhung der inneren Energie eines Materials geht mit einer Temperaturerhöhung einher. Beide Einflüsse werden durch die Wärmespeicherfunktion ausgedrückt, dem Zusammenhang zwischen gespeicherter innerer Energie, Temperatur und Feuchtemasse im Material.

Im Porenraum des porösen Materials können sich Gase und Flüssigkeiten befinden. Dabei stehen die Gaseigenschaften, z.B. Dampfdichte, im Gleichgewicht mit Oberflächeneigenschaften der Flüssigkeit. Eine Besonderheit im porösen Material ist die Ausprägung von gekrümmten Flüssigwasseroberflächen in kapillaren Poren. Diese porengrößenabhängige Krümmung führt zu einer Veränderung des Gleichgewichts zwischen Kondensation von Wasserdampf in der Flüssigkeit und Verdunstung. Bei größeren Kapillarkräften und damit größeren Krümmungen wird das Verdunsten erschwert und die Luftfeuchtigkeit über der Flüssigkeit sinkt. Dieses ist im Labor dadurch beobachtbar, dass ein Material in Abhängigkeit von der Umgebungsluftfeuchte nur eine begrenzte Menge Feuchte aus der Umgebungsluft aufnimmt und speichert (Desikkatorversuch [65]). Wird eine solche Messung für mehrere Luftfeuchten durchgeführt, ergibt dies einen Zusammenhang zwischen relativer Luftfeuchte und gespeicherter Feuchte, die Sorptionsisotherme (Abb. 148, links). Das Messverfahren ist in der aktuellen Fassung der WTA Richtlinie 4-11 [67] detailliert beschrieben.

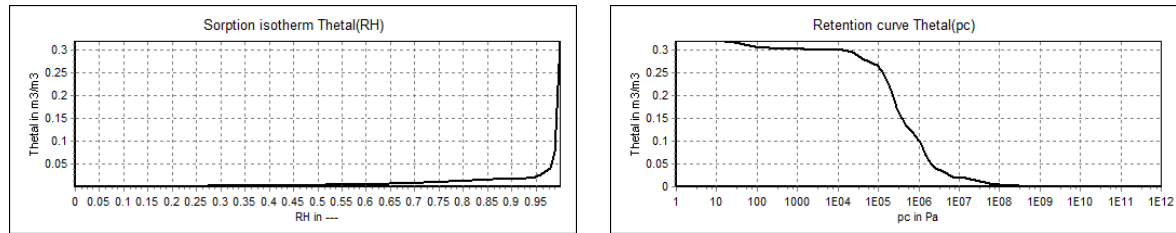


Abb. 148 Sorptionsisotherme/Feuchtespeicherfunktion.

Bei relativen Luftfeuchtigkeiten über 95 % wird der Porenraum zunehmend durch Kapillarkondensat gefüllt. Dieses markiert den Beginn des überhygrothermischen Feuchtebereichs, in welchem der größte Teil der Feuchte im Material gespeichert wird. Deshalb ist es für ein genaues physikalisches Modell wichtig, diesen Bereich insbesondere zu beschreiben. Im DELPHIN-Modell wird dafür die Feuchtespeicherfunktion verwendet. Diese beschreibt den Zusammenhang zwischen gespeicherter Feuchtemasse und Kapillardruck. Letzterer lässt sich nicht direkt messen, aber durch einen von außen aufgeprägten Überdruck erzwingen. Im bauphysikalischen Labor des IBK wird in einer Druckplattenapparatur ein feuchtegesättigtes Material einem erhöhten Luftdruck (stufenweise erhöht bis max. 1,5 MPa) ausgesetzt. Das Material ist einseitig auf einer feuchtedurchlässigen Keramik gelagert, wodurch das Wasser hinausgedrückt wird. Für jede Druckstufe stellt sich ein Feuchtegehalt im Material ein. Der Zusammenhang wird in der Feuchtespeicherfunktion abgebildet (Abb. 148, rechts).

Zusätzlich gibt es noch einen theoretischen Zusammenhang zwischen der relativen Luftfeuchte und der Kapillarkraft mittels der *Kelvin*-Gleichung, abgeleitet aus der Krümmung einer Wasseroberfläche in einer zylindrischen Kapillare und der entsprechenden Absenkung des Dampfdrucks. Damit lassen sich relative Luftfeuchte und Kapillardruck ineinander umrechnen.

Für die geschlossene Darstellung der Feuchtespeicherfunktion gibt es verschiedene mathematische Ansätze, wobei in DELPHIN eine mehrmodale integrale *GAUSS*'sche-Verteilungsfunktion verwendet wird. Für jedes Material müssen die Gleichgewichtsfeuchten im Labor bestimmt und die Parameter der Feuchtefunktion kalibriert werden.

1.4.2.3 Wärme-/Energietransport

Wärme bzw. Energie wird in porösen Medien durch verschiedene Mechanismen transportiert. Wärmeleitung ist der maßgebende Mechanismus. Ein Temperaturgradient erzeugt einen Wärmestrom, dessen Größe von der Wärmeleitfähigkeit des Materials abhängt. Bei zunehmendem Feuchtegehalt erhöht sich diese; ein Zusammenhang, der in DELPHIN im Modell für die Wärmeleitfähigkeit abgebildet wird. Dieser Effekt ist auch wichtig, damit die Reduktion der Wärmedämmeigenschaften eines durchfeuchteten Dämmstoffes korrekt beschrieben werden kann.

In Hohlräumen, z.B. Hinterlüftungen, wird Wärme durch langwelligen Strahlungsaustausch übertragen. In DELPHIN ist hierzu ein *Boltzmann*'sches Strahlungsmodell implementiert.

Der letzte wichtige Transportmechanismus für Energie ist der konvektive Transport in einer fließenden Kapillarströmung bzw. Gastransport. Dabei wird die im strömenden Medium gespeicherte Energie räumlich transportiert und entsprechend in den Bilanzgleichungen berücksichtigt. Wichtig ist hierbei die Berücksichtigung der Verdunstungsenthalpie, welche zu signifikant erhöhtem Energietransport bei strömendem Dampf im Vergleich zu strömendem Wasser führt. Die korrekte Abbildung dieses Effekts ist notwendig, damit Verdunstungskühlung und Kondensationswärme abgebildet werden können.

1.4.2.4 Feuchtetransport

Dampfdiffusion wird von Unterschieden im Wasserdampfpartialdruck hervorgerufen. Der Dampfdruck erhöht sich bei steigender Temperatur und bei steigender absoluter Dampfdichte und ist somit geeignet, beide konkurrierenden Einflussfaktoren gleichermaßen abzubilden. Das Verhältnis zwischen Dampfdiffusionsgradient und Dampfmassenstrom wird durch die material- und feuchteabhängige Dampfleitfähigkeit beschrieben. Im porösen Medium ist der Dampfdiffusionsweg durch die Porenstruktur verlängert, ausgedrückt durch die Tortuosität bzw. Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl. Zusätzlich geht in die Dampfleitfähigkeit noch eine Feuchteabhängigkeit ein, welche durch die Veränderung des Porenraums durch lokal kondensiertes Wasser bedingt ist. Ausgehend vom trocknen Material nimmt die Dampfleitfähigkeit zunächst zu. Im Labor wird dieses in zwei Versuchen gemessen, dem Dry-Cup und Wet-Cup Test ([65]). Bei weiterer Kapillarkondensation reduziert sich der für die Dampfdiffusion zur Verfügung stehende Porenquerschnitt zunehmend und die Dampfleitfähigkeit verringert sich bis auf 0, wenn das Material feuchtegesättigt ist (Abb. 149, links).

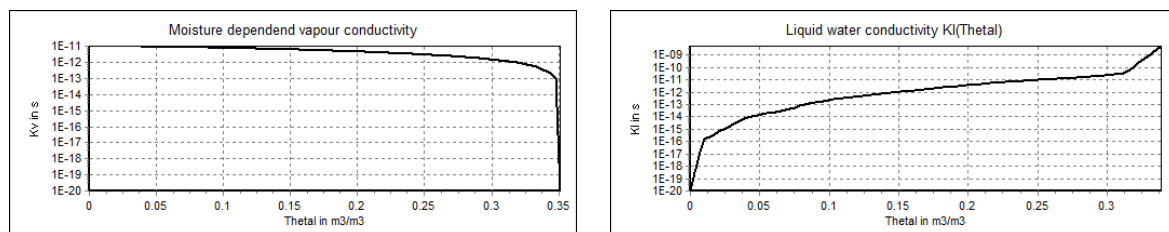


Abb. 149 Dampfleitfähigkeit und Flüssigwasserleitfähigkeit.

Der zweite wichtige Transportmechanismus ist der kapillare Flüssigwassertransport. Ein poröses Material wird im feuchtegesättigten oder nahezu gesättigten Zustand bei Anliegen eines äußeren (hydrostatischen) Drucks durchströmt. Dabei handelt es sich um eine laminare *Darcy*-Strömung, angetrieben vom Druckgradient durch das Material. Größere Porengrößenbereiche haben einen geringeren Strömungswiderstand als kleinere Porengrößenbereiche. Modellhaft kann das durch parallele Durchströmung von kleinen bis großen Röhren abgebildet werden. Bei nur teilweise gesättigten Materialien wird angenommen, dass die kleineren Röhren sich zuerst mit Wasser füllen und entsprechend den Strömungswiderstand bestimmen. Mit zunehmendem Feuchtegehalt stehen mehr und mehr Röhren zur Verfügung und der Durchströmungswiderstand sinkt, bzw. die Kapillarleitfähigkeit nimmt zu (Abb. 149, rechts).

Die Messung und Kalibrierung der Feuchtespeicher- und Transportfunktionen ist ein mehrstufiger, nicht-trivialer Prozess. Der Artikel von Grunewald & Häupl [68] beschreibt im Detail die oben angesprochenen Prozesse, Gleichungen und Zusammenhänge sowie die Parametrierung durch Laborexperimente.

1.4.2.5 Numerisches Lösungsverfahren – Raumdiskretisierung und physikalische Modellauswertung

Die Lösung der dynamischen gekoppelten Bilanzgleichung ist aufgrund der gegebenen Komplexität und Randbedingungen (u.a. nutzerdefiniertes Klima) generell nur mittels numerischer Integration möglich. Das System von Bilanzgleichungen ist hierbei ein System von partiellen Differentialgleichungen, konkret den Erhaltungsgleichungen für Energie- und Masse. Der erste Schritt zur Lösung ist die Transformation dieser Erhaltungsgleichungen in ein System gewöhnlicher Differentialgleichungen (ausschließlich mit Zeitableitung) durch ein Raumdiskretisierungsverfahren. In DELPHIN wird hierbei die Finite-Volumen-Methode (FVM) verwendet, welche folgende Vorteile bietet:

- Massen- und Energieströme lassen sich exakt bilanzieren, d.h. die Wärme-/Feuchtemenge, welche von einem Element in das Nachbarelement fließt wird nur einmal berechnet und in der Bilanz des einen Elements abgezogen und der Bilanz des Nachbarelements hinzugefügt. Dieses garantiert Energie- und Massenerhaltung.
- Unstetigkeiten, z.B. an Materialschichtgrenzen oder durch Transportwiderstände (z.B. durch Folien) lassen sich sauber abbilden.
- Die Bestimmung von Flussgrößen, Quellen und Senken erfolgt weitgehend analog zur physikalischen Modellierung, welches das Verständnis von Quelltext erleichtert.

Im Vergleich zur Finite-Elemente-Methode (FEM) sind das klare Vorteile, da die FEM sehr unflexibel ist und grundsätzlich stetige Funktionsansätze verlangt. Weiterhin ist die FEM primär für diffusionsdominierte Probleme geeignet. In der Bauteilsimulation müssen jedoch durch Kapillartransport und Luftströmung starke Konvektionsterme abgebildet werden.

Zur Anwendung der Finite-Volumen-Methode wird ein Berechnungsgitter benötigt. In DELPHIN wird ein Rechteck-Raster verwendet, d.h. es werden Quader als Volumenelemente verwendet. Die Gesamtgeometrie ist jedoch nicht auf Rechtecke beschränkt, sodass komplexe Konstruktionsdetails, wie Fensteranschlüsse, Wandeinbindungen etc. modelliert werden können.

In jedem Volumenelement werden die Erhaltungsgrößen bilanziert, d.h. die Energie- und Feuchtemassendichte. Die Erhaltungsgrößen aller Volumenelemente werden nun in einem Vektor y zusammengefasst. Die Berechnung der Zeitableitung, d.h. Änderungsraten der Erhaltungsgrößen, ist der physikalische Kernbestandteil des Simulationsprogramms.

Im Berechnungsschema des physikalischen Modells sind nun vier Schritte notwendig:

- Berechnung aller abgeleiteten Zustandsgrößen, wie Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit, Kapillardruck, Wasserdampfpartialdruck, etc. sowie Transportkoeffizienten, wie Wärmeleitfähigkeit, Dampfdiffusionskoeffizient und Kapillarleitfähigkeit. Diese Berechnungen müssen in jedem Volumenelement erfolgen.
- Berechnung der Wärme- und Feuchteströme zwischen Elementen und an Rändern der Geometrie (Randbedingungen). Diese Berechnung muss für alle elementbegrenzenden Seiten durchgeführt werden.
- Berechnung aller Quellen- und Senken in allen Berechnungselementen.
- Bestimmung der Änderungsrate (Divergenz) der Erhaltungsgrößen in jedem Element. Hierbei wird in jedem Element die Summe der ein- und ausströmenden Flüsse gebildet und mit Quellen und Senken (Wärme- und Feuchteproduktionsraten) addiert. Bezogen auf das Elementvolumen ergeben sich die Änderungsraten der Wärme- und Feuchtemassendichten.

Die Implementierung dieses Algorithmus verwendet das DELPHIN-Datenmodell, einschließlich zahlreicher Bibliotheken zur Materialmodellierung, Klimaberechnung, physikalischer Grundlagenformeln etc. Teil des Datenmodells ist die Verknüpfung von Elementstrukturen mit verbindenden Seiten, die Nummerierung der Elemente und Seiten und Verwaltung aller für den Datenzugriff notwendigen Speicherstrukturen. Die Initialisierung dieses Teils des Simulationsprogramms nimmt fast 60 % des Programmquelltextes ein und ist unabdingbar für einen effizienten Datenzugriff während der Simulationszeit.

1.4.2.6 Numerisches Lösungsverfahren – Zeitintegration

Durch Auswertung des physikalischen Modells wird für jede Bilanzgröße eine Zeitableitung berechnet. Das mathematische Problem kann nun als abstrakte Anfangswertaufgabe formuliert werden:

$$\frac{df}{dy} = f(t, y)$$

wobei $f(t,y)$ das physikalische Modell beschreibt, t die Zeit ist und y der Vektor der Erhaltungsgleichungen. Für dieses grundlegende Problem gibt es viele numerische Integrationsansätze und Implementierungen. Speziell bei der hygrothermischen Simulation entsteht aufgrund starker Kopplungen zwischen Energie- und Feuchtemassenbilanzgleichungen und durch Fernwirkungen ein steifes System von Differentialgleichungen. Fernwirkungen, d.h. starke Kopplungen zwischen vielen und zum Teil weit entfernten Elementen, treten z.B. durch sehr leitfähige Materialien, wie Stahl/Aluminium oder durch Luftströmungen auf.

Die Zeitintegration steifer Gleichungssysteme bedingt den Einsatz von impliziten Integrationsverfahren. Bei diesen wird ein Gleichungssystem aufgestellt und gelöst, wobei alle Unbekannten (d.h. Erhaltungsgrößen), gleichzeitig bestimmt werden. Der Einfluss einer

einzelnen Einflussgröße kann sich also je nach Kopplungsstärke auf alle Ergebnisgrößen auswirken.

Das Gleichungssystem, welches bei hygrothermischen Transportproblemen entsteht, ist stark nichtlinear, unter anderem bedingt durch den Zusammenhang zwischen Feuchtegehalt und Kapillardruck, wobei letzterer über mehr als sechs Größenordnungen variiert. Für die Lösung von nichtlinearen Gleichungssystemen wird ein iteratives Verfahren verwendet, wobei sich das *Newton-Raphson* Verfahren aufgrund guter Konvergenzeigenschaften anbietet.

Abschließend nach der Lösung des nichtlinearen Gleichungssystems wird die Lösung noch einer Fehlerkontrolle unterzogen. Die erfolgreiche Konvergenz des *Newton*-Verfahrens ist hierbei nicht ausreichend. Die Begrenzung des lokalen Fehlers, d.h. des Fehlers in jedem einzelnen Integrationsschritt, bewirkt effektiv auch die Begrenzung des globalen Integrationsfehlers. Der Fehlertest basiert auf einer Taylorreihenentwicklung und verlangt, dass die neuen Erhaltungsgrößen (Energie- und Massedichten) zusammen mit den dazu passenden Zeitableitungen nicht unwesentlich von der Taylorreihenapproximation abweichen. Der Fehlerschätzer wird auch dafür verwendet, den Integrationszeitschritt anzupassen. Bei Überschreitung der Fehlertoleranz wird der Zeitschritt verkleinert und erneut gerechnet. Bei Erfolg wird der Zeitschritt stufenweise vergrößert.

Für die Fehlerprüfung und Zeitschrittadaption werden auch die Lösungen der vergangenen Integrationsschritte verwendet. Das in DELPHIN eingesetzte Verfahren ist daher ein zeitschrittvariables Mehrschrittverfahren.

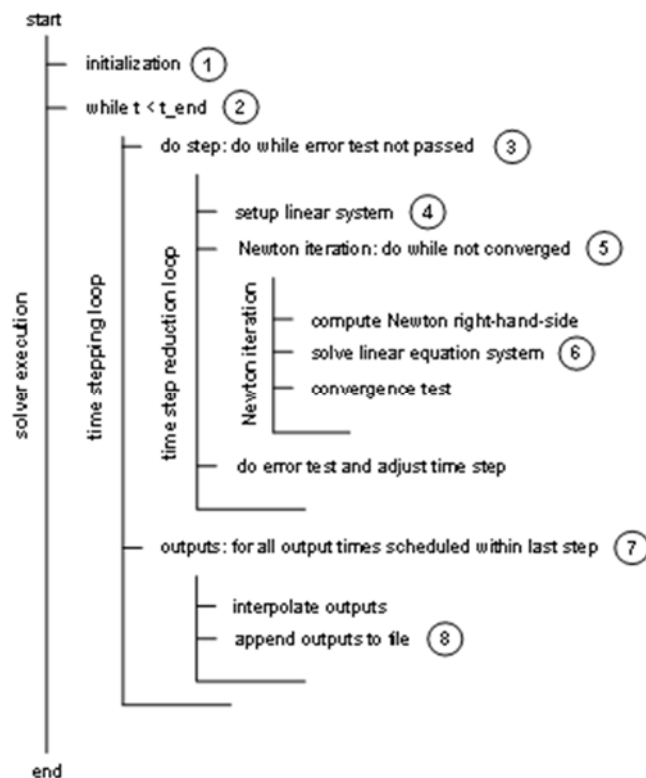


Abb. 150 Ablaufschema/Integrations- und Iterationsschleifen.

Abb. 150 zeigt die relevanten Schleifenkonstruktionen im Programm. Die Implementierung besteht, wie im Schema dargestellt, im Wesentlichen aus vier geschachtelten Schleifen mit den folgenden Bausteinen:

1. Initialisierung des Berechnungsmodells
2. Hauptschleife: führt Integrationsschritte aus bis Simulationsende erreicht ist
3. Fehlerkontrollschleife: wird solange durchlaufen bis Fehlerschranke unterschritten wird (in jedem invaliden Schleifendurchlauf wird der Zeitschritt reduziert)
4. Berechnung der *Jacobi*-Matrix: allerdings nur bei Konvergenzfehlern oder starken Zeitschrittänderungen; zumeist bleibt die *Jacobi*-Matrix für mehrere Schritte bestehen
5. *Newton*-Iterationsschleife: wird solange durchlaufen bis das Verfahren konvergiert oder abbricht
6. Lösen des linearen Gleichungssystems
7. Alle im letzten Zeitschritt geplanten Ausgaben bearbeiten (Integrationsschritte sind nicht an Ausgabezeitschritte gekoppelt)
8. Anhängen der berechneten Ergebnisse an die Ausgabedateien (Ergebnisdaten werden nicht im Speicher gehalten)

Um eine akzeptable Simulationsgeschwindigkeit bei 2D-Geometrien zu erhalten, wird ein modifiziertes *Newton*-Verfahren eingesetzt, bei dem die *Jacobi*-Matrix so selten wie möglich aktualisiert wird (Punkt 4). Jede *Jacobi*-Matrix Aktualisierung bedingt auch eine LU-Faktorisierung der Matrix und ist somit der zeitkritische Teil der Simulationsausführung.

1.4.2.7 DELPHIN 6 Technologieentwicklung

Voraussetzung für die Modellerweiterungen innerhalb dieses Forschungsvorhabens war der Wechsel auf die neue Simulationsplattform DELPHIN 6. Diese projektübergreifende und maßgeblich durch Eigenleistung des IBK getriebene Technologieentwicklung erfolgte parallel zur Arbeit im Holzbalkenkopfprojekt. Die modulare Softwarearchitektur des neuen Simulationskerns ermöglichte hierbei die zeitnahe Umsetzung der in diesem Forschungsprojekt geplanten Simulationsentwicklungsziele innerhalb der Projektlaufzeit. Mit der Technologie und Quelltextstruktur des Simulationskerns von DELPHIN 5 wären die geplanten Erweiterungen nicht umsetzbar gewesen bzw. hätten in Bezug auf Luftströmungsberechnungen und 3D-Geometrien inakzeptable Rechenzeiten gefordert. Im Folgenden werden die Erweiterungen zum DELPHIN 6-Basismodell beschrieben.

1.4.3 Erweiterung des hygrothermischen Modells zur Berücksichtigung von anisotropen Materialeigenschaften von Hölzern

Die anisotropen Eigenschaften von Hölzern wirken sich primär auf die Transporteigenschaften aus. Bei der makroskopischen Mittelung zur Bestimmung der Feuchtespeicherung bzw. dem Zusammenhang zur relativen Luftfeuchtigkeit in der Sorptionsisotherme braucht die Anisotropie hingegen nicht berücksichtigt zu werden.

Im oben beschriebenen physikalischen Berechnungsmodell muss also der Punkt der Berechnung von Wärme- und Feuchteströmen zwischen Volumenelementen erweitert

werden. Bei isotropen Materialien ergibt sich der Feuchtestrom zwischen zwei benachbarten Volumen aus dem Produkt aus Transportkoeffizient und Gradient, z.B. beim Flüssigwasserstrom:

$$j^w = K_l \cdot \nabla p_l$$

Bei anisotropen Materialien ist der Transportkoeffizient je nach Materialrichtung, d.h. in tangentialer, radialer, und longitudinaler Richtung unterschiedlich. Dafür werden die Materialtransportrichtungen u , v und w eingeführt. Je nach Lage des Materials im Koordinatensystem muss in Abhängigkeit der Transportrichtung ein anderer Transportkoeffizient verwendet werden. Wie oben beschrieben verwendet DELPHIN rechtwinklige Gitterlinien und berechnet Ströme ausschließlich entlang der x , y und z -Koordinatenrichtungen. Dadurch verlaufen Energie und Feuchteströme zwischen Elementen stets entlang der Koordinatenrichtungen. Entsprechend muss der entlang der Koordinatenrichtung geltende Transportkoeffizient verwendet werden. Abb. 151 zeigt bspw. die unterschiedliche Verwendung der Transportkoeffizienten für die u - und v -Richtung bei der Berechnung der Flüssigwasserstromdichte in x -Richtung eines unterschiedlich ausgerichteten Materials.

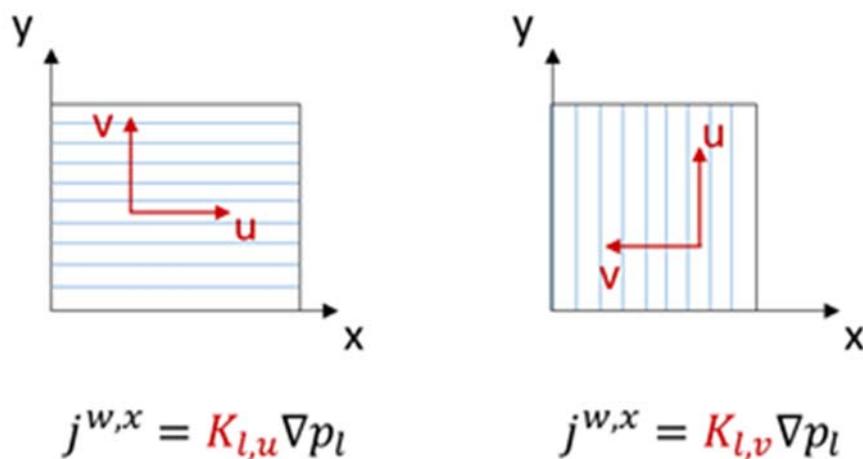


Abb. 151 Verwendung richtungsabhängiger Transportkoeffizienten bei unterschiedlich ausgerichteten Materialien.

Es ist zu berücksichtigen, dass Materialien innerhalb der modellierten Geometrie und des verwendeten Koordinatensystems beliebig orientiert sein können. Allgemein wird dieses über eine Rotationsmatrix berücksichtigt, welche auf den Tensor der Transporteigenschaften angewendet wird (Details der mathematischen Formulierung sind in [61] beschrieben).

D6MARLZ! 006.000

[IDENTIFICATION]

NAME	= EN: Spruce DE: Fichte
PRODUCER	= EN: TU Dresden
PRODUCT_ID	= EN: 01.08.2012
LABORATORY	= DE: IBK-Labor EN: IBK-Laboratory
DATE	= 14.10.2013
COLOUR	= #409020
FLAGS	= AIR_TIGHT
USE_INSTEAD	= 0
CATEGORY	= 8
U_DIRECTION	= radial
V_DIRECTION	= tangential
W_DIRECTION	= longitudinal

[STORAGE_BASE_PARAMETERS]

RHO	= 393.703 kg/m3
CE	= 1843 J/kgK
THETA_POR	= 0.737531 m3/m3
THETA_EFF	= 0.72809 m3/m3
THETA_CAP	= 0.65 m3/m3
THETA_80	= 0.0600701 m3/m3

[TRANSPORT_BASE_PARAMETERS]

LAMBDA	= 0.11175 W/mK
AW	= 0.0117595 kg/m2s05
MEW	= 186.075 -
KLEFF	= 1.81065e-10 s
LAMBDA_V	= 0.105583 W/mK
AW_V	= 0.00526733 kg/m2s05
MEW_V	= 487.724 -
KLEFF_V	= 9.22366e-10 s
LAMBDA_W	= 0.151167 W/mK
AW_W	= 0.012024 kg/m2s05
MEW_W	= 4.57501 -
KLEFF_W	= 2.00481e-10 s

Abb. 152 Auszug aus einer Materialdefinitionsdatei für ein 3D-anisotropes Material: Basisparameter.

Um anisotropes Materialverhalten in DELPHIN zu berücksichtigen, waren Erweiterungen in mehreren Bereichen nötig:

- Materialmodell und Datenbank: Dateiformat, Berechnungsfunktionalität
- Datenmodell: Erweiterung um die Möglichkeit der zusätzlichen Definition der Materialausrichtung
- Berechnungsalgorithmus: ausrichtungsspezifische Berechnung der Transportkoeffizienten entlang der Systemkoordinaten

Das Materialmodell speichert Parametrisierungsdaten in Materialdateien. Die bei der Kalibrierung des Materialmodells generierten Funktionen werden dabei als Datentabellen abgelegt und bei der Auswertung einer Funktion linear interpoliert. Jede Funktion wird dabei durch ein eindeutiges Schlüsselwort identifiziert. Bei der Erweiterung auf anisotrope Eigenschaften sind nun für jede richtungsabhängige Eigenschaft ein, zwei oder drei

Parameter oder Funktionen anzugeben. Je nach Datenverfügbarkeit kann ein Material also isotrop, in zwei (u, v) oder drei Richtungen (u, v, w) anisotrop parametrisiert werden.

Abb. 152 zeigt den Anfang einer in drei Richtungen parametrisierten Materialdatei (die Parameter der Richtungen v und w sind farblich hervorgehoben). Die Schlüsselwörter der anisotropen Parameter erhalten für die Richtungen v und w den Suffix `_v` bzw. `_w`. Parameter für die Materialrichtung u erhalten keinen Suffix, sodass für isotrope Materialien das bisherige Materialdateiformat unverändert weiterverwendet werden kann.

Für Materialfunktionen werden die jeweiligen Transportparametersektionen einer Richtung zugeordnet (Abb. 153). Die Schlüsselwörter für die Materialfunktionen innerhalb der Sektionen bleiben unverändert. Quelltextseitig erlaubt dies eine bessere Nachnutzung existierender Datenstrukturen.

Details zum erweiterten Datenformat sind im technischen Bericht [63] beschrieben.

```
[MOISTURE_TRANSPORT]
  FUNCTION          = lgKl(Theta_l)
    0.00101479      0.00101479      0.00101479 ...
    -20             -20             -20         ...
  FUNCTION          = lgKv(Theta_l)
    0               0.00368766      0.00737531 ...
    -11.9805        -11.9805        -11.9805    ...

[MOISTURE_TRANSPORT_V]
  FUNCTION          = lgKl(Theta_l)
    0.00101479      0.00101479      0.00101479 ...
    -20             -20             -20         ...
  FUNCTION          = lgKv(Theta_l)
    0               0.00368766      0.00737531 ...
    -12.3989        -12.3989        -12.3989    ...

[MOISTURE_TRANSPORT_W]
  FUNCTION          = lgKl(Theta_l)
    0.00101479      0.00101479      0.00101479 ...
    -20             -20             -20         ...
  FUNCTION          = lgKv(Theta_l)
    0               0.00368766      0.00737531 ...
    -10.3712        -10.3712        -10.3712    ...
```

Abb. 153 Auszug aus einer Materialdatei für ein 3D-anisotropes Material.

Innerhalb des DELPHIN-Datenmodells wird eine Konstruktion über Zuweisungen von Materialien zu einem Bereich von Elementen im Raster definiert. Abb. 154 zeigt die bisher verwendete Zuweisung.

```
<Assignment type="Material" location="Element">
  <Reference>Spruce (Holzbalken, 192) </Reference>
  <Range>0 0 0 22</Range>
</Assignment>
```

Abb. 154 Zuweisungsblock für isotrope Materialien.

Bei der Anordnung von anisotropen Materialien ist zusätzlich die Rotationsmatrix bzw. im Falle einer 90° Drehung eine Abbildung der Materialtransportrichtungen auf Systemkoordinaten anzugeben. Für letzteres ist eine Abbildungstabelle vorgegeben, welche für jeden Materialzuweisungsbereich die Materialtransportrichtungen abbildet. Z.B. bedeutet „UVU“, dass für die Systemkoordinate x die Parameter der Materialrichtung u verwendet werden, sowie analog $y = v$ und $z = u$. In diesem Fall handelt es sich also um ein Material mit nur zwei unterschiedlichen Richtungen (z.B. longitudinal, radial), und in z-Richtung sollen die Parameter der Materialrichtung u ebenfalls verwendet werden. Abb. 155 zeigt die beispielhafte Zuweisung mit der zusätzlichen Koordinatenzuordnung.

```
<Assignment type="Material" location="Element">
  <Reference> Spruce (Holzbalken, 192)</Reference>
  <Mapping>UVU</Mapping>
  <Range>0 0 39 39</Range>
</Assignment>
```

Abb. 155 Zuweisungsblock für anisotrope Materialien, unter Verwendung einer Koordinatenzuordnungsregel.

Bei beliebig gedrehten Materialien wird eine Transformationsmatrix angegeben (Vergl. Beispiel in [61]).

Die Koordinatenzuordnung wird in jedem Finite-Volumen-Element gespeichert und bei der Berechnung verwendet, um aus den Eigenschaften eines Materials die für die aktuelle Koordinatenrichtung geltende Transporteigenschaft zu beziehen. Dies erfolgt im einfachsten Fall über die Auswahl der passenden Richtung (wie oben beschrieben) und im Fall beliebig gedrehter Koordinaten über eine Matrixmultiplikation. Die Transformationsmatrix wird dabei recht komplex. Die durch trigonometrische Funktionen relativ langsame Berechnung der Matrix wird daher in den Initialisierungsteil des Solvers verschoben. Für jedes Element wird nun eine vorberechnete 3x3-Matrix abgelegt und auf jede Transportfunktion angewendet. Im Algorithmus bedeutet dies:

1. Berechnung der wärme- und feuchteabhängigen Transportfunktionen für alle Materialrichtungen
2. Anwendung der Transformationsmatrix und Speichern der transformierten Funktionen je Systemkoordinate
3. Flussberechnung erfolgt unter Zugriff auf vorabberechnete Transportfunktion

Auch hier ist das sinnvolle Vorberechnen und Ablegen von mehrfach verwendeten Variablen elementar für eine effiziente Simulation. Entsprechend anspruchsvoll ist die Definition und Verwaltung von Datenstrukturen, die einen schnellen Zugriff auf vorberechnete Parameter erlauben. Im Rahmen dieses Arbeitspaketes wurden daher verschiedene Implementierungsvarianten getestet und verglichen. Im Ergebnis wurde die Variante verwendet, bei der bereits bei der Berechnung der elementbasierten Zustandsgrößen alle Eigenschaften in Systemkoordinatenrichtung in jedem Element gespeichert sind. Bei der Berechnung der Ströme zwischen Elementen werden die vorberechneten Transportkoeffizienten nur noch volumengewichtet gemittelt und mit dem Gradienten des treibenden Potentials (z.B. Kapillardruckgradient oder Dampfdruckgradient) multipliziert.

1.4.4 Erweiterung des hygrothermischen Modells zur Berücksichtigung von Luftströmung

Luftbewegungen im Porenraum und in Hohlräumen unterliegen üblicherweise einer sehr viel schnelleren Dynamik als Feuchte- und Wärmeausgleichsprozesse. D.h. eine Änderung des Luftdrucks am Rand des Berechnungsgebiets führt typischerweise innerhalb von Sekunden bis Minuten zu einem neuen stationären Luftdruckfeld. Temperaturfelder benötigen bereits Stunden und Feuchtefelder benötigen Tage bis Monate, um einen neuen Gleichgewichtszustand zu erreichen. Bei den angestrebten Anwendungen der Bauteilsimulation ist es nicht von Interesse, die Dynamik des sich ändernden Luftdruckfeldes zu verfolgen. Vielmehr ist die Auswirkung der Luftströmung auf Temperatur- und Feuchteverteilung im Bauteil interessant.

Ausgehend von dieser Betrachtung wird während der dynamischen Wärme- und Feuchtesimulation lediglich ein ausreichend aktuelles Luftströmungsfeld benötigt. Dafür wird die Luftmassenbilanz als quasi-stationäre Differentialgleichung (ausschließlich Ortsableitung) behandelt. Konkret bedeutet dies, dass zu einem bestimmten Zeitpunkt das Strömungsfeld unter Verwendung der aktuellen Randbedingungen berechnet wird. Bei Berücksichtigung thermischer Auftriebsströmungen werden die aktuellen Elementtemperaturen zur Berechnung der Auftriebskräfte herangezogen. Die Berechnung des stationären Strömungsfelds erfolgt durch die Lösung eines linearen Gleichungssystems. Es wird im Modell grundsätzlich von laminarer Strömung ausgegangen und turbulente Verwirbelungen vernachlässigt. Wichtig für die Bauteilsimulation ist die Abschätzung der Strömungsgeschwindigkeit in der richtigen Größenordnung zur Bestimmung des konvektiven Wärme- und Feuchtetransports.

Für die Integration der Luftströmungsberechnung in das Simulationsprogramm waren wiederum zahlreiche Teilerweiterungen erforderlich:

- Datenmodellerweiterung, d.h. Definition von Druckrandbedingungen und Feldbedingungen (Referenzdruck)
- Materialmodell (Luftdurchlässigkeitsparameter)
- Berechnungsalgorithmus

Die Angabe von Randdrücken führt bei einem durchgehenden Luftströmungsweg zur Berechnung eines Druckabfalls entlang des Strömungsweges in Abhängigkeit der Luftdurchlässigkeiten der Materialien.

Bei Konstruktionsdetails mit nichtbelüfteten Hohlräumen ist eine Luftzirkulation durch Auftriebskräfte häufig ein wesentlicher Wärme- und Feuchtetransportmechanismus. Insbesondere bei abgedichteten Holzbalkenauflagern sollte der Einfluss einer solchen Luftzirkulation untersucht werden. Modellseitig wäre es daher möglich, einen Lufthohlraum umgeben von luftdichtem Material zu definieren. Die Elemente eines solchen Hohlraums hätten dann keine Verbindung zu einem Randdruck. Bei einer stationären Berechnung würden dann zwar die relativen Druckunterschiede zwischen Elementen Hohlraum berechenbar sein, jedoch ist das Gleichungssystem singulär, da der Bezugsdruck fehlt. In DELPHIN wurde deshalb die Möglichkeit integriert, über ein Quellen-/Senkenmodell in einem

einziges Element des Hohlraums einen Bezugsdruck festzulegen. Damit kann das Gleichungssystem gelöst und Strömungsgeschwindigkeiten berechnet werden.

Im Materialmodell wird derzeit ausschließlich eine konstante Luftdurchlässigkeit je Material unterstützt. Die Messung und Kalibrierung von Luftdurchlässigkeiten für viele unterschiedliche Materialien und Feuchtezustände war im Rahmen dieses Projektes nicht möglich. Daher wurden Luftdurchlässigkeiten für im Projekt verwendete Materialien aus der Literatur entnommen.

Für die Implementierung der Luftströmungsberechnung, bzw. den Zeitpunkt der Aktualisierung gibt es grundsätzlich drei Möglichkeiten:

1. Aktualisierung in jedem einzelnen *Newton*-Iterationsschritt (harte Kopplung, in Schleife 5 in Abb. 150)
2. Aktualisierung bei jedem neuen Versuch innerhalb der Fehlerkontrollschleife (bei Zeitpunktänderungen, in Schleife 3 in Abb. 150)
3. Aktualisierung nach jedem erfolgreich beendeten Simulationsschritt (schwache Kopplung, in Schleife 2 in Abb. 150)

Die Varianten unterscheiden sich hinsichtlich der Anzahl der zu berechnenden Strömungsfelder. Bei Variante 1 wird das Strömungsfeld extrem oft aktualisiert, welches die Simulationszeit drastisch reduziert. Dafür wird eine vollständig gekoppelte Lösung erreicht, welche mathematisch exakt im Rahmen der erlaubten Toleranzen ist.

Bei Variante 2 wird das Strömungsfeld immer dann aktualisiert, wenn sich der Zeitpunkt ändert, d.h. bei jedem neuen Integrationsschritt und bei jeder Zeitschrittreduktion aufgrund von Fehlertestüberschreitungen und Konvergenzfehlern. Für die Berechnung des Strömungsfeldes wird die geschätzte Lösung (Startlösung) für das *Newton*-Verfahren verwendet. Bei dieser Variante sind deutlich weniger Aktualisierungen notwendig. Jedoch kann das berechnete Strömungsfeld geringfügig vom korrekten Strömungsfeld abweichen und zwar immer dann, wenn sich die Temperatur- und Feuchteverteilung während der *Newton*-Iteration stark ändert. Dies passiert in der Regel eher selten, da ein großer Unterschied zwischen Schätzlösung zu Beginn des *Newton*-Verfahrens und korrigierter Konvergenzlösung auch immer ein Indikator für einen großen Integrationsfehler ist.

In Variante 3 wird das Strömungsfeld schließlich immer dann aktualisiert, wenn ein Integrationsschritt abgeschlossen wurde. Damit ist das Strömungsfeld dann zwar stimmig zur Temperatur- und Feuchteverteilung am Ende des Integrationsschritts, wurde aber nicht für die eigentliche Berechnung verwendet. Der Einfluss des Strömungsfeldes hinkt also immer einen Integrationsschritt hinterher. Bei starker Kopplung zwischen Strömungsfeldberechnung und Temperaturverteilung trägt dies den Charakter eines expliziten Integrationsschemas und führt zu einer instabilen Berechnung. Vorteilhafterweise werden Instabilitäten durch den Fehlertestmechanismus entdeckt und durch Reduktion des Integrationsschritts kompensiert. Dadurch werden aber sehr kleine Zeitschritte benötigt und die Berechnung wird trotz der geringeren Anzahl von Luftströmungsfeldberechnungen viel langsamer.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden alle drei Varianten implementiert und systematisch getestet. Für allgemeine Anwendungen hat sich Variante 2 als guter

Kompromiss zwischen Genauigkeit/Stabilität und Geschwindigkeit (Häufigkeit der Luftströmungsfeldberechnung) herausgestellt. Variante 1 ist bei extrem starker Kopplung (Konstruktionen mit Metallblechen, starken Temperaturgradienten und starken Auftriebsströmungen in vertikalen Hohlräumen) günstiger. Variante 3 ist bei Berechnungen ohne thermische Auftriebsströmung schneller.

Bei allen Varianten wurde auch untersucht, ob ein modifiziertes *Newton*-Verfahren die Berechnungsgeschwindigkeit steigern kann. Das lineare Gleichungssystem $A_p = b$ (p ist der Lösungsvektor der Luftdrücke in allen Elementen) wird dabei durch LU-Faktorisierung der Matrix A und nachfolgendes Rückwärtsauflösen berechnet. Gerade bei großen Geometrien mit vielen Volumenelementen ist diese LU-Faktorisierung des Luftströmungsgleichungssystems sehr zeitaufwändig. Auch wenn sich das Gleichungssystem nur geringfügig ändert, z.B. wenn sich in einem kleinen Teil der Geometrie die Luftbewegung verändert, muss die LU-Faktorisierung durchgeführt werden.

Alternativ dazu kann das Problem auch als Nullstellensuche formuliert werden: $F(p) = A_p - b = 0$ welches mit dem *Newton*-Verfahren gelöst wird. Die Koeffizientenmatrix des *Newton*-Verfahrens entspricht dabei der Matrix A . Ist die Matrix A aktuell, führt bereits der erste *Newton*-Schritt zum korrekten Ergebnis, der Aufwand ist also mit dem der direkten Lösung des Gleichungssystems vergleichbar. Nun kann die Matrix A in faktorisierte Form für mehrere Luftströmungsberechnungen verwendet werden. Dies spart jeweils den aufwendigen LU-Zerlegungsschritt. Allerdings kann die Matrix nun nicht mehr ganz aktuell sein und benötigt u.U. mehrere *Newton*-Schritte. Da jedoch je *Newton* Schritt nur die verhältnismäßig schnelle Rückwärtsauflösung verwendet werden muss, sind bei üblichen 2D-Geometrien selbst drei bis vier *Newton*-Iterationen noch deutlich schneller berechnet, als eine einzige LU-Faktorisierung durchgeführt.

Dieses Verfahren wurde in DELPHIN implementiert und führte wiederum zu einer drastischen Geschwindigkeitssteigerung bei entsprechenden Anwendungsfällen (2D, moderat bis komplexe Geometrie, starke Auftriebsströmungen).

Bei 3D-Berechnungen (Abschnitt 1.4.6) ist die Simulationsperformance noch nicht zufriedenstellend, da das Gleichungssystem zur Berechnung des Luftströmungsfelds weiterhin ausschließlich mittels direkter Lösungsverfahren (Bandmatrix) erfolgt. Für eine allgemeine Anwendung im Ingenieurbereich/Planungsprozess sind hier noch weitere Optimierungen notwendig.

1.4.5 Erweiterung des hygrothermischen Modells zur Berücksichtigung von dreidimensionalen Problemen

Die numerischen Algorithmen sind in der DELPHIN 5 Implementierung fest verankert, d.h. das Zeitintegrationsverfahren, Matrixform (Bandmatrix), Lösungsverfahren für lineare Gleichungssysteme innerhalb des *Newton*-Verfahrens (direktes Verfahren, LU-Faktorisierung mit Rückwärtsauflösung) sind im Programmquelltext festgeschrieben. Dies stellte sich bei der Erweiterung um die 3D-Berechnungsfunktionalität als starke Einschränkung heraus und konnte erst durch Verwendung der neuen IBK-Solverplattform umgangen werden. Diese

Solverplattform ist modular aufgebaut und enthält eine Vielzahl von Bibliotheken, die mehrere Simulationsprogramme gleichermaßen nutzen können. Abb. 156 zeigt einen Überblick über die einzelnen Module und die damit erstellten Simulationsprogramme am IBK.

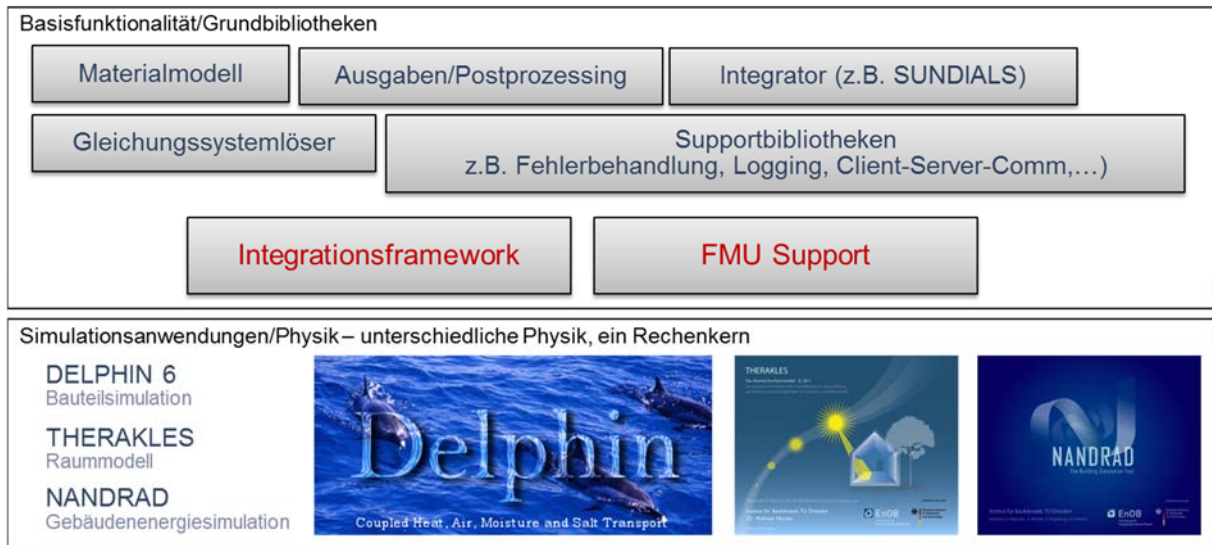


Abb. 156 Modulares Konzept der neuen IBK Simulationsplattform.

Aufbauend auf der neu entwickelten Plattform konnte die neue DELPHIN 6 Bauteilsimulationssoftware zunächst als Portierung der existierenden DELPHIN 5-Technologie umgesetzt werden. Die neue modulare Struktur erlaubt nun einen Austausch zentraler numerischer Algorithmen, wie z.B. dem linearen Gleichungssysteml ser innerhalb des *Newton*-Verfahrens.

Für die Erweiterung des DELPHIN 6-Modells auf 3D-Geometrien (anfänglich identisch mit dem 2D-Simulationsmodell von DELPHIN 5), wurden folgende Einzelanpassungen notwendig:

- Erweiterung des Datenmodells zur Verwendung von 3D-Gittern
- Erweiterung des Ausgabedatenformats und PostProcessing-Adapters auf 3D-Gitter
- Komplette Umstrukturierung des Initialisierungsprozederes (Speicheranforderung der Originalimplementierung zu groß)
- Erweiterung der Stromberechnung zwischen Elementen auf drei Koordinatenachsen
- Speicherzugriffsoptimierung während der Berechnung
- Einführung iterativer Löser für lineare Gleichungssysteme (*Krylow*-Unterraum-Methoden)
- Entwicklung und Implementierung geeigneter Matrixstrukturen und Vorkonditionierer für 3D-HAM-Simulationen (wesentliche Performanceoptimierung)

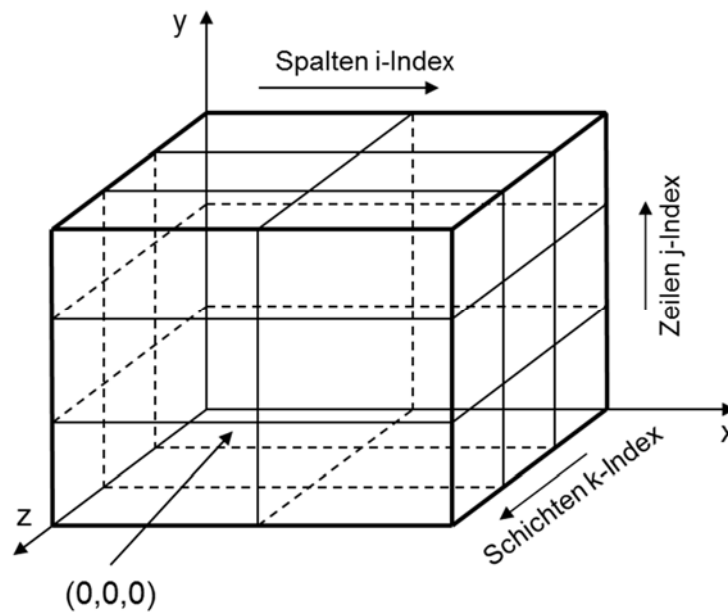


Abb. 157 Koordinaten und Indexdefinition im DELPHIN 6 Berechnungsraster.

Die Erweiterung des Datenmodells und der Ausgabedateien beschränkt sich auf die zusätzliche Definition der z-Koordinate bzw. ijk-Adressierung statt ij-Adressierung bei 2D-Rastern (Abb. 157). Das Format der neuen 3D-Ausgabedateien ist im Technischen Bericht [64] beschrieben. Bei Zuweisungen von Materialien, Randbedingungen, Ausgaben, etc. zum Simulationsraster wird der Bereich nun durch sechs statt vier Indices definiert (jeweils i,j,k Indices für Begrenzungselemente links, unten, hinten und rechts, oben, vorn; Beispiel in Abb. 158).

```
<Assignment type="Output" location="Element">
  <Reference>RH_A3</Reference>
  <Range>54 36 15 61 43 22</Range>
</Assignment>
```

Abb. 158 Zuweisungsblock erweitert um k-Index (z-Koordinate).

Bei der Erweiterung des Initialisierungsprozederes auf 3D-Koordinaten durch einfache Vergrößerung der 2D-Matrizen um die dritte Dimension ergab sich das Problem, dass bereits bei moderat komplexen Geometrien die Speichieranforderungen immens waren. Alle Elemente der Geometrie und deren Referenzierungsstrukturen konnten nicht gleichzeitig im Speicher gehalten werden. Daher musste die gesamte Initialisierung zerlegt und nach Koordinaten getrennt durchgeführt werden. Im neuen Algorithmus werden zunächst Zuweisungsmatrizen für die x-Koordinate erstellt und alle Referenzierungen aufgelöst. Nach Bearbeitung der x-Koordinate werden Zuweisungsmatrizen für diese Richtung aus dem Speicher entfernt und die Matrizen für die y-Richtung erstellt, usw.

Bei der Berechnung der Wärme- und Feuchteströme zwischen Elementen werden nun auch die Ströme in z-Richtung berechnet. Entsprechend musste bei der Berechnung der

Änderungsraten von Energie und Feuchtemassen die Bilanzierung um diese Stromrichtungen erweitert werden.

Die bei 3D-Simulationen gegenüber 2D-Simulationen massiv gestiegenen Speicheranforderungen erforderten ein teilweise drastisches Umstellen der Datenstrukturen. Z.B. wurden anfänglich alle Flussgrößen für innere und Randoberflächen in einem Vektor zusammengefasst. Bei typischen Flussgrößen für Randoberflächen (Wärmeleitung, Dampfdiffusionsstrom, Dampfdiffusionsenthalpie, direkte Solarstrahlung, diffuse Solarstrahlung, langwelliger Strahlungsaustausch, Schlagregenstrom, etc.) und den zwischen Elementen auftretenden Strömen ergaben sich mehr als 20 Stromgrößen (entsprechend je einer Double-Fließkommazahl) je Seite. Diese Größen werden komplett im Speicher abgelegt und zur Berechnungszeit angefordert. Das bringt zwei Probleme mit sich: zum einen ist der insgesamt benötigte Speicherbedarf sehr hoch und andererseits wird die CPU ausgebremst, da der Speicherdatentransfer sehr lange dauert. Durch den Umbau der Speicherstruktur konnte der Speicherbedarf um ca. ein Drittel gesenkt werden und die Kernschleifen deutlich beschleunigt werden.

Ungeachtet dieser Optimierung war das direkte Lösungsverfahren für die linearen Gleichungssysteme das größte Hindernis für 3D-Anwendungen. Der bei einer LU-Faktorisierung einer Bandmatrix benötigte Speicherbedarf und Rechenaufwand wächst linear mit der Bandbreite und quadratisch mit der Anzahl der Zeilen/Spalten der Matrix. Für 3D-Probleme gilt daher effektiv eine kubische Komplexität, wodurch sich ein direktes Lösungsverfahren für nicht-triviale Geometrien schlicht verbietet.

Als Alternative wurde ein iteratives Verfahren für das Lösen der linearen Gleichungssysteme implementiert, welches deutlich geringere Speicheranforderungen aufweist. Stand der Technik sind die sogenannten *Krylow*-Unterraum-Verfahren. Hygrothermische Probleme führen aufgrund von Konvektionstermen zu nicht-symmetrischen Matrizen (symmetrische Besetzung, asymmetrische Zahlenwerte). Grundidee der *Krylow*-Unterraum-Iterationsverfahren ist die Minimierung der Residuen, welche bei Einsetzen einer Schätzlösung im Gleichungssystem verbleiben. Bei den *Krylow*-Verfahren werden nun nach-und-nach zueinander orthogonale Vektoren bestimmt, d.h. alle Vektoren stehen senkrecht zueinander (das Skalarprodukt aller Vektoren zu allen anderen ist jeweils 0). Bei einer ausreichenden Anzahl von Vektoren lassen sich über ein einfaches kleines Gleichungssystem Faktoren bestimmen, die mit den Vektoren multipliziert, die annähernd korrekte Lösung ergeben. In der Implementierung sind viele Details zu beachten, die einen deutlichen Einfluss auf die Performance und Erfolg des Verfahrens haben. Allein die Integration des Verfahrens in das *Newton*-Verfahren und Anpassung der relevanten Konvergenztests nahm einen größeren Zeitraum in Anspruch.

Jedwedes iteratives Lösungsverfahren kann durch den Einsatz von Vorkonditionierern verbessert werden. Vereinfacht beschrieben soll das Gleichungssystem $Ax = b$ gelöst werden. Würde das Gleichungssystem linksseitig mit der inversen von A multipliziert werden, ergäbe dies sofort die Lösung $A^{-1}Ax = x = A^{-1}b$. Die Berechnung der *exakten* Inversen ist jedoch weder sinnvoll noch effizient möglich. Jedoch kann eine Approximation der Inversen $P \cong A^{-1}$ konstruiert werden und stattdessen auf das Gleichungssystem angewendet werden,

sodass das Iterationsverfahren ein viel einfacher zu lösendes Problem erhält. Eine solche Approximation P wird als Vorkonditionierer (engl. preconditioner) bezeichnet.

Für das HAM-Problem in DELPHIN wurde eine spezifische Matrix-Implementierung entwickelt, welche die spezielle Besetzungsstruktur, resultierend aus dem verwendeten Berechnungsraster, berücksichtigt. Dadurch wurde eine effiziente Lösung überhaupt erst möglich. Einige Details der Implementierung sind in [62] und [63] beschrieben, eine komplette Beschreibung wird in der Dissertation von S. Vogelsang enthalten sein.

1.4.6 Kalibrierung und Validierung des Modells

Obwohl es eine Vielzahl thermischer (z.B. DIN EN ISO 10211 und EN ISO 15026) und hygrothermischer Vergleichstests beziehungsweise Benchmarktests (HAMSTAD) gibt, existiert derzeit nur eine einfache (1D), hygrothermische analytische Lösung ([85], [86], [87]). Im Besonderen fehlen anisotrope und hygrothermische, zwei- und dreidimensionale, analytische Lösungen.

1.4.6.1 Entwicklung eines Benchmarktests für hygrothermische, dreidimensionale Simulationen

Infolge des Fehlens solcher analytischen Lösungen wurden Vergleichstests erarbeitet, um die Gültigkeit und Genauigkeit von numerischen Anwendungen zu überprüfen. Der experimentelle Aufbau, der so genannte Akademische-Holzbalkenkopf-Vergleichstest (Academic Joist End Benchmark – AJEB), gibt charakteristische Simulationen für anisotrope Testfälle vor. Diese wurden für die numerischen Tests von DELPHIN 6 durchgeführt, der neuesten Version der DELPHIN Software [61], ursprünglich [69]. Die Benchmarktests definieren Versuche, die es erlauben, die Interaktion von anisotropem Transport im hygroskopischen Bereich zu untersuchen.

Experimenteller Aufbau und Ablauf

Für den AJEB-Test wurde ein Holzbalken mit einer Querschnittsfläche von 0,1x0,1 m in einer Klimakammer mit den Anfangsbedingungen 20 °C und 50 % r.F. aufgebaut. Um eine gleichmäßig verteilte relative Luftfeuchte über den gesamten Balken zu Beginn des Tests sicherzustellen, wurde eine Anpassungsphase von einem Monat gewählt. Für die Untersuchung des dynamischen, hygrischen Verhaltens des Holzes wurde dann die relative Luftfeuchte in der Klimakammer innerhalb von zehn Minuten auf 90 % erhöht und für eine Dauer von 72 h gehalten. Anschließend erfolgte wieder eine Reduktion auf 50 %, um den Trocknungsprozess zu beobachten. Diese Luftfeuchte wurde bis zum Erreichen des quasi-stationären Zustands beibehalten. Die Temperatur betrug während der gesamten Untersuchung konstant 20 °C. Unter isobaren Bedingungen betrug die Zeitdauer für das gesamte Experiment ungefähr 50 Tage.

Um den Einfluss der einzelnen Materialtransportrichtungen genauer zu untersuchen, wurde der gesamte, oben beschriebene Auffeuchtungs- und Trocknungsprozess in vier Experimenten wiederholt, die in Abb. 159 zu sehen sind.

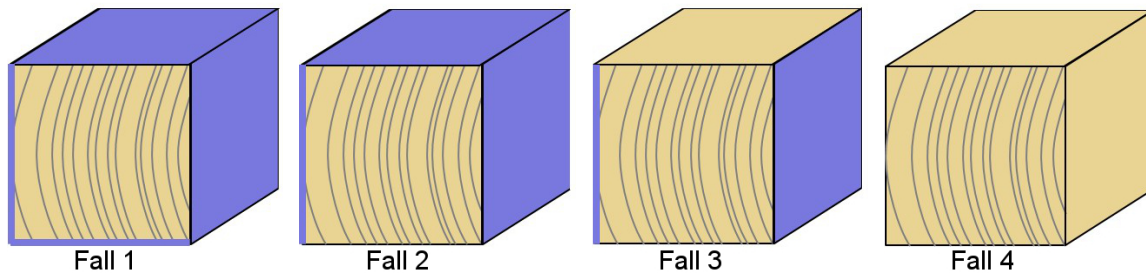


Abb. 159 Vier Testfälle des AJEB-Experiments (v.l.n.r.): 1. vier Seiten abgedichtet, 2. drei Seiten abgedichtet, 3. zwei Seiten abgedichtet, 4. keine Seite abgedichtet.

In allen Fällen ist die Frontseite des Stirnholzes dem Raumklima ausgesetzt, die entgegengesetzte Stirnholzseite ist mit dampfdichter Aluminiumfolie abgedichtet. Abb. 159 zeigt den Verlauf der Jahresringe der Holzproben der Experimente, welche auch in den Simulationen so abgebildet waren.

Fall 1: Longitudinaler Transport - vier Seiten sind mit dampfdichter Folie abgedeckt.

Fall 2: Longitudinaler und radial/tangentialer Transport - drei Seiten sind mit dampfdichter Folie abgedeckt.

Fall 3: Longitudinaler und radial/tangentialer Transport - zwei Seiten sind mit dampfdichter Folie abgedeckt.

Fall 4: Longitudinaler und radial/tangentialer Transport - keine Seite ist mit dampfdichter Folie abgedeckt.

Um den Einfluss struktureller Anomalien zu minimieren, wurde ein Balken mit sehr wenig Ästen und ohne sichtbare Risse für die Experimente ausgewählt.

Der Fall 1 repräsentiert eindimensionalen Transport im dreidimensionalen Raum und erzeugt eine Vergleichsbasis für die folgenden Testfälle. Die Fälle 2 bis 4 behandeln die Interaktion von schnellerem longitudinalem Transport mit langsamerem tangentialen Transport. Letztere Fälle zeigen die resultierenden, zusätzlichen Effekte aus der Wechselwirkung zweier langsamer Transportrichtungen mit longitudinalem Transport. Die genauen Positionen der Sensoren werden von den Verfassern als geeignet erachtet, wobei weitere Experimente mit TDR-Sensoren benötigt werden, um eine genauere Erfassung der Anfangsbedingungen für alle Experimente zu erzielen.

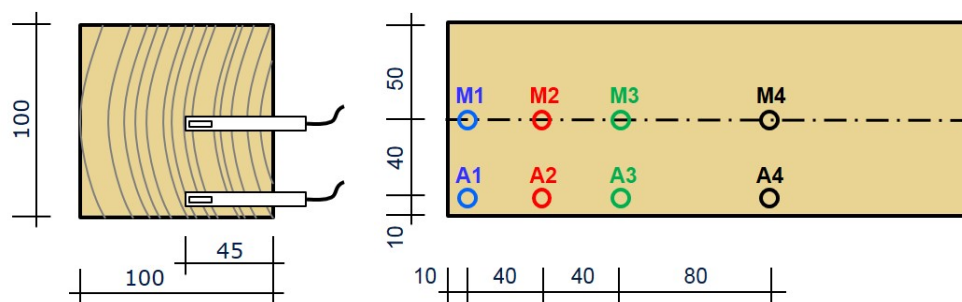


Abb. 160 Quer- und Längsschnitt durch den akademischen Holzbalken und die Positionen der kombinierten T/RL-Sensoren (Durchmesser: 6 mm).

An verschiedenen Stellen des Balkens (Abb. 160) maßen Thermistoren mit negativem Temperaturkoeffizienten (NTC) mit einer Genauigkeit von $\pm 0,1$ K sowie kapazitive Feuchtesensoren (± 2 % r.F.) Temperatur und relative Luftfeuchte. Ein zusätzliches Sensorpaar zeichnete das Klima in der Klimakammer auf (Abb. 161).



Abb. 161 Der Akademische Holzbalken in der Klimakammer in Vorbereitung für die Durchführung von Fall 1.

Vergleich Messung und Simulation für Testfall 2

Der Vergleich zwischen Simulationsergebnissen und Messdaten (Abb. 162) weist eine gute Übereinstimmung der Verlaufsform über die gesamte Dauer der Simulationen hinweg aus. Nach Änderungen der Klimarandbedingungen sind allerdings Abweichungen zu beobachten, die sich im Verlauf der Zeit minimieren. Die Diskussion des Testfalls 2 konzentriert sich auf den Vergleich der relativen Luftfeuchte der A-Messpunkte.

Bei dieser Simulation wurden weder hygrische noch thermische Übergangskoeffizienten sowie Holzeigenschaften variiert, die Simulations-Standardeinstellungen wurden beibehalten.

In den Simulationen berechnet der numerische Solver von DELPHIN die Feuchtemassen und -ströme in den einzelnen Elementen. Daraus kann dann über die Sorptionsisotherme die relative Luftfeuchte ermittelt werden. Da die Hysterese in den Simulationen nicht berücksichtigt werden kann, verwendet DELPHIN die Desorptionskurve. Eine derartige Festlegung einer ein-eindeutigen Feuchtespeicherfunktion führt zu zusätzlichen Abweichungen zwischen Messung und Simulation. Abweichungen zwischen Messung und Berechnung sind deshalb beim Vergleich der absoluten Luftfeuchten, die direkt vom Solver berechnet werden, kleiner. Ein Vergleich der relativen Luftfeuchten macht jedoch

grundsätzliche Tendenzen deutlicher sichtbar. Im nachfolgenden Abschnitt zu Testfall 3 werden die absoluten Luftfeuchten ausführlicher behandelt.

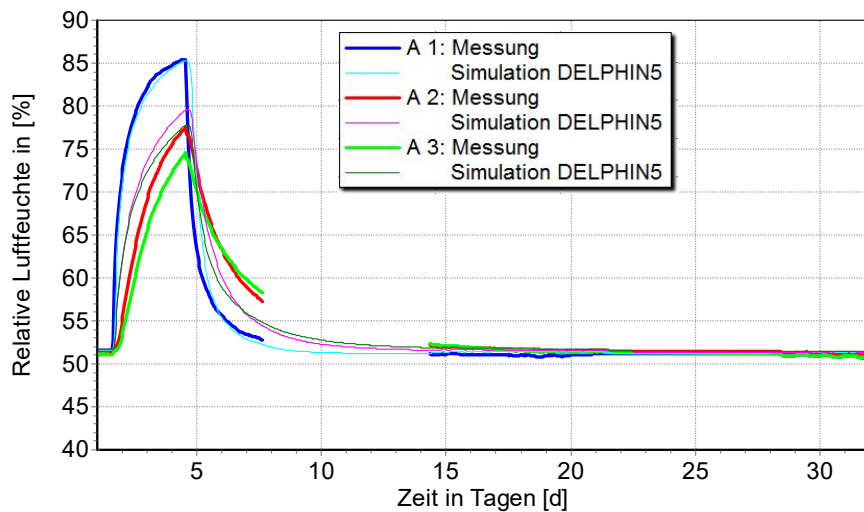


Abb. 162 Vergleich von Simulationsergebnissen und Messdaten für Testfall 2: A-Sensoren.

Der vergrößert dargestellte Wasseraufnahmeprozess in Abb. 163 lässt erkennen, dass die Messungen und Simulationen direkt auf die aufgeprägte Luftfeuchteänderung reagieren.

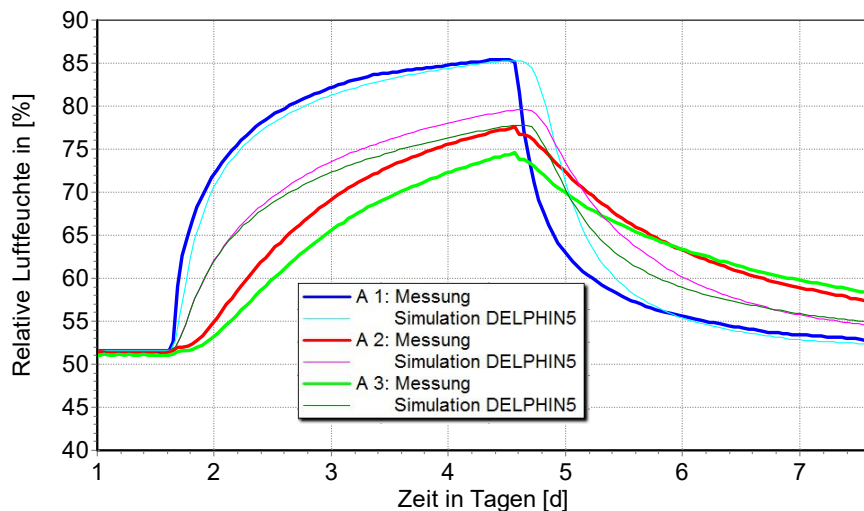


Abb. 163 Vergrößerter Vergleich von Simulationsergebnissen und Messdaten für Fall 2: A-Sensoren.

Der stärker ausgeprägte Einfluss des longitudinalen über den tangentialen Transport während der Auffeuchtungsphase an Punkt A1 wie er in Abb. 163 zu sehen ist, konnte durch die Simulationen ausgezeichnet nachvollzogen werden. Die weiter innen liegenden Messsensoren A2 bis A3 bzw. A4 zeigen im Vergleich zur Simulation nach 1,6 Tagen einen langsameren Auffeuchtungsprozess. Analog dazu vollzieht sich die Abtrocknung nach 4,6 Tagen in den Messungen langsamer als in der Simulation.

Während der Trocknungsphase des Experiments schneiden sich die Linien der Sensoren A2 und A3. Der Sensorpunkt A2 weist eine identische Distanz zum seitlichen Rand auf, der Abstand zum Stirnholz ist geringer (50 zu 90 mm). Die Überschneidung dieser Linien nach knapp 6 bzw. 7 Tagen simulierter Zeit zeigt demzufolge den Einfluss anisotropen Feuchtetransports mit seiner höheren Leitfähigkeit in longitudinaler Richtung: während beider Phasen reagiert die Luftfeuchte am Punkt A2 schneller als an Punkt A3. Sowohl die Simulation als auch die Messung geben dieses Verhalten wieder, wobei die Simulation langsamer auf den äußeren Feuchteabfall reagiert.

Die Messwerte und Simulationsergebnisse an Messpunkt A4 (nicht abgebildet) weichen nur leicht von denen an Punkt A3 ab. Dies deutet darauf hin, dass ab Messpunkt A3 longitudinaler Transport nur noch einen geringen Einfluss ausübt.

Für den schnelleren Auffeuchtungsprozess in der Simulation kommen einige Gründe in Frage:

- die Hysterese der Feuchtspeicherfunktion: der Desorptionswassergehalt bei 70 % r.F. beträgt 5,7 Vol.-%, der Absorptionswassergehalt beträgt nur 3,9 Vol.-%,
- das bei Holz besonders ausgeprägte nicht-lineare Verhalten, welches gerade bei tangential-radialen Transport zum Tragen kommt,
- Umverteilungsprozesse zwischen mobilen und immobilen Phasen,
- Inhomogenitäten im Holz, welche allein schon durch den mikroskopischen, im Vergleich zu anderen Baumaterialien komplexeren, Aufbau materialimmanent bedingt sind oder
- die Annahme eines thermodynamischen Gleichgewichts in jedem Volumenelement.

Abweichungen zwischen Messung und Simulation während dynamischer Prozesse wurden beispielweise schon in [66] beobachtet und beschrieben. Für den Akademischen Holzbalken sind singuläre Inhomogenitäten im Balken oder einzelne Risse als Ursache unwahrscheinlich, da das beschriebene Verhalten an allen tiefer liegenden Messpunkten und auch bei anderen Versuchen (siehe nachfolgender Abschnitt) auftritt. Schwind- und Quellprozesse, die um alle Sensoren gleichzeitig ablaufen und durch die schnelle Luftfeuchteveränderungen verursacht werden, werden zu den Abweichungen ebenfalls kaum beigetragen haben, indem sich z.B. um die Sensoren eine Fuge bildet und wieder schließt, da die Löcher sehr gut abgedichtet wurden.

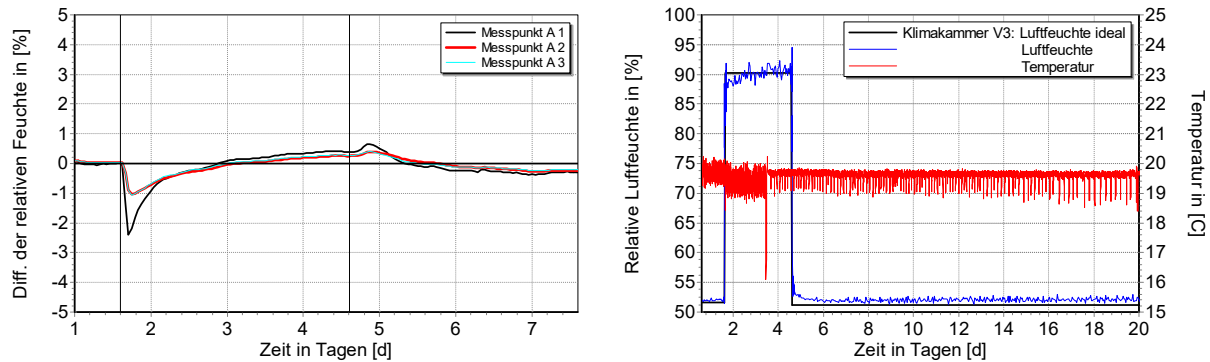


Abb. 164 links: Vergleich von Simulationsergebnissen mit vereinfachten Klimarandbedingungen für Fall 2, rechts: gemessene Temperatur und Luftfeuchte sowie idealisierte Luftfeuchte.

Um die Testfälle zu vereinfachen, wurden verschiedene Strategien zur Simulationsmodellierung verglichen, indem die sich ergebende Solverstatistik untersucht wurde (Konvergenz und Durchfallstatistik bzw. Error test failures). Zuerst wurde der Einfluss der Klimarandbedingungen betrachtet. Abb. 164 stellt die Differenz eines Simulationslaufes mit gemessenen und idealisierten (interpolierten) Klimarandbedingungen gegenüber. Der maximale Unterschied zwischen den Simulationsergebnissen beträgt unter 2,4 % r.F. an Punkt A1. Folglich kann die Verwendung idealisierter Klimarandbedingungen für die Testfälle als noch ausreichend genau angesehen werden. Die Verwendung der idealisierten Klimarandbedingungen führt zu einer Abnahme der Simulationsdauer von 2,9 h auf 1,2 h (reale Zeit) auf einem Einzelkern-Prozessor.

Die Umgebung von DELPHIN ermöglicht die Berechnung der Flüssigwasserleitfähigkeit mit dem Kirchhoff-Potential Ψ_l oder der Flüssigwasserleitfähigkeit K_l . Beide Möglichkeiten wurden zur Berechnung der Testfälle angewendet und ergaben identische Ergebnisse. Die Berechnung mit dem Kirchhoff-Potential erwies sich 7-10 % schneller als das Flüssigwasserleitfähigkeitsmodell.

Vergleich Messung und Simulation für Testfall 3

Bei den Simulationen zum Testfall 3 (Abb. 165) wurden Klima- und Materialparameter variiert, um deren Einfluss auf das Ergebnis festzustellen. Der Wert des thermischen Übergangskoeffizienten variierte zwischen 4-11 W/m²K, der Dampfübergangskoeffizient zwischen 3·10⁻⁷-1·10⁻⁹ s/m. Übergangskoeffizienten ermöglichen es, oberflächennahe Luftströmungen oder Eigenschaften wie Farbe oder Rauigkeit zu berücksichtigen, welche die Temperatur und Luftfeuchte auf den Oberflächen beeinflussen. Der in Richtlinien oder WTA-Merkblättern höchste thermische Übergangskoeffizient für Innenräume wird in [72] mit 8 W/m²K angegeben, insofern wäre ein Wert von 11 W/m²K sehr hoch. Allerdings handelt es sich bei der Klimakammer mit einem Volumen von weniger als einem Kubikmeter nicht um einen üblichen Innenraum. In der Klimakammer wird sehr häufig Temperatur und Luftfeuchte nachgeregelt, wobei jedes Mal Lüfter das Kammervolumen durchmischen. Insofern ist ein hoher Übergangskoeffizient gerechtfertigt. Allerdings führte der höchste thermische Wert zu einer um maximal 1 % r.F. größeren Abweichung.

II.1 Vorhabensziele, Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

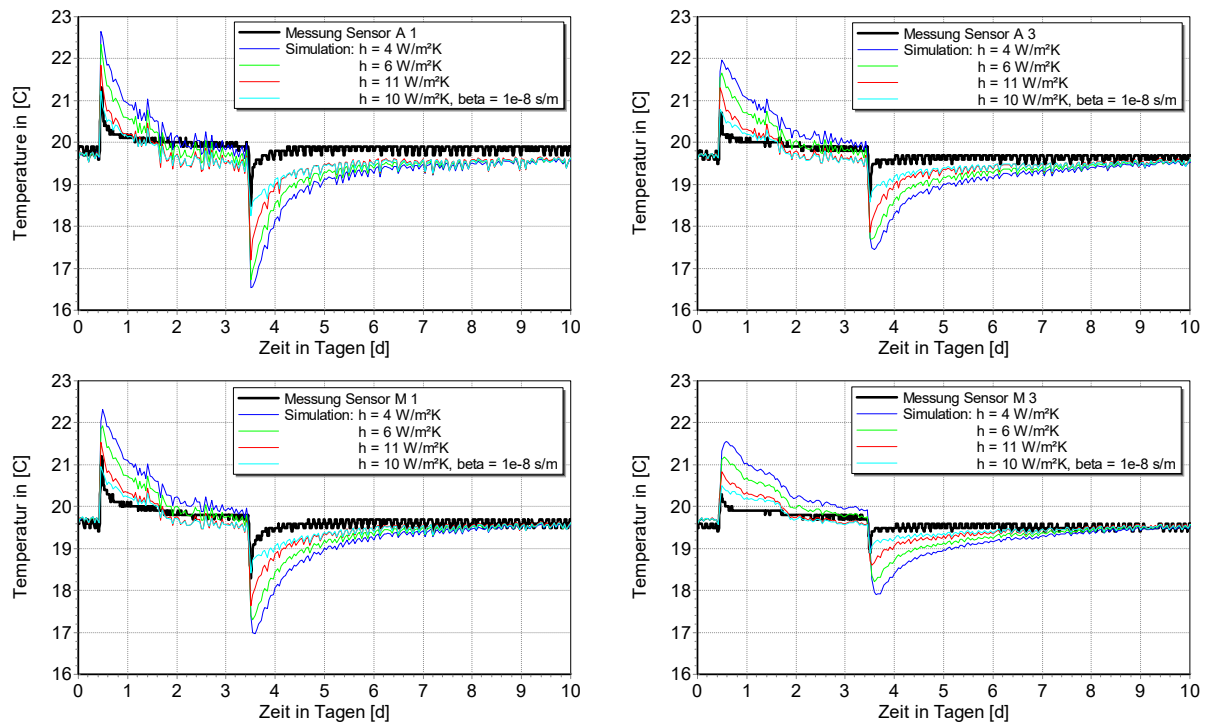


Abb. 165 Vergleich von Messung und Simulationsvarianten der Temperatur an den Sensorknoten A1 (links oben), A3 (rechts oben), M1 (links unten) und M1 (rechts unten) für Testfall 3.

Obwohl der Versuch isotherm angelegt war, wich trotz Regeltechnik die Temperatur am Beginn und nach Ende der Befeuchtungsphase von den geplanten 20 °C um ca. 1,5 K ab. Diese Abweichungen werden hauptsächlich durch veränderte Phasenumwandlungsenthalpieprozesse in der Klimakammer hervorgerufen, bedingt durch die schnelle Veränderung der Feuchteverhältnisse. Dieser Sprung wurde am besten mit höheren thermischen Übergangskoeffizienten nachempfunden. Der Vergleich der roten und hellblauen Linie illustriert, dass auch ein veränderter Dampfübergangskoeffizient auf die Temperaturen einwirkt, da die hellblaue Linie mit dem sonst angewendeten Dampfübergangskoeffizient von $3 \cdot 10^{-8}$ s/m, zwischen der roten und grünen Linie liegen würde. Mit den Übergangskoeffizienten 10 W/m²K und $3 \cdot 10^{-8}$ s/m ergab sich die beste Übereinstimmung zwischen Rechnung und Simulation.

Eine Absenkung der spezifischen Wärmespeicherkapazität auf 1400 J/kgK führte nur zu vernachlässigbaren Veränderungen.

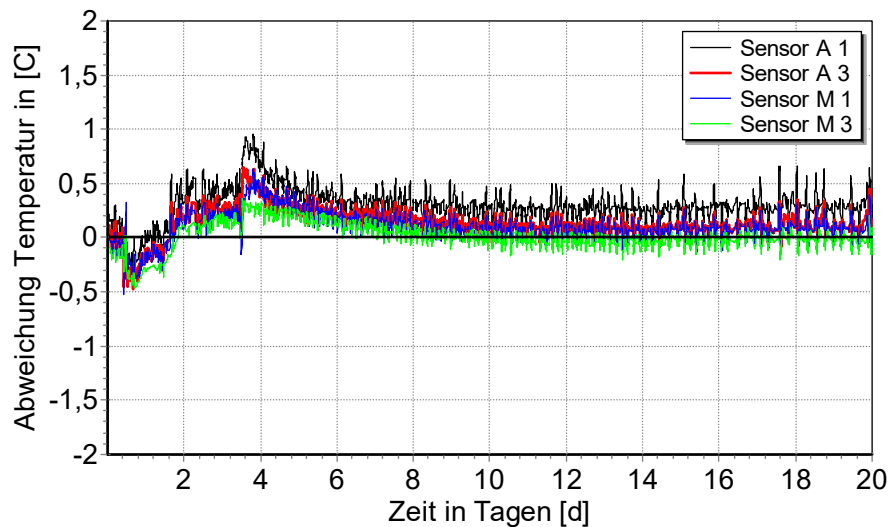


Abb. 166 Temperaturdifferenz zwischen Messung und Simulation an verschiedenen Sensorpunkten (Übergangskoeffizienten $10 \text{ W/m}^2\text{K}$ und $3 \cdot 10^{-8} \text{ s/m}$) für Testfall 3.

Die (zeitlich nicht gemittelten) Temperaturabweichungen zwischen Messung und Rechnung betrugen kurzzeitig maximal $0,9 \text{ K}$ an Punkt A1, $0,6 \text{ K}$ an den Sensorpunkten A3 und M1 sowie $0,3 \text{ K}$ an M3 bei einer Genauigkeit der Temperatursensoren von $\pm 0,1 \text{ K}$ (Abb. 166).

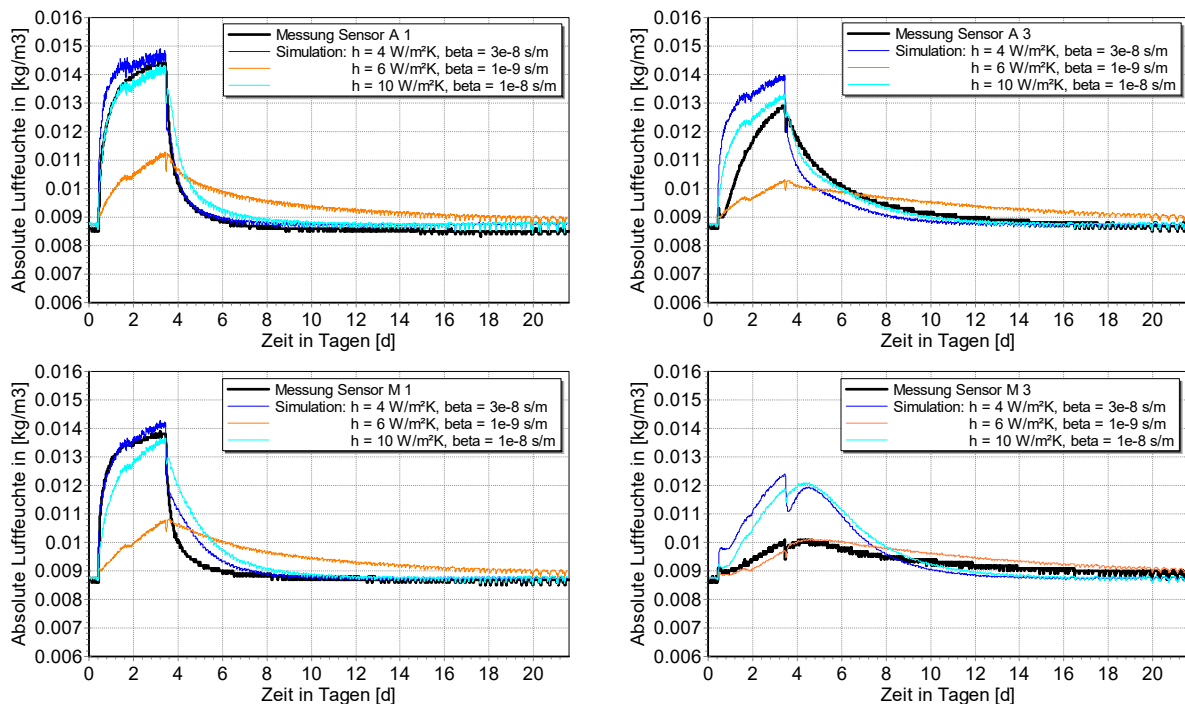


Abb. 167 Vergleich von Messung und Simulationsvarianten der absoluten Luftfeuchte an den Sensorpunkten A1 (links oben), A3 (rechts oben), M1 (links unten) und M3 (rechts unten) für Testfall 3.

Durch die Anpassung an die realen Bedingungen stimmen Messung und Simulation für den Testfall 3 weit besser überein als für Testfall 2 (Abb. 167). Im vorigen Abschnitt zu Testfall 2

war für die A-Sensoren bemerkt worden, dass die Simulation jeweils schneller auf die Änderungen reagierte als die eigentliche Messung. Das wiederholt sich bei der absoluten Luftfeuchte des Testfalls 3 nur an den inneren Messpunkten A3 und M3. An den äußeren Punkten A1 und M1 ist die Übereinstimmung bei der Wahl der korrekten Übergangsbedingungen dagegen sehr gut.

Besonders an Messpunkt M3 besteht nur qualitative Kongruenz. Hier wird die grundsätzliche Bewegung durch die Simulation nachvollzogen, quantitativ schießen die Simulationsergebnisse über die Messwerte hinaus, es sei denn, es werden mit $1 \cdot 10^{-9}$ s/m unrealistische Dampfübergangsbedingungen gewählt. Die möglichen Gründe für diese Differenzen wurden im Abschnitt zu Testfall 2 bereits erläutert. Das schon qualitativ unterschiedliche Abweichen an den Messpunkten M1 und M3 – an Punkt 1 reagiert je nach Wahl der Übergangsbedingungen die Messung schneller als die Simulation - deutet darauf hin, dass nicht die Modellierung der Übergangsbedingungen der Grund für die Abweichungen an M3 ist, sondern die interessanten, aber in ihrer Gesamtheit noch nicht exakt modellierbaren Eigenschaften innerhalb des Holzes mit ihren vielfältigen Einflüssen. Hinsichtlich einer genauen Wiedergabe realen hygrischen Verhaltens besteht weiterhin Forschungsbedarf.

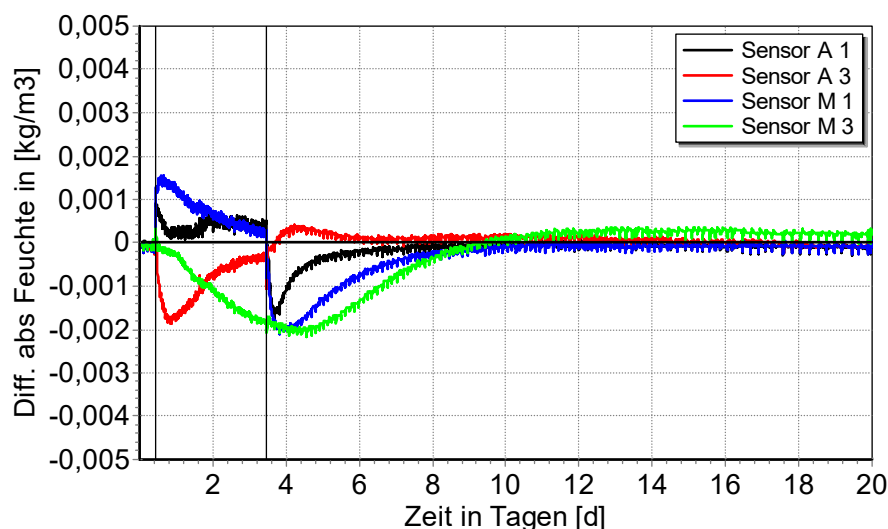


Abb. 168 Differenzen der absoluten Luftfeuchte zwischen Messung und Simulation an verschiedenen Sensorpunkten (Übergangskoeffizienten $10 \text{ W/m}^2\text{K}$ und $3 \cdot 10^{-8} \text{ s/m}$) für Testfall 3.

Die Abb. 168 betrachtet den absoluten Fehler zwischen simulierten und gemessenen Ergebnissen für den Testfall 3. Mit den thermischen und hygrischen Übergangskoeffizienten $10 \text{ W/m}^2\text{K}$ bzw. $3 \cdot 10^{-8} \text{ s/m}$ überschreiten die Differenzen zwischen Messung und Simulation in der absoluten Luftfeuchte nicht $0,002 \text{ kg/m}^3$ (Abb. 168). Nach den Feuchtesprüngen treten bei den beiden außen liegenden Messpunkten A1 und M1 kurzzeitige Abweichungen von bis zu $0,002 \text{ kg/m}^3$ auf, welche aber vergleichsweise schnell wieder abklingen. An Messpunkt M1 folgt die Simulation den Messergebnissen in der Aufweichungsphase enger als in der Trocknungsphase, während dies an Punkt A3 entgegengesetzt abläuft. Weil an diesen

beiden Punkten M1 und A3 unterschiedliche Transportrichtungen dominieren ist das ein Hinweis darauf, dass die Umverteilungsprozesse anders vonstattengehen.

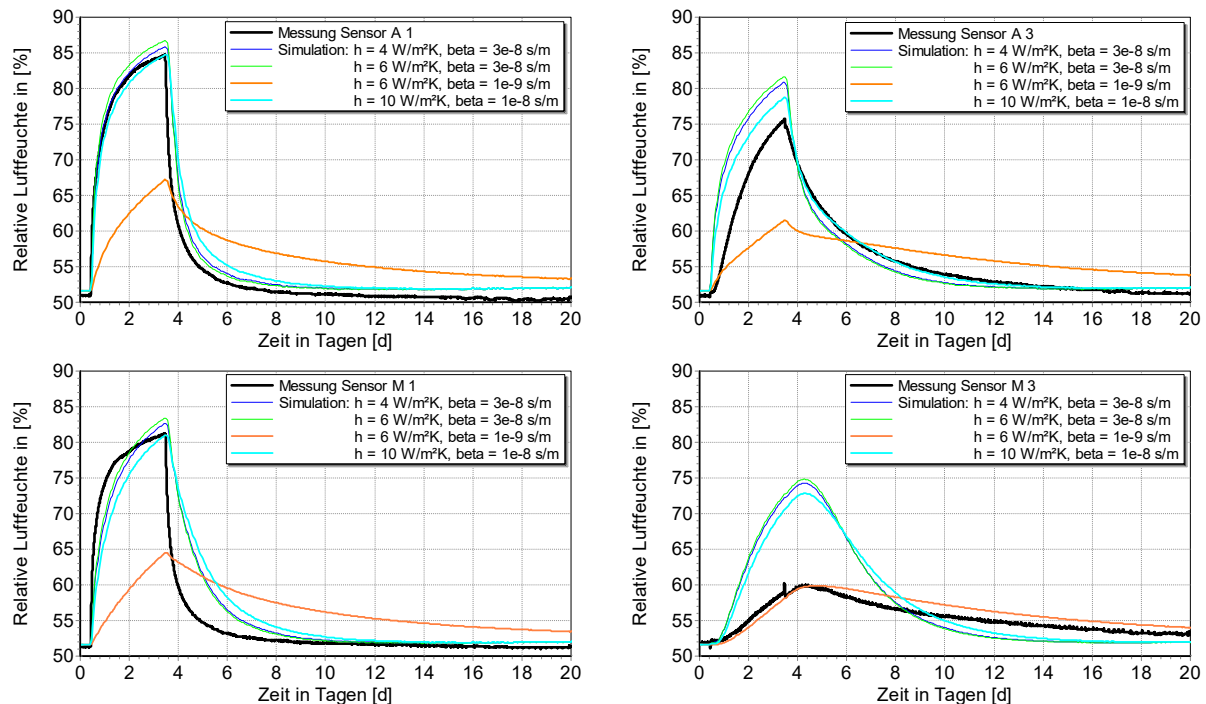


Abb. 169 Vergleich von Messung und Simulationsvarianten der relativen Luftfeuchte an den Sensorpunkten A1 (links oben), A3 (rechts oben), M1 (links unten) und M3 (rechts unten) für Testfall 3.

Bei einer Genauigkeit der Luftfeuchtesensoren von $\pm 2\%$ kann die Differenz der relativen Luftfeuchte an den Sensorpunkten nahe des Stirnholzes A1 und M1 als ausgezeichnet bewertet werden, an Messpunkt A3 ist sie ebenfalls noch sehr gut (Abb. 169). An Punkt M3 wiederum werden durch die Darstellungsweise der relativen Luftfeuchte die Unterschiede von Messung und Berechnung offensichtlicher.

Testweise wurde der μ_{dry} -Wert der longitudinalen Richtung von 4,6 um mehr als das Doppelte auf 10 erhöht. An Messpunkt M1 näherten sich die Simulationsergebnisse je nach Variante um weniger als 1 % r.F. an die Messdaten an, an Punkt M3 um weniger als 2 %. Ein Tausch der tangentialen und radialen Richtungseigenschaften hatte praktisch keine Auswirkungen.

Die Übereinstimmung an den Rändern des Testbalkens ist besser, was für die Bewertung von Konstruktionen mit Holz wichtiger ist, da Schädigungsprozesse meistens an den Rändern beginnen.

Die sehr gute Übereinstimmung für die oberflächennahen Bereiche und die Abweichungen der Messwerte von der Simulation im Inneren des Holzes weisen darauf hin, dass die Modellierung des Feuchtetransports in Holz grundsätzlich gut ist. Die Erkenntnisse reichen jedoch nicht weit genug, um die komplexen Transportphänomene in einem größeren Holzbauteil genau zu berechnen, da sich mit der Entfernung von den instationären

Klimarandbedingungen die Einflüsse der komplexeren, physikalischen Vorgänge beim Transport und der Speicherung von Feuchte im Holz erhöhen.

1.4.6.2 Vergleich der Simulationsergebnisse mit den Holzbalkenkopfprüfstandsmessungen

Als Simulationszeitraum für den Vergleich von Messdaten und Simulationsergebnissen wurde die unter 1.3.4.3 beschriebene Messphase ausgewählt. Dabei wurde die Temperatur des Außenklimabereichs im Holzbalkenkopfprüfstand für fünf Tage von 20 auf -10 °C abgesenkt und anschließend wieder auf 20 °C erhöht (Abb. 170). Die Vergleiche konzentrieren sich auf das mit Kalziumsilikat gedämmte Feld 2.

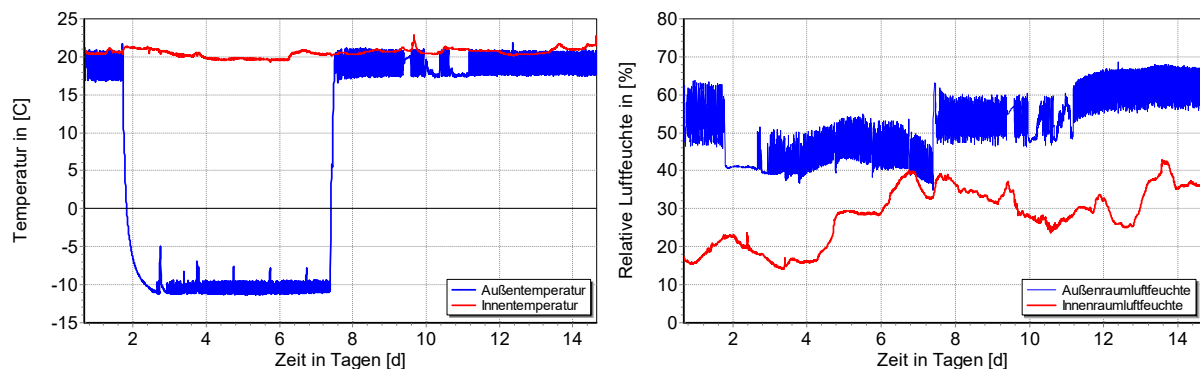


Abb. 170 Außen- und Innenklima während des näher untersuchten Zeitraums.

Zu Beginn der Simulationen wurden Messung und Simulation für den quasi-eindimensionalen, ungestörten Bereich zwischen den Balken angestrengt. In diesen Simulationen wurden mithilfe von Python-Skripten und automatisierten Auswertungsprogrammen wie GenOpt diverse Materialeigenschaften und Simulationsrandbedingungen überprüft: die Materialeigenschaften wurden innerhalb enger Grenzen, die die Messungen einzelner Probekörper mit ihren Streuungen vorgaben, variiert. Letztlich erwiesen sich die Mittelwerte aus den Messungen als passend. Ein nicht zu vernachlässigender Einfluss erwächst aus den thermischen und hygrischen Übergangsbedingungen auf den begrenzenden Oberflächen. Für die thermischen Übergangskoeffizienten ergab sich, je nach Position, ein Bereich von 12 bis 14 W/m²K außen und um 6 W/m²K innen. Die beste Übereinstimmung im hygrischen Bereich ergab sich mit $3 \cdot 10^{-8}$ s/m innen und $1 \cdot 10^{-7}$ s/m außen. Das Vorgehen ist in der zukünftigen Publikation *Calibration of Hygrothermal Simulations by the Help of a Generic Optimization Tool* (Vergl. Abschnitt II.6) detailliert beschrieben.

Übereinstimmung von DELPHIN 5 und DELPHIN 6 Ergebnissen

Zunächst wurde überprüft, ob die Ergebnisse der beiden Programmversionen DELPHIN 5 und DELPHIN 6 voneinander abweichen. Dafür wurde der untere Balken in Feld 2 im zweidimensionalen Bereich simuliert, der Schnitt wurde durch den Balken geführt.

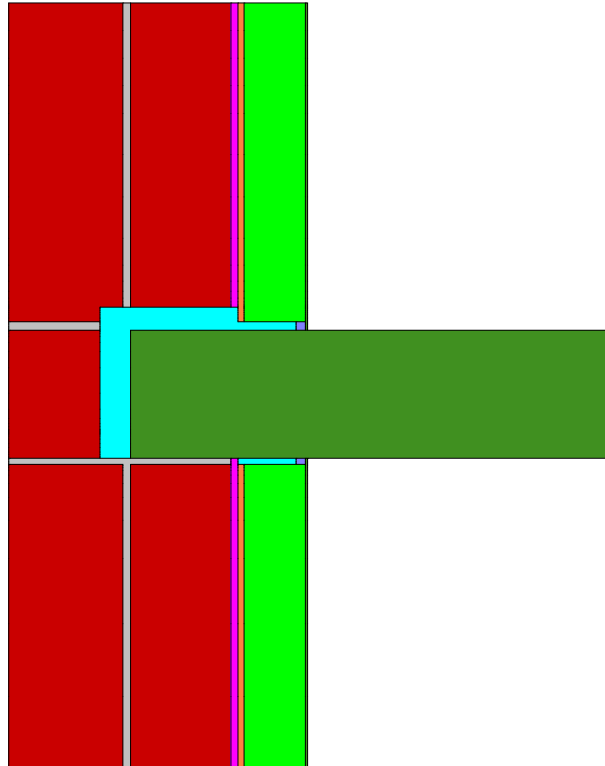


Abb. 171 Screenshot aus DELPHIN 5: Vertikalschnitt durch den unteren Balken im Feld 2.

In Abb. 171 wurde der Vertikalschnitt durch die Achse des Balkens im unteren Bereich des Feldes 2 geführt. Es wurden nur einige Mörtelschichten abgebildet. In den oben erwähnten eindimensionalen Simulationen wurde festgestellt, dass die Mörtelschichten nur einen untergeordneten Einfluss auf die Ergebnisse ausüben, sodass auf weitere Mörtelschichten verzichtet werden konnte. Die Abbildung von mehr Mörtel-Schichten hätte die Anzahl der diskretisierten Elemente im dreidimensionalen Bereich auf weit über eine Million erhöht, wodurch sich die Simulationszeit massiv verlängert hätte.

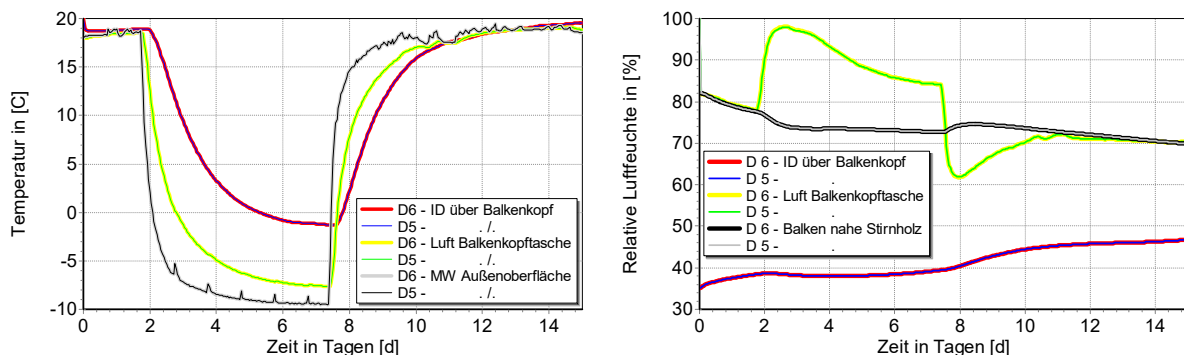


Abb. 172 Vergleich der Simulationsergebnisse von DELPHIN 5 und 6 anhand von Temperatur und relativer Luftfeuchte an unterschiedlichen Punkten in Feld 2, unten.

Wie aus den beiden Diagrammen in Abb. 172 zu entnehmen ist, verlaufen die Temperaturen und relativen Luftfeuchten mit den beiden Versionen praktisch deckungsgleich. Die

Abweichungen betragen maximal 0,5 K und 0,12 % r.F. und sind damit so klein, dass sie vernachlässigt werden können.

In zweidimensionalen Simulationen mit DELPHIN 5 wurden folgende Parameter variiert:

- Verwendung longitudinaler, radialer oder tangentialer Datensätze für die Fichte (Materialeigenschaft)
- Verwendung unterschiedlicher hygrischer und thermischer Übergangskoeffizienten am Übergang zwischen Luft und Material des Balkenaufagers (Kontaktbedingung)
- Langwellige Abstrahlung gegenüberliegender Seiten der Luftschicht des Balkenaufagers (Feldbedingung)
- Berechnung der Wärmeleitfähigkeit der Luft im Balkenaufager mithilfe der anliegenden Randtemperaturen und der Geometrie des Aufagers (Feldbedingung)
- Verwendung unterschiedlicher Wärmeleitfähigkeiten für die Fichte (Materialeigenschaft)
- Kombinationen der voran stehenden Varianten

In Klammern ist die jeweilige Einordnung der Veränderungen im Modellierungskontext in DELPHIN angegeben. Die hygrischen und thermischen Übergangskoeffizienten wurden von den quasi-eindimensionalen Simulationen übernommen: $6,5 \text{ W/m}^2\text{K}$ und $3 \cdot 10^{-8} \text{ s/m}$ auf der Innenseite sowie $14 \text{ W/m}^2\text{K}$ und $1 \cdot 10^{-7} \text{ s/m}$ auf der Außenseite. Die Vergleiche werden im Wesentlichen mit DELPHIN 5 durchgeführt, weil viele der speziellen Feldbedingungen noch nicht in DELPHIN 6 implementiert werden konnten. Zudem lässt sich dadurch herausarbeiten, mit welchen Einstellungen die Messdaten des dreidimensionalen Prüfdetails in zweidimensionalen Berechnungen am besten wiedergegeben werden können.

Ein bewertender Vergleich der verschiedenen Varianten gestaltete sich insofern schwierig, da manche Varianten besonders gut die Abkühlphase nachzeichnen konnten, beim Aufwärmen allerdings weiter neben den Messergebnissen lagen, bzw. umgekehrt und dieses Verhalten je nach Messpunkt noch changierte. Andere Varianten zeigten während beider Phasen einen ähnlichen Abstand auf. Mit statistischen Werten lässt sich ein derartiges Verhalten nur sehr aufwändig und etwas unübersichtlich aufarbeiten.

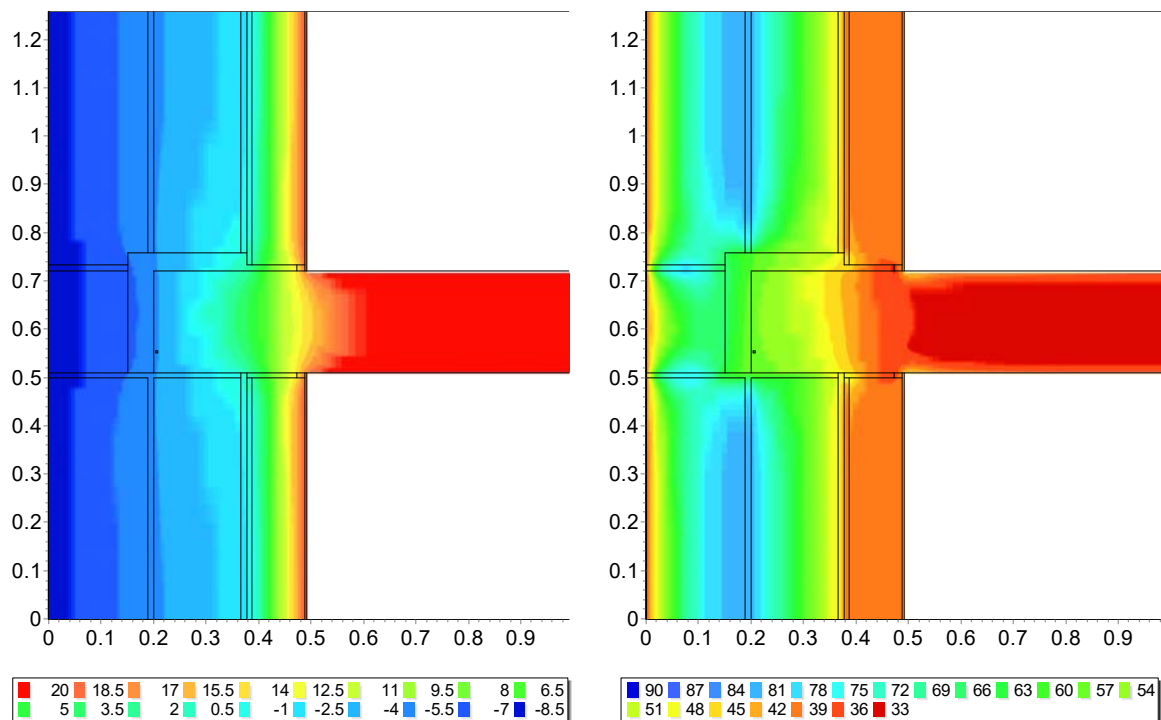


Abb. 173 Temperaturfeld (links) und Feld der relativen Luftfeuchte (rechts) an Tag 7 mit berechneter, temperatur- und geometrieabhängiger Wärmeleitfähigkeit der Luft im Balkenaufleger (Kalziumsilikatdämmplatten mit longitudinalem Datensatz für die Fichte).

In Abb. 173 sind das Temperaturfeld und das Feld der relativen Luftfeuchte zu Beginn des siebten Tages des Experiments visualisiert. Die Felder sind Ergebnisse zweidimensionaler Simulationen. Daraus geht hervor, dass der Einfluss der Holzbalkenköpfe selbst im zweidimensionalen Bereich örtlich nur sehr begrenzt ist und in der Konstruktion nach weniger als 0,3 m schon abgeklungen ist, auf oberflächennahen Bereichen ist der Einflussbereich noch kleiner. Da der Holzbalken im Gegensatz zu dreidimensionalen Simulationen in z-Richtung nicht unendlich ausgedehnt ist, wird der Einfluss dreidimensional noch enger begrenzt sein. In der Ebene der Innendämmung wird das Temperaturfeld durch den Holzbalken zum Innenraum hin verzerrt, hinter der Innendämmung in der Ebene des Auflagers zur Außenoberfläche hin (Abb. 173, links). In der unmittelbaren Umgebung des Balkenauflegers herum ist das Mauerwerk trockener. Der Holzbalken scheint sich ein günstiges Umfeld selber zu schaffen.

Einfluss der Materialeigenschaften

Aus Gründen der Übersicht werden in den folgenden beiden Abbildungen nur Simulationsvarianten verglichen, in denen die Materialeigenschaften der Fichte variiert wurden: dabei kamen Datensätze mit radialen, tangentialen und longitudinalen Transporteigenschaften zum Einsatz, wobei longitudinal auch die Wärmeleitfähigkeit von

0,151 auf 0,120 W/mK reduziert wurde. Die Ergebnisse mit radialem und tangentialem Datensatz unterschieden sich praktisch nicht.

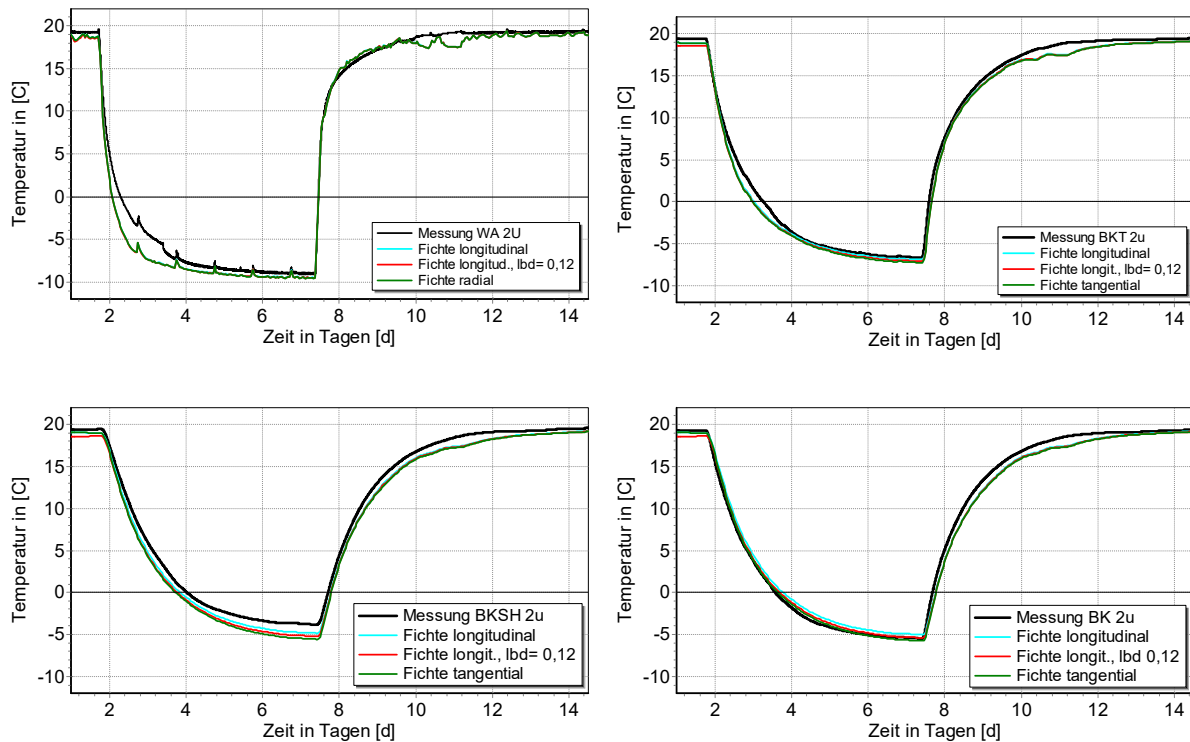


Abb. 174 Vergleich von Messdaten und Simulationsvarianten mit unterschiedlichen Fichte-Transporteigenschaften an den Temperatur-Messpunkten nahe der Außenoberfläche des Mauerwerks (links oben), Ende Balkenkopftasche (rechts oben), im Balkenkopf (links unten) und auf dem Stirnholz (rechts unten) des unteren Balkens in Feld 2.

Wenige Millimeter unter der Außenoberfläche ist die Temperaturdifferenz zwischen Messung und Rechnung während der dynamischen Abkühlung mit zwischenzeitlich 3 K viel größer als gegen Ende der Phase mit abgesenkter Außentemperatur, dann beträgt die Differenz nur 0,5 K (Abb. 174, links oben). An diesem Messpunkt „WA 2u“ spielen die unterschiedlichen Eigenschaften des Holzbalkens keine Rolle mehr. An der vertikalen Fläche am Ende des Balkenaufagers („BKT 2u“) verlaufen die Temperaturen mit tangentialem Materialdatensatz nach sechs Tagen um 0,6 K, mit longitudinalem Datensatz um nur 0,2 K tiefer im Vergleich zur Messung (Abb. 174, rechts oben). Die größere Abweichung am zweiten und dritten Tag während der Abkühlphase ist wahrnehmbar, jedoch nicht mehr so ausgeprägt wie an Punkt „WA 2u“.

In der Konstruktion wurden die größten Abweichungen an dem Temperatursensor festgestellt, der im Balkenkopf befestigt ist („BKSH 2u“): knapp 1 K Abweichung mit ausschließlich longitudinalen und 1,8 K mit radialen bzw. tangentialen Transporteigenschaften des Holzbalkens (Abb. 174, links unten). Auf dem Stirnholz selber ist die Übereinstimmung dagegen mit weniger als 0,5 Kelvin Abweichung beim Abkühlvorgang sehr gut (Abb. 174, rechts unten), wobei hier die Simulationen, im Gegensatz zu bisherigen Beobachtungen, ein wenig langsamer als die Messdaten fallen und wieder ansteigen. Die

beste Übereinstimmung wurde mit longitudinalen Transporteigenschaften und niedrigerer Wärmeleitfähigkeit erzielt.

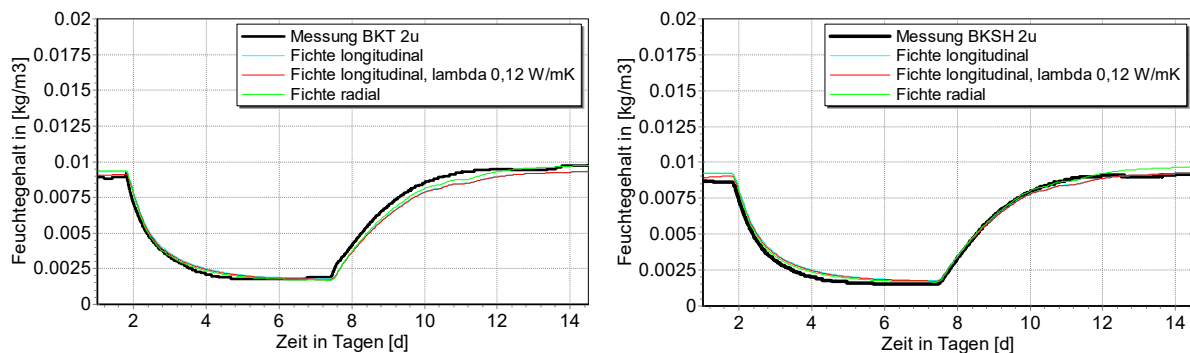


Abb. 175 Vergleich von Messdaten und Simulationsvarianten an den Feuchte-Messpunkten Ende Balkenkopftasche (links) und im Balkenkopf (rechts) im unteren Balken Feld 2.

In den Balken des Feldes 2 wurde die Luftfeuchte am Ende der Balkenkopftasche und nahe des Stirnholzes im Holzbalken gemessen. Die Übereinstimmung im Verlauf der absoluten Luftfeuchte ist jeweils ausgezeichnet, die Differenz zwischen Rechnung und Messung beträgt weniger als 0,4 g/kg. Die Varianten unterscheiden sich untereinander nur um Nuancen, weshalb hier angesichts aller Unwägbarkeiten kein Vorzugsmaterialdatensatz herausgestellt wird.

Einfluss der Klimarandbedingungen und verwendeten Feldmodelle

Zwischen den im Folgenden besprochenen Varianten und den vorstehenden ließ sich am Messpunkt nahe der Außenoberfläche („WA 2u“) kein nennenswerter Unterschied feststellen, weshalb dieser hier nicht noch einmal betrachtet wird. An den übrigen Messpunkten führte die Verwendung folgender Modelle bzw. Kombinationen zu etwas größeren Temperaturabweichungen von den Messungen:

- Sehr niedrige Übergangskoeffizienten im Luftraum des Balkenaufagers ($2 \text{ W/m}^2\text{K}$ und $1,2 \cdot 10^{-8} \text{ s/m}$),
- Langwellige Abstrahlung und Übergangskoeffizienten im Luftraum des Balkenaufagers,
- Langwellige Abstrahlung, Übergangskoeffizienten und Berechnung der Wärmeleitfähigkeit der Luft um den Holzbalkenkopf.

Die Kombination vieler verschiedener Modelle erwies sich demnach hier nicht als zielführend. Besonders die zweite Variante führte zu einer zu langsamen Abkühlung und Aufwärmung. Bei diesen 2D-Simulationen wurden immer die longitudinalen Daten angesetzt, weil diese die besten Ergebnisse im Vergleich der Holzeigenschaften ergaben.

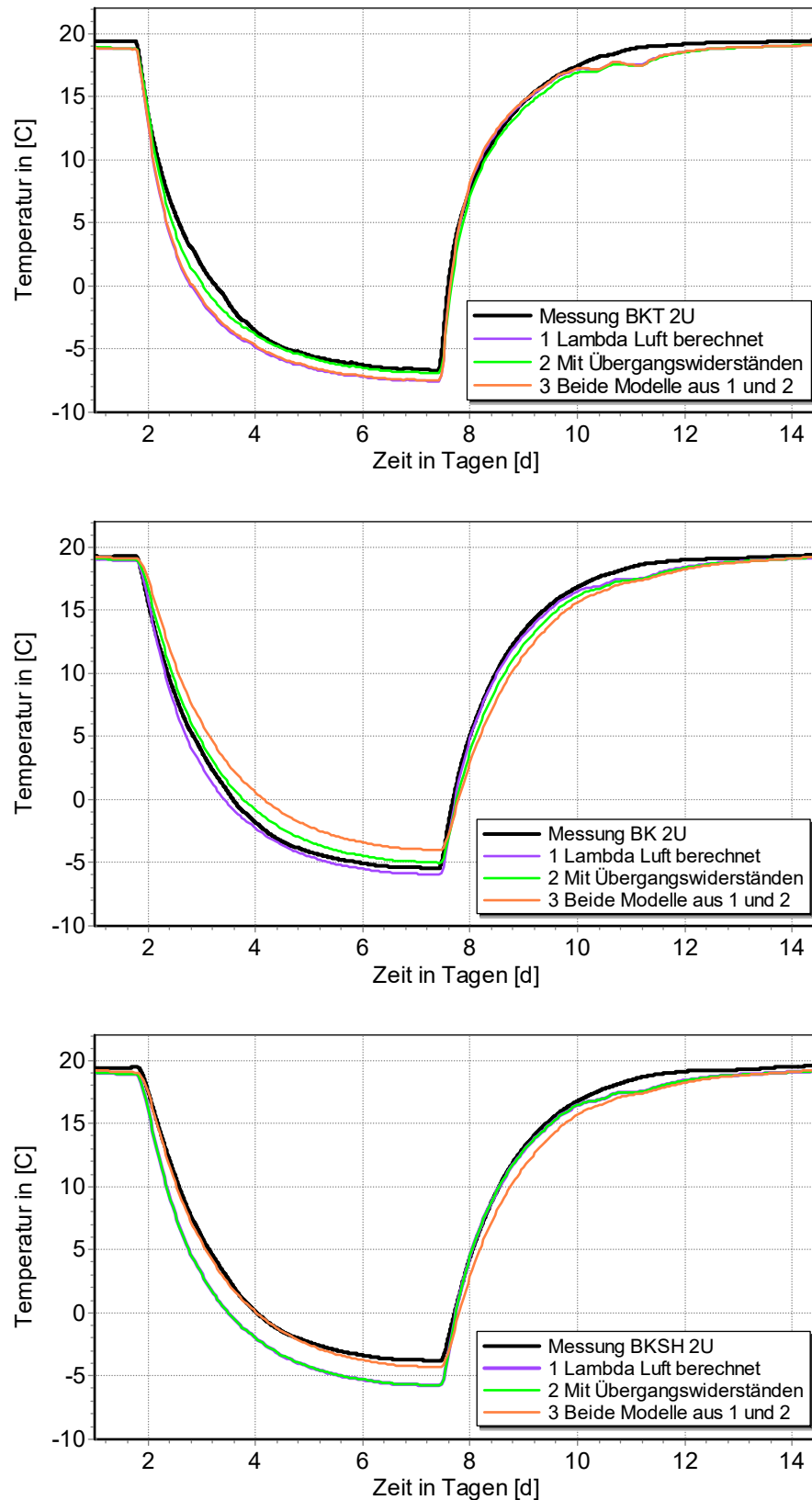


Abb. 176 Vergleich von Messdaten und Simulationsvarianten mit unterschiedlichen Feldmodellen an den Temperatur-Messpunkten Ende Balkenkopftasche (oben), auf dem Stirnholz (Mitte) und im Balkenkopf (unten) des unteren Balkens in Feld 2.

Je nach Messpunkt und Experiment-Phase waren unterschiedliche Feldbedingungen am besten geeignet. Am Ende der Balkenkopftasche genügte die reine Berücksichtigung von Übergangskoeffizienten (Variante 2 in Abb. 176, oben) für die kleinsten Abweichungen mit 0,2 K nach sechs Tagen und 0,5 K nach neun Tagen gegenüber 1 K und 0,2 K nach sechs bzw. neun Tagen mit den anderen Varianten, wobei hier die Varianten 1 und 3 fast deckungsgleich verliefen.

Auf dem Stirnholz des Balkenkopfes waren dagegen die Varianten 1 und 2 kaum zu unterscheiden, während Variante 3 in Abb. 176, Mitte, bei der die Luft-Wärmeleitfähigkeit kontinuierlich neu berechnet wird und Übergangswiderstände im Auflager angeordnet waren, mit 0,1 K und 1,2 K (nach sechs bzw. neun Tagen) Abweichung im Schnitt der Messung am Nächsten kam (Abb. 176, Mitte). In den Varianten 1 und 2 wurden 1,1 und 0,7 K Differenz festgestellt.

Im Balkenkopf wiederum, nahe dem Stirnholz, bewirkte die Variante 1 mit berechneter Luft-Wärmeleitfähigkeit die geringsten Temperaturabweichungen, 0,5 K nach sechs und 0,3 K nach neun Tagen (Abb. 176, unten). Zum Vergleich lag die Variante 2 nach sechs Tagen bei einer Differenz von 0,5 K zu den Messdaten und nach neun Tagen bei 0,7 K.

Wie schon bei den Vergleichen der unterschiedlichen Transporteigenschaften in Abb. 174 bemerkt, ist auch bei der Verwendung unterschiedlicher Feldmodelle die hygrische Übereinstimmung sehr gut. Es zeigte sich hier aber auch, dass die Verwendung sehr hoher Material-Luft-Übergangswiderstände im Balkenauflager oder anderer besonderer Kombinationen zu keiner höheren Deckung führt. Lediglich eine der „aufwändigeren“ Kombinationen mit vielen Komponenten, hier langwellige Abstrahlung um den Balkenkopf, berechnete Wärmeleitfähigkeit der Luft und mit Übergangswiderständen (Variante 4), erzielte bessere Ergebnisse. Diese wird zusammen mit den Varianten 1 (berechnete Luft-Wärmeleitfähigkeit) und Variante 3 (wie Variante 1, zusätzlich Übergangswiderstände) aus den vorigen Absätzen vergleichen.

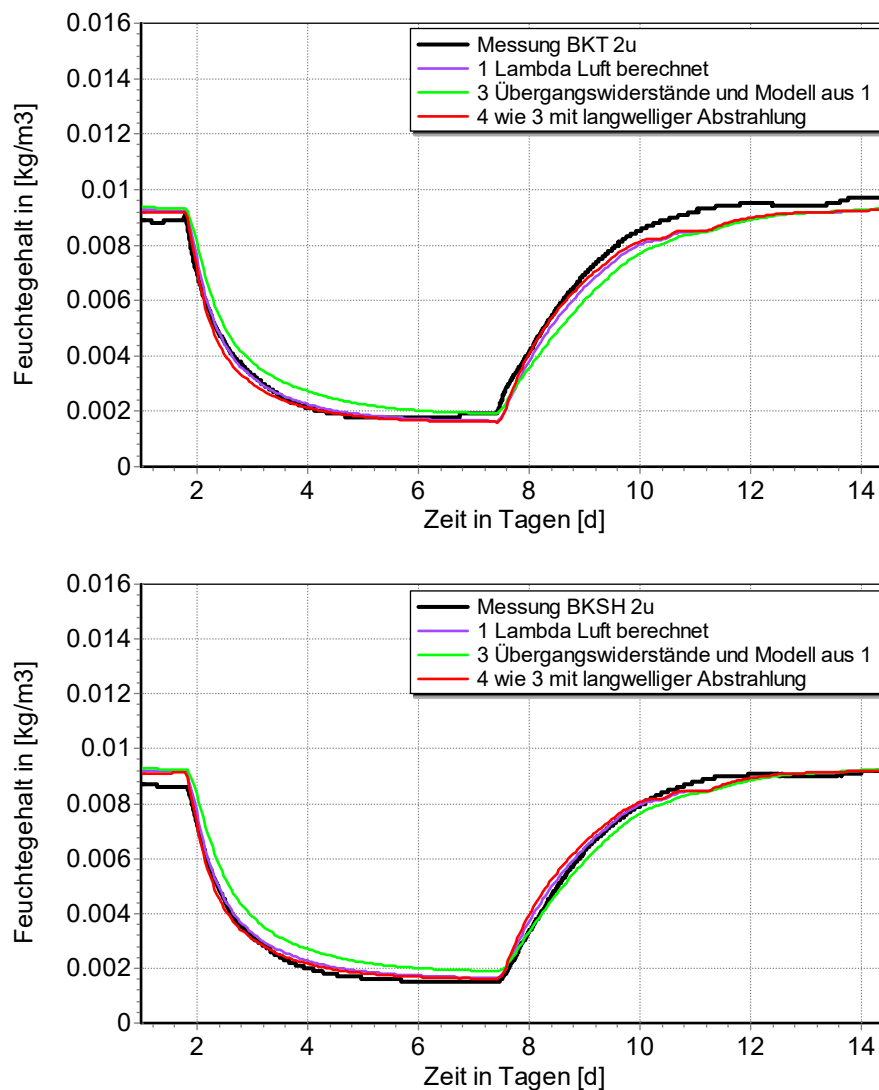


Abb. 177 Vergleich von Messdaten und Simulationsvarianten mit unterschiedlichen Feldmodellen an den Feuchte-Messpunkten Ende Balkenkopftasche (oben) und im Balkenkopf (unten) des unteren Balkens in Feld 2.

Abb. 177 oben veranschaulicht, dass auf der vertikalen Fläche am Ende der Balkenkopftasche Variante 1 nach sechs bzw. neun Tagen nur um 0,2 und 0,5 g/m³ von den Messergebnissen abweicht. Mit Variante 3 gibt es nach sechs Tagen exakte Übereinstimmung, nach neun Tagen summiert sich allerdings die Differenz zu 0,8 g/m³ auf. Der Unterschied mit Variante 4 ist mit 0,3 und 0,4 g/m³ am gleichmäßigsten.

Im Balkenkopf sind alle Abweichungen nach sechs und neun Tagen minimal (Abb. 177, unten): bei Variante 1 beträgt die Differenz 0,2 und 0 g/m³ in Variante 3 0,4 und 0,3 g/m³ und bei Variante 4 unter Verwendung drei verschiedener Modelle je 0,1 g/m³.

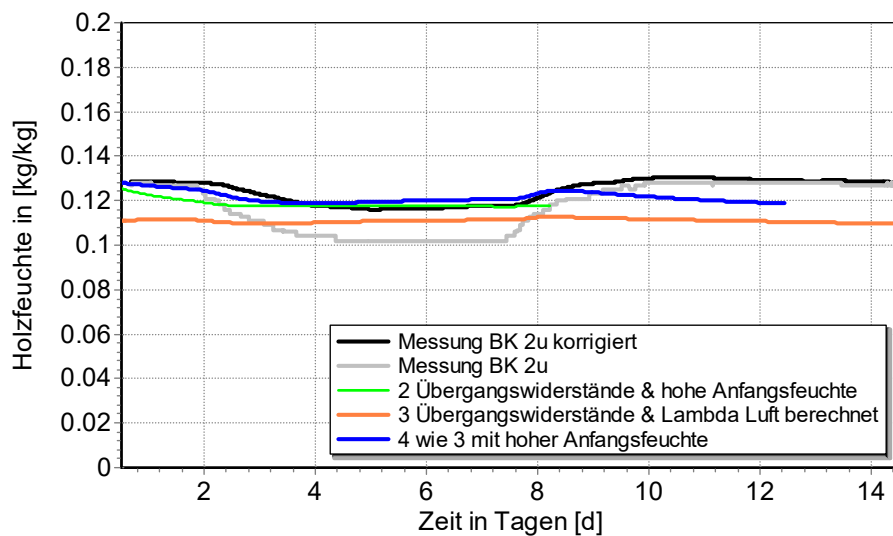


Abb. 178 Vergleich von Messdaten der Holzfeuchtwiderstand-Messung und Simulationsvarianten mit unterschiedlichen Feldmodellen und Anfangsfeuchten im unteren Balken des Feldes 2.

Werden die Messdaten aus der Holzfeuchtwiderstandsmessung und die Simulationsergebnisse verglichen, wird anhand von Abb. 178 deutlich, dass die verwendeten Anfangsbedingungen von Beginn an zu Differenzen um 2 M.-% führen, obwohl die Messungen der Luftfeuchte sehr gut mit den Simulationen übereinstimmten. Da die Temperaturmessung zur Kompensation der temperaturabhängigen Widerstandsmessung nicht direkt am Messpunkt stattfand, wurde mithilfe des vom Hersteller bereitgestellten Algorithmus die „richtige“ temperaturkorrigierte Kurve berechnet. Für die Differenzen kommen mehrere Ursachen in Frage:

- Die Messpunkte von relativer Luftfeuchte und Holzfeuchte befinden sich nicht an derselben Stelle (Vergl. Abb. 113). Die daraus resultierenden Abweichungen dürften allerdings gering sein, da sich beide Stellen sehr nah am Stirnholz befinden, in einer Entfernung von ca. 10 cm.
- Die Klimarandbedingungen werden aus obigem Grund sehr ähnlich sein und aus dem Mauerwerk aufsteigende Feuchte kann aufgrund der hygrischen Trennung mittels Folien ausgeschlossen werden.
- Bei Feuchtwiderstandsmessgeräten wird durch den Hersteller in der Regel eine fixe Sorptionsisotherme festgelegt, die dementsprechend von der Sorptionsisotherme des gemessenen Materials abweichen kann. Dies dürfte den Hauptgrund für die Abweichungen darstellen.

Wird diesem Bereich des Holzbalkens ein abweichender Wassergehalt als Anfangsbedingung zugeordnet, ergibt sich auch hier eine sehr gute Übereinstimmung. Wiederum erweist sich die Anordnung von Übergangskoeffizienten als sinnvoll, hier in Verbindung mit dem Modell zur Berechnung der Wärmeleitfähigkeit der Luftschicht. Allerdings wird die leichte Auffeuchtung während der Aufwärmphase durch die Simulation nicht nachvollzogen. Die relative Luftfeuchte am Messpunkt „BKT 2u“ stimmt dann nicht

mehr so gut überein wie z.B. in Abb. 177 dargestellt. Sinnvoller wäre deshalb die Hinterlegung einer anderen Sorptionsisotherme während der Umwandlung der Messsignale. Vom Hersteller ist allerdings ein solcher Eingriff nicht vorgesehen, sodass sich der Nutzer im Zuge der Validierung für eine Art der Feuchteerfassung entscheiden muss.

Es konnte somit bewiesen werden, dass auch in zweidimensionalen Simulationen das hygrothermische Verhalten des Bereichs um den Balkenkopf in Abhängigkeit von den verwendeten Materialeigenschaften und Modellierungsoptionen gut bzw. sehr gut wiedergegeben werden kann, insbesondere der Feuchtegehalt. Bezüglich der Transporteigenschaften im Deckenbalken wurde eindeutig festgestellt, dass in zweidimensionalen Simulationen die Verwendung longitudinaler Transporteigenschaften an fast allen untersuchten Punkten zur besten Übereinstimmung führte. Für die Feldmodelle lässt sich keine vergleichbar eindeutige Aussage treffen, da die Ergebnisse zu uneinheitlich waren. Lediglich das Anordnen von thermischen und hygrischen Übergangswiderständen an den Material-Luft-Übergängen im Balkenaufleger hatte an fast allen Messpunkten einen positiven Einfluss, der thermische Widerstand sollte allerdings nicht zu hoch ($0,5 \text{ m}^2\text{K/W}$) sein. Ein Berechnungsmodell für die Wärmeleitfähigkeit der Luft zur Berücksichtigung der Konvektion im Bereich um den Balkenkopf erwies sich in einigen Fällen ebenfalls als hilfreich. Während bei den Temperaturen eine Kombination verschiedener Modelle nicht zielführend war, ergab beim Vergleich der Feuchtwerte eine Simulation die beste Übereinstimmung, die sowohl die langwellige Abstrahlung und Übergangswiderstände um den Balkenkopf berücksichtigte, als auch die Wärmeleitfähigkeit der Luft dort berechnete.

Dreidimensionale Simulationen mit DELPHIN 6

Um Rechenzeit einzusparen wurde für die dreidimensionalen Berechnungen der Schnitt durch die vertikale Symmetrieachse des Holzbalkens geführt. Die Anzahl der Elemente betrug dadurch 305.000 Elemente gegenüber 580.000 Elementen bei der Abbildung des ganzen unteren Halbfeldes.

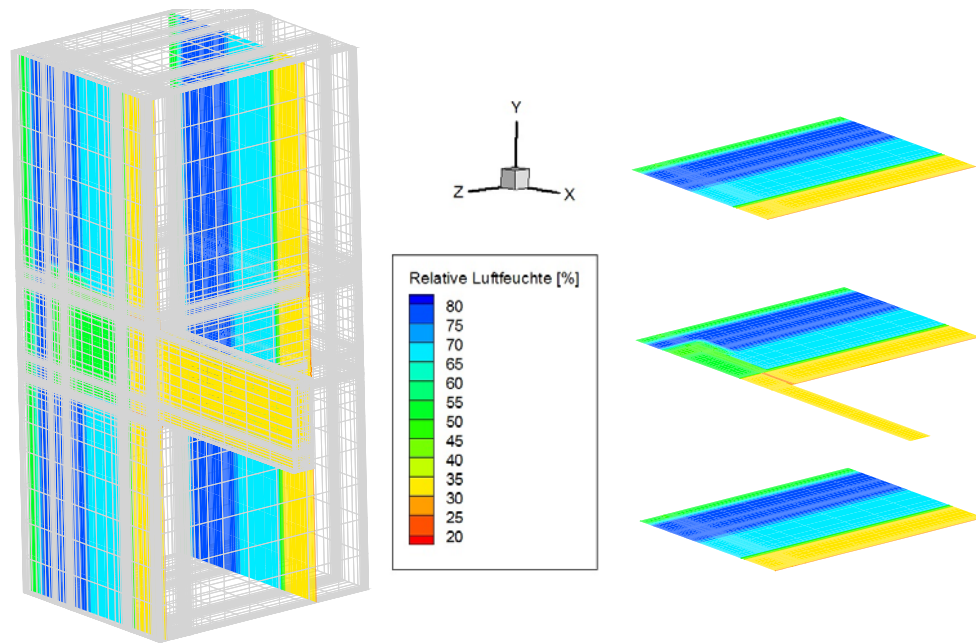


Abb. 179 Screenshot mit der Abbildung der Anfangsbedingungen im Vertikalschnitt und Diskretisierung (links) und Horizontalschnitt (rechts).

Abb. 179 zeigt die Verteilung der Feuchte zu Beginn der Simulationen an zwei Schnittflächen in zwei Vertikalschnitten (links, mit Diskretisierung) und drei Horizontalschnitten an unterschiedlichen Positionen. Aufgrund der vielen Sensoren im Wandaufbau war es möglich die Anfangsfeuchte recht genau zu definieren und mit dem anschließenden Feuchteverlauf abzustimmen. Sie betrug zwischen 35 % in der Ebene des Dämmsystems und des raumexponierten Balkens und 82 % in den mittleren Bereichen des Mauerwerks, wobei um den Balkenkopf selber ungefähr 55 % relativer Luftfeuchte vorherrschten. Dank der langen Temperierung vor dem Start des Versuchs war die Temperaturverteilung mit 19,5 bis 20 °C sehr homogen.

II.1 Vorhabensziele, Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

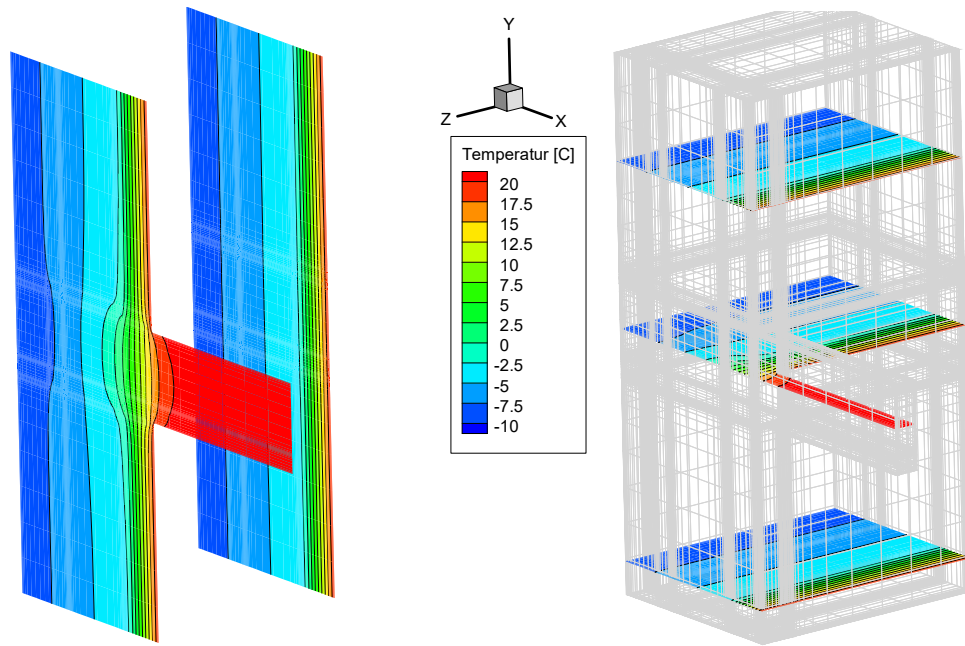


Abb. 180 Temperaturverteilung nach sechs Tagen um den unteren Holzbalken in Feld 2: für zwei Vertikalschnitte (links) und Horizontalschnitte mit Diskretisierung (rechts).

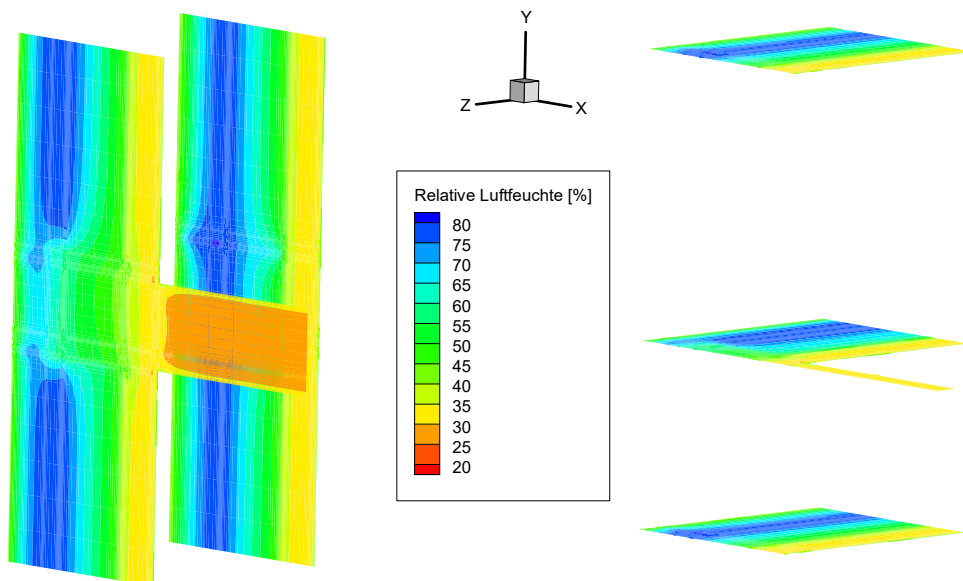


Abb. 181 Verteilung der relativen Luftfeuchte nach sechs Tagen um den unteren Holzbalken in Feld 2: für zwei Flächen Vertikalschnitte (links) und Horizontalschnitte mit Diskretisierung (rechts).

Die Temperaturverteilung der dreidimensionalen Simulation in Abb. 180 gleicht sehr stark der zweidimensionalen Temperaturverteilung in Abb. 174. Durch den Holzbalken wird Wärme in die Konstruktion geleitet, auf der anderen Seite übt die Luftschicht vor dem Stirnholz eine derartige Dämmwirkung aus, dass der Mauerwerksbereich vor dem Stirnholz sehr leicht abgekühlt wird. Auch bei der Verteilung der relativen Feuchte kann zwischen der

dreidimensionalen Berechnung in Abb. 181 und dem zweidimensionalen Pendant kaum ein Unterschied bemerkt werden. Im Folgenden werden die Messdaten mit einer 3D-Simulationvariante verglichen, in der an den Begrenzungsflächen des Balkenaufagers Übergangskoeffizienten angeordnet wurden ($4,5 \text{ W/m}^2\text{K}$ und $2,7 \cdot 10^{-8} \text{ s/m}$).

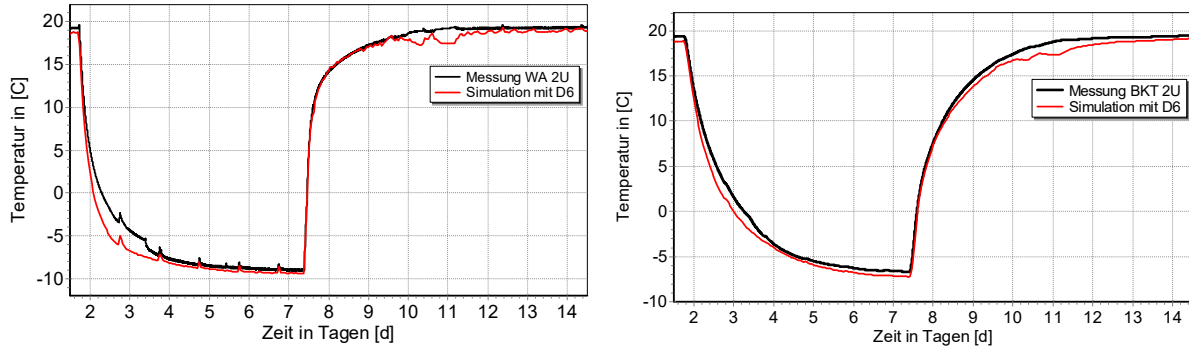


Abb. 182 Vergleich von Messdaten und einer 3D-Simulationsvariante an den Temperatur-Messpunkten nahe Außenoberfläche Mauerwerk (links) und am Ende der Balkenkopftasche (rechts) des unteren Balkens in Feld 2.

Am Messpunkt nahe der Außenoberfläche „WA 2u“ beträgt die Differenz nach sieben Tagen nur 0,4 K (Abb. 182, links). Anschließend folgt die Temperatur exakt den Messwerten beginnt dann aber, wie schon in den zweidimensionalen Simulationen, zu schwingen. Die größere Differenz am zweiten und dritten Tag wird auch in der dreidimensionalen Simulation nicht reduziert werden, dieses Abweichen ist am nächsten Messpunkt („BKT 2u“) nur noch vage zu sehen. An der vertikalen Begrenzungsfläche am Ende des Balkenaufagers, in Abb. 182, rechts, weichen Messung und Simulation nach sieben Tagen um 0,6 K und nach zehn Tagen um 0,7 K ab.

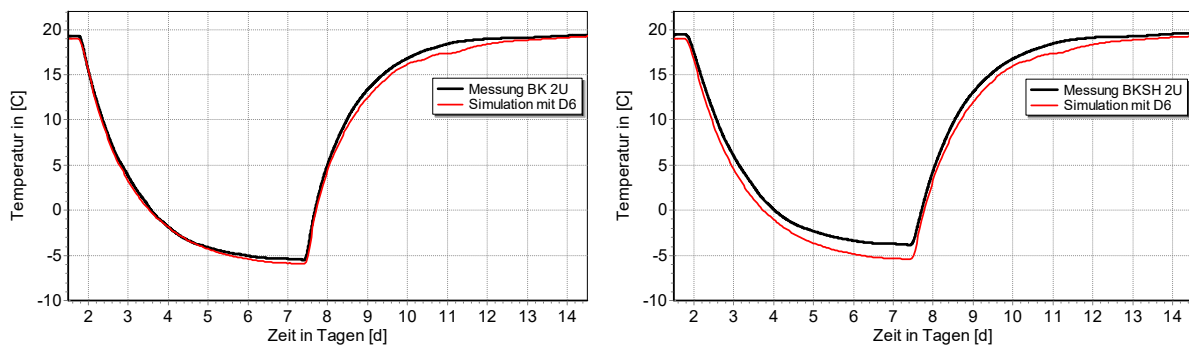


Abb. 183 Vergleich von Messdaten und einer 3D-Simulationsvariante an den Temperatur-Messpunkten auf dem Stirnholz (links) und nahe der Stirnholzoberfläche (rechts) des unteren Balkens in Feld 2.

Auch die Temperatur auf dem Stirnholz („BK 2u“, Abb. 183, links) folgt den Messungen sehr gut, die Kurven weichen nach sieben und zehn Tagen nur um 0,5 bzw. 0,6 K voneinander ab. Im Balkenkopf dagegen, in ungefähr 10 mm Entfernung zum Stirnholz („BKSH 2u“), ist die Differenz wie schon in den zweidimensionalen Simulationen vergleichsweise groß und

summiert sich zu 1,6 K nach sieben und 0,8 K nach zehn Tagen (Abb. 183, rechts) auf. Hier könnte eine Rolle spielen, dass dieser Sensor aus praktischen Gründen nicht ungefähr parallel zu den Isothermen eingebracht werden konnte, im Gegensatz zu allen anderen Temperaturfühlern. Dadurch ist es möglich dass der Sensor über die dünne, metallene Schutzhülle selber Wärme zum Messpunkt am Stirnholz weiter leitet, was in den Simulationen nicht berücksichtigt wurde.

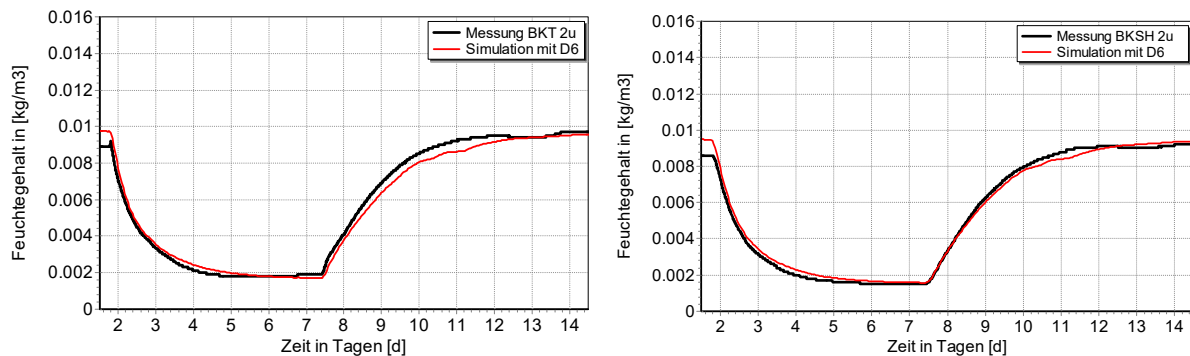


Abb. 184 Vergleich von Messdaten und einer 3D-Simulationsvariante an den Feuchte-Messpunkten Ende Balkenkopftasche (links) und im Balkenkopf (rechts) des unteren Balkens in Feld 2.

Obwohl die Temperaturen im Stirnholz („BKSH 2u“) vergleichsweise deutlich abweichen, zeichnet der simulierte Verlauf der absoluten Luftfeuchte die Messdaten nahezu perfekt nach und weicht nur jeweils 0,1 g/m³ nach sieben und zehn Tagen ab (Abb. 184, rechts). Auch in der Luftschicht vor dem Stirnholz („BKT 2u“) stimmen Messung und Rechnung bei der absoluten Luftfeuchte sehr gut überein. Am Ende der Abkühlphase beträgt der Abstand 0,2 g/m³, nach zehn Tagen 0,5 g/m³ (Abb. 184, links).

Die überwiegend gute bis sehr gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Messdaten ist an den einzelnen Messpositionen bei dreidimensionaler Berechnung nicht besser als bei den zweidimensionalen Simulationen. Eine noch geringere Differenz könnte unter Umständen erzielt werden, wenn weitere Modelle aus DELPHIN 5 in DELPHIN 6 verfügbar sind, z.B. die langwellige Abstrahlung in Luftspalten oder die Berechnung der Wärmeleitfähigkeit von Luft in Abhängigkeit von den anliegenden Temperaturen und der Geometrie, welche an einigen Messpunkten erfolgreich eingesetzt werden konnten.

1.5 Prognosewerkzeuge für holzerstörende Pilze

Die Entwicklung eines neuen Isoplethenbereichmodells auf der Grundlage von Literatúrauswertungen und eigenen Messungen wird im folgenden Kapitel beschrieben. Des Weiteren werden Versuchsaufbauten zur Bestimmung von Wachstumsvoraussetzungen holzerstörender Pilze diskutiert. Die Ergebnisse werden anschließend für die Erstellung eines Pilzprognosewerkzeuges herangezogen. In einem letzten Schritt erfolgt die Anwendung auf ausgewählte Praxisbeispiele.

1.5.1 Modellhafte Beschreibung der Pilzresistenz von Hölzern

Zur modellhaften Beschreibung der Pilzresistenz von Hölzern wurde eine umfangreiche Literatúrauswertung von ökophysiologischen Arbeiten über holzerstörende Pilze durchgeführt, bei der mehr als 285 Publikationen ausgewertet wurden A.1. Die dadurch erarbeitete Datengrundlage hat es ermöglicht, ein Literatur-Isoplethensystem zu generieren. Als Voraussetzungen für das Modell dient die Methodik von [16], bei der Daten aus der Anzucht auf Vollmedien verwendet wurden. Insgesamt wurden Daten von etwa 318 holzabbauenden und lignicolen Pilzarten berücksichtigt. Wie bereits geschildert, bestehen beträchtliche Unsicherheiten unter welchen Randbedingungen von Feuchte und Temperatur holzerstörende Pilze zu wachsen beginnen können. Anhand der unterschiedlichen ökophysiologischen Angaben in der Literatur ergab sich zu Anfang eine relativ groß umrissene Fläche mit einer mehr oder minder breiten Amplitude, was die ökologischen Randbedingungen für das Wachstum der holzerstörenden Pilze betrifft (Abb. 185). Anschließend wurde derjenige Bereich herausgenommen, für den bereits das Wachstum der holzerstörenden Pilze eindeutig als erwiesen gelten kann, d.h. oberhalb von ca. 97 % r.F. (Abb. 186). Schließlich wurden noch Angaben über extrem niedrige Feuchten herausgenommen, die entweder nicht klar nachvollzogen werden können oder bei denen aufgrund der Methodik von einer tatsächlich wesentlich höheren Substratfeuchte ausgegangen werden muss (wie z.B. für [23] diskutiert). In Abb. 187 ist die fertige „Literatur-Isoplethe“ dargestellt. Im Wesentlichen sind die Temperaturgrenzen festgelegt, was die Feuchte betrifft, so besteht bei allgemein guten Wachstumstemperaturen noch eine gewisse Unsicherheit, den Feuchtebereich betreffend zwischen 93-97 % r.F. Dadurch kann bereits ein mehr oder minder enger Bereich definiert werden, in dem die Grenzbedingungen für das Wachstum holzabbauender Pilze erwartet werden (Abb. 187). Durch die aus der Literatur erarbeiteten Grenzbedingungen/Grenzbereiche wird eine wichtige Arbeits- und Vergleichsgrundlage für die durchgeführten Prüfstand-Versuche geschaffen.

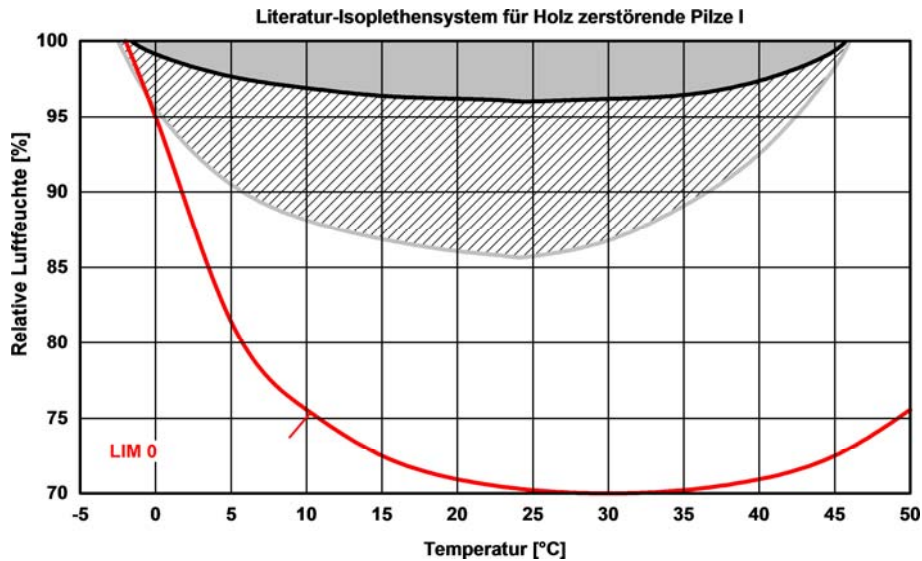


Abb. 185 Das noch ungefilterte Literatur-Isoplethensystem-I bezeichnet den gesamten Bereich, in dem in der Literatur bei Feuchten ≤ 100 % r.F. Wachstum von holzerstörenden Pilzen angegeben wird. Die mit Lim 0 gekennzeichnete Kurve stellt die Wachstumsgrenze für Schimmelpilze auf optimalem Medium dar (aus [15]).

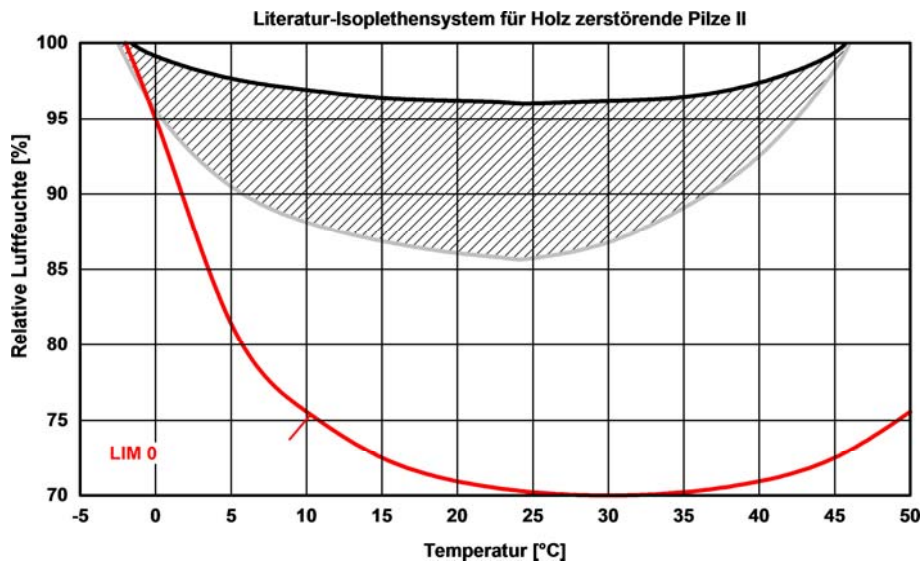


Abb. 186 Im Literatur-Isoplethensystem-II ist ein Bereich oberhalb von 97 % r.F.abgetrennt, für den das Wachstum von holzerstörenden Pilzen bereits als eindeutig erwiesen gelten kann. Die mit Lim 0 gekennzeichnete Kurve stellt die Wachstumsgrenze für Schimmelpilze auf optimalem Medium dar (aus [15]).

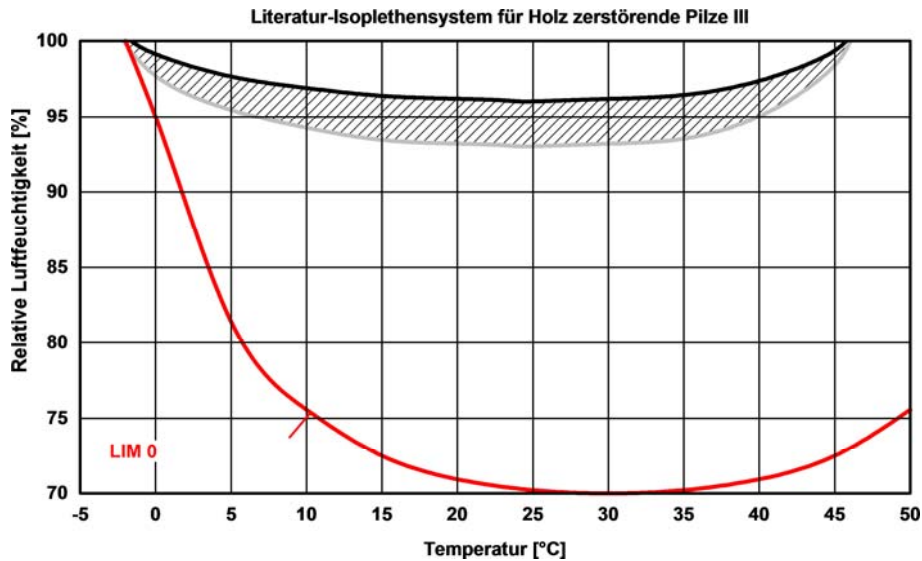


Abb. 187 Das fertige Literatur-Isoplethensystem-III zeigt die aus der Literatur gewonnenen Daten für die Bestimmung der Wachstumsvoraussetzungen von holzabbauenden Pilzen nach der Aussonderung von Angaben über extrem niedrige Feuchten, die entweder nicht klar nachvollzogen werden können oder bei denen aufgrund der Methodik von einer tatsächlich wesentlich höheren Substratfeuchte ausgegangen werden muss. Die mit Lim 0 gekennzeichnete Kurve stellt die Wachstumsgrenze für Schimmelpilze auf optimalem Medium dar (aus [15]).

1.5.2 Prüfstand-Messung von Isoplethenbereichen zur Bestimmung der Wachstumsvoraussetzungen von holzerstörenden Pilzen

In der Literatur existieren stark abweichende Angaben, ab welchen Substrat-/Umgebungsfeuchten ein Wachstum holzabbauender Pilze möglich ist. Aus diesem Grund werden im Rahmen des Vorhabens Messungen durchgeführt, die zum Ziel haben, temperaturabhängig die unterste Feuchtegrenze für das Wachstum gebäuderelevanter, holzabbauender Pilze zu erfassen. Dabei geht es um Feuchte im Material selbst und nicht um physiologische Vorgänge, die bei Vorhandensein einer nahen zusätzlichen Feuchtequelle möglich sind. Die Bestimmung der Wachstumsvoraussetzungen für holzabbauende Pilze erfolgt mit einem speziell am Fraunhofer-Institut für Bauphysik entwickelten Prüfstand (z.B. [24]-[26]). Da die holzabbauenden Pilze im Gegensatz zu den meisten Schimmelpilzen nicht deutlich an der Oberfläche und damit oft nicht direkt sichtbar auftreten, werden zusätzliche Methoden zur Bestimmung von deren Aktivität eingesetzt. Traditionell wird die Aktivität holzerstörender Pilze über den Masseabbau des Holzes bestimmt. Im Bereich der Minimal-Voraussetzungen für das Wachstum dieser Organismen ist jedoch mit einer relativ geringen Abnahme der Masse zu rechnen und zum anderen würde eine Darr-Trocknung der Holzprüfkörper vor dem Beimpfen eine sehr starke Störung des Versuchsablaufs bedeuten. Alternativ wurde daher die Messung der CO₂-Abgabe durch die Mikroorganismen installiert, wie z.B. in [27] dargestellt. Abb. 188 zeigt schematisch den Aufbau des Setups.

II.1 Vorhabensziele, Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

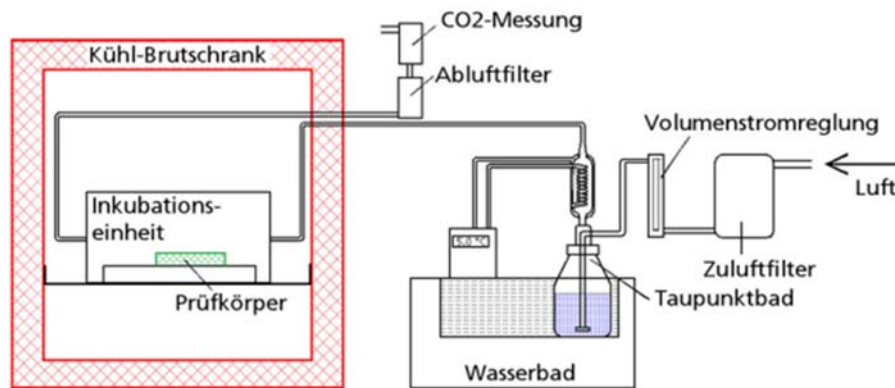


Abb. 188 Schematische Darstellung des Mess-Setups.

Das Prinzip besteht aus einer Verbindung von einem Kühlbrutschrank mit einem durch ein Taupunktbad geleiteten Luftstrom (Abb. 189). Bei einer Temperatur T_1 wird der Luftstrom im Taupunktbad mit Wasserdampf gesättigt. Dieser gelangt anschließend in die Inkubationsbox, in der eine etwas höhere Temperatur T_2 bereitgestellt wird. Entsprechend der Temperaturerhöhung stellt sich dann eine bestimmte Luftfeuchte ein. Aufgrund des verwendeten Prinzips können Temperatur und Luftfeuchte kontrolliert werden.



Abb. 189 Spezielle Versuchseinrichtung zur Bestimmung von produktspezifischen Isoplethenbereichen zur Charakterisierung der Resistenz gegenüber Schimmelbefall.

Grundsätzlich erlaubt das Prinzip auch das Fahren instationärer Zustände. Jedoch wird der Versuch in der Regel stationär ausgeführt, damit entsprechende Basisdaten gewonnen werden können, ab welcher Kombination von Temperatur und relativer Feuchte ein Organismus an einem bestimmten Substrat zu wachsen beginnen kann. Um die Aktivität der

holzabbauenden Pilze messtechnisch darstellen zu können, wird am Setup der CO₂-Gehalt der Luft am Eingang und am Ausgang gemessen (Abb. 190).



Abb. 190 Messung der metabolischen Aktivität mittels CO₂-Sensoren.

Da es sich bei Holz um ein sehr inhomogenes und in Bezug auf seine Materialkennwerte breit streuendes Material handelt, wurde auf eine genügend große Anzahl von Proben geachtet. Entsprechend den Vorgaben sind die Versuchsreihen relativ langwierig (mindestens 100 Tage je Durchgang). Insgesamt konnten im modifizierten Setup erfolgreich drei Messdurchgänge gefahren werden. Als Prüfpilze wurden verschiedene, als besonders verbreitet und ökologisch tolerante Formen, bekannte Arten festgelegt, *Coniophora puteana*, *Donkioporia expansa* und *Serpula lacrymans* (Abb. 191). Es wurden bekannte Prüfstämme ausgewählt und erworben.



Abb. 191 Kellerschwamm (*Coniophora puteana*), Eichenporling (*Donkioporia expansa*), Hausschwamm (*Serpula lacrymans*) – auf den Schalen sind auch die Bezeichnungen der Stammsammlungen angegeben.

II.1 Vorhabensziele, Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

Neben einem mit bloßem Auge deutlich sichtbaren Pilzwachstum bei einer Luftfeuchtigkeit von 98-100 % und einer Temperatur von 23 °C (Abb. 192) konnte ein Wachstum der Testpilze im Fichtenholz bei weiteren Randbedingungen nachgewiesen werden.



Abb. 192 Wachstum bei 98-100 % Luftfeuchtigkeit und 23 °C Temperatur.

In aufeinander folgenden Messdurchgängen werden die Randbedingungen für das Wachstum holzabbauender Pilze eingegrenzt. Zur Absicherung und Bestätigung werden zusätzlich zu den Prüfstandmessungen weitere Verfahren herangezogen, um gegebenenfalls eine Aktivität der Pilze nachzuweisen. Ein Befall von Holz durch Lignocellulose abbauende Pilze kann gut durch mikroskopische Verfahren dokumentiert werden (z.B. [28]-[30]). Mit geeigneten Färbemethoden können eindringende Pilzhyphen bzw. eine chemische Veränderung betroffener Zellwände deutlich hervorgehoben werden (Abb. 193).

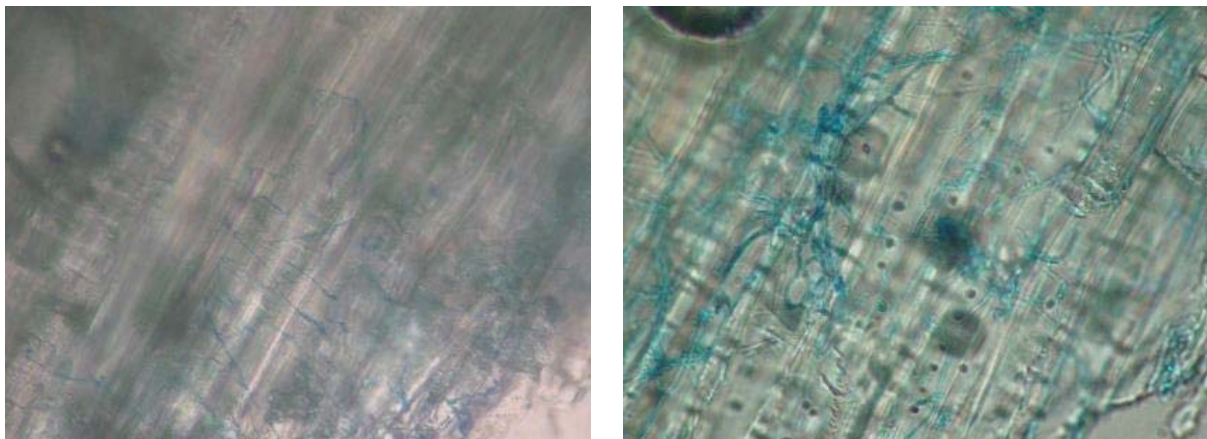


Abb. 193 Mikroskopischer Befund, Randbedingungen: 10 °C, 97 % r.F.

Die gravimetrische Bestimmung von Substanzverlusten bei Angriff von holzabbauenden Organismen auf Vollholz gehört, wie oben bereits ausgeführt, zu den Standardverfahren der Holzprüfung (z.B. DIN CEN/TS 15083-1: 2005; DIN EN 350-1: 1994). Im Rahmen des Vorhabens können gravimetrische Verfahren jedoch nur eingeschränkt angewendet werden (z.B. als Anfangs- und Endpunktbestimmung). In jüngster Zeit werden fortschreitend neue Erkenntnisse gewonnen, die die Möglichkeiten der molekulargenetischen Zuordnung von Lignocellulose abbauenden Pilzen weiter verfeinern [31]-[35]. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, verschiedene molekulare Marker zur Bestimmung der Aktivität (Quantität) von holzabbauenden Pilzen heranzuziehen. Für Pilze allgemein bietet sich z.B. für eine quantitative Abschätzung eine Ergosterol-Bestimmung an. Unter bestimmten Voraussetzungen eignet sich Ergosterol auch zur quantitativen Abschätzung von holzabbauenden Pilzen [36]-[39]. In analoger Weise kann auch Chitin herangezogen werden [37], [39]. Um die respiratorische Aktivität von Pilzen unter verschiedenen Randbedingungen (Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit) zu messen, wurde die Microcalorimetrie bereits eingesetzt [40], [41]. Dieses innovative und zukunftsweisende Verfahren sollte auf seine Eignung für den Einsatz zur Bestimmung der metabolischen Aktivität bei holzabbauenden Pilzen überprüft werden. Dies überschreitet jedoch den Rahmen dieses Projektes.

1.5.3 Anzüchtung von Sporen holzerstörender Pilze

Für Modellversuche wurden Holzspäne mit holzerstörenden Pilzen beimpft und bei 100 % r.F. bei Raumtemperatur inkubiert (Abb. 194). Dort haben sich nach geraumer Zeit (>1 Jahr) erste Fruchtkörper gebildet (Abb. 195). Ursprünglich sollte die Fruchtkörperzucht für die Gewinnung der keimfähigen Sporen herangezogen werden. Bei der Durchführung der Anzuchtversuche wurde aber deutlich, dass die Fruchtkörperbildung leider so langsam erfolgt, dass damit weder die benötigten Mengen, noch der gegebene Zeitplan erreicht werden können. Daher wurde auf eine alternative Beimpfungsmethode umgestellt, die im folgenden Abschnitt dargestellt wird.



Abb. 194 Mit *Coniophora puteana* (Kellerschwamm) beimpfte Holzspäne.



Abb. 195 Erste Fruchtkörper der Testpilze (links: *Neolentinus suffrutescens*, rechts: *Coniophora puteana*, Kellerschwamm).

1.5.4 Beimpfung der Prüfkörper und Entwicklung einer neuen Beimpfungsmethode

Im ersten und zweiten Durchgang bestand die eine Hälfte der Prüfkörper aus Fichte (*Picea abies*) und die andere aus Eiche (*Quercus robur*). Beide Holzarten waren unbehandelt, luftgetrocknet und stammten aus dem Alpenvorland.

Für den ersten Durchgang wurden die Holzstücke beimpft, indem Bohrlöcher im Holz mit Mycel bestückt wurden (Abb. 196).

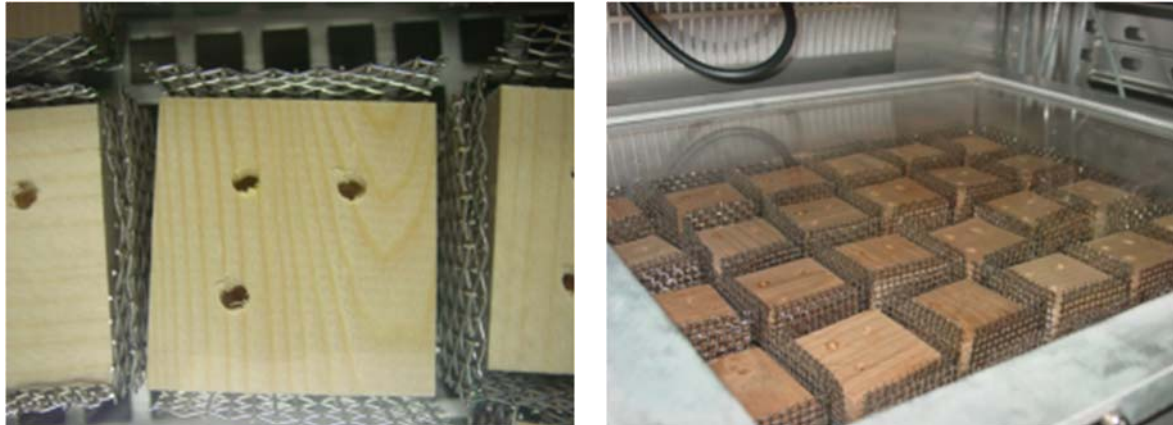


Abb. 196 Links: Fichtenholzstücke mit Bohrlöchern. Rechts: Beimpfung der Bohrlöcher mit Mycelstücken.

Um das Anwachsen der Prüfpilze zu erleichtern wurde eine neue Beimpfungsmethode entwickelt. Hierbei wurden die Prüfkörper nicht mehr alleine mit Mycelstücken beimpft, sondern die Testpilze wurden zuerst auf einem Medium mit Holzstäbchen etabliert (Abb. 197). Nach einem erfolgreichen Anwachsen der Testpilze auf den Holzstäbchen wurden im zweiten Durchgang die Bohrlöcher mit den bewachsenen Holzstäbchen bestückt (Abb. 198).

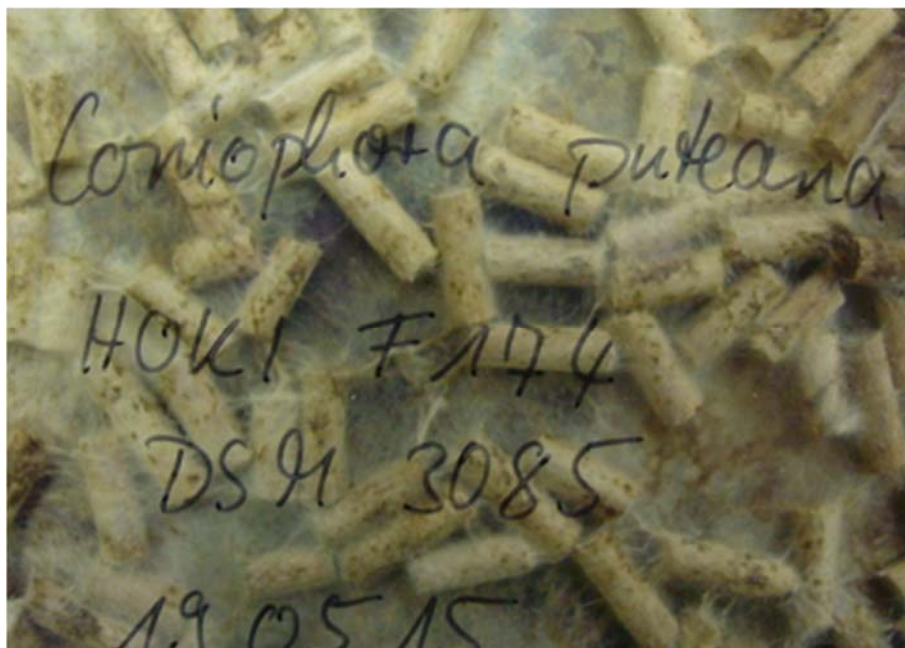


Abb. 197 Anzucht auf Holzstäbchen von *Coniophora puteana*, Kellerschwamm.



Abb. 198 Beimpfung mit bewachsenen Holzstäbchen.

1.5.5 Prüfstand-Messung metabolischer Aktivität holzerstörender Pilze mit Schwerpunkt der Feststellung des Beginn des Wachstums

Zur Messung der metabolischen Aktivität wurde ein Prüfstand eingerichtet, der im Aufbau dem Isoplethenprüfstand unter Punkt 1.5.2 entspricht, jedoch aufgrund seiner Dichtigkeit gegen Gase und angepasster Massenflüsse zur Messung von CO₂-Emissionen aus den Testkammern geeignet ist. Zur Validierung des Messverfahrens wurde ein Testlauf in einem erweiterten Setup durchgeführt (Abb. 199). Mit Malzextrakt gefüllte und mit Schimmelpilzen beimpfte Agarplatten wurden in der Versuchseinrichtung inkubiert und die CO₂-Entwicklung gemessen (Abb. 200). Sehr deutlich ist hierbei der hohe Anstieg der CO₂-Konzentration während der log-Phase des Wachstums der Schimmelpilze zu sehen, während in der Plateau-Phase die metabolisch Aktivität und damit der CO₂-Ausstoß der Schimmelpilze sichtbar vermindert ist.

Da das Wachstum der holzerstörenden Pilze erwartungsgemäß deutlich langsamer erfolgt, sollte das Erreichen einer Plateau-Phase während des Versuchszeitraumes erwartungsgemäß nicht eintreten.



Abb. 199 Erweitertes Setup: Testlauf mit beimpften Agarplatten.

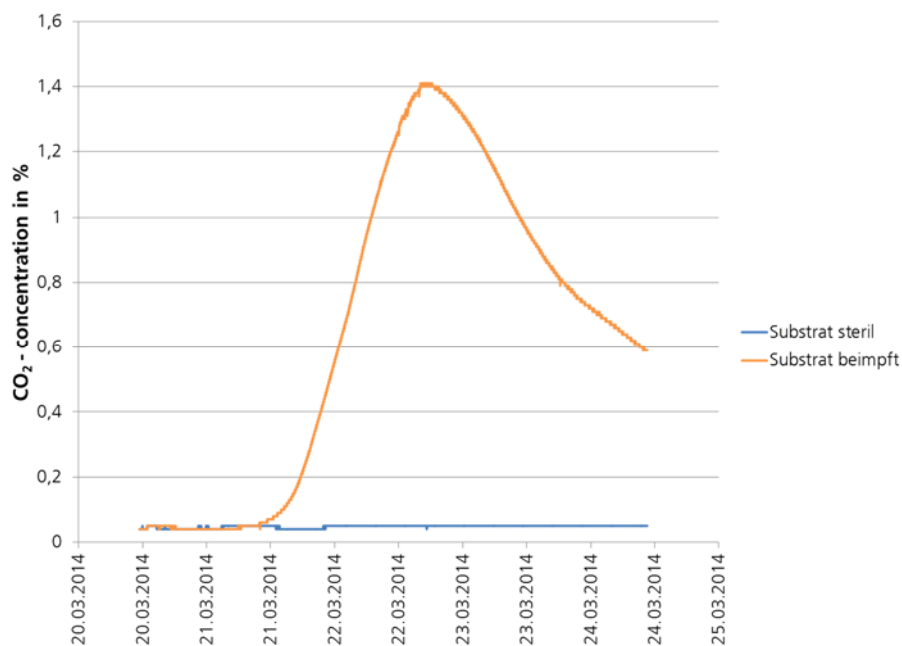


Abb. 200 Messung der CO₂-Entwicklung, Vergleich zwischen beimpften und sterilen Agarplatten.

Die metabolischen Aktivitäten der holzerstörenden Pilze ließen sich über die CO₂-Messung nachvollziehen.

Die in Abb. 201 exemplarisch dargestellten Daten aus dem zweiten Durchgang zeigen einen um ca. 80 ppm erhöhten CO₂-Gehalt der Probe mit 97 % r.F., einen um ca. 60 ppm erhöhten

II.1 Vorhabensziele, Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

CO₂-Gehalt bei den Proben mit 96 % bzw. 94 % r.F. und (im Rahmen von Messungenauigkeit und Rauschen) nicht voneinander abweichende Messwerte bei den trockeneren Proben. Anhand der Aufzeichnungen konnte validiert werden, dass holzerstörende Pilze bereits ab 94 % r.F. metabolisch aktiv sind. Damit ist auch belegt worden, dass eine Fasersättigung oder flüssiges Wasser in der Holzfaser nicht für die Aktivität der Pilze nötig ist.

In Abb. 202 sind Werte der CO₂-Messung eines Tages aus dem dritten Durchgang dargestellt. Sowohl bei 24 °C als auch bei 10 °C ist bei 95 % r.F. eine deutlich erhöhte metabolische Aktivität erkennbar.

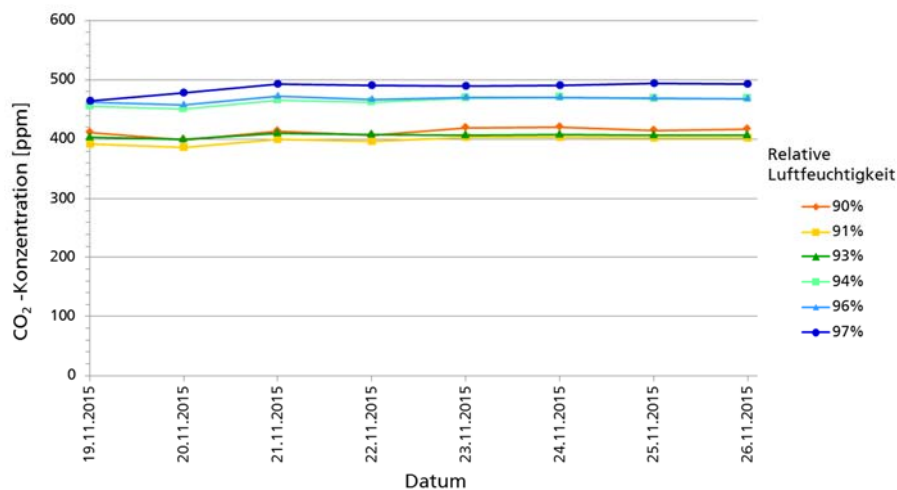


Abb. 201 CO₂-Messwerte in ppm, exemplarisch Daten für 10 °C vom 19.11.2015 bis zum 26.11.2015 (Durchgang 2).

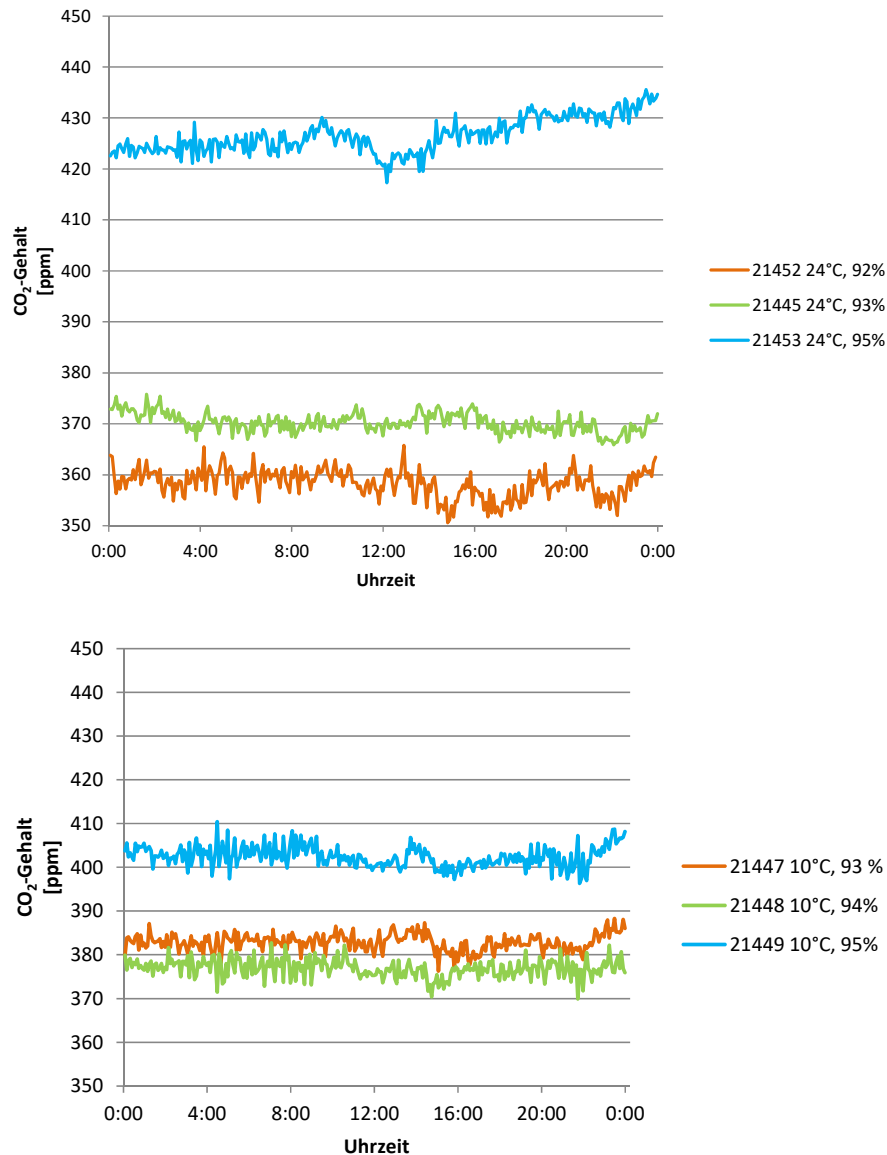


Abb. 202 CO₂-Messwerte in ppm, exemplarisch Daten (für 24 °C oben und für 10 °C unten) vom 07.12.2016 (Durchgang 3).

Die Daten der CO₂-Messungen wurden im Abgleich mit Literaturdaten zur Errechnung eines neuen, verfeinerten Isoplethensystems verwendet. Dieses ist in Abb. 203 dargestellt. Somit konnte eine Präzisierung der Basisdaten für die Prognose geleistet werden. Der unsichere Bereich konnte bis auf ein schmales Band reduziert werden. Anhand von Literaturangaben und darin angeführten Messungen Dritter kann ein Wachstum holzerstörender Pilze knapp unterhalb der gemessenen Werte nicht gänzlich ausgeschlossen werden (z.B.[42]). Aus Gründen der Vorsorge empfiehlt es sich daher von der ungünstigeren Voraussetzung auszugehen. Demensprechend zeigt Abb.204 die nach diesen Daten festgelegte Grenzisoplethe. Damit sind die Grenzbedingungen von Temperatur und Feuchte für holzerstörende Pilze in bisher noch nicht gekannter Genauigkeit festgelegt und stehen für Berechnungen und mathematische Modelle zur Verfügung.

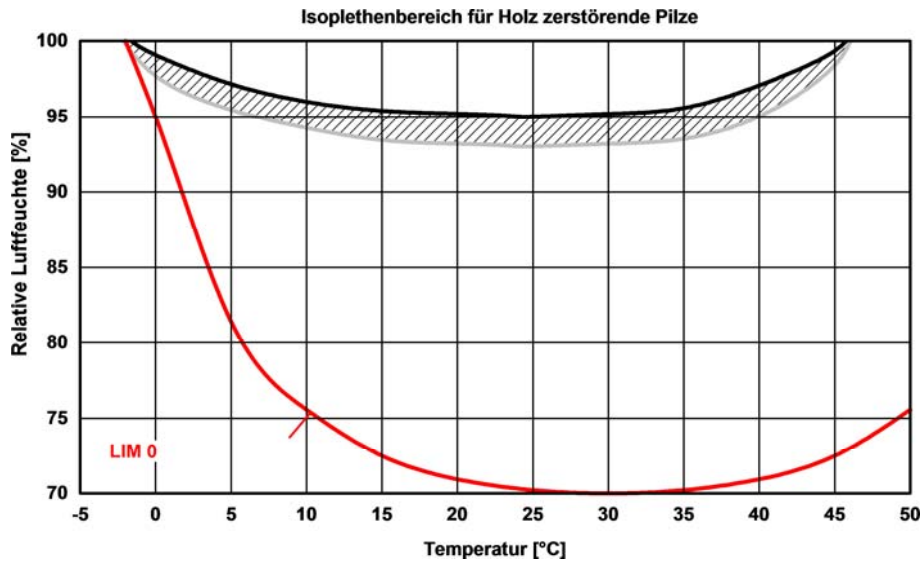


Abb. 203 Isoplethenbereich für holzzertörende Pilze, aus Literaturdaten kombiniert mit eigenen Messungen.

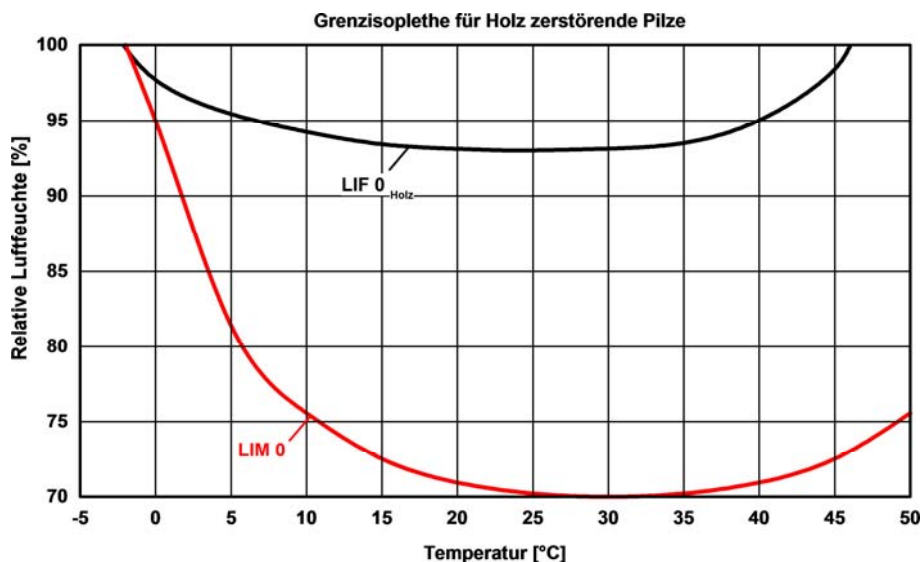


Abb. 204 Grenzisoplethe für holzzertörende Pilze, aus Literaturdaten kombiniert mit eigenen Messungen.

1.5.6 Vergleich von Prognosewerkzeugen für holzzerstörende Pilze

Für die Vorhersage des Wachstums von holzabbauenden Pilzen werden nachfolgend drei verschiedene Modellansätze kurz vorgestellt, die aus der umfangreichen Literaturauswertung sowie den am Fraunhofer IBP durchgeführten labortechnischen Untersuchungen resultieren. Bei den ersten beiden zur Verfügung stehenden Ansätzen handelt es sich um die klassische Bewertung des Risikos für Pilzwachstum nach DIN 68800 [3] und um die Bewertungskriterien nach dem WTA-Merkblatt 6-8 [1]. Der dritte Ansatz basiert auf dem biohygrothermischen Simulationsmodell WUFI® Bio. Für die Berechnungen zur Pilzbildung von holzzerstörenden Pilzen und deren Vermeidung wurde im Rahmen des

Forschungsprojektes dieses Modell auf die Version WUFI® HzP erweitert. Das Kürzel HzP steht hier für **holzzerstörende Pilze**.

1.5.6.1 Klassische Bewertungskriterien

Die klassische Bewertung des Risikos für Pilzwachstum an Holzbauteilen beruht auf dem Ansatz, dass die vorliegende Holzfeuchte über 20 M.-% und die Temperatur höher als 15 °C liegt. Das Modell geht davon aus, dass sich holzabbauende Pilze entwickeln, wenn die Grenzwerte ≥ 20 M.-% und ≥ 15 °C im Holz längerfristig überschritten werden. In [5] wird genau erläutert, woher diese Werte kommen und dass diese beiden Grenzen längerfristig überschritten werden müssen.

1.5.6.2 WTA-Ansatz

Im Rahmen der WTA-Arbeitsgruppe „Hygrothermische Bemessung von Holzbauteilen“ wurde ein neues WTA-Merkblatt erarbeitet, das eine Richtlinie für die Bewertung von holzerstörenden Pilzen beinhaltet. Hierin wird festgelegt, dass bei Massivholzbauteilen die relative Porenluftfeuchte im Holz 95 % bei 0 °C und 86 % bei 30 °C in der maßgebenden 10 mm dicken Schicht im Tagesmittel nicht überschritten werden darf [1]. Abb. 205 zeigt die festgelegte Grenzkurve der Porenluftfeuchte und der Temperatur im Holz, die im Tagesmittel nicht überschritten werden darf.

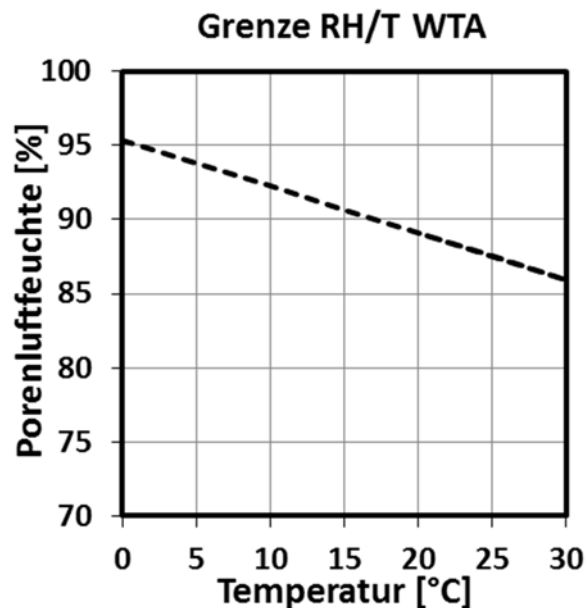


Abb. 205 Grenzkurve der relativen Porenluftfeuchte für die maßgebende 10 mm Schicht im Holz, die im Tagesmittel nicht überschritten werden darf [1].

1.5.6.3 Biohygrothermisches Simulationstool WUFI® HzP (HolzZerstörende Pilze)

Mit dem biohygrothermischen Modell WUFI® HzP wird der Feuchtehaushalt einer Modellschicht von holzerstörenden Pilzen berechnet. Bei der Berechnung berücksichtigt das Modell die biologischen Wachstumsvoraussetzungen der holzabbauenden Pilze – relative

Feuchte und Temperatur. In WUFI® HzP werden die unterschiedlichen Kriterien für das Wachstum von holzerstörenden Pilzen aus der Literatur, nach WTA-Merkblatt 6-8 und die gemessenen Isoplethenkurven von holzerstörenden Pilzen implementiert. In Abb. 206 ist die Benutzeroberfläche des Softwaretools dargestellt. Die linke Grafik in Abb. 206 zeigt die ausgewählte Isoplethenkurve nach WTA [1]. Die instationären Randbedingungen berücksichtigen mögliches zwischenzeitliches Austrocknen der Spore und damit verzögertes Pilzwachstum.

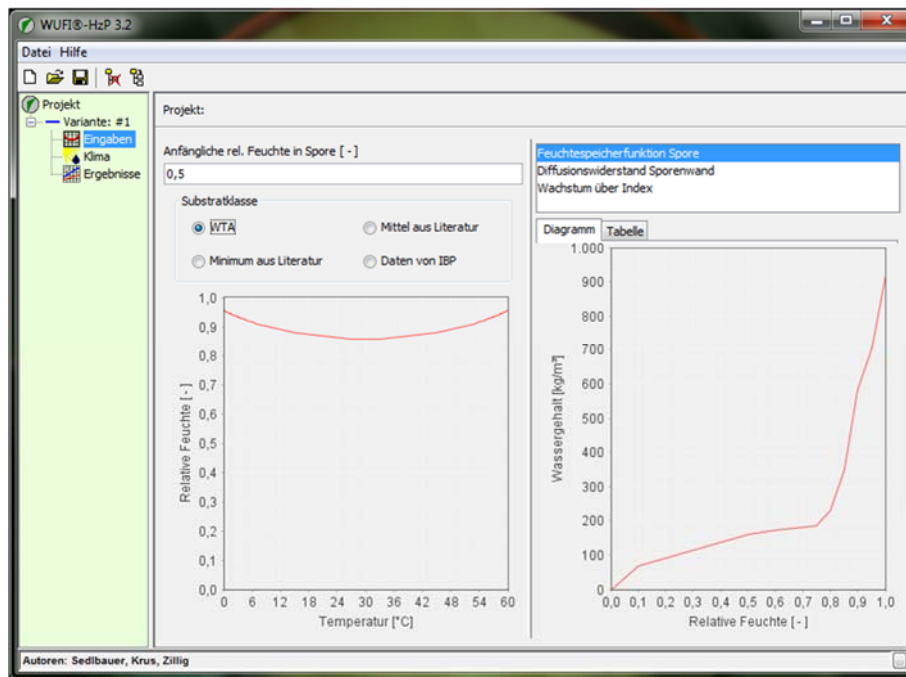


Abb. 206 Benutzeroberfläche des biohygrothermischen Simulationstools WUFI® HzP mit Darstellung der Isoplethenkurve nach der WTA-Richtlinie [1].

Die Ausgabe der Rechenergebnisse des biohygrothermischen Modells WUFI® HzP zeigt das Wachstum von holzerstörenden Pilzen in mm über den Berechnungszeitraum auf. Durch die Implementierung der unterschiedlichen Wachstumskriterien ist es mit diesem Modell möglich, das Risiko von holzerstörenden Pilzen für kritische Einbausituationen im Gebäude vergleichend zu bewerten. In Abb. 207 sind die verschiedenen Grenzkurven für das Wachstum von holzabbauenden Pilzen in Abhängigkeit der Temperatur und der relativen Feuchte dargestellt, wie sie in WUFI® HzP implementiert wurden. Hierbei entspricht die grüne Linie der Isoplethenlinie nach den Vorgaben der WTA [1], die untere cyanfarbene Kurve entspricht den Minimalwerten aus der Literatur, die blaue Linie wird als Mittelwert aus der Literatur angesetzt und die schwarze Linie bildet die Wachstumsgrenze anhand der am Fraunhofer IBP gemessenen Werte.

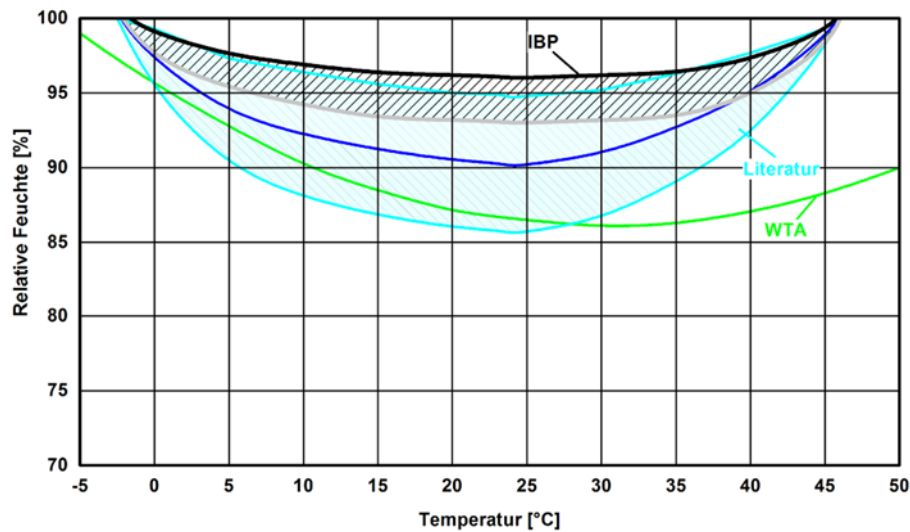


Abb. 207 Hinterlegte Grenzkurven für das Wachstum von holzabbauenden Pilzen im biohygrothermischen Modell WUFI® HzP.

1.5.7 Anwendungsbeispiele der hygrothermischen Simulationswerkzeuge zur Bewertung des Wachstums von holzerstörenden Pilzen

In dem nachfolgenden Abschnitt werden anhand von Beispielberechnungen die oben aufgeführten Bewertungskriterien angewendet. Bei einem Beispiel handelt es sich um ein begrüntes Flachdach, das mit eindimensionaler Berechnung beurteilt werden kann, und beim zweiten Beispiel um die Beurteilung der Feuchtesituation eines Holzbalkenkopfes, wofür eine zweidimensionale Berechnung erfolgte. Einerseits werden die Berechnungsergebnisse nach den klassischen Bewertungsrichtlinien nach DIN 68800 [3] und andererseits nach den in WUFI® HzP implementierten Wachstumsgrenzen bewertet. Zusätzlich wurden die beiden Anwendungsfälle mithilfe der von D. Kehl entwickelten Software zur Umsetzung der WTA-Kriterien beurteilt.

1.5.7.1 Beispiel 1: „Begrüntes Flachdach einer Schule“

Für die erste beispielhafte Anwendung des Prognosewerkzeugs zu holzabbauenden Pilzen wird ein Flachdach mit Begrünung an einer Schule gewählt. Hierbei wird das Risiko von Pilzwachstum mit verschiedenen Szenarien betrachtet, wie mit und ohne Verschattung sowie mit und ohne Feuchteintrag in die Konstruktion.

Die rechnerischen Untersuchungen von gekoppelten Wärme- und Feuchtetransportvorgängen in der Flachdachkonstruktion werden mit dem am Fraunhofer IBP entwickelten und mehrfach verifizierten eindimensionalen Simulationsprogramm WUFI® Pro [2] durchgeführt. Des Weiteren wird das Wachstum von holzabbauenden Pilzen mit dem Vorhersagemodell WUFI® HzP ermittelt. Für die Bewertung der Temperatur- und Feuchteverhältnisse, sowie für das Pilzwachstum, werden an kritischen Positionen in der Konstruktion Monitorpositionen (Abb. 208) gesetzt, mit deren Hilfe die hygrothermischen Bedingungen punktuell bewertet werden können.

II.1 Vorhabensziele, Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

Als außen anliegendes Klima wird das Holzkirchner Feuchtereferenzjahr mit und ohne Direkteinstrahlung (entspricht somit ohne und mit Verschattung) angesetzt. Innen wird eine normale Feuchtelast zugrunde gelegt. Dies entspricht einem sinusförmigen Verlauf der Temperatur zwischen 22 °C im Juni und 20 °C im Dezember sowie einer relativen Feuchte zwischen 60 % im August und 40 % im Februar. Die angesetzten Wärmeübergangskoeffizienten sind für das Dach mit 19 W/m²K und innenseitig jeweils mit 8 W/m²K berücksichtigt. Das Dach wird mit einer Neigung von 1 ° angesetzt. Die Dachkonstruktion wird mit einer kurzwelligen Absorptionszahl von 0,6 und einer langwelligen Emissionszahl von 0,9 angegeben. Des Weiteren werden die Berechnungen mit der expliziten Strahlungsbilanz berechnet, da die hierfür wesentlichen Strahlungsdaten in dem gewählten Klimadatensatz vorhanden sind und somit die Temperaturverhältnisse realistischer simuliert werden können.

Der Anfangswassergehalt der einzelnen Materialien wird entsprechend der Ausgleichsfeuchte bei 80 % r.F. angenommen. Die Berechnungen werden beginnend im Januar für einen Zeitraum von zehn Jahren durchgeführt.

In Abb. 208 ist der Aufbau des betrachteten Flachdachs mit Angabe der eingesetzten Materialien und deren Schichtdicke dargestellt. Des Weiteren ist in der Grafik gekennzeichnet, welche Monitorpositionen (blaue Punkte) ausgewertet werden und in welcher Aufbauebene ein Feuchteeintrag von 250 g/m² im Winter rechnerisch angesetzt wird. Dieser Feuchteeintrag ist bedingt durch die Vorgaben in der DIN 68800-2 [3], in der festgelegt ist, dass bei einer Dachkonstruktion trotz Abdichtung der Konstruktion aus Sicherheitsgründen mit einem zusätzlichen Feuchteeintrag von 250 g/m² in den Wintermonaten zu rechnen ist.

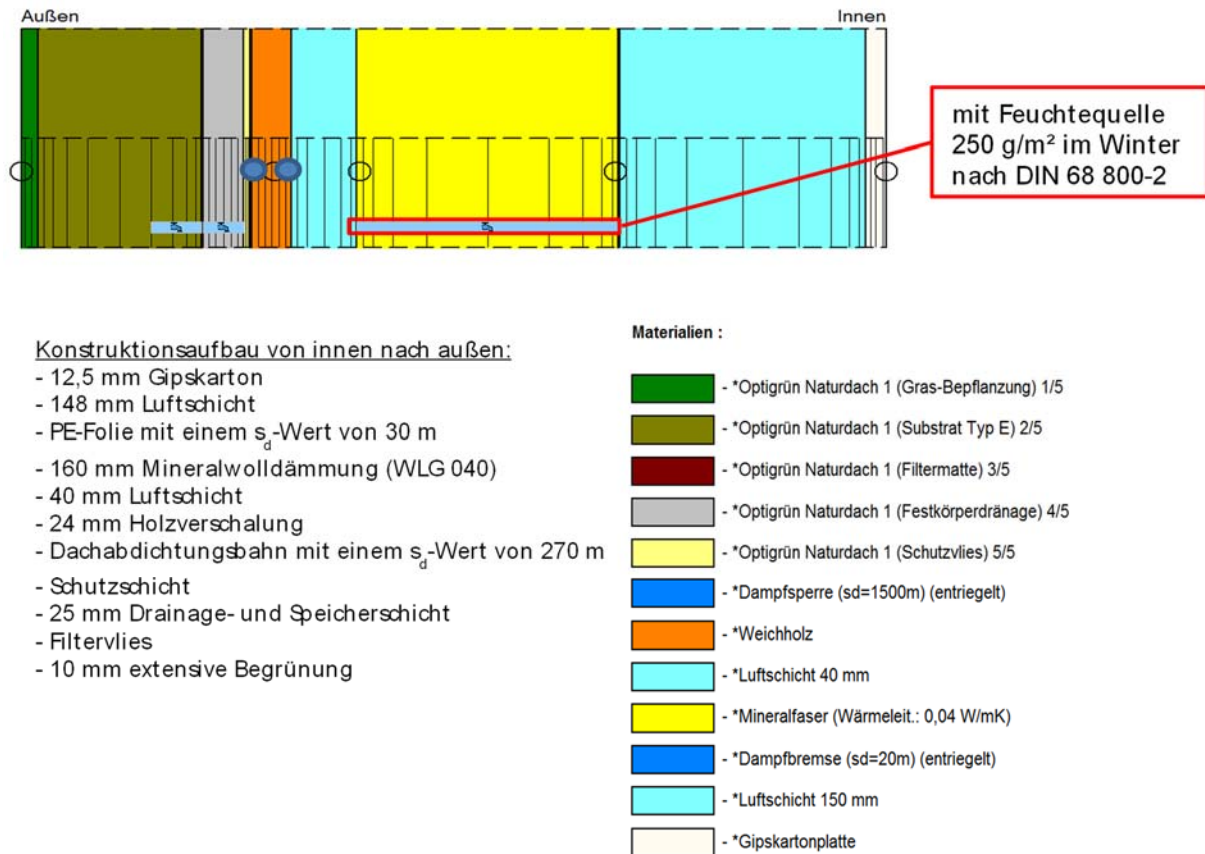


Abb. 208 Konstruktiver Aufbau eines begrünten Flachdaches mit Kennzeichnung der Monitorpositionen und möglicher Feuchtequelle sowie Beschreibung des Aufbaus mit Materialangaben.

Mithilfe der Simulation werden die hygrothermischen Verhältnisse für einen Zeitraum von zehn Jahren berechnet. Nachfolgend sind die berechneten Ergebnisse der verschatteten und der sonnenbeschienenen Flachdachkonstruktion sowie die Varianten mit und ohne Feuchteeintrag im Winter in Abb. 209 abgebildet. Für die Auswertung und Bewertung sind die Wassergehalte in der Holzschalung jeweils im Vergleich mit und ohne Sonneneinstrahlung ohne Feuchteeintrag in Abb. 209 oben und mit zusätzlichem Feuchteeintrag in Abb. 209 unten dargestellt. Bei der dichten Konstruktion zeigt sich, dass der Wassergehalt in der Holzschalung bei einem verschatteten Dach bereits nach ca. fünf Jahren über den als kritische bezeichneten Wert von 80 kg/m³ ansteigt. Bei einem dichten Flachdach mit Sonneneinstrahlung steigt der Wassergehalt im Laufe der zehn Jahre ebenfalls kontinuierlich an, aber hier kommt es in den zehn Jahren nur in den Wintermonaten zu einem Wassergehalt über 80 kg/m³, in den Sommermonaten trocknet die Konstruktion wieder etwas aus, sodass der Wassergehalt unterhalb den kritischen 80 kg/m³ liegt. Erst ab dem zehnten Jahr zeigt sich, dass auch in der sonnenbeschienenen Dachkonstruktion der Wassergehalt ganzjährig über den kritischen Wassergehalt von 20 M.-% (entspricht 80 kg/m³) in der Holzschalung ansteigt. Der Einfluss eines zusätzlichen Feuchteeintrags von 250 g/m² in den Wintermonaten auf die betrachtete Flachdachkonstruktion ist in Abb. 209 unten zu erkennen. Hier zeigt sich, dass der Wassergehalt in der Holzschalung innerhalb

von zwei Jahren einen kritischen Wassergehalt von 20 M.-% dauerhaft überschreitet, unabhängig davon, ob die Dachfläche verschattet ist oder nicht.

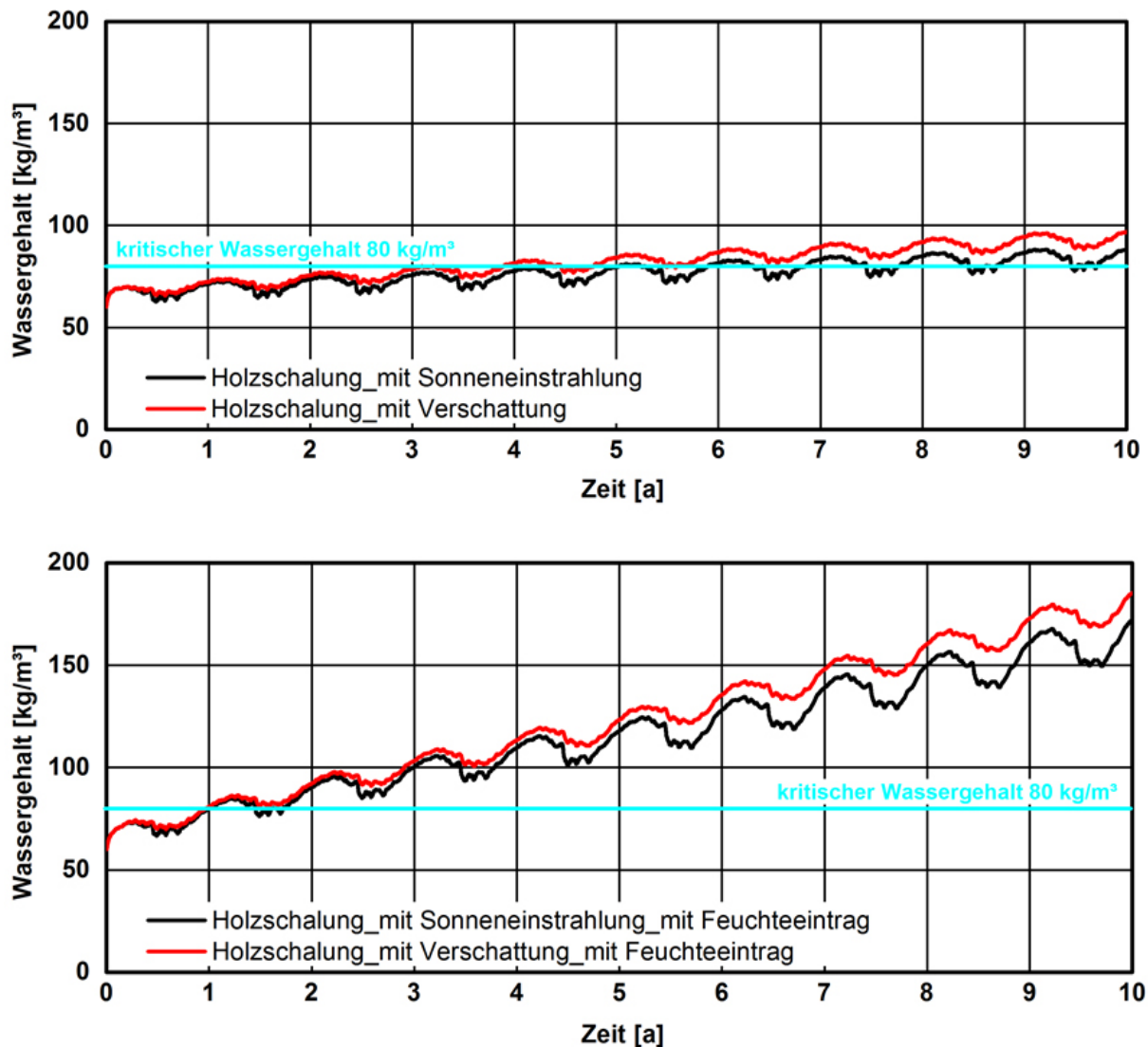


Abb. 209 Zeitlicher Verlauf der Wassergehalte in der Holzschalung bei Verschattung und Sonneneinstrahlung innerhalb von zehn Jahren. Oben: ohne Feuchteeintrag in den Wintermonaten. Unten: mit zusätzlichem Feuchteeintrag von 250 g/m² im Winter.

Aufbauend auf diesen Berechnungsergebnissen werden die Temperatur- und Feuchteverhältnisse in der Holzschalung in das zur Verfügung stehende Prognosetool zur Beurteilung des Wachstums von holzerstörenden Pilzen eingelesen.

In Tab. 25 sind die Anzahl der Stunden bzw. Tage aufgelistet, an denen in der Holzschalung der Wassergehalt über 20 M.-% liegt und gleichzeitig eine Temperatur von $\geq 15^\circ\text{C}$ vorliegt. Werden die Tage, an denen durchgängig das Wachstumskriterium erfüllt ist betrachtet, zeigt sich, dass hier mit einem Faktor von etwa acht die Verschattung erwartungsgemäß einen sehr deutlichen negativen Einfluss auf das Wachstumsrisiko hat. Diese Auswertung zeigt auch, dass mit einem Feuchteeintrag im Winter in der Konstruktion, wie aus dem berechneten Feuchteverlauf gemäß Abb. 209 unten zu erwarten, das Wachstumsrisiko bei

dieser relativ diffusionsdichten Konstruktion stark ansteigt. Interessanterweise ergeben sich bei den Auswertungen mit Feuchteeintrag bei einer besonnten Konstruktion deutlich höhere aufsummierte Zeiten. Dies ist darin begründet, dass aufgrund der solaren Einstrahlung an dieser Position häufiger die 15 °C-Temperaturgrenze überschritten wird.

Tab. 25 Ergebnisse der klassischen Auswertung „Begrüntes Flachdach einer Realschule“.

Variante	Anzahl der Stunden	Anzahl der Tage (Kriterium durchgehend über 24 h erfüllt)
ohne Feuchteeintrag/Sonne	1875	15
ohne Feuchteeintrag/Verschattung	5195	121
mit Feuchteeintrag/Sonne	16079	340
mit Feuchteeintrag/Verschattung	9675	240

In Abb. 210 ist die Auswertung des 10. Jahres mithilfe der von D. Kehl entwickelten Software zur Umsetzung der WTA-Kriterien an der Holzschalung eines dichten Flachdaches ohne Feuchteeintrag (rechts) und mit Feuchteeintrag (links) sowie ohne (oben) und mit Sonneneinstrahlung (unten) dargestellt. Jeder Punkt in der jeweiligen Grafik stellt einen Tagesmittelwert dar. Es ist erkennbar, dass ohne Feuchteeintrag beim besonnten Dach innerhalb der ersten 10 Jahre die Grenzlinie nur minimal überschritten wird (oben links), somit besteht nur ein sehr geringes Wachstumsrisiko. Mit dem Eintrag der angesetzten 250 g Wasser pro Winterperiode ergibt sich dagegen durch die hohen resultierenden Holzfeuchten ein massives Risiko. Dabei zeigen sich mit solarer Einstrahlung (unten links) geringere Materialfeuchten als ohne (unten rechts). Allerdings sind, wie in der Grafik hervorgehoben, deutlich häufiger Zeiten mit Temperaturen oberhalb 15 °C gegeben, woraus sich das schlechtere Abschneiden mit Solareintrag in Tab. 25 bei der Beurteilung anhand der Bewertung nach DIN 68800 [3] ergibt.

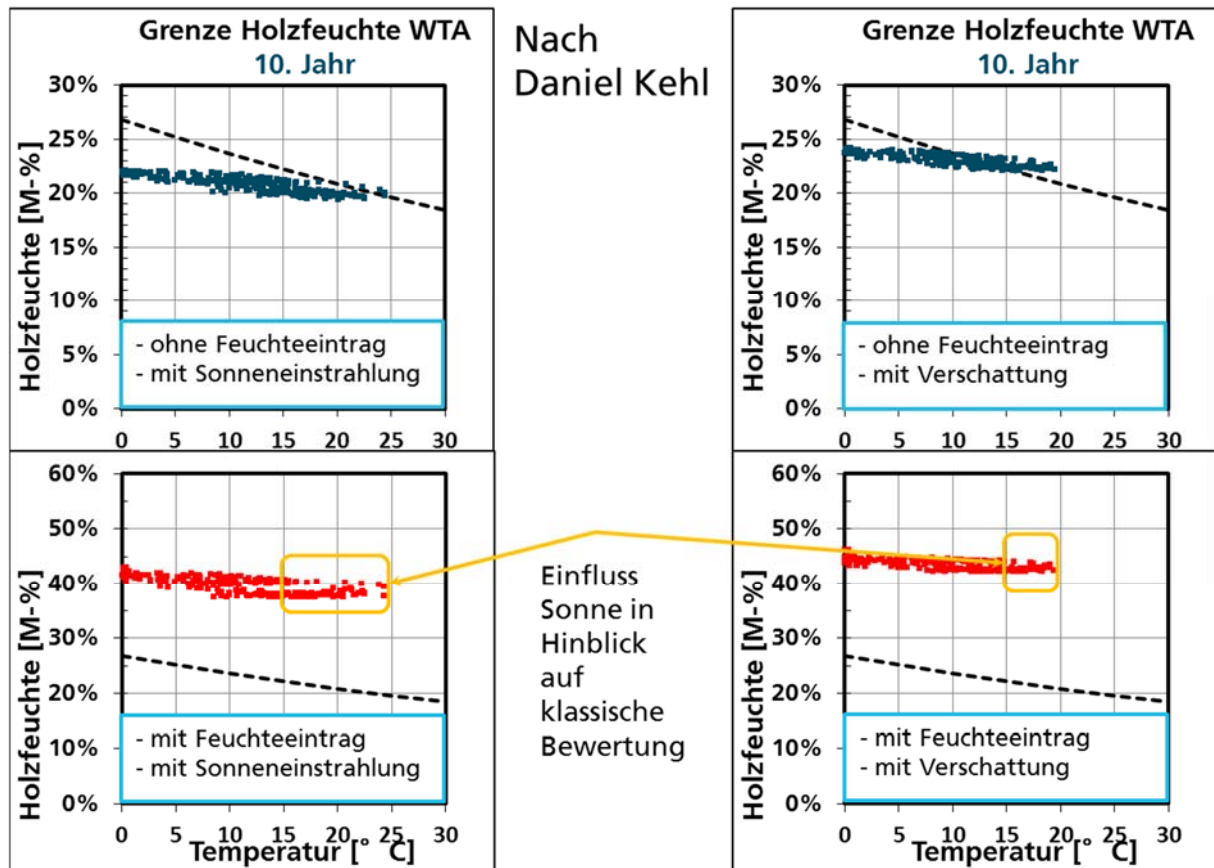


Abb. 210 Auswertung des 10. Jahres mithilfe der von D. Kehl entwickelten Software zur Umsetzung der WTA-Kriterien an der Holzschalung eines dichten Flachdaches ohne Feuchteintrag (links) und mit Feuchteintrag (rechts) sowie ohne (oben) und mit Sonneneinstrahlung (unten).

Im nachfolgenden Absatz werden die Ergebnisse des Pilzwachstums dargestellt, die mit dem Softwaretool WUFI® HzP und den unterschiedlichen Isoplethen berechnet wurden. In den Abbildungen 211 bis 214 ist jeweils das berechnete Pilzwachstum in Millimetern über einen Zeitraum von zehn Jahren dargestellt. In jeder Grafik sind dabei vier Wachstumskurven von einer Konstruktionsvariante vergleichend abgebildet.

Bei der Berechnungsvariante mit einem dichten Dach und Sonneneinstrahlung kommt es unter Verwendung der Minimalwerte aus der Literatur sowie der Angaben nach dem WTA-Merkblatt [1] zu einem minimalen Wachstum ab dem siebten Jahr (Abb. 211). Wenn eine Verschattung für das Dach (Abb. 212) angesetzt wird, ergibt sich unter Ansatz der beiden obengenannten Wachstumskurven deutlich mehr Pilzwachstum und das bereits ab dem fünften Jahr.

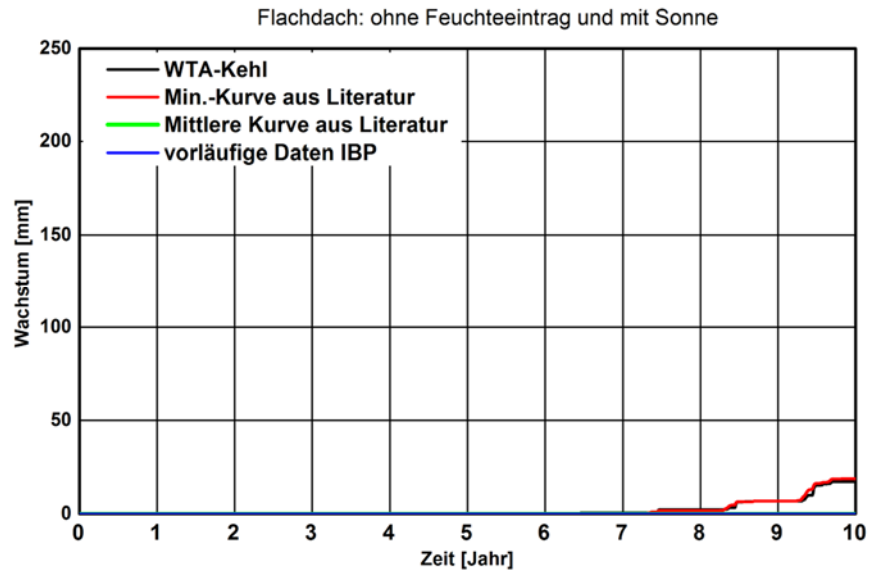


Abb. 211 Zeitlicher Verlauf des Wachstums von holzerstörenden Pilzen an der Holzschalung eines dichten Flachdaches mit Sonneneinstrahlung.

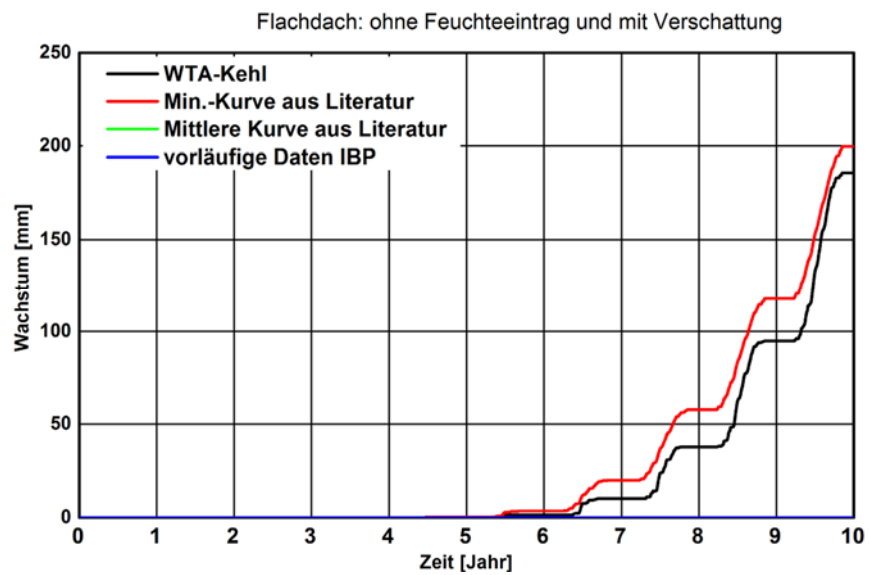


Abb. 212 Zeitlicher Verlauf des Wachstums von holzerstörenden Pilzen an der Holzschalung eines dichten Flachdaches mit Verschattung.

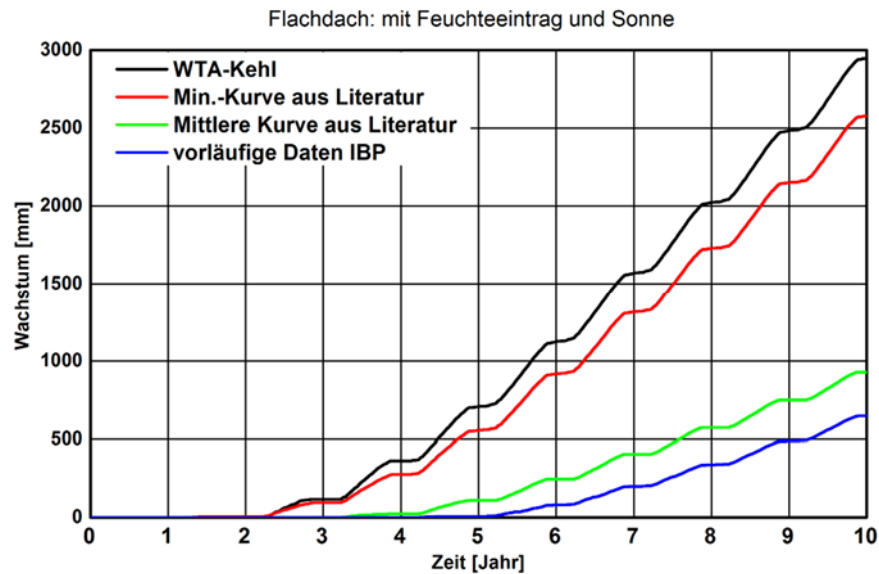


Abb. 213 Zeitlicher Verlauf des Wachstums von holzerstörenden Pilzen an der Holzschalung eines Flachdaches mit einem Feuchteeintrag von 250 g/m^2 im Winter und Sonneneinstrahlung.

Wenn davon ausgegangen wird, dass es im Winter zu einem zusätzlichen Feuchteeintrag von 250 g/m^2 in die Konstruktion kommt, zeigt sich mit Verschattung (Abb. 213) und ohne Verschattung (Abb. 214) ein sehr deutliches Wachstum an der Holzschalung ab dem zweiten Jahr, wobei sich die Intensität des Wachstums zwischen den Ansätzen mit Minimalwerten aus der Literatur und den Werten nach WTA sehr stark von den Ansätzen mit mittlerer Wachstumsgrenze aus der Literatur und gemessener Isoplethen unterscheidet.

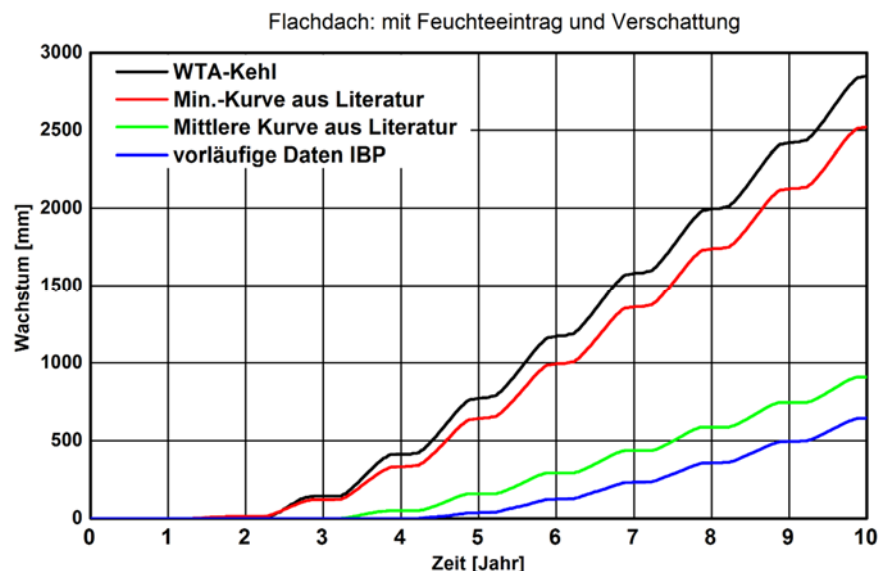


Abb. 214 Zeitlicher Verlauf des Wachstums von holzerstörenden Pilzen an der Holzschalung eines Flachdaches mit einem Feuchteeintrag von 250 g/m^2 im Winter und Verschattung.

1.5.7.2 Beispiel 2: „Modernisierung einer Schule“

Beim zweiten Beispiel geht es um Berechnungen einer Altbausanierung einer Schule, in die neue dichtere Fenster und eine 5 cm starke Innendämmung aus Kalziumsilikat-Platten und alternativ aus Mineraldämmplatten eingebaut werden. Die eingesetzten Kalziumsilikat-Platten besitzen eine Wärmeleitfähigkeit von $0,06 \text{ W/mK}$, wogegen die Mineraldämmplatten eine deutlich niedrigere Wärmeleitfähigkeit von $0,04 \text{ W/mK}$ aufweisen. Dies bedeutet einen Wärmewiderstand der Innendämmung aus Kalziumsilikat von ca. $0,85 \text{ m}^2\text{K/W}$ und von ca. $1,25 \text{ m}^2\text{K/W}$ bei den Mineraldämmplatten.

Bei der Schule handelt es sich um ein Gebäude mit Holzbalkendecke und Holzboden. Die Räume werden vorrangig als Zweckräume und nicht als Klassenzimmer verwendet. Die geplante Innendämmung bewirkt bei niedrigen Außentemperaturen eine Absenkung der Temperatur der Außenwand und somit niedrigere Oberflächentemperaturen auf der Innenseite des Mauerwerks. Wasserdampfdiffusion oder Luftkonvektion aus dem Innenraum führen dann zu einem Ansteigen der relativen Feuchte in diesem Bereich, mit der Folge eines höheren Risikos von Wachstum von holzerstörenden Pilzen. Als besonders kritisch in Hinblick auf erhöhte relative Feuchten nach Einbau der Innendämmung ist im vorliegenden Gebäude die Einbindung der Balken der Geschossdecken in die Außenwände und vor allem der Wassergehalt in den Balkenköpfen in Bezug auf das Risiko für die Ansiedelung holzerstörender Pilze zu betrachten.

Für die rechnerische Untersuchung der gekoppelten Wärme- und Feuchtetransportvorgänge wird das zweidimensionale Simulationsprogramm WUFI® 2D [2] verwendet. Mit diesen Berechnungen werden bei Einsatz des Innendämmsystems die Temperatur, relative Feuchte und der Wassergehalt am Balkenkopf ermittelt. Diese Ergebnisse werden im Folgenden erneut mit den zur Verfügung stehenden Prognosetools und den unterschiedlichen IsoPLETHENkurven hinsichtlich des Wachstums von holzerstörenden Pilzen bewertet.

Als Klimarandbedingungen werden die Klimadaten von Dresden-Wahnsdorf verwendet. Für das Innraumklima wird eine normale Feuchtelast (entsprechend WTA-Merkblatt 6-2-01/D [4]) angesetzt. Der Wärmeübergangskoeffizient beträgt innenseitig $8 \text{ W/m}^2\text{K}$ und außenseitig $17 \text{ W/m}^2\text{K}$. In den Ecken wird ein reduzierter Wärmeübergangskoeffizient von $5 \text{ W/m}^2\text{K}$ verwendet, da hier die geometrischen Verhältnisse nur einen geringeren Wärmeübergang ermöglichen. Es wird von einer nach Norden ausgerichteten Wand ausgegangen, da dies die kälteste Wandseite ist und damit bei Verwendung einer Innendämmung die aus hygrischer Sicht kritischste Wand darstellt. Als Anfangswassergehalt wird der Wassergehalt angesetzt, der sich bei 80 % Ausgleichfeuchte einstellt. Die Berechnungen werden für einen Zeitraum von sechs Jahren in 1 h-Schritten durchgeführt.

Der Aufbau des Wand-Deckenanschlusses ist in Abb. 215 links im Ursprungsaufbau vor der Sanierung und in Abb. 215 rechts nach der Sanierung dargestellt. Vor der Sanierung besteht die Außenwand aus Vollziegel (unten 53 cm und oben 40 cm) mit 1 cm Innen- und 2 cm Außenputz (Kalk-Zementputz). Der Boden besteht aus dem 24 cm starken Holzbalken mit einer 2 cm Sparschalung darunter und einem Kalkputz/Schilf-Putz (1 cm). Oberhalb des Balkens befindet sich eine Dielung (3 cm) mit Linoleum. Vor dem Balkenkopf ist ein mehrere Millimeter breiter Luftspalt vorhanden. Nach der Sanierung befindet sich an der Außenwand

innen auf dem alten Putz ein 5 mm starker Kalziumsilikat-Kleber und eine 5 cm Dämmplatte (Kalziumsilikat-Platte) sowie ein Kalkputz (1 cm). Bei der zweiten Variante wurden anstelle der Kalziumsilikat-Platten Mineralschaumplatten sowie der zum System gehörende Kleber und Innenputz eingesetzt. Unterhalb des Balkens sind 35 mm starke Herakustik-Platten angebracht und oberhalb befinden sich zusätzlich zu der Dielung noch 10 mm Mineralwolle und 20 mm Fermacell-Trockenestrich sowie 5 mm Linoleum.

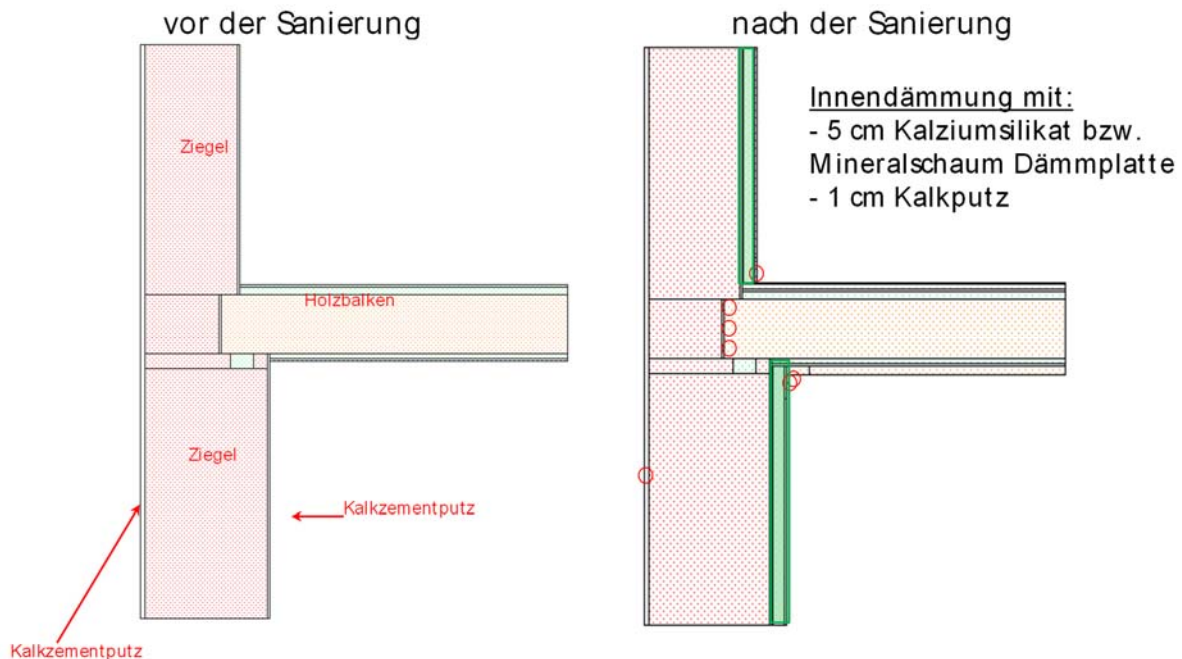


Abb. 215 Schematischer Aufbau des Wand-Deckenanschlusses vor (links) und nach (rechts) der Sanierung.

Die berechneten Wassergehalte am Balkenkopfende vor der Sanierung sowie nach dem Einbau von 5 cm Innendämmung mit Kalziumsilikat- bzw. Mineralschaum-Dämmplatte sind in Abb. 216 dargestellt. Beginnend mit einem Wassergehalt bei 80 % Ausgleichsfeuchte verringert sich der Wassergehalt des Balkenkopfes ohne Innendämmung im Laufe der Jahre. Er liegt vor der Sanierung stets unter 20 M.-%. Nach der Sanierung steigt der Wassergehalt am Balkenkopf bei allen Varianten in den ersten Jahren an und schwankt dann, jahreszeitlich bedingt, oberhalb der Grenze von 20 M.-%. Im Laufe der sechs Jahre sinkt der Wassergehalt wieder leicht ab. Dabei liegt die ersten zwei Jahre der Wassergehalt bei der Variante mit Mineralschaumdämmung etwas oberhalb der Variante mit den Dämmplatten aus Kalziumsilikat. Bei den letzten berechneten zwei Jahren ist die Situation umgekehrt. Hier unterschreitet bei der Mineralschaumdämmung der Wassergehalt zum Ende hin die 20 M.-%-Marke.

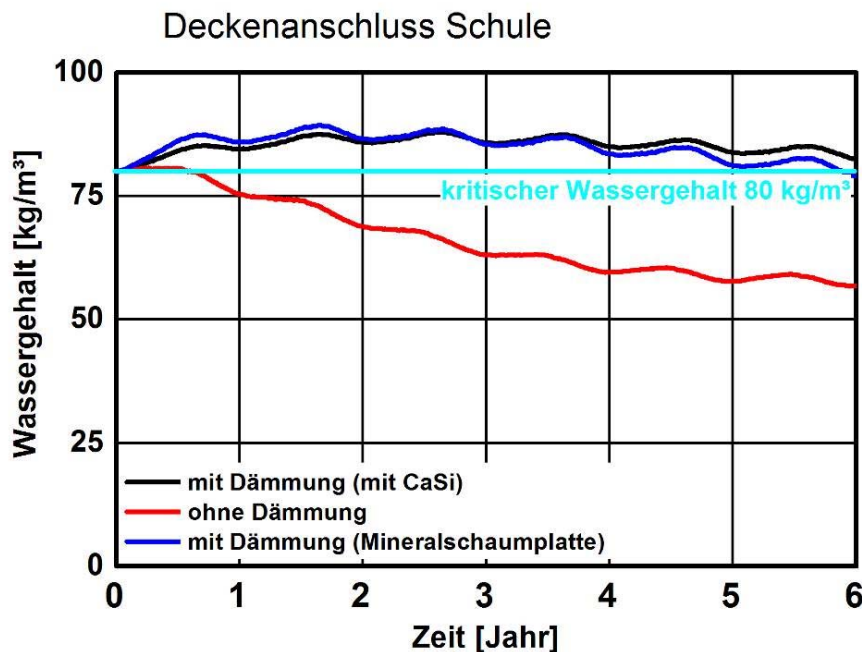


Abb. 216 Zeitlicher Verlauf des Wassergehaltes am Balkenkopfende vor und nach der Sanierung mit Kalziumsilikat- und Mineralschaum-Innendämmung.

Tab. 26 Ergebnisse der klassischen Auswertung „Modernisierung einer Schule“.

Variante	w-Wert Außenputz [kg/m ² *vh]	Anzahl der Stunden	Anzahl der Tage (Kriterium durchgehend über 24 h erfüllt)
vor der Sanierung	1,0	1391	1
nach der Sanierung (Kalziumsilikat)	1,0	15802	648
nach der Sanierung (Mineralschaum)	1,0	16987	675

Der Vergleich der Ergebnisse in Tab. 26 zeigt deutlich den Einfluss der Innendämmung auf den Feuchtehaushalt der Konstruktion. Vor der Sanierung kommt es nach der klassischen Auswertung zur Bewertung des Risikos von holzerstörenden Pilzen lediglich zu einem Tag, an dem die Kriterien überschritten sind. Sobald eine Innendämmung angebracht wird, steigt die Anzahl der kritischen Tage bei beiden Sanierungsvarianten auf über 600 Tage an. Dabei ergibt sich für die Mineralschaumdämmung ein etwas ungünstigeres Ergebnis als für die Dämmung mit Kalziumsilikat-Platten. Anhand der Bewertung nach DIN 68800 [3] wird somit durch die Applikation der Innendämmung ein Wachstum von holzerstörenden Pilzen erwartet.

In Abb. 217 ist die Auswertung des 6. Jahres mithilfe der von D. Kehl entwickelten Software zur Umsetzung der WTA-Kriterien am Balkenkopfende vor (links) und nach dem Einbau einer Innendämmung mit Kalziumsilikat-Platten (rechts) dargestellt. Vor der Sanierungsmaßnahme liegen die Balkenkopfholzfeuchten im völlig unkritischen Bereich. Der Einsatz der Innendämmung führt, wie aus dem rechten Diagramm ersichtlich, einerseits zu

höheren Holzfeuchten, aber andererseits auch zu niedrigeren Temperaturen. Zu wenigen Zeitpunkten wird die Grenzlinie gerade noch geringfügig überschritten.

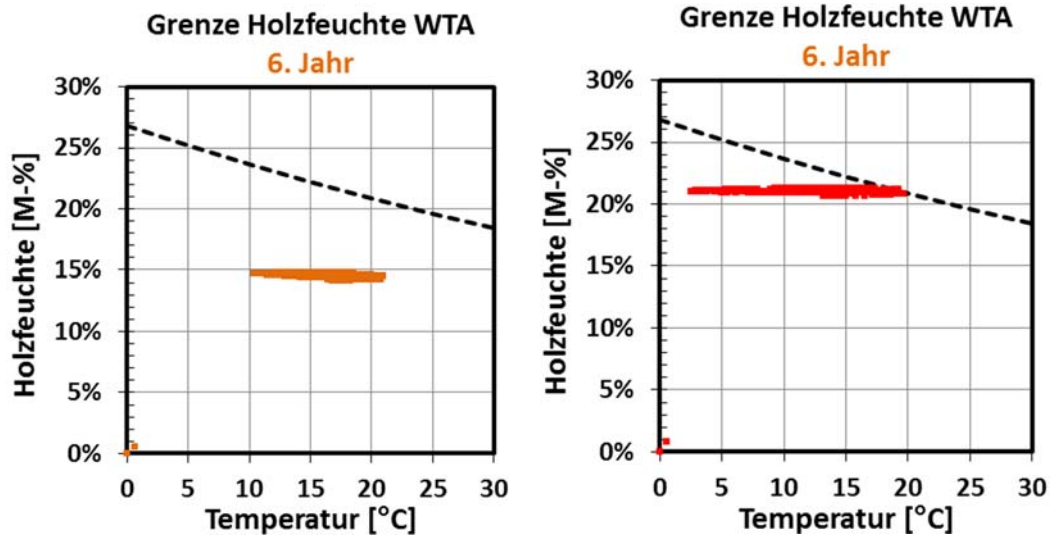


Abb. 217 Auswertung des 6. Jahres mithilfe der von D. Kehl entwickelten Software zur Umsetzung der WTA-Kriterien am Balkenkopfende vor (links) und nach dem Einbau einer Innendämmung mit Kalziumsilikat-Platten (rechts).

Bei Einsatz der Mineralschaum-Dämmplatten ergeben sich trotz höherem Wärmedämmwert etwas geringere Holzfeuchten, sodass die Grenzkurve nicht überschritten wird (Abb. 218).

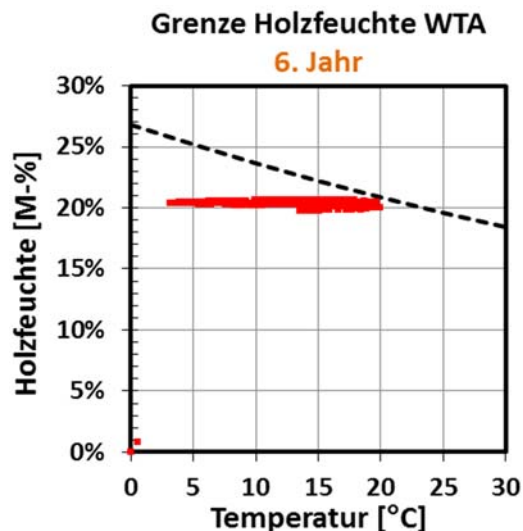


Abb. 218 Auswertung des 6. Jahres mithilfe der von D. Kehl entwickelten Software zur Umsetzung der WTA-Kriterien am Balkenkopfende nach dem Einbau einer Innendämmung mit Mineralschaum-Platten.

Werden die berechneten Temperatur- und Feuchteverläufe des Holzbalkenkopfes in WUFI® HzP eingelesen und mit den unterschiedlichen Isoplethenkurven das Wachstum berechnet, zeigt sich dagegen gemäß Abb. 219, dass in der bestehenden wie auch in der sanierten Konstruktion, unabhängig vom Material der Innendämmung, keinerlei Wachstum von holzerstörenden Pilzen zu erwarten ist.

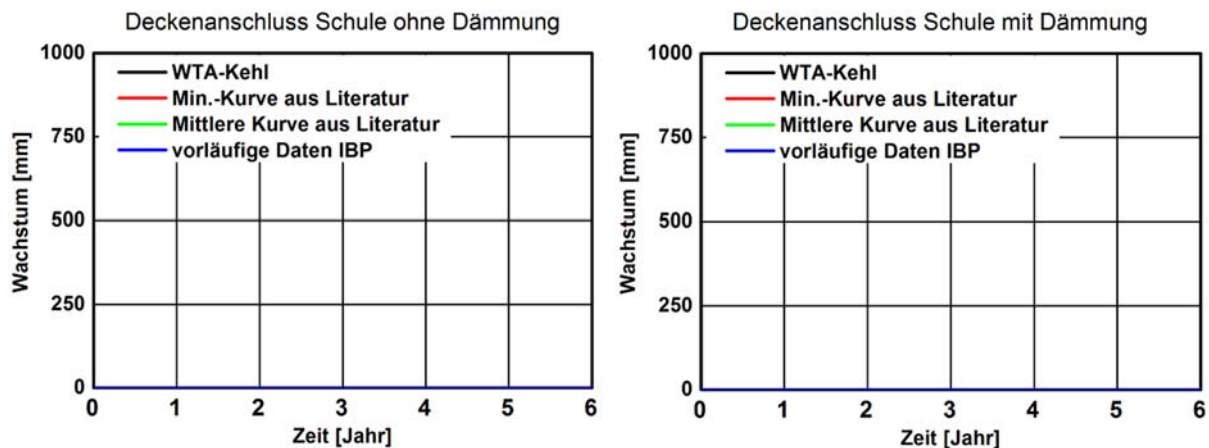


Abb. 219 Zeitlicher Verlauf des Wachstums von holzerstörenden Pilzen am Holzbalkenkopf vor (links) und nach (rechts) der Sanierung.

1.5.7.3 Zusammenfassung der Ergebnisse

Für die Beurteilung des Risikos des Wachstums von holzerstörenden Pilzen wurde im Rahmen dieses Forschungsprojektes das bereits bestehende und bewährte Modell zur Berechnung des Schimmelpilzwachstumsrisiko WUFI® Bio auf die Version WUFI® HzP erweitert. In WUFI® HzP wurden die unterschiedlichen Kriterien für das Wachstum von holzerstörenden Pilzen aus der Literatur, nach WTA-Merkblatt 6-8 und die am Fraunhofer IBP ermittelten Isoplethenkurven von holzerstörenden Pilzen implementiert. Um das neu entwickelte Prognosetool zu beurteilen, wurden anhand von zwei ganz unterschiedlichen Anwendungsbeispielen, dessen Ergebnisse mit der klassischen Bewertung des Risikos für Pilzwachstum nach DIN 68800 [3] und mit den Bewertungskriterien nach dem WTA-Merkblatt 6-8 [1] verglichen.

Beim ersten Anwendungsbeispiel, einem begrünten Flachdach, das als relativ dichte Konstruktion feuchtechnisch sicher als eher kritisch zu beurteilen ist, ergibt die Beurteilung nach den klassischen Kriterien nur bei einwandfreier Ausführung und bei unverschatteter Dachfläche ein weitgehend unkritisches Ergebnis. Bei Verschattung und in noch größerem Maße bei Ansatz eines Feuchteeintrags fällt diese Dachkonstruktion bei Beurteilung nach den klassischen Kriterien zu Recht durch. Allerdings ergibt sich danach, entgegen den Erwartungen und Erfahrungen, mit Feuchteeintrag bei der verschatteten Konstruktion ein deutlich unkritischeres Ergebnis als bei der besonnten Variante.

Ohne Feuchteeintrag ergibt sich bei Ansatz der messtechnisch im Rahmen dieses Projektes bestimmten Grenzisoplethe kein Wachstum von holzerstörenden Pilzen. Das Gleiche gilt, wenn die aus dem Mittelwert der Literatur abgeleitete Isoplethe zugrunde gelegt wird. Werden dagegen die Kriterien nach WTA oder die aus den untersten Werten der Literatur abgeleitete Isoplethe angesetzt, ergibt sich ein geringes Wachstum. Mit dem nach Norm für hygrothermische Beurteilungen anzusetzenden Feuchteeintrag ergeben alle Kriterien ein deutliches Wachstum, auch hier ein geringeres bei Ansatz der aus dem Mittelwert der Literatur abgeleiteten und der IBP-Isoplethe.

Beim zweiten Anwendungsbeispiel, der Beurteilung des Einflusses einer Innendämmmaßnahme auf den Feuchtehaushalt eines Balkenkopfes und damit auf das Risiko des Wachstums holzzerstörender Pilze ergibt der klassische Ansatz ein deutliches Wachstumsrisiko, sowohl beim Einsatz der Kalziumsilikatdämmung mit höherer Wärmeleitfähigkeit als auch bei der Mineralschaumplattendämmung. Bei Verwendung von WUFI® HzP ergibt sich dagegen bei Ansatz jeder der vier implementierten Kriterien keinerlei Risiko.

Die anhand der zwei Anwendungsbeispiele durchgeführten Vergleiche zeigen, dass die Bewertung nach den klassischen Kriterien zum Teil etwas widersprüchliche Ergebnisse liefert, aber vor allem aufgrund der voneinander unabhängigen Grenzwerte (15 °C und 20 M.-%) ein zu hohes Wachstumsrisiko ergeben kann. Dies zeigt sich vor allem beim zweiten Anwendungsbeispiel. Insgesamt ergibt der Ansatz der aus dem Mittelwert der Literatur abgeleiteten und der IBP-Isoplethen die geringsten Wachstumsrisiken, die beiden anderen in WUFI® HzP implementierten Ansätze etwas höhere. Wahrscheinlich liegen die beiden ersteren näher an der Wirklichkeit, wogegen die beiden anderen ein gewisses Sicherheitspotential mit sich bringen. Nur durch weitere Untersuchungen kann geklärt werden, ob sich durch die strenge Anwendung der IBP-Isoplethen in ausreichendem Maße Schadensfälle vermeiden lassen.

1.6 Wissenstransfer in die Praxis

1.6.1 Anwendung des validierten hygrothermischen Modells auf Sanierungsfälle unter Berücksichtigung der Varianzbreiten der klimatischen Verhältnisse und der Material- und Konstruktionseigenschaften

Generell ist es möglich durch umfangreiche Simulationsstudien mit einem validierten hygrothermischen Modell in Verbindung mit Laborergebnissen Aussagen für die Praxis zu tätigen. Im Rahmen des europäischen Projektes *RIBuild* werden gegenwärtig, unter Verwendung der in diesem Projekt gewonnen Messdaten und Erfahrungen aus den Simulationen, Parameteruntersuchungen angestrengt, welche die Varianzen der Material- und Konstruktionseigenschaften sowie der bauklimatischen Randbedingungen, die in den Referenzgebäuden ermittelt wurden, genauer untersuchen. Die Studien beziehen bspw. den Einfluss des Wasseraufnahmekoeffizienten von Außenputzen, die Feuchtespeicherfähigkeit des Mauerwerks, Temperaturunterschiede zwischen Innen und Außen, Dichtigkeit des Auflagers, etc. mit ein. Dabei werden die unterschiedlichen Sanierungsstrategien mithilfe einer Quantifizierung der Risiken der Feuchteinträge geprüft.

1.6.2 Auswertung der Ergebnisse mit dem Prognosewerkzeug für holzerstörende Pilze und Risikoanalyse von Innendämmungen bei Holzbalkendecken

Die Anwendung des Prognosewerkzeuges auf Praxisbeispiele wird in den Abschnitten 1.5.6 und 1.5.7 ausführlich beschrieben.

1.6.3 Veröffentlichung der Ergebnisse und Entwicklung eines Planungsleitfadens, der eine schnelle Umsetzung der Ergebnisse in die Praxis ermöglicht

Die bisher gewonnenen Erkenntnisse aus den Laborversuchen und die Erfahrungen aus den Testhäusern werden als eine Unterstützung der Planungspraxis Eingang in eine BINE-Informationsschrift finden. Diese wird die relevanten Ergebnisse im Sinne einer schadensfreien Ausführung von Innendämmungen bei vorhandenen Holzbalkendecken behandeln.

Die aktive Mitarbeit der Projektpartner in der Wissenschaftlich-Technischen-Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege (WTA) sichert die Berücksichtigung der gewonnenen Erkenntnisse bei der Merkblattbearbeitung und findet somit Zugang in die Praxis. Ziel der WTA-Merkblätter ist es unter anderem, eine größere Entscheidungs- und Handlungsfreiheit zu schaffen, die sowohl der Denkmalpflege als auch dem Umweltschutz dienlich ist, indem wertvolle Bausubstanz geschützt wird und gleichzeitig ein Beitrag zur energetischen Aufwertung denkmalgeschützter Häuser erbracht wird, der Kosten und damit Leerstand reduzieren hilft. Eine Überarbeitung eines speziellen WTA-Merkblattes zu Balkenköpfen wird in die Wege geleitet.

II.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die Positionen sind im zahlenmäßigen Verwendungsnachweis aufgeführt.

II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die seitens der Bundesrepublik Deutschland international zugesagten Ziele zur Einsparung von CO₂-Emissionen drohen nicht eingehalten zu werden, obwohl die Brisanz der Klimaänderungen zunehmend deutlicher wird. Deshalb ist es erforderlich, alle verfügbaren Möglichkeiten zur Senkung des Energiebedarfs auch im Gebäudebereich auszuschöpfen. Die Sanierungsquote im Altbaubestand bleibt seit längerem hinter den Erwartungen zurück. Ein gewichtiger Grund dafür sind die Bedenken von Entscheidungsträgern wie Architekten und Bauherren hinsichtlich der Auswirkungen von Innendämmmaßnahmen auf Holzbalkendecken. Die Erforschung dieses neuralgischen Details liegt im öffentlichen Interesse und ist unabhängig von bestimmten Produkten und Systemen durchzuführen. Eine neutrale Behandlung der Materie ohne Industriebeteiligung ist nicht zuletzt wegen der Akzeptanz der Ergebnisse notwendig.

Nicht zuletzt wegen der Komplexität und Vielzahl der Aufgaben erschien es erfolgsversprechender, das Projekt in einem Verbund von Forschungspartnern durchzuführen. Zum einen mussten reale Schäden wie auch funktionierende Details in möglichst vielen Objekten erfasst werden, um Transport- und Schädigungsmechanismen zu überprüfen und um die Vertrauenswürdigkeit der gezogenen Schlussfolgerungen zu erhöhen, schließlich ist ein konkreter Bezug zur Praxis bei Projekten dieser Art unabdinglich, um die gewünschte Breitenwirkung zu erzielen. Zum anderen macht es die Berücksichtigung von Prozessen wie der zeitabhängigen Holzzerstörung oder der Anisotropie erforderlich, Modelle für deren Berechnung und Bewertung zu erarbeiten. Als Grundlage solcher Modelle beziehungsweise für deren Test wiederum mussten umfangreiche und belastbare Laborversuche durchgeführt oder erst entworfen werden. Die durch Laborversuche validierten, neuen Modelle wurden in Module für vorhandene Simulationswerkzeuge implementiert. In Testprüfständen konnten die erarbeiteten Software-Module dann unter kontrollierbaren Bedingungen und verschiedenen baukonstruktiven Detailausbildungen hinsichtlich ihrer Genauigkeit des Zusammenwirkens innerhalb der Software überprüft werden. Durch dieses Vorgehen konnten vorhandene, etablierte Simulationswerkzeuge mit deren Infrastruktur weiter entwickelt werden. Die nun erweiterten Simulationswerkzeuge werden auch von anderen Forschergruppen oder Ingenieuren in Zukunft bedient werden.

Die Forschungsergebnisse geben Architekten und Bauherren Sicherheit im Umgang mit Innendämmung und werden sie dazu ermutigen, zukünftig innen zu dämmen.

II.4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Im Folgenden werden die Erfolgsaussichten nach Projektende für die Bereiche Wirtschaft, Wissenschaft und Technik näher betrachtet.

4.1 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten

Die Thematik des hygrothermischen Verhaltens von Holzbalken in innengedämmten Mauerwerk sowie des mikrobiologischen Verhaltens von Hölzern in Bestandsgebäuden stößt nach wie vor auf reges nationales und internationales Interesse. Die erarbeiteten Softwarelösungen bilden mit wissenschaftlicher Genauigkeit den für einen praxisorientierten Anwenderkreis benötigten Funktionsumfang ab. Die nutzerfreundliche grafische Oberfläche ermöglicht den unkomplizierten Einsatz im Arbeitsprozess von Planern und Architekten. Es wird erwartet, dass durch die so gewonnene Planungssicherheit:

- bislang mit dem Argument der Schadenanfälligkeit nicht gedämmte Konstruktion energetisch saniert werden,
- größere Dämmstoffdicken zum Einsatz kommen,
- Schadenrisiken bekannt sind und damit Schäden a priori vorgebeugt werden können,
- wertvolle Denkmalsubstanz besser einer Nutzung zugeführt und damit langfristig erhalten werden kann.

Zudem wird eine erhöhte Anfrage an Objekt- und Laboruntersuchungen sowie eine Zunahme der Prüftätigkeit in diesem Bereich erwartet.

Die Programme können zusätzlich in der Industrie und im Handwerk zur besseren Vermarktung der Produkte eingesetzt werden. Bspw. zur Beurteilung des Erfolgspotentials einer Sanierungsmaßnahme. Die anschauliche Gegenüberstellung verschiedener Varianten bietet einem potentiellen Auftraggeber eine geeignete Entscheidungsgrundlage.

4.2 Wissenschaftliche und technische Erfolgsaussichten

Die Erweiterung der Berechnungsmodelle für instationäre hygrothermische Simulationen auf den dreidimensionalen Bereich ermöglicht die Untersuchung weiterer bauphysikalischer Fragestellungen. Sowohl durch die Projektpartner als auch durch andere Forschungseinrichtungen. Dies gilt im gleichen Maße für die Entwicklung des Isoplethenbereichmodells. Auch hier wurde eine wichtige wissenschaftliche Grundlage für die Betrachtung weiterer Vorgänge geschaffen. Die Ergebnisse finden bereits jetzt in anderen Forschungsprojekten Anwendung. bspw. im EU-Projekt *RIBuild*.

In der Dämmstoffindustrie können die Prognosewerkzeuge und Forschungsergebnisse für die Verbesserung bestehender Produkte bzw. für Neuentwicklungen angewendet werden.

Bereits im Projektverlauf bestand das Interesse an der Betreuung ähnlicher Messaufbauten.

Zudem profitieren Studierende unterschiedlicher Studiengänge sowie Planer, im Rahmen von Weiterbildungsangeboten der beteiligten Forschungsinstitute, durch die Einarbeitung der Projekthinhalte in die Lehrveranstaltungen. Die praxisnahe Thematik trägt zu einer besseren Anschaulichkeit und Verbreitung der Ergebnisse bei.

4.3 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Das WTA-Merkblatt 8-14 „Balkenköpfe in Außenwänden“ kann hinsichtlich der Ausführung von Innendämmungen durch die Ergebnisse dieses Projekts entscheidend ergänzt werden. Diese Merkblätter haben aufgrund, der der WTA zuerkannten hohen fachlichen Kompetenz annähernd Normungscharakter und sind in der Praxis wegen ihres hohen und dichten Informationscharakters weit verbreitet. Unter Führung des IBP wurde bereits ein WTA-Merkblatt zur Vorhersage von Schimmelpilzwachstum erarbeitet. Die aktive Mitarbeit der Projektpartner in den Referaten 6 (Bauphysik/Bauchemie) und 8 (Holztragwerke und Fachwerk) der WTA sichert die Berücksichtigung der gewonnenen Erkenntnisse bei der Merkbearbeitung und findet somit Zugang in die Praxis.

Mit der Veröffentlichung der in den Objekten angewendeten bautechnischen Lösungen und deren Auswirkungen auf das hygrothermische Verhalten am Balkenkopf in Fachpublikationen werden Planenden, Behörden und Bauherren Unsicherheiten bei der Anwendung genommen und Beispiele für eine Abschätzung des Risikos anhand hygrothermischer Simulationen aufgezeigt.

Die erzielten Ergebnisse fließen aufgrund von Kooperationsverträgen mit Ausbildungseinrichtungen (z.B. Handwerkskammer Münster, EIPOS) auch in die Schulungsunterlagen für die Ausbildung und Weiterbildung von Ingenieuren und Handwerkern ein. Nicht zuletzt kann durch die mittelfristig zu erwartende Minderung von Schadensfällen der Ruf von energetischen Sanierungsmaßnahmen verbessert und damit deren Umsetzung erleichtert werden.

Die auf die numerische Modellierung gestützte Auswertung der Einzelprojekte eröffnet erweiterte Möglichkeiten für die zukünftige wissenschaftliche Arbeit. Die Modelle können anhand der Messdaten validiert werden und bilden damit die Basis für eine weitergehende Analyse der bauphysikalischen Prozesse hinsichtlich:

- Interaktion von Klima, Bauteilen, Anlagen und Nutzerverhalten (die komplexen Zusammenhänge lassen sich mithilfe der Simulation besser und anschaulich erklären)
- Langzeitverhalten (die Simulation kann unter Einbezug der voraussichtlichen Auswirkungen des Klimawandels um mehrere Jahrzehnte fortgeführt werden)

Die entwickelte Software wird 2017 am Markt eingeführt werden. Bezüglich der Akzeptanz von Simulationsverfahren in der Praxis ist die Durchführung eines größer angelegten Validierungsprojektes im Anschluss wünschenswert und wissenschaftlich betrachtet unabdingbar.

II.5 Fortschritt Dritter während der Laufzeit

Während der Projektlaufzeit fand ein reger Austausch im Rahmen des europäischen Projektes *RIBuild* mit Wissenschaftlern der DTU in Dänemark, der AU in Kopenhagen, der RTU in Riga, SP in Schweden, KUL in Leuven, UNIVPM in Italien sowie zwei weiteren Partnern (EMA, IFlex) statt. Im Verlaufe dieses Projektes soll ein umfassender Handlungsleitfaden für die Anwendung von Innendämmsystemen in historischen Bestandsbauten (vor 1945) erarbeitet werden. Ein Arbeitspaket dieses Leitfadens befasst sich mit der Analyse von Messdaten in europäischen Sanierungsobjekten, ein anderes mit der Erfassung von Messdaten aus Prüfständen mit unterschiedlichen Forschungsschwerpunkten. Unter fachlicher Beratung und Anleitung des IBK wurden neue Monitoringprojekte initiiert, die sich derzeit in der Phase der Datenakquise befinden. Diese Endet im Dezember 2017. In Abb. 220 sind die Standorte dieser Gebäude dargestellt, ebenso ein für die Auswahl betrachteteter Faktor, die Regenbelastung.

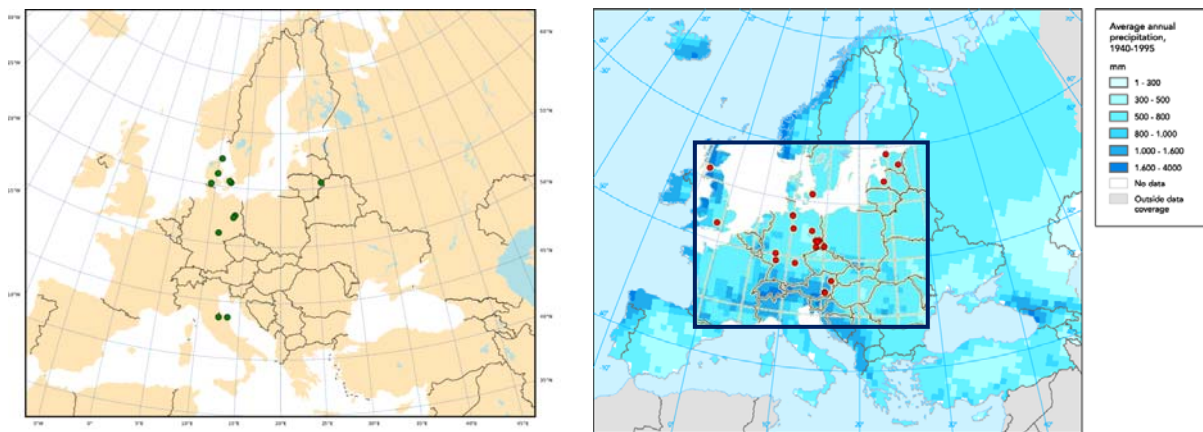
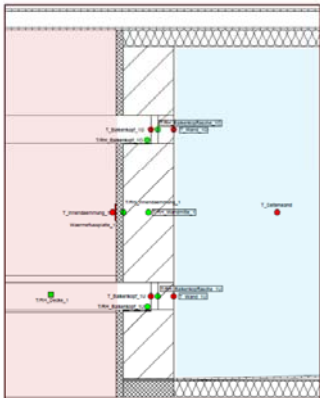


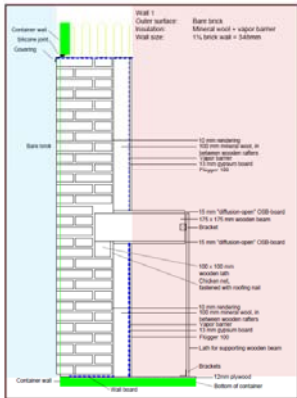
Abb. 220 Darstellung der Gebäudestandorte der im Projekt *RIBuild* initiierten Monitoringprojekte (links) und Darstellung der in der Literaturstudien dieses Projektes ausgewerteten Monitoringprojekte der vergangenen 20 Jahre vor dem Hintergrund einer mittleren Regenbelastungskarte (rechts) für Europa.

Ergänzend zu der Messdatenerfassung in realen Gebäuden werden Messdaten in Prüfständen mit idealisierten konstruktiven und klimatischen Bedingungen erfasst. Neben dem IBK haben auch die KUL und die DTU Prüfstände mit Testwänden und anliegendem Kalt- und Warmseitenklima errichtet. Jeder dieser Prüfstände verfügt über einen anderen Forschungsschwerpunkt. So ist es das Ziel des Prüfstandes an der KUL die Strömungsverhältnisse am Balkenkopf in Abhängigkeit der konstruktiven Situation und des angebrachten Dämmsystems detailliert zu erfassen. Ein Schwerpunkt des Projektes an der DTU ist der messtechnische Vergleich verschiedener Innendämmprodukte im Zusammenhang mit Oberflächenbehandlungen (Farben, Hydrophobierungen) des Mauerwerks. Auch wurden im Prüfstand der DTU neben den Balkenköpfen einbindende massive Innenwände installiert. Eine Übersicht der drei Prüfstände enthält die Abb. 221 sowie die Tab. 27.

TUD:



DTU:



KUL:

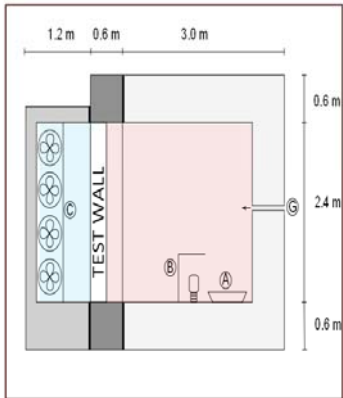


Abb. 221 Darstellung der Innendämm-Prüfkammern an der TUD (links), der DTU (Mitte) und der KUL (rechts) als Schnitt.

Tab. 27 Übersicht der wichtigsten Fakten für die Innendämm-Prüfkammern an der TUD, der DTU und der KUL.

	TUD	DTU	KUL
Prüffelder/Messstrecken	3 Prüffelder für verschiedene Dämmstoffe 6 Messstrecken für Balkenköpfe 3 Messstrecken für Wandaufbauten	24 Prüffelder mit 6 verschiedenen Innendämmprodukten in 3 verschiedenen Prüfständen 24 Messstrecken	8 Prüffelder mit 4 verschiedenen Dämmstoffen und 6 verschiedenen Formen der Wandeinbindung des Balkenkopfes
Ziel der Messungen	Erfassung der verschiedenen Dämmstoffe Erfassung der Varianten für die Abdichtung der Balkenköpfe	Erfassung der verschiedenen Dämmstoffe mit einbindender Wand, mit Balkenkopfende Erfassung des Effektes der Oberflächenbehandlungen	Erfassung der verschiedenen Dämmstoffe Erfassung der Varianten für die bautechnische Einbindung der Balkenköpfe
Erfasste Dämmstoffe	PUR-Hybridplatte, Kalziumsilikat, Mineralschaum	iQ-Therm, Multipor, Gasbeton, Dämmputz, SkamoPlus, u.a.	Kalziumsilikat, EPS, Mineralwolle

5.1.1 Kooperation mit der DTU

Zwischen den beiden Projektpartnern IBK und DTU fand ein sehr intensiver fachlicher Austausch statt. Dazu gehörten auch verschiedene gegenseitige Gastaufenthalte von Wissenschaftlern. Das Projekt der DTU war besonders aufgrund des enormen Umfangs und der guten messtechnischen Ausstattung von Interesse, da ein weitaus breiteres Spektrum an Baustoffen untersucht werden konnte als es im Rahmen des Holzbalkenkopfprojektes möglich war. Aus diesem Grund stellte die DTU im Rahmen der Kooperation ihre Messdaten sowie die Prüfstanddokumentation bereit, während das IBK im Gegenzug einen Teil der

Messdaten ausgewertete und Hilfestellung bei der hygrothermischen Modellierung mit DELPHIN gab. Bei den untersuchten Wandaufbauten der DTU handelt es sich um typische Konstruktionen, wie sie in mehrstöckigen Gebäuden Dänemarks und auch Deutschlands auftreten. Die Messdaten der DTU konnten somit unter anderem auch dazu verwendet werden die Weiterentwicklung des 3D-Solvers von DELPHIN voranzutreiben.

5.1.1.1 Beschreibung der Prüfaufbauten und Versuche

Für die diversen Wandaufbauten wurden an der DTU 12,2 m lange Kühlraum-Container speziell angepasst. Dafür wurden 24 1x2 m große Öffnungen in die Außenhülle der Container geschnitten und Testwände eingepasst, die auf der traditionellen Bauweise dänischer mehr-stöckiger Gebäude der Periode 1850 bis 1930 basieren. Die Wandtypen sind in Abb. 222 dargestellt und bestehen aus 1,5 Stein (35 cm) dickem Vollziegelmauerwerk mit einem 1 cm dicken Putz auf der Innenseite sowie einer halben Stein (11 cm) dicken Innenwand, die in die Außenwand einbindet. Jede Wand beinhaltet auch eine Decke mit komplettem Fußbodenaufbau und 100 mm dicker Mineralwolle, die die Lehmschicht des „originalen“ Aufbaus auf der Einschubdecke ersetzt. Der Deckenaufbau beinhaltet auch einen Holzbalken, der parallel zur Innenwand verläuft und in der Außenwand auf einer Mauerlatte (10x10 cm) aufliegt. Alle Ränder der Testwände sind wärmegeklämt und mit einer Dampfbremse versehen, sodass dort von weitgehend adiabaten Randbedingungen ausgegangen werden kann. Das Klima auf der Innenseite, 20 °C bei 60 % r.F., kann genau vorgegeben werden, auf die Außenseiten wirkt das natürliche Außenklima ein.

Das Messsystem basiert hauptsächlich auf digitalen Temperatur/Luftfeuchte-Sensoren der Schweizer Firma Innovative Sensor Technology (IST). Der verwendeten Sensoren des Typs HYT221 sind durch einen Schrumpfschlauch und Kleber umhüllt, um Wasser- oder Salzsäden an den elektrischen Komponenten zu vermeiden.

Abb. 222 zeigt einen Vertikal- und Horizontalschnitt der Testaufbauten mit Punkten, die die Sensorpositionen anzeigen. Ein analoges Messsystem, basierend auf Widerstandsmessungen in einem Holzdübel, wurde zusammen mit den digitalen Sensoren an den Punkten 1 und 5 platziert. Derartige Holz-Widerstandsmessungen werden in Dänemark seit ungefähr 20 Jahren weitläufig verwendet, um den Wassergehalt in den Konstruktionen zu messen. In dem Experiment unterstützen sie als Referenz- bzw. Vergleichswert die digitalen Sensoren. Die Widerstandsmessung in einem Gipsdübel komplettiert den digitalen und den Holz-Widerstandssensor am Punkt 1. Diese Art der Feuchtemessung erwies sich in der Vergangenheit als sehr verlässlich zur Bewertung der Feuchtebelastung im Mauerwerk.

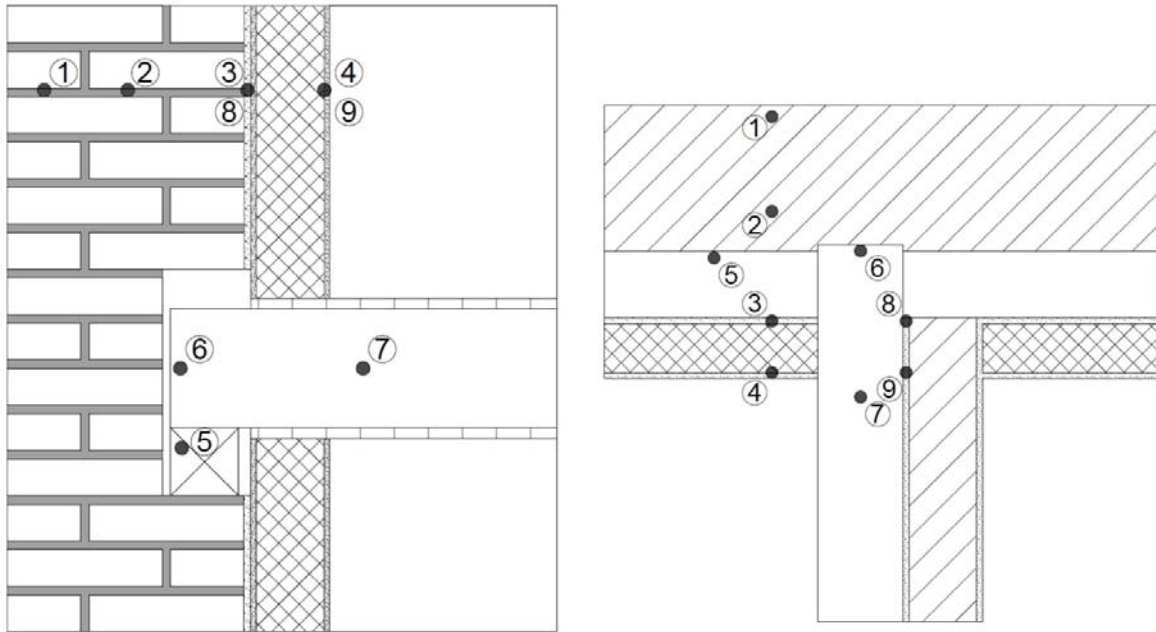


Abb. 222 Sensoren-Platzierung: 1 = Nahe der Außenoberfläche, 2 = Mauerwerksmitte, 3 = In Ebenheitsschicht hinter Innendämmsystem, 4 = Innenputzoberfläche, 5 = Außenseite Mauerlatte, 6 = Stirnholz Deckenbalken, 7 = Mitte Deckenbalken im Raumbereich, 8 = In Ebenheitsschicht in „Raum“-Ecke, 9 = Im Innenputz in „Raum“-Ecke.

5.1.1.2 Beschreibung der geprüften Wandaufbauten

Wie in Abb. 223 illustriert, wurden verschiedene diffusionsoffene Innendämmsysteme mit unterschiedlichen Arten der Innen- und Außenoberflächenbehandlung auf den Testwänden appliziert. Die Außenoberflächen sind überwiegend als Sichtmauerwerk ausgeführt, was der typischen dänischen Bautradition geschuldet ist. Nur eine Außenwand, die innseitig mit Multipor gedämmt ist, wurde auf der Außenseite mit einem Putz versehen, um die daraus resultierenden Unterschiede genauer zu erfassen. Nahezu alle Außenwände wurden zweimal ausgeführt: sowohl Richtung Südwest ausgerichtet (höchste Schlagregenbelastung in Dänemark), als auch zweimal Richtung Nordost (geringste Strahlungseinwirkung und geringste Windexposition in Dänemark). Der Grund für die jeweils zweifache Ausführung ist, dass je eine der beiden Wände imprägniert ist. Die allgemeine Erwartungshaltung ist, dass jegliche Abänderung vom ursprünglichen unbehandelten Zustand der Außenoberfläche zu günstigeren hygrothermischen Verhältnissen führt. Die Änderungen sind hier in Form von Putz, Farbe und Imprägnierung realisiert worden.

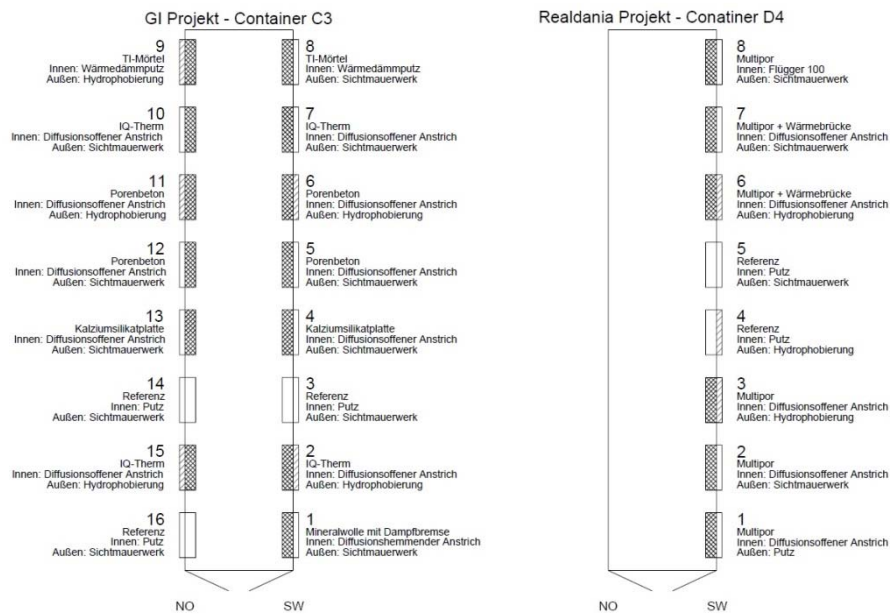


Abb. 223 Plan mit den Testwandaufbauten in zwei Containern an der Technischen Universität von Dänemark.

Aus Abb. 223 gehen die getesteten Innendämmsysteme hervor: Mullpor Innendämmung (Fa. Xella, $\rho = 80\text{kg/m}^3$); Introfex bzw. iQ-Therm (Fa. Remmers); SkamoPlus Indeklimaplate bzw. CasiPlus-Klimaplatte (Fa. Byggros); Wärmedämmkalkputz (Eigenentwicklung Teknologisk Institut); Porenbeton (DTU-Eigenentwicklung auf Basis Fa. Luca Industries International); „traditionelle“ stark dampfbremsendes Innendämmsystem mit Mineralwolle (Fa. Rockwool) und innerer Dampfbremse.

5.1.2 Kooperation mit der TUT

Auch die Technische Universität von Tallin führt ähnliche Messungen von Innendämmprodukten unter gewählten Klimarandbedingungen in einem Prüfstand durch und stand während der Bearbeitungszeit im regen Austausch mit dem IBK. Zu den von der TUT getesteten Dämmstoffen zählt ebenso Mullpor, des Weiteren TecTem und EpaTherm. Im Gegensatz zu allen übrigen Prüfständen handelt es sich bei der Basiskonstruktion nicht um Mauerwerk, sondern um eine Leichtbaukonstruktion und es wurden auch zerstörende Prüfverfahren (Bohrkernentnahme) eingesetzt. Auch die TUT gewährte dem IBK Zugriff auf die Messdaten und erhielt im Gegenzug Unterstützung bei der hygrothermischen Modellierung der Prüffelder.

II.6 Erfolgte und geplante Veröffentlichung der Ergebnisse

Die während der Projektlaufzeit gewonnenen Ergebnisse und technologischen Neuentwicklungen konnten auf vielfältige Art und Weise veröffentlicht werden. Zum einen im wissenschaftlichen Umfeld durch Beiträge auf internationalen Fachkonferenzen als auch in der Planungspraxis mittels Publikationen in Fachzeitschriften.

Zusätzlich wurden und werden für das Zielpublikum der Planer und Architekten eigene Konferenzen organisiert. Dazu zählen der alle zwei Jahre stattfindende Innendämmkongress und der Ende 2016 öffentlich durchgeführte Projektabschluss mit ca. 100 Teilnehmern aus der Planungspraxis.

Anlässlich des Tages des Offenen Denkmals, der von der Stiftung Denkmalschutz jährlich bundesweit koordiniert wird, konnte die Baustelle Schloss Drebkau im Jahr 2012 und 2013 besichtigt werden. Bis zu 400 Besucher nutzten die Gelegenheit, sich über den Fortschritt bei den Sanierungsarbeiten an der historischen Bausubstanz und über die geplanten Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz des Einzeldenkmals zu informieren. Großes Interesse bestand an den konstruktiven Maßnahmen zum Erhalt der historischen Holzbalkendecken in Verbindung mit der Anwendung von Innendämmsystemen.

Die im Rahmen des Forschungsprojektes am Schloss Drebkau gewonnen Erkenntnisse bilden die Voraussetzung für den Einsatz der Innendämmung an dieser kulturhistorisch wertvollen Bausubstanz.

Darüber hinaus sind alle Projektpartner in die Erstellung von WTA-Merkblättern der Referate 6 (Bauphysik/Bauchemie) und 8 (Holztragwerke und Fachwerk), insbesondere in das Merkblatt 8-14, eingebunden. Somit können die Forschungsergebnisse direkt in Planungs- und Handlungsanweisungen eingebracht werden.

Mit einer Nachnutzung der Ergebnisse und zusätzlichem Erkenntnisgewinn ist auch zukünftig im Rahmen des EU-Projektes *RIBuild* (Laufzeit bis 2019) zu rechnen. Insbesondere die Aufbereitung und Auswertung der Messergebnisse des Holzbalkenkopfprüfstandes am IBK sowie der Vergleich zwischen Messung und Simulation stehen weiterhin im Fokus. Erste Veröffentlichungen sind bereits in Vorbereitung:

FREUDENBERG, P.; Ruisinger, U.; Stöcker, E.: *Calibration of Hygrothermal Simulations by the Help of a Generic Optimization Tool*. In: 11th Nordic Symposium on Building Physics, NSB2017, 11-14 June 2017, Trondheim, Norway

KRUS, M.; Thiel, A.; Kilian, R.: *Untersuchungen zum Einfluss unterschiedlicher Balkenkopf-Sanierungsvarianten in der Alten Schäferei Benediktbeuern*. Im Nachgang zur Tagung „Käfer & Co.-Holzschutz in der Baudenkmalpflege“ am 16.-17. Februar 2017, Thierhaupten.

Zudem wird zusammenfassend ein BINE-Informationsblatt mit Hinweisen für die Planungspraxis erarbeitet.

Die nachfolgende Liste enthält alle Veröffentlichungen im Rahmen des Forschungsprojektes:

ANLAUFT, E.; Staar, A.: *Energetische Sanierung eines denkmalgeschützten Sandsteingebäudes mittels Innendämmung – Messergebnisse zum hygrothermischen Verhalten der Holzbalkenköpfe*. In: 25. Hanseatische Sanierungstage – 25 Jahre Feuchte und Altbausanierung, (2014), S. 85-100. – ISBN 978-3-8167-9309-0

GRUNEWALD, J.; Ruisinger, U.; Stöcker, E.; Staar, A.; Stopp, H.; Strangfeld, P.; Großkinsky, T.; Hofbauer, W.; Krus, M.; Bjarløv, S.P.; Odgaard, T.: *Holzbalkenaufleger in historischem Mauerwerk: Analyse, Bewertung und energetische Sanierung mittels Innendämmung*. In: Mauerwerk-Kalender 2016, (2016). – ISBN 978-3-433-03131-5

HOFBAUER, W.; Krueger, N.; Rennebarth, T.: *Auftreten und Schadensbilder – Bestimmung von Wachstumsgrenzen holzerstörender Pilze*. In: Abschlussveranstaltung Holzbalkenköpfe im Mauerwerk – Energetisches Bewertungsverfahren für Bestandsgebäude mit Holzbalkendecken, Dresden, 2016.

KEHL, D.; Ruisinger, U.; Plagge R.; Grunewald, J.: *Holzbalkenköpfe bei innengedämmten Mauerwerk – Ursachen der Holzerstörung und Beurteilung von Holz zerstörenden Pilzen*. Tagungsbeitrag zum 2ten Internationalen Innendämmkongress, Dresden, 2013.

KEHL, D.; Ruisinger, U.; Plagge R.; Grunewald, J.: *Wooden Beam Ends in Masonry with Interior Insulation – A Literature Review and Simulation on Causes and Assessment of Decay*. Tagungsbeitrag zum 2ten Zentraleuropäischen Bauphysik Symposium (CESBP) Wien, 2013.

KEHL, D.; Ruisinger, U.: *Holzbalkenköpfe im Mauerwerk - Was strömt denn da?*. Beitrag in der Zeitschrift Holzbau – die neue quadriga, Kastner Verlag, Wolnzach, 2013.

KEHL, D.: *Holzbalkenköpfe bei innen gedämmtem Mauerwerk - Was können wir aus verschiedenen Projekten lernen?*. In: 25. Hanseatische Sanierungstage – 25 Jahre Feuchte und Altbausanierung, (2014), S. 71-84. – ISBN 978-3-8167-9309-0

KRUS, M.; Lengsfeld, K.: *Rechnerische Untersuchungen zum Wachstum von holzerstörenden Pilzen*. In: Abschlussveranstaltung Holzbalkenköpfe im Mauerwerk – Energetisches Bewertungsverfahren für Bestandsgebäude mit Holzbalkendecken, Dresden, 2016.

KRUS, M.; Thiel, A.; Großkinsky, T.: *Untersuchungen zu unterschiedlichen Sanierungsvarianten von Holzbalkenköpfen*. In: Abschlussveranstaltung Holzbalkenköpfe im Mauerwerk – Energetisches Bewertungsverfahren für Bestandsgebäude mit Holzbalkendecken, Dresden, 2016.

NICOLAI, A.; Vogelsang, S.: *Automated validation of building performance and building envelope simulation tools*. Journal of Building Performance Simulation, Taylor & Francis, ISSN (print) 1940-1493, (online) 1940-1507

RUISINGER, U.; Stöcker, E.; Vogelsang, S.; Kehl, D.: *Anisotropie und hygrothermische Simulation*. In: Abschlussveranstaltung Holzbalkenköpfe im Mauerwerk – Energetisches Bewertungsverfahren für Bestandsgebäude mit Holzbalkendecken, Dresden, 2016.

SONTAG, L.; Nicolai, A.; Vogelsang, S.: *Validierung der Solverimplementierung des hygrothermischen Simulations-gramms Delphin*. Forschungsbericht

STAAR, A.; Bark, T.: *Die Hygrothermie von Holzbalkenköpfen im innengedämmten Außenmauerwerk*. In: 8. Konferenz Solarökologische Bausanierung, (2014)

STAAR, A.; Bark, T.: *Mit Balkenauflagern schonend umgehen*. In: Bauen im Bestand B+B, (2015), Nr. 6, S. 44-47. – ISSN 2190-9504

STAAR, A.; Bark, T.; Strangfeld, P.: *Messungen und Erfahrungen mit unterschiedlichen Systemen und Einbauvarianten*. In: Abschlussveranstaltung Holzbalkenköpfe im Mauerwerk – Energetisches Bewertungsverfahren für Bestandsgebäude mit Holzbalkendecken, Dresden, 2016.

STAAR, A.; Strangfeld, P.; Bark, T.: *Numerische Simulation am Praxisbeispiel der Hygrothermie von Holzbalkenköpfen*. In: Central European Symposium on Building Physics CESBP and BAUSIM 2016 - Proceedings. S.441-448, Technische Universität Dresden, Fakultät Architektur, Institut für Bauklimatik, 2016.

STAAR, A.; Stopp, H.: *Hygrothermisches Verhalten von Holzbalkenköpfen in innengedämmtem Außenmauerwerk - Messungen und numerische Simulationen des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports*. In: International Academic Forum AMO-SPITSE-NESEFF, Moscow, S. 122–123, 2016.

STAAR, A.; Malakhova, A.; Stopp, H.: *Internal insulation systems of historic buildings. study of the beams bearing constructions in the outer part of wall*. In: XXII International Youth Conference 2016, Moscow, 2016.

STAAR, A.; Strangfeld, P.; Bark, T.: *Numerische Simulation als Planungswerkzeug in der Bauphysik – Praxisbeispiel Holzbalkenkopf*. Gl Gebäudetechnik in Wissenschaft & Praxis, 2017, Jahrgang 138, 02/17, S.122-131, 2017.

STAAR, A.; Bark, T., Strangfeld, P.: *Der Holzbalkenkopf im innengedämmten Außenmauerwerk– Erkenntnisse aus der Bauforschung in historischen Gebäuden*. 4. Innendämmkongress 2017, Technische Universität Dresden, Fakultät Architektur, Institut für Bauklimatik, 2017.

STRANGFELD, P.; Staar, A.: *Die Schiebell-Schule Drebkau – eine bau-und anlagentechnische Komplettsanierung historischer Bausubstanz*. Tagungsbeitrag zum 2ten Internationalen Innendämmkongress, Dresden, 2013.

STRANGFELD, P.; Staar, A.; Toepel: *Innendämmung von Außenwänden mit erhaltenswerten Fassaden und eingebundenen Holzbalkenköpfen*, Posterbeitrag zur EnOB-Tagung, Essen, 2014.

STRANGFELD, P.; Staar, A.: *Wie gefährdet sind die im Außenmauerwerk eingebundenen Holzbalkenköpfe durch eine Innendämmung?*. In: 22. Wiener Sanierungstage – Instandsetzung von Bestandsgebäuden im urbanen Hochbau, (2014)

VOGELSANG, S.: *Integration of an anisotropic material model into the hygrothermal transport simulation framework Delphin*. Tagungsbeitrag zur BauSim Konferenz, Berlin, 2012.

II.6 Erfolgte und geplante Veröffentlichung der Ergebnisse

VOGELSANG, S.: *3D Modeling Techniques & Parallel Computation*. EnTool Symposium, Dresden, 2013. - ISBN 978-3-86780-350-2

VOGELSANG, S.; Kehl, D.; Ruisinger, U.; Meißner, F.: *Three-dimensional HAM transport in timber beam ends-measurements and simulation*. In: BauSim 2014 – Human-centered building(s), (2014), S. 174-181. – ISBN 978-3-00-047160-5

VOGELSANG, S.; Nicolai, A.: *Modeling and implementing efficient three dimensional anisotropic heat air and moisture transport*. In: 10th Nordic Symposium on Building Physics, (2014), S. 287-294. ISBN: 978-91-88722-53-9

VOGELSANG, S.; Fechner, H.; Nicolai, A.: *Delphin 6 Material File Specification*. Version 6.0, Forschungsbericht

Literaturverzeichnis

- [1] WTA-Merkblatt 6-816/D: Feuchtetechnische Bewertung von Holzbauteilen – Vereinfachte Nachweise und Simulation. Ausgabe 2016.
- [2] Künzel, H.M.: Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten. Dissertation Universität Stuttgart (1994).
- [3] DIN 68800-2:2012-02: Holzschutz – Teil 2: Vorbeugende bauliche Maßnahmen im Hochbau. Beuth-Verlag. 2012.
- [4] WTA-Merkblatt 6-2-14/D: Simulation wärme- und feuchtetechnischer Prozesse. Fraunhofer IRB Verlag: München, 2014.
- [5] Kehl, D.: Pilzmodelle – Ist der Befall vorhersehbar? Oder: Wann geht Holz kaputt? Holzbau 1/2011 Im Blickpunkt: Holzschutz/Sanierung im Bestand. S. 23 – 26.
- [6] Kemmetter, F.: Erweiterung eines Prognosewerkzeugs zur Berechnung von Schimmelpilzwachstum um holzerstörende Pilze. Diplomarbeit TU-München 2008.
- [7] Huckfeldt, T.; Schmidt, O.; Quader, H.: Ökologische Untersuchungen am Echten Hausschwamm und weiteren Hausfäulepilzen. Holz als Roh- und Werkstoff 63 (2005), S. 209–219.
- [8] Schmidt, O.: Indoor wood-decay basidiomycetes: damage, causal fungi, physiology, identification and characterization, prevention and control. Mycol. Progress 6/4 (2007), pp. 261–279.
- [9] Alfredsen, G.; Solheim, H.; Jenssen, K. M.: Evaluation of decay fungi in Norwegian buildings. The International Research Group on Wood Protection. 36th Annual Meeting Bangalore, India, 24–28 (2005): IRG/WP 05– 10562.
- [10] Snow, D.: The germination of mould spores at controlled humidities. Ann. App. Biol. Vol. 36/1 (1949), pp. 1–13.
- [11] Block, S. S.: Humidity requirements for mold growth. Applied Microbiology 1/6 (1953), pp. 287–293.
- [12] Ayerst, G.: The effect of moisture and temperature on growth and spore germination in some fungi. Journal of Stored Products Research 5 (1969), pp. 127–141.
- [13] Smith, S. L., Hill, S. T.: Influence of temperature and water activity on germination and growth of *Aspergillus restrictus* and *Aspergillus versicolor*. Transactions of the British Mycological Society Vol. 79/3 (1982), pp. 558–560.
- [14] Grant, C.; Hunter, C. A.; Flannigan, B.; Bravery, A. F.: The moisture requirements of moulds isolated from domestic dwellings. International Biodeterioration 25 (1989), pp. 259–284.

- [15] Sedlbauer, K.: Vorhersage von Schimmelpilzbildung auf und in Bauteilen. Dissertation Universität Stuttgart, 2001.
- [16] Sedlbauer, K.; Krus, M.: Schimmelpilze in Gebäuden – Biohygrothermische Berechnungen und Gegenmaßnahmen. In: Bauphysik-Kalender 2003, S. 435–531. Ernst & Sohn, Berlin.
- [17] Viitanen, H.: Modelling the time factor in the development of mould fungi in wood – the effect of critical humidity and temperature conditions. *Holzforschung* 51/1 (1997), S. 6–14.
- [18] Viitanen, H.; Ritschkoff, A.: Mould growth in pine and spruce sapewood in relation to air humidity and temperature. Uppsala: Swedish University of Agriculture Sciences, Department of Forest Products, 1991.
- [19] Viitanen, H.: Mathematical modelling of moisture behaviour and mould growth in building envelopes. Espoo Finnland: VTT/TTY, 2005-2009.
- [20] Seidler, C.M.: Neue Bewertung der Berechnungsergebnisse des Biohygrothermischen Modells mit dem Mould.-Index. Master-Thesis Universität Stuttgart, 2009.
- [21] Oswald, R., Richter-Engel, S., Schnapauff, V. et al.: Dritter Bericht über Schäden an Gebäuden, S. 81 ff. Bundesministerium für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau, Bonn, 1995.
- [22] Viitanen, H.; Hanhijärvi, A.; Hukka, A.; Koskela, K.: Modelling mould growth and decay damages. In: *Healthy Buildings*, Espoo, 6–10 August 2000. FISIAQ 3 (2000), pp. 341–346.
- [23] Bavendamm, W.; Reichelt, H.: Die Abhängigkeit des Wachstums holzzersetzender Pilze vom Wassergehalt des Nährsubstrates. *Archiv für Mikrobiologie* 9/5 (1938), S. 486–544.
- [24] Hofbauer, W.; Breuer K.; Tschalkner, A. et al.: Vergleichende Untersuchungen zum Schimmelpilzwachstum auf verschiedenen Baustoffoberflächen – materialspezifische Wachstumsisoplethen. IBP Mitteilung 32 (457), 2004.
- [25] Hofbauer, W.; Breuer, K.; Krueger, N.; Sedlbauer, K.: Toxic mould versus façade-jungle – a comparison of undesirable biological growth on indoor surfaces and outer building coatings. In: *Proceedings of the 10th International Conference on Indoor Air Quality and Climate – Indoor Air 2005*, Beijing, Vol. 2, S. 2450–2454.
- [26] Hofbauer, W.; Krueger, N.; Breuer, K. et al.: Mould resistance assessment of building materials – Material specific isopleth-systems for practical application. In: *Strøm-Tejsen, P., Olesen, B. W., Wargocki, P. et al.: Indoor Air 2008: Proceedings of the 11th International Conference on Indoor Air Quality and Climate*, Copenhagen, Denmark, 2008.
- [27] Good, H. M.; Darrah, J. A.: Rates of decay in wood measured by carbon dioxide production. *Annals of Applied Biology* 59/3 (2008), pp. 463–472.

- [28] Kleist, G.; Seehann, G.: Colonization patterns and topochemical aspects of sap streak caused by *Stereum sanguinolentum* in Norway spruce. *Eur. J. For. Path.* 27 (1997), pp. 351–361.
- [29] Huckfeldt, T.; Kleist, G.; Quader, H.: Vitalitätsansprache des Hausschwammes (*Serpula lacrymans*) und anderer holzzerstörender Gebäudepilze. *Zeitschrift für Mykologie* 66/1 (2000), S. 35–44.
- [30] Blanchette, R. A.; Held, B. W.; Jurgens, J. A. et al.: Wood-Destroying Soft Rot Fungi in the Historic Expedition Huts of Antarctica. *Appl. Environ. Microbiol.* 70/3 (2004), pp. 1328–1335.
- [31] Kauserud, H.; Stensrud, Ø.; DeCock, C. et al.: Multiple gene genealogies and AFLPs suggest cryptic speciation and long-distance dispersal in the basidiomycete *Serpula himantoides* (Boletales). *Molecular Ecology* 15 (2006), pp. 421–431.
- [32] Kauserud, H.; Bjorvand Svegård, I.; DeCock, C.; Hallenberg, N.: Hybridization among cryptic species of the cellar fungus *Coniophora puteana* (Basidiomycota). *Molecular Ecology* 16 (2007), pp. 389–399.
- [33] Kauserud, H.; Shalchian-Tabrizi, K.; DeCock, C.: Multilocus sequencing reveals multiple geographically structured lineages of *Coniophora arida* and *C. olivacea* (Boletales) in North America. *Mycologia* 99/5 (2007), pp. 705–713.
- [34] Schmidt, O.; Moreth, U.: Ribosomal DNA intergenic spacer of indoor wood-decay fungi. *Holzforschung* 62 (2008), S. 759–764.
- [35] Horisawa, S.; Sakuma, Y.; Doi, S.: Qualitative and quantitative PCR methods using species-specific primer for detection and identification of wood rot fungi. *J. Wood Sci.* online (2009): DOI 10.1007/s10086–008–1011–3.
- [36] Mohebbi, B.; Mai, C.; Miltz, H.: Soft Rot Decay in Acetylated Wood: Microcalorimetry and Ergosterol Assay in Decayed Wood. In: *Proceedings of the First European Conference on Wood Modification*, Ghent, Belgium 3rd– 4th April 2003, pp. 197–202.
- [37] Eikenes, M.; Hietala, A. M.; Alfredsen, G.; Fossdal, C. G.: Comparison of quantitative real-time PCR, chitin and ergosterol assays for monitoring colonization of *Trametes versicolor* in birch wood. *Holzforschung* 59/5 (2005), S. 568–573.
- [38] Niemenmaa, O.; Galkin, S.; Hatakka, A.: Ergosterol contents of some wood-rotting basidiomycete fungi grown in liquid and solid culture conditions. *International Biodeterioration & Biodegradation* 62 (2008), pp. 125–134.
- [39] Nilsson, K.; Bjurman, J.: Chitin as an indicator of the biomass of two wood-decay fungi in relation to temperature, incubation time, and media composition. *Can. J. Microbiol.* 44/6 (1998), pp. 575–581.
- [40] Li, Y.; Wadsö, L.; Larsson, L.: Microbial growth in stored dust samples as a function of the relative humidity. In: *Proceedings: Indoor Air 2005*, Beijing, pp. 2435–2438.

- [41] Li, Y., Wadsö, L., Bjurman, J.: Using measurements of fungal activity by isothermal microcalorimetry as a base for modelling fungal growth in buildings. In: Proceedings: Indoor Air 2005, Beijing, pp. 2439–2443.
- [42] Doi, S. (1991): *Serpula lacrymans* in Japan. In: Jennings, D.H. & Bravery, A.F. (eds.): *Serpula lacrymans*. Fundamental Biology and Control Strategies. John Wiley & Sons, Chichester: 173-187.
- [43] <http://www.bauklimatik-dresden.de/delphin/index.php>
- [44] www.wufi.de
- [45] DIN EN 15026:2007-07: Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen - Bewertung der Feuchteübertragung durch numerische Simulation, Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- [46] Ruisinger, U.: Long-term measurements and simulations of five internal insulation systems and their impact on wooden beam heads. In Mahdavi A, Martens B: Proceedings 2nd Central European Symposium on Building Physics (CESBP), TU Wien, 2013, S. 313-320.
- [47] Sontag, L.; Nicolai, A.; Vogelsang, S.: Validierung der Solverimplementierung des hygrothermischen Simulationsprogramms Delphin. <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-128968>.
- [48] WTA-Merkblatt 8-14 Ertüchtigung von Holzbalkendecken nach WTA II: Balkenköpfe in Außenwänden. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 9/2014.
- [49] Häupl, P.: Innendämmung von Außenbauteilen. Bauphysikkalender 2010, Verlag Ernst & Sohn, Berlin.
- [50] Häupl, P.: Bauphysik - Klima Wärme Feuchte Schall: Grundlagen, Anwendungen, Beispiele, Aktiv in Mathcad. Berlin: Ernst & Sohn Verlag für Architektur und Technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, 2008.
- [51] Strangfeld, P.; Stopp, H.; Jurk, K.: Hygrothermie von Holzbalkenköpfen in wärmeschutztechnisch sanierten Außenwänden mit erhaltenswerten Fassaden, in: Europäischer Sanierungskalender 2007, Beuth Verlag Berlin.
- [52] Strangfeld, P.; Staar, A.; Toepel, T.: Das hygrothermische Verhalten von Holzbalkenköpfen im innengedämmten Außenmauerwerk. Bausubstanz, Fraunhofer IRB Verlag, H.2, S. 39-45; H3, S.45 -51, 2012.
- [53] Anlauff, E.; Staar, A.: Energetische Sanierung eines denkmalgeschützten Sandsteingebäudes mittels Innendämmung – Messergebnisse zum hygrothermischen Verhalten der Holzbalkenköpfe, in: BuFAS (Hrsg.): 25 Jahre Feuchte und Altbausanierung – Tagungsband der 25. Hanseatischen Sanierungstage. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart und Beuth Verlag, Berlin, 2014, S. 85–100.

- [54] Kehl, D.: Holzbalkenköpfe bei innen gedämmtem Mauerwerk – Was können wir aus verschiedenen Projekten lernen? in: BuFAS (Hrsg.): 25 Jahre Feuchte und Altbauanierung – Tagungsband der 25. Hanseatischen Sanierungstage. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart und Beuth Verlag, Berlin, 2014, S. 71–100.
- [55] Ruisinger, U.; Kautsch, P.; Ettenauer, J.; Steinwender, H.; Dörr, G.: OEKO-ID - Innendämmungen zur thermischen Gebäudeertüchtigung, Untersuchung der Möglichkeiten und Grenzen ökologischer, diffusionsoffener Dämmsysteme. <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-155710>.
- [56] Kehl, D.; Ruisinger, U.: Holzbalkenköpfe im Mauerwerk. Was strömt denn da? Holzbau – die neue Quadriga. Wolnzach: Kastner Verlag 5/2013.
- [57] Gnoth, S.: Zum thermischen und hygri-schen Verhalten von Bauteilen mit offenen und geschlossenen Hohlräumen. Dissertation TU Dresden, Fakultät für Maschinenwesen 2008.
- [58] Kehl, D.; Ruisinger, U., Plagge P., Grunewald J: Holzbalkenköpfe bei innengedämmten Mauerwerk – Ursachen der Holzerstörung und Beurteilung von Holz zerstörenden Pilzen. 2. Internationaler Innendämmkongress 2013, Technische Universität Dresden, Fakultät Architektur, Institut für Bauklimatik
- [59] Künzel, H.: Außenputze – früher und heute. Wissenschaftliche Erkenntnisse, Praxis und Normung, Fraunhofer IRB Verlag, 2015.
- [60] Bark, T.: Sanierung von Außenwänden mit besonderen Baukonstruktionen. BTU Cottbus-Senftenberg, Fakultät 2, Vortrag am 07.12.2015.
- [61] Vogelsang, S.; Nicolai, A.: „Modelling and Implementing efficient Three Dimensional Anisotropic Heat Air and Moisture Transport“, Proceedings of the 10th Nordic Symposium on Building Physics, Lund, Sweden, 2014.
- [62] Vogelsang, S.; Kehl, D.; Ruisinger, U.; Meissner, F.: „Three-Dimensional HAM Transport in Timber Beam Ends – Measurements and Simulation“, Tagungsband der BauSIM 2016, Dresden, Deutschland, 2016.
- [63] Vogelsang, S.; Fechner, H.; Nicolai, A.: Delphin 6 Material File Specification, Technischer Bericht, Qucosa, <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-126274>, 2013.
- [64] Vogelsang, S.; Nicolai, A.: Delphin 6 Output File Specification, Technischer Bericht, Qucosa, <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-201373>, 2016.
- [65] Scheffler, G.: Validation of hygrothermal material modelling under consideration of the hysteresis of moisture storage, Dissertation, TU Dresden, April 2008.
- [66] Scheffler, G.: A whole range hygric material model: Modelling liquid and vapour transport properties in porous media, Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 53, page 286ff, 2010.
- [67] WTA-Merkblatt 4-11-16: Messung des Wassergehalts bzw. der Feuchte bei mineralischen Baustoffen (überarbeitete Fassung), Fraunhofer IRB Verlag, 2016.

- [68] Grunewald, J.; Häupl, P.: „Gekoppelter Feuchte-, Luft-, Salz- und Wärmetransport in porösen Baustoffen“ – Bauphysikkalender 2003 (S. 377-434), Ernst & Sohn Verlag, Berlin 2003.
- [69] Grunewald, J.: Diffusiver und konvektiver Stoff- und Energietransport in kapillarporösen Baustoffen. Dissertation TU Dresden, Sept. 1997.
- [70] DIN EN ISO 15148:2016-12: Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten bei teilweisem Eintauchen, Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- [71] DIN EN ISO 10211:2008-04: Wärmebrücken im Hochbau – Wärmeströme und Oberflächentemperaturen – Detaillierte Berechnungen. Beuth Verlag GmbH: Berlin.
- [72] DIN EN ISO 6946:2015-06: Bauteile - Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient - Berechnungsverfahren. Beuth Verlag GmbH: Berlin.
- [73] http://www.engineeringtoolbox.com/exhaust-outlet-d_1008.html
- [74] VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (GVC) Hrsg. (2016). VDI- Wärmeatlas, 11.Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- [75] Wegener, F.: Die Arbeiten des Zimmermanns, des Tischlers und des Dachdeckers sowie die Feuerungsanlagen. Ein Handbuch für Maurer-, Zimmermeister und Architekten. Fulda und Leipzig, Verlag J.J. Arnd, 1894.
- [76] Ahnert, A.; Krause, K.H.: Typische Baukonstruktionen von 1860 bis 1960 zur Beurteilung der vorhandenen Bausubstanz, Band 2, Huss-Medien GmbH, Berlin, 2009.
- [77] Gilly, D.: Abriss der Cameral Bauwissenschaft (zu Vorlesungen entworfen von D. Gilly, Königl. Preuss. Geheimer Ober-Baurath), Berlin, 1801, Realschulbuchhandlung.
- [78] Promnitz, J.: Der praktische Zimmermann. Handbuch für Zimmerermeister, Gesellen, Lehrlinge, Bauführer und Architekten. Verlag von G. Knapp, Halle, 1870.
- [79] WTA-Merkblatt 8-14 Ertüchtigung von Holzbalkendecken nach WTA II: Balkenköpfe in Außenwänden. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 9/2014.
- [80] Staar, A.; Strangfeld, P.; Bark, T.: Numerische Simulation als Planungswerkzeug in der Bauphysik – Praxisbeispiel Holzbalkenkopf. GI Gebäudetechnik in Wissenschaft & Praxis, 2017, Jahrgang 138, 02/17, S.122-131.
- [81] Gnoth, S.; Jurk, K.; Strangfeld, P.: Hygrothermisches Verhalten eingebetteter Holzbalkenköpfe im Innengedämmten Außenmauerwerk. Bauphysik, Verlag Ernst & Sohn, 27/2, 2005.
- [82] Staar, A.; Bark, T.; Strangfeld, P.: Der Holzbalkenkopf im innengedämmten Außenmauerwerk – Erkenntnisse aus der Bauforschung in historischen Gebäuden. 4. Innendämmkongress 2017, Technische Universität Dresden, Fakultät Architektur, Institut für Bauklimatik.

- [83] Bark, T.: Untersuchungsbericht zur Wasseraufnahme von Putzfassaden (unveröffentlicht), Fakultät 2 BTU Cottbus-Senftenberg, 12/2014.
- [84] Zillig, W.: Moisture Transport in wood using a multiscale approach, PhD thesis, Katholieke Universiteit Leuven, Mai 2009.
- [85] Chang, W.J.; Weng, C.I.: An analytical solution to coupled heat and moisture diffusion transfer in porous materials. International Journal of Heat and Mass Transfer, 43 (2000), pages 3621-3632, December 1999.
- [86] Liu, J.Y.; Cheng, S.: Solution of Luikov equations of heat and mass transfer problems in porous bodies. International Journal of Heat and Mass Transfer, 34 No. 7 (1991), pages 1747-1754, August 1990.
- [87] Luikov, A.V.: Heat and Mass Transfer in capillary-porous bodies. Pergamon Press, Oxford, 1966 (Chapter 6)

Anhang

A.1 Ausgewertete Literaturstellen

- Abou-Heilah, A.N. & Hutchinson, S.A. (1977): Range of Wood-decaying Ability of Different Isolates of *Serpula lacrimans*. Trans. Br. Mycol. Soc. 68: 251-257.
- Abou-Heilah, A.N. & Hutchinson, S.A. (1978): Factors Contributing to Differences Between Wood Decaying Abilities of Strains of *Serpula lacrimans*. Trans. Br. Mycol. Soc. 70(2): 302-304.
- Achhammer, A. (1992): *Pleurotus* unter Streß. Ökophysiologische Untersuchungen zu Wasserhaushalt und Sporulation. Bibliotheca Mycologica Band 141: X + 206 pp.
- Adejoye, O.D., Adebayo-Tayo, B.C., Ogunjobi, A.A., Afolabi, O.O. (2007): Physicochemical Studies on *Schizophyllum commune* (FRIES) a Nigerian Edible Fungus. World Applied Sciences Journal 2 (1): 73-76.
- Afyon, A., Konuk, M., Yağiz, D., Helfer, S. (2006): A study of wood decaying macrofungi of the western Black Sea Region, Turkey. Mycotaxon 93: 319-322.
- Alfredsen, G., Solheim, H., Jennsen, K.M. (2005): Evaluation of decay fungi in Norwegian buildings. IRG/WP 05-10562. The International Research Group on Wood Protection. Section 1, Biology. IRG Secretariat, Sweden: 1-12.
- Ammer, U. (1963): Untersuchungen über das Wachstum von Rotstreifepilzen in Abhängigkeit von der Holzfeuchtigkeit. Forstwissenschaftliches Centralblatt 82(11-12): 360-391
- Ammer, U. (1964): Über den Zusammenhang zwischen Holzfeuchtigkeit und Holzzerstörung durch Pilze. Holz als Roh- und Werkstoff 22(2): 47-51.
- An, J., Niu, J., Chen, D., Chen, Y., Irbis, C. (2014): Screening of *Trametes* strains for efficient decolorization of malachite green at high temperatures and ionic concentrations. International Biodeterioration & Biodegradation 87: 109-115.
- Arantes, V. & Goodell, B. (2014): Chapter 1. Current Understanding of Brown-Rot Fungal Biodegradation Mechanisms: A Review. In: Schultz, T., et al.: Deterioration and Protection of Sustainable Biomaterials. ACS Symposium Series. American Chemical Society, Washington DC: 3-21.
- Aufsess von, H. (1974): Mikroskopische Erscheinungsbilder beim Holzabbau durch *Fomes annosus* (Fr.) Cooke. Eur. J. For. Path. 4: 193-203.
- Bader, T.K., Hofstetter, K., Alfredsen, G., Bollmus, S. (2012): Microstructure and stiffness of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) sapwood degraded by *Gloeophyllum trabeum* and *Trametes versicolor* – Part I: Changes in chemical composition, density and equilibrium moisture content. Holzforschung 66: 191-198.
- Bader, T.K., Hofstetter, K., Alfredsen, G., Bollmus, S. (2012): Changes in microstructure and stiffness of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) sapwood degraded by *Gloeophyllum trabeum* and *Trametes versicolor* – Part II: Anisotropic stiffness properties. Holzforschung 66: 199-206.

- Baldrian, P., Valášková, M., Merhautová, V., Gabriel, J. (2005): Degradation of lignocellulose by *Pleurotus ostreatus* in the presence of copper, manganese, lead and zinc. *Research in Microbiology* 156: 650-676.
- Batko, S. (1949): A Note on the distribution of *Poria obliqua* (Pers.) Bres. *Trans. Brit. Myc. Soc.* 33: 105-106
- Bavendamm, W. & Reichelt, H. (1938): Die Abhängigkeit des Wachstums holzzersetzender Pilze vom Wassergehalt des Nährsubstrates. *Archiv für Mikrobiologie* 9 (5): 486-544.
- Blanchette, R.A. (1991): Delignification by Wood-Decay Fungi. *Annu. Rev. Phytopathol.* 29: 381-398.
- Blanchette, R.A., Held, B.W., Jurgens, J.A. McNew, D.L., Harrington, T.C., Duncan, S.M. Farrell R.L. (2004): Wood-Destroying Soft Rot Fungi in the Historic Expedition Huts of Antarctica. *Applied and Environmental Microbiology* 70(3): 1328–1335.
- Blei, M (2009): Holzerstörende Pilze – Teil 1. Echter Hausschwamm – Biologie, Vorkommen und Bekämpfung. *Wohnmedizin* 47(2): 40-42.
- Boddy, L. (1983a): Carbon Dioxide Release from Decomposing Wood: Effect of Water Content and Temperature. *Soil Biol. Biochem.* 15(5): 501-510.
- Boddy, L. (1983b): Effect of Temperature and Water Potential on Growth Rate of Wood-rotting Basidiomycetes. *Trans. Br. Mycol. Soc.* 80(1): 141-149.
- Boddy, L. (1983c): Microclimate and Moisture Dynamics of Wood Decomposing in Terrestrial Ecosystems. *Soil Biol. Biochem.* 15(2): 149-157.
- Boddy, L., Gibbon, O.M., Grundy, M.A. (1985): Ecology of *Daldinia concentrica*: Effect of Abiotic Variables on Mycelial Extension and Interspecific Interactions. *Trans. Br. Mycol. Soc.* 85(2): 201-211.
- Boddy, L. & Rayner, A.D.M. (1983): Origins of Decay in Living Deciduous Trees: The Role of Moisture Content and a Re-appraisal of the Expanded Concept of Tree Decay. *New Phytol.* 94: 623-641.
- Bouslimi, B., Koubaa, A., Bergeron, Y. (2014): Effects of biodegradation by brown-rot decay on selected wood properties in eastern white cedar (*Thuja occidentalis* L.). *International Biodeterioration & Biodegradation* 87: 87-98.
- Bravery, A.F. (1991): The Strategy for Eradication of *Serpula lacrymans*. In: Jennings, D.H. & Bravery, A.F. (eds.): *Serpula lacrymans*. Fundamental Biology and Control Strategies. John Wiley & Sons, Chichester: 117-130.
- Bresinsky, A. (2006): Schneehaubenpilze – Austernseitlinge. *Tintling* 46(4): 8-18.
- Bricknell, J.M. (1991): Surveying to Determine the Presence and Extent of an Attack of Dry Rot Within Buildings in the United Kingdom. In: Jennings, D.H. & Bravery, A.F. (eds.): *Serpula lacrymans*. Fundamental Biology and Control Strategies. John Wiley & Sons, Chichester: 95-115.

- Brischke, C. (2007): Untersuchungen abbaubestimmender Faktoren zur Vorhersage der Gebrauchsdauer feuchtebeanspruchter Holzbauteile. Dissertation Universität Hamburg, Hamburg: 321 pp.
- Brischke, C., Bayerbach, R., Rapp, A.O. (2006): Decay-influencing factors: A basis for service life prediction of wood and wood-based products. *Wood Material Science & Engineering* 1(3-4): 91-107.
- Brischke, C. & Rapp, A.O. (2008): Dose-response relationship between wood moisture content, wood temperature and fungal decay determined for 23 European field test sites. *Wood. Sci. Technol.* 42: 507-518.
- Brown, J., Fahim, M.M., Hutchinson, S.A. (1968): Some effects of atmospheric humidity on the growth of *Serpula lacrimans*. *Trans. Br. Mycol. Soc.* 51(3-4): 507-510.
- Brownlee, C. & Jennings, D.H. (1981): The content of soluble carbohydrates and their translocation in mycelium of *Serpula lacrimans*. *Trans. Br. Mycol. Soc.* 77(3): 615-619.
- Brownlee, C. & Jennings, D.H. (1982a): Long distance translocation in *Serpula lacrimans*: velocity estimates and the continuous monitoring of induced perturbations. *Trans. Br. Mycol. Soc.* 79(1): 143-148.
- Brownlee, C. & Jennings, D.H. (1982b): Pathway of translocation in *Serpula lacrimans*. *Trans. Br. Mycol. Soc.* 79(3): 401-407.
- Buchwald, G. (1990): Über das Vorkommen von *Serpula lacrymans* (Wulf.: Fr.) Schröter in der Bundesrepublik Deutschland. *Zeitschrift für Mykologie* 56(1): 79-86.
- Burdsall, H.H. Jr. (1991): *Meruliporia (Poria) incrassata*: Occurrence and Significance in the United States as a Dry Rot Fungus. In: Jennings, D.H. & Bravery, A.F. (eds.): *Serpula lacrymans*. Fundamental Biology and Control Strategies. John Wiley & Sons, Chichester: 189-191.
- Carll, C.G. & Highley, T.L. (1999): Decay of Wood and Wood-Based Products Above Ground in Buildings. *Journal of Testing and Evaluation* 27(2): 150-158.
- Cartwright, K.S.G. & Findlay, W.P.K. (1934): Studies in the Physiology of Wood-destroying Fungi. II. Temperature and Rate of Growth. *Annals of Botany* 48 (2): 481-497.
- Cartwright, K.S.G. & Findlay, W.P.K. (1943): Timber Decay. *Biological Reviews* 18(4): 145-158.
- Cartwright, K.S.G. & Findlay, W.P.K. (1958): Decay of Timber and its Prevention. 2nd edition. His Majesty's Stationery Office, Department of Scientific and Industrial Research, London: 332 pp.
- Chen, H., Harmon, M.E., Griffiths, R.P., Hicks, W. (2000): Effects of temperature and moisture on carbon respired from decomposing woody roots. *Forest Ecology and Management* 138: 51-64.
- Choeyklin, R., Hattori, T., Jones, E.B.G. (2011): A checklist of aphyllophoraceous fungi in Thailand: Part I. New records. *Mycosphere* 2(2): 161-177.

- Chowdhary, A., Randhawa, H.S., Gaur, S.N., Agarwal, K., Kathuria, S., Roy, P., Klaassen, C.H., Meis, J.F. (2012): *Schizophyllum commune* as an emerging fungal pathogen: a review and report of two cases. *Mycoses* 56: 1-10.
- Clarke, R.W., Jennings, D.H., Coggins, C.R. (1980): Growth of *Serpula lacrimans* in relation to water potential of substrate. *Trans. Br. Mycol. Soc.* 75(2): 271-280.
- Coggins, C.R. (1991): Growth Characteristics in a Building. In: Jennings, D.H. & Bravery, A.F. (eds.): *Serpula lacrymans*. Fundamental biology and control strategies. John Wiley & Sons, Chichester: 81-93.
- Cojocar, A. & Tănase, C. (2010): Macromycetes identified on the construction wood of historical monuments from Moldavia and causes of their development. *J. Plant Develop.* 17: 63-68.
- Collier, K.J. (2014): Wood decay rates and macroinvertebrate community structure along contrasting human pressure gradients (Waikato, New Zealand). *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research* 48(1): 97-111.
- Cookson, L.J., Page, D., Singh, T. (2014): Accelerated above-ground decay testing in Australia and New Zealand. *International Biodeterioration & Biodegradation* 86: 210-217.
- Cotter, D.A. & Niederpruem D.J. (1971): Control of Arabitol Formation in *Schizophyllum commune* Development. *Arch. Mikrobiol.* 78: 128-138.
- Curling, S., Clausen, C.A., Winandy, J.E. (2001): The effect of hemicellulose degradation on the mechanical properties of wood during brown rot decay. The International Research Group on Wood Protection. Section 2. Test methodology and assessment. IRG/WP 01-20219. IRG Secretariat, Stockholm: 1-10.
- Curling, S., Winandy, J.E., Clausen, C.A. (2000): An experimental method to simulate incipient decay of wood by basidiomycete fungi. The International Research Group on Wood Protection. Section 2. Test methodology and assessment. IRG/WP 00-20200. IRG Secretariat, Stockholm: 1-12.
- Curling, S.F. & Murphy, R.J. (1999): The effect of artificial ageing on the durability of wood-based board materials against basidiomycete decay fungi. *Wood Science and Technology* 33: 245-257.
- Curling, S.F., Clausen, C.A., Winandy, J.E. (2002): Experimental method to quantify progressive stages of decay of wood by basidiomycete fungi. *International Biodeterioration & Biodegradation* 49: 13-19.
- Curling, S.F., Winandy, J.E., Carll, C., Micales, J.A., Tenwolde, A. (2003): How Variability in OSB Mechanical Properties Affects Biological Durability Testing. *Holzforschung* 57: 8-12.
- Cymorek, S. & Hegarty, B. (1986a): A technique for fructification and basidiospore production by *Serpula lacrymans* (SCHUM. EX FR.) SF GRAY in artificial culture. Document No: IRG/WP/2255. The International Research group on Wood Preservation. Stockholm: 13 pp.

- Cymorek, S. & Hegarty, B. (1986b): Differences among Growth and Decay capacities of 25 Old and New Strains of the Dry-rot Fungus *Serpula lacrymans* Using a Special Test arrangement. *Material und Organismen* 21(4): 237-249.
- Dai, Y.C. (2005): First report of Sapwood Rot of Peach Caused by *Schizophyllum commune* in China. *Plant Disease* 89 (7): p. 778.
- Davidson, F.A. (2007): Mathematical modelling of mycelia: a question of scale. *Fungal Biology Reviews* 21: 30-41.
- DIN 4074-1:2012-06: Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit – Teil 1: Nadelschnittholz. Stand 2012-08. Deutsches Institut für Normung e. V.. Beuth Verlag, Berlin: 23 pp.
- DIN 68800-1:2011-10: Holzschutz – Teil 1: Allgemeines. Beuth Verlag, Berlin: 35 pp.
- DIN 68800-2:2012-02: Holzschutz – Teil 2: Vorbeugende bauliche Maßnahmen im Hochbau. Beuth Verlag, Berlin: 51 pp.
- Dix, N.J. (1984): Minimum Water Potentials for Growth of some Litter-decomposing Agarics and other Basidiomycetes. *Trans. Br. Mycol. Soc.* 83 (1): 152-153.
- Dix, N.J. (1985): Changes in Relationship between Water Content and Water Potential after Decay and its Significance for Fungal Successions. *Trans. Br. Mycol. Soc.* 85(4): 649-653.
- Doi, S. (1988): Studies on the damages of Wooden Constructions from *Serpula lacrymans* (Fr.) Gray. Report of the Hokkaido Forest Products Research Institute 78: 1–81.
- Doi, S. (1991): *Serpula lacrymans* in Japan. In: Jennings, D.H. & Bravery, A.F. (eds.): *Serpula lacrymans*. Fundamental Biology and Control Strategies. John Wiley & Sons, Chichester: 173-187.
- Dong, J.L., Zhang, Y.W., Zhang, R.H., Huang, W.Z., Zhang, Y.Z. (2005): Influence of culture conditions on laccase production and isozyme patterns in the white-rot fungus *Trametes gallica*. *J. Basic Microbiol.* 45(3): 190-198.
- Dowson, C.G., Boddy, L., Rayner, A.D.M. (1989): Development and extension of mycelial cords in soil at different temperatures and moisture contents. *Mycol. Res.* 92(4): 383-391.
- Duncan, C.G. & Lombard, F.F. (1965): Fungi associated with principal decays in wood products in the United States. U.S. Forest Service Research Paper WO-4, Department of Agriculture, Washinton, D. C.: 1-31.
- Eamus, D. & Jennings, D.H. (1984): Determination of Water, Solute and Turgor Potentials of Mycelium of Various Basidiomycete Fungi causing Wood Decay. *Journal of Experimental Botany* 35(161): 1782-1786.
- Eamus, D. & Jennings, D.H. (1986): Turgor and fungal growth: Studies on water relations of mycelia of *Serpula lacrimans* and *Phallus impudicus*. *Trans. Br. Mycol. Soc.* 86(4): 527-535.
- Emerhi, E.A., Ekeke, B.A., Oyebade, B.A. (2008): Biodegrading effects of some rot fungi on *Pinus caribaea* wood. *African Journal of Biotechnology* 7(10): 1512-1515.
- Engels, N. (2010): Arbeitshilfen der Restaurierungswerkstätten. Informationsblatt 7. Pilzbefall in Gebäuden – was tun? LVR-Amt für Denkmalpflege im Rheinland, Pulheim: 7pp.

Eslyn, W.E. (1970): Utility Pole Decay. Part II: Basidiomycetes Associated with Decay in Poles. Wood Science and Technology 4: 97-103.

Eslyn, W.E. (1983): Decay in mine timbers. Part I. Sampling procedures and conditions and descriptions of samples. Forest Prod. J. 33(6): 27-30.

Eslyn, W.E. (1986): Utility Pole Decay. Part 4: Growth-Temperature Relations and Decay Capabilities of Eleven Major Utility Pole Decay Fungi. Holzforschung 40: 69-77.

Eslyn, W.E. & Lombard, F.F. (1983): Decay in mine timbers. Part II. Basidiomycetes associated with decay of coal mine timbers. Forest Products Journal 33 (7/8): 19-23.

Etheridge, D.E. (1957): Moisture and Temperature Relations of Heartwood Fungi in Subalpine Spruce. Canadian Journal of Botany 35: 935-944.

Falck, R. (1906): Über den Hausschwamm. Zeitschrift für Hygiene und Infektionskrankheiten 55(1): 478-505.

Falck, R. & Falck, O. (1912): Die *Merulius*-Fäule des Bauholzes. In: Möller, A. (ed.): Hausschwammforschungen in amtlichem Auftrage. Sechstes Heft. Gustav Fischer, Jena: XVI+328 pp.

Ferdinandsen, C. & Buchwald, N.F. (1937): Nogle undersøgelser over tømmersvampe. Med saerligt hensyn til deres fugtigt-hedskrav. Danske Skovforen. Tidsskr. 1937: 685-715.

Findlay, W.P.K. (1934): Studies in the Physiology of Wood-destroying Fungi. I. The Effect of Nitrogen Content upon the Rate of Decay of Timber. Annals of Botany 48: 109-117.

Findlay, W.P.K. (1940): Studies in the Physiology of Wood-destroying Fungi. III. Progress of Decay under Natural and under Controlled Conditions. Annals of Botany N.S. 4(16): 701-712.

Flohr, E. (2005): Balkenblättling (*Gleophyllum trabeum*). Schützen & Erhalten September 2005: 5-6.

Fraiture, A. (2008): Introduction à la mycologie domestique. Les champignons qui croissent dans les maisons.

Freschet, G.T., Weedon, J.T., Aerts, R., Hal van, J.R., Cornelissen, J.H.C. (2012): Interspecific differences in wood decay rates: insights from a new short-term method to study long-term wood decomposition. Journal of Ecology 100: 161-170.

Fritzsche, H. (1866): Vollständige Abhandlung über den Hausschwamm. Mittheilungen des Sächsischen Ingenieur-Vereines 4: I-X + 1-53.

Fuhr, M.J., Stührk, C., Schubert, M., Schwarze, F.W.M.R., Herrmann, H.J. (2012): Modelling the effect of environmental factors on the hyphal growth of the basidiomycete *Physisporinus vitreus*. Journal of Basic Microbiology 52: 523-530.

Gäumann E. (1940): Über die Temperaturansprüche des Hausschwammes. Zentralblatt für Bakteriologie, Parasitenkunde und Infektionskrankheiten 101(2): 409-410.

Geith, K. (2009): Holzzerstörende Organismen in Gebäuden. Ungebetene Gäste in historischen Bauwerken und Neubauten. Das Jurahaus 15: 76-80.

- Ginterová, A., & Lazarová, A. (1987): Degradation Dynamics of Lignocellulose Materials by Wood-Rotting *Pleurotus* Fungi. *Folia Microbiol.* 32: 434-437.
- Gobakken, L.R., Vestøl, G.I., Sivertsen, M.S. (2011). Effects of wood properties on surface mould growth on coated claddings of Norway spruce. In: Proceedings of the 7th meeting of the Nordic-Baltic Network in Wood Material Science & Engineering (WSE). October 27-28, 2011, Oslo, Norway. *Skog og Landskap* 2011(15): 79-84.
- Gonzalez, J.M. & Morrell, J.J. (2012): Effects of environmental factors on decay rates of selected white- and brown-rot fungi. *Wood and Fiber Science* 44(4): 343-356.
- Good, H.M. & Darrah, J.A. (1967): Rates of decay in wood measured by carbon dioxide production. *Annals of Applied Biology* 59(3): 463-472.
- Grading, C., Promberger, A., Schwanninger, M., Messner, K., Sixta, H. (2004): Characterization of fungal growth on Lenzing Beech Logs. *Lenzinger Berichte* 83: 1-5.
- Gramss, G. (1986): Invasion of wood by basidiomycetous fungi. III. Mycelial spread in heavily wounded understory trees as determined by the interaction of kratovirulence and pathovirulence properties. *J. Basic Microbiol.* 26(7): 389-408.
- Griffin, D.M. (1977): Water Potential and Wood-decay Fungi. *Ann. Rev. Phytopathol.* 15: 319-329.
- Griffith, G.S. & Boddy, L. (1990): Fungal decomposition of attached angiosperm twigs. I. Decay community development in ash, beech and oak. *New Phytol.* 116: 407-415.
- Griffith, G.S. & Boddy, L. (1991a): Fungal decomposition of attached angiosperm twigs. II. Moisture relations of twigs of ash (*Fraxinus excelsior* L.). *New Phytol.* 117: 251-257.
- Griffith, G.S. & Boddy, L. (1991b): Fungal decomposition of attached angiosperm twigs. III. Effect of water potential and temperature on fungal growth, survival and decay of wood. *New Phytol.* 117: 259-269.
- Griffith, G.S. & Boddy, L. (1991c): Fungal decomposition of attached angiosperm twigs. IV. Effect of water potential on interactions between fungi on agar and in wood. *New Phytol.* 117: 633-641.
- Grosse-Brauckmann, H. (1987): Über einige seltene resupinate Basidiomyceten. *Zeitschrift für Mykologie* 53(1): 81-92.
- Guillite, O. (1992): Epidémiologie des attaques. In: Rammeloo, J. (ed.): *Le mérule et autres champignons nuisibles dans les bâtiments*. Jardin botanique national de Belgique, Meise: 34-42.
- Gulden, G. & Torkelsen, A.E. (1996): A catalogue of Svalbard plants, fungi, algae and cyanobacteria. Part 3. Fungi I. Basidiomycota: Agaricales, Gasteromycetales, Aphyllophorales, Exobasidiales, Dacrymycetales and Tremellales. *Norsk Polarinstitutt Skrifter*. 198:173-206.
- Han, C.-H., Zhang, G.-Q., Wang, H.-X., Ng, T.B. (2010): Schizolysin, a hemolysin from the split gil mushroom *Schizophyllum commune*. *FEMS Microbiol. Lett.* 309: 115-121.

Hartig, R. K. F. v. T. (1902): Der echte Hausschwamm und andere das Bauholz zerstörende Pilze. J. Springer, Berlin: 105 pp.

Hattori, T. (1999): *Phellinus setifer* sp. nov. and *P. acontextus*, two noteworthy polypores from temperate areas of Japan, with notes on their allies. Mycoscience 40: 483-490.

Häßler, D. (2008): Schäden an Holzbrücken – Teil 2. Fußgängerbrücke aus Holz wegen umfangreicher Baufehler und Bauschäden abbruchreif. Der bausachverständige 4/2008: 19-20.

Hegarty, B. (1991): Factors Affecting the Fruiting of the Dry Rot Fungus *Serpula lacrymans*. In: Jennings, D.H. & Bravery, A.F. (eds.): *Serpula lacrymans*. Fundamental Biology and Control Strategies. John Wiley & Sons, Chichester: 39-53.

Held, B.W., Jurgens, J.A., Arenz, B.E., Duncan, S.M., Farrell, R.L., Blanchette, R.A. (2005): Environmental factors influencing microbial growth inside the historic expedition huts of Ross Island, Antarctica. International Biodeterioration & Biodegradation 55: 45–53.

Hérault, B., Beauchêne, J., Muller, F., Wagner, F., Baraloto, C., Blanc, L., Martin, J.-M. (2010): Modelling decay rates of dead wood in a neotropical forest. Oecologia 164(1):243-51.

Herliyana, E.N., Tsunoda, K., Hadi, Y.S., Iskandaria, A., Natalia, D.A. (2013): *Pleurotus Ostreatus* for Durability Test of Rubber and Sengon Woods using Indonesian National Standard and Japanese Standard Methods. International Scholarly and Scientific Research & Innovation 7(2): 645-650.

Hernández, R.E. (2007): Moisture Sorption Properties of Hardwoods as Affected by Their Extraneous Substances, Wood Density, and Interlocked Grain. Wood and Fiber Science, 39(1): 132-145.

Herrick, J.A. (1939): The growth of *Stereum gausapatum* Fries in relation to Temperature and Acidity. Ohio Journal of Science 39(5): 254-258.

Hietala, A.M., Stefańczyk, E., Nagy, N.E., Fossdal, C.G. (2014): Influence of wood durability on the suppressive effect of increased temperature on wood decay by the brown-rot fungus *Postia placenta*. Holzforschung 68(1): 123-131

Hjortstam, K., Larsson, K.-H., Ryvarden, L., Eriksson, J. (1987): The Corticiaceae of North Europe. Volume 1. Introduction and keys. Fungiflora, Oslo: 59 pp.

Horisawa, S., Sakuma Y., Takata, K., Doi, S. (2004): Detection of intra- and interspecific variation of the dry rot fungus *Serpula lacrymans* by PCR-RFLP and RAPD analysis. J. Wood Sci. 50: 427–432.

Huckfeldt, T. (2008): Fäulepilze an Fenstern. Schadensbeispiele. In: Schneider, U / Pax Classic GmbH (Hrsg.): Pax Classic Fachtagung. Fenster im Baudenkmal zur Denkmal 2008. Tagungsbeiträge. Lukas Verlag für Kunst- und Geistesgeschichte, Berlin: 25-43.

Huckfeldt, T. (2016): Wen haben wir den da? Sicheres Erkennen holzzerstörender Pilze. Bautenschutz + Bausanierung 4/2016: 26-30.

- Huckfeldt, T., Dill, I., Steeghs-Alcer, K., Schmidt, O. (2011): Morpho-anatomische und molokulare Charakterisierung des Hausfäulepilzes *Leucogyrophana pulverulenta*. Zeitschrift für Mykologie 77(1): 45-60.
- Huckfeldt, T. & Schmidt, O. (2006): Hausfäule- und Bauholzpilze. Diagnose und Sanierung. Rudolf Müller, Köln: 377 pp.
- Huckfeldt, T. & Schmidt, O. (2006): Identification key for European strand-forming house-rot fungi. Mycologist 20: 42-56.
- Huckfeldt, T. & Schmidt, O. (2015): Hausfäule- und Bauholzpilze. Diagnose und Sanierung. 2. Auflage. Rudolf Müller, Köln: 610 pp.
- Huckfeldt, T., Schmidt, O., Quader, H. (2005): Ökologische Untersuchungen am Echten Hausschwamm und weiteren Hausfäulepilzen. Holz als Roh- und Werkstoff 63: 209–219.
- Huckfeldt, T. & Schröter, C. (2005): Baumschwämme, seltene „Gäste“ im Haus. Schützen & Erhalten September 2005: 6-8.
- Humphrey, C.J. & Siggers, P.V. (1933): Temperature relations of wood-destroying fungi. Journal of Agricultural Research 47(12): 997-1008.
- Ibach, R.E., Gnatowski, M., Sun, G. (2013): Field and Labotatory Decay Evaluations of Wood-Plastic Composites. Forest products Journal 63(3-4): 76-97.
- Ingold, C.T. (1981): *Flammulina velutipes* in relation to drying and freezing. Trans. Br. Mycol. Soc. 76(1): 150-152.
- Jahn, E., Patscheke, G., Kerner, G. (1963): Der Verlauf des Abbaues von Totbuchenholz und seiner Komponenten Zellulose, Lignin und Pentosan durch Weißfäulepilze [*Pleurotus ostreatus* (JACQ. EX FR.) QUÉL. Und *Trametes versicolor* (L. EX FR.) PILAT]. Zeitschirft für Allg. Mikrobiologie 3(4): 235-250.
- Jahn, H. (1969): Einige resupinate und halbresupinate „Stachelpilze“ in Deutschland. Westfälische Pilzbriefe 8(7/8): 113-144.
- Jain, P.C. (2008): Applied microbiology: Microbial degradation of grains, oil seeds, textiles, wood, corrosion of metals and bioleaching of mineral ores. Department of Applied Microbiology & Biotechnology, Dr. Harisingh Gour University 14 February 2008 (2008-02-14), pp: 1-37. <http://nsdl.niscair.res.in/bitstream/123456789/558/1/MicrobialDegradation.pdf>. Assessed 2016 09 06.
- Jämsä, S., Ahola, P., Viitaniemi, P (1999): Performace of coated heat-treated wood. Surface Coatings International. Journal of the Oil & Colour Chemist's Association 82(6): 297-300.
- Jämsä, S., Ahola, P., Viitaniemi, P. (2000): Long-term natural weathering of coated Thermowood. Pigment & Resin Technology 29(2): 68-74.
- Jennings, D.H. (1991): The Physiology and Biochemistry of the vegetative Mycelium. In: Jennings, D.H. & Bravery, A.F. (eds.): *Serpula lacrymans*. Fundamental biology and control strategies. John Wiley & Sons, Chichester: 55-79.

Karasiński, D. (2010): Polish resupinate Russulales: the genus *Vararia*. *Acta Mycologica* 45(1): 45-56.

Kauserud, H., Högberg, N., Knudsen, H., Elborne, S.A., Schumacher, T. (2004): Molecular phylogenetics suggest a North American link between the anthropogenic dry rot fungus *Serpula lacrymans* and its wild relative *S. himantioides*. *Molecular Ecology* 13: 3137-3146.

Kauserud, H., Sætre, G.-P., Schmidt, O., Decock, C., Schumacher, T. (2006): Genetics of self/nonself recognition in *Serpula lacrymans*. *Fungal Genetics and Biology* 43: 503-510.

Kauserud, H., Schmidt, O., Elfstrand, M., Högberg, N. (2004): Extremely low AFLP variation in the European dry rot fungus (*Serpula lacrymans*): implications for self/nonself-recognition. *Mycol. Res.* 108(11): 1264-1270.

Kauserud, H., Svegård, I.B., Decock, C., Hallenberg, N. (2007): Hybridization among cryptic species of the cellar fungus *Coniophora puteana* (Basidiomycota). *Molecular Ecology* 16: 389-399.

Kazemi, S.M., Dickinson, D.J., Murphy, R. J. (2001): Effects of Initial Moisture Content on Wood Decay at Different Levels of Gaseous Oxygen Concentrations. *J. Agric. Sci. Technol.* 3: 293-304.

Kehl, D. (2011): Pilzmodelle – Ist der Befall vorhersehbar? Oder: Wann geht Holz kaputt? *Holzbau – Die neue Quadriga* 1/2011: 23-26.

Kehl, D. (2012) Holzbalkenköpfe im Mauerwerk. Stand der Erkenntnisse. *Holzbau – Die neue Quadriga* 6/2012: 20-25.

Kehl, D. (2014): Holzbalkenköpfe bei innen gedämmtem Mauerwerk - Was können wir aus verschiedenen Projekten lernen? 25. Hanseatische Sanierungstage vom 30. Oktober bis 1. November 2014 im Ostseebad Heringsdorf/Usedom. *Vorträge*, Beuth Verlag, Berlin: 71-84.

Kehl, D. (2016): Kapitel 6.7. Holzbalkenköpfe bei innengedämmtem Mauerwerk. In: *Fachverband Innendämmung e. V. (Hrsg.): Praxishandbuch Innendämmung*. Müller Verlag, Köln: 226-231.

Kehl, D., Plagge, R., Grunewald, J. (2012): Wann geht Holz kaputt? Nachweistechische Beurteilung von Holz zerstörenden Pilzen. 23. Hanseatische Sanierungstage vom 1. bis 3. November 2012 im Ostseebad Heringsdorf/Usedom. *Vorträge*, Beuth Verlag, Berlin: 61-73.

Kehl, D. & Ruisinger, U. (2013): Holzbalkenköpfe im Mauerwerk – Was strömt denn da? *Holzbau – Die neue Quadriga*, 5/2013: 39-42.

Kehl, D., Ruisinger, U., Plagge, R., Grunewald, J. (2013): Wooden Beam Ends in Masonry with Interior Insulation – A Literature Review and Simulation on Causes and Assessment of Decay. *Proceedings of 2nd Central European Symposium on Building Physics, Vienna 2013*: 299-304.

Kehl, D., Ruisinger, U.; Plagge, R.; Grunewald, J. (2013): Holzbalkenköpfe bei innengedämmtem Mauerwerk – Ursachen der Holzzerstörung und Beurteilung von Holz zerstörenden Pilzen. 2. Internationaler Innendämmkongress. *Tagungsunterlage*, TU Dresden, Selbstverlag, Dresden: 226-240.

- Kempe, K. (2009): Holzschädlinge. Vermeiden, erkennen, bekämpfen. Fraunhofer IRB-Verlag, Stuttgart.
- Kleist, H. & Seehann, G. (1997): Colonization patterns and topochemical aspects of sap streak caused by *Stereum sanguinolentum* in Norway spruce. Eur. J. For. Path. 27: 351-361.
- Kleist, G. & Seehann, G. (1999): Der Eichenporling, *Donkioporia expansa* – ein wenig bekannter Holzzerstörer in Gebäuden. Zeitschrift für Mykologie 65(1): 23-32.
- Kloiber, M., Válek, J., Bláha, J., Čechová, J. (2013): Reconstruction of a Baroque Open Beam Ceiling Based on Material Analysis. Advanced Materials Research 688: 10-19.
- Koch, A.-P. (1991): The Current Status of Dry Rot in Denmark and Control Strategies. In: Jennings, D.H. & Bravery, A.F. (eds.): *Serpula lacrymans*. Fundamental Biology and Control Strategies. John Wiley & Sons, Chichester: 147-154.
- Koch, G., Rehbein, M., Lenz, M.-T. (2007): Natürliche Dauerhaftigkeit Sibirischer Lärche. Holz-Zentralblatt 22: 593-597.
- Koch, W. (1958): Untersuchungen über Mycelwachstum und Fruchtkörperbildung bei einigen Basidiomyceten (*Polystictus versicolor*, *Polyporus annosus*, *Pleurotus ostreatus* und *Psalliota bispora*). Archiv für Mikrobiologie 30: 409-432.
- Koenigs, J.W. (1974): Production of Hydrogen Peroxide by Wood-Rotting Fungi in Wood and Its Correlation with Weight Loss, Depolymerization, and pH Changes. Arch. Microbiol. 99: 129-145.
- Koltin, Y., Wessels, J.G.H., Valk van der, P. (1973): Chlamydospores of *Schizophyllum commune*. Arch. Mikrobiol. 91: 179-182.
- Kong, W.-S. (2004): Oyster Mushroom Cultivation. In: MushWorld (ed.): Mushroom Growers' Handbook 1. MushWorld: 54-61.
- Koske, R.E. & Tessier, B. (1986): Growth of some wood and litter-decay basidiomycetes at reduced water potential. Trans. Br. Mycol. Soc. 86 (1): 156-158.
- Kosonen, T. & Huhtinen, S. (2008): Wood-rotting basidiomycetes of Svalbard (Norway). Karstenia 48: 21–28.
- Krause, D. (2009): (K)eine Bekämpfung des Echten Hausschwammes im Münster Bad Doberan. Der Bausachverständige 5(2): 15-20.
- Kristen, T. & Westhoff, W. (1957) Eigenschaften der Holzwolle-Leichtbauplatten in Abhängigkeit vom Feuchtigkeitsgehalt. Untersuchungen des Instituts für Baustoffkunde und Materialprüfung der Technischen Hochschule Braunschweig. Auszug aus dem Untersuchungsbericht vom März 1954. In: Kristen, T., Westhoff, W., Rüsck, H., Stois, A., Hierl, J. (Hrsg.): Holzwolle-Leichtbauplatten. Eigenschaften, Feuchtigkeits- und Frostbeanspruchung. Ernst & Sohn, Berlin: 25-42.
- Kumi-Woode, B.G. (1996): Natural decay resistance of some Ghanaian timbers and wood decay hazard potential for Ghana. Master thesis. Faculty of Forestry, Lakehead University, Thunder Bay, Ontario, Canada.

- Laks, P.E., Pruner, M.S., Pickens, J.B., Woods, T.L. (1992): Efficacy of chlorothalonil against 15 wood decay fungi. *Forest Products Journal* 42(9): 33-38.
- Larsson, K.-H. (2007): Molecular phylogeny of *Hyphoderma* and the reinstatement of *Peniophorella*. *Mycological Research* 3: 186-195.
- Lenz, P.L. & McKay, H.H. (1966): Delineations of Forest Fungi: Morphology and Relationships of *Vararia*. *Mycopathologia et Mycologia Applicata* 29: 1-25.
- Liese, W. & Ammer, U. (1964): Über den Befall von Buchenholz durch Moderfäulepilze in Abhängigkeit von der Holzfeuchtigkeit. *Holzforschung* 18(4): 97-102.
- Liu, W., Schaefer, D., Qiao, L., Liu, X. (2013): What controls the variability of wood-decay rates? *Forest Ecology and Management* 310: 623-631.
- Lohwag K. (1952a): Der Hausschwamm *Gyrophana lacrymans* (WULF.) PAT. und seine Begleiter. *Sydowia* 6: 268–283.
- Lohwag, K. (1952b): Zur Fruchtkörperbildung holzerstörender höherer Pilze in Reinkultur. *Sydowia* 6: 323-335.
- Low, G.A., Palfreyman, J.W., White, N.A., Sinclair, D.C.R. (1999): Development of Model Systems for Investigations of the Dry Rot Fungus *Serpula lacrymans* (Schumach. Ex Fr.) Gray: Use for Analysis of the Environmental Sensitivity of the Organism. *Holzforschung* 53: 129-136.
- Low, G.A., Young, M.E., Martin, P., Palfreyman, J.W. (2000): Assessing the relationship between the dry rot fungus *Serpula lacrymans* and selected forms of masonry. *International Biodeterioration & Biodegradation* 46: 141-150.
- Maier, J. (2010): Trockenstarre, Moderfäule und vermurmte Bereiche. Pilzbefall auf Holz. *Der Maler und Lackierermeister* 5/2010: 12-16.
- Mankowski, M. & Morrell, J.J. (2000): Patterns of Fungal Attack in Wood-Plastic Composites Following Exposure in a Soil Block Test. *Wood and Fiber Science* 32(3): 340-345.
- Marutzky R., Grosser von, D., Hertel, H., Radovic, B., Willeitner H., DIN , iVTH (Hrsg., 2013): Beuth Kommentar Holzschutz. Praxiskommentar zu DIN 68800 Teile 1 bis 4. 2., vollständig überarbeitete Auflage. Beuth Verlag, Berlin: 372 pp.
- Mattsson, J. & Flyen, A.-C. (2008): Biodeterioration in buildings in Svalbard (Spitsbergen). *Historical Polar Bases – Preservation and Management*. ICOMOS. International Polar Heritage Committee: 23-29.
- Mattson, J., Flyen, A.-C., Nunez, M. (2010): Wood-decaying fungi in protected buildings and structures on Svalbard. *Agarica* 29: 5-14.
- Maurice, S., Coroller, L., Debaets, S., Vasseur, V., Le Floch, G., Barbier, G. (2011): Modelling the effect of temperature, water activity and pH on the growth of *Serpula lacrymans*. *Journal of Applied Microbiology* ISSN 1364-5072: 1-11.
- Meyer, L. (2012): Comparative wood durability studies in the field with particular reference to the material climate. Master Thesis, Leibnitz University Hannover, Hannover: 85 pp.

- Meyer, L., Brischke, C., Pilgård, A. (2012): Moisture performance based wood durability testing. The International Research Group on Wood Protection. Section 2. Test methodology and assessment. IRG/WP 12-20495. IRG Secretariat, Stockholm: 1-26.
- Moreth, U. & Schmidt, O. (2005): Investigations on ribosomal DNA of indoor wood decay fungi for their characterization and identification. *Holzforschung* 59: 90-93.
- Mori, S., Itoh, A., Nanami, S., Tan, S., Chong, L., Yamakura, T. (2013): Effect of wood density and water permeability on wood decomposition rates of 32 Bornean rainforest trees. *Journal of Plant Ecology* 7(4):356-363.
- Morrell, J.J., Miller, D.J., Lebow, S.T. (1998): Above Ground Performance of Preservative-treated Western Wood Species. Proceedings Ninety-fourth Annual Meeting of the American Wood-preservers' Association, Scottsdale, Arizona, May 17-19, 1998. American Wood-preservers' Association, Granbury, Texas: 249-256.
- Morton, H.L. & French, D.W. (1966): Factors Affecting Germination of Spores of Wood-Rotting Fungi on Wood. *Forest Products Journal* 16(3): 25-30.
- Moser, M. (1958): Der Einfluss tiefer Temperaturen auf das Wachstum und die Lebenstätigkeit höherer Pilze mit spezieller Berücksichtigung von Mykorrhizapilzen. *Sydowia* 12: 386-399.
- Mswaka, A.Y. & Magan, N. (1999): Temperature and water potential relations of tropical *Trametes* and other wood-decay fungi from indigenous forests of Zimbabwe. *Mycol. Res.* 103(10): 1309-1317.
- Müller, U. (2011): Holzbalkenköpfe in historischem Mauerwerk. Zwischen Luftumspülung und Innendämmung. *Holzbau – Die neue Quadriga* 1/2011: 13-17.
- Nelson, B.C., Goñi, M.A., Hedges, J.I. Blanchette, R.A. (1995): Soft-Rot Fungal Degradation of Lignin in 2700 Year Old Archaeological Woods. *Holzforschung* 49: 1-10.
- Nicolotti, G., Gonthier, P., Guglielmo, F., Garbelotto, M.M. (2009): A Biomolecular Method for the Detection of Wood Decay Fungi: A Focus in Tree Stability Assessment. *Arboriculture & Urban Forestry* 35(1): 14-19.
- Niederpruem, D.J. (1963): Role of Carbon Dioxide in the Control of Fruiting of *Schizophyllum commune*. *J. Bacteriol.* 85: 1300-1308.
- Nilsson, R.H., Hallenberg, N., Nordén, B., Maekawa, N., Wu, S.-H. (2003): Phylogeography of *Hyphoderma setigerum* (Basidiomycota) in the Northern Hemisphere. *Mycol. Res.* 107(6): 645-652.
- Novotný, Č., Erbanová, P., Cajthami, T., Rothschild, N., Dosoretz, C., Šašek, V. (2000): *Irpex lacteus*, a white rot fungus applicable to water and soil bioremediation. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 54:850-853.
- Nuss, I. (2009): Der Hausschwamm – Mythos und Wahrheit. *Der Bausachverständige* 6/2009: 10-16.

- Nuss, I., Jennings, D.H., Veltkamp, C.J. (1991): Morphology of *Serpula lacrymans*. In: Jennings, D.H. & Bravery, A.F. (eds.): *Serpula lacrymans*. Fundamental Biology and Control Strategies. John Wiley & Sons, Chichester: 9-38.
- Ogawa, H., Fujimura, M., Takeuchi, Y., Makimura, K. (2009): The importance of basidiomycetous fungi cultures from the sputum of chronic idiopathic cough: A study to determine the existence of recognizable clinical patterns to distinguish CIC from non-CIC. *Respiratory Medicine* 103: 1492-1497.
- Ogawa, H., Fujimura, M., Takeuchi, Y., Makimura, K., Satoh, K. (2011): Sensitization to *Bjerkandera adusta* Enhances Severity of Cough Symptom in Patients with Fungus-Associated Chronic Cough (FACC). *Med. Mycol. J.* 52: 205-212.
- Ogawa, H., Fujimura, M., Takeuchi, Y., Makimura, K., Satoh, K. (2012): The Definitive Diagnostic Process and Successful Treatment for ABPM Caused by *Schizophyllum commune*: A Report of Two Cases. *Allergology International* 61: 163-169.
- Ohga S. (1990): Growth Rate of Mycelium of Shiitake, *Lentinus edodes*, in Relation to Water Potential of Medium. *J. Fat. Agr.* 34(4): 413-420.
- Ortiz, R., Jamet, A., Herrera, P., Vindigni, G., Pereira, A. (2011): Influencia del deterioro incipiente producido por el hongo de pudrición parda *Serpula lacrymans*, sobre las propiedades mecánicas de compression normal y paralela a la fibra en madre de *Pinus radiata* D. DON. *Informes da la Construcción* 63: 69-74.
- Palfreyman, J.W., Gartland, J.S., Sturrock, C.J., Lester, D., White, N.A., Low, G.A., Bech-Andersen, J., Cooke, D.E.L. (2003): The relationship between 'wild' and 'building' isolates of the dry rot fungus *Serpula lacrymans*. *FEMS Microbiology Letters* 228: 281-286.
- Palfreyman, J.W., White, N.A., Buultjens, T.E.J., Glancy, H. (1995): The Impact of Current Research on the Treatment of Infestations by the Dry Rot Fungus *Serpula lacrymans*. *International Biodeterioration & Biodegradation* 35: 369-395.
- Pavlík, M. & Pavlík, Š. (2013): Wood decomposition activity of oyster mushroom (*Pleurotus ostreatus*) isolate in situ. *Journal of Forest Science* 59(1): 28-33.
- Pegler, D.N. (1991): Taxonomy, Identifikation and Recognition of *Serpula lacrymans*. In: Jennings, D.H. & Bravery, A.F. (eds.): *Serpula lacrymans*. Fundamental Biology and Control Strategies. John Wiley & Sons, Chichester: 1-7.
- Pentland, G.D. (1967): The Effect of Soil Moisture on the Growth and Spread of *Coniophora puteana* under Laboratory Conditions. *Canadian Journal of Botany* 45: 1899-1906.
- Perkins, J.H. (1969): Morphogenesis in *Schizophyllum commune*. I. Effects of White Light. *Plant Physiol.* 44: 1702-1711.
- Perkins, J.H. & Gordon, S.A. (1969): Morphogenesis in *Schizophyllum commune*. II. Effects of Monochromatic light. *Plant Physiol.* 44: 1712-1716.
- Peylo, A. (2005): Sind Borverbindungen im Holzschutz effektiv und zeitgemäß? *Der Bausachverständige* 1(2): 11-13.

- Plank, S. (1978): Ökologie und Verbreitung Holzabbauender Pilze im Burgenland. Wissenschaftliche Arbeiten aus dem Burgenland 61: 1-207.
- Premamalini, T., Ambujavalli, B.T., Anitha, S., Somu, L., Kindo, A.J. (2011): Case Report. *Schizophyllum commune* a Causative Agent of Fungal Sinusitis: A Case Report. Case Reports in Infectious Diseases Vol 2011, Article ID 821259: 4 pp.
- Pugh, G.J.F. (1980): Strategies in Fungal Ecology. Trans. Br. mycol. Soc. 75(1): 1-14.
- Quiroz-Castañeda, R.E., Balcázar-López, E., Dantán-González, E., Martínez, A., Folch-Mallol, J., Anaya, C.M. (2009): Characterization of cellulolytic activities of *Bjerkandera adusta* and *Pycnoporus sanguineus* on solid wheat straw medium. Electronic Journal of Biotechnology 12(4): 8 pp.
- Råberg, U., Edlund, M.-L., Terziev, N., Land, C.J. (2005): Testing and evaluation of natural durability of wood in above ground conditions in Europe – an overview. Journal of Wood Science 51(5): 429-440.
- Rock, J., Badeck, F.-W., Harmon, M.E. (2008): Estimating decomposition rate constants for European tree species from literature sources. Eur. J. Forest Res. 127(4): 301–313.
- Romero, E., Speranza, M., García-Guinea, J., Martínez, Á.T. Martínez, M.J. (2007): Anamorph of the white-rot fungus *Bjerkandera adusta* capable of colonizing and degrading compact disc components. FEMS Microbiol. Lett. 275: 122-129.
- Royes, J. & Loveless, A.R. (1960): *Poria carbonacea* (Berk. & Curt.) Cooke as a Cause of Timber Rot in Jamaica. Trans. Brit. Mycol. Soc. 43(3): 571-577.
- Ruisinger, U., Stöcker, E., Grunewald, J., Stopp, H., Strangfeld, P., Staar, A. Krus, M., Hofbauer, W.K., Großkinsky, T., Odgaard, T. (2016): Holzbalkenaufleger in historischem Mauerwerk: Analyse, Bewertung und energetische Sanierung mittels Innendämmung. Mauerwerk-Kalender 2016. 41.Jg.: 351-381.
- Saito, H., Fukuda, K., Sawachi, T. (2012): Integration model of hygrothermal analysis with decay process for durability assessment of building envelopes. Build. Simul. 5: 315-324.
- Samahpati, N. & Banerjee, S. (1971): Studies on the Physiology of Higher Fungi. IV. Effect of Different Carbon Sources on Vegetative Growth of Some Species of *Fomes* and *Ganoderma*. Nat. Inst. Sci. India Proc. 37(2): 68-73.
- Scheffler, G.A. (2014): Innendämmung bei Sichtmauerwerk und Holzbalkendecken. Anwendung neuer Bemessungskriterien bei der rechnerischen Nachweisführung. Bausubstanz 2/2014: 36-44.
- Schmidt, O. (2000): Molecular Methods for the Characterization and identification of the Dry Rot Fungus *Serpula lacrymans*. Holzforschung 54(3): 221-228.
- Schmidt, O. (2003): Molekulare und physiologische Charakterisierung von Hausschwamm-Arten. Zeitschrift für Mykologie 69(1): 287-298
- Schmidt, O. (2006): Wood and Tree Fungi. Biology, Damage, Protection, and Use. Springer, Berlin, Heidelberg.

- Schmidt, O. (2007): Indoor wood-decay basidiomycetes: damage, causal fungi, physiology, identification and characterization, prevention and control. *Mycological Progress* 6(4): 261-279.
- Schmidt, O., Grimm, K., Moreth, U. (2002): Molekulare und biologische Charakterisierung von *Gloeophyllum*-Arten in Gebäuden. *Zeitschrift für Mykologie* 68(2): 141-152.
- Schmidt, O. & Moreth-Kebernik, U. (1990): Biological and Toxicant Studies with the Dry Rot Fungus *Serpula lacrymans* and New Strains Obtained by Breeding. *Holzforschung* 44(1): 1-6.
- Schmidt, O. & Moreth-Kebernik, U. (1991a): A simple method for producing basidiomes of *Serpula lacrymans* in culture. *Mycological Research* 95 (3): 375-376.
- Schmidt, O. & Moreth-Kebernik, U. (1991b): Monocaryon pairings of the dry rot fungus *Serpula lacrymans*. *Mycol. Res.* 95(12): 1382-1386.
- Schmidt, O. & Moreth, U. (2003): Molecular Identity of Species and Isolates of Internal Pore Fungi *Antrodia* spp. and *Oligoporus placenta*. *Holzforschung* 57(2): 120-126.
- Schmidt, O. & Moreth, U. (2006): Molekulare Untersuchungen an Hausfäulepilzen. *Z. Mykol.* 72(2): 137-152.
- Schmidt, O., Schmitt, U., Moreth, U., Potsch, T. (1997): Wood decay by the white-rotting basidiomycete *Physisporinus vitreus* from a cooling tower. *Holzforschung* 51(3): 193-200.
- Schmidt, O., Wei, D., Liese, W., Wollenberg, E. (2011): Fungal degradation of bamboo samples. *Holzforschung* 65(6): 883-888.
- Schmiedeknecht, M. (1959): Feuchtigkeit als Standortfaktor für mikroskopische Pilze. *Z. Pilzk.* 25(3-4): 69-77.
- Scholz, V., Idler, C., Daries, W., Egert, J. (2005): Lagerung von Feldholzhackgut. Verluste und Schimmelpilze. *Agrartechnische Forschung* 11(4): 100-113.
- Schroeder, D.B., & French, D.W. (1964): Cultural Characteristics and Decay of Wood Fiber Products by *Asterostroma cervicolor* (BERK. & CURTIS) MASSEE and *Trechispora brinkmanni* (BRES.) ROGERS & JACKSON. *Canadian Journal of Botany* 42(2): 205-211.
- Schubert, M., Dengler, V., Mourad, S., Schwarze, F.W.M.R. (2009): Determination of optimal growth parameters for the bioincising fungus *Physisporinus vitreus* by means of response surface methodology. *Journal of Applied Microbiology* 106: 1734-1742.
- Schwarze, F.W.M.R. & Schubert, M. (2011): *Physisporinus vitreus*: a versatile white rot fungus for engineering value-added wood products. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 92: 431-440.
- Score, A.J. & Palfreyman, J.W. (1994): Biological Control of the Dry Rot Fungus *Serpula lacrymans* by *Trichoderma* Species: The Effects of Complex and Synthetic Media on Interaction and Hyphal Extension Rates. *International Biodeterioration & Biodegradation* 33: 115-128.

- Shim, S.-S. & Kawamoto, K. (2002): Enzyme production activity of *Phanerochaete chrysosporium* and degradation of pentachlorophenol in a bioreactor. *Water Research* 36: 4445-4454.
- Shupe, T, Lebow, S., Ring, D. (2008): Causes and Control of Wood Decay, Degradation & Stain. Louisiana State University Agricultural Center, Louisiana Cooperative Extension Service, Louisiana Agricultural Experiment Station, Pub.2703 (5 M) Rev. 6/08. LSU Ag-Center Research and Extension, Baton Rouge: 27 pp.
- Singh, J. (1999): Dry rot and Other Wood-Destroying Fungi: Their Occurrence, Biology, Pathology and Control. *Indoor Built Environ.* 8: 3-20.
- Šipöcz, M., Rosenberg, M., Krištofiková, L. (2008): Microbial Utilization of Lignocellulose Composites: Fundamentals and Applications. *Wood Research* 53(4): 69-84.
- Skrede, I., Engh, I.B., Binder, M., Carlsen, T., Kauserud, H., Bendiksby, M. (2011): Evolutionary history of Serpulaceae (Basidiomycota): molecular phylogeny, historical biogeography and evidence for a single transition of nutritional mode. *BMC Evolutionary Biology* 11: 230-242.
- Skyba, O., Douglas, C.J., Mansfield, S.D. (2013): Syringyl-Rich Lignin Renders Poplars More Resistant to Degradation by Wood Decay Fungi. *Applied and Environmental Microbiology* 79(8): 2560-2571.
- Snider, R.D. (1970): Effects of Light and Temperature on Basidiospore Discharge in *Schizophyllum commune* FR. Master Thesis Kansas State University, Manhattan, Kansas: 70 pp.
- Souza de, A. & Gaylarde, C.C. (2002): Biodeterioration of varnished wood with and without biocide: implications for standard test methods. *International Biodeterioration & Biodegradation* 49: 21-26.
- Spaulding, P. (1929): Decay of slash of Northern White Pine ins Southern New England. United States Department of Agriculture Washington D.C., Technical Bulletin 132: 1-20.
- Stienen, T., Schmidt, O., Huckfeldt, T. (2014): Wood decay by indoor basidiomycetes at different moisture and temperature. *Holzforschung* 68(1): 9-15.
- Supratti, S. (2010): Decay Resistance of 84 Indonesian Wood Species Against Fungi. *Journal of Tropical Forest Science* 22(1): 81–87.
- Thompson, W. & Rayner, A.D.M. (1982): Structure and Development of Mycelial Cord Systems of *Phanerochaete laevis* in Soil. *Trans. Br. Mycol. Soc.* 78(2):193-200.
- Thorn, R.G. & Barron, G.L. (1984): Carnivorous mushrooms. *Science* 224 (4644): 76-78.
- Thornton, J.D. (1991): Australian Scientific Research on *Serpula lacrymans*. In: Jennings, D.H. & Bravery, A.F. (eds.): *Serpula lacrymans*. Fundamental Biology and Control Strategies. John Wiley & Sons, Chichester: 155-171.
- Toole, E.R. (1971): Germination of Spores of Wood Decay Fungi on Wood. *Phytopathology* 61: 88-90.

- Toyouni, A., Horisawa, S., Yoshimura, T., Doi, S., Imamura, Y. (2010): The effect of different foundation systems on the fungal flora in the crawl space of a new wooden Japanese house. *Building and Environment* 45: 1054-1060.
- Tresner, H.D. & Hayes, J.A. (1971): Sodium Chloride Tolerance of Terrestrial Fungi. *Applied Microbiology* 22 (2): 210-213.
- Tschierpe, H.J. & Sinden, J.W. (1964): Weitere Untersuchungen über die Bedeutung von Kohlendioxyd für die Fruktifikation des Kulturchampignons, *Agaricus campestris* var. *bisporus* (L.) LGE. *Archiv für Mikrobiologie* 49: 405-425.
- Tuor, U., Winterhalter, K., Fiechter, A. (1995): Enzymes of white-rot fungi involved in lignin degradation and ecological determinants for wood decay. *Journal of Biotechnology* 42: 1-17.
- Ujor, V.C., Monti, M., Peiris, D.G., Clements, M.O., Hedger, J.N. (2012): The mycelial response of the white-rot fungus, *Schizophyllum commune* to the biocontrol agent, *Trichoderma viride*. *Fungal Biology* 116: 332-341.
- Valášková, V. & Baldrian, P. (2006): Estimation of bound and free fractions of lignocellulose-degrading enzymes of wood-rotting fungi *Pleurotus ostreatus*, *Trametes versicolor* and *Piptoporus betulinus*. *Research in Microbiology* 157: 119-124.
- Venäläinen, M., Harju, A.M., Kainulainen, P., Viitanen, H., Nikulainen, H. (2003): Variation in the decay resistance and its relationship with other characteristics in old Scots pines. *Ann. For. Sci.* 60: 409-417.
- Viitanen, H. (1994): Factors affecting the development of biodeterioration in wooden constructions. *Materials and Structures* 27: 483-493.
- Viitanen H. & Ojanen T. (2007): Improved model to predict mold growth in building materials. Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings X – International Conference, ORNL, Florida, USA 2007: 8pp.
- Viitanen, H., Toratti, T., Makkonen, L., Peuhkuri, R., Ojanen, T., Ruokolainen, L., Räisänen, J. (2010): Towards modelling of decay risk of wooden materials. *European Journal of Wood and Wood Products* 68: 303-313.
- Viitanen, H., Vinha, J., Salminen, K., Ojanen, T., Peuhkuri, R., Paajanen, L., Lähdesmäki, K. (2010): Moisture and Biodeterioration Risk of Building Materials and Structures. *Journal of Building Physics* 33(3): 201-224.
- Volz, P.A. & Niederpruem, D.J. (1970): Induced Cytological Aberrancies in Basidiocarp Morphology of *Schizophyllum commune* FR. *Arch Mikrobiol.* 72: 371-374.
- Wadsö, L., Pilgård, A., Alfredsen, G. (2010): Measurements of rot fungal activity as a function of moisture content by isothermal calorimetry. The International Research Group on Wood Protection. Section 2. Test methodology and assessment. IRG/WP 10-20428. IRG Secretariat, Stockholm: 2-5.
- Wagenführ, R. & Steiger, A. (1966): Pilze auf Bauholz. 2., überarbeitete Auflage. AA. Ziemsen Verlag, Wittenberg Lutherstadt: 168 pp.

- Wälchli, O. (1973): Die Widerstandsfähigkeit verschiedener Holzarten gegen Angriffe durch den echten Hausschwamm (*Merulius lacrimans* (Wulf.) Fr.). Holz als Roh- und Werkstoff 31: 96-102.
- Wälchli, O. (1976): Die Widerstandsfähigkeit verschiedener Holzarten gegen Angriffe durch *Coniophora puteana* (Schum. ex Fr.) Karst. (Kellerschwamm) und *Gloeophyllum trabeum* (Pers. ex Fr.) Murrill (Balkenblättling). Holz als Roh- und Werkstoff 34: 335-338.
- Wälchli, O. (1977): Der Temperatureinfluß auf die Holzzerstörung durch Pilze. Holz als Roh- und Werkstoff 35: 45-51.
- Wälchli, O. (1980): Der echte Hausschwamm – Erfahrungen über Ursachen und Wirkungen seines Auftretens. Holz als Roh- und Werkstoff 38: 169-174.
- Wälchli, O. (1991): Occurrence and Control of *Serpula lacrymans* in Switzerland. In: Jennings, D.H. & Bravery, A.F. (eds.): *Serpula lacrymans*. Fundamental Biology and Control Strategies. John Wiley & Sons, Chichester: 131-145.
- Ważny, J. & Czajnik, M. (1963): Wistępowanie grzybów niszczących drewno w budynkach na terenie Polski. Folia Forest. Polon., Ser. B, 5: 5-17.Ex [63]!!
- Weedon, J.T., Cornwell, W.K., Cornelissen, J.H.C., Zanne, A.E., Wirth, C., Coomes, D.A. (2009): Global meta-analysis of wood decomposition rates: a role for trait variation among tree species? Ecology Letters 12: 45-56.
- Wei, D., Schmidt, O., Liese, W. (2013a): Method to test fungal degradation of bamboo and wood using vermiculite as reservoir for moisture and nutrients. Maderas. Ciencia y tecnologia 15(3): 349-356.
- Wei, D., Schmidt, O., Liese, W. (2013b): Durability test of bamboo against fungi according to EN standards. Eur. J. Wood Prod. 71: 551-556.
- Weigl, J. & Ziegler, H. (1960): Wasserhaushalt und Stoffleitung bei *Merulius lacrymans* (Wulf.) Fr. Archiv für Mikrobiologie 37: 124-133.
- Wild, U. (2008): Befall durch Echten Hausschwamm nach fehlerhaften Umbau- und Sanierungsmaßnahmen. Der Bausachverständige 4/2008: 21-23.
- Williams, C.F. & Niederpruem, D.J. (1968): Trehalase in *Schizophyllum commune*. Archiv für Mikrobiologie 60: 377-383.
- Wilson, J.M. & Griffin, D.M. (1979): The effect of water potential on the growth of some soil basidiomycetes. Soil. Biol. Biochem. 11: 211-212.
- Winandy, J.E., Curling, S.F., Lebow, P.K. (2005): Controlling moisture content of wood samples using a modified soil-pan decay method. Forest Prod. J. 55(6): 80-85.

Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V. – WTA (Hrsg., 2005): WTA Merkblatt 1-2-05/D. Der Echte Hausschwamm - Erkennung, Lebensbedingungen, vorbeugende Maßnahmen, bekämpfende chemische Maßnahmen, Leistungsverzeichnis. Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V. – WTA, Referat 1 Holzschutz, IRB-Verlag, Stuttgart: 32 pp.

Wolfaardt, F., Taljaard, J.L., Jacobs, A., Male, J.R., Rabie, C.J. (2004): Assessment of wood-inhabiting Basidiomycetes for biokraft pulping of softwood chips. *Bioresource Technology* 95: 25-30.

Zadražil, F. (1975): Influence of CO₂ Concentration on the Mycelium Growth of Three *Pleurotus* Species. *European J. Appl. Microbiol.* 1: 327-335.

Zeller, S.M., Schmitz, H., Duggar, B.M. (1919): Studies in the Physiology of the Fungi. VII. Growth of Wood-Destroying Fungi on Liquid Media. *Ann. Mo. Bot. Gard.* 6(2): 137-142.

Zoberi, M.H. (1964): Effect of Temperature and Humidity on Ballistospore Discharge. *Trans. Brit. Mycol. Soc.* 47(1): 109-114.