

Schlussbericht

Zuwendungsempfänger: Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V. Postfach 20 07 33 80007 München durchführendes Institut: Fraunhofer-Institut für Holzforschung, Wilhelm-Klauditz- Institut WKI 38108 Braunschweig	Förderkennzeichen: 22W-C-3-071-01
Holzbau Deutschland Institut e.V. (HDI) Kronenstraße 55 – 58 10117 Berlin	22W-C-3-071-02
Vorhabensbezeichnung: » Holzbau im Einfluss des Klimawandels - Entwicklung von Strategien zur Sicherung der Gebrauchstauglichkeit «	
Laufzeit des Vorhabens: 01.06.2017 bis 31.12.2018	

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft und des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau- und Reaktorsicherheit unter den Förderkennzeichen 22W-C-3-071-01 und -02 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Ernährung
und Landwirtschaft

Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz,
Bau und Reaktorsicherheit

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	2
1 Kurze Darstellung des Projekts.....	3
1.1 Aufgabenstellung.....	3
1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	3
1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens	4
1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand	5
1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen	10
2 Eingehende Darstellung	12
2.1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele	14
2.1.1 Arbeitspaket 1: Recherche und Vorauswahl	14
2.1.1.1 Recherchen zu Schadenshäufigkeiten und zum Bauen in anderen Klimazonen	14
2.1.1.2 Analyse der Klimamodelle	26
2.1.1.3 Zusammenfassung	32
2.1.2 Arbeitspaket 2: Simulation und Berechnung	35
2.1.3 Arbeitspaket 3: Analyse und Auswertung	41
2.1.3.1 Sensitivitätsanalysen und Parameterstudien	41
2.1.3.2 Wandkonstruktionen.....	45
2.1.3.3 Innendämmungen	55
2.1.4 Auswerten Parameterstudie, Entwickeln von Strategien, Veröffentlichung	69
2.2 Wichtige Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	71
2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	71
2.4 Nutzen und Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans	71
2.5 Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	73
2.6 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses	75
Anhang: Erklärung des Zuwendungsempfängers	76

1 Kurze Darstellung des Projekts

1.1 Aufgabenstellung

Das Ziel des Gesamtprojektes war, den CO₂-Speicher „Holzgebäude“ unter der Berücksichtigung des Klimawandels zu evaluieren, um kritische Punkte definieren und Problemlösungen erarbeiten zu können. Dabei sollte unter der Prämisse von zukunftsorientierter Vorsorgebetrachtung ein Zeithorizont von etwa 100 Jahren berücksichtigt und analysiert werden.

1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Forschungsvorhaben wurde durchgeführt, um folgende förderpolitischen Ziele des Waldklimafonds zu unterstützen:

- Erhöhung der Anpassungsfähigkeit von bestehenden und zukünftigen Holzbauweisen an den Klimawandel und damit verbunden die Sicherung des CO₂ Minderungspotentials von Holzprodukten
- Beitrag zur deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel
- Substitution energetisch aufwendiger Bauweisen und Materialien durch langlebige Holzprodukte -> Förderung der Energieeffizienz
- Unterstützung und Ausbau der Kaskadennutzung mit der Folge der Erhöhung des langanhaltenden Kohlenstoffspeichers im Bauwesen (Holzproduktspeicher)

Um das langfristige Ziel im Förderschwerpunkt 3 „Erhöhung des Holzproduktspeichers und die Vergrößerung des Anteils von Holzprodukten mit lang andauernder Kohlenstoffspeicherung“ zu erreichen, ist eine vorsorgende Prognose über die Auswirkungen des Klimawandels auf den Holzbau in die aktuelle Bemessungspraxis mit einzubeziehen.

In dem durchgeführten Projekt wurden die Grundlagen dazu geschaffen und der Holzbau evaluiert. Das Forschungsprojekt war der erste Schritt zur Untersuchung der Auswirkungen des Klimawandels auf den Holzbau und demzufolge auf die Speicherkapazität des Holzes bzw. des Holzbaus von CO₂.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Forschungsvorhaben wurde im Sommer 2015 beantragt und nach etwa zweijähriger Vorlaufzeit konnte der Projektbeginn zum 1.7.2017 erfolgen. Ursprünglich war eine Bearbeitungsdauer von 13 Monaten geplant. Infolge der verhältnismäßig langen Vorlaufzeit gab es seitens des Fraunhofer WKI jedoch personelle Veränderungen, so dass mit Bewilligung des Vorhabens eine personelle Neueinstellung vorgenommen werden musste. Wegen der dadurch erforderlichen Einarbeitungszeit wurde eine kostenneutrale Laufzeitverlängerung beantragt und bewilligt. Das Vorhaben konnte dadurch mit geringfügigen zeitlichen Änderungen inhaltlich vollständig planmäßig umgesetzt werden:

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurde ein Soll-Ist-Vergleich der jetzigen bauphysikalischen Bemessungsgrundlagen für Holzbauten in Bezugnahme auf das erwartete Klima in 100 Jahren vorgenommen, um die Auswirkungen der globalen und auch regionalen Klimaänderungen auf die Gebrauchstauglichkeit von Holzkonstruktionen zu klassifizieren. Dabei wurden sowohl regionale als auch globale Klimamodelle berücksichtigt und quantitativ (z.B. Temperaturanstieg, Niederschlagsmaxima usw.) zusammengefasst. Die quantitative Zusammenfassung der Klimamodelle wurde dann in Modellrechnungen und bauphysikalische numerische Simulationen von Baudetails und Bauprodukten implementiert. Die Auswirkungen des Klimawandels auf den Holzbau konnten so berechnet werden. Neuralgische Problemfelder im „Holzbau der Zukunft“ wurden identifiziert und bewertet. Aus dem Wissen um die zukünftigen Problemstellen, lassen sich nun Strategien entwickeln, um die Gebrauchstauglichkeit von Gebäuden in Holzbauweise auch in anderen Klimaregionen sicherzustellen. Das Forschungsprojekt sollte zudem ein weiterer Schritt in die Verwendung von Buche als konstruktiver Baustoff sein, da diese Baumart als Pflanze gut an eine Klimaerwärmung angepasst ist und hervorragende Festigkeitseigenschaften aufweist. Die errechneten Materialfeuchten im Modell können auch auf die Buche übertragen werden. Der negative Einfluss erhöhter Materialfeuchten ist auf das nicht dauerhafte Holz der Buche wesentlich größer als bei derzeit im Bauwesen üblichen Holzarten/19/. Die Nutzung der Buche sichert jedoch die zukünftige Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Forstwirtschaft sowie der vor- und nachgelagerten Bereiche.

Während die am häufigsten eingesetzten Nadelhölzer Fichte und Tanne eine recht geringe Dauerhaftigkeit (Klasse 4 - wenig dauerhaft gemäß DIN EN 350) haben und ihre physikalischen Eigenschaften relativ homogen sind, divergieren diese bei Laubhölzern gravierend. Dies ergibt die Tatsache, dass die Auswirkungen von klimatischen Veränderungen potentiell kritisch für einzelne Laubhölzer sein aber auch einen potenti-

ellen Markt für andere Laubhölzer wie z.B. Eiche (Klasse 2 nach DIN EN 350) bilden können.

In diesem Projekt wurden spezifische Materialmodelle der wichtigsten Laubholzarten erstellt und im Rahmen der Simulationen berücksichtigt. Dieses Vorgehen ermöglicht nun,

- Strategien für die optimale Nutzung der einzelnen Laubholzarten mit Blick auf den Klimawandel zu erstellen,
- Festlegungen zu treffen, um Bestandteile der Holzkonstruktionen durch spezifische Laubholzarten zu ersetzen und
- Planungen neuer Struktursysteme durchzuführen, die für die Verwendung von Laubhölzern optimiert sind.

Das Projektziel wurde vollständig erreicht.

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand

Die Anpassungsfähigkeit und demzufolge die Speicherfunktion des Waldes wurde in diversen Forschungsprojekten untersucht (z.B. /17/, /18/). Äquivalent dazu fehlt es jedoch an Untersuchungen hinsichtlich des Holzproduktespeichers im Bauwesen unter Berücksichtigung des Klimawandels. Um die potentielle CO₂ Speicherfunktion von Holz und Holzprodukten im Bauwesen für künftige Generationen zu sichern, muss der Einfluss des Klimawandels auf die Nutzungsdauer und den Zeitraum der Gebrauchstauglichkeit für Holz und daraus hergestellte Bauprodukte und Gebäude bekannt sein.

Zurzeit werden die Gebrauchstauglichkeit und die Dauerhaftigkeit von Holzbauwerken unter Berücksichtigung von Faktoren berechnet, die den Einfluss des Klimawandels und die daraus resultierenden bauphysikalischen Folgen nicht berücksichtigen. Der Stand der Technik und die aktuellen Bemessungsvorschriften orientieren sich an Erfahrungswerten. Ein Blick in die Zukunft und die damit verbundene Sicherung des Kohlenstoffspeichers „Holzhaus“ unter der Einbeziehung konkreter Schwachpunkte, insbesondere im Hinblick auf Klimafolgen existiert nicht. So sind in /13/ insbesondere die Entwicklung von Hitzewellen, Starkregenereignissen, Wind und Hagel als Einflussparameter von genereller Bedeutung erwähnt. Aufgrund ihrer Anisotropie sind Holz und Holzwerkstoffe bei klimatischen Wechselwirkungen im Tragwerk oder im Bauteil zusätzlichen Belastungen ausgesetzt. Zudem ist bei erhöhter Holzfeuchte der verstärkte Abbau durch holzerstörende Pilze oder Insekten zu erwähnen. Nach Jacob /14/ steigt

in bestimmten Regionen Deutschlands die Niederschlagsmenge im Winterhalbjahr um bis zu 30 %. In Mittelgebirgsregionen kann es sogar zu einer Zunahme von bis zu 70 - 80 % kommen /13/. Dabei steigt nicht die Anzahl der Niederschlagstage, sondern die Intensität der Regenschauer. Zudem wird durch den Rückgang kalter und trockener Wintertage die Trocknung der Bauteile und Konstruktionen reduziert oder verhindert. Der Holzbau wird deshalb, v. a. infolge des veränderten Quell- und Schwindverhaltens und der Gefährdung durch Pilze sensibel auf Klimaveränderungen reagieren. Die leichte Zunahme des Holzbaus in den letzten Jahren sollte daher nicht durch falsche Kennwerte und Annahmen sowie durch eine Anhäufung von Schadensfällen gefährdet werden. Untersuchungen nach dem Prinzip der Vorsorge sind daher zwingend notwendig.

Durch die bedeutende Möglichkeit der Speicherung des Kohlenstoffes in den Holzbauteilen ist es erforderlich, den Holzbau weiter auszubauen um den nationalen Klimaschutzstrategien gerecht zu werden. Unter Berücksichtigung der Nutzungsdauer von 100 Jahren fehlt es aber an wissenschaftlich und fundiert abgesicherten Erkenntnissen, die die Auswirkungen des Klimawandels bestimmen. Nach Mantau et al. /7/ wurden 2012 in Deutschland ca.13,4 Mio. m³ (12,3 Mio. Tonnen CO₂) Holz im Hochbau effektiv verbaut. In einem Einfamilienhaus aus Holz werden bezogen auf 1000 m³ umbauten Raum ca. 42,4 m³ Holz und Holzwerkstoffe für die Konstruktion verbaut /7/. Betrachtet man nur das verbaute Volumen der tragenden Konstruktion, so ist eine CO₂-Speicherung von ca. 39 t CO₂ anzunehmen (1 m³ Holz speichert 920 kg CO₂). Sofern für die Dämmung ebenfalls Holzfaserdämmplatten verwendet werden, ergibt sich eine zusätzliche Speichermasse von ca. 10 t CO₂. Auf die Bundesrepublik Deutschland bezogen beträgt der Anteil von Wohngebäuden, welche mit Holz gefertigt werden, seit 2002 ca. 12 % und ist kontinuierlich auf ca. 15 % bis zum Jahr 2010 angestiegen /11/. Seit 2010 stagniert der Anteil bei ca. 15 %. Mantau et al. geben in /7/ den Anteil mit überwiegend in Holz gebauten Ein- und Zweifamilienhäusern mit 17 % an. Der sehr konservativ gerechnete Beitrag zur CO₂-Speicherung durch **neu gebaute Wohngebäude aus Holz** kann für Deutschland im Jahr 2012 demnach mit 496.350 t CO₂ angenommen werden. Dies betrifft nur die tragende Konstruktion. Eine Erhöhung des Marktanteiles von Wohngebäuden aus Holz um 20 % würde eine weitere CO₂-Speicherkapazität von zusätzlich 100.000 t pro Jahr schaffen. Nach Hofer et al. /12/ ist die positive Wirkung der Materialsubstitution zudem wesentlich größer, als die der thermischen Substitution (Verwendung von Holz und Holzprodukten zur Energiegewinnung) und bietet daher ein ausbaufähiges Potential, welches zum jetzigen Zeitpunkt nicht ausgenutzt wird. Nach Rock /15/ ergibt sich bei einer vollständigen Nutzung des Holzes als langlebiges Produkt (Materialsubstitution) mit darauf folgender energetischer Nutzung (Energiesubstitution) sogar maximales Substitutionspotenzial von 1,238

t C pro t Holz. Nach /12/ entspricht 1 t C ca. 3,67 t CO₂. Dieser Wert stellt jedoch die Obergrenze dar und bedarf den Abbau von Hemmnissen und den verstärkten Einsatz langlebiger Holzprodukte. Das Speicherpotential von Holzprodukten muss neben dem Wald als Hauptspeicherquelle für CO₂ als weiteres Instrument zur Bekämpfung des Klimawandels genutzt werden /12/. Unter der Voraussetzung des Wissens über die zukünftigen Auswirkungen, kann der Bausektor einen entscheidenden Beitrag dazu leisten.

Mischwaldbestände sind besser an den Klimawandel angepasst, als die heute noch häufigen Nadelholzmonokulturen. Der Waldbau hat darauf bereits reagiert, wodurch in Zukunft mehr Laubholz als Ressource für den Holzbau zur Verfügung stehen wird und die bisher verwendeten Nadelhölzer knapp werden. Laubholz und insbesondere die Buche spielt im konstruktiven Holzbau zurzeit faktisch keine Rolle, auch wenn erste Bestrebungen unternommen werden, um dies zu ändern. Soll in Zukunft die Erhöhung des CO₂-Speichers im Baubereich ausgebaut werden, ist eine Nutzung der Buche als Konstruktionsmaterial unabdingbar. Ein tiefgreifendes Wissen über den Einfluss der Buche auf die Gebrauchstauglichkeit von Gebäuden in Holzbauweise unter den zukünftigen Klimaszenarien existiert nicht. Hier soll das beantragte Forschungsprojekt ein erster Schritt zur dauerhaften konstruktiven Verwendung der Buche sein.

Das mit diesem Abschlussbericht beschriebene Vorhaben hatte das Ziel, die zukünftigen Einflüsse des Klimawandels auf den Holzbau allgemein prognostizieren zu können. Es zielte darauf ab, deterministische Modelle zu erstellen, um die Einflüsse klimatischer Veränderungen zu analysieren und zu quantifizieren, um daraus wiederum die zukünftige Entwicklung der Holzkonstruktionen, mit Schwerpunkt auf den kritischen Bauteilen (z.B. Gelenke, Schnittstellen, etc.) abzuleiten. Das übergeordnete Ziel des Vorhabens war die Verbesserung der Holzkonstruktionen im Hinblick auf die zukünftigen klimatischen Veränderungen, um den Marktanteil von Holz in dauerhaften Konstruktionen zu erhöhen. Dies wiederum wird dazu beitragen, die negativen Auswirkungen des Klimawandels zu reduzieren, indem sichergestellt wird, dass die CO₂-Speicherung erhöht und der Energieverbrauch in der Bauindustrie reduziert wird.

Diese Projektziele wurden vollständig erreicht.

Literatur:

- /1/ Hagemann, S.; Jacob, D.: Gradient in the climate change signal of European discharge predicted by a multi-model ensemble. *Climatic Change*, 81, 309-327. (2007)
- /2/ Herlyn, J. W.: Numerische Simulation des Feuchteverhaltens von Holzbauteilen. In: Gesellschaft für Umweltsimulation (GUS): Umwelteinflüsse erfassen, simulieren, bewerten: 33. Jahrestagung der GUS, Fraunhofer ICT, S. 219 – 239, (2004)
- /3/ Herlyn, J.W. ; Schliesing, St.: Zuverlässigkeitsprognosen von feucht beanspruchten Holzbauteilen durch numerische Simulationen und statistische Methoden – exemplarische Vorgehensweise bei modernen Dach- und Wandkonstruktionen. AIF-Forschungsvorhaben 13392, Abschlussbericht 2006, Fraunhofer WKI
- /4/ Herlyn, J.W.: Experimentelle und numerische Bewitterungssimulation an Holztafelwänden mit Mauerwerk-Vorsatzschale. 34. Jahrestagung der GUS, (2005)
- /5/ Herlyn, J.W.: Möglichkeiten und Grenzen moderner Holzwerkstoffe. Vortrag. Fachtagung GDF-GFV-AK Holzhausbau aktuell, Biberach, 20.01.2005
- /6/ Jacob, D.; Barring, L. ; Christensen, O.B. ; u.a.: An intercomparison of regional climate models for Europe: Design of the experiments and model performance. *Climatic Change*, Vol. 81. (2007)
- /7/ Weimar H. ; Jochem, D ; Mantau U. ; u.a.: Holzverwendung im Bauwesen – Eine Marktstudie im Rahmen der „Charta für Holz“. Thünen Report 9, Johann Heinrich von Thünen-Institut Braunschweig, S. 12 ff. und S. 73 f., (2013)
- /8/ Mehlhorn, L.; Hävemeyer, H.; Greubel, D.: Wärme- und Feuchtehaushalt von Fachwerkbauten - Simulationsberechnungen und Messungen. Bauklimatisches Symposium an der Technischen Universität Dresden, Dresden, S. 433-463, (1994)
- /9/ Rüter, N. ; Bilgen, R. ; Pohlig, A. ; u.a.: Ökologische Gebäudekonzepte für Japan – ein Leitfaden. Braunschweig: Fraunhofer WKI (2010)
- /10/ Rüter, N.: Sustainable solutions by ecological wooden houses. Fraunhofer Technology Summit – Buildings and building products in harmony with environment and health – concepts for better living. Tokio, 08.04.2005.
- /11/ Statistisches Bundesamt: Baugenehmigungen von Wohn- und Nichtwohngebäuden nach überwiegend verwendetem Baustoff - Lange Reihen ab 1980. S. 8 und 72 (2013)

-
- /12/ Hofer, P. ; Taverna, R. ; Werner, F. ; u.a.: CO₂-Effekte der Schweizer Wald- und Holzwirtschaft. Szenarien zukünftiger Beiträge zum Klimaschutz. Umwelt-Wissen Nr. 0739. Bundesamt für Umwelt, Bern, S. 75 (2007)
- /13/ BMVBS / BBR: Folgen des Klimawandels: Gebäude und Baupraxis in Deutschland, BBP-Online Publikation (2008)
- /14/ Jacob. D.: Regionalisierte Szenarien des Klimawandels. Raumordnung und Raumforschung. Vol. 67 (2), S. 89-96 (03.2009)
- /15/ Rock, J.: Klimaschutz und Kohlenstoff in Holz: Vergleich verschiedener Strategien. Dissertation, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät der Universität Potsdam, S. 60 (2008)
- /16/ Würdehoff, R. ; Spellmann, H. ; Evers, J. ; u.a.: Kohlenstoffstudie Forst und Holz
Niedersachsen – Beiträge aus der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt. Band 6. Göttingen, S. 32 ff. (2011)
- /17/ Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen: Wald im Klimawandel, Auswirkungen des Klimawandels auf Wälder und Forstwirtschaft in Nordrhein-Westfalen, 1. Auflage, Düsseldorf (2012)
- /18/ Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Verbraucherschutz: Maßnahmenkonzept zur Anpassung der Wälder Mecklenburg-Vorpommerns an den Klimawandel, Schwerin (2010)
- /19/ DIN EN 350-2:1994-10
Dauerhaftigkeit von Holz und Holzprodukten - Natürliche Dauerhaftigkeit von Vollholz - Teil 2: Leitfaden für die natürliche Dauerhaftigkeit und Tränkbarkeit von ausgewählten Holzarten von besonderer Bedeutung in Europa

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die reine Projektbearbeitung erfolgte ausschließlich durch die beiden kooperierenden Projektpartner Fraunhofer WKI und Holzbau Deutschland - Institut.

Zur Auswahl der zu berücksichtigenden Bauteilaufbauten wurde eine Abstimmung mit dem Projekt „**Einfluss von Holz und Holzbaustoffen auf die Innenraumluftqualität (HolnRaLu)**“ vorgenommen. Ziel des Projektes war die Erarbeitung eines Vorschlags für die Vorgehensweise bei der Bewertung von CE-gekennzeichneten Holzwerkstoffen und technisch getrocknetem Brettsperholz im Hinblick auf die Abgabe von Stoffen an die Innenluft. Holz setzt flüchtige organische Verbindungen frei: Was als typischer Holzgeruch in Innenräumen wahrnehmbar ist, schlägt sich auch in messbaren Werten wieder. Derzeit werden Baustoffe nur einzeln geprüft. In realen Einbausituationen kann es jedoch zu Wechselwirkungen oder Nebenreaktionen kommen.

Für die Umsetzung des Projekts musste zunächst das genaue Szenario zur Simulation von Realraumbedingungen definiert werden. Insgesamt wurden mindestens vier verschiedene Außenwand- (und Fußboden-)elemente hergestellt und sowohl im Labor als auch in realen Gebäuden eingebaut getestet. Dabei wurden Außenwandkonstruktionen gewählt, die nach einer Umfrage unter Bauunternehmen sowie den Erfahrungen der beteiligten Projektpartner regelmäßig Verwendung finden. Genau hier setzte die Zusammenarbeit an.

Die beiden Projektleiter Johannes Niedermeyer (HDI) und Norbert Rüter (Fraunhofer WKI) haben zudem über die bestehenden Netzwerke eine weite Verknüpfung des Projektes zu anderen Projekten und zu anderen Marktakteuren vorgenommen. Die Projekte haben jeweils die Nutzung nachwachsender Rohstoffe im Hochbau zum Thema. Insbesondere sind folgende Projekte erwähnenswert:

Mit dem Forschungsverbund „**Mehr als nur Dämmung – Zusatznutzen von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen**“ (Förderkennzeichen 22011615 (Fraunhofer WKI) und weitere; gefördert vom Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft) koordiniert und bearbeitet das Fraunhofer WKI zwar kein weiteres Vorhaben, das sich mit den direkten Klimafolgen beschäftigt. In dem Vorhaben werden jedoch die Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen hinsichtlich aller Grundanforderungen gemäß Bauproduktenverordnung betrachtet, mit Ausnahme der Standsicherheit. Die Standsicherheit bleibt unberücksichtigt weil Dämmstoffe per Definition keine tragenden Funktionen aufweisen. Die Ergebnisse des Vorhabens sollen dazu dienen, wissen-

schaftliche Erkenntnisse zu erarbeiten, um Normen und Regelwerke entsprechend der neuen, nachwachsenden Rohstoffe anzupassen. In dem Forschungsverbund sind insgesamt 12 Forschungsinstitute und praktisch die gesamte Branche der Hersteller von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen vertreten.

In dem Forschungsvorhaben **„Entwicklung einer Richtlinie für Konstruktionen in Holzbauweise in den GK4 und 5 gemäß der LBO BW (HolzbauRLBW)“**, gefördert im EFRE-Programm in Baden-Württemberg, werden nationale und internationale Forschungsergebnisse aus Brandversuchen ausgewertet sowie Konstruktionen und Anschlüsse theoretisch und mittels Brandversuchen untersucht. Dieses Vorhaben hat das Ziel, einen für die Baupraxis verwendbaren und bauaufsichtlich abgestimmten Leitfaden zu erstellen, um Gebäude in Holzbauweise in den GK4 und 5 hinsichtlich der Anforderungen bezüglich der Rauchdichtigkeit zu erstellen. Die beiden genannten Projektleiter sind in dem genannten Forschungsvorhaben beteiligt. Rüther als Projektmitarbeiter der Hochschule für Forstwirtschaft Rottenburg und Niedermeyer im projektbegleitenden Ausschuss. Beide verknüpfen die Erfahrungen aus dem Projekt HolzStrategie mit der Projektbearbeitung HolzbauRLBW.

Mit dem Forschungsvorhaben **„Development of sustainable insulation materials and building elements for the chilean market (Susi4Chile)“** (EUREKA-Antrag; Förderkennzeichen 01DN19033A) wird das Ziel verfolgt, unterschiedliche Dämmungen aus nachwachsenden Rohstoffen, die im Bereich der Land-, Forst- oder Holzwirtschaft als Abfallprodukt anfallen, zu entwickeln. Dieses Vorhaben hat wiederum einen deutlichen Bezug zum Bauen und Klimawandel. Es werden insgesamt drei Stellschrauben bedient: Zum ersten sollen Rohstoffe, die entweder fossil gespeichertes CO₂ beinhalten oder mineralisch basiert sind (Hartschäume und Mineralwolle) durch „juveniles“ CO₂ bindende und speichernde Rohstoffe substituiert werden, um der Atmosphäre dadurch CO₂ zu entziehen. Zum zweiten sollen die Gebäude energieeffizienter werden und somit weniger CO₂ bei der Nutzung emittieren. Beides bedient die Versuche, den Klimawandel zu verlangsamen. Zum dritten fließen die Erkenntnisse aus dem Vorhaben HolzStrategie ein, sodass der Wandel des Klimas berücksichtigt wird.

2 Eingehende Darstellung

Das Forschungsvorhaben wurde innerhalb von drei aufeinander aufbauenden Arbeitspaketen bearbeitet:

- Im AP 1 wurden mit Hilfe von Literaturrecherchen, Auswertungen von Klimamodellen und Schadenshäufigkeiten die zu verwendenden Randbedingungen der Simulationen definiert.
- Im AP 2 erfolgte die Modellierung und Simulation.
- Im AP 3 erfolgte mit Hilfe von Sensitivitätsanalysen und statistischen Auswertungen die Evaluation und Definition der kritischen Punkte zur Ableitung von Strategien.

Die Arbeitspakete 1 und 2 schlossen jeweils mit einem Meilenstein ab:

Der Meilenstein 1 wurde mit zeitlich geringfügiger Verzögerung erreicht, weil personelle Neueinstellungen und die damit verbundene Einarbeitung mehr Zeit in Anspruch genommen haben, als die ursprünglich bei der Antragstellung vorgesehenen Personen benötigt hätten. Der Meilenstein wurde dennoch vollständig gegen Ende von Arbeitspaket 1 erreicht. Die in die Simulationen und Berechnungen zu implementierenden Klimadaten, Materialien, Geometrien und demzufolge die zu untersuchenden Bauteile wurden auf Grundlage der durchgeführten Arbeiten in den Arbeitsteilpaketen 1.1 bis 1.3 bestimmt und ausgewählt.

Der Meilenstein 2 wurde am Ende des Arbeitspaketes 2 wie fachlich geplant erreicht. Die Berechnungen und Simulationen konnten wie geplant für alle relevanten Szenarien durchgeführt werden und die Rechenmodelle wurden mit bereits erfolgten Klimaversuchen am Fraunhofer WKI validiert. Die Bearbeitung des abschließenden Arbeitspaketes 3 konnte somit vorgenommen werden.

Die Analysen und Auswertungen der durchgeführten theoretischen Simulationen und praktischen Erkenntnisse führten zu folgenden Ergebnissen:

- **Die prognostizierten Änderungen des Klimas werden im Raum der Bundesrepublik Deutschland keinen signifikanten, negativen Einfluss auf das Bauen mit Holz haben.** Heute und in absehbarer Zukunft, also innerhalb der betrachteten 100 Jahre, sind die Klimaprognosen in der Art, dass keine bauphysikalischen Schäden aufgrund des Klimawandels zu erwarten sind. Konstruktionen, die nach aktuellen Regeln der Technik erstellt werden und gebrauchstauglich sind, sind auch unter den prognostizierten klimatischen Änderungen weiterhin gebrauchstauglich. Der „CO₂-Speicher Holzgebäude“ ist als solcher nicht negativ vom prognostizierten Klimawandel betroffen.

- Für die praktische Arbeit des planenden Ingenieurs und des ausführenden Handwerkers sind jedoch einzelne Aspekte zukünftig verstärkt zu beachten. **Extremwetterereignisse wie Sturmböen und Starkregen sind bei Planung und Ausführung verstärkt zu berücksichtigen.** Sturmböen müssen in der Art und Weise der Windsogverankerung berücksichtigt werden und Starkregenerereignisse in der Art und Weise der Regenwasserführung. Die entsprechenden Regelwerke sind zukünftig dahingehend anzupassen. Beides genannte ist jedoch nicht auf den Holzbau beschränkt, sondern betrifft das gesamte Bauwesen.
- Ein weiterer, zukünftig verstärkt zu beachtender Aspekt ist der sommerliche Wärmeschutz. **Die Regelungen zum sommerlichen Wärmeschutz bedürfen einer intensiven Neuordnung.** Neuordnung in dem Sinne der Hochstufung der Priorität des Themas. Nicht im Sinne der Methodik des Nachweises. Einzelne Parameter und insbesondere die klimatischen Randbedingungen sind für das gesamte Bauwesen anzupassen.
- **Ein Aspekt, der einer weiteren intensiven Betrachtung bedarf ist der, der holzerstörenden Insekten.** Dieser Aspekt geht zwar einher mit der Gesamtheit der Änderungen von Flora und Fauna aufgrund der klimatischen Änderungen. Holzerstörende Insekten wie beispielsweise Hausbock und Termiten haben jedoch einen Einfluss auf das Bauwesen und hier insbesondere auf den Holzbau. Die Erkenntnisse zu möglichen Folgen aus einem möglichen zukünftigen Populationsverlauf von holzerstörenden Insekten sind aktuell noch völlig unzureichend erforscht, so dass hier weiterer Forschungsbedarf besteht.

Im Folgenden werden die durchgeführten Arbeitspakete konkret beschrieben:

2.1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

2.1.1 Arbeitspaket 1: Recherche und Vorauswahl

2.1.1.1 Recherchen zu Schadenshäufigkeiten und zum Bauen in anderen Klimazonen

- **Schadenshäufigkeiten**

Das **HDI** hat eine Studie zu Schadensfällen im Holzbau im mitteleuropäischen Raum durchgeführt und bereits existierende Problemstellen identifiziert. Die Studie wurde mit Hilfe von Literaturstudien, Auswertung von Statistiken der Rückversicherer und Befragung der Mitglieder des **HDI** durchgeführt. Weiterhin wurden Art und Häufigkeit der diversen Holzkonstruktionen ermittelt.

Auf der Grundlage der Ergebnisse hat das **HDI** die wirtschaftlich wichtigsten Holzbauweisen für den mitteleuropäischen Markt bestimmt, und die Charakterisierung und Bestimmung der neuralgischen Punkte vorgenommen. Die Ergebnisse wurden genutzt als Eingangsdaten (Art der Konstruktion) für die bauphysikalischen Modelle im Arbeitspaket 2 (Simulation und Berechnung).

Im Rahmen der Recherche zu klimabedingten Schadensfällen von Außenbauteilen in Holzbauweise wurden Datenerhebungen bei Sachverständigen für Holzschäden, Gebäudeversicherungen sowie der Fachberatung Holzbau im Rahmen des INFORMATI-ONSDIENST HOLZ herangezogen.

Fachberatung Holzbau

Unter dem bekannten Label des INFORMATIONSDIENST HOLZ erhalten Architekten und Ingenieure, öffentliche und private Bauentscheider sowie Ausführende im Holzbau seit Dezember 2013 individuelle Hilfestellungen beim Planen und Bauen mit Holz. Für das Arbeitspaket 1.1 wurden alle bis zum 31.12.2017 durchgeführten 5.818 Fachberatungen (Projekte) systematisch ausgewertet. Neben den tatsächlichen Schadensfällen lassen sich auch aus den weiteren beratenen Projekten interessante Ableitungen hinsichtlich des Projektes machen. Die Wahl des geeigneten Holzproduktes auch der richtigen Holzart und/oder des zweckmäßigen Holzwerkstoffes hinsichtlich der bauphysikalischen Verwendbarkeit stellt insgesamt einen Schwerpunkt dar:

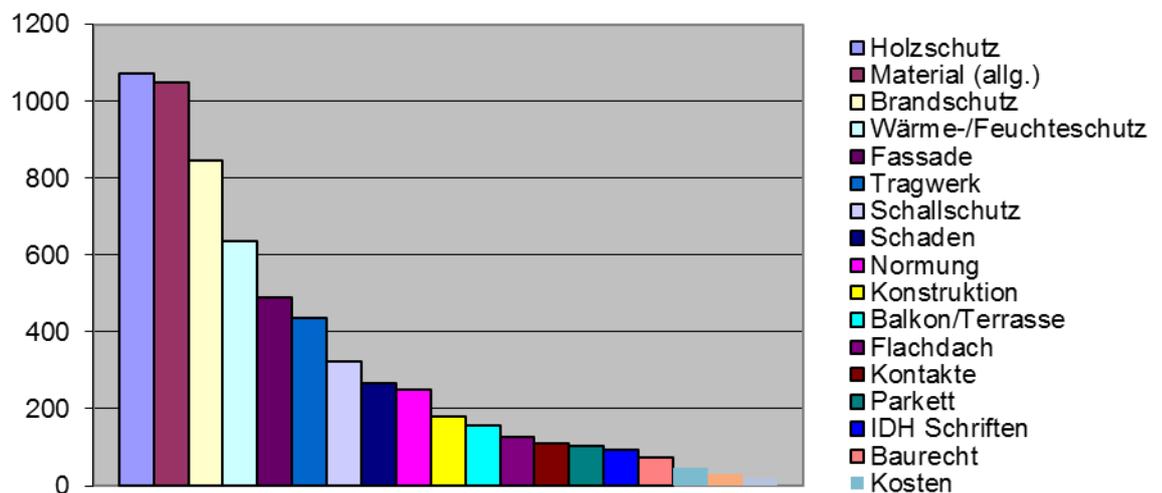


Abbildung 1: Anzahl der Fachberatungen in den Jahren 2014 bis 2017, aufgeschlüsselt nach Fachthemen

- Bei 267 Beratungen wurden Mängel oder Schäden besprochen und analysiert. Grundsätzlich steht aber die Planung der Sanierung dieser Schäden im Vordergrund vor der Ursachenfindung
- Über 45 % aller Schäden sind bei Sanierungsbauaufgaben entdeckt worden. Über 20 % der Schäden wurden bei Beratungen bei Einfamilienhäusern festgestellt.
- Der größte Anteil der Schäden wurde in Nordrhein-Westfalen festgestellt (26 %), aber auch in weiteren Bundesländern, wie Baden-Württemberg und Hessen, sind besonders häufig betroffen.

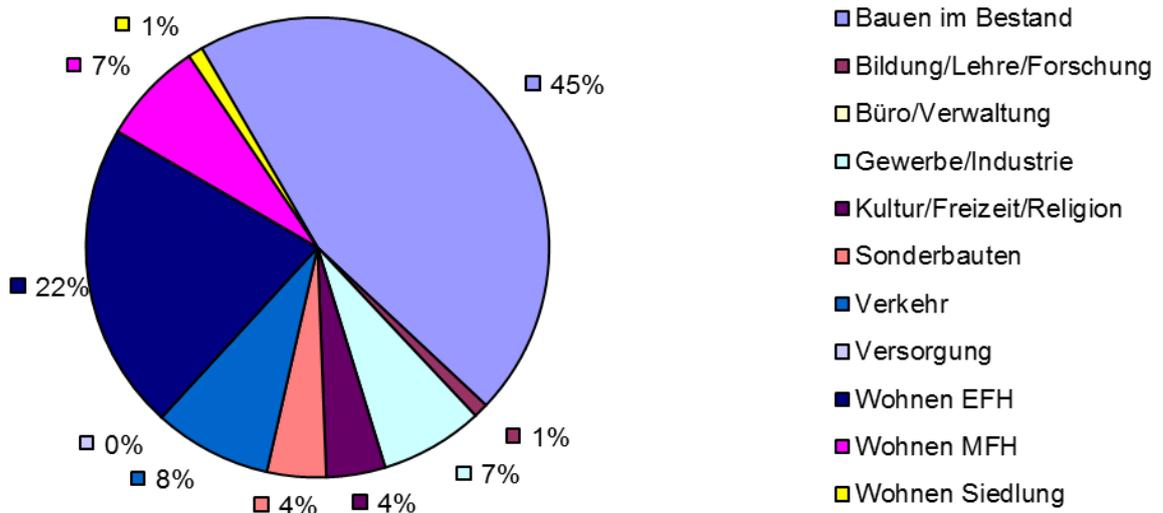


Abbildung 2: Schadenshäufigkeit im Rahmen der Fachberatung, aufgeschlüsselt nach Bauart und Bauzustand (Bauen im Bestand)

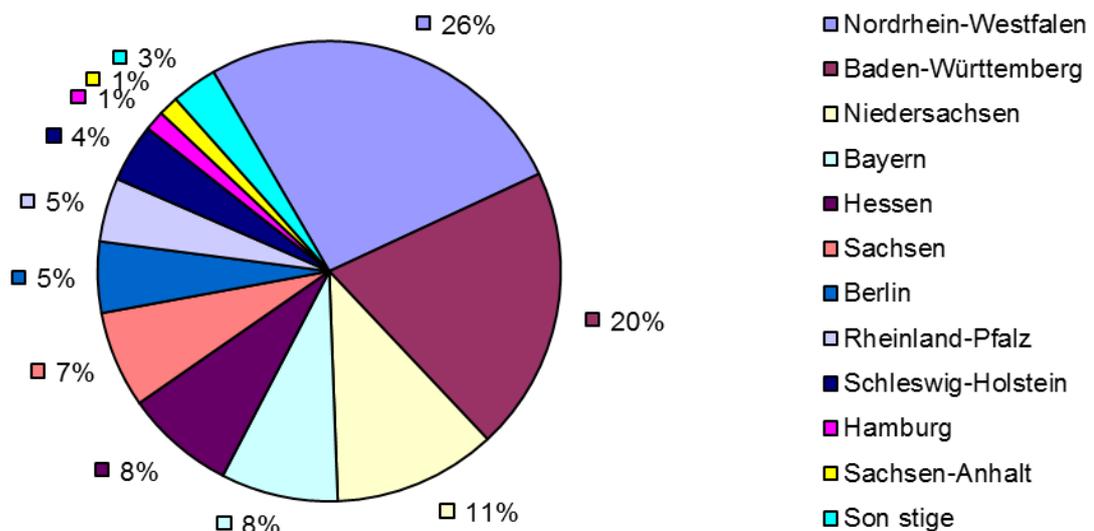


Abbildung 3: Schadenshäufigkeit im Rahmen der Fachberatung, aufgeschlüsselt nach Bundesländern

- Bei 670 Projekten wurden bauphysikalische Belange besprochen. Diese wären unter neuen Klimadaten ggf. neu zu bestimmen.
- Der größte Anteil bauphysikalischer Beratungen bezog sich auf das Bundesland Nordrhein-Westfalen (26 %)

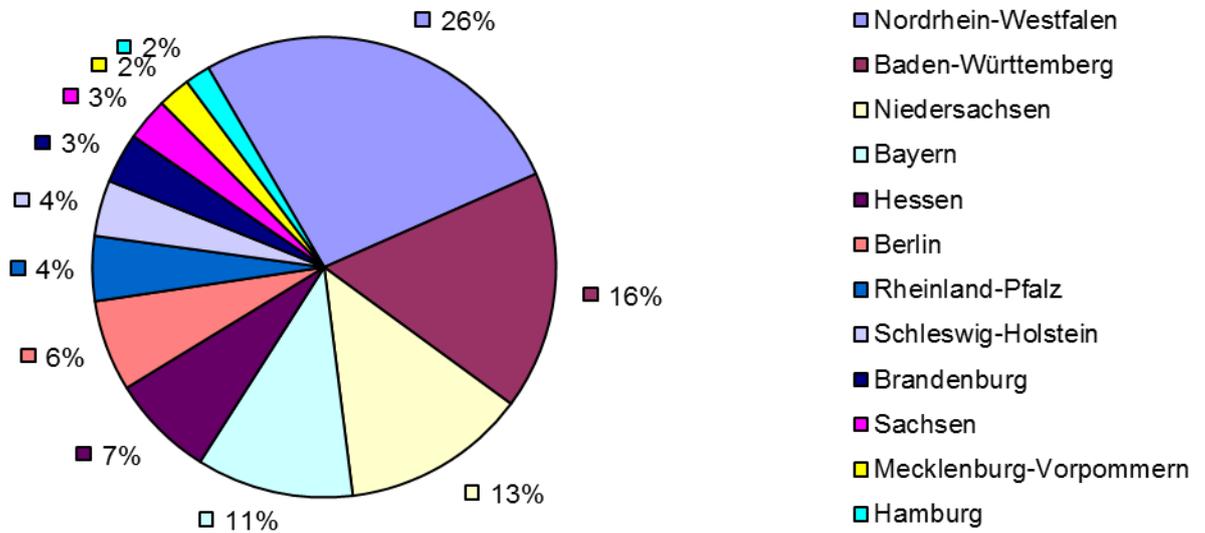


Abbildung 4: Bauphysikalische Fragen im Rahmen der Fachberatung, aufgeschlüsselt nach Bundesländern

- Auch bei den bauphysikalischen Fragen sind insbesondere zu bestehenden Konstruktionen (Bauen im Bestand) Beratungen (48,5 %) durchgeführt worden

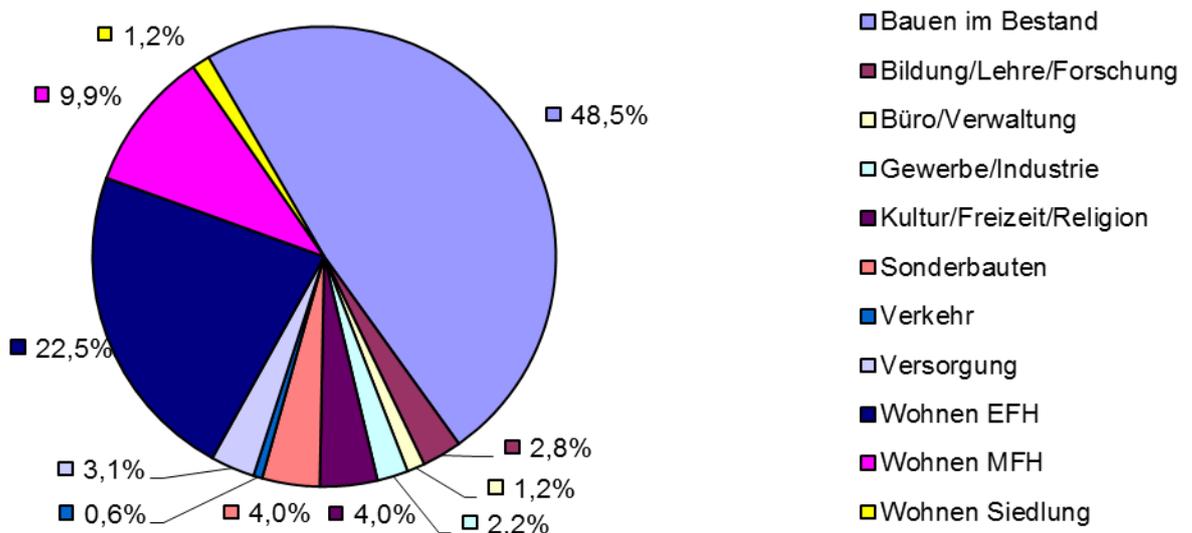


Abbildung 5: Bauphysikalische Fragen im Rahmen der Fachberatung, aufgeschlüsselt nach Bauart und Bauzustand (Bauen im Bestand)

Fachberatung Holzbau: Übersicht der Schadensursachen bei Außenbauteilen

In der Regel sind die Schäden, die im Zusammenhang mit klimabedingten Einwirkungen auftreten, Feuchteschäden. In der nachfolgenden Tabelle sind die am häufigsten dokumentierten Schadensursachen genannt. Hierbei handelt es sich oft bei geringen Feuchtetoleranzen der Bauteile um ein Zusammenwirken zwischen wirtschaftlich ausgereizten Konstruktionen, mangelnder Planung (z. B. hygrothermische Nachweise) und z. T. fehlerhafter Ausführung (z. B. mangelnder Witterungsschutz während der Bauphase).

Tabelle 1: Schadensursachen bei Außenbauteilen

Bauteil	Schadensursachen
Außenwandsockel	diffusionsdichte Bauweise, konvektive Feuchteinträge, mangelnde Sockelabdichtungen, Baufeuchte (Estrich, Niederschläge)
Außenwandfensterbank	unterdimensionierte Abdichtung, fehlerhafte Bauteilanschlüsse
Außenwandfensterlaibung	fehlerhafte Bauteilanschlüsse, UV-Strahlung (Unbeständigkeit des Materials, z. B. Folien)
Außenwand (Fläche)	diffusionsdichte Bauweise, konvektive Feuchteinträge, Baufeuchte (Estrich, Putz, Niederschläge) UV-Strahlung (Unbeständigkeit des Materials)
Schrägdach	diffusionsdichte Bauweise, konvektive Feuchteinträge, Dachundichtheiten, UV-Strahlung (Unbeständigkeit des Materials, z. B. Abdichtungsbahnen)
Flachdach	diffusionsdichte Bauweise, konvektive Feuchteinträge, Dachundichtheiten, Baufeuchte (Niederschläge), UV-Strahlung (Unbeständigkeit des Materials, z. B. Abdichtungsbahnen)

Umfrage bei Sachverständigen für Holzschutz

Die Umfrage erfolgte in Sachverständigenkreisen, die regelmäßig Fortbildungsmaßnahmen für Sachverständige von Holzbau Deutschland – Bund Deutscher Zimmermeister im Zentralverband des Deutschen Baugewerbes wahrnehmen und eine nachvollziehbare Expertise für Holzschutz nachweisen können. Die gezielte Ansprache von rund 80 Teilnehmern der Deutschen Sachverständigentage für Holzbau und Ausbau der Jahre 2018 und auch 2017 bietet grundsätzlich ein sehr breites Spektrum an Schadensbildern. Aus dieser gezielten Befragung können drei Sachverhalte extrahiert werden:

- Die Analyse ergab keine signifikante Änderung der Ursachen bei den Schadensfällen über die letzten Jahre, die nachweisbar aufgrund von Klimaveränderungen verursacht wurden.
- Insbesondere wurden keine Veränderungen der Schadenbilder infolge von hygrothermischen Zusammenhängen erkannt, die aus Klimaveränderung bzgl. Temperatur, Luftdruck, relative Luftfeuchte hervorgerufen wurden.
- Bei der Schadensauswertung konnte kein Fall erkannt werden, der auf alleiniges Versagen der Diffusionsfunktionalität der üblichen Standardaufbauten von Holztafelwänden zurückzuführen ist.

Recherche bei den Gebäudeversicherungsunternehmen

Die Recherche wurde durch direkte Befragungen und begleitende Internetrecherche bei 21 Gebäudeversicherungsunternehmen durchgeführt. Entweder lagen Analysen zu Schadensursachen grundsätzlich nicht vor, oder diese Auswertungen konnten nicht weitergegeben werden. Zumindest konnten in den direkten Befragungen keine klimabedingten Einwirkungen als Schadensursache bei Holzgebäuden herausgearbeitet werden. Vielmehr wurde häufiger darauf hingewiesen, dass grundsätzliche Planungs- und/oder Ausführungsfehler zu den Schadensbildern geführt haben soll.

- **Bauen in anderen Klimazonen**

Das Fraunhofer WKI hat eine vertiefende Literaturrecherche über Holzbauweise aus anderen Klimaregionen durchgeführt, um Beispiele für positive, aber auch negative Entwicklungen zu erlangen. Dieses Arbeitspaket umfasste somit eine Literaturrecherche zum Problem hygrothermischer Schäden aktueller Holzkonstruktionen und zu möglichen Lösungsansätzen. Laut einer Analyse von 127 Versagensfällen gehen 11,4% der Schäden auf Unterschätzungen der Umweltauswirkungen, also faktisch auf Planungsfehler hinsichtlich hygrothermischer Problemstellungen, zurück [1]. Abgesehen von allgemeinen Kondensations- oder Feuchtigkeitsproblemen, die sich mehr auf Fugenstellen, Ecken, Dachböden und flache Decken, Wärmebrücken und Leckagen konzentrieren, weisen Fallstudien zu modernen Holzkonstruktionen auf andere Probleme hin, die durch Feuchtigkeit in verschiedenen Situationen verursacht werden:

- Die Untersuchung von hochgedämmten Holzrahmenwänden, die in Tallinn gebaut wurden, zeigt die Bedeutung der Dichtheit und Wärmebeständigkeit der Winddichtung. Im Fall eines geringeren Widerstandes in der Windbarriere liegt der kritische Bereich in der Schnittstelle von Winddichtung und Dämmschicht [2].
- Bei beidseitig mit OSB-beplankten Holzrahmenwänden wird die Wirkung der Dampfsperre wichtig. Die Untersuchungen in [3] weisen darauf hin, dass in Fällen ohne Dampfsperre das Risiko des Schimmelpilzwachstums an der Grenzfläche zwischen Dämmschicht und äußerer OSB höher ist, als mit Dampfsperre.
- Die meisten der jüngsten Schäden, die durch Feuchtigkeit in finnischen Holzkonstruktionen verursacht werden, befinden sich in den Fußböden und in der Fuge zwischen Boden und Wand [4].
- Werden OSB-Platten ohne Dampfsperre und mit hoher Dampfdurchlässigkeit der gestrichenen Gipskartonplatte im Winter unter einer hohen inneren Luftfeuchtigkeit verbaut, führt dies zu starken Feuchtigkeitsansammlungen in der OSB-Beplankung [5].
- Die Luft- und Dampfdurchlässigkeit von Außendämmungen hat eine große Wirkung auf den Feuchtigkeitsgehalt anderer Schichten. Da Polystyrol (PS) eine geringere Diffusionsfähigkeit als Mineralwolle hat, ist der Wassergehalt in der Grenzfläche von OSB mit PS viel höher [6].
- Die Außendämmung ist sehr wirksam, um das Auftreten von Kondensation zu verringern. Bei sehr kaltem Außenklima verringert sich jedoch der Vorteil [6].

Allgemeine Lösungsansätze (Materialentwicklungen ausgenommen):

- Die von Künzel durchgeführten gekoppelten numerische Wärme-, Feuchte- und Luftanalysen vereinfachen zeitaufwendige Realversuche zur hygrothermischen Beurteilung von Gebäudehüllen [7].
- Verschiedene Untersuchungen zu Fäulnis- und Schimmelpilzrisiken in verschiedenen Situationen wurden durchgeführt, um Methoden zur Abschätzung des Zerfalls und des Schimmelpilzrisikos in verschiedenen Schichten der Gebäudehülle und zur Definition sicherer Bedingungen zu entwickeln [8-12].
- Numerische Modelle zur hygrothermischen Untersuchung können verbessert werden, indem weitere Bedingungen berücksichtigt werden, z. B. zusätzliche Feuchtigkeitsverteilung aufgrund von Wind und Regen [13].
- Zerstörungsfreie Methoden zum Gebäude-Monitoring und Vor-Ort-Untersuchungen zur frühen Erkennung von Schäden und Fäulnis in Holzbauten sollten weiterentwickelt werden [14].

Literatur:

- [1] Hansson, Eva Frühwald. "Analysis of structural failures in timber structures: Typical causes for failure and failure modes." *Engineering Structures* 33.11 (2011): 2978-2982.
- [2] Pihelo, Peep, Henri Kikkas, and Targo Kalamees. "Hygrothermal performance of highly insulated timber-frame external wall." *Energy Procedia* 96 (2016): 685-695.
- [3] Latif, E., Ciupala, M. A., Tucker, S., Wijeyesekera, D. C., & Newport, D. J. (2015). Hygrothermal performance of wood-hemp insulation in timber frame wall panels with and without a vapour barrier. *Building and Environment*, 92, 122-134.
- [4] Heikkilä, Jari. "Moisture damage in Finnish wooden houses." *Journal of Building Appraisal* 1.4 (2005): 331-343.
- [5] Glass, S. V., Kochkin, V., Drumheller, S. C., & Barta, L. (2015). Moisture performance of energy-efficient and conventional wood-frame wall assemblies in a mixed-humid climate. *Buildings*, 5(3), 759-782.
- [6] Maref, W., Armstrong, M., Rousseau, M., & Lei, W. (2010, April). A field monitoring investigation of the effect of adding different exterior thermal insulation materials on the hygrothermal response of wood-frame walls in a cold climate. In *Proceedings of the Building Enclosure Science & Technology (BEST2) Conference, Portland, OR, USA* (Vol. 1214).

- [7] Künzel, H. M. (1995). Simultaneous heat and moisture transport in building components. *One-and two-dimensional calculation using simple parameters*. IRB-Verlag Stuttgart.
- [8] Viitanen, H., Vinha, J., Salminen, K., Ojanen, T., Peuhkuri, R., Paajanen, L., & Lähdesmäki, K. (2010). Moisture and bio-deterioration risk of building materials and structures. *Journal of Building Physics*, 33(3), 201-224.
- [9] Viitanen, H., Krus, M., Ojanen, T., Eitner, V., & Zirkelbach, D. (2015). Mold risk classification based on comparative evaluation of two established growth models. *Energy Procedia*, 78, 1425-1430.
- [10] 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(3), 303-313.
- [11] Gradeci, K., Labonnote, N., Time, B., & Köhler, J. (2018). A probabilistic-based methodology for predicting mould growth in façade constructions. *Building and Environment*, 128, 33-45.
- [12] Isaksson, T., Brischke, C., & Thelandersson, S. (2013). Development of decay performance models for outdoor timber structures. *Materials and Structures*, 46(7), 1209-1225.
- [13] Saber, H. H., Lacasse, M. A., Moore, T. V., & Nicholls, M. (2014). Mid-rise wood constructions: investigation of water penetration through cladding and deficiencies (Report to Research Consortium for wood and wood-hybrid mid-rise buildings).
- [14] Riggio, M., Sandak, J., & Franke, S. (2015). Application of imaging techniques for detection of defects, damage and decay in timber structures on-site. *Construction and Building Materials*, 101, 1241-1252.

- Art und Häufigkeit der diversen Holzkonstruktionen

Die wirtschaftliche Bedeutung der einzelnen Bauweisen können nicht aus den üblichen Statistiken des Statistischen Bundesamtes entnommen werden, da die differenzierte Abfrage der Holzbauweise nicht Bestandteil der Baugenehmigungsantragstellung ist. In dieser erfolgt lediglich die Abfrage, ob es sich um ein Gebäude aus Holz handelt oder nicht. So belief sich der Anteil der Holzbaugebäude 2016 im Durchschnitt bei den Wohngebäuden bei 16,2 % und bei den Nichtwohngebäuden bei 19,3 % (Abbildung 6).

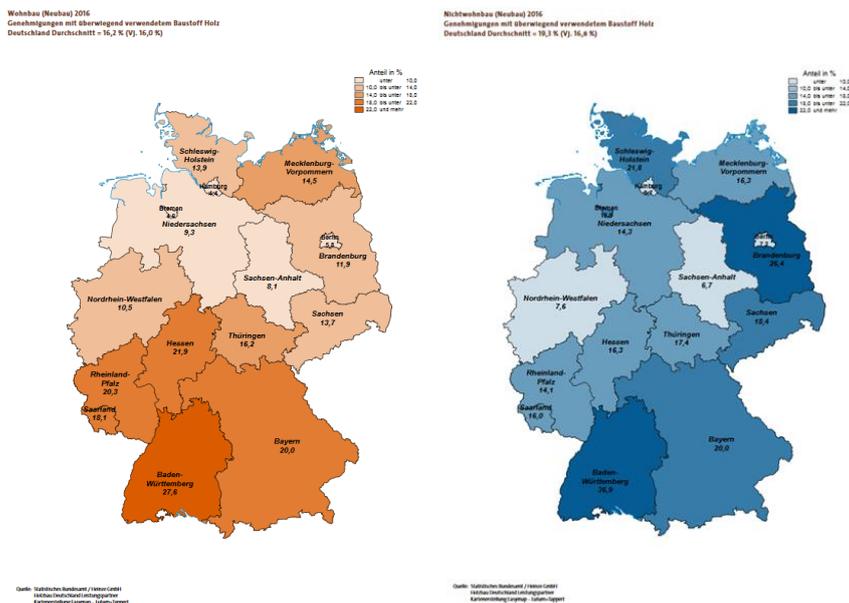


Abbildung 6: Anteil der Holzgebäude im Wohnungsbau (links) und Nichtwohnungsbau (rechts) im Jahr 2016; Quelle: Statistisches Bundesamt

Nach Einschätzung der Fachgremien von Holzbau Deutschland beläuft sich der Anteil der Holzrahmenbauweise auf ungefähr 90 %. Der Holzmassivbau hat einen Marktanteil von derzeit etwa 10 % in diesem Segment.

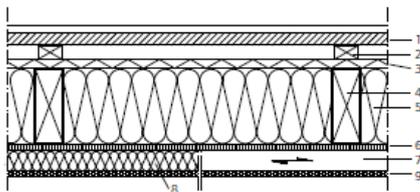
Die Fachwerkbauweise spielt auch auf Grund ihrer bauphysikalischen Besonderheiten heute im europäischen Markt keine Rolle mehr. Sie ist lediglich bei historischen Sanierungsprojekten Gegenstand der Planung und Ausführung.

Konstruktiv in Hinblick auf die hygrothermische Funktionsweise der Außenbauteile unterscheidet man allerdings zwischen dem handwerklichen Holzrahmenbau, i.d.R. diffusionsoffener, und dem industriellen Holzrahmenbau, i.d.R. diffusionsdichter.

Übliche Außenbauteile in Holzrahmenbauweise

Unter dem Zeichen des INFORMATIONSDIENST HOLZ werden insbesondere in der Grundlagschrift zum Holzrahmenbau (Reihe1 | Teil 1 | Folge 7 _Holzrahmenbau) einige Standarddetails dargestellt. Im Bereich des Holzmassivbaus kann auf eine Schrift zum Brettsper Holz (Reihe 4 | Teil 6 | Folge 1 _Bauen mit Brettsper Holz) zurückgegriffen werden. Nachstehend, in Abbildung 7, sind beispielhaft drei übliche Bauteilquerschnitte dargestellt, wobei diese ausschließlich eine sehr verkürzte Darstellung aller üblichen Bauteilquerschnitte sind. Während die dargestellten Wandaufbauten üblich und bauphysikalisch völlig unkritisch sind, ist der dargestellte Flachdachaufbau zwar üblich, jedoch bauphysikalisch fehleranfällig. Das übliche, belüftete und (deswegen) bauphysikalisch unproblematische Steildach ist hier nicht dargestellt. Eine sehr umfangreiche Sammlung an Bauteilquerschnitten bietet die Datenbank „dataholz“, die unter anderem auch von Projektpartner HDI mit Inhalten versehen wird.

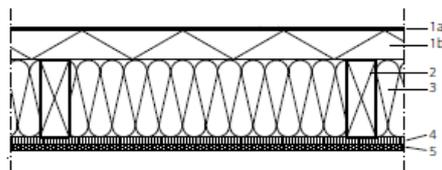
Wandbauteil HDI 1: Außenwand mit hinterlüfteter Fassade und Installationsebene



Bauteilschichten AW-1

Nr.	Dicke (mm)	Material
1	—	Fassadenbekleidung
2	30	Lattung, b = 50 mm, e = 625 mm
3	16	hydrophobierte MDF-Platte
4	160	Ständer (Konstruktionsvollholz), b = 60 mm, e = 625 mm
5	160	Dämmung
6	15	OSB-Platte
7	40	Lattung, b = 60 mm, e = 400 mm
8	40	Dämmung
9	12,5	GKB-Platte
Σ	274	Bauteildicke, ohne Fassadenbekleidung

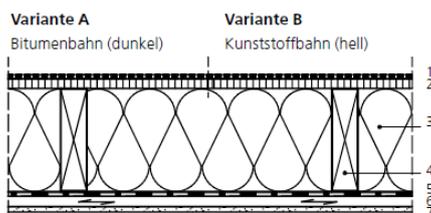
Wandbauteil HDI 2: Außenwand mit Wärmedämmverbundsystem



Bauteilschichten AW-2

Nr.	Dicke (mm)	Material
1a	-8-10	WDVS-Putzsystem
1b	60	WDVS-Dämmplatte, z.B. Holzweichfaser ¹⁾
2	160	Ständer (Konstruktionsvollholz), b = 60 mm, e = 625 mm
3	160	Dämmung
4	15	OSB-Platte
5	12,5	GKB-Platte
Σ	257	Bauteildicke

Flachdachbauteil HDI 3: Nicht belüftete (einschalige) Flachdächer



Bauteilaufbau für Dachneigung $\geq 5^\circ$

- | | |
|---|--|
| 1A Bitumenabdichtung | 4 Tragkonstruktion, z.B. KVH (Anteil 10 %) |
| 1B Kunststoffabdichtung, vlieskaschiert | 5 Dampfbremse ($s_d \geq 2$ m) bzw. feuchtevariabel |
| 2 Schalung OSB/3-Platten nach DIN EN 300, d = 22 mm ($\mu = 200/300$) | 6 Installationsebene, ungedämmt, d = 24 mm |
| 3 Volldämmung mit Faserdämmstoff | 7 Gipskartonbekleidung, d = 12,5 cm |

Abbildung 7: übliche Bauteilquerschnitte (Beispiele)

2.1.1.2 Analyse der Klimamodelle

Das **Fraunhofer WKI** hat die bestehenden Klimamodelle hinsichtlich der Verwertbarkeit innerhalb des Projektes analysiert. Dazu wurden sowohl regionale, als auch globale Modelle berücksichtigt. Es wurden die für Deutschland bzw. Mitteleuropa vorhergesagten Annahmen der aktuellen Klimamodelle ausgewertet und für den weiteren Verlauf des Forschungsprojektes quantitativ zusammengefasst. Um die Auswirkungen der globalen Klimaänderungen auf einzelne Länder zu untersuchen, wurden z.B. von Jacob /14/ regionale Klimamodelle in das globale Klimamodell eingebettet. Nach Jacob /14/ ist es so möglich, eine spezielle Region „unter dem Vergrößerungsglas“ detaillierter zu untersuchen und eine Brücke zwischen der globalen Klimaänderung und den lokalen Konsequenzen zu schlagen. Als regionale Klimamodelle wurden folgende berücksichtigt:

- REMO vom Max-Planck-Institut
- STAR vom Potsdamer Institut für Klimafolgenforschung
- WETTREG der Firma Climate & Environment Consulting in Potsdam

Die Auswirkungen der regionalen Klimamodelle wurden in die Betrachtung integriert und dienen quantitativ als Datengrundlage für die bauphysikalische Simulation.

Alle verfügbaren Daten werden nach folgenden Merkmalen kategorisiert:

- Regionale und globale Daten: Es bezieht sich auf die Regionen, für die Klimadaten berechnet werden. REMO-Klimadaten sind beispielsweise als globale Daten für Europa zwischen 27N und 72N Breitengrad und 22W und 45E Längengrad sowie als regionale Daten für Deutschland verfügbar.
- Auflösung: Die Region, für die die Klimadaten berechnet werden, wird mit gleichem Abstand basierend auf dem Grad zwischen Breitengrad und Längengrad geteilt. Zum Beispiel REMO-Klimadaten, für hochauflösende Daten wird der Bereich in Gitter mit 0,11 Grad in Breiten- und Längsrichtung unterteilt, was ca. 12 Km Entfernung entspricht, und für niederauflösende Daten die Änderungen von 0,44 Grad, was ca. 50Km in jede Richtung entspricht.
- Szenarien: Sie kann auf dynamischen und statistischen Prozessen basieren. Dynamische Modelle wie REMO simulieren verschiedene Klimaparameter, indem sie nichtlineare Gleichungen für regionale Abschnitte des globalen Modells lösen. Statistische Modelle basieren auf Wissen, das auf spezifischen Klimabeobachtungen basiert. WETTREG bezieht sich beispielsweise auf etablierte statistische Zusammenhänge zwischen großräumigen Zirkulationsmustern in der Atmosphäre und lokalen und regionalen Wetterereignissen.

- Representative concentration pathway (RCP): Sie wird definiert, indem die Menge der Treibhausgase, die in den kommenden Jahren freigesetzt werden, zugrunde gelegt wird. RCP8.5 zeigt den schlimmsten Fall an, wenn wie gewohnt weitergearbeitet und somit emittiert wird. RCP2.6 bezieht sich auf die beste Situation aufgrund von Klimaschutzbedingungen und geringstmöglichen Treibhausgasemissionen.

- Aggregation: Es bezieht sich auf Zeitintervalle für die Berechnung der Daten, die stündlich, täglich, wöchentlich, monatlich, alle 3 oder 6 Stunden sein können.

Da der Schwerpunkt innerhalb des Vorhabens auf Deutschland liegt, wird REMO als dynamisches Klimamodell zur Untersuchung langfristiger Klimaübergänge im Worst-Case (RCP 8.5) bis Ende des Jahres 2100 mit täglicher Aggregation betrachtet.

Die meisten globalen und regionalen Klimamodelle prognostizieren starke klimatische Veränderungen in den Wintermonaten und schwächere Veränderungen im Sommer [REMO,WETTREG,STAR]. Die durchschnittliche Jahrestemperatur in Deutschland wird bis zum Jahr 2100 voraussichtlich um 1,1 bis 5,5 ° C steigen. Die Zahl der Sommertage ($T > 25 \text{ ° C}$) verdoppelt sich bis zum Ende des Jahrhunderts und die Zahl der heißen Tage ($T > 30 \text{ ° C}$) erhöht sich sogar auf das Dreifache. Der starke Temperaturanstieg im Winter wird bedingt durch fehlende Schneedecken, weniger Wärmeabsorption durch den Boden und weniger Kaltluft aus dem Osten. Bis zum Ende des Jahrhunderts wird kaum Schnee in den Alpen unterhalb von 1.500 Metern fallen. Die Winter werden nasser, insbesondere an der Nordseeküste. Am Ende dieses Jahrhunderts liegt die minimale Wintertemperatur für mehr als 90% der Fläche Deutschlands bei mehr als 0 ° C (Abbildung 8).

Tabelle 2 zeigt die Jahresdurchschnittstemperatur in ausgewählten deutschen Städten für jedes Jahrzehnt des 21. Jahrhunderts und Tabelle 3 die Anzahl der Tage mit mehr als 25°C. Solche Tage werden meteorologisch-klimatologisch als Sommertage bezeichnet. Tropentage sind solche mit einer Tageshöchsttemperatur von mehr als 30 ° C und als tropische Nächte werden diejenigen bezeichnet, an denen die Nachttemperatur nicht unter 20 ° C sinkt.

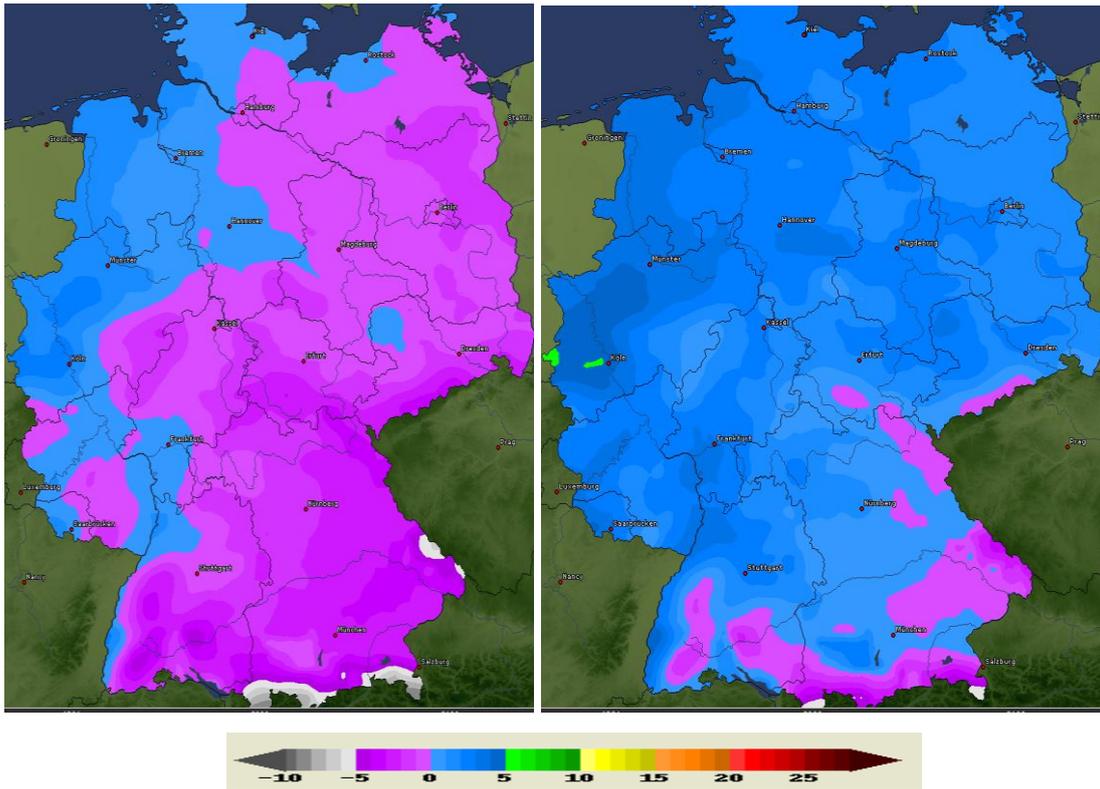


Abbildung 8: Zeitlich gemittelte minimale Wintertemperaturen in Deutschland (links: von 2011 bis 2040, rechts: von 2071 bis 2100)

Tabelle 2: Durchschnittstemperatur in ausgewählten deutschen Städten für jedes Jahrzehnt des 21. Jahrhunderts

Average Temperature	Dresden	Frankfurt	Freiburg	Garmisch-Partenkirchen	Hamburg	Hannover	Köln	München	Potsdam	Rostock
2001-2010	9,5	10,8	10,6	5,2	9,4	10,0	10,6	9,5	9,8	9,1
2011-2020	9,5	11,0	11,0	5,5	9,5	10,0	10,9	9,8	9,8	9,1
2021-2030	10,1	11,3	11,1	5,8	10,0	10,6	11,1	10,0	10,3	9,6
2031-2040	10,4	11,7	11,6	6,3	10,3	10,8	11,6	10,4	10,5	9,8
2041-2050	10,8	12,2	12,1	6,8	10,7	11,3	12,0	11,1	11,1	10,3
2051-2060	11,1	12,4	12,3	7,2	10,9	11,5	12,2	11,3	11,2	10,5
2061-2070	12,1	13,5	13,5	8,4	11,5	12,2	13,0	12,5	12,1	11,1
2071-2080	12,1	13,5	13,5	8,2	11,7	12,4	13,2	12,4	12,1	11,3
2081-2090	13,0	14,3	14,4	9,5	12,4	13,1	13,9	13,4	13,0	12,1

Tabelle 3: Anzahl der Tage mit mehr als 25°C in ausgewählten deutschen Städten für jedes Jahrzehnt des 21. Jahrhunderts

Number of days warmer than 25°C	Dresden	Frankfurt	Freiburg	Garmisch-Partenkirchen	Hamburg	Hannover	Köln	München	Potsdam	Rostock
2001-2010	32	41	38	0	12	17	28	23	11	6
2011-2020	25	54	47	0	12	21	39	25	13	4
2021-2030	59	96	94	0	33	45	76	31	34	15
2031-2040	42	88	80	0	25	32	67	34	19	9
2041-2050	38	78	78	0	19	30	60	29	17	9
2051-2060	65	100	110	2	34	47	89	62	39	24
2061-2070	173	276	303	10	78	115	196	201	100	45
2071-2080	147	211	222	6	73	92	173	156	85	28
2081-2090	148	233	262	22	48	81	170	178	75	28
2091-2100	168	278	317	38	63	93	216	246	81	35

Verschiedene Arten von regionalen und globalen Klimamodellen, die auf statischen (WETTREG) und dynamischen numerischen Simulationen (Remo) basieren, wurden analysiert. Basierend auf früheren Fraunhofer-Untersuchungen zur Bestimmung eines Referenzjahres als Extremsituation für die Gebäudeplanung, wurde Deutschland in hygrothermische Zonen unterteilt. Repräsentativ für die jeweiligen Zonen werden zehn Städte ausgewählt, um einen Vergleich zu ermöglichen (Abbildung 9). Aus den prognostizierten Klimadaten wurden Hygrothermal- und Testreferenzjahre entwickelt, um die hygrothermische Leistung des Gebäudes zu erfassen. Dabei wurden Daten für extreme Sommer, Winter und extreme Ganzjahre erarbeitet.

Für die Simulation werden berechnete Tageswerte von REMO eingeplant, um Klimadaten für die voraussichtlich heißesten (Frankfurt & Freiburg) und kältesten Zonen (Garmisch-Partenkirchen) des 21. Jahrhunderts zu implementieren. Um den Effekt von verschiedenen Materialien auf deren Feuchtigkeitsgehalt zu analysieren, werden hygrothermische Untersuchungen an Strukturelementen durchgeführt. Dabei werden stündliche Test-Referenzjahrsdaten (TRJ-Daten) herangezogen.

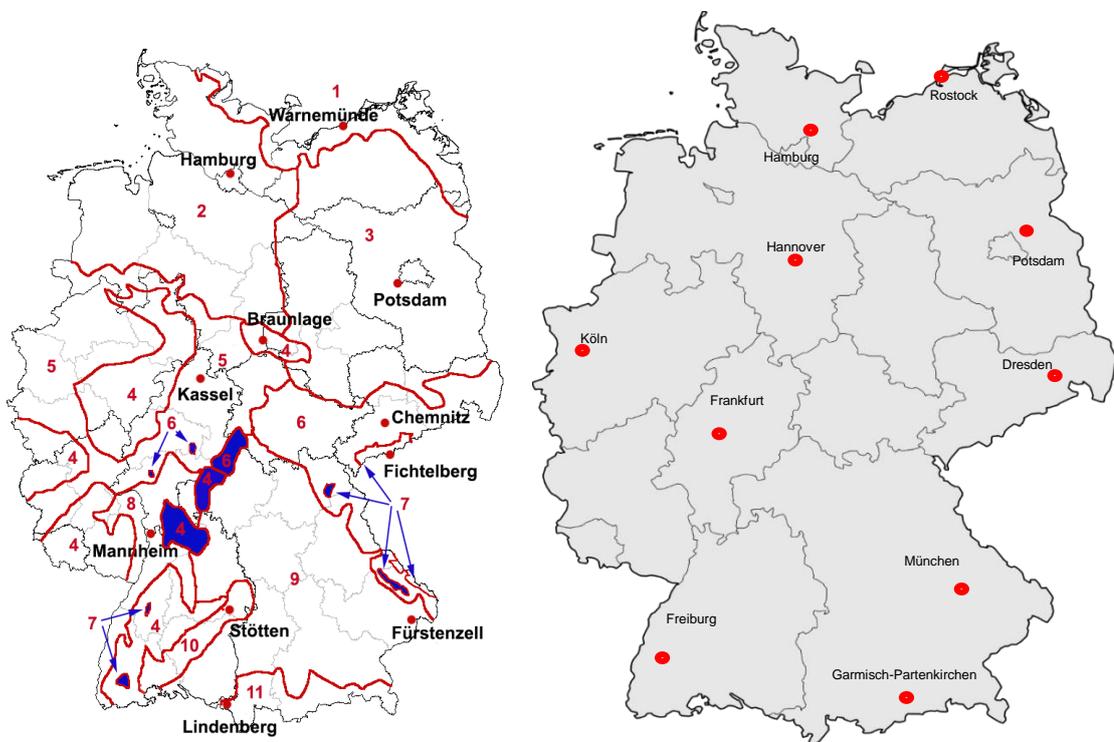


Abbildung 9: Hygrothermische Zonen Deutschlands

Klimaänderungen – Niederschläge:

Die Niederschlagsmenge wird bis zum Ende des Jahrhunderts im Allgemeinen abnehmen, jedoch wird prognostiziert, dass extreme Wetterereignisse bis zum Ende des Jahrhunderts wie plötzliche starke Regenfälle oder ungewöhnliche, unvorhersehbare, schwere oder unsaisonale Wetterereignisse zunehmen werden.

Die Abbildung 10 zeigt im linken Bild die Niederschlagsmenge im ersten Jahrzehnt des 21. Jahrhunderts und im rechten Bild die prognostizierte Niederschlagsmenge im letzten Jahrzehnt.

Die Prognosen bezüglich der zunehmenden Extremwetterereignisse können innerhalb dieses Vorhabens praktisch nicht verwendet werden, weil die Prognosen zum einen sehr unsicher sind und weil die konkreten Ereignisse tatsächlich unvorhersehbar sind und auch in ferner Zukunft unvorhersehbar bleiben werden.

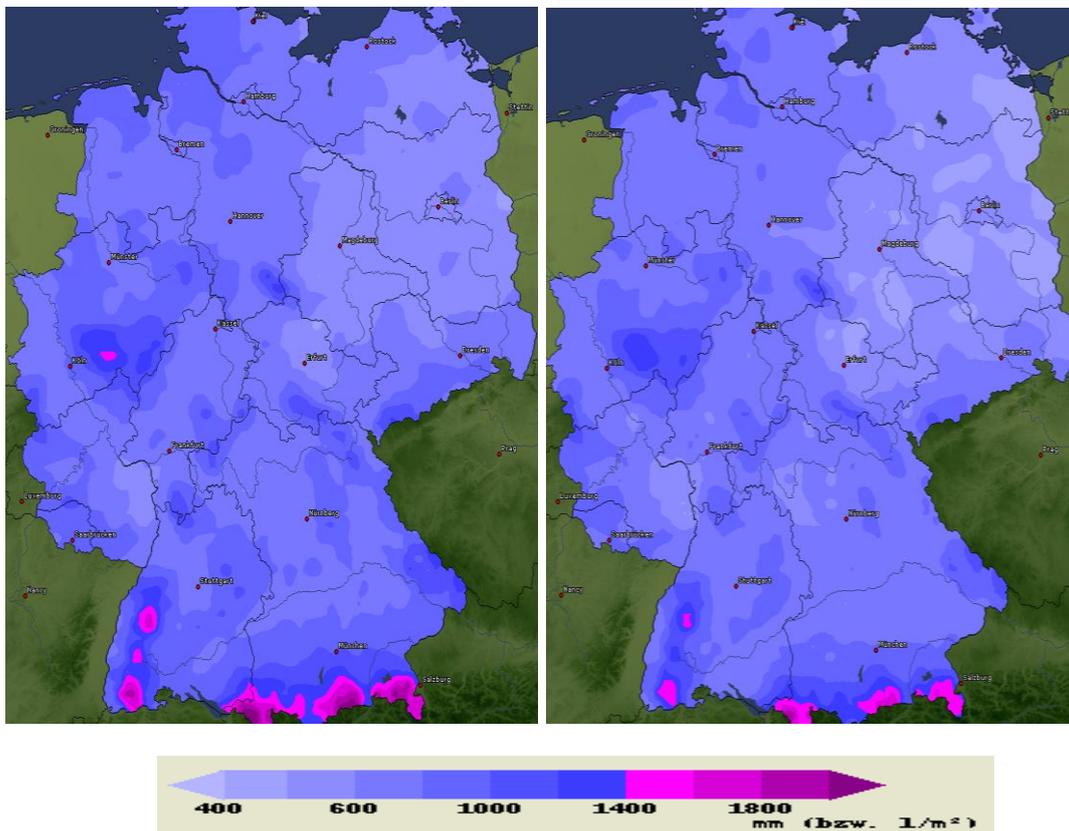


Abbildung 10: Niederschlagsmenge aus dem ersten (links) und letzten (rechts) Jahrzehnt des 21. Jahrhunderts

2.1.1.3 Zusammenfassung

Nach der Sondierung der globalen und regionalen Klimaszenarien durch das **HDI** hat das **Fraunhofer WKI** ein „Worst-Case-Szenario“ und ein „Moderates Szenario“ für die spätere Umsetzung der Berechnungssimulationen zusammengefasst. Dabei sind die lokalen Wetterextreme, als auch die Häufigkeit der eintretenden Phänomene berücksichtigt worden. Die zu berücksichtigenden und zusammengefassten Daten (Folgen des Klimawandels) wurden in Anlehnung an /13/ quantitativ und qualitativ in die bauphysikalischen Berechnungen implementiert:

- Hitzewellen / lange Sonneneinstrahlung im Sommer
- Starkregenereignisse / Schneefall und deren Lastannahme
- Wind insbesondere Böen und die Sogwirkung auf Fassaden
- Zunahme von feuchten Wintern
- Änderung der Temperatur in Relation zur Luftfeuchte

Hierbei war der Fokus der Untersuchungen vor allem auf den noch unklaren Folgen des Klimawandels, wie die Zunahme der feuchten Winter. Dabei ist nicht das Jahresmittel zu betrachten, sondern die Extremwetterlage.

Die Ergebnisse dieses Arbeitsteilpaketes lieferten die in das Arbeitspaket 2 zu implementierenden Daten der Klimamodelle und der festgelegten Bauprodukte und Bauteile.

Als zu betrachtende Konstruktionen wurde beschlossen, die des Projektes „HolnRaLu“ zu betrachten, weil diese den aktuellen Stand der Vielfalt aller Konstruktionsvarianten am besten widerspiegeln. Abbildung 11 zeigt die vier unterschiedlichen Wandtypen und in Tabelle 4 sind die entsprechenden Materialeigenschaften aufgeführt.

In Abbildung 12 ist beispielhaft ein Deckenaufbau dargestellt, der einen Wohnraum von einem nicht gedämmten Dachgeschoss trennt.

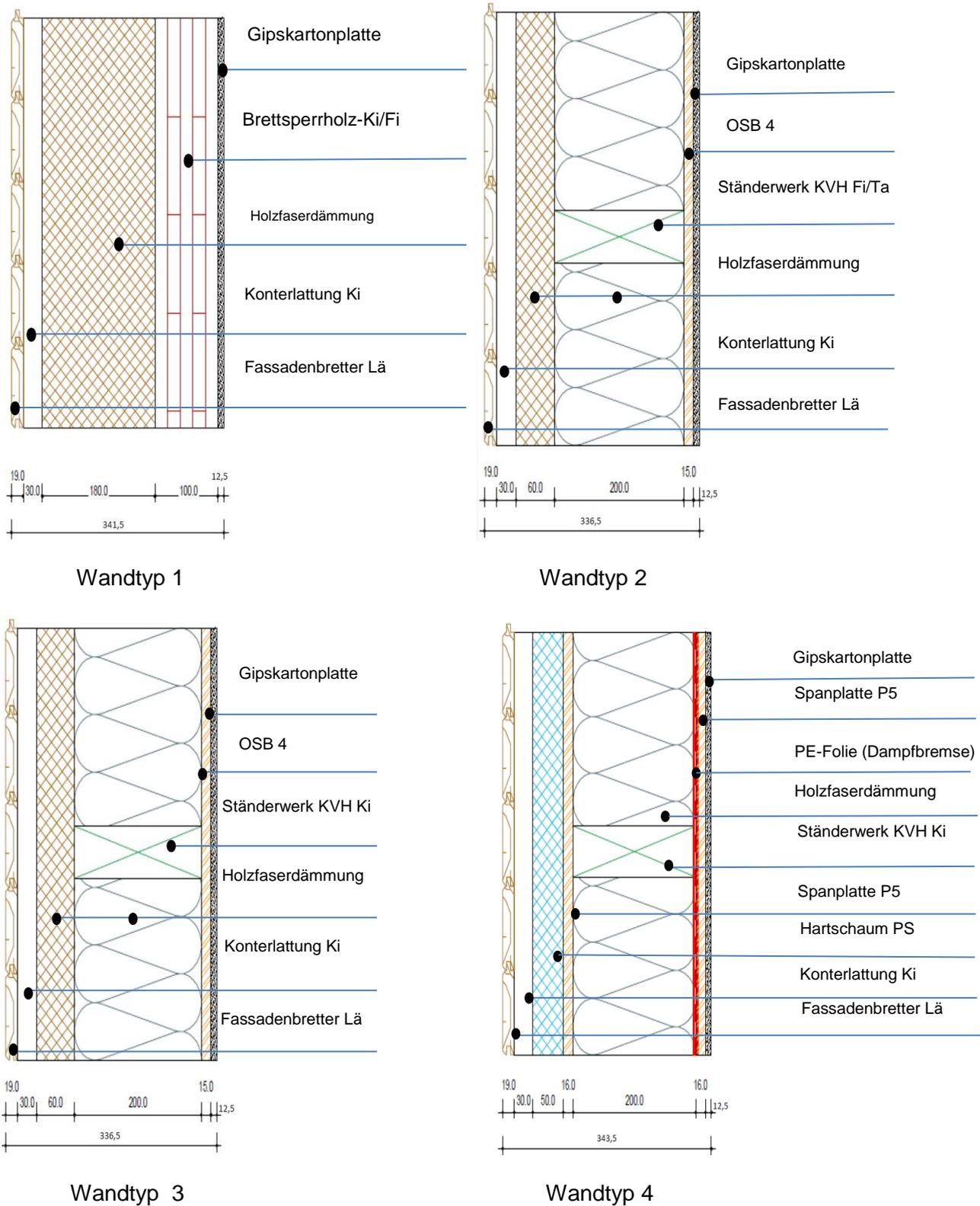


Abbildung 11: Bauteilaufbauten zur Verwendung in der Simulation

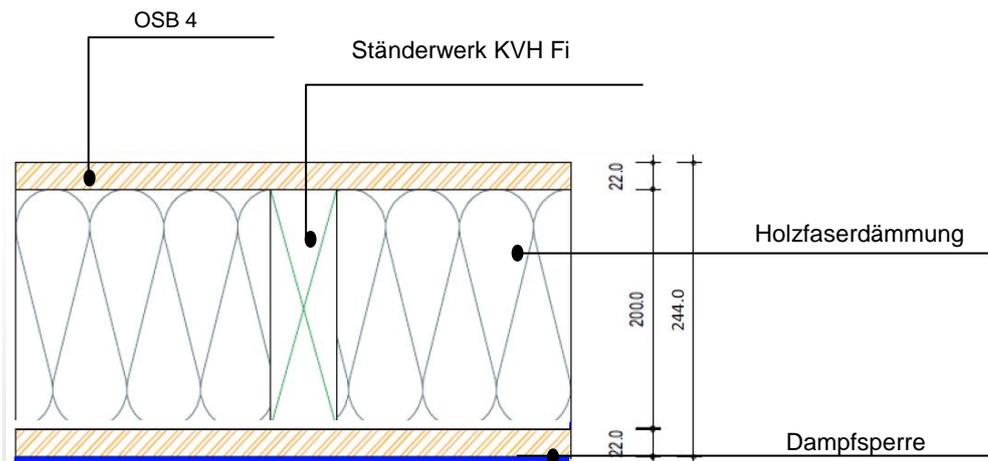


Abbildung 12: Beispielhaft gewählter Deckenaufbau, als Trennung eines Wohnraums zu einem nicht gedämmten Dachraum

Tabelle 4: Materialeigenschaften

Wandschicht	Dichte [kg/m ³]	Spezifische Wärmekapazität [J/kgK]	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	Dampfwiderstands- faktor μ	Porosität
Buche	708	1400	0.12	242	0.56
Holzfaserdämmung	50	1400	0.035	2	0.97
Gipskartonplatte	750	850	0.3	11.2	0.743
Ständerwerk KVH Fi	450	1400	0.23	4.3	0.73
OSB 4	650	1400	0.12	276	0.57
Hartschaum PS	30	1500	0.04	50	0.95
Spanplatte P5	620	2000	0.102	0.57	0.57
Ständerwerk KVH Ki	510	1600	0.13	50	0.73
Dampfbremse (sd=1m)	130	2300	2.3	1000	0.001

2.1.2 Arbeitspaket 2: Simulation und Berechnung

Die Parameter und die im Arbeitspaket 1 bestimmten Bauteile wurden in diesem Arbeitspaket vom **Fraunhofer WKI** in mathematische Modelle übertragen und berechnet. Der gekoppelte Wärme- und Feuchtetransport wurde mit den Programmen WUFI und COMSOL berechnet. COMSOL wurde auch für die Berechnung von Kräften oder Verformungen benutzt. Dabei kann auch der gekoppelte Wärme- und Feuchtetransport mit den daraus resultierenden Dimensionsänderungen im Holz, welche wiederum zu Spannungen und möglichen Rissen führen, berechnet werden. Die Berechnung mit allen Programmen dient dem „Screening“ der Versagens- und Problemfälle.

Die bauphysikalischen Simulationen sollen folgende Ausgabedaten liefern:

- Materialfeuchte/Feuchteprofil
- Min. und max. der Materialfeuchte -> Quellen und Schwinden
- Temperatur
- Auswirkungen durch Eintrag von Kräften (Schnee und Wind)

Der Vorteil der so entwickelten Rechenmodelle ist, dass Änderungen der Klimaeingangsdaten schnell und zuverlässig berechnet werden können. Weiterhin sind die Modelle nicht explizit an Bauteil- und Konstruktionsdetails gebunden. Die Berechnungen beruhen auf physikalischen Gesetzmäßigkeiten und Annahmen und sind somit vielseitig einsetzbar. Um die kritischen Parameter der Modelle zu kalibrieren, sind innerhalb dieses Projektes einzelne experimentelle Vorversuche vorgenommen worden. Die Kalibrierung und Validierung der Modelle grundsätzlicher Natur wurde mit Hilfe von bereits durchgeführten Bewitterungsversuchen am Fraunhofer WKI und auch mittels Studien anderer Forschungsinstitute vorgenommen. Dieses Arbeitspaket wurde ausschließlich vom Fraunhofer WKI durchgeführt und lieferte als Ergebnis die Daten zur Auswertung und Durchführung der Sensitivitätsanalysen und somit die Datenbasis für Arbeitspaket 3.

Eine wichtige Fragestellung bei der Durchführung von Simulationsrechnungen ist die Festlegung der Materialparameter. Wichtige Parameter von Materialien weisen z. T. große Schwankungsbreiten auf. Bei neu entwickelten Materialien oder bei Änderungen von Materialrezepturen ergibt sich das Problem, dass oftmals Materialparameter nicht oder nur unzureichend bekannt sind. Die experimentelle Bestimmung von Materialparametern ist immer mit einem mehr oder weniger großen Zeit- und Kostenaufwand verbunden.

Es sind u. a. diese Probleme, die durch Parametervariationen verringert werden sollen. Indem man minimale, mittlere und maximale Werte oder eine Normalverteilung für wichtige Parameter vorgibt, kann man deren Schwankungsbereich für konkrete Materi-

alien abbilden und betrachten. Gleichzeitig kann dadurch der Einfluss eines Materialparameters auf die Gesamtkonstruktion untersucht werden. Die Größe der Schwankungsbereiche kann oftmals aus der Erfahrung oder von ähnlichen Materialien mit bekannten Kennwerten und deren Schwankungsbreiten abgeleitet werden. Bei völliger Unkenntnis von Parametern wäre es auch möglich, den Variationsraum so groß anzusetzen, dass der jeweilige Parameter mit seiner gesamten Schwankungsbreite darin liegen muss. Dies hat aber nicht nur einen erhöhten Rechenaufwand zur Folge, sondern es verhindert Aussagen zur Zuverlässigkeit einer Konstruktion. Denn wenn die Lage des Schwankungsbereichs eines Parameters in einem Variationsraum nicht bekannt ist, wird jede Aussage etwa zu einem Vertrauensbereich sinnlos, da nicht bekannt ist, ob auch nur ein einziger Wert des Materialparameters in diesem Vertrauensbereich liegen kann. Es ist aber denkbar, durch die Berechnung einiger Variationen des unbekanntem Parameters zu Aussagen über dessen Einfluss auf das hygrothermische Verhalten einer Konstruktion zu gelangen. Ist dieser Einfluss gering, kann es möglich sein, die Unsicherheit hinsichtlich dieses Parameters zu vernachlässigen. Der Einfluss eines Parameters lässt sich z. B. mittels Sensitivitätsanalysen betrachten. In der Praxis wird es eher selten vorkommen, dass der Wertebereich eines wichtigen Materialparameters völlig unbekannt ist. Ist dies aber der Fall, muss er ermittelt werden. Je nach der Größe des Einflusses eines Materialparameters und der konkreten Problemstellung, kann es jedoch auch bei bekannten Materialien notwendig werden, für Zuverlässigkeitsprognosen die Schwankungsbreiten bestimmter Parameter genauer zu ermitteln.

Numerische Simulationsprogramme für die Bauphysik dienen der Berechnung des Temperatur- und Feuchteverhaltens von Bauteilen. Einfache Berechnungsmodelle sind nur für eindimensionale stationäre Verhältnisse geeignet. Sie erlauben i. allg. Berechnungen nach dem in DIN 4108 Teil 3 beschriebenen Glaser-Verfahren. Komplexere Rechenmodelle ermöglichen die Berechnung mehrdimensionaler instationärer Transportvorgänge nach den Verfahren der Finiten Differenzen oder der Finiten Elemente. Ein Überblick über verfügbare instationäre Temperatur- und Feuchtetransportmodelle findet sich bei Holm (Holm 2001, S. 132). Die innerhalb dieses Forschungsvorhabens durchgeführten Berechnungen wurden, wie bereits erwähnt, mit dem Simulationsprogrammen WUFI und COMSOL berechnet.

Ein weiteres, am Fraunhofer WKI zur Untersuchung von Wärme- und Feuchtetransportvorgängen vor allem in Holz und Holzwerkstoffen entwickeltes Simulationsprogramm „TUN“ wurde innerhalb dieses Vorhabens ausschließlich für umfangreiche Parametervariationen genutzt. Das Programm bildet die Grundlage für die Zuverlässigkeitsuntersuchungen, weil es die Berechnung stationärer und instationärer Wärme- und

Feuchtetransportvorgänge in ein, zwei oder drei Dimensionen ermöglicht und weil eine automatische Parametervariation vorgenommen werden kann. Im Verlauf dieses Projekts wurde das Programm um einige Transportmodelle erweitert, wie z. B. den Strahlungswärmeaustausch zwischen Bauteiloberflächen oder den konvektiven Wärme- und Feuchtetransport in Luftschichten, sowie ein Bedienungs- und Auswertetool für das sogenannte Pre- und Postprocessing als Add-In für ein kommerzielles Tabellenkalkulationsprogramm realisiert. Wegen der fehlenden Literatur zu dem Programm erfolgt nachstehend eine kurze Beschreibung der Funktionsweise des Programms:

TUN erlaubt die Berechnung mehrdimensionaler und instationärer Wärme- und Feuchtetransportvorgänge. Der Wärmetransport wird durch die Fourier'sche Differentialgleichung modelliert, der Feuchtetransport durch das 1. Fick'sche Gesetz. Die Wärmeleitfähigkeit λ kann als Konstante und als feuchteabhängiger Wert $\Delta\lambda/\Delta u$ angegeben werden. Der Diffusionskoeffizient D wird nach der empirisch ermittelten Schirmer-Beziehung bestimmt, die sich auch in DIN 52615 findet.

Die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ wird programmintern nach einer Gleichung von Hussein berechnete (Hussein 1982 S.19f.), die um einen Faktor μ_1 erweitert wurde und die μ nicht als Funktion der relativen Luftfeuchte sondern als Funktion der Materialfeuchte darstellt.

Hier stellt μ_1 eine untere Schranke für den Diffusionswiderstand dar, während μ_0 die Diffusionswiderstandszahl bei einer Materialfeuchte von 0 M.-% angibt, für den Fall, dass $\mu_1=0$ ist. Die stoffspezifische Konstante k_μ kann nach einer Methode von Hussein aus den Diffusionswiderstandszahlen des Trocken- und des Nassbereiches nach DIN 52615 bzw. DIN EN ISO 12572 ermittelt werden (Hussein 1982 S. 21). Eine umfangreiche Sammlung der Werte für $\Delta\lambda/\Delta u$, μ_1 , μ_0 und k_μ findet sich bei Leimer (Leimer 1991 S. 133/134). Zur Beschreibung des Sorptionsverhaltens sind im Programm mehrere Sorptionsisothermen hinterlegt. Sie können über den Parameter F60 an materialspezifische Verhältnisse angepasst werden. Das Programm benötigt als weitere Materialkennwerte für die Berechnungen die spezifische Wärmekapazität c , die Rohdichte ρ , die Porosität und, wenn mit Kapillarleitung gerechnet werden soll, die Leitwerte für kapillares Saugen und Weiterleiten.

Die Differentialgleichungen werden für die Simulation nach der Methode von Crank-Nicolson in Differenzgleichungen umgestellt. Dazu wird ein Bauteil, je nach Problemstellung, in 1-, 2- oder 3-dimensionale Elemente, also in Streckenabschnitte, Rechtecke oder Quader zerlegt. Diese Zerlegung wird im Folgenden Elementierung genannt. Die Lösung der Gleichungssysteme erfolgt iterativ nach der sukzessiven Überrelaxation oder der Methode der konjugierten Gradienten. Die numerische Stabili-

tät der Rechnung hängt außer von der gewählten Lösungsmethode auch von den Elementgrößen und der Zeitschrittweite ab. Bei festgelegter Elementierung ist die Zeitschrittweite nach oben begrenzt, eine feinere Elementierung hat einen überproportional wachsenden Rechenaufwand zur Folge. Für die Berechnungen gibt es zwei Abbruchkriterien, zum einen eine maximale Anzahl an Iterationsschritten und zum anderen eine vorgegebene obere Schranke bei den Lösungsdifferenzen aufeinander folgender Iterationsschritte.

Über eine Steuerdatei werden dem Simulationsprogramm die benötigten Parameter für Wärme- und Feuchteleitung sowie Wärme- und Feuchtespeicherung, die klimatischen Randbedingungen, die geometrische Zerlegung also Elementierung des Bauteils sowie bestimmte Steuer- und Ausgabeparameter vorgegeben. Die Steuerdatei kann in einem beliebigen Texteditor bearbeitet werden.

Die Berechnungsergebnisse werden als Textdatei ausgegeben und müssen mit geeigneten Computerprogrammen ausgewertet werden. Am Beginn der Ergebnisdatei werden Kontrollgrößen ausgegeben, die zumindest bei den ersten Berechnungen einer Serie durch Aufruf mit einem Editor visuell begutachtet werden sollten. Auch eine Betrachtung der Berechnungsergebnisse sollte an dieser Stelle erfolgen, um frühzeitig Eingabefehler des Benutzers und Probleme im Rechenablauf aufzudecken. Die Aufbereitung der Daten erfolgt mit geeigneten Programmen. Am PC besteht z. Z. die Möglichkeit ausgewählte Zustandsgrößen in ein Tabellenkalkulationsprogramm einzulesen. Dort können sie entweder direkt analysiert oder für die Weiterverarbeitung mit anderen Programmen wie z. B. Statistikpaketen vorbereitet werden. Für detaillierte Programmbeschreibungen und Erläuterungen zur Modellierung der Transport- und Speichervorgänge sei auf die Schriften von D. Greubel verwiesen (Greubel 1987a, 1987b).

Das Simulationsprogramm TUN hat folgende Einschränkungen:

- Durch die feste Vorgabe von rechteckigen bzw. quaderförmigen Elementen sind zwei- und dreidimensionale Berechnungen auf einfache Geometrien beschränkt. Dieser Nachteil ist jedoch bei der Untersuchung von Holzbauteilen i. allg. ohne Relevanz.
- Die Darstellung von freiem Wasser, z. B. von Tauwasser, ist nicht möglich. Wasser kann von TUN immer nur als Material- oder Luftfeuchte dargestellt werden. Zur Beurteilung von freiem Wasser gibt es aber einige Möglichkeiten. Innerhalb von Materialien kann ein schneller und über die Maximalfeuchte der Sorptionsisotherme hinaus gehender Feuchteanstieg als Kondensation interpretiert werden. Bei Tauwasserausfall an Materialoberflächen kann das Problem aber zu recheninternen Wasserverlusten führen, die mit der Realität nichts

zu tun haben. Hier bietet sich die Einführung einer speziellen Materialschicht auf der Oberfläche von an Luftschichten grenzenden Materialien an. Die Eigenschaften dieser Materialschicht sollten denen von Luft ähnlich sein, aber eine Sorptionsisotherme aufweisen. Ein schneller, starker Anstieg kann dann als Oberflächenkondensation gedeutet werden. Selbst Tauwassermengen könnten so bilanziert werden.

- Luftströmungen durch Undichtigkeiten von Wänden hindurch sind derzeit nicht modellierbar. Dazu sind umfangreiche Programmanpassungen notwendig, die derzeit noch bearbeitet werden.
- Strömungs- oder topographische Verhältnisse außerhalb und innerhalb eines Gebäudes lassen sich nicht berücksichtigen. Diese Verhältnisse können nur indirekt berücksichtigt werden, indem mit angepassten Wärme- oder Stoffübergangswiderständen gerechnet wird. Hier ist es jedoch momentan schwierig instationäre Verhältnisse zu berücksichtigen, da die Übergangswiderstände fest vorgegeben werden und allenfalls zu festgelegten Zeitpunkten geändert werden können.

Für die Durchführung von Parameterstudien ist ein systematisches Vorgehen erforderlich, da einerseits die für das hygrothermische Verhalten von Wandbauteilen maßgebenden Materialparameter nicht immer bekannt sind und andererseits alle Materialparameter mehr oder weniger große Schwankungsbreiten aufweisen, die berücksichtigt werden müssen. Um den Rechenaufwand zu begrenzen und die Auswertung der Berechnungsergebnisse zu erleichtern, werden daher Parameterkombinationen nach statistischen Methoden erzeugt:

- Variation von Parametern in diskreten Stufen: Hierbei können für jeden zu variierenden Parameter 2 bis 7 Werte vorgegeben werden. Werden viele Parameter in mehreren Stufen miteinander kombiniert, entsteht eine sehr große Anzahl von Kombinationsmöglichkeiten (vollfaktoriell), die einen großen Rechenaufwand zur Folge hätten. Über eine Zufallsfunktion lässt sich diese Anzahl definiert eingrenzen. Dabei besteht aber naturgemäß kein Einfluss darauf, welche Kombinationen ausgewählt werden. Dies erschwert die systematische Auswertung der Berechnungsergebnisse, die sinnvoll nur mit statistischen Methoden erfolgen kann.
- Statistische Versuchsplanung: Eine nicht zufällige Reduktion o. g. Parameterkombinationen bzw. –stufen kann durch Methoden der statistischen Versuchsplanung erfolgen. In das Add-In integriert ist z. Z. die Taguchi – Methode für Versuchspläne mit 4 Faktoren in 3 Stufen und für 7 Faktoren in 2 Stufen. Der Vorteil von Taguchi Versuchsplänen ist eine sehr geringe Anzahl von notwendi-

gen Versuchen bzw. Rechenläufen. Wechselwirkungen zwischen den Faktoren lassen sich damit allerdings nicht bestimmen.

- Parametervariation mit Gauß-Verteilten Kennwerten: Diese Art der Parametervariation soll es ermöglichen, die häufig vorkommende Normalverteilung von Stoffkennwerten nachzustellen. Es werden für jeden zu variierenden Parameter Mittelwert und Standardabweichung vorgegeben. Daraus wird über den Zufalls-generator des Tabellenkalkulationsprogramms für jeden Parameter einer konkreten Parameterkombination ein Wert generiert. Die Anzahl der letztendlich erzeugten Kombinationen kann frei gewählt werden. Je größer diese ist, desto feiner wird der Variationsraum abgetastet. Diese Art der Parametervariation bietet sich an, wenn sehr viele Parameter variiert werden sollen und große Rechenkapazitäten zur Verfügung stehen. Dann erscheint es sogar möglich letztendlich alle Parameter in ihren Schwankungsbreiten zu variieren.

Sollen andere statistische Verfahren für Parameterstudien zum Einsatz kommen, ist es möglich, die Parameterkombinationen mit speziellen Programmen zur statistischen Versuchsplanung zu erzeugen, diese in die Tabellenkalkulation zu importieren und von dort aus die Steuerdateien zu erstellen. Beispielhaft sind dies D-optimale Versuchspläne, die eine ähnlich starke Reduktion der Anzahl erforderlicher Berechnungen ermöglichen wie die Taguchipläne, aber das Erkennen von einfachen Wechselwirkungen zwischen den variierten Parametern zulassen. Die Berechnungsergebnisse können dann zur Auswertung wieder exportiert werden.

Litertaur:

- Drewes, H., Greubel, D. 1984: Zeitgeraffte Simulation der Wetterbeanspruchung hölzerner Außenbauteile in Doppelklimakammern, Teil 1: Wetteranalysen. Holz-Zentralblatt 110, Nr. 14. S. 207-208
- Greubel, D. 1987: Berechnung des Wärme- und Feuchtetransports in Wandelementen aus Holzwerkstoffen. Holz als Roh- und Werkstoff 45. S. 145-149
- Greubel, D. 1987: Vergleich von Rechen- und Messergebnissen zum Feuchtehaushalt hölzerner Wandelemente unter instationären Klimarandbedingungen. Bauphysik 1/1987. S. 21-25
- Holm, A. H. 2001: Ermittlung der Genauigkeit von instationären hygrothermischen Bauteilberechnungen mittels eines stochastischen Konzeptes. Dissertation, Univ. Stuttgart, Fachbereich Bauingenieur- und Vermessungswesen. 196 S.
- Hussein, F. 1982: Feuchteverteilung in porösen Baustoffen Aufgrund instationärer Wasserdampfdiffusion. Dissertation, Univ. Dortmund. 58 S. + Anhang
- Leimer, H.-P. 1991: Beitrag zur Bestimmung des wärme- und feuchtetechnischen Verhaltens von Bauteilen bei der Sanierung historischer Fachwerkgebäude. Dissertation, Hochschule Weimar, Fachbereich Architektur. 138 S

2.1.3 Arbeitspaket 3: Analyse und Auswertung

2.1.3.1 Sensitivitätsanalysen und Parameterstudien

Mithilfe der am **Fraunhofer WKI** durchgeführten Sensitivitätsanalysen lassen sich die Einflüsse der Eingangsdaten auf die im Arbeitspaket 2 erhaltenden Ergebnisse der Simulationsmodelle exakt charakterisieren. Untergeordnete Einflüsse können so bestimmt werden. Nach dem Bestimmen der „wichtigen“ sensitiven Einflussgrößen, wurden mit diesen Parameterstudien durchgeführt.

In den vom **Fraunhofer WKI** durchzuführenden Parameterstudien wurden die relevanten Eingangsdaten der Modelle variiert, um so die Versagensfälle der Gebrauchstauglichkeit und deren Einfluss zu charakterisieren. Dabei wurden als Parameter nicht ausschließlich die Materialdaten und Klimarandbedingungen geändert, es wurden auch unterschiedliche Anwendungsszenarien wie z.B. Innendämmungen und WDVS betrachtet.

Die Vorgehensweise, um zu Aussagen über die Zuverlässigkeit von feucht beanspruchten Holzbauteilen zu gelangen, kann unterschiedlich sein und richtet sich nach der konkreten Problemstellung. So wird man für bewährte Konstruktionen, die seit Jahren in bestimmten Klimagebieten errichtet werden, i. allg. Berechnungen auf Basis bekannter Materialparameter für andere Klimaverhältnisse, also eine Kennwertvariation der Klimaparameter, durchführen. Hierbei handelt es sich also um Prognosen zur Änderung des Einsatzgebietes. Ähnlich verhält es sich bei Nutzungsänderungen, bei denen eventuell lediglich das Innenklima variiert werden muss. Auch bei Schadensfällen, wenn es darum geht, zu Erkenntnissen über Schadensursachen zu gelangen, bieten sich mitunter eingeschränkte Kennwertvariationen an. In der Konsequenz läuft dies aber auf Zuverlässigkeitsprognosen bei Sanierungsmaßnahmen hinaus.

Der hauptsächliche Bereich für Zuverlässigkeitsprognosen im Sinne dieser Arbeit liegt jedoch in der Beurteilung von neuen Konstruktionsweisen bzw. -materialien. Hier ist für die Prognosen ein größerer Aufwand notwendig, da gegebenenfalls Material- und Klimaparameter variiert werden müssen. Nur durch ein planvolles Vorgehen lassen sich hier mit vertretbarem Aufwand aussagekräftige Ergebnisse erzielen. Durch eine Beschränkung auf wichtige Materialparameter und/oder auf die zu erwartenden Klimaverhältnisse in den geplanten Einsatzgebieten sowie durch Methoden statistischer Versuchsplanung kann der Variationsraum eingeschränkt und systematisch untersucht werden. Auch durch eine Einschränkung der Betrachtung auf bekannte oder ermittelte Problembereiche innerhalb einer Konstruktion bzw. eines Querschnitts lässt sich der Untersuchungsaufwand verringern. So können z. B. vor der Durchführung von umfangreichen Parametervariationen einige Einzelrechnungen am zweidimensionalen Quer-

schnitt durchgeführt werden, um durch eine detaillierte Untersuchung die Problembereiche herauszufiltern, während die eigentliche Parametervariation dann eindimensional an eben diesen Problembereichen vorgenommen wird. Dadurch lässt sich der Zeitaufwand für die Berechnungen und das Auswerten der Ergebnisse erheblich verringern. Auch die anfallende Datenmenge ist dann wesentlich kleiner.

Für jede Problemstellung sollte also vor Beginn von Kennwertvariationen eine genaue Problem- und Zielanalyse durchgeführt werden. Einige Hinweise zu möglichen Fragestellungen bei der Analyse gibt die folgende Übersicht:

- Handelt es sich um eine bewährte Konstruktion oder eine Neuentwicklung, liegen Messergebnisse an der jeweiligen Konstruktion oder von Materialparametern vor?
- Sollen neben den Berechnungen auch Bewitterungssimulationen durchgeführt werden oder handelt es sich um eine sozusagen rein virtuelle Beurteilung des Bauteils?
- Sollen Einzelberechnungen oder Parametervariationen durchgeführt werden?
- Wenn Parametervariationen, was muss variiert werden: Materialparameter, Klimaparameter oder beides?
- Welche Klimaparameter sollen/müssen berücksichtigt werden?
- Welche Wärme- und Feuchteleitvorgänge müssen berücksichtigt werden?
- Welche Ansprüche an die Genauigkeit der Berechnungen bzw. der Prognosen werden gestellt?
- Können aus der Erfahrung Parameter benannt werden, die den größten Einfluss haben oder müssen Sensitivitätsanalysen durchgeführt werden?
- Müssen bestimmte Materialparameter ermittelt werden?
- Sollten ein- oder zweidimensionale Berechnungen durchgeführt werden, oder besser eine Kombination aus beiden?
- Welche statistischen Methoden sollten sinnvollerweise zum Einsatz kommen?
- Nach welchen Kriterien bzw. mit welchen Kenngrößen kann das Problem bzw. die Konstruktion am besten beurteilt werden?

Diese Fragenliste ist keineswegs vollständig und in der Reihenfolge nicht festgelegt.

Für die Beurteilung einer Konstruktion ist es notwendig, dem Problem angemessene, also geeignete und aussagekräftige Kenngrößen und Kriterien festzulegen. Die Kenngrößen und Beurteilungskriterien können von Problemstellung zu Problemstellung variieren und müssen dazu geeignet sein, Berechnungsergebnisse schnell und angemessen zu interpretieren. Die zu betrachtenden Beurteilungskriterien bzw. Kenngrößen und die anzuwendenden statistischen Methoden sollten frühzeitig festgelegt werden.

Das Hauptaugenmerk dieser Arbeit liegt auf dem Feuchteverhalten von Holzkonstruktionen. Die Feuchte hat im Holzbau einen entscheidenden Einfluss auf die Dauerhaftigkeit und Standsicherheit also die Zuverlässigkeit einer Konstruktion. Das Maß für den Feuchtegehalt ist die Holzfeuchte u (auch als Material- oder Stofffeuchte bezeichnet), die üblicherweise massebezogen in Masseprozent (M.-%) angegeben wird. Im Bereich mineralischer Baustoffe wird die Materialfeuchte meist volumenbezogen in Volumenprozent (V.-%) angegeben. In dieser Arbeit wird mit dem massebezogenen Feuchtegehalt gearbeitet.

Holz und Holzwerkstoffe verhalten sich unterschiedlich und müssen unterschiedlich beurteilt werden. Holzfeuchten über 20 M.-% gelten als problematisch, da das Schimmelwachstum möglich wird. Holzfeuchten über 30 M.-% gelten als problematisch, weil dann das Wachstum holzzerstörender Pilze möglich wird.

Holzwerkstoffe sind neben dem biologischen Abbau auch durch Formänderungen bei großen Feuchtedifferenzen innerhalb eines Materials und durch Zerstörung des Materialgefüges bei sehr hohen Auffeuchtungen gefährdet. Allerdings ist hier die Vielfalt verfügbarer Materialien so groß, dass eine pauschale Festlegung von Grenzkriterien nicht sinnvoll erscheint. Eine Unterteilung in Holzwerkstoffe aus Vollholz, Furnieren, Spänen und Fasern reicht ebenfalls nicht aus, da z. B. auch Herstellungsprozesse und Bindemittel einen wesentlichen Einfluss auf das Feuchteverhalten eines Materials haben.

Einige Hinweise zu maximalen Feuchten von Holz und Holzwerkstoffen geben DIN Normen wie DIN 4108 Teil 3 und die DIN 68800 Teil 2 oder auch die Umgebungsbedingungen der Nutzungsklassen in DIN 1052 / DIN EN 1995. Da bei der numerischen Simulation aber für jedes Element des Gitters Zustandsgrößen vorliegen, muss entschieden werden, ob Grenzwerte auf ein beliebiges Element oder ein komplettes Material oder eine Materialschicht bezogen werden sollen.

Ausgehend von den o. g. Überlegungen kommen z. B. folgende Kriterien für die Beurteilung des Feuchteverhaltens von Baukonstruktionen bzw. -materialien in Frage:

- der maximale Feuchtegehalt eines einzelnen Elementes
- gemittelter Feuchtegehalt eines Materialbereiches
- Feuchteakkumulation und Schwankungsbreite innerhalb eines Jahres bzw. innerhalb eines Betrachtungszeitraumes
- Feuchtedifferenzen zwischen Materialschichten
- Feuchteverhalten der Gesamtkonstruktion

Als Grenzwerte für Holz könnten z. B. festgelegt werden:

- der Feuchtegehalt von Holz soll $u = 30$ M.-% für ein einzelnes Element des Elementgitters nicht überschreiten,
- $u = 20$ M.-% im Mittel des Gesamtmaterials sollen für maximal 6 Monate im Jahr überschritten werden,
- tritt Feuchteakkumulation auf, soll sie bis zum Erreichen der o. g. Grenzwerte abgeschlossen sein,
- die Schwankungsbreite der Holzfeuchte innerhalb eines Jahres soll für ein einzelnes Element höchstens 10 M.-% und im Materialmittel höchstens 5 M.-% betragen.

Für die Beurteilung umfangreicher Parametervariationen ist nicht nur die Festlegung sinnvoller Grenzwerte notwendig, sondern auch die Ermittlung geeigneter statistischer Kennwerte, die eine umfassende und schnelle Beurteilung der Konstruktionen ermöglichen. Hierzu werden verschiedene Ansatz- und Vorgehensweisen untersucht.

Mit den gebräuchlichen statistischen Kennwerten Spannweite, Mittelwert, mittlere absolute und quadratische Abweichung, Standardabweichung u. a. können sowohl die Streuung automatisch variierten Parameter als auch die Streuung der Berechnungsergebnisse beurteilt werden. Häufigkeitsauszählungen und daraus generierte Histogramme geben einen guten Überblick über die Verteilung der variierten und der untersuchten Größen. Sie liefern auch Aussagen über die Anzahl von Grenzwertüberschreitungen bzw. –unterschreitungen der untersuchten Größen einer Parametervariation. Eine Analyse der Verteilungen kann Aussagen über die Eintrittswahrscheinlichkeit bestimmter Ereignisse liefern.

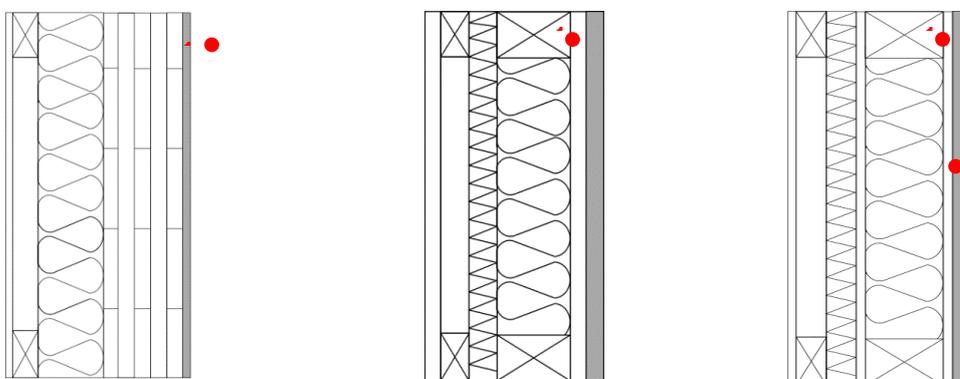
Die mittlere absolute Abweichung kann in abgewandelter Form auch zur Beschreibung der Differenzen zwischen Mess- und Berechnungsergebnissen dienen. Da hierbei die Nulleigenschaft dieser Abweichung verloren geht, kann auch eine durchschnittliche tatsächliche Abweichung gebildet werden, die dann eine Aussage zur gegenseitigen Lage von Mess- und Berechnungswerten liefert.

Die Vorgehensweise bei der Untersuchung der verschiedenen Problemstellungen war nicht starr. Vielmehr galt es, nach geeigneten Wegen zu suchen, um durch Parametervariationen zu Beurteilungen der unterschiedlichen Konstruktionen zu gelangen. Die sich im Verlauf der Arbeit entwickelnden Erkenntnisse führten dazu, dass die Bauteiluntersuchungen, von denen im Folgenden aufgrund der Fülle des Datenmaterials nur einige Ergebnisse dargestellt werden können, auf unterschiedlichen Wegen erfolgten. Einige Ergebnisse führten auch dazu, dass Anpassungen des Simulationsprogramms vorgenommen wurden.

2.1.3.2 Wandkonstruktionen

Die Unsicherheiten bei der Simulation mit prognostizierten Randbedingungen aufgrund der Streuungen in den Materialeigenschaften aber auch aufgrund der prognostizierten klimatischen Einwirkungen wurden mit Hilfe von parametrischen Analysen berücksichtigt. So lassen sich optimale Kombinationen finden. Bei einzelnen Parametern wurden Quantilwerte verwendet oder Mittelwerte mit Sicherheitsfaktoren beaufschlagt. So gibt es keine Sicherheit für die vorhergesagten Klimadaten, insbesondere über einen Zeitraum von mehr als hundert Jahren. Es gibt keine Genauigkeit bei der Definition von Materialeigenschaften und deren Abbauraten durch Alterung. Menschliche Fehler während der Erstellung eines Gebäudes sind ein weiteres unvermeidliches Problem. Numerische Simulationen haben auch Einschränkungen, was die Unsicherheit in den Ergebnissen erhöht.

In diesem Teil wurden effektive Parameter bezüglich Materialart, Montagekonfiguration und Anfangszustand der Schichten unter konstanten Randbedingungen untersucht. Da alle Wandtypen unter den Frankfurter Klimadaten ihr kritischstes hygrothermisches Verhalten zeigten, werden alle Sensitivitätsanalysen genau unter dieser Klimabedingung (100 Jahre tägliche Durchschnittstemperatur und relative Luftfeuchtigkeit von Frankfurt) durchgeführt. Es sei darauf hingewiesen, dass, da die Wandtypen zwei und drei nur einen Unterschied im Material des als Bauelement verwendeten Materials aufweisen, der Wandtyp drei in diesem Teil eliminiert wird und die Wand 3 in allen Diagrammen von nun an mit der Wandart vier in Beziehung steht. Die ursprünglich definierten Wandkonfigurationen werden als Referenzwände betrachtet und das Ergebnis der Sensitivitätsanalyse mit dem Ergebnis der Referenzwände verglichen. Die nachstehende Abbildung 13 zeigt erneut die Wandkonfiguration und die kritischen Punkte, an denen die relative Luftfeuchtigkeit in diesem Teil schwankt, wurden in den Diagrammen in den nächsten Teilen veranschaulicht.



Wandtyp 1

Wandtyp 2

Wandtyp 3

Abbildung 13: Wandkonfiguration und kritischen Punkte

Die Auswertung der Berechnungsergebnisse richtet sich nach den jeweiligen Anforderungen im konkreten Fall. So kann die Bewertung einzelner Berechnungen viel detaillierter erfolgen als die Auswertung umfangreicher Parametervariationen, die nur durch eine Reduktion der Daten und statistische Methoden in einem sinnvollen Rahmen betrachtet werden können.

Bei der Validierung von Versuchen bzw. Messungen, wird man sich bei der Auswertung zunächst auf diejenigen Elemente im Elementgitter beschränken, die den Positionen der Messstellen entsprechen. Nach erfolgter Anpassung zwischen Messungen und Berechnungen können dann andere Bereiche des Querschnitts betrachtet werden. Das Auffinden relevanter Bereiche, z. B. von Bereichen hoher Auffeuchtungen, ist einerseits eine Sache der Erfahrung des Bearbeiters. Mit den Möglichkeiten den gesamten Querschnittsbereich im Zeitablauf als animiertes Oberflächendiagramm zu betrachten, wird andererseits die Suche nach relevanten Bereichen, z. B. von Bereichen besonders hoher Auffeuchtungen, sehr erleichtert. Auch die Möglichkeit der bereichsweisen Ausgabe von Mittelwerten bietet gute Ansatzmöglichkeiten für die Auswertungen. Messergebnisse, z. B. von gravimetrischen Messstellen, geben tatsächlich nur einen Mittelwert wieder und oftmals ist nicht nur ein kleiner Bereich eines Baumaterials innerhalb eines Bauteils von Interesse, sondern das Material als Ganzes oder das hygrothermische Verhalten einzelner Schichten innerhalb eines Materials, etwa um Feuchtegradienten zu beurteilen.

Einfluss der Dämmung

Die Wirkung verschiedener Dämmungsarten wurde bei allen Wandtypen untersucht. Holzfasern, Mineralwolle, Polystyrol und Zellulosedämmungen werden berücksichtigt. Das folgende Diagramm zeigt den Bereich der relativen Feuchteänderungen an der Schnittstelle zwischen Bauelement und Außendämmung, bei allen Wandtypen und für verschiedene Dämmungsarten; die maximale Menge der relativen Feuchte in allen Wänden liegt im Zeitraum zwischen 2060 und 2090.

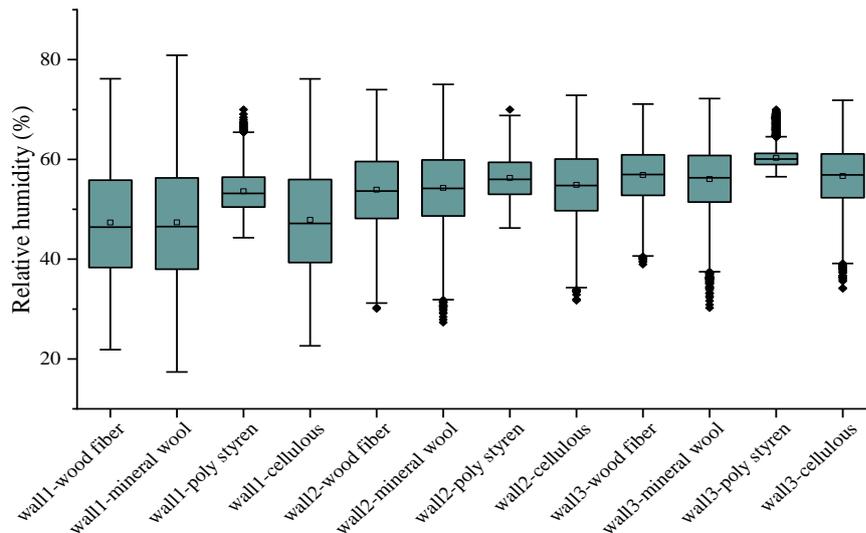


Abbildung 14: Bereich der relativen Luftfeuchtigkeit - Position 1 - Wirkung verschiedener Dämmstoffe

Die Ergebnisse deuten darauf hin:

- Mineralwollendämmung führt zu einer deutlichen Erhöhung des Bereichs der relativen Luftfeuchtigkeit an der Schnittstelle zwischen Dämmung und Holz.
- Zellulosedämmung ist vergleichbar mit Holzfaserdämmung, ohne nennenswerte Unterschiede.
- Die Berechnungen mit Polystyrol führen zwar zu einer deutlichen Reduzierung der maximalen relativen Luftfeuchtigkeit im Sommer, erhöht aber andererseits die minimale relative Luftfeuchtigkeit im Winter, so dass die Innenschichten nicht so schnell austrocknen können wie die anderen Dämmarten. Dieser Aspekt der schnellen Trocknung ist essentiell hinsichtlich einer Bewertung der Fehlertoleranz eines Bauteils. Ein schnelles Austrocknen und eine hohe Trocknungsreserve ist gleichzusetzen mit einer hohen Robustheit der Konstruktion.

Abbildung 15 veranschaulicht besser die Wirkung von Dämmstoffen auf die maximale relative Luftfeuchtigkeit von Bauteilen über die Jahrzehnte.

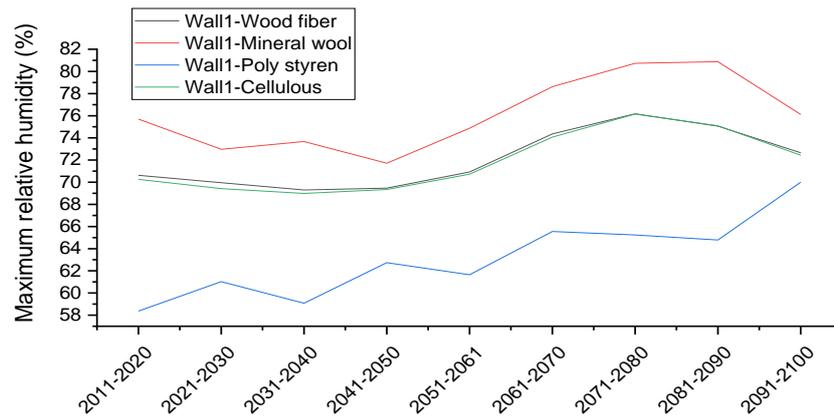


Abbildung 15: Maximale relative Luftfeuchtigkeit in jedem Jahrzehnt in der Schnittstelle -Position 1 Wandtyp 1- Wirkung verschiedener Dämmstoffe

In den in diesem Projekt durchgeführten Simulationen wurden alle Wände perfekt modelliert, ohne Leckagen oder Konstruktionsprobleme zu berücksichtigen. Aufgrund der Lücken zwischen den Dämmplatten, des anfänglich hohen Feuchtigkeitsgehalts der Baustoffe (Lagerung auf der Baustelle bei Regen oder Feuchtigkeit) und menschlicher Fehler während der Konstruktion oder des Betriebs des Gebäudes kann sich Feuchtigkeit in den inneren Schichten der Hülle ansammeln; daher wird die Trocknungsrate zu einem wichtigen Parameter zur Vermeidung von Feuchtigkeitsproblemen. Abbildung 16 zeigt das Ergebnis der Simulation für den Fall, dass ein Holzbauteil einen Anfangsfeuchtegehalt von 30% aufweist. Eine diffusionsdichte Dämmung wie beispielsweise Hartschäume (Polystyrol) verzögert den Trocknungsprozess erheblich im Vergleich zu diffusionsoffenen Dämmungen.

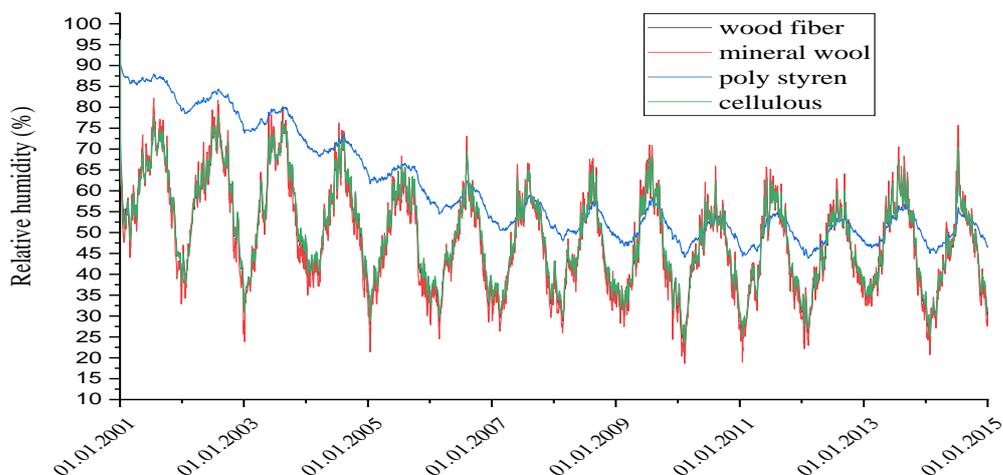


Abbildung 16: Trocknungsprozess des Bauteils mit verschiedenen Außenisierungen - Position 1 Wandtyp1

Einfluss der Holzart

Die Wirkung von Holzarten, die als Konstruktionselemente verwendet werden, wurde in diesem Teil untersucht. Fichte und Kiefer als Weichholz und Buche als Hartholz wurden berücksichtigt. Nach dem Ergebnis der Simulation in Abbildung 17 haben Bauteile aus Fichte die höchste relative Luftfeuchtigkeit auf ihrer Außenfläche. Im Holztafelbau hat die Art des Holzes für den Rahmen keinen nennenswerten Einfluss auf die hygrometrische Leistung der Gebäudehülle. In dieser Art von Wandstrukturen hat die Art des Beplankungsmaterials die entscheidende Rolle.

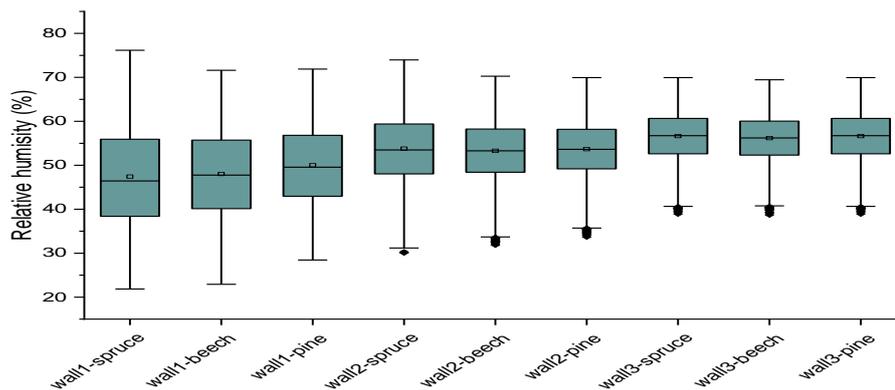


Abbildung 17: Einfluss verschiedener Holzarten auf die relative Luftfeuchtigkeit von Bauteilen - Position 1

Verschiedene Arten von Plattenwerkstoffen wie MDF, Spanplatten und OSB, die als Beplankung von vorgefertigten Holztafeln verwendet werden. Als Ergebnis der Simulationen ist die Schnittstelle zwischen der Isolationsschicht im Inneren der Tafel und der äußeren Beplankung (Position 2 Wandtyp 3) der kritische Punkt. Abbildung 18 zeigt, dass die relative Luftfeuchte an diesem kritischen Punkt tendenziell geringer wird mit zunehmendem Klimawandel.

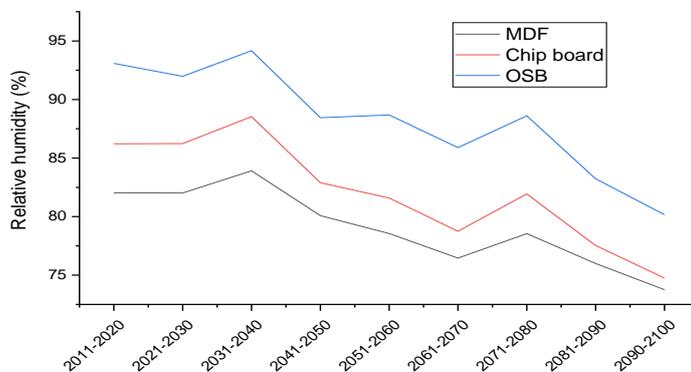


Abbildung 18: Maximale relative Luftfeuchtigkeit jedes Jahrzehnts mit unterschiedlichem Beplankungsmaterial - Position 2 Wandtyp 3

Die aktuelle Praxis, dass die Innere Beplankung diffusionsdichter sein muss als die äußere Beplankung, wird auch zukünftig zu keinen Schäden führen. In Bezug auf die Ergebnisse der Berechnungen wird auch empfohlen, zwei verschiedene Materialien für die Innen- und Außenummantelung der Paneele in der Art zu verwenden, dass das Material mit einer höheren Dampfdurchlässigkeit auf die Außenseite aufgebracht wird, um ein schnelleres Austrocknen im Sommer zu ermöglichen. Das Material mit einer niedrigeren Dampfdurchlässigkeit ist für die Innenschicht zu verwenden, um die Konstruktion dichter zu machen und den Eintritt von Wasserdampf in die Konstruktion zu vermeiden.

Theoretisch und auch in der Praxis hat die Art der Dämmung im Inneren der Paneele einen erheblichen Einfluss auf die relative Luftfeuchtigkeit nicht nur auf die innere Schnittstelle zwischen Isolierung und Ummantelung, sondern auch auf die relative Luftfeuchtigkeit der äußeren Isolierschicht. Die Differenzen zwischen Theorie und Praxis wurden jedoch bereits an diversen Stellen dieses Berichtes erwähnt. So zeigt beispielsweise die Grafik in Abbildung 20, dass Konstruktionen mit Dämmungen aus Polystyrol im Vergleich zu anderen Dämmstoffen die beste hygrothermische Leistung aufweisen. Die Praxis liefert jedoch andere Erkenntnisse, was sich in der bereits beschriebenen Fehlertoleranz widerspiegelt.

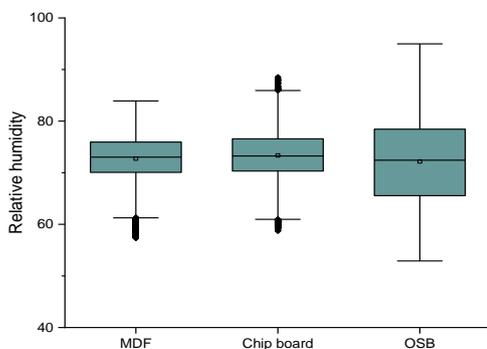


Abbildung 19: Einfluss der Art der Beplankung auf den Bereich der relativen Luftfeuchtigkeit - Position 2 Wandtyp 3

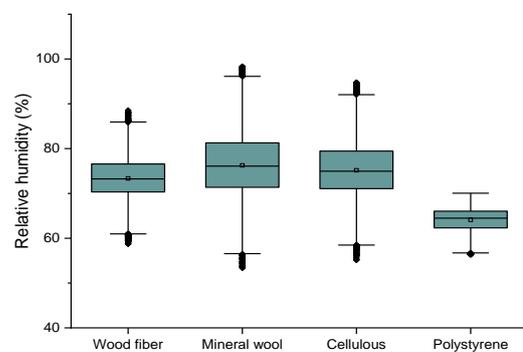


Abbildung 20: Einfluss des Dämmmaterials auf den Bereich der relativen Luftfeuchtigkeit - Position 1 Wandtyp 3

Einfluss der Belüftung / Hinterlüftung der Fassade

Die Hinterlüftung der äußeren Abschlusschichten von Außenwandbaugruppen soll den Eintritt von flüssigem Wasser durch Schlagregen in die Wand verhindern und die überschüssige Feuchtigkeit im Inneren der Hülle austrocknen. Für die hinter der Fassade verwendeten Luftschichten sind zwei wichtige Faktoren zu berücksichtigen: ihre Belüftungsrate und ihre Wasser- und/oder Dampfdurchlässigkeit des für die Fassade verwendeten Materials.

Lüftungsgröße und Hohlraumtiefe beeinflussen die Lüftungsleistung unter den Fassaden stark. Andererseits können einige Barrieren wie Bäume vor Gebäuden die Belüftungsrate von Luftschichten verringern. Studien zeigen, dass sich die Lüftungsleistung in den Luftschichten zwischen 10 und 200 1/h ändern kann. Die Ergebnisse von Abbildung 21 beziehen sich auf den Bereich der relativen Luftfeuchtigkeit in der äußeren Schicht von Strukturelementen unter Berücksichtigung der niedrigen (10 1/h) und hohen (200 1/h) Lüftungsrate in den Luftschichten hinter der Fassade. Simulationsergebnisse zeigen, dass eine hohe Lüftungsrate in der Luftschicht zu einer Erhöhung des Feuchtigkeitsgehalts in der Außenfläche von Strukturelementen führt (Position 1). An dieser Stelle sei noch einmal erwähnt, dass nur Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit als Außenklima gelten; die Luftschicht hinter der Fassade und ihre Belüftungsrate werden stärker von anderen Wettereigenschaften wie Niederschlag und Sonneneinstrahlung beeinflusst, die in dieser Studie nicht berücksichtigt wurden.

Bei Fassaden, die aufgrund ihrer hohen Dampfdurchlässigkeit aus Holzwerkstoffen hergestellt wurden, werden belüftete Luftschichten immer unter der Verkleidung betrachtet. Die Wirkung von Lärche und Sperrholz als zwei gängige Fassadenmaterialien wurde durch Simulationen bewertet. Die Ergebnisse in Abbildung 22 zeigen, dass die Verwendung von Sperrholz für die Fassade zu einem höheren Feuchtigkeitsgehalt an der Außenfläche des Bauteils führt, als die Verwendung von Lärchenholz für die Verkleidung.

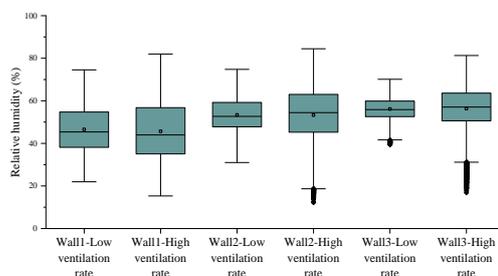


Abbildung 21: Einfluss der Lüftungsrate in der Luftschicht hinter der Fassade - Position 1

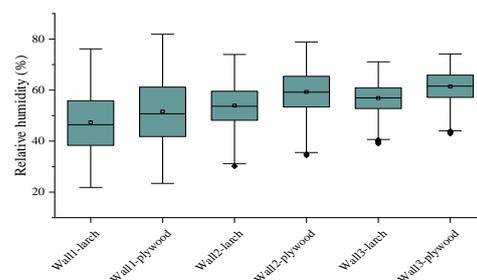


Abbildung 22: Wirkung des Fassadenmaterials - Position 1

Best and Worst cases:

Nach parametrischen Simulationen wurden eine Kombination aus worst und best cases wurden hier betrachtet, um den Bereich der relativen Luftfeuchtigkeit in verschiedenen Schichten der Wände zu vergleichen und die Schimmelpilzwachstumsrate in jedem von ihnen zu untersuchen:

	Best case:	Worst case:
Fassade	Lärche	Sperrholz
Belüftung	Low ventilation rate → 10 1/h	High ventilation rate → 200 1/h
Dämmung	Holzfaser	Mineral wool
Beplankung	Spanplatte	OSB

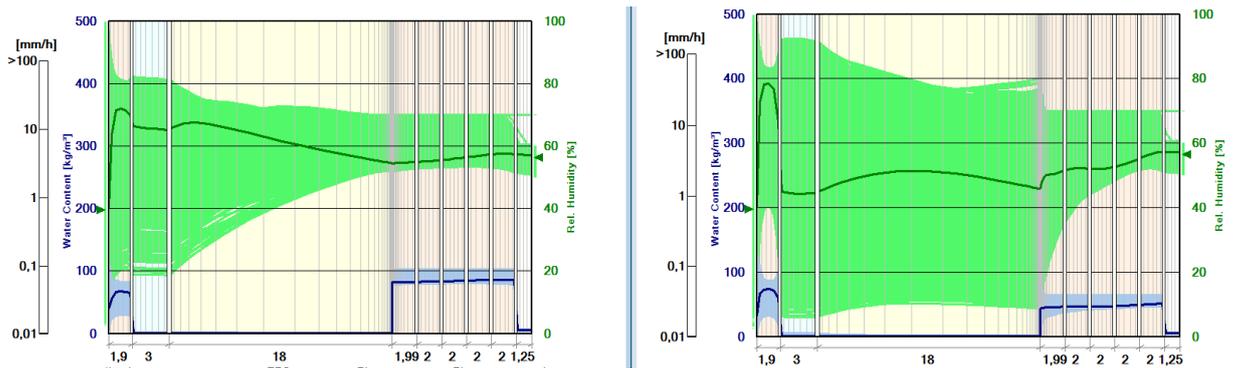


Abbildung 23: Bereich der Feuchtigkeitsgehalte und relativen Feuchteänderungen in allen Schichten - Wandtyp 1 - Best Case (links) - Worst Case (rechts)

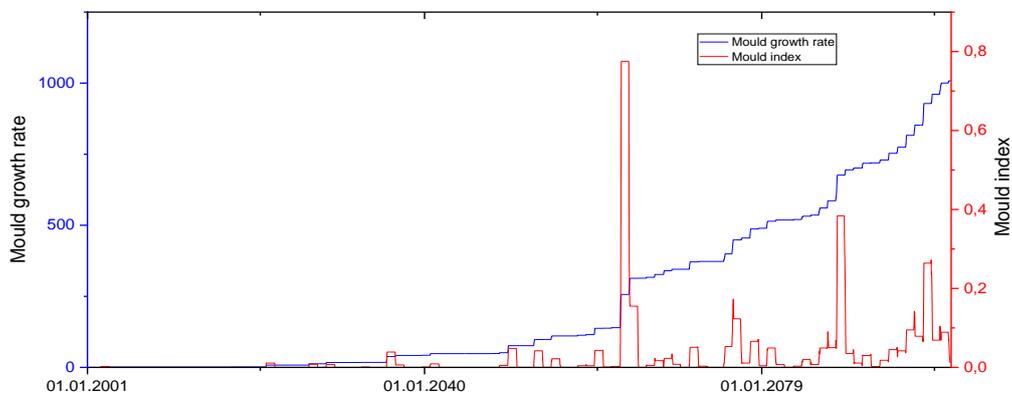


Abbildung 24: Schimmelpilzwachstumsrate und -index - Position 1 Wandtyp 1 (Schlimmster Fall)

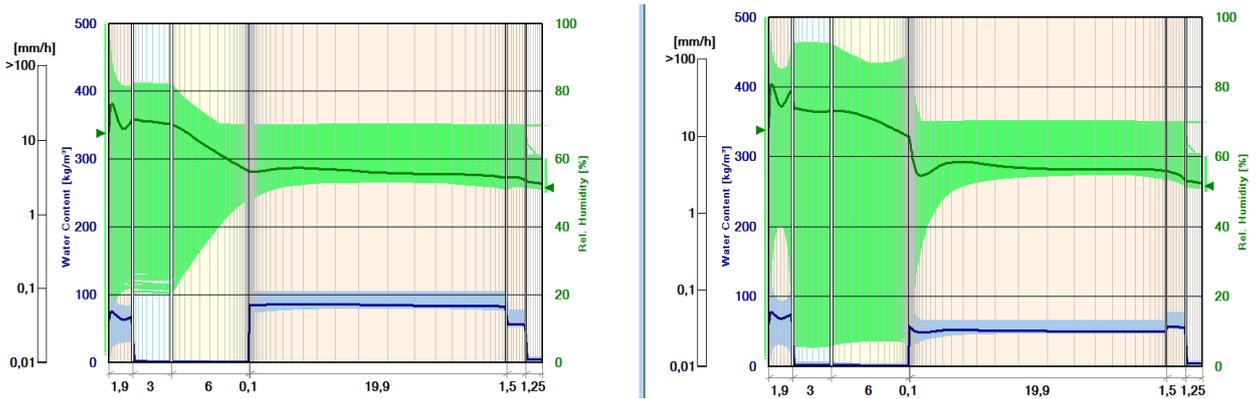


Abbildung 25: Bereich der Feuchtigkeitsgehalte und relativen Feuchteänderungen in allen Schichten - Wandtyp 2 - Best Case (links) - Worst Case (rechts)

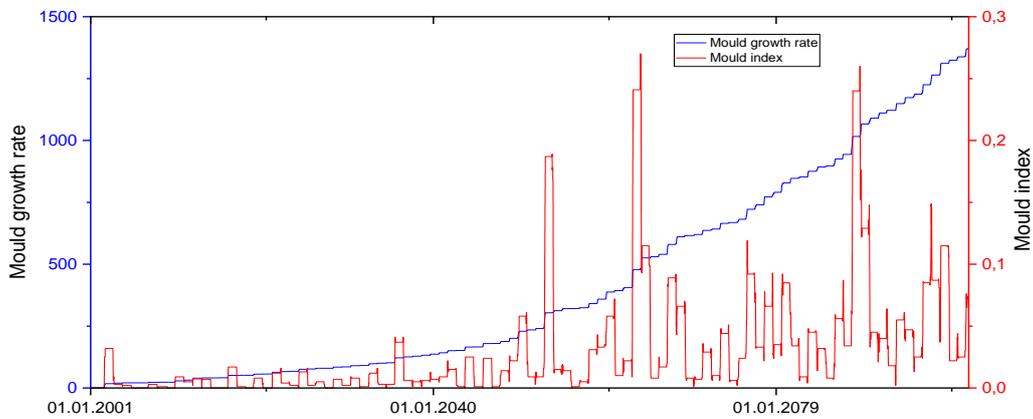


Abbildung 26: Schimmelpilzwachstumsrate und -index - Position 1 Wandtyp 2 (Schlimmster Fall)

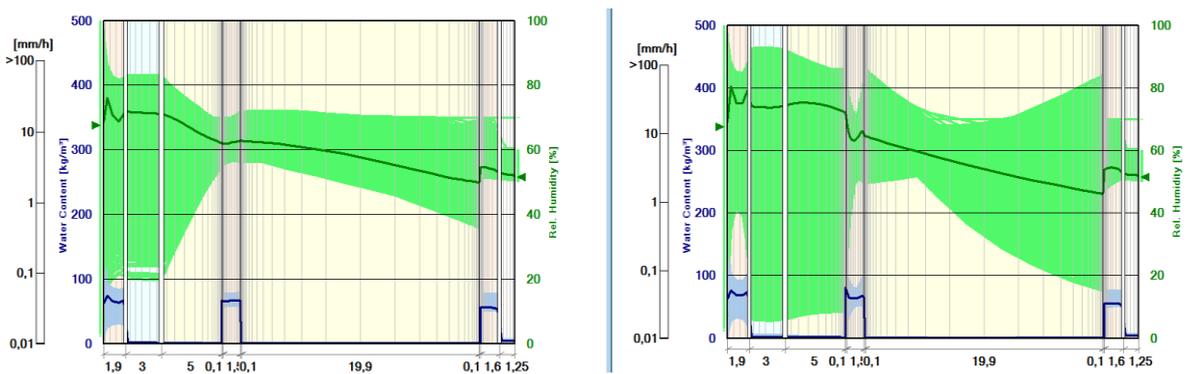


Abbildung 27: Bereich der Feuchtigkeitsgehalte und relativen Feuchteänderungen in allen Schichten - Wandtyp 3 - Best Case (links) - Worst Case (rechts)

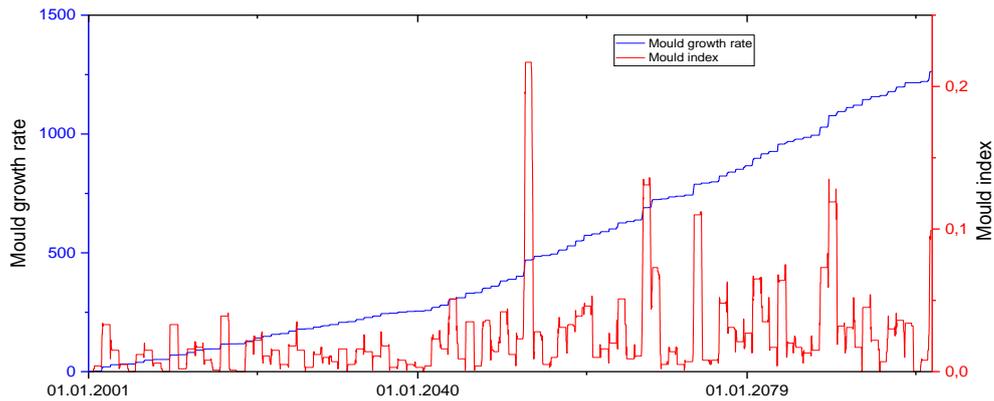


Abbildung 28: Schimmelpilzwachstumsrate und -index - Position 1 Wandtyp 3 (Schlimmster Fall)

Schlussfolgerung

- Grundsätzlich ist keinerlei Gefährdung der Holzkonstruktionen bei fachlich richtiger Ausführung zu erwarten. Eventuell anfallender Schimmel wird auch im schlimmsten Fall im marginalen Bereich bleiben.
- Eine hohe Belüftungsrate der Fassade kann den Feuchteintritt in die Konstruktion tendenziell erhöhen.
- Schichten mit hohem Dampfwiderstandsfaktor sind zu vermeiden; sie verringern die Trocknungsrate erheblich und können unplanmäßige Feuchtigkeit bei der Montage einschließen.

Tabelle 5: Faktoren der Parametervariation

innere Schicht (DB)	Innendämmung			Klebschicht	alte Wand		
	μ	λ	ρ		μ	λ	ρ
sd-Wert [m]	[-]	[W/(m*K)]	[kg/m ³]	[-]	[-]	[W/(m*K)]	[kg/m ³]
0,1	3	0,04	50	10	5	0,2	600
1			150		20	0,5	1000
10			200		100	1,0	1500
100							

In weiteren Schritten nach der Parametervariation wurden weitere Konstruktionsvarianten berechnet, wobei diesmal auch unterschiedliche Klimate berücksichtigt wurden: Das Klima, welches nach dem Glaserverfahren üblicherweise angesetzt wird (-10°C/80% LF), das sogenannte Holzkirchener Klima (Hoki) von 1991 als für Deutschland relativ extremes Klima und ein gemäßigttes Klima aus dem norddeutschen Raum (Klimastandort Braunschweig – BS). Tabelle 6 gibt einen Überblick über die Varianten.

Tabelle 6: Beschreibung der berechneten Varianten

Variante	Kleber	Innendämmung			alte Wand		DB	Klima
	Dicke	Rohdichte	λ	μ	λ	s_d		
	[mm]	[mm]	[kg/m ³]	[W/(m*K)]		[W/(m*K)]	[m]	
1	10	60	150	0,04	100	1,0	0,1	Glaser
2	4							
3	10							
4	4		Hoki					
5								BS
6	10		Hoki					
7								BS
8	4	130	0,04	30	0,8	1	Glaser	
9						0,3		
10								
11	10	20	100	2	2	1	BS	
12							Hoki	
13		80					BS	
14		20						
15								
16	80	0,1						
17		1						
17	div.					0,3	Glaser	

Ergebnisse

Abbildung 30 zeigt beispielhaft einzelne Ergebnisse der Parametervariation. Es ist jeweils die maximale Materialfeuchte des äußersten, 5 mm dicken Elementes der Holzfaserdämmung jeder Variante zum Ende der Berechnung aufgetragen. Jede Variante unterscheidet sich ausschließlich durch einen Parameter von einer anderen Variante (siehe auch Tabelle 7). Bei den Varianten 1 bis 3, 4 bis 6, 7 bis 9... und 34 bis 36 wird jeweils ausschließlich der μ -Wert der äußeren Wand ($\mu = 5, 20$ und 100) variiert. Die Varianten 1, 4, 7 und 10 unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Parameter ausschließlich im sd -Wert der inneren Schicht ($sd = 0,1, 1, 10$ und 100 m), die Varianten 1, 13 und 25 in der Wärmeleitfähigkeit der äußeren Wand. Aus dieser Abbildung lassen sich sehr deutlich nachstehend aufgeführte Tendenzen ablesen:

1. Je diffusionsdichter die äußere Wand ist, desto mehr Kondenswasser fällt an (Linie 1). Der Einfluss wird jedoch umso geringer, je diffusionsdichter die innere Schicht ist (Linie 1a).
2. Je größer die Wärmeleitfähigkeit der äußeren Wand ist, desto mehr Kondenswasser fällt an (Linie 2). Der Einfluss wird jedoch umso geringer, je diffusionsdichter die innere Schicht ist (Linie 2a).
3. Je diffusionsdichter die innere Schicht ist, desto weniger Kondenswasser fällt an (Linie 3), wobei der Unterschied zwischen 0,1m und 1 m (z.B. Variante 1 und 4) wesentlich (!) größer ist als zwischen 10 m und 100 m (z.B. Variante 8 und 11). Der Unterschied zwischen 0,1 m und 10 m ist wiederum umso größer, je höher die Wärmeleitfähigkeit der äußeren Wand ist (Linie 3a) und je niedriger (!) der sd -Wert der inneren Schicht (z.B. Vergleich der Varianten 1 und 4 bzw. 3 und 6)

In Abbildung 31 wird der Einfluss der Diffusionseigenschaften der inneren Schicht noch mal verdeutlicht, ebenso jedoch auch die Wichtigkeit, für eine ausreichend große Menge Speicherkapazität zu sorgen. Auch hier ist wiederum die Materialfeuchte des äußersten 5 mm dicken Elementes der Holzfaserdämmung aufgetragen, jedoch über den Rechenverlauf. Während bei Var 2 die Materialfeuchte auf weit über 100 % steigt, beträgt die errechnete Materialfeuchte bei Var 3 nur ca. 1/3 der von Var 2. Dieser Effekt wird nur dadurch erzielt, dass anstelle einer 4 mm dicken Speicherschicht (Klebschicht) eine 10 mm dicke bei der Berechnung angesetzt worden ist. Durch eine Erhöhung des sd -Wertes der inneren Schicht von 0,1 m auf 0,3 m (Var 2 – Var 9) wird in

etwa eine Halbierung der Materialfeuchte erreicht. Abbildung 34 zeigt den Einfluss des s_d -Wertes der inneren Schicht auf die Materialfeuchte der Dämmung, beispielhaft an Konstruktionen mit einer Dicke der Klebers von 4 mm, einer Dicke der Dämmung von 60 mm, einem μ -Wert der alten Wand von 100, einer Wärmeleitfähigkeit der alten Wand von $1,0 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ und einem variierten s_d -Wert der inneren Schicht von 0,1 m, 0,3 m, 1,0 m, 2,0 m und 5,0 m.

Abbildung 32 verdeutlicht den Einfluss des Gebäudestandortes und des vorherrschenden Klimas. Die Varianten 4 und 5 unterscheiden sich ausschließlich im zur Berechnung angesetzten Klima. Während bei Var 4 mit dem extremen Alpenvorlandklima (Holzkirchen) die errechnete Materialfeuchte an der einen betrachteten Stelle auf ca. 90 % steigt, feuchtet die Dämmung an der gleichen Stelle, jedoch bei Berücksichtigung des analogen Braunschweiger Klimas (Var 5) auf nur ca. 30 % auf. Abbildung 36 zeigt die gleichen Tendenzen in anderer Darstellungsweise.

Abbildung 35 zeigt anschaulich den Einfluss der Dicke der feuchtespeicherfähigen Schicht für zwei unterschiedlich dicke Innendämmungen. Bei relativ geringer Dicke der speicherfähigen Schicht unter ca. 10 mm steigt die Materialfeuchte der Dämmung stark überproportional an. Eine mehr als ca. 20 mm dicke Schicht hat wiederum nur untergeordnete Auswirkungen. Auf den ersten Blick wirkt es erstaunlich, dass die Materialfeuchte bei dickerer Dämmung, trotz kälterer Außenwand, geringer ist als bei dünnerer Dämmung. Dieser Effekt ist jedoch nur bei relativ dünner Dicke der feuchtespeicherfähigen Schicht zu beobachten. Zu erklären ist dieser Effekt mit der im Vergleich zu Mineralwolle hohen Speicherfähigkeit der Holzfaserdämmung. Im Vergleich zu massiven mineralischen Baustoffen ist die Feuchtespeicherfähigkeit von Holzfaserdämmstoffen jedoch relativ gering, weshalb eine geringere Dicke der speicherfähigen Schicht nicht kompensiert werden kann. Abbildung 37 zeigt gleiche Tendenzen wie zuvor beschrieben, exemplarisch für Konstruktionen mit unterschiedlichen Diffusionseigenschaften der inneren Schicht.

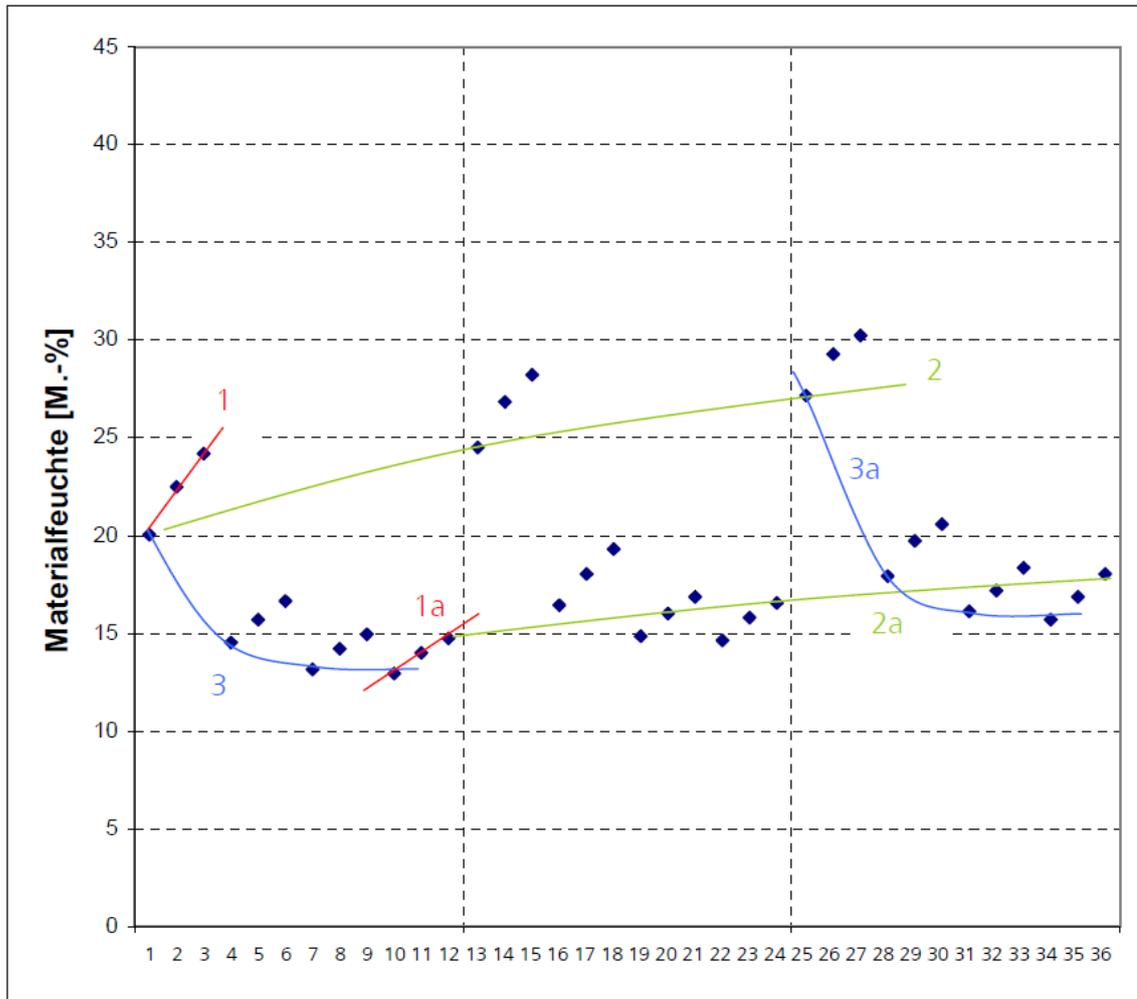


Abbildung 30: Automatische Parametervariation – grafische Darstellung der Berechnungsergebnisse der Varianten gemäß Tabelle 7

Tabelle 7: Automatische Parametervariation - exemplarische Auflistung einzelner, relevanter Varianten – die Berechnungsergebnisse dieser Varianten sind in Abbildung 30 grafisch dargestellt

Variante Nr.	alte Wand	innere Schicht	alte Wand
	μ	sd	λ
1	5	0,1	0,2
2	20	0,1	0,2
3	100	0,1	0,2
4	5	1	0,2
5	20	1	0,2
6	100	1	0,2
7	5	10	0,2
8	20	10	0,2
9	100	10	0,2
10	5	100	0,2
11	20	100	0,2
12	100	100	0,2
13	5	0,1	0,5
14	20	0,1	0,5
15	100	0,1	0,5
16	5	1	0,5
17	20	1	0,5
18	100	1	0,5
19	5	10	0,5
20	20	10	0,5
21	100	10	0,5
22	5	100	0,5
23	20	100	0,5
24	100	100	0,5
25	5	0,1	1,0
26	20	0,1	1,0
27	100	0,1	1,0
28	5	1	1,0
29	20	1	1,0
30	100	1	1,0
31	5	10	1,0
32	20	10	1,0
33	100	10	1,0
34	5	100	1,0
35	20	100	1,0
36	100	100	1,0

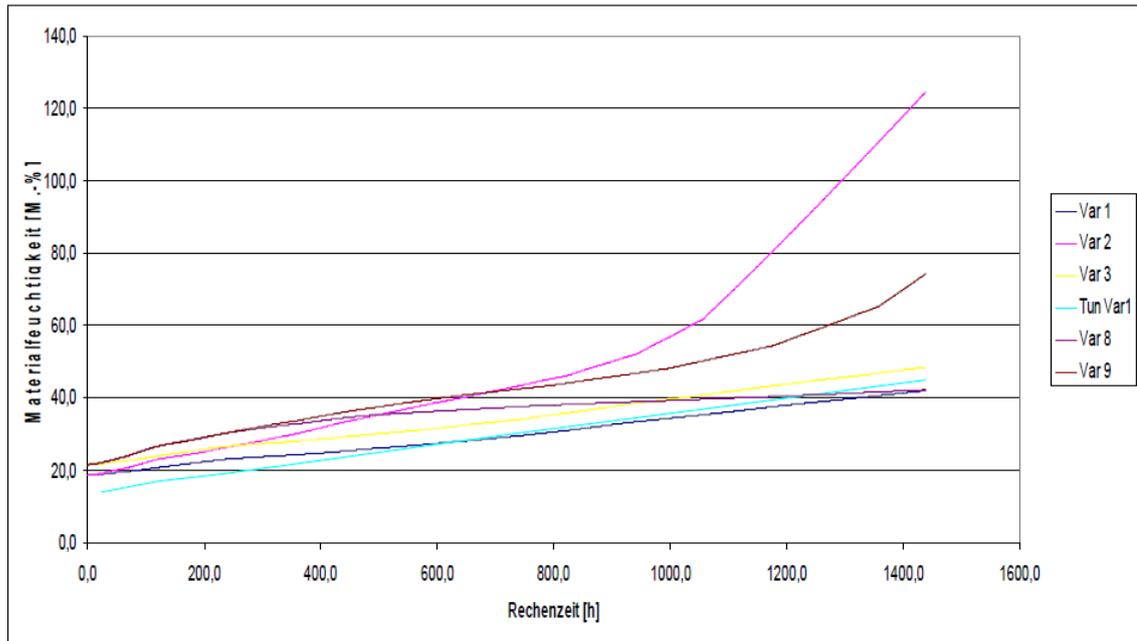


Abbildung 31: Ergebnisse der Berechnungen mit den Randbedingungen nach Glaser

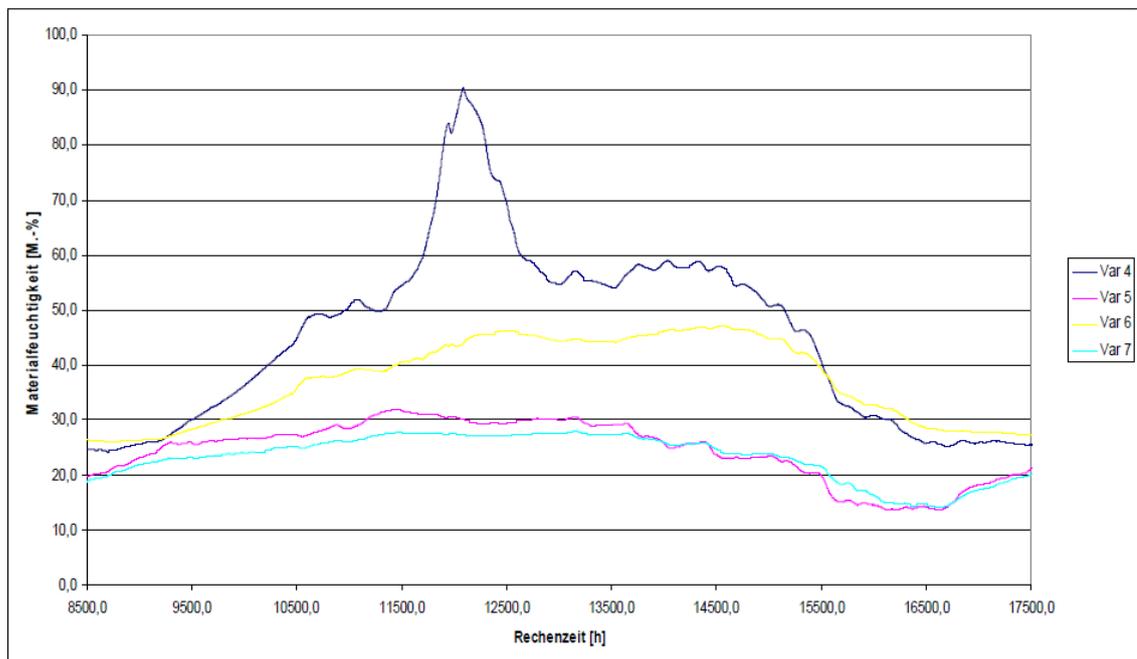


Abbildung 32: Ergebnisse der Berechnungen mit instationären klimatischen Randbedingungen

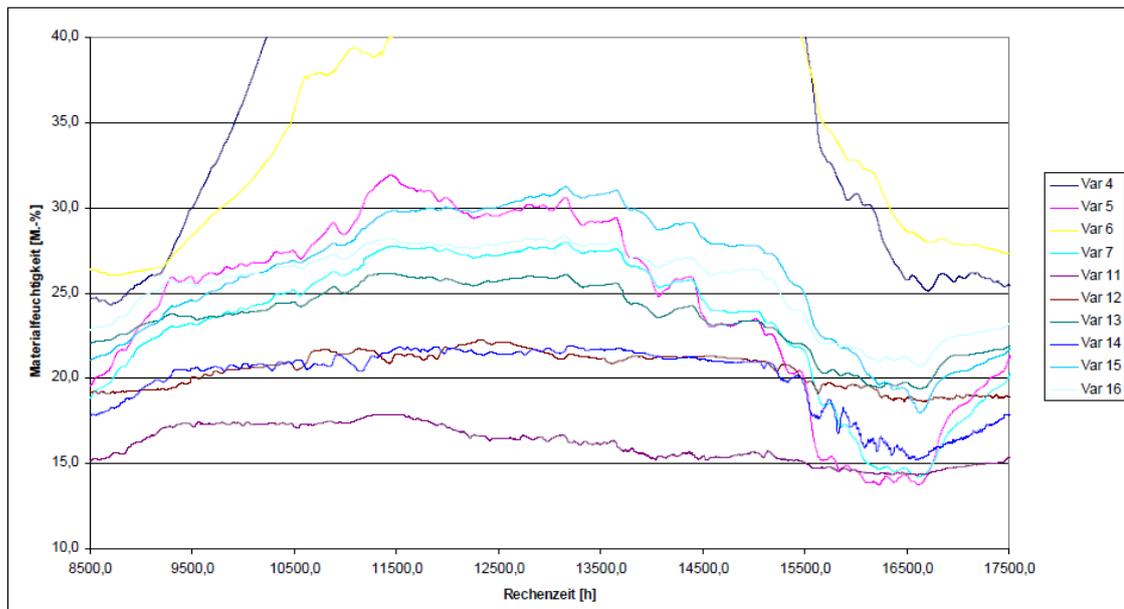


Abbildung 33: Ergebnisse der Berechnungen mit instationären klimatischen Randbedingungen mit eingeschränkter Darstellung der y-Achse

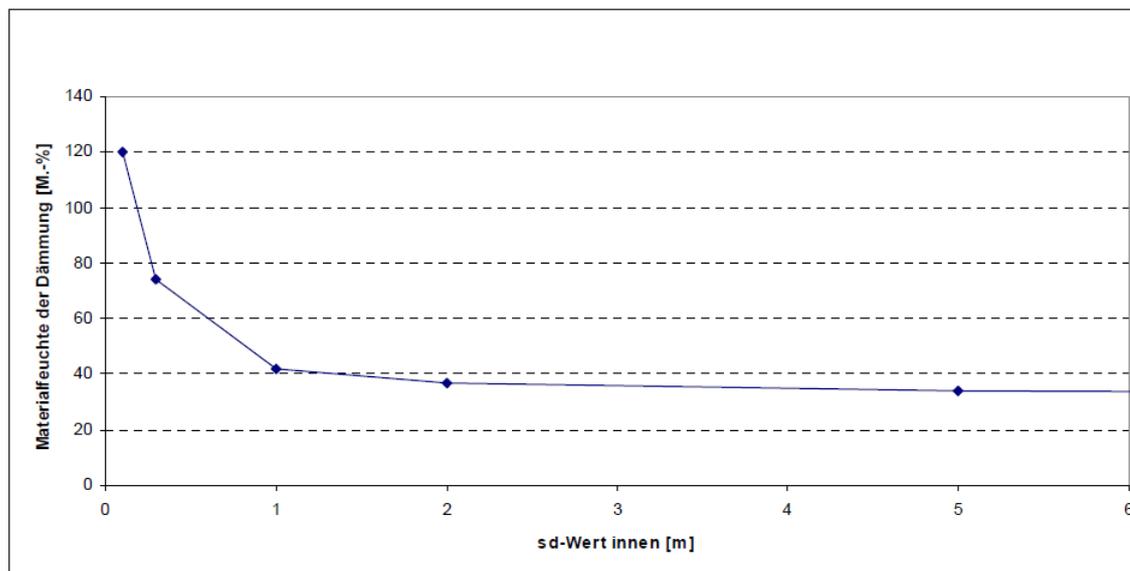


Abbildung 34: Einfluss des inneren sd-Wertes der inneren Schicht auf die Materialfeuchte der Dämmung an einem Rechenbeispiel mit den Parametern Dicke der Klebers 4 mm, Dicke der Dämmung 60 mm, mü-Wert der alten Wand 100; Wärmeleitfähigkeit der alten Wand 1,0 W/(m*K), sd-Wert der inneren Schicht 0,1 – 0,3 – 1,0 – 2,0 – 5,0 m (x-Achse)

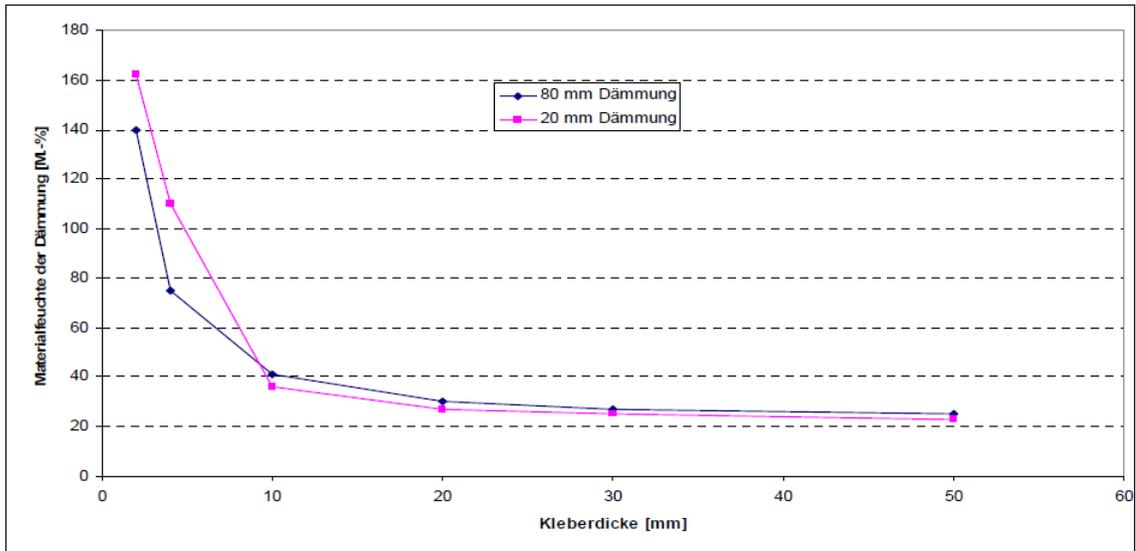


Abbildung 35: Einfluss der Kleberdicke auf die Materialfeuchte der Dämmung an zwei Rechenbeispielen mit den Parametern Dicke der Klebers 2 – 4 – 10 – 20 – 30 – 50 mm (x-Achse), Dicke der Dämmung 20 – 80 mm, mü-Wert der alten Wand 100; Wärmeleitfähigkeit der alten Wand 2,0 W/(m*K), sd-Wert der inneren Schicht 0,3 m

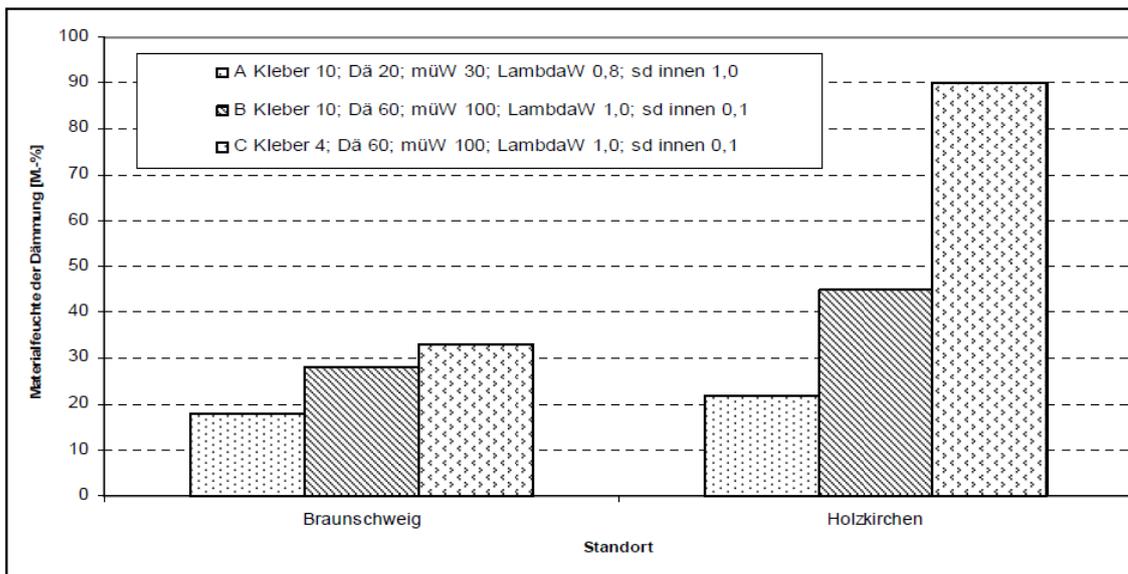


Abbildung 36: Einfluss des Standortes eines Gebäudes auf die Materialfeuchte der Dämmung an drei Rechenbeispielen mit den Parametern Dicke der Klebers 10 (A und B) – 4 (C) mm, Dicke der Dämmung 20 (A) – 60 (B und C) mm, mü-Wert der alten Wand 30 (A) – 100 (B und C), Wärmeleitfähigkeit der alten Wand 0,8 (A) – 2,0 (B und C) W/(m*K), sd-Wert der inneren Schicht 1,0 (A) – 0,1 (B und C) m

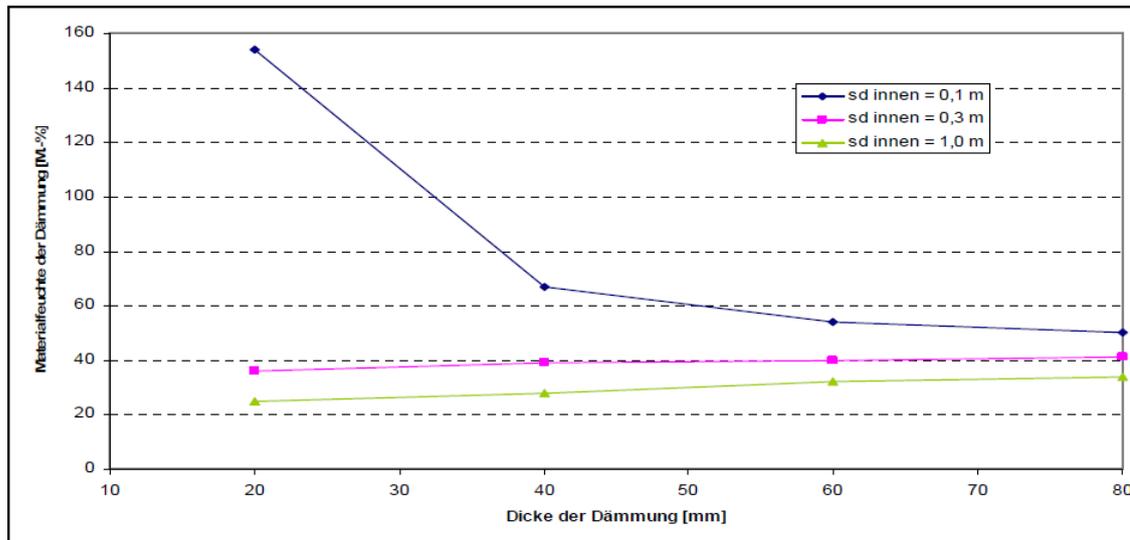


Abbildung 37: Einfluss der Dicke der Dämmung auf die Materialfeuchte der Dämmung bei Variation des inneren sd-Wertes mit den Parametern Dicke der Klebers 10 mm, Dicke der Dämmung 20 bis 80 mm (x-Achse), mü-Wert der alten Wand 100; Wärmeleitfähigkeit der alten Wand 2,0 W/(m*K), sd-Wert der inneren Schicht 0,1 - 0,3 – 1,0 m

Schlussfolgerung

Durch Innendämmungen wird die tragende Wandkonstruktion im Winter vor einem Wärmeeintrag aus dem Innenraum und im Sommer vor einer Wärmeabgabe an den Innenraum gehindert. Somit erfüllen gut geplante und ausgeführte Innendämmungen die wesentlichen Grundbedingungen für eine komfortable Raumtemperierung. Da außen liegende Wärmedämmungen (z.B. Wärmedämm-Verbundsysteme mit Holzfaserdämmung) die tragende Wand vor hohen Temperaturschwankungen schützen und bei richtiger Ausführung einen guten Wetterschutz bieten, sind diese in mitteleuropäischen Klimaten prinzipiell besser geeignet. Jedoch gibt es Situationen wie z.B. Forderungen aus dem Denkmalschutz, die eine Innendämmung erforderlich machen.

Die Ergebnisse, die bereits bei der Berechnung der neuen, aktuellen Wandkonstruktionen erzielt worden sind, sind hier, bei den Innendämmungen von alten Wandkonstruktionen, bestätigt worden. Wie bereits allgemein bekannt, haben die Art der Ausführung, der Standort der Konstruktion und damit auch das vorherrschende Klima einen maßgeblichen Einfluss auf die Funktionsfähigkeit einer Konstruktion.

Grundsätzlich kann jedoch festgehalten werden, dass ein Klimawandel in der Art, in der er prognostiziert wurde, keinen negativen Effekt auf fachlich korrekt erstellte Innendämmungen von alten Wandkonstruktionen hat. Eine Innendämmung, die nach heutigen Randbedingungen funktionsfähig ist, wird auch zukünftig funktionsfähig bleiben. Kurzzeitige Extremwetterereignisse haben keinen Einfluss auf die Innendämmung und

eine tendenzielle Klimaerwärmung wirkt sich nicht negativ auf eine Innendämmung aus.

Dadurch, dass die tragende Wand im Winter durch die Innendämmung relativ kalt wird, ist es sehr wahrscheinlich, dass Kondenswasser in der Grenzschicht von Innendämmung zur alten Wand anfällt. Eine Verhinderung einer Kondenswasserbildung ist nahezu unmöglich, da z.B. Dampfsperren erfahrungsgemäß an den Anschlüssen und Durchdringungen zu Problemen führen. Die Erkenntnisse der letzten Jahrzehnte zeigen, dass die oberste Priorität dahingehend gesetzt werden muss, eventuell anfallendes Kondenswasser zu verteilen, zu speichern und bei entsprechenden Klimabedingungen wieder abzugeben. Konstruktionen die, auch zur Raumseite hin, relativ diffusionsoffen sind und Feuchtigkeit zwischenspeichern können, weisen aufgrund des hohen Austrocknungspotentials in der Regel eine wesentlich größere Sicherheit auf, als Konstruktionen, die mit nicht speicherfähigen (Mineralwolle, Hartschäume) und gering diffusionsfähigen (Hartschäume, PE-Folien) Materialien erstellt werden. Solche Materialien haben eine größere Fehleranfälligkeit bei unplanmäßig eindringender Feuchtigkeit, da diese dann in der Regel als freies Wasser anfällt.

Grundsätzlich sind Innendämmungen bei eindringender Feuchtigkeit (z.B. aufgrund von aufsteigender Feuchtigkeit aus dem Erdreich oder schadhafter Fassaden) kritisch zu betrachten.

Weiterhin sind folgende Grundsätze zu beachten:

- Eine Dampf bremsende Wirkung der innersten, zum Raum zugewandten Ebene vermindert den Kondenswasseranfall. Bei unbekanntem Außenkonstruktionen sollte die innerste Ebene einen s_d -Wert von ca. einem bis ca. drei Meter aufweisen. Dampfdichtere Materialien führen nicht unbedingt zu sicheren Konstruktionen. Aus Abbildung 38 und Abbildung 39 geht hervor, dass die Materialfeuchte der Innendämmung an der Grenzschicht zur alten Wand bei ungünstigen Randbedingungen sehr stark ansteigen kann, wenn die innere Schicht nicht Dampf bremsend wirkt. Bei Verwendung z.B. einer Sanierungstapete mit Dampf bremsenden Eigenschaften, bleibt die Materialfeuchte selbst bei ansonsten ungünstigen Randbedingungen auf einem unkritischen Niveau (Abbildung 39).
- Die Konstruktionen werden umso sicherer, je besser anfallendes Kondenswasser durch Kapillarkräfte über die Konstruktion verteilt und gespeichert werden kann. Abbildung 40 zeigt Temperatur und Feuchtigkeit in einer Konstruktion mit Innendämmung und sehr diffusionsoffener, raumseitiger Beschichtung (Lehm-

putz), bei der jedoch die Innendämmung auf einer günstig wirkenden alten Wand aufgebracht wurde.

- Die Dämmung sollte die Fähigkeit aufweisen, so viel Wasserdampf wie möglich zwischenspeichern zu können. Dies gelingt durch die Verwendung schwerer, sorptiver Dämmungen wie z.B. Holzfaserdämmungen. Eine Holzfaserdämmung mit einer Rohdichte von z.B. 130 kg/m^3 kann ca. 10 bis 15 Liter Wasser je m^3 speichern, ohne die Eigenschaften relevant zu verändern. Bei einer Mineralfaserdämmung mit einer Rohdichte von ca. 25 kg/m^3 beträgt die speicherfähige Masse nur ca. 1 bis 1,5 Liter Wasser je m^3 .
- Die raumseitig zugewandte Oberfläche der alten Wand sollte so kapillaraktiv wie möglich sein, damit eventuell anfallendes Kondenswasser schnell und zuverlässig aus der Ebene abgeleitet und über einen größeren Querschnitt verteilt wird. Tabelle 8 gibt einen Überblick über die Kapillaraktivität unterschiedlicher Materialien. Eventuelle Tapeten, Anstriche und Grundierungen müssen sorgfältig entfernt werden.
- Unplanmäßige Hohlräume sind zu vermeiden. Es erscheint am sichersten, Dämmplatten mit einem mineralischen, möglichst wenig hydrophobierten Kleber vollflächig mit der alten Wand zu verkleben. Organische Kleber und Ortschäume sind ungeeignet.

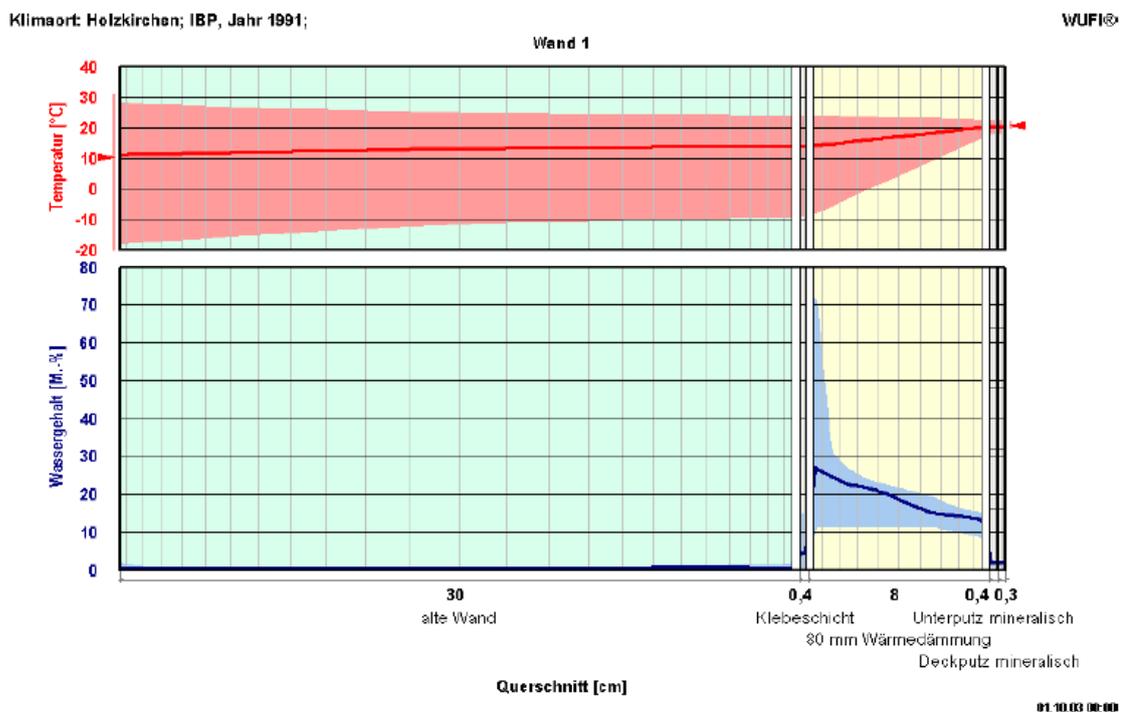


Abbildung 38: Temperatur (oben) und Materialfeuchte (unten) über den Bauteilquerschnitt bei ungünstigen Randbedingungen: alte Wand mit hoher Wärmeleitfähigkeit ($\lambda = 2,0 \text{ W}/(\text{m}^*\text{K})$), hohem μ -Wert ($\mu = 100$) und geringer Kapillaraktivität (w -Wert = $< 0,01 \text{ kg}/(\text{m}^2*\text{s}0,5)$), innere Schicht relativ diffusionsoffen ($s_d = 0,1 \text{ m}$) und relativ extremem Klima (Alpenvorland)

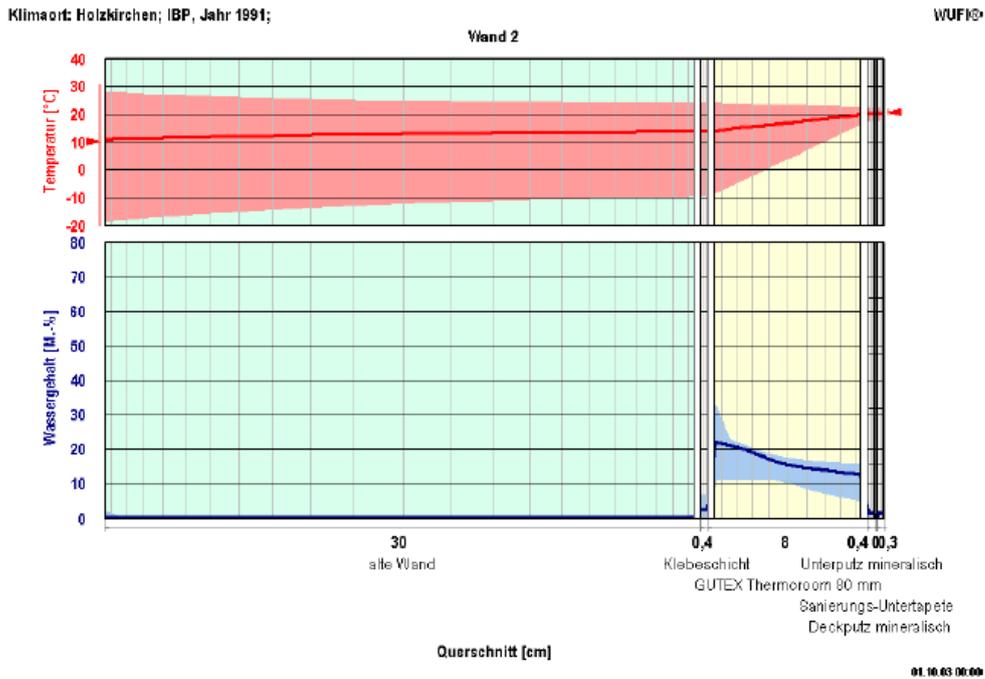


Abbildung 39: Temperatur (oben) und Materialfeuchte (unten) über den Bauteilquerschnitt bei ungünstigen Randbedingungen, jedoch mit zusätzlicher Dampfbremse auf der Innenseite: alte Wand mit hoher Wärmeleitfähigkeit ($\lambda = 2,0 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$), hohem μ -Wert ($\mu = 100$) und geringer Kapillaraktivität (w -Wert = $< 0,01 \text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s}^{0,5})$), innere Schicht Dampfbremsend ($s_d = 2,3 \text{ m}$) und relativ extremem Klima (Alpenvorland)

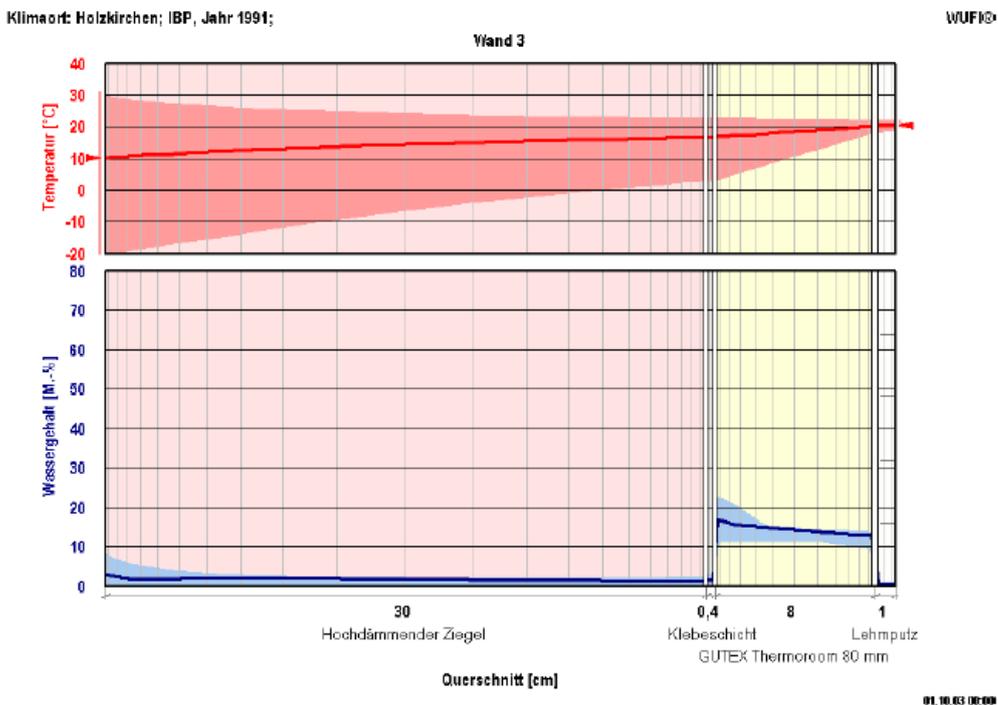


Abbildung 40: Temperatur (oben) und Materialfeuchte (unten) über den Bauteilquerschnitt mit sehr diffusionsoffener, raumseitiger Beschichtung (Lehmputz, $s_d = \text{ca. } 0,1 \text{ m}$) und relativ extremem Klima (Alpenvorland), jedoch aufgebracht auf eine günstig wirkende alte Wand mit niedriger Wärmeleitfähigkeit ($\lambda = 0,3 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$), niedrigem μ -Wert ($\mu = 30$) und hoher Kapillaraktivität (w -Wert = $> 0,1 \text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s}^{0,5})$)

Tabelle 8: Kapillaraktivität unterschiedlicher Materialien

Kapillaraktivität	Wasseraufnahmekoeffizient (w-Wert)	Flüssigtransportkoeffizient weiterverteilen Dww	Beispiele
	[kg/(m ² *s ^{0.5})]	[m ² /s]	
sehr gering	< 0,01	< 1 E-11	Kunststoffe, Kunstharzputze, stark hydrophobierte Holzwerkstoffe, sonstige stark hydrophobierte Materialien
gering bis mäßig	0,005 bis 0,1	1 E-8 bis E-12	Holz quer zur Faserrichtung, hydrophobierte Holzwerkstoffe, Außenputze, einige Natursteine
stark	0,05 bis 0,2	1 E-6 bis E-9	Holz in Längsrichtung, mineralische Putze ohne Hydrophobierung, Kalksandstein, Ziegelmauerwerk
sehr stark	> 0,1	> 1 E-7	nicht hydrophobierter Porenbeton, Ziegelmauerwerk, Lehm

Hinweise / Erklärungen:

Der Flüssigtransportkoeffizient ist in der Regel stark wassergehaltsabhängig - etwa exponentiell - und erstreckt sich bei den meisten mineralischen Baustoffen über etwa drei Zehnerpotenzen (!).

Die Einteilung hinsichtlich der Kapillaraktivität ist sehr stark subjektiv. Ein Geologe verbindet mit „stark kapillaraktiv“ andere Werte als ein Technologie aus der Kunststoffindustrie.

Der Flüssigtransportkoeffizient Weiterverteilen Dww beschreibt die Umverteilung des aufgesaugten Wassers, wenn nach Beendigung der Benetzung kein neues Wasser mehr eindringt und das vorhandene Wasser sich zu verteilen beginnt. Im Bauteil entspricht dies der Feuchtwanderung in Abwesenheit von Regen. Das Weiterverteilen wird von den kleineren Kapillaren bestimmt, da sie mit ihrer größeren Saugkraft die großen Kapillaren leer saugen (siehe auch WUFI-Hilfe).

Der Wasseraufnahmekoeffizient ist in den SI-Einheiten [kg/m²s^{0.5}] angegeben. Den häufiger gebräuchlichen Wert in der Einheit [kg/m²h^{0.5}] erhält man durch Multiplikation der oben aufgeführten Werte mit dem Faktor 60.

2.1.4 Auswerten Parameterstudie, Entwickeln von Strategien, Veröffentlichung

Aus den Ergebnissen der Parameterstudie lassen sich die Strategien ableiten, die die Sicherung der Gebrauchstauglichkeit von Holzbauwerken im Einfluss des Klimawandels gewährleisten. Dabei sind die Ergebnisse in der Art, dass die prognostizierten Änderungen des Klimas im Raum der Bundesrepublik Deutschland keinen signifikanten negativen Einfluss auf das Bauen mit Holz haben. Heute und in absehbarer Zukunft, also innerhalb der prognostizierten 100 Jahre, sind die Klimaprognosen in der Art, dass keine bauphysikalischen Schäden aufgrund des Klimawandels zu erwarten sind. Konstruktionen, die nach aktuellen Regeln der Technik erstellt werden und gebrauchstauglich sind, sind auch unter den prognostizierten klimatischen Änderungen weiterhin gebrauchstauglich. Der „CO₂-Speicher Holzgebäude“ ist als solcher nicht negativ vom prognostizierten Klimawandel betroffen. Durch die Parameterstudien ließen sich diese abgesicherten und fundierten Erkenntnisse und Aussagen über die Auswirkungen des Klimawandels auf den Holzbau treffen.

Weiterhin konnten die Ansatzpunkte für mögliche Handlungsempfehlungen und deren kritische Grenzen detektiert werden. So sind für die praktische Arbeit des planenden Ingenieurs und des ausführenden Handwerkers einzelne Aspekte zukünftig verstärkt zu beachten. Extremwetterereignisse wie Sturmböen und Starkregen sind bei Planung und Ausführung zu berücksichtigen. Sturmböen müssen in der Art und Weise der Windsogverankerung berücksichtigt werden und Starkregenereignisse in der Art und Weise der Regenwasserführung. Die entsprechenden Regelwerke sind zukünftig dahingehend anzupassen. Beides genannte ist jedoch nicht auf den Holzbau beschränkt, sondern betrifft das gesamte Bauwesen. Ein weiterer, zukünftig verstärkt zu beachtender Aspekt ist der sommerliche Wärmeschutz. Die Regelungen zum sommerlichen Wärmeschutz bedürfen einer intensiven Neuordnung. Neuordnung in dem Sinne der Hochstufung der Priorität des Themas. Nicht im Sinne der Methodik des Nachweises. Einzelne Parameter und insbesondere die klimatischen Randbedingungen sind jedoch für das gesamte Bauwesen anzupassen, nicht ausschließlich für den Holzbau.

Die durchgeführten Untersuchungen wurden auch unter dem Aspekt der Substitution von Nadelholz durch Laubholz (Fichte -> Buche) hinsichtlich der Materialfeuchte und der Relation zur Dauerhaftigkeit von Buchenholz ausgewertet. Dabei zeigte sich, dass aus bauphysikalischer Sicht bezüglich des prognostizierten Klimawandels keine Bedenken bestehen, Buche anstelle von Fichte zu verwenden. Dieses Projekt ist daher ein wichtiger Schritt in die Richtung der zukünftigen Buchennutzung. Die Aspekte der Bearbeitbarkeit (Härte, Gewicht, Zuschnitt...) und der Festigkeit wurden innerhalb dieses Vorhabens „HolzStrategie“ nicht berücksichtigt, weil sie keinen Bezug zum Klimawandel haben.

Ein Aspekt, der jedoch einer weiteren intensiven Betrachtung bedarf ist der, der holzzerstörenden Insekten. Dieser Aspekt geht zwar einher mit der Gesamtheit der Änderungen von Flora und Fauna aufgrund der klimatischen Änderungen. Holzzerstörende Insekten wie beispielsweise Hausbock und Termiten haben jedoch einen Einfluss auf das Bauwesen und hier insbesondere auf den Holzbau. Termiten sind eines der Probleme in Ländern mit klimatischen Bedingungen wie Frankreich, das die Produzenten zwingt, eine chemische Behandlung für Holzstrukturelemente anzuwenden. Die Karte in Abbildung 41 zeigt das Risiko eines Termitenbefalls in Frankreich im Jahr 2012:

Das Diagramm in Abbildung 42 zeigt einen Vergleich der tatsächlichen Durchschnittstemperatur in Frankreich und der vorhergesagten Durchschnittstemperatur in Deutschland (Frankfurt, Rostock und Garmisch-Partenkirchen). Es ist deutlich zu erkennen, dass das prognostizierte Klima für die Städte in den gemäßigten Zonen Deutschland (beispielhaft Frankfurt und Rostock) ähnlich sein wird, wie das tatsächliche Klima südfranzösischer Städte, in denen bereits heute Termiten dauerhaft vertreten sind. Die Erkenntnisse zu möglichen Folgen aus einem möglichen zukünftigen Populationsverlauf von holzzerstörenden Insekten sind aktuell noch völlig unzureichend erforscht, so dass hier weiterer Forschungsbedarf besteht.

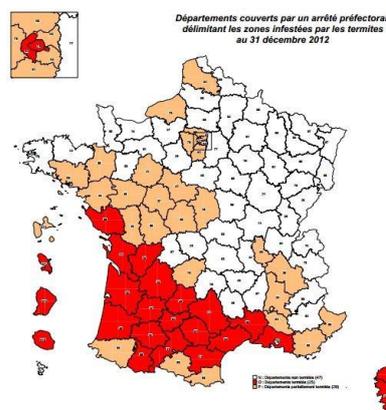


Abbildung 41: Risiko hinsichtlich eines Termitenbefalls in Frankreich im Jahr 2012

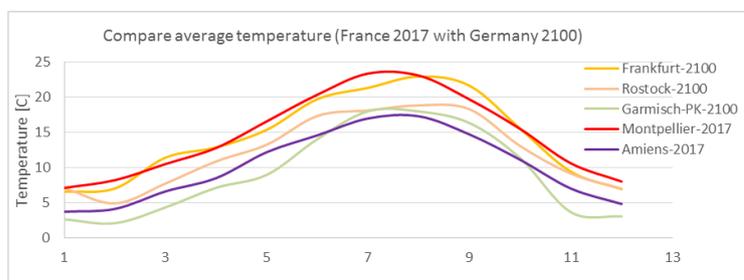


Abbildung 42: Vergleich der tatsächlichen Durchschnittstemperatur in Frankreich (Montpellier, Amiens) im Jahr 2017 und der vorhergesagten Durchschnittstemperatur in Deutschland (Frankfurt, Rostock und Garmisch-Partenkirchen) im Jahr 2100

2.2 Wichtige Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Im Projekt sind vorrangig Personalkosten in etwa gleicher Höhe angefallen, wie bei der Antragstellung eingeplant.

Materialkosten sind in nur untergeordnetem Umfang für kleinformatische Versuche angefallen. Die Projektpartner der Industrie haben die erforderlichen Materialien zur Fertigung der Proben gefertigt.

Die für das Projekt bewilligten Aufwendungen sind wie beantragt und bewilligt verwendet worden.

2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Arbeiten wurden wie geplant durchgeführt. Wie im Antrag dargestellt waren sie für die Durchführung des Projektes notwendig und angemessen.

2.4 Nutzen und Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Die Ergebnisse dieses Forschungsvorhabens haben wie geplant eine deutliche Zukunftsperspektive für das Bauen mit Holz aufgezeigt. Trotz der Sensitivität des Holzes gegenüber klimatischen Einwirkungen sind keine grundsätzlichen Schwachstellen identifiziert worden, die den Holzbau unter den prognostizierten, sich ändernden klimatischen Verhältnissen problematisch erscheinen lassen. Ganz im Gegenteil. Tendenziell trockenere und wärmere Bedingungen sind – aus bauphysikalischer Sicht betrachtet - positiv für das Bauen mit Holz. Extremwetterereignisse müssen konstruktiv berücksichtigt werden und die kurzzeitigen Folgen solcher Extremwetterereignisse wie Überschwemmungen müssen regulatorisch und städteplanerisch berücksichtigt werden. Beispielsweise bei der Ausweisung von Bauland. Dies ist jedoch unabhängig vom Holzbau.

Mit dem Forschungsvorhaben „**Development of sustainable insulation materials and building elements for the chilean market (Susi4Chile)**“ (EUREKA-Antrag; Förderkennzeichen 01DN19033A) wird das Ziel verfolgt, unterschiedliche Dämmungen aus nachwachsenden Rohstoffen, die im Bereich der Land-, Forst- oder Holzwirtschaft als Abfallprodukt anfallen, zu entwickeln. Dieses Vorhaben hat wiederum einen deutlichen Bezug zum Bauen und Klimawandel. Es werden insgesamt drei Stellschrauben bedient: Zum ersten sollen Rohstoffe, die entweder fossil gespeichertes CO₂ beinhalten

ten oder mineralisch basiert sind (Hartschäume und Mineralwolle) durch „juveniles“ CO₂ bindende und speichernde Rohstoffe substituiert werden, um der Atmosphäre dadurch CO₂ zu entziehen. Zum zweiten sollen die Gebäude energieeffizienter werden und somit weniger CO₂ bei der Nutzung emittieren. Beides bedient die Versuche, den Klimawandel zu verlangsamen. Zum dritten fließen die Erkenntnisse aus dem Vorhaben HolzStrategie ein, sodass der Wandel des Klimas berücksichtigt wird.

Ganz aktuell wurde das Vorhaben „**Pre-Study on Renewable Insulation Materials for Adaptation of Buildings to Climate Change (PRIMAdapt)**“ im Förderbereich „Klimaforschung Neuseeland“ des BMBF eingereicht (Einreichung am 17.6.2019). Das Vorhaben hat das Hauptziel, ein binationales Netzwerk von Vertretern der Forschung und Industrie aus Neuseeland und Deutschland aufzubauen, um in beiden Ländern Forschungsmaßnahmen zur Anpassung von Gebäuden an den Klimawandel durchzuführen.

Weiterhin konnten die in diesem Projekt gewonnenen Ergebnisse bei der Angebotserstellung zur Ausschreibung des BBSR „**Analyse bestehender bautechnischer Normen und Regelwerke für einen Anpassungsbedarf an die Folgen des Klimawandels**“ Vorhaben im Forschungsprogramm Zukunft Bau zum Aktenzeichen: 10.08.17.7-19.02 (Deadline Einreichung 4.7.2019) genutzt werden.

Wie sich die prognostizierten klimatischen Änderungen auf die Population von Holzzerstörenden Insekten wie Termiten und Hausbock auswirken, ist aktuell noch nicht erforscht und bedarf einer intensiven Betrachtung.

2.5 Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Die globale Erwärmung ist eine der gewissen klimatischen Vorhersagen, die durch mehrere wissenschaftliche Beweise bestätigt wurde. Beobachtungen aus globalen und regionalen Klimavorhersagemodellen zeigen ähnliche Übergänge bis zum Ende des 21. Jahrhunderts in Deutschland, wie z.B. Temperaturanstieg, feuchtere Winter, mehr Hitzewellen und stärkere Regenfälle[1]. Diese Klimaveränderungen können zu Herausforderungen für die Bauwirtschaft führen; daher sind die Untersuchung ihrer Folgen und die Suche nach Systemen, die sich diesen Auswirkungen anpassen und/oder widerstehen können, wichtige Themen. Die durchgeführten Untersuchungen bestätigen ausschließlich die Annahmen innerhalb des Vorhabens „HolzStrategie“.

Die von H. Viitanen et al.[2-4] entwickelte europäische Karte der Gefährdung durch Holzerstörung zeigt die Haltbarkeit und Lebensdauer von Holzprodukten gemäß den aktuellen klimatischen Bedingungen in Europa an. In Forschungen des finnischen Forschungszentrums (VTT) wurde ein mathematisch-empirisches Modell erstellt, das die Möglichkeit des Schimmelpilzwachstums in verschiedenen Baumaterialien in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchtigkeit, der Temperatur und der Dauer der Exposition des Produkts gegenüber diesen Umgebungssituationen vorhersagen kann [5]; das vom Fraunhofer-IBP (Institut für Bauphysik) in Zusammenarbeit mit VTT entwickelte Schimmelpild-Index-Programm wurde in dieser Forschung zur Beurteilung der Schimmelpilzwachstums-Wahrscheinlichkeit in verschiedenen Teilen von Baugruppen verwendet. Die Modelle zur Prognostizierung des Schimmelpilzwachstums sind bereits vor dem Vorhaben „HolzStrategie“ erarbeitet worden. Die Ergebnisse in [3] bestätigen ausschließlich die in diesem Vorhaben „HolzStrategie“ getroffenen Annahmen.

Die aktuellen Vorschriften in Europa zum Wärmeschutz von Gebäuden beschränken sich eher auf die hohe Energieeffizienz der Gebäude. Forschungen von M. Lacasse et al. [6, 7] und vielen anderen Autoren deuten darauf hin, dass eine hohe thermische Beständigkeit der Gebäudehülle oder besser gesagt, die Verwendung einer dickeren Dämmstoffschicht in Konstruktionen, die Menge des Wärmeflusses verringert und im Falle eines Feuchtigkeitseintritts in die Hülle die Rate der Austrocknung geringer wird. Daher steigt gemäß Lacasse et al. das Risiko von Kondensation und Schimmelbildung bei dieser Art von Konstruktionen und kritische Parameter sollten genauer untersucht werden. Einer der wichtigsten effektiven Parameter sind die Randbedingungen, die in dieser Studie berücksichtigt werden. Der Einfluss zukünftiger Klimaänderungen in Deutschland galt als äußere Randbedingung für einige Holzbauhüllen, um ihr hyg-

rothermisches Verhalten während ihrer Nutzungsdauer zu untersuchen. Die durchgeführten Arbeiten von Lacasse et al. sind somit im Gleichklang mit den Arbeiten des Vorhabens „HolzStrategie“.

Die innerhalb dieses Vorhabens „HolzStrategie“ verwendeten Modelle zur Vorhersage des hygrothermischen Verhaltens von Holzkonstruktionen waren in guter Übereinstimmung mit den Daten der experimentellen Tests, die in verschiedenen Artikeln wiederum bestätigt wurden [8, 9], daher wurde diese Software mit ihrem Mould-Index-Add-on verwendet, um das Risiko von Schimmelpilzwachstum bei Wandkonstruktionen zu bewerten, wenn sie verschiedenen klimatischen Bedingungen ausgesetzt waren.

- [1] Kaspar F, Mächel H, Jacob D and Kottmeier C 2017 Beobachtung von Klima und Klimawandel in Mitteleuropa und Deutschland Klimawandel *Deutschland Springer Spektrum (Berlin: Heidelberg)* pp 17–26
- [2] Viitanen H, Vinha J, Salminen K, Ojanen T, Peuhkuri R, Paajanen L and Lähdesmäki K 2010 Moisture and bio-deterioration risk of building materials and structures *Journal of Building Physics* **33(3)** 201-224
- [3] Viitanen H, Krus M, Ojanen T, Eitner V and Zirkelbach D 2015 Mold risk classification based on comparative evaluation of two established growth models. *Energy Procedia* **78** 1425-1430
- [4] Viitanen H, Toratti T, Makkonen L, Peuhkuri R, Ojanen T, Ruokolainen L and Räisänen J 2010 Towards modeling of decay risk of wooden materials *European Journal of Wood and Wood Products* **68(3)** 303-313
- [5] Hukka A and Viitanen H A 1999 A mathematical model of mold growth on wooden material *Wood Science and Technology* **33 (6)** pp. 475–485
- [6] Saber H H, Lacasse M A, Moore T V and Nicholls M 2014 Mid-rise wood constructions: investigation of water penetration through cladding and deficiencies *Report to Research Consortium for wood and wood-hybrid mid-rise buildings*
- [7] Lacasse M A, Saber H H, Maref W, Ganapathy G, Plescia S and Parekh A 2016 Field evaluation of thermal and moisture response of highly insulated wood-frame walls *Client Report (National Research Council Canada. Construction)*
- [8] Mundt-Petersen S O and Harderup L E 2013 Validation of a one-dimensional transient heat and moisture calculation tool under real conditions. In Proceedings of the Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings *XII-International Conference Florida USA*.
- [9] Zirkelbach D, Mehra S R, Sedlbauer K P, Künzl H M and Stöckl B A 2017 hygrothermal green roof model to simulate moisture and energy performance of building components *Energy and Buildings* **145** p.79-91

2.6 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

Erfolgte Veröffentlichungen:

- Rüter, N.: Sommerlicher Wärmeschutz. Forum Holzbau Urban Köln, 11. Europäischer Kongress (EBH 2018) 16./17. Oktober 2018 Tagungsband, ISBN 978-3-906226-21-7, S.81-92
- Shaghayegh Ameri, Norbert Rüter: „Hygrothermal risk analysis of recently constructed timber buildings exposed to outdoor climate changes by the end of the century in Germany.“ Central Europe towards Sustainable Building 2019, CESB19 conference, 2. bis 4. Juli 2019 Prague
- Shaghayegh Ameri, Norbert Rüter: „Assessment of the critical parameters on hygro-thermal performance of timber structures’ envelope.“ iSBE Forum of Young Researchers in Sustainable Building 2019, 1. Juli 2019 Prague.
- Rüter, N.: Impulsstatements zum „End of Life von NawaRo-Dämmstoffen“ 5. Akteursforum NawaRo-Dämmstoffe am 06.06.2019 „End of Life von NawaRo-Dämmstoffen in Theorie und Praxis – Rückbau, Recycling und Wiederverwendung“
- Auf der Homepage des Fraunhofer WKI sind die Ergebnisse des Projektes in Kurzform veröffentlicht:
<https://www.wki.fraunhofer.de/de/fachbereiche/zeluba/profil/forschungsprojekte/holzbau-im-einfluss-des-klimawandels.html>
- Das Fraunhofer WKI nutzt und verwertet die Ergebnisse bereits aktiv in Sinne des Verwertungsplans (siehe 2.4).

Geplante Veröffentlichungen:

Das HDI kommuniziert und diskutiert die Ergebnisse mit dem ausführenden Gewerbe im laufenden Tagesgeschäft, unter anderem über die Informationsplattform, „INFORMATIONSDIENST HOLZ“.

Das Fraunhofer WKI und das HDI erarbeiten geeignete Medien zur Information und Aufklärung über die Zusammenhänge (Pressemitteilungen, Vorträge, Workshops)

Anhang: Erklärung des Zuwendungsempfängers

Die in dem vorliegenden Schlussbericht enthaltenen Erläuterungen wurden wahrheitsgemäß und nach bestem Wissen und Gewissen abgegeben.

Zuwendungsempfänger

Fraunhofer-Institut für Holzforschung, Wilhelm-
Klauditz-Institut WKI

Bienroder Weg 54 E

38108 Braunschweig

Braunschweig, im Juli 2019

Holzbau Deutschland Institut e.V. (HDI)
Kronenstraße 55 – 58

10117 Berlin

Berlin, im Juli 2019
