



## **IGF-Forschungsvorhaben CORNET 271 EN**

**ThermNat**

**Bauteile mit Dämmmaterial aus nachwachsenden Rohstoffen: Fokus (Hygro-)Thermik**

**Durchgeführt von:**

**Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Standort Holzkirchen (IBP)  
Holzforschung Austria (HFA)**

**Applicant / AiF-Forschungsvereinigung:**

**Holztechnologie / Trägerverein Institut für Holztechnologie Dresden e.V., Dresden,  
Germany (TIHD)**

**Authors / Autoren**

**Dr. Daniel Zirkelbach, Johannes Tieben, Eri Tanaka, Nis Andresen, Dr. Notburga  
Pfabigan, Dr. Julia Bachinger, Dr. Bernd Nusser**

**Holzkirchen / Wien 30.06.2023**

# Inhalt

<b>Ausgangssituation und Zielstellung</b>	<b>3</b>
<b>1 Wärmedämmeigenschaften von Naturfaserdämmstoffen</b>	<b>4</b>
1.1 Laboruntersuchungen	4
1.2 Freilanduntersuchungen	6
1.3 Erstellung von Datensätzen für die hygrothermische Simulation	8
<b>2 Dauerhaftigkeit von Naturfaserdämmstoffen</b>	<b>9</b>
2.1 Laboruntersuchungen	10
2.2 Ableitung von Grenzkurven	13
2.3 Instationäres Prognosemodell	14
<b>3 Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>16</b>
3.1 Wärmedämmeigenschaften	16
3.1 Dauerhaftigkeit	18
<b>Danksagung</b>	<b>20</b>

## Ausgangssituation und Zielstellung

Aus Gründen des Klimaschutzes und der Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen rückt im Bau-sektor neben dem Energiebedarf im Betrieb auch der Primärenergiebedarf der Bauprodukte in den Fokus. Hier haben Materialien aus nachwachsenden Rohstoffen zahlreiche Vorteile und sollten daher vermehrt eingesetzt werden.

Im Wettbewerb mit konventionellen Dämmstoffen sehen sich die Hersteller von Naturfaserdämmstoffen, bei denen es sich häufig um KMU mit begrenzten finanziellen Mitteln handelt, vor allem mit der Problematik der teilweise ungerechtfertigten Feuchtezuschläge auf den Dämmwert ihrer Materialien sowie mit Bedenken bezüglich der größerer Feuchteempfindlichkeit konfrontiert.

Diesen beiden Themenbereichen wurden daher im Rahmen des Projekts ThermNat detailliert behandelt mit folgenden Zielstellungen:

### Wärmedämmeigenschaften von Naturfaserdämmstoffen

- Die feuchteabhängige Wärmeleitfähigkeit soll so realitätsnah wie möglich ohne überzogene Aufschläge (aktuell bis zu 20 %) ermittelt und für die thermische und hygrothermische Bemessung herangezogen werden. Dazu ist eine Aufteilung des Wärmetransports in Leitung durch das trockene Material, Erhöhung der Wärmeleitung durch Feuchte im Dämmstoff sowie Latentwärmetransporte durch Wasserdampfdiffusion mit Phasenwechsel (Verdunstungskühlung, Kondensationswärme) erforderlich.
- Auf Basis dieser Aufteilung kann ermittelt werden welche Anteile in der Einbausituation in welchem Umfang auftreten und wie diese durch geeignete Zuschläge abgedeckt werden können. Die effektiven Leitfähigkeitswerte werden durch Abgleich mit Freilandversuchen überprüft und validiert.

### Dauerhaftigkeit von Naturfaserdämmstoffen

- Auf Basis von Labor- und Freilandversuchen sollten neue Grenzkurven entwickelt werden, die zur Bewertung unterschiedlich empfindlicher Naturfaserdämmstoffe bei der Planung von Bauteilen herangezogen werden können. Die bisher üblichen einfachen und nur feuchtebezogenen Grenzwerte sind für eine hygrothermische Bemessung zu grob und führen in der Praxis häufig zu Irritationen.
- Dafür sollte ein instationäres Prognosemodell entwickelt werden, mit dem die Bildung von holzerstörenden Pilzen sowie ein eventuell einsetzender Abbau des Materials zeitabhängig vorhergesagt werden kann.

# Forschungs-Ergebnisse

## 1 Wärmedämmeigenschaften von Naturfaserdämmstoffen

Es ist weitgehend bekannt, dass Feuchte in Dämmstoffen deren Wärmeleitfähigkeit erhöht. Bei diffusionsdichten Dämmstoffen wie EPS ist ein erheblicher Wassergehalt von ca. 10 Vol.-% erforderlich, um die Wärmeleitfähigkeit um  $0,01 \text{ W/(mK)}$  bzw. bei einer Ausgangswärmeleitfähigkeit von  $0,04 \text{ W/(mK)}$  um 25 % zu erhöhen. Bei faserbasierten Stoffen kann eine viel geringere Wassermenge den Wärmefluss durch die Dämmschicht im Vergleich zum trockenen Zustand temporär und kurzfristig deutlich erhöhen. Diese Erhöhung des Wärmetransports resultiert aus dem sog. Latentwärmetransport, bei dem Feuchte auf der warmen Seite verdunstet, dort Wärme entzieht (Verdunstungskühlung), durch Dampfdiffusion auf die kalte Seite wandert und dort wieder kondensiert und dadurch Wärme zuführt (Kondensationswärme).

Anders als beispielsweise Mineralwolle oder EPS können Naturfaserdämmungen Feuchte an den Innenoberflächen ihrer Porenstrukturen speichern. Das bedeutet, dass Naturfaserdämmungen normalerweise nie trocken sind, sondern je nach Umgebungsluftfeuchte eine sogenannte Gleichgewichtsfeuchte aufweisen. Daher erhalten diese Materialien normalerweise feuchtebedingte Zuschläge auf die Wärmeleitfähigkeit, um sowohl der erhöhten Wärmeleitfähigkeit als auch dem latenten Wärmetransport Rechnung zu tragen.

Im Rahmen des aktuellen Forschungsprojektes wurde ein Laborverfahren für hygroskopische Dämmstoffe identifiziert und validiert, das sowohl eine bessere Differenzierung zwischen Wärmeleitfähigkeits- und Latentwärmeanteil am gemessenen Wärmestrom ermöglicht als auch das energetische Verhalten der Materialien realistisch abbildet. Auf dieser Basis werden auch Vorschläge für Zuschläge auf Wärmeleitfähigkeit für thermische und hygrothermische Berechnungen unterbreitet.

### 1.1 Laboruntersuchungen

Ziel der Labormessungen ist es, entweder ein Prüfszenario zu identifizieren, das direkt für die praktische Anwendung verwendbare und realistische Wärmeleitfähigkeitswerte liefert oder das in Kombination mit hygrothermischen Simulationen indirekt die messtechnische Grundlage für solche Werte zur Verfügung stellt.

Die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit für den Wärmeschutz im Gebäude erfolgt nach DIN EN 12664 bzw. ISO 10051 für die Messung von feuchten Proben. Grundsätzlich handelt es sich bei der Plattengerätmessung um ein direktes statisches Messverfahren, bei dem ein Temperaturgradient zwischen Warm- und Kaltseite aufgebracht wird. Dieser Gradient wird konstant gehalten bis alle Aufwärm- bzw. Speichervorgänge abgeschlossen sind und sich ein konstanter Wärmestrom einstellt. Die Berechnung der Wärmeleitfähigkeit erfolgt dann aus dem gemessenen Wärmestrom in Beharrung und der dabei gemessenen Temperaturdifferenz und wird auf die Dicke des Probekörpers bezogen. Solange der Probekörper trocken

oder diffusionsdicht ist, stellt sich je nach Probekörper innerhalb von 4 h bis 24 h der Beharrungszustand ein und die Messung kann ausgewertet werden.

Bei feuchten Proben kommt es aber wie oben beschrieben zu verschiedenen Feuchtetransportvorgängen in der Probe, die das thermische Verhalten u.U. deutlich beeinflussen. Verfahren nach ISO 10051 sieht vor, dass die Messung entweder am Anfang ausgewertet wird, bevor die Transportvorgänge für die Feuchte beginnen (Phase A in Abbildung 1) oder nachdem der Transport vollständig abgeschlossen ist und sich ein stabiler Zustand einstellt (Phase C).

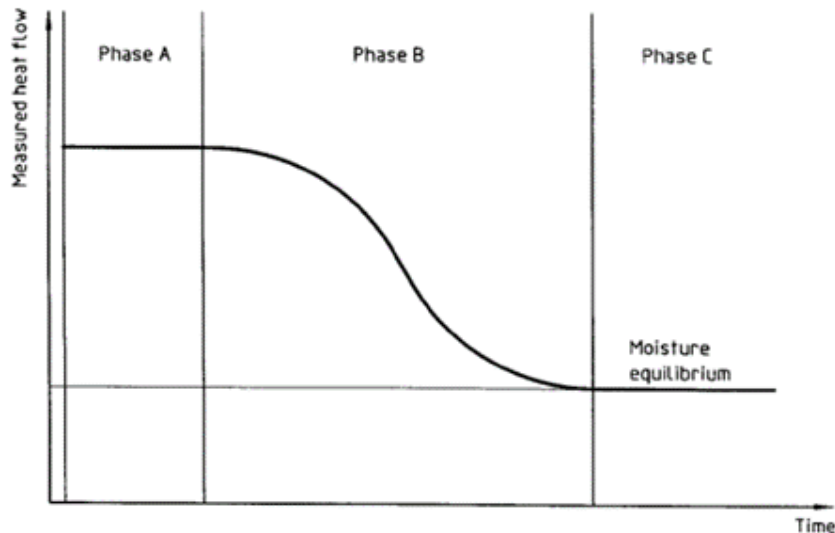


Abbildung 1: Phasenverlauf während der Wärmeleitfähigkeitsmessung

Die Messung der feuchten Wärmeleitfähigkeit muss zum Erreichen des Beharrungszustands über einen sehr langen Zeitraum durchgeführt werden. Die Messdauer erhöht sich von üblicherweise maximal 24 h auf mehrere Tage bis Wochen. Zu Beginn der Messung ist die gemessene Wärmeleitfähigkeit deutlich erhöht, am Ende sinkt der Wert aber bei dem hier geprüften Holzfaserdämmmaterial, vorkonditioniert bei 70 bzw. 80 % r.F. so weit ab, dass er weniger als 3 % bzw.  $1 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$  über dem Trockenwert liegt. Somit wäre ein Zuschlag von 5 % nach DIN 4108, mindestens aber  $2 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$  auf den Nennwert angemessen.

Ein Auftrennen und separates Messen in mehreren Einzelschichten nach ISO 10051 liefert für die hier geprüften Dämmstoffproben keine sinnvollen Ergebnisse. Auch nach 12 Tagen findet im Beharrungszustand offensichtlich noch eine Feuchteumverteilung ohne Änderung der Feuchteprofile in der Probe statt und dieser sogenannte Heat-Pipe-Effekt erschwert eine sinnvolle Auswertung. Sowohl die Endergebnisse für die mittlere Wärmeleitfähigkeit über alle Einzelschichten als auch die Messung an einem Probekörper in Nenndicke (ohne Auftrennung) ergeben nahezu die gleichen Werte. Aufgrund des zwar angestrebten aber nicht tatsächlich erzielten Mehrwerts kann der Aufwand für das Aufteilen der Proben vermieden und direkt an der ganzen Platte gemessen werden.

Zunächst wurde die im Rahmen dieses Projekts durchgeführten Labormessung einer Holzfaserdämmplatte, die aus fünf dünnen Platten zusammengesetzt war, nachberechnet. Die ursprüngliche Idee, durch die Nachberechnung der Messung die durch den Wassergehalt

bedingte Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit mit ihrer lokalen Verteilung zu ermitteln, war nicht mit der erhofften Genauigkeit möglich. Dies liegt zum einen an den für diese Zielstellung zu großen Messunsicherheiten und der Inhomogenität des Materials (die dadurch bedingten Abweichungen können größer ausfallen als die zu identifizierenden Zielgrößen) und zum anderen an der nicht genau genug abbildbaren Feuchtverteilung in der Simulation insbesondere im Zustand des Heat-Pipe-Effekts, die eine nochmals deutlich aufwändigere Ermittlung der feuchtetechnischen Kennwerte erfordern würde.

Durch die Nachberechnung der Wärmeleitfähigkeitsmessung der gesamten Platte konnten im Vergleich zur geschichteten und feuchtetechnisch abgetrennten Platte folgende Erkenntnisse erzielt werden:

Die Simulation mit und ohne Latentwärme ergab, dass deren Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeitsmessung vernachlässigbar gering bleibt, wenn die Messung nach EN 12677 ohne Tauwasserbildung an der Kaltseite und unter Einhaltung des Abbruchkriteriums durchgeführt wird. Die Beschreibung der feuchteabhängigen Wärmeleitfähigkeit kann bis 95 % r.F. direkt aus dem vorgeschlagenen Laborversuch abgeleitet werden. Der restliche Verlauf bis zur maximalen Sättigung wird dann vereinfacht über einen exponentiellen Anstieg bis auf die Wärmeleitfähigkeit von Wasser von 0,6 W/mK berücksichtigt. Die Validierung dieses Ansatzes anhand von vier verschiedenen Naturfaserdämmstoffen zeigt, dass auf diese Weise eine nur leicht auf der sicheren Seite liegende Simulation des Versuchs möglich ist.

## **1.2 Freilanduntersuchungen**

Zur Validierung der effektiven Wärmeleitfähigkeiten dienten Messwerte aus einem am Forschungshaus (Abbildung 2) der Holzforschung Austria in Stetten (Österreich) durchgeführten Freilandversuch. Dabei wurden Temperatur- und Feuchteverhältnisse und die sich dabei einstellenden Wärmeströme in verschiedenen Wandkonstruktionen mit unterschiedlichen Feuchtegehalten über den Zeitraum von einem Jahr ermittelt. Es wurden Naturfaser-Gefachdämmungen mit hinterlüfteter Fassade sowie Varianten mit außenseitigem EPS- und mit Holzfaser-WDVS mit Nord- und Südorientierung untersucht. Weiterhin wurde besonders hohen Feuchten ausgesetzte WDVS-System auf baufeuchtem Mauerwerk auf der Westseite betrachtet.

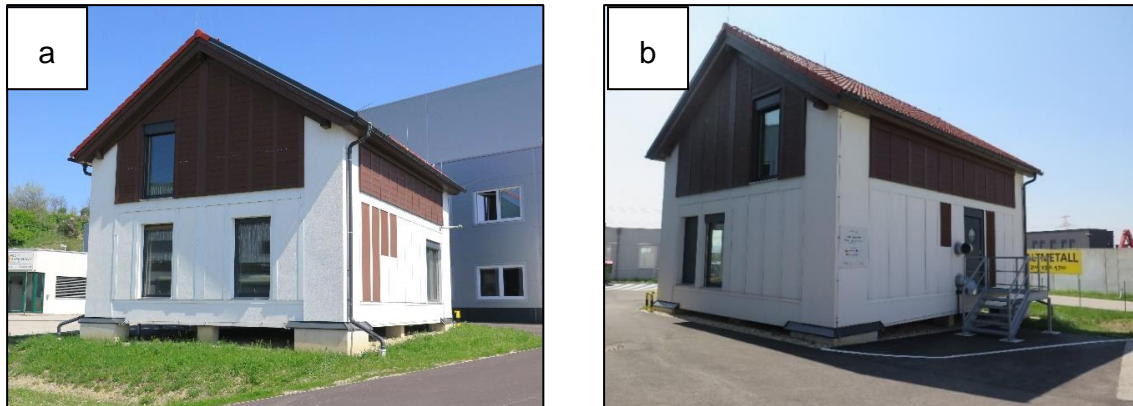


Abbildung 2: Forschungshaus der Holzforschung Austria in AT-2100 Stetten. a) Süd-West Ansicht.  
b) Nord-Ost Ansicht.

Die Ziele der Freilanduntersuchungen lassen sich wie folgt zusammenfassen: 1. Erhebung von Messdaten an einem Gebäude im Realmaßstab zum qualitativen Vergleich der betrachteten Varianten untereinander im Hinblick auf die hygrothermische Performance (Wärmeleitfähigkeit, Dauerhaftigkeit). 2. Abgleich der Ergebnisse aus den Laboruntersuchungen zur Wärmeleitfähigkeit mit den empirisch gemessenen Daten aus der Freilanduntersuchung. 3. Erste praktische Anwendung des entwickelten Holzfäuleprognosemodells auf empirische Messdaten.

Die hygrothermische Nachsimulation der Messungen zeigte für die Fälle, bei denen die hygrothermischen Daten hinreichend genau bekannt waren, jeweils eine gute Übereinstimmung mit den gemessenen Wärmeströmen. Insgesamt konnte gezeigt werden, dass der feuchtegehaltsbedingte Anstieg der Wärmeleitfähigkeit bei den im Einbauzustand überwiegend auftretenden relativen Feuchten bis etwa 95 % r.F. nur gering ausfällt. Erst bei höheren Feuchten oder Kondensatbildung wird der Einfluss v.a. durch Latentwärmeeffekte deutlich größer.

In Tabelle 1 sind die Abweichungen zwischen Messung und Erwartungswerten gegenübergestellt. In den meisten Fällen mit Ausnahme der Strohvarianten liegen die gemessenen Wärmedurchlasskoeffizienten ( $\Lambda_{\text{dyn, Messung}}$ ) über den auf Basis des Wärmeleitfähigkeitsnennwerts errechneten Wärmedurchlasskoeffizienten ( $\Lambda_{\text{dyn, Nennwert}}$ ). Dabei betragen die relativen Abweichungen für die Gefachdämmstoffe etwa 4 % bis 20 %. Die überproportional hohe Abweichung bei den Zellulosevarianten wird v.a. auf die bei den gemessenen Varianten deutlich zu hohe Einblasdichte zurückgeführt. Betrachtet man die übrigen Fälle, so deuten die Abweichungen darauf hin, dass ein Zuschlag von 5 % auf den Nennwert für Holzfaserdämmstoffen nach DIN 4108-4 im Jahresmittel vermutlich nicht überzogen ist. Die vorliegenden Ergebnisse deuten sogar darauf hin, dass für die rein thermische Bemessung ggf. auch ein Zuschlag zwischen 5 und 10 % bei Naturfaserdämmstoffen gerechtfertigt sein könnte. Ein pauschaler Feuchtezuschlag auf pflanzliche Faserdämmstoffe von 20 %, wie er in der ÖNORM B 6015-2 angesetzt wird, ist hingegen deutlich zu hoch angesetzt.

Tabelle 1: Zusammenfassende Gegenüberstellung der aus den Wärmestrommessungen im Zeitraum zwischen dem 11.01.2022 und dem 01.02.2022 hervorgehenden, durchschnittlichen Wärmedurchlasskoeffizienten  $\Lambda$  der verschiedenen Varianten im Vergleich zu dessen auf Basis der in den technischen Produktdatenblättern hinterlegten Nennwerte berechneten Erwartungswerte.

Variante		Messung $\Lambda$ ( $\Lambda_{\text{dyn, Messung}}$ )	Erwartungswert $\Lambda$ ( $\Lambda_{\text{dyn, Nennwert - Basis } \lambda_D}$ ) (Herstellerangabe)	Abweichung
Gefachdämmung	WDVS			
Mineralwolle	EPS	0,101	0,098	+ 3,0 %
Mineralwolle	WF	0,110	0,101	+ 8,2 %
Holzfaser	EPS	0,118	0,109	+ 7,6 %
Holzfaser	WF	0,123	0,112	+ 8,9 %
Zellulose	EPS	0,129	0,107	+ 17,1 %
Zellulose	WF	0,139	0,110	+ 20,9 %
Schafwolle	EPS	0,124	0,111	+ 10,5 %
Schafwolle	WF	0,119	0,114	+ 4,2 %
Stroh	EPS	0,129	0,138	- 7,0 %
Stroh	WF	0,136	0,143	- 5,2 %

### 1.3 Erstellung von Datensätzen für die hygrothermische Simulation.

Abbildung 3 zeigt exemplarisch die Beschreibung der feuchteabhängigen Wärmeleitfähigkeit anhand einer Holzfaserdämmplatte gemäß dem im Rahmen des Projekts erarbeiteten Ansatz. Links sind in der ersten Spalte die jeweiligen Wassergehalte und in der zweiten die zugehörige Wärmeleitfähigkeit beim jeweiligen Wassergehalt aufgelistet. Startwert ganz oben ist der Trockenwert, dann folgt der auf Basis der Messung ermittelte Wert bei 80 % r.F. Daraus kann der Steigungskoeffizient der Wärmeleitfähigkeit pro 1 kg/m<sup>3</sup> Zunahme des Wassergehalts in (W/mK)/(kg/m<sup>3</sup>) und daraus wiederum der Wert bei 95 % r.F. ermittelt werden. Die Wärmeleitfähigkeit-Werte oberhalb 95 % r.F. werden bis zum maximalen Wassergehalt (1000 kg/m<sup>3</sup> x Porosität [-]) einer Exponentialkurve für die feuchtegehaltsbedingte Wärmeleitfähigkeitszunahme ergänzt, die beim Wert von Wasser bei 0,6 W/mK endet. In der Regel ist noch eine Anpassung für den Übergang der beiden Kurvenbereiche erforderlich – dazu kann der Wert bei 50 kg/m<sup>3</sup> als Startpunkt der Standardkurve linear interpoliert werden zwischen dem Wert bei 95 % r.F. (im Beispiel 19,55 kg/m<sup>3</sup>) und dem Wert bei 100 kg/m<sup>3</sup>.



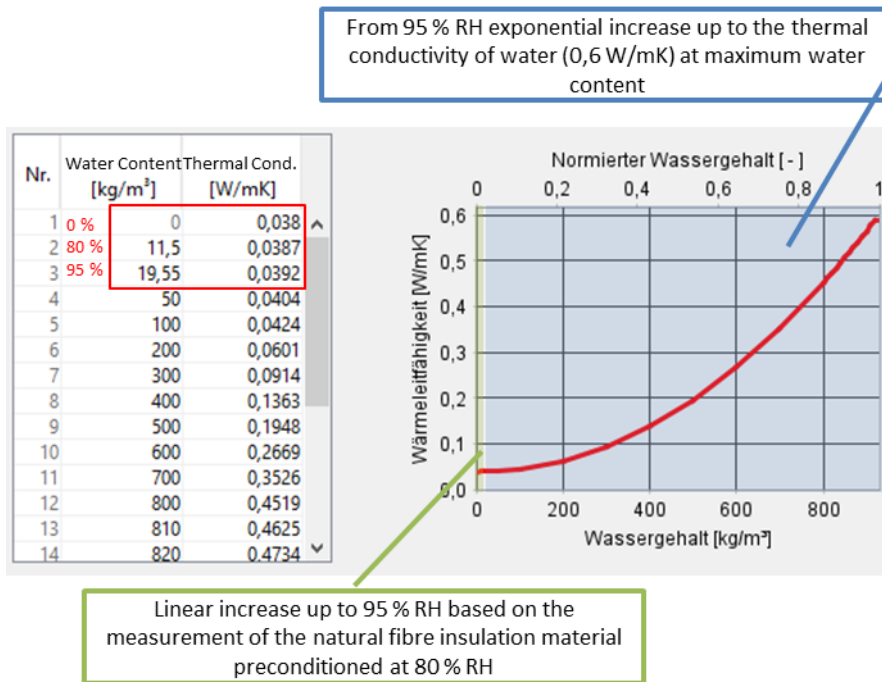


Abbildung 3: Beschreibung der feuchteabhängigen Wärmeleitfähigkeit in WUFI®. Links ist die tabellarische Eingabe und rechts ist deren graphische Darstellung.

## 2 Dauerhaftigkeit von Naturfaserdämmstoffen

Holz- und Naturfaserdämmungen sind biologische Materialien, die bei „günstigen“ Temperatur- und Feuchtebedingungen einem natürlichen Abbau unterliegen. Daher ist es wichtig, solche Materialien nur hygrothermischen Bedingungen auszusetzen, die Wachstum von und Materialabbau durch Fäulnispilze verhindern. Ein allgemeiner, aber sehr konservativer Grenzwert für die Massivholzfeuchte beträgt 20 M.-%. Dieser Grenzwert enthält allerdings eine hohe Sicherheit, da Fäulnis erst bei Feuchtegehalten oberhalb der Fasersättigung von etwa 27 bis 30 M.-% auftritt. Außerdem laufen biologische Prozesse wie der Abbau nur dann mit einer relevanten Geschwindigkeit ab, wenn auch die Temperaturen auf einem für das Pilzwachstum günstigen Niveau liegen. Das WTA-Merkblatt 6-8 zur Bewertung von Holzkonstruktionen hat daher ein neues Kriterium für Massivholz aufgestellt, das nicht vom Wassergehalt in M.-% abhängt, sondern von der relativen Luftfeuchte in den Poren des Baustoffs (Abbildung 4). Die relative Porenluftfeuchte im Holz ist ein geeignetes Maß dafür, wie „leicht“ die Feuchte für die Pilze im Material verfügbar bzw. entnehmbar ist. Diese, immer noch vorsichtige Grenzwertkurve steigt temperaturabhängig von 86 % rel. Luftfeuchte bei 30 °C bis auf 95 % r.F. bei 0 °C.

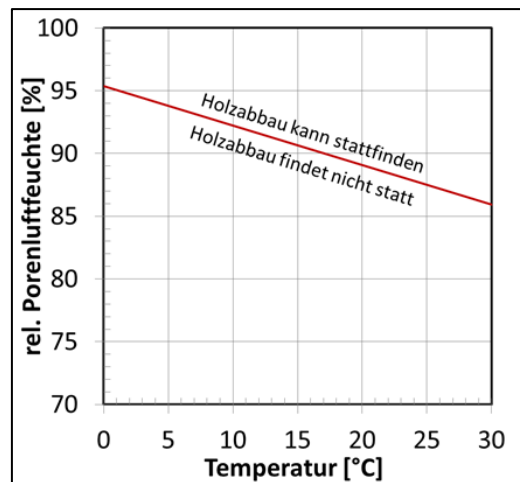


Abbildung 4: Grenzcurve der rel. Porenluftfeuchte bezogen auf die Temperatur einer 10 mm dicken Holzschicht, die im Tagesmittel nicht überschritten werden darf.

Aber auch diese Grenzwerte sind stationär und können daher bei kurzfristigen Feuchtespitzen, die die Grenzwerte überschreiten, bereits zum formalen Versagen eines Bauteils führen. In der Praxis führen diese kurzzeitigen Überschreitungen normalerweise jedoch nicht zu Problemen, wenn die Feuchte anschließend schnell genug wieder austrocknen kann. Aus diesem Grund entwickelt das Fraunhofer-IBP derzeit im Rahmen eines anderen Projekts ein instationäres Holzfäulemodell, das die Lücke zwischen den temperaturabhängigen Langzeitgrenzwerten aus WTA und dem realen Verhalten soweit wie möglich schließen soll. Im aktuellen Forschungsprojekt stand deshalb unter anderem die Entwicklung eines instationären Bewertungsmodells für Faserdämmstoffe im Fokus, welches die abweichenden Spezifikationen dieser Werkstoffe im Vergleich zu Massivholz berücksichtigt und eine belastbare Bewertungsgrundlage für Hersteller und Planer bieten soll.

## 2.1 Laboruntersuchungen

In Versuchsreihen im Labor wurden verschiedene Holzfaserwerkstoffe und Massivholz mit verschiedenen Holzfäulepilzen beimpft und bei unterschiedlichen Kombinationen aus relativer Feuchte und Temperatur in der Klimakammer inkubiert.

Untersucht wurden folgende Materialien (84 Probekörper je Material):

- Faserdämmplatte, Nassverfahren, 160 kg/m<sup>3</sup> [A in Abbildung 5]
- Faserdämmplatte, Trockenverfahren mit Hydrophobierung, 110 kg/m<sup>3</sup> [B]
- Faserdämmplatte, Trockenverfahren ohne Hydrophobierung, 150 kg/m<sup>3</sup> [C]
- Zellulosefaser, 50 kg/m<sup>3</sup> [D]
- Kiefernspiltholz, Referenz (*Pinus sylvestris*) [E]

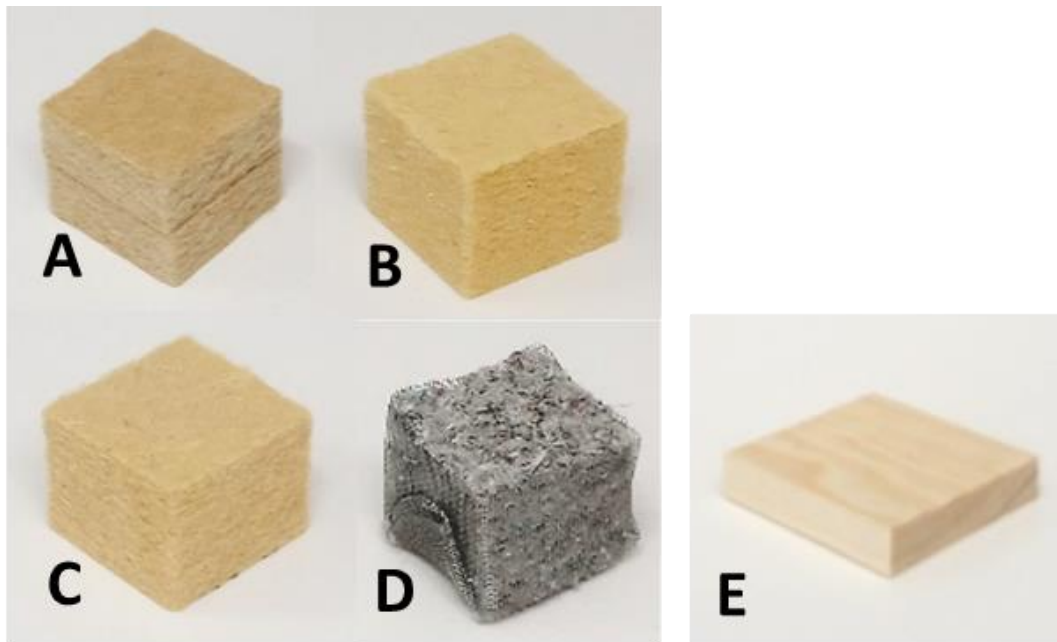


Abbildung 5: Untersuchte Holzfaserdämmstoffe (links) und Referenz-Kiefernplintholz (rechts).

Als Holzfäulepilze wurden die folgenden Spezies eingesetzt:

- Brauner Kellerschwamm (*Coniophora puteana*). Gängiger Norm-Prüfpilz mit hohem Abbaupotential; verursacht eine Braunfäule
- Schmetterlings-Tramete (*Trametes versicolor*). Ebenfalls gängiger Norm-Prüfpilz; verursacht eine Weißfäule.
- Gemeiner Spaltblättling (*Schizophyllum commune*). Laut Literatur hohe Affinität zu Fasermaterialien; verursacht eine Weißfäule.

Für die Beimpfung der Probekörper wurden die Pilze zunächst auf Malzextrakt-Agar angezchtet, „Dübel“ aus unbehandeltem Nadelholz mit ca. 1 cm Länge daraufgelegt und für vier Wochen inkubiert (Abbildung 6). Die Probekörper wurden nach Sterilisierung mit Gamma-Strahlung zunächst in den Zielklimaten bis zum Erreichen der Sättigungsfeuchte konditioniert und anschließend mit je einem Dübel pro Organismus, also insgesamt jeweils drei Dübeln pro Probekörper, versehen.

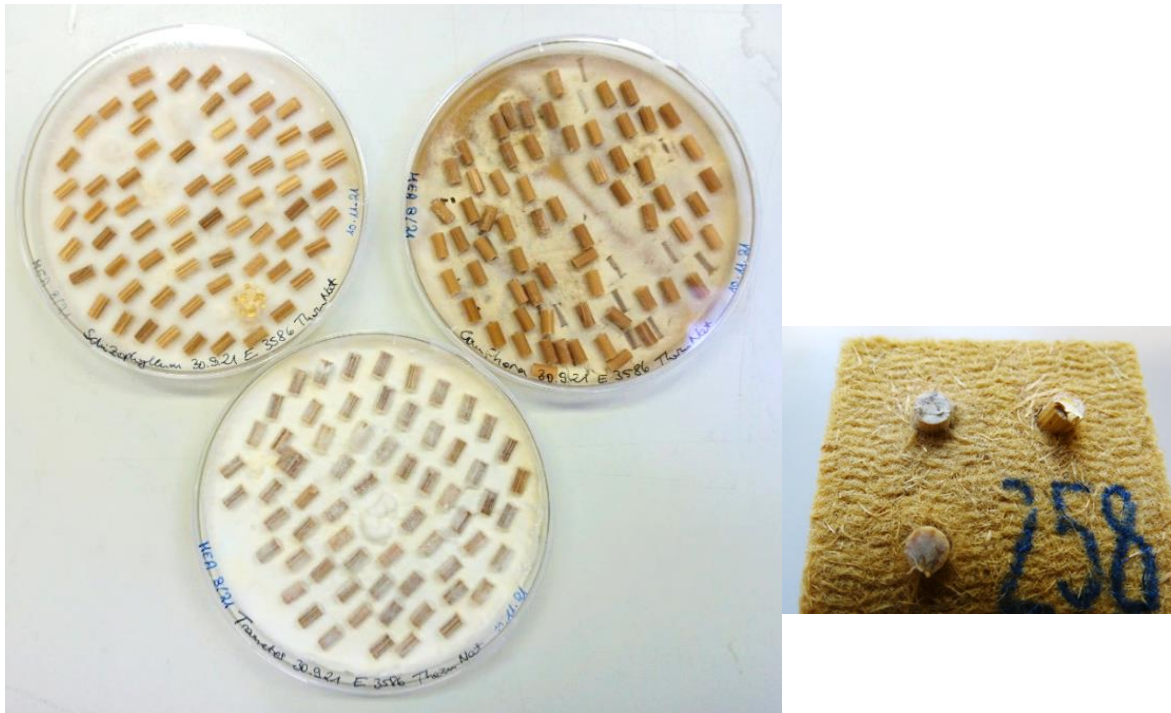


Abbildung 6: Links - Vorbereitung von infizierten Holzdübeln (oben links: *Schizophyllum commune*, oben rechts: *Coniophora puteana*, unten: *Trametes versicolor*) und rechts mit Dübeln „beimpften“ Probekörper.

Die Inkubationseinheiten (dicht verschlossene Behälter, siehe Abbildung 7) für einen Zeitraum von maximal 12 Monaten folgenden Klimabedingungen ausgesetzt:

- 97 % r. F. bei 10 °C, 15 °C, 25 °C und 30 °C
- 100 % r. F. bei 10 °C und 15 °C



Abbildung 7: Inkubationseinheit mit beimpften Probekörpern. Unter dem Gitter befindet sich die mit Salzlösung bzw. destilliertem Wasser gefüllte Schale.

Gemäß den Ergebnissen kam es bei 97 % r.F. und Temperaturen von 10 °C, 15 °C, 25 °C und 30 °C zu keinem bzw. nur zu minimalem Masseabbau an den untersuchten Dämmmaterialien. Abgesehen von einem einzigen Ausreißer-Wert (der im Nassverfahren hergestellten

Dämmstoffplatte ohne Hydrophobierung, bei 15 °C nach ca. 6,5 Monaten), lagen alle Masseverluste unter 1,5 M.-%. Selbst bei den für Pilzwachstum idealen Temperaturen von 25 °C und 30 °C, lagen die maximalen Masseverluste mit 1,5 M.-% im Bereich der Messungenauigkeit und in allen Fällen unter dem ermittelten Masseverlust des Kiefer-Splintholzes.

Bei 100 % r.F. und 10 °C und 15 °C (Abbildung 8) wies die Zellulosefaser (Kurve D) zu keinem Zeitpunkt Masseverluste auf. Bei den beiden im Trockenverfahren hergestellten Dämmmaterialien mit und ohne Hydrophobierung (jeweils C und B) kam es im Zeitverlauf zu geringen Masseverlusten, dabei schnitt das hydrophobierte Dämmmaterial geringfügig besser ab als das nicht hydrophobierte. Beide Dämmstoffplatten zeigten jedoch geringere Masseverluste als die Kiefer-Splintholz Referenz. Lediglich die im Nassverfahren hergestellte Dämmplatte ohne Hydrophobierung wies bei 100 % r.F. und 10 °C sowie 15 °C im Zeitverlauf höheren Masseabbau auf als die Kiefer-Splintholz Referenz.

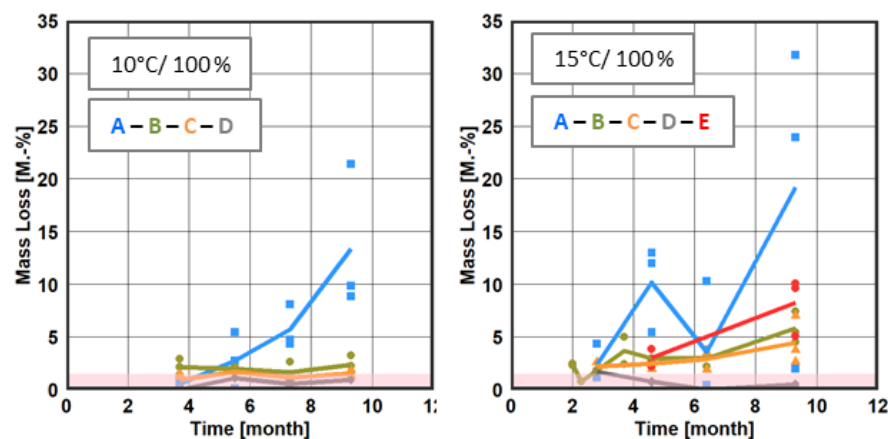


Abbildung 8: Masseverluste der bei 10 °C und 15 °C sowie 100 % r.F. durchgeführten Versuche. (A = Nassverfahren; B = Trockenverfahren ohne Hydrophobierung; C = Trockenverfahren mit Hydrophobierung; D = Zellulose; E = Kiefer-Splintholz), transparent rot markiert = Bereich der Messungenauigkeit von 1,5 M.-%)

Die Ergebnisse der Labor-Untersuchungen zeigen, dass Holz- und Naturfaserdämmstoffe sowohl anfälliger als auch beständiger gegenüber dem Befall von holzerstörenden Pilzen sein können als Massivholz. Es sind für diese Materialien also nicht pauschal vorsichtigere Grenzwerte anzusetzen als für Holz. Manche Produkte scheinen sogar deutlich beständiger zu sein.

## 2.2 Ableitung von Grenzkurven

Aus den Laborversuchen wurden temperatur- und feuchteabhängige Grenzkurven (Grenz-Isoplethen) abgeleitet. Diese basieren auf den früher am IBP ermittelten Grenzkurven für Massivholz sowie auf dem prinzipiellen Verlauf von Pilz-Isoplethen.

Für die im Rahmen der Versuche überprüften Holzfaserdämmstoffe mit gleich hoher oder höherer Beständigkeit als Massivholz kann ebenfalls diese Kurve verwendet werden – dementsprechend wird sie in Abbildung 9 als Kurve „ThermNat II“ eingeführt, die von etwa 97,5 % r.F. bei 0 °C bis etwa 93 % r.F. bei 30 °C verläuft. Allerdings sind nicht alle untersuchten



Materialien beständiger als Holz. Für diese Materialien wurde mit vergleichsweise hoher Sicherheit die Kurve ThermNat I festgelegt, Dabei liegen die Grenzwerte deutlich niedriger: bei 30 °C startet der Abbau bereits ab 86 % r.F.. Dies ist zwar unrealistisch niedrig. Um jedoch realistischere Verläufe angeben zu können, wären weitere und detailliertere Untersuchungen erforderlich. Trotzdem liegt auch diese Grenzkurve noch deutlich höher als der bisher zur Verfügung stehende Grenzwert von temperaturunabhängig 18 M.-%.

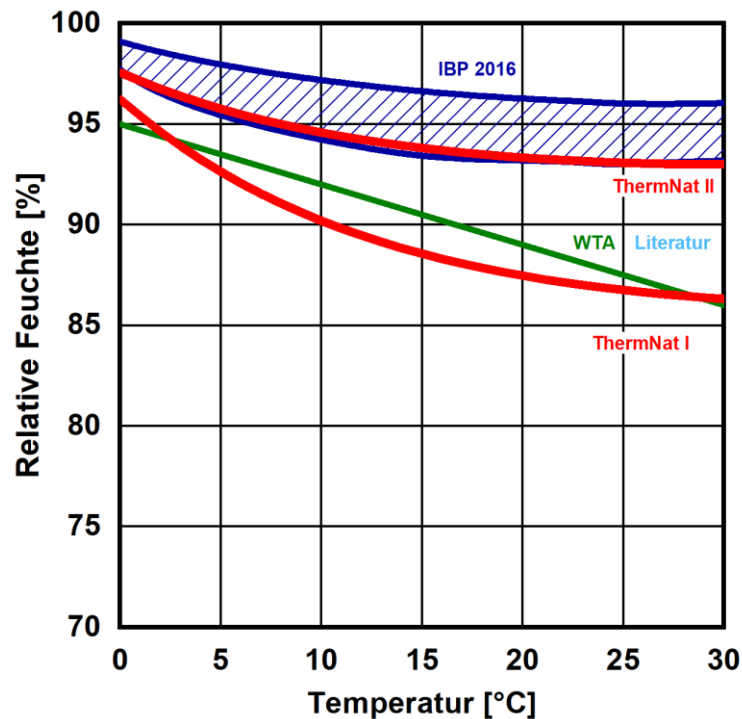


Abbildung 9: Neu ermittelte Grenzkurven für Massivholz und gleich beständige oder beständigere Naturfaserdämmstoffe (ThermNat II) sowie auf der sicheren Seite liegend für weniger beständige Naturfaserdämmstoffe (ThermNat I). Die Grenzkurven aus früheren Untersuchungen des IBP (blau) und die Grenzkurve aus dem WTA-Merkblatt 6-8 (grün) sind zum Vergleich ebenfalls hinterlegt.

### 2.3 Instationäres Prognosemodell

Bereits in einem früheren Projekt wurde gezeigt, dass deutliche Analogien zwischen dem Wachstum von Schimmel- und Holzfäulepilzen bestehen, auch wenn die Holzfäulepilze zumindest bei höheren Temperaturen ein höheres Feuchteniveau benötigen als Schimmelpilze. Dementsprechend wurde auf Basis des Modells WUFI® Bio (Schimmelprognose) ein neues Modell zur Prognose des Wachstums holzerstörender Pilze WUFI® HzP entwickelt. Dazu wurde zunächst die zuvor beschriebene Grenzkurve für das Wachstum von Holzfäulepilzen in Massivholz herangezogen. Die Verzögerung bis zur Etablierung des Pilzes im Material (Initiationsphase) und der anschließend einsetzende Materialabbau werden wie folgt abgebildet:

- 1.) Modellierung der Feuchteaufnahme über Diffusionswiderstand und Sorptionsisotherme der Spore bis zum Erreichen der kritischen Feuchte, bei der der Pilz im Material ausreichend etabliert ist.
- 2.) Anschließende Modellierung der Geschwindigkeit des Abbaus des Holzes.

Die Kalibrierung der beiden Effekte erfolgt auf einer doppelten Basis: Erstens anhand der neuen Versuche und der Dauer bis zur Beobachtung des ersten Masseverlusts sowie der im weiteren Verlauf beobachteten Geschwindigkeit des Masseabbaus bei den jeweiligen Versuchsbedingungen und zweitens anhand den Ergebnissen aus früheren Untersuchungen, in denen für beide Vorgänge - hier als Initiationsphase und Abbauphase bezeichnet – bereits erste Ansätze für die Berechnung von Materialabbau in Massivholz vorgestellt wurden.

Mit den festgelegten Grenzkurven ThermNat I und ThermNat II und den zuvor beschriebenen Wachstumsparametern werden die Holzabbauprozesse unter den untersuchten Klimabedingungen nachberechnet und mit den Versuchsergebnissen verglichen. Abbildung 10 zeigt die Vergleiche der Modellprognose mit den Messergebnissen.

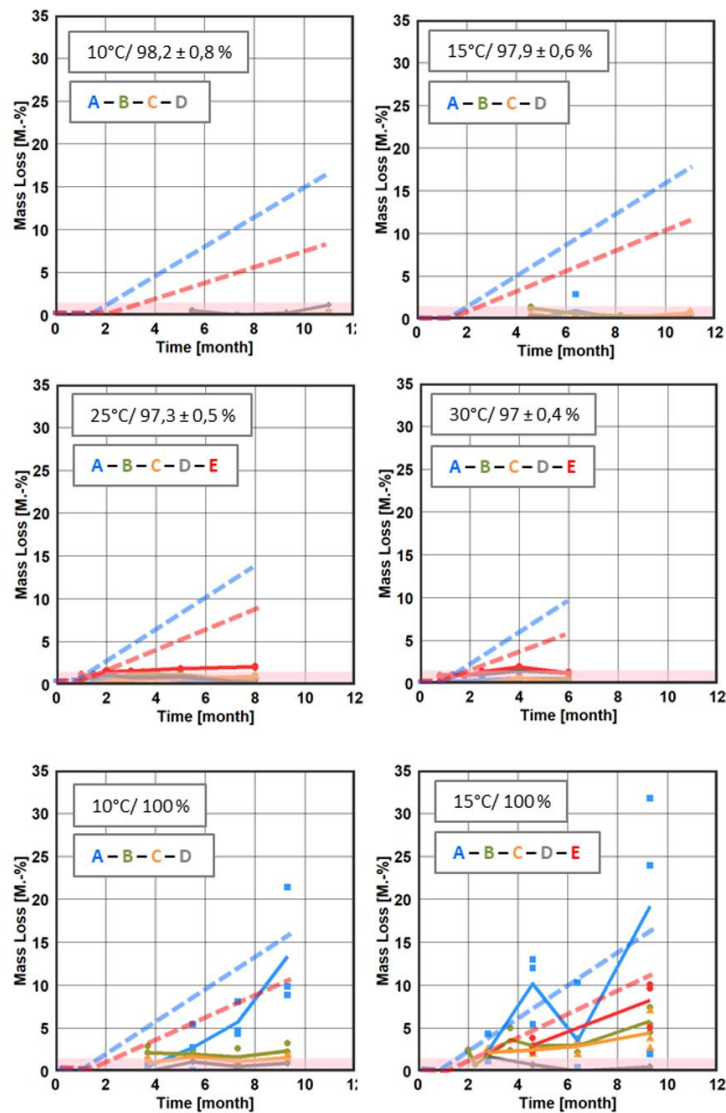


Abbildung 10: Vergleich zwischen Prognose (blau für ThermNat I und rot gestrichelt für ThermNat II) und Messung (Punkte und Mittelwertkurven) der Masseverluste der verschiedenen Naturfaserdämmstoffe und des Referenzholzes (A = Nassverfahren; B = Trockenverfahren ohne Hydrophobierung; C = Trockenverfahren mit Hydrophobierung; D = Zellulose; E = Kiefer-Splintholz), transparent rot markiert = Bereich der Messungenauigkeit von 1,5 M.-%)

Die Nassverfahrensplatte ohne Hydrophobierung wurde entsprechend der Messergebnisse der Klasse ThermNat I (weniger beständig als Holz) zugeordnet. Die Punkte stellen die einzelnen Messergebnisse und die durchgezogene Linie die Mittelwerte der jeweils drei Probekörper dar. Die hellblaue gestrichelte Linie entspricht dem prognostizierten Masseverlust aus dem Prognosemodell. Der Vergleich zeigt, dass vor allem bei den niedrigeren Temperaturen und Feuchten der Masseverlust früher beginnt und deutlich stärker ansteigt als in der Messung. Bei den höheren Temperaturen von 25 und 30 °C bei 97 % wird der Start des Masseverlusts gut abgedeckt, der anschließende Anstieg liegt ebenfalls deutlich höher als die Messdaten.

Die anderen Naturfaserdämmstoffe sowie das Referenzholz (Kiefer-Splintholz) werden mit der Grenzkurve „ThermNat II“ berechnet (gestrichelte rote Linie). Der Masseverlust beginnt bei den verschiedenen Klimabedingungen nach etwa 1-2 Monaten - bei den niedrigen Temperaturen etwas früher, bei den höheren in etwa so wie gemessen. Der prognostizierte Masseverlust liegt wie bereits erwähnt, bei den höheren Feuchten von 100 % r.F. nur leicht, bei den niedrigeren von 97 % dagegen weiter auf der sicheren Seite.

Im Vergleich zu den Labormessungen kann festgestellt werden, dass der neue Modellansatz gegenüber den Messergebnissen auf der sicheren Seite liegt aber deutlich die Anwendungsgrenzen der Materialien gegenüber den bisher verfügbaren Bewertungskriterien nach oben verschiebt. Diese Bewertung bestätigt sich auch anhand des Vergleichs mit den Freilandversuchen.

Mit dem neuen Ansatz müssen nun weitere Erfahrungen im Vergleich zu Labor- und Praxisuntersuchungen gesammelt und dieser ggf. an der einen oder anderen Stelle noch weiter verfeinert werden. Weitere Untersuchungen erscheinen v.a. für die unteren Grenzkurven der besonders beständigen Materialien sinnvoll, die teilweise einen signifikant niedrigeren Masseverlust aufweisen als Massivholz - aber auch bezüglich der Geschwindigkeit des Masseabbaus im Feuchtebereich um die 97 % r.F., bei der die Prognose aktuell noch recht weit auf der sicheren Seite liegt.

### **3 Zusammenfassung und Ausblick**

#### **3.1 Wärmedämmeigenschaften**

Die simulationsbasierte Vorstudie hat gezeigt, dass bei geeigneter Vorkonditionierung der sorptionsfähigen Dämmstoffprobekörper in Verbindung mit einem geeigneten Temperaturgradienten Kondensationsvorgänge während der Messung vermieden werden können.

Die verbleibenden Latentwärmeeffekte reduzieren sich im konkreten Fall auf maximal 0,5 % vom Messwert der Wärmeleitfähigkeit und liegen somit unterhalb der Messgenauigkeitsgrenze der Wärmeleitfähigkeitsmessung (standardmäßig 2 % bis 3 %). Das zunächst angestrebte Verfahren mit foliengetrennten Einzelschichten ist als ungeeignet einzustufen, da sich



trotz des unverhältnismäßig höheren Aufwands für die Probenvorbereitung nur eine vernachlässigbar geringfügige Reduktion des Latentwärmeeinflusses während der Messung erzielen lässt, die den Zusatzaufwand nicht rechtfertigt.

Aus der Labormessung am Plattengerät kann geschlossen werden, dass das effizienteste Verfahren zur Messung der feuchteabhängigen Wärmeleitfähigkeit, das Verfahren am nicht aufgetrennten Probekörper nach DIN EN 12664 bzw. ISO 10051 ist. Es liefert in den Untersuchungen fast den gleichen Wert für die Wärmeleitfähigkeit, wie die Messung am aufgetrennten, Probekörper. Da eine detaillierte Analyse der Wärme- und Feuchteströme innerhalb des Materials infolge der begrenzten Genauigkeit der Messdaten und Materialparameter teilweise zu physikalisch unsinnigen Zusammenhängen führt, bietet dieses Verfahren keinen relevanten Mehrwert. Dieser könnte nur durch eine erhebliche und vermutlich unwirtschaftliche Steigerung des Messaufwand erreicht werden.

Aus diesen Gründen wird das Verfahren nach DIN EN 12664 bzw. ISO 10051 am ganzen Probekörper als am besten geeignet zur Ermittlung der feuchtebedingten Wärmeleitfähigkeit eingestuft. Die hier zu erwartenden Restunsicherheiten sind als vernachlässigbar gering einzustufen, da in der Realität allein die materialbedingten Streuungen der Wärmeleitfähigkeit eine größere Schwankungsbreite haben.

Die simulationsbasierte Überprüfung von Laborversuchen an Holzfaserplatten unterschiedlicher Dichte sowie einer Hanffaserplatte belegt, dass die Latentwärmeeffekte im Laborversuch jeweils maximal 1% höher liegen als ohne Berücksichtigung der Latentwärme. Außerdem wird festgestellt, dass das gewählte Versuchsszenario mit 80 % r.F. Vorkonditionierung und einer Temperaturdifferenz von etwa 1 K pro 1 cm Materialdicke gewährleistet, dass die r.F. auf der Kaltseite sicher unterhalb von 100 % bleibt und somit keine Kondensationsbedingungen auftreten.

Das festgelegte Messverfahren umfasst im nicht unterteilten Probekörper einen Feuchtebereich von etwa 60 % r.F. auf der warmen bis 95 % r.F. auf der kalten Seite. Da es während der Messung zu keinem überproportional hohen Anstieg der Wärmeleitfähigkeit kommt, kann vereinfacht ein linearer Zusammenhang zwischen Porenluftfeuchte und feuchteabhängiger Wärmeleitfähigkeit bis 95 % angenommen werden. Zur Beschreibung der feuchteabhängigen Wärmeleitfähigkeit des gemessenen Probekörpers wird festgelegt, dass der Messwert der Wärmeleitfähigkeit auf die mittlere Porenluftfeuchte während der Messung bezogen wird (80 % r.F. im vorliegenden Fall). Zwischen dem Wert der trockenen Wärmeleitfähigkeit und dem Wert bei 80 % Porenluftfeuchte wird linear interpoliert und aufgrund des anzunehmenden linearen Zusammenhangs bis 95 % Porenluftfeuchte vereinfacht weiter linear extrapoliert. Im Bereich darüber wird ein exponentieller Anstieg bis 100 % r.F. auf 0,6 W/mK (Wärmeleitfähigkeit von Wasser) angenommen.

Die Anwendung des ermittelten Datensatzes zur Nachsimulation des Freilandversuchs hat gezeigt, dass durch das Laborverfahren und der daraus ermittelten Wärmeleitfähigkeit das reale feuchteabhängige Verhalten der Wärmeleitfähigkeit in der hygrothermischen Simulation hinreichend genau abgebildet wird.

Auch die in-situ Messungen und deren Nachsimulation lassen in Kombination mit den Laborversuchen den Schluss zu, dass bei den im Einbauzustand überwiegend auftretenden Feuchtegehalten bis etwa 95 % r.F. der feuchtegehaltsbedingte Anstieg der Wärmeleitfähigkeit von sorptionsfähigen Dämmstoffen inklusive der in diesem Bereich auftretenden Latentwärmestransporte (sog. Heat-Pipe-Effekt) bei gleichbleibenden Feuchtprofilen eher gering bleibt. Bei Feuchten oberhalb von 95 % r.F. nimmt der Wärmestransport dann stärker zu. Dies liegt zum einen daran, dass bei höheren relativen Feuchten die Sorptionsfeuchtegehalte und damit auch die Wärmeleitfähigkeit stärker ansteigen und zum anderen an den ebenfalls in größerem Umfang auftretenden Latentwärmeströmen. Dies gilt insbesondere bei Auftreten von Tauwasser, was aber zumindest bei Naturfaserdämmstoffen schon aus Dauerhaftigkeitsgründen möglichst vermieden werden sollte.

Zusammenfassend lässt sich schließen, dass ein Zuschlag von 5 % auf den Nennwert für Holzfaserdämmstoffe nach DIN 4108-4 im Jahresmittel das thermische Verhalten der hier untersuchten Bauteile recht gut widerspiegelt. Anlass für eine Reduktion des 5-%-Zuschlags liefern die Versuchsergebnisse jedoch nicht. Ein pauschaler Feuchtezuschlag auf pflanzliche Faserdämmstoffe von 20 %, wie er in der ÖNORM B 6015-2 ohne Überwachung bei der Produktion angesetzt wird, erscheint dagegen mit deutlich zu viel Sicherheit versehen zu sein. Hier wäre eine Reduktion auf den Bereich zwischen 10 und 15 % sinnvoll.

### **3.1 Dauerhaftigkeit**

Die Ergebnisse der Labor-Untersuchungen zeigen, dass Holz- und Naturfaserdämmstoffe sowohl anfälliger als auch beständiger gegenüber dem Befall von holzerstörenden Pilzen sein können als Massivholz. Es sind für diese Materialien also nicht pauschal vorsichtigere Grenzwerte anzusetzen als für Holz. Manche Produkte scheinen sogar deutlich beständiger zu sein.

Die im Rahmen des Projekts entwickelten Grenzkurven ThermNat I und ThermNat II für unterschiedlich beständige Naturfaserdämmstoffe sowie das ergänzende instationäre Prognosemodell ermöglichen eine Beurteilung der Anwendungssicherheit der untersuchten Produkte und zeigen gute und vielversprechende Ergebnisse im Vergleich zu den durchgeführten Labor- und Freilandversuchen.

Das neue Prognosemodell muss nun noch weiter auf Praxistauglichkeit überprüft und anhand realer Konstruktionen weiter validiert werden. Dabei sollten sowohl funktionierende als auch geschädigte Bauteile bewertet werden – beides sollte das Modell wiedergeben können, wobei auch hier im Zweifel eine Schädigung eher zu früh als zu spät angezeigt werden sollte. Dabei sollte deutlich werden, ob neben bereits genannten Unsicherheiten noch bei weiteren Aspekten Änderungsbedarf besteht, oder Verbesserungen möglich sind. Nach eventuellen weiteren Anpassungen und einer Bewährung in dieser Testphase kann es als praxisgerechtes Werkzeug eingesetzt werden. Dabei kann die aktuell noch mit Wachstum von Myzel in [mm] ausgegebene Prognoseergebnisse mit einem weiter validierten Faktor

als Holzabbau-Indikator in [M.-%] umgesetzt werden. Dazu soll auch noch ein Ampelschema entworfen werden, das Planern bei der Bemessung von Konstruktionen eine einfache Orientierung bietet.

Perspektivisch ist es wünschenswert, die vorgeschlagenen zwei Klassen weiter zu differenzieren, sowohl auf Seiten der empfindlicheren Materialien als auch auf Seiten der beständigeren, da einige Materialien vermutlich deutlich widerstandsfähiger gegenüber holzerstörenden Pilzen sind als Splintholz. Für einzelne Materialien, die von den Klassen deutliche Abweichungen bestehen, besteht auch die Möglichkeit, eine individuelle Kurve festzulegen. Dafür sollten noch möglichst einfache Prüfverfahren entwickelt werden. Für Dämmstoffe aus Stroh oder Schafwolle liegen bisher nur wenig Erkenntnisse vor, so dass deren Beurteilung und Anwendbarkeit besonders schwierig ist - aktuell kann für diese keine der beiden Grenzkurven herangezogen werden.

Nicht näher betrachtet werden konnten im Rahmen dieses Projekts die Beplankungsmaterialien. Es wurde aber deutlich, dass diese oft noch höhere Feuchtegehalte aufweisen als die Gefachdämmungen und damit tendenziell auch früher entsprechende Grenzwerte bezüglich der Dauerhaftigkeit überschreiten. Da es hier ebenfalls sehr unterschiedliche Produkte gibt, die vermutlich auch entsprechend unterschiedliche Beständigkeit gegen holzerstörende Pilze aufweisen, wäre es naheliegend auch diese Materialien genaueren Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit zu unterziehen. Wenn auch diese Produkte in eine künftige Klassifizierungssystematik einbezogen sind, würde dies die Planung von sicheren und robusten Holzbaukonstruktionen weiter vereinfachen.

## Danksagung

Das CORNET/IGF-Vorhaben 271 EN **ThermNat** der Forschungsvereinigung Trägerverein Institut für Holztechnologie Dresden e.V. (TIHD) wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Die Bearbeitung des Projektes wurde unterstützt durch Unternehmer- und Fachverbände des Holzbaus und der Dämmstoffherstellung aus Nachwachsenden Rohstoffen sowie Firmen der europäischen Dämmstoff- und Baustoffhersteller, Holzwerkstoffindustrie, des Holzbaus, der Bauplanung und durch Architekten.

Der vollständige Bericht kann bestellt werden bei:

**Trägerverein Institut für Holztechnologie Dresden e.V.**  
**Zellescher Weg 24**

**01217 Dresden**

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages