

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Abschlussbericht

## **EnEff Gebäude 2050 - Demonstration einer innovativen und nachhaltigen Aufdachdämmung aus Rohrkolben**

Projektnummer:

03EGB0008A/B

Laufzeit:

01.10.2017 bis 30.06.2020



Fraunhofer Institut für Bauphysik  
Holzkirchen  
Institut für Bauphysik (IBP)



SAINT-GOBAIN ISOVER G+H  
Ladenburg



typha technik Naturbaustoffe  
Schönau

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

# Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung und Ziele des Vorhabens IBP</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Stand des Wissens und der Technik zu Beginn des Vorhabens</b>	<b>8</b>
2.1	Rohstoff und umwelttechnische sowie landwirtschaftliche Bedeutung	8
2.2	Fertigungsanlage zur Herstellung von Typhaplatten	9
2.2.1	Längs- und Querschneideeinrichtung	9
2.2.2	Beleimtrommel	10
2.2.3	Pressformen und Presse	11
2.2.4	Arbeitsabläufe bei der Plattenproduktion	11
<b>3</b>	<b>Aufbau einer Laboranlage IBP</b>	<b>12</b>
3.1	Planung der Laboranlage am IBP	12
3.2	Anpassung/Erweiterung der Versuchsanlage der Firma Typha Technik	13
<b>4</b>	<b>Optimierung der Aufdachdämmung</b>	<b>19</b>
4.1	Variation des Bindemittels	19
4.2	Variation der Bindemittelapplikation	25
4.2.1	Sprühtechnik	25
4.2.2	Bepudern mit trockenem Bindemittel	25
4.3	Optimierung der Partikelgeometrie und des Plattenaufbaus	26
<b>5</b>	<b>Tests mit bestehenden Fertigungsanlagen</b>	<b>28</b>
5.1	Versuche mittels der Technologie zur Herstellung von Holzwolle-Leichtbauplatten (Versuche A)	28
5.1.1	Beschreibung des Produktionsprozesses/ Prozessschritte	28
5.1.2	Durchgeführte Versuche und Ergebnisse	32
5.2	Versuche mittels der Technologie zur Herstellung von Spanplatten (Versuche B)	42
5.2.1	Beschreibung des Produktionsprozesses/ Prozessschritte	44
5.2.2	Plattenherstellung	46
5.2.3	Durchgeführte Versuche und Ergebnisse	53
<b>6</b>	<b>Platten für Prüfstand und Demogebäude</b>	<b>77</b>
6.1	Hygrothermische Materialkennwerte	77
6.1.1	Bestimmung der Wärmefreisetzungsrates	77

6.1.2	Wärmeleitfähigkeit	78
6.1.3	Diffusionswiderstandszahl	80
6.1.4	Wasseraufnahmekoeffizienten	81
6.1.5	Freie Sättigung	82
6.1.6	Sorptionsfeuchte	83
6.1.7	Feuchtespeicherfunktion	83
6.1.8	Kapillare Rückleitung (Kapi-Test)	84
6.1.9	Bestimmung der Kapillartransportkoeffizienten	86
6.1.10	Vergleich der Kennwerte mit Ausgangszustand	89
6.2	Herstellung Flexdachplatten	91
6.3	Herstellung Demogebäudeplatten	92
<b>7</b>	<b>Demonstration des Einsatzes der Dämmung</b>	<b>93</b>
7.1	Einbau und Monitoring am Flexdach	93
7.1.1	Beschreibung der Versuchseinrichtung	93
7.1.2	Einbau der Aufdachdämmplatten und der Sensorik	95
7.1.3	Ergebnisse der Flexdach-Untersuchungen	103
7.2	Demowohngebäude	114
7.2.1	Beschreibung des Demogebäudes	114
7.2.2	Installation der Messsensorik und Datenerfassung	119
7.2.3	Ergebnisse Typhahaus	126
<b>8</b>	<b>Rechnerische Untersuchungen zu Einsatzgrenzen IBP</b>	<b>133</b>
8.1	Durchführung der rechnerischen Untersuchungen	133
8.1.1	Auswahl der Standorte	134
8.1.2	Auswahl der Konstruktionen	138
8.1.3	Nutzungsbedingtes Innenklima und Übergangskoeffizienten.	139
8.2	Ergebnisse der Berechnungen	140
8.2.1	Einsatz als Aufdachdämmung in der BRD	140
8.2.2	Einsatz als Aufdachdämmung außerhalb der BRD	155
8.2.3	Andere Einsatzbereiche	158
8.3	Zusammenfassung Untersuchung der Einsatzgrenzen	169
<b>9</b>	<b>Erarbeitung eines Konzepts zur industriellen Umsetzung</b>	<b>170</b>
9.1	Erörterung des Marktpotentials	170
9.1.1	Auswahl des geeigneten Produktes – Aufsparrendämmplatte	170
9.1.2	Darstellung des Alleinstellungsmerkmals einer Typha- Aufsparrendämmplatte	172
9.1.3	Identifizierung des Optimierungspotentials	174
9.1.4	Perspektivische Stellung am Markt: potentiell zu erzielende Preise und Mengen	175
9.2	Darlegung der technischen Umsetzung	176

9.2.1	Beschreibung der technischen Herausforderung und erforderlichen Anpassungsmaßnahmen	177
9.2.2	Prozesskonzipierung	179
9.2.3	Investitionsschätzung und Grobkalkulation für die Fertigung	182
9.3	Allgemeine Einordnung des Konzeptes	185
<b>1 0</b>	<b>Öffentlichkeitsarbeit</b>	<b>186</b>
<b>1 1</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>188</b>
11.1	Ausgangspunkt der Arbeit	188
11.2	Schneidetechnik und Schichtaufbau	188
11.3	Bindemittel und Applikation	189
11.4	Plattenherstellung	190
11.5	Materialkennwerte	191
11.6	Berechnungen zu Einsatzgrenzen	191
11.7	Begleitendes wissenschaftliches Monitoring	192
11.8	Ausblick	194

# 1 Einleitung und Ziele des Vorhabens IBP

Eine nachhaltige und dabei konkurrenzfähige Aufdachdämmung aus dem nachwachsenden Rohstoff Typha hat in mehrererlei Hinsicht Bezug zu den förderpolitischen Zielen des 6. Energieforschungsprogramms im Allgemeinen und insbesondere zur Förderinitiative „EnEff.Gebäude2050 – Innovative Vorhaben für den nahezu klimaneutralen Gebäudebestand 2050“.

Zurzeit basieren Aufdachdämmsysteme aus nachwachsenden Rohstoffen weitgehend auf dem Rohstoff Holz in Form von Holzfaserdämmplatten. Für die Herstellung solcher Systeme gibt es unterschiedliche Verfahren, welche eine hohe Prozessenergie benötigen. Bei der Produktion von Holzfaserdämmplatten im Nassverfahren werden u.a. durch die Trocknung bei 160-200 °C des zuvor eingebrachten, zur Herstellung notwendigen, Wassers bis zu 2670 MJ pro Kubikmeter erzeugten Dämmstoff benötigt. Bei dem nur wenig energieärmeren Trockenverfahren braucht man dagegen den Zusatz von ca. 4% PUR-Kleber (Informationen des Verband Holzfaserdämmstoffe e.V.; VHD).

Die Verwendung von Typha als Rohstoff für die Baustoffproduktion verknüpft zahlreiche ökologische und ökonomische Vorteile. Dies wurde bereits in von der DBU geförderten Projekten erfolgreich nachgewiesen [1; 2]. Bereits der Typha-Anbau trägt erheblich zur Reduzierung von CO<sub>2</sub>-Emissionen bei [3], wesentlich mehr als der Holzanbau. Die besondere Eignung der Blattmasse von Typha für die Herstellung von innovativen Baustoffen ist dabei bestimmt durch die Struktur der Pflanze: Die Blätter haben ein faserverstärktes Stützgewebe, ausgefüllt mit einem weichen, offenzelligen Schwammgewebe. Dies verleiht ihnen eine erstaunliche Statik und eine ausgezeichnete Dämmwirkung. Durch die Verwendung von Typha und dem Einsatz mineralischer Bindemittel kann deutlich energieärmer ein nachhaltiges Produkt erzeugt werden. Die im Prozess zur Lösung der mineralischen Kleber notwendigen Wassermengen sind gering, sodass eine Lufttrocknung nach dem Abbindevorgang ausreichend ist.

Ferner wird mit dem Produkt aus Rohrkolben nicht nur, wie bei anderen Dämmstoffen auch, durch die Dämmwirkung Energie gespart, sondern bei einem späteren einfachen Rückbau ist dieses wieder voll in den Stoffkreislauf rückführbar. Somit ist das Produkt über den kompletten Lebenszyklus hinweg nachhaltig und ressourcenschonend. Durch den geringen Energiebedarf des Produktionsprozesses erscheint auch der Einsatz von regenerativen Energiequellen in hohem Maß in Zukunft möglich.

Neben der Kohlenstoffbindung im Bauprodukt vermindert der Anbau des Rohstoffes auf wiedervernässten, bisher trocken gelegten, Niedermooren die erheblichen Emissionen von CO<sub>2</sub> und unterstützt die Initiativen der Bundesregierung zum klimarelevanten Moorschutz. Hinzu kommt, dass die Typhaanbauflächen für die Reinigung nährstoffbelasteter Oberflächenwässer bzw. zur Ertüchtigung von Kläranlagen genutzt werden können sowie ferner Anbauflächen teilweise für Retentionsflächen zur Vermeidung von

Überschwemmungen geeignet sind. Auch ist durch ein früheres Pilotprojekt bereits belegt, dass der Ertrag pro Hektar für Landwirte attraktiv ist.

Das Fraunhofer Institut für Bauphysik IBP und das Unternehmen Typha Technik haben bereits in eigenen Vorarbeiten einen ersten Baustoff aus Typha entwickelt - das mit Magnesit gebundene Typhaboard. Dieses weist trotz einer niedrigen Wärmeleitfähigkeit eine gute Festigkeit auf. Damit ergibt sich eine am Markt einmalige Kombination aus Dämmung und Tragwirkung, die auch bereits bei der Fachwerksanierung in der Praxis erfolgreich eingesetzt wurde [2].

Ausgehend von den umfangreichen Erfahrungen der Projektpartner wurde ein Produkt aus Rohrkolben entwickelt, welches für die Aufdachdämmung eingesetzt werden soll. Ganz wesentlich bei dieser Entwicklung war, dass sich möglichst viele der bei dem bereits zuvor bestehenden Produkt, dem magnesitgebundenen Typhaboard, gegebenen Vorteile in der zu entwickelnden Aufdachdämmung wiederfinden. Besonderes Augenmerk wurde dabei auf die vollständige Rückführbarkeit in den Stoffkreislauf und einen guten Brandschutz gelegt. Aufgrund der fehlenden biologischen Abbaubarkeit schieden z.B. die meisten organischen Kleber wie z.B. Polyurethankleber als Bindemittel aus. Im Rahmen dieses Vorhabens sollte eine einfache und für spätere Entwicklungen möglichst flexible Laboranlage für die Herstellung der für die Demonstration erforderlichen Aufdachdämmplatten aufgebaut werden. Zu zeigen war dabei auch, dass die Aufdachdämmung zusätzlich anderen benötigten Eigenschaften im Baubereich genügt, wie Flammhemmung und Feuchtigkeitsregulierung. Außerdem ist für einen Markterfolg die leichte Verarbeitbarkeit dieses Materials von großer Bedeutung und es soll ein Konzept für dessen industrialisierte Fertigung entwickelt werden.

Durch das modellhafte Innovationsprojekt soll nachgewiesen werden, dass mit bekannten technischen Verfahren zur Schneidetechnik, zur Applikation des Bindemittels und Verpressung zu Platten mit geringem technischen Aufwand und Energieeinsatz die Herstellung des Bauproduktes möglich und sinnvoll ist. Dabei ist geplant, auf einer labortechnischen Anlage kleine Dämmplatten aus Typha mit mineralischen Kleber für eine Aufdachdämmung herzustellen, die den Anforderungen für die Anwendung genügen und an einem Versuchstand unter Freilandbedingungen erprobt werden sowie für die der Praxiseinsatz an einem realen Wohngebäude nachgewiesen wird.

Somit besteht das Hauptziel des Vorhabens darin, die Eignung eines neu entwickelten Produkts aus Typha, einem nachhaltigen und gleichzeitig in Preis und Leistung konkurrenzfähigen Dämmstoff für eine Aufdachdämmung, in geeigneter Weise zu demonstrieren. Ein wesentlicher Teil dieses Projektes waren aber auch weiter gehende Produktoptimierungen. Dabei sollte für das neu entwickelte Produkt durch Tests und Demonstration vor Ort untersucht werden, ob es eine ausreichende Biegesteifigkeit und Trittfestigkeit aufweist, um als Aufdachdämmung Akzeptanz zu finden und durch die damit verbundene Durchtrittsfestigkeit potentielle Gefährdungen der Handwerker zu

minimieren. Durch rechnerische Untersuchungen sollte zudem die Eignung des Produkts unter veränderten Randbedingungen, die Fehlertoleranz damit gedämmter Konstruktionen und die Einsatzgrenzen bestimmt werden, um letztendlich Schäden beim Kunden mit hoher Sicherheit ausschließen zu können

## 2 Stand des Wissens und der Technik zu Beginn des Vorhabens

### 2.1 Rohstoff und umwelttechnische sowie landwirtschaftliche Bedeutung

Mit dem breiten Einsatz von Typha können zahlreiche umweltpolitische Ziele gleichzeitig unterstützt werden. Durch die nasse Nutzung von Mooren werden die natürlichen Moorfunktionen wie Nährstoff- und Wasserrückhalt gewährleistet, sowie das Moor als wichtige Kohlenstoffsенke im Landschaftshaushalt wiederhergestellt, sie stellt eine geeignete, nachhaltige alternative Landnutzung für die Zukunft dar. Der Anbau bringt Umweltvorteile im Bereich der Stabilisierung und Renaturierung wiedervernässter Niedermoorflächen. Bei der derzeitigen intensiven Bewirtschaftung von trocken gelegten Niedermoorflächen werden Emissionen von ca. 35 t CO<sub>2</sub>-äqu. pro Jahr erzeugt, umgerechnet auf CO<sub>2</sub> Äquivalenten. Durch die Wiedervernässung der trockengelegten Niedermoore und den Anbau von Typha angustifolia werden aufgrund der Erfordernis einer Über-stauung zwar ebenfalls klimaschädliche Gase abgegeben, allerdings in deutlich geringeren Mengen, die je nach Literaturquelle mit zwischen nahe 0 und bis zu 10 t CO<sub>2</sub>-äqu. pro Hektar und Jahr angegeben werden. Außerdem werden bei einer Verwertung des Rohstoffs zu einem langlebigen Bauprodukt großer Mengen an CO<sub>2</sub> im Material gebunden, die mit ca. 25 t CO<sub>2</sub> pro Hektar und Jahr beziffert werden können. In der Summe ergibt sich somit eine Gesamtemissionsminderung von wenigstens 50 t CO<sub>2</sub>-äqu..

Hinzu kommen CO<sub>2</sub>-Einsparungen durch den Ersatz fossiler Energieträger beim Einsatz nachwachsender Rohstoffe und durch Energieeinsparung beim Einsatz des neu entwickelten dämmenden Baustoffs. Es wird in Zukunft zu prüfen sein, inwieweit diese Emissionseinsparungen als entsprechende Credits auf dem freiwilligen Kohlenstoffmarkt veräußert werden können. Aus ökologischer Sicht besteht zusätzlich der Vorteil darin, dass die Anpflanzungen eine ökologische Nische für zahlreiche schützenswerte niedermoor typische Tierarten bilden (so wurde z.B. die Bekassine zum Vogel des Jahres 2013 auserkoren). Diesbezüglich bedeutet hier die Ernte keine Einschränkung, da sie außerhalb der Brut- und Legezeiten im Winter bei Abwesenheit der Brutstätten und Tiere erfolgt.

Gleichzeitig wird mit dem Anbau auch Gewässerschutz betrieben. Mit Hilfe der mit Typha bepflanzten Anbauflächen kann eingeleitetes Oberflächenwasser von großen Mengen seiner Nähr- und Schadstoffe befreit und in gereinigter Form wieder eingeleitet werden. Außerdem wird mit diesem Anbau die Fläche vor weiterer fortschreitender Bodenerosion geschützt.

Typhabestände sind unempfindliche, natürliche Monokulturen, die jedes Jahr 15 – 20 Tonnen Trockenmasse pro Hektar hervorbringen (circa 150 – 250 m<sup>3</sup> Baustoff). Dies entspricht dem vier- bis fünffachen Wert dessen, was hiesige Nadelwälder liefern. Die Umsetzbarkeit des Anbaus von Typha wurde in dem von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) geförderten Projekt

„Rohrkolbenanbau in Niedermooren“ unter Leitung des Lehrstuhls für Landschaftsökologie der TU München bereits aufgezeigt [1].

Der hohe Inhalt von Polyphenolen in der Typhapflanze macht sie witterungsresistent und dementsprechend biologisch beständig gegen Pilz- und Insektenbefall. Infolgedessen sind keine Pestizide oder Insektizide zur Pflege der Anbaubestände nötig. Ausreichend ist die Existenz einer nährstoffreichen Wasserzuführung, um ausreichend viel Mineralien für die Typhapflanze zur Verfügung stellen zu können. Typha ist eine der wenigen Kulturen, die eine naturnahe, standortgerechte, stabilisierende Nutzung von Niedermooren ermöglicht. Dies bedeutet aber, dass damit eher unlukrative Flächen einer wirtschaftlichen Nutzung zugeführt werden können. Daraus ergibt sich auch, dass im Gegensatz zu den meisten anderen aus Naturstoffen hergestellten Dämm- oder Baustoffen hierbei der Anbau nicht in Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion steht. Ein weiterer wesentlicher Vorteil des Typhaanbaus ergibt sich daraus, dass kein bedeutsamer Befall durch Schädlinge zu befürchten ist, sodass für die Rohstofflagerung außer einem Regenschutz keine besonderen Vorkehrungen getroffen werden müssen.

Auch wenn anfänglich sicher eine Anschubfinanzierung zur Einrichtung erster Anbauflächen, die diese völlig andere Art der landwirtschaftlichen Nutzung möglich machen, erforderlich sein wird, ergibt sich für den Landwirt im Anschluss eine lukrative Ertragsmöglichkeit. Geht man von einem sicher auch langfristig erzielbaren Preis von 25 Cent pro kg Trockenmasse aus, ergibt sich ein Erlös von ca. 4.000 bis 6.000 Euro pro Hektar und Jahr. Dies bedeutet, dass auf diese Weise eine subventionsfreie und trotzdem rentable Landwirtschaft möglich ist und dies bei gleichzeitig hohem Beitrag zum Umweltschutz.

## 2.2 Fertigungsanlage zur Herstellung von Typhaplatten

Die zu Projektbeginn bestehende, von Herrn Theuerkorn aufgebaute, Versuchsanlage ist wie folgend beschrieben aufgebaut. Die wesentlichen Anlagekomponenten sind dabei die Längsschneide- und Querschneideeinrichtung, die Beleimtrommel, die Presse und die Pressformen.

### 2.2.1 Längs- und Querschneideeinrichtung

Die Maschine zum Längsschneiden der Typha-Blattbündel besteht aus einem Messerblock von jeweils gegenläufigen HSS- Kreismesserpaaren im Abstand von ca. 2 mm, die, elektrisch angetrieben, die Blattbündel durch den Block ziehen und in Streifen bzw. Stäbe von 2 – 5 mm zerlegen (siehe Bild 1). Die längsgeschnittenen Stäbe mit einer Länge von 1 – 1,5 m werden in einer Querschneideeinrichtung in Abschnitte von 5 bis 10 cm zerlegt. Dabei führt sie ein kurzes Förderband aus dem Längsschnitt zum Querschnitt, von wo sie dann in den Zwischenspeicher gefördert werden. Für diese Maschine wurde ein alter Heu- und Futterschneider aufgearbeitet und umgebaut.



Bild 1:  
Längs- und Querschneideeinrichtung (links) und Typha-Stäbe nach dem Längsschnitt (rechts).

### 2.2.2 Beleimtrommel

Über ein Förderband werden die verarbeitungsgerecht zugeschnittenen Partikel dem Zwischenspeicher entnommen und der Beleimtrommel (siehe Bild 2 links) zugeführt. Dieser Vorgang ist kontrollierbar über Wägezellen, die zwischen der Trommel und dem ca. 2 m hohen Stahlrohruntergestell angebracht sind. Die Höhe des Gestells erleichtert den Befüllvorgang der Pressformen. Mithilfe einer Druckluftanlage, die die Partikel mit einem Sprühkopf (siehe Bild 2 rechts) im Herabfallen besprüht, wird das Pressgut in der Trommel beleimt. Auch dieser Vorgang wird über die Wägezellen gesteuert.



Bild 2:  
Beleimtrommel (links) und Bindemittel-Sprühautomat (rechts).

### 2.2.3 Pressformen und Presse

Aufgrund der Gefachformate beim Fachwerkhaus in der Pfeifergasse, damals der erste Einsatz von Typhaplatten für eine Sanierung, waren Platten mit einem Format von 1m x 2,5 m erforderlich (siehe [2]). Für diese Größe wurden die Pressformen aus Siebdruckplatten mit Eschenholz-Verstärkungsrippen gebaut. Sie werden unter Druck verriegelt und der Presse sofort wieder entnommen. Auf diese Weise können täglich so viele Platten produziert werden, wie Formen vorhanden sind.

Um die großen Plattenformate bewältigen zu können, wurde eine neue Presse gebaut. Dazu wurden zur Kostenminderung gebrauchte Doppel-T-Träger zu einem stabilen, statisch nachgewiesenen Stahlrahmen verschweißt. Zwei 15t-Hydraulikzylinder bringen den erforderlichen Druck auf eine Pressschiene, um die Formen auf das gewünschte Maß zu verdichten.



Bild 3:  
Pressform mit Schüttrahmen kurz vor Einbringung in die Presse (links) und Pressvorgang (rechts) kurz vor Verriegelung der Pressformen.

### 2.2.4 Arbeitsabläufe bei der Plattenproduktion

Die einzelnen Blattbündel werden manuell dem Längsschneider zugeführt und von den Kreismesserpaaren in Stäbe gespalten. Diese werden über ein Förderband zum Querschneider (Rotationsschneidemaschine) transportiert und dort auf die gewünschte Länge abgelängt. Die geschnittenen Partikel werden in den Zwischenspeicher gefördert und von einem Förderband mit Mitnehmern dort entnommen und in die Beleimtrommel eingewogen. Während des Mischvorgangs wird das angerührte Magnesit über den Druckluftautomaten in die Trommel eingesprüht und so die Partikel benetzt. Die beleimte Masse wird in die Pressform entleert und manuell möglichst gleichmäßig verteilt. Der Deckel der Form wird aufgesetzt und die Form in die Presse geschoben und auf das gewünschte Maß verdichtet. Die Form wird in diesem Zustand verriegelt, sodass sie der Presse wieder entnommen werden kann, und bleibt in der Form bis die Platte ausgehärtet ist.

### 3 Aufbau einer Laboranlage IBP

#### 3.1 Planung der Laboranlage am IBP

Mit Projektstart erfolgten erste Planungsansätze zur Errichtung einer Laboranlage am Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP). Dabei wurde der Flächen- und Raumbedarf für die zum Zeitpunkt des Projektantrags vorgesehenen Komponenten, wie Maschinen, Förderbänder und Lagerflächen ermittelt sowie an die Räumlichkeiten in einem Gebäude des IBP angepasst. Die Gespräche zur Planung der Laboranlage fanden etwa im monatlichen Rhythmus statt. Eine Skizze mit den erforderlichen Gerätschaften und deren logistisch sinnvollen Platzierung in der zunächst zur Verfügung stehenden Fläche ist erstellt worden (siehe Bild 4).

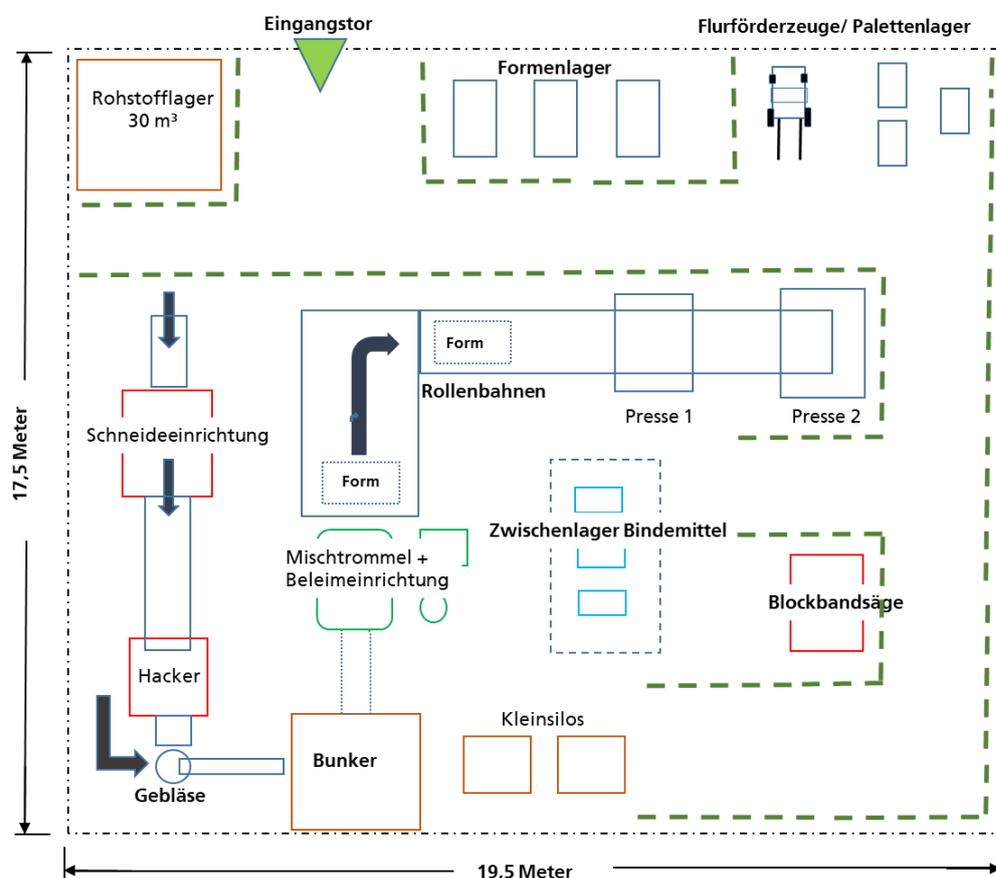


Bild 4:  
Planskizze für den Aufbau und die örtliche Verteilung einer Laboranlage zur Herstellung von Versuchsplatten mit Typha.

Ferner wurden Angebote zu den einzelnen Komponenten eingeholt und es fanden erste Gespräche mit einem Maschinenbauer zu der Herstellung von

Komponenten mit den speziellen Anforderungen statt. Der weitere Fortschritt verschob sich aber, da wider Erwarten der Platz in den Räumlichkeiten noch durch andere Versuchseinrichtungen blockiert war.

Zum Zeitpunkt des Projektantrags im Jahr 2017 ging man davon aus, dass zur Erreichung der für eine Aufdachdämmung notwendigen Materialeigenschaften im ersten Schritt ein Herstellprozess mit Verleimung von Viertel, halben oder ganzen Blattbündeln von Typha zu Blöcken erforderlich ist. Danach sollten die erzeugten Blöcke mit Hilfe einer Blockbandsäge längs der Blattbündel auf die erforderliche Dicke geschnitten und dann in einem weiteren Schritt mit Standardmakropartikeln aus Typha versehen werden, um die gewünschte Festigkeit der Platten an sich und deren Oberfläche zu erzielen.

Im Laufe des Vorhabens hatten sich allerdings die Randbedingungen dahingegen verändert, dass das für den Aufbau einer derartigen Anlage erforderliche Budget für Investitionen nicht mehr in ausreichendem Maße von Seiten des IBP zur Verfügung gestellt werden konnte. Die hohen Investitionskosten und der Zeitaufwand für die Beschaffung und Errichtung sowie die Inbetriebnahme einer solchen Laboranlage wäre im Rahmen des Projektes nicht vertretbar gewesen, zumal auch der notwendige Platz für eine, wie sich aus den weiteren Untersuchungen ergab, deutlich aufwändigere Versuchsanlage mit Streueinrichtung am Fraunhofer-IBP nicht vorhanden ist.

### 3.2 Anpassung/Erweiterung der Versuchsanlage der Firma Typha Technik

Aus den beschriebenen Gründen wurde in Abstimmung mit dem Projektträger entschieden, stattdessen die bei der Firma Typha Technik vorhandene Anlage soweit zu verbessern und aufzurüsten, dass die Aufdachdämmplatten für die Demonstrationsvorhaben dort hergestellt werden können.

Ganz wesentlich für die Produkteigenschaften ist die Erzeugung möglichst symmetrischer, stabförmiger Partikel, die jeweils sowohl das Stützgewebe als auch das Schwammgewebe enthalten. Dazu dient ein Messerblock, der aus zwei gegenläufigen Reihen paralleler, rotierender, scharfer Kreismesser besteht, die sich um einige Millimeter überschneiden und so die Blattbündel zugleich durchziehen und je nachdem wie eng die Messer stehen, sie in Streifen bestimmter Breite zerlegen. Bild 5 zeigt zum Verständnis die Skizze eines Querschnitts des Typhablattbündels mit der Blattstruktur und mit roten Linien die hier mit einem Abstand von 4 mm angesetzten Schnitte.

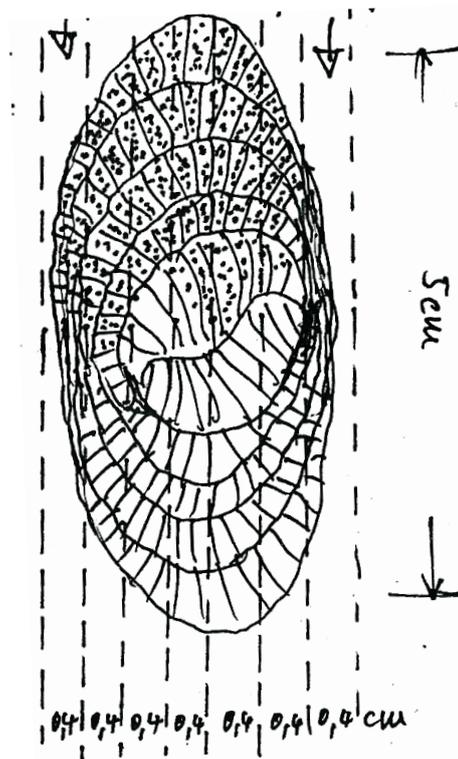


Bild 5:

Skizze eines Querschnitts des Typhablattbündels mit der Blattstruktur. Die roten Linien zeigen die hier mit einem Abstand von 4 mm angesetzten Schnitte.

Die Höhe der Partikel ergibt sich durch die Struktur der Pflanze, da diese geschnittenen „Pflanzenblattscheiben“ in Querrichtung entsprechend der Pflanzenstruktur in 3 bis 6 mm hohe Stäbe zerfallen. Bei der Plattenherstellung hat sich aber immer wieder gezeigt, dass die vorhandene Längsschneideeinrichtung äußerst schadensanfällig ist. Es ist immer wieder vorgekommen, dass sich die rotierenden Kreismesser verkanten und dabei zu Bruch gehen.

Es hat sich dabei ergeben, dass der die Messer führende Abstandshalter oder Kamm einen ganz wesentlichen Einfluss auf die Schadensgefahr hat. Dabei spielt die Härte des Materials eine große Rolle, genauso wie die Präzision der Messerführung. Um diese Problematik zu reduzieren, wurden Messerführungskämme aus einem hochfesten Stahl hergestellt und mit einer speziellen Wasserstrahlschneideeinrichtung bearbeitet. Einen großen Schwachpunkt der Längsschneideeinrichtung in der Laborwerkstatt der Fa. Typha- Technik stellen dennoch weiterhin die Kämme dar, die dem Ausleiten der Typha-Partikel an den Bereichen zwischen den Kreismessern dienen. Schon bei der geringsten Überlastung durch zu schnelle Materialzugabe verstopften die Kämme, was trotz kräftiger Materialstärken von 16mm HSS-Stahl zum Verbiegen der Zinken und in der Folge zu zeit- und kostenaufwändigen Reparaturen führt und häufig einen Austausch der Kreismesser erforderlich macht. Bild 6 zeigt eine fotografische Aufnahme eines verbogenen Führungskammes (links) und der daraus resultierenden Zerstörung der Kreismesser (rechts).



Bild 6:  
Fotografische Aufnahme eines verbogenen Führungskammes (links) und der daraus resultierenden Zerstörung der Kreismesser (rechts).

Angesichts der großen Mengen an Versuchspartikeln die für die Versuche bei der HWL-Fabrikation, den Versuchen in Göttingen, das Flexdach und die 100 m<sup>2</sup> Fläche des Demogebäudedachs zu produzieren waren, musste eine Lösung geschaffen werden, die eine Chance bot, den Belastungen standzuhalten. Mit dem fachlichen und praktischen Beistand der Maschinenbauexperten der Firma Lindinger in Obertattenbach ging man dazu über, anstelle des mit Wasserstrahl geschnittenen Kamms aus HSS-Vollmaterial einzelne, besonders gehärtete Bleche mit Distanzstücken in der Stärke der Messer zu einem Block zu addieren (siehe

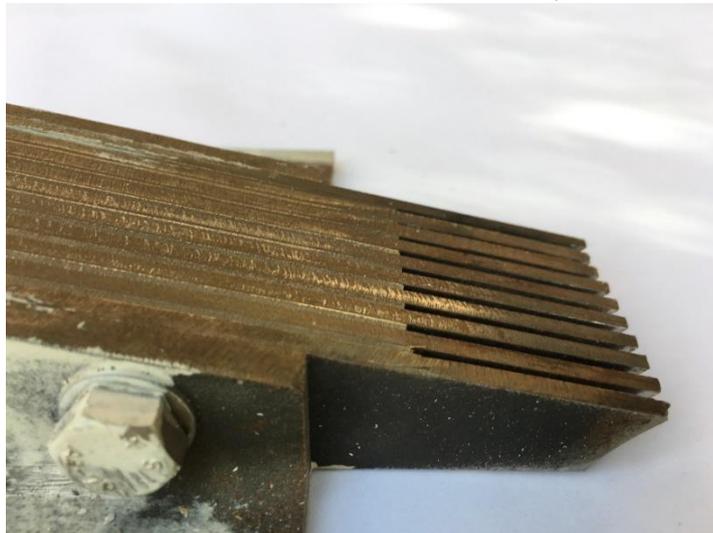


Bild 7). Dies hat den Vorteil, dass die Zinken so geformt werden können, dass sie der statischen Beanspruchung besser standhalten und zugleich bei Beschädigung einzeln ausgetauscht werden können. Dieses Bauprinzip hat sich im Rahmen der Beanspruchung im Projekt soweit bewährt, dass man es für die Nutzung im industriellen Maßstab empfehlen kann.

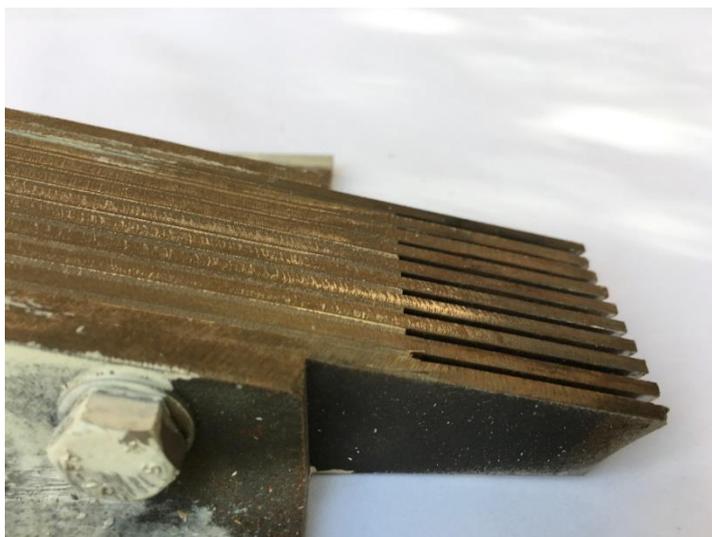


Bild 7:

Kamm aus einzelnen besonders gehärteten Bleche, die mit Distanzstücken in der Stärke der Messer zu einem Block addiert wurden.

Wie im Weiteren genauer beschrieben, stellte sich heraus, dass eine niedrigere Rohdichte und Wärmeleitfähigkeit auch durch eine höhere Partikelgröße zu erreichen ist. Für die Stabilität und die glatten Oberflächen sind wie zuvor Deckschichten mit schlanken Stäben erforderlich. Daher wurde die Schneideinrichtung so umgebaut, dass beide Partikelgrößen hergestellt werden können. Dazu wurde die Anlage um ein weiteres Kreismessersset mit entsprechend den neuen Abständen angepassten Kämmen erweitert (siehe Bild 8).

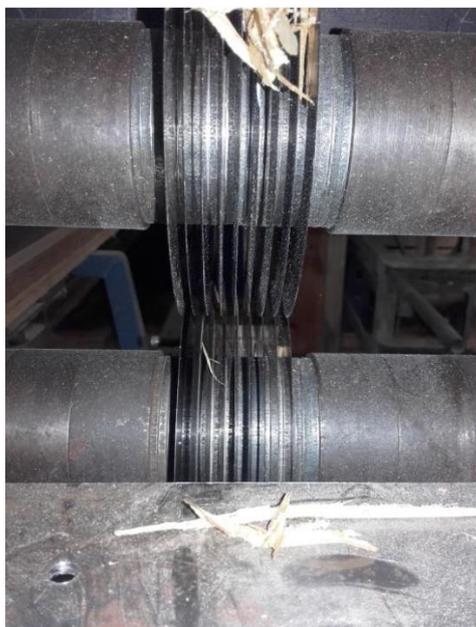


Bild 8:

Ansicht der Antriebswellen mit den für beide Partikelgrößen eingebauten Messersätzen.

Anhand der Skizze des Blattbündels ist auch erkennbar, dass die Enden der sichelförmigen Blätter, die seitlich nah aneinander liegen, nahezu kein dämmendes Schwammgewebe besitzen. Um die Dämmeigenschaften der Platte weiter zu verbessern, lässt sich dieser Bereich vorab vom Blattbündel abtrennen, wie in Bild 9 schematisch dargestellt.

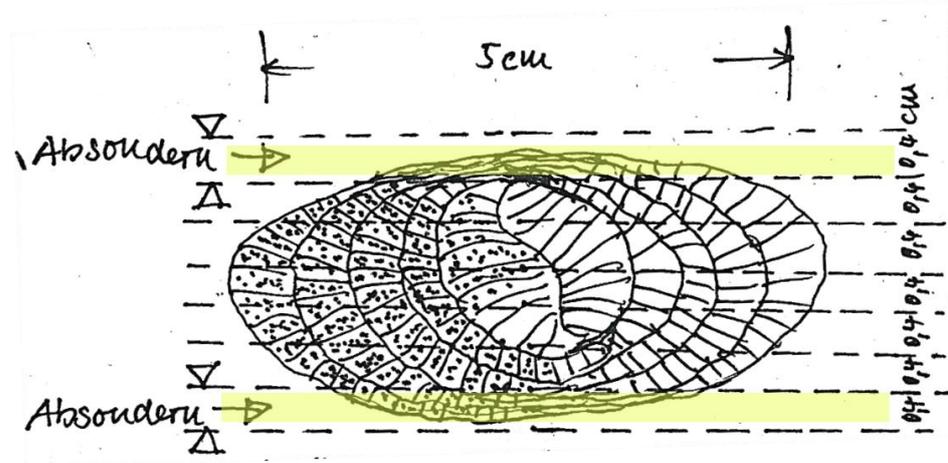


Bild 9:  
Prinzip der Abtrennung aerenchymarmer Seitenbereiche.

Um dies auch für größere Typhablattmassen bewerkstelligen zu können, wurde eine Seitenabtrennanlage konzipiert und gebaut, wie sie in Bild 10 skizzenartig dargestellt ist.

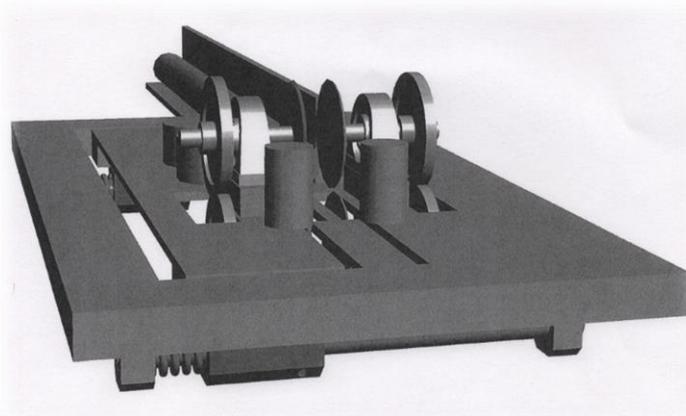


Bild 10:  
Entwurfsskizze einer Anlage zur Abtrennung der aerenchymarmen Seitenbereiche der Typhablattbündel.

Der Aufbau einer derartigen Anlage hat sich als unerwartet schwierig herausgestellt, auch weil die Typhablattbündel sich nicht nur zu den Blattspitzen hin konisch verjüngen, sondern weil sie zumeist auch in sich

verdreht wachsen. Bild 11 zeigt einen Zwischenstand der Anlagenentwicklung mit den Anpressrollen und der Antriebsmechanik.

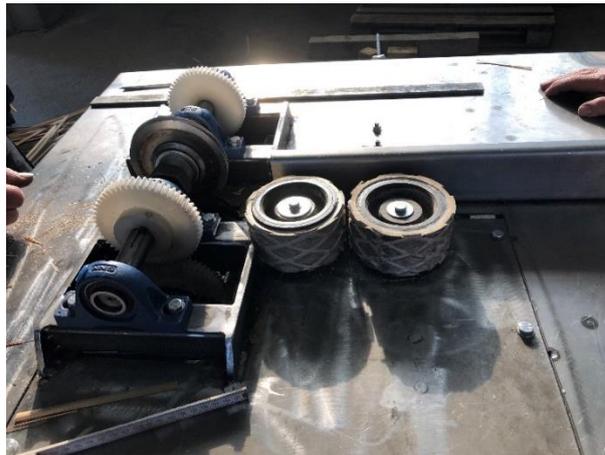


Bild 11:  
Zwischenstand der Anlagenentwicklung mit den Anpressrollen und der Antriebsmechanik.

Beim einem Maschinenbauunternehmen vor Ort wurde diese Anlage hergestellt und auf Funktionsfähigkeit überprüft (siehe Bild 12). Zu beachten ist dabei, dass durch die Abtrennung der Seitenabschnitte die Typhablattbündel ihren Zusammenhalt verlieren. Dieser Anlagenteil muss deshalb so in die Gesamtfertigungsanlage eingebaut werden, dass die Seitenabtrennung möglichst in geringem Abstand zu den Kreismessersätzen zur Längsaufspaltung positioniert sind.



Bild 12:  
Überprüfung der Anlage zur Abtrennung der aerenchymarmen Seitenbereiche auf Funktionsfähigkeit.

## 4 Optimierung der Aufdachdämmung

### 4.1 Variation des Bindemittels

Zur Optimierung der Aufdachdämmung wurden die folgend aufgelisteten ganz unterschiedliche Bindemittel in die Untersuchungen einbezogen:

- Magnesit mit MgCl/MgSO<sub>4</sub>
- Blotalbumin
- Kombi Magnesit/Blotalbumin
  
- Kasein
- Wasserglas
- Geopolymer
- Zement

Der Einsatz der ersten drei Bindemittel-Varianten wird ausführlich im Kapitel 0 beschrieben, weshalb hier nicht weiter darauf eingegangen wird. Die Anwendung von Kasein führte einerseits zu relativ instabilen Probekörpern, die bei Kontakt mit Wasser aufgrund der Löslichkeit von Kasein weiter an Festigkeit verloren. Andererseits führt das Kasein zu einer deutlich höheren mikrobiellen Anfälligkeit. Aus diesen Gründen wurde dieser Ansatz nicht weiterverfolgt. Auch die Versuche mit Wasserglas wurden nicht weiter vertieft. Das Probenmaterial wies zwar eine relativ hohe Druckfestigkeit auf, aufgrund seiner hohen Sprödigkeit löste sich der Partikelverband allerdings schnell bei einer Biegebeanspruchung.

Die in Kapitel 5.1 beschriebenen Tests mit einer Anlage zur Herstellung von Holzwolle-Leichtbauplatten, die mit Zement als Bindemittel hergestellt werden, waren Anlass auch für das Typhamaterial den als besseres Bindemittel geltenden Zement auf dessen Eignung zu testen. Dabei kamen unterschiedliche Zementarten zum Einsatz, ein Grauzement und zwei Weißzemente, wovon einer die Bezeichnung Deor Weißzement trug. Bei diesen Untersuchungen ging es auch um die Fragestellung, ob für Typha-Partikel die Bestäubung als Applikation des Bindemittels geeignet ist.

Als Grundmaterial wurden die Typha Stäbe in der bisherigen, nicht verbesserten Schneidetechnik hergestellt. Zur Erkundung der Festigkeitseigenschaften wurden drei verschiedene Zementsorten in „Bestäubungstechnik“ bei folgenden Veränderlichen angewendet: Rohstoff gewaschen und ungewaschen, Zementanteil, Wasseranteil. Bild 13 bis Bild 18 zeigen die Ergebnisse der Versuche mit Zementbindung. Mit dargestellt sind die Versuchsparameter sowie das wesentliche Kriterium der Biegefestigkeit. Diese wurde auf einfache und anschauliche Weise durch Aufständern der Platte an den vier Ecken und Beschweren mit Gewichten in Plattenmitte, bis eine Durchbiegung von ca. 1 cm erreicht wurde, demonstriert.

#### Platte VZ-1



#### Testform:

Typha Normalfaser 600 gr.  
Besprühen mit 500ml Wasser  
**Weißzement** 400 gr. mit Sieb eingestreut  
in Pressform gefüllt  
mit 3kp/m<sup>2</sup> gepresst  
Platte beidseitig beheizt

#### Ergebnis:

Platte konsistent aber sehr weich  
Gewicht nach 985 gr.  
Volumen 6.250 cm<sup>3</sup> (50x50x2,5cm)  
Spez.Gewicht: ca. 158 kg/m<sup>3</sup>

#### Belastungstest:

Aufständern der Platte an den vier Ecken  
Beschweren mit Gewichten in Plattenmitte bis eine Durchbiegung von ca.1cm erreicht wird

#### Ergebnis:

Durchbiegung von **1cm** bei 1,5 kg Belastung

Bild 13:

Ansicht der Platte VZ1 mit Versuchsparameter und optisches sowie beziffertes Ergebnis des Belastungstests.

#### Platte VZ-2



#### Testform:

Typha Normalfaser 700 gr.  
2-mal gewaschen  
ausgebreitet zur Trocknung 24 Std.  
Danach Gewicht 1160 gr.  
Besprühen mit 100ml Wasser  
**Weißzement** 400 gr. mit Sieb eingestreut  
In Pressform gefüllt  
Mit 3kp/m<sup>2</sup> gepresst  
Platte beidseitig beheizt

#### Ergebnis:

Platte sehr weich  
Gewicht 1.010 gr.  
Volumen 6.250 cm<sup>3</sup> (50x50x2,5cm)  
Spez.Gewicht: ca.162 kg/m<sup>3</sup>

#### Belastungstest:

Aufständern der Platte an den vier Ecken  
Beschweren mit Gewichten in Plattenmitte bis eine Durchbiegung von ca.1cm erreicht wird

#### Ergebnis:

Durchbiegung von **1cm** bei 1,2 kg Belastung

Bild 14:

Ansicht der Platte VZ2 mit Versuchsparameter und optisches sowie beziffertes Ergebnis des Belastungstests.

### Platte VZ-3



#### Testform:

Typha Normalfaser 700 gr.  
2-mal gewaschen  
Trotz anschließendem intensiven Abpressen Gewicht 2500 gr.  
**Weißzement** 700 gr. mit Sieb eingestreut  
In Pressform gefüllt  
Mit  $3\text{kp/m}^2$  gepresst  
Platte beidseitig beheizt

#### Ergebnis:

Platte sehr weich  
Gewicht 1.455 gr.  
Volumen  $6.250\text{ cm}^3$  ( $50 \times 50 \times 2,5\text{cm}$ )  
Spez.Gewicht: ca.  $233\text{ kg/m}^3$

#### Belastungstest:

Aufständern der Platte an den vier Ecken  
Beschweren mit Gewichten in Plattenmitte  
bis eine Durchbiegung von ca.1cm erreicht wird

#### Ergebnis:

Durchbiegung von **1cm** bei 1,2 kg Belastung

Bild 15:

Ansicht der Platte VZ3 mit Versuchsparameter und optisches sowie beziffertes Ergebnis des Belastungstests.

### Platte VZ-4



#### Testform:

Typha Normalfaser 700 gr.  
2-mal gewaschen  
Trocknung ausgebreitet 24 Std. Gewicht 967 gr.  
300 gr. Wasser aufgesprüht  
**Weißzement** 700 gr. mit Sieb eingestreut  
In Pressform gefüllt  
Mit  $3\text{kp/m}^2$  gepresst  
Platte beidseitig beheizt

#### Ergebnis:

Platte wirkt etwas stabiler  
Gewicht 1.405 gr.  
Volumen  $6.250\text{ cm}^3$  ( $50 \times 50 \times 2,5\text{cm}$ )  
Spez.Gewicht: ca.  $225\text{ kg/m}^3$

#### Belastungstest:

Aufständern der Platte an den vier Ecken  
Beschweren mit Gewichten in Plattenmitte  
bis eine Durchbiegung von ca.1cm erreicht wird

#### Ergebnis:

Durchbiegung von **1cm** bei 1,0 kg Belastung

Bild 16:

Ansicht der Platte VZ4 mit Versuchsparameter und optisches sowie beziffertes Ergebnis des Belastungstests.

#### Platte VZ-5



#### Testform:

Typha Normalfaser 700 gr.  
2-mal gewaschen  
Zur Trocknung ausgebreitet 24 Stunden  
Danach Gewicht 754 gr.  
500 gr. Wasser aufgesprüht  
**Deor Weißzement** 700 gr. mit Sieb eingestreut  
In Pressform gefüllt  
Mit  $3\text{kp/m}^2$  gepresst  
Platte beidseitig beheizt

#### Ergebnis:

Platte wirkt etwas stabiler  
Gewicht 1.418 gr.  
Volumen  $6.250\text{ cm}^3$  ( $50 \times 50 \times 2,5\text{cm}$ )  
Spez.Gewicht:  $226\text{ kg/m}^3$

#### Belastungstest:

Aufständern der Platte an den vier Ecken  
Beschweren mit Gewichten in Plattenmitte  
bis eine Durchbiegung von ca.1cm erreicht wird

#### Ergebnis:

Durchbiegung von **1cm** bei 2,0 kg Belastung

Bild 17:

Ansicht der Platte VZ5 mit Versuchsparameter und optisches sowie beziffertes Ergebnis des Belastungstests.

#### Platte VZ-7



#### Testform:

Typha Normalfaser 700 gr.  
520 gr. Wasser aufgesprüht  
**Grauzement** 700 gr. mit Sieb eingestreut  
In Pressform gefüllt  
Mit  $3\text{kp/m}^2$  gepresst  
Platte unbeheizt

#### Ergebnis:

Platte wirkt wie VZ-1-6  
Gewicht 1.393 gr.  
Volumen  $6.250\text{ cm}^3$  ( $50 \times 50 \times 2,5\text{cm}$ )  
Spez.Gewicht: ca.  $223\text{ kg/m}^3$

#### Belastungstest:

Aufständern der Platte an den vier Ecken  
Beschweren mit Gewichten in Plattenmitte  
bis eine Durchbiegung von ca.1cm erreicht wird

#### Ergebnis:

Durchbiegung von **1cm** bei 1,0 kg Belastung

Bild 18:

Ansicht der Platte VZ7 mit Versuchsparameter und optisches sowie beziffertes Ergebnis des Belastungstests.

#### Platte VM-4



#### Testform:

Typha Normalfaser 700 gr.  
595 gr. Sole aufgesprüht  
**Magnesit** 440 gr. mit Sieb eingestreut  
In Pressform gefüllt  
Mit 3kp/m<sup>2</sup> gepresst  
Platte unbeheizt

#### Ergebnis:

Platte ist wesentlich stabiler und abriebfester als alle Zement gebundenen Platten  
Gewicht 1394 gr.  
Volumen 6250 cm<sup>3</sup> (50x50x2,5cm)  
Spez.Gewicht: ca. 244 kg/m<sup>3</sup>

#### Vorgehensweise Belastungstest:

Aufständern der Platte an den vier Ecken  
Beschweren mit Gewichten in Plattenmitte  
bis eine Durchbiegung von ca.1cm erreicht wird

#### Ergebnis:

Durchbiegung von **weniger als 1cm bei 16,0 kg Belastung**

Bild 19:

Ansicht der Platte VM4 mit Versuchsparameter und optisches sowie beziffertes Ergebnis des Belastungstests.

Die Versuche zeigen eine relativ geringe Biegefestigkeit. Bereits bei etwa 1 bis maximal 2 kg Belastung erhält man eine Durchbiegung von 1 cm. Vergleicht man dies mit einer Probeplatte mit Magnesit als Bindemittel (Bild 19) erkennt man einen eklatanten Unterschied. Hier braucht es 16 kg für die gleiche Durchbiegung.

#### Zusammenfassung der Zementversuche:

Bei allen Versuchen, Typha mit Zement zu binden, egal:

- welche Sorte Zement
- ob Typha gewaschen oder ungewaschen
- welcher Wasseranteil
- beheizte oder unbeheizte Aushärtung

kann festgestellt werden,

- dass die Ergebnisse ungenügend sind in Bezug auf Druck- und Biegesteifigkeit und Abriebfestigkeit.
- Demgegenüber zeigen die Versuche mit Magnesitbindung unvergleichlich bessere Werte
- Grundsätzlich ist das Bestäubungsverfahren geeignet zur Bindung von Typha-Plattenmaterial
- Für genauere Ergebnisse bedarf es besonderer, vergleichbarer Versuchsreihen

Letztendlich scheint das Typhamaterial sogenannte Zementgifte zu enthalten, die auch nicht in ausreichendem Maße ausgewaschen werden können, weshalb bei der Anwendung von Zement keine ausreichenden Festigkeiten erzielt werden können. Bei den Zementgiften handelt es sich wahrscheinlich um die Polyphenole, die für die hohe mikrobielle Resistenz verantwortlich sind.

Es wurden auch Versuche mit Geopolymer durchgeführt. Geopolymere sind Zwei-Komponenten-Systeme, bestehend aus einem reaktiven Feststoff, der Silizium- und Aluminiumoxide enthält, sowie einer basischen Aktivierungslösung aus Alkalihydroxiden oder -silikaten in Wasser. Der Feststoff ist ein natürliches Gestein oder Mineral, daher die Vorsilbe "Geo". Bild 20 zeigt zwei Varianten der Plattenherstellung mit Geopolymer, wobei bei Geopolymer 1 weißes Kaolin und bei Geopolymer 2 preisgünstigeres rotes Kaolin eingesetzt wurde.

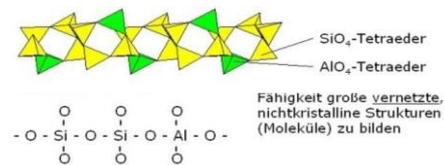


Bild 20:

Ansicht von zwei unterschiedlichen mit Geopolymer gebundenen Typhaplatten. Das Bindemittel der mittig gezeigte Platte ist mit weißem Kaolin und das der unteren Platte mit preisgünstigerem roten Kaolin hergestellt. Im Bild oben ist die Strukturformel von Geopolymer aufgeführt.

Ein wesentliches Ergebnis der Untersuchungen war, dass der aufgrund dessen höherer Bindekraft mit Geopolymer geringe Bindemittelbedarf ausreichend stabile Typhaplatten mit sehr geringer Rohdichte und damit niedriger Wärmeleitfähigkeit ermöglicht. Dabei wird bei einer Rohdichte von  $110 \text{ kg/m}^3$  eine Wärmeleitfähigkeit von  $0,039 \text{ W/mK}$  gemessen.

Außerdem wird erwartet, dass der Energiebedarf für die Herstellung des Bindemittels Geopolymer aufgrund der niedrigeren Brenntemperaturen von Kaolin deutlich geringer ist. Allerdings verliert man damit die hervorragenden

Brandschutzeigenschaften, die vor allem in der Verwendung von Magnesit und der damit verbundenen Abspaltung von Kristallwasser begründet sind.

## 4.2 Variation der Bindemittelapplikation

### 4.2.1 Sprühtechnik

Seit Beginn der Entwicklung des Typha-Boards vor ca. 15 Jahren war offenkundig, dass die vorteilhafteste Applikation des Sorelbinders das Aufsprühen auf die Typha-Partikel mit einem möglichst feinen Sprühnebel ist, wenn sich diese im freien Fall befinden. Dabei ist am besten gewährleistet, dass sich die Typha-Partikel mit einer minimal dünnen Haut überziehen und das Bindemittel möglichst wenig in die Aerenchymbereiche eindringt.

Dabei gibt es zwei grundsätzliche Ansätze, die untersucht wurden:

- Einsprühen in eine Mischtrommel, z.B. von außen durch eine Öffnung in der Trommel
- Besprühen der Partikel mit einem von außen mit Druckluft zu steuernden Automaten, der in der Trommel an geeigneter Stelle montiert ist.

Es zeigte sich deutlich, dass für kleinere Mengen bis zu 50 l loses Schüttvolumen die erste Möglichkeit einen gangbaren Weg darstellt. Dabei wurde erkannt, dass Freifallmischer gegenüber Zwangsmischern etwas bessere Ergebnisse brachten, d.h. eine, dünne gleichmäßigere Beschichtung, da ein wesentlich höherer Anteil der Partikel im freien Fall ohne druckvolle Berührung mit anderen Partikeln vom Sprühnebel getroffen wird.

### 4.2.2 Bepudern mit trockenem Bindemittel

Durch die Möglichkeit, bei einem Hersteller den HWL-Prozess auf Tauglichkeit für die industrielle Typha-Plattenproduktion zu untersuchen, wurde es notwendig, diese Applikationsmethode zu überprüfen. (Siehe hierzu 5.1)

Bei diesen Versuchen musste man sich auf die Zugabe des trockenen, pulverförmigen Bindemittels von außen in die Trommel beschränken, da ein Gerät zum Einblasen des trockenen Bindemittels in eine geschlossene Trommel nicht zur Verfügung stand und dies zu aufwändig herzustellen gewesen wäre.

Es zeigte sich, dass der Zwangsmischer mit seiner Möglichkeit das MgO-Pulver von oben nach und nach den mit Sole (MgCl bzw.  $MgSO_4 + H_2O$ ) vorgemischten Partikeln zuzugeben, die bessere Möglichkeit bietet als der Freifallmischer. Bei

diesem müsste eine Vorrichtung entwickelt werden, die eine kontinuierliche, dosierte Zugabe des MgO-Pulvers waagrecht in die Achse der Mischtrommel ermöglicht.

Es kann festgestellt werden, dass die Bestäubung mit dem trockenen Bindemittel eine brauchbare Applikation ist, die aber in den Versuchen nicht die Qualität des Besprühens in der geschlossenen Trommel erreicht hat. Es wäre denkbar, dass das Bestäuben durch verschiedene Maßnahmen wie z.B. feinerer Mahlgrad des Kausters oder kontinuierliche Beschickung verbessert werden kann.

### 4.3 Optimierung der Partikelgeometrie und des Plattenaufbaus

Ausgangspunkt für die Überlegung und Weiterentwicklung bildeten die im Vorfeld des Projektes erzielten Ergebnisse von Typha-Technik zum dreischichtigen Aufbau des Boards, die zum Ziel hatten gegenüber dem vorliegenden Typha-Board

- das spezifischen Gewicht des Plattenmaterials von  $250 \text{ kg/m}^3$  auf  $150\text{-}180 \text{ kg/m}^3$
- den spezifischen Wärmedämmwert Lambda von  $0,053 \text{ W/mK}$  auf ca.  $0,045 \text{ W/mK}$

zu senken, bei möglichst wenig geminderten mechanischen und statischen Eigenschaften. Die Vorversuche hatten erwiesen, dass dies mit drei Maßnahmen zu erreichen ist.

1. Die Kernschicht des dreischichtigen Plattenaufbaus wird mit wesentlich größeren Partikeln versehen als die Deckschichten, was zur Folge hat, dass insgesamt die Partikeloberflächen und damit der Kleberbedarf kleiner werden. Dies wiederum hat zur Folge, dass das spezifische Gewicht sinkt und damit der Lambda Wert.
2. Um aus größeren Partikeln die freien Lufträume zu verdrängen, sind höhere Drücke erforderlich. Diese bewirken, da sie zugleich und in gleichem Maß auch die Deckschicht betreffen, eine biegesteifere und insgesamt gefestigtere Struktur. So wird trotz der geringeren Masse der Biegesteifigkeit und der Durchtrittsfestigkeit gedient.
3. Die besondere Wuchsform des Rohstoffs Typha, vor allem von Typha-Angustifolia mit seinen kräftigen Blattbündeln mit ovalem Querschnitt (Bild 5) bietet die Möglichkeit, mit einer speziellen Schneidetechnik, wie in Bild 9 gezeigt, die aerenchymärmeren Bereiche des Blattbündels an den beiden flachen Seiten des Ovals abzutrennen. Da das Aerenchym bei Typha der vorrangige Träger der Wärmedämmeigenschaft ist (es hat

für sich gemessen Werte von unter 0.035 W/mK) befördert die alleinige Verwendung des so erzeugten Mittelbereichs für die Kernschicht des Sandwichs die Wärmedämmfähigkeit des Materials erheblich. Dazu kommt, dass im Mittelbereich des Blattbündels aufgrund des sichelförmigen Blattquerschnittes die Blätter dicker sind und somit beim Schnitt größere Partikel entstehen. Dies trägt ebenfalls dazu bei, die Gesamtoberfläche der Partikel und damit auch den Klebstoffverbrauch zu minimieren.

#### Zusammenfassung:

Im Projekt wurden diese drei Gesichtspunkte in folgender Weise verifiziert:

- Die Kernschichtpartikel wurden mit einem Schneidraster von 6mm Schnittbreite aufbereitet, die Deckschicht mit 3 mm Schnittbreite. Im Board machen die Deckschichten je 20% der eingesetzten Blattmasse aus, die Kernschicht 60%.
- Wegen der größeren Partikel in der Kernschicht konnten die Verpressdrücke um ca. 40% erhöht werden, ohne das Aerenchym nennenswert zu quetschen mit dem Effekt, dass die Deckschichten stärker verdichtet und somit zug- und druckfester wurden.
- Die eigens für das Projekt konstruierte Maschine zur Trennung der aerenchym- und sklerenchymhaltigen Bereiche der Typha-Blattbündel wurde so ausgerichtet, dass von der Gesamtblattmasse ca. 60% vom aerenchymreichen Mittelbereich von ca. 2 mal 20% sklerenchymreicheren Seitenbereichen getrennt wurden.

## 5 Tests mit bestehenden Fertigungsanlagen

Im Rahmen des Projektes wurden zwei verschiedene Technologien zur Herstellung einer Typha-Aufsparrendämmplatte untersucht, wobei sich beide technologischen Verfahren deutlich voneinander unterscheiden. Neben der Technologie zur Herstellung von Holzwolle-Leichtbauplatten wurde die Spanplattentechnologie getestet. In Kapitel 5.1 sind die Versuche zur Produktion von Typha-Aufsparrendämmplatten mittels einer Holzwolle-Leichtbauplatten-Produktionsanlage sowie die dabei erzielten Ergebnisse beschrieben. Kapitel 5.2 stellt die Versuche zur Herstellung einer Typha-Aufsparrendämmplatte unter zur Hilfenahme einer Spanplattenpilotanlage dar. Weiterhin werden die Untersuchungsergebnisse dargestellt. Tabelle 1 gibt einen Versuchs-Überblick über die eingesetzten Technologien, Versuchsanzahl und getestete Eigenschaften

Tabelle 1: Übersicht zu eingesetzten Technologien, Versuchsanzahl und getestete Eigenschaften.

	<b>Versuche A</b>	<b>Versuche B</b>
Eingesetzte Technologie	Holzwolle-Leichtbau-Platten	Spanplatten
Versuchsanzahl	2 (1Produktionsversuch sowie 1 Beleimungsversuch)	6 (5 Produktionsversuche; 1 Vorversuch)
Getestete Eigenschaften	Festigkeitseigenschaften; Wasseraufnahme, Wärmeleitfähigkeit; Brandeigenschaften	Festigkeitseigenschaften; Wasseraufnahme, Wärmeleitfähigkeit; Brandeigenschaften

### 5.1 Versuche mittels der Technologie zur Herstellung von Holzwolle-Leichtbauplatten (Versuche A)

In 2 Versuchen wurde überprüft, ob die Technologie zur Herstellung von Holzwolle-Leichtbauplatten zur Herstellung einer Typha-Aufsparrendämmplatte geeignet ist. Neben einem Produktionsversuch auf einer bestehenden Anlage für Holzwolle-Leichtbauplatten wurde ein Versuch zum Bindemittelauftrag auf Typha-Partikel in an die HWL-Produktion angepasster Art und Weise durchgeführt.

#### 5.1.1 Beschreibung des Produktionsprozesses/ Prozessschritte

Ausgangspunkt der durchgeführten Versuchsreihen war die von der Saint-Gobain ISOVER G+H AG vermittelte Verbindung zu einem Hersteller von Holzwolle-Leichtbauplatten (HWL-Platten) und der Möglichkeit, dessen Produktionsweisen und Produktionskapazitäten hinsichtlich einer Eignung für die Herstellung von Typha-Platten zu überprüfen. Zur Klärung dieser Frage

wurde von Seiten des Herstellers ein Versuchstag in den HWL-Produktionshallen zur Verfügung gestellt.

Der grundlegende Unterschied beim HWL-Herstellungsprozess zum bisherigen Vorgehen bei der Typha-Plattenherstellung betrifft zwei Bereiche:

- Beim vorgefundenen HWL-Prozess wird Zement als Bindemittel verwendet, bei Typha die Magnesit Bindung
- das Bindemittel wird beim Mischvorgang trocken auf die feuchten Partikel aufgestäubt, bei Typha wird ein feiner Nebel der MgO-Emulsion auf die trockenen Partikel in der Mischtrommel aufgesprüht.

Des Weiteren ist in diesem Zusammenhang festzustellen, dass die jeweiligen Rohstoffpartikel auf völlig unterschiedlichen Wegen entstehen. Bei HWL sind es rotierende schwere Hobelmaschinen, die aus den Rohholzblöcken mit hohem Energieaufwand die entsprechenden Holzstreifen heraushobeln. Bei Typha sind es sehr feine HSS Kreismesserblöcke, die die Blattbündel längs in Streifen gewünschter Breite aufspalten, wie in Bild 1 gezeigt. Diese werden danach von einer Querschneideeinrichtung auf Stablängen von ca. 70 mm eingekürzt. Die so hergestellten Typha-Partikel wurden anstelle der Hobelspäne in den Produktionsprozess eingeschleust.

Der HWL-Prozess stellte sich grob skizziert folgendermaßen dar:

1. Erstellen der Hobelspanstreifen aus Rundholzstücken mit anschließender Lagerung in Silos
2. Entnahme der Späne aus den Silos, wässern und abpressen der überschüssigen Feuchte
3. Beschicken in die Portionswaage (Bild 21)
4. Beschicken in die Mischtrommel mit Zugabe der aus 3) errechneten Zementmenge
5. Ausstreuen des Partikel-Zementgemisches auf das Band und egalisieren des Streuguts in den auf dem Band fortlaufenden Einzelformkästen (Bild 22)
6. Stapeln der Einzelformkästen mit Einpressen der seitlich überstehenden Partikel und anschließendem Beschweren mit Gewichten (Bild 22 rechts).



Bild 21:  
Beschicken in die Portionswaage und Ausstreuen des Partikel-Zementgemisches auf das Band.



Bild 22:  
Egalisieren des Streuguts in den auf dem Band fortlaufenden Einzelformkästen (links) und Stapeln der Einzelformkästen mit Einpressen der seitlich überstehenden Partikel und anschließendem Beschweren mit Gewichten (rechts).

Die vorbeschriebenen Einzelschritte 1-6 des Herstellungsprozesses wurden für die Verwendung von Typha-Partikeln anstelle von Holzwolle wie folgt angepasst.

1. Herstellen der Typha-Partikel in Streifen mit feinen rotierenden Kreismessern und Einkürzen mit der Querschneideeinrichtung wie beschrieben
2. Da zum Härten der Sorelbindung eine Zugabe von  $MgCl$  oder  $MgSO_4$  in gelöster Form erforderlich ist, wurden vorab portionsweise die Typhapartikel mit definierten Mengen dieser Lösungen besprüht und danach
3. im normalen Bandherstellungsprozesses der Portionswaage zugeführt
4. Anstatt Zement wurde hier die entsprechende aus 3) errechnete Menge kaustisch gebranntes  $MgO$  zugegeben, Mahlgrad / Körnung ähnlich Zement
5. Normaler Prozess des Ausstreuens der Partikel
6. Dieser Produktionsschritt müsste auf ein Typha angepasstes Verfahren leicht modifiziert werden: Das schnelle Einschieben der seitlich überstehenden Partikel geschieht bei HWL mit kurz von der Seite her beidseitig eingreifenden Blechen. Diese schieben in einer schnellen Bewegung die überstehenden Partikel so unter den Rand des darüber liegenden nächsten Einzelformkastens im Stapel, dass nichts über die Formränder hinausragt. Bei der Verarbeitung von Typha müssten diese Bleche durch dickere Elemente ersetzt werden, da das Typha-Material mit höherem Duck und mehr Volumen seitlich austritt. Wegen des höheren erforderlichen Drucks muss auch mit höheren Gewichten beschwert werden, damit die Formen nicht überquellen.

#### Ergebnis und Schlussfolgerung:

Die HWL Produktionsweise eignet sich bedingt zur Herstellung von Typha-Boards mit folgenden Einschränkungen in der Herstellung:

- Die Schneidetechnik zur Herstellung der Rohpartikel von HWL und Typha ist, wie schon dargelegt, komplett verschieden. Die Technik von Typha ist wesentlich einfacher und weniger energieaufwändig. Dieser Vorteil wird aber durch die notwendigerweise höhere Lagerkapazität aufgewogen.
- Die Tränkung der Typha-Partikel mit Sole und das anschließende Abpressen der überschüssigen Feuchte auf das erforderliche Maß können vergleichbar gut gelingen. Hierbei müsste nur das Wasser bei HWL durch Sole ersetzt werden.
- Typha-Partikel können nicht sinnvoll mit Zement gebunden werden, wie in Kapitel 4.1 gezeigt werden konnte. Dieser muss durch Magnesit ersetzt werden. Dieses Bindemittel hätte im Übrigen auch positive Effekte auf die Festigkeitseigenschaften und Nachhaltigkeit von HWL Produkten. Dies wird jedoch derzeit nicht eingesetzt, weil Zement wegen der viel höheren Produktionsmengen billiger ist als das viel niedriger gebrannte kaustische  $MgO$ .

- Alle weiteren Anpassungen des HWL-Prozesses für die Herstellung von Typha-Dreischichtmaterial lassen sich mit geringem Kostenaufwand realisieren.

### 5.1.2 Durchgeführte Versuche und Ergebnisse

In der Folge werden die Ergebnisse der durchgeführten Versuche dargestellt. Dabei werden zunächst Methoden des Bindemittelauftrags auf Typhapartikel beschrieben und im Anschluss daran die Produktionsversuche. Mit aufgelistet werden dabei die jeweils an den Proben ermittelten Materialkennwerte.

#### Versuch zum Bindemittelauftrag auf Typha-Partikel:

Im Rahmen dieses Versuches wurden Untersuchungen zum Bindemittelauftrag durchgeführt. Es sollte das für den Herstellungsprozess von HWL-Platten übliche Verfahren zum Auftrag des Bindemittels („Bepuderung“) simuliert, für Typha-Partikel untersucht und optimiert werden.

Hierzu wurde das Verfahren im Technikum der Firma Typha Technik im Versuchsmaßstab nachvollzogen, Probeplatten gepresst und diese hinsichtlich ihrer Eigenschaften untersucht. Da Typha-Partikel auf Grund ihres Schwammgewebes ein stärkeres Saugverhalten zeigen als Holzwolle, wurden ebenfalls Optimierungsversuche zur Hydrophobierung der Partikel vor der Bindemittelzugabe durchgeführt. Bild 23 zeigt Schritt 1 und 2 des Versuchsablaufes. Die Schritte 3 und 4 sind in Bild 24 dargestellt.



Bild 23:

Ablauf des Versuches: Schritt 1 Tränkung von hydrophobierten oder unhydrophobierten Typha-Partikeln in Sole (Mg-Chlorid) (links); Schritt 2 Umfüllen der Typha-Partikel in trockene Umgebung (rechts).



Bild 24:  
Ablauf des Versuches: Schritt 3 Abpressen überschüssiger Solen- Flüssigkeit in den Typha-Partikel; Schritt 4 Bepudderung der Typha-Partikel mit Mg.

Im Rahmen eines ersten Versuches wurden unbehandelte Typha-Partikel eingesetzt. Nicht dargestellt ist die anschließende Streuung der Typha-Partikel in Streukästen, das Verpressen und Arretieren in der Form sowie das Ausschalen nach einer definierten Zeit. Im Zuge des zweiten Versuches wurden die Typha-Partikel vorab mit einem Hydrophobierungsmittel versetzt.

Zur Einschätzung des Versuches wurden die Probepplatten hinsichtlich der Zugfestigkeit und der Wasseraufnahme untersucht. Bild 25 zeigt die Ergebnisse der Zugfestigkeitsprüfung. Je Versuchsvariante wurden 3 Prüfkörper gemessen.

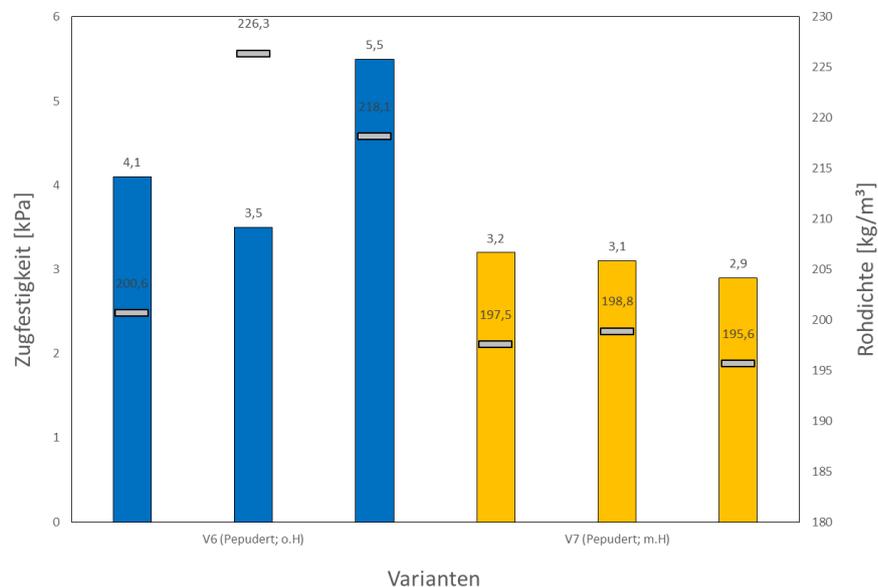


Bild 25:  
Ergebnisse der Zugfestigkeitsprüfung der Versuchsreihen V6 ohne und V7 mit Hydrophobierung. Je Versuchsvariante wurden 3 Prüfkörper gemessen.

Versuchsreihe V6, bei welcher unhydrophobierte Typha-Partikel eingesetzt wurden, erzielte eine mittlere Zugfestigkeit von  $\sim 4,4$  kPa, wobei der Mittelwert der Prüfkörper-Rohdichte  $\sim 215$  kg/m<sup>3</sup> betrug. Versuchsreihe V7, bei welcher hydrophobierte Typha-Partikel eingesetzt wurden, erzielte eine mittlere Zugfestigkeit von  $\sim 3,1$  kPa, wobei der Mittelwert der Prüfkörper-Rohdichte  $\sim 197$  kg/m<sup>3</sup> betrug. Somit zeigt sich, dass die Hydrophobierung der Typha-Partikel lediglich einen geringen Einfluss auf die Zugfestigkeit nimmt.

Bild 26 zeigt die Ergebnisse der Prüfung der Wasseraufnahme. Je Versuchsvariante wurde orientierend 1 Prüfkörper gemessen. Versuchsreihe V6 erzielte hierbei eine Wasseraufnahme von  $\sim 5,2$  kg/m<sup>2</sup>, wobei die Prüfkörper-Rohdichte  $\sim 192$  kg/m<sup>3</sup> betrug. Versuchsreihe V7 erzielte eine Wasseraufnahme von etwa  $3,7$  kg/m<sup>2</sup> auf, wobei die Prüfkörper-Rohdichte  $\sim 219$  kg/m<sup>3</sup> betrug. Somit zeigt sich, dass die Hydrophobierung der Typha-Partikel wie erwartet einen merklichen Einfluss auf die Wasseraufnahme des Produktes hat. Allerdings unterschreitet das Resultat nicht den in DIN 4108-10 vorgegebenen Wert  $\leq 2$  kg/m<sup>2</sup> (in Bezug auf Holzfaserdämmstoffe) zur Anwendung des Produktes im Steildach (DAD-ds).

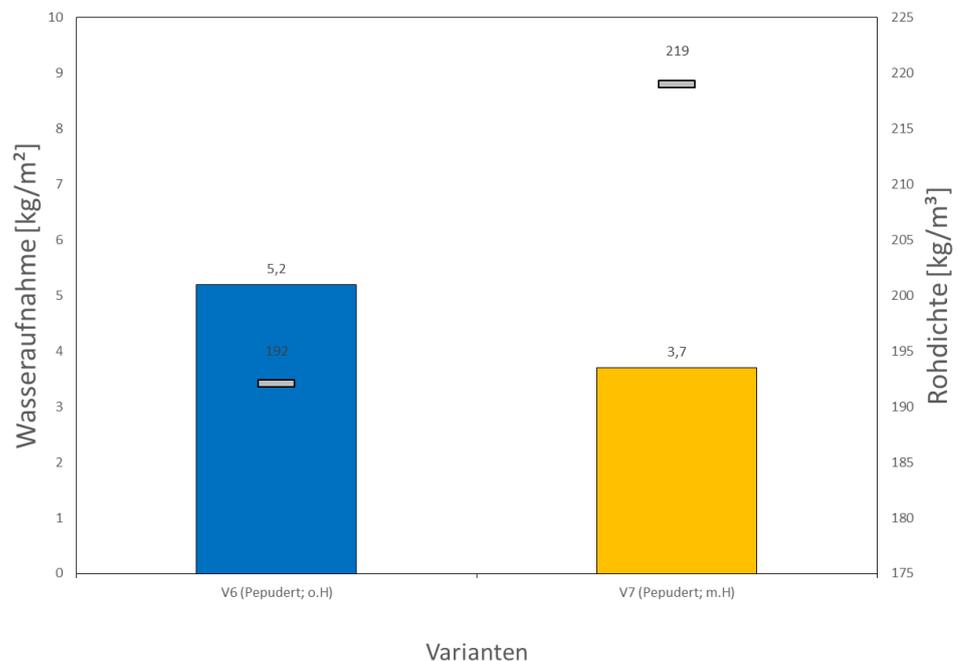


Bild 26:  
Ergebnisse der Wasseraufnahmepfung der Versuchsreihen V6 ohne und V7 mit Hydrophobierung. Je Versuchsvariante wurden 1 Prüfkörper gemessen.

Im Rahmen der Untersuchungen zum Bindemittelauftrag auf Typha-Partikel, welche das für den Herstellungsprozess von Holzwolle-Platten übliche Verfahren („Bepudern“) simulieren sollte, zeigte sich somit, dass eine Vorbehandlung der Typha-Partikel zielführend sein kann. Der Einsatz von Hydrophobierungsmittel wirkte sich im Zuge des Versuches unwesentlich auf die Zugfestigkeit der Probeplatte aus, aber es wurde ein reduzierter Wert für

die Wasseraufnahme ermittelt, welcher zum Erzielen des für den Anwendungsbereich DAD-ds definierten Wert  $\leq 2 \text{ kg/m}^2$  (in Bezug auf Holzfaserdämmstoffe) eventuell weiter optimiert werden muss.

## Produktionsversuch

Im Rahmen des Produktionsversuches wurden insgesamt 12 Typha-Platten produziert (Bild 27). Dies entsprach einer Menge von etwas mehr als  $0,5 \text{ m}^3$ . Tabelle 2 gibt einen Überblick über die hergestellten Probeplatten sowie den Abmaßen und der Rohdichte. Es wurden überwiegend Probeplatten mit einer Länge von 1,9 m und einer Breite von 0,6 m produziert, welche in der Länge für die Probenvorbereitung halbiert wurden. Die Dicke betrug  $\sim 0,07 - 0,08 \text{ m}$ . Die durchschnittliche Rohdichte der Probeplatten betrug  $231,9 \text{ kg/m}^3$ , wobei der höchste Wert bei  $254,4 \text{ kg/m}^3$  und der niedrigste Wert bei  $207,0 \text{ kg/m}^3$  lag.

Tabelle 2:  
Übersicht zu den im Produktionsversuch hergestellten Probeplatten.

Platte Nr.	Gewicht [kg]	Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]	Länge [mm]	Breite [mm]	Höhe [mm]
3B	7,809	228,3	950	600	70-80
4B	8,512	207,0			
5A	8,160	238,6			
5B	8,684	253,9			
6A	8,103	236,9			
6B	8,034	235,2			
7A	8,160	238,6			
7B	8,700	254,4			
8A	7,867	230,0			
8B	7,595	222,1			
9A	7,521	219,9			
10A	7,860	229,8	600	450	
10B	3,570	220,4			



Bild 27:  
Mit der HWL-Plattenfertigungsanlage hergestellte Typha-Aufsparrendämmplatten.

Mechanische Eigenschaften:

Die produzierten Typha-Aufsparrendämmplatten wurden hinsichtlich ihrer mechanischen Eigenschaften untersucht. Es wurden die Zugfestigkeit, die Druckspannung bei 10% Stauchung sowie die Biegefestigkeit ermittelt und in Bezug auf die Rohdichte einzelnen Prüfkörper dargestellt.

Zur Ermittlung der Zugfestigkeit in Anlehnung an DIN EN 1607 wurden 8 Prüfkörper (n = 8) getestet. Bild 28 zeigt die Ergebnisse der Zugfestigkeitsprüfung. Im Mittel wurde eine Zugfestigkeit von 1,1 kPa erzielt, wobei der Mittelwert der Prüfkörper-Rohdichte 230 kg/m<sup>3</sup> betrug. Es wurden Zugfestigkeiten zwischen 0,6 kPa bis 1,8 kPa erzielt. Eine zu erwartende Korrelation zwischen Prüfkörperrohddichte und Zugfestigkeit liegt nicht vor. Als Gründe können u.a. deutliche qualitative Unterschiede der Produktoberfläche sowie eine sichtbare Inhomogenität der Bindemittelverteilung im Produkt herangeführt werden.

Im Vergleich dazu erzielen Holzfaserdämmstoffen mit einer Rohdichte von etwa 180 kg/m<sup>3</sup> bis 190 kg/m<sup>3</sup> Zugfestigkeiten von rund 50 kPa. Die Werte zu den Holzfaserdämmstoffen wurden dabei durch Messungen eines vergleichbaren handelsüblichen Produktes erzielt. Tabelle 3 listet die Untersuchungsergebnisse der Vergleichsmessung auf.

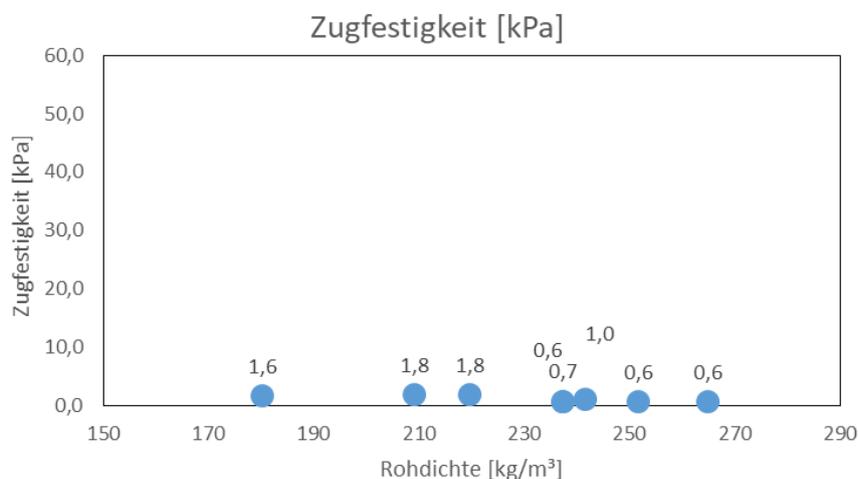


Bild 28:  
Zugfestigkeit in Abhängigkeit der Rohdichte der durch den Holzwolleleichtbauplatten-Produktionsprozess hergestellten Probelplatten.

Tabelle 3:  
Messergebnisse zur Zugfestigkeit der Vergleichsmessung eines  
Holzfaserdämmstoffes.

Nr.	Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]	Zugfestigkeit [kPa]
1	188,1	43,0
2	190,9	54,3
3	190,0	53,0
4	187,2	47,6
5	188,8	47,0
<b>Mittelwert</b>	<b>189,0</b>	<b>49,0</b>

Zur Ermittlung der Druckspannung bei 10 %iger Stauchung in Anlehnung an DIN EN 826 [4] wurden 7 Prüfkörper (n = 7) getestet. Bild 29 zeigt die Ergebnisse der Druckspannung bei 10 % Stauchung. Im Mittel wurde eine Druckspannung von 148,3 kPa erzielt, wobei der Mittelwert der Prüfkörper-Rohdichte 225 kg/m<sup>3</sup> betrug. Es wurden Druckspannungen zwischen 140 kPa bis 160,2 kPa gemessen. Eine zu erwartende Korrelation zwischen Prüfkörperroh-dichte und Druckspannung konnte auch bei diesen Messungen nicht festgestellt werden.

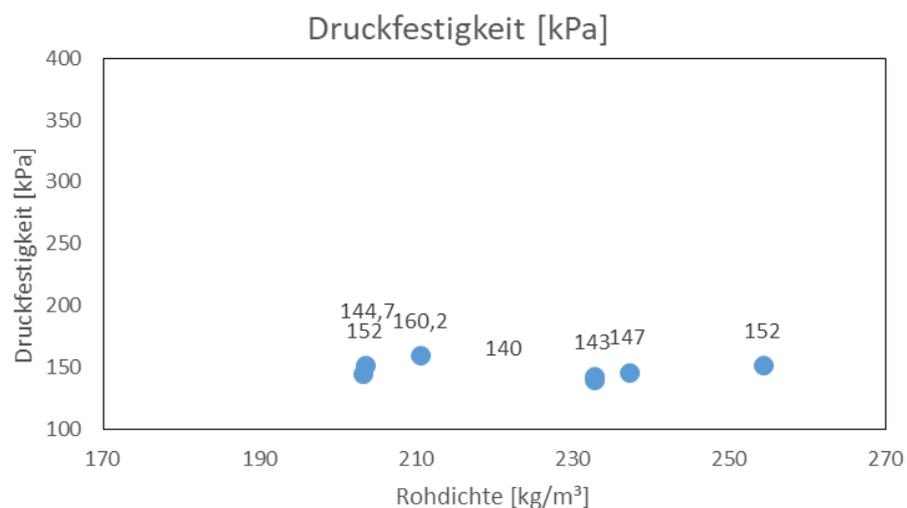


Bild 29:  
Druckspannung bei 10 % Stauchung [kPa] in Abhängigkeit der Rohdichte der  
durch den HWL-Produktionsprozess hergestellten Probeplatten.

Ein Vergleich zu Holzfaserdämmstoffen mit einer Rohdichte ~ 190 kg/m<sup>3</sup> zeigt, dass der Holzfaserdämmstoff trotz geringerer Rohdichte eine fast doppelte Druckspannung, nämlich etwa 290 kPa, aufweist. Tabelle 4 listet die Untersuchungsergebnisse der Vergleichsmessung auf.

Trotz des deutlichen Unterschiedes der Ergebnisse der Typha-Aufsparrendämmplatte zur Holzfaserdämmplatte werden allerdings die nach

DIN 4108-10 [ 5] geforderten Festigkeitsanforderungen (Referenzwert für Holzfaserdämmstoffe: 100 kPa) zur Anwendung als Aufsparrendämmplatte im Steildach (DAD-ds) erreicht.

Tabelle 4:  
Messergebnisse zur Druckspannung bei 10 % Stauchung der Vergleichsmessung eines Holzfaserdämmstoffes.

Nr.	Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]	Druckspannung bei 10 % Stauchung [kPa]
1	190,2	293,7
2	189,9	292,4
3	190,9	295,5
4	190,3	293,1
5	190,3	283,4
<b>Mittelwert</b>	<b>190,3</b>	<b>291,6</b>

Zur Ermittlung der Biegefestigkeit in Anlehnung an DIN EN 12089 [6] wurden 8 Prüfkörper (n = 8) getestet. Bild 30 zeigt die Messung der Biegefestigkeit im Rahmen eines 3-Punkt-Biegeversuches. In Bild 31 sind die Ergebnisse der Biegefestigkeit dargestellt. Im Mittel wurde eine Biegefestigkeit von 134 kPa erzielt, wobei der Mittelwert der Prüfkörper-Rohdichte 192 kg/m<sup>3</sup> betrug. Es wurden Biegefestigkeiten zwischen 69,9 kPa bis 311,6 kPa erzielt.



Bild 30:  
Prüfaufbau eines 3-Punkt-Biegeversuch zur Ermittlung der Biegefestigkeit.

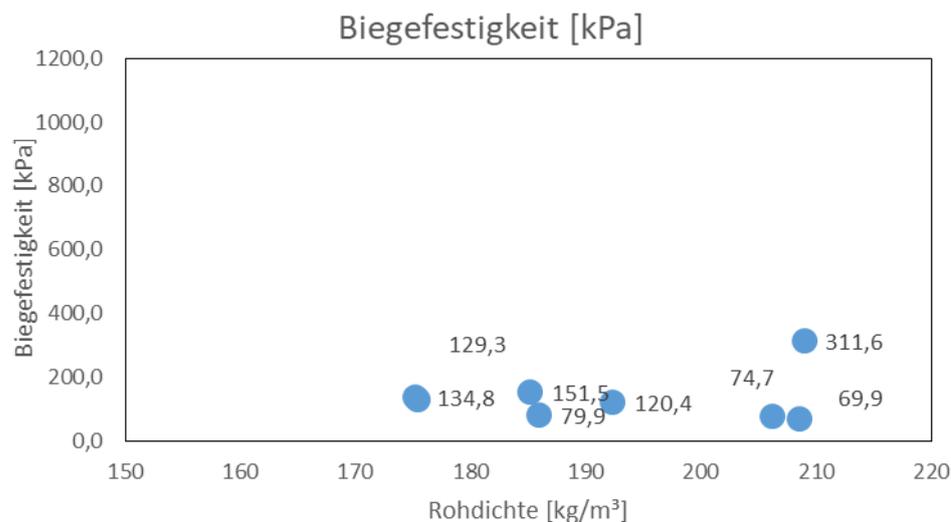


Bild 31:  
Biegefestigkeit in Abhängigkeit der Rohdichte der durch den Holzwoleleichtbau-Platten-Produktionsprozess hergestellten Probeplatten.

Ein Vergleich zu Holzfaserdämmstoffen mit einer Rohdichte ~ 190 kg/m<sup>3</sup> zeigt, dass der Holzfaserdämmstoff trotz geringerer Rohdichte eine im Mittel um den Faktor 7 bis 8 höhere Biegefestigkeit von etwa 1025 kPa aufweist. Tabelle 5 listet die Untersuchungsergebnisse der Vergleichsmessung.

Tabelle 5:  
Messergebnisse zur Biegefestigkeit der Vergleichsmessung eines Holzfaserdämmstoffes.

Nr.	Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]	Biegefestigkeit [kPa]
1	187,2	1036,7
2	188,7	1060,2
3	187,6	956,0
4	188,5	1010,9
5	190,4	1054,2
6	184,4	1028,1
<b>Mittelwert</b>	<b>187,8</b>	<b>1024,35</b>

#### Überprüfung des Brandklasse

Die im Rahmen des Holzwole-Produktionsprozess hergestellten Probeplatten wurden zur Bestimmung der Brandklasse nach DIN EN 13501 [7] getestet. Hierzu wurden 2 SBI – Tests durchgeführt. Ein SBI-Test (Single Burning Item-Test) simuliert den Beginn eines Brands, um das Brandverhalten von Bauprodukten zu beurteilen. Tabelle 6 zeigt die Einordnung der Messwerte in die Klassifizierungsskala zur Bestimmung der Brandklasse für Versuch 1. Tabelle 7 veranschaulicht dies für Versuch 2.

Zur Einstufung in eine Brandklasse nach DIN EN 13501 [7] müssen je nach Brandklasse verschiedene Prüfungen absolviert werden. Zur Einstufung in A bedarf es neben dem SBI-Test noch die Überprüfung des Produktes im ISO-Ofen und der Bestimmung des PCS-Wertes (Heizwert), wobei die Durchführung des Tests im ISO-Ofen mit dem Typha-Produkt nicht zielführend ist.

Tabelle 6:  
Messwerte und Klassifizierungsskala des SBI-Testes (Versuch 1) der durch den Holzwolle-Produktionsprozess hergestellten Typha-Probeplatten (Auszug aus dem Versuchsprotokoll).

		test data	Euroclass acc. EN 13501-1				
			A1	A2	B	C	D
THR	[MJ]	<b>2,038</b>	≤4,0	≤7,5	≤7,5	≤15,0	-
FIGRA 0,2	[W/s]	<b>26,83</b>	≤20	≤120	≤120	-	-
FIGRA 0,4	[W/s]	<b>19,36</b>	-	-	-	≤250	≤750
LFS	Yes/No	<b>No</b>	No	No	No	No	-
			s1	s2	s3		
TSP	[m <sup>2</sup> ]	<b>27</b>	≤50,0	≤200,0	-		
SMOGRA	[m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	<b>0</b>	≤30,0	≤180,0	-		
			d0	d1	d2		
FDP persisting shorter than 10s	Yes/No	<b>No</b>	No	Yes			
FDP persisting longer than 10s	Yes/No	<b>No</b>	No	No	Yes		

Tabelle 7:  
Messwerte und Klassifizierungsskala des SBI-Testes (Versuch 2) der durch den Holzwolle-Produktionsprozess hergestellten Typha-Probeplatten (Auszug aus dem Versuchsprotokoll).

		test data	Euroclass acc. EN 13501-1				
			A1	A2	B	C	D
THR	[MJ]	<b>3,432</b>	≤4,0	≤7,5	≤7,5	≤15,0	-
FIGRA 0,2	[W/s]	<b>110,58</b>	≤20	≤120	≤120	-	-
FIGRA 0,4	[W/s]	<b>65,38</b>	-	-	-	≤250	≤750
LFS	Yes/No	<b>No</b>	No	No	No	No	-
			s1	s2	s3		
TSP	[m <sup>2</sup> ]	<b>21,38</b>	≤50,0	≤200,0	-		
SMOGRA	[m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	<b>0</b>	≤30,0	≤180,0	-		
			d0	d1	d2		
FDP persisting shorter than 10s	Yes/No	<b>No</b>	No	Yes			
FDP persisting longer than 10s	Yes/No	<b>No</b>	No	No	Yes		

Der alleinige SBI-Test für die durch den HWL-Produktionsprozess hergestellten Typha-Probeplatten erlaubt eine Einstufung in die Brandklasse A2 s1 d0. Diese Einschätzung ist allerdings auf Grund des nicht durchführbaren ISO-Ofentests nicht gerechtfertigt. Daher muss zunächst von einer Einstufung in Brandklasse B oder C ausgegangen werden. Diese Einschätzung müsste allerdings durch einen größeren Stichprobenumfang bestätigt werden. Bild 32 zeigt den chronologischen Ablauf des SBI-Tests.



Bild 32:  
Darstellung des Ablaufes/ Durchführung eines SBI – Tests (links nach rechts) der durch den HWL-Produktionsprozess hergestellten Typha-Probeplatten.

Neben den SBI-Tests wurden die durch den HWL-Produktionsprozess hergestellten Typha-Probeplatten hinsichtlich Ihres Glimmverhaltens untersucht. Das Resultat des Glimmtestes zeigt, dass das Produkt nicht zum Glimmen neigt. Die Prüfung wurde mit Probekörpern mit einer Dicke von 70 mm durchgeführt. Zur explizite Bestimmung des Glimmverhaltens bedarf es weiteren Tests mit einer Produktstärke von 100 mm. Bild 33 zeigt den Prüfaufbau und das Resultat des Glimmtestes. Ein senkrecht in einem Rahmen angebrachter Probekörper wird dabei einer Gasbrennerflamme ausgesetzt. Das Schwelen wird ermittelt durch Temperaturmessung mit Thermoelementen sowie die Beobachtung von andauerndem Brennen nach erneuter Entzündung.



Bild 33: Prüfaufbau des Glimmtestes (links) und Prüfergebnis der durch den Holzwolle-Produktionsprozess hergestellten Typha-Probeplatten.

### Überprüfung der Wärmeleitfähigkeit

Zur Einschätzung der Wärmeleitfähigkeit der durch den Holzwolle-Produktionsprozess hergestellten Typha-Probeplatten wurden 2 Prüfkörper getestet. Tabelle 1 können die Messergebnisse entnommen werden.

Tabelle 8:

Tabelle Ergebnisse der Wärmeleitfähigkeitsmessung und Rohdichte von zwei durch den Holzwolle-Produktionsprozess hergestellten Typha-Probeplatten.

	Prüfkörper-Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]	Wärmeleitfähigkeit Lambda TR10 [W/m*K]
Prüfkörper 1	180	0,050
Prüfkörper 2	220	0,052

### Kurz- Zusammenfassung

Im Rahmen der Untersuchungen zu den mechanischen Festigkeiten der Typha-Aufsparrendämmplatte, welche durch den HWL-Produktionsprozess hergestellt wurde, konnte festgestellt werden, dass die erzielten Druckspannungen des Typha-Produktes den Anforderungen zur Verwendung im Anwendungsbereich DAD-ds (in Bezug auf Holzfaserdämmstoffe) nach DIN 4108-10 [5] genügt. Weiterhin zeigten die Untersuchungen zur Brandklasse und dem Glimmverhalten der Typha-Aufsparrendämmplatte orientierende Ergebnisse, die eine Einstufung des Typha-Produktes in die Brandklasse B oder C erlauben. Außerdem belegen orientierende Glimmtests, dass das getestete Typha-Produkt nicht glimmt. Versuche zur Wärmeleitfähigkeit ergaben eine Wärmeleitfähigkeit von ~ 0,050 W/m\*K bis 0,052 W/m\*K.

## 5.2 Versuche mittels der Technologie zur Herstellung von Spanplatten (Versuche B)

In verschiedenen Versuchen wurde die Eignung der Spanplatten-Technologie zur Herstellung einer Typha-Aufsparrendämmplatte überprüft und Versuche zur Modifizierung durchgeführt. Für die Versuche kamen verschiedene Aggregate einer Spanplatten-Pilotanlage zum Einsatz. Dies betrifft vor allem die Partikelstreuanlage mit dem dazugehörigen Förderband. Die anderen für die Spanplattenfertigung verwendeten Anlagen kamen hier nicht zum Einsatz. Tabelle 9 zeigt einen Überblick über die durchgeführten Versuche sowie die im Rahmen des Versuches fokussierten Fragestellungen und Modifizierungsansätze.

Tabelle 9:

Überblick über die durchgeführten Versuche sowie die im Rahmen des Versuches fokussierten Fragestellungen und Modifizierungsansätze.

	Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3	Versuch 4	Versuch 5	Versuch 6
--	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------

Zeitpunkt	Juni 2018	August 2018	August 2018	Januar 2019	Juni 2019	August 2019
Standort*	Standort A	Standort B	Standort A	Standort A	Standort A	Standort A
Tauglichkeit der Technologie	X					
Streuung	X		X			
Plattenaufbau			X			
Bindemittel				X		X
Hydrophobierung		X	X			X
Aushärtung des Bindemittels	X		X			

\* Standort A = Externer Standort mit Spanplattenpilotanlage und weiterer im Rahmen der Versuche genutzter Gerätschaften; Standort B = Technikum der Firma Typha Technik

Im Zuge des 1. Versuches sollte vorwiegend die Tauglichkeit der Spanplatten-Technologie zur Herstellung der Typha-Aufsparrendämmplatte untersucht werden. Die Herstellung – insbesondere die maschinelle Streuung - einer 3-schichtigen Dämmplatte mit Deckschicht- und Mittelschicht-Partikel stand im Fokus des Versuches. Weiterführend sollten alternative Methoden zur Aushärtung des Bindemittels mit dem Ziel getestet werden, die Produktionszeit zu reduzieren.

Versuch 2 wurde in Folge der Erkenntnisse des ersten Versuches konzipiert und hatte zum Ziel, Lösungen zur Reduzierung der Wasseraufnahme der Typha-Aufsparren-Dämmung zu finden. Dazu wurden Untersuchungen zum Einsatz und Einfluss von Hydrophobierungsmittel auf die Wasseraufnahme des Produktes sowie die Festigkeitseigenschaften durchgeführt.

Versuch 3 umfasst eine Vielzahl von Fragestellungen wie weitere Untersuchungen zu Streuung, Plattenaufbau, Hydrophobierung und Aushärtung des Bindemittels. Im Rahmen des Berichtes soll auf ausgewählte Ergebnisse eingegangen werden.

Im Rahmen von Versuch 4 wurde die Tauglichkeit eines herkömmlichen Bindemittels – einem Isocyanat zur Herstellung von Holzfaserdämmstoffen – zur Verwendung bei der Produktion der Typha-Aufsparrendämmplatte getestet. Weiterhin sollten die Versuchsergebnisse als Referenz dem standardmäßig eingesetzten Magnesit gegenübergestellt werden.

Versuch 5 diente in erster Linie zur Herstellung der für die Eindeckung des FlexDa benötigten Probeplatten. Kapitel 6 und 7 können weiterführende Informationen entnommen werden. Der 6. Versuch beinhaltete nochmals eine

Vielzahl von Versuchsansätzen, welche insbesondere die Schwerpunkte „Bindemittel“ und „Hydrophobierung“ umfasste.

Vor der jeweiligen Beschreibung der Versuchsreihe wird zur besseren Übersicht eine tabellarische Zusammenstellung aufgeführt. Diese enthält jeweils die hauptsächlichsten Variationsparameter und die wichtigsten Kennwerte.

### 5.2.1 Beschreibung des Produktionsprozesses/ Prozessschritte

In der Folge wird zunächst der Produktionsprozess und die durchgeführten Prozessschritte erläutert und beschrieben.

Der Produktionsprozess lässt sich in 2 Phasen gliedern, nämlich:

- Partikelherstellung
- Produktherstellung

Die Partikelherstellung wurde im Verlauf der Versuche B stetig weiterentwickelt. Insbesondere die maschinelle Vorabtrennung des sklerenchymarmen Bereiches, welche zu Beginn händisch erfolgte, stand im Fokus der Weiterentwicklung (siehe auch 3.2).

Die Herstellung der Partikel lässt sich in 3 Hauptabschnitte unterteilen:

- a) Abtrennen der sklerenchymarmen Bereiche
- b) Länglicher Zuschnitt des Typha-Blattes
- c) Ablängen der Typha-Blattstreifen (Produkt aus b) in gleich lange Partikel

In einem ersten Schritt wurden die sklerenchymarmen (Außen-) Bereiche des Typha-Blattes der Länge nach zur Steigerung der Partikelqualität, insbesondere in Bezug auf die Dämmeigenschaften, abgetrennt. Dieser Zuschnitt erfolgte, zur Herstellung der in den ersten Versuchen benötigten Partikel, händisch mit großem zeitlichem Aufwand. Bild 34 zeigt Typha-Blätter vor (links) und nach der Abtrennung des sklerenchymarmen Bereiches (rechts).

Im Verlaufe des Projektes wurde eine maschinelle Abtrennung des sklerenchymarmen Bereiches durch die Firma Typha Technik in Zusammenarbeit mit einer Maschinenbaufirma vor Ort entwickelt, was eine deutliche Zeitersparnis der Partikelherstellung bedeutet.



Bild 34:  
Typha-Blätter vor (links) und nach (rechts) der Abtrennung des sklerenchymarmen Bereiches.

Die durch die Vor-Abtrennung des sklerenchymarmen Bereiches vorbereiteten Typha-Blätter werden einer Schneideeinrichtung zur Herstellung der Typha-Partikel zugeführt. In einem ersten Schritt werden die Blattkolben der Länge nach in Streifen geschnitten. Die Schneideeinrichtung erlaubt es, dass Typha-Partikel in zwei unterschiedlichen Breiten zugeschnitten werden können. Somit lassen sich für die Herstellung einer dreischichtigen Typha-Aufsparren-Dämmplatte sowohl feinere Deckschichtpartikel als auch gröbere Mittelschichtpartikel gewinnen.



Bild 35:  
Typha-Blattstreifen bei der Zuführung zur Ablängeeinrichtung (links) und fertige Typha-Partikel (rechts).

Die durch die Schneideeinrichtung hergestellten Typha-Blattstreifen werden auf einem Förderband einem Schlagscherenwerkzeug zugeführt, welches die Blattstreifen in Partikel mit definierter Länge unterteilt. Die fertigen Typha-Partikel werden in einem Bunker gesammelt oder in verschiedenen Behältnissen gelagert für den Transport bereitgestellt. Bild 35 zeigt die Zuführung der Typha-Blattstreifen zum Schlagscherwerkzeug (links) und die fertigen Typha-Partikel (rechts).

## 5.2.2 Plattenherstellung

Die Plattenherstellung wurde im Rahmen der verschiedenen Versuche je nach Fragestellung variiert. Tabelle 9 gibt einen Überblick über den Fokus der verschiedenen Versuche.

Der Herstellungsprozess der Probeplatten lässt sich in 3 Kategorien unterteilen, welche einem chronologischen Ablauf von a) zu c) folgen:

- a) Beleimung der Partikel
- b) Streuung der Partikel
- c) Pressen und Aushärtung der Platte

Folgend werden die 3 Prozesse näher erläutert und beschrieben.

### a) Beleimung der Partikel

Im ersten Schritt der Produktherstellung erfolgte die Beleimung der Typha-Partikel mittels Bindemittel. Im Rahmen der Versuche wurde überwiegend Magnesit ( $MgCO_3$ ) als Bindemittel verwendet. Die aufgebrachte Bindemittelmenge wurde bei Deckschicht- und Mittelschicht-Partikel variiert. Tabelle 10 zeigt die Bindemittelanteile der verschiedenen Partikel.

Tabelle 10:  
Bindemittelanteile der verschiedenen Partikelarten der Typha-Aufsparren-dämmplatte.

Partikel	Anteile (Magnesit: Typha)
Deckschicht-Partikel	1 zu 1
Mittelschicht-Partikel	0,8 zu 1

Neben dem Bindemittel Magnesit wurden weitere Bindemittel eingesetzt. Tabelle 11 zeigt die weiteren Bindemittel in den verschiedenen Versuchen.

Tabelle 11:  
Eingesetzte Bindemittel und Anteile.

Versuche	Bindemittel
Versuche 1, 2, 3, 5, 6	Magnesit mit MgCl
Versuch 4	Polymeres Diphenylmethandiisocyanat (PMDI)
Versuch 5, 6	Blutalbumin
Versuch 6	Magnesit + Blutalbumin
Versuch 6	Magnesit mit MgSO <sub>4</sub>

Vor der Besprühung der Partikel mit dem eingesetzten Bindemittel bedarf es der Bindemittelvorbereitung. Das Bindemittel Magnesit, welches aus 2 Hauptkomponenten besteht, der MgO-Lösung, der wiederum MgCl bzw. MgSO<sub>4</sub> zugegeben wird, muss vorab in einem bestimmten Mischungsverhältnis angerührt werden. Es erfolgte zuerst das Abwiegen der Komponenten und danach das Vermengen (Bild 36).



Bild 36:  
Bindemittelvorbereitung: Abwiegen der Bindemittelkomponenten (links) und das Vermengen (rechts).

Der Auftrag des Bindemittels (Beleimung) auf die Typha-Partikel erfolgt mittels Trommelbeleimung. Bild 37 zeigt die mit Typha-Partikel befüllte Beleimungstrommel vor der Beleimung. Das Benetzen der Typha-Partikel mit dem Bindemittel erfolgt durch das Versprühen/ Vernebeln mit einer auf einer starren Achse in der Mitte der Trommel sitzenden Beleimungsdüse.



Bild 37:  
Beleimungstrommel mit Typha-Partikel und Beleimungsdüse.

Während des Beleimungsprozesses rotierte die Trommel und somit die Typha-Partikel um die feststehende Düse. Die Beaufschlagung des Bindemittels auf die Typha-Partikel erfolgte in Versuch 2 am Standort Schönau in adaptierter Weise.

Die Beleimung der Deck- und Mittelschicht-Partikel erfolgte getrennt voneinander / nacheinander. Für einen Versuchsdurchlauf (d.h. die Streuung einer dreischichtigen Typha-Aufsparrendämmplatte mit einer Enddicke von 40 mm mittels Spanplatten-Pilotanlage in einen Streukasten) wurden zu Beginn die Deckschichtpartikel beleimt. Während der Streuung der unteren Deckschicht mit der Pilotanlage wurde die Mittelschicht in der Trommel mit Bindemittel besprüht. Zur Absenkung der Wasseraufnahme der Typha-Aufsparrendämmplatte wurden die Typha-Partikel bei manchen Versuchen vor dem Beleimen der Partikel mit Hydrophobierungsmittel besprüht.

#### b) Streuung der Partikel

Die Streuung der mit Bindemittel benetzten Partikel erfolgte mittels der Spanplatten-Pilotanlage in Streukästen. Vorversuche zeigten, dass das Streuen von Typha-Partikeln mittels Spanplatten-Streuaggregat möglich ist. Die Ergebnisse zeigten weiterhin, dass lediglich das Mittelschicht-Streuaggregat ein zufriedenstellendes Streuergebnis aufweist (Bild 38 und Bild 39). Das Deckschicht-Streuaggregat wurde in den Vorversuchen als nicht geeignet identifiziert. Somit wurde die Streuung beider Partikel-Varianten, also Deck- und Mittelschicht-Partikel, im Rahmen aller Versuche – neben der händischen

Streuung bei manchen Versuchen – durch das Mittelschicht-Streuaggregat realisiert.



Bild 38:  
Vorversuche zur Streuung von Typha-Partikeln mittels der Spanplatten-pilotanlage: Mit Typha-Partikel gefüllter Aufgabebunker (links) und mit Mittelschicht-Streuaggregat gestreute Typha-Partikel (rechts).



Bild 39:  
Streuergebnis der mit dem Mittelschicht-Streuaggregat gestreuten Typha-Partikel.

Für den Streuvorgang wurde die zu streuende Menge in den Aufgabebunker eingefüllt und durch ein integriertes Förderband sowie einem Rückstreifrechen gleichmäßig dem unterhalb des Bunkers lokalisiertem Streukopf zur Streuung zugeführt. Während des Streuprozesses wurde ein Streukasten auf einem Förderband am Auswurf des Streukopfes vor und zurück bewegt und somit

eine schichtweise Streuung der Partikel in den Streukästen erzielt (Bild 40). Der Schichtaufbau – untere Deckschicht, Mittelschicht, obere Deckschicht – wurde nacheinander in einzelnen Streuvorgängen aufgebracht. Das Deckschichtmaterial umfasst etwa 30 %, das Mittelschichtmaterial dementsprechend ca. 70 %.



Bild 40:  
Streukästen unter einem Streuaggregat der Spanplatten-Pilotanlage (links) und mittels Mittelschicht-Streuaggregat in Streukästen gestreute Typha-Partikel (rechts).

#### c) Pressen und Aushärtung der Platte

Nach dem Streuvorgang werden die gestreuten Partikel in der Streuform durch eine Presse auf die Zielstärke des späteren Produktes verdichtet und die Streuform arretiert. Das als Bindemittel eingesetzte Magnesit erlaubt eine Aushärtung ohne zusätzliche Wärmezufuhr, sodass nach etwa 24 Stunden die ausgehärtete Typha-Aufsparrendämmplatte aus der Streuform ausgeschalt werden kann (Bild 41).



Bild 41:  
Verdichten und Arretieren der gestreuten Typha-Partikel in einer Streuform (links) sowie eine fertige 3-schichtige Typha-Aufsparrendämmplatte.

Im Rahmen des Projektes wurden verschiedene Versuche zu alternativen Aushärtungsvarianten mit der Zielstellung durchgeführt, den Herstellungsprozess zu beschleunigen. Es zeigte sich, dass die Aushärtung des Bindemittels (und auch der anderen im Verlaufe der Versuche eingesetzten Bindemittel) durch alternative Methoden deutlich schneller erfolgen kann und somit einen Produktionsprozess beschleunigen könnte.

Tabelle 12:  
Chronologische Darstellung des Produktionsprozess einer Typha-  
Aufsparrendämmplatte mittels Spanplatten-Pilotanlage ( Versuch B).

Produktionsprozess					
Ernte	Phase	Partikelherstellung (am Standort B)	Produktherstellung (am Standort Göttingen)		
			Beleimung der Partikel	Streuung der Partikel	Pressen und Aushärtung der Platte
Im Rahmen des Projektes wurden keine Fragestellungen zum Anbau und der Ernte der Typha-Pflanze nachgegangen. Die geernteten Blätter wurden aus dem Donaudelta der Länder Bulgarien und Rumänien importiert.	Prozessschritte /Aggregate	A) Abtrennen der sklerenchymarmen Bereiche	A) Bindemittelvorbereitung	A) Befüllen des Vorratsbunkers	A) Verdichten und Arretieren auf die Zielstärke
		maschinelle Vor- Abtrennung**	B) Befüllen der Beleimtrommel	B) Streuung der Typha-Partikel in Streukästen: a) Streuung der unteren Deckschicht	B) 24 Stündige Aushärtung der Platte ohne Energiezufuhr
		B) Länglicher Zuschnitt des Typha-Blattes	C) Besprühung der Typha-Partikel mit: a) ggf. Hydrophobier- ungsmittel b) Bindemittel Typha/BM = 1:1	b) Streuung der Mittelschicht c) Streuung der oberen Deckschicht	C) Aushärtung des Bindemittels mit alternativen Methoden
		Schneide- einrichtung	Beleimungs- trommel und Beleimungsdüse	Aufgabebunker mit Förderband und Rückstreifrechen und Mittelschicht – Streuaggregat einer Spanplatten- Pilotanlage	Presse  Verschiedene Aggregate zur Beschleunigung der Bindemittelaus- härtung
		C) Ablängen der Typha-Blattstreifen in gleich lange Partikel			
		Schlagschere/ -werkzeug		Streukästen verschiedener Dimension	

\* Standort Göttingen = Externer Standort mit Spanplatten-Pilotanlage und weiterer im Rahmen der Versuche genutzter Gerätschaften; Standort B = Technikum der Firma Typhatechnik; \*\* Händische Abtrennung vor der Einführung der maschinellen Vor-Abtrennung

### 5.2.3 Durchgeführte Versuche und Ergebnisse

Im Projektverlauf wurden 6 Versuche zur Herstellung einer Typha-Aufsparren-Dämmplatte mittels der Spanplatten-Technologie mit verschiedenen Fragestellungen und Optimierungsansätzen durchgeführt. Die im Kapitel 5.2 gezeigte Tabelle 9 listet die Versuche auf und verdeutlicht u.a. den Fokus des Versuches. In der Folge sollen die erzielten Ergebnisse je Versuch dargestellt werden.

#### **Versuch 1**

Im Fokus des 1. Versuches stand die Überprüfung der generellen Tauglichkeit der Spanplatten-Technologie zur Herstellung einer Typha-Aufsparren-Dämmplatte sowie die Evaluierung der Streuung der Typha-Partikel und das Testen alternativer Methoden zur Aushärtung des Bindemittels Magnesit. Tabelle 13 listet als Übersicht die wesentlichen Parameter der Versuche zur Plattenherstellung der Versuchsreihe 1 auf. In der Folge werden dann ausgewählte Ergebnisse des Versuches 1 präsentiert.

Tabelle 13:  
Übersicht der wesentlichen Parameter der Versuche zur Plattenherstellung der Versuchsreihe 1.

Zeitpunkt /Ort	Var.	Bindemittel	Streuung	Aushärtung	Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]	Wärmeleitfähigkeit [mW/mK]
<b>Versuch 1</b> Juni 2018 Göttingen	P1	Magnesit	MS: maschinell DS: manuell	kalt	152	42,9.
	P2	Magnesit	MS: maschinell DS: manuell	kalt	152	42,1.
	P3	Magnesit	MS: maschinell DS: manuell	kalt	162	n.b.
	B1	Magnesit	manuell	kalt	146	42,2
	B2	Magnesit	manuell	Heißdampf	162	45,5
	B3	Magnesit	manuell	Heißluft	147	42,8.

n.b.: nicht bestimmt

#### a) Überprüfung der generellen Tauglichkeit der Spanplatten-Technologie

In Versuchen sollte die Tauglichkeit der Spanplatten-Technologie zur Herstellung von Typha-Aufsparrendämmplatten überprüft werden. Exemplarisch sollen hier die durchgeführten Streuversuche angeführt werden (vgl. auch Kapitel 5.2.1).

Durch die Vorabversuche zur Streuung unbeleimter Typha-Partikel konnte festgestellt werden, dass sich die Streutechnologie der Spanplattenherstellung prinzipiell zur Streuung der Typha-Partikel eignet. Auch wurde durch diese Versuche evaluiert, dass lediglich das Streuaggregat zur Streuung der Mittelschichtspäne der für die Versuche verwendeten Spanplatten-Pilotanlage ein Streuen der Typha-Partikel erlaubt. Das Aggregat zur Streuung der Deckschicht erwies sich für die Anwendung als unbrauchbar. So wurde ausgehend von den Streu-Vorversuchen festgelegt, dass im Rahmen der Versuche die Streuung der Deck- und Mittelschicht-Partikel mit Hilfe des Mittelschicht-Streuaggregates erfolgt.

Weiterhin wurde in Vorversuchen das maschinelle Einstreuen der Partikel in Streukästen überprüft und analysiert. Daneben wurde eine Technik entwickelt, in welcher Weise die Positionierung des Streukastens und das kontinuierliche Durchfahren des Streukastens erfolgen muss, damit eine gleichmäßige Verteilung der gestreuten Partikel erfolgen kann.

#### b) Evaluierung des Streuungsergebnisses

Zur Evaluierung des Streuungsergebnisses mittels Spanplatten-Pilotanlage wurden die Festigkeitseigenschaften Zugfestigkeit, Biegefestigkeit und Druckspannung bei 10 % Stauchung der gefertigten Probeplatten ermittelt. Als Referenz wurde eine händisch gestreute Probeplatte herangezogen.

Eine Auswertung und somit die Einschätzung des Streuverhaltens auf die Produktqualität ist auf Grund der Rohdichte-Unterschiede nur bedingt möglich. Den Untersuchungsergebnissen kann abgeleitet werden, dass durch das maschinelle Streuen – mittels der Spanplatten-Pilotanlage – vergleichbare Festigkeitseigenschaften zu der händisch gestreuten Probeplatte erzielt werden konnte. Allerdings lassen die deutlich variierende Produktrohdichten sowie unterschiedliche Produktdicken keine letztliche Interpretation zu.

Tabelle 14 zeigt die Parameter der händisch und maschinell gestreuten Typha-Probeplatten sowie die Ergebnisse der Festigkeitsuntersuchungen.

Eine Auswertung und somit die Einschätzung des Streuverhaltens auf die Produktqualität ist auf Grund der Rohdichte-Unterschiede nur bedingt möglich. Den Untersuchungsergebnissen kann abgeleitet werden, dass durch das maschinelle Streuen – mittels der Spanplatten-Pilotanlage – vergleichbare Festigkeitseigenschaften zu der händisch gestreuten Probeplatte erzielt werden konnte. Allerdings lassen die deutlich variierende Produktrohdichten sowie unterschiedliche Produktdicken keine letztliche Interpretation zu.

Tabelle 14:  
Darstellung der Probepplattenparameter sowie der Ergebnisse der Festigkeitsuntersuchungen.

Parameter		<b>händisch</b> gestreute Typha- Probepplatte	<b>maschinell</b> gestreute Typha- Probepplatten ( <b>Pilotanlage</b> )
Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]		165 - 210	190 - 230
Bindemittelanteil [Bindemittel:Typha]		0,88 zu 1	0,88 zu 1
Schichtaufbau		3-schichtig	3-schichtig
Plattendicke [mm]		70	40
Aushärtung des Bindemittels		Ohne Wärmezufuhr; 24 Stunden	Ohne Wärmezufuhr; 24 Stunden
Zugfestigkeit	Probenumfang n	6	6
	Dichte (mittlere Dichte) [kg/m <sup>3</sup> ]	122,5 bis 147 (133,3)	168,1 bis 175,4 (172,77)
	Zugfestigkeit (Mittlere Zugfestigkeit) [kPa]	0,6 bis 2,4 (1,68)	2,2 bis 3 (2,65)
Biegefestigkeit	Probenumfang n	3	10
	Dichte (mittlere Dichte) [kg/m <sup>3</sup> ]	131,7 bis 150 (139,6)	156,1 bis 172,6 (164,62)
	Biegefestigkeit (Mittlere Biegefestigkeit) [kPa]	176,6 bis 202 (189,03)	173,5 bis 248,2 (222,97)
Druckspannung	Probenumfang n	3	3
	Dichte (mittlere Dichte) [kg/m <sup>3</sup> ]	127,6 bis 143 (133,93)	154,6 bis 159,1 (156,63)
	Druckspannung (Mittlere Druckspannung) [kPa]	27,5 bis 33,8 (31,27)	18 bis 19 (18,43)

c) Überprüfung alternative Methoden zur Aushärtung des Bindemittels

Zur Überprüfung alternativer Methoden zur Aushärtung des eingesetzten Bindemittels wurde das Bindemittel Magnesit in Probepplatten durch 3 verschiedene Methoden (Aushärtung kalt 24 h; Aushärtung mit Heißdampf; Aushärtung mit Heißluft) gehärtet und mittels der Festigkeitseigenschaften evaluiert. Tabelle 15 zeigt die Parameter der händisch gestreuten Typha-Probepplatten.

Tabelle 15:  
Darstellung der Probeplattenparameter.

Parameter	<b>händisch</b> gestreute Typha- Probeplatten
Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]	150 - 180
Bindemittelanteil [Bindemittel:Typha]	0,88 zu 1
Schichtaufbau	3-schichtig
Plattendicke [mm]	70
Aushärtung des Bindemittels	o. Wärmezufuhr (24 Stunden) m. Wärmezufuhr (Heißdampf) m. Wärmezufuhr (Heißluft)

Die Versuche zeigten, dass die Aushärtung des eingesetzten Bindemittels (Magnesit) mit alternativen Methoden zielführend sein kann. So erwies sich die Aushärtung mittels Heißdampf als vielversprechend. Die Aushärtung des Magnesits durch Heißluft wurde als ungeeignet betrachtet.

Die Untersuchungen der Festigkeitseigenschaften unterstreichen, dass die Aushärtung durch Heißdampf eine Alternative zur Standard-Aushärtung (ohne Wärmezufuhr) darstellt. Exemplarisch für die Festigkeitseigenschaften werden nachfolgend die Messergebnisse der Zugfestigkeit der gemessenen Platten gezeigt (Bild 42). So erzielen die Proben, welche mittels Heißdampf gehärtet wurden die höchsten Festigkeitswerte. Der Mittelwert dieser Prüfkörper belief sich auf 4,9 kPa. Der mittlere Messwert der Zugprüfung der Probekörper, welche eine Aushärtung ohne Wärmezufuhr erfuhren (Standard-Aushärtung) betrug 1,7 kPa. Die Ergebnisse der Prüfkörper, welche mit Heißluft ausgehärtet wurden lagen nur bei  $\leq 0,3$  kPa. Die Untersuchung lassen vermuten, dass die Aushärtung mittels Methode A zwei wesentliche Vorteile mit sich bringt:

1. Reduzierung der Herstellungszeit
2. Steigerung der Produktfestigkeit

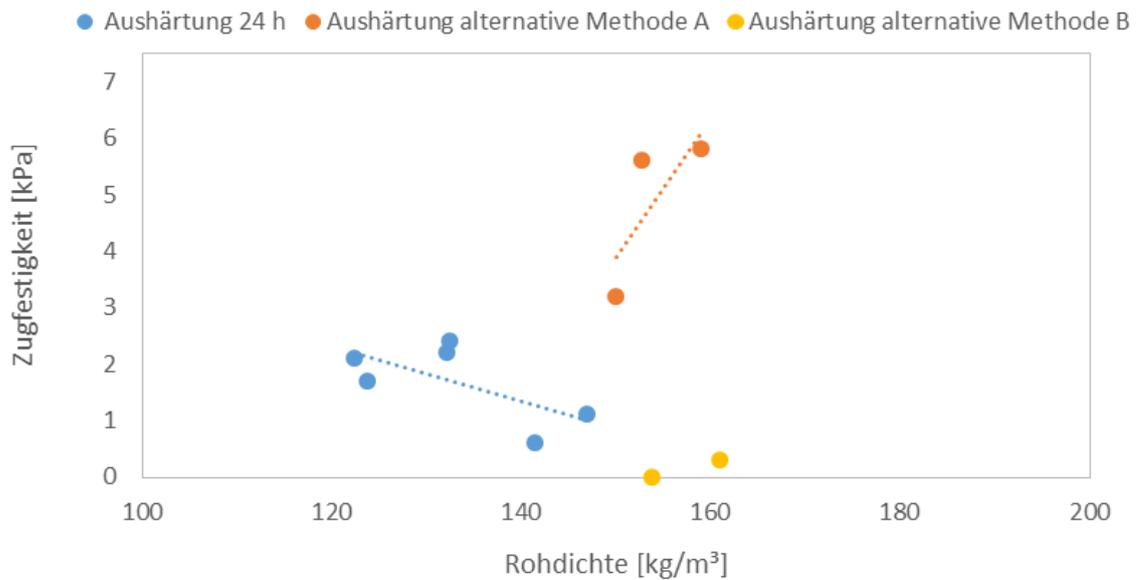


Bild 42:  
Zugfestigkeit verschiedener Probekörper unterschiedlicher Methoden zur Bindemittel-Aushärtung.

#### d) Weitere Resultate

Neben den Festigkeitsmesswerten wurden auch die Wasseraufnahme sowie die Wärmeleitfähigkeit ermittelt. Tabelle 16 und Tabelle 17 zeigen die Messwerte für die Wasseraufnahme. Es wird deutlich, dass alle erzielten Messwerte über dem in DIN 4108-10 [5] aufgeführten Grenzwert (für Holzfaserdämmstoffe) von  $\leq 2 \text{ kg/m}^2$  liegen, welcher im Anwendungsbereich [DAD, ds] erforderlich ist. Die erzielten Ergebnisse waren deshalb Ausgangspunkt der in Versuch 2 durchgeführten Vorversuch zum Einsatz von Hydrophobierungsmittel.

Tabelle 16:  
Wasseraufnahme einer händisch gestreuten 3-schichtigen Typha-Aufsparrendämmplatte (Produktstärke 70 mm; Standard-Aushärtung).

Prüfkörper	Rohdichte [kg/m³]	Wasseraufnahme [kg/m²]
P 1	134,19	<b>3,27</b>
P 2	132,98	<b>3,07</b>
P 3	145,16	<b>2,39</b>
Mittelwert	137,4	<b>2,9</b>

Tabelle 17:

Wasseraufnahme einer maschinell gestreuten 3-schichtigen Typha-Aufsparrendämmplatte (Produktdicke 40 mm; Standard-Aushärtung).

Prüfkörper	Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]	Wasseraufnahme [kg/m <sup>2</sup> ]
P 1	162,90	<b>4,75</b>
P 2	155,51	<b>5</b>
P 3	159,49	<b>5,19</b>
Mittelwert	159,3	<b>5,0</b>

Auch wurden die in Versuch 1 hergestellten Typha-Probepplatten teilweise hinsichtlich ihrer Wärmeleitfähigkeit untersucht. Tabelle 18 zeigt die Messwerte. Die Ergebnisse zeigen, dass die maschinell gestreuten Proben vergleichbare Werte aufweisen wie die händisch gestreuten Probepplatten. Mit Ausnahme der händisch gestreute mit Heißdampf ausgehärteten Probepplatte liegen alle Messwerte im Bereich zwischen 42,1 und 42,9 mW/(m\*K). Für die händisch gestreute mit Heißdampf ausgehärteten Probepplatte wurde ein Wert von 45,5 mW/(m\*K) erzielt, welcher damit über den Messwerten der anderen Probepplatten lag. Eine Erklärung dafür könnte u.a. die ebenfalls höhere Rohdichte der Probepplatte sein.

Tabelle 18:

Wärmeleitfähigkeit verschiedener händisch gestreuter Probepplatten (Produktdicke ~ 70 mm) und maschinell gestreuter Probepplatten (Produktdicke ~50 mm).

Plattenvariante		Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]	Lambda 10 [mW/(m*K)]
Händische Streuung	Aushärtung 24 h	146	<b>42,2</b>
	Aushärtung alternative Methode A	162	<b>45,5</b>
	Aushärtung alternative Methode B	147	<b>42,8</b>
Maschinelle Streuung	Aushärtung 24 h – Probe 1	152	<b>42,9</b>
	Aushärtung 24 h – Probe 2	152	<b>42,1</b>

## Versuch 2

Im Rahmen von Versuch 2 wurde ausgehend von den in Versuch 1 ermittelten Werten für die Wasseraufnahme Vorversuche zur Optimierung der Wasseraufnahme der Typha-Aufsparrendämmplatte durchgeführt. Fokussiert wurde dabei auf den Einsatz von Hydrophobierungsmittel. In Versuch 2 wurde u.a. die Art und Weise der Applikation sowie der Einfluss auf ausgewählte Produkteigenschaften getestet. Tabelle 19 listet als Übersicht die wesentlichen

Parameter der Versuche zur Plattenherstellung der Versuchsreihe 2 auf. In der Folge werden dann ausgewählte Ergebnisse des Versuches 2 präsentiert.

Tabelle 19:  
Übersicht der wesentlichen Parameter der Versuche zur Plattenherstellung der Versuchsreihe 2.

Zeitpunkt /Ort	Var.	Bindemittel/ Variation	Streuung	Aushärtung	Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]	Wasseraufnahme [kg/m <sup>2</sup> ]
<b>Versuch 2</b> August 2018 Schönau	V2	Magnesit mit Sasol Wax 138	manuell	kalt	n.b instabil	n.b.
	V3	Magnesit	manuell	kalt	158	3,8
	V4	Magnesit mit Sasol Wax 138	manuell	kalt	197	1,7
	V5	Magnesit mit Rapsöl	manuell	kalt	211	5,0
	V6	Magnesit bepudert	manuell	kalt	192	5,2
	V7	mit Rapsöl, Magnesit bepudert	manuell	kalt	219	3,7
	V8	Magnesit mit Rapsöl+Spiritus	manuell	kalt	238	4,9

n.b.: nicht bestimmt

Zur Applikation wurde zunächst versucht, die Hydrophobierungsmittel gemeinsam mit dem Magnesit aufzubringen. Allerdings flockte das Sasol Wax 138 sofort in der Magnesitlösung aus, sodass hier nur eine getrennte hintereinander abfolgende Applikation des Hydrophobierungsmittels und des Bindemittels möglich ist. Weiterhin kann den Versuchen abgeleitet werden, dass das Besprühen der Partikel mit Hydrophobierungsmittel mit der gleichen Technologie erfolgen kann, welche zur Beleimung der Partikel angewendet wird.

Bild 43 zeigt die Ergebnisse der Wasseraufnahme. Bild 44 zeigt den Prüfaufbau der Messung zur Wasseraufnahme der in Versuch 2 hergestellten Probplatten. Dabei werden die Platten einseitig mit Wasser in Kontakt gebracht. Es zeigte sich, dass durch den Einsatz von Hydrophobierungsmittel die Messwerte der Wasseraufnahme mit 1,7 kg/m<sup>2</sup> unter dem in DIN 4108-10 [5] aufgeführten Grenzwert (für Holzfaserdämmstoffe) von  $\leq 2$  kg/m<sup>2</sup> gedrückt werden können, welcher im Anwendungsbereich [DAD, ds] erforderlich ist.

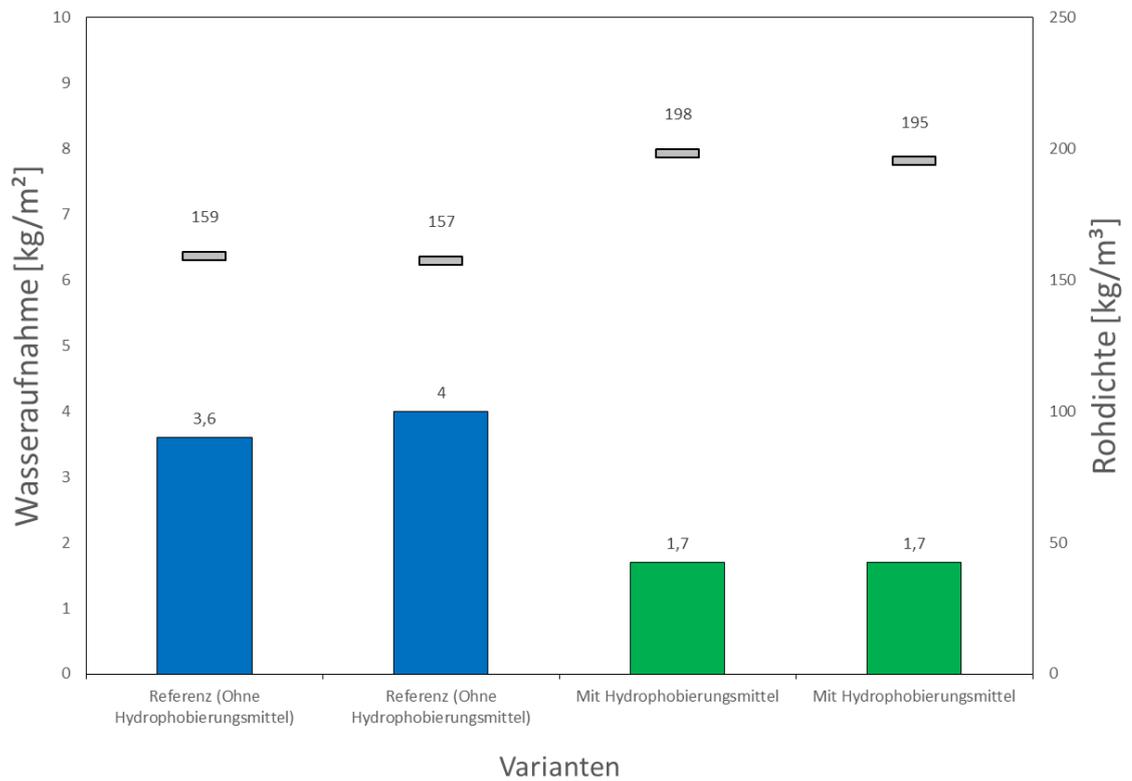


Bild 43:  
Wasseraufnahme verschiedener Probekörper (mit und ohne Hydrophobierungsmittel).



Bild 44:  
Prüfaufbau der Messung der Wasseraufnahme.

Bild 45 zeigt die Zugfestigkeit der Probeplatten, bei welchen die Typha-Partikel mit und ohne Hydrophobierungsmittel besprüht wurden. Für die Proben ohne

Hydrophobierungsmittel wurde eine Zugfestigkeit von im Mittel 1,1 kPa erzielt. Die mittlere Zugfestigkeit der Proben mit Hydrophobierungsmittel belief sich auf 2,9 kPa. Die Proben der Variante mit Hydrophobierungsmittel wiesen im Vergleich zu den Proben der Variante ohne Hydrophobierungsmittel somit höhere Rohdichten auf. Dabei wurden, bezogen auf die Masse der Typha-partikel, 2,5 % Sasol Wax 138 eingesetzt.

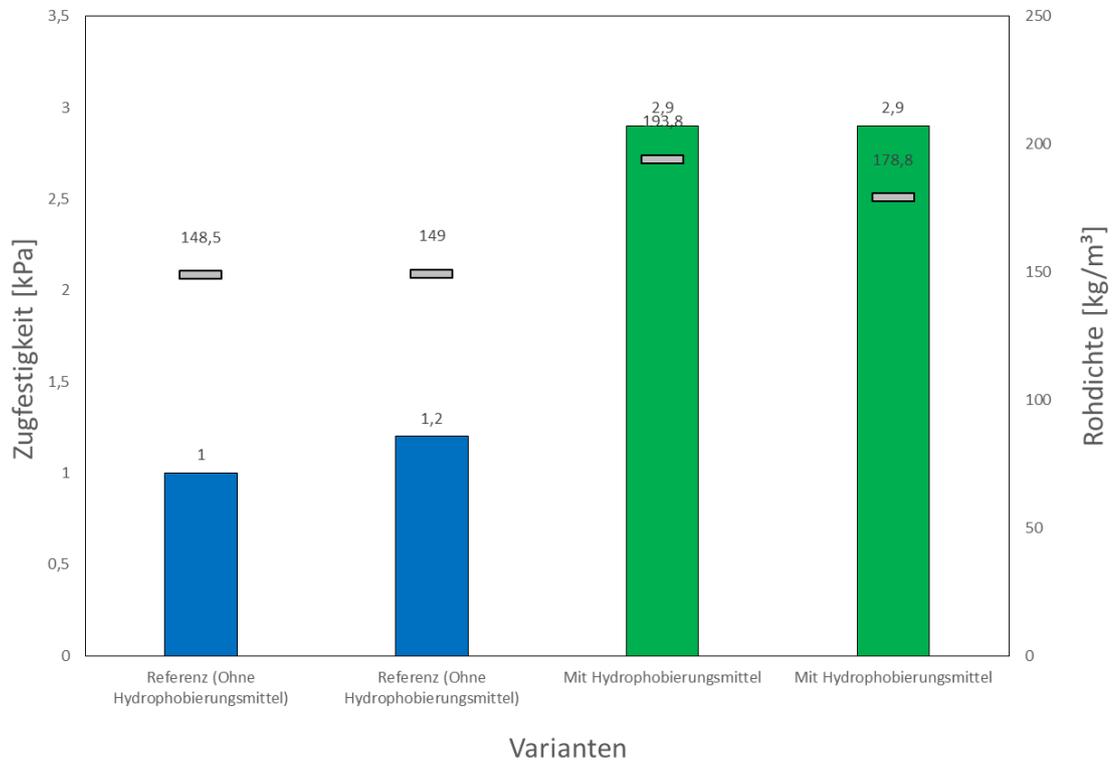


Bild 45:  
Zugfestigkeit verschiedener Probekörper (mit und ohne Hydrophobierungsmittel).

### **Versuch 3**

Im Rahmen von Versuch 3 wurde vor allem der Fragestellung der geeigneten Aushärtungsmethode nachgegangen. In der Folge soll eine Auswahl der erzielten Ergebnisse dargestellt werden. Tabelle 20 listet als Übersicht die wesentlichen Parameter der Versuche zur Plattenherstellung der Versuchsreihe 3 auf. In der Folge werden dann ausgewählte Ergebnisse des Versuches 3 präsentiert.

Tabelle 20:  
Übersicht der wesentlichen Parameter der Versuche zur Plattenherstellung der Versuchsreihe 3.

Zeitpunkt /Ort	Var.	Bindemittel/ Variation	Streuung	Aushärtung	Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]	Wärmeleitfähigkeit [mW/mK]
<b>Versuch 3</b> August 2018 Göttingen	A1	Magnesit	manuell	10 min Heißdampf	157	45,7
	A2	Magnesit	manuell	5 min Heißdampf	147	45,1
	A3	Magnesit	manuell	2 min Heißdampf	170	41,4
	A4	Magnesit	manuell	1 min Heißdampf	144	43,9
	A5	Magnesit mit Hydrophobierungsmittel	manuell	10 min Heißdampf	157	45,2

Die Ergebnisdarstellung umfasst die Resultate der Versuche zur Aushärtung des Bindemittels mit Heißdampf (vgl. Versuch 1). Der Versuch zur Aushärtung des Bindemittels mit Heißdampf umfasste dabei 5 verschiedene Varianten, die in Tabelle 21 näher beschrieben sind.

Tabelle 21: Versuchsparameter des Versuches zur Aushärtung des Bindemittels mit der alternativen Methode A.

Parameter	Beschreibung
Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]	Nassrohichte: 200
Dicke [mm]	70 - 80
Plattendimension [mm]	650*650
Verhältnis [Typha : Binder]	Deckschicht: 1 : 1 / Mittelschicht: 1 : 0,8
Additive [%]	2 % Hydrophobierungsmittel (nur bei B5)
Zufuhrdauer [min] Wärme	10/ 5/ 2/ 1
Streuung	händisch
Bezeichnung (Minuten)	A1(10)/ A2(5)/ A3(2)/ A4(1)/ A5 (10+Hydro)

Der Fokus hierbei lag auf der Reduzierung der Wärmezufuhr zur Aushärtung. Es wurden Plattenvarianten mit 10/5/2/1-minütiger Wärmezufuhr hergestellt und hinsichtlich ihrer Eigenschaften überprüft.

Tabelle 22 zeigt die ermittelten Kennwerte der hergestellten Typha-Probepplatten. Die Rohdichte wurde nach 7-tägiger Trocknung der Platte im Trockenschrank bei 40 °C und anschließendem Konditionieren bei Raumtemperatur ermittelt.

Tabelle 22: Kennwerte der unterschiedlichen Probepplatten

Var.	Rohdichte* [kg/m <sup>3</sup> ]	Zugfestigkeit [kPa]	Druckspannung bei 10 % Stauchung [kPa]	Wasseraufnahme [kg/m <sup>2</sup> ]	Wärmeleitfähigkeit [mW/mK]
A1	157,0	6,8	119,1	2,63	45,7
A2	146,8	4,0	97,7	2,39	45,1
A3	170,4	6,2	127,0	2,43	41,4
A4	143,7	4,2	119,3	2,75	43,9
A5	156,9	2,4	124,8	1,91	45,2

\* nach Trocknung für 7 Tage bei 40 °C und anschließendes Konditionieren

Bei einem Vergleich der Zugfestigkeiten der Proben A1, A2 und A4, welche ähnliche Rohdichten aufweisen, wird deutlich, dass eine Heißdampfbeaufschlagung von 10 Minuten die höchsten Zugfestigkeiten erzielt. Dies lässt auf eine gesteigerte Aushärtung des Bindemittels bei A1 im Vergleich zur 5-minütigen (A2) und 1-minütigen (A4) Aushärtungsdauer, auf Grund der geringeren Zugfestigkeiten der Varianten A2 und A4, schließen. Auch lassen die Ergebnisse vermuten, dass bei einer Wärmezufuhr von 5 Minuten im Vergleich zur 1-minütigen Wärmezufuhr keine Steigerung der Zugfestigkeit erzielt werden kann.

Die Ergebnisse der Druckspannungsmessung zeigen, dass alle Varianten mit Ausnahme von A2 den nach DIN 4108-10[5] aufgeführten Grenzwert (für Holzfaserdämmstoffe) von  $\geq 100\text{kg/m}^2$ , welcher im Anwendungsbereich [DAD, ds] erforderlich ist, überschreiten. Rückschlüsse auf die Bindemittelaushärtung in Bezug auf die Wärmezufuhrdauer ist durch die erzielten Ergebnisse der Druckspannung nicht möglich. Eine Erklärung hierfür könnte sein, dass die Druckspannung stärker mit der Produktrohndichte korreliert und eine Tendenz zur Aushärtung des Bindemittels somit überdeckt.

Die mittleren Messwerte der Wasseraufnahme der verschiedenen Varianten liegen alle nahe beieinander. Lediglich das Ergebnis der Variante A5, bei welcher die Typha-Partikel zusätzlich mit Hydrophobierungsmittel beaufschlagt wurden, ist merklich niedriger. Dies zeigt, dass der Einsatz von Hydrophobierungsmittel zum Erreichen des nach DIN 4108-10 [5] aufgeführten Grenzwert (für Holzfaserdämmstoffe) von  $\leq 2\text{ kg/m}^2$  für den Anwendungsbereich [DAD, ds] zielführend ist. Die Varianten A1 bis A4, bei welchen keine Hydrophobierungsmittel verwendet wurden, überschreiten den geforderten Grenzwert.

Bezüglich der Wärmeleitfähigkeit der hergestellten Probeplatten wurden Ergebnisse zwischen 41,4 mW/(m\*K) und 45,7 mW/(m\*K) gemessen. Interessanterweise ergibt Variante A3, bei der eine zweiminütige Heißdampf-beaufschlagung erfolgte zwar die höchste Rohdichte, trotzdem aber die niedrigste Wärmeleitfähigkeit.

#### **Versuch 4**

Im Zuge von Versuch 4 wurde Untersuchungen zur Herstellung einer Typha-Aufsparrendämmplatte unter Verwendung eines herkömmlichen Bindemittels durchgeführt. Die erzielten Ergebnisse sollen als Referenz für die im Rahmen des Projektes vorgesehen Bindemittel dienen. In der Folge werden ausgewählte Ergebnisse des Versuches 4 dargestellt. Tabelle 23 listet als Übersicht die wesentlichen Parameter der Versuche zur Plattenherstellung der Versuchsreihe 4 auf. Anschließend werden dann ausgewählte Ergebnisse des Versuches 4 präsentiert.

Tabelle 23:  
Übersicht der wesentlichen Parameter der Versuche zur Plattenherstellung der Versuchsreihe 4.

Zeitpunkt /Ort	Var.	Bindemittel/ Variation	Streuung	Aushärtung	Rohdichte* [kg/m <sup>3</sup> ]	Wärmeleitfähigkeit [mW/mK]
<b>Versuch 4</b> August 2018 Göttingen	A1	Isocyanat 5 M.-%	manuell einschichtig	2 min Heißdampf	117	40,5
	A2	Isocyanat 5 M.-%	manuell einschichtig	2 min Heißdampf	106	40,3
	A3	Isocyanat 5 M.-%	manuell einschichtig	2 min Heißdampf	80	39,2
	B1	Isocyanat DS: 6 M.-% MS: 4 M.-%	manuell 3-schichtig	2 min Heißdampf	100	40,0
	B2	Isocyanat DS: 6 M.-% MS: 4 M.-%	manuell 3-schichtig	2 min Heißdampf	86	38,3

\* nach Trocknung für 7 Tage bei 40 °C und anschließendes Konditionieren

Als Bindemittel wurde PMDI, ein Isocyanat (mit Prä-Polymer), eingesetzt. In Bezug auf die eingesetzte Typha-Menge betrug der Bindemittelanteil im Mittel 5 %, und liegt somit wesentlich unter der eingesetzten Magnesit-Bindemittelmenge. Die Versuchsplatten in Versuch 4 wurden händisch gestreut. Es wurden sowohl 1 schichtige als auch 3 schichtige Probeplatten mit unterschiedlicher Rohdichte hergestellt. Die Aushärtung des Bindemittels wurde durch

Heißdampf realisiert. Die Wärmezufuhrdauer betrug 2 Minuten. Tabelle 24 gibt einen Überblick über die Versuchsparameter des Versuches 4

Tabelle 24:  
Versuchsparameter des Versuches 4.

Parameter	Beschreibung
Plattenaufbau	Einschichtig (ES)/ 3-Schichtig (3S)
Rohdichte [ $\text{kg/m}^3$ ]	ES: 120/100/80; 3S: 100/80
Dicke [mm]	70 - 80
Plattendimension [mm]	650*650
Verhältnis [Typha : Binder]	ES: 1 : 0,05; 3S: DS: 1 : 0,06 / MS: 1 : 0,04
Zufuhrdauer [min] Wärme	2
Streuung	händisch
Bezeichnung	ES: A1/ A2/ A3 3S: B1/ B2



Bild 46:  
Händisch gestreute, mit Isocyanat gebundene und mit Heißdampf ausgehärteten einschichtige (oben) und 3-schichtige Typha-Probepplatten (unten).

Weiterhin sollte durch Versuch 4 gezeigt werden, dass die Reduzierung des Bindemittelgehaltes eine Reduzierung der Rohdichte erlaubt und somit letztlich

auch die Wärmeleitfähigkeit des Produktes reduziert werden kann. Somit musste auch überprüft werden, inwieweit die Festigkeitseigenschaften im Zuge der Rohdichterduzierung herabgesetzt wurden. Exemplarisch für die Festigkeitseigenschaften werden in der Folge die Zugfestigkeit sowie die Druckspannung bei 10 % Stauchung dargestellt. Bild 46 zeigt die händisch gestreuten, mit Isocyanat gebundenen und mit Heißdampf ausgehärteten einschichtigen (oben) und 3-schichtigen Typha-Probeplatten (unten).

Die Ergebnisse in Bild 47 zeigen, dass die Rohdichterduzierung bei einem Vergleich der Varianten des Versuches 4 mit identischem Plattenaufbau einen Einfluss auf die Zugfestigkeit nimmt. So weisen die vergleichbaren Prüfkörper der Varianten mit gleichem Plattenaufbau bei höherer Dichte eine höhere Zugfestigkeit auf. Allerdings ist auch das eingesetzte Bindemittel entscheidend. Eine Gegenüberstellung von vergleichbaren Probeplatten mit dem Magnesit-Bindemittel weist deutlich geringere Zugfestigkeiten bei höheren Rohdichten im Vergleich zu den Probeplatten mit dem Isocyanat-Bindemittel auf (vgl. Versuch 1 und 3). Somit kann bei den Typha-Probeplatten durch den Einsatz von Isocyanat höhere Zugfestigkeiten trotz geringerer Rohdichte erzielt werden.

Den Ergebnissen in Bild 47 und Bild 48 kann eine leichte Tendenz des Einflusses des Plattenaufbaues abgelesen werden. Insbesondere bei der Ergebnisdarstellung der Druckspannung bei 10 % Stauchung wird ist dies erkennbar. So erzielen bei ähnlicher Rohdichte die Variante mit 3 schichtigem Plattenaufbau höhere Messwerte als die Variante mit 1 schichtigem Plattenaufbau.

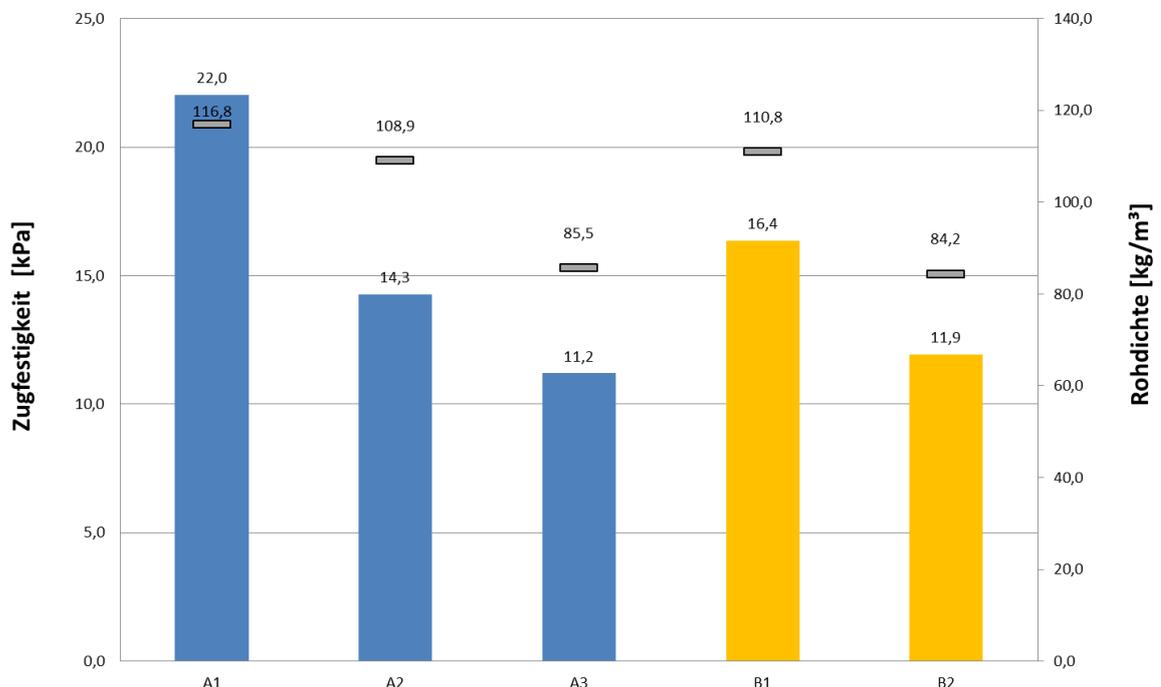


Bild 47:  
Mittlere Zugfestigkeit der verschiedenen Varianten des Versuches 4.

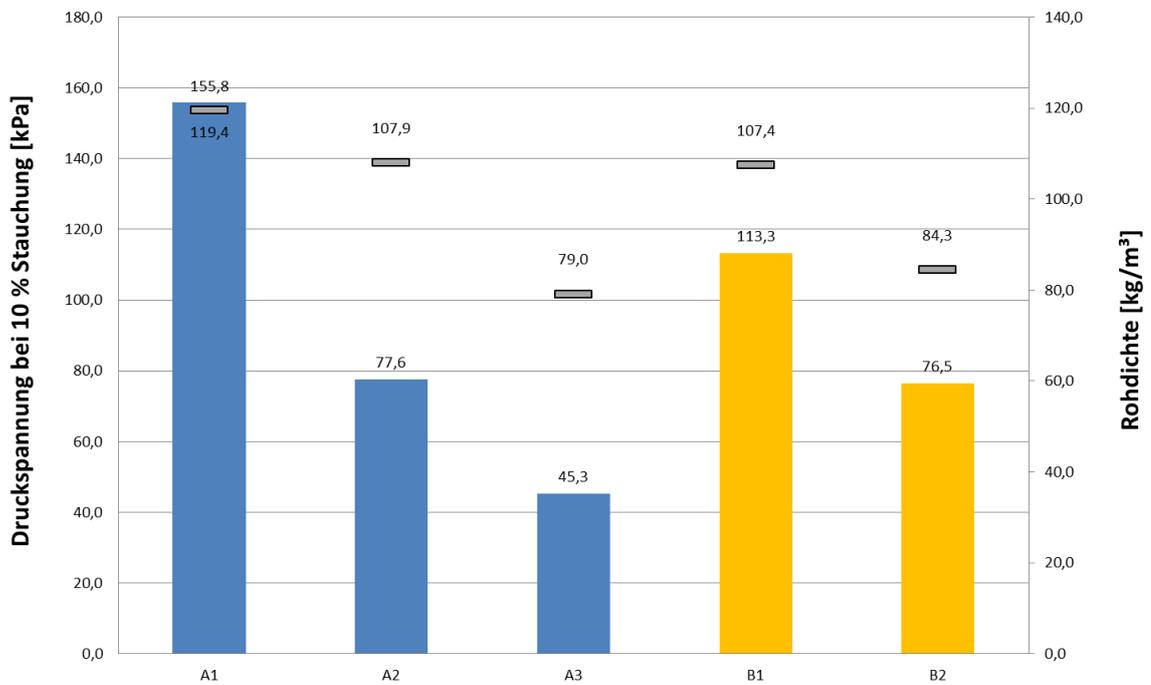


Bild 48: Mittlere Druckspannung bei 10 % Stauchung der verschiedenen Varianten des Versuches 4.

Die reduzierten Rohdichten der Probepplatten des Versuches 4 spiegeln sich in den verringerten Wärmeleitfähigkeiten wieder (vgl. Versuch 1 und 3). Neben der Rohdichte könnte auch der geringere Bindemittelanteil einen Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit haben. Durch den geringeren Bindemittelanteil kann angenommen werden, dass die natürliche Dämmwirkung des Typha-Aerenchym stärker zum Tragen kommt.

### Versuch 5

Im Rahmen von Versuch 5 wurden in erster Linie die zur Eindeckung des FlexDa benötigten Probepplatten hergestellt. Herausgestellt werden kann, dass diese Probepplatten maschinell gestreut sowie mit Heißdampf zur Aushärtung des Bindemittels hergestellt wurden. Tabelle 23 listet als Übersicht die wesentlichen Parameter der Versuche zur Plattenherstellung der Versuchsreihe 5 auf. In der Folge werden dann ausgewählte Ergebnisse des Versuches 5 präsentiert.

Tabelle 25:  
Übersicht der wesentlichen Parameter der Versuche zur Plattenherstellung der Versuchsreihe 5.

Zeitpunkt /Ort	Var.	Bindemittel	Streuung	Aushärtung	Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]
<b>Versuch 5</b> Juni 2019 Göttingen	T1	Magnesit	maschinell, 3-schichtig, optimierte Partikel	Heißdampf	132
	T2	Magnesit	maschinell, 3-schichtig, optimierte Partikel	Heißdampf	145
	T3	Magnesit	maschinell, 3-schichtig, optimierte Partikel	Heißdampf	153
	T5	Magnesit	maschinell, 3-schichtig, optimierte Partikel	Heißdampf	166
	T4	Magnesit	maschinell, 3-schichtig, optimierte Partikel	Heißdampf	172
	B	Blutalbumin	maschinell, 3-schichtig, optimierte Partikel	Heißdampf	99
	FX1	Magnesit	maschinell, 3-schichtig, optimierte Partikel	Heißdampf	192
	FX2	Magnesit	maschinell, 3-schichtig, optimierte Partikel	Heißdampf	179
	FX3	Magnesit	maschinell, 3-schichtig, optimierte Partikel	Heißdampf	187
	FX4	Magnesit	maschinell, 3-schichtig, optimierte Partikel	Heißdampf	180

In der folgenden Ergebnisdarstellung werden Messwerte der Probeplatte mit dem Magnesit-Bindemittel mit Messwerten der Probeplatte mit dem Blutalbumin-Bindemittel gegenübergestellt. Weiterhin charakterisieren die Ergebnisse der Probeplatte mit dem Magnesit-Bindemittel die auf dem FlexDa verbauten Probeplatten.

Tabelle 26 gibt einen Überblick über die Prozess- und Plattenparameter des Versuches 5, wobei die Abkürzung BA in den Spalten Rohdichte und Verhältnis Typha : Binder für Blutalbumin steht.

Tabelle 26:  
Prozess- und Plattenparameter des Versuches 5.

Parameter	Beschreibung
Plattenaufbau	3-Schichtig
Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]	Magnesit: ~ 150 ; BA: ~ 102
Dicke [mm]	40-50
Plattendimension Länge x Breite [mm]	1200x620
Verhältnis Typha : Binder	Magnesit: DS: 1 : 1 / MS: 1 : 0,8; BA: 1 : 0,12
Methode zur Aushärtung des Bindemittels	Heißdampf
Zufuhrdauer Heißdampf [min]	2
Streuung	Maschinell

Tabelle 27 zeigt die mittlere Zugfestigkeit und Druckspannung bei 10 %iger Stauchung sowie Wärmeleitfähigkeit der in Versuch 5 hergestellten Varianten, welche zum einen Magnesit und zum anderen Blotalbumin als Bindemittel aufweisen. Ein Vergleich zwischen der Variante mit Magnesit und der Variante mit Blotalbumin kann auf Grund des Rohdichteunterschiedes nicht gemacht werden. Mit Blick auf die mittlere Druckspannung bei 10 % Stauchung wird deutlich, dass der erzielte mittlere Messwert den in DIN 4108-10 [5] aufgeführten Grenzwert (für Holzfaserdämmstoffe) von  $\geq 100$  kPa, welcher im Anwendungsbereich [DAD, ds] erforderlich ist, einhält.

Tabelle 27:  
Mittlere Zugfestigkeit und Druckspannung bei 10 %iger Stauchung sowie Wärmeleitfähigkeit der in Versuch 5 hergestellten Varianten.

Eigenschaften		Mittelwerte
Magnesit-Bindemittel	Zugfestigkeit [Pa]	5,9
	Druckspannung [Pa]	107,0
	Wärmeleitfähigkeit [mW/(m*K)]	44,5
Blotalbumin-Bindemittel	Zugfestigkeit [Pa]	4,4
	Druckspannung [Pa]	67,1
	Wärmeleitfähigkeit [mW/(m*K)]	39,6

Es zeigt sich, dass die Variante mit Blotalbumin eine geringere Wärmeleitfähigkeit aufweist als die Variante mit Magnesit. Wie bei Versuch 4 könnte neben der Rohdichte auch der geringere Bindemittelanteil einen Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit haben.

## Versuch 6

Versuch 6 umfasst verschiedene Fragestellungen unterschiedlicher Bereiche. Tabelle 28 gibt einen Überblick über ausgewählte Ansätze die in Versuch 6 verfolgt wurden.

Tabelle 29 listet als Übersicht die wesentlichen Parameter der Versuche zur Plattenherstellung der Versuchsreihe 6 auf. In der Folge werden dann ausgewählte Ergebnisse des Versuches 6 präsentiert.

So wurden u.a. Untersuchungen zur Verwendung von Magnesiumsulfat ( $MgSO_4$ ) als Bestandteil des Magnesit- Bindemittels durchgeführt. Weiterhin wurde die anteilige Verwendung von 2 Bindemitteln zur Herstellung einer Platte getestet. Auch wurden Versuche zur Verringerung der Wasseraufnahme der Typha-Platte durchgeführt. Hierzu wurden Hydrophobierungsmittel auf Wachs- und Silikonbasis getestet. Die in Versuch 6 hergestellten Platten wurden teilweise sowohl mit Heißdampf als auch ohne produziert.

Tabelle 28:  
Fragestellungen des 6. Versuches

Fragestellung	Beschreibung
Bindemittel	1) Variation der Magnesitbestandteile: - Magnesiumchlorid ( $MgCl_2$ ) - Magnesiumsulfat ( $Mg SO_4$ )  2) Einsatz von 2 Bindemitteln im Produkt: - Magnesit und Blutalbumin
Hydrophobierung	Einsatz von Hydrophobierungsmittel auf Wachs- und Silikonbasis
Aushärtung des Bindemittels	Gegenüberstellung der Platteneigenschaften nach - Aushärtung des Bindemittels ohne Wärmezufuhr - mit Wärmezufuhr (alternative Methode A)

Tabelle 29:  
Übersicht der wesentlichen Parameter der Versuchsreihe 6.

Zeitpunkt /Ort	Var.	Bindemittel / Variation	Streuung	Aushärtung	Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]	Wärmeleitfähigkeit [mW/mK]
Versuch 6 August 2019 Göttingen	1	Magnesit mit MgCl	maschinell, 3-schichtig, opt. Partikel	kalt	154	45.
	2	Magnesit mit MgSO <sub>4</sub>	maschinell, 3-schichtig, opt. Partikel	kalt	155	44
	3	Magnesit mit MgCl und StoPrim	maschinell, 3-schichtig, opt. Partikel	kalt	139	43
	4	Magnesit mit MgSO <sub>4</sub> und StoPrim	maschinell, 3-schichtig, opt. Partikel	kalt	148	43
	5	Magnesit mit MgCl	maschinell, 3-schichtig, opt. Partikel	Heißdampf	152	44
	6	Magnesit mit MgSO <sub>4</sub>	maschinell, 3-schichtig, opt. Partikel	Heißdampf	154	45
	7	Magnesit mit MgCl und StoPrim	maschinell, 3-schichtig, opt. Partikel	Heißdampf	163	45
	8	Magnesit mit MgSO <sub>4</sub> und StoPrim	maschinell, 3-schichtig, opt. Partikel	Heißdampf	n.b.	n.b.
	9	Magnesit mit MgCl und HydroWax Blue	maschinell, 3-schichtig, opt. Partikel	Heißdampf	n.b.	n.b.
	10	Magnesit mit MgCl HydroWax Pro	maschinell, 3-schichtig, opt. Partikel	Heißdampf	n.b.	n.b.
	11	25 % Magnesit + 20 % Albumin	maschinell, 3-schichtig, opt. Partikel	Heißdampf	n.b.	n.b.
	12	50 % Magnesit + 20 % Albumin	maschinell, 3-schichtig, opt. Partikel	Heißdampf	n.b.	n.b.
	13	50 % Magnesit mit MgSO <sub>4</sub> + 20 % Albumin	maschinell, 3-schichtig, opt. Partikel	Heißdampf	n.b.	n.b.
	14	Magnesit mit MgCl	maschinell, 3-schichtig, opt. Partikel	Heißdampf +Trocknung bei 70°C	n.b.	n.b.

n.b.: nicht bestimmt

In der Folge werden ausgewählte Ergebnisse des Versuches 6 präsentiert. Tabelle 30 können die getesteten Festigkeitseigenschaften ausgewählter Varianten des Versuches 6 entnommen werden.

Es wurde untersucht, inwieweit der Austausch des Magnesiumchlorids ( $MgCl_2$ ) durch Magnesiumsulfat ( $MgSO_4$ ) Einfluss auf die Produktfestigkeit hat. Hintergrund dabei ist, dass das Chlorid sich korrosiv auf metallene Verbindungselemente, wie z.B. Verschraubungen, auswirken kann. Auch wurde der Unterschied der beiden Varianten hinsichtlich der Bindemittelaushärtung untersucht. Es zeigte sich, dass der Einsatz von Magnesiumsulfat eine geringfügige Minderung der Druckspannung und eine etwas ausgeprägtere Reduktion der Biegefestigkeit des Produktes bei Aushärtung ohne Wärmezufuhr bzw. mit Heißdampf bewirkte. Auch wurden Versuche zur Aushärtung des Magnesits mit Heißdampf und unmittelbar nachgeschalteter Trocknung durchgeführt. Ein positiver Einfluss auf die Festigkeitseigenschaften konnte nicht festgestellt werden.

Tabelle 30: Mittlere Druckspannung und mittlere Biegespannung ausgewählter Varianten des Versuches 6

Parameter		Eigenschaften	
Aushärtung des Bindemittels	Bindemittel	Druckspannung bei 10 % Stauchung [kPa]	Biegefestigkeit [kPa]
Ohne Wärmezufuhr	Magnesit mit $MgCl_2$	55,7	418,6
	Magnesit mit $MgSO_4$	54,1	302,0
Mit Heißdampf	Magnesit mit $MgCl_2$	133,3)	348,9
	Magnesit mit $MgSO_4$	123,5	295,9
	Magnesit + Blutalbumin	84,1	300,2
Heißdampf + nachgeschaltete Trocknung	Magnesit	123,7	345,9

Die Versuche mit einer Mischung aus Magnesit und Albumin als Bindemittel hatten den Zweck, möglichst die Vorteile beider Bindemittel zu kombinieren. Aufgrund seiner deutlich höheren Bindekraft ist bei Albumin ein wesentlich geringerer Bindemittelbedarf gegeben. Dies führt zu geringeren Rohdichten und damit zu niedrigeren Wärmeleitfähigkeiten. Der Zusatz von Magnesit hat die Verbesserung der Brandeigenschaften zum Ziel. Die Probe mit Magnesit und Blutalbumin konnte keine gesteigerten Festigkeiten des Produktes im Vergleich zu den aufgeführten Varianten mit Magnesit erzielen. Dessen Werte liegen zwischen denen der rein magnesitgebundenen Platte ohne Dampfaushärtung und denen mit Dampfaushärtung. Ein direkter Vergleich ist allerdings nicht zielführend, da die Probeplatte mit Magnesit und Blutalbumin eine deutlich geringere Rohdichte aufwies. Dies liegt vor allem daran, dass

hierbei nur 25 % Magnesit und 20% Blutalbumin bezogen auf die Typha-Menge eingesetzt wurde.

In Versuch 6 wurden drei verschiedene Hydrophobierungsmittel eingesetzt, wobei 2 Varianten auf Wachsbasis und 1 Variante auf Silikonbasis getestet wurden. Auch bei diesen Hydrophobierungsmitteln auf Wachsbasis musste die Applikation getrennt von der Bindemittelapplikation erfolgen. Im Gegensatz dazu war mit dem Hydrophobierungsmittel auf Basis einer Silikonmikroemulsion eine gleichzeitige Applikation der Mischung beider Reagenzien möglich. Tabelle 31 zeigt die Versuchsergebnisse der mittleren Wasseraufnahme von Varianten mit Hydrophobierungsmittel des Versuches 6. Es zeigte sich, dass die getesteten Proben, bei welchen Hydrophobierungsmittel auf die Partikel aufgesprüht wurde, mit Ausnahme einer Variante den nach DIN 4108-10 [5] geforderten Grenzwert (für Holzfaserdämmstoffe)  $\leq 2 \text{ kg/m}^2$  für den Anwendungsbereich DAD ds erzielten. Den deutlichsten Effekt weist dabei das Hydrophobierungsmittel auf Silikonharzbasis auf, das in einem Arbeitsgang mit dem Magnesit auf die Partikel gesprüht wurde.

Tabelle 31:  
Mittlere Wasseraufnahme der Varianten mit Hydrophobierungsmittel des Versuches 6.

Aushärtung des Bindemittels	Hydrophobierungsmittel	Wasseraufnahme [kg/m <sup>2</sup> ]
Ohne Wärmezufuhr	Magnesit ohne Hydrophobierungsmittel	2,42
	Magnesit mit Hydro - Silikonbasis	0,99 ()
Mit Heißdampf	Magnesit ohne Hydrophobierungsmittel	2,72
	Magnesit mit Hydro - Silikonbasis	0,86 - 1,18
	Magnesit mit Hydro - Wachsbasis (A)	1,98
	Magnesit mit Hydro - Wachsbasis (B)	2,3

In Bild 49 sind Wärmeleitfähigkeitsmesswerte von in Versuch 6 produzierten Probenplatten gegenüber der Plattenrohichte aufgetragen. Die Darstellung zeigt, dass die Wärmeleitfähigkeit der Typha-Aufsparrendämmplatte mit der Plattenrohichte korreliert. Um einen potentiellen Einfluss der variierten Parameter (bspw. Aushärtung des Bindemittels) auf die Wärmeleitfähigkeit zu untersuchen, müssen weiterführende Untersuchungen dazu gemacht werden, da für eine genauere Interpretation der Messwerte der Stichprobenumfang zu gering war.

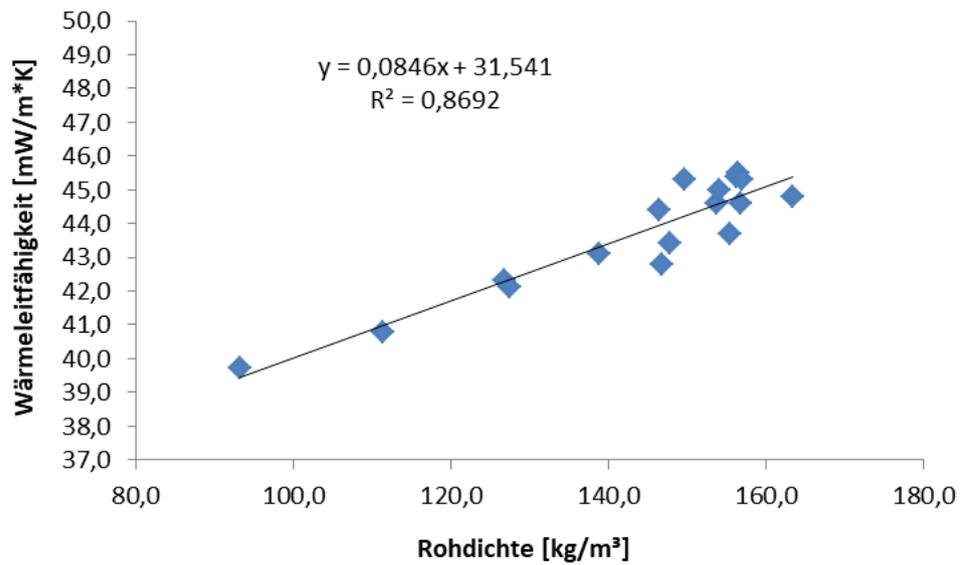


Bild 49:  
Wärmeleitfähigkeit von produzierten Probeplatten in Abhängigkeit von der Rohdichte (Versuch 6).

Zur orientierenden Ermittlung der Brandklasse nach DIN EN 13501 [7] der 3-Schichtigen Typha-Aufsparrendämmplatte wurde ein SBI Test durchgeführt. Bild 50 bis Bild 52 zeigen die Versuchsanordnung mit den Typhaaufdach-Dämmplatten, den Brandversuch und die Situation nach Ende der Beflammung.



Bild 50:  
SBI – Test: Versuchsanordnung mit der 3-schichtigen Variante der Typha-Aufsparrendämmplatte.

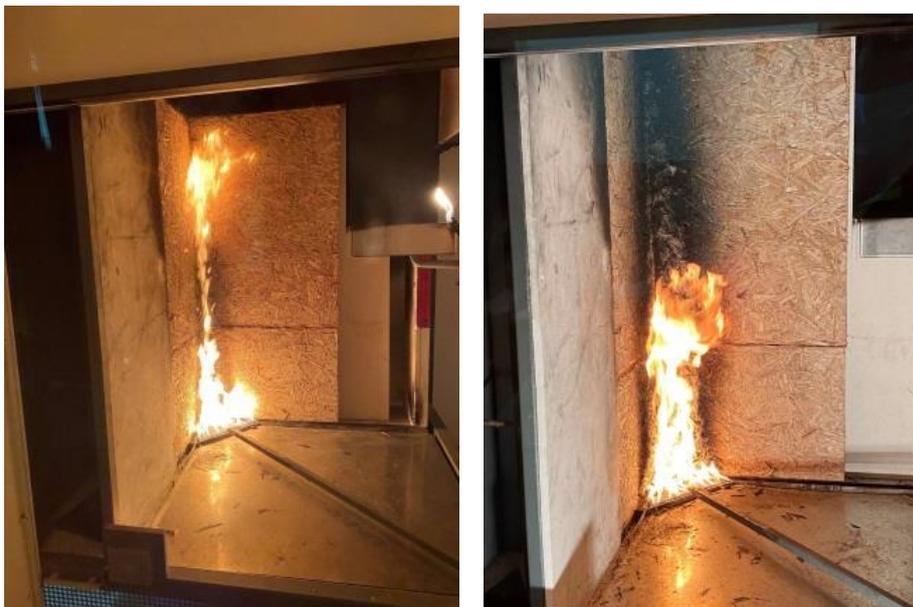


Bild 51:  
SBI – Test: Verschiedene Stadien des Brandversuchs.



Bild 52:  
SBI – Test: Situation nach Ende der Beflammung.

Tabelle 32 zeigt die Einordnung der Messwerte in die Klassifizierungsskala zur Bestimmung der Brandklasse. Das Testergebnis des einzelnen SBI-Testes für die 3-schichtige Typha-Aufsparrendämmplatte erlaubt eine orientierende Einstufung in die Brandklasse A2 s1 d0, wobei aufgrund des fehlenden ISO-Ofentestes lediglich von einer Einstufung in die Brandklasse B oder C ausgegangen werden kann (vgl. 5.1.2). Diese Einschätzung muss durch einen größeren Stichprobenumfang bestätigt werden.

Tabelle 32:  
Messwerte und Klassifizierungsskala des SBI-Testes der 3-schichtigen Typha-  
Probepplatten (Auszug aus dem Versuchsprotokoll).

Messwerte:						Sollwerte:				
Probe		1	2	3	Ø	A1	A2	B	C	D
THR (600s)	MJ	3,009			3,01	≤4,0	≤7,5	≤7,5	≤15	-
FIGRA 0,2	W/s	94,69			94,7	≤20	≤120	≤120	-	
FIGRA 0,4	W/s	50,52			50,5	-			≤250	≤750
LFS	Ja / Nein	Nein				Nein	Nein	Nein	Nein	-
						<b>-s1</b>	<b>-s2</b>		<b>-d0</b>	<b>-d1</b>
TSP (600s)	m <sup>2</sup>	27,00			27,0	≤50	≤200		-d2 = weder -d0 noch -d1	
SMOGRA	m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>	0,00			0,0	≤30	≤180			
FDP ≤10s weiterbrennen	Ja / Nein	Nein				-s3 = weder -s1 noch -s2			Nein	Ja
FDP >10s weiterbrennen	Ja / Nein	Nein							Nein	Nein

## 6 Platten für Prüfstand und Demogebäude

### 6.1 Hygrothermische Materialkennwerte

Während der einzelnen Versuche zur Optimierung der Aufdachdämmung durch Variation des Bindemittels, der Partikelanordnung, der Herstellungsart oder anderer Parameter wurden zur Kontrolle des Einflusses bzw. des Erfolgs unterschiedliche Materialparameter bestimmt. Diese Ergebnisse sind zur einfacheren Lesbarkeit und Interpretation der Einflüsse auf die Materialeigenschaft an der jeweiligen Stelle aufgeführt. Aus diesem Grund werden in diesem Kapitel nur die Ergebnisse der Materialkennwertbestimmungen des im Rahmen dieses Projektes optimierten und in die Demonstrationsflächen eingebauten Produkts zusammengefasst und mit dem zu Beginn des Vorhabens vorliegenden Typhoaboard verglichen und bewertet.

Für ein besseres Verständnis bei der Beurteilung und beim Einsatz der Kennwerte werden im Folgenden kurz deren Bedeutung und die zugehörigen Messverfahren dargestellt und mit den Teilergebnissen am Aufdachdämmmaterial ergänzt.

#### 6.1.1 Bestimmung der Wärmefreisetzungsrate

Zur schnellen und groben Einstufung der Brandeigenschaften wurde ein Brandtest nach ISO5660 [8] durchgeführt. Bild zeigt den schematischen Aufbau des dafür eingesetzten sogenannten Cone Calimeters.

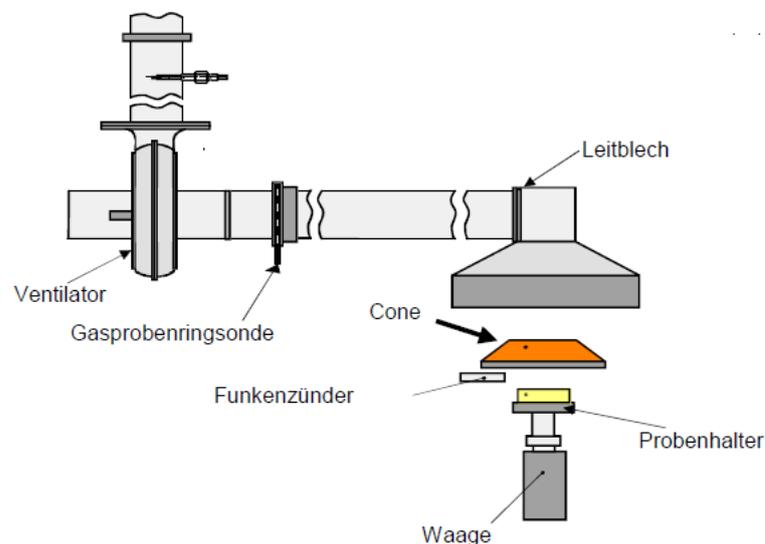


Bild 53:  
Schematischen Aufbau des zur Einstufung der Brandeigenschaften eingesetzten sogenannten Cone Calimeters.

Getestet wurde dabei ein Probenmaterial mit Kasein als Bindemittel und eines mit Magnesit. In Tabelle 33 sind die Ergebnisse des Test mit Kaseinbindung und in Tabelle 34 die mit Magnesitbindung aufgelistet.

Tabelle 33:

Ergebnisse des Brandtests nach ISO5660 für die Typhaprobe mit Kaseinbindung (Auszug aus dem Versuchsprotokoll).

Product	Time to ignition (s)	THR (MJ/m <sup>2</sup> )	q <sub>max</sub> (kW/m <sup>2</sup> )	q <sub>180</sub> (kW/m <sup>2</sup> )	SPR <sub>max</sub> (m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> s)	TSP (m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )	Indicated Euroclass*
Bulrush with Casein binder, irradiance 35 kW/m <sup>2</sup>	8	28.0	142	66	0.5	19	E or worse
Bulrush with Casein binder, irradiance 50 kW/m <sup>2</sup>	4	31.3	174	80	0.6	37	E or worse

Tabelle 34:

Ergebnisse des Brandtests nach ISO5660 für die Typhaprobe mit Magnesitbindung (Auszug aus dem Versuchsprotokoll).

Product	Time to ignition (s)	THR (MJ/m <sup>2</sup> )	q <sub>max</sub> (kW/m <sup>2</sup> )	q <sub>180</sub> (kW/m <sup>2</sup> )	SPR <sub>max</sub> (m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> s)	TSP (m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )	Indicated Euroclass <sup>1</sup>
Bulrush with magnesite binder, irradiance 35 kW/m <sup>2</sup>	NI	6.2	16	-	0.6	19	B
Bulrush with magnesite binder, irradiance 50 kW/m <sup>2</sup>	NI	8.5	15	-	1.6	41	B

NI = No ignition

Bei diesem Brandtest ergab sich mit dem organischen Bindemittel Kasein eine Einstufung nach Euroclass E oder schlechter. Mit dem mineralischen Bindemittel Magnesit wird dagegen eine wesentlich bessere Einstufung nach Euroclass B erreicht. Dies ist die beste Einstufung, die für ein Material, das brennbare Bestandteile beinhaltet, erreichbar ist.

### 6.1.2 Wärmeleitfähigkeit

Die Wärmeleitfähigkeit wird mit dem Ein- und Zweiplattenverfahren nach DIN DIN EN 12664 [9] bestimmt. Die Proben werden zwischen einer Heiz- und einer

Kühlplatte angeordnet. Im stationären Temperaturzustand fließt ein konstanter Wärmestrom durch die Proben. Die Wärmeleitfähigkeit wird bestimmt aus dem Wärmestrom, der mittleren Temperaturdifferenz zwischen den Probenoberflächen und den Abmessungen der Proben. Für diese Untersuchungen steht am IBP in Holzkirchen ein spezieller Plattenapparat für kleinere Prüfkörper mit Abmessungen von 24 cm x 24 cm zur Verfügung (s. Bild 54), mit dem in Anlehnung an die Norm zeitnah in der Optimierungsphase die Wärmeleitfähigkeit vor Ort ermittelt werden kann.



Bild 54:  
Fotografische Ansicht der Messeinrichtung zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit.

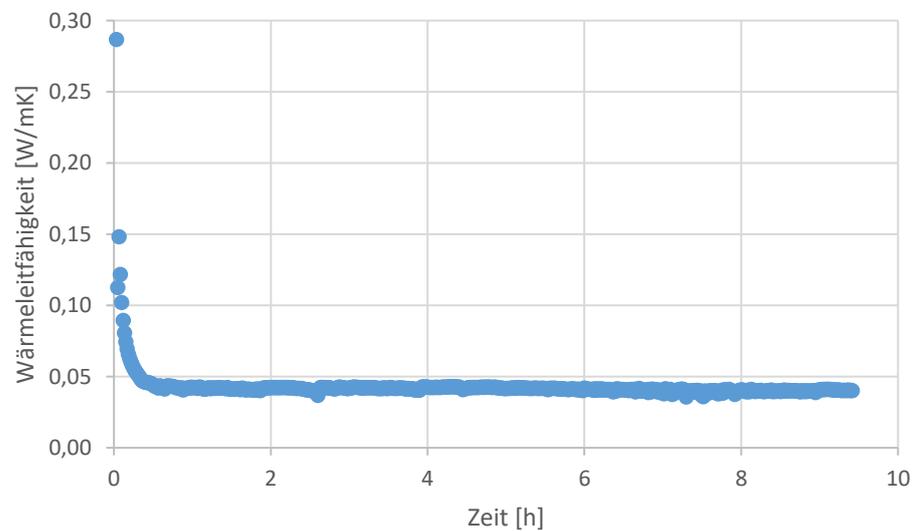


Bild 55:  
Einschwingvorgang der Lambdamessung der 8 cm dicken Aufdachdämmung, gemessen mit dieser Anlage.

Bild 55 zeigt den Einschwingvorgang der Lambdamessung der 8 cm dicken Aufdachdämmung, gemessen mit dieser Anlage. Es ergibt sich damit ein Messwert der Wärmeleitfähigkeit von 0,041 W/mK.

### 6.1.3 Diffusionswiderstandszahl

Die Diffusionswiderstandszahl beschreibt den Wasserdampfdiffusionswiderstand eines Materials im Vergleich zu einer Luftschicht gleicher Dicke. Die Diffusionswiderstandszahl von Luft ist dementsprechend gleich 1, wogegen die der Baumaterialien meist deutlich höher liegt.

Für die Bundesrepublik Deutschland ist die Durchführung der Messung von Dampfdiffusionskoeffizienten gemäß DIN EN ISO 12572 [10] genormt. Dabei wird nach Trockenbereichsverfahren für einen Feuchtigkeitsbereich zwischen 0 bis 50 % r.F., allgemein als "dry-cup"-Verfahren bekannt, und Feuchtbereichsverfahren für einen Feuchtigkeitsbereich zwischen 50 bis 100 % r.F. ("wet-cup") unterschieden. Die Messung erfolgt unter isothermen Bedingungen.



Bild 56:  
Auf die Prüfgefäße dicht aufgebrachte Typhaplatten während der Diffusionswiderstandsmessung.

Eine plattenförmige Probe des zu prüfenden Materials wird als oberer Abschluss auf ein Gefäß aufgesetzt und dampfdicht mit dem Gefäßrand verbunden. Im Gefäß wird durch ein Trocknungsmittel oder eine gesättigte Salzlösung eine konstante relative Luftfeuchtigkeit eingestellt. Die Gefäße werden in einen Klimaraum mit konstanter Temperatur und Luftfeuchte gebracht. Unter dem Einfluss des Wasserdampfpartialdruckgefälles zwischen den an die Probenoberfläche angrenzenden Lufträumen diffundiert Wasserdampf durch die Proben hindurch. Nach Einstellen eines stationären Diffusionsstromes ergibt

sich eine pro Zeiteinheit konstante Gewichtsänderung des Messgefäßes, welche dem Diffusionsstrom entspricht. Bild 56 zeigt die eingebauten Prüfkörper während der Messung. Bild 57 zeigt den Messverlauf der Dry-cup-Messung. Die Messungen ergeben einen mittleren Diffusionswiderstandskoeffizienten von 18,3 im Dry-cup-Verfahren und 16,5 im Wet-cup-Verfahren.

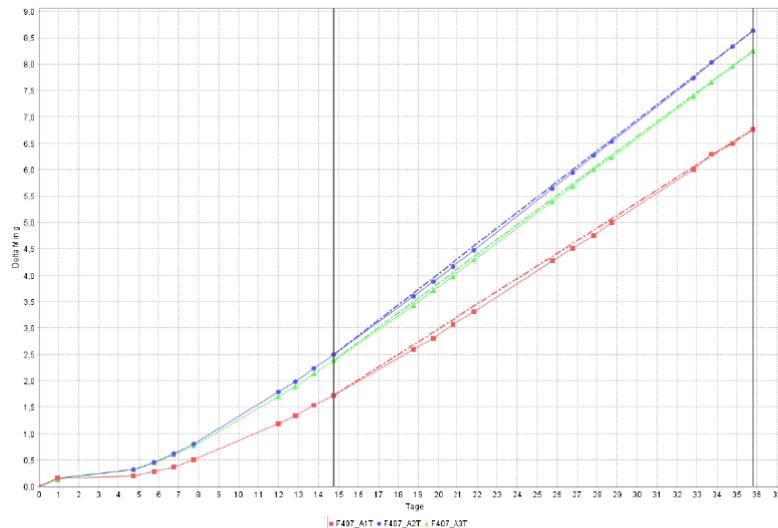


Bild 57:  
Messverlauf der Dry-cup-Messung der Typha Aufdachdämmung.

#### 6.1.4 Wasseraufnahmekoeffizienten

Der Wasseraufnahmekoeffizient beschreibt die Feuchtaufnahme eines Materials über die Benetzungsfläche. Bei Materialien mit zeitlich konstanter Porenstruktur erfolgt die Wasseraufnahme stets linear mit der Wurzel der Zeit.

Zur Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten nach DIN EN ISO 15148 [11] werden die Proben an den Seitenflächen abgedichtet und mit der Saugfläche nach unten 2 bis 10 mm tief in ein Wasserbad eingetaucht. Die Proben werden vor dem Eintauchen in das Wasserbad und dann in bestimmten Zeitabständen gewogen. Vor der zweiten und den folgenden Wägungen wird an der Saugfläche oberflächlich anhaftendes Wasser mit einem feuchten Schwammtuch entfernt. Trägt man die flächenbezogene Wasseraufnahme über der Wurzel der Zeit auf, ergibt sich für die meisten mineralischen Baustoffe eine Gerade. Aus der Steigung der Geraden kann der Wasseraufnahmekoeffizient (w-Wert) ermittelt werden. Ergibt sich keine mit der Wurzel der Zeit lineare Wasseraufnahme, wird der w-Wert aus der Wasseraufnahme nach 24 Stunden ermittelt. Wie aus Bild 58 ersichtlich, zeigt sich bei der Typhaaufdachdämmung eine deutliche Abweichung vom  $\sqrt{t}$ -Verhalten. Dementsprechend ergibt die normgerechte Auswertung nach 24 Stunden Saugzeit einen mittleren w-Wert von 1,56 kg/m<sup>2</sup>√h.

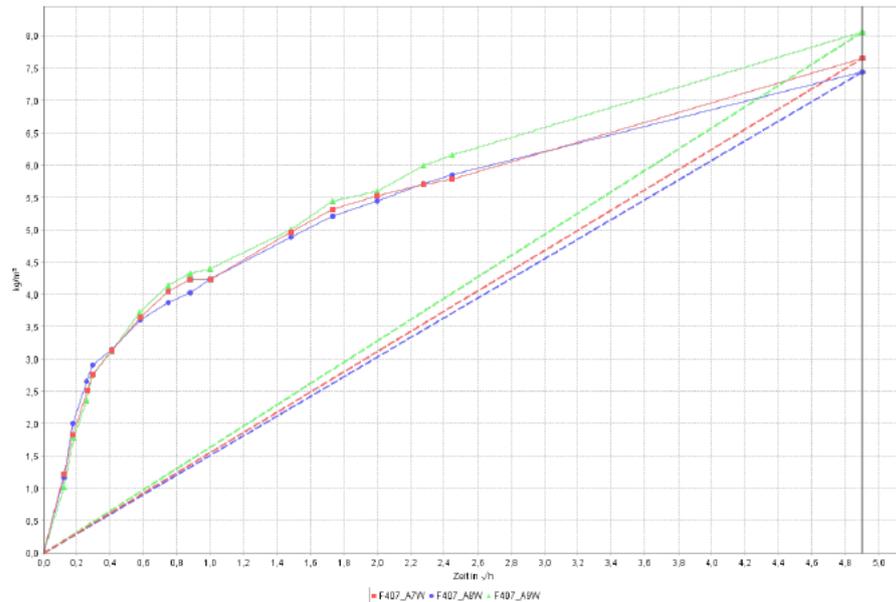


Bild 58:  
Zeitlicher Verlauf der Wasseraufnahme der Typhaaufdachdämmung bei einseitigen Kontakt mit Wasser.

Der Wasseraufnahmekoeffizient beschreibt nur die Wasseraufnahme eines Baustoffes über die Oberfläche, nicht aber die Verteilung des Wassers innerhalb des Materials. Mit Hilfe von Kapillartransportkoeffizienten, deren messtechnische Bestimmung aber einen hohen apparatetechnischen Aufwand bedeutet, lassen sich für die Wasseraufnahme die Feuchteverteilungen berechnen. Diese für hygrothermische Berechnungen wesentlichen Transportkoeffizienten für den Saugvorgang können mit guter Näherung auch aus Standardstoffkennwerten (der  $w$ -Wert, der freien Wassersättigung und dem Bezugsfeuchtegehalt) approximiert werden [12].

### 6.1.5 Freie Sättigung

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

Zur Bestimmung der freien Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck gemäß DIN 52103 [13] werden entsprechend vorbereitete und gewogene Prüfkörper in ein Wasserbad, gefüllt mit Leitungswasser, auf einen Gitterrost gelegt. Die Prüfkörper werden zunächst für 1 Stunde nur bis zur Hälfte eingetaucht. Dann werden sie mit 20 mm  $\pm$  5 mm Wasser überdeckt und in regelmäßigen Zeitintervallen gewogen. Oberflächlich anhaftendes Wasser wird mit einem feuchten Schwammtuch entfernt. Die freie Wasseraufnahme ist beendet, wenn Gewichtskonstanz erreicht ist, d. h. der Prüfkörper ändert sein Gewicht in 24

Stunden um nicht mehr als 0,1 M.-%. Anschließend werden die Prüfkörper bis zur Gewichtskonstanz im Trockenschrank getrocknet (Trocknungstemperatur 110 °C bzw. 40 °C für gipshaltige Baustoffe oder für Baustoffe, bei denen höhere Temperaturen zu vermeiden sind, bei Kunststoffen 70 °C). Die Bestimmung der Wasseraufnahme von Beschichtungsstoffen erfolgt analog. Dazu werden die Materialien auf Aluminiumbleche aufgebracht.

#### **6.1.6 Sorptionsfeuchte**

Zur Bestimmung der Sorptionsfeuchte gibt es ein allgemein angewandtes, sehr einfaches Verfahren. Die Probe wird in einem über einer Salzlösung oder mit Hilfe eines Klimaschranks eingestellten Klima gelagert und der Ausgleichsfeuchtegehalt durch Wiegen der Probe ermittelt. Durch schrittweises Variieren der relativen Luftfeuchte von relativ niedrigen (< 50 % r.F.) zu hohen Feuchten (bis 95 % r.F.) erhält man die Adsorptionsisotherme bzw. bei umgekehrter Vorgehensweise die Desorptionsisotherme. Messungen oberhalb von 95 % r.F. sollten nicht durchgeführt werden, da in diesem Bereich bei hygroskopischen mineralischen Baustoffen die Sorptionsisotherme extrem steil ist. Kleine nicht auszuschließende Schwankungen der relativen Luftfeuchte (z.B. durch Temperaturschwankungen) bewirken nämlich bereits sehr große Änderungen der Sorptionsfeuchte. Die Ermittlung einer Sorptionsisotherme dauert je nach Probenmaterial und der Anzahl der Feuchtestufen aufgrund der sehr langsamen Einstellung der Ausgleichsfeuchte mehrere Wochen bis Monate. Das Messverfahren ist innerhalb der DIN EN ISO 12571 [14] normiert.

#### **6.1.7 Feuchtespeicherfunktion**

Da die direkte messtechnische Bestimmung der Feuchtespeicherfunktion mit Hilfe der Saugspannungsmessung [15] sehr zeitaufwändig und fehleranfällig ist, wurde am IBP dazu ein Approximationsverfahren entwickelt [16]. Dabei dienen die gemessenen Sorptionsfeuchten sowie die freie Wassersättigung als Eingangsparameter. Bild 59 zeigt für die untersuchte Typhaplatte das Ergebnis der Anpassung der Feuchtespeicherfunktion mit dem dafür entwickelten Berechnungstool.

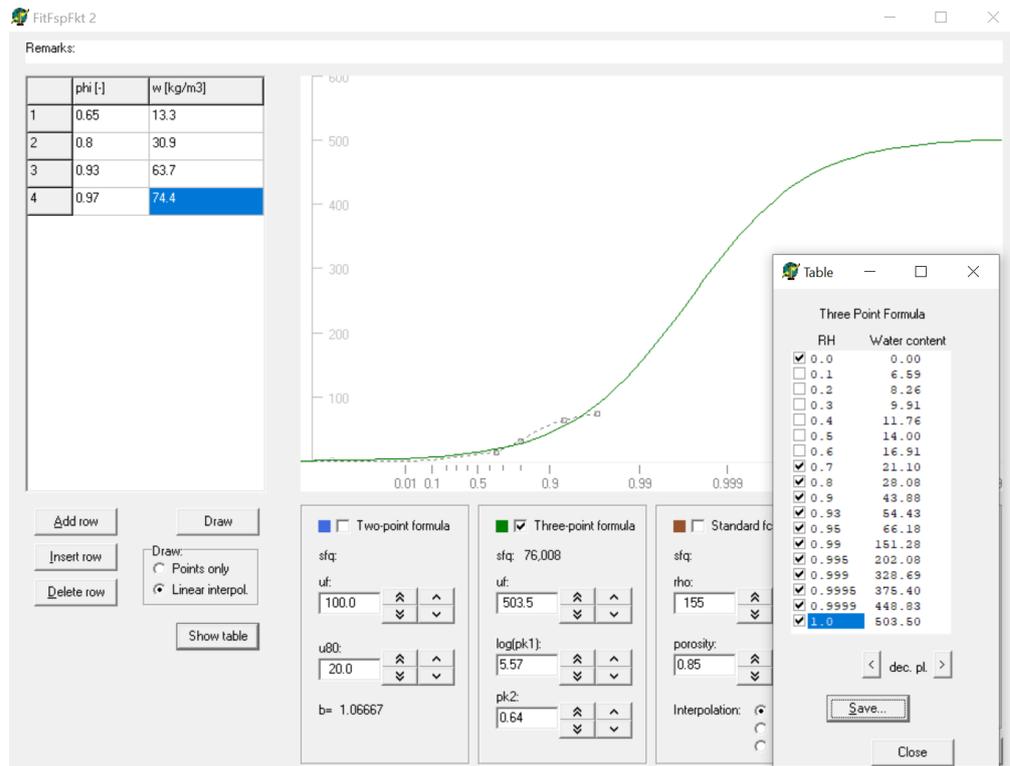


Bild 59:  
Ermittlung der Feuchtespeicherfunktion der Typhaplatte unter Verwendung der gemessenen sorptionsfeuchtegehalte und der freien Wassersättigung.

### 6.1.8 Kapillare Rückleitung (Kapi-Test)

Die Kapillartransportkenngrößen für die kapillare Rückleitung diffusionsoffener kapillaraktiver Dämmstoffe können nicht direkt vom Wasseraufnahmekoeffizienten, dem sogenannten w-Wert, abgeleitet werden, da es sich hier um eine andere Art der Feuchtaufnahme handelt. Bei einer Innendämmung gelangt die Feuchtigkeit nicht über kapillares Saugen in das Material, sondern über Wasserdampfdiffusion bis zu der Stelle, an der aufgrund Unterschreitung der Taupunkttemperatur Kondensat ausfällt. Im Gegensatz zum Saugvorgang, bei dem zunächst die größeren Poren maßgeblich den Transport übernehmen, werden hier zuerst die kleineren Poren mit Wasser gefüllt, da bei ihnen aufgrund der Erniedrigung des Sättigungsdampfdruckes über konkav gekrümmte Menisken zuerst die Tauwasserbedingung erreicht wird. Diese leiten das Wasser gegebenenfalls kapillar zurück. Hinzu kommt, dass hier auch Porenbereiche mit Wasser gefüllt werden können, die beim Saugvorgang nicht erreicht werden. Dies ist darin begründet, dass die Befeuchtung hier nicht über kapillares Saugen erfolgt, sondern über Dampfdiffusion bis zur Stelle, an der das Tauwasser dann ausfällt (auf diese Weise werden zum Beispiel kapillar völlig inaktive Materialien, wie z.B. Polystyrolplatten, aufgefuechtet). Demzufolge können sich für diesen Transportvorgang andere Kapillartransportkoeffizienten ergeben als für den Saugvorgang bei Berechnung bzw. der Weiterverteilung beim Trocknungsvorgang. Um die Kapillaraktivität von Innendämmungen (ihr kapillares Rücktransportvermögen) zu überprüfen, wurde am Fraunhofer-Institut für

Bauphysik deshalb das folgend beschriebene neue Labor-Testverfahren entwickelt, das den Feuchtetransport im Material möglichst ähnlich den realen Einsatzbedingungen abbildet. Es ermöglicht, die Kapillaraktivität von Innendämmungen ohne Kontakt mit flüssigem Wasser und unter nicht-isothermen Randbedingungen mit entgegen gesetztem Dampf- und Flüssigtransport zu ermitteln und erlaubt damit die Bestimmung korrekterer Kennwerte für den kapillaren Rücktransport und in der Folge zuverlässigere Aussagen über die tatsächliche Regulierungsfunktion kapillaraktiver Innendämmungen.

Ein prismatischer Probekörper (48 mm x 48 mm x Probendicke, angepasst an die vorhandene Möglichkeit der Kernspinspektroskopie) wird an fünf Seiten (seitlich und rückseitig) mit Epoxidharz abgedichtet. Die Rückseite der Probe wird an ein Kühlelement angebracht, mit Hilfe dessen die Taupunkttemperatur des Raumklimas unterschritten wird. Die Vorderseite ist dem Raumklima (23 °C, 65 % r. F.) ausgesetzt. Der einsetzende Diffusionsstrom feuchter Innenraumluft führt zum Anstieg der relativen Feuchte im rückwärtigen Probenbereich. Ein zunehmender Flüssigtransport zurück in den wärmeren und noch trockeneren Vorderbereich des Probekörpers wird hierdurch in Gang gesetzt. In Abhängigkeit von den Randbedingungen und den Materialeigenschaften stellt sich so – bei ausreichendem kapillarem Rücktransport – ein Gleichgewichtszustand ein, bei dem sich die gegenläufigen Feuchtetransportvorgänge die Waage halten. Der Versuchsaufbau ist in der nachfolgenden Skizze in Bild 60 dargestellt.

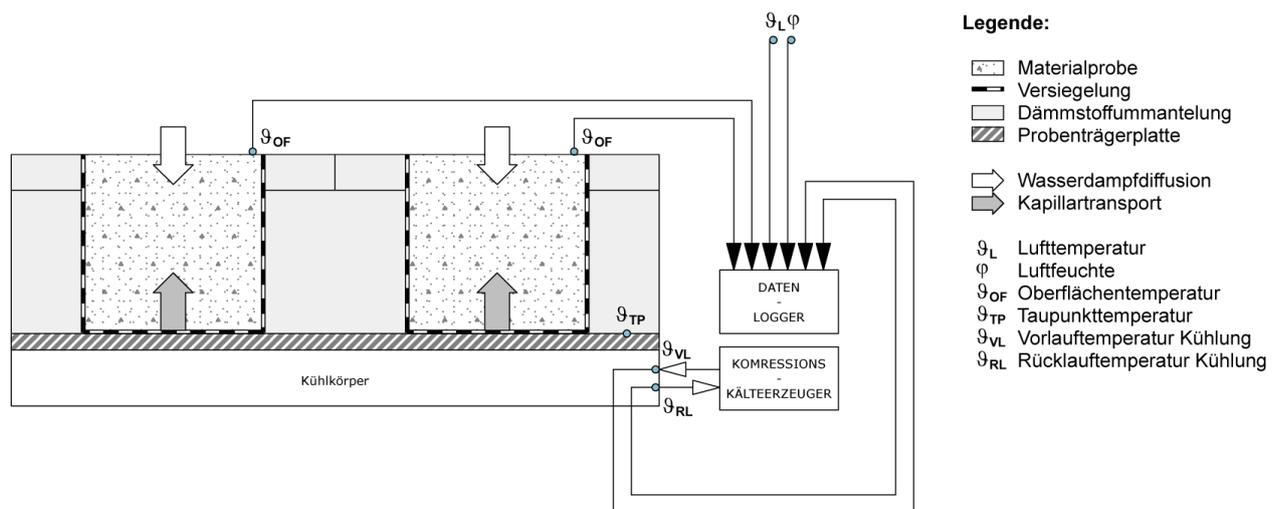


Bild 60:  
Schematische Darstellung des sogenannten „Kapi-Tests“ zur Untersuchung des kapillaren Rücktransports in Innendämmungen [17].

Um das hygrothermische Verhalten der Materialien während der Versuche zu bestimmen, werden zwei Messungen durchgeführt: Über regelmäßiges Wiegen wird die absolute Feuchtaufnahme und über Kernspinspektroskopie (NMR, siehe Bild 61) die Verteilung der Feuchte innerhalb der Probe bestimmt. Die eigentliche Ermittlung der Flüssigtransportkennwerte wird dann mit Hilfe hygrothermischer Simulationen [18, 19] durchgeführt, wobei die Kennwerte schrittweise so angepasst werden, dass sowohl der Feuchtegehalt als auch die

Feuchteverteilung innerhalb der Proben möglichst optimal mit den gemessenen Werten übereinstimmen.

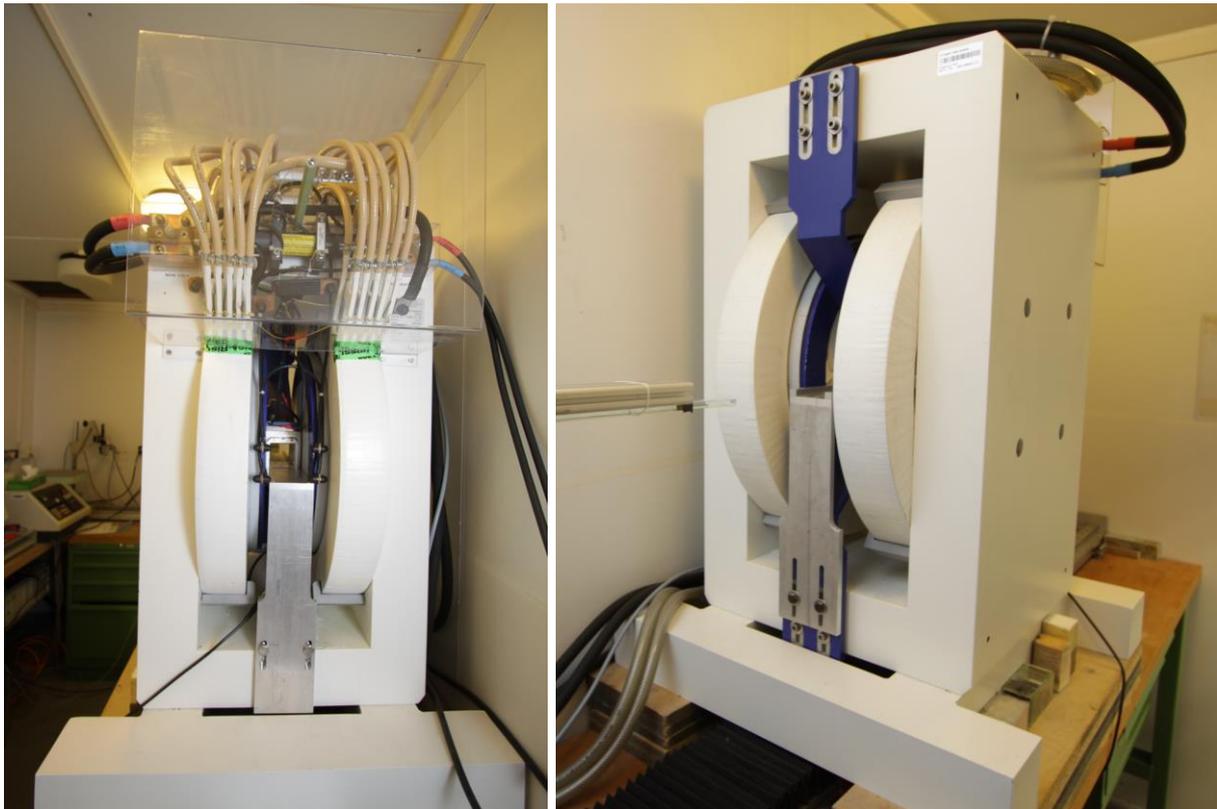


Bild 61:  
NMR-Anlage zur Ermittlung der Wassergehaltsverteilung im Prüfkörper.

### 6.1.9 Bestimmung der Kapillartransportkoeffizienten

Im Folgenden wird zum besseren Verständnis auch beschrieben, wie komplex die Bestimmung eines allgemein geeigneten Kapillartransportkoeffizienten ist. Als Grundkennwert für Kapillartransportvorgänge ist zumeist nur der Wasseraufnahmekoeffizient, der sogenannte  $w$ -Wert, allgemein bekannt. Er beschreibt als integrale Kenngröße die Wasseraufnahme des Materials bei Kontakt mit flüssigem Wasser. Mit Beendigung des Wasserkontaktes (in der Praxis dem Ende der Berechnung) findet aber weiterhin ein Kapillartransport statt. Im Gegensatz zur Wasseraufnahme, bei der die großen Poren maßgeblich sind, findet hier eine Umverteilung des Wassers von den großen in die kleineren Poren statt. Dieser Transportvorgang kann deshalb nicht mit denselben Kapillartransportkoeffizienten beschrieben werden wie die Wasseraufnahme, er läuft wesentlich langsamer ab. Hinzu kommt, dass nach derzeitigem Kenntnisstand der im Dry-cup und Wet-cup ermittelte Unterschied, zumindest bei minera-

lischen Materialien, auf einem parallel zur Diffusion ablaufenden Flüssigtransportvorgang beruht, der verwirrenderweise als Oberflächendiffusion bezeichnet wird.

Bei einer Innendämmung gelangt, wie bereits beschrieben, die Feuchtigkeit nicht über kapillares Saugen in das Material, sondern über Wasserdampfdiffusion bis zu der Stelle an der aufgrund Unterschreitung der Taupunkttemperatur Kondensat ausfällt. Die Folge ist, dass dieser Transportvorgang wieder mit einem anderen Kapillartransportkoeffizienten beschrieben werden müsste. In der Praxis ergibt sich damit aber das Problem, dass für eine physikalisch korrekte Beschreibung bei einer hygrothermischen Berechnung für jede dieser Transportarten der diesbezügliche Transportkoeffizient angesetzt werden müsste. Das wird dann schwierig, wenn das gleiche Produkt für unterschiedliche Anwendungsbereiche eingesetzt werden soll, also z.B. sowohl als Außendämmung als auch als Innendämmung. Der Ansatz mit zwei unterschiedlichen Materialdatensätzen wird in der Praxis aufgrund der fehlenden Berücksichtigung beim Anwender mit hoher Wahrscheinlichkeit zu Fehlberechnungen führen. Hinzu kommt, dass die Transportmechanismen auch parallel auftreten können. So kann gerade die Aufdachdämmung von außen durch Undichtigkeiten mit Regenwasser und von Innen z.B. durch rückseitige Konvektion mit Tauwasser beaufschlagt werden. Aus diesem Grund wird versucht, soweit möglich, mit einer Kapillartransportfunktion alle diese Transportvorgänge abzudecken.

Für die Ableitung dieser Kapillartransportfunktion wird deshalb iterativ vorgegangen, indem die Transportkoeffizienten solange angepasst werden, bis die damit durchgeführten Berechnungen eine möglichst gute Übereinstimmung mit dem Wassergehaltsverlauf beim Saugvorgang, beim Trocknungsvorgang nach Sättigung, aber auch bei der Wasseraufnahme im Kapi-Test sowie beim sich dabei einstellenden Feuchteprofil ergeben. Zusätzlich sollte auch der beim Dry-cup und Wet-cup ermittelte Unterschied möglichst korrekt wiedergegeben werden.

Bild 62 zeigt für die Aufdachdämmung, in einen Zwischenschritt dieser Vorgehensweise, dass eine gute Übereinstimmung des Trocknungsverlaufs bei gleichzeitig korrektem Resultat für das resultierenden Wet-cup-Ergebnis erzielbar ist. Während zwei Materialproben ein sehr ähnliches Trocknungsverhalten zeigen, weicht eine Probe deutlich davon ab.

Gemessene  $\mu$ -Werte

Dry-Cup : 18.3

Wet-Cup: 16.5

Nachberechnete  $\mu$ -Wert

Wet-Cup: 16.5 (mit bei 93 % ergänzten Dww)

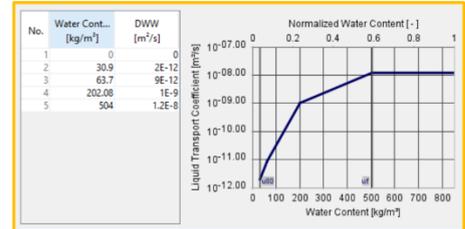
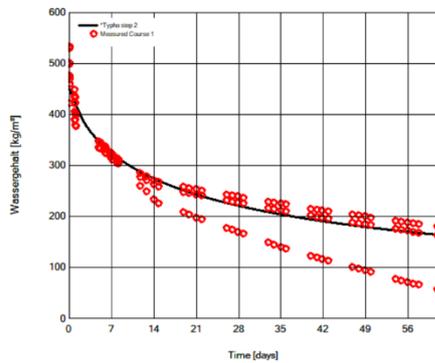


Bild 62:

Darstellung des Zwischenschrittes zur Anpassung des berechneten Trocknungsverhaltens bei gleichzeitiger Anpassung an das Ergebnis der Wet-cup-Messung.

Bild 63 zeigt die erreichte Übereinstimmung zwischen Messung und Berechnung beim Kapi-Test, sowohl in Bezug auf den zeitlichen Verlauf der Wasseraufnahme als auch beim resultierenden Wassergehaltsprofil am Ende des Versuchs.

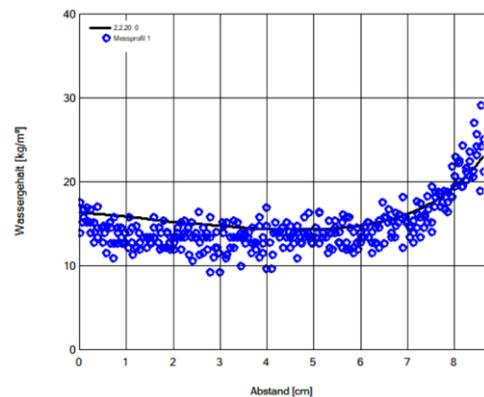
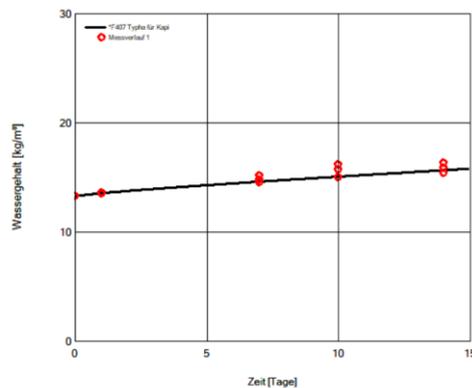


Bild 63:

Vergleich Messung und Berechnung beim Kapi-Test, Verlauf der Wasseraufnahme (links) und Wassergehaltsprofil am Ende des Versuchs (rechts).

## 6.1.10 Vergleich der Kennwerte mit Ausgangszustand

In Tabelle 35 sind die hygrischen Kennwerte aufgelistet, Tabelle 36 zeigt die erhaltenen Kapillartransportkoeffizienten.

Tabelle 35:  
Zusammenstellung der feuchtetechnischen Materialkennwerte der Typhaaufdach-Dämmung.

Probe Nr.	Eigenschaft	Einheit	Ergebnis	
			Einzelwerte	Mittelwert
F407_A10 F407_A11 F407_A12	Rohdichte trocken (40 °C, trockene Umluft)	[kg/m <sup>3</sup> ]	157 159 151	155
F407_A25	Reindichte	[kg/m <sup>3</sup> ]		1021
F407_A25	Porosität	[%]		84,82
F407_A1 F407_A2 F407_A3	Diffusionswiderstandszahl $\mu$ (23-0/50)	[-]	20,4 17,3 17,3	18,3
F407_A4 F407_A5 F407_A6	Diffusionswiderstandszahl $\mu$ (23-50/93)	[-]	<sup>-1)</sup> 17,2 15,7	16,5
F407_A7 F407_A8 F407_A9	Wasseraufnahmekoeffizient $t w_{1h}$	[kg/m <sup>2</sup> √h]	4,2 4,2 4,4	4,3
F407_A7 F407_A8 F407_A9	Wasseraufnahmekoeffizient $w_{4h}$	[kg/m <sup>2</sup> √h]	2,8 2,7 2,8	2,8 <sup>2)</sup>
F407_A7 F407_A8 F407_A9	Wasseraufnahmekoeffizient $w_{24h}$	[kg/m <sup>2</sup> √h]	1,6 1,5 1,6	1,6
F407_A13 F407_A14 F407_A15	Feuchtegehalt bei 23 °C u. 65 % r.F.	[Vol. %]	1,35 1,29 1,34	1,33
F407_A16 F407_A17 F407_A18	Feuchtegehalt bei 23 °C u. 80 % r.F.	[Vol. %]	2,12 3,06 3,10	3,09
F407_A19 F407_A20 F407_A21	Feuchtegehalt bei 23 °C u. 93 % r.F.	[Vol. %]	6,43 6,24 6,44	6,37
F407_A22 F407_A23 F407_A24	Feuchtegehalt bei 23 °C u. 97 % r.F.	[Vol. %]	7,73 7,44 7,15	7,44
F407_A10 F407_A11 F407_A12	Freie Wassersättigung	[Vol. %]	53,4 50,12 47,62	50,4

1) Probe beschädigt.

Tabelle 36:  
Kapillartransportkoeffizienten der Typhaaufdachdämmung.

Kapillartransportkoeffizient für Saugen	$D_{W80}$ [m <sup>2</sup> /s]	80 % r.F.	$4.8 \cdot 10^{-11}$
	$D_{W100}$ [m <sup>2</sup> /s]	100 % r.F.	$3.2 \cdot 10^{-8}$
Kapillartransportkoeffizient für Weiterleiten	$D_{W80}$ [m <sup>2</sup> /s]	80 % r.F.	$2.0 \cdot 10^{-12}$
	$D_{W93}$ [m <sup>2</sup> /s]	93 % r.F.	$9.0 \cdot 10^{-12}$
	$D_{W99.5}$ [m <sup>2</sup> /s]	99.5 % r.F.	$1.0 \cdot 10^{-9}$
	$D_{W100}$ [m <sup>2</sup> /s]	100 % r.F.	$1.2 \cdot 10^{-8}$

Vergleicht man diese Materialeigenschaften mit denen des Produktes vor Projektbeginn (siehe Tabelle 37) wird, deutlich welche Verbesserungen erzielt worden sind. Die Rohdichte konnte von 270 kg/m<sup>3</sup> auf 155 kg/m<sup>3</sup> gesenkt werden, was eine deutliche Senkung der Auflast am Dach und Entlastung der Handwerker bedeutet. Mit dieser Absenkung der Rohdichte ist auch eine Reduktion der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl verbunden, um nahezu den gleichen Faktor von 28 auf 18,3.

Diese Erhöhung der Diffusionsoffenheit wirkt sich an den meisten Standorten positiv auf das Feuchteverhalten der Aufdachdämmung aus, wie die Berechnungen der Einsatzgrenzen in Kapitel 8 zeigen. Die Feuchtespeicherfähigkeit hat tendenziell zugenommen, allerdings auch der Wasseraufnahmekoeffizient. Während ersteres positiv zu bewerten ist, kann sich die Zunahme des Wasseraufnahmekoeffizienten nachteilig auswirken, allerdings nur insofern das Material direkt mit Wasser beaufschlagt wird. In der Praxis ist dies lediglich in der kurzen Periode vor der Neueindeckung des Daches von Bedeutung.

Tabelle 37  
 Feuchtetechnischen Materialkennwerte der Typhaplatte zu Projektbeginn.

Eigenschaft	Einheit	Ergebnis
Rohdichte trocken	kg/m <sup>3</sup>	270
Reindichte	kg/m <sup>3</sup>	1095
Porosität	%	75,3
Diffusionswiderstandszahl $\mu$ (23-0/50)	---	28
Diffusionswiderstandszahl $\mu$ (23-50/93)	---	19,8
Wasseraufnahmekoeffizient $w_{4h}$	kg/m <sup>2</sup> √h	1,6
Wasseraufnahmekoeffizient $w_{24h}$	kg/m <sup>2</sup> √h	1,1
Feuchtegehalt bei 23 °C u. 65 % r.F.	[Vol.%]	0,65
Feuchtegehalt bei 23 °C u. 80 % r.F.	[Vol.%]	1,17
Feuchtegehalt bei 23 °C u. 93 % r.F.	[Vol.%]	2,88
Feuchtegehalt bei 23 °C u. 97 % r.F.	[Vol.%]	6,94
Freie Wassersättigung	[Vol.%]	58,8

## 6.2 Herstellung Flexdachplatten

Die Herstellung der Platten für das Flexdach-Gebäude ist in Kapitel 5.2.2 bei der Beschreibung der Versuche mit der Spanplattenfertigungsanlage erläutert worden. Lediglich die zum Vergleich mit eingebaute einlagige 8 cm dicke 3-Schicht-Aufdachdämmung wurde nicht dort, sondern im Technikum der Firma Typha Technik, hergestellt. Dabei kam das in Kapitel 6.3 beschriebene Verfahren zum Einsatz, nur mit dem unterschied der größeren Dicke.

## 6.3 Herstellung Demogebäudeplatten

Wegen der 3-schichtigkeit des herzustellenden Plattenmaterials und dem Umstand, dass hierfür zwei verschiedene Partikelgrößen benötigt werden, war es notwendig, zur vorhandenen Mischtrommel mit ca. 2m<sup>3</sup> eine zweite Mischtrommel mit ca. 0,8m<sup>3</sup> Volumen für die Deckschichten bauen zu lassen. Nur mit einer Beschickung dieser beiden Mischeinrichtungen zugleich war es möglich, die drei Schichten in einem Zug in die Form einzubringen. Auch ein zweites Silo wurde notwendig, um beide Partikelsorten parallel zur Verfügung zu haben. Für das Demogebäude wurden 40 Platten mit den Maßen 2,5x1,0x0,6m hergestellt in folgender Abfolge der Produktionsschritte:

- 1a) Herstellen der Kernschichtpartikel durch Abtrennen der aerenchymärmeren Seitenbereiche der Blattbündel, Zuführen der Kernzone in den 6mm-Schneideblock und Weiterleiten auf Band in die Querschneideeinrichtung zur Erzeugung von Partikeln mit 70mm Länge, Einblasen in Silo 1.
- 1b) Herstellen der Deckschichtpartikel durch Aufspalten der Blattbündel im 3mm Schneidblock, Weiterleiten auf das Band in die Querschneideeinrichtung zur Erzeugung von Partikeln mit 70mm Länge, Einblasen in Silo 2.
- 2a) Entnahme der Kernschichtpartikel aus Silo 1 mit Förderband, Beleimen mit Magnesitemulsion durch einsprühen in die große Mischtrommel.
- 2b) Entnahme der Deckschichtpartikel aus Silo 2, Befüllen der kleinen Mischtrommel, Beleimen mit Magnesitemulsion mit Automaten.
- 3a) Entnahme der Hälfte der Deckschichtpartikel aus der kleinen Mischtrommel, einfüllen in die Form und egalisieren mit Verdichten und Hochziehen der Randzonen.
- 3b) Entnahme der Kernschichtpartikel aus der großen Mischtrommel, Aufbringen auf die untere Lage der Deckschicht in der Form, egalisieren der Schicht.
- 3c) Aufbringen der anderen Hälfte der Deckschichtpartikel auf die Kernschicht, Ränder verdichten, egalisieren.
- 4) Aufsetzen des Form-Deckelelements, einsetzen in die Hydraulikpresse und pressen bis Formschluss.
- 5) Verriegeln des Deckels, Entnahme aus der Presse, stapeln zum 48-stündigen Aushärten.
- 6) Ausformen und stapeln mit Luftlatten zum Trocknen.

Neben den Aufdachdämmplatten für das Demogebäude wurde auf diese Weise auch die einlagige 8 cm dicke 3-Schicht-Aufdachdämmung für das Flexdach-Gebäude hergestellt (siehe Kapitel 7.1). Diese diente dazu, neben den zwei Lagen 4 cm dicker Platten auch eine einlagige Version vergleichend zu untersuchen.

## 7 Demonstration des Einsatzes der Dämmung

Im Rahmen des Vorhabens wird der Einsatz der Aufdachdämmung an zwei ganz unterschiedlichen Gebäuden demonstriert. Zum einen finden Untersuchungen am speziell für Dachuntersuchungen eingerichteten sogenannten Flexdach statt, das sich auch deshalb dafür anbietet, da es auf dem Freigelände des IBP steht. Zusätzlich wird an einem neu errichteten Gebäude ebenfalls ein Monitoring zum Einsatz der Aufdachdämmung durchgeführt.

### 7.1 Einbau und Monitoring am Flexdach

Im Folgenden wird zunächst die Versuchseinrichtung und der Einbau der zu testenden Aufdachdämmvarianten beschrieben. Die ermittelten Messergebnisse und deren Interpretation werden im Anschluss daran aufgeführt.

#### 7.1.1 Beschreibung der Versuchseinrichtung

Auf der Freilandversuchsstelle in Holzkirchen steht ein über den Projektträger Jülich (PtJ) mit Mitteln des BMWi entwickelter flexibler Dachprüfstandes (FlexDa) zur Verfügung. Der FlexDa-Prüfstand bietet die Möglichkeit, Dachsysteme in Nord- Südausrichtung zu untersuchen. Es stehen vier Versuchsflächen mit jeweils einer Nettogröße von 2,5 m x 2,5 m zur Verfügung. Die Neigung der Dachflächen ist im Bereich zwischen 22° und 50° einstellbar, ohne die Versuchselemente auszubauen bzw. zu tauschen. Über die eigentlichen Versuchsflächen hinaus sind vielfältige Ortgang- und Dachüberstandslösungen möglich. Damit können Dachuntersuchungen bei fast allen gängigen Dachsituationen realisiert werden.

Die Versuchskammern unterhalb der Versuchsflächen sind innen klimatisierbar, sodass eine praxismässige Feuchtelast sichergestellt werden kann. Die Befeuchtung jeder Kammer erfolgt über dezentrale, geregelte Verdunstungs-Befeuchter mit eingebauten Hygrostaten. Damit ist eine individuelle Feuchtelast in jeder Kammer zu realisieren. Für die meisten hygrothermischen Fragestellungen ist es notwendig, über einen bestimmten längeren Zeitraum im Mittel eine konstante relative Raumluftfeuchte von z.B. 50 % zu halten. Bild 64 zeigt eine fotografische Aufnahme des FlexDa-Prüfstandes aus Süd-Osten in einem Wintermonat mit Schnee.



**Bild 64:**  
Ansicht des FlexDa-Prüfstandes aus Südosten in einem Wintermonat mit Schnee.

Für die Erfassung der Messdaten wird eine 19"-Anlage des Messsystems „Almemo“ der Fa. Ahlborn verwendet, die in ein Anlagenrack eingebaut ist. Almemogeräte erkennen automatisch die Kenndaten des angeschlossenen Fühlers und zeigen bzw. registrieren den physikalischen Wert. Bestimmte Funktionen können durch entsprechende Stecker, Schnittstellenkabel oder Module aktiviert werden. Für spezielle Sensoren gibt es auch Stecker mit integrierter Anpassungselektronik. Es können beliebige Sensoren auch über entsprechende Module fest angeschlossen werden. Die Anlagen können untereinander und in ein Datennetzwerk eingebunden werden. Das Bild 65 zeigt die Ansicht der Zentraleinheit der Messwerterfassungsanlage.



Bild 65:  
Ansicht der Zentraleinheit der Messwerterfassungsanlage im flexiblen Dachprüfstand.

Die neu entwickelte und als geeignet beurteilte Aufdachdämmung wird mit diesem Dachprüfstand untersucht, um unter realen Randbedingungen deren Eignung und Effektivität zu überprüfen. Durch die eingetretenen und beschriebenen Verzögerungen konnten die Versuche nicht, wie anfänglich geplant, als Vorversuch eine Winterperiode früher als die Versuche am Demogebäude gestartet werden. Allerdings wurde diese Messeinrichtung genutzt, um eine höhere Variantenanzahl (zweilagig mit je 4 cm Dicke und einlagig mit 8 cm Dicke) zu untersuchen und einen Vergleich mit einer Aufdachdämmung auf Basis einer Dämmplatte aus Holzfasern einzubeziehen.

### **7.1.2 Einbau der Aufdachdämmplatten und der Sensorik**

Die mit der Anlage in Göttingen erzeugten Platten mit den Abmessungen 0,6 m x 1,2 m x 0,04 m sind im August 2019 am Dachprüfstand des IBP („FlexDa“) eingebaut worden. Insgesamt werden 4 Ausführungen auf der nach Norden ausgerichteten und ca. 30° geneigten Dachfläche untersucht. Zwei Ausführungen sind mit zwei Lagen der 4 cm dicken Aufdachdämmplatte aus Typha aufgebaut, jeweils mit zusätzlich vorhandener Mineralwolle dämmung direkt unterhalb der Aufdachdämmplatten. Zum Vergleich hierzu ist eine ebenfalls zweilagig verlegte Aufdachdämmung aus Holzfaserdämmplatten sowie eine 8 cm Typhaplatte auf die Sparren montiert worden. Die 8 cm dicke Platte wurde extra für diesen Zweck im Technikum der Firma Typha Technik hergestellt. Nach Sensorinstallation ist die Messwerterfassung seit September

2019 in Betrieb. Der unter den Versuchsdachflächen liegende Raum wird beheizt und auf eine typische Wohnraumfeuchte von 40-50 % befeuchtet.

Im Rahmen der Untersuchungen werden die Temperaturen und relativen Feuchten, sowie der innenseitige Wärmestrom an den verschiedenen Dachaufbauten gemessen. Hierfür wird ein bereits bestehender Dachaufbau auf dem Flexdach-Prüfstand entsprechend umgebaut. Die Versuchsflächen werden auf der nördlich ausgerichteten Dachseite des Versuchsgebäudes installiert. Die bestehende Dachfläche besteht aus 6 gleichgroßen Sparrenfeldern, von denen im Zuge des Umbaus die zwei mittig gelegenen Sparrenfelder für die Untersuchungen mit Typha- und Holzfaserdämmung versehen werden. Nachfolgend wird anhand von Bildern und Texten der genaue Aufbau der in die zwei Sparrenfelder eingebauten Platten und Sensorik erläutert. In Bild 66 ist eine Konstruktionskizze des geplanten und ausgeführten Dachquerschnitts mit den verschiedenen Dämmmaterialien dargestellt. Die verwendeten Materialien sowie die unterschiedlichen Aufbauten der vier Messfelder TY1, TY2, TY3 und HF sind in Tabelle 38 aufgelistet und benannt.

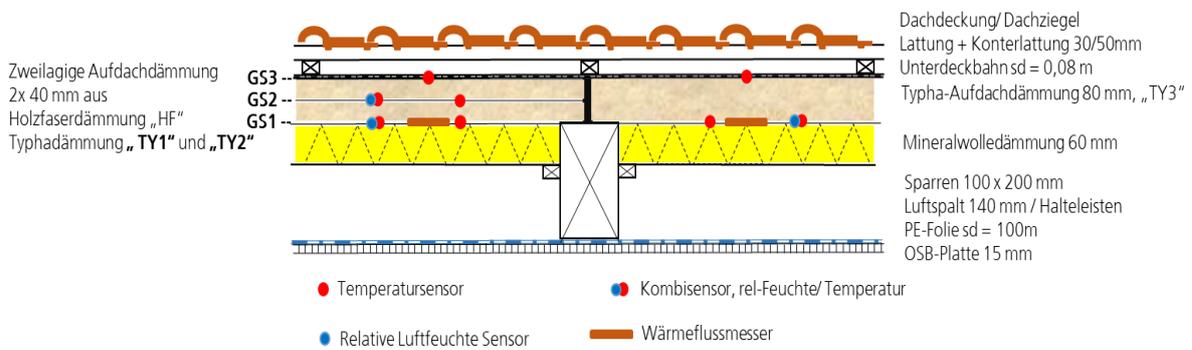


Bild 66:  
Skizze der Dachkonstruktion mit verschiedenen Dämmmaterial als Aufdachdämmung. Mit eingetragen sind die Positionen der Sensorik.

Tabelle 38:  
 Auflistung der verwendeten Materialien. Gelistet von innen nach außen.

Messfeld:	Material	Schichtdicke	Sonstige Merkmale
	OSB Platte	15 mm	
	PE – Folie ISOVER Difunorm Power Grip		$s_d$ – Wert: 100 m
	Sparren	Querschnitt: 10 x 20 cm	
	Auflagerleiste für Mineralwolle	Querschnitt: 5 x 6 cm	Seitlich an Sparren verschraubt, als Auflager für die Mineralwolle
	Aufdachdämmung je Messfeld:		
TY1	Zweilagig Typhaplatte	2x 4 cm	
TY2	Zweilagig Typhaplatte	2 x 4 cm	
TY3	Einlagig Typhaplatte	8 cm	Eingebaut 26.11.19
HF	Zweilagig Holzfaserplatte STEICO universal dry	2 x 4 cm	WLG 045
	Für alle Felder gleicher Aufbau:		
	Dachbahn Permo® vert UV		$s_d$ – Wert: 0,08 m
	Lattung und Konterlattung	2x Querschnitt: 5 x 6 cm	
	Dachziegel		

Nachfolgend sind in Bild 67 bis Bild 74 fotografische Aufnahmen der Umbaumaßnahmen vom 1./2. August bzw. 26. November 2019 dargestellt. Da Anfang August die 8 cm dicke Typhaplatte noch nicht zur Verfügung stand, wurde das Messfeld TY3 mit einer doppellagigen je 4 cm dicken Holzfaserdämmplatte vorbereitet, sodass am 26. November durch eine kleine Baumaßnahme die Dämmplatte und die Sensorik für TY3 einfach nachgerüstet werden konnte. Bild 67 zeigt die geöffneten beiden Sparrenfelder, die für den Einbau der zu untersuchenden Aufdachdämmvarianten vorgesehen wurde.



Bild 67:  
 Ansicht der zwei geöffneten Sparrenfelder, die für den neuen Versuchsaufbau mit Typha- und Holzfaserdämmung versehen werden sollen.

Frühere Messungen am Flexdach haben gezeigt, dass es ganz wesentlich ist, den Anschlussbereich (Bild 68 ) am First sehr gewissenhaft auszuführen, da sich hier sehr leicht Undichtheiten an der Drehkante der Dachfläche des Flexdachprüfstandes, ausbilden, die zu einem Eindringen von Regenwasser führen können. Nach Fertigstellung der Eindeckung wird zusätzlich in diesem Bereich ein Dachbahnstreifen auf die Eindeckung geklappt und mit einer Dachlatte fixiert (siehe Bild 74 im oberen Bereich.)



Bild 68:  
 Ansicht des Anschlussbereiches am First. Hier muss sehr sorgfältig gearbeitet werden um eine Hinterströmung mit Regenwasser zu vermeiden.

Um Hinterströmungen zu vermeiden, die die Messungen stark beeinflussen können, wurde hierbei die Altdämmung aus Mineralwolle direkt hinter den Aufdachdämmplatten montiert. Bild 69 zeigt die dazu angebrachten Querstrebungen, die angebracht wurden, um ein Durchhängen der Mineralwollendämmung zu vermeiden.



Bild 69:  
Ansicht von oben auf das Sparrenfeld mit eingebrachter Querverstrebung, damit die Mineralwollendämmung nicht durchhängt.

In Bild 70 ist am Beispiel der oberen, firstnahen zweilagigen Typhaaufdach-Dämmung die Positionierung der Sensorik dargestellt. Man erkennt die quadratische Wärmefluss-scheibe sowie direkt daneben den Pt<sub>100</sub>-Oberflächen-temperatursensor und rechts davon den Kombisensor mit dem Lufttemperatursensor und dem kapazitiven Sensor zur Ermittlung der relativen Luftfeuchte. Im Anschluss an die Sensormontage wurde diese Platte dann als erste Lage umgedreht, sodass sich die Messstellen auf der Unterseite der Aufdachdämmung befinden (Grenzschicht zwischen Mineralwollendämmung und Aufdachdämmung, im weiteren Verlauf als GS1 bezeichnet).



Bild 70:  
 Unteransicht einer Typhadämplatte mit 4 cm Dicke, auf der die Sensoren für Wärmestrom, Temperatur und relativer Feuchte aufgeklebt sind.

Bild 71 zeigt eine Gesamtansicht der vier Versuchsflächen, mit rechts den zwei Flächen mit zweilagig verlegten Typhadämplatten. Links oben ist die Vergleichsfläche mit Holzfaserdämmung positioniert. Darunter befindet sich ein Holzfaserdämmplatte als Platzhalter für die später zu montierende 8 cm dicke einlagige Typhadämplatte.



Bild 71:  
 Ansicht der vier Messfelder des neu aufgebauten Daches mit Typha- und Holzfaserdämmung.

Bild 72 zeigt den späteren Einbau der 8 cm dicken Typhaaufdachdämmplatte mit bereits installiertem Oberflächentempersensor. Zur Montage wurde das Dach teilweise abgedeckt, die Lattung örtlich ausgespart und die Unterdeckbahn aufgeklappt. Im Anschluss wurde das Ganze wieder verschlossen und eingedeckt.



Bild 72:  
Ansicht des Feldes TY3 nach Einbau der 8 cm dicken Typhaplatte am 26.11.2019.

Bild 73 zeigt die gesamte Dachfläche mit den jeweiligen Feldern der Aufdachdämmung, vor Anbringung der Unterspannbahn und Eindeckung. Zu diesem Zeitpunkt ist die 8 cm dicke Dämmvariante noch nicht eingebaut.



Bild 73:  
Ansicht der gesamten Dachfläche mit den in der Mitte liegenden Versuchsfeldern TY1-TY2 und HF.

Bild 74 zeigt das Dach mit Unterdeckbahn und angebrachter Lattung. In Bild 75 erkennt man den fertigen Dachaufbau mit der Ziegeleindeckung.



Bild 74:  
Ansicht des geschlossenen Daches mit Unterdeckbahn, Lattung und Konterlattung.



Bild 75:

Ansicht des geschlossenen Daches mit fertiger Verlegung der Dachplatten. Im oberen Bereich ist die zusätzliche Überlappung mit einem Dachbahnstreifen zur Abdichtung im „Firstbereich“ sowie dessen Fixierung mit Holzlatten erkennbar.

### 7.1.3 Ergebnisse der Flexdach-Untersuchungen

Bild 76 gibt im oberen Diagramm einen Überblick über die gemessenen Verläufe der Stundenmittelwerte der erfassten Außenlufttemperatur sowie die relative Außenluftfeuchte während des gesamten Messzeitraumes vom 1. September 2019 bis 31. Dezember 2020 wider. Diese Daten werden kontinuierlich an der meteorologischen Station des Fraunhofer Institutes in Holzkirchen erfasst. Im unteren Diagramm sind die Stundenwerte der Globalstrahlung dargestellt. Man erkennt die tages- und jahreszeitlich bedingten Schwankungen bei der Außenlufttemperatur und relativen Luftfeuchte. Es werden zeitweise im Sommer maximale mittlere stündliche Außenlufttemperaturen von über 30°C (Diagrammskala bis 30°C) erreicht. In den Wintermonaten sinkt die Außenlufttemperatur bis auf ca. -10°C, bei relativen Luftfeuchten von 20 - 100%. Die Globalstrahlung erreicht in den Sommermonaten Juni und Juli mit bis ca. 1000 W/m<sup>2</sup> ihren Höhepunkt. An einigen Tagen in den Wintermonaten November und Dezember liegt mit unter 100 W/m<sup>2</sup> tagsüber das Minimum.

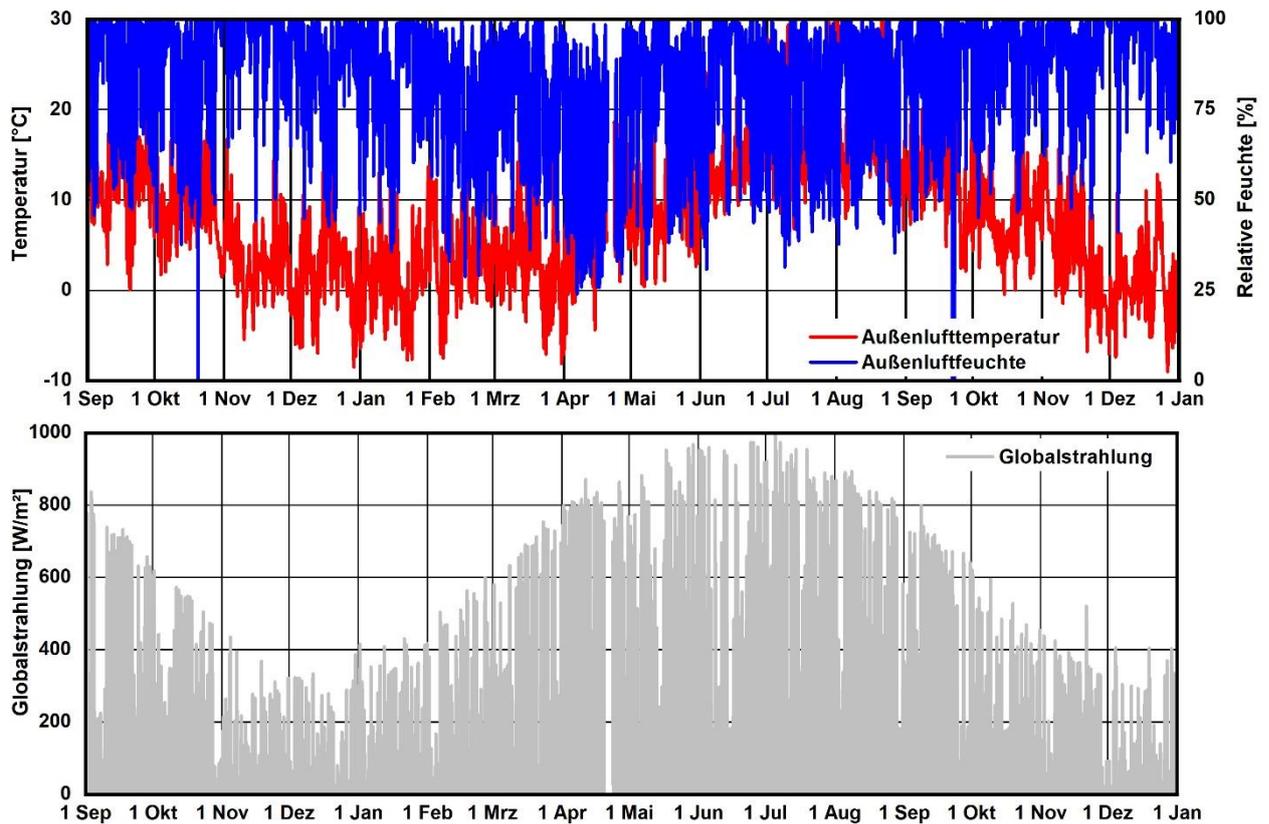


Bild 76:  
Verläufe der Stundenmittelwerte der an der meteorologischen Station des Institutes erfassten Außenlufttemperatur, relativen Außenluftfeuchte (beide im oberen Diagramm) und der Globalstrahlung (unteres Diagramm) während des gesamten Messzeitraumes vom 1. September 2019 bis 31. Dezember 2020.

Bild 77 zeigt die Verläufe der Stundenmittelwerte des Innenklimas (Raumlufttemperatur und relative Luftfeuchte) in der Messkammer (Raum unterhalb der Versuchsflächen) für den gesamten Zeitraum vom 1. September 2019 bis 31. Dezember 2020. Durch den relativ milden Oktober startete die Beheizung erst Anfang November 2019 und etwas später die Befeuchtung (grüne Markierungen). Die Regelung schaltete automatisch die Beheizung zu, wenn die Raumlufttemperatur auf 20 °C sinkt. Ab Sommer 2020 und die gesamte restliche Messperiode bis Ende Dezember 2020 erfolgte keine Befeuchtung der Messkammer, um auch den diesbezüglichen Einfluss in die Untersuchungen einzubeziehen.

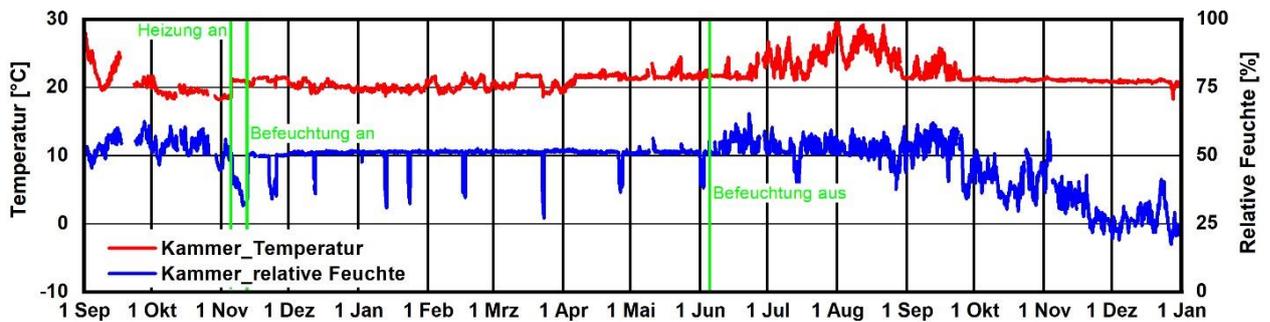


Bild 77:  
Verläufe der Stundenwerte des Innenklimas (Lufttemperatur und relative Luftfeuchte) in der Messkammer im Zeitraum 1. September 2019 bis 31. Dezember 2020. Der Beginn der Beheizung und zusätzliche Befeuchtung ist durch grüne Linien markiert. Ab Sommer 2020 erfolgte keine weitere Befeuchtung in der Kammer.

Im Folgenden werden die Untersuchungen in zwei Perioden eingeteilt, die erste Periode mit und die zweite ohne interne Befeuchtung. Dadurch soll der Einfluss der internen Feuchtelast auf das hygrothermische Verhalten der Aufbauten betrachtet werden. Um den zeitlichen Bezug der Ergebnisse zu vereinfachen, werden auch die Verläufe des Innenklimas für beide Perioden getrennt dargestellt. Bild 78 zeigt die Ergebnisse für die erste Periode vom 1. Oktober 2019 bis 31. März 2020 und Bild 79 für die zweite darauf folgende Heizperiode vom 1. Oktober 2020 bis 31. Dezember 2020.

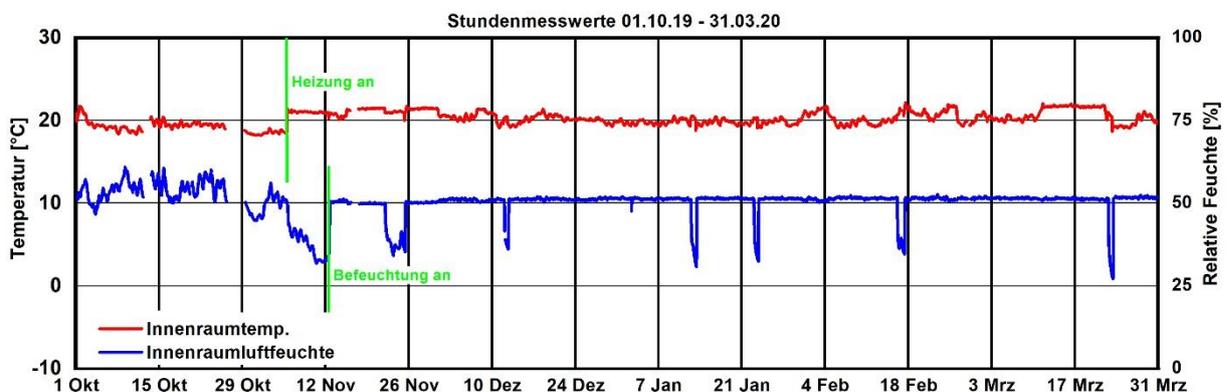


Bild 78:  
Verläufe der Stundenwerte des Innenklimas (Lufttemperatur und relative Luftfeuchte) in der Messkammer im Zeitraum 1. Oktober 2019 bis 31. März 2020. Der Beginn der Beheizung und zusätzliche Befeuchtung ist durch grüne Linien markiert.

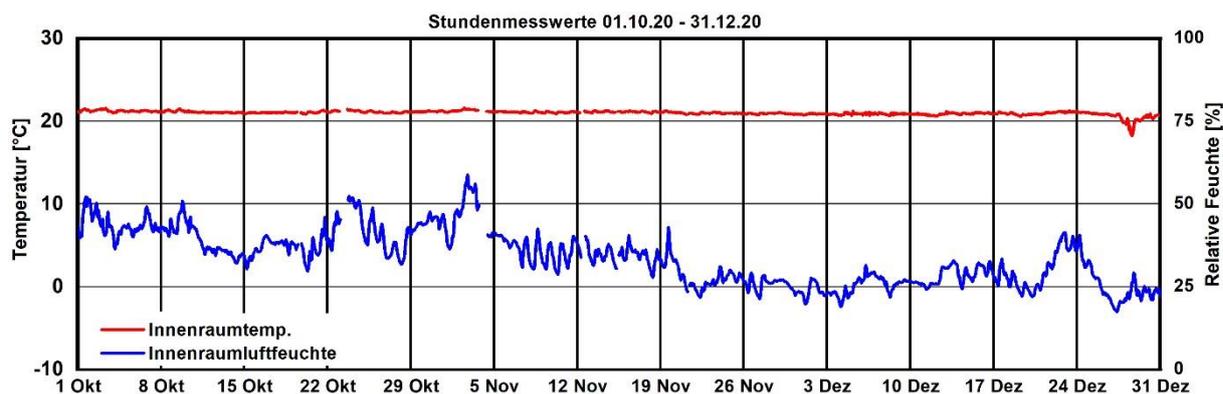


Bild 79:

Verläufe der Stundenwerte des Innenklimas (Lufttemperatur und relative Luftfeuchte) in der Messkammer im Zeitraum 1. Oktober 2020 bis 31. Dezember 2020. In dieser Periode fand keine Raumbefeuchtung statt.

Bild 80 bis Bild 83 zeigt die Messperiode vom 1. Oktober 2019 bis 31. März 2020 mit Befeuchtungsregelung auf 50 % relativer Luftfeuchte im Dachraum sowie von die Periode von 1. Oktober bis 31. Dezember 2020 ohne Befeuchtung. In Bild 80 sind die Verläufe der Stundenwerte der Temperaturen (oben) und dazugehörigen relativen Luftfeuchten (unten) in den Grenzschichten (GS1) zwischen Mineralwolle und den Aufdachdämmungen aus Holzfaser (HF), den beiden zweilagig verlegten Dämmplatten aus Rohrkolben (TY1 + TY2) sowie der einlagigen Rohrkolbenplatte (TY3) im Zeitraum mit zusätzlicher Befeuchtung vom 1. Oktober 2019 bis 31. März 2020 zu sehen.

Man erkennt im unteren Diagramm, dass mit einsetzender Befeuchtung Anfang November die relativen Luftfeuchten bei allen Varianten ansteigen. Man erkennt deutlich, dass mit dem Aussetzen der Befeuchtung, wie zum Beispiel Ende November 2019, die Luftfeuchten kurzfristig sinken und nach Fortsetzung der Befeuchtung wieder rasch den ursprünglichen Bereich erreichen. Dies zeigt, dass der Dachaufbau relativ schnell auf Änderungen der internen Feuchtelast reagiert. Die relative Luftfeuchte in der Grenzschicht zwischen Mineralwolle und der Aufdachdämmung steigt bei der Variante mit Holzfaserplatte bis auf ca. 80 % relative Feuchte an. Im Vergleich dazu pendeln sich die mittleren Feuchten bei den Varianten TY1 und TY2 auf ca. 70 % ein und bei TY3 auf ca. 75 %.

Die Ausführungen TY1 und TY2 sind im gleichen Sparrenfeld angebracht. Die Ausführung TY1 ist oben (zum First hin) und TY2 unten (zur Traufe hin) montiert. Die Holzfaserdämmplatte ist im benachbarten Sparrenfeld zum First hin von Beginn an vorhanden. Im gleichen Sparrenfeld ist die einlagige Rohrkolbendämmplatte (TY3) zur Traufe hin ab Ende November 2019 eingebaut. Aufgrund der Lage der Felder können sich geringe hygrothermische Unterschiede einstellen. So zeigt sich auch an den Messergebnissen, dass die Positionierung eine gewisse Rolle spielt, da die weiter unten platzierten

Typhapplatten tendenziell eine etwas höhere Feuchte aufweisen. Kältere Temperaturen in der Grenzschicht haben höhere relative Luftfeuchten zur Folge, das gleiche gilt umgekehrt, wie an den gemessenen Temperaturverläufen von TY1-3 zu sehen ist. Bei der Holzfaserdämmung verläuft die Temperatur auf fast dem gleichen Niveau wie bei der einlagigen Rohrkolbenplatte TY3 und liegt nur geringfügig drunter. Dennoch stellt sich tendenziell ein dauerhafter höherer Feuchtegehalt bei der Holzfaserdämmung ein. Dies kann mit dem unterschiedlichen Sorptionsverhalten von Holzfaserdämmung im Vergleich zu einer Dämmplatte aus Rohrkolben begründet werden. Generell kann man sagen, dass die Unterschiede gering sind und sich die Werte bei allen Ausführungen in einem unkritischen Feuchtebereich befinden.

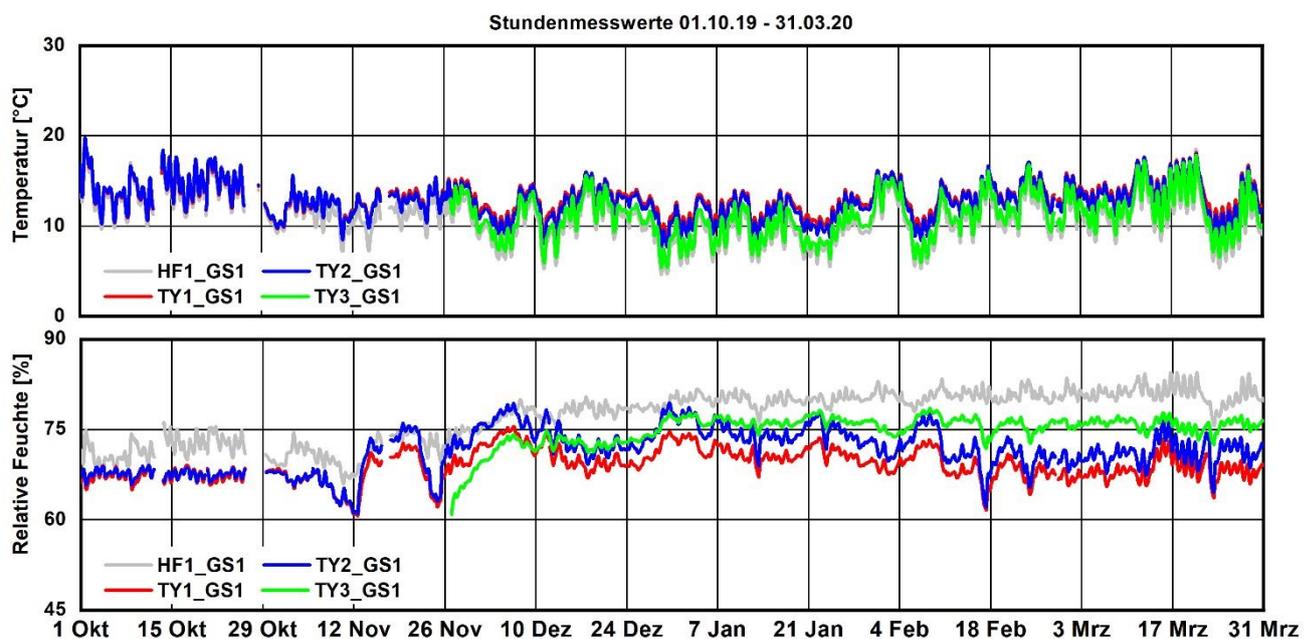


Bild 80:

Verläufe der Stundenwerte der Temperaturen und dazugehörigen relativen Luftfeuchten in den Grenzschichten (GS1) zwischen Mineralwolle und den Aufdachdämmungen aus Holzfaser (HF), den beiden zweilagig verlegten Dämmplatten aus Rohrkolben (TY1 + TY2) sowie der einlagigen Rohrkolbenplatte (TY3) im Zeitraum mit zusätzlicher Befeuchtung vom 1. Oktober 2019 bis 31. März 2020.

In Bild 81 sind die Verläufe der Stundenwerte der Temperaturen und dazugehörigen relativen Luftfeuchten in den Grenzschichten (GS1) zwischen Mineralwolle und der Aufdachdämmung aus Holzfaser (HF), den beiden zweilagig verlegten Dämmplatten aus Rohrkolben (TY1 + TY2) sowie der einlagigen Rohrkolbenplatte (TY3) im Zeitraum ohne zusätzlicher Befeuchtung vom 1. Oktober 2020 bis 31. Dezember 2020 dargestellt. Ohne zusätzliche Befeuchtung sinken die relativen Luftfeuchten in den Grenzschichten im Laufe der Monate November und Dezember, bedingt durch das kältere Außenklima und der Beheizung der Versuchskammer.

Bei der Holzfaserdämmung ist ein Unterschied von 10 bis 15% höherer relativer Luftfeuchte im Vergleich zu den Varianten mit Rohrkolbenplatten feststellbar. Dies ist zum großen Teil in der im Vergleich zu den Typhaplatzen gemessenen um ca. 2 K niedrigeren Grenzschichttemperatur begründet.

Bei Variante TY3 ist der Messfühler ab Mai 2020 leider komplett ausgefallen und daher können dafür für diesen Zeitraum keine Messwerte dargestellt werden. Ein Austausch ist nicht vorgenommen worden, da das Öffnen des Versuchsdaches den Gesamtaufbau gestört und starken Einfluss auf die Messreihe gehabt hätte. Auffällig ist, dass die beiden Typhamessungen TY1 und TY2 nun weitgehend gleiche Verläufe der Luftfeuchte aufweisen.

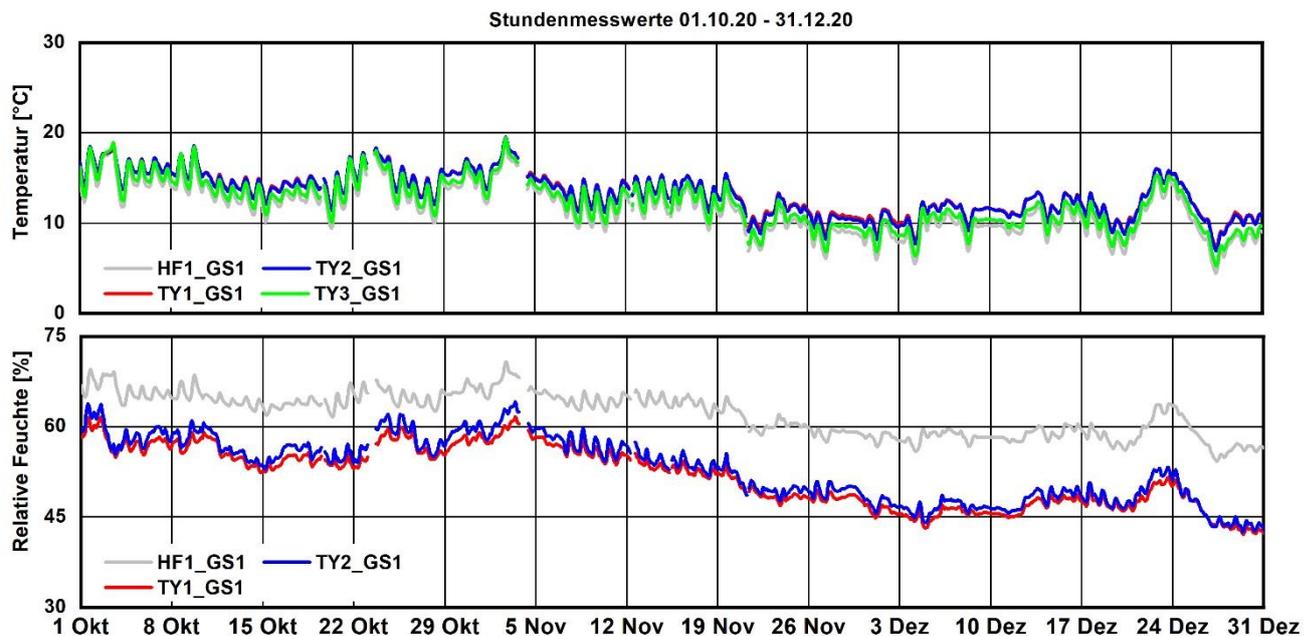


Bild 81:

Verläufe der Stundenwerte der Temperaturen und dazugehörigen relativen Luftfeuchten in den Grenzschichten (GS1) zwischen Mineralwolle und der Aufdachdämmung aus Holzfaser (HF), den beiden zweilagig verlegten Dämmplatten aus Rohrkolben (TY1 + TY2) sowie der einlagigen Rohrkolbenplatte (TY3) im Zeitraum ohne zusätzlicher Befeuchtung vom 1. Oktober 2020 bis 31. Dezember 2020.

In Bild 82 sind die Verläufe der Stundenwerte der Temperaturen und dazugehörigen relativen Luftfeuchten in den Grenzschichten (GS2) zwischen den beiden Lagen der Aufdachdämmung aus Holzfaser (HF) und den beiden Dämmplatten aus Rohrkolben (TY1 + TY2) im Zeitraum mit zusätzlicher Befeuchtung vom 1. Oktober 2020 bis 31. März 2020 zu sehen. Wegen der einlagigen Verlegung der Rohrkolbenplatte (TY3) ist bei dieser Ausführung diese Grenzschicht nicht messtechnisch erfassbar. Die Temperaturunterschiede in den Grenzschichten der Ausführungen sind zwischen TY1 und TY2 nur sehr gering. Dementsprechend liegen die Verläufe der Lufttemperaturen an dieser Stelle für beide Typhaplatzenmessungen sehr nahe beieinander. Hier macht

sich die Lage der Messfelder in der Dachfläche kaum bemerkbar. Bei der Holzfaserdämmplatte ergeben sich an dieser Stelle aber um etwas mehr als 1 K niedrigere Temperaturen, was sich auch durch die entsprechend höheren Messungen der Luftfeuchte äußert.

Deutlich zu sehen ist, dass die Temperaturen in GS2 deutlich niedriger liegen als in GS1 (vergleiche Bild 81). Die relativen Luftfeuchten in der Schicht (GS2) zwischen den beiden Lagen der Dämmplatten steigen mit zunehmender Befeuchtung von ca. 75 % auf über 90 % bei der Holzfaserdämmung an. Dabei ist der Verlauf der relativen Feuchte bei den beiden Rohrkolbendämmplatten deutlich gedämpfter wie bei der Holzfaserdämmung, diese liegen im Bereich zwischen ca. 70 % und ca. 85 %. Es zeigt sich, dass die relativen Luftfeuchten in den Rohrkolbenplatten in dem dargestellten Messzeitraum immer deutlich unter den gemessenen relativen Feuchten der Holzfaserplatte verlaufen. Die Rohrkolbenplatten besitzen einen höheren Diffusionswiderstand und ein ausgeprägteres Sorptionsvermögen als die Holzfaserdämmung, was sich im gedämpfteren Feuchteverhalten widerspiegelt.

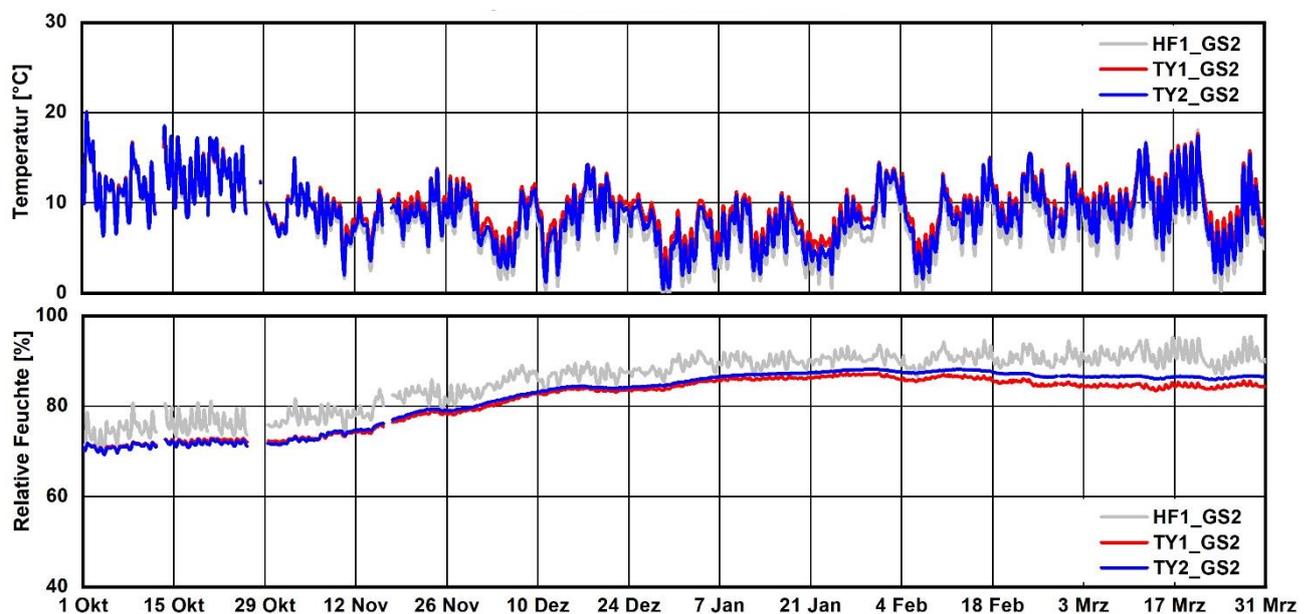


Bild 82:  
Verläufe der Stundenwerte der Temperaturen und dazugehörigen relativen Luftfeuchten in den Grenzschichten (GS2) zwischen den beiden Lagen der Aufdachdämmung aus Holzfaser (HF), und den beiden Dämmplatten aus Rohrkolben (TY1 + TY2) im Zeitraum mit zusätzlicher Befeuchtung vom 1. Oktober 2020 bis 31. März 2020. Wegen der einlagigen Verlegung der Rohrkolbenplatte (TY3) liegen für diese Stelle keine Messwerte vor.

Weiterführend sind in Bild 83 die Verläufe der Stundenwerte der Temperaturen und dazugehörigen relativen Luftfeuchten in den Grenzschichten (GS2) im Zeitraum vom 1. Oktober 2020 bis 31. Dezember 2020 ohne Befeuchtung

dargestellt. Wegen der einlagigen Verlegung der Rohrkolbenplatte (TY3) liegen auch hier für diesen Zeitraum keine Messwerte vor.

Die Verläufe der Temperaturen in den Grenzschichten zwischen den beiden Lagen der Dämmplatten sinken im Laufe der Messperiode von über 15 °C kontinuierlich bis unter 5 °C. Dadurch, dass in der zweiten Messperiode keine Befeuchtung in der Kammer stattgefunden hat, liegen die relativen Luftfeuchten zwischen den Dämmplatten deutlich niedriger als bei einem auf 50 % Luftfeuchte klimatisierten Innenraumklima (vergl. Bild 82). Alle gemessenen relativen Luftfeuchten liegen im unkritischen Bereich unter 80%. Dabei zeigt sich ebenfalls wieder, dass die Verläufe der relativen Luftfeuchte zwischen den Plattenlagen bei der Holzfaserdämmung immer höher sind als bei den Dämmplatten aus Rohrkolben. Die relative Luftfeuchte liegt hierbei im Durchschnitt um die 10% höher als bei den beiden Varianten TY1 und TY2.

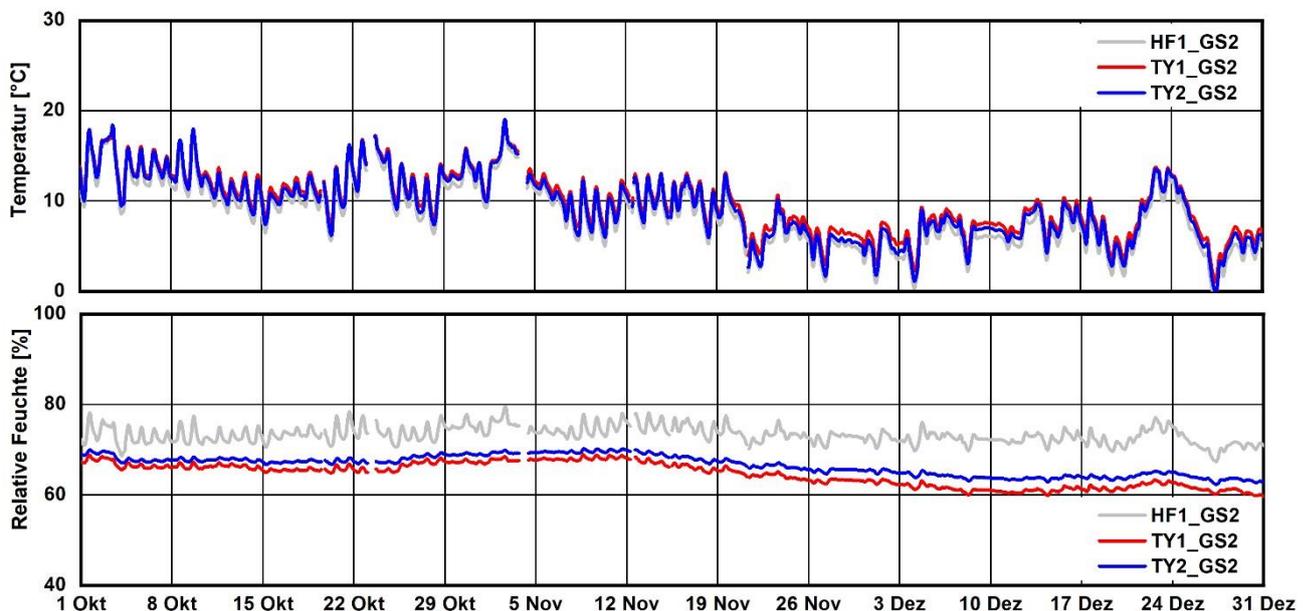


Bild 83:

Verläufe der Stundenwerte der Temperaturen und dazugehörigen relativen Luftfeuchten in den Grenzschichten (GS2) zwischen den beiden Lagen der Aufdachdämmungen aus Holzfaser (HF) und den beiden Dämmplatten aus Rohrkolben (TY1 + TY2) im Zeitraum ohne zusätzliche Befeuchtung vom 1. Oktober 2020 bis 31. Dezember 2020. Wegen der einlagigen Verlegung der Rohrkolbenplatte (TY3) liegen für diese Stelle keine Messwerte vor.

In Bild 84 und Bild 85 erfolgt eine zeitliche Darstellung der Grenzschichttemperaturen unter - und oberhalb (GS1 und GS3) des Gesamtpaketes der Aufdachdämmung sowie den daraus resultierenden messtechnisch ermittelten

Wärmestromdichten in GS1 als gleitende Mittelwerte. Dabei wurde jeweils ein gleitender Durchschnitt über 24h angesetzt.

Bild 84 zeigt die Verläufe im Zeitraum mit zusätzlicher Befeuchtung vom 1. Oktober 2019 bis 31. März 2020 und in Bild 85 analog die gleitenden Durchschnittswerte für den Zeitraum ohne Befeuchtung vom 1. Oktober bis 31. Dezember 2020. Wie erwartet, liegen die gemessenen Wärmeströme ( Bild 84 und Bild 85 unteres Diagramm) bei allen vier Varianten relativ nah beieinander, bedingt durch die ähnlichen Wärmeleitfähigkeiten und Dicken. Hierbei wird der Wärmeverlust in  $W/m^2$  als negativer Wert dargestellt.

Im ersten Zeitraum mit Befeuchtung (Bild 84) sowie im zweiten Zeitraum ohne Befeuchtung (Bild 85) betragen die Unterschiede der Wärmeströme zwischen den Varianten ca. 5%, die auf den ersten Blick gering erscheinen. Dabei tritt bei der Rohrkolbenplatte TY1 der größte Wärmestrom auf.

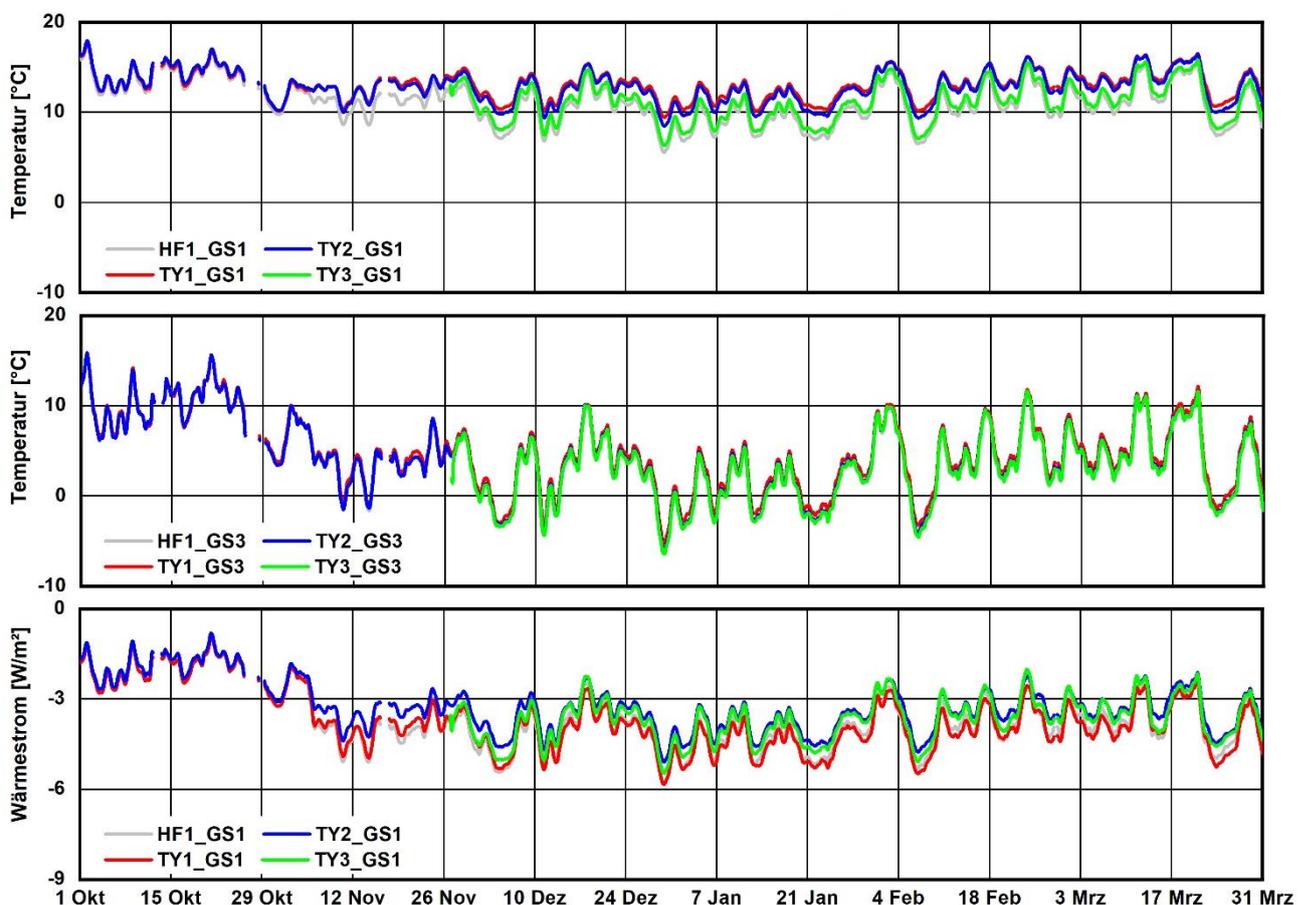


Bild 84:  
Verläufe der Grenzschichttemperaturen unter - und oberhalb (GS1 oben und GS3 mittig) des Gesamtpaketes der Aufdachdämmungen mit den Wärmestromdichten (untere Abbildung) in GS1 als gleitende Durchschnittswerte der Tagesmittel im Zeitraum mit zusätzlicher Befeuchtung vom 1. Oktober 2019 bis 31. März 2020.

Dies stellt sich auch im Zeitraum ohne Befeuchtung (Bild 85) ähnlich dar, wenngleich die Unterschiede generell noch geringer als in der Phase mit Befeuchtung sind.

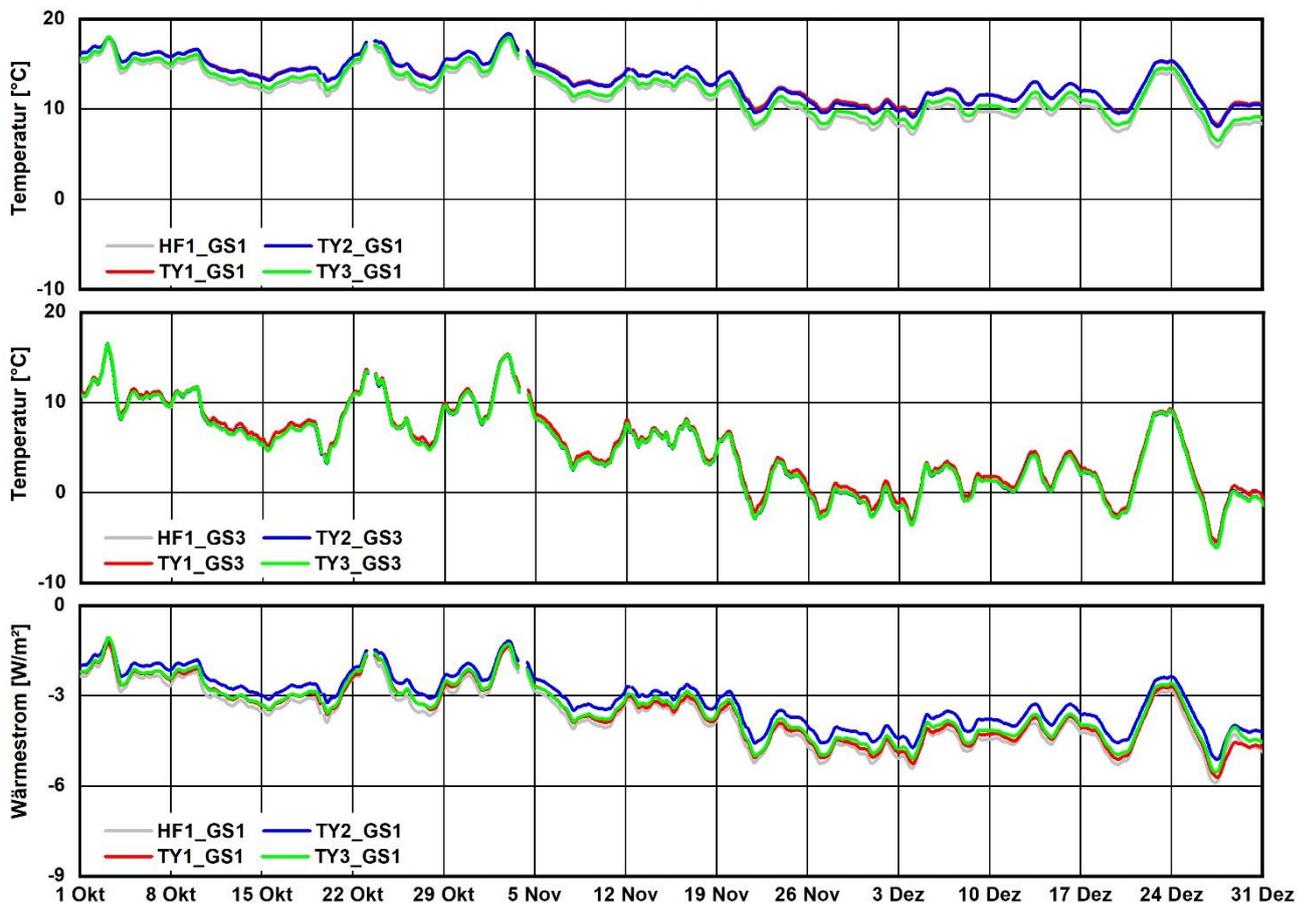


Bild 85:

Verläufe der Grenzschichttemperaturen unter - und oberhalb (GS1 oben und GS3 mittig) des Gesamtpaketes der Aufdachdämmungen mit den Wärmestromdichten (untere Abbildung) in GS1 als gleitende Durchschnittswerte der Tagesmittel im Zeitraum ohne Befeuchtung vom 1. Oktober bis 31. Dezember 2020.

Eine genauere Betrachtung der Unterschiede des Wärmedämmvermögens erfolgt durch monatweise Berechnung der Wärmedurchlasswiderstände aus den gemessenen Wärmestromdichten und Temperaturdifferenzen.

In Tabelle 39 sind dazu monatweise die ermittelten Wärmedurchlasswiderstände (R-Werte in  $[m^2/K W]$ ) für die komplette Heizperiode 2019/20 (1. Oktober- 31. März) sowie für den Zeitraum 1. Oktober bis 31. Dezember 2020 aufgelistet. Dabei werden die Prüffelder mit den Aufdachdämmungen aus Typha (TY1, TY2 ) im Vergleich zu einer Aufdachdämmung aus Holzfaserdämmplatten (HF) dargestellt. Die ermittelten Wärmedurchlasswiderstände für

die einlagig 8 cm dicke Aufdachdämmung aus Rohrkolben(TY3) sind ab Dezember 2019 ebenfalls mit aufgeführt.

An den Ergebnissen für die Holzfaserdämmung kann man sehr gut die Genauigkeit des Verfahrens erkennen. Hier ergibt sich stets nahezu der gleiche Wärmewiderstand. Lediglich im ersten Auswertemonat ergibt sich ein etwas höherer Wärmewiderstand. Dies könnte darin begründet sein, dass die industriell hergestellten Platten im Einbauzustand nahezu absolut trocken sind.

Tabelle 39:

Ermittelte Wärmedurchlasswiderstände für die Aufdachdämmungen aus Rohrkolben (TY1, TY2) im Vergleich zu einer Aufdachdämmung aus Holzfaserdämmplatten (HF). Zur zusätzlichen Information sind auch die Innen- und Außenklimata aufgelistet. Bei allen Werten handelt es sich um Monatsmittelwerte.

Jahr/ Monat	Wärmedurchlasswiderstände R-Wert [m²/K W]				Klimata [°C/ %]	
	HF	TY1	TY2	TY3	Raum	Außen
2019/ Oktober	1,94	2,04	2,31	-	19,4/ 54	10,2/ 87
2019/ November	1,88	2,24	2,60	-	20,7/ 46	3,7/ 93
2019/ Dezember	1,91	2,36	2,74	2,25	20,3/ 51	2,1/ 87
2020/ Januar	1,88	2,29	2,69	2,31	19,8/ 51	1,1/ 87
2020/ Februar	1,89	2,26	2,72	2,21	20,4/ 51	4,1/ 76
2020/ März	1,89	2,26	2,68	2,21	20,7/ 51	3,8/ 79
2020/ Oktober	1,88	2,34	2,75	2,29	21,1/ 41	8,3/ 89
2020/ November	1,91	2,33	2,69	2,19	21,1/ 33	4,2/ 91
2020/ Dezember	1,82	2,22	2,59	2,11	20,8/ 27	0,5/ 93

Auch bei den ermittelten R-Werten für die Typhadämmung ergibt sich ein im Wert von Monat zu Monat konstantes Bild mit nur geringen Unterschieden. Auffällig ist dabei, dass die interne Feuchtelast keinen erkennbaren Einfluss auf den Wärmewiderstand zeigt. Insgesamt ergeben die Messungen der beiden Typhafelder TY1 und TY2 einen merklich höheren R-Wert als die Holzfaserdämmplatte. Die Ergebnisse für TY1 liegen dabei etwa 20 % höher als bei HF, die von TY2 sogar im Mittel um annähernd 40 %. Dies dürfte allerdings nicht in einem derart niedrig liegenden Lambda-Wert begründet sein. Im Gegensatz zur industriell gefertigten Holzfaserdämmplatte, die ein exakt eingehaltene Dicke von 40 mm aufweist, ergibt sich bei den Typhaplatten ein anderer Wert. Auch wenn die Typhaplatten auf eine Nenndicke von ebenfalls 40 mm ausgelegt waren, ergibt sich nach Öffnung der Pressformen durch das Rückstellverhalten

der Typhapartikel eine etwas größere Dicke, die in Plattenmitte Werte von teils über 45 mm erreichen. Hinzu kommt, dass gerade bei der Herstellung dieser kleinformatigen Prüfkörper Randeffekte auftreten, weil eine völlige gleichmäßige Streuung der Partikel nicht möglich ist. Gerade an den Kanten der Pressform fallen beim Streuprozess manche Partikel nach innen in die Form und manche nach außen. Dies führt dazu, dass im Randbereich die Partikeldichte etwas niedriger als im Kernbereich ist. Dementsprechend werden sich beim Ausschalen hier auch andere Rückstellkräfte entwickeln, verbunden mit einer geringfügigeren Ausdehnung. Die derart hergestellte Prüfkörper weisen deshalb noch (im Gegensatz zu späteren großtechnisch hergestelltem Material) eine konvexe Oberfläche auf. Bei vergleichbarer Wärmeleitfähigkeit ergibt sich durch die größere Dicke ein etwas höherer Wärmewiderstand. Hinzu kommt als weiterer dämmender Effekt die Ausbildung einer Luftschicht zwischen den in der Dicke variierenden Dämmstofflagen der Typhadämmung. Die 8 cm dicke Typhadämmung kann dagegen diesen Effekt nicht aufweisen. Allerdings ist bei ihr aufgrund des besseren Verhältnisses Kernschicht zu Deckschicht im Vergleich zu den doppellagigen 4 cm dicken Platten eine geringere mittlere Wärmeleitfähigkeit zu erwarten. Eine Messung mit dem kleinen Plattenapparat, wie er in Kapitel 0 beschrieben ist, ergibt hierfür einen Wert von 0,041 W/mK.

## 7.2 Demowohngebäude

Zusätzlich zu den Untersuchungen am Flexdach-Prüfstand wurden an einem Neubau eines Gebäudes Versuchsfelder vorgesehen, die mit der Aufdachdämmung versehen wurden. Zusätzlich konnte die Gelegenheit genutzt werden, um Untersuchungen im Wandbereich durchzuführen. Im Folgenden wird das Gebäude beschrieben und näher auf die Messfelder sowie die Montage der Sensorik eingegangen. Im Anschluss daran werden die Messergebnisse vorgestellt und bewertet.

### 7.2.1 Beschreibung des Demogebäudes

Aus Bild 86 wird die Lage des Gebäudes erkennbar. Hierbei handelt es sich um einen neu erstellten Bau mit Verbindung zu einem Bestandsgebäude. Von diesem aus wird es auch mit Strom und Heizung versorgt. Man erkennt, dass das neue Gebäude nahezu eine Nord-Südausrichtung besitzt. Dementsprechend ergeben sich Dachflächen mit Ost- und Westausrichtung. Im linken Teil der Abbildung ist das Erdgeschoss dargestellt und im rechten Teil das Obergeschoss, das gleichzeitig das Dachgeschoss darstellt.

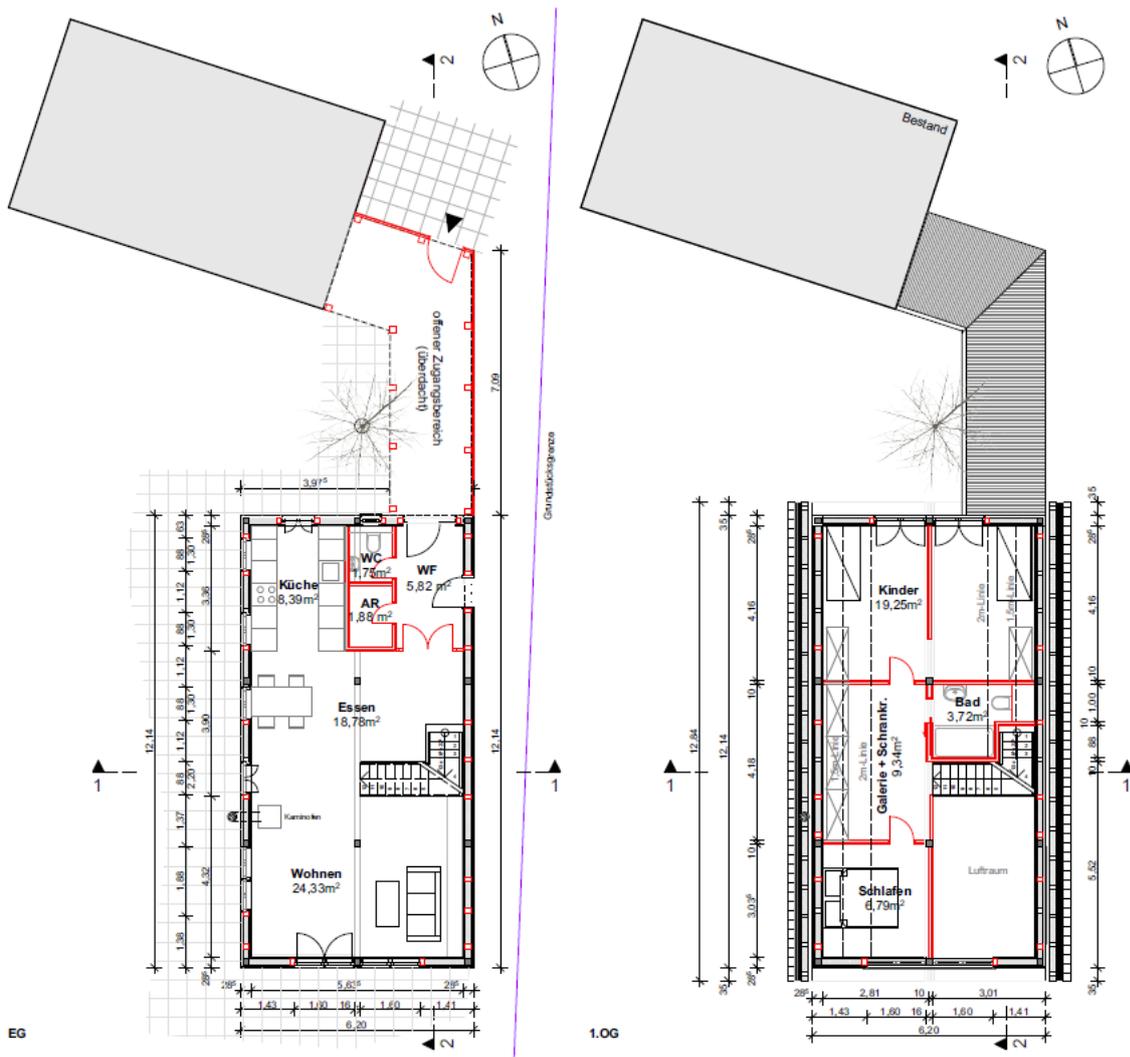


Bild 86:

Lage des Gebäudes mit Verbindung zu einem Bestandsgebäude. Links Erdgeschoss rechts das Obergeschoss, welches gleichzeitig das Dachgeschoss darstellt.

Bild 87 zeigt den Längs- und Querschnitt des Gebäudes. In der oberen Abbildung wird erkennbar, dass das Dach eine Neigung von etwa 34° aufweist. Als Versuchsfläche wurde der Dachbereich oberhalb des vorgesehenen Badezimmers (siehe Bild 86) ausgewählt, also die Dachseite mit Ostausrichtung. Bild 88 zeigt die Außenansichten des Gebäudes.

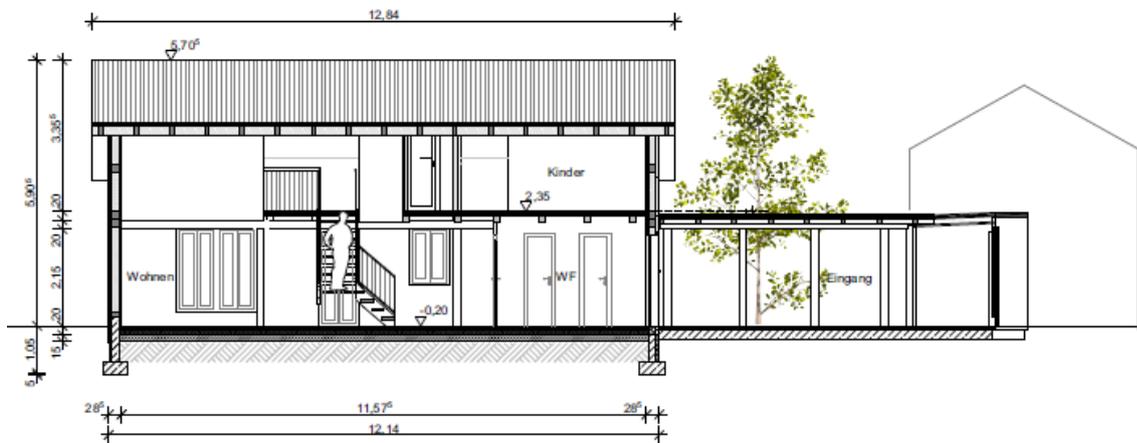
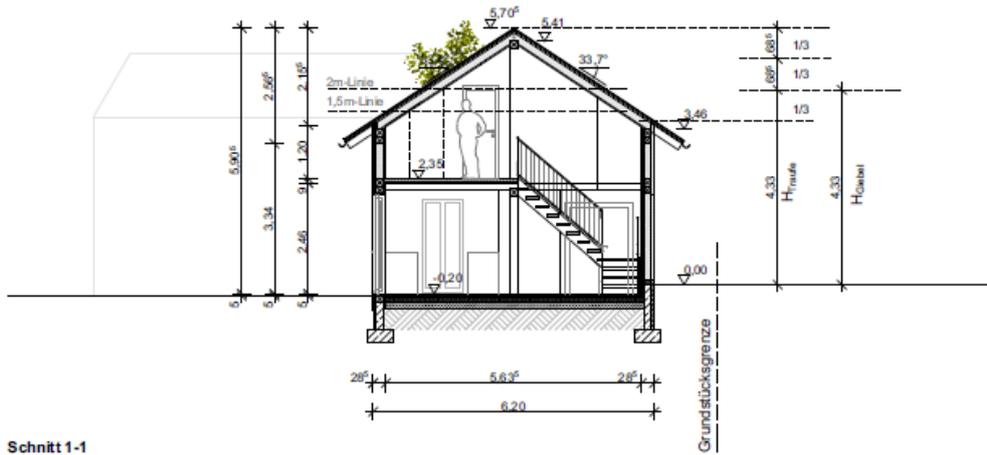
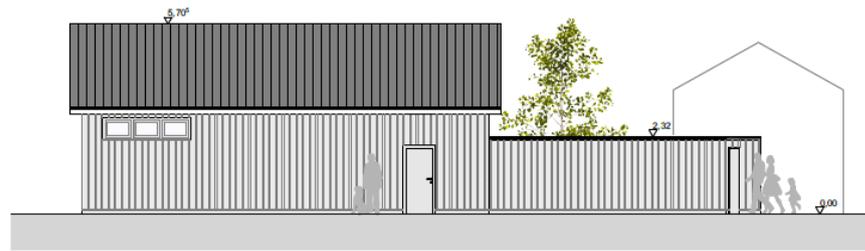


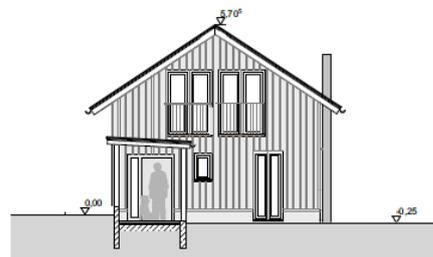
Bild 87:  
Längs- (unten) und Querschnitt (oben) des Gebäudes.



Ansicht Ost



Ansicht West



Ansicht Nord



Ansicht Süd

Bild 88:  
Außenansichten des Gebäudes.

Bild 89 zeigt eine fotografische Aufnahme des Bauzustandes kurz vor der Installation der Messensorik im Dachbereich am 2. Dezember 2019. Das Gerüst und die Leiter zur Anbringung des Temperatursensors unterhalb der Dacheindeckung ist bereits aufgebaut. Bild 90 zeigt eine Innenaufnahme des für die Messung erstellten Raumes unterhalb der Versuchsdachfläche. Die Wände dieses Raumes sind passenderweise mit Typhawandplattenmaterial beplankt worden.



Bild 89:  
Außenansicht des Gebäudes kurz vor Installation der Sensorik im Dachbereich  
Anfang Dezember 2019.



Bild 90:  
Innenaufnahme des für die Messung erstellten Raumes unterhalb der  
Versuchsdachfläche.

Bild 91 zeigt eine Innenaufnahme des Raumes. Man erkennt einen Teil des Daches und den Außenwandbereich des Raumes, der später das Badezimmer darstellen soll.



Bild 91:  
Blick in die Messkammer mit Teilansicht der Dachunterseite.

### 7.2.2 Installation der Messensorik und Datenerfassung

Es wurde in einem Dachfeld mit Aufdachdämmung eine Messachse eingerichtet. Dabei wurde hier eine reine Aufdachdämmung mit 60 mm Dicke ohne Zwischensparrendämmung ausgeführt. Bild 92 zeigt den schematischen Querschnitt des Dachaufbaus zusammen mit der Positionierung der Sensorik. Hier befindet sich zusätzlich zum innenseitigen Oberflächentempersensor, zur Wärmeflusscheibe und dem Kombisensor zur Erfassung der Oberflächentemperatur und der Luftfeuchte der bereits erwähnte Temperatursensor auf der Außenseite der Dämmung.

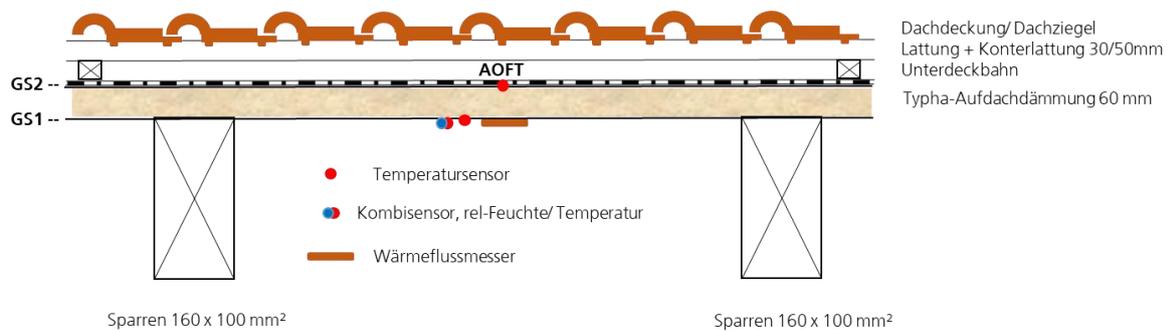


Bild 92:  
Schematischer Querschnitt des Dachaufbaus und Positionierung der Sensorik.

Anhand von Bild 93 kann man die Positionierung der Sensorik an der Innenoberfläche des Messfeldes erkennen. Der Oberflächentemperatursensor und der Kombisensor sind dabei ober- bzw. unterhalb der Wärmestrommessscheibe positioniert. Ganz links ist die Durchführung des außenseitigen Temperatursensorkabels erkennbar. Dieses Kabel wurde bewusst auf der Außenseite entlang der Isotherme waagrecht von der Mitte des Feldes zum Rand hin verlegt (siehe Bild 94).



Bild 93:  
Messfeld mit Durchführung des außenseitigen Temperatursensorkabels.



Bild 94:  
Außenansicht der Aufdachdämmung mit Sensor zur Ermittlung der Oberflächentemperatur und waagrecht entlang der Isotherme verlegter Kabelführung.

Bild 95 zeigt die Sensorik zur Erfassung des Raumklimas. Dabei wurde ein Kombisensor zur Erfassung der Temperatur und der Feuchte für die Regelung eingesetzt und der andere für die Messwerterfassung.



Bild 95:  
Sensorik zur Erfassung des Raumklimas; ein Kombisensor dient der Regelung des Raumklimas und der andere der Messwerterfassung.

Bild 96 zeigt die Box mit den Anschlusskabeln für die Messsensorik. Innerhalb dieses Gerätegehäuses befindet sich auch der Datenlogger sowie der Einschub für die WLAN-Verbindung zur Übertragung der Messdaten auf dem Server des Instituts

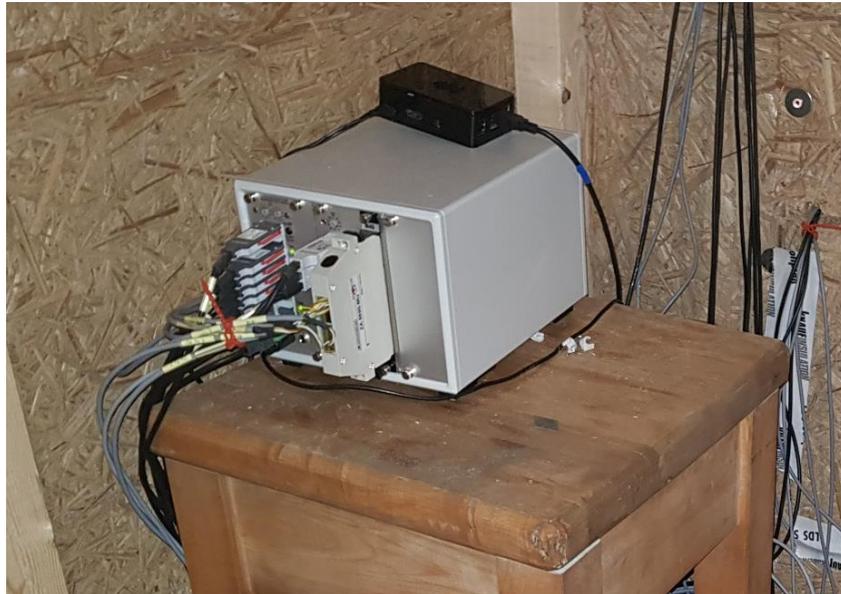


Bild 96:  
Gerätebox mit den Anschlusskabeln für die Messsensorik sowie den  
Einschubkarten für die WLAN-Verbindung und die Datenspeicherung.

Der Raumluftbefeuchter, der auf dem Verdunstungsprinzip beruht, ist in Bild 97 im Versuchsraum auf der rechten Seite erkennbar. Er wird gerade über einen Gartenschlauch mit Wasser gefüllt, da das Gebäude noch keinen Wasseranschluss besitzt. Dementsprechend muss der Wasserstand im Befeuchter regelmäßig überprüft und bei Bedarf händisch nachgefüllt werden. Die Regelung des Befeuchters erfolgt extern unter Verwendung der Raumluftfeuchtemessdaten über die kleine weiße Steuereinheit in der Steckdosenleiste. Der Befeuchter ist zum Zeitpunkt der Aufnahme gerade noch nicht eingesteckt. Die Raumbeheizung erfolgt über einen portablen elektrischen Radiator, der in diesem Bild nicht zu sehen ist.



Bild 97:  
Ansicht des Versuchsraumes mit Messwerterfassungsanlage links auf dem Beistelltischchen und mit Befeuchtungsgerät rechts nebst der Regeleinrichtung.

Da die installierte Messdatenerfassung erweiterbar ist, wurde die Gelegenheit genutzt, auch ein Monitoring im Wandbereich durchzuführen. Dabei war das Ziel der Messungen, zu untersuchen, ob kleingeschnittene Typhapartikel geeignet sind, um in der Wand als Schüttdämmung eingesetzt zu werden. Zu einem späteren Termin wurde dazu die beidseitig mit dem Typhaboard verschaltete Wand geöffnet (siehe gut erkennbaren Hohlraum in Bild 98).



Bild 98:  
Innseitige Öffnung der beidseitig mit Typhaboard bekleideten Wand.

Auf den zum Hohlraum orientierten Seiten wurde die Messensorik angebracht (siehe Bild 99), wobei auf der zum Raum liegenden Seite zusätzlich zum Kombi-sensor ein Oberflächentempersensur sowie eine Wärmefluss-scheibe installiert wurde. Alle Sensorkabel wurden mit an die Datenerfassungsanlage angeschlossen.



Bild 99: Messsensorik auf der zum Raum liegenden Seite (im Bild unten) mit Kombi-sensor, Oberflächentempersensur sowie Wärmefluss-scheibe und der Außenseite (im Bild oben) mit Kombi-sensor.

Bild 100 zeigt schematisch die Anordnung aller Messensoren bei der Wandmessung. Miteingetragen sind hier auch die außen- und innenseitigen Oberflächentempersensoren (AOFT und IOFT), die nicht in Bild 99 zu sehen sind.

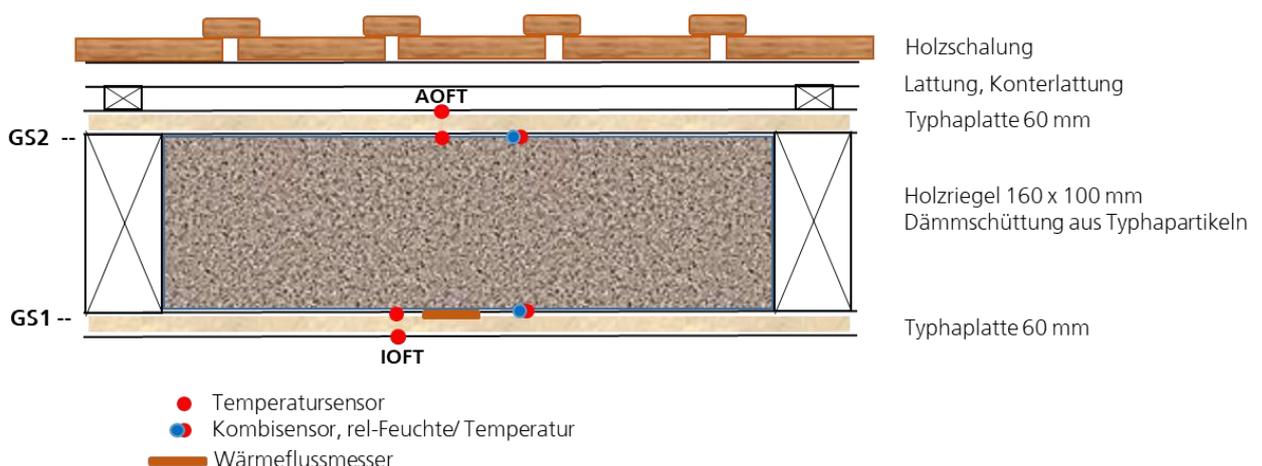


Bild 100: Positionierung der einzelnen Messstellen beim Wandversuch.

Der Hohlraum wurde mit den Typhapartikeln gefüllt und händisch etwas verdichtet (Bild 101). Danach wurde der darüber liegende Hohlraum vorsichtig ebenfalls mit Typhapartikeln aufgefüllt und die Öffnung verschlossen, wie in Bild 102 zu sehen ist. Anschließend wurde noch ein Sensor für die Innenoberflächentemperatur angebracht.



Bild 101:  
Verfüllung des Hohlraums mit Typhapartikeln und anschließende Verdichtung.



Bild 102:  
Verschluss der Einfüllöffnung für die Typhadämmschüttung.

## 7.2.3 Ergebnisse Typhahaus

In Bild 103 sind im oberen Diagramm die gemessenen Außenlufttemperaturen und –feuchten der nächstgelegenen Wetterstation in Bad Griesbach als Stundenmittelwerte dargestellt. Die Daten wurden von der Wetterstation der Meteogroup in Bad Griesbach im Rottal erfasst und zur Verfügung gestellt. Das untere Diagramm stellt die gemessene Globalstrahlung dar. Die Werte sind für den Zeitraum 01.01.-31.03.2020 abgebildet. Dieser Zeitraum entspricht der nachfolgend dargestellten und ausgewerteten Messperiode am Demogebäude im Raum Postmünster.

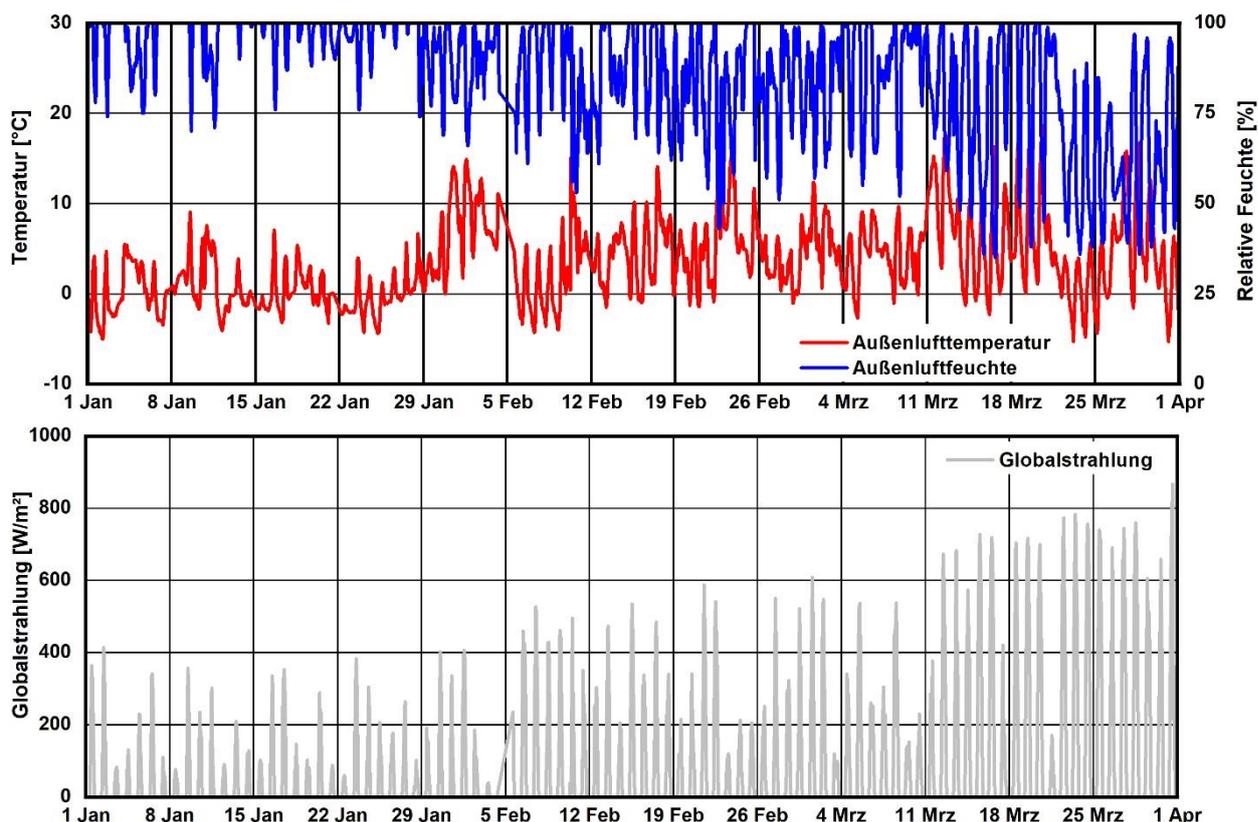


Bild 103:  
Verläufe der Stundenmittelwerte der an der meteorologischen Station Bad Griesbach im Rottal erfassten Außenlufttemperatur, relativen Außenluftfeuchte (oberes Diagramm) und der Globalstrahlung (unteres Diagramm) während des Messzeitraumes vom 1. Januar bis 31. März 2020.

Bild 104 zeigt die Verläufe der Stundenmittelwerte des Innenklimas (Raumlufthtemperatur und relative Luftfeuchte) im Demogebäude für den Zeitraum vom 1. Januar bis 31. März 2020. Leider kam es bei der Messdatenerfassung in dem dargestellten Zeitraum immer wieder zu einer Unterbrechung der Datenspeicherung aufgrund der trotz des eingesetzten WLAN-Verstärkers schlechten Verbindung. Aus diesem Grund setzten die Kurven im Diagramm immer wieder für kurze Abschnitte aus. Die Beheizung des Gebäudes liegt bei ca. 21 °C. Die Regelung der relativen Luftfeuchte im Versuchsgebäude

schwankt im Messraum nach den anfänglichen Höchstwerten von über 75 % im unbeheizten Zeitraum, die nach Einschalten der Beheizung am 10. Januar stark nach unten gehen. Im weiteren Verlauf zeigt sich auch anhand der Großen Schwankungsbreite, die zwischen 15 – 68 %, liegt, dass die Leistung der Befeuchtungseinrichtung nicht ausreicht, um ein annähernd konstantes Feuchteniveau zu halten. Dies ist vor allem darin begründet, dass aufgrund eines verzögerten Baubeginns und Lieferverzögerungen bei den Fenstern extreme Undichtheiten gegeben waren. Im Mittel liegt beträgt die relative Luftfeuchte ca. 45 % in dem dargestellten Messzeitraum, was dennoch einer typischen Feuchtelast im Winterzeitraum entspricht.

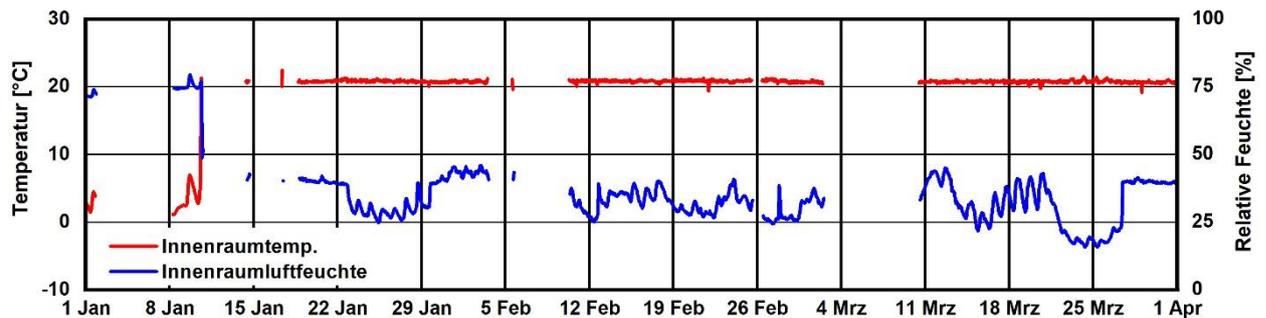


Bild 104:  
Verläufe der Stundenwerte des Innenklimas (Lufttemperatur und relative Luftfeuchte) im Gebäudeinnenraum im Zeitraum 1. Januar bis 31. März 2020.

In Bild 105 sind die Verläufe der Stundenwerte der Temperaturen (oben) und der dazu gehörigen relativen Luftfeuchten (unten) in der Grenzschicht (GS1) unterhalb der verlegten Aufdachdämmplatte aus Rohrkolben (TY) für den Zeitraum 1. Januar bis 31. März 2020 dargestellt. Man erkennt kurzfristige Schwankungen, die im Regelverhalten des Heizradiators begründet sind. Analog dazu verhält sich die relative Feuchte mit gegenläufigen Schwankungen. Zu Beginn des Messzeitraum zeigt sich, dass bei den anfänglich niedrigen Temperaturen die Feuchten in GS1 bei ca. 75 % liegen. Sobald die Temperatur im Gebäude ab Mitte Januar gut geregelt wird, sinkt die relative Feuchte in GS1 deutlich und zügig auf unter 50 % ab.

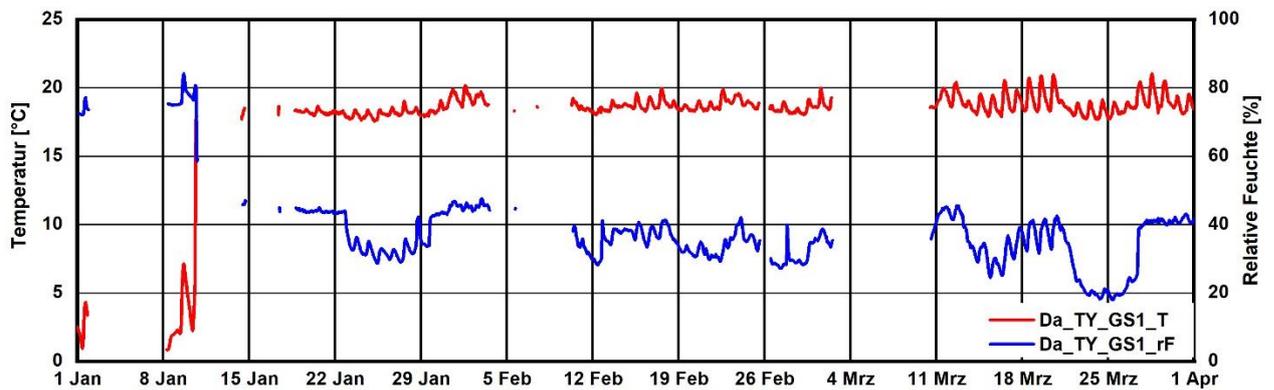


Bild 105  
Verläufe der Stundenwerte der Temperaturen (rote Linie) auf der Unterseite (GS1) der Aufdachdämmung aus Rohrkolben und der dazugehörigen relativen Luftfeuchte im Zeitraum vom 1. Januar bis 31. März 2020.

In Bild 106 erfolgt die zeitliche Darstellung der Grenzschichttemperaturen unter- und oberhalb der Aufdachdämmung (oberes Diagramm) und der gemessenen Wärmestromdichten im unteren Diagramm. Die Temperatur an der Außenseite der Aufdachdämmung (GS2) zeigt sehr deutliche Tageschwankungen.

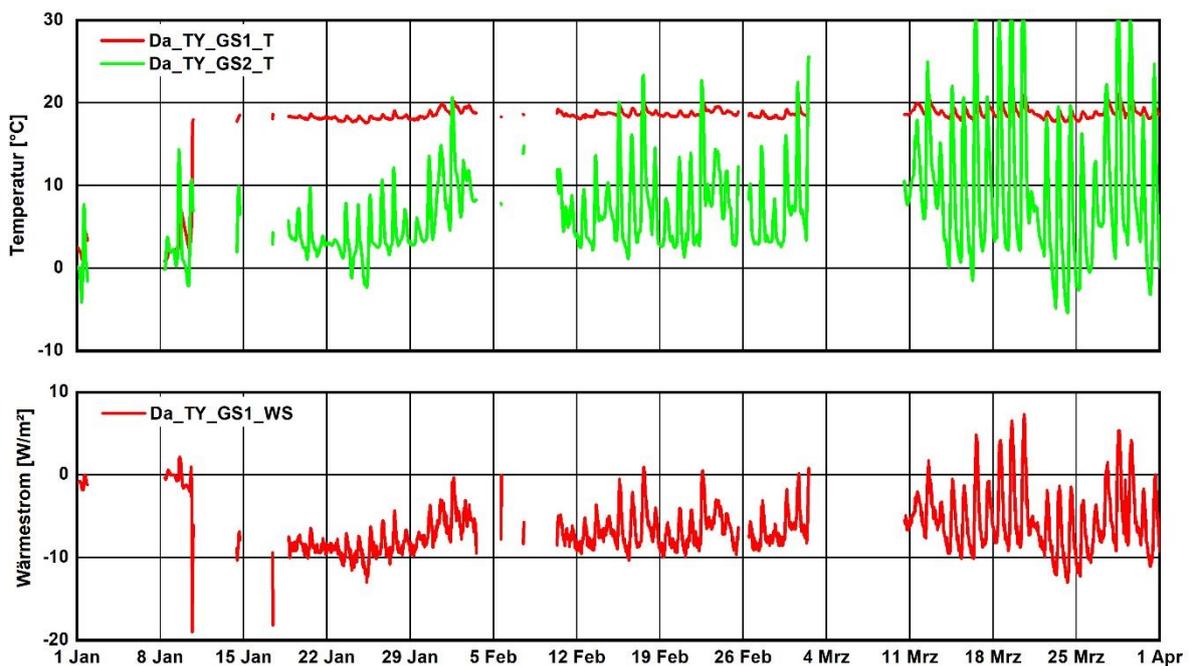


Bild 106:  
Verläufe der Grenzschichttemperaturen unter- und oberhalb (GS1 und GS2) der Aufdachdämmung (oberes Bild) mit den Wärmestromdichten (untere Abbildung) in GS1 als Stundenmittelwerte im Zeitraum vom 1. Januar bis 31. März 2020.

Die Temperaturen liegen erwartungsgemäß deutlich unterhalb der der Innenoberfläche, kann diese kurzfristig aber auch deutlich übersteigen, vor allem bei starker Sonneneinstrahlung. Bei den gemessenen Wärmestromdichten zeigt sich, wie auch bei den innenseitigen Oberflächentemperaturen, der Einfluss des Regelverhaltens des Heizkörpers.

Der besseren Übersicht wegen zeigt Bild 107 die Ergebnisse als gleitenden Tagesmittelwert. Man erkennt in dieser Ansicht gut, dass der gemessene Wärmestrom einen Verlauf nimmt, der recht gut zum Temperaturverlauf der Außenseite passt.

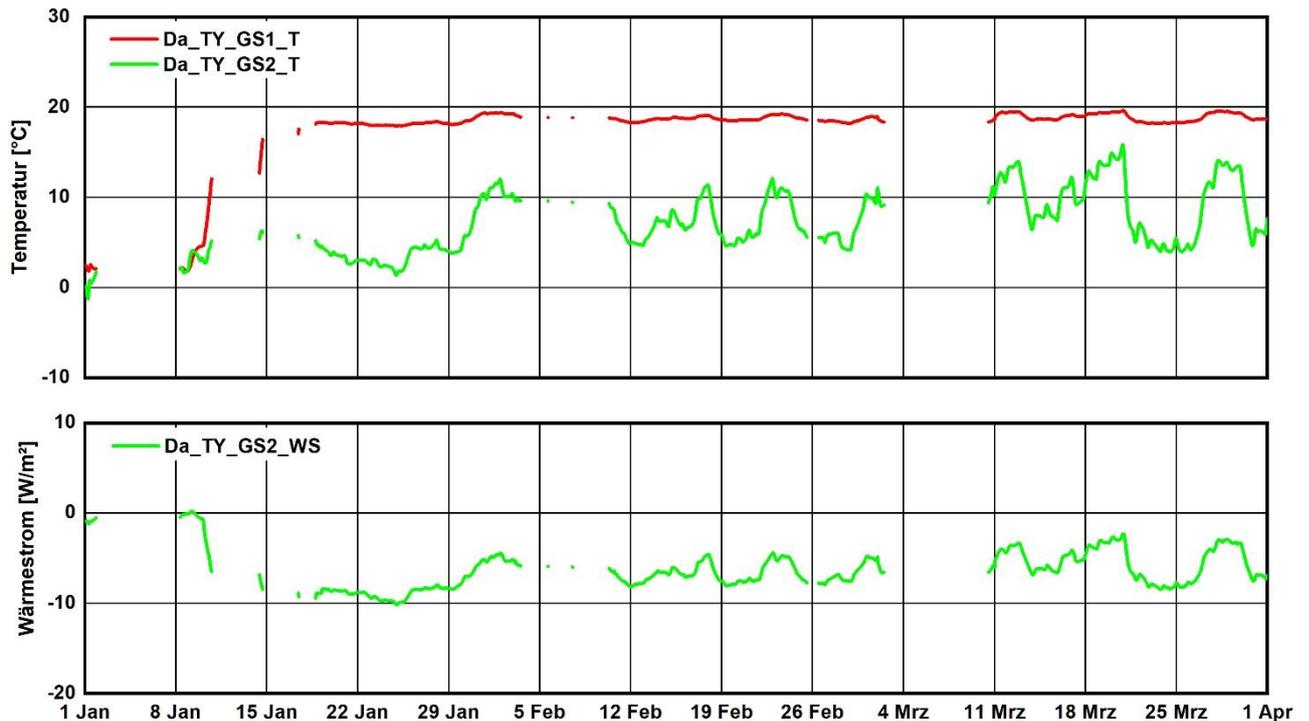


Bild 107:

Verläufe der Grenzschichttemperaturen unter- und oberhalb (GS1 und GS2) der Aufdachdämmung (oberes Bild) und der Wärmestromdichte (untere Abbildung) als gleitende Tagesmittelwerte im Zeitraum vom 1. Januar bis 31. März 2020.

In Bild 108 sind die Verläufe der Stundenwerte der Temperaturen und dazugehörigen relativen Luftfeuchten an den verschiedenen Messstellen in der Wand mit der Schüttdämmung aus Rohrkolbenpartikeln im Zeitraum vom 1. Januar bis 31. März 2020 dargestellt. Im oberen Diagramm sind die Temperaturverläufe dargestellt. Man erkennt die Reihung der Verläufe von innen über die beiden Grenzschichttemperaturen (GS1 und GS2) nach außen mit jeweils abnehmenden Temperaturen. Die Temperatur an der Außenseite zeigt zwar auch deutliche Tagesschwankungen, sie sind aber nicht ganz so ausgeprägt wie bei den Messungen am Dach, was dadurch begründet ist, dass die Außenoberfläche der Wand tagsüber eine deutlich niedrigere solare Einstrahlung erfährt als die Dachoberfläche. Die Außenoberflächentemperatur steigt auch hier,

allerdings nur kurzfristig, ab und zu über die Innenoberflächentemperatur. Diese verläuft relativ konstant mit Werten von 18 bis 19 °C. Die hinter der Schüttdämmung gemessene Luftfeuchte (grüne Linie im unteren Diagramm) liegt anfänglich nur etwas höher als auf der Innenoberfläche, was in der noch fehlenden Beheizung begründet ist. Im weiteren Verlauf nimmt die relative Luftfeuchte kontinuierlich ab, korrespondierend mit der zunehmenden Erwärmung der Außenluft. Die Oberflächenfeuchte hinter der innenseitigen Typhabeplankung (rote Linie im Diagramm) nimmt mit Beginn der Beheizung stark ab und bleibt im weiteren Verlauf durchgängig 30 % niedriger als auf der Außenoberfläche. In GS2 kommt es im Gegensatz zu GS1 erst gegen Ende März zu einer Feuchte von unter 75 %.

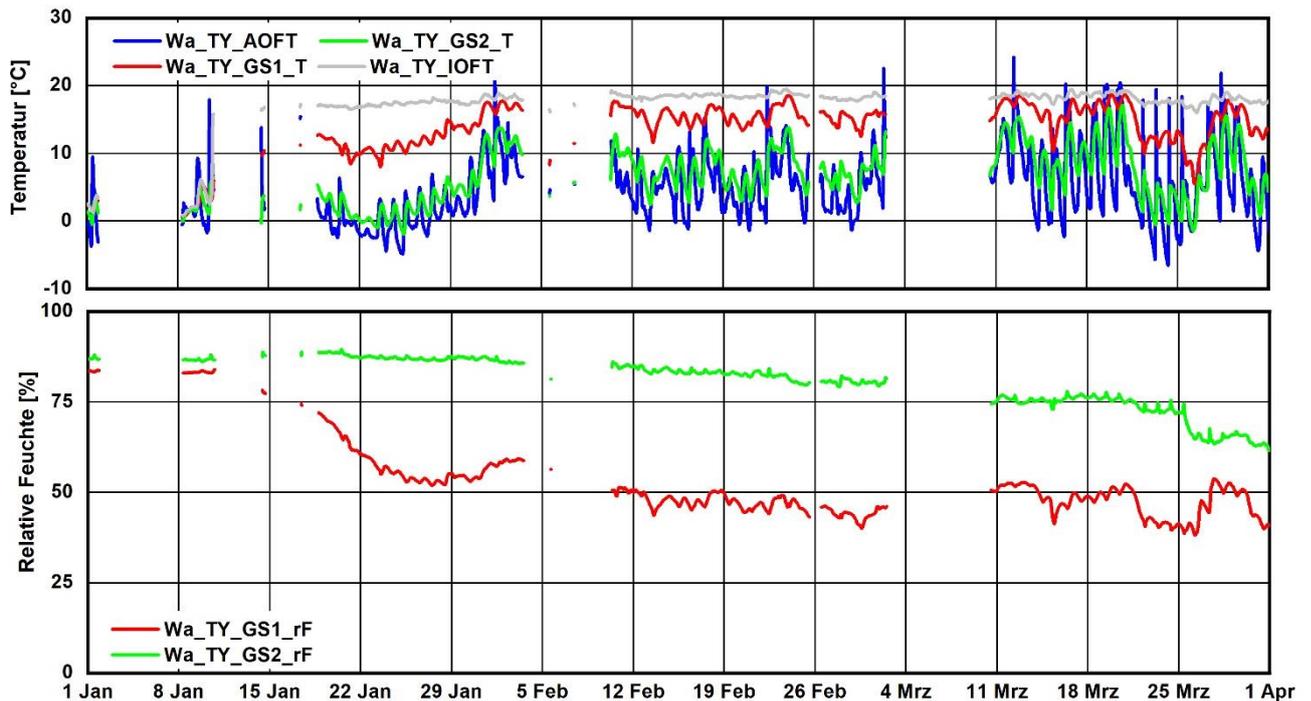


Bild 108:

Verläufe der Stundenwerte der Temperaturen und der dazugehörigen relativen Luftfeuchten in den Grenzschichten (GS1 + GS2) sowie an der Außen- und Innenoberfläche der Schüttdämmung aus Rohrkolben vom 1. Januar bis 31. März 2020.

Bild 109 zeigt für den Wandversuch die zeitliche Darstellung der Grenzschichttemperaturen hinter- und vor der Schüttdämmung (oberes Diagramm) und der gemessenen Wärmestromdichten im unteren Diagramm. Die Temperatur an der Außenseite weist zwar auch deutliche Tagesschwankungen auf, sie sind aber nicht ganz so ausgeprägt wie bei den Messungen am Dach, was dadurch begründet ist, dass die Außenoberfläche der Wand tagsüber eine deutlich niedrigere solare Einstrahlung erfährt als die Dachoberfläche. Die Temperaturen an GS2 liegen stets unterhalb der der Innenoberfläche, übersteigen im Gegensatz zum Ergebnis der Dachmessungen zu keinem Zeitpunkt die von GS1. Bei den gemessenen Wärmestromdichten zeigt sich, wie auch bei den

innenseitigen Oberflächentemperaturen, der Einfluss des Heizkörpers. Da die Wärmeflussmessscheibe hier aber hinter der Innenbeplankung angebracht ist, sind die Schwankungen aber deutlich geringer ausgeprägt. Bild 110 zeigt die Ergebnisse als gleitender Tagesmittelwert.

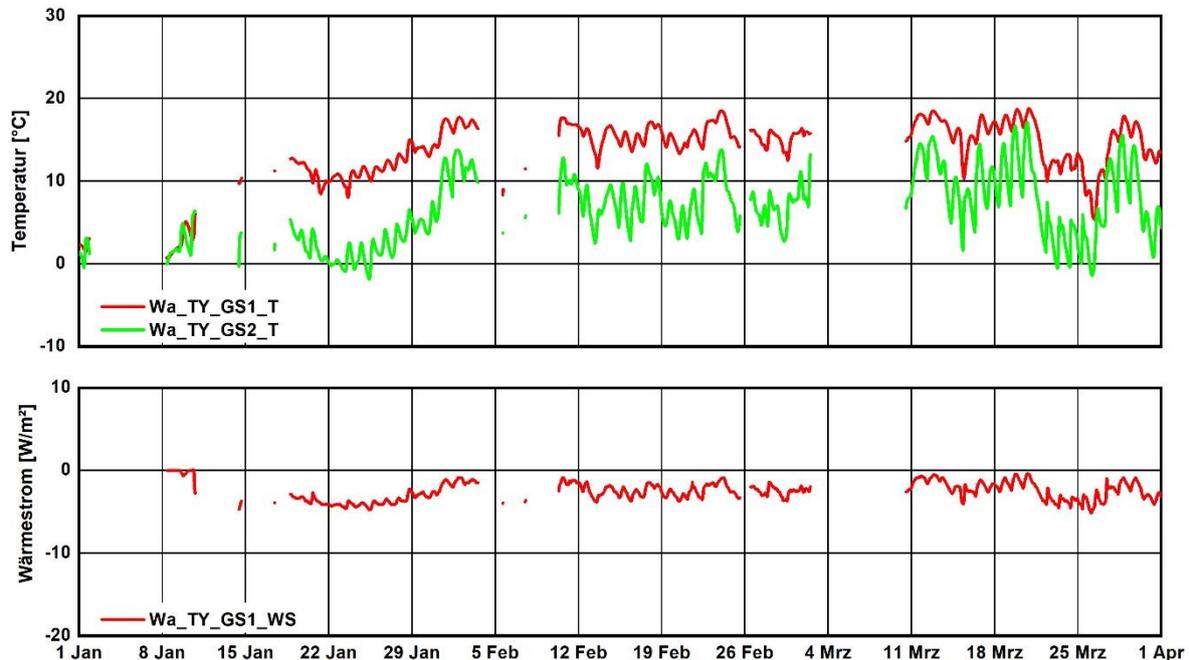


Bild 109:  
Verläufe der Grenzschichttemperaturen innen und außen liegend (GS1 und GS2) der Schüttdämmung aus Rohrkolben in der Wandkonstruktion mit den Wärmestromdichten (Wärmeströme) in GS1 als Stundenmittelwerte im Zeitraum vom 1. Januar bis 31. März 2020.

In Tabelle 40 sind die aus den Messwertverläufen für den Dach- sowie den Wandversuch berechnete Wärmedurchlasswiderstände (R-Werte) für unterschiedliche Auswerteperioden aufgelistet. Für die Aufdachdämmung ergibt sich im Mittel ein R-Wert von  $1,71 \text{ m}^2/\text{K W}$ . Dies passt sehr gut zu den im Flexdachversuch ermittelten R-Werten von etwa  $2,2 \text{ m}^2/\text{K W}$ , die mit einer Nenndicke von  $2 \times 4 \text{ cm}$  ermittelt wurden. Legt man die reale Dicke von  $66 \text{ mm}$  zugrunde, berechnet sich damit für die Aufdachdämmung eine Wärmeleitfähigkeit von  $0,039 \text{ W/mK}$ , was etwas besser ist als der Messwert für dieses Material. Allerdings muss man dabei berücksichtigen, dass die Wärmeflussmessscheiben einen Messfehler von etwa  $5 \%$  aufweisen.

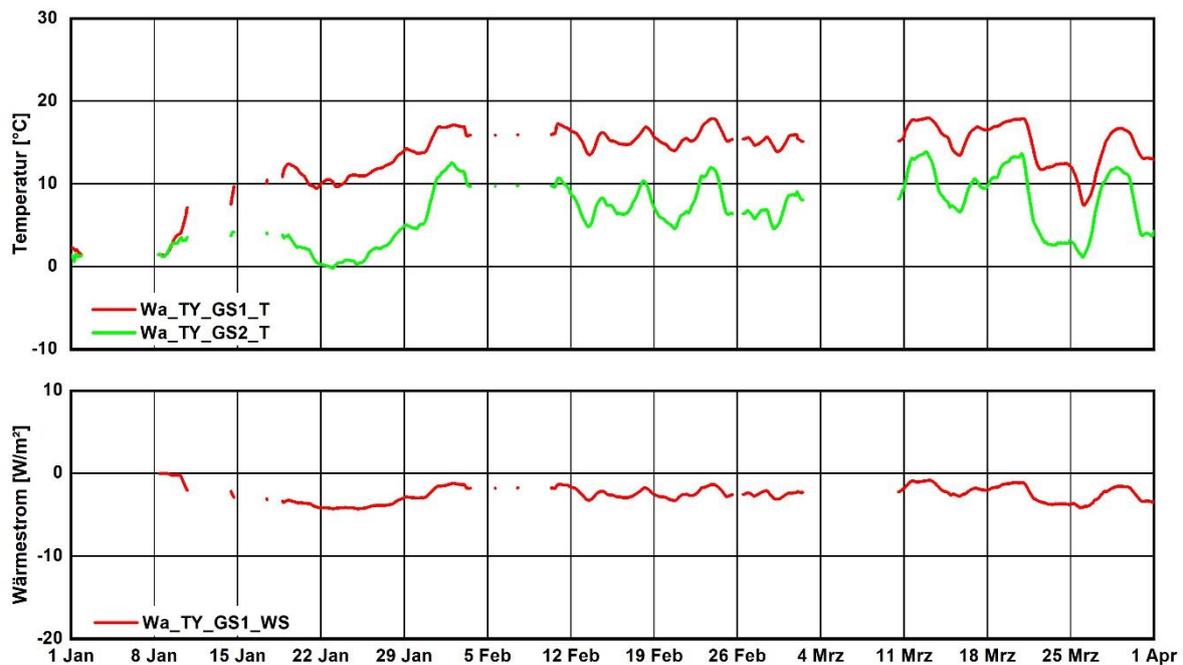


Bild 110:  
Verläufe der Grenzschichttemperaturen innen und außen liegend (GS1 und GS2) des Gesamtpaketes der Rohrkolbendämmung in der Wandkonstruktion mit den Wärmestromdichten (Wärmeströme) in GS1 als gleitende Durchschnittswerte der Tagesmittel im Zeitraum vom 1. Januar bis 31. März 2020.

Für die Typha-Schüttdämmung berechnet sich ein mittlerer Wärmedurchlasswiderstand von 2,78 m<sup>2</sup>/K W bei einer Hohlraumdicke von 16 cm. Dementsprechend weist die Schüttdämmung eine Wärmeleitfähigkeit von ca. 0,058 W/mK auf.

Tabelle 40:  
Für den Dach- und den Wandversuch aus den Messdaten berechnete Wärmedurchlasswiderstände (R-Werte) für unterschiedliche Auswerteperioden.

Periode	Dach		Wand	
	Auswertezeitraum	R-Wert [m <sup>2</sup> /K W]	Auswertezeitraum	R-Wert [m <sup>2</sup> /K W]
Januar 2020	19.-30.	1,67	24.-31.	2,70
Februar 2020	11.-29.	1,73	16.-22.	2,85
März 2020	11.-31.	1,75	11.-31.	2,80
	<b>Mittelwert</b>	<b>1.71</b>	<b>Mittelwert</b>	<b>2,78</b>

## 8 Rechnerische Untersuchungen zu Einsatzgrenzen IBP

Im Zuge der energetischen Sanierung von Altbauten werden zunehmend im Dachbereich sogenannte Aufdachdämmungen eingesetzt. Häufig war das vorhandene Altdach bereits mit einer Mineralwolledämmung versehen, aber es besteht meist keine ausreichende Kenntnis zur verwendeten Dampfbremse und der Qualität der Verlegung. Im Folgenden werden über hygrothermische Berechnungen die Einsatzgrenzen der neu entwickelten Dämmplatte bestimmt. Dabei geht es in erster Linie um den Einsatz als Aufdachdämmung unter deutschen Klimabedingungen. Zusätzlich wird anhand weiterer internationaler Standorte die Einsatzmöglichkeit in anderen Klimazonen untersucht.

Grundbasis für die Berechnungen ist ein typisches Altbaudach mit innenseitiger Beplankung aus OSB sowie einer Dampfbremse dahinter und einer Altdämmung zwischen den Sparren aus Mineralwolle mit 6 cm Dicke. Dieser Dachaufbau wird, unabhängig davon, ob er auch in den anderen Klimazonen üblich ist, auch dort zugrunde gelegt, da es hier zunächst nur um den Klimaeinfluss geht. Für alle Standorte wird auch der Dachaufbau in Bezug auf Innenbeplankung und Dampfbremse sowie der Dicke der Altdämmung und Aufdachdämmung variiert. Beispielhaft wird auch der Einfluss der Dachneigung einbezogen.

Neben dem eigentlichen Einsatzzweck einer Aufdachdämmung werden auch die Verwendung als Innendämmung sowie ein beispielhafter Einsatz zur energetischen Sanierung eines Fachwerkgebäudes geprüft.

### 8.1 Durchführung der rechnerischen Untersuchungen

Für die rechnerische Untersuchung von gekoppelten Wärme- und Feuchte-transportvorgängen liegt am IBP das erprobte und vielfach validierte ein-dimensionale EDV-Programm WUFI®-Pro vor [18]. Das Programm verknüpft dabei energetische und hygrothermische Bauteilberechnungen und liefert Temperatur- und Feuchteverläufe der Bauteile. WUFI® ist ein menügesteuertes Windowsprogramm, das die realitätsnahe Berechnung des instationären hygrothermischen Verhaltens von mehrschichtigen Bauteilen unter natürlichen Klimabedingungen erlaubt. Es basiert auf den neusten Erkenntnissen in Bezug auf Dampfdiffusion und Flüssigkeitstransport in Baustoffen. WUFI® arbeitet mit Standardstoffkennwerten sowie mit einfach zu bestimmenden Speicher- und Flüssigtransportfunktionen. Bisherige Beschreibungen des Feuchte-transportverhaltens von Baustoffen mit Hilfe dieses Verfahrens haben eine gute Übereinstimmung zwischen rechnerischer Aussage und praktischer Untersuchung am Objekt ergeben [19-22]. Die für die Berechnungen notwendigen Materialkennwerte entstammen der WUFI®-Materialdatenbank. Die Schadensbeurteilung erfolgt zusätzlich mit Hilfe des Prognosetools WUFI®-Bio [23, 24]. Da die Temperatur- und Feuchteverhältnisse wesentliche Einflussfaktoren für das Schimmelpilzwachstum darstellen, kann aus der Kenntnis der hygro-

thermischen Bedingungen und deren zeitlicher Veränderung eine Wachstumswahrscheinlichkeit für Schimmelpilze abgeleitet werden. Sogenannte Isolethensysteme beschreiben die Abhängigkeit der Sporenkeimung bzw. des Myzelwachstums von der Oberflächentemperatur und -feuchte. Um den Einfluss des Substrats, also des Untergrundes auf die Schimmelpilzbildung, berücksichtigen zu können, werden Isolethensysteme für drei unterschiedliche Substratgruppen vorgeschlagen: 0 = optimaler Nährboden, I = biologisch gut verwertbar, II = biologisch kaum verwertbare Substrate. Aufbauend auf diesen Isolethensystemen wurde, um die Wirkungsweise der wesentlichen Einflussgröße auf die Auskeimung der Sporen, nämlich die bei bestimmten Temperaturen verfügbare Feuchte, bauphysikalisch korrekt beschreiben zu können, ein biohygrothermisches Modell entwickelt. Dieses ist in der Lage, den Feuchtehaushalt einer Modellspore in Abhängigkeit von instationären Randbedingungen rechnerisch zu ermitteln, also auch ein zwischenzeitliches Austrocknen der Pilzsporen zu berücksichtigen.

Ist ein bestimmter Wassergehalt (Grenzwassergehalt) im Sporennieren erreicht, kann die Sporenkeimung als abgeschlossen betrachtet werden und das Schimmelpilzwachstum beginnt. Dieser Grenzwassergehalt wird mithilfe der Isolethensysteme für Sporenauskeimung festgelegt. Für die relativ gut schimmelpilzresistente Typhaplatte wird trotzdem, um auf der sicheren Seite zu liegen, Substratgruppe I, also leicht biologisch verwertbares Material, zugrunde gelegt.

Die Berechnungen erfolgen für den Regelquerschnitt für ein Dach mit Nordausrichtung, da dies aufgrund der geringeren solaren Einstrahlung die ungünstigste Situation darstellt. Die Berechnungen werden für einen Zeitraum von drei Jahren durchgeführt. Zusätzlich werden für ausgewählte Beispiele auch aufwändigere zweidimensionale Berechnungen durchgeführt, um beurteilen zu können, ob aus hygrothermischer Sicht ein Risiko des Wachstums Holz zerstörender Organismen bei den Sparren gegeben ist.

### **8.1.1 Auswahl der Standorte**

Mit den Standorten Hof, Würzburg und Freiburg werden für Deutschland drei Standorte gewählt, die sich in ihren Klimabedingungen deutlich unterscheiden und den drei in der DIN 4108 [25] definierten Klimazonen zuzuordnen sind (siehe Bild 111). Würzburg gilt dabei als typisches mittleres Klima für Deutschland, Hof als kaltes und Freiburg als besonders warmes Klima.

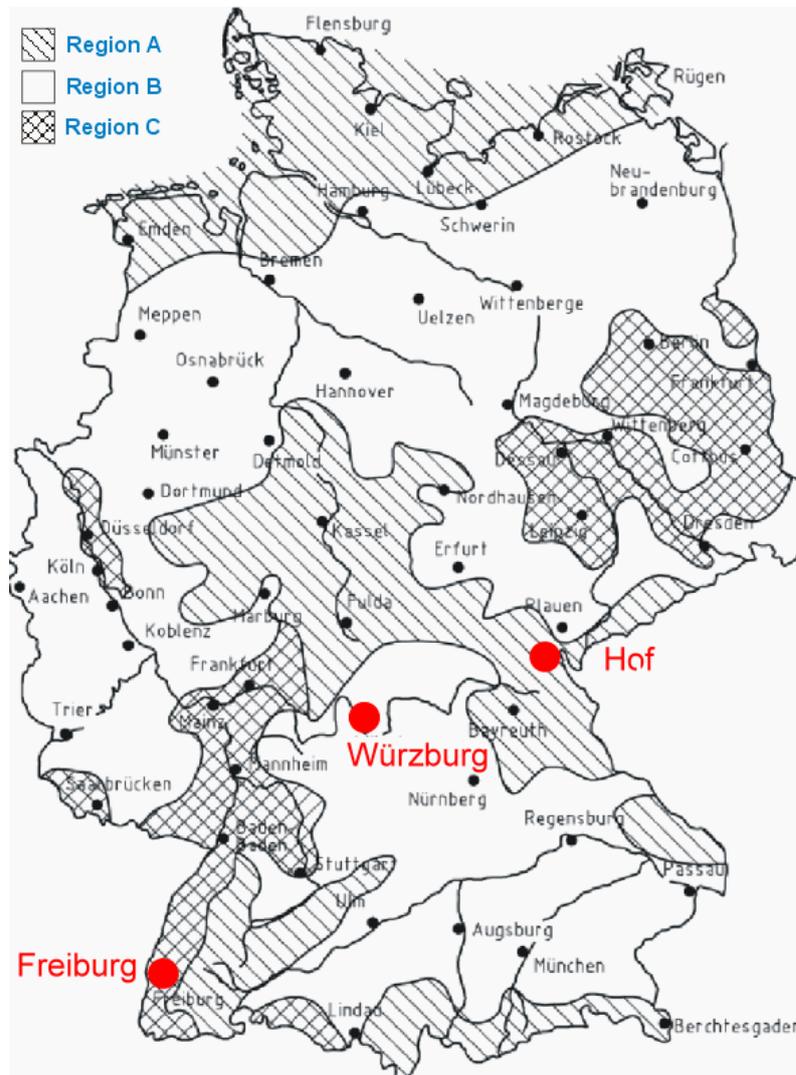


Bild 111:  
Lage der drei ausgewählten Standorte Hof, Würzburg und Freiburg und Zuordnung zu den entsprechenden Klimaregionen nach DIN 4108 Blatt 2/A1.

Bild 112 zeigt den Jahresgang der Außenlufttemperatur und der relativen Luftfeuchte einschließlich der jeweiligen Tagesmittelwerte für Hof. Die Stadt liegt auf einer Höhe von ca. 570 m über NN und deren mittlere Jahrestemperatur liegt bei 6,1 °C, die mittlere relative Luftfeuchte bei 81 % und die Jahresniederschlagsmenge bei ca. 880 mm.

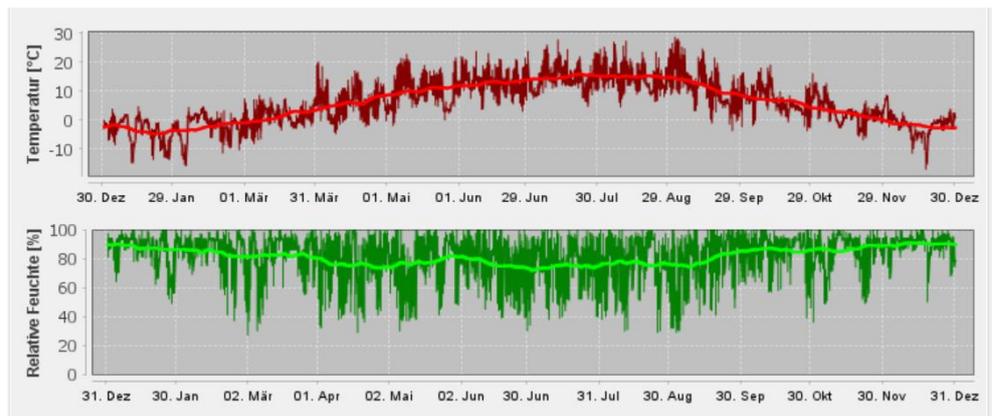


Bild 112

Jahresgang der Außenlufttemperatur und der relativen Luftfeuchte von Hof einschließlich der jeweiligen Tagesmittelwerte.

Bild 113 zeigt den Jahresgang der Außenlufttemperatur und der relativen Luftfeuchte einschließlich der jeweiligen Tagesmittelwerte für Würzburg. Würzburg liegt auf einer Höhe von ca. 260 m über NN und die mittlere Jahrestemperatur bei 9,0 °C, die mittlere relative Luftfeuchte bei 78 % und die Jahresniederschlagsmenge bei ca. 710 mm.

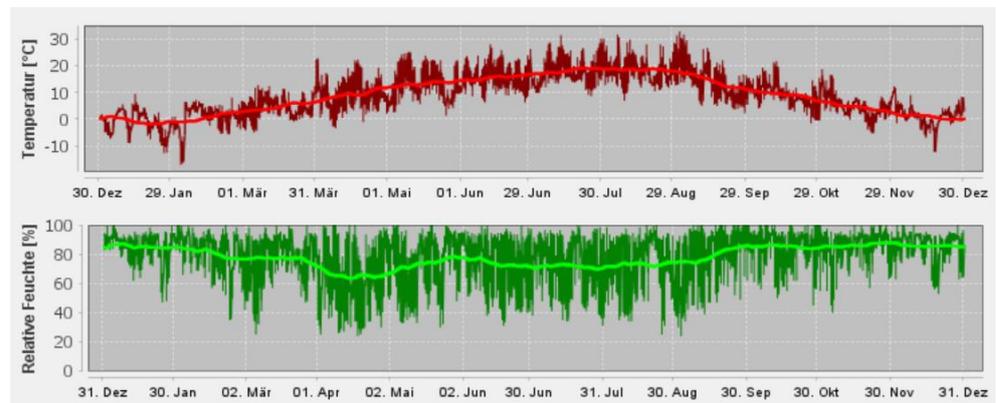


Bild 113:

Jahresgang der Außenlufttemperatur und der relativen Luftfeuchte von Würzburg einschließlich der jeweiligen Tagesmittelwerte.

Freiburg (Bild 114) als besonders warmer Ort in Deutschland besitzt eine mittlere Jahrestemperatur von 10,4 °C und eine mittlere Luftfeuchte von 74 %, bei einer Jahresniederschlagsmenge von 940 mm. Freiburg liegt dabei mit 270 m auf etwa der gleichen Höhe wie Würzburg.

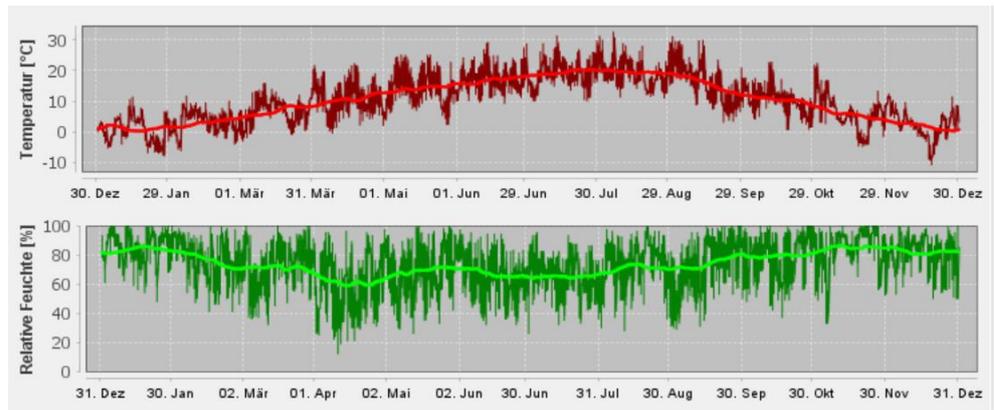


Bild 114:  
Jahresgang der Außenlufttemperatur und der relativen Luftfeuchte von Freiburg einschließlich der jeweiligen Tagesmittelwerte.

In Bezug auf internationale Standorte in anderen Klimazonen ist die Auswahl dadurch beschränkt, dass nur für relativ wenige Standorte geeignete Klimadaten zur Verfügung stehen. Als Vertreter für einen besonders kalten Standort wurde Östersund in Schweden ausgewählt, das in einer Höhe von ca. 380 m liegt. Hier werden Außentemperaturen von bis fast  $-40\text{ °C}$  erreicht (Bild 115). Die Jahresmitteltemperatur liegt bei nur  $1,5\text{ °C}$  und die mittlere Luftfeuchte bei  $79,5\text{ %}$ .

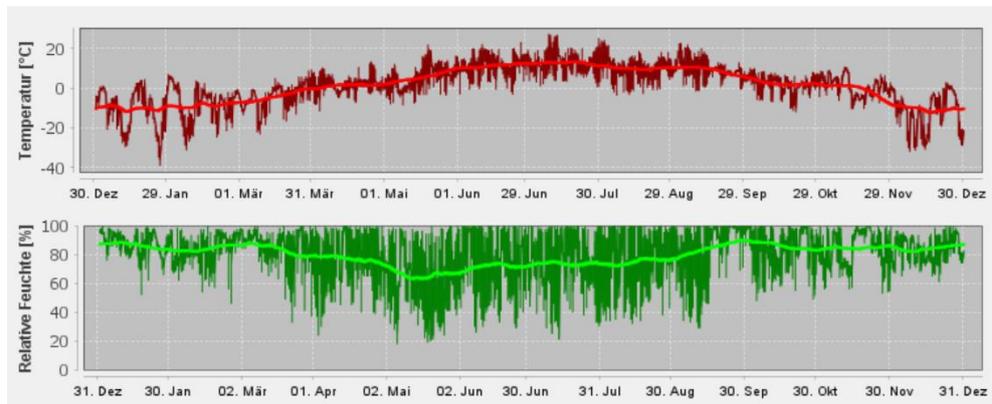


Bild 115:  
Jahresgang der Außenlufttemperatur und der relativen Luftfeuchte von Östersund in Schweden einschließlich der jeweiligen Tagesmittelwerte.

Malaga, das ganz im Süden von Spanien am Mittelmeer liegt, besitzt eine wesentlich höhere Jahresmitteltemperatur von  $18,3\text{ °C}$  mit deutlich trockenerer Außenluft, die im Jahresmittel eine Luftfeuchte von nur  $64,3\text{ %}$  aufweist (Bild 116).

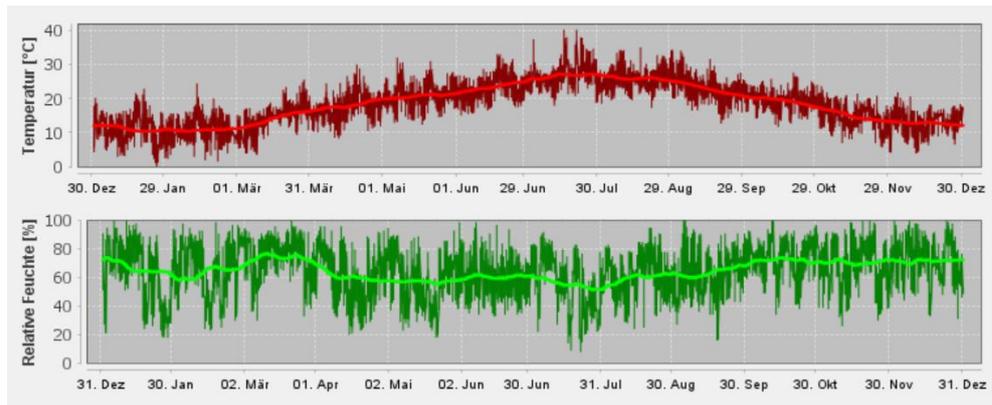


Bild 116:  
 Jahresgang der Außenlufttemperatur und der relativen Luftfeuchte von Malaga im Süden von Spanien einschließlich der jeweiligen Tagesmittelwerte.

Als Standort mit besonders hohen Temperaturen stehen die Klimadaten von Key West zur Verfügung (Bild 117). Der auf Meereshöhe liegende Ort besitzt eine mittlere Temperatur von 25,2 °C und dabei aber eine relativ hohe mittlere Luftfeuchte von 75,5 %. Hier wird für die Berechnungen davon ausgegangen, dass den größten Teil des Jahres das Gebäude über eine Klimaanlage auf 23 °C gekühlt wird, sodass die Wasserdampfdiffusionsstromrichtung die meiste Zeit nach innen gerichtet ist.

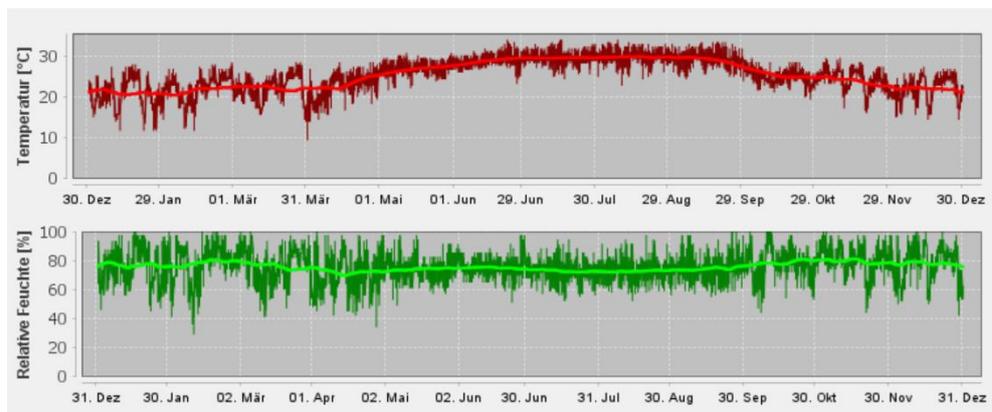


Bild 117:  
 Jahresgang der Außenlufttemperatur und der relativen Luftfeuchte von Key West ganz im Süden der USA einschließlich der jeweiligen Tagesmittelwerte.

## 8.1.2 Auswahl der Konstruktionen

Bei den Untersuchungen wird von einem Standarddachaufbau ausgegangen, der eine typische Situation im Altbaubestand darstellt. Dabei handelt es sich um ein Steildach mit alter Zwischensparrendämmung aus Mineralwolle, die allerdings nur eine Dicke von 6 cm aufweist. Innenseitig ist das Dach mit einer OSB-Platte mit dahinterliegender Dampfbremse beplankt. Zur Verbesserung des Dämmstandards wird die neu entwickelte Typha-Dämmplatte als Aufdach-

dämmung außenseitig aufgebracht, mit einer diffusionsoffenen Unterspannbahn versehen und wieder mit Ziegeln eingedeckt. Es wird davon ausgegangen, dass die vorhandene Holzschalung, weil marode, entfernt wird und die Aufdachdämmung direkt auf die Sparren aufgebracht wird. Dies stellt aus feuchtetechnischer Sicht die eher ungünstigere Situation dar.

Da beim Altbaubestand häufig der Dachaufbau nicht bekannt ist, wurde zusätzlich eine Variante ohne Dampfbremse und als Extremfall statt der relativ diffusionsdichten OSB-Platte eine diffusionsoffene Beplankung mit Gipskarton und ohne Dampfbremse. Als worst-case wird eine Variante mit Vollsparrendämmung (15 cm Mineralfaserdämmung) betrachtet, auch wenn bei diesem Beispiel die durch die Aufdachdämmung erzielte Reduktion des Wärmedurchgangskoeffizienten in keinem sinnvollen Verhältnis zum Aufwand steht. Allerdings kann es dann Sinn machen, wenn die Unterdeckung ersetzt werden muss und stattdessen als Unterdeckung die Typhaplatte eingesetzt wird. Bei diesen Berechnungen wird von einer normalen Dachneigung von 25 Grad ausgegangen, aber auch zusätzlich beispielhaft eine stärkere Dachneigung von 50 Grad einbezogen.

Zusätzlich zu den hier im Vordergrund stehenden Untersuchungen zum Einsatz der Dämmstoffplatte als Aufdachdämmung werden auch Anwendungsbeispiele als Innendämmung sowie beispielhaft eine energetische Sanierung eines Fachwerkgebäudes berechnet.

### **8.1.3 Nutzungsbedingtes Innenklima und Übergangskoeffizienten.**

Bei allen Berechnungen wird von einer Wohnraumnutzung mit normaler Feuchtelast ausgegangen. Berechnungen zum Einfluss einer hohen Feuchtelast machen im Dachbereich wenig Sinn und der Ansatz einer niedrigen Feuchtelast, wie sie zum Beispiel bei Büronutzung gegeben ist, führt stets zu unkritischerem Verhalten, birgt aber immer die Gefahr, dass eine damit begründete Konstruktion bei einer späteren Umnutzung problematisch werden kann.

Es wird von einem Dach mit Ziegeleindeckung mit normal hinterlüfteter Eindeckung ausgegangen. Gemäß den in [26] beschriebenen Untersuchungen ergeben sich bei einem üblichen Steildach in Abhängigkeit der Stelle des Daches unterschiedliche Temperaturverläufe. Die höchsten Temperaturen ergeben sich in Firstnähe und die niedrigsten im Bereich der Traufe. Diese Temperaturverläufe kann man mit guter Übereinstimmung zur Messung unter Ansatz eines effektiven Übergangsparameters rechnerisch nachvollziehen. Bei den folgenden Berechnungen wird, um mit dem Ergebnis immer auf der sicheren Seite zu liegen, der kältere Dachbereich nahe der Traufe betrachtet. Dies bedeutet, dass hierbei mit einem konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten von  $19 \text{ W/m}^2\text{K}$  und für die Ziegeleindeckung mit einer reduzierten kurzwelligen Absorptionszahl von 0,53 gerechnet wird.

Bei den zusätzlichen Berechnungen zum Einsatz als Innendämmung bzw. Außendämmung werden Standardübergangsbedingungen angesetzt.

## 8.2 Ergebnisse der Berechnungen

Im Folgenden werden die Berechnungsergebnisse für die jeweiligen Konstruktionen dargestellt und erläutert. Dabei werden zunächst die Ergebnisse der beschriebenen Dachaufbauten mit den angesetzten Randbedingungen gezeigt. Im Anschluss daran wird zur Überprüfung der Fehlertoleranz untersucht, wie sich ein zusätzlicher winterlicher Feuchteintrag durch Undichtheiten auswirkt. Zum Schluss werden die zusätzlichen Ergebnisse für von der Aufdachdämmung abweichende Nutzungen aufgeführt.

### 8.2.1 Einsatz als Aufdachdämmung in der BRD

#### 8.2.1.1 Fehlerfreie Ausführung

In Bild 118 ist für die Standard-Variante des Dachaufbaus mit einer energetischen Sanierung durch eine 6 cm dicke Typhaplatte der implementierte Aufbau dargestellt. Als Monitorposition ist der aus feuchtetechnischer Sicht als kritischste Stelle eingestufte äußere Bereich der Aufdachdämmung gewählt worden.

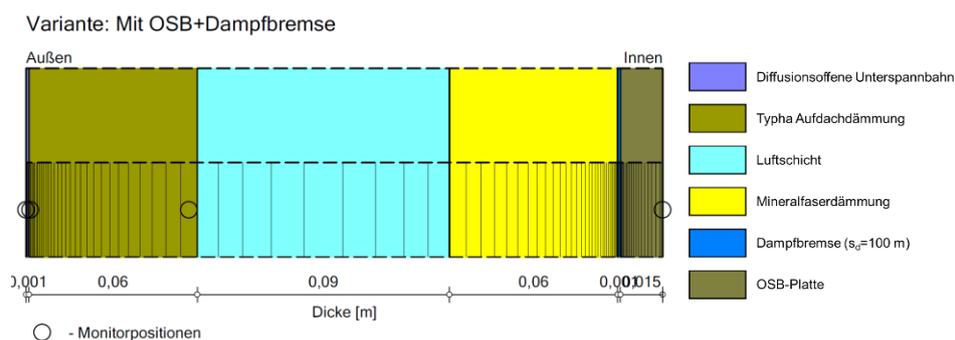


Bild 118:  
Für die Berechnungen implementierter Dachaufbau.

Bild 119 zeigt den zeitlichen Verlauf des Gesamtwassergehaltes der Dachkonstruktion. Man erkennt, dass der Gesamtwassergehalt, ausgehend von dem angenommenen Anfangswassergehalt entsprechend 80 % Ausgleichsfeuchte, zunächst abnimmt und auf niedrigerem Niveau typische jahreszeitlich bedingte Verläufe annimmt. Es stellt sich schnell ein eingeschwungener Zustand mit immer wiederkehrenden Verläufen ein.

Der in Bild 120 dargestellte Verlauf des Wassergehaltes in der Aufdachdämmung zeigt, dass dort der Wassergehalt anfänglich durch Umverteilungsprozesse etwas zunimmt, aber dann ebenfalls abnimmt und in einen eingeschwungenen Zustand auf niedrigem Niveau einschwingt. Bei diesem niedrigen Wassergehalt ist kein relevanter Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit der Dämmung gegeben.

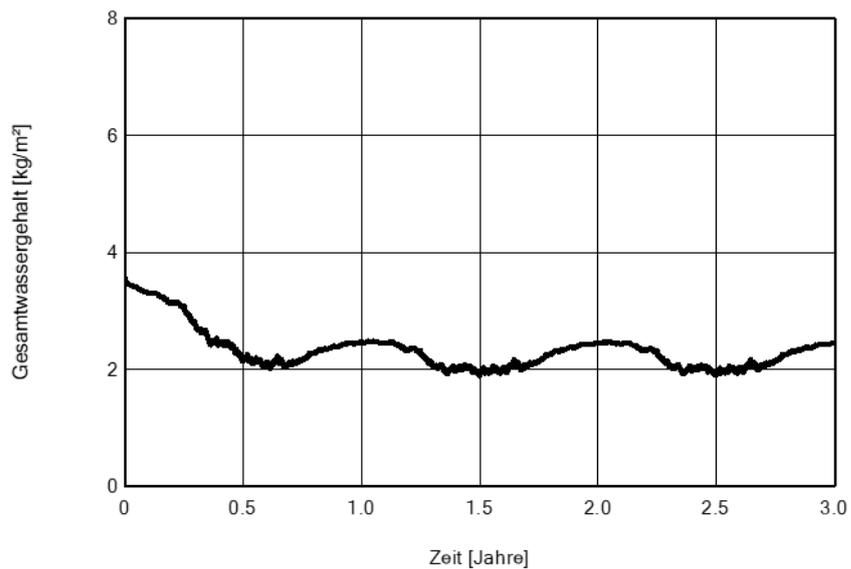


Bild 119:  
Zeitlicher Verlauf des berechneten Gesamtwassergehaltes für die Dachkonstruktion mit 6 cm Typha-Aufdachdämmung, innenseitiger Beplankung mit OSB-Platte und Dampfbremse dahinter, Standort Hof.

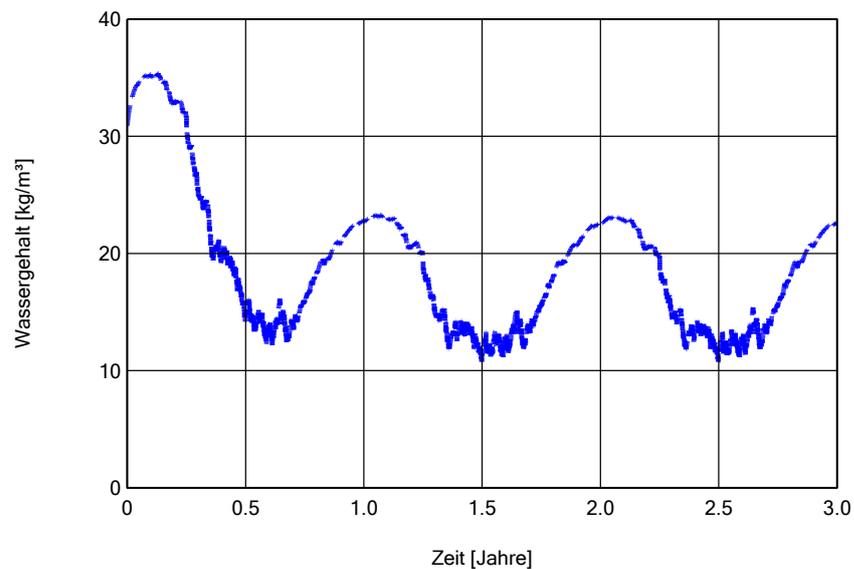


Bild 120:  
Zeitlicher Verlauf des berechneten Wassergehaltes der Aufdachdämmung aus Typha für die Dachkonstruktion mit 6 cm Typha-Aufdachdämmung, innenseitiger Beplankung mit OSB-Platte und Dampfbremse dahinter, Standort Hof.

Betrachtet man die kritischste Stelle im Dachaufbau, also den unteren Bereich der Aufdachdämmung, ergeben sich an dieser Monitorposition die in Bild 121

dargestellte Verläufe der relativen Feuchte und der Temperatur. Man erkennt, dass hier zeitweise durchaus Feuchten von deutlich oberhalb 80 % vorkommen, allerdings bei niedrigen Temperaturen. Um zu beurteilen, ob hier Schimmelpilzwachstumsgefahr gegeben ist, werden diese Randbedingungen in WUFI®-Bio eingelesen

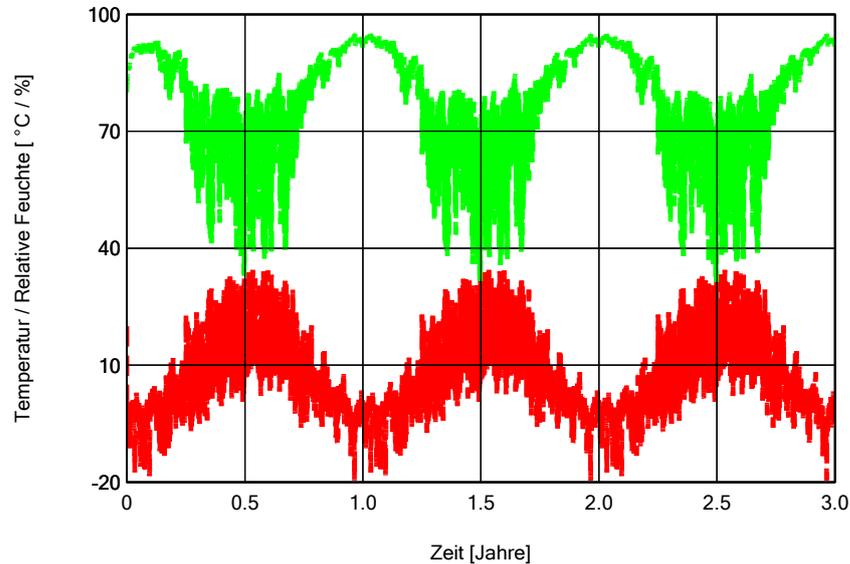


Bild 121:

Zeitlicher Verlauf der berechneten Temperatur (rote Linie) und relativen Luftfeuchte (grüne Linie) im oberen Bereich der Aufdachdämmung aus Typha für die Dachkonstruktion mit 6 cm Typha-Aufdachdämmung, innenseitiger Beplankung mit OSB-Platte und Dampfbremse dahinter, Standort Hof.

In Bild 122 ist das Ergebnis der Berechnung mit WUFI®-Bio unter Verwendung der berechneten Randbedingung, wie sie in Bild 121 dargestellt sind, abgebildet. Da die Monitorposition sehr weit außen liegt, variiert der temperaturabhängige Grenzwassergehalt (rote Linie im oberen Diagramm) sehr stark. Der berechnete Wassergehalt der Modellspore (blaue Linie) liegt die meiste Zeit unter dem Grenzwassergehalt, ab dem eine Keimung abgeschlossen ist und das Schimmelpilzwachstum beginnen kann, schneidet diesen aber immer wieder. Im unteren Diagramm ist der berechnete Verlauf des Mould-Indexes dargestellt. Dieser liegt mit einem Maximum von ca. 0,045 weit unterhalb eines kritischen Wertes.

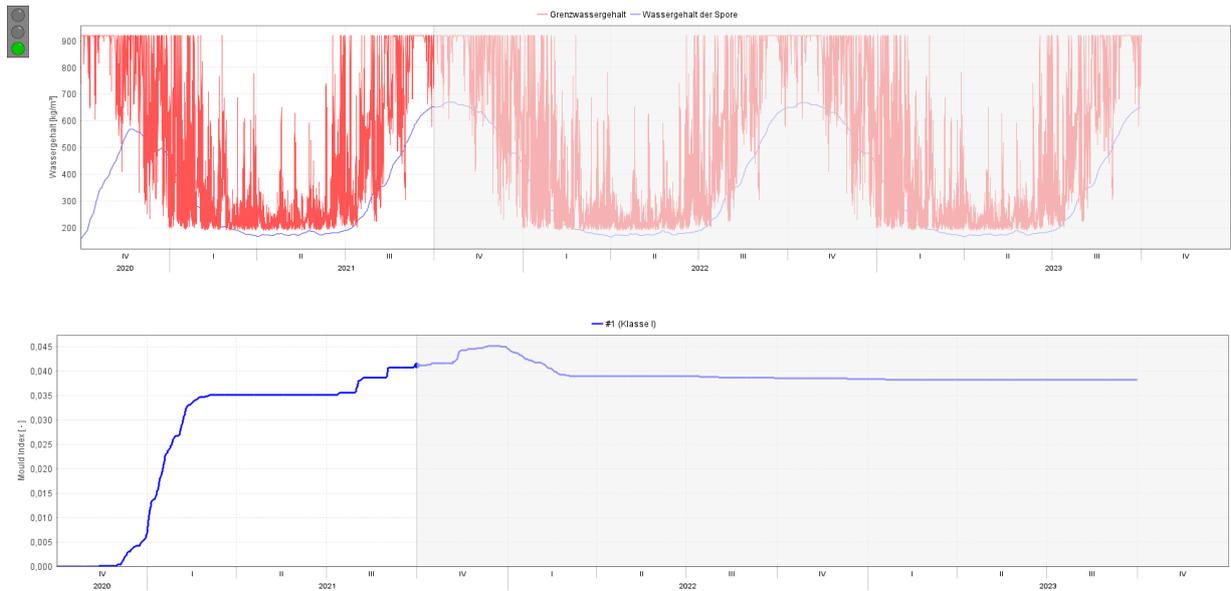


Bild 122:

Berechnungsergebnis von WUFI®-Bio für die Dachkonstruktion mit 6 cm Typha-Aufdachdämmung, innenseitiger Beplankung mit OSB-Platte und Dampfbremse dahinter, Standort Hof, unter Verwendung der berechneten Randbedingung im äußeren Bereich der Typhaplatte. Das obere Bild zeigt den Verlauf des Grenzwassergehaltes (rote Linie) und des Wassergehaltes der Modellspore (blaue Linie). Im unteren Diagramm ist der berechnete Verlauf des Mould-Indexes dargestellt.

Bild 123 zeigt den zeitlichen Verlauf des Gesamtwassergehaltes der Dachkonstruktion mit OSB als Innenbeplankung aber ohne Dampfbremse. Der Gesamtverlauf ist sehr ähnlich wie bei der Variante mit Dampfbremse. Es ergeben sich aber etwas höhere Unterschiede zwischen den Jahreszeiten, weil der maximale Gesamtwassergehalt im Winter etwas höher liegt.

Auch der in Bild 124 dargestellte Verlauf des Wassergehaltes in der Aufdachdämmung für die Variante ohne Dampfbremse zeigt ein sehr ähnliches Verhalten. Auch hier sind die jahreszeitlichen Schwankungen etwas größer, was sich vor allem in einem höheren maximalen Wassergehalt im Winter zeigt. Dieser liegt statt bei ca. 23 kg/m<sup>3</sup> nun bei ca. 30 kg/m<sup>3</sup>. Aber auch bei diesem Wassergehalt ist kein relevanter Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit der Dämmung gegeben.

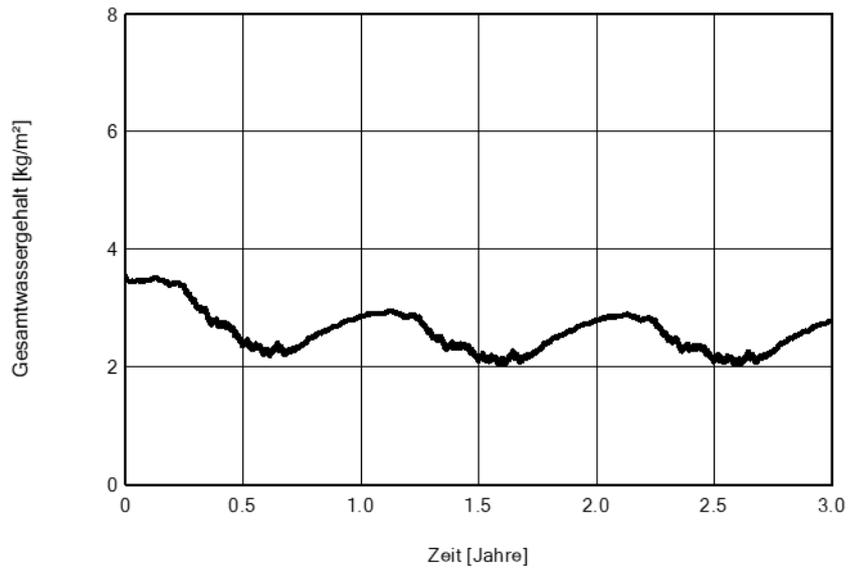


Bild 123.  
 Zeitlicher Verlauf des berechneten Gesamtwassergehaltes für die Dachkonstruktion mit 6 cm Typha-Aufdachdämmung, innenseitiger Beplankung mit OSB-Platte ohne Dampfbremse dahinter, Standort Hof.

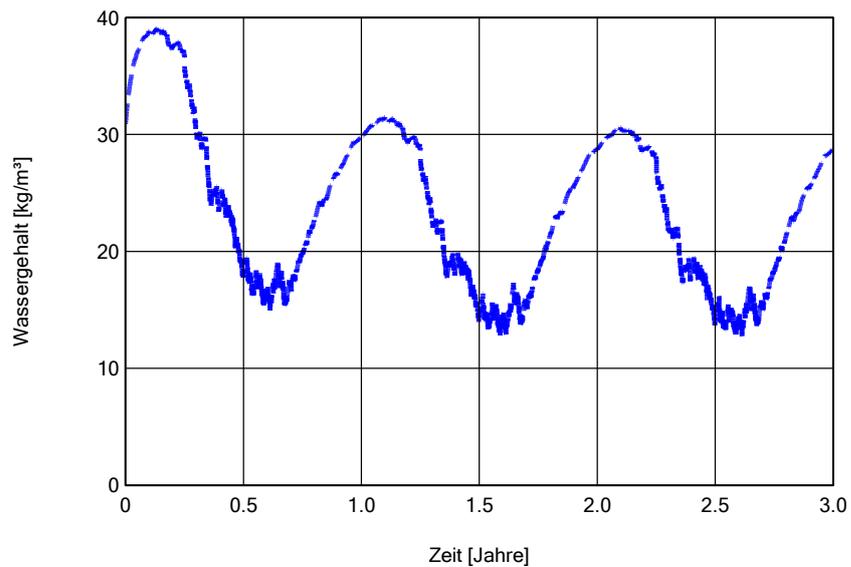


Bild 124:  
 Zeitlicher Verlauf des berechneten Wassergehaltes der Aufdachdämmung aus Typha für die Dachkonstruktion mit 6 cm Typha-Aufdachdämmung, innenseitiger Beplankung mit OSB-Platte ohne Dampfbremse dahinter, Standort Hof.

Betrachtet man hierfür die kritischste Stelle im Dachaufbau, ergibt sich an dieser Monitorposition der in Bild 125 dargestellte Verlauf der relativen Feuchte und der Temperatur. Die Verläufe ähneln auch hier stark denen der Variante

mit Dampfbremse. Allerdings ergeben sich etwas höhere maximale Luftfeuchten bei dieser Variante. Da bereits eine geringfügige Erhöhung der Feuchte, darüber entscheiden kann, ob Schimmelpilzwachstum auftritt oder nicht, wird auch hier das Risiko mit WUFI®-Bio beurteilt

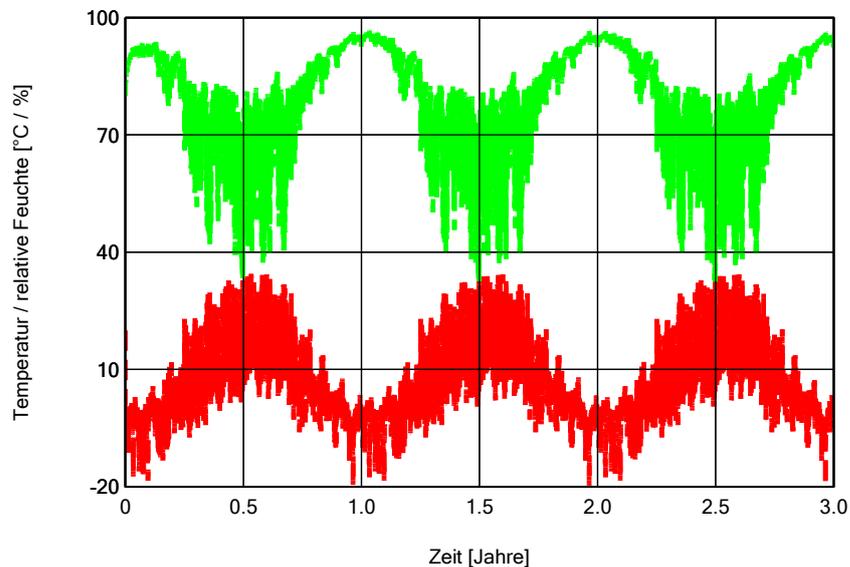


Bild 125:

Zeitlicher Verlauf der berechneten Temperatur (rote Linie) und relativen Luftfeuchte (grüne Linie) im oberen Bereich der Aufdachdämmung aus Typha für die Dachkonstruktion mit 6 cm Typha-Aufdachdämmung, innenseitiger Beplankung mit OSB-Platte ohne Dampfbremse dahinter, Standort Hof.

In Bild 126 ist das Ergebnis der Berechnung mit WUFI®-Bio unter Verwendung der berechneten Randbedingung, wie sie in Bild 125 dargestellt sind, abgebildet. Im Vergleich zur Variante mit Dampfbremse ergibt sich nur ein geringer Unterschied. Der Mould-Index steigt bei dieser Variante bis auf den Wert von 0,62, also auch hierbei auf einen völlig unkritischen Wert.

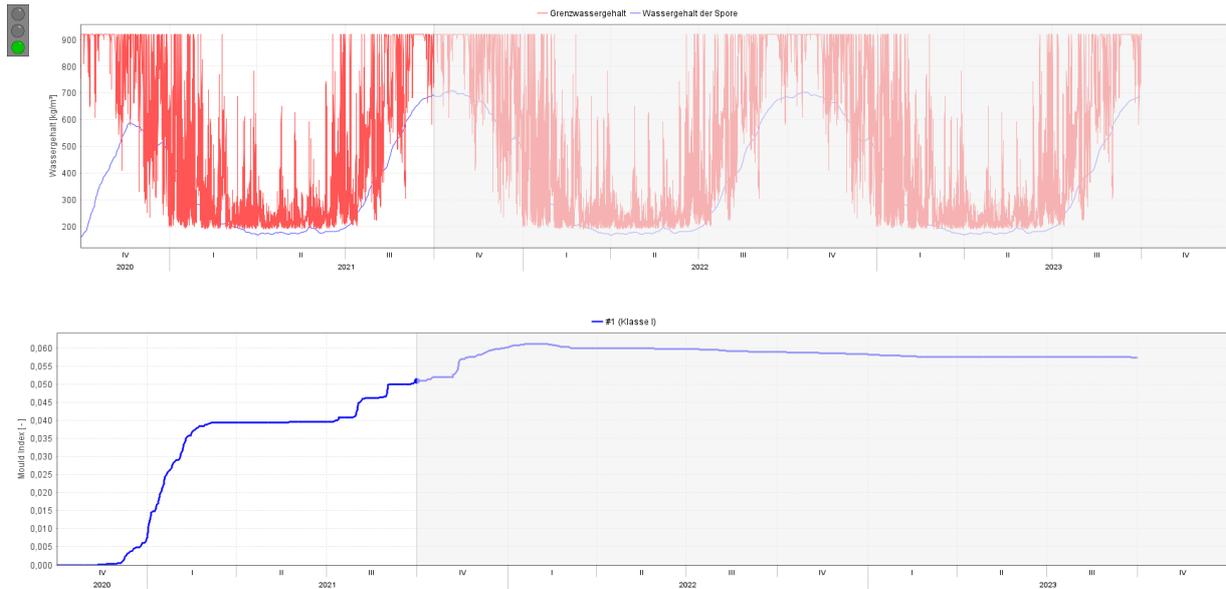


Bild 126:

Berechnungsergebnis von WUFI®-Bio für die Dachkonstruktion mit 6 cm Typha-Aufdachdämmung, innenseitiger Beplankung mit OSB-Platte ohne Dampfbremse dahinter, Standort Hof, unter Verwendung der berechneten Randbedingung im äußeren Bereich der Typhaplatte. Das obere Bild zeigt den Verlauf des Grenzwassergehaltes (rote Linie) und des Wassergehaltes der Modellspore (blaue Linie). Im unteren Diagramm ist der berechnete Verlauf des Mould-Indexes dargestellt.

Für die beiden anderen Aufbauvarianten werden im Folgenden nur die Maximalwerte des Gesamtwassergehaltes, des Wassergehaltes in der Aufdachdämmung aus Typha und der maximalen relativen Feuchte an der außenseitigen Monitorposition in der Typhaplatte, jeweils im eingeschwungenen Zustand) in Tabelle 41 aufgelistet. In der letzten Spalte dieser Tabelle ist als entscheidende Größe der Mould-Index angegeben. Im Vergleich zu den beiden ersten, auch als Ergebnisgrafiken dargestellten, Varianten führt eine reine raumseitige Beplankung mit doppellagiger Gipskartonplatte (Variante 3) zu einer weiteren Erhöhung der Maximalwerte des Gesamtwassergehaltes, des Wassergehaltes in der Aufdachdämmung sowie der maximalen relativen Feuchte an der außenseitigen Monitorposition. Die Folge ist auch hier eine leichte Erhöhung des Mould-Indexes, wobei auch dieser weit im unkritischen Bereich bleibt. Variante 4, ebenfalls mit doppellagiger Gipskartonbeplankung, unterscheidet sich dadurch, dass eine 15 cm dicke Vollsparrendämmung mit Mineralwolle vorliegt. Die Folge ist ein weiterer Anstieg der Maximalwerte. Der Mould-Index fällt aber etwas niedriger aus. Dies ist wahrscheinlich darin begründet, dass das Temperaturniveau der Typhaplatte absinkt und damit trotz höherer Feuchte die Wachstumsbedingungen ungünstiger sind.

Tabelle 41:

Berechnete Maximalwerte des Gesamtwassergehaltes, des Wassergehaltes in der Aufdachdämmung aus Typha sowie der maximalen relativen Feuchte an der außenseitigen Monitorposition in der Typhaplatte für den Standort Hof, jeweils im eingeschwungenen Zustand). In der letzten Spalte dieser Tabelle ist als entscheidende Größe der Mould-Index angegeben.

Var.	Dachaufbau	Max. Gesamtwassergehalt [kg/m <sup>2</sup> ]	Max. Wassergehalt Typha [kg/m <sup>3</sup> ]	Max. Feuchte Monitorpos. [%].	Max. Mould-Index [-]	
Hof	1	Standardaufbau	2,47	23,0	93,8	0,045
	2	Ohne Dampfbremse	2,90	30,6	95,5	0,062
	3	Raumseitig nur GK	3,43	51,3	96,1	0,085
	4	Vollsparrendämmung	4,2	64,4	97,2	0,077

Die für den mittleren deutschen Klimastandort Würzburg berechneten Ergebnisse sind in Tabelle 42 aufgelistet. Es ergeben sich recht ähnliche Maximalwerte für den Gesamtwassergehalt, den Wassergehalt in der Aufsparren-Dämmung und die relative Luftfeuchte beim Monitorpunkt. Allerdings liegen die berechneten Mould-Indizes etwas höher als für Hof. Dies ist wahrscheinlich den höheren Temperaturen des Standorts Würzburg geschuldet.

Tabelle 42:

Berechnete Maximalwerte des Gesamtwassergehaltes, des Wassergehaltes in der Aufdachdämmung aus Typha sowie der maximalen relativen Feuchte an der außenseitigen Monitorposition in der Typhaplatte für den Standort Würzburg, jeweils im eingeschwungenen Zustand). In der letzten Spalte dieser Tabelle ist als entscheidende Größe der Mould-Index angegeben.

Var.	Dachaufbau	Max. Gesamtwassergehalt [kg/m <sup>2</sup> ]	Max. Wassergehalt Typha [kg/m <sup>3</sup> ]	Max. Feuchte Monitorpos. [%].	Max. Mould-Index [-]	
Würzburg	5	Standardaufbau	2,52	26,6	92,6	0,063
	6	Ohne Dampfbremse	2,90	30,5	93,8	0,095
	7	Raumseitig nur GK	2,95	47,0	94,3	0,152
	8	Vollsparrendämmung	3,66	55,4	94,1	0,108

Die für den äußerst warmen deutschen Klimastandort Freiburg berechneten Ergebnisse sind in Tabelle 43 aufgelistet. Es ergeben sich recht ähnliche Maximalwerte für den Gesamtwassergehalt, den Wassergehalt in der Aufsparren-Dämmung und die relative Luftfeuchte beim Monitorpunkt. Allerdings liegen die berechneten Mould-Indizes von allen drei Standorten hier am niedrigsten. Dies ist wahrscheinlich in den hohen Temperaturen bei gleichzeitig niedrigen Außenluftfeuchten des Standorts Freiburg begründet.

Tabelle 43:

Berechnete Maximalwerte des Gesamtwassergehaltes, des Wassergehaltes in der Aufdachdämmung aus Typha sowie der maximalen relativen Feuchte an der außenseitigen Monitorposition in der Typhaplatte für den Standort Freiburg, jeweils im eingeschwungenen Zustand). In der letzten Spalte dieser Tabelle ist als entscheidende Größe der Mould-Index angegeben.

Var.	Dachaufbau	Max. Gesamtwassergehalt [kg/m <sup>2</sup> ]	Max. Wassergehalt Typha [kg/m <sup>3</sup> ]	Max. Feuchte Monitorpos. [%].	Max. Mould-Index [-]	
Freiburg	9	Standardaufbau	2,40	21,3	90,5	0,032
	10	Ohne Dampfbremse	2,75	27,6	91,9	0,045
	11	Raumseitig nur GK	2,87	42,0	92,7	0,072
	12	Vollsparrendämmung	3,40	49,7	91,8	0,057

### 8.2.1.2 Betrachtung der Fehlertoleranz

Um die Fehlertoleranz der Dachaufbauten mit Typha-Aufdachdämmung zu untersuchen, wurde rechnerisch ein Feuchteeintrag von 1000 g, verteilt auf die drei Wintermonate Dezember, Januar und Februar, angenommen. Das ist die vierfache Menge dessen, was in der DIN 68800-2 [27] als zusätzliche Sicherheit bei Berechnungen gefordert wird. In Tabelle 41 sind die damit erhaltenen Ergebnisse für alle drei Standorte aufgelistet. Durch Vergleich mit den in

Tabelle 41 bis Tabelle 43 dargestellten Ergebnissen kann man erkennen, dass, wie zu erwarten, der zusätzliche massive Feuchteeintrag zu höheren Maximalwerten der Wassergehalte und der maximalen Luftfeuchte führt. Trotzdem ergeben sich absolut unkritische Beurteilungen hinsichtlich des Risikos von Schimmelpilzwachstum, mit einem Maximalwert von 0,135, der weit im sicheren Bereich liegt. Es dürfte in der hohen Diffusionsoffenheit der Typha-Aufsparren-Dämmung begründet sein, dass sich trotz hohem zusätzlich angesetzttem Feuchteeintrag ein völlig unkritisches Verhalten ergibt.

Tabelle 44:

Berechnete Maximalwerte des Gesamtwassergehaltes, des Wassergehaltes in der Aufdachdämmung aus Typha sowie der maximalen relativen Feuchte an der außenseitigen Monitorposition in der Typhaplatte für alle drei Standorte, jeweils im eingeschwungenen Zustand). In der letzten Spalte dieser Tabelle ist als entscheidende Größe der Mould-Index angegeben.

Var.	Dachaufbau	Max. Gesamtwassergehalt [kg/m <sup>2</sup> ]	Max. Wassergehalt Typha [kg/m <sup>3</sup> ]	Max. Feuchte Monitorpos. [%].	Max. Mould-Index [-]	
<b>Hof</b>	13	Standardaufbau	3,43	36,1	94,3	0,053
	14	Ohne Dampfbremse	3,86	43,3	95,6	0,072
	15	Raumseitig nur GK	4,00	57,3	96,6	0,090
	16	Vollsparrendämmung	5,07	77,3	95,9	0,083
<b>Würzburg</b>	17	Standardaufbau	3,42	36,2	92,7	0,072
	18	Ohne Dampfbremse	3,77	41,2	93,9	0,105
	19	Raumseitig nur GK	3,72	52,4	94,8	0,135
	20	Vollsparrendämmung	4,37	65,9	93,6	0,113
<b>Freiburg</b>	21	Standardaufbau	3,23	34,5	91,0	0,036
	22	Ohne Dampfbremse	3,54	37,3	91,7	0,055
	23	Raumseitig nur GK	3,39	47,8	92,7	0,072
	24	Vollsparrendämmung	3,93	59,1	92,5	0,057
<b>Würzb.</b>	25	Wie Variante 19 mit 50° Dachneigung	3,76	52,9	94,4	0,167

Bei allen 24 Varianten wurde von einer üblichen Dachneigung von 25 Grad ausgegangen. Da gerade auf der betrachteten Nordseite eine höhere Steilheit des Daches die solare Einstrahlung reduziert, wurde zusätzlich eine Variante mit 50 Grad Dachneigung in die Berechnungen einbezogen. Zugrunde gelegt wurde dazu die ungünstigste Variante 19 mit Würzburg als Standort und einer Innenbeplankung aus Gipskarton ohne Dampfbremse. Auch hierbei wird ein hoher zusätzlicher Feuchteeintrag von 1000 g auf die drei Wintermonate

verteilt einbezogen. Man erkennt anhand der Werte in Tabelle 44, dass eine hohe Dachneigung die Feuchtesituation und die damit verbundene Schimmelpilzwachstumsgefahr hier nur geringfügig nachteilig verändert.

Neben einer potentiellen Schimmelpilzproblematik ist für die Beurteilung der Dauerhaftigkeit bzw. Funktionsfähigkeit eines Dachaufbaus vor allem die Belastung des Dachstuhls von Bedeutung. Eine Beurteilung, ob es bei den Dachsparren zu einer Feuchtebelastung mit dem Risiko des Wachstums Holz zerstörender Organismen kommt, ist rechnerisch nur durch eine zweidimensionale hygrothermische Simulation möglich. Auch hierfür wird als Basis die Variante 19 zugrunde gelegt. Bild 127 zeigt den implementierten Aufbau, wobei als Symmetriegrenzen das halbe Gefach zwischen den Sparren und auf der rechten Seite der halbe Sparren angesetzt wurde. Die Beurteilung findet anhand des zeitlichen Verlaufs des Gesamtwassergehaltes des Sparrens sowie unter Berücksichtigung der in Bild 127 mit eingetragenen nummerierten Bereiche des Holzsparrens statt.

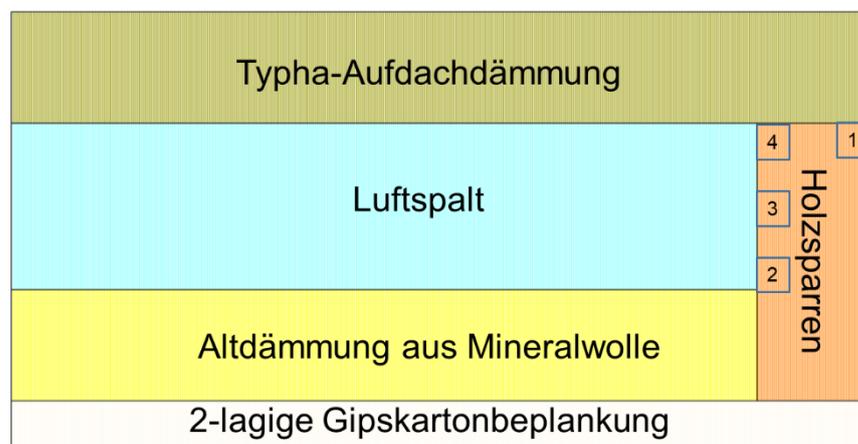


Bild 127:

Für die zweidimensionale Berechnung implementierter Dachaufbau. Die Stellen, die gesondert betrachtet werden, sind mit Nummer eingezeichnet.

Bild 128 zeigt den Verlaufs des Gesamtwassergehaltes des Sparrens. Es ist zu erkennen, dass der massebezogene Gesamtwassergehalt, ausgehend von der als Startbedingung angenommenen Ausgleichsfeuchte entsprechend 80 %, abnimmt und mit geringen jahreszeitlichen Schwankungen bei um die 10 Masse-% verläuft.

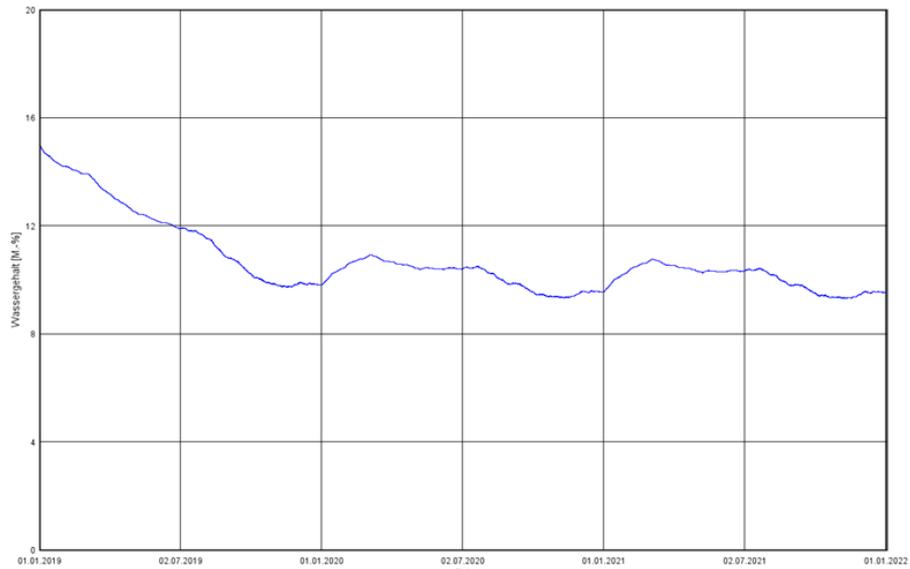


Bild 128:  
Verlauf des Gesamtwassergehaltes des Sparrens.

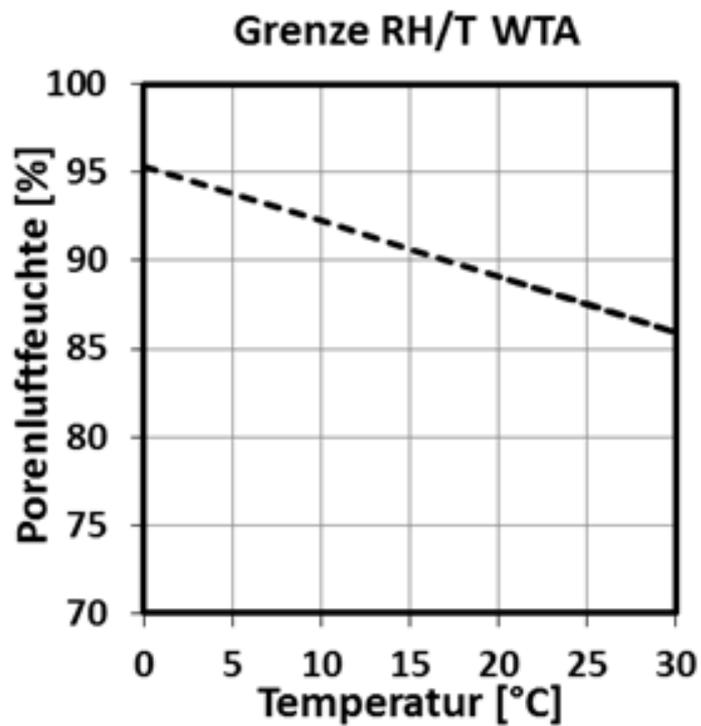


Bild 129:  
Grenzkurve der rel. Porenlufffeuchte für die maßgebende 10 mm Schicht im Holz, die im Tagesmittel nicht überschritten werden darf [28].

Im Rahmen der WTA-Arbeitsgruppe „Hygrothermische Bemessung von Holzbauteilen“ wurde ein neues WTA-Merkblatt erarbeitet, das eine Richtlinie für die Bewertung von holzerstörenden Pilzen beinhaltet. Hierin wird festgelegt, dass bei Massivholzbauteilen die relative Porenlufffeuchte im Holz 95 % bei 0

°C und 86 % bei 30 °C in der maßgebenden 10 mm dicken Schicht im Tagesmittel nicht überschritten werden darf [28]. Bild 129 zeigt die festgelegte Grenzkurve der Porenluftfeuchte und der Temperatur im Holz, die im Tagesmittel nicht überschritten werden darf.

Da dieser Ansatz nach WTA direkt als Ausgabemöglichkeit in WUFI-2D implementiert ist, stellt dies die einfachste Möglichkeit dar, um zu beurteilen, ob die Gefahr des Wachstums Holz zerstörender Organismen gegeben ist. Solange die stündlichen Zustandspunkte des Datenpaars Temperatur und sogenannter Porenluftfeuchte unterhalb der Grenzkurve, die in den folgenden Bildern als rote Kurve eingezeichnet ist, nicht überschreiten, besteht diesbezüglich kein Risiko. Nur bei Überschreitung kann es erforderlich werden, die Situation genauer zu prüfen.

Bild 130 zeigt für die Position 1 in Bild 127, also für die außenseitige Mitte des Sparrens das Ergebnis. Farblich eingezeichnet sind die Zustandspunkte des ausgewählten Bereichs, wobei diese, um den zeitlichen Verlauf beurteilen zu können, ihre Farbe von Hellgrün bis ins Schwarze ändern. Man erkennt, dass sich die Zustände, ausgehend vom Anfangszustand mit 80% rel. Feuchte bei 20°C tendenziell hin zu deutlich niedrigeren Feuchten ändern, die im Wesentlichen um etwas über bis deutlich unter 60 %rel. Feuchte liegen. Deutlich mehr variiert die Temperatur dieser Stelle, die von ca. 7,5 °C bis fast 28 °C reicht. Alle Punkte liegen weit unterhalb der Grenzlinie nach WTA.

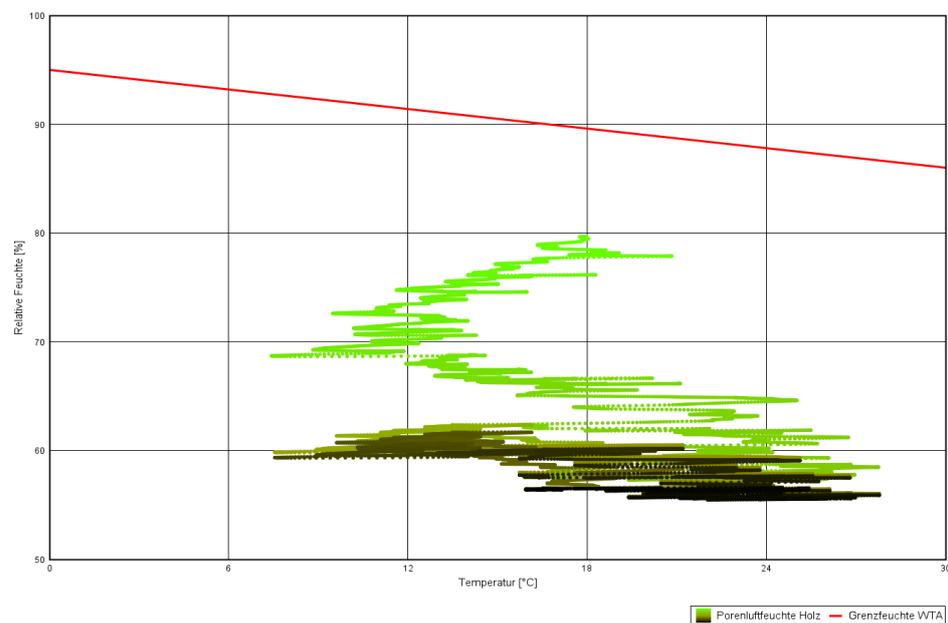


Bild 130:  
Verlauf der stündlichen Zustandspunkte im Vergleich zur Grenzlinie nach WTA für die in Bild 127 eingezeichnete Position 1 der Konstruktion.

Für Position 2 ist die Situation in Bild 131 dargestellt. Zeitweise ergeben sich merklich höhere Feuchten, die aber immer noch nicht einmal den unkritischen Anfangszustand bei 80% rel. Feuchte bei 20°C erreichen.

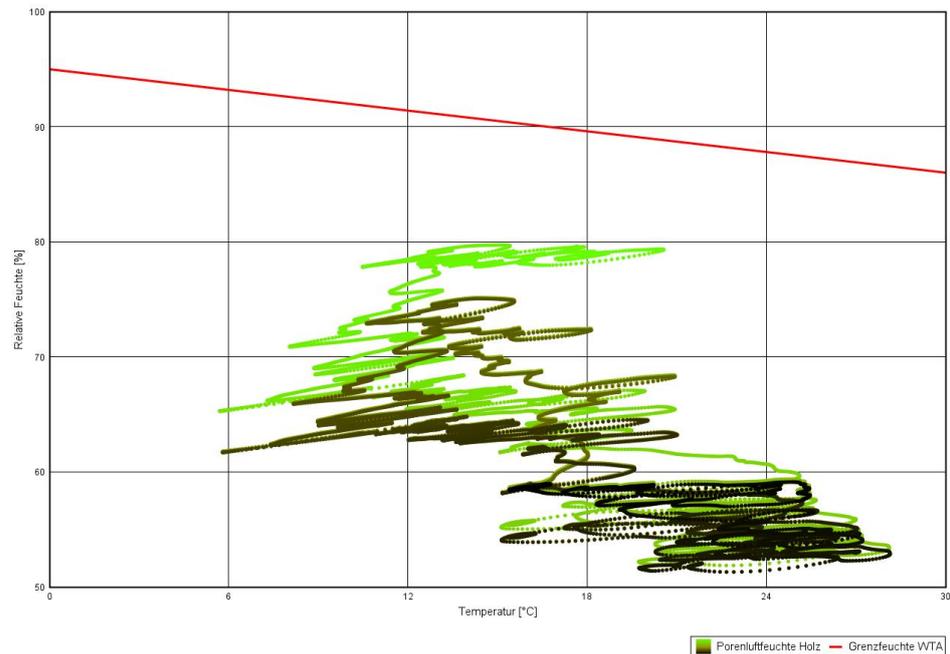


Bild 131:

Verlauf der stündlichen Zustandspunkte im Vergleich zur Grenzlinie nach WTA für die in Bild 127 eingezeichnete Position 2 der Konstruktion.

An Position 3, also auf mittlerer Höhe des Sparrens, ergibt sich nahezu das gleiche Bild wie an Position 2.

Man erkennt aus Bild 133 deutlich, dass Position 4 die kritischste Stelle darstellt. Es ergeben sich an dieser Stelle deutlich höhere Feuchten, die anfänglich auch mal 90 % übersteigen. Langfristig werden aber nur immer wieder knapp über 80 % erreicht, eine in Bezug auf Holz zerstörende Organismen völlig unkritische Situation.

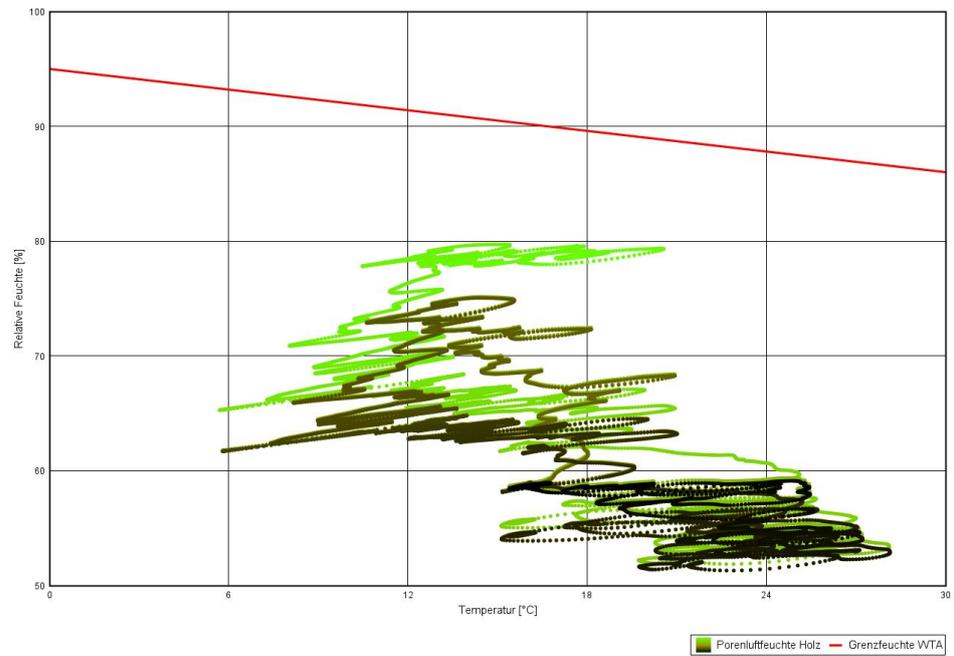


Bild 132:  
Verlauf der stündlichen Zustandspunkte im Vergleich zur Grenzlinie nach WTA für die in Bild 127 eingezeichnete Position 3 der Konstruktion.

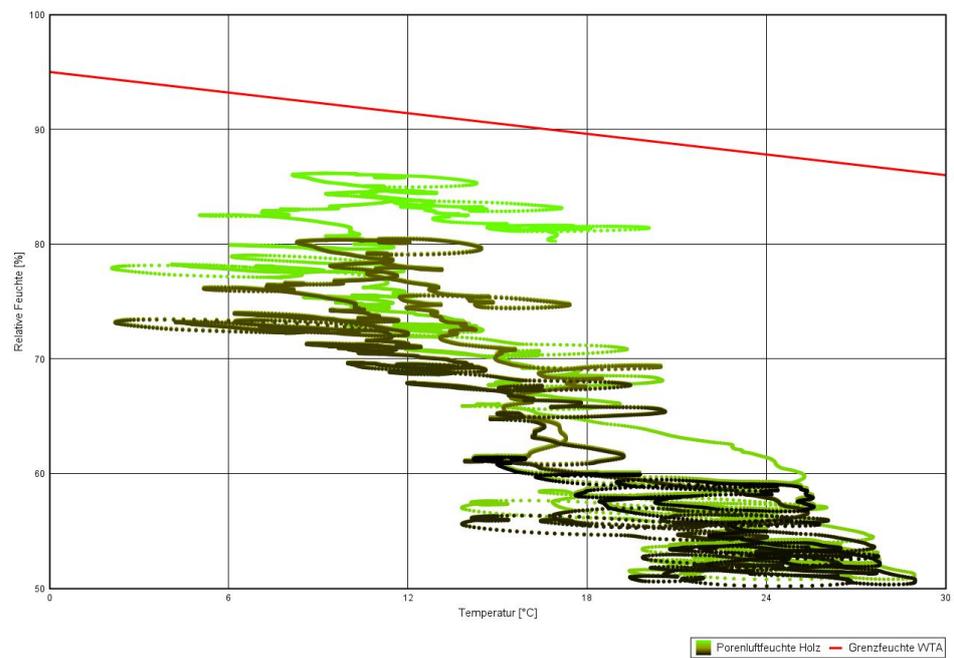


Bild 133: Verlauf der stündlichen Zustandspunkte im Vergleich zur Grenzlinie nach WTA für die in Bild 127 eingezeichnete Position 4 der Konstruktion.

## 8.2.2 Einsatz als Aufdachdämmung außerhalb der BRD

In Tabelle 45 sind die Ergebnisse für einen besonders kalten Standort, Östersund in Schweden, aufgelistet. Dabei wurde bei allen Varianten, auch bei den anderen Standorten außerhalb der BRD, der zusätzliche Feuchteintrag von 1000 g verteilt auf die drei Wintermonate zugrunde gelegt. Auch an diesem Standort ergeben sich völlig unkritische Bedingungen

Tabelle 45:

Berechnete Maximalwerte des Gesamtwassergehaltes, des Wassergehaltes in der Aufdachdämmung aus Typha sowie der maximalen relativen Feuchte an der außenseitigen Monitorposition in der Typhaplatte für den Standort Östersund, jeweils im eingeschwungenen Zustand). In der letzten Spalte dieser Tabelle ist als entscheidende Größe der Mould-Index angegeben.

Var.	Dachaufbau	Max. Gesamtwassergehalt [kg/m <sup>2</sup> ]	Max. Wassergehalt Typha [kg/m <sup>3</sup> ]	Max. Feuchte Monitorpos. [%].	Max. Mould-Index [-]	
Östersund	26	Standardaufbau	3,18	33,4	91,8	0,020
	27	Ohne Dampfbremse	3,61	40,4	93,4	0,029
	28	Raumseitig nur GK	4,30	58,1	94,6	0,035
	29	Vollsparrendämmung	5,63	87,9	94,2	0,034

Noch unkritischer ergibt sich der Standort Malaga (siehe Tabelle 46). Hier wird für alle vier Varianten keinerlei Schimmelpilzwachstum prognostiziert.

Als weiterer Standort wurde Key West ausgewählt. Hier sind nicht nur die Außenklimabedingungen anders, sondern es wird, wie dort üblich, eine Klimaanlage eingesetzt. Diese sorgt nicht nur für einen über längere Perioden umgekehrten Temperaturgradienten, mit innen niedrigeren Temperaturen als außen. Auch für diesen Standort wurde der Feuchteintrag in die Dachkonstruktion von jährlich 1000 g angesetzt. Dies bedeutet auch, dass die Raumluft über die Klimaanlage entfeuchtet wird.

Tabelle 46:

Berechnete Maximalwerte des Gesamtwassergehaltes, des Wassergehaltes in der Aufdachdämmung aus Typha sowie der maximalen relativen Feuchte an der außenseitigen Monitorposition in der Typhaplatte für den Standort Malaga, jeweils im eingeschwungenen Zustand). In der letzten Spalte dieser Tabelle ist als entscheidende Größe der Mould-Index angegeben.

Var.	Dachaufbau	Max. Gesamtwassergehalt [kg/m <sup>2</sup> ]	Max. Wassergehalt Typha [kg/m <sup>3</sup> ]	Max. Feuchte Monitorpos. [%].	Max. Mould-Index [-]	
Malaga	30	Standardaufbau	3,18	33,4	91,8	0,020
	31	Ohne Dampfbremse	3,61	40,4	93,4	0,029
	32	Raumseitig nur GK	4,30	58,1	94,6	0,035
	33	Vollsparrendämmung	5,63	87,9	94,2	0,034

Tabelle 7 zeigt die Ergebnisse für diesen Standort. Durch den entgegengesetzten Temperaturgradienten liegt in der Typhaplatte die kritischste Stelle nicht mehr an der Außen- sondern an der Innenseite. In Tabelle 47 werden deshalb die maximalen Werte der Luftfeuchte und des Mould-Indexes für die innenseitige Monitorposition aufgelistet. Für die Konstruktion mit OSB-Beplankung und Dampfbremse dahinter ergibt sich maximal 86,3 % relativer Luftfeuchte zwar im Vergleich zu den in Tabelle 1 bis 5 niedrige Luftfeuchte, aufgrund der dort vorliegenden deutlich höheren Temperatur erhält man aber einen recht hohen Mould-Index von 2,40. Dies zeigt an, dass diese Konstruktion unter dortigen Klimarandbedingungen bedenklich werden kann. Betrachtet man Variante 31 ohne Dampfbremse, wird ersichtlich, was der Grund für dieses ungünstige Verhalten ist. Da über große Zeiträume der Temperaturgradient nach innen gerichtet ist, wirkt sich die Dampfbremse nachhaltig aus, weil der Dampftransport nach innen weitgehend unterbunden wird. Desto diffusions-offener die Innenbeplankung ist umso günstiger ist das Feuchteverhalten. Die Varianten mit innenseitigem Gipskarton ergeben einen Mould-Index von Null. Allerdings muss hier die Klimaanlage auch eine höhere Entfeuchtungsleistung bringen, wodurch der Energieaufwand etwas erhöht sein wird.

Tabelle 47:

Berechnete Maximalwerte des Gesamtwassergehaltes, des Wassergehaltes in der Aufdachdämmung aus Typha sowie der maximalen relativen Feuchte an der außenseitigen Monitorposition in der Typhaplatte für den Standort Key West, jeweils im eingeschwungenen Zustand) In der letzten Spalte dieser Tabelle ist als entscheidende Größe der Mould-Index angegeben.

Var.	Dachaufbau	Max. Gesamtwassergehalt [kg/m <sup>2</sup> ]	Max. Wassergehalt Typha [kg/m <sup>3</sup> ]	Max. Feuchte Monitorpos. [%].	Max. Mould-Index [-]	
Key West	34	Standardaufbau	3.60	34,5	86,3	2,40
	35	Ohne Dampfbremse	3,14	27,4	78,1	0,25
	36	Raumseitig nur GK	1,42	20,0	61	0
	37	Vollsparrendämmung	1,49	20,4	63,5	0

Um zu klären, ob unter den speziellen Randbedingungen von Key West mit dem Standardaufbau neben der Schimmelpilzgefahr an der Typhaplatte auch das Risiko der Ausbreitung von Holz zerstörenden Organismen am Sparren gegeben ist, wurde auch hierfür eine zweidimensionale Berechnung durchgeführt. Besonders gefährdet ist der untere Bereich des Sparrens im Materialdreieck OSB-Mineralwolle-Holzsparren (In Bild 127 linke untere Ecke des Sparrens). Bild 133 zeigt die Zustandspunkte dieser Stelle im Vergleich zur WTA-Grenzkurve. Man erkennt, dass an dieser Stelle relativ hohe Temperaturen von bis zu 34 °C auftreten. Die Zustandspunkte liegen hierbei teilweise oberhalb der Grenzkurve nach WTA. Um zu beurteilen, ob dies bedeutet, dass das Wachstum Holz zerstörender Organismen wahrscheinlich ist, wird das im Rahmen des über das PTJ geförderte Projekt „Energetisches Bewertungsverfahren für Bestandsgebäude mit Holzbalkendecken“ [29] entwickelte Softwaretool WUFI®-HzP eingesetzt, das ähnlich wie WUFI®-Bio aufgebaut ist, aber speziell für Holz zerstörende Organismen entwickelt wurde. Aus Bild 134 wird ersichtlich, dass im ersten Jahr die Grenzkurve deutlich überschritten wird, in den darauffolgenden Jahren aber nur geringfügig. Dies ist im ersten Jahr in einer Umverteilung der angesetzten Anfangsfeuchte begründet. Dies bedeutet, dass diesbezüglich die untersuchte Konstruktion gerade so funktionieren würde. Jeder zusätzliche Feuchteintrag durch Undichtheiten könnte aber fatale Folgen haben.

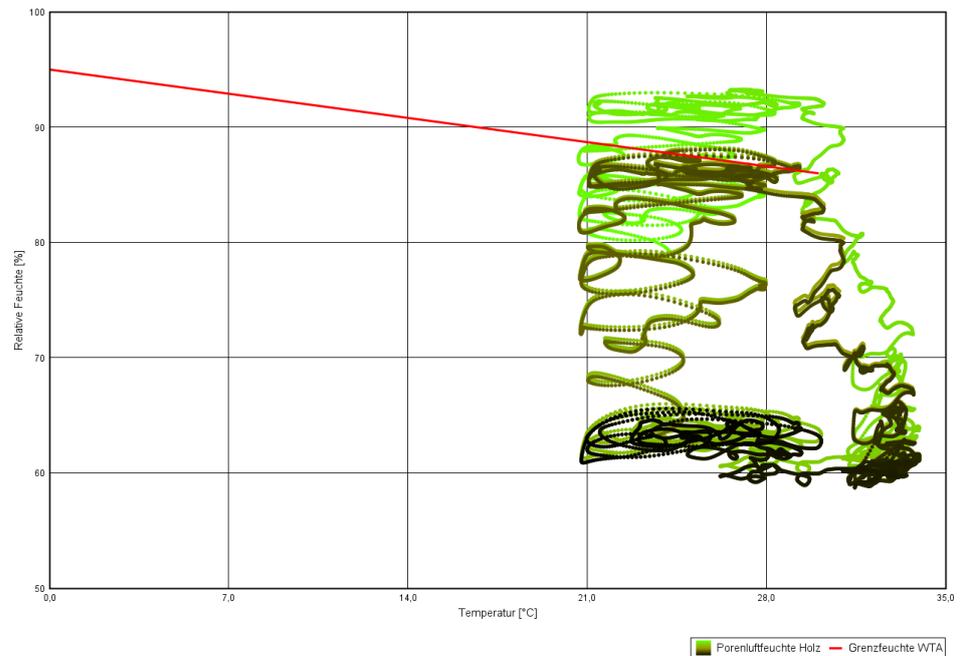


Bild 133:  
Verlauf der stündlichen Zustandspunkte im Vergleich zur Grenzlinie nach WTA für die linke untere Ecke des Sparrens in Bild 127.



Bild 134:  
Berechnungsergebnis von WUFI®-HzP für die Randbedingungen an der unteren Ecke des Sparrens im Übergang zur Mineralwollgedämmung. Das Bild zeigt den Verlauf des Grenzwassergehaltes (rote Linie) und des Wassergehaltes der Modellspore (blaue Linie).

### 8.2.3 Andere Einsatzbereiche

Zusätzlich zum Einsatz als Aufdachdämmung wird auch die Anwendung als Innendämmung untersucht. Außerdem erfolgt beispielhaft die Untersuchung des Einsatzes zur energetischen Sanierung eines Fachwerkhäuses, das das erste Anwendungsbeispiel für das vor Projektbeginn zur Verfügung stehende Magnesitgebundene Typha-Board war.

### 8.2.3.1 Einsatz der magnesitgebundenen Typhaplatte als Innendämmung auf Mauerwerk

Das vor dem Projektstart entwickelte Typhaboard wurde bereits in Nürnberg und in Benediktbeuern erfolgreich als Innendämmung eingesetzt. Deshalb stellt sich die Frage, ob auch die neu entwickelte Aufdachdämmung gleichermaßen für diesen Einsatzzweck geeignet ist. Als Klimarandbedingungen werden die Klimadaten von Hof verwendet, da dies im Vergleich zu den beiden anderen Standorten für die Anwendung als Innendämmung den kritischeren Fall darstellt. Für das Innenklima dienen auch hier Wohnraumverhältnisse mit normaler Feuchtelast. Als Wärmeübergangskoeffizienten wird innenseitig von  $8 \text{ W/m}^2\text{K}$  und außenseitig von  $17 \text{ W/m}^2\text{K}$  ausgegangen. Es wird ein außenseitig mit Kalkzementputz versehenes Ziegelmauerwerk mit 36 cm Dicke angesetzt, das innenseitig mit Gipsputz verputzt ist. Man erhält damit einen Wandaufbau mit einem Wärmedurchgangskoeffizienten von  $1,25 \text{ W/m}^2\text{K}$  nahe dem Mindestdämmstandard. Innenseitig wird die „Aufdachdämmung“ aufgebracht und mit einem Lehmputz versehen. Die Materialkennwerte für das Mauerwerk und den Lehmputz werden der WUFI®-Materialdatenbank entnommen. Bild 135 zeigt den implementierten Wandaufbau. Es wird davon ausgegangen, dass die Wand eine Nordausrichtung besitzt und vor direktem Schlagregen geschützt ist. Da eine vollflächige Auflage der Typhaplatte auf dem Ziegelmauerwerk nicht sicher zu garantieren ist, wurde zwischen Dämmung und Mauerwerk eine dünne Luftschicht angenommen. Angesetzt wird eine Innendämmung mit 4 cm Dicke, wodurch sich der Wärmedurchgangskoeffizient etwas mehr als halbiert.

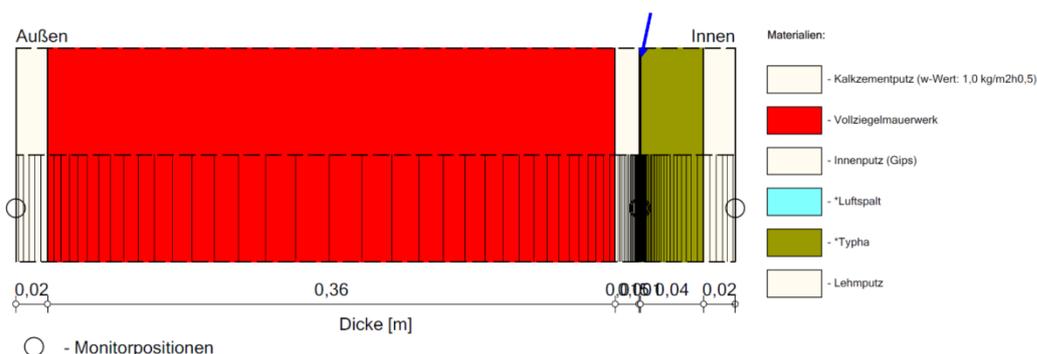


Bild 135:

Für die Anwendung als Innendämmung auf Mauerwerk implementierter Wandaufbau. Der Blaue Pfeil zeigt auf die kritische Stelle der Konstruktion, die bei den Berechnungen besonders betrachtet wird.

In Bild 136 ist der berechnete Verlauf des Gesamtwassergehaltes dargestellt. Ausgehend von einer Anfangsfeuchte entsprechend der Ausgleichsfeuchte bei 80 % r. F. nimmt der Gesamtwassergehalt des Wandaufbaus zu und erreicht erst nach etwas mehr als 10 Jahren den eingeschwungenen Zustand mit dem typischen jahreszeitlich schwankenden Verlauf. Für die weiteren Berechnungen mit 4 cm Innendämmung wird deshalb das zuletzt berechnete Feuchteprofil als Startbedingung eingelesen und von da an drei Jahre berechnet.

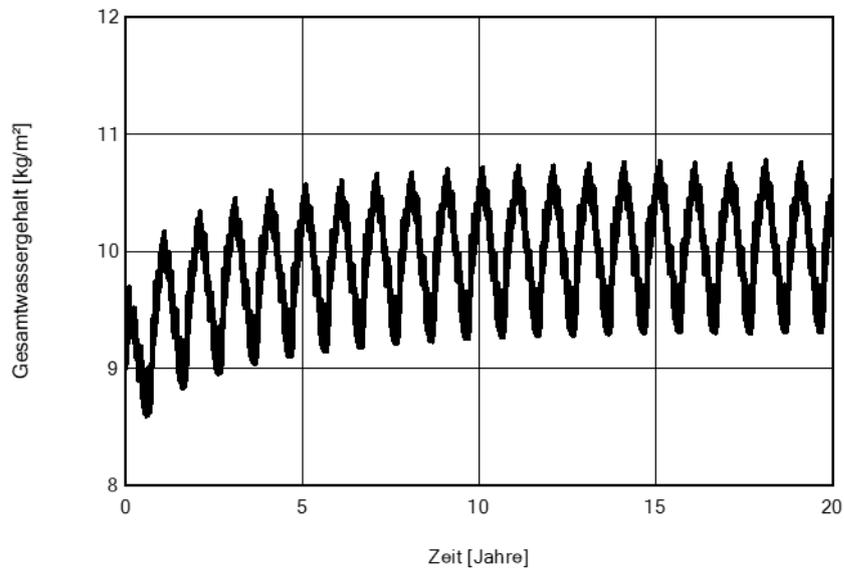


Bild 136:  
Berechneter Verlauf des Gesamtwassergehaltes der innenseitig mit der Typhaplatte gedämmten Außenwand.

Betrachtet man die kritischste Stelle der Wand, zwischen Außenwand und Innendämmung (im Bild mit einem Pfeil markiert), sind auch hier die typischen Jahreszeitlichen Schwankungen der Temperatur und der relativen Luftfeuchte zu erkennen. Allerdings werden an dieser Stelle nur maximale relative Luftfeuchten von ca. 81 % erreicht (Bild 137), diese allerdings nur bei niedrigen Temperaturen. Eine Schimmelpilzbildung kann somit ausgeschlossen werden.

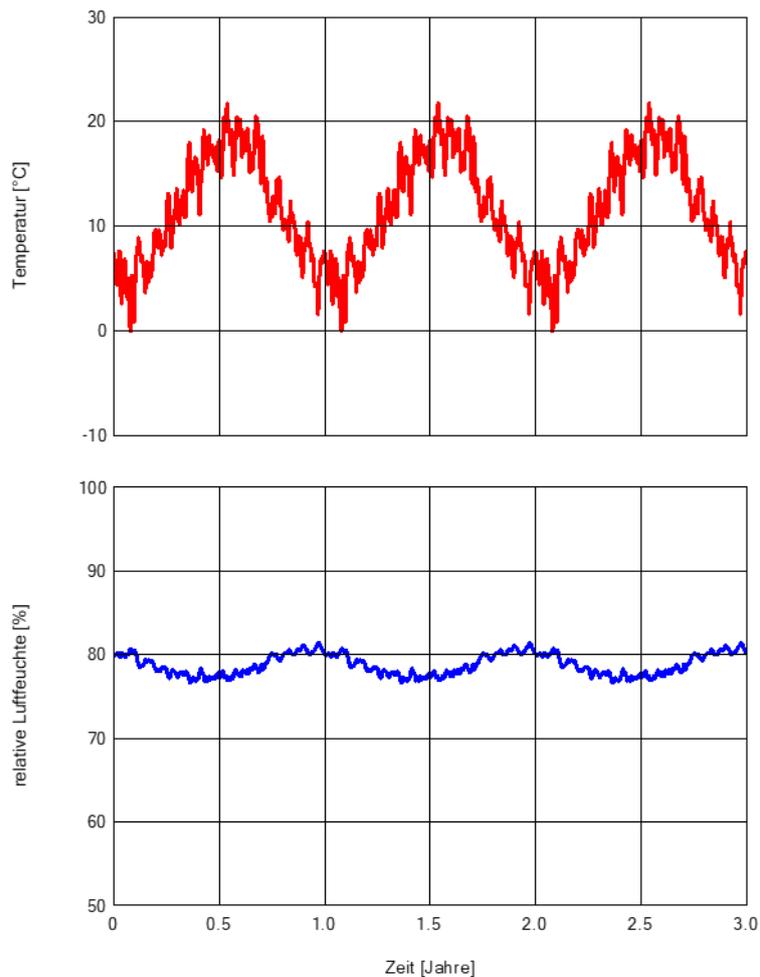


Bild 137:  
Zeitlicher Verlauf der Temperatur (oben) und der relativen Luftfeuchte (unten) zwischen Außenwand und Innendämmung.

Die Berechnungsergebnisse bedeuten, dass bei sorgfältiger Ausführung mit einer guten dauerhaften Abdichtung kein Feuchteschaden zu erwarten ist. Da dies aber nicht immer gegeben sein wird, stellt sich natürlich auch die Frage der Fehlertoleranz der Konstruktion. Um darauf eine Antwort zu finden, wurde im Folgenden bewusst von einer Undichtigkeit ausgegangen, die eine Hinterströmung der Dämmplatte mit warmfeuchter Luft aus dem Innenraum zur Folge hat. Bei den folgenden Berechnungen wurde eine Hinterströmung mit einer Luftwechselrate von 10/h angesetzt.

Bild 138 zeigt die Situation hinter der Dämmung. Durch die einströmende warme Luft steigt die maximale Luftfeuchte auf Werte von bis ca. 84 % r. F. Der Temperaturverlauf wird allerdings nur marginal beeinflusst. Unter Ansatz dieser Randbedingungen ergibt das Schimmelpilzprognosemodell einen völlig unkritischen Mould-Index von lediglich 0,5.

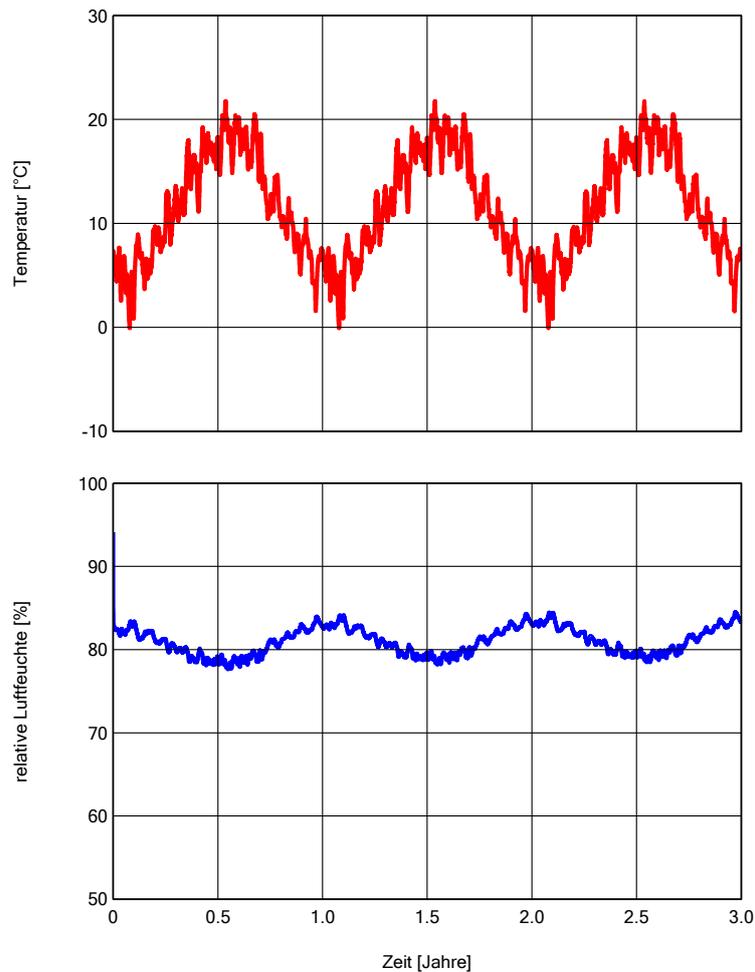


Bild 138:

Zeitlicher Verlauf der Temperatur (oben) und der relativen Luftfeuchte (unten) zwischen Außenwand und Innendämmung bei einer Hinterströmung mit einer Luftwechselrate von 10/h.

Das Ergebnis für eine weitere Erhöhung der Hinterströmung auf eine Luftwechselrate von 25/h zeigt Bild 139. Nun werden im Winter zeitweise auch 88 % r. F. überschritten. Wie anhand des in Bild 140 dargestellten Ergebnisses zu erkennen ist, überschreitet unter diesen Bedingungen der Sporenwassergehalt deutlich den Grenzwassergehalt, Damit ergibt sich ein Mould-Index von 1,9, sodass bereits Vorsicht geboten ist.

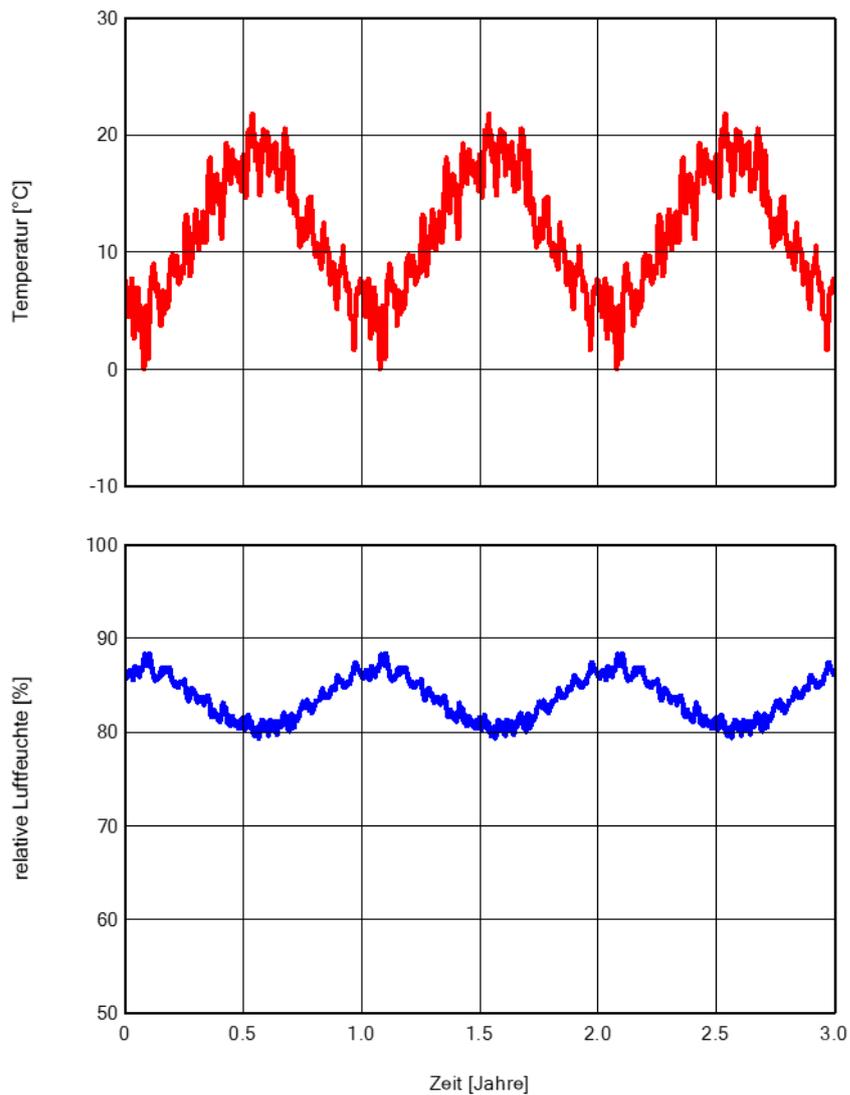


Bild 139:  
 Zeitlicher Verlauf der Temperatur (oben) und der relativen Luftfeuchte (unten) zwischen Außenwand und Innendämmung bei einer Hinterströmung mit einer Luftwechselrate von 25/h.

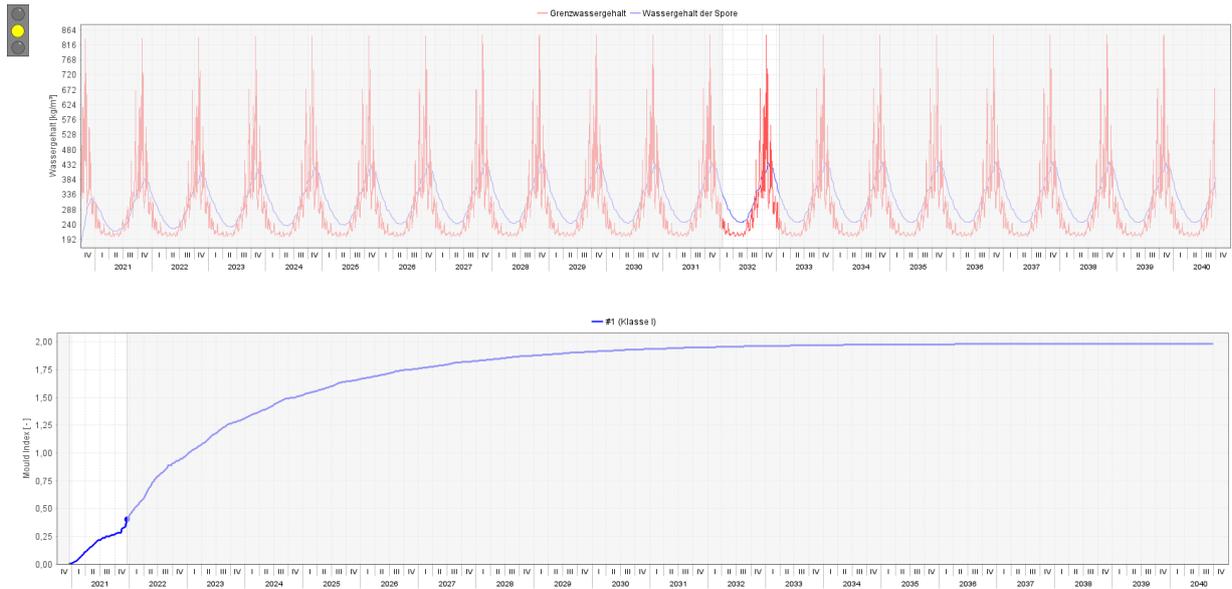


Bild 140:  
 Berechnungsergebnis von WUFI®-Bio für die Randbedingungen hinter der 4 cm Typha-Innendämmung für den Standort Hof bei einer Hinterlüftung der Dämmung mit einer Rate von 25/h. Das obere Bild zeigt den Verlauf des Grenzwassergehaltes (rote Linie) und des Wassergehaltes der Modellspore (blaue Linie). Im unteren Diagramm ist der berechnete Verlauf des Mould-Indexes dargestellt.

Im Folgenden wird ermittelt, bis zu welcher Dämmstoffdicke die Feuchte-situation hinter der Dämmung unkritisch bleibt. Dabei wird von einer vollflächigen Verklebung ohne Hinterströmung und von einer leichten Hinterströmung mit einer Luftwechselrate von 10/h ausgegangen. Die Dämmstoffdicke wird dazu schrittweise um 1 cm erhöht. In Tabelle 48 sind die Ergebnisse zusammengefasst.

Tabelle 48:  
 Mould-Index hinter der Dämmung, vollflächig verklebt (ohne Hinterlüftung) und mit einer Hinterlüftungsrate von 10/h.

Dämmstoffdicke [cm]	4	5	6	7	8	9	10
Ohne Hinterlüftung	0	0,2	0,8	2,0	2,75	3,25	3,7
Mit Hinterlüftungsrate 10/h	0,5	2,65	3,85	4,7	5,3	5,7	6,0

Bis zu einer Dämmstoffdicke von 6 cm ergibt sich bei vollflächiger und damit korrekt ausgeführter Verklebung ein völlig unkritisches Verhalten. Bei größeren Dämmstärken könnte es zu Schimmelpilzbildung kommen. Dabei ist aber zu berücksichtigen, dass zwar die hygrothermischen Randbedingungen ein Schimmelpilzwachstum ermöglichen, bei korrekter Ausführung aber keine keimfähigen Sporen an dieser Stelle vorliegen dürften, da die vor Anbringung der Innendämmung auf der Oberfläche befindlichen Sporen durch den hoch alkalischen Kleber abgetötet werden. Eine ganz andere Situation ergibt sich bei Hinterlüftung der Innendämmung. Zum einen werden mit der eingebrachten Raumluft auch keimfähige Sporen eingebracht und zum anderen führt die warmfeuchte Innenluft zu deutlich ungünstigeren Bedingungen hinter der Dämmung. Bei einer Hinterlüftungsrate von 10/h ist bereits ab einer Dämmstoffdicke von 5 cm mit Schimmelpilzwachstum zu rechnen. Dies zeigt, dass bei Innendämmungen eine Hinterströmung grundsätzlich zu vermeiden ist, was im Falle derartiger Plattendämmstoffe durch eine vollflächige Verklebung an der Außenwand erreicht wird.

Bei diesen Ergebnissen ist aber zu berücksichtigen, dass hier eine denkbar ungünstige Bausituation mit einem Mauerwerk nahe dem Mindestdämmstandard zugrunde gelegt wird. Bei Wandaufbauten mit höherem Dämmniveau werden entsprechend größere Innendämmstoffdicken problemfrei bleiben. Dies ist im jeweiligen Anwendungsfall durch hygrothermische Berechnungen zu untersuchen.

Bei den hier vorgestellten Ergebnissen zur Anwendung der Typhaplatte als Innendämmung wurde als Kriterium nur die feuchtetechnische Situation hinter der Dämmstoffplatte betrachtet. Andere grundsätzlich für eine Innendämmung wichtige Fragestellungen, wie z.B. der äußere Regenschutz und die zunehmende außenseitige Frostschadensgefahr sind hier nicht Gegenstand der Untersuchungen.

### **8.2.3.2 Einsatz zur energetischen Fachwerkhaussanierung**

Beim Einsatz zur energetischen Sanierung eines Fachwerkgebäudes ist die wesentliche Fragestellung weniger die Feuchtesituation in der Ausfachung als vor allem die davon abhängige Situation der feuchteempfindlichen Holzbalken. Dies kann nur durch eine zweidimensionale Berechnung beurteilt werden. Bild 30 zeigt den dafür implementierten Wandaufbau. Dabei wurde von einer vollständigen Ausfachung mit dem Typhamaterial ausgegangen und eine innenseitige 6 cm dicke Beplankung mit demselben Material zugrunde gelegt. Der innenseitige Abschluss wird durch einen Lehmputz gebildet und außenseitig im Ausfachungsbereich durch einen Kalkzementputz.

Die Beurteilung findet anhand des zeitlichen Verlaufs des Gesamtwassergehaltes der Ausfachung sowie unter Berücksichtigung der in Bild 141 mit eingetragenen nummerierten Bereiche des Holzbalkens statt.

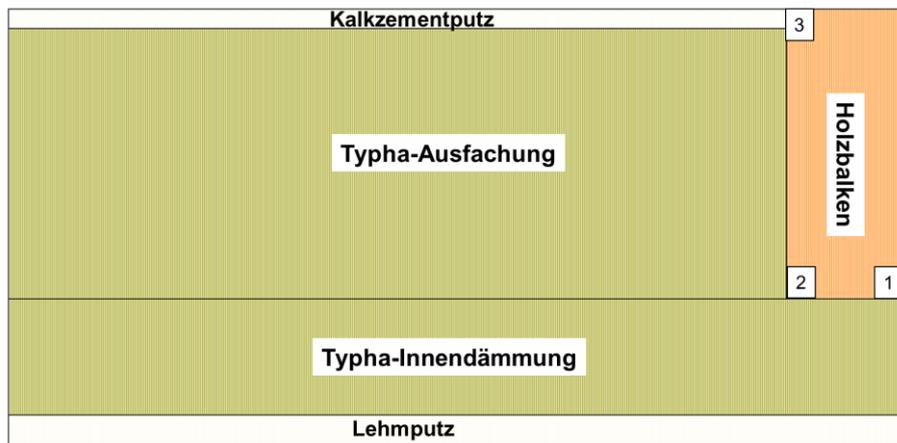


Bild 141:  
Für die zweidimensionale Berechnung implementierter Wandaufbau. Die Stellen, die gesondert betrachtet werden, sind mit Nummer eingezeichnet.

Bild 142 zeigt den Verlaufs des Gesamtwassergehaltes der Ausfachung. Es ist zu erkennen, dass der massebezogene Gesamtwassergehalt, ausgehend von der als Startbedingung angenommenen Ausgleichsfeuchte entsprechend 80 %, abnimmt und mit geringen jahreszeitlichen Schwankungen bei um die 16 kg/m<sup>3</sup> verläuft.

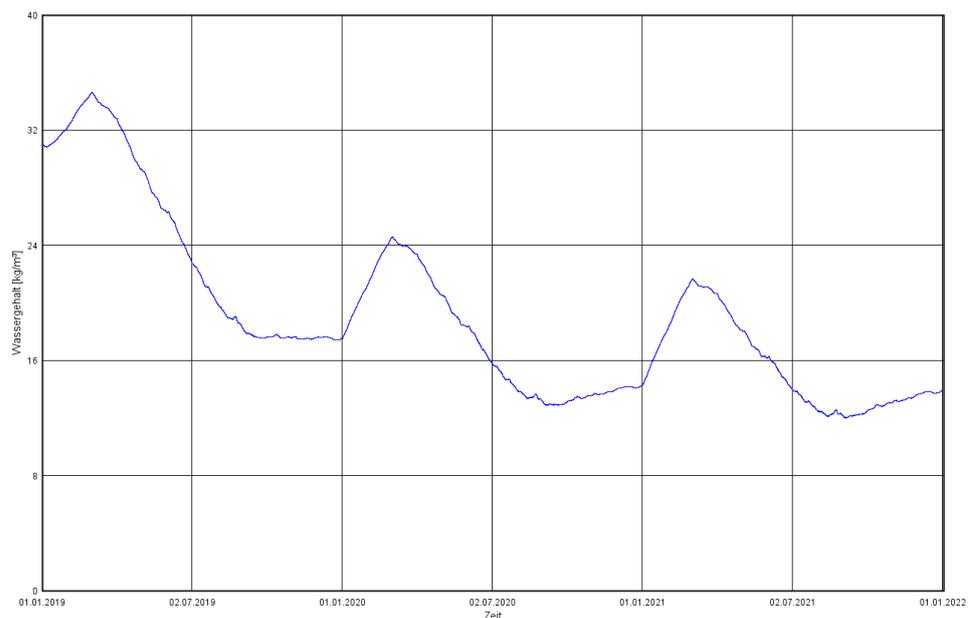


Bild 142:  
Verlaufs des Gesamtwassergehaltes der Ausfachung.

Bild 143 zeigt für die Position 1 in Bild 141, also für die innenseitige Mitte des Balkens hinter der Innendämmung, das Ergebnis. Man erkennt, dass sich die Zustände, ausgehend vom Anfangszustand mit 80% rel. Feuchte bei 20°C tendenziell hin zu deutlich niedrigeren Feuchten ändern, die im Wesentlichen

um etwas über bis deutlich unter 60 %rel. Feuchte liegen. Deutlich mehr variiert die Temperatur dieser Stelle, die von knapp unter 5 °C bis fast 28 °C reicht. Alle Punkte liegen weit unterhalb der Grenzlinie nach WTA.

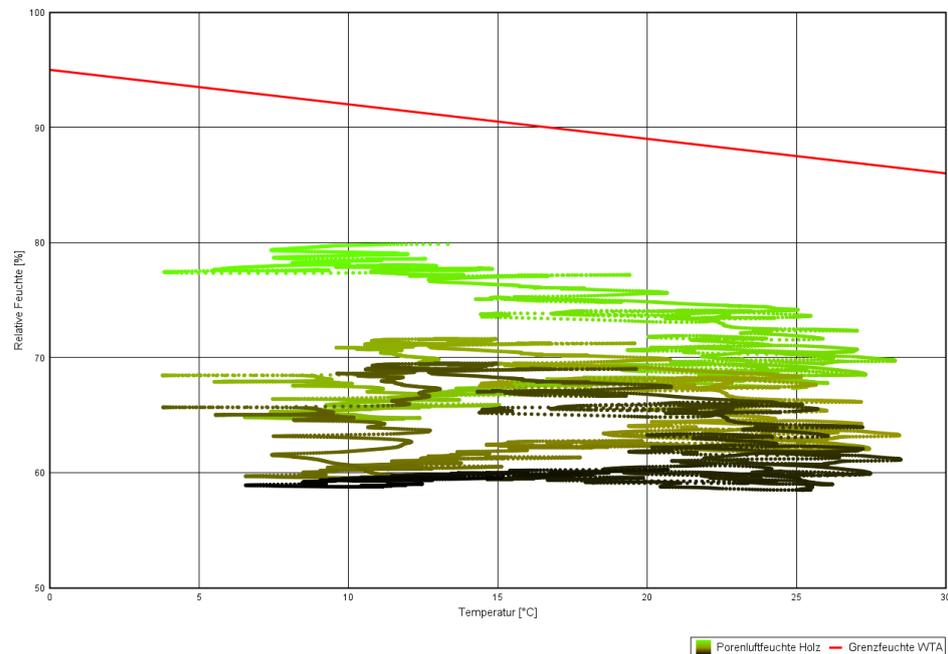


Bild 143:

Verlauf der stündlichen Zustandspunkte im Vergleich zur Grenzlinie nach WTA für die in Bild 141 eingezeichnete Position 1 der Konstruktion.

Für Position 2 ist die Situation in Bild 144 dargestellt. Es ergibt sich ein ähnliches Bild wie an Position 1, allerdings aufgrund der Lage mit einem etwas eingeschränkteren Temperaturbereich.

An Position 3, also auf an der Außenecke zur Ausfachung, ergibt sich ein ganz anderes Bild (siehe Darstellung in Bild 145). Aufgrund der außenseitige Positionierung wird hier ein wesentlich breiterer Temperaturbereich abgedeckt, der von unter 0 °C bis ca. 28 °C reicht. Es werden an dieser Stelle auch zeitweise Feuchten von 50 % unterschritten. Auch hier wird die Grenzlinie nie überschritten.

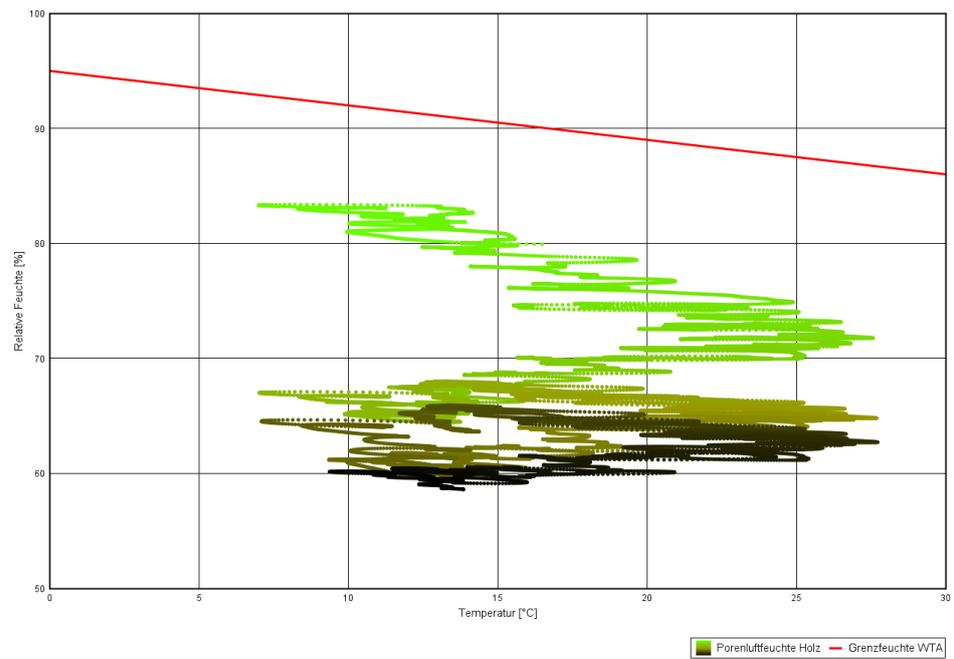


Bild 144:  
Verlauf der stündlichen Zustandspunkte im Vergleich zur Grenzlinie nach WTA für die in Bild 141 eingezeichnete Position 2 der Konstruktion.

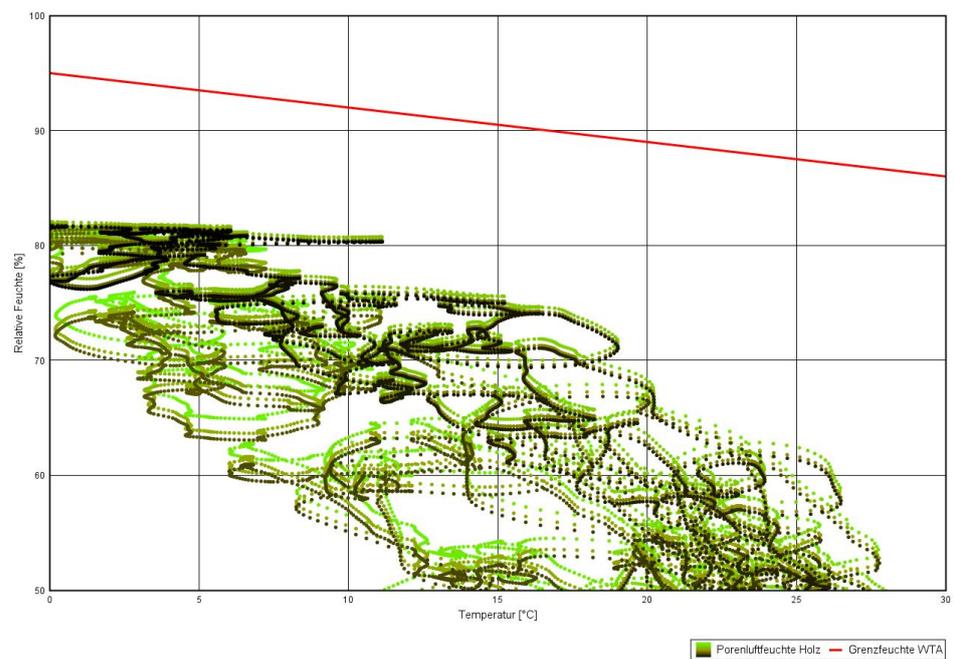


Bild 145:  
Verlauf der stündlichen Zustandspunkte im Vergleich zur Grenzlinie nach WTA für die in Bild 141 eingezeichnete Position 3 der Konstruktion.

Insgesamt ergibt sich bei der energetischen Fachwerksanierung aus feuchte-technischer Sicht ein völlig unkritisches Bild. Auch dies ist der Diffusion-

soffenheit des Materials geschuldet. Durch die im Vergleich zum Magnesitgebundenen Typha-Board niedrigere Wärmeleitfähigkeit wird aber ein merklich besserer Dämmstandard erzielt. Im Ausfachungsbereich sinkt durch den Ersatz des Magnesitgebundenen Typha-Boards mit dem neu für die Aufdachdämmung entwickelten Typha-Dämmmaterial der für ein Fachwerk schon sehr niedrige Wärmedurchgangskoeffizient von 0,29 W/mK auf 0,23 W/mK. Unter Einbeziehung der Wärmebrückenwirkung des umfassenden Holzbalkenrahmens dürfte sich damit ein mittlerer Gesamtwärmedurchgangskoeffizient von ca. 0,3 W/mK ergeben.

### 8.3 Zusammenfassung Untersuchung der Einsatzgrenzen

Zur Untersuchung der Einsatzgrenzen des neu entwickelten Typha-Dämmstoffs zur Aufdachdämmung wurden umfangreiche hygrothermische Berechnungen durchgeführt. Dabei wurde zunächst für die drei typischen Standorte mit kalten, mittleren und warmen Klimarandbedingungen, also für Hof, Würzburg und Freiburg, die Feuchtesituation ermittelt. Zusätzlich wurden auch Klimata außerhalb der BRD einbezogen, mit Östersund in Schweden und Malaga in Spanien als Vertreter für extrem kalte und sehr warme Klimata. Beim zusätzlichen Standort Key West kommt als besondere Situation die dort übliche Klimatisierung zum Tragen, die zu einem entgegengesetzten Temperaturgradienten führt. Für alle Standorte wurde ausgehend von einer sehr dichten Innenbeplankung aus OSB mit dahinterliegender Dampfbremse der Innenseitige Diffusionswiderstand schrittweise reduziert, mit letztendlich innenseitig lediglich einer doppelagigen Gipskartonplatte.

In allen diesen Anwendungsfällen ergibt sich durch die hohe Diffusionsoffenheit der neu entwickelten Platte ein völlig unkritisches Verhalten. Dies gilt sogar dann noch, wenn über Undichtheiten in den Wintermonaten von einem jährlichen Feuchteintrag von 1000 g ausgegangen wird. Die einzige Ausnahme bildet hier der Standort Key West mit einer diffusionsdichten innenseitigen Beplankung.

Zusätzlich zur Aufdachdämmung wurde auch der Einsatz als Innendämmung untersucht. Während hierbei die im Vergleich zum vor Projektbeginn vorliegenden Magnesitgebundenen Typhaboard deutlich reduzierte Wärmeleitfähigkeit aus energetischer Sicht vorteilhaft ist, kann sich die höhere Diffusionsoffenheit bei dieser Anwendung nachteilig auswirken. Auch der Einsatz des neu entwickelten Materials für die energetische Sanierung von Fachwerkgebäuden stellt sich sehr positiv dar.

## 9 Erarbeitung eines Konzepts zur industriellen Umsetzung

Dieses Kapitel umfasst die Vorbetrachtungen zur Erstellung eines Business-Planes. Neben der Erörterung des Marktpotentials (Kapitel 9.1.) einer Typha-Aufsparrendämmplatte werden Möglichkeiten zur technische Umsetzung (Kapitel 9.2) einer industriellen Produktion des Dämmstoffes aufgezeigt.

### 9.1 Erörterung des Marktpotentials

In diesem Kapitel werden die relevanten Punkte für eine primäre Abschätzung aufgeführt. Neben dem Unterpunkt 9.1.1 „Auswahl des geeigneten Produktes - Aufsparrendämmplatte“, welches die Entscheidung für die ausgewählte Produktgruppe darlegt, werden im Rahmen des Unterpunktes 9.1.2 „Darstellung des Alleinstellungsmerkmals einer Typha-Aufsparrendämmplatte“ die Vorteile des Rohstoffes und des angestrebten Produktes gegenüber am Markt befindlicher Vergleichsprodukte aufgezeigt. In Kapitel 9.1.3 „Identifizierung des Optimierungspotentials“ werden Schwächen des Produktes benannt und der Optimierungsbedarf herausgearbeitet. Zur Einschätzung des Marktpotentials werden in Unterpunkt 9.1.4 „Perspektivische Stellung am Markt: potentiell zu erzielende Preise und Mengen“ erste rudimentäre Annahmen zu wirtschaftlichen Zahlen getroffen.

#### 9.1.1 Auswahl des geeigneten Produktes – Aufsparrendämmplatte

Die Saint-Gobain Isover G+H AG versteht sich als Systemanbieter von Wärmedämmstoffen und bietet ein breites Produktportfolio – insbesondere Glas- und Steinwolleprodukte – zur Wärmedämmung von Gebäuden an. Der Dämmstoffmarkt zeigt in den letzten Jahren eine Steigerung des Marktanteiles von Produkten aus nachwachsenden Rohstoffen. Zur Erweiterung des Produkt-repertoires von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen war es im Rahmen des Projektes angedacht, ein Produkt zu entwickeln, welches umfänglich dem Nachhaltigkeitsgedanken sowie dem Cradle to Cradle –Konzept entspricht. Die Typha-Pflanze als Rohstoff zur Herstellung eines Dämmstoffes wurde für dieses Vorhaben ausgewählt.

Die Entscheidung zur Entwicklung einer Aufsparrendämmplatte aus Typha basiert auf verschiedenen Faktoren:

Im Produktportfolio des Unternehmens der Saint-Gobain-ISOVER G+H AG sind Aufsparrendämmprodukte aus Mineralwolle zu finden, welche u.a. auf Grund des geringen Produktgewichtes sowie der Brandschutzeigenschaften Vorteile gegenüber Produkten aus nachwachsenden Rohstoffen aufweisen. Allerdings

sind die Druck- und Biegefestigkeiten geringer als bei am Markt erhältlichen Holzweichfaserplatten.

Durch die Verwendung von nachwachsenden Rohstoffen (Typha) zur Herstellung von Produkten zur Aufsparren-Dämmung können hohe Druck- und Biegefestigkeiten bei hinreichenden Wärmedämmeigenschaften erzielt werden. Es konnte hier auf die bereits vorhandene Erfahrung der Firma Typha-Technik mit Typha-Platten zur Aussteifung von Fachwerkkonstruktionen aufgebaut werden. Die hohen Druck- und Biegefestigkeiten (Sicherheit gegen Durchtritt bei der Arbeit auf dem Dach) ermöglichen ein für den Verarbeiter (von HWF) gewohntes Handling.

Somit ermöglicht eine Aufsparren-Dämmung aus nachwachsenden Rohstoffen und insbesondere Typha eine sinnvolle Ergänzung des Produktportfolios des Systemanbieters Saint-Gobain Isover G+H AG und bietet zusätzlich Differenzierungspotential gegenüber Holzweichfaserdämmstoffen.

Weiter sollte das zu entwickelnde Produkt folgende Eigenschaften erfüllen:

- **Produktdichte < 150 kg/m<sup>3</sup>**
- **Wärmeleitfähigkeit 0,045 mW\*s/K**
- **Trittsichere und abriebfeste Oberfläche**
- **Nut- und Federverbindung**

Im Rahmen des vorliegenden Projektes soll auf Basis der zuvor beschriebenen Gegebenheiten eine Typha-Aufsparrendämmplatte entwickelt werden. Weiterhin wurde DIN 4108-10 [5] als Orientierungshilfe herangezogen. DIN 4108-10 [5] definiert für Wärmedämmstoffe den Anwendungsbereich und die jeweiligen Anforderungen daran. Folgender Anwendungsbereich wurde festgelegt:

- **DAD [Dach, Außendämmung unter Deckung vor Bewitterung geschützt]**

Da für Typha-Produkte in dieser Norm keine Anforderungen definiert sind, sollte eine Orientierung an den definierten Werten von Holzfaserdämmstoffen erfolgen. Holzfaserdämmstoffe stellen im Anwendungsbereich DAD den größten Marktanteil dar und dienen somit als ausgemachter Benchmark. Für Holzfaserdämmstoffe dieses Anwendungsbereiches werden durch das benannte DIN-Regelwerk die Produkteigenschaften Druckspannung/ -festigkeit und Wasseraufnahme definiert. Tabelle 49 gibt einen Überblick über die definierten Werte:

Tabelle 49:  
Definierte Produkteigenschaften für Holzfaserdämmstoffe für den Anwendungsbereich DAD (nach DIN 4108-10 [5], verändert)

		Druckspannung [kPa]	Wasseraufnahme [kg/ m <sup>2</sup> ]
DAD	dk	-	≤ 2
	dg	≥ 10	
	dm	≥ 20	
	ds	≥ 100	

Am Markt befindliche Holzfaserdämmstoffe, welche im Anwendungsbereiches DAD verwendet werden, lassen sich überwiegend der Kategorie **ds** – mit einer sehr hohen Druckbelastung – zuordnen. Folglich wurde dies ebenfalls als Benchmark der zu entwickelnden Typha-Aufsparrendämmplatte herangezogen.

### 9.1.2 Darstellung des Alleinstellungsmerkmals einer Typha-Aufsparrendämmplatte

Zur Ermittlung des Alleinstellungsmerkmals einer Typha-Aufsparrendämmplatte werden vergleichbare Holzfaserdämmstoffe (DAD,ds) herangezogen. Zur Evaluation werden verschiedene Parameter ausgewählt, welche sich in 2 Kategorien, nämlich den Produkteigenschaften und der Nachhaltigkeit gliedern. Die Evaluierung erfolgt mittels einem einfachen Bewertungsschema, welches die einzelnen Parameter in Bezug auf die Typha-Aufsparrendämmplatte gegenüber einem Holzfaseraufsparrendämmprodukt (DAD,ds) gewichtet. Die einzelnen Parameter werden mit:

**[+] für bessere Eigenschaften;**

**[=] für vergleichbare Eigenschaften;**

**[-] für schlechtere Eigenschaften**

eingestuft.

Die Einstufung erfolgt durch die erzielten Erkenntnisse im Rahmen dieses Projektes, bestehender Literatur sowie auf Grund der Einschätzung der Autoren des Abschlussberichtes.

Tabelle 50 zeigt eine Übersicht über ausgewählte relevante Punkte der Typha-Aufsparrendämmplatte und den am Markt befindlichen Holzfaseraufsparrendämmstoffen.

Tabelle 50:  
Übersicht beurteilter Parameter von einer Typha-Aufsparrendämmplatte gegenüber einem Holzfaseraufsparrendämmprodukt

Kategorie	Beurteilung der Typha-Aufsparrendämmplatte gegenüber einem Holzfaseraufsparrendämmprodukt (DAD,ds)		
	+	=	-
Produkteigenschaften	Rohdichte Brandschutz Kein Glimmen	Wärmeleitfähigkeit Wasseraufnahme Verarbeitbarkeit	Druckfestigkeit Nut- und Federverbindung
Nachhaltigkeit	Bindemittel Umsetzung C2C Gewässerschutz Biomasseproduktion CO <sub>2</sub> -Senke	Kultivierung	

Die Bewertung der Parameter macht deutlich, dass die Typha-Aufsparrendämmplatte Vorteile gegenüber einem Holzfaseraufsparrendämmprodukt, insbesondere in der Kategorie Nachhaltigkeit, aufweist. Hier ist dementsprechend auch das Alleinstellungsmerkmal zu definieren:

### **Zu 100 % ökologisch!**

Weiterhin zeigt Bild 146: Darstellung rohstoffseitiger und produktseitiger Vorteile eines Typha-Aufsparrendämmproduktes nochmals ausgewählte positive Parameter des Typha-Aufsparrendämmproduktes, welche in rohstoff- und produktseitige Parameter gegliedert sind. Diese Darstellung wurde bereits im Rahmen des Architektenforums „Bauphysik und Energieeffizienz“ 2019 in Dortmund zur Präsentation der Typha-Aktivitäten bei Saint-Gobain Isover G+H AG verwendet und potentiellen zukünftigen Planern präsentiert.

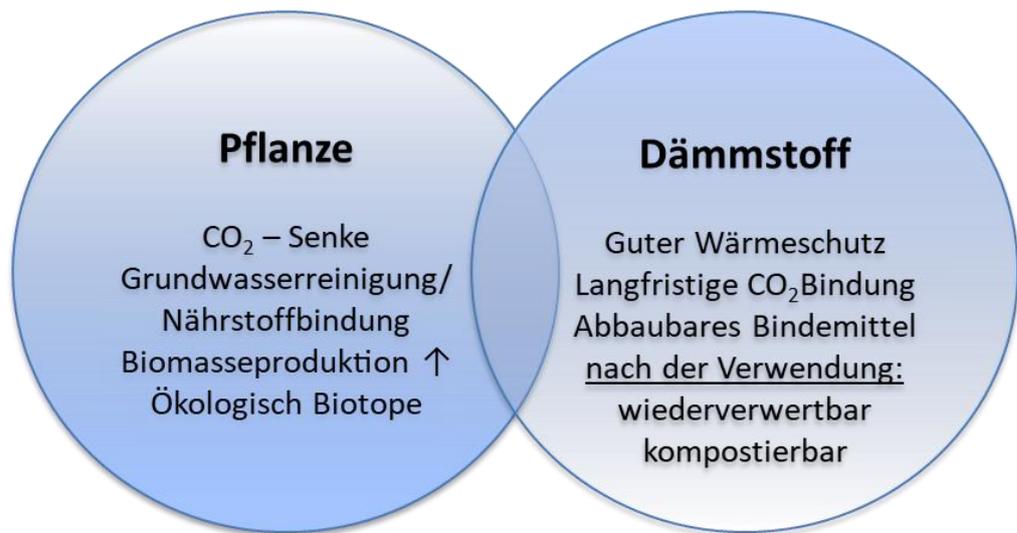


Bild 146:  
Darstellung rohstoffseitiger und produktseitiger Vorteile eines Typha-Aufsparrendämmproduktes

Diese Darstellung transportiert insbesondere die positiven ökologischen und nachhaltigen Aspekte des Typha-Aufsparrendämmproduktes und unterstreicht das identifizierte Alleinstellungsmerkmal des Dämmstoffes.

### 9.1.3 Identifizierung des Optimierungspotentials

Wie bereits in 9.1.2 wurden als Referenz zur Identifizierung des Optimierungspotentials Holzfaseraufsparrendämmstoffe (DAD,ds) herangezogen. Zur Bewertung wurden neben den ermittelten Werkstoffeigenschaften im Verlaufe des Projektes ebenfalls Erkenntnisse eines Verarbeitungstests mit einer Befragung von Fachpersonal durchgeführt.

Die ermittelten Werkstoffeigenschaften im Verlaufe des Projektes zeigen **geringere Festigkeitseigenschaften** im Vergleich zu am Markt befindlichen Holzfaseraufsparrendämmprodukten. Allerdings werden im Verlaufe des Projektes die angestrebten Anforderungen an die Verwendung als Aufsparrendämmplatte (DAD,ds) im Steildach nach DIN 4108-10 (vgl. Holzfaserdämmstoffe) erzielt. Die geringeren Festigkeiten sind auch auf die niedrigere Produktdichte zurückzuführen.

Im Rahmen der Verarbeitungstests wurden neben der exemplarischen Installation von Typha-Aufsparrendämmplatten (Bild 147) auch Begehungsversuche durchgeführt. Weiterhin wurden durch einen Fragebogen verschiedene Einschätzungen durch das Fachpersonal erbeten.



Bild 147:  
Exemplarischen Installation von Typha-Aufsparrendämmplatten

Der Bewertung und Einschätzung durch das Fachpersonal war aufschlussreich und ermöglichte die Identifizierung von noch bestehenden Mängeln. In der Folge werden einige benannte Mängel gelistet:

- **Die Begehung im Sparrenzwischenfeld ist auf Grund zu geringer Biegefestigkeit nicht möglich.**
- **Die Plattenoberfläche ist unzureichend.**
- **Lösungen zur Verbindung der Platten untereinander müssen erarbeitet werden.**

Für eine erfolgreiche Marktetablierung des Produktes sollte für die im Rahmen der Untersuchungen identifizierten Mängel Lösungen gefunden werden. Hierfür sind weitere Versuchsreihen notwendig, um denkbare Lösungsansätze zu überprüfen und ggf. zu optimieren.

#### **9.1.4 Perspektivische Stellung am Markt: potentiell zu erzielende Preise und Mengen**

Der Marktanteil von Dämmstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen in Deutschland verzeichnet ein stetiges Wachstum. Im Zeitraum zwischen 2004 und 2011 wurde in Deutschland eine Steigerung von 4 % auf 11 % erzielt. Etwa die Hälfte dieser Produkte waren Holzfaserdämmstoffe. Somit erscheint eine Orientierung an diesem Produktsortiment sinnvoll.

Holzfaserdämmstoffe verzeichneten auf dem deutschen Markt in 2011 ein Volumen von ~ 1,04 Mio. m<sup>3</sup>. In Europa wiesen diese in 2015 ein Marktvolumen von 4,4 Mio. m<sup>3</sup> auf.

In Bezug auf Kosten und Preise von Holzfaserdämmstoffen benennt die Literatur Produktionskosten von 0,5 €/ kg bis 0,75 €/ kg (aus Hoppe 2005 Dämmstoffplatten aus Holzfasern, holztechnologie,46 (1). S.45-49) und zu erzielende Preise von 1,0 €/ kg bis 1,5 €/ kg. Auch werden m<sup>3</sup> - Preise von etwa 250 € (aus Makas, M. 2012 Holzfaserdämmstoffe Stand Heute und Anforderungen in der Zukunft in: Wagenführ A. (Herausgeber), Tagungsband des 15. Holztechnologischen Kolloquiums, Dresden, 29.-30. März 2012. S.38-50)) genannt.

Die Ermittlung der perspektivischen Stellung des Typha-Aufsparrendämmstoffes und der Abschätzung von potentiell zu erzielenden Preisen und Mengen bedarf einer Vielzahl von Betrachtungen, welche im Rahmen dieses Projektes nicht durchgeführt wurden.

Da die neuartige Aufdachdämmung aus Typha deutliche Vorteile im Vergleich zur Holzfaser-Dämmung aufweist, kann davon ausgegangen werden, dass auch ein etwas höherer Marktpreis erzielt werden kann. Es sind vor allen zwei Kundenvorteile zu nennen:

1. Höhere Nachhaltigkeit aufgrund der Verwendung eines mineralischen Bindemittels, das den Baustoff direkt kompostierbar macht.
2. Ein ausgezeichneter Brandschutz und keinerlei Glimmneigung

Bedenkt man, dass derzeit immer noch die häufigste Brandursache der Blitzeinschlag im Dachbereich ist, dürfte dieses Argument ausschlaggebend sein, um auch höhere Marktpreise zu rechtfertigen.

Aus den genannten Gründen erscheint es realistisch, statt der für Holzfaserdämmung erzielbaren Preise von 250 €/m<sup>3</sup> einen etwas höheren Preis von 300 €/m<sup>3</sup> anzusetzen. Eine vorsichtige Abschätzung von einer anfänglichen Absatzmenge von wenigstens 3000 m<sup>3</sup>/ a für den Typha-Aufsparrendämmstoff aus:

## 9.2 Darlegung der technischen Umsetzung

Hier werden aus technischen Erkenntnissen, welche im Rahmen des Projektes erlangt wurden, notwendige Maßnahmen zur industriellen Umsetzung abgeleitet und beschrieben. In 9.2.1 „Beschreibung der technischen Herausforderung und erforderliche Anpassungsmaßnahmen“ wird auf die bestehenden Herausforderungen zur Produktion hingewiesen und die notwendigen Maßnahmen zur Realisierung abgeschätzt. Der Unterpunkt 0 „Prozesskonzipierung“ beschreibt mögliche Prozessschritte einer industriellen

Produktion der Typha-Aufsparrendämmplatte. Abschließend soll Unterpunkt 9.2.3 „Investitionsschätzung“ eine grobe und auf Annahmen basierte Kostenschätzung zum notwendigen Invest für eine Produktionsanlage zur industriellen Produktion der Typha-Aufsparrendämmplatte liefern.

Im Rahmen des Projektes (vgl. Kap. 5) wurden zwei verschiedene Herstellungsverfahren zur Produktion einer Typha-Aufsparrendämmplatte untersucht. Bei den Verfahren handelt es sich um industriell etablierte Herstellungsverfahren von Holzwerkstoffen, nämlich von Holzwole- und Spanplatten. Es zeigte sich, dass beide Verfahren nach Adaption die Produktion von Typha-Aufsparrendämmplatten ermöglichen würden. Eine Gegenüberstellung der Untersuchungsergebnisse von Probeplatten beider Herstellungsverfahren zeigt, dass die in 9.1.1 beschriebenen Anforderungen an eine Typha-Aufsparrendämmplatte insbesondere durch das Spanplatten-Herstellungsverfahren erzielt werden können. In der Folge werden die entscheidenden Faktoren gelistet, welche den Vorteil des Spanplattenverfahren gegenüber dem Herstellungsverfahren von Holzwoleplatten unterstreicht:

- Dreischichtiger Plattenaufbau
- Kontinuierlicher Produktionsprozess
- Deutliche Reduktion der Produktionszeit und Steigerung der Produktionskapazität

Somit erfolgte die Festlegung, dass die Herstellungstechnologie von Spanplatten zur Produktion von Typha-Aufsparrendämmplatten adaptiert werden soll.

### **9.2.1 Beschreibung der technischen Herausforderung und erforderlichen Anpassungsmaßnahmen**

Die Untersuchungsergebnisse des Projektes legen dar, dass ein direkter Übertrag der Spanplattenherstellung auf die Produktion einer Typha-Aufsparrendämmplatte nicht ohne Anpassungen erfolgen kann. In diesem Unterkapitel werden entscheidende Prozessschritte und deren Herausforderung zur Anpassung an die Herstellung der Typha-Aufsparrendämmplatte dargestellt. Als Referenz dient die Produktion einer handelsüblichen Spanplatte und deren Prozessschritte.

#### 1) Partikelherstellung:

Das Herstellungsprinzip von Spänen kann nicht zu Herstellung von Typha - Partikel angewendet oder angepasst werden. Partikel einer Spanplatte unterscheiden sich grundlegend zu den Partikeln einer Typha-Aufsparrendämmplatte. Lediglich ein Größenunterschied zwischen Deck- und Mittelschichtpartikel ist bei beiden Produkten gegeben. Zur Herstellung von Typha-Partikel für Versuche im Projekt wurde ein bereits bestehendes

Herstellungsverfahren/ Schneidetechnik zur Steigerung der Partikelmenge und Partikelqualität weiterentwickelt. Der im Rahmen des Projektes erzielte Entwicklungsstand demonstriert die Möglichkeit/ Machbarkeit einer vollständig automatisierten Herstellung von Typhadeckschicht- und Typhamittelschichtpartikel aus geernteten Typhablattbündeln im Anlieferungszustand. Allerdings bedarf es einer Überführung der Technik in einen industriellen Maßstab, welches weiteren Bedarf an Entwicklungsarbeit vermuten lässt.

#### 2) Bindemittel:

Zur Herstellung von Spanplatten werden überwiegend synthetisch organische Bindemittel (z.B. UF-Harz) eingesetzt, welche durch eine Sprühbeimung gleichmäßig auf die Oberfläche des Spanes aufgetragen werden. Zur Herstellung einer Typha-Aufsparrendämmplatte wird ein anorganisches Magnesit-Bindemittel eingesetzt. In den Versuchen konnte gezeigt werden, dass eine Sprühbeimung mit Magnesit ebenfalls möglich ist. Industrielle Tests konnten auf bestehenden Industrieanlagen leider nicht durchgeführt werden, da die Betreiber insbesondere eine deutliche Verschmutzung ihrer Anlage durch die Verwendung von Magnesit befürchteten. Daher muss die Eignung von diversen Beimungsmethoden bei der industriellen Herstellung von Spanplatten für Typha in weiterführenden Tests ermittelt werden.

#### 3) Partikelstreuung:

Da sich die Spanpartikel in ihrer Größe deutlich von den Typhapartikeln unterscheiden, sind Anpassungsmaßnahmen der Streuköpfe anzunehmen. Ausgehend von den Versuchen des Projektes kann angenommen werden, dass zur Streuung der Typhadeckschicht- und Typhamittelschichtpartikel ähnliche Streuköpfe verwendet werden können. Weiterhin zeigten die Versuche, dass Streueinheiten des Spanplatten-Deckschichtmaterials zur Streuung von Typhadeckschichtmaterial nicht geeignet ist. Positive Ergebnisse für beide Typhapartikel (Deckschicht und Mittelschicht) erzielte die Verwendung eines Streuaggregates für Spanplattenmittelschichtspäne. Weitere Testreihen sind auch hier erforderlich.

#### 4) Presse:

Aufgrund der Partikelgröße und –beschaffenheit weisen Spanpartikel höhere Schüttdichten auf als Typhapartikel. Dies hat neben den unterschiedlichen Zielrohddichten und –produktstärken von Spanplatten und Dämmstoffplatten unmittelbaren Einfluss auf die Höhe des gestreuten Partikelkuchens. Da Partikelkuchen der Spanplatten i.d.R. deutlich geringer aufliegen, ist die maximale Öffnungsweite der Spanplattenpressen ggf. ein limitierender Faktor und bedarf einer Anpassung.

## 9.2.2 Prozesskonzipierung

Die vorliegende Prozesskonzipierung ist das Ergebnis eines im Rahmen des Projektes durchlaufenden Verfahrens, welches sich in 3 Handlungsschritte gliedern lässt:

1. Ideensammlung im Projektkonsortium:
2. Prüfung bestehender Infrastruktur durch erste Versuche:
3. Evaluation und Festlegung einer geeigneten Infrastruktur und Optimierung:

Die Ergebnisdarstellung umfasst die Quintessenz der mehrstufigen Konzipierung des Prozesses. Der in den verschiedenen Stufen erörterte Prozess ist zur Veranschaulichung zusätzlich durch vor Ort bei den durchgeführten Versuchen gemachte Fotos dargestellt. Das Konzept umfasst die Schritte der Werkstoffherstellung. Die Rohstoffgewinnung sowie die Verarbeitung und Weiterverarbeitung des Werkstoffes wurden im Rahmen der Untersuchungen nicht berücksichtigt.

### a) Zuschnitt des Blattbündels und Aufbewahrung

In einem ersten Schritt werden Typha-Blattbündel in longitudinaler Richtung – in 2 definierten Dicken für Mittelschicht- und Deckschichtmaterial – in Streifen zugeschnitten. Unmittelbar vorab werden aerenchymarme Randbereiche mit einer vorgelagerten Scheideeinrichtung abgetrennt.



Bild 148:  
Längsschneiden des Typha-Blattbündels (links) und Speicherung der eingekürzten Partikel.

Die zugeschnittenen Streifen werden in definierten Abständen zu den Partikel abgelängt und im Anschluss in Vorratsbunkern gesammelt (veranschaulicht in Bild 148).

#### b) Beleimung der Partikel

Im Rahmen der Untersuchungen wurden die Partikel in einer um die eigene Achse rotierenden Trommel durch Aufsprühen des Bindemittels beleimt (veranschaulicht in Bild 149). Dies ermöglicht eine weitgehend homogene Benetzung der Partikeloberfläche. Denkbar ist, dass die Partikel „im Fallen“ nochmals homogener benetzt werden können. Eine solche Beleimung bspw. durch einen Bindemittelring müsste zur Optimierung in Versuchen überprüft werden.



Bild 149:  
Besprühen der Partikel mit dem Bindemittel in einer Mischtrommel.

#### c) Streuung der Partikel

Im Anschluss an die Beaufschlagung der Partikel mit Bindemittel erfolgt die Streuung des Partikelkuchens (veranschaulicht in Bild 150). Hierfür werden drei aufeinanderfolgenden Streuaggregate für einen kontinuierlichen Prozess benötigt. Das erste Aggregat streut die erste Deckschicht des Plattenwerkstoffes. Daraufhin werden durch ein weiteres Aggregat die Mittelschichtpartikel auf die erste Deckschicht und im Anschluss die zweite Deckschicht aufgestreut. Der Anteil der Mittelschichtpartikel am Plattenwerkstoff beträgt etwa 70 %. Es zeigte sich, dass die Streuung beider Partikelarten (MS und DS) durch ein bestimmtes Streuaggregat, welches auch zur Mittelschichtstreuung bei der Spanplattenherstellung eingesetzt wird, realisiert werden kann. Im Rahmen der Versuche wurden die Partikel in Streukästen eingestreut. Eine Übertragung des Streuprozesses auf ein Fließband wurde in kleinem Maßstab positiv getestet und muss in größeren Anlagen im Zuge weiterer Versuchen validiert werden.



Bild 150:  
Einstreuung der Partikel auf ein Fließband (links) bzw. in eine Pressform (rechts).

#### d) Pressprozess und Aushärtung des Bindemittels

Der gestreute Partikelkuchen wird mittels Vorpresse auf die Nenndicke des Plattenwerkstoffes gepresst. Im Rahmen dieser Untersuchungen erfolgte dies in den Streukästen (veranschaulicht in Bild 151). Die Dicke wurde durch das Anbringen einer Abdeckplatte fixiert. Die Aushärtung erfolgte im Zeitraum von 24 Stunden durch Lufttrocknung – wie es auch bei der Herstellung von Holzwolleplatten gehandhabt wird. Diese Methode erschwert einen kontinuierlichen Produktionsprozess und beschränkt erheblich die Produktionskapazität. Weiterführenden Versuche zeigten, dass die Aushärtung des Bindemittels durch alternative Methoden, wie zum Beispiel die Beaufschlagung mit Heißdampf, deutlich schneller erfolgen kann und den Produktionsprozess beschleunigt.



Bild 151:  
Pressen der Partikel-Bindemittelmischung (links) und ausgeschaltete Aufdachdämmplatten (rechts).

d) Zuschnitt des Plattenwerkstoffes

Die Versuche zeigten, dass für den Zuschnitt der neuentwickelten Typha-Platte sowohl Kreissägen- als auch Bandsägetechnologie eingesetzt werden kann.

### **9.2.3 Investitionsschätzung und Grobkalkulation für die Fertigung**

Für die Abschätzung des Investitionsaufwandes und den Fertigungsaufwand werden im Folgenden zwei unterschiedliche Ansätze vorgestellt. Dies ist zum einen der Aufbau einer großtechnischen Fertigungsanlage und zum anderen der einer kleinen halbindustriellen Anlage.

#### **9.2.3.1 Industrielle Fertigungsanlage**

Die industrielle Fertigungsanlage erlaubt einen hohen Durchsatz mit einer geschätzten Jahresproduktion von 60.000 m<sup>3</sup> Baustoff pro Jahr. Allerdings erfordert diese Anlage auch enorme Rohstoffmengen, für die eine Anbaufläche von ca. 500 Hektar erforderlich ist. Da die Anbaumöglichkeiten derzeit erst im Entstehen sind, wird davon ausgegangen, dass eine derartige industrielle Fertigungsanlage eher langfristig eine Option darstellt. Hinzu kommt, dass damit auch größere Transportwege verbunden sind, sofern diese großen Anbauflächen nicht zentral in anlagennäher aufgebaut werden können. Tabelle 51 zeigt eine finanzielle Grobkalkulation für eine derartige Anlage.

Tabelle 51:  
Überschlägige Berechnung für eine industrielle Typha-Board Fertigungsanlage  
in Deutschland.

		<b>Einnahmen</b>
	Jährliche Einnahmen bei einer täglichen Produktion von: 300 m <sup>3</sup> /d Baustoff, 200 Arbeitstage/Jahr, 215 €/ m <sup>3</sup> ab Werk =300 m <sup>3</sup> /d x 200 d x 215 €/m <sup>3</sup>	215 €/m <sup>3</sup> €
	Summe Einnahmen	<b>12,9 Mio €</b>
		<b>Ausgaben</b>
1.	Investitionen - Fertigungsanlage komplett ohne Schneidetechnik - Schneidetechnik - Fertigungsgebäude 5 Hallen á 0,3 Mio € - Überdachung zur Lagerung von 70.000m <sup>3</sup> Typha-Material - Grundstück 4 ha á 30 €/ m <sup>2</sup> Summe Investitionen	9,80 Mio € 1,80 Mio € 1,50 Mio € 3,60 Mio € 1,20 Mio € 17,90 Mio €
2.	<b>Jährlicher Kapitaldienst</b> aus Investition 17,9 Mio € Laufzeit 15 Jahre, 2% Zins, Tilgung innerhalb der Laufzeit	1,55 Mio €
3.	<b>Jährliche Material- und Betriebskosten</b> - Typha Material: 300m <sup>3</sup> /d x 200 d x 0,3€/kg x 125kg/m <sup>3</sup> - Magnesitkleber: 300m <sup>3</sup> /d x 200 d x 0,2€/kg x 125kg/m <sup>3</sup> - Betriebskosten: Strom, Wasser, Heizung, Reparaturen 1200€/d x 200d Summe	2,25 Mio € 1,50 Mio € 0,25 Mio € 4,0 Mio €
4.	<b>Jährliche Personalkosten</b> 2 x 6 Std. Schichtbetrieb 12 Personen incl. Verwaltung 12 Std./Pers.d x 18 Pers. X 78 €/Std. x 200 d	3,40 Mio €
5.	<b>Lizenzgebühren jährlich nach Umsatz</b> 3% von 12,9 Mio €	0,40 Mio €
6..	<b>Versicherungen und Zulassungen</b> Versicherung Zulassungen	0,70 Mio € 0,20 Mio € 0,90 Mio €
	Summe 2.- 6. Ausgaben jährlich	<b>10.25 Mio €</b>

### 9.2.3.2 Halbindustrielle Fertigungsanlage

Die halbindustrielle Fertigungsanlage beruht auf einer Weiterentwicklung der Pilotanlage in Schönau von Herrn Theuerkorn. Es wird abgeschätzt, dass eine derartige Anlage einen Durchsatz mit einer geschätzten Jahresproduktion von 1.600 m<sup>3</sup> Baustoff pro Jahr ermöglicht. Die benötigten Rohstoffmengen für eine derartige Anlage erfordern lediglich eine Anbaufläche von ca. 15 Hektar, die zumindest anfänglich deutlich realistischer realisierbar sind. Mit derartigen halbindustriellen Fertigungsanlagen wären regionale Betriebe mit kurzen

Rohstofflieferwegen möglich. Außerdem ist hiermit, aufgrund des wesentlich geringeren Investitionsaufwandes (siehe Auflistung in Tabelle 52), möglich, dass der Landwirt oder eine landwirtschaftliche Genossenschaft die komplette Wertschöpfungskette bedienen kann. Falls langfristig eine industrielle Anlage aufgebaut wird, bedeutet das nicht unbedingt das Aus für diese kleinen Fertigungsanlagen, da mit dem Rohstoff Typha eine breite Palette von Baustoffen erzeugt werden kann, sodass sich hier mit hoher Wahrscheinlichkeit eine Marktnische finden lässt, die nicht sinnvoll mit einer Großanlage bedient werden kann.

Tabelle 52:  
Überschlägige Berechnung für eine halbindustrielle Typha-Board Fertigungsanlage in Deutschland.

		<b>Einnahmen</b>
	Jährliche Einnahmen bei einer täglichen Produktion von 8 m <sup>3</sup> Baustoff, 200 Arbeitstage/Jahr 350 € / m <sup>3</sup> ab Werk	350 €/m <sup>3</sup> €
	<b>Summe Einnahmen</b>	<b>560 T € €</b>
		<b>Ausgaben</b>
1.	Investitionen - Fertigungsanlage 10 Stationen von 1 Anliefern, 2 Längsschnitt, 3 Querschnitt, 4 Silo 5 MgO Aufbereitung, 6 Mischen, 7 Randverdichten 8 Pressen + Härten, 9 Ausformen, 10 Lagern - Gebäude Fertigung - Überdachung für 2000 m <sup>3</sup> Typhamaterial - Grundstück - Planungskosten Summe Investitionen	350 T € 300 T € 100 T € 40 T € 100 T € <b>890 T €</b>
2.	<b>Jährlicher Kapitaldienst</b> aus Investition rund 900 T € Laufzeit 15 Jahre, 2% Zins, Tilgung innerhalb der Laufzeit	78 T €
3.	<b>Jährliche Material- und Betriebskosten</b> - Typha Material: 8 m <sup>3</sup> /d x 200 d x 0,3 €/kg x 125 kg/m <sup>3</sup> - Magnesitkleber: 8 m <sup>3</sup> /d x 200 d x 0,2 €/kg x 125 kg/m <sup>3</sup> € - Betriebskosten: Strom, Wasser, Heizung, Reparaturen Summe	60 T € 40 T € 20 T € <b>120 T €</b>
4.	<b>Jährliche Personalkosten</b> 5 Pers. x 12 Mon. x 3,5 T € incl. Verwaltung	210 T €
5.	<b>Lizenzgebühren jährlich nach Umsatz</b> 3% von 560 T €	17 T €
6..	<b>Versicherungen und Zulassungen</b> Versicherung Zulassungen	7 T € 3 T € <b>10 T €</b>
	<b>Summe 2.- 6. Ausgaben jährlich</b>	<b>435 T €</b>

### 9.3 Allgemeine Einordnung des Konzeptes

Das im Rahmen des Projektes erstellte und in den Kapiteln 9.1 und 9.2 beschriebene Konzept zur industriellen Umsetzung einer Typha-Aufsparren-dämmplatte basiert überwiegend auf fundierte theoretischen Annahmen und Voraussetzungen. Bei gezielter praktischer Umsetzung des Projektes müssten diese Annahmen vorab im Rahmen von praktischen Feldversuchen verifiziert werden.

## 1 0 Öffentlichkeitsarbeit

Die Ergebnisse und die daraus abzuleitenden mit der entwickelten neuen Aufdachdämmung verbundenen Vorteile in Bezug auf Umweltschutz und Bautechnik wurden durch Publikationen, auf Tagungen und im Rahmen von Vorlesungen veröffentlicht und zur Diskussion gestellt. Tabelle 53 listet die Vortragsveranstaltungen, die in Zusammenhang mit der Thematik der Nutzung von Typha als Rohstoff für die Baustoffherstellung stehen, chronologisch auf.

Tabelle 53:  
Chronologische Auflistung der Vortragsveranstaltungen in Zusammenhang mit der Thematik der Nutzung von Typha als Rohstoff für die Baustoffherstellung.

Zeit	Ort	Veranstaltung	Titel
12. 06. 2018	Meppen	Fachtagung Paludikultur – Bewirtschaftung, Produkte, Naturschutz	Vortrag: Typha als Basis für einen innovativen dämmenden Baustoff - Umweltrelevanz, Alleinstellungsmerkmale und Einsatzbeispiele -
26.10. 2018	Wuppertal	Projektedorum EnEff.Gebäude.2050 „Performance Gaps – Der Beitrag von Forschungsprojekten auf dem Weg zum nahezu klimaneutralen Gebäudebestand 2050“	Posterbeitrag: Demonstration einer innovativen und nachhaltigen Aufdachdämmung aus Rohrkolben / „RokoDaMi“
01.10. 2019	Wuppertal	2. Projektedorum EnEff.Gebäude.2050	Vortrag: Demonstration einer innovativen und nachhaltigen Aufdachdämmung aus Rohrkolben (RokoDaMi)
18.10. 2019	Stuttgart	Symposium „Klima- und Kultur(en)- gerechtes Bauen“	Vortrag: Ressourcen- und denkmalgerechter Umgang mit vernakulären Bauten g:
23.01. 2020	Greifswald	Paludi-Prima-Treffen - „Paludikultur in die Praxis bringen: Integration – Management – Anbau“	Vortrag: Entwicklung eines tragfähigen und dämmenden Baustoffs aus Rohrkolben
14.09. 2020	Gunzenhausen	Vorstellung Typhakonzept Seemeisterstelle Wasserwirtschaftsamt Ansbach	Vortrag: Typha als Basis für einen innovativen dämmenden Baustoff Umweltrelevanz, Alleinstellungsmerkmale und Einsatzbeispiele
21.09. 2020	Hohenheim	3. Internationaler Bioökonomiekongress Baden-Württemberg. 1.2 New Cropping Systems & Products (2)	Vortrag: An innovative building material on the basis of cattail as an example for bioeconomy
9.10. 2020	München	Treffen im Landwirtschaftsministerium im Rahmen der Bioökonomiestrategie Bayern.	Vortrag: Innovativer Baustoff auf Basis von Typha zur langfristigen CO2-Bindung – Umweltrelevanz und Alleinstellungsmerkmale
13. bis 15.1. 2021	München	BAU-online München	Innovativ Bauen mit Rohrkolben als Rohstoff

Bei der Hannover Messe am 23.-27.4.2018 „Schaufenster Bioökonomie“ wurde auf dem Gemeinschaftsstand PTJ/ BIOPRO GmbH/ FNR das Typha-Entwicklungskonzept vorgestellt (siehe Bild 152 links). Außerdem wurde die neu entwickelte Aufdachdämmung sehr prominent auf den Messestand von Saint-Gobain auf der BAU 2019 gezeigt (Bild 152 links). Für die BAU 2021, die nur online stattfand wurde ein Vortrag eingereicht. Außerdem wurden ein 3D-Modell eines Dachaufbaus mit Aufdachdämmung im virtuellen Show-Room präsentiert.



Bild 152:

Gemeinschaftsstand PTJ/ BIOPRO GmbH/ FNR „Schaufenster Bioökonomie“ auf der Hannover Messe am 23.-27.4.2018 (links) und Aussteller auf der BAU 2019 in München (rechts).

Im Jahresbericht des IBP 2019/2020, der die ÖKOLOGISCHE TRANSFORMATION UNSERER LEBENSÄUME zum Hauptthema hat, stellt diese Entwicklung unter dem Motto „Rohrkolben aufs Dach - für die Umwelt und den Brandschutz“ eines der Highlightprojekte dar. Auch auf der Bundesgartenschau 2020 in Heilbronn wurde die Herstellung von Baustoffen aus Rohrkolben anschaulich vorgeführt und fand regen Anklang.

# 1 1 Zusammenfassung und Ausblick

## 11.1 Ausgangspunkt der Arbeit

Alle nachfolgend aufgeführten Erkenntnisse stellen eine Weiterentwicklung der seit über 20 Jahren von der Firma Typha Technik Naturbaustoffe hergestellten und vertriebenen Produkte dar.

Wesentliche Ziele der Weiterentwicklung hin zu einer am Markt gegenüber Holzweichfaserplatten wettbewerbsfähigen Lösung waren die Reduzierung der Wärmeleitfähigkeit ( $\leq 0,045 \text{ W/mK}$ ) und die Reduzierung der Rohdichte (kleiner  $200 \text{ kg/m}^3$ ; vor allem durch Änderung des verwendeten Bindemittels Magnesit oder des Bindemittelanteils) bei Erfüllung der für Holzweichfaserplatten marktüblichen mechanischen Festigkeiten.

## 11.2 Schneidetechnik und Schichtaufbau

Bei der Optimierung der Aufdachdämmung stellte sich heraus, dass das Ziel einer niedrigen Rohdichte und Wärmeleitfähigkeit am besten über eine höhere Partikelgröße zu erreichen ist. Dies beruht darauf, dass aufgrund der geringeren Oberfläche ein niedrigerer Bindemittelbedarf gegeben ist. Mit diesen größeren Partikeln ist aber für das Produkt einer Aufdachdämmung keine geeignete ausreichend abriebfeste Oberflächenstruktur möglich, sodass Deckschichten mit kleinerer Partikelgröße erforderlich sind.

Die vorhandene Schneideeinrichtung wurde deshalb so umgebaut, dass beide Partikelgrößen hergestellt werden können. Dazu sind die Kämme für die Zwischenräume der Messerblöcke dahingehend verbessert worden, dass durch Einsatz besonders gehärtetem Stahl unter Verwendung der Wasserschnietechnik eine genauere Passung und damit eine geringere Fehlerhaftigkeit beim Schneiden sowie eine erhöhte Standzeit der Kreismesserblöcke erreicht wird. Die Schneideeinrichtung wurde außerdem dahingehend angepasst, dass nun zwei unterschiedliche, weitgehend quadratische Partikelgrößen erzeugt werden können. Dies führt zu einer höheren Variabilität bei der Materialzusammensetzung und den damit verbundenen Eigenschaften. Die Herstellung von Probelplatten mit diesen auf diese Weise optimierten Partikeln ergibt eine merkliche Reduktion der Wärmeleitfähigkeit bei vergleichbarer Festigkeit, sodass dieser Ansatz weiterverfolgt worden ist.

Zur weiteren Verbesserung der Dämmeigenschaften werden zuvor von den ganzen Typhablattbündeln seitlich mehrere Lagen Sklerenchym abgetrennt. Die dazu notwendige Aufrüstung der Schneideanlage ist entwickelt und von einem mit dem Rohstoff und der Schneidetechnik vertrauten Maschinenbauer gebaut und montiert worden. Durch die angepasste Schneideanlage können nun optimierte Partikel unterschiedlicher Größen für den Schichtaufbau erzeugt werden.

## 11.3 Bindemittel und Applikation

Es wurden aus beschaffter Typha-Blattmasse aus SO-Europa mit Standardpartikeln Probekörper hergestellt. Als Bindemittel kam Zement, Magnesit und Albumin sowie PMDI zum Einsatz, wobei auch orientierende Versuche mit Kasein und Wasserglas sowie Geopolymer durchgeführt wurden. Die Prüflinge sind mit unterschiedlichen Bindemittelanteilen hergestellt worden. Daran sind die Rohdichte, die haptische Festigkeit sowie die Wärmeleitfähigkeit ermittelt worden. Die Ergebnisse zeigen die Tendenz, dass mit dem Bindemittel Magnesit gegenüber den anderen anorganischen Bindemitteln die besseren Resultate bezüglich Wärmeleitfähigkeit bei gleichzeitig ausreichender Festigkeit für die verschiedenen Anwendungen am Bau erzielt werden können. Beispielsweise zeigt die Gegenüberstellung der erzielten Werte mit Kasein und Magnesit als Bindemittel, dass mit Magnesit etwa 60 % höhere Zug- und Druckfestigkeiten und eine mehr als doppelte so hohe Biegefestigkeit erzielt wird.

Insbesondere ergeben überraschenderweise Weise die Versuche mit Zement als Bindemittel unzureichende Festigkeiten, die deutlich unterhalb der Proben mit Magnesitbindung liegen. Dies liegt wahrscheinlich daran, dass die in Typha vorhandenen Polyphenole als Zementgifte wirken.

Im Brandtest nach ISO 5660-1 [30] ergab sich mit dem organischen Bindemittel Kasein eine Einstufung nach Euroclass E oder schlechter. Mit dem mineralischen Bindemittel Magnesit wird dagegen eine wesentlich bessere Einstufung nach Euroclass B erreicht. Dies ist die beste Einstufung, die für ein Material, das brennbare Bestandteile beinhaltet, erreichbar ist.

Zusätzlich wurden auch erste Proben hergestellt, die Geopolymer, ein anorganisches Zweikomponentensystem aus einer reaktiven Feststoffkomponente (Siliziumoxid, Aluminiumoxid) und einer alkalischen Aktivierungslösung, als Bindemittel enthalten. Durch den Einsatz des Geopolymers werden zwei Vorteile erwartet; den geringeren Energiebedarf bei der Bindemittelherstellung und eine größere Klebekraft. Nachteilig werden dagegen wahrscheinlich die Brandschutzeigenschaften beeinflusst. Die ersten Versuche stimmen optimistisch, hier ist aber noch größerer Forschungsbedarf gegeben.

Da die derzeitige Magnesitplatte für manche Bauanwendungen eine nach Norm zu hohe Wasseraufnahme aufweist, wurde versucht, diese durch Einsatz von Hydrophobierungsmitteln zu reduzieren. Dabei zeigte sich, dass übliche Hydrophobierungsmittel auf Wachsbasis gute Ergebnisse bringen, wenn sie als Extraarbeitsschritt appliziert werden. Eine gemeinsame Applikation mit dem Bindemittel scheitert aber daran, dass das Wachs schlagartig zu großen Klumpen koaguliert. Versuche mit einer Mikroemulsion auf Silikonbasis zeigten dieses Problem dagegen nicht, sodass ein Besprühen mit einer Mischung aus Bindemittel und Hydrophobierungsmittel erfolgreich war.

Außerdem wurden Versuche durchgeführt, bei denen das MgCl<sub>2</sub>, das bei Stahl korrosionsfördernd wirkt, durch MgSO<sub>4</sub> ersetzt wurde. Die auf diese Weise hergestellten Platten ergeben nur geringfügig andere Festigkeiten.

Ferner wurde versucht, mit einem organischen Bindemittel auf Basis von Albumin, den Klebemittelsatz zu reduzieren, um geringere Rohdichten in Kombination mit niedrigeren Wärmeleitfähigkeiten zu erzielen. Um trotzdem den Vorteil des Brandschutzes beizubehalten wurde mit einer Mischung aus organischem Bindemittel und Magnesit gearbeitet.

## 11.4 Plattenherstellung

Zur Überprüfung der Eignung bereits bestehender Fertigungsverfahren in Verbindung mit Typha-Partikeln wurden zunächst Tests an einer Anlage einer Firma zur Produktion von Holzwole-Leichtbauplatten gemacht. Die HWL-Platten werden aus Nadelhölzern hergestellt, wobei diese langfaserig gehobelt, danach mit Bindemittel beaufschlagt werden. Über ein Förderband wird die Partikelmasse vorverdichtet und anschließend damit Formen gefüllt. Die gefüllten Formen werden daraufhin gestapelt, noch einmal stapelweise gepresst und belastet, sodass Form auf Form bündig liegt. Es handelt sich hierbei also um eine Mischung aus kontinuierlichem und batchweisem Herstellungsverfahren. Die Versuche haben gezeigt, dass eine derartige Fertigungsanlage mit entsprechenden Modifikationen durchaus für die Herstellung magnesitgebundener Typhaplatten geeignet wäre.

Außerdem wurden auf einer Versuchsanlage zur Herstellung von Holzspanplatten in Göttingen diverse Versuche mit Partikeln aus Typha gemacht. Da die verbesserte Schneideeinrichtung zunächst noch nicht zur Verfügung stand, wurde in einem ersten Schritt mit Standardpartikeln geprüft, ob sich das Streuverfahren aus der Spanplattentechnologie generell eignet, die Rohrkolbenpartikel den Anforderungen gemäß dreischichtig aufzubringen. Dabei zeigte sich, dass von den beiden vorhandenen Streueinrichtungen nur eine geeignet ist. Dies führt dazu, dass für den geschichteten Aufbau der Partikelbehälter zunächst mit den feinen Partikeln gefüllt werden muss, nach Streuung der unteren Deckschicht dieser allerdings entleert werden muss, um ihn dann mit den größeren Partikeln zu füllen. Dieses immer wiederkehrende Auffüllen und Entleeren erfordert zusätzlichen Zeitbedarf für die Plattenherstellung auf dieser Anlage. Es wurden Plattenprobestücke (60 x 60 cm<sup>2</sup> und 115 x 60 cm<sup>2</sup>) mit einer Mittelschicht aus größeren Partikeln und zwei Deckschichten mit kleineren Partikeln hergestellt.

Nachdem die aufgerüstete Schneideanlage zur Verfügung stand, konnten auf der Versuchsanlage der Uni Göttingen weitere Optimierungsversuche gemacht werden. In diesen Versuchen wurde der in weiten Teilen kontinuierliche Prozess zur Herstellung der Typha-Platte optimiert. Ziel war es, eine ausreichende Anzahl geeigneter und unter industrie-ähnlichen Bedingungen produzierter Platten für das Monitoring auf einer Versuchsfläche des FlexDa Prüfstand des IBP in Holzkirchen zu erzeugen. Ferner wurden verschiedene Möglichkeiten der

schnelleren Aushärtung ausprobiert, um Perspektiven für einen industriellen Prozess aufzuzeigen. Dabei kamen neben der reinen Zufuhr von Wärme in einer Heizpresse auch eine Durchströmung von Heißluft sowie eine Aushärtung mit Heißdampf zum Einsatz. Die Durchströmung mit Heißluft führt zu keinem zufriedenstellenden Ergebnis was die Festigkeit und haptische Stabilität der erzeugten Platten betrifft. Durch eine nur wenige Minuten dauernde Beaufschlagung mit Heißdampf konnten dabei bezüglich Verkürzung der Aushärtung und der Festigkeit der Platten die besten Ergebnisse erzielt werden. Mit der Anlagentechnik der Uni Göttingen konnten so Platten mit den Maßen  $0,6 \times 1,2 \times 0,04 \text{ m}^3\text{h}$  für die Freilanduntersuchungen hergestellt werden. Auch waren die Versuche hilfreich, um die im Projekt angestrebte Konzeptionierung eines Produktionsprozesses in Teilen praktisch zu erproben und zu evaluieren bzw. neue Aspekte aufzunehmen und diese in die Überlegungen miteinfließen zu lassen.

## 11.5 Materialkennwerte

Durch den dreischichtigen Aufbau mit einer Kernschicht mit größeren Typhapartikeln und damit auch geringerem Bindemittelbedarf und mit nur wenige Millimeter dicken Deckschichten zur Erhöhung der Oberflächengüte konnte die Rohdichte der Platten von  $270 \text{ kg/m}^3$  um mehr als 40 % auf etwa  $155 \text{ kg/m}^3$  gesenkt werden. In Kombination mit der Verbesserung der Partikelqualität durch vorheriges Abtrennen der aerenchymarmen Seitenbereiche der Blattbündel konnte damit der Messwert der Wärmeleitfähigkeit der Platten deutlich auf unter  $0,045 \text{ W/mK}$  abgesenkt werden. Trotz der deutlichen Reduktion der Rohdichte erhält man auf diese Weise eine Dämmstoffplatte mit für eine Aufdachdämmung geeigneter Festigkeit. Durch die niedrigere Rohdichte ergibt sich auch ein um etwa 35 % niedrigerer Diffusionswiderstand, was gerade beim Einsatz als Aufdachdämmung aus bauphysikalischer Sicht von Vorteil ist.

Die Reduktion der Rohdichte bewirkt auch eine deutliche Erhöhung der kapillaren Saugfähigkeit der Materials. Der Wasseraufnahmekoeffizient der neuen Platte liegt mit  $2,8 \text{ kg/m}^2\sqrt{\text{h}}$  etwas mehr als doppelt so hoch. Dem kann, wie bereits beschrieben, durch Einsatz eines Hydrophobierungsmittels, welches dem Bindemittelgemisch zugesetzt wird, entgegnet werden. Allerdings ist bei dieser Anwendung ein höherer Wasseraufnahmekoeffizient eher positiv zu bewerten, da dadurch die Fehlertoleranz des Gesamtsystems erhöht wird.

## 11.6 Berechnungen zu Einsatzgrenzen

Zur Untersuchung der Einsatzgrenzen des neu entwickelten Typha-Dämmstoffs zur Aufdachdämmung wurden umfangreiche hygrothermische Berechnungen durchgeführt. Dabei wurde zunächst für die drei typischen Standorte mit kalten, mittleren und warmen Klimarandbedingungen, also für Hof, Würzburg und Freiburg, die Feuchtesituation ermittelt. Zusätzlich wurden auch Klimata außerhalb der BRD einbezogen, mit Östersund in Schweden und Malaga in Spanien als Vertreter für extrem kalte und sehr warme Klimata. Beim zusätzlichen Standort Key West kommt als besondere Situation die dort übliche

Klimatisierung zum Tragen, die zu einem entgegengesetzten Temperaturgradienten führt. Für alle Standorte wurde ausgehend von einer sehr dichten Innenbeplankung aus OSB mit dahinterliegender Dampfbremse der innenseitige Diffusionswiderstand schrittweise reduziert, mit letztendlich innenseitig lediglich einer doppelagigen Gipskartonplatte.

In allen diesen Anwendungsfällen ergibt sich durch die hohe Diffusionsoffenheit der neu entwickelten Platte ein völlig unkritisches Verhalten. Dies gilt sogar dann noch, wenn über Undichtheiten in den Wintermonaten von einem jährlichen Feuchteintrag von 1000 g ausgegangen wird. Die einzige Ausnahme bildet hier der Standort Key West mit einer diffusionsdichten innenseitigen Beplankung.

Zusätzlich zur Aufdachdämmung wurde auch der Einsatz als Innendämmung untersucht. Während hierbei die im Vergleich zum vor Projektbeginn vorliegenden Magnesitgebundenen Typhaboard deutlich reduzierte Wärmeleitfähigkeit aus energetischer Sicht vorteilhaft ist, kann sich die höhere Diffusionsoffenheit bei dieser Anwendung nachteilig auswirken. Auch der Einsatz des neu entwickelten Materials für die energetische Sanierung von Fachwerkgebäuden stellt sich sehr positiv dar.

## 11.7 Begleitendes wissenschaftliches Monitoring

Die mit der Anlage in Göttingen erzeugten Platten (Maße  $0,6 \times 1,2 \times 0,04 \text{ m}^3$ ) sind im August 2019 am Dachprüfstand des IBP („FlexDa“) eingebaut worden. Insgesamt werden 4 Ausführungen auf der nach Norden ausgerichteten und ca.  $30^\circ$  geneigten Dachfläche untersucht. Zwei Ausführungen sind mit zwei Lagen der 4 cm dicken Aufdachdämmplatte aus Typha aufgebaut, beide mit zusätzlich vorhandener 6 cm dicker Mineralwollendämmung. Zum Vergleich hierzu ist eine ebenfalls zweilagig verlegte Aufdachdämmung aus Holzfaserdämmplatten sowie eine 8 cm Typhaplatte auf die Sparren montiert worden. Die 8 cm dicke Platte wurde extra für diesen Zweck im Technikum der Firma Typha Technik hergestellt. Nach Sensorinstallation ist die Messwerterfassung seit September 2019 in Betrieb. Der unter den Versuchsdachflächen liegende Raum wird beheizt und auf eine typische Wohnraumfeuchte von 40 – 50 % befeuchtet.

Am dem Demogebäude Raum Postmünster sind aus konstruktiven Gründen 6 cm dicke Aufdachdämmplatten aus Typha verlegt. Hergestellt sind diese Aufdachdämmplatten Technikum der Firma Typha Technik nach dem gleichen Prinzip wie die Platten in Göttingen, also. optimierte Partikelerzeugung (Abtrennung von Sklerenchymbereichen) in zwei Dicken, jeweils Mittelschicht und auf jeder Seite eine Deckschicht. Die Anlage zur Entfernung der aerenchymarmen Seitenbereiche hat sich als weitgehend fehlerfrei arbeitend erwiesen. Lediglich bei der kontinuierlichen Abfuhr der abgeschnittenen Teile ist noch weiterer Entwicklungsbedarf vonnöten.

Die Aufdachdämmplatten sind seit November 2019 auf dem Demogebäude verlegt und die Sensorik ist montiert worden. Nach Erstellung eines kleinen Versuchsraumes unterhalb der Dachversuchsflächen konnte die Messwert-erfassung gestartet sowie mit der Beheizung und Befeuchtung noch im Dezember 2019 begonnen werden. Hier wurde auch die Gelegenheit genutzt, zusätzlich eine Messung mit einer Schüttdämmung aus Typhapartikeln im Wandbereich durchzuführen.

Die Messreihen am Prüfstand des IBP („FlexDa“) zeigen, dass die Ausführungen mit der Aufdachdämmung aus Typha gleichwertige Ergebnisse bezüglich des Wärmewiderstandes im Vergleich zur Holzfaserdämmung aufweisen. Dabei ist bei einer zweilagigen Verlegung mit 2x 4 cm Platten der Wärmewiderstand etwas höher, als bei einer einlagig verlegten 8 cm dicken Dämmung, was aber auch darin begründet ist, dass die auf 4 cm Dicke ausgelegten Platten in der Realität etwas höhere Dicken aufwiesen.

Beim Demogebäude ergibt sich mit der 6 cm dicken Aufdachdämmung aus Typha erwartungsgemäß ein niedrigerer Wärmewiderstand als bei der 8 cm dicken Platte am Prüfstand. Aus den Messergebnissen lässt sich eine Wärmeleitfähigkeit ermitteln, die gut mit den Laborergebnissen übereinstimmt und tendenziell sogar noch etwas besser ausfällt. Im Wandbereich ergibt sich anhand der Wärmewiderstände der 16 cm dicken Schüttdämmung aus Typha latifolia zwischen der Tragkonstruktion aus Holz eine Wärmeleitfähigkeit von 0,058 W/mK. Die mit 6 cm dicken magnesitgebundenen Typhaboards beplankte Wand erreicht damit einen Wärmedurchgangskoeffizienten von unter 0,2 W/m<sup>2</sup>K.

## 11.8 Ausblick

Beim Ausbringen der dreischichtigen Aufdachdämmplatten wie im Kapitel 7 beschrieben, hat sich gezeigt, dass bei dem Material eine etwas höhere Biegesteifigkeit wünschenswert wäre, um auch weitere Sparrenabstände sicher überbrücken zu können. Dazu wurden nach dem eigentlichen Projektende noch Versuche gemacht, die das erfolgreiche Prinzip der Vergrößerung der Kernschichtpartikel weiter verfolgte. Das geschah in der Weise, dass die mittleren Bereiche der Blattbündel nach dem Abtrennen der aerenchym-ärmeren Seitenware nicht mehr wie vorher durch das 6 mm – Schneidraster geschickt wurden, sondern als Ganze auf ca. 70 mm eingekürzt und so beleimt wurden. Anhand von Bild 1 kann man sehr gut die deutlich größeren Typhapartikel im Kernbereich der Platte erkennen. Zudem wurde der Masseanteil des 3 mm dicken Deckschichtmaterials um ca. 10 % erhöht. Auf Grund der für die Komprimierung der größeren Kernschichtpartikel notwendigen höheren Drücke und der daraus resultierenden stärkeren Verdichtung der Deckschichten ist ein um ca. 25 % biegesteiferes Plattenmaterial entstanden. Das Raumgewicht und auch der Wärmedämmwert blieben in etwa gleich. Mit dem so weiterentwickelten Board lassen sich Sparrenabstände bis zu 1,0 m problemlos ohne Unterschalung überbrücken ebenso wie möglicherweise notwendig werdende Auskragungen über eine Sparrenunterlage hinaus bis zu 0,5 m.



Bild 153:  
Ansicht des Querschnitts der weiter entwickelten Typha-Aufdachdämmung. Gut erkennbar sind die deutlich größeren Typhapartikel im Kernbereich der Platte.

Nach wie vor ist die Rohstofffrage der begrenzende Faktor für die Herstellung von Bauprodukten aus Typha. Die Ernte im Donaudelta und der Transport des Materials zu einer Fertigungsanlage in Deutschland stellt dabei sowohl aus

ökonomischen als auch aus ökologischen Gründen keine sinnvolle Alternative zum Anbau dar.

Eine Möglichkeit besteht im Aufbau von Fertigungsanlage nahe des Donaudeltas, also in Rumänien, Bulgarien oder anderen Ländern der Schwarzmeerregion in Osteuropa. Durch das Vorkommen von Typha Naturbeständen sind hier die Verhältnisse anders. Allein im Donaudelta steht ein jährlich zu erntender Rohstoff Typha zur Erzeugung von ca. 1,5 Mio m<sup>3</sup> Baustoff zur Verfügung. In jedem dieser Länder gibt es Rohstoffressourcen, die mehrere industrielle Produktionsanlagen rentabel zu machen.

Eines der generellen Haupthindernisse zur Etablierung von Paludikultur-Produkten entfällt in diesen Ländern und damit das Henne-Ei-Problem zwischen Produktion und Rohstoffherzeugung. Hier muss kein möglicher Produzent (Investor) auf einen risikobereiten Landwirt warten, der ihm den Rohstoff liefert. Wegen des zunehmenden gesellschaftlichen Drucks in Richtung Nachhaltigkeit und Kreislaufwirtschaft ist mittelfristig zu erwarten, dass die großen europäischen Baustoffproduzenten auf diese Ressourcen zurückgreifen werden, da das Lohnniveau in diesem Teil Europas wesentlich niedriger ist und die Gewinnmargen bei der industriellen Produktion zudem höher liegt als bei der halbindustriellen Anlage.

Aber auch in den westeuropäischen Ländern findet aufgrund der inzwischen in weiten Kreisen bekannten Problematik der CO<sub>2</sub>-Emissionen konventioneller Landwirtschaft im Allgemeinen ein Umdenken statt. Diese CO<sub>2</sub>-Emissionen sind vor allem aufgrund der zur landwirtschaftlichen Bewirtschaftung erfolgten Trockenlegung und dem damit verbundenen Moorabbau von besonders großem Umfang. Dies ist auch der Grund dafür, dass zunehmend Forschungsprojekte gefördert werden, die die Emissionen durch Wiedervernässung und den Anbau von Paludi-Kulturen zum Thema haben. Zu nennen sind hier beispielhaft das bereits mehrere Jahre laufende MoorUse-Projekt der Hochschule Weihenstephan-Triesdorf (HSWT) und das Projekt „Klimaschutz durch Moorentwicklung - Produktketten aus Niedermoorbiomasse in Niedersachsen“, bei denen neben Fragen des Anbaus auch die Verwertung des Rohstoffs eine entscheidende Rolle spielt. Bei beiden Projekten ist aufgrund dieser Fragestellung die Firma Typha Technik und das IBP beteiligt. Bei anderen Forschungsprojekten, wie z.B. Paludi-Prima und Plant<sup>3</sup> der Universität Greifswald, sind wir in der Projektbegleitenden Arbeitsgruppe vertreten und beraten zu Fragen des Anbaus (hierzu vor allem Herr Theuerkorn) und der Verwertung des Rohstoffs zu Bauprodukten.

In den Niederlanden wird momentan in der Nähe von Amsterdam ein Projekt für eine halbindustrielle Produktionsanlage für die Herstellung von 2.000-3.000 m<sup>3</sup>/a Typha Baustoff auf Basis einer Typha Anbaufläche von 30 ha gestartet. Grund hierfür ist nicht nur ein ausgeprägtes Gespür für geschäftliche Chancen nachhaltiger ökologischer Produkte, sondern vor allem der politische Wille und die Entschlossenheit der Sackung der stark verbreiteten Niedermoorböden und den damit verbundenen CO<sub>2</sub> Emissionen entgegenzuwirken. Zugleich kann

hierdurch die notwendige Suche nach neuen Verdienstmöglichkeiten für Landwirte unter den veränderten Bedingungen vorangetrieben und gefördert werden.

In der Po-Ebene in Italien und der Camargue in Südfrankreich bestehen Überlegungen, Typha-Felder den Reisterrassen nachzuschalten und als Nährstoffpuffer zu Wasserschutzbereichen zu platzieren. Hierdurch soll zugleich ein vielseitiger und dort knapper Rohstoff erzeugt werden, der höhere Erträge bietet als der Reisanbau. Dabei tritt der Typha Anbau nicht in Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion. Es scheint schlüssig zu fordern, dass nachwachsende Rohstoffe nicht die Nahrungsmittelproduktion verdrängen dürfen. Hier aber, helfen diese Flächen, die Qualität und Gewinnung unseres wichtigsten Grundnahrungsmittels Wasser zu verbessern.

Ganz grundsätzlich gewinnt die Bioökonomie und die damit verbundene Kreislaufwirtschaft eine steigende Bedeutung, erkenntlich auch daran, dass zunehmend politische Strategiepapiere zur Förderung und Umsetzung bioökonomischer Fragestellungen entstehen. Gerade diesbezüglich kann der Einsatz von Typha zur Baustoffherstellung einen besonderen Beitrag liefern, da nicht nur der Anbau wesentliche Umweltvorteile mit sich bringt, sondern durch den Einsatz im Bau der gespeicherte Kohlenstoff jahrzehntelang gebunden wird. Hinzu kommt, dass durch den hierbei möglichen Verzicht der Beimengung von Bioziden oder Brandschutzmitteln und die damit verbundene direkte Kompostierbarkeit ein Einsatz nahe dem Cradle-to Cradle Prinzip möglich ist.

## Literaturverzeichnis

- [1] Prof. Dr. J. Pfadenhauer, S. Heinz; Multitalent Rohrkolben -Ökologie, Forschung, Verwertung Broschüre zum Abschlussbericht des DBU-Projektes „Rohrkolbenanbau in Niedermooren – Integration von Rohstoffgewinnung, Wasserreinigung zu einem nachhaltigen Nutzungskonzept“ im Donaumoos 1998-2001, TU München, Lehrstuhl für Vegetationsökologie.
- [2] Theuerkorn, W.; Fritsch, A.; Mach, M.; Krus, M; Großkinsky, Th.; Fitz, C. Theuerkorn, D. Knodt, H. Walter, U.: Neuer Baustoff für umweltfreundliche und bautechnische Sanierung in der Denkmalpflege. DBU-Bericht (Förderkennzeichen AZ 27918)
- [3] Prof.-Dr.-Ing M. Faulstich: SRU Umweltgutachten 2012, Verantwortung für eine begrenzte Welt
- [4] DIN EN 826:2013-05: Wärmedämmstoffe für das Bauwesen - Bestimmung des Verhaltens bei Druckbeanspruchung; Deutsche Fassung EN 826:2013
- [5] DIN 4108-10:2015-12: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 10: Anwendungsbezogene Anforderungen an Wärmedämmstoffe - Werkmäßig hergestellte Wärmedämmstoffe
- [6] DIN EN 12089:2013-06: Wärmedämmstoffe für das Bauwesen - Bestimmung des Verhaltens bei Biegebeanspruchung; Deutsche Fassung EN 12089:2013
- [7] DIN EN 13501-1:2019-05: Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten - Teil 1: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Prüfungen zum Brandverhalten von Bauprodukten; Deutsche Fassung EN 13501-1:2018
- [8] ISO 5660-1:2015-03: Prüfungen zum Brandverhalten von Baustoffen - Wärmefreisetzungs-, Rauchentwicklungs- und Masseverlustrate - Teil 1:Wärmefreisetzungsrate (Cone Calorimeter-Verfahren) und Rauchentwicklungsrate (dynamische Messung).
- [9] DIN EN 12664:2001-05: Wärmetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung des Wärmedurchlasswiderstandes nach dem Verfahren mit dem Plattengerät und dem Wärmestrommessplatten-Gerät - Trockene und feuchte Produkte mit mittlerem und niedrigem Wärmedurchlasswiderstand; Deutsche Fassung EN 12664:2001
- [10] DIN EN ISO 12572:2017-05: Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit - Verfahren mit einem Prüfgefäß (ISO 12572:2016); Deutsche Fassung EN ISO 12572:2016
- [11] DIN EN ISO 15148:2018-12: Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten bei teilweisem

- Eintauchen (ISO 15148:2002 + Amd 1:2016); Deutsche Fassung EN ISO 15148:2002 + A1:2016
- [12] Krus, M., Holm, A.: Approximationsverfahren für die Bestimmung feuchte-technischer Materialkennwerte. Proceedings 10. Bauklimatisches Symposium Dresden, 27.-29. September 1999, S. 423-432.
- [13] DIN 52103:1986-09:Prüfung von Naturstein und Gesteinskörnungen; Bestimmung von Wasseraufnahme und Sättigungswert
- [14] DIN EN ISO 12571:2013-12: Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung der hygroskopischen Sorptionseigenschaften (ISO 12571:2013); Deutsche Fassung EN ISO 12571:2013
- [15] Krus, M.: Bestimmung der Feuchtespeicherfunktion. IBP-Mitteilung 23 (1996) Nr. 292..
- [16] Holm, A.; Krus, M.; Künzel, H.M.; Tanaka, E.: Approximation der Feuchtespeicherfunktion aus einfach bestimmbar Kennwerten. The JTCCM Journal, Vol. 43, Dezember 2006.
- [17] Binder, A., Zirkelbach, D., Künzel, H. M. 2010. Test Method to quantify the wicking properties of insulation materials designed to prevent interstitial condensation. Proceedings of the Buildings XI International Conference. Clearwater Beach, USA. 119 p.
- [18] Künzel, Hartwig M.: Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten, Dissertation Lehrstuhl Bauphysik, Fakultät Bauingenieur- und Vermessungswesen der Universität Stuttgart, 1994
- [19] Künzel, H.M. (1999): Praktische Beurteilung des Feuchteverhaltens von Bauteilen durch moderne Rechenverfahren. WTA-Schriftenreihe, Heft 18, Aedificatio Verlag.
- [20] Krus, M.; Holm, A.; Sedlbauer, K.; Künzel, H.M.: Sanierung und die Folgen – rechnerische Betrachtung ausgewählter Beispiele. In: Venzmer, H. (Hrsg.): Europäischer Sanierungskalender 2007. Berlin: Beuth (2007), S. 45-70..
- [21] Zirkelbach D.: Hygrothermische Simulation - Anwendungsmöglichkeiten in der Planung. Würth Planermagazin ql<sup>2</sup>/8 (2016) 1, p. 28-34.
- [22] Vertal, M., Vaskova, A., Korjenic, A., Katunsky, D.: Fallstudie zum Trocknungsverhalten von Außenwandkonstruktionen aus Porenbeton mit Wärmedämmverbundsystem. BAUPHYSIK (2016) 36, p. 378-388.
- [23] Sedlbauer, K.: Vorhersage von Schimmelpilzbildung auf und in Bauteilen. Dissertation Universität Stuttgart (2001).

- [24] Krus, M.; Sedlbauer, K.: Innendämmung und Schimmelpilzproblematik. Internationaler Innendämmkongress, 20.-21. Mai 2011. Dresden Tagungsunterlage S. 53-64. ISBN 3-940117-07-06.
- [25] DIN 4108-2:2013-02: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz.
- [26] Kölsch Ph.: Hygrothermische Simulation von hinterlüfteten Steildächern mit effektiven Übergangsparametern. Ergänzte und editierte Fassung 01/2017. Online Ressource Selbstverlag 2017, 11 S.
- [27] DIN 68800-2:2012-02: Holzschutz - Teil 2: Vorbeugende bauliche Maßnahmen im Hochbau
- [28] WTA Merkblatt 6-8-16/D:2016-08: Feuchtetechnische Bewertung von Holzbauteilen - Vereinfachte Nachweise und Simulation.
- [29] EnOB - Energetisches Bewertungsverfahren für Bestandsgebäude mit Holzbalkendecken. Projektnummer: 0329663N/P/O. Laufzeit: 01.02.2012 bis 31.09.2016.