

Jorg Thöming, Michael Baune,
Wiebke Veltzke, Robin Brückner

Papierschaumplatten auf Basis von recyceltem Papierstaub – Material- und Verfahrensentwicklung

F 2833

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlußberichtes einer vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung -BMVBS- im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2013

ISBN 978-3-8167-8928-4

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00

Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

www.irb.fraunhofer.de/tauforschung

FORSCHUNGSINITIATIVE ZukunftBAU

des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung
(BMVBS), vertreten durch das Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und
Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und
Raumordnung (BBR)

Abschlussbericht

„Papierschaumplatten auf Basis von recyceltem Papierstaub – Material- und Verfahrensentwicklung“

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstituts für Bau-, Stadt-, und Raumforschung gefördert. (Aktenzeichen: SF – 10. 08. 18.7 – 09.37 / II 2 – F20-09-225) Die Verantwortung für den Inhalt liegt beim Autor.

Antragsteller:

Universität Bremen, vertreten durch den Rektor

Federführende Forschungseinrichtung:

Universität Bremen, Zentrum für Umweltforschung und nachhaltige Technologien, UFT

Projektverantwortlicher:

Prof. Dr.-Ing. Jorg Thöming

Projektleiter:

Dr. rer. nat. Michael Baune

Projektmitarbeiter:

Wiebke Veltzke, Robin Brückner

Inhaltsverzeichnis

Nomenklatur	3
Einleitung	4
Ziel des Projektes und Vorgehensweise	4
1 Versuche zur Herstellung von Testmaterial.....	5
1.1 Zusammenstellung geeigneter Rohmaterialien.....	5
1.1.1 Bindemittel	6
1.1.2 Funktionale Zuschlagsstoffe.....	7
1.2 Verfahrensentwicklung - Herstellung von Proben	8
2 Analyse und Beurteilung der Dämmmaterialparameter	13
2.1 Wärmeleitfähigkeit	13
2.2 Schallabsorption	14
2.3 Brandverhalten.....	17
2.4 Hydrophobierung.....	19
2.5 Schimmelverhalten	24
2.6 Porengrößenverteilung.....	31
3 Validierung der Funktionsmuster	32
3.1 Untersuchungen zur mechanischen Stabilität und zum Bruchverhalten.....	32
3.2 Oberflächenbehandlung (Lackieren, streichen, verputzen)	36
3.3 Untersuchungen zur Kaschierung	38
3.4 Erstellung von Konzepten sowie Anschauungs-und Präsentationsmaterialien	39
4 Umsetzungsmöglichkeiten	40
5 Gesamtfazit zum Projektverlauf.....	41
Quellenverzeichnis	42

Nomenklatur

α	Schallabsorptionsgrad	
λ	Wärmeleitfähigkeit	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
AB	Acrylbinder	
BM	Bindemittel	
CFNA	Celluloseflocke mit Aluminiumhydroxid und Ammoniumpolyphosphat	
CHD	Chitosan D	
CHK	Chitosan K	
CMC	Carboxymethylcellulose	
h.v.	hoch viskos	
hydr.	hydrophobiert	
KK	Kraftkleister	
KL	Kleister, leicht	
KS	Spezialkleister	
LG	Lignin	
m.v.	medium viskos	
MC	Methycellulose	
$NaHCO_3$	Natriumhydrogencarbonat	
N-Q-Plot	Normal-Quantil-Plot	
n.v.	niedrig viskos	
PS	Papierstaub	
PSHB	Papierstaub mit hohem Boratgehalt (25,14 %)	
PSNB	Papierstaub mit normalem Boratgehalt (4,79 %)	
PSOB	Papierstaub ohne Borat (0,38 %)	
THB	Transient Hot Bridge-Verfahren	
TM	Triebmittel	

Einleitung

Der schonende Umgang mit Ressourcen gewinnt immer mehr an Bedeutung. Konsumenten fordern einen verantwortungsbewussten Umgang von Rohstoffen und Energie, besonders im Hinblick auf endliche Ressourcen wie Erdöl. Die Wertstoffrückgewinnung nimmt dabei einen wichtigen Platz ein. Sowohl Recycling, als auch die Verwendung von anfallenden Reststoffen beim Recycling spielen dabei eine Rolle. Die Entwicklung von Produkten aus Reststoffen ist daher ein wünschenswerter Weg, Ressourcen zu schonen und die Kosten der Entsorgung zu minimieren.

Der vorliegende Abschlussbericht entstand im Rahmen des Projekts „Papierschaumplatten auf Basis von recyceltem Papierstaub –Material- und Verfahrensentwicklung“, in dem der beim Recycling von Altpapier anfallende Papierstaub verwertet werden soll. Könnte ein Produkt aus Papierstaub entwickelt werden, würde ein Abfallprodukt zum Wertstoff und die Qualität des Altpapiers würde verbessert [1], da Papierstaub die weitere Aufbereitung des Altpapiers kritisch beeinflusst. Weitere in diesem Projekt verwendete Reststoffe bestehen aus Altpapier, das schon heute in einem fast geschlossenen Kreislauf recycelt werden kann.

Bisher wird Altpapier hauptsächlich im Kreislauf recycelt und zur Herstellung neuer Papiere, Pappen und Verpackungsmaterialien verwendet. Daneben wird Altpapier beispielsweise zur Herstellung faserverstärkter Gipsbauplatten (EP 0590 095 B1), Dämmmaterial (DE 3420195 C2) im Innenbereich oder für absorbierende Materialien (EP 0926 294 B 1) genutzt.

Mögliche Anwendungsgebiete sind der Einsatz der Platten als Dämmstoff in der Bauindustrie, oder die Verwendung als Leichtschaumplatten im Displaybereich. Da jede dieser Anwendungen unterschiedliche Anforderungen an die Materialien stellt, ist es unabdingbar, das Material durch verschiedene Zuschlagsstoffe modifizieren zu können. Insbesondere der mögliche Einsatz des Materials in der Baubranche stellt einige wichtige Vorbedingungen an die Eigenschaften des Materials, wie Brand- und Schimmelverhalten, mechanische Stabilität, Hydrophobierung, Schallabsorption und Wärmeleitfähigkeit.

Ziel des Projektes und Vorgehensweise

Ziel des Projektes ist die Entwicklung eines Verfahrens zur Herstellung von gebundenen Produkten aus recyceltem Papierstaub, sowie deren Charakterisierung und Modifikation. Des Weiteren soll ein geeignetes Anwendungsgebiet für diese cellulosehaltigen Produkte gefunden werden.

Um diese Ziele zu erreichen werden verschiedene Herstellungsverfahren entwickelt um den Papierstaub zu binden. Diese Proben werden auf unterschiedlichste Eigenschaften hin untersucht, um so geeignete Anwendungsbereiche ermitteln zu können.

1 Versuche zur Herstellung von Testmaterial

Im Folgenden wird vorgestellt, wie aus dem Ausgangsstoff ein gebundenes Produkt entsteht. Dazu werden zunächst die Ausgangsstoffe und die, für die Herstellung benötigen, zusätzlichen Stoffe vorgestellt. Danach werden die Herstellungsprozesse erläutert.

1.1 Zusammenstellung geeigneter Rohmaterialien

Die Ausgangsmaterialien aus cellulosehaltigen Reststoffen unterscheiden sich in ihrer Struktur, und ihrem Anteil Brandhemmer. Dies führt zu unterschiedlichen Herstellungsrezepten der Papierplatten, je nach Ausgangsmaterial, Herstellungsart und Produkt. Eine genauere Betrachtung der Ausgangsmaterialien ist daher unumgänglich. Zunächst werden die strukturellen Unterschiede aufgezeigt, später die verschiedenen Anteile der Brandhemmer geklärt.

Die strukturellen Unterschiede der Ausgangsmaterialien sind in den

Abbildung 1 bis Abbildung 4 deutlich zu erkennen. Der Papierstaub mit normalem Boratgehalt (4,79 % PSNB) ist am feinsten (Abbildung 1), die nächstgrößeren Reststoffe sind der Papierstaub mit hohem Boratgehalt (25,14 % PSHB, Abbildung 2) und die Celluloseflocke mit $\text{Al}(\text{OH})_3$ und $(\text{NH}_4)_5\text{P}_5\text{O}_{10}$ (Abbildung 3). Am größten ist der Papierstaub mit geringem Boratgehalt (0,38 % PSOB) (Abbildung 4).



Abbildung 1: Papierstaub (Feinstofffraktion), mit normalem Boratgehalt von 4,79 % (PSNB).



Abbildung 2: Papierstaub mit hohem Boratgehalt von 25,14 % (PSHB).



Abbildung 3: Celluloseflocke mit $(\text{NH}_4)_5\text{P}_5\text{O}_{10}$ (17,43 %), $\text{Al}(\text{OH})_3$ und Borat (0,74 %) (CFNA).



Abbildung 4: Papierstaub mit geringem Boratgehalt von 0,38 % (PSOB).

Um aus Papierstaub feste Produkte, also z.B. Pellets oder Platten, herstellen zu können, muss zum Papierstaub ein Bindemittel hinzugegeben werden. Darüber hinaus wird, um das Bindemittel und ggf. weitere Zuschlagstoffe vermischen zu können, Wasser zugegeben. Dies ist aus Sicht von Umwelt- und Nachhaltigkeitsaspekten unbedenklich. Bei den Zuschlagstoffen handelt es sich um Triebmittel, Hydrophobierungsmittel oder Faserstoffe, die hinzugefügt werden, um die Eigenschaften der Papierstaubprodukte zu variieren.

Die Anteile Brandhemmer in den Ausgangsmaterialien ist mittels photometrischer Analyse festgestellt worden.

- Papierfasern aus Altpapier mit geringem Boratgehalt 0,38 % (PSOB)
- Papierfasern aus Altpapier mit hohem Boratgehalt 25,14 % (PSHB)
- Papierstaub (Feinststofffraktion) mit normalem Boratgehalt 4,79 % (PSNB)
- Celluloseflocken mit $(\text{NH}_4)_5\text{P}_5\text{O}_{10}$ (17,43%), $\text{Al}(\text{OH})_3$ und Borat (0,74 %) (CFNA)

Der Boratgehalt in Baustoffen darf ab 01.01.2011 keinesfalls 5 % überschreiten. Die meisten untersuchten Proben sind aus dem Papierstaub mit 4,79 % Borat hergestellt worden. Nur in einigen speziellen Fällen ist der Papierstaub mit hohem Boratgehalt 25,14 % verwendet worden, z.B. wenn der Einfluss des Borats explizit ermittelt werden sollte. Alle anderen Proben unterschreiten den Grenzwert für den Boratgehalt im Produkt bzw. in der Probe. Da der Boratgehalt des Papierstaubs vermutlich negative Auswirkungen auf die Dämmeigenschaften des Produktes hat, sind Proben aus boratfreiem Papierstaub (0,38 % Borat) und Papierstaub mit hohem Boratgehalt (25,14 %) hergestellt worden, um ihren Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit und die Brennbarkeit zu überprüfen (vgl. Abschnitt 2.1 und Abschnitt 2.3).

1.1.1 Bindemittel

Als Bindemittel wurden Carboxymethylcellulose in verschiedenen Viskositäten, Methylcellulose, Gluten, Acrylbinder, Lignin, verschiedene Kleister sowie Knochenleim erprobt. Für das Herstellungsverfahren Freeze Gelation ist BegoSol K mit SiO_2 -Nanopartikel (Silica-Sol) als Bindemittel eingesetzt worden.

Carboxymethylcellulose und **Methylcellulose** sind ausgewählt worden, da aufgrund der strukturellen Ähnlichkeit zwischen dem Bindemittel und dem Papierstaub (Cellulose) eine gute Abbindung des Materials zu erwarten ist. Zudem sind sie kostengünstig und sehr gut verfügbar.

Gluten wurde ausgewählt, da es als Klebeeiweiß sehr gute Bindeeigenschaften mit Wasserlöslichkeit und Nachhaltigkeit verbindet, da es sich um einen nachwachsenden Rohstoff und um ein Abfallprodukt handelt das zum Beispiel bei der Glutenabtrennung aus Getreideprodukten anfällt. Zudem bleibt Gluten während des Trocknungsprozesses elastisch und verfestigt sich erst im Nachhinein (vgl. Brot), wodurch ein optimales Aufschäumen des Produktes erreicht werden soll.

Der handelsübliche **Acrylbinder** wurde aufgrund seines sehr geringen Preises, der einfachen Handhabung, sowie seiner außerordentlich guten Bindeeigenschaften ausgewählt. Allerdings müssen hier Abstriche bei der Nachhaltigkeit des Produktes gemacht werden, da es sich bei Acryl um einen synthetisch hergestellten Kunststoff handelt.

Lignin ist als mögliches Bindemittel gewählt worden, da es als „Kittsubstanz“ in Pflanzen dient. Die Struktur von **Lignin** ist sehr kompliziert. Es besteht aus unterschiedlichen Verbindungen,

deren Struktur nicht endgültig geklärt ist. Durch das Lignin ist die Pflanze in der Lage Druckspannungen aufzunehmen, analog dem Zementstein im Beton. Es ist ebenfalls ein Makromolekül und es besteht, im Gegensatz zur Cellulose, aus mehreren unterschiedlichen Monomeren [2].

Es sind unterschiedliche **Kleister** als Bindemittel eingesetzt worden, die hauptsächlich aus Methylcellulose, Stärkeether, Polyvinylacetatpulver und weiteren Additiven bestehen. Die Massenanteile variieren je nach Hersteller und Anwendungsgebiet.

Es wurden ebenfalls einige Versuche mit **Knochenleim** als Bindemittel vorgenommen. Knochenleim ist ein Glutinleim, der aus Knochen gewonnenem wird. Der Hauptbestandteil Glutin hat die Summenformel $C_{13}H_{20}N_4O_5$.

1.1.2 Funktionale Zuschlagsstoffe

Als Zuschlagstoffe werden alle Stoffe / Substanzen bezeichnet, die neben Papierstaub und Bindemittel in die Probe gegeben werden. Da verschiedene Zuschlagsstoffe verschiedene Eigenschaften der Proben beeinflussen, werden diese im Folgenden vorgestellt.

Textilfasern

Ein Ansatz zur Verbesserung der Dämmwirkung könnte der Einsatz von Textilfasern sein. Diese sind aufgrund ihrer hohen Verfügbarkeit (Altkleider), sowie ihrer Nachhaltigkeit (Abfallstoff, nachwachsender Rohstoff (bei Baumwolle)) ein hervorragender Zuschlagsstoff. Deshalb sind Papierplatten mit Baumwoll- und Polyesterfasern verschiedener Länge aus Altkleidern hergestellt und überprüft worden.

Hydrophobierungsmittel

Um einen Einsatz z.B. in der Bauindustrie zu ermöglichen, muss das Produkt hydrophobe Eigenschaften besitzen. Da Bauprodukte durch unsachgemäße Lagerung in Kontakt mit Wasser kommen können, muss ein etwaiges Endprodukt hydrophobiert oder zumindest teilhydrophobiert werden. Hierbei ist eine prozessintegrierte, durchgehende Hydrophobierung vorzuziehen, um ein Eindringen von Wasser, beispielsweise an Schnittkanten, zu vermeiden. Hierzu wurden zahlreiche Hydrophobierungsmittel getestet (s. Kapitel 2.4).

Brandschutzmittel

Das Zugeben eines Brandschutzmittels ist nicht notwendig, da drei von vier eingesetzte Papierstäube einen ausreichend hohen Anteil Brandschutzmittel beinhalten. Dies sind je nach Papierstaub entweder Borsäure (H_3BO_3) oder Ammoniumpolyphosphat ($(NH_4)_5P_5O_{10}$) und Aluminiumhydroxid ($Al(OH)_3$). Die Brandschutzmitte verhindert die Brennbarkeit des Produktes (Abb.1). Zudem wirkt das Brandschutzmittel Borsäure auch gegen Pilzwachstum, ist also Fungizid.

Fungizide

Die cellulosehaltigen Reststoffe können von Mikroorganismen, in erster Linie Pilze, verwertet werden. Um eine Zerstörung dieser auszuschließen werden prozessintegriert verschiedene Fungizide in die Probe eingebracht. Es werden verschiedene Möglichkeiten getestet, das

Schimmelwachstum zu verhindern. Neben der Möglichkeit in den Stoffkreislauf einzugreifen, wird versucht die Eigenschaften der Probe so zu gestalten, dass Pilzwachstum nicht mehr möglich ist (z.B. pH-Werteinstellung). Außerdem sind einige Fungizide mit unbekannter Wirkungsweise (Chitosan) getestet worden (vgl. Kapitel 0, Tabelle 4).

1.2 Verfahrensentwicklung - Herstellung von Proben

Die Papierstäube sollen in eine Leichtphase überführt werden, sodass ein Einsatz z.B. im Bau- und Displaybereich möglich wird. Da vielfältige Formen und Anwendungsgebiete denkbar sind, wurden verschiedene Methoden getestet. Neben dem Extrudieren sind auch Proben mittels Freeze Gelation hergestellt oder aufgeschäumt worden.

Eine Übersicht der grundlegenden Herstellungsschritte ist in Abbildung 5 dargestellt.

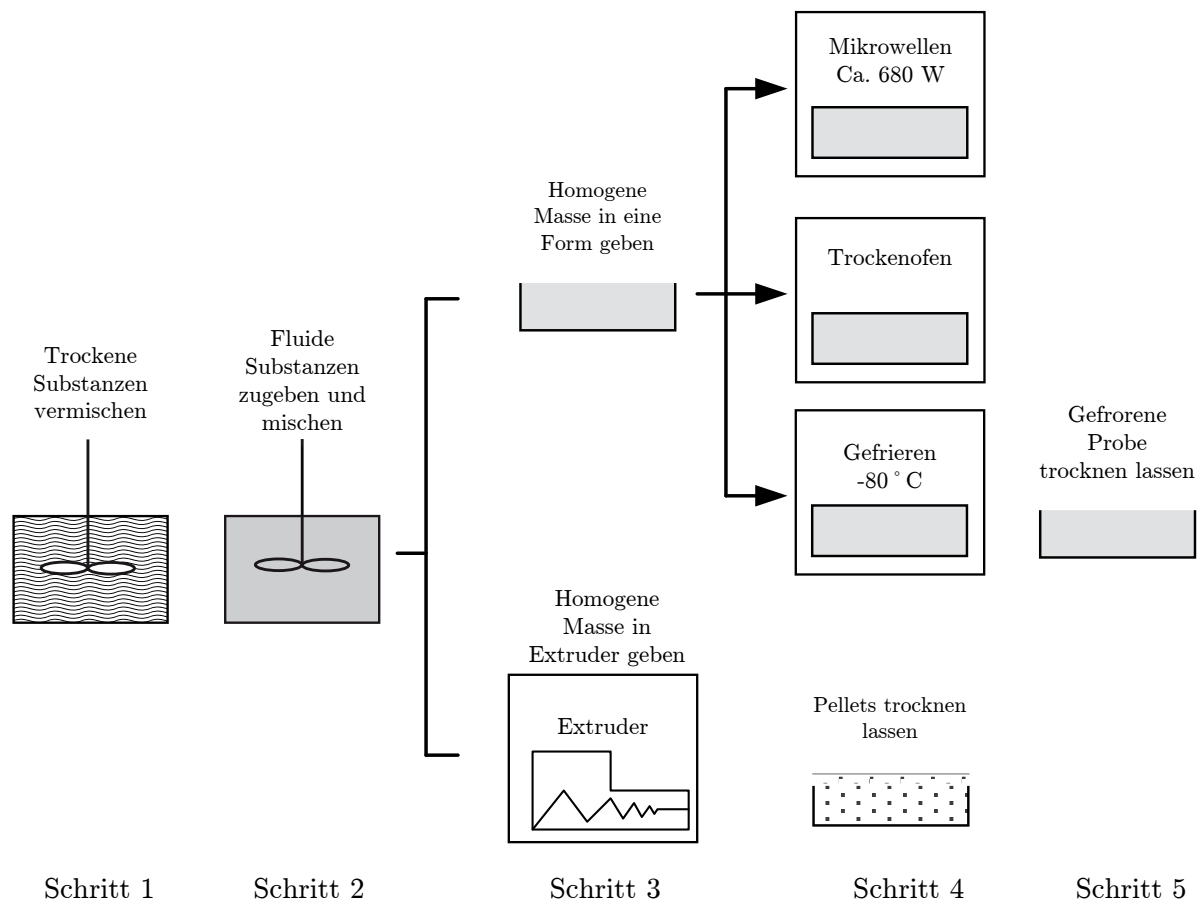


Abbildung 5: Entwickelte Herstellungsmöglichkeiten von Papierprodukten aus cellulosebasierten Reststoffen.

Variable Parameter bei der Herstellung / Aufschäumen

Es gibt unterschiedliche Wege die Papierstaubmasse aufzuschäumen. Eine Methode ist, das chemische Aufschäumen. Hierbei wird durch einen Zusatzstoff eine chemische Reaktion hervorgerufen, bei der es durch Gasentwicklung, zum Aufschäumen des Materials kommt. So kann die Probe durch Zusatz von Natriumhydrogencarbonat (NaHCO_3) als Triebmittel, beim Trocknen durch CO_2 -Entwicklung aufgeschäumt werden. Die Zersetzung des Triebmittels zu CO_2

Versuche zur Herstellung von Testmaterial

hat eine homogenere Porengrößenverteilung zur Folge, d.h. es werden mehr und kleinere Poren erzeugt (vgl. Abbildung 6 bis 8).

Eine weitere Methode ist, die Porosität durch den Wasseranteil und die Wahl des Bindemittels zu beeinflussen. Poröses Material wird auch durch Verdampfung des Wassers erreicht, sodass dieser Anteil einen starken Einfluss auf die Probenstruktur hat (vgl. Abbildung 8). Auch das gewählte Bindemittel führt, wie in Abbildung 9 zu erkennen, zu verschiedenen Porositäten. Diese drei Faktoren sind bei der Herstellung von Papierplatten mit Trocknung mittels Mikrowellen und im Trockenofen zu beachten.



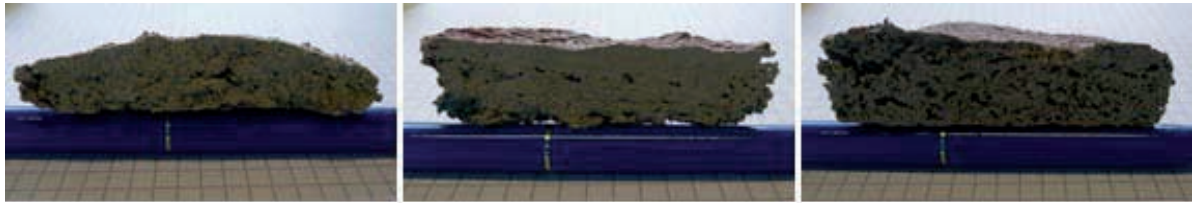
Abbildung 6: Papierplatte hergestellt ohne das Triebmittel NaHCO_3 .



Abbildung 7: Papierplatte hergestellt mit dem Triebmittel NaHCO_3 .



Abbildung 8: Porenverteilung bei Zugabe von unterschiedlichem Wassergehalt. Links sind 325 wt-% Wasser bezogen auf die Papierstaubmasse und rechts 250 wt-% Wasser bezogen auf die Papierstaubmasse.



Tapetenkleister

Gluten

Acrylbinder

Abbildung 9: Porosität der Strukturen, beim Einsatz verschiedener Bindemittel. Links Papierplatte hergestellt mit Tapetenkleister als Bindemittel, mittig Probe mit Gluten, rechts Papierplatte mit Acrylbinder.

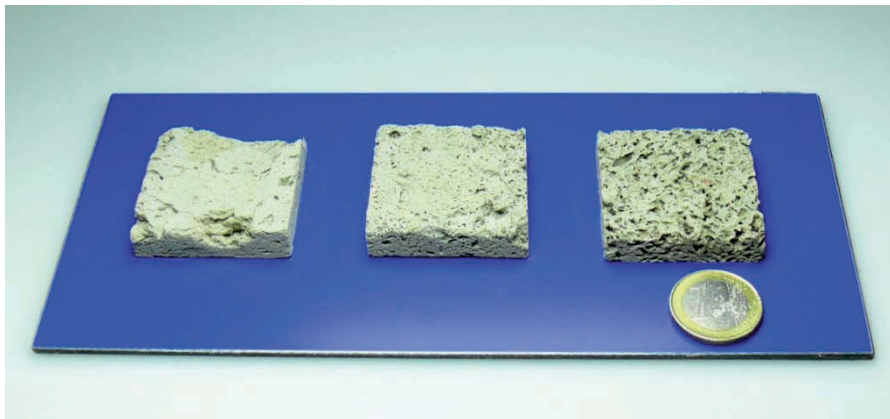


Abbildung 10: Der Wassergehalt nimmt von links nach rechts zu, die Porosität der Proben nimmt mit steigendem Wasseranteil zu.



Abbildung 11: Die Struktur der Proben variiert je nach Ausgangsmaterial, links Papierplatte mit geringem Boratgehalt (0,38 %), mittig Papierplatte mit 4,79 % Boratgehalt, rechts Papierplatte aus Celluloseflocke.

In den Abbildung 10 Abbildung 9 bis Abbildung 11 sollen die Variationsmöglichkeiten bei der Herstellung von Papierplatten deutlich gemacht werden. Diese Papierplatten sind alle mit demselben Herstellungsverfahren der Trocknung mittels Mikrowelle entstanden. Dennoch weisen sie große Unterschiede auf.

Wird der Papierstaub mit unterschiedlichen Bindemitteln verarbeitet, ergeben sich mehr oder weniger feste Papierplatten. In Abbildung 9 wird deutlich, dass die Porenverteilung stark vom gewählten Bindemittel abhängt. Während die Proben links und mittig eine sehr ungleichmäßige Porosität aufweisen ist bei der Probe rechts eine gleichmäßigere Verteilung zu erkennen. Auch die Anzahl der Poren ist deutlich größer. Neben den Bindemitteln ist auch der verwendete Wassergehalt entscheidend. Dieser Zusammenhang wird in Abbildung 10 deutlich. Dort sind drei Papierplatten zu sehen, die mit dem gleichen Bindemittel hergestellt worden sind, jedoch

Versuche zur Herstellung von Testmaterial

der Wassergehalt bezogen auf die Masse des Papierstaubs variiert. Auch hier sind deutliche Unterschiede der Porosität erkennbar. Neben dem Bindemittel und Wassergehalt kann auch das Ausgangsmaterial variiert werden. In Abbildung 11 sind Papierplatten mit demselben Bindemittel aber unterschiedlichem Ausgangsmaterial zu sehen. Diese sind jedoch mit unterschiedlichem Wassergehalt hergestellt worden, da sich die Wasseraufnahme der Ausgangsstoffe stark unterscheidet. Trotzdem ist ein deutlicher Unterschied in der Struktur zu erkennen.

Wie in den Abbildung 9 bis Abbildung 11 sehr gut erkennbar ist, variieren die Papierplatten sehr stark je nach Rezeptur. Daraus ergeben sich zahlreiche Variationsmöglichkeiten alleine bei der Betrachtung des Ausgangsmaterials, des Wassergehalts und des Bindemittels. Diese Möglichkeiten werden durch die Zugabe von Zuschlagsstoffen noch erweitert.

Herstellung mittels Freeze Gelation

Eine weitere Methode, die zur Erzeugung poröser Strukturen geeignet ist, ist die Herstellung mittels Freeze Gelation (Abbildung 5). Die mit dieser Methode hergestellten Proben sind in Bezug auf die Porosität sehr gut (Abbildung 12). Nachteilig ist jedoch, dass diese Methode äußerst kostenintensiv ist, weswegen hauptsächlich Proben mit der weitaus günstigeren Heißtrocknung getestet worden sind. Die Proben, hergestellt mittels Freeze Gelation, können vielfältige Formen annehmen und sind einfach zu verarbeiten. Daher ist ein Einsatz solcher Platten in Nischenanwendungen durchaus denkbar.

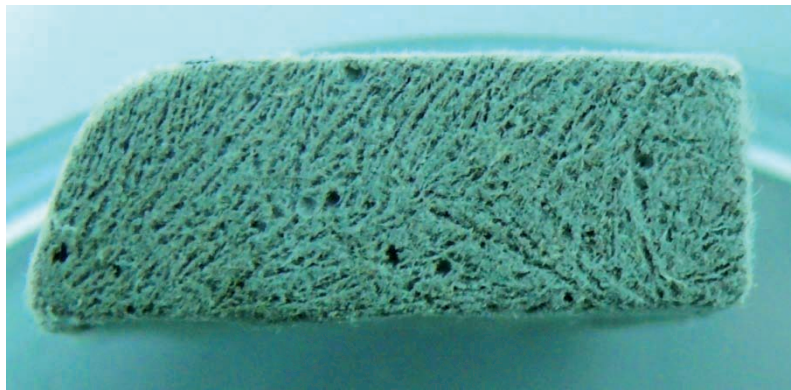


Abbildung 12: Struktur einer Probe hergestellt mittels Freeze Gelation.



Abbildung 13: Kleine Papierproben mit hoher Genauigkeit abgeformt mittels Freeze Gelation.

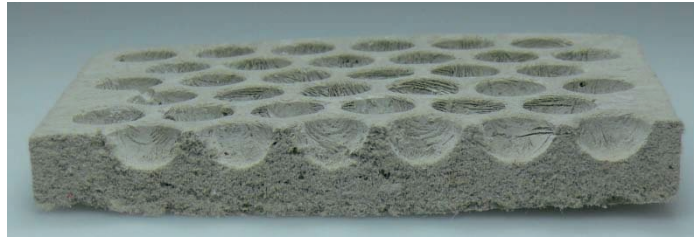


Abbildung 14: Vielfältige Formen werden bei der Herstellung mittels Freeze Gelation möglich.

Extrudieren

Da ein Extruder zur Herstellung von pelletiertem Material zur Verfügung stand, wurde die Möglichkeit in Betracht gezogen das Material zu extrudieren, was für die Produktion von Pellets aus dem gleichen Material schon ausführlich und erfolgreich getestet wurde. Trotzdem ein neuer Düsenkopf für die Extrusion von Plattenmaterial konstruiert worden ist, konnte damit keine Papierplatte hergestellt werden. Durch die hohe Klebkraft der Papiermasse und die sehr lange Trockenzeit ist das Herstellen von Papierplatten mittels Extrusion nicht möglich. Daher ist der Schwerpunkt auf andere Erfolg versprechendere Herstellungsmethoden gelegt worden.

2 Analyse und Beurteilung der Dämmmaterialparameter

Im nachfolgenden Kapitel, wird auf die einzelnen untersuchten Eigenschaften der hergestellten Papierprodukte eingegangen. Die untersuchten Eigenschaften der Papierprodukte sind oft weiter optimiert worden, um aufzuzeigen welche Spielräume sich durch ihre Variation ergeben.

2.1 Wärmeleitfähigkeit

Da sowohl die Struktur, als auch die physikalischen Eigenschaften des Papierstaubproduktes, eine Anwendung als Dämmstoff sinnvoll erscheinen lassen, wird auf die Analyse der Dämmeigenschaften besonders eingegangen.

Von den hergestellten Proben ist die Wärmeleitfähigkeit mit dem Transient Hot Bridge-Verfahren (THB) ermittelt worden. Die Ergebnisse in Tabelle 1 zeigen jeweils die Mittelwerte der Messungen.

Tabelle 1: Wärmeleitfähigkeiten λ (in $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$) ausgewählter Proben.

Zuschlagstoffe / Papierstaub	CMC	Papierstaub mit 4,79 % Borat (PSNB)			Wassergehalt in %**	Abmaße der Probe in mm
		Gluten	Tapeten- kleister	Acrylbinder		
-	-	0,126	0,127	0,116	250	70 x 70 x 20
Baumwolle / PSNB	-	0,128	0,106	0,100	250	70 x 70 x 20
Baumw. (kurz)* / PSNB	-	0,121	0,097	0,104	250	70 x 70 x 20
Polyester/ PSNB	-	0,131	0,113	0,101	250	70 x 70 x 20
Polyester (kurz) / PSNB *	-	0,104	0,103	0,112	250	70 x 70 x 20
Baumw., NaHCO_3 / PSNB	-	0,121	0,080	0,087	250	70 x 70 x 20
Silikonöl / PSNB	-	0,117	0,113	-	250	70 x 70 x 20
NaHCO_3 / PSNB	0,115	0,116	0,074	0,097	165	50 x 50 x 6
NaHCO_3 / PSOB	0,088	-	-	-	366	50 x 50 x 6
NaHCO_3 / PSHB	0,081	-	-	-	283	50 x 50 x 6
$\text{Al}(\text{OH})_3 +$ $((\text{NH}_4)_5\text{P}_5\text{O}_{10})$	0,084	-	-	-	366	50 x 50 x 6

*Die kurzen Baumwoll- und Polyesterfasern sind < 0,5 mm lang, die längeren Fasern > 6 mm.

**Wassergehalt in Prozent bezogen auf die Menge des eingesetzten Papierstaubs

Tabelle 1 ist zu entnehmen, dass die Wärmeleitfähigkeiten aller Proben über dem, für einen Dämmstoff erforderlichen, Wert von $0,04 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ liegen. Durch den Einsatz von Natriumhydrogencarbonat (NaHCO_3) als Triebmittel kann die Wärmeleitfähigkeit aber stark herabgesetzt werden. Dies zeigt, dass das Potential ein Produkt mit hoher Dämmwirkung zu

erstellen, vorhanden ist. Zudem wurden diese Messungen unter realen Bedingungen durchgeführt, d.h. bei normaler Luftfeuchte und ohne vorheriges Trocknen im Trockenschrank, sodass diese Messungen nicht auf die übliche Norm (EN 12667; ISO 1946) bezogen werden können. Die Bedingungen für die Messungen wurden absichtlich so gewählt, da hier die Beobachtung des Effekts der einzelnen Zuschlagsstoffe im Vordergrund stand und nicht der Absolutwert der Wärmeleitfähigkeit.

Ebenfalls aus der Tabelle ersichtlich ist, dass Proben mit Gluten als Bindemittel durchgehend die höchsten Wärmeleitfähigkeitswerte besaßen, was vermutlich an der netzartigen Struktur des Glutens nach der Verfestigung liegt. Bei den Proben mit Tapetenkleister oder Acrylbinder als Bindemittel, zeigt sich, dass durch Zuschlagstoffe die Wärmeleitfähigkeit signifikant gesenkt werden kann, wobei die Effekte durch die einzelnen Zuschlagstoffe jedoch nicht zwangsläufig kumulativ sind.

Überraschend ist, dass selbst bei Silikonöl, das als Hydrophobierungsmittel eingesetzt wurde und bei dem eigentlich eine Erhöhung der Leitfähigkeit zu erwarten war, eine absenkende Wirkung auf die Wärmeleitfähigkeit beobachtet werden konnte.

Da die Messung der Wärmeleitfähigkeit bei geringen Probenabmaßen durch die hohe Porosität erschwert ist, ist versucht worden einen größeren THB-Sensor und größere Papierplatten zu verwenden. Die Herstellung von sehr ebenen Papierplatten im Format A4 ist jedoch sehr zeitaufwändig und schwierig, sodass diese Messungen nicht mehr im Projektzeitraum durchgeführt werden konnten. Die noch anstehenden Messungen umfassen auch Mischungen der Ausgangsstoffe, die ein großes Potential zur Verbesserung der Probenstruktur und der Wärmeleitfähigkeit bilden. Auch eine Anpassung des Herstellungsprozesses birgt Möglichkeiten die Wärmeleitfähigkeit zu verbessern, z.B. durch die Wahl eines geeigneteren Bindemittels mit Schäumungseffekt und die Optimierung des Wassergehalts.

2.2 Schallabsorption

Um eine Aussage zum Schallverhalten der Papierplatten treffen zu können, werden Versuche zur Ermittlung des Schallabsorptionsgrads α durchgeführt. Der Schallabsorptionsgrad kann Werte zwischen $0 < \alpha < 1$ annehmen. Strebt der Wert gegen null, wird der Schall fast vollständig reflektiert, während bei einem Wert nahe eins, der Schall fast vollständig absorbiert wird. Da der Schallabsorptionsgrad frequenzabhängig ist, sollten die Messungen an den entsprechenden Frequenzbereich angepasst werden.

Die Papierproben werden in einem Impedanzrohr mittels Schallquelle mit einer stehenden Welle beschallt. Die reflektierte Welle wird durch zwei Mikrofone (M1 und M2) gleichzeitig gemessen, daraus kann der Schallabsorptionsgrad errechnet werden (vgl. Abbildung 15). Es werden Frequenzen von 50 Hz bis 1400 Hz jeweils in Schritten von 10 Hz eingestellt.

Analyse und Beurteilung der Dämmmaterialparameter

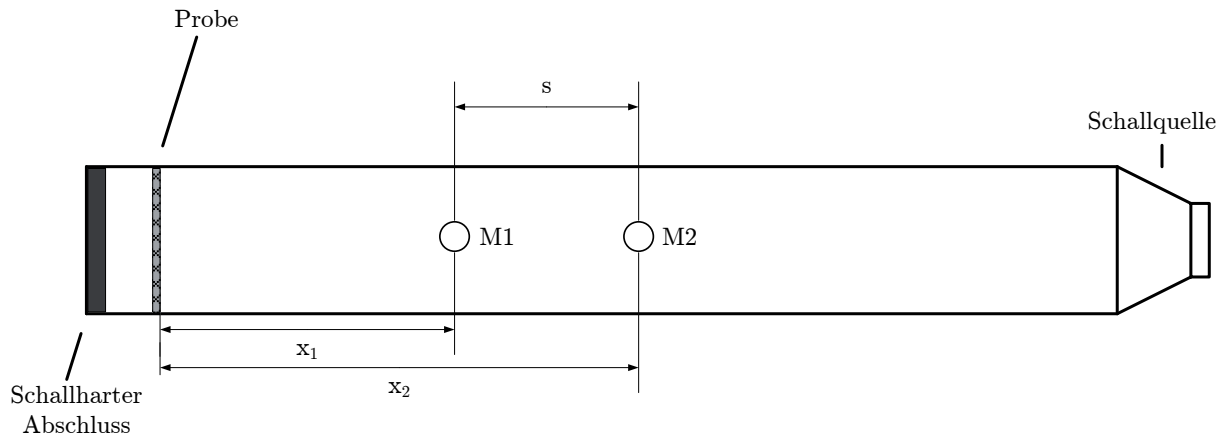


Abbildung 15: Schema zum Aufbau des Impedanzrohrs mit der Zwei-Mikrofon-Messmethode.

Für die Versuche werden drei runde Papierplattenproben mit einem Durchmesser von $d = 130 \text{ mm}$ hergestellt.

- PSNB mit NaHCO_3 , „Mikrowelle“ mit einer Höhe von ca. 25 mm
- PSNB mit Schäumungsmittel SB2, mit Cellulosepapier mit einer Höhe von ca. 12 mm
- PSNB mit Schäumungsmittel SB2, ohne Cellulosepapier mit einer Höhe von ca. 10 mm

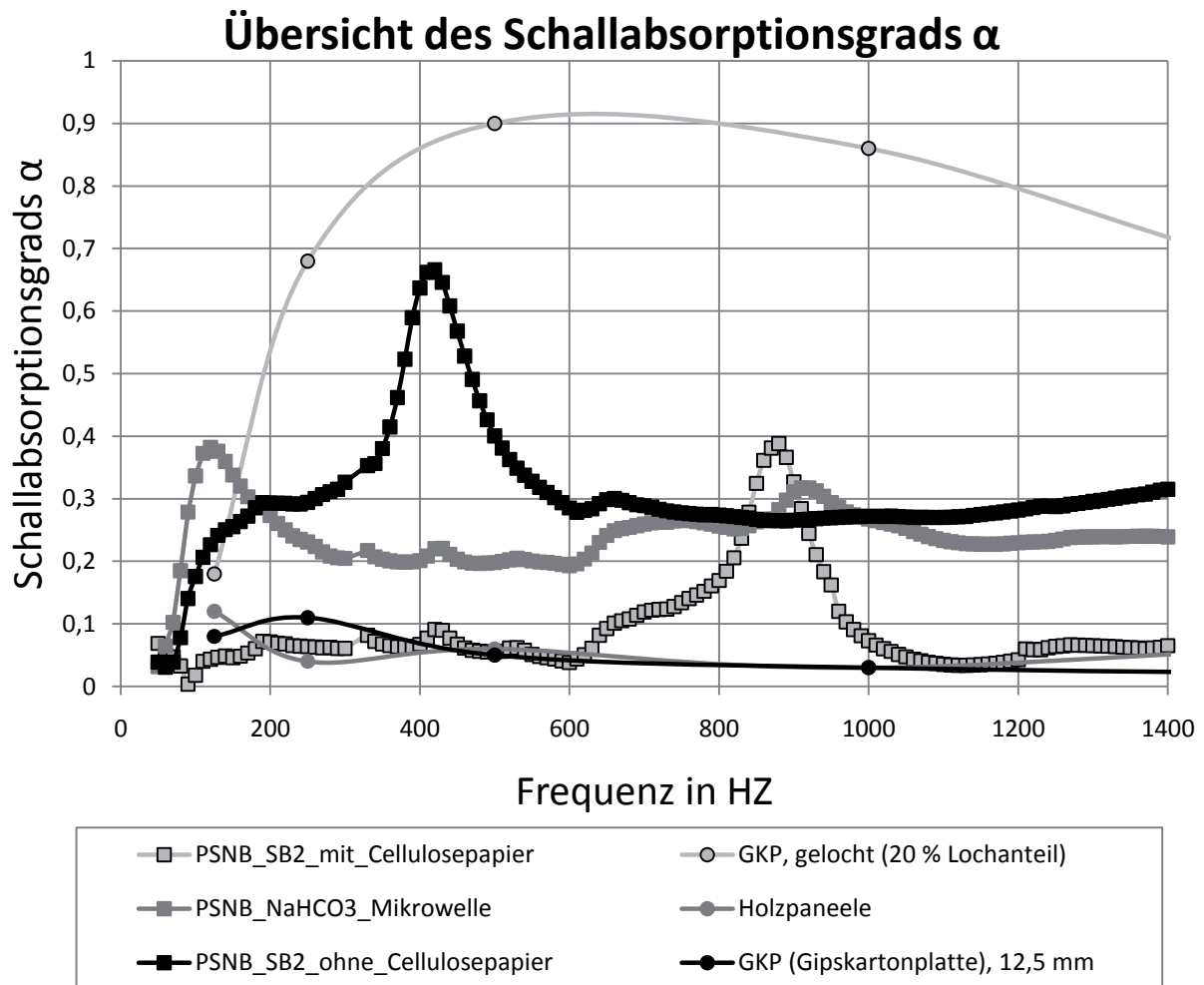


Abbildung 16: Übersicht der Messergebnisse zum Schallabsorptionsgrad α . Vergleichsmaterialien aus [3].

Die Ergebnisse der Messungen zeigen den Verlauf der Schallabsorptionsgrade verschiedener Papierplattenproben und Vergleichsmaterialien über die Frequenz. Die kaschierte Papierplatte weist, wie zu erwarten, wesentlich geringere Schallabsorptionsgrade auf, da die Kaschierung zu einer Reflexion der Schallwelle führt. Sowohl die geschäumte Papierplatte als auch die in der Mikrowelle hergestellte Platte zeigen gute Ergebnisse. Eine weitere Verbesserung könnte durch Bohrungen erreicht werden, analog der Gipskartonplatte (GKP).

2.3 Brandverhalten

Versuche zum Brandverhalten von Papierplatten sind notwendig, um einschätzen zu können, welche Brandstoffklasse erreicht werden kann. Auch wenn Celluloseflocken schon eine Zulassung als Bauprodukt haben, müssen Papierplatten aus Celluloseflocken auf ihr Brandverhalten hin untersucht werden, da sowohl die äußere Form, als auch die Zuschlagstoffe Einfluss auf das Brandverhalten haben.

Die Versuche zum Brandverhalten der Papierplatten sind in Anlehnung an DIN EN ISO 11925-2 durchgeführt worden[4]. Dabei wird die Probe über einen Zeitraum von 20 s mit einer 20 mm langen Flamme an der Kante im Winkel von etwa 45° beflammt. Die Papierplatten sind etwa 50 mm x 50 mm groß, sodass die Randbedingung der maximalen Flammhöhe nicht übernommen werden kann. Es sind alle vier Ausgangsmaterialien auf das Brandverhalten hin untersucht worden, jedoch nur als Platte, nicht in Form von Pellets. Die Platten sind, aufgrund der Ergebnisse der Biegefestigkeit, nur mit dem Bindemittel CMC medium viskos hergestellt worden mit dem Triebmittel NaHCO_3 . Wie bereits in Kapitel 1.1 erwähnt, sind einige der Ausgangsmaterialien aufgrund des Anteils an Brandhemmern nicht brennbar, sodass ein positiver Einfluss der Brandhemmer in den Papierplatten zu erwarten ist.

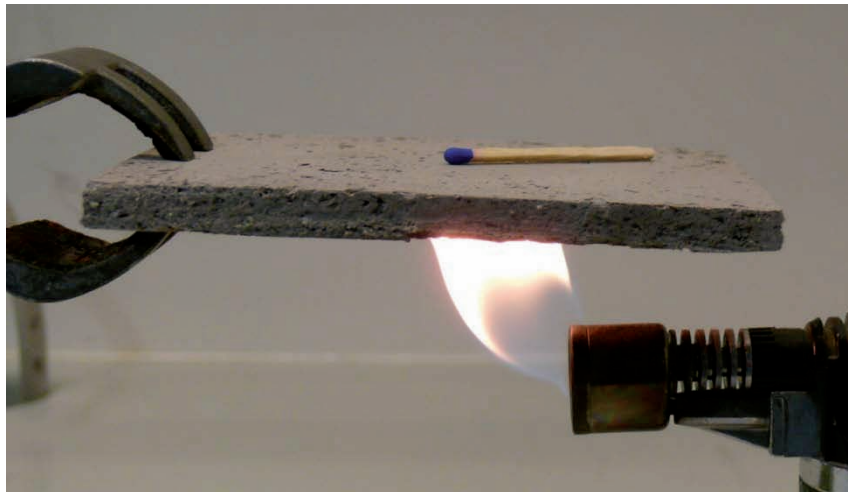


Abbildung 17: PSNB mit CMC als Bindemittel und NaHCO_3 als Triebmittel.



Abbildung 18: Papierplatte aus Papierstaub mit 4,79 % Boratgehalt, links während des Brandtests, rechts nach einer Flammdauer von 20 s ohne zu glimmen.



Abbildung 19: Papierplatte aus Papierstaub mit 25,14 % Boratgehalt, links während des Brandtests, rechts nach einer Flammdauer von 20 s ohne zu löschen, die Probe glimmt wenig.

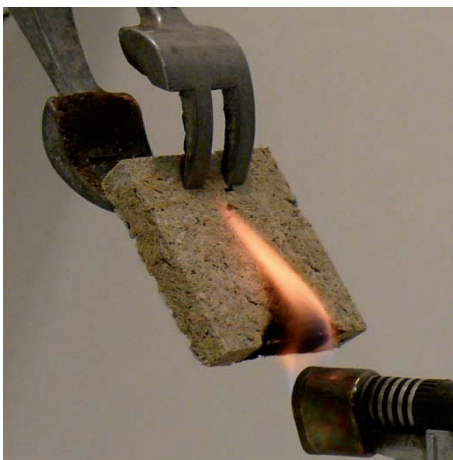


Abbildung 20: Papierplatte aus Celluloseflocken mit $(\text{NH}_4)_5\text{P}_5\text{O}_{10}$ (17,43 %), $\text{Al}(\text{OH})_3$ und Borat (0,74 %), links während des Brandtests, rechts nach einer Flammdauer von 20 s ohne zu löschen, die Probe glimmt wenig.



Abbildung 21: Papierplatte aus Papierstaub mit 0,38 % Boratgehalt, links während des Brandtests, rechts nach einer Flammdauer von 20 s ohne zu löschen, die Probe glimmt wenig.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Proben während des Versuchs keine große Flammbildung aufweisen. Nach der Flammdauer von 20 s ist keine offene Flamme zu erkennen, die Probe glimmt nur in drei Fällen (PSOB, PSHB, CF) und wird nach 30 s gelöscht (vgl. Abbildung 17 bis Abbildung 21). Anhand der Ergebnisse ist von einer Einstufung in Brandklasse B2 normalentflammbar auszugehen. Dies bedeutet, dass die Papierplatten als Bauprodukt eingesetzt werden könnten.

2.4 Hydrophobierung

Um das Einsatzgebiet der Papierplatten zu vergrößern, ist eine Hydrophobierung der Papierplatten untersucht worden. Da die im Papierstaub enthaltenen Cellulosefasern sehr große Mengen Wasser aufnehmen können, kann dies zu unterschiedlichen Problemen bei der Verarbeitung führen. Um Papierplatten wenigstens kurzzeitig gegen Wasserkontakt zu schützen sind daher umfassende Versuche zur Hydrophobierung durchgeführt worden. Hierbei wurden zahlreiche Hydrophobierungsmittel getestet, und deren Zusammenspiel mit den einzelnen Bindemitteln untersucht.

Um die Hydrophobierung zu charakterisieren, sind die Papierplatten mit Hilfe der, in den folgenden Abbildungen vorgestellten, Tests untersucht worden. Aus dem Abschneiden der Hydrophobierungsmittel in diesen drei Tests wird dann ein Ranking in Tabelle 3 erstellt.

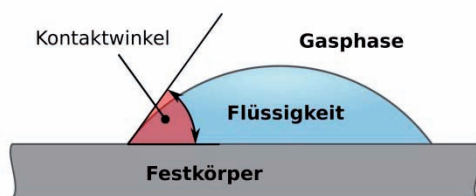


Abbildung 22: Schema Kontaktwinkelmessung, es wird der sich ausbildende Winkel zwischen Tropfen und Oberfläche gemessen-

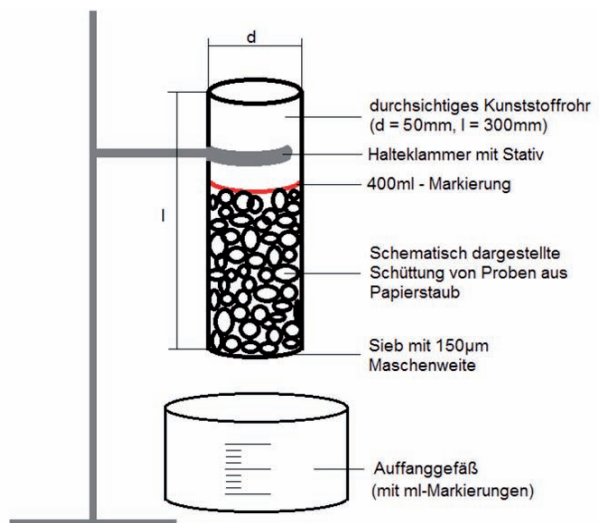


Abbildung 23: Schema zur Messung der Wasserabstoßung nach DIN EN 14316-1.

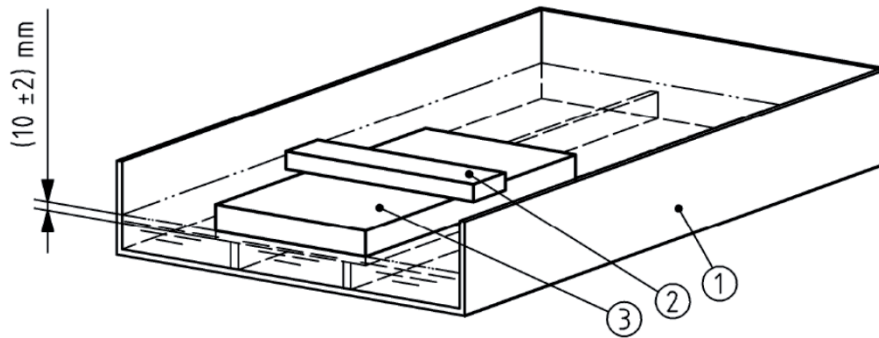


Abbildung 24: Schema zur Messung der Wasseraufnahme nach DIN EN 1609.

Bei der Kontaktwinkelmessung wird der sich ausbildende Winkel zwischen einer Oberfläche und einem Tropfen auf der Probe gemessen und die Zeit, bis der Tropfen in die Probe eingezogen ist (Abbildung 22).

Um die Wasserabstoßung (DIN EN 14316-1) zu ermitteln, werden 100 ml Wasser auf eine definiertes Volumen Schüttung gegeben und die unten aufgefangene Menge Wasser gemessen (Abbildung 23). Diese darf einen vorgegebenen Wert nicht unterschreiten.

Als dritter Test ist die Wasseraufnahme (DIN EN 1609) gewählt worden. Sie simuliert eine 24 Stunden dauernde Regenperiode (Abbildung 24).

In Tabelle 2 sind die untersuchten Hydrophobierungsmittel und deren Verarbeitung aufgelistet. Die Verarbeitung vor Trocknung bedeutet, dass das Hydrophobierungsmittel im Herstellungsprozess, also vor dem Trockenschritt, zugegeben wird. Nach der Trocknung bedeutet, dass die Hydrophobierungsmittel nach der Trocknung direkt auf die Oberfläche der Papierplatte aufgebracht werden.

Tabelle 2: Zur Herstellung der unterschiedlichen Proben verwendete Hydrophobierungsmittel.

Hersteller	Name	Wirkstoff	Verarbeitung
HydroTherm Group	Additherm Hydro	unbekannt	Vor Trocknung
Hydro Chemie INT GmbH	Porofin®	Paraffin	Vor Trocknung
unbekannt	Hydrophobierungsmittel auf Siloxanbasis	Siloxane	Vor und nach Trocknung
Dow Corning	DC520	Silane/Siloxane	Vor Trocknung
Xiameter	OFS0777	Siliconate	Vor und nach Trocknung
Solo Goya	Maskierfarbe	Latex	Vor Trocknung
TUNAP Firmengruppe	Silikonöl n.v. $\eta \approx 100 \text{ mPa}\cdot\text{s}$	Polydimethylsiloxan	Vor Trocknung
Fluka Chemika	Silikonöl DC 200, m.v. $\eta \approx 1000 \text{ mPa}\cdot\text{s}$	Polydimethylsiloxan	Vor Trocknung
Fluka Chemika	Silikonöl DC 200, h.v. $\eta \approx 3000 \text{ mPa}\cdot\text{s}$	Polydimethylsiloxan	Vor Trocknung

Analyse und Beurteilung der Dämmmaterialparameter

Die Zugabe eines Hydrophobierungsmittels führt nicht dazu, dass die Proben wasserabweisend werden, ihre Wasseraufnahme kann aber stark verlangsamt und die maximale Aufnahme deutlich verringert werden. Die Versuche zur Wasserabstoßung zeigen, dass für granulierten Proben die Grenzwerte für die Wasserabstoßung nach DIN EN 14316-1 [5] eingehalten und sogar deutlich überschritten wird. Der Mindestwert für abgestoßenes Wasser liegt bei 175 ml, wobei ein geringeres Wasservolumen bedeutet, dass die Proben mehr Wasser aufnehmen. Für nicht hydrophobierte Proben wurden 161 ml erreicht, während die Werte für alle hydrophobierten Proben zwischen 220 ml und 240 ml liegen. Damit ist die Wasserabstoßung bei allen hydrophobierten Proben im Rahmen der Norm.

Ebenso konnte durch Kontaktwinkelmessungen eine starke Hydrophobierung der Probenoberfläche nachgewiesen werden (Abbildung 25, links). Die Probe der links in Abbildung 25 wurde mit dem Hydrophobierungsmittel DC 520 der Firma Dow Corning hydrophobiert, während die Probe rechts in Abbildung 25 kein Hydrophobierungsmittel enthielt.

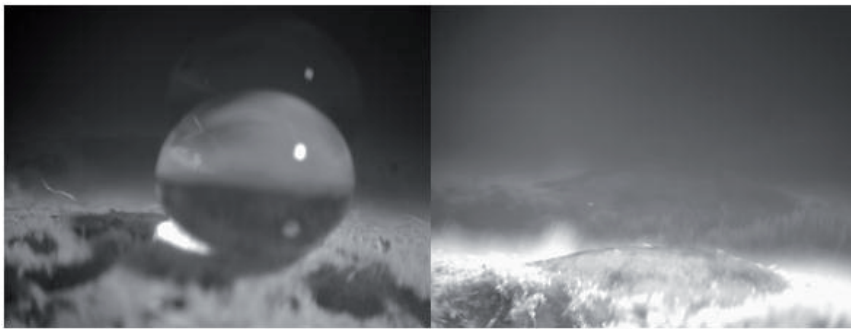


Abbildung 25: Vergleich zwischen einem Wassertropfen auf einer hydrophoben (links) und einer hydrophilen (rechts) Probenoberfläche.

Da Dämmstoffe aus Cellulose bis 20 % Feuchtigkeit aufnehmen können, ohne nennenswerte Einbußen bei Ihren Dämmeigenschaften hinnehmen zu müssen, ist die Hydrophobierung ggf. bereits ausreichend. Zudem ist eine regulierende Wasseraufnahme und -abgabe für ein gutes Raumklima förderlich, und somit eine vollständige Hydrophobierung nicht zwangsläufig wünschenswert. Da für Dämmstoffplatten aus Cellulose noch keine verbindlichen Normen in der Bauindustrie eingeführt wurden, können Tests nur in Anlehnung an genormte Verfahren für ähnliche Produkte durchgeführt werden.

Die Unterschiede der Hydrophobizität, lassen sich durch folgende Bildserien graphisch verdeutlichen (Abbildung 26 bis Abbildung 28)



Abbildung 26: Wassertropfen auf einer nicht hydrophobierten Probe nach 0 s (links) und 30 s (rechts).



Abbildung 27: Wassertropfen auf einer mit DC 520 hydrophobierten Probe nach 60 s (links), 180 s (mitte) und 300 s (rechts).



Abbildung 28: Wassertropfen auf einer mit Siliconaten hydrophobierten Probe nach 60 s (links), 300 s (mitte) und 600 s (rechts).

Hier zeigt sich der starke Einfluss des gewählten Hydrophobierungsmittels auf die Benetzbarkeit der Probe. Die Kontaktwinkelmessungen wurden sowohl auf den Außenflächen, sowie auch auf Schnittflächen im Inneren der Probe durchgeführt. Hierbei wurde festgestellt, dass auch hier die Wahl des Hydrophobierungsmittels entscheidend ist. Während bei den mit Siliconaten hydrophobierten Proben, die Kontaktwinkel im Inneren der Probe meist gleich gut oder besser waren, als auf den Außenflächen der Probe, waren bei den Proben, die mit DC 520 hydrophobiert wurden, die Kontaktwinkel auf den Außenflächen deutlich besser und blieben deutlich länger erhalten als innen.

In der folgenden Tabelle 4 ist das Abschneiden der Hydrophobierungsmittel in den verschiedenen Versuchen aufgelistet.

Tabelle 3: Bewertung des Abschneidens der Hydrophobierungsmittel in den durchgeführten Versuchen.

Versuch	Kontaktwinkel	DIN EN 14316	DIN EN 1609	Wasseraufnahme / Gewicht
1. Wahl	Siliconate	Siliconate	-	Siliconate
2. Wahl	Porofin	DC520	-	Silikonöl n.v.
3. Wahl	Silikonöl n.v.	Silikonöl n.v.	-	Porofin
4. Wahl	DC520, Silikonöl h.v.	Siloxane	-	Silikonöl h.v.
5. Wahl	Siloxane	Porofin	-	Siloxane
6. Wahl	Additherm Hydro	Additherm Hydro	-	Additherm Hydro

Analyse und Beurteilung der Dämmmaterialparameter

Die Bindemittel haben einen Einfluss auf die Hydrophobierung der Proben. Die Proben, die mit Acrylbinder hergestellt wurden, zeigen, wie zu erwarten, mit Abstand die besten Ergebnisse. Dies liegt daran, dass der Acrylbinder selbst über eine hydrophobierende Wirkung verfügt. Die mit Gluten gebundenen Proben zeigten ausreichende Ergebnisse, während die Ergebnisse bei Proben, mit Tapetenkleister als Bindemittel eher mangelhaft ausfallen (Abbildung 26 und Abbildung 27).



Abbildung 29: Wassertropfen auf einer mit Acrylbinder gebundenen Probe nach 0 s (links), 180 s (mitte) und 360 s (rechts).



Abbildung 30: Wassertropfen auf einer mit Gluten gebundenen Probe nach 0 s (links), 90 s (mitte) und 180 s (rechts).

Beide Proben auf den obigen Abbildung 29 und Abbildung 30 wurden mit dem gleichen Hydrophobierungsmittel behandelt.

Ist die durchgehende Hydrophobierung der Probe nicht erforderlich, können die Papierproben nachträglich oberflächlich hydrophobiert werden. Einfaches auftragen des Hydrophobierungsmittels ist dabei ausreichend. Vorteil dieser Methode ist, dass einzelne Oberflächen gezielt hydrophobiert werden können. Die Ergebnisse (Abbildung 31 und Abbildung 32) zeigen die sehr gute Wirkung der Hydrophobierungsmittel.



Abbildung 31: Nachträgliche Hydrophobierung mit OFS0777 von Xiameter.



Abbildung 32: Nachträgliche Hydrophobierung mit Hydrophobierungsmittel auf Siloxanbasis.

Sowohl die prozessintegrierte als auch die nachträgliche Hydrophobierung von Papierplatten ist möglich und führt zu sehr guten Ergebnissen, wobei die Wasseraufnahmefähigkeit dabei über die Wahl und den Anteil des Hydrophobierungsmittels einstellbar ist.

2.5 Schimmelverhalten

Um das Schimmelverhalten verschiedener Papierplatten beurteilen zu können, sind Versuche durchgeführt worden, in denen sowohl der Ausgangsstoff Papierstaub, als auch verschiedene Additive variiert worden sind (vgl. Tabelle 4).

Für diese Versuche sind hauptsächlich Papierplatten hergestellt worden die einen geringen Boratgehalt aufweisen, damit das Schimmelwachstum durch diesen nicht beeinflusst wird. Um auch beim Schimmelbefall gleiche Voraussetzungen zu schaffen, sind die Proben mit einer definierten Sporenlösung beimpft worden, sodass zu Beginn der Versuche auf allen Proben circa die gleiche Menge Sporen der gleichen Schimmelpilze sind. Als geeignete Schimmelpilze sind die in ISO 846 genannten Prüfpilze, *Aspergillus niger*, *Trichoderma viride*, *Paecilomyces variotii*, *Penicillium funiculosum* und *Chaetomium globosum* ausgewählt worden [6]

Um möglichst günstige Bedingungen für das Schimmelwachstum zu erreichen, sind die Papierplatten bei hoher Luftfeuchtigkeit und konstanter Temperatur von 20 °C gelagert worden. Die Proben sind, wie in den Abbildung 33 und Abbildung 34 zu sehen, so gelagert worden, dass der Wasserstand für eine konstante Luftfeuchtigkeit sorgt.

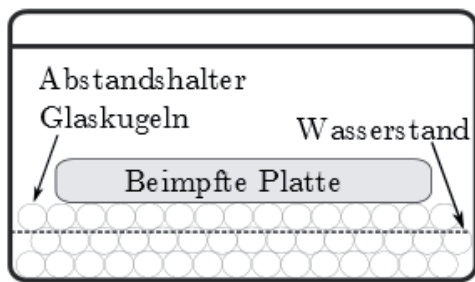


Abbildung 33: Schema der Probenlagerung.



Abbildung 34: Probenlagerung nach dem Impfen der Proben mit Sporenlösung.

Alle Proben sind in drei Gruppen, je nach Additiven, eingeteilt worden. In Gruppe 1 sind Proben aufgeführt, die durch den Einfluss der Additive auf die Probe ein Pilzwachstum nicht mehr ermöglichen (z.B. pH-Wert-Erhöhung). Die zweite Gruppe umfasst Proben, bei denen das Pilzwachstum durch direkten Eingriff der Additive in den Stoffwechsel gehemmt werden soll. Zuletzt sind in Gruppe drei alle Proben gelistet, die entweder keine Additive beinhalten oder deren Additive eine unbekannte Wirkung haben. Um das Schimmelverhalten definiert testen zu können, werden die Proben mit einer nach ISO 846 hergestellten Sporensuspension beimpft und über einen Zeitraum von 28 Tagen bei 28 °C (± 2 °C) im Brutschrank gelagert. Die Sporenlösung beinhaltet Pilzsporen von *Aspergillus niger*, *Trichoderma viride*, *Paecilomyces variotii*, *Penicillium funiculosum* und *Chaetomium globosum*, zu je gleichen Teilen.

Tabelle 4: Hergestellte Papierplattenproben, eingeteilt nach der fungiziden Wirkungsweise der Additive. Gruppe 1 beinhaltet alle Proben mit mindestens einem Umgebung beeinflussenden fungiziden Additiv, wobei die mit * gekennzeichneten Proben zwei Additive beinhalten. Mit ** gekennzeichnete Additive sind schon im Ausgangsmaterial enthalten und müssen bei der Plattenherstellung nicht zugefügt werden.

Lfd. Nr.	Bezeichnung	Additive	Probenanzahl
Gruppe 1 - Umgebung beeinflussende Additive			
1,2	PSOB ohne Sporen „Nullprobe“	1,2 g NaHCO ₃	2
3-5	PSOB + NaHCO ₃	1,2 g NaHCO ₃	3
6-8	PSOB + CHK* + NaHCO ₃	1,66 g CHK + 1,2 g NaHCO ₃	3
9-11	PSOB + CHD* + NaHCO ₃	1,66 g CHD + 1,2 g NaHCO ₃	3
12-14	PSOB + Hydr.* + NaHCO ₃	1,2 g Xiameter OFS-0777 + 1,2 g NaHCO ₃	3
15-17	PSOB + CU* + NaHCO ₃	0,0065 mg CuSO ₄ + 1,2 g NaHCO ₃	3
18-20	CFNA* + NaHCO ₃	1,2 g NaHCO ₃ + (NH ₄) ₅ P ₅ O ₁₀ ** + Al(OH) ₃ **	3
21-23	PSOB + Kalk	1,25 g Kalk	3
Gruppe 2 - Stoffwechsel beeinflussende Additive			
24-26	PSOB + CU	13 g H ₂ O mit 5 mg Kupfersulfat	3
27,28	PSNB	Borsäure**	2
29,30	PSHB	Borsäure**	2

Gruppe 3 - Additive mit unbekannter Wirkungsweise und Proben ohne Additive			
31-33	CFNA	$(\text{NH}_4)_5\text{P}_5\text{O}_{10}^{**} + \text{Al}(\text{OH})_3^{**}$	3
34	PSOB ohne Sporen „Nullprobe“	-	1
35,36	PSOB mit Sporen „Trockensteril.“	-	2
37-39	PSOB	-	3
40-42	PSOB + CHK	1,66 g CHK	3
43-45	PSOB + CHD	1,66 g CHD	3
46-48	PSOB + Hydr.	1,2 g Xiameter OFS-0777	3

Die Auswertung der Proben geschieht nach der Lagerung im Brutschrank in zwei Schritten. Zunächst werden alle Proben einer Sichtkontrolle mit bloßem Auge unterzogen. Proben bei denen Schimmelwachstum zu sehen ist, werden entsprechend bewertet. Ist mit bloßem Auge kein Schimmelwachstum zu erkennen, wird die Probe im zweiten Schritt unter dem Binokular betrachtet und dann entsprechend bewertet.

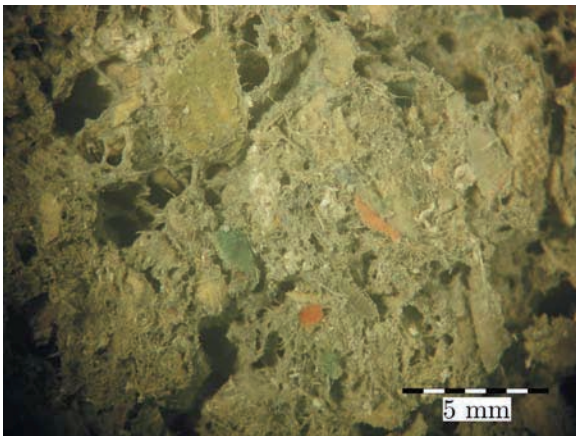


Abbildung 35: Papierplatte mit Additiv Kalk nach vierwöchiger Versuchsdauer. Mit bloßem Auge ist kein Schimmelwachstum erkennbar.

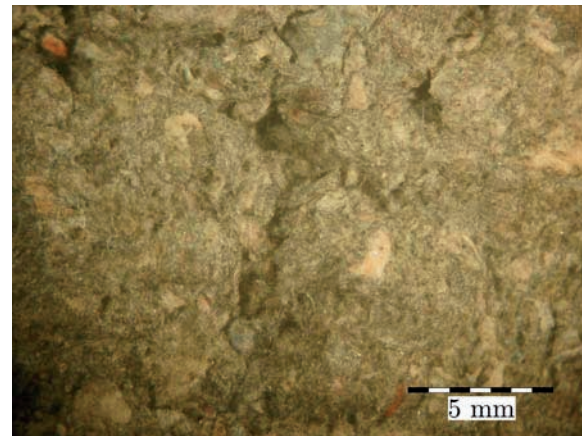


Abbildung 36: Papierplatte mit Additiv Chitosan D nach vierwöchiger Versuchsdauer. Mit bloßem Auge ist Schimmelwachstum erkennbar.

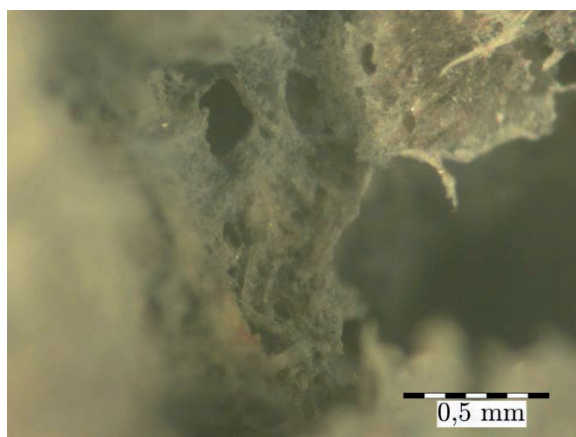


Abbildung 37: Papierplatte mit Additiv Kalk nach vierwöchiger Versuchsdauer. Unter dem Binokular ist kein Schimmelwachstum erkennbar.

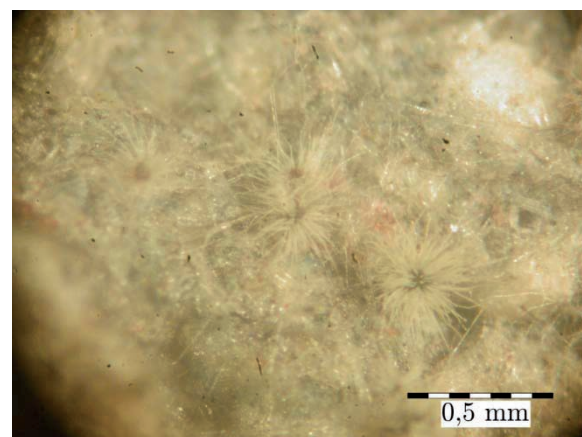


Abbildung 38: Papierplatte mit Additiv Chitosan D nach vierwöchiger Versuchsdauer. Unter dem Binokular ist die Pilzstruktur deutlich sichtbar.

Die Einstufung des Schimmelwachstums erfolgt dabei nach ISO 846, zu sehen in Tabelle 5.

Tabelle 5: Beurteilung des Schimmelwachstums nach ISO 846.

Wachstumsintensität	Beurteilung
0	Kein Wachstum bei mikroskopischer Betrachtung erkennbar.
1	Kein Wachstum bei bloßem Auge, aber unter dem Mikroskop klar erkennbar.
2	Wachstum mit bloßem Auge erkennbar, bis zu 25 % der Probenoberfläche bewachsen.
3	Wachstum mit bloßem Auge erkennbar, bis zu 50 % der Probenoberfläche bewachsen.
4	Beträchtliches Wachstum, über 50 % der Probenoberfläche bewachsen.
5	Starkes Wachstum, ganze Probenoberfläche bewachsen

Die Interpretation der Wachstumsintensitäten, also die Bewertung des Probenmaterials, ist sehr einfach. Proben die mit den Wachstumsintensitäten 0 bis 1 eingestuft werden, sind resistent gegen Schimmelwachstum oder weisen nur leichtes Wachstum auf. Diese werden als hinreichend resistent angesehen. Alle höheren Wachstumsintensitäten sind nicht ausreichend resistent gegen Schimmelwachstum, beinhalten also zu viele Nährstoffe um als Bauprodukt eingesetzt werden zu können. Um die Ergebnisse der Versuche auch statistisch auswerten zu können, sollten sie noch zwei weitere Versuchsreihen durchgeführt werden. Eine qualitative Interpretation der Ergebnisse ist trotzdem möglich.

Tabelle 6: Bewertung der Wachstumsintensität und Ergebnisse der pH-Wertmessung der Proben.

Lfd. Nr.	Probenbezeichnung	pH-Wert	Wachstumsintensität	Gew-% NaOH
Gruppe 1 - Umgebung beeinflussenden Additive				
1, 2	Nullprobe ohne Sporen PSOB + NaHCO ₃	10,4	0	8,42
3-5	PSOB + NaHCO ₃	10,4	0	8,42
6-8	PSOB + NaHCO ₃ + CHK	10,4	0	6,76
9-11	PSOB + NaHCO ₃ + CHD	10,4	0	6,76
12-14	PSOB + NaHCO ₃ + Hydr.	10,5	0	7,15
15-17	PSOB + NaHCO ₃ + CU	10,3	0	8,42
18-20	CFNA + NaHCO ₃	10,2	0	8,42
21-23	PSOB + KA	11,8	0	
Gruppe 2 - Stoffwechsel beeinflussende Additive				
24-26	PSOB + CU	9,4	1	
27, 28	PSNB	7,2	0	

29,3	PSHB	8,7	0	
Gruppe 3 - Additive mit unbekannter Wirkungsweise und Proben ohne Additive				
31-33	CFNA	7,7	1	
34	Nullprobe ohne Sporen PSOB	9,1	1	
35, 36	Trockensterilisiert mit Sporen PSOB	8,8	1	
37-39	PSOB	9,4	1	
40-42	PSOB + CHK	9,3	3	
43-45	PSOB + CHD	7,7	4-5	
46-48	PSOB + Hydr.	10	1	

Nach der Einzelbetrachtung der Papierplattenproben sollen auf den nächsten Seiten die Ergebnisse der Versuche in Zusammenhang mit den Additiven und ihren Wirkungsweisen gebracht werden. Dazu wird erst allgemein über die Ergebnisse berichtet, später dann auf jede Wirkungsweise eingegangen. Zuletzt werden die Ergebnisse kurz zusammengefasst. Da das Schimmelpilzwachstum vom pH-Wert abhängig ist [7], werden die Proben nach den fünf Wachstumsintensitäten aus Tabelle 6 bewertet und mit dem gemessenen pH-Wert in Tabelle 7 dargestellt. In Tabelle 6 sind die Proben nach den Wirkungsweisen der Additive in drei Gruppen eingeteilt. Die Wachstumsintensität beschreibt den nach vier Wochen Lagerung unter Versuchsbedingungen erkennbaren Schimmelbewuchs. Bis auf zwei Proben werden alle Plattenzusammensetzungen in den zwei geringsten Wachstumsintensitäten von 0 bis 1 eingestuft. Demnach sind bis auf die zwei Proben mit Chitosan, alle Proben gegen Schimmelwachstum resistent oder weisen nur leichtes Wachstum auf.

Nach IHD Verfahrensanweisung liegt der pH-Wert von Cellulose Einblasdämmstoffen (wie Celluloseflocken) bei ca. 8,8 [8]. Da diese Einblasdämmstoffe mit Boraten versetzt sind, werden eigene Messungen durchgeführt. Die Ergebnisse der pH-Wertmessung der cellulosehaltigen Reststoffe sind in Tabelle 7 aufgezeigt. Der Zusatz „Staub“ bedeutet, dass es sich um den unbehandelten Reststoff handelt. Es ist zu sehen, dass der pH-Wert der unbehandelten Reststoffe durch Zugabe von NaHCO_3 erwartungsgemäß sinkt. Ebenfalls lässt sich ein leichter Anstieg des pH-Wertes durch die Trocknung mittels Mikrowellen feststellen. Sobald das NaHCO_3 durch die Trocknung zerfällt, steigt der pH-Wert an. Dass dieser Effekt nicht auf die vierwöchige Lagerung der Proben zurückgeführt werden kann, wird durch die Referenzmessung belegt, bei der die Papierplatten mit NaHCO_3 direkt nach der Herstellung pH-Werte von 11,3 (PSOB + NaHCO_3 , Platte) und 11,1 (CFNA + NaHCO_3 , Platte) aufweisen.

Tabelle 7: Messergebnisse der pH-Werte von cellulosehaltigen Reststoffen vor und nach der Verarbeitung.

Probenbezeichnung	pH-Wert
PSOB, Staub	8,3
PSOB + NaHCO ₃ , Staub	8,1
PSOB, Platte	8,5
PSOB + NaHCO ₃ , Platte	11,5
PSHB, Staub	8,5
CFNA, Flocke	6,1
CFNA + NaHCO ₃ , Platte	11,1
CMC + H ₂ O (1:40)	7,7

Die cellulosehaltigen Reststoffe ohne Additive zeigen nur sehr leichtes Schimmelwachstum. Daher sind sie nicht stark von Pilzbefall gefährdet, solange keine für Schimmelpilze verwertbaren Additive in ihnen enthalten sind.

Die Additive Chitosan D und Chitosan K sind als fungizides Additiv ungeeignet, da sie als Nährstoff für Schimmelpilze dienen.

Von den verbleibenden Additiven (NaHCO₃, Kalk, Kupfersulfat, Borat) hat Kupfersulfat anscheinend keinen Einfluss auf das Schimmelverhalten, ist also in dieser Konzentration ungeeignet. Die Borsäure verhindert das Schimmelwachstum völlig. Es ist also möglich, durch das Eingreifen in den Stoffwechsel das Schimmelwachstum zu verhindern.

Das Additiv NaHCO₃ führt dazu, dass die Proben zu viel Wasser aufnehmen und daher ihre Festigkeit verlieren. Damit ist NaHCO₃ als Additiv höchstens eingeschränkt einsetzbar. Kalk hat als Additiv das Schimmelwachstum verhindert. Durch eine Anhebung des pH-Wertes kann das Schimmelwachstum effektiv verhindert werden.

Somit sind Kalk und Borsäure als potenzielle Additive einzusetzen. Aus ökologischer Sicht sollte abgewägt werden, welches Additiv in welchem Bereich eingesetzt werden kann. Kalk, als ökologisch schlecht bewertetes Additiv, steht dabei dem gesundheitlich nicht unbedenklichen Borat gegenüber. Die gesundheitlichen Risiken, die durch Schimmelwachstum entstehen können, sollten nicht durch den Einsatz der potenziell reproduktionstoxischen Borate [9] substituiert werden. Daher ist der Einsatz von Kalk als Additiv vorzuziehen. Allgemein ist die Erhöhung des pH-Wertes eine gute Möglichkeit das Schimmelwachstum zu hemmen.

Kritisch zu betrachten ist die in ISO 846 nur unpräzise geregelte Einteilung der Wachstumsintensitäten. Weiterhin findet keine Identifizierung der auf den Proben wachsenden Pilzspezies statt. Ebenfalls zu bemerken ist, dass der Versuch lediglich das Schimmelverhalten der ersten vier Wochen zeigt. Es ist möglich, dass die Proben nach einem längeren Zeitraum völlig anders bewertet werden müssten. Da es sich für Pilze um ein nicht optimales Substrat handelt, tritt das Wachstum verlangsamt auf. Um auch längerfristig das Pilzwachstum der Proben zu vermeiden, sollte ein fungizides Additive zugegeben werden.

Die Versuche zeigen den Einfluss von Additiven auf das Schimmelverhalten cellulosehaltiger Reststoffe, jedoch nicht ihren Einfluss auf weitere Eigenschaften. Der Einfluss der Additive auf

weitere Eigenschaften (z.B. mechanische Stabilität) sollte überprüft werden. Das Schimmelwachstum auf der hydrophobierten Papierplattenprobe bei sehr hohem pH-Wert ($\text{pH} = 10,0$) zeigt, dass weitere Kombinationen von fungiziden Additiven mit Hydrophobierungsmitteln untersucht werden sollten. In diesem Rahmen sollte die Wasseraufnahme der Papierplatten nicht unbeachtet bleiben. Hier kann ein Einfluss der fungiziden Additive nicht ausgeschlossen werden. Ebenfalls sollten Konzentrationsversuche der Additive durchgeführt werden, um so einen möglichst geringen Anteil zugeben zu müssen, gleichzeitig aber die fungizide Wirkung zu gewährleisten. Dies gilt besonders für die Additive Kalk und Borat. Insbesondere ist der Boratgehalt so gering wie möglich zu halten, um gesundheitliche Gefährdungen auszuschließen [10]. Auch eine Erhöhung der Kupferkonzentration sollte in Betracht gezogen werden. Die hier eingesetzte Konzentration ist zu gering um das Schimmelwachstum zu hemmen, aber weitere Versuche mit höheren Konzentrationen sind viel versprechend. Darüber hinaus sollten weitere Additive mit pH-Wert erhöhender Wirkung untersucht werden, da dies ein einfacher und effektiver Weg ist das Schimmelwachstum zu hemmen. Auch das Brandverhalten der Papierplatten mit fungiziden Additiven muss ermittelt werden. Dabei ist ein positiver Einfluss von Kalk zu erwarten. Borate werden ohnehin als Brandhemmer eingesetzt, sind also dahingehend unkritisch.

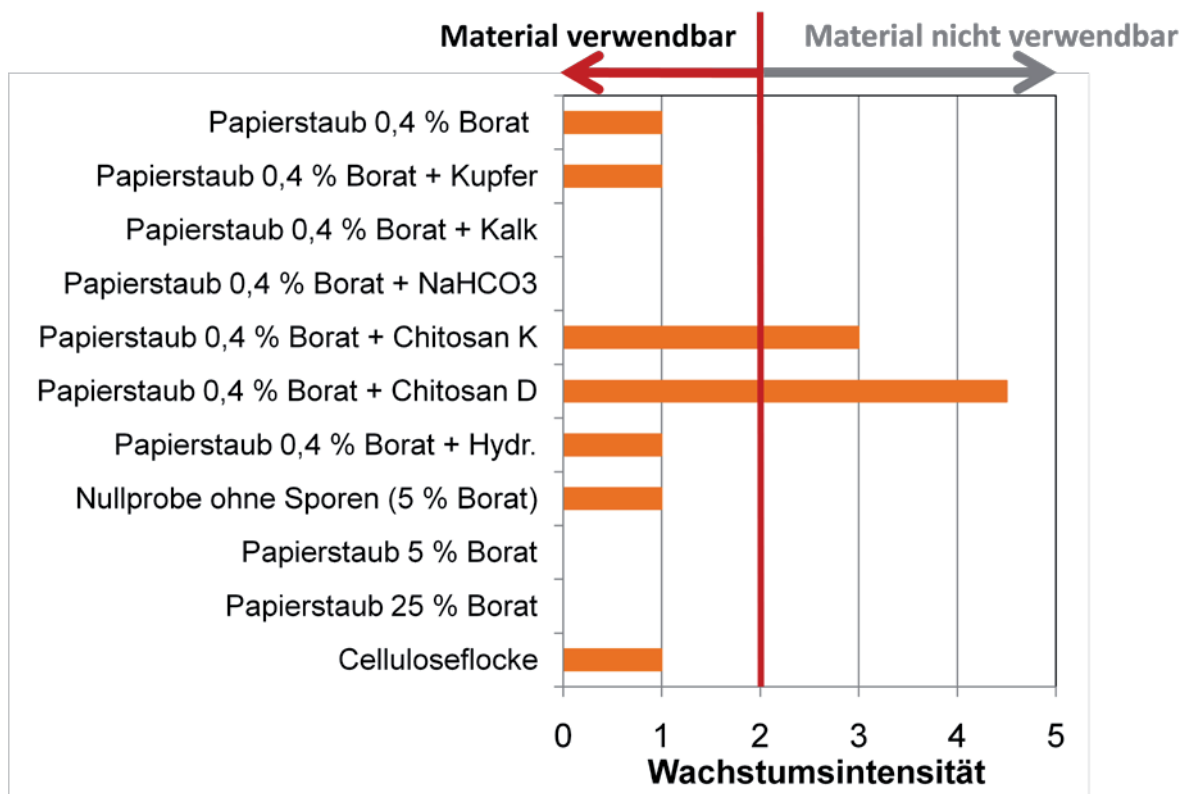


Abbildung 39: Wachstumsintensität ausgewählter Papierplattenproben.

Die Ergebnisse zeigen ein geringes Schimmelwachstum von Papierplattenproben aus cellulosehaltigen Reststoffen mit sehr geringem Boratgehalt von 0,38 % als auch bei Proben aus cellulosehaltigen Reststoffen mit den Brandhemmern NH_4PO_3 und $\text{Al}(\text{OH})_3$. Zu empfehlen ist daher, bei cellulosehaltigen Reststoffen ohne Borat (z.B. Celluloseflocken) ein fungizides Additiv zuzugeben (vgl. Abbildung 39).

Das zu empfehlende Additiv ist Kalk. Von diesem Additiv gehen keine gesundheitlichen Gefährdungen aus. Die Wirksamkeit ist auch über einen langen Zeitraum gewährleistet und Pilzwachstum wird bei einem pH-Wert > 11 vollständig gehemmt. Sind in den cellulosehaltigen Reststoffen schon Borate in ausreichendem Anteil ($> 0,38\%$) enthalten, kann auf eine weitere Zugabe von fungiziden Additiven verzichtet werden, wie in Abbildung 39 zu erkennen ist.

2.6 Porengrößenverteilung

Um die Porengrößenverteilung zu messen, sind Querschnitte fotografiert und mit der Software Sigma Scan Pro ausgewertet worden. Leider konnte auf diesem Weg kein aussagefähiges Ergebnis erreicht werden, da die Auswertung in 2D die Poren nicht mittig aufschneidet und so die Porengrößenverteilung verfälscht. Dazu kommt, dass die Grenzen zwischen Pore und Material durch ähnliche Grauwerte nur sehr schwer zu ermitteln sind. Auch der Versuch die Porengrößenverteilung mittels Quecksilberporosimetrie zu ermitteln sind an der weichen Struktur der Papierplatten gescheitert.

3 Validierung der Funktionsmuster

Dieses Arbeitspaket umfasst Untersuchungen zur weiteren Charakterisierung und Verarbeitung von Papierplatten. In Kapitel 3.1 werden die Ergebnisse zur Untersuchung der mechanischen Stabilität vorgestellt. Danach wird auf die Verarbeitung der Oberfläche eingegangen und abschließend werden die Möglichkeiten der Kaschierung erläutert.

3.1 Untersuchungen zur mechanischen Stabilität und zum Bruchverhalten

Um die mechanische Stabilität zu prüfen sind Drei-Punkt-Biegetests durchgeführt worden (vgl. Abbildung 40). Als Biegefestigkeit σ_b wird die höchste Spannung bezeichnet, die aus der Höchstkraft F_m während der Biegebeanspruchung berechnet werden kann.

Die Biegeversuche sind an der Prüfmaschine Zwick/Roell Z005 durchgeführt worden. Die Versuchsparameter sind soweit wie möglich der DIN 12089 entnommen [11].

Die Abmaße der Proben sind durch das größtmögliche Auflager vorgegeben mit 20 mm x 20 mm x 100 mm

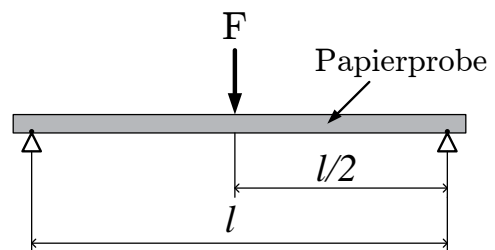


Abbildung 40: Schema des Drei-Punkt-Biegetests.

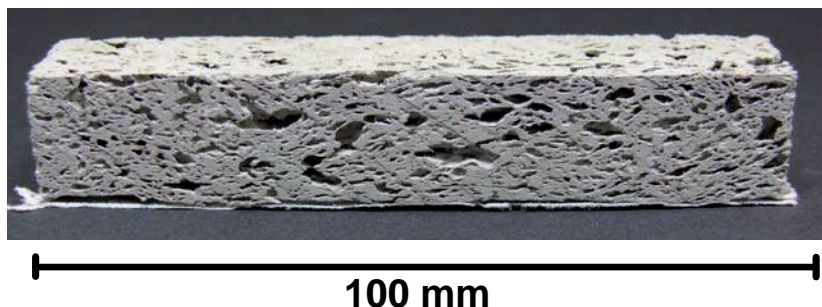


Abbildung 41: Seitenansicht einer Probe (P13) für die Messung der Biegefestigkeit.

Da die Ergebnisse der Proben streuen, ist es notwendig diese mehrfach zu messen. Der Stichprobenumfang liegt zwischen $3 \leq n \leq 30$. Die Ergebnisse werden statistisch mit Hilfe des Anderson-Darling-Tests auf Verteilung und graphischer Methoden ausgewertet (Histogramm, Normalverteilungsdichtediagramm, Normal-Quantil-Diagramm).

Es sind die in Tabelle 8 aufgelisteten Proben auf ihre Biegefestigkeit hin getestet worden, wobei die Proben P3 bis P25 mittels Mikrowelle und F1 mittels Freeze Gelation hergestellt worden sind.

Bei allen Messwerten, bei denen das Bestimmtheitsmaß und der Anderson-Darling Test gegen eine Normalverteilung sprechen, sollte der Erwartungswert nur mit Vorsicht betrachtet werden. (P4, P6, P8, P11, P16, P24 und F1 in Tabelle 8 grau hinterlegt). Für die anderen Messwerte (P3, P7, P9, P10, P12, P13, P14, P18, P19, P25) ist dieser Wert aussagekräftig. Interessant ist auch die

Validierung der Funktionsmuster

Betrachtung des Variationskoeffizienten. Dieser Vergleichswert zeigt, dass die Streuung der Messwerte besonders bei den Proben P4, P6, P16, und F1 sehr groß ist. Diese Proben sind, wie schon oben erläutert, kritisch zu betrachten.

Die Proben P4, P6, P11, P24 und F1 in Tabelle 8 sollten somit durch weitere Messungen aussagekräftiger gemacht werden oder, aufgrund der geringen Erwartungswerte, sollte die entsprechende Zusammensetzung als nicht zur Herstellung geeignet angesehen werden.

Tabelle 8: Zusammenfassende Übersicht der Ergebnisse.

Proben-name	Trieb-mittel	Bindemittel	Anzahl der Messwerte n	Mittelwert μ der Biegefestigkeit σ_b in MPa	Standard-abweichung σ	Variations-koeffizient $\text{VarK}(\underline{x})$	A-D Test	Normal-verteilung	N-Q-Plot Bestimmtheits-maß R^2
P3A-E	-	AB	30	0,504	0,095	0,189	+	+	0,976
P4	NaHCO ₃	AB	6	0,321	0,164	0,510	-	+	0,756
P6	-	KK	5	0,793	0,678	0,855	-	?	0,786
P7	NaHCO ₃	KK	5	0,417	0,106	0,253	+	+	0,993
P8	-	KS	5	0,493	0,114	0,231	+	+	0,795
P9	NaHCO ₃	KS	5	0,185	0,025	0,134	+	+	0,923
P10	-	LG	6	0,342	0,065	0,191	+	+	0,942
P11	NaHCO ₃	LG	6	0,449	0,147	0,328	-	+	0,745
P12	-	CMC m.v.	6	1,109	0,51	0,460	+	+	0,952
P13	NaHCO ₃	CMC m.v.	6	1,467	0,183	0,125	+	+	0,927
P14	-	MC	6	0,589	0,121	0,205	+	+	0,973
P16	-	CMC h.v.	5	0,672	0,369	0,550	+	?	0,812
P18	-	CMC n.v.	5	0,459	0,054	0,118	+	+	0,962
P19	NaHCO ₃	CMC n.v.	5	0,529	0,135	0,256	+	+	0,908
P24	-	CMC m.v. hydr.	5	0,663	0,178	0,268	-	+	0,819
P25	NaHCO ₃	CMC m.v. hydr.	4	0,572	0,106	0,185	+	+	0,967
F1	-	<i>BegoSol K</i>	4	0,263	0,149	0,568	-	?	0,730

Validierung der Funktionsmuster

Da sich die Erwartungswerte der Biegefestigkeiten aus Tabelle 8 nur schwer vergleichen lassen, sind die Werte in Tabelle 9 nach der Biegefestigkeit sortiert.

Die höchsten Biegefestigkeiten werden bei den Proben P13 ($\sigma_b=1,467$ MPa) und P12 ($\sigma_b=1,109$ MPa) gemessen. Diese Werte schneiden bei allen Auswertungen positiv ab. Nur streut Probe P12 mit einem Variationskoeffizienten von $\text{VarK}(\underline{x})=0,460$ stark. Anscheinend können die höchsten Werte mit dem Bindemittel „CMC medium viskos“ erreicht werden. Wenn die kritischen Werte nicht betrachtet werden, wird nach der medium viskosen CMC mit dem Bindemittel Methylcellulose die höchste Biegefestigkeit erreicht (P14 mit $\sigma_b=0,589$ MPa). Diese Probe weist eine um den Faktor zwei geringere Festigkeit auf als Probe P13 ($\sigma_b=1,467$ MPa). Erst im Mittelfeld findet sich der nicht cellulosebasierte Acrylbinder. Die entsprechende Probe P3 hat eine mittlere Biegefestigkeit von $\sigma_b=0,504$ MPa, ist also etwa um den Faktor drei geringer als Probe P13 ($\sigma_b=1,467$ MPa).

Tabelle 9: Erwartungswerte der Proben mit Standardabweichung

Probe	TM	BM	Probe	$-\sigma < \mu(x) < +\sigma$ in MPa	Dichte in $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$
P13	NaHCO ₃	CMC m.v.	P13	1,284 < 1,467 < 1,650	0,44
P12	-	CMC m.v.	P12	0,599 < 1,109 < 1,619	0,51
P6	-	KK	P6	0,115 < 0,793 < 1,471	0,48
P16	-	CMC h.v.	P16	0,303 < 0,672 < 1,042	0,51
P24	-	CMC m.v. hydr.	P24	0,485 < 0,663 < 0,841	0,52
P14	-	MC	P14	0,468 < 0,589 < 0,710	0,48
P25	NaHCO ₃	CMC m.v. hydr.	P25	0,466 < 0,572 < 0,678	0,46
P19	NaHCO ₃	CMC n.v.	P19	0,394 < 0,529 < 0,664	0,51
P3A-E	-	AB	P3A-E	0,409 < 0,504 < 0,599	0,55
P8	-	KS	P8	0,379 < 0,493 < 0,607	0,52
P18	-	CMC n.v.	P18	0,405 < 0,459 < 0,513	0,53
P11	NaHCO ₃	LG	P11	0,302 < 0,449 < 0,597	0,41
P7	NaHCO ₃	KK	P7	0,312 < 0,417 < 0,523	0,39
P10	-	LG	P10	0,276 < 0,342 < 0,407	0,46
P4	NaHCO ₃	AB	P4	0,157 < 0,321 < 0,484	0,42
F1	-	<i>BegoSol K</i>	F1	0,113 < 0,263 < 0,412	0,37
P9	NaHCO ₃	KS	P9	0,160 < 0,185 < 0,210	0,41
Kommerzielle Materialien			Rigips ohne Papier	3,965 < 4,047 < 4,129	0,83
			Rigips mit Papier	5,789 < 5,865 < 5,942	0,83
			Fermacell	7,337 < 7,881 < 8,425	
			Pavaclay*	1,50-2,50	0,35

Die in Tabelle 9 angegebenen Werte entsprechen der 1-Sigma Regel. Es liegen also etwa 68 % der Werte in diesem Bereich. Die Festigkeit steigt nicht mit dem Polymerisationsgrad, da die höchsten Biegefestigkeiten ($\sigma_b > 1$ MPa) beim Bindemittel medium viskose CMC auftreten (P13 und P12). Die Probe P16 ($\sigma_b=0,672$ MPa) mit der hoch viskosen CMC ist nur etwa halb so fest

wie Probe P13 ($\sigma_b=1,467$ MPa), auch wenn dieser Wert aufgrund der Statistik mit Vorsicht behandelt werden sollte. Die niedrig viskose CMC ist, wie erwartet, noch weniger fest als die anderen CMCs. Zu bemerken ist, dass das Hydrophobieren der Proben anscheinend die Festigkeit der Proben verringert (vgl. Tabelle 9, P25 und P13). Die hydrophobierte Probe mit Triebmittel (P25) ist nur etwa halb so fest wie die gleiche Probe ohne Hydrophobierung (P13). Probe P6 hat, wenn der Erwartungswert betrachtet wird, die dritthöchste Biegefestigkeit ($\sigma_b=0,793$ MPa). Sie ist statistisch jedoch nicht belastbar und der Variationskoeffizient zeigt eine sehr große Streuung. Daher sollte der hohe Erwartungswert nicht täuschen. Mit geringeren Biegefestigkeitswerten ($0,342$ MPa $< \sigma_b < 0,449$ MPa) schneidet das Bindemittel Lignin ab, es reicht nicht an die Festigkeitswerte mit medium viskoser CMC heran. Der Einsatz von Nanopartikeln als Bindemittel scheint nicht empfehlenswert, da die Proben vermutlich nicht normalverteilt sind und der Erwartungswert der Biegefestigkeit ebenfalls sehr gering ist (F1).

Um die hergestellten Papierstaubplatten mit kommerziell erhältlichen Materialien vergleichen zu können, sind in Tabelle 9 auch die Erwartungswerte für Rigips (Feuchträume), Fermacell und Pavaclay aufgenommen worden. Die Rigipsplatten sind mit und ohne Papierschicht gemessen worden. Die Angabe der Biegefestigkeit des Pavaclay ist eine Herstellerangabe von Pavatex®. Pavaclay wird als Trockenbauplatte zum Innenausbau verwendet. Alle Materialien sind fester als Probe P13, nur die Biegefestigkeit der Pavaclay Trockenbauplatte ist in der gleichen Größenordnung. Die nicht porösen Materialien Rigips und Fermacell sind aufgrund ihrer Struktur nicht direkt mit den hergestellten Papierstaubplatten vergleichbar, liefern aber eine erste Einschätzung. Die Proben P13 und P12 sind, hinsichtlich der Biegefestigkeit, als sehr vielversprechend einzuordnen.

Fazit

Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass die Biegefestigkeit der Papierstaubplatten nicht vom Polymerisationsgrad der verwendeten Cellulose (Bindemittel) abhängt. Der Einsatz von Bindemitteln wie Acrylbinder, Lignin und Kleister ist nicht zu empfehlen, da keine ausreichend festen Proben hergestellt werden können. Empfehlenswert ist die Verwendung von Cellulose als Bindemittel. Auch die Zugabe von NaHCO_3 als Triebmittel scheint einen positiven Einfluss zu haben. Für den Herstellungsprozess ist die Herstellung mit Mikrowellen eindeutig zu bevorzugen. Die durch Freeze Gelation hergestellte Probe F1 hat, auch bei einem nicht sehr belastbaren Erwartungswert, eine um den Faktor fünf geringere Biegefestigkeit und scheint daher nicht geeignet für die Herstellung von Plattenmaterial. Im Vergleich mit dem Produkt Pavaclay ist, mit der Kombination aus CMC als Bindemittel und NaHCO_3 als Triebmittel, schon eine deutliche Annäherung an die vom Hersteller angegebene Biegefestigkeit erreicht. Dies lässt darauf schließen, dass bei einer weiteren Optimierung des Prozesses und der Inhaltsstoffe die Biegefestigkeitswerte von Pavaclay erreicht werden können. Das bedeutet, dass der Einsatz von Papierstaubplatten als nicht tragendes Bauelement denkbar und durch den Einsatz von Cellulose als Bindemittel auch nachhaltig ist.

3.2 Oberflächenbehandlung (Lackieren, streichen, verputzen)

Für eine Anwendung in Innenbereich sollte eine Papierplatte weiter verarbeitet werden können. Da besonders farbliche und strukturelle Gestaltung möglich sein sollten, sind Papierplatten (ca.

Validierung der Funktionsmuster

50 mm x 50 mm) verschieden weiterbehandelt worden. Die Untersuchung umfasste drei Oberflächenbehandlungen, das Verputzen der Papierplatte mit einem rauen Kalkstreichputz auf Kalkbasis und Gipsspachtelmasse, sowie das Streichen der Papierplatte mit Acrylfarbe.

Das Verputzen der Papierplatte mit Kalkstreichputz sollte in zwei Schritten geschehen. Wird der Putz in einem Schritt auf die Probe gebracht, führt dies zu Rissen in der Oberfläche, wie in den Abbildung 42 und Abbildung 43 gut zu erkennen ist. Auch die Vorbehandlung mit Silikatverdünner führt nicht zu einem besseren Ergebnis. Wird der Putz im ersten Schritt dünn aufgetragen und nach einer ausreichenden Trockenzeit ein weiteres Mal aufgetragen, sind sehr gute Ergebnisse zu erreichen (vgl. Abbildung 44, links).

Ebenfalls mit sehr guten Ergebnissen konnten die Papierplatten gestrichen und mit Gips verputzt werden (vgl. Abbildung 44, mittig und rechts).



Abbildung 42: Verputzte Papierplatte ohne Vorbehandlung. Nach dem Trocknen sind tiefe Risse auf der gesamten Oberfläche erkennbar.

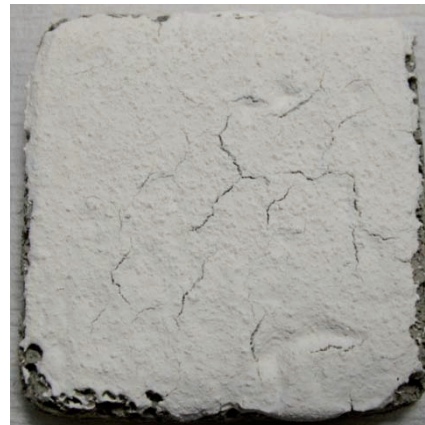


Abbildung 43: Versputzte Papierplatte, die mit Silikatverdünner vorbehandelt worden ist. Nach dem Trocknen sind Risse auf der gesamten Oberfläche erkennbar.



Abbildung 44: Papierplatten nach der Oberflächenbehandlung. Links, Papierplatte mit einem rauen Streichputz auf Kalkbasis für den Innenbereich, mittig Papierplatte mit Acrylfarbe gestrichen, rechts Papierplatte mit Gips verputzt.

Insgesamt haben die Oberflächen gute Eigenschaften und eine sehr gute optische Wirkung. Die mit Kalkstreichputz oder Gips behandelten Papierplatten könnten ohne Tapete im Innenraum eingesetzt werden. Dabei wird die feuchtigkeitsregulierende Wirkung der Papierplatten durch den Kalkstreichputz unterstützt und gleichzeitig vor Schimmelbefall geschützt.

3.3 Untersuchungen zur Kaschierung

Der nächste Abschnitt stellt die Ergebnisse der Untersuchung zur Kaschierung von Papierplatten vor. Als Klebstoff für die Kaschierung sind Knochen- und Holzleim verwendet worden.

Es sind vier Möglichkeiten zum Aufbringen des Knochenleims untersucht worden. Die erste Variante den Knochenleim aufzubringen ist, ihn direkt auf die Papierdeckschicht aufzutragen und dann auf die Papierplatte zu pressen. Die beklebte Platte ist dann beschwert getrocknet. Als zweite Möglichkeit kann der Knochenleim zunächst auf die Papierdeckschicht aufgetragen werden und trocken. Danach wird die mit Knochenleim beschichtete Deckschicht unter Einwirkung flächiger Hitze auf die Papierplatte geklebt.

Neben der Möglichkeit den Knochenleim auf die Papierdeckschicht aufzutragen, kann dieser auch auf der Papierplatte aufgetragen werden, woraus sich zwei weitere Varianten ergeben. Zur Übersicht sind alle untersuchten Varianten nochmals aufgelistet:

- Knochenleim auf Papierdeckschicht (A)
- Knochenleim auf Papierdeckschicht, nach dem Trocknen aufgebügelt (B)
- Knochenleim auf Papierplatte (C)
- Knochenleim auf Papierplatte, nach dem Trocknen aufgebügelt (D)

Die Ergebnisse zeigen, dass es einen sehr großen Unterschied bei der Oberflächenqualität gibt, je nachdem welche Variante zum Kaschieren angewendet wird (Abbildung 45 bis Abbildung 48). Bei der Kaschierung mit Variante A sind sehr deutliche Unebenheiten auf der Kaschierung zu erkennen, was auch für die Kaschierung mit Variante C gilt. Bei Variante B konnte keine ausreichende Verbindung zwischen Papierplatte und Deckschicht erreicht werden (vgl. Abbildung 46). Nur mit Variante D ist eine optisch bessere Kaschierung gelungen.

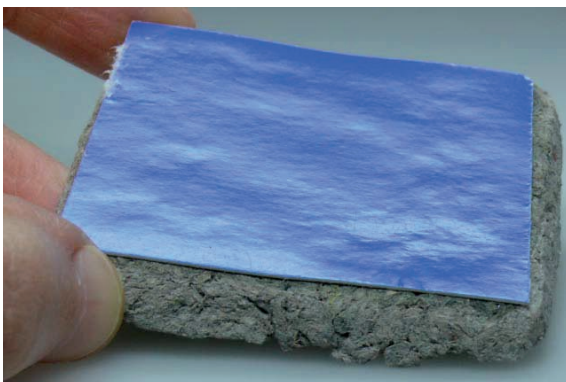


Abbildung 45: Papierplatte mit Deckschicht, nach Variante A.



Abbildung 46: Papierplatte mit Kascherversuch nach Variante B.

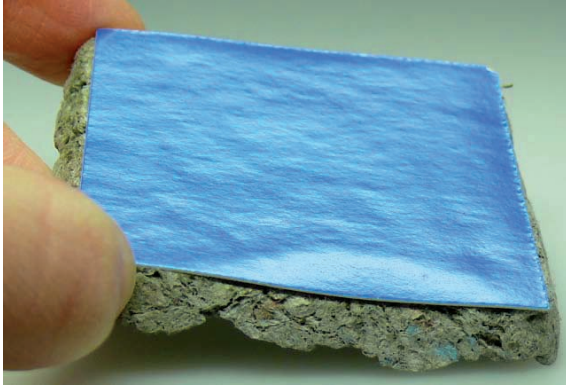


Abbildung 47: Papierplatte mit Deckschicht nach Variante C.

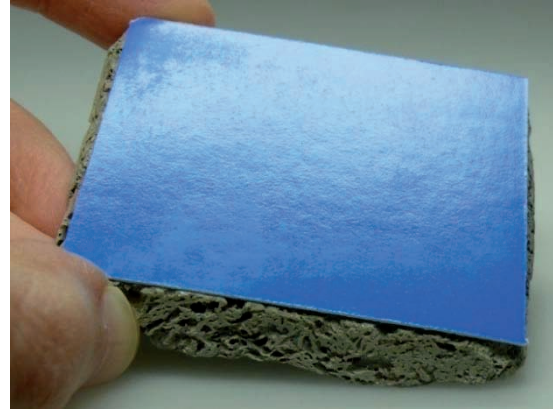


Abbildung 48: Papierplatte mit Deckschicht nach Variante.

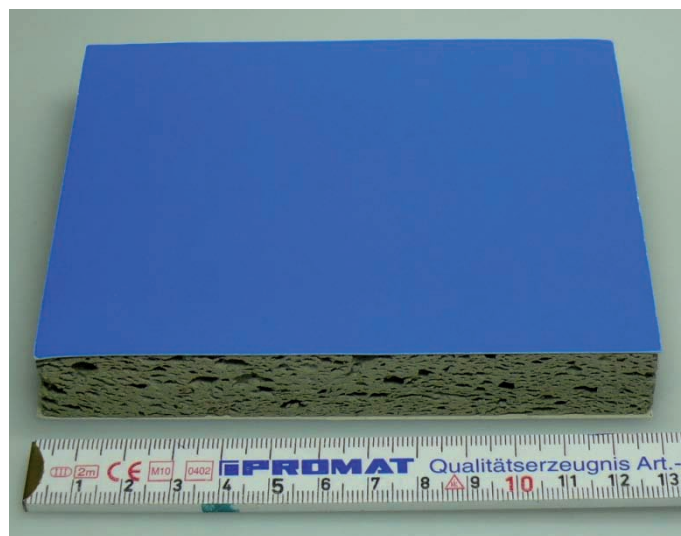


Abbildung 49: Kaschierung einer Papierplatte mit Holzleim.

In Abbildung 49 ist eine mittels Holzleim kaschierte Papierplatte zu sehen. In diesem Fall ist der Holzleim direkt auf die Deckschicht aufgebracht worden und dann auf die Papierplatte gelegt worden. Durch pressen der Papierplatte konnte eine gute Oberflächengüte erreicht werden.

3.4 Erstellung von Konzepten sowie Anschauungs- und Präsentationsmaterialien

Die im Rahmen dieses Arbeitspakets hergestellten Anschauungs- und Präsentationmaterialien sind in Abbildung 10 bis Abbildung 11, Abbildung 13 bis Abbildung 14, Abbildung 17 bis Abbildung 18, Abbildung 31 bis Abbildung 32 und Abbildung 44 bis Abbildung 49 zu sehen.

Auf Basis der Erfahrungen im bauraum Bremen e.V. sind die Anschauungs- und Präsentationmaterialien entwickelt und hergestellt worden. Dies dient der besseren Präsentation der Ergebnisse.

4 Umsetzungsmöglichkeiten

Die in den vorherigen Arbeitspaketen aufgezeigten Ergebnisse zeigen, dass Papierstaub als Ausgangsstoff in vielfältigen Bereichen eingesetzt werden kann. Besonders in Form von Papierplatten sind Einsatzgebiete im Bau- oder Displaybereich denkbar. Dabei sind Bauprodukte wie, Trockenbauplatten für den Innenbereich, Innenwanddämmung und Akustikplatten zu nennen. Im Displaybereich könnte eine Verwendung als Kernmaterial neue Produkteigenschaften ermöglichen. Im Folgenden werden besonders interessante Optionen vorgestellt.

Der Einsatz als Wärmedämmverbundplatte als Alternative zu den bisherigen Polystyrol Dämmplatten

Die bisher marktüblich verwendeten Polystyrolplatten weisen neben dem sehr kritischen Brandverhalten auch andere physikalische Nachteile wie hohe Diffusiondichtigkeit auf. Desweiteren stehen Polystyrolprodukte in einigen Ländern wegen gesundheitlicher Bedenken in der Diskussion. Die bisher ermittelten physikalischen Kenndaten der Papierschaumplatte geben Hinweise auf eine gute und vergleichbare Wärmedämmleistung. Im Brandfall würden keine giftigen und entzündlichen Rauchgase entstehen. Außerdem ist nicht mit brennend abtropfenden Erscheinungen zu rechnen.

Der Einsatz als Akustik Deckenplatte z.B. als Alternative zu den bisherigen Gipskarton Akustik Deckenplatten

Gute Schalldämmeigenschaften von überwiegend Zellulose basierenden Materialien sind bekannt und werden bereits in einigen Akustiksystemen verwendet. Bekannte Kennwerte wie längsbezogener Strömungswiderstand in Verbindung mit möglichen geringen Rohdichten ermöglichen gute akustische Eigenschaften hinsichtlich Schalldämmung und Nachhallzeit. Vergleichbare Plattenwerkstoffe auf Papierbasis existieren nicht auf dem Markt.

Um die Papierschaumplatten für diesen Markt einsatzfähig zu machen, sollten die Eigenschaften der Schall und Wärmedämmung in weitergehenden Untersuchungen genau ermittelt und ggfs. verbessert werden. Beispielhaft seien genannt, die Verbesserung der Struktur und Porosität, des Feuchteverhaltens, der mechanischen Eigenschaften u.a. thermodynamische Faktoren.

Desweiteren sollten, zur Erreichung kontinuierlicher und wirtschaftlicher Produktionstechniken für die Herstellung großer Materialmengen nach industriellen Maßstäben, die Verfahrenstechniken optimiert werden. Zu untersuchen sind hier beispielsweise eine Fließbandtrocknung durch Mikrowellen und andere verfahrenstechnische Aspekte.

Für weitere Untersuchungen sollten auf industrieller Seite eventuell Recyclingunternehmen hinzugezogen werden um die Problematik der Entsorgung und damit verbundener Kostenersparnisse zu untersuchen.

Es ist zu erwarten, dass der Markt bei einem vergleichbarem Preis und Qualitätsstandart sehr positiv auf das Produkt Papierschaumplatte reagieren wird. Durch die CO₂ Neutralität könnte das Produkt z. B. im Bereich Green Building Verwendung finden.

Gesamtfazit zum Projektverlauf

Des Weiteren ist geplant, die Anschauungs- und Präsentationmaterialien im bauraum Bremen e.V. auszustellen.

Außerdem sind weiterführende Projekte im Rahmen des Zentralen Innovationsprogramms Mittelstand (ZIM) mit der AiF als Projektträger und in Zusammenarbeit mit Firmen geplant. Dabei soll, aus den Ergebnissen heraus, die Erfahrung mit dem Umgang und Einsatz der Zuschlagstoffe auf den Herstellungsprozess von Recycling-Cellulosefasern übertragen werden. Zudem sind weitergehende direkte Industriekooperationen denkbar.

5 Gesamtfazit zum Projektverlauf

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass es gelungen ist, aus einem cellulosebasierten Reststoff ein gebundenes Papierprodukt herzustellen. Je nach Ausgangsmaterial und Herstellungsmethode sind unterschiedliche Formen der Papierprodukte denkbar.

Im Innenbereich ist ein Einsatz sehr gut möglich. Beispielsweise kann durch Einstellen der Porosität und entsprechender Bohrungen eine für den Schallschutz sehr interessante Papierplatte entwickelt werden. Auch die leichte Verarbeitung, das Brandverhalten und das sehr gute Schimmelverhalten sprechen dafür. Zudem ist auch ein Spritzwasserschutz durch Hydrophobierung der Platten möglich, diese kann sowohl nachträglich als auch prozessintegriert erfolgen. Auch im Bereich der Innenraumdämmung könnten die Papierplatten eingesetzt werden. Da sie leicht zu verarbeiten sind, können sie besonders bei denkmalgeschützten Fassaden einen Eingriff an der Außenwand verhindern. Die vielfältigen meist einstellbaren Eigenschaften ermöglichen eine sehr gute Anpassung der Papierplatten an mögliche Einsatzgebiete.

Auf Basis der Ergebnisse dieses Projekts ist das Herstellungsverfahren für Papierplatten von der Universität Bremen beim Deutschen Patentamt zum Patent eingereicht worden und wird dort unter dem Aktenzeichen 10 2012 015 539.5 geführt.

Quellenverzeichnis

- [1] BLECHSCHMIDT, J.: *Taschenbuch der Papiertechnik*. München : Fachbuchverl. Leipzig im Carl Hanser Verl., 2010. – ISBN 978-3-446-41967-4
- [2] BENEDIX, R.: *Bauchemie: Einführung in die Chemie für Bauingenieure und Architekten*. 5., überarbeitete und aktualisierte. Wiesbaden : Vieweg+Teubner Verlag / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2011
- [3] VEIT, Prof. Dr.-Ing. I.: Der Schallabsorptionsgrad ? In: *Trockenbau Akustik 2* (2007).
- [4] NORMENAUSSCHUß BAUWESEN (NABAU) IM DIN: *DIN EN ISO 11925-2 - Prüfungen zum Brandverhalten - Entzündbarkeit von Produkten bei direkter Flammeneinwirkung - Teil 2: Einzelflammentest*.
- [5] NORMENAUSSCHUß BAUWESEN (NABAU) IM DIN: *DIN EN 14316-1 - Wärmedämmstoffe für Gebäude - An der Verwendungsstelle hergestellte Wärmedämmung aus Produkten mit expandiertem Perlite (EP) - Teil 1: Spezifikation für gebundene und Schüttdämmstoffe vor dem Einbau*. 2004
- [6] Norm 1997. *ISO 846:1997 - Kunststoffe - Bestimmung der Einwirkung von Mikroorganismen auf Kunststoffe*
- [7] FRÖSSEL, F.: *Schimmelpilze in Wohnungen: Wenn der Pilz zur Untermiete wohnt*. Waldshut-Tiengen : Baulino Verlag, 2006. – ISBN 3938537183
- [8] INSTITUT FÜR HOLZTECHNOLOGIE DRESDEN GGMBH: *Verfahrensanweisung - Prüfung der Schimmelpilzbeständigkeit von Dämmstoffen*. 2007
- [9] MERCK KGAA: *Sicherheitsdatenblatt Borsäure*. 2011
- [10] LEISEWITZ, A. ; KRUSE, H. ; SCHRAMM, E. ; SCHWARZ, W. ; UMWELTBUNDESAMT, Deutschland *Erarbeitung von Bewertungsgrundlagen zur Substitution umweltrelevanter Flammenschutzmittel*. Umweltbundesamt, 2001.
- [11] NORMENAUSSCHUß BAUWESEN (NABAU), KUNSTSTOFFE (FNK) UND MATERIALPRÜFUNG IM DEUTSCHEN INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. (DIN): *DIN EN 12089 - Wärmedämmstoffe für das Bauwesen - Bestimmung des Verhaltens bei Biegebeanspruchung*, 1997.