

Fonds zur Förderung der Wald- und Holzforschung (WHFF)
c/o Bundesamt für Umwelt BAFU Abteilung Wald
Herrn W. Riegger
3003 Bern
Projektnummer 2009-17

Schlussbericht an den Fonds zur Förderung der Wald- und Holzfor-
schung
(WHFF-2009-17)

Entwicklung eines einblasbaren formstabilen Dämm- **stoffs aus Holzhobelspänen**

Development of a blowable dimensionally stable wood shaving insulation material

Verfasser: Dr. Klaus Richter,
Empa Abt. Holz (bis März 2011)

Projektmitarbeiter:
Tillmann Meints, BSc Student Univ. Freiburg/Bsg.
Alexander Bitto, FMF Freiburg
Heinz Stehle, FITAN AG Dornach
Dr. Otto Smrekar, FITAN AG Dornach
Markus Heeb, Empa Abt. Holz

Projektleitung: Dr. Klaus Richter

November 2013

Zusammenfassung

Ein etabliertes, leistungsstarkes und bewährtes Produkt zu verbessern und am Markt zu ersetzen, ist eine anspruchsvolle und herausfordernde Aufgabe. Es war die Zielsetzung dieses Projektes, die Machbarkeit der Verbesserung von etablierten Hobelspansystemen zur Wärmedämmung von Hauswandsystemen aufzuzeigen. Es sollten gleich- und besserwertige Alternativen für das bisherige hobelspanbasierte Dämmprodukt CLIMAT gefunden werden, dessen technischen Nachteil in einer Setzung der eingebrachten Hobelspäne gesehen wird, wenn sich das Hobelspangefüge durch Vibrationen verdichtet. Ein weiterer aktueller Anlass, um nach Alternativen für die CLIMAT-Technologie zu suchen ist, dass Borsäure als etablierte Schimmelschutzkomponente aus Gesundheitsgründen in der Diskussion steht, verboten zu werden. Damit ergeben sich für die folgenden Forschungsfragen: Evaluation von möglichst ungiftigen Behandlungsmitteln (i) als alternative Schimmelschutzkomponente für Hobelspändämmungen, die (ii) gleichzeitig die Späne durch die Behandlung versteifen, so dass die störenden Setzungseigenschaften reduziert werden.

Im Gesamtprojekt wurden durch zwei Forschungs- und einen Industriepartner verschiedene Behandlungsvarianten entwickelt und Probebehandlungen in einer Pilotanlage durchgeführt. Anschließend wurden die bauphysikalischen Kennwerte jeder Hobelspansysteme ermittelt. Die Prüfungsmethoden und die Ergebnisse werden in diesem Bericht beschrieben und diskutiert. Die Erkenntnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

1. Die Entwicklung und Aufbringung multifunktionaler Behandlungsmittel hängt von sehr vielen Variablen ab. Die Abstimmung und Verträglichkeit der ausgewählten Chemikalien, die Aufbringungsmethoden und die Trocknungsbedingungen wurden als wichtigste Einflussgrößen ermittelt.
2. Die Hobelspanfraktionen aus der Holzindustrie sind kein einheitliches Ausgangsprodukt. Geeignete Sortier- und Qualitätssicherungsverfahren sind nötig, um eine Einengung der Variationsbreite insbesondere auch im Hinblick auf die Setzungssicherheit zu erreichen.
3. Unter den zehn evaluierten Varianten ist noch kein vollwertiger Ersatz für das mit Borax behandelte CLIMAT ermittelt worden. Doch können verschiedene Ansätze in Teilbereichen deutlich bessere Werte als das Referenzprodukt erzielen.
4. Besonders vielversprechend zeigen sich Varianten mit Chitosan- und Bentonitbehandlung. Vor allem im Hinblick auf gutes Setzverhalten und Schimmelpilzresistenz können hier gute Werte erzielt werden. Die Wärmeschutzwirkung muss jedoch noch gesichert verbessert werden.
5. Kaliwasserglas hat sich als versteifende Komponente nicht bewährt, da die Späne zu stark verspröden und sehr schnell brechen. Das führt zu hohen Dichten und schlechten Dämmwerten.

6. Der Trocknungsprozess in einem Trommeltrockner führt in Kombination mit den angestrebten Versteifungseffekten zu einem hohen Anteil an gebrochenen Spänen und hohem Feinanteil, was sich in einem ungünstigen Setzungsverhalten des Materials auswirkt.

6. Die für eine bauaufsichtliche Zulassung in der Schweiz notwendige Brennbarkeitsprüfung wird von allen zehn Ansätzen bestanden.

7. Um ein Produkt zu erhalten, das in jeder der Kategorien Setzungssicherheit, Wärmeleitfähigkeit, Brandschutz und Schimmelpilzresistenz zufriedenstellend ist, müssen die aussichtsreichen Ansätze weiter entwickelt werden, um noch bestehende Schwächen zu beheben.

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|---------|---|----|
| 1 | Einleitung..... | 6 |
| 2 | Zielsetzung des Projektes | 9 |
| 3 | Projektorganisation und Durchführung | 10 |
| 4 | Material und Methoden | 11 |
| 4.1 | Hobelspäne | 11 |
| 4.2 | Verwendete Chemikalien | 11 |
| 4.2.1 | Ca- und Na-Ligninsulfonate | 11 |
| 4.2.2 | Natrium-, Lithium-, Kaliumwasserglas..... | 11 |
| 4.2.3 | Natrium-Bentonit..... | 11 |
| 4.2.4 | Chitosan | 11 |
| 4.2.5 | Diammoniumphosphat..... | 11 |
| 4.3 | Methoden..... | 12 |
| 4.3.1 | Labormethoden..... | 12 |
| 4.3.2 | Behandlung im Pilotmassstab..... | 13 |
| 4.3.2.1 | Materialcharakterisierung..... | 14 |
| 4.3.2.2 | Morphologie..... | 14 |
| 4.3.2.3 | Streudichte | 14 |
| 4.3.2.4 | Setzungsverhalten | 15 |
| 4.3.2.5 | Wärmeleitfähigkeit | 16 |
| 4.3.2.6 | Schimmelpilzresistenz | 17 |
| 4.3.2.7 | Brandverhalten | 18 |
| 5 | Ergebnisse..... | 20 |
| 5.1 | Labortest..... | 20 |
| 5.1.1 | Herstellung der wässriger Lösungen und Abbindeversuche..... | 20 |
| 5.1.2 | Hobelspanmodifizierung | 20 |
| 5.1.2.1 | Setzungsversuche | 22 |
| 5.2 | Behandlung im Pilotmassstab..... | 23 |
| 5.2.1 | Materialcharakterisierung..... | 26 |
| 5.2.2 | Setzungsverhalten | 27 |
| 5.2.3 | Wärmeleitfähigkeit | 29 |
| 5.2.4 | Schimmelpilzresistenz | 31 |
| 5.2.5 | Brandverhalten | 32 |
| 6 | Diskussion | 34 |
| 6.1 | Setzungsverhalten | 35 |
| 6.2 | Wärmeleitfähigkeit | 37 |

| | | |
|-----|--------------------------------|----|
| 6.3 | Schimmelpilzresistenz | 39 |
| 6.4 | Brandverhalten | 40 |
| 6.5 | Bewertung | 40 |
| 7 | Ausblick und Empfehlungen..... | 43 |
| 8 | Literatur | 44 |

1 Einleitung

Der Hochbau (Erstellung, Betrieb, Unterhalt und Sanierung) ist in der Schweiz für mehr als die Hälfte des Energieverbrauchs und des CO₂-Ausstosses verantwortlich. Dank neuer Technologien ist die Senkung des Energieverbrauchs von Gebäuden auf einen Drittel umsetzbar, selbst bei bestehenden Gebäuden oft verbunden mit verbessertem Wohnkomfort und zu vergleichbaren Kosten. Bei allen Bestrebungen zur Verbesserung der Energieeffizienz von Gebäuden spielt die Reduktion der Wärmeverluste durch die Gebäudehülle eine entscheidende Rolle. Somit kommt der Wärmedämmung im Hochbau eine immer grössere Bedeutung zu. Bei den Zukunftsentwicklungen wird neben der Realisierung neuer Niedrigenergie- und Passivhauskonzepte, bei denen eine entsprechende Wärmedämmung den nötigen Energiebedarf auf die anzuwendende Regelungs- und Lüftungstechnik reduziert, vor allem aber auch die Sanierung im Bestand an Bedeutung gewinnen und große Einsparpotentiale ermöglichen. Eine fachgerechte und sowohl technisch als auch ökologisch auf den Bedarfsfall ausgelegte Dämmung der Aussenfassade ist eine entscheidende Grundlage für die Verwirklichung zukünftiger Energieeinsparpotentiale im Bereich Raumwärme.

Der Dämmstoffmarkt zeichnet sich durch eine Vielfalt von unterschiedlichen Stoffen und Produkten aus. Will man zwischen den Marktanteilen der unterschiedlichen Produktgruppen differenzieren, so reduziert sich die Betrachtung im Wesentlichen auf drei Segmente. Der Markt teilt sich auf zwischen den mineralischen Dämmstoffen mit ca. 59 % auf Platz eins und den Schaumkunststoffen, die ca. 37 % des verbauten Volumens beanspruchen. Die Dämmstoffe auf Basis nachwachsender Rohstoffe konnten zwar an Bedeutung gewinnen, liegen mit einem Anteil von 4 – 5 % aber immer noch deutlich hinter den anderen Produktgruppen zurück (Anonymus 2006b). Durch das von 2003 bis 2007 laufende Förderprogramm des deutschen Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV) für eine Reihe von Dämmstoffen auf Basis nachwachsender Rohstoffe stiegen die Absatzmengen für die geförderten Produkte von vorher 60.000 m³/a auf 130.000 m³/a im Jahr 2007. In der Studie von Eicke-Henning (1997) wurde prognostiziert, dass alternative Dämmstoffe langfristig einen Marktanteil von 9 % - 13 % erzielen könnten. Dieser Marktanteil ist heute, mehr als fünfzehn Jahre später, allerdings noch nicht in vollem Umfang realisiert.

Die Ursachen für den immer noch eher zögerlichen Einsatz nachwachsender Rohstoffe als Dämmstoff sind dabei vielfältig. Es sind ökonomische (Kostenvorteile), wärmetechnische (Dämmleistung) und marktrelevante (entwickelte Vertriebs- und Anwendungstechnik) Aspekte, die die bestehende Dominanz der beiden Stoffgruppen Mineralwolle (Marktanteil ca. 60%) und Polystyrol (Marktanteil ca. 30%) weiterhin stützen. Bei deren Herstellung muss allerdings ein relativ hoher Einsatz fossiler Energie aufgewendet werden, zudem werden die Kunststoff-basierten Produkte stofflich aus fossilen Ressourcen produziert. Da die „graue“ Energie und die Umweltwirkungen von Bauprodukten bei insgesamt verbesserter Energieeffizienz der Gebäude einen höheren Beitrag zu den kumulierten Umwelteinwirkungen von Bauwerken leisten, gewinnen die aus erneuerbaren

pflanzlichen Ressourcen hergestellten Dämmstoffe (Holz, Hanf, Cellulose, Kork) relativ an Bedeutung und weisen auf niedrigem Niveau steigende Marktanteile auf.

Die Eignung von Holzspänen und Holzfasern als Dämmmaterial ist seit langem bekannt. Vogel (1999) untersuchte systematisch den Einsatz dieser beiden Materialfraktionen als lose, also blas- oder schüttbare Dämmstoffe und hat grundlegende Angaben zu den Stoffkennwerten (Wärmeleitfähigkeit, Sorption, Wasserdampfdiffusion), dem Setzungs- und Separationsverhalten und den Brandschutzaspekten bereitgestellt. Holzspan- und -faserisolationen haben demnach neben ihrer Gewinnung (als Sekundärprodukt) aus einem regional verfügbaren nachwachsenden Rohstoff den Vorteil der Atmungsaktivität und der positiven Beeinflussung des Feuchtehaushalts im Innenklima. Als rieselfähiges Schüttgut sind Hobelspäne einblasbar und können so Hohlräume ganz ausfüllen. Verwendung finden Hobelspäne vor allem bei der Zwischensparrendämmung im Holzskelettbau und im Holztafelbau (Vogel et al 2002). Die Dämmschicht ist dampfdiffusionsoffen und Feuchte ausgleichend. Die Schallschutzeigenschaften und der sommerliche Wärmeschutz sind hoch. Nachteilig ist, dass Holz als natürliches Material gegen die Einwirkung von Mikroorganismen und Feuer geschützt werden muss, um die baulichen Sicherheitsanforderungen und die langfristige Funktionstüchtigkeit als Dämmstoff in der Gebäudehülle sicherzustellen. Ein weiterer Nachteil ist die Tendenz zur Verdichtung (Setzung, Separierung) der eingeblasenen Späne im Laufe der Nutzungsjahre, was zu einer Veränderung der Stoffwerte bis hin zur Bildung von Wärmebrücken führen kann.

Die zusätzliche Ausrüstung der Holzbestandteile ist von zentraler Bedeutung für das Gesamtprofil von Hobelspan-Dämmstoffen. Damit die hervorragenden ökologischen Grundeigenschaften durch eine Behandlung mit Zusatzstoffen nicht zunichte gemacht werden, sollen die Zusatzstoffe wirksam, aber ökologisch und preislich akzeptabel sein. In den am Markt eingeführten Produkten werden bisher vor allem kombinatorisch wirkende Zusätze auf der Basis von Borsalzen (Borax, Borsäure) verwendet. Borsalze wirken im Brandfall sperrschichtbildend und bewirken eine Schimmelpilzresistenz, da sie den pH-Wert der behandelten Produkte im alkalischen Bereich halten. Auch Wasserglas, Ammoniumphosphate und andere Mineralsalzmischungen werden als Behandlungsmittel verwendet, ein deutscher Produzent setzt eine patentierte Mischung aus Molke und Soda ein. Während Borsalze (Borax) als Flammschutzmittel bislang, auch im Vergleich zu Alternativstoffen, als ökologisch akzeptabel eingestuft wurden, werden aktuell auf EU-Ebene Diskussionen zur Einstufung von Borax (Dinatriumtetraborat) als reproduktionstoxisch geführt, so dass Borsalze und Borsäure als erbgut- und fruchtschädigend eingestuft werden könnten. Das würde die Verwendung von Boraten zur Ausrüstung natürlicher Materialien unter anderem auch für Wärmedämmstoffe in Zukunft verbieten.

Die Ausprägung einer nachträglichen Setzung der in die Wand-, Decken- oder Dachelemente eingeblasenen rieselfähigen Dämmmaterialien ist abhängig von der Morphologie der Partikeln und dem Verdichtungsgrad nach dem Einblasen. Hobelspäne gelten bei guter Sortierung aufgrund der flächigen Struktur und der Rückstellkräfte der Späne als wenig anfällig für Setzungen (Woest, 2004), allerdings sollte die Höhe der

Gefache nicht mehr als 2 Meter betragen, um eine zu hohe Verdichtung auszuschließen. Um eine höhere Flexibilität insbesondere bei der Dämmung von Holzständerbauten zu erreichen, wäre eine Formstabilisierung der Späne – genauer: des formpassenden Gefüges aus losen Spänen – nach dem Einblasen oder Aufschütten von grossem Vorteil. Dies würde auch die Manipulation der Hobelspandämmung nach dem Öffnen der Gefache bei Um- oder Rückbauarbeiten vereinfachen. Allerdings sollte das Herbeiführen einer gewissen Formstabilität keineswegs die bauphysikalischen Qualitäten der Hobelspandämmung verschlechtern.

Untersuchung und Massnahmen zur Vermeidung von Setzungen bei Schüttdämmstoffen

Forschungsarbeiten über die Eignung von lose eingebrachten Hobelspänen zur Dämmung von Gebäudefassaden wurden seit Mitte der 1990iger Jahre an der Technischen Universität München (TUM) durchgeführt (Vogel 1999, Vogel et al. 1997, 1998). In der Folge sind die Arbeiten in Deutschland durch zwei umfangreiche Verbundprojekte, finanziert durch die Bundesstiftung Umwelt sowie das Bundesministerium für Bildung und Forschung auf andere holzbasierte Materialien ausgedehnt worden (Refiner Holzstoff, Sägespäne, Fasern) und schliessen auch anwendungstechnische Arbeiten, messtechnische Untersuchungen an Gebäuden und Umweltanalysen ein (Vogel et al. 2006).. Jüngste Untersuchungen befassen sich mit der Entwicklung von Kompositdämmstoffen auf Basis von Frässpänen aus Holz (Tremel 2011), und der Entwicklung einer Methodik zur Bestimmung der dauerhaften Setzungssicherheit (Tremel, Engelhardt 2013; Böck 2013). Die Arbeiten zeigen die baupraktische Eignung (Verfügbarkeit von Ressourcen, Stoffaufbereitung, Logistik, Einbringtechnologie) der Dämmung mit holzbasierten Materialien auf und weisen die relevanten Eigenschaften der losen Dämmstoffe in ihrer ganzen Bandbreite nach. Es wurden wärme-, feuchte-, schall- und brandschutztechnische Versuche (z.B. Wärmeleitfähigkeit, Wasserdampfdiffusion, Strömungswiderstand, Baustoffklasse) durchgeführt und das mechanische Verhalten, die Streudichte und die Siebkennlinien bestimmt, die als Grundlage für Produktoptimierungen und Produktneuentwicklungen sowie der Qualitätssicherung dienen. Im Hinblick auf die für Wärmedämmstoffe wichtigste Kenngröße, die Wärmeleitfähigkeit, waren die Unterschiede bei den untersuchten Hobelspangemischen erstaunlicherweise nicht so stark ausgeprägt wie erwartet. Dadurch ergibt sich für diese Materialstruktur mehr Spielraum bei der Rohstoffbeschaffung. Es wurde aufgezeigt, dass neben dem Verdichtungsgrad besonders die Materialfeuchte einen wesentlichen Einfluss auf die bauphysikalischen Kenngrössen hat. In einer jüngeren Untersuchung zeigen Schunk et al. (2009), dass die Wärmeleitfähigkeit von Dämmungen aus Frässpänen verschiedener Holzarten hauptsächlich von dem Volumen des eingebrachten Materials und damit der Porosität des Systems abhängig ist, und dass die anatomischen Unterschiede zwischen den Holzarten nach der Verdichtung der daraus hergestellten Späne die Wärmeleitfähigkeitswerte nicht mehr wesentlich beeinflussen. Dieser Befund ist vor dem Hintergrund einer chemischen Behandlung der Frässpäne, bei dem durch Mineralisierung und Verholzung der Hobelspä-

ne von Nadelhölzern sich Dichte- und Porositätsänderungen ergeben, von beträchtlichem Interesse.

In der Schweiz wurde im Auftrag des Bundesamtes für Energie ein Forschungsprojekt durchgeführt, in dem es um die Eignung von Hanf und Grasfasern als lose einbringbare Dämmstoffe ging (Hersener, Keller 2002). Vor dem Hintergrund des beantragten Projekts interessant ist die Untersuchung einer alternativen Brand- und Pilzschutzausrüstung mit einem patentierten Produkt Saveware®. Diese Studien zeigten auf, dass die mit Saveware® ausgerüsteten Altpapierdämmstoffe mit etwas niedrigerer Einblasdichte verarbeitet werden konnten und aus technischer und ökologischer Sicht die Saveware-Ausrüstung den Isofloc-Dämmstoff gegenüber der mit Borsalzen ausgerüsteten Standard-Variante verbesserte. Die Verwendung von Lignin als Biostabilisator und Flammenschutzadditiv bei Holz und Kunststoffen ist bekannt (Nitz et al. 2001; Howell et al. 2004), wurde aber bisher nicht in der Holzspan-Dämmstoff-Entwicklung genutzt. Auch das Potenzial der Mineralisierung Oliveira et al. 2001) und Verholzung (Kharazipour et al. 1991) von Cellulose wurde bei Spanplatten und Klebesystemen und in der Papierindustrie (Hentschel 1938) erkannt, jedoch bisher noch nicht für die Dämmstoffanwendung erschlossen und in die hier üblichen Verfahren integriert. Das vorliegende Forschungsvorhaben nimmt diese Situation zum Anlass, um die Möglichkeiten einer chemischen Behandlung zur Verfestigung von Hobelspänen für die Dämmstoffanwendung zu untersuchen.

2 Zielsetzung des Projektes

Die durchgeführten Arbeiten erproben neue Ansätze zur chemischen Ausrüstung von Holzspänen für die Entwicklung von Dämmstoffen. Die eingesetzten Chemikalien und Komponenten sollen nicht-toxisch und ihre Gewinnung nicht mit einem Abbau endlicher Ressourcen verbunden sein. Die Verfahren verfolgen die beiden Hauptziele

- i) das bisher eingesetzte Borax als Schutzausrüstung zu ersetzen, und
- ii) die eingeblasene Holzspanmasse in eine Formbeständigkeit zu überführen, um Setzungen auszuschliessen, angepasste Schüttdichten zu erzielen, und grössere Füllhöhen zu erlauben.

Es sollen mindestens die bauphysikalischen Kennwerte des bisher eingesetzten Produkts mit Boraxbehandlung (CLIMAT) erreicht werden. Die Wärmeleitfähigkeit soll einen Wert von $0,041\text{W/m}\cdot\text{K}$ (nach SIA 279) nicht überschreiten. Die Brandkennziffer 5.3 (schwer brennbar, schwach qualmend) nach VKF-Vorschrift soll erreicht werden. Der Wasserdampfdiffusionswiderstand μ soll 1-2 betragen. Das Produkt soll eine spezifische Wärmekapazität c von $2100\text{J/kg}\cdot\text{K}$ aufweisen und die Schimmelpilzresistenz soll weiterhin gegeben sein.

3 Projektorganisation und Durchführung

Das Projekt wurde in einer Zusammenarbeit von 2 Forschungseinrichtungen (FMF Uni Freiburg/Bsg, Empa Abt. Holz Dübendorf und St.Gallen) und einem Industriepartner (FITAN durchgeführt.) Die Entwicklung neuer Methoden zur chemischen Behandlung wurde am Freiburger Materialforschungszentrum (FMF) durchgeführt (Laborphase). Unter Laborbedingungen wurden Varianten entwickelt und Probeimprägnierungen durchgeführt. Der Fokus lag dabei auf den drei Kennwerten Brandschutz, Versteifung und Schimmelpilzresistenz. Die Auswahl der Chemikalien orientierte sich an der Vorgabe, dass alle verwendeten Chemikalien natürlich vorkommen und wenig giftig sein sollen, sowie aus ökonomischen Gründen günstig in der Beschaffung sein müssen.

Nach der Laborphase werden in einer Pilotanlage der Firma FITAN AG in Dornach repräsentative Proben unter Realbedingungen erstellt. Diese Pilotbehandlungen erfolgten in zwei zeitlich unterschiedlichen Phasen. In einer ersten orientierenden Versuchskampagne im Frühjahr 2010 wurden 14 Varianten mit Untervarianten hergestellt und einer Bestimmung der Materialeigenschaften unterzogen. Deren Erkenntnisse führten zu einer zweiten fokussierten Behandlung im Frühjahr 2011.

Die Materialcharakterisierung der hergestellten Ansätze wurde an der Empa in Laboratorien in Dübendorf und in St. Gallen unter Federführung der Abteilung Holz. Abbildung 1 zeigt die Projektorganisation des Forschungsprojektes.

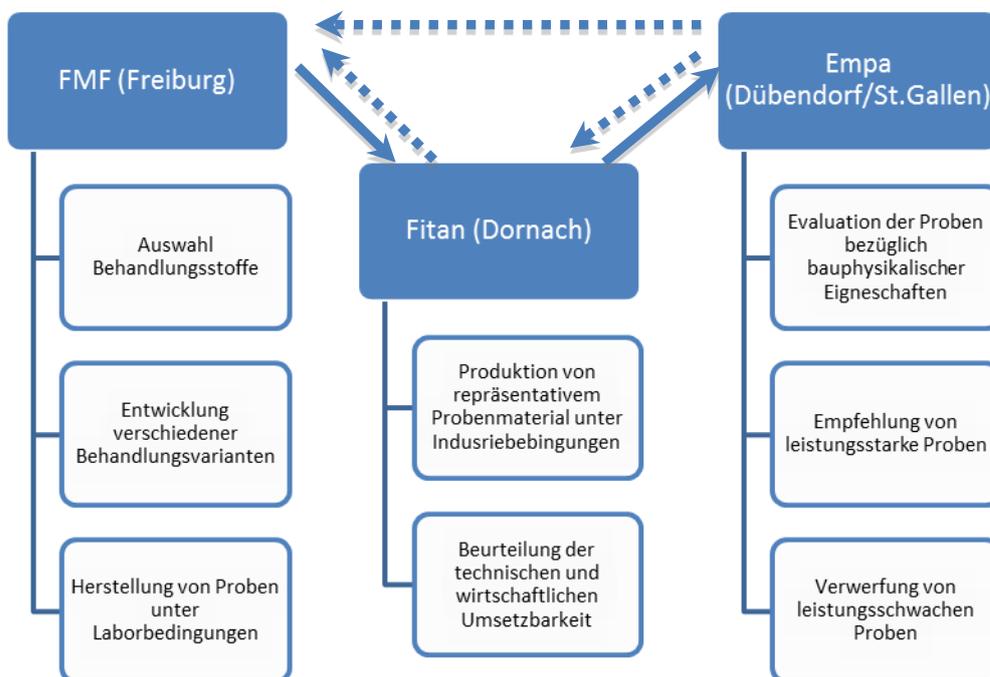


Abb. 1. Projektpartner und Arbeitsorganisation. Durchgezogene Pfeile stellen den primären Informations- und Materialfluss dar. Gestrichelte Pfeile zeigen die Rückkopplung durch Evaluation

4 Material und Methoden

4.1 Hobelspäne

Für die durchzuführenden Behandlungen werden Hobelspäne aus den Holzarten Fichte, Tanne und Douglasie zusammensetzt. Das Material wird bei verschiedenen Weichholzsägewerken aus der Region Basel angekauft. Ab Werk sind diese schon nach Größe vorsortiert, es wird nach Spanmaterial und Sägemehl unterschieden. Vor der Behandlung in der Pilotanlage werden die Späne ein weiteres Mal durchgesiebt (Lochweite 2x4mm), um den Feinanteil weiter zu reduzieren. Trotzdem weist das Rohmaterial zum Teil noch einen großen Feinanteil auf. Die Lagerung der Späne erfolgt bis zur Probenherstellung in luftdurchlässigen Kunststoffgewebesäcken zu je 12,5kg in einem gut belüfteten und vor Regen geschützten Lager.

4.2 Verwendete Chemikalien

4.2.1 Ca- und Na-Ligninsulfonate

Ligninsulfonsäure fällt bei der Papier- und Zellstoffproduktion als Sekundärprodukt an. In Gegenwart von Wasser hat es klebende Eigenschaften. Erwartete Wirksamkeit in Verbindung mit den Holzspänen: antimikrobielle Wirkung sowie durch Verharzung beim Brand Bildung von Kohlenstoffschichten mit Flammschutzwirkung

4.2.2 Natrium-, Lithium-, Kaliumwasserglas

Industriell hergestellt aus Lauge und Quarzsand, das wasserlösliche Polymere wie z.B. Kohlenhydrate durch Mineralisierung verfestigt, sie wasserunlöslich, wasserabweisend und flammfest machen kann. Erwartete Eigenschaften in Verbindung mit den Holzspänen sind die fungizide und feuerhemmende Wirkung

4.2.3 Natrium-Bentonit

Bentonit ist verunreinigter Ton, entstanden aus vulkanischem Tuff, und hat ein hohes Kationenaustauschvermögen. Besitzt hohes Quell- und Selbstheilungsvermögen der durch Selbstorganisation, bildet dabei Schichtstrukturen mit hoher Sperrwirkung.

4.2.4 Chitosan

Ausgangssubstanz von Chitosan ist Chitin, das vornehmlich aus Hummer- und Krabenschalen isoliert wird. Es dient im Pflanzen- und Tierreich als Gerüstsubstanz. Bei Pilzen ist es Bestandteil der Zellwand. Chitosan ist ein Polysaccharid mit freien Aminogruppen. Es ist in verdünnten Säuren löslich und dient als Ionenaustauscher. Die bisher geringe kommerzielle Nutzung findet vor allem durch Chitinpräparate in der Abwasserbehandlung, Kosmetikherstellung, Papier- und Färberhilfsmittel und vom Körper abbaubarer Wundverbände statt. Hohe Verfügbarkeit, da es z.B. ein Sekundärprodukt der Fischindustrie ist.

4.2.5 Diammoniumphosphat

Ausgangssubstanz ist natürliches Phosphat. Der Einsatzbereich ist zum Großteil in Düngemitteln, aber auch als Flammschutzmittel. Phosphorsäure wird unter anderem zur

Herstellung von Antibiotika benutzt. Die landseits erschließbaren Phosphatvorkommen sind endlich.

4.3 Methoden

4.3.1 Labormethoden

Für die Abbindereaktionen zur Verfestigung der Hobelspäne kommen prinzipiell folgende Möglichkeiten in Frage:

- (i) Mineralisierung und/oder Verholzung. Wasserglas soll durch Trocknen oder durch Zusatz von schwachen Säuren wie protoniertem Chitosan, Alginsäure, Carboxymethylcellulose, saurem Bentonit oder von mehrwertigen Kationen (z.B. Aluminiumsulfat, Alaun) mineralisiert werden.
- (ii) Als alternative Mineralisierung soll das Abbinden der Bentonite durch Kationenaustausch der Natrium-Ionen des Bentonits mit mehrwertigen Kationen wie protoniertem Chitosan oder Calcium- und Aluminiumsalzen genutzt werden. Chitosansulfat bzw. Chitosansulfat/Bentonit-Blends sollen durch Zusatz von Calciumhydroxyd („Kalkmilch“) durch Chitosan - kombiniert mit Gips (Calciumsulfat) -Bildung verfestigt werden.
- (iii) Eine Verholzung von Ligninsulfonat bzw. von Ligninsulfonat/Bentonit-Blends mit Kohlenhydrat-Bindemittel soll enzymatisch oder durch Kombination mit Mineralisierung bewirkt werden.

Die Vorversuche zur Abklärung der Möglichkeiten nach diesen grundsätzlichen Mechanismen wurden mit klassischen nasschemischen Verfahren im Labor des FMF ausgeführt: Holzspäne wurden in wässrigen Lösungen der ausgewählten Chemikalien durch Tauchen imprägniert. Die Experimente benötigten relative hohe Wassermengen bzw. kleine Konzentrationen, um eine homogene Imprägnierung zu erreichen. Zwischen einzelnen Behandlungsschritten wurden die Späne getrocknet. Die Eignung der Rezepturen wurde anhand einfacher qualitativer Untersuchungen (Bewertung des Abbindeverhaltens und der Zeit der Verkieselung) bestimmt.

Die nach Modifikation mit den wirksamen Komponenten (Kaliumwasserglas (KWG), Ca- und Na-Ligninsulfonate (Ca-L, Na-L), Dextrin (D), Stärke (S); Aluminiumsulfat-Hexahydrat(Al)) behandelten Hobelspanvarianten wurden einem Setzungsversuch unterzogen. Dazu wurden die Späne in einen Zylinder gefüllt und mit einem Gewicht beschwert. Dabei wurde die Abnahme der Füllhöhe mit der Zeit beobachtet. Die diversen Dämmstoffe wurden vor dem Experiment 24 h bei 80°C getrocknet. Die Setzungsexperimente wurden in einem klimatisierten Raum (23°C) durchgeführt. Der Zylinder (Plexiglas) hat eine Höhe von 75 cm und einen Durchmesser von 13 cm. Der Zylinder wurde unabhängig vom Dämmstoff bis auf eine Höhe von 66 cm befüllt. Hierbei wurde der Zylinder während des Befüllens gerüttelt, so dass ein maximaler Verdichtungsgrad erzielt wurde. Das Beschwerungsgewicht betrug 4145.3 kg

4.3.2 Behandlung im Pilotmasstab

Beim Industriepartner wurden die Chemikalien in einem speziell für dieses Projekt entwickelten und hergestellten Miniaturtrommelmischer unter praxisnahen Bedingungen auf die Hobelspäne aufgebracht, bei 105°C getrocknet und zur Weiterverarbeitung (Charakterisierung) bereitgestellt. Die Miniaturmischanlage (Abb. 2) hat ein Fassungsvermögen von 0,15m³ und verfügt über eine horizontal gelagerte vierblättrige Mischspindel. Die Geschwindigkeit der Trommel ist stufenlos regelbar. Für die nach der Behandlung stattfindende Trocknung gibt es im unteren Bereich der Mischtrommel, parallel zur Mischachse ausgerichtet, eine Luftzufuhr. Diese kann durch eine Propangaskanone geheizt werden. Die Temperaturmessung findet am Einlass zur Trommel statt. Senkrecht nach oben geht vom Deckel der Mischkammer ein Abluftkanal weg. Der Kanal ist an einer Absauganlage angeschlossen und hat eine Absperrklappe direkt an der Mischkammer. Im Deckel und an den Seitenwänden sind verschiedene Düsen angebracht um Behandlungssuspensionen oder -lösungen einzusprühen. Der Druckaufbau erfolgt über eine kleine, von einer Bohrmaschine angetriebene Pumpe. Alternativ stand eine Handgiftspritze für die Gartenanwendung zur Verfügung.

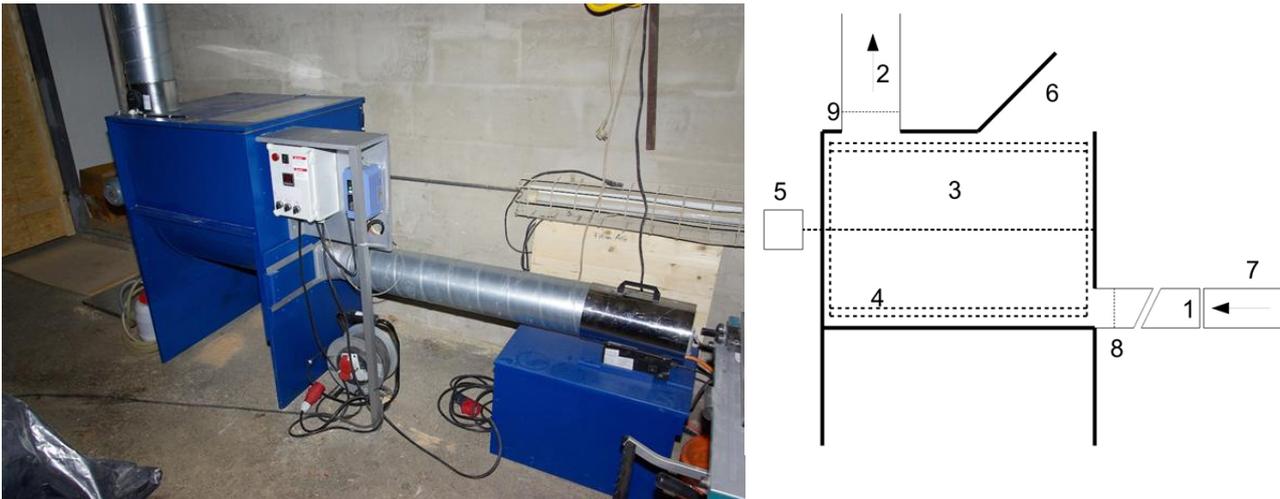


Abb. 2. Links: Pilotanlage zur Hobelspanbehandlung. Rechts: Längsschnitt mit 1 Luftzufuhr, 2 Luftabfuhr, 3 Mischtrommel, 4 Mischspindel, 5 Mischspindeltrieb (Elektromotor + Getriebe), 6 Befüll-, Entnahme- und Kontrollklappe, 7 Propangasheizkanone, 8 Zuluftventil und Temperaturfühler, 9 Abluftventil.

Die Behandlung erfolgte in folgenden Schritten: Die Hobelspäne und die Chemikalien wurden bereitgestellt und eingewogen. Eine definierte Menge Späne wurde in die Mischmaschine eingefüllt, der Mischer anlaufen gelassen und die bis zu drei Behandlungsmittel in der durch die Laborversuche vorgegebenen Reihenfolge via Sprühvorrichtung eingebracht. Zwischen den einzelnen Behandlungsschritten wurde die Sprühvorrichtung jeweils mit 100ml warmem Wasser gespült. Anschliessend wurde der Zuluftkanal geöffnet und die Propangaskanone gezündet, die Abluftanlage eingeschaltet und die Trocknungstemperatur durch Drosseln der Propangaskanone und Regeln der Abluftmenge auf 105°C eingestellt. Der Feuchtegehalt der Späne wurde „händisch“ kontrol-

liert, alternativ kann durch Messung der Ablufttemperatur die Differenz zur Zuluft Temperatur beurteilt werden. Die Trocknung wurde beendet, wenn die Späne als trocken beurteilt wurden und wenn sich die Temperaturwerte von Zuluft und Abluft stark angenähert hatten. Nach Stoppen des Mixers und der Heissluftzufuhr wurden die Späne mit einem speziellen Spänesauger aus der Mischtrommel abgesaugt und in Kunststoffsäcke gefüllt zum Transport an die Empa.

4.3.2.1 Materialcharakterisierung

An den verschiedenen behandelten Hobelspänen wurde die Morphologie, die Streudichte, das Setzungsverhalten, der Feuchtegehalt, die Wärmeleitfähigkeit, die Schimmelpilzresistenz und das Brandverhalten ermittelt. Vor den jeweiligen Prüfungen waren die Proben mindestens 14 Tage zur Klimatisierung im Klima 20°/65%rL gelagert.

4.3.2.2 Morphologie

Die Untersuchung der Morphologie erfolgte durch fotografische Dokumentation von definierten Probenmengen, als auch durch lichtmikroskopische Analyse einzelner Späne.

Für die fotografische Analyse wurden von allen Varianten 2g Material entnommen und jeweils unter gleichen Bedingungen unter Verwendung eines Stativs mit einer Digitalkamera fotografiert. Das Probenmaterial wurde dazu auf einen schwarzen Karton gegeben und vorsichtig flächig verteilt. Über die Grössenskalierung wurden die Proben und deren Morphologie makroskopisch verglichen und die Partikelgrößenverteilungen näherungsweise beurteilt.

Für die lichtmikroskopische Analyse wurden einzelne Späne rechteckig auf ca. 1x2mm zugeschnitten, um den Einfluss der Krümmung der Späne zu minimieren. Die zugeschnittenen Stücke wurden mit Plastilin auf einen Objektträger geklebt, mit einem Deckglas abgedeckt und anschließend zusammengepresst. Das Präparat wurde mit einem Auflichtmikroskop bei 200- und 400facher Vergrößerung untersucht. Von einzelnen Spänen wurden mit einem Schlittenmikrotom Querschnitte der Späne geschnitten, auf Deckgläsern eingebettet und im Durchlichtmikroskop untersucht.

Die im Labor des FMF modifizierten Späne wurden zudem mit einem ESEM (Umwelt-rasterelektronenmikroskop) untersucht. Dazu wurden die Späne bei 103°C getrocknet und ohne Besputterung mit einem Leitmetall im ESEM analysiert.

4.3.2.3 Streudichte

Zur Bestimmung der Streudichte wurde das Probenmaterial von Hand gut, aber vorsichtig durchmischt, um eine mögliche Spangrößenseparation und Setzung durch Transport, Bewegung und Lagerung aufzuheben. Als Messbehälter diente ein 1l-Becherglas. Das Becherglas wurde bis zur 800ml Markierung mit Spänen gefüllt, wobei auf eine lockere und gleichmäßige Schüttung geachtet wird. Bei Bedarf wurde die Oberfläche vorsichtig geglättet, ohne das Material zu verdichten. Danach wurde die Probe auf 1/100g genau gewogen. Schläge oder Vibrationen, die ein Setzen hervorrufen können, wurden vermeiden. Abzüglich des Eigengewichts des Becherglases ergibt sich die Dichte in

Gramm je 0,8l. Um auf kg/m^3 umzurechnen, wurde der Wert mit 1,25 multipliziert. Das Material wurde wieder der Gesamtprobe zugegeben.

Da die ermittelten Werte stark vom gleichmäßigen Füllen und der genauen Füllhöhe abhängen, wurde der Vorgang viermal je Probe durchgeführt. Vor jeder Neubefüllung des Becherglases wurden die Späne im Sack noch einmal durchgemischt, um einen repräsentativen Durchschnitt der Gesamtprobe zu erhalten. So sollten mögliche lokale Dichteunterschiede der Gesamtprobe ausgeglichen werden.

4.3.2.4 Setzungsverhalten

Um das in der Realität zum Teil über Jahre andauernde Setzen von Hobelspandämmungen im Laborversuch nachzustellen, wurde dies mit Vibrations- oder Rütteltischen simuliert. Das für dieses Projekt zur Verfügung stehende Gerät war ein mit Druckluft betriebener Vibrationstisch der Firma Netter Vibrationstechnik. Die Vibrationsfrequenz kann über einen Druckminderer grob eingestellt werden. Eine Frequenzanzeige ist nicht vorhanden. Das Druckluftsystem des Labors hat einen konstanten Druck von ca. 9 bar. Für die Versuche wurde ein Luftdruck von 4 bar eingestellt.

Auf den Vibrationstisch (50 x 50cm) ist ein abnehmbarer Probenbehälter aus Sperrholz aufgesetzt. Dieser ist mit zwei Schrauben am Rütteltisch befestigt. Die Innenmaße des Probenbehälters sind 15 x 15 x 45cm (Breite x Tiefe x Höhe). An einer Seite ist anstatt einer hölzernen Wand eine Plexiglasscheibe eingesetzt, wodurch die Füllhöhe vor, während und nach dem Vibrationsvorgang abgelesen, als auch das Verhalten der Späne während des Vorgangs beobachtet werden kann. Der Vibrationstisch und der Probenbehälter sind in Abbildung 3 abgebildet.



Abb. 3. Versuchsanlage zur Bestimmung des Setzungsverhaltens

Je Probe wurde ein Versuch durchgeführt. Die Einbaudichte der Proben orientiert sich zwischen der Streudichte und der zu erwartenden Enddichte. Findet keine Setzung statt, liegt die Einbaudichte bereits über der Enddichte. Der Versuch wurde in diesem Fall mit einer geringeren Anfangsdichte wiederholt. Der Versuchsablauf erfolgte in festgelegten

Schritten: Der Probenbehälter wurde bis zur 40cm-Markierung mit Probematerial befüllt bzw. verdichtet, und anschliessend auf dem Vibrationstisch festgeschraubt. Die Probe wurde mit 2110,6 g beschwert, was in einer 2-3m hohen Wand eine mittlere Position simuliert (abhängig von Materialdichte). Nach Aktivierung der Vibration wurde die Füllhöhe nach 10, 20, 60, 120, 300, 600, 900, 1200, 1500 und 1800 Sekunden notiert, und der Versuch nach 30 Minuten (1800 sec.) beendet. Das Probenmaterial wurde der Gesamtprobe wieder zugeführt. Aus dem Endvolumen und dem Gewicht der Proben wurde durch folgende Formel die erreichte Dichte errechnet:

Enddichte $D_e = \text{Probengewicht } G_p / \text{Probenvolumen bei Versuchsende } V_{pe}$.

4.3.2.5 Wärmeleitfähigkeit

Zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit wurde ein Einplattengerät verwendet. Der Vorteil zum Zweiplattengerät liegt in der einfachen Handhabung, den geringen benötigten Mengen an Probenmaterial und der durch die geringen Massen bedingten kurzen Vorlaufzeiten. Die Genauigkeit des Geräts wurde als ausreichend erachtet.

Da das Gerät für Feststoffe ausgelegt ist, war es nötig für Schüttdämmstoffe spezielle Prüfraumen herzustellen, in welche die Proben eingefüllt wurden. Die Prüfraumen bestehen aus einem Bodenteil und einem Deckel aus Aluminium mit den Maßen 250 x 250 x 0,5mm. Auf das Bodenteil wird ein Rahmen aus XPS mit einer Wandstärke von 20mm und einer Höhe von 30mm aufgeklebt. Es ergibt sich ein Innenraum von 210 x 210 x 30mm mit einem Volumen von 1,3l.

Die Versuche wurden mit verschiedenen Einbringdichten durchgeführt. Dazu war es nötig die Proben verschieden stark in den Prüfraumen zu verdichten. Um diesen Vorgang einfach und effizient zu gestalten, wurde auf den offenen Prüfraumen ein bodenloser zweiter Rahmen aufgesetzt. So konnte die benötigte Masse problemlos per Hand eingestreut werden. Dabei wurden die Späne möglichst gleichmäßig im Rahmen verteilt, um eine gleichmäßige Dichte zu erzielen. Anschließend wurde mit einer passgenauen Sperrholzplatte (20 x 20 x 25mm) die Probe soweit verdichtet, dass die Späne noch leicht erhöht sind. Der Hilfsrahmen wurde abgenommen. Dann wurde der Deckel aufgelegt, der unter leichtem Druck den Rahmen schließen musste, um so einen guten Kontakt zwischen Probe und Deckel sicher zu stellen.

Der vorbereitete Prüfraumen wurde in das Einplattengerät (s. Abbildung 4) eingelegt und nach einer 90 minütigen Einlaufphase die Messung begonnen. Dabei wurde der Wärmefluss mittels Thermoelementen an fünf Stellen über 90 Minuten gemessen. Der Messraum ist klimatisiert, so dass die Proben ihren Feuchtegehalt nicht verändern. Zwischen zwei Messungen, bzw. nach einem Wechsel der Probe, muss es wieder eine Einlaufphase geben. In der Messphase wird der Wärmestrom im Minutentakt aufgezeichnet und ein Mittelwert angegeben.

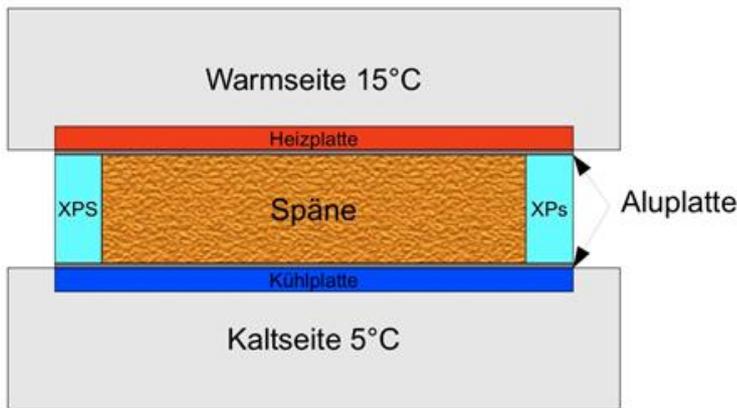


Abb 4. Schema Einplattengerät mit Späneprobe im Messrahmen

4.3.2.6 Schimmelpilzresistenz

Es gibt kein Normverfahren zur Feststellung der Schimmelpilzresistenz von Hobelspänen. Deshalb wurde die Analyse an eine Standard Versuchsanweisung (SOP) der Empa zur „Prüfung des Verhaltens von Anstrichen auf Holzoberflächen gegenüber Pilzen/Pilzbewuchs“ (Empa SOP-Nr. 4349) angelehnt. Dazu wurden auf zwei verschiedene Arten Späneproben mit Pilzsporen beimpft.

Bei der ersten Variante wurde für jede der Spänevarianten zweimal 2g klimatisiertes Probenmaterial in einer Petrischale abgewogen und mit einem Deckel verschlossen. Gleichzeitig wurde mit Referenzproben der zu diesem Zeitpunkt herrschende Feuchtegehalt der Proben bestimmt. Die Petrischalen wurden mit Ethylenoxid (Gas) sterilisiert. Es folgte die Beimpfung mit einer Schimmelpilzsporensuspension. Da der Feuchtegehalt der Proben bekannt war, gab man jeder Probe so viel Suspension zu, dass bei jeder Probe eine Feuchte von 50% herrschte. Die Anzahl der eingebrachten Sporen je Probe bleibt dabei gleich.

Da das Probematerial lediglich einen Feuchtegehalt von durchschnittlich ca. 12% aufwies und ein präzises Arbeiten mit unter einem Gramm Flüssigkeit nicht gewährleistet war, wurden alle Proben mit 1g Sporensuspension beimpft. Die Beimpfung erfolgte an einem sterilen Arbeitsplatz mittels Saugpipette. Die Petrischalen wurden dabei so kurz wie möglich geöffnet.

Variante zwei ist identisch, nur dass man die Späne in eine Petrischale mit Mineral-Nähragar gab. Dieser beinhaltet reinen Agar und verschiedene Nährsalze. Durch den Nähragar kann sich die Feuchtigkeit selbstständig einstellen, wodurch ein besserer Pilzbewuchs provoziert werden sollte.

Die Suspension beinhaltet Sporen folgender Pilzarten:

- *Aspergillus versicolor* (Empa-Kulturnr.: 517)
- *Cladosporium sphaerospermum* (Empa-Kulturnr.: 428)
- *Penicillium purpurogenum* (Empa-Kulturnr.: 631)
- *Phoma* sp. (Empa-Kulturnr.: 610)
- *Alternaria* sp. (Empa-Kulturnr.: 632)
- *Aureobasidium pullulans* (Empa-Kulturnr.: 316)

Die Lagerung der Testansätze erfolgte in einer Klimakammer bei 23°C und 50% relativer Luftfeuchtigkeit. Um einen Feuchteverlust durch Verdunstung zu minimieren lagerten die Ansätze in einer verschlossenen Kunststoffkiste, in der zusätzlich ein Becherglas mit Wasser stand. Der Bewuchs wurde wöchentlich kontrolliert und auf einer Skala von 0-5 bewertet:

0 = kein Bewuchs

1 = Bewuchs nur unter dem Mikroskop erkennbar

2 = < 25% der Probenoberfläche bewachsen (makroskopisch erkennbar)

3 = 25-50% der Probenoberfläche bewachsen (makroskopisch erkennbar)

4 = > 50% der Probenoberfläche bewachsen (makroskopisch erkennbar)

5 = gesamte Probe bewachsen (makroskopisch erkennbar)

Nach der 28 (Erstbehandlung) bzw. 42 Tagen (Zeitbehandlung) wurde der Versuch abgebrochen.

4.3.2.7 Brandverhalten

Die Proben der ersten Behandlung wurden 10 Tage vor den Versuchen in einer Klimakammer bei Normalklima (50% Luftfeuchtigkeit, 23°C Temperatur) klimatisiert. Der Transport zum Prüflabor erfolgte in Kunststoffsäcken, die mit Kabelbindern verschlossen waren.

Die Brandprüfung wurde im Radiant Panel Test für schüttbare Materialien durchgeführt (Abb. 5). Man bringt eine definierte Menge klimatisiertes Prüfmaterial in einer 30mm dicken Schicht und einer definierten Dichte in die Bodenwanne der Prüfkammer ein. Ein über der Probe hängender Gasstrahler, der eine Temperatur von 150°C erzeugt, wird benutzt, um die Probe zwei Minuten lang vorzuheizen. Die Probe war dabei mit einer Glasplatte abgedeckt. Während der Tests wurde die Glasplatte vorsichtig nach links weg gezogen, gleichzeitig startete der Lineburner, um zehn Minuten lang die rechte Seite der Probe zu beflammen. Wenn der Lineburner verlöschte, wurde nach weiteren 20 Minuten der Versuch beendet.



Abb. 5. Radiant Panel Test. Rechts Lineburner mit nach links laufender Flammfront (Bild: Rechsteiner)

Folgende Daten wurden dokumentiert:

- Zeit, welche die Flammfront für jeweils 10cm Fortschritt brauchte
- erreichte Distanz nach 10, 12, 20, 22, 30 Minuten
- erreichte Distanz nach Selbsterlöschen, bzw. Versuchsende

Aus diesen Angaben errechnete eine Software die Wärmestromdichte in kW/m^2 .

Nach folgendem Schlüssel wurde der Brennbarkeitsgrad bestimmt:

- < $2,7 \text{ kW/m}^2$: leichtbrennbar (Brennbarkeitsgrad 3)
- > $2,7 \text{ kW/m}^2$: mittelbrennbar (Brennbarkeitsgrad 4)
- > $4,5 \text{ kW/m}^2$: schwerbrennbar (Brennbarkeitsgrad 5)
- > 8 kW/m^2 : quasi nicht brennbar (Brennbarkeitsgrad 6q)

Für den Rauchdichtetest wurden die Proben im gleichen Verfahren klimatisiert, wie beim Brennbarkeitstest. Die Proben wurden in einen 0,6l Siebkäfig gefüllt und dieser in eine belüfteten Prüfkammer exponiert. Die Proben wurden bis zum Abbrennen beflammt. Während des gesamten Vorgangs wurde durch eine Fotozelle fotometrisch die Lichtabsorption in der Prüfkammer bestimmt. Der kritische Wert ist die höchste gemessene Lichtabsorption.

Nach folgendem Schlüssel wurde der Qualmgrad bestimmt:

- > 90% Lichtabsorption: schwer qualmend (Qualmgrad 1)
- 50-90% Lichtabsorption: mittel qualmend (Qualmgrad 2)
- 0-50% Lichtabsorption: schwach qualmend (Qualmgrad 3)

Für eine Zulassungsprüfung muss jeder der beiden Tests dreimal durchgeführt werden. Bei starker Streuung der Ergebnisse noch ein viertes mal. Aufgrund der Menge der Proben, der hohen Kosten, dem begrenztem Projektbudget und nicht zuletzt, da es sich um eine Studie handelt, wurden die Tests nur in zweifacher Ausfertigung durchgeführt. Für eine Sondierung des Verhaltens der Proben wurde dieses Vorgehen als ausreichend erachtet.

5 Ergebnisse

5.1 Labortest

5.1.1 Herstellung der wässrigen Lösungen und Abbindeversuche

In Tabelle 1 sind die Ansätze zur Herstellung der wässrigen Lösungen für die Abbindeversuche zusammengestellt. Für die Abbindeversuche wurden die einzelnen Komponenten zu folgenden Massenkonzentrationen eingesetzt:

- Ca-L, Na-L KWG und Al zu 10-wt%
- S und D zu 5-wt%

Aus eine Vielzahl von Versuchen wurden anhand der Bewertung der Abbindezeit und dem Verkieselungsverhalten die in Tabelle 2 zusammengestellten Systeme weiterverfolgt.

Tab.1. Lösungen der eingesetzten Komponenten.

| Komponente | Masse [g] | Volumen [ml] | Konzentration [g/ml] |
|-------------------|-----------|--------------|----------------------|
| Stärke | 1.25 | 100 | 0.0125 |
| Dextrin | 1.25 | 100 | 0.0125 |
| Ca-Ligninsulfonat | 1.25 | 100 | 0.0125 |
| Na-Ligninsulfonat | 1.25 | 100 | 0.0125 |
| Aluminiumsulfat | 2.50 | 100 | 0.0250 |
| Kaliumwasserglas | 2.50 | 100 | 0.0250 |

Tab.2. Ausgewählte Abbindeversuche

| No. | Komponenten | abgebunden/verkieselt |
|-----|---------------------|-----------------------|
| 1 | S + Ca-L + KWG | ja (2s) |
| 2 | S + Al + KWG | ja (10s) |
| 3 | S + Ca-L + Al + KWG | ja (5s) |
| 4 | D + Ca-L + KWG | ja (1s) |
| 5 | D + Al + KWG | ja (8s) |
| 6 | D + Ca-L + Al + KWG | ja (4s) |

s = Sekunde

Die Abbinde-/Verkieselungsreaktionen mit Dextrin zeigten etwas bessere Ergebnisse als die mit Stärke. Des Weiteren zeigten die Systeme ohne Aluminiumsulfat deutlich schnellere Abbinde-/Verkieselungsreaktionen.

5.1.2 Hobelspanmodifizierung

Für die Modifizierungen der Holzspäne werden folgende Komponenten verwendet

- Dextrin
- Aluminiumsulfat
- Ca-Ligninsulfonat
- Kaliumwasserglas

Es wurden sowohl die Rohholzspäne (HS) als auch die mit Ammoniumpolyphosphat imprägnierten Holzspäne (HS-P) modifiziert. Diese wurden vor der Modifizierung für 24 h bei 80°C in einem Labortrocknenofen getrocknet. Hierbei erfolgte ein Massenverlust von ~ 9%.

Masse HS vor Trocknung = 1600 g
 Masse HS nach Trocknung = 1480 g

Masse HS-P vor Trocknung = 1600 g
 Masse HS-P nach Trocknung = 1460 g

In Tabelle 3 sind die Ansätze zur Herstellung der wässrigen Lösungen für die Modifikation zusammengestellt.

Tab.3. Lösungen der eingesetzten Komponenten.

| Komponente | m =Masse [g] | V = Volumen [ml] | c = Konzentration [g/ml] |
|------------|--------------|------------------|--------------------------|
| D | 40.0 | 4000 | 0.01 |
| Ca-L | 80.0 | 4000 | 0.02 |
| KWG | 300.0 | 6000 | 0.05 |

Sowohl die reinen Holzspäne (HS) als auch die mit Ammoniumpolyphosphat imprägnierten Holzspäne (HS-P) wurden modifiziert. Die Holzspäne wurden mit folgenden Komponenten versetzt:

- D zu 2.5-wt%
- Ca-L zu 5.0-wt%
- KWG zu 5.0 bzw. 10.0-wt%

Die Gewichtsprocente (wt%) beziehen sich auf die Masse der eingesetzten Holzspäne.

Modifizierung der reinen HS:

1500 g der HS wurden stufenweise mit einer wässrigen Lösung von D, Ca-L und KWG imprägniert. In Portionen von 250 g wurden die HS mit einer wässrigen Lösung der jeweiligen Komponente begossen. Die nicht eingezogene Lösung wurde abgeführt und nochmals den Holzspänen zugegeben, bis letztlich die ganze Lösung aufgesaugt wurde. Nach Versetzen der HS mit der ersten Komponente (D) wurden diese bei 80°C für 24 h im Labortrockner getrocknet. Diese Vorgehensweise wurde für jede weitere Komponente (Ca-L und KWG) wiederholt. Die verwendeten Komponenten und die Vorgehensweise sind in Abbildung 6 gezeigt.

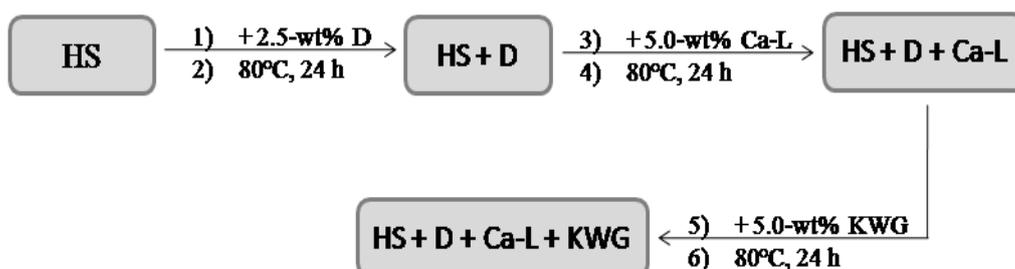


Abb 6.Vorgehensweise bei der Modifizierung der HS.

Tabelle 4 zeigt für die Modifizierung der HS eingesetzte Volumen der jeweiligen Komponenten.

Tab.4. Für die Modifizierung von 1500 g HS eingesetzte Komponenten.

| Stufe | Komponente | Masse [g] | Konzentration [g/ml] | Volumen [ml] |
|-------|------------|-----------------|----------------------|----------------|
| 1 | D | 37.5 | 0.010 | 3750 |
| 2 | Ca-L | 75.0 | 0.020 | 3750 |
| 3 | KWG | 75.0 bzw. 150.0 | 0.025 | 3000 bzw. 6000 |

Modifizierung von HS-P:

1500 g der HS-P wurden portionsweise (6 x 250 g) mit einer wässrigen Lösung von KWG (s. Tab.6) modifiziert. Jeweils 250 g der HS-P wurden mit je 500 ml der KWG-Lösung begossen. Nach Versetzen der gesamten HS-P mit dem KWG wurden diese bei 80°C für 24 h getrocknet. Die Vorgehensweise ist in Abbildung 7; der Ansatz in Tabelle 5 gezeigt.

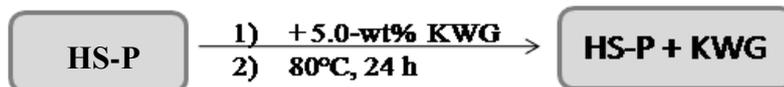


Abb. 7. Vorgehensweise bei der Modifizierung von HS-P.

Tab.6. Für die Modifizierung von 1500 g HS-P eingesetztes KWG.

| Stufe | Komponente | Masse [g] | Konzentration [g/ml] | Volumen [ml] |
|-------|------------|-----------|----------------------|--------------|
| 1 | KWG | 75.0 | 0.025 | 3000 |

5.1.2.1 Setzungsversuche

An den folgenden Systemen wurden Setzungsmessungen vorgenommen:

- 1 HS
- 2 HS + 2.5-wt% D + 2.5-wt% Ca-L + 5.0-wt% KWG
- 3 HS + 2.5-wt% D + 2.5-wt% Ca-L + 10.0-wt% KWG
- 4 HS-P
- 5 HS-P + 5.0-wt% KWG

In Tabelle 5 sind die Ergebnisse der Messungen an den Systemen 1 bis 3 zusammengestellt.

Tab.5. Vergleich der Ergebnisse aus den Setzungsexperimenten.

| t_{Bes} | Füllstand Zylinder [cm] | | | | |
|-----------|-------------------------|------|------|------|------|
| | S1 | S2 | S3 | S4 | S5 |
| 0 sec | 66.0 | 66.0 | 66.0 | 66.0 | 66.0 |
| 5 sec | 52.0 | 59.0 | 63.7 | 52.0 | 63.0 |
| 15 min | 51.0 | 58.0 | 63.5 | 51.0 | 62.5 |
| 45 min | 49.5 | 58.0 | 62.8 | 49.5 | 62.4 |
| 24 h | 49.3 | 57.8 | 62.8 | 49.3 | 62.2 |
| 48 h | 49.3 | 57.8 | 62.8 | 49.3 | 62.1 |
| 72 h | 49.3 | 57.8 | 62.8 | 49.3 | 62.1 |
| 96 h | 49.3 | 57.8 | 62.8 | 49.3 | 62.1 |

t_{Bes} = Dauer der Beschwerung

Bei S1 (HS) tritt sofort nach Beschwerung des Dämmstoffs eine Setzung von 14.0 cm auf, dies entspricht einem Höhenverlust (-h) von ~ 21.2 %. Hingegen zeigt S2 eine Setzung von 7.0 cm (-h ≈ 10.5 %), S3 lediglich eine Setzung von 2.3 cm (-h ≈ 3.5 %). S4 (HS-P) zeigt bei Beschwerung gegenüber S1 (HS) eine viel geringere Setzung von 6.0 cm (-h ≈ 9.1 %). Die Setzung bei S5 (HS-P + KWG) beträgt nur 3.0 cm (-h ≈ 4.5 %).

In Tabelle 6 sind alle Massen der Dämmstoffe aufgeführt, welche für die Setzungsexperimente verwendet wurden.

Tab.6. Massen der Dämmstoffe vor und nach dem Setzungsexperiment bei einer Füllhöhe von 66.0 cm..

| System | S1 | S2 | S3 | S4 | S5 |
|--------|-----|-----|-----|-----|-----|
| m_v | 349 | 383 | 565 | 677 | 620 |
| m_n | 352 | 386 | 569 | 680 | 622 |

m_v = Masse des Dämmstoffs vor dem Setzungsexperiment.

m_n = Masse des Dämmstoffs nach dem Setzungsexperiment.

Die geringsten Massen weisen die Dämmstoffe S1 (HS) und S2 (HS + D + Ca-L + KWG). Relativ hohe Massen zeigen S3, S4 und S5.

Die vororientierenden Laborexperimente zeigen, dass die mit K-Wasserglas bzw. Ca-Ligninsulfonat / K-Wasserglas / (ggf. Dextrin) als Additive modifizierten Hobelspane eine die deutlich reduzierte Setzung/Verdichtung erfahren. Die beiden Systeme HS-P mit Kaliwasserglas und HS mit Calcium-Ligninsulfonat/K-Wasserglas/(Dextrin) wurden ausgewählt für die Versuche beim Industriepartner, wo unter industrierelevanten Mischbedingungen weitere Anpassungen erprobt werden sollten, die anschliessend einer umfassenderen Materialcharakterisierung bei Empa unterzogen werden.

5.2 Behandlung im Pilotmasstab

In Tabelle 7 sind die im weiteren Verlauf des Projektes charakterisierten Systeme der Hobelspane zusammengestellt. Alle mit dem Buchstaben S bezeichneten Systeme wur-

den mit Chemikalien behandelt, die Systeme Fi, Dou sind sortenreine, die Systeme SRoh1 bzw. SRoh2 gemischte Hobelspäne ohne Imprägnierung mit einem chemischen Zusatzmittel. SROh1 bezeichnet die unbehandelte Hobelspanfraktion zu den in der ersten Kampagne behandelten Systeme S2-S14, SROh2 bezeichnet die unbehandelte Hobelspanfraktion zu den in der zweiten Kampagne behandelten Systeme S15-S27. Das System SR entspricht dem mit Borax und Diammoniumphosphat behandelten Produkt CLIMAT. Die Proben mit dem Kürzel L (SL2-7) wurden unter Laborbedingungen wie oben beschrieben im FMF hergestellt. Die Hobelspäne wurden dazu in die wässrigen Lösungen mit den Chemikalien eingetaucht und zwischen den Behandlungen getrocknet. Die Systeme, die in Dornach beim Industriepartner im Miniaturtrommelmischer beaufschlagt wurden, wurden in zwei Behandlungskampagnen hergestellt: S2 – S 14 im Frühjahr 2010, S 15 – S 27 im Frühjahr 2011. Mit Ausnahme des Systems S8.1, bei dem die Chemikalien in Pulverform eingebracht wurden, erfolgte die Beaufschlagung bei allen anderen Systemen in gelöster/suspendierter Form.

Zusammenfassend werden folgende drei Varianten mit jeweils unterschiedlichen Konzentrationen hergestellt und untersucht:

- Variante 1: Dextrin, Natriumligninsulfonat, Kaliwasserglas (S2.2, S3.2, S8.1, S8.2)
- Variante 2: Diammoniumphosphat, Natriumligninsulfonat, Calciumligninsulfonat Kaliwasserglas (S9.2, S10.2, S11.2, S15, S16, S 17, S18, S 19)
- Variante 3: Phosphor-/Essigsäure, Natrium-Bentonit, Nieder-/Hochmolekulares Chitosan (S12.2, S13.2, S14.2, S20, S21, S22, S23, S24, S27)

Tab.7. Übersicht der im Miniaturtrommelmischer behandelten Hobelspansysteme mit Bezeichnung der eingesetzten Chemikalien.

| Name | Komp. 1 | Gew. % | Komp. 2 | Gew. % | Komp. 3 | Gew. % | Aufbringung |
|-------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|--------------------|
| Fi | - | - | - | - | - | - | - |
| Dou | - | - | - | - | - | - | - |
| SRoh1 | - | - | - | - | - | - | - |
| SR | Ph | 5 | Bo | 1 | - | - | gelöst/suspendiert |
| SL2 | D | 2.5 | Ca-L | 5 | KWG | 5 | getränkt |
| SL3 | D | 2.5 | Ca-L | 5 | KWG | 10 | getränkt |
| SL5 | Ph | 5 | Bo | 1 | KWG | 5 | getränkt |
| SL7 | ES | - | Na-Be | 2.5 | N/H-Ch | 2.5 | getränkt |
| S2.2 | D | 2.5 | Na-L | 5 | KWG | 5 | gelöst/suspendiert |
| S3.2 | D | 2.5 | Na-L | 5 | KWG | 10 | gelöst/suspendiert |
| S8.1 | D | 2.5 | Na-L | 5 | KWG | 20 | trocken |
| S8.2 | D | 2.5 | Na-L | 5 | KWG | 20 | gelöst/suspendiert |
| S9.2 | Ph | 5 | Na-L | 5 | KWG | 5 | gelöst/suspendiert |
| S10.2 | Ph | 5 | Na-L | 2.5 | KWG | 5 | gelöst/suspendiert |
| S11.2 | Ph | 2.5 | Na-L | 5 | KWG | 5 | gelöst/suspendiert |
| S12.2 | PhS | 4 | Na-Be | 2.5 | H-Ch | 2.5 | gelöst/suspendiert |
| S13.2 | ES | 2.5 | Na-Be | 2.5 | N-Ch | 2.5 | gelöst/suspendiert |
| S14.2 | PhS | 2.5 | Na-Be | 2.5 | N-Ch | 2.5 | gelöst/suspendiert |
| SRoh2 | | | | | | | |
| S15 | Ca-L | 5 | KWG | 2.5 | Ph | 2.5 | gelöst/suspendiert |
| S16 | Ca-L | 5 | KWG | 2.5 | Ph | 1 | gelöst/suspendiert |
| S17 | Ca-L | 5 | KWG | 1 | Ph | 1 | gelöst/suspendiert |
| S18 | Ca-L | 2.5 | KWG | 2.5 | Ph | 1 | gelöst/suspendiert |
| S19 | Ca-L | 2.5 | KWG | 1 | Ph | 1 | gelöst/suspendiert |
| S20 | H-CH | 3 | PhS | 3 | Na-Be | 3 | gelöst/suspendiert |
| S21 | H-CH | 2 | PhS | 3 | Na-Be | 2 | gelöst/suspendiert |
| S22 | H-CH | 2.4 | PhS | 6 | Na-Be | 6 | gelöst/suspendiert |
| S23 | H-CH | 2.4 | PhS | 6 | Na-Be | 1 | gelöst/suspendiert |
| S24 | H-CH | 3 | ES | 3 | Na-Be | 3 | gelöst/suspendiert |
| S27 | H-CH | 2.4 | ES | 3 | Na-Be | 9.6 | gelöst/suspendiert |

| Legende | |
|---------|----------------------------|
| Na-Be | Natrium-Bentonit |
| Bo | Borax |
| D | Dextrin |
| ES | Essigsäure |
| H-Ch | Hochmolekulares Chitosan |
| KWG | Kaliwasserglas |
| N-Ch | Niedermolekulares Chitosan |
| Ca-L | Calciumligninsulfonat |
| Na-L | Natriumligninsulfonat |
| Ph | Diammoniumphosphat |
| PhS | Phosphorsäure |

Das Adaptionen und Modifikationen bei der Behandlung werden als Ergebnis der Prozessentwicklung verstanden und sind nachfolgend kurz beschrieben:

S8.1:

„4000 g der Hobelspäne wurden während des Mischens mit Wasser benetzt. Mittels eines PVC-Rohrs wurden die Pulverkomponenten D und Na-L [Natrium-Ligninsulfonat] innerhalb von 2 min manuell zu dosiert. Nach einer Mischzeit von 5 min wurden die Hobelspäne mit einer 28 wt%-igen KWG-Lösung manuell imprägniert. Die modifizierten Hobelspäne wurden im Trommelmischer mittels regelbarer Heißluft (Gasbrenner/variables Blechrohr) getrocknet.“

S2.2, S3.2, S8.2:

„6000 g der Hobelspäne wurden während des Mischens mit 90°C heißer D- und Na-L-Lösung nacheinander imprägniert. Nach einer Antrocknungszeit von 10 min bei 100°C wurden die Hobelspäne mit einer 28 wt%-igen KWG-Lösung besprüht. Alle Lösungen wurden manuell aufgebracht. Die modifizierten Hobelspäne wurden im Trommelmischer mittels Heißluft (Gasbrenner/variables Blechrohr) getrocknet.“

S9.2, S10.2, S11.2, S15 – S19:

„6000 g der Hobelspäne wurden während des Mischens mit 90°C heißer Na-L-Lösung imprägniert. Danach erfolgte die Imprägnierung der Hobelspäne mit KWG und zuletzt mit 60°C warmer $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ -Lösung [Diammoniumphosphat]. Alle Lösungen wurden manuell aufgesprüht. Die modifizierten Hobelspäne wurden im Trommelmischer mittels Heißluft (Gasbrenner/Blechrohr) getrocknet.“

S12.2, S13.2, S14.2, S20-S24, S27:

„HMC [Hochmolekulares Chitosan] bzw. NMC [Niedermolekulares Chitosan] wurde mit einer geringstmöglichen Menge an Säure (CH_3COOH [Essigsäure] oder H_3PO_4 [Phosphorsäure]) und Wasser bei 90°C gelöst. In die jeweilige Chitosan-Lösung wurde zuletzt Na-B [Natrium-Bentonit] eingerührt. Die erhaltene 80°C heiße Suspension wurde während des Mischens manuell auf die Hobelspäne (5000 g) aufgebracht. Die modifizierten Hobelspäne wurden im Trommelmischer mittels Heißluft (Gasbrenner/Blechrohr) getrocknet.“

5.2.1 Materialcharakterisierung

Die Morphologie der Hobelspanserien wurde durch visuelle Ansprache als unterschiedlich taxiert. Alle mit Kaliwasserglas behandelten Ansätze sind hellbraun gefärbt. Die zusätzlich mit Calcium-/Natrium-Ligninsulfonat behandelte Proben (Variante 1, s.o.) zeigen eine dunkle Braunfärbung. Die Chitosanproben (Variante 3) haben einen natürlichen bis blassen Farbton.

Proben SL2.2, SL3.2, SL7, S12.2, S13.2 haben sehr große, leichte, stark gekrümmte Späne. SL5, S2.2, S3.2, S8.1, S8.2 sind von kleiner Spangröße, haben viel Fein- und

Mehlanteil, sind wenig gekrümmt. Die Qualität der übrigen Proben (S9.2, S10.2, S11.2, S14.2) liegt dazwischen.

Die Auflichtmikroskopische Untersuchung lässt keine eindeutigen Beurteilungen hinsichtlich der Verteilung der aufgetragenen Komponenten zu. Die Chemikalien können mit lichtoptischen Verfahren (Fluoreszenz, Hellfeld/Dunkelfeld) nicht eindeutig von der Holzsubstanz unterschieden und bestimmt werden. Einzig auf den Proben S8.1, S8.2 und SL3 kann Kaliwasserglas auf den Spanoberflächen eindeutig identifiziert werden. Es bildete flächige, kristallartige Krusten auf den Spänen (s. Abbildung 8, links).

Die Untersuchung von Einzelspänen im Durchlichtmikroskop gibt Hinweise, dass die in der Kampagne Frühjahr 2010 verwendeten Hobelspäne zu einem hohen Anteil aus Douglasienholz bestehen. Andererseits konnten an den Rändern der Schnitte keine Anzeichen von den eingedrungenen Chemikalien (Kristalle, Verfärbungen) beobachtet werden. Bedingt durch das Verfahren der Stabilisierung der Späne beim Mikrotomieren (Einbettung in PEG) besteht die Möglichkeit, dass die Behandlungssubstanzen ausgewaschen werden, da alle aufgetragenen Substanzen wasserlöslich sind.

In den orientierenden ESEM Untersuchungen der modifizierten Späne konnten die auskristallisierten Behandlungssubstanzen als punktförmige Beläge homogen verteilt auf den Zellwandflächen erkannt werden (s. Abbildung 8, rechts).

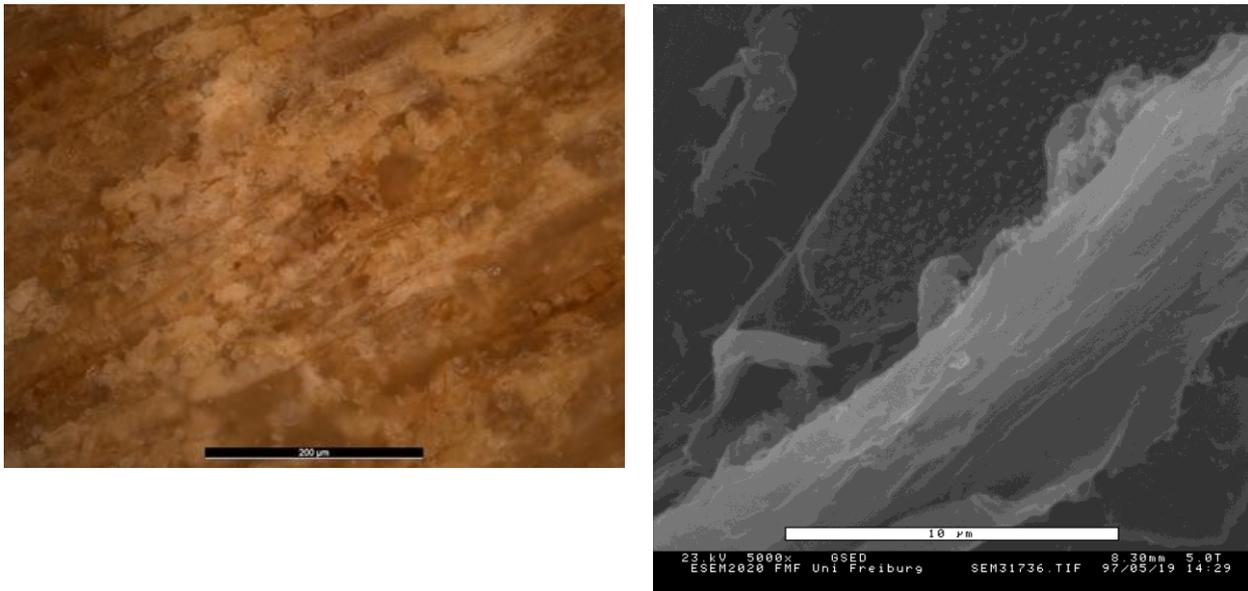


Abb. 8. Links: Auflichtmikroskop Probe S8.2, x 200. Rechts: ESEM Untersuchung; Span nach Behandlungsvariante HS + D + Ca-L + KWG, x 5000.

5.2.2 Setzungsverhalten

Tabelle 8 zeigt die gemessenen Dichtewerte (Streudichte und Setzungsdichte und die abs. Differenz der beiden Messwerte, die in Abbildung 9 graphisch dargestellt sind.

Tab. 8. Streu- und Setzungsdichten in [kg/m³] der Hobelspansysteme

| | Streudichte | Setzungsdichte | abs. Diffe- renz |
|--------|--------------------|-----------------------|-----------------------------|
| System | Kg/m ³ | | |
| SRoh1 | 38.7 | 71.0 | 32.34 |
| SR | 61.8 | 82.7 | 20.91 |
| SL2 | 36.1 | 62.7 | 26.64 |
| SL3 | 47.0 | 72.6 | 25.60 |
| SL5 | 57.6 | 101.8 | 44.21 |
| SL7 | 31.3 | 49.3 | 18.01 |
| S2.2 | 74.3 | 92.8 | 18.48 |
| S3.2 | 90.1 | 118.0 | 27.90 |
| S8.1 | 107.1 | 129.4 | 22.31 |
| S8.2 | 94.2 | 138.8 | 44.59 |
| S9.2 | 76.1 | 97.9 | 21.72 |
| S10.2 | 62.8 | 100.0 | 37.17 |
| S11.2 | 61.4 | 88.9 | 27.47 |
| S12.2 | 52.3 | 69.2 | 16.88 |
| S13.2 | 54.3 | 68.6 | 14.26 |
| S14.2 | 80.0 | 95.0 | 14.97 |
| SRoh2 | 43,25 | 72,73 | 29,47 |
| S15 | 52.79 | 71.64 | 18.85 |
| S16 | 47.48 | 68.09 | 20.61 |
| S17 | 42.43 | 62.5 | 20.07 |
| S18 | 49.47 | 69.06 | 19.59 |
| S19 | 43.53 | 62.02 | 18.49 |
| S20 | 51.02 | 68.09 | 17.07 |
| S21 | 48.78 | 68.57 | 19.79 |
| S22 | 47.07 | 70.59 | 23.52 |
| S23 | 45.5 | 62.5 | 17 |
| S24 | 50.92 | 67.61 | 16.69 |
| S27 | 50.28 | 68.57 | 18.29 |

Die Ergebnisse zeigen, dass sich die Streu- und Setzungsdichten der verschiedenen Varianten insbesondere der ersten Behandlungskampagne stark unterscheiden. Die Laborproben (SLx) haben im Vergleich zu den Proben aus der Pilotanlage (Sx.x) tendenziell geringere Streudichten. Die CLIMAT-Probe (SR) hat einen durchschnittlichen Wert. Einen sehr niedrigen Wert zeigt die Probe SL7, der Chitosanansatz aus dem Labor. Besonders hohe Werte von über 90kg/m³ wurden bei den Systemen mit 10 und 20wt% KWG (S3.2, S8.1, S8.2) ermittelt. Die Variationsbreite der Systeme aus der zweiten Behandlungskampagne ist insgesamt deutlich geringer, die Dichten liegen vergleichsweise tief zwischen 44 und 51 kg/m³. Auch die Standardabweichungen der Messwerte der Laborproben und der Behandlungssysteme der zweiten Kampagne waren gegenüber der ersten Pilotbehandlung geringer. Die grösste Standardabweichung weist das System S3.2 auf. Das Referenzprodukt CLIMAT (SR) erreicht in der realen Verarbeitung durchschnittlich eine Einbaudichte zwischen 70-80kg/m³. Im durchgeführten Setzungsversuch erreichte SR eine vergleichbare Enddichte von 82,69kg/m³. Die geringsten Setzungsdichten der behandelten Proben zeigen mit unter 80kg/m³ die Chi-

tosanansätze SL7, S12 und S13, sowie die Laborproben SL2 und SL3. Die höchsten Enddichten haben sich bei den Varianten mit hohem Kaliwasserglasanteil (S3.2, S8.1 und S8.2) zwischen 110 und 140kg/m³ eingestellt. SL5, S9.2, S10.2, S11.2 und S14.2 liegen im durchschnittlichen Bereich zwischen 80 und 105kg/m³. Die Systeme der zweiten Kampagne zeigen sehr geringe Setzungsdichten. Die Rohspäne (SRoh2) haben hierbei die höchste Enddichte, was auf eine generelle Versteifung der behandelten Späne schließen lässt. Besonders geringe Setzungsdichten weisen die Proben S17, S19 und S23 auf.

Unabhängig vom Dichteniveau ist die absolute Differenz zwischen Streudichte und Setzungsdichte ein interessanter Kennwert, da er die mögliche Setzung des Materials beschreibt. Gemessen an den unversteiften Rohspänen (SRoh1 und 2) und dem Referenzsystem (SR) scheiden die Systems SL7, S2.2, S12.2, S13.2, S14.2, und alle Systeme der zweiten Behandlung (Ausnahme S22) mit besseren (geringeren) Werten ab. Die geringsten Setzungswerte mit < 17 kg/m³ werden von den Proben erreicht, die mit Chitosan behandelt wurden.

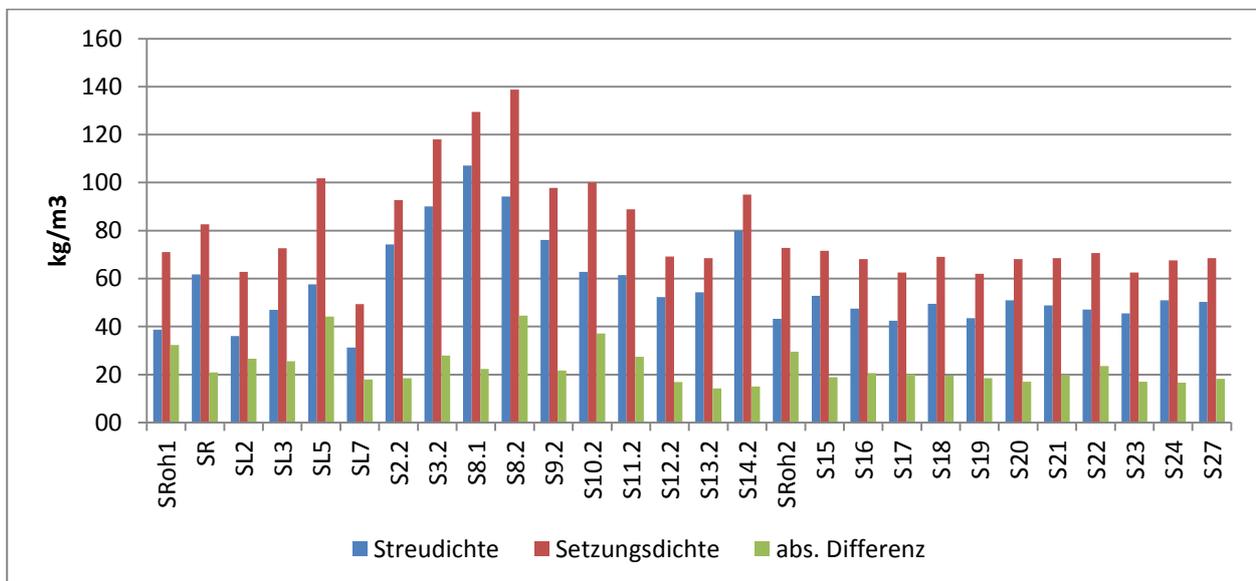


Abb. 9. Streu- und Setzungsdichten in [kg/m³] der Hobelspansysteme

5.2.3 Wärmeleitfähigkeit

Tabelle 9 und Abbildung 10 zeigen die Ergebnisse der Wärmeleitfähigkeitsmessungen. Aus Zeit- und Kostengründen wurden mit drei Ausnahmen die Messungen einfach durchgeführt. Die Proben S3.2.100, S13.2.60 und S20.70 wurden dreifach gemessen, wobei die Prüfrahmen jedes Mal neu befüllt wurden. Aus diesen Messungen wird eine einfache Standardabweichung von $\sigma = 0,0006$ (S3.2.100, S13.2.60) und $\sigma = 0,0009$ (S20.70) ermittelt. Trotz dieser hohen Schwankungsbereiche können die Ergebnisse verglichen und diskutiert werden.

Die Dichte im Prüfraumen (letzte Ziffer im Probenname) orientiert sich an der ermittelten Setzungsdichte des jeweiligen Ansatzes (s. 4.3.2.4), um möglichst praxisnahe Bedingungen zu untersuchen. Der Vergleichbarkeit wegen wird in den Schritten 60, 80, 90, 100, 110 kg/m³ gemessen. Alle Ergebnisse liegen im Bereich zwischen 0,0400 und 0,0459W/m*K. Tendenziell ist zu beobachten, dass bei geringer Einbaudichte eine niedrigere Wärmeleitfähigkeit gemessen wird (vgl. S14.2.80 und S14.2.100, SRoh1.60. SRoh2.70 und SRoh1.80).

Tab. 9. Wärmeleitfähigkeit [W/m*K] der Hobelspansysteme (Einzelmesswerte). An drei Systemen wurde die Standardabweichung durch Dreifachmessung bestimmt.

| System | W/m*K | St.abw. | System | W/m*K | St.abw. | System | W/m*K | St.abw. |
|----------|--------|---------|----------|--------|---------|-----------|--------|---------|
| Fi80 | 0.04 | | S2.2.80 | 0.043 | | S13.2.60 | 0.0407 | 0.0006 |
| Dou80 | 0.0405 | | S2.2.90 | 0.0449 | | S13.2.80 | 0.0433 | |
| SRoh1.60 | 0.0427 | | S3.2.90 | 0.0459 | | S14.2.80 | 0.0419 | |
| SRoh1.80 | 0.0442 | | S3.2.100 | 0.0458 | 0.0006 | S14.2.100 | 0.0453 | |
| SR.60 | 0.0411 | | S8.1.100 | 0.0446 | | S-Roh2.70 | 0.0436 | |
| SR.80 | 0.0439 | | S8.1.110 | 0.0452 | | S15.70 | 0.0448 | |
| SL2.60 | 0.0422 | | S8.2.90 | 0.0424 | | S16.70 | 0.0449 | |
| SL2.80 | 0.0431 | | S8.2.100 | 0.0429 | | S17.70 | 0.0455 | |
| SL3.60 | 0.0422 | | S9.2.80 | 0.0412 | | S18.70 | 0.0444 | |
| SL3.80 | 0.044 | | S9.2.90 | 0.0431 | | S19.70 | 0.0448 | |
| SL5.60 | 0.0421 | | S10.2.70 | 0.0433 | | S20.70 | 0.0448 | 0.0006 |
| SL5.80 | 0.0432 | | S10.2.80 | 0.0459 | | S21.70 | 0.0448 | |
| SL7.40 | 0.0415 | | S11.2.80 | 0.0436 | | S22.70 | 0.0449 | |
| SL7.60 | 0.042 | | S12.2.80 | 0.0441 | | S23.70 | 0.0453 | |
| | | | | | | S24.73 | 0.0451 | |
| | | | | | | S27.73 | 0.0446 | |

Die geringsten Messwerte liefern die unbehandelten Systeme Fi80 und Dou80, sowie die Systeme SL7.60, S13.2.60, S14.2.80 mit $\leq 0,042\text{W/m}^*\text{K}$. Im Gegensatz dazu zeigen die Ansätze S2.2.90, S3.2.100, S8.1.110, S10.2.80, S14.2.100 hohe Messwerte von über $0,0442\text{W/m}^*\text{K}$. Auch die Wärmeleitfähigkeit der Systeme der zweiten Behandlungskampagne liegen schwanken um $0,045\text{ W/m}^*\text{K}$, sie erfüllen damit nicht die Erwartungen hinsichtlich verbesserter Wärmedämmleistung.

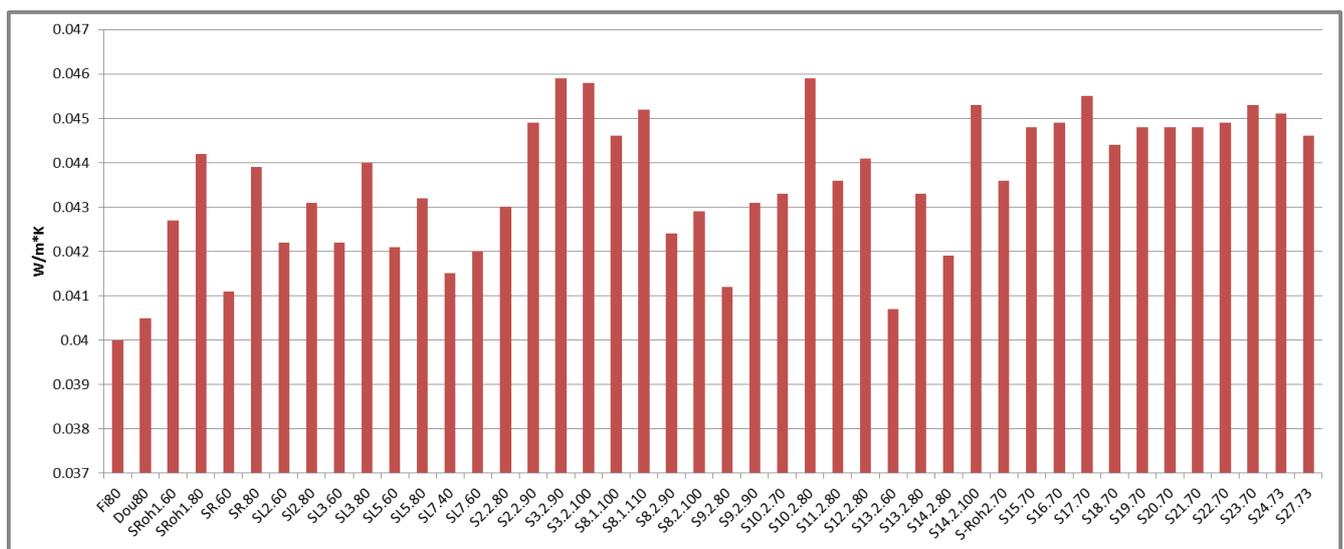


Abb. 10. Wärmeleitfähigkeit in W/m*K, die letzte Ziffer der Systembezeichnung gibt die Testdichte in kg/m³ an.

5.2.4 Schimmelpilzresistenz

Tabelle 10 zeigt den Bewuchs der Proben nach 7, 14, 21 und 28 bzw. 42 Tagen. Das Beurteilungssystem des Bewuchsgrades (vergl. 4.3.2.5) ist für Holzklötzchen ausgelegt und nicht für lose Späne. Eine Beurteilung nach prozentualem Bewuchs auf der Probe war in diesem Fall schwierig und in großem Maße von der Einschätzung des Prüfers abhängig. Die Beurteilungen fanden immer durch dieselbe Person statt. Trotzdem lassen sich tendenzielle Aussagen bezüglich der Stärke des Bewuchses machen.

Generell ist festzustellen, dass die Ansätze auf Agar (Endziffer 3, 4) einen schnelleren und stärkeren Bewuchs aufweisen. Besonders deutlich ist dies bei den Proben S12.2, S14.2 und SR zu beobachten. Bei S2.2, S3.2, S8.1, S9.2, S10.2, S11.2 und Fi ist fast kein Unterschied im Bewuchs zwischen den Ansätzen mit und ohne Agar festzustellen. Die niedrigsten Bewüchse nach 28 Tagen weisen die Proben S8.1, S8.2, S12.2, S14.2, sowie SR (ohne Agar) auf. Die einzigen bewuchsfreien Proben sind S12.2.1 und S12.2.2. Hier ist nach vier Wochen auch unter dem Stereomikroskop kein Bewuchs festzustellen. Die Proben der zweiten Behandlungskampagne sind nur mit Sporensuspension beimpft und wurden ohne Agar ausgebracht. Hier erfolgte die Auswertung über 42 Tage. Zwischen der Beurteilung am 28 und 42 Tag nahm die Befallsintensität bei der Hälfte der Systeme um 0.5 Punkte zu, bei der anderen Hälfte erfolgte keine Änderung. Die besten Schutzwirkungen weisen die Systeme S20 und S 23 auf, die mit Chitosan und Phosphorsäure behandelt wurden.

Tab. 10. Bewuchsgrad der Proben nach 7,14, 21, 28 bzw. 42 Tagen. Proben mit Endziffer .1, .2 sind nur mit Sporensuspension beimpft, Proben mit Endziffer .3, .4 sind auf Nähragar und sind mit Sporensuspension beimpft.

| Probe | Tage nach Beimpfung | | | | | Probe | Tage nach Beimpfung | | | | |
|---------|---------------------|----|-----|-----|-----|----------|---------------------|-----|-----|-----|-----|
| | 7 | 14 | 21 | 28 | 42 | | 7 | 14 | 21 | 28 | 42 |
| S2.2.1 | 2 | 2 | 3 | 3 | | S11.2.1 | 2 | 2 | 4 | 4 | |
| S2.2.2 | 2 | 2 | 3 | 4 | | S11.2.2 | 2 | 2 | 4 | 4 | |
| S2.2.3 | 2 | 2 | 3 | 4 | | S11.2.3 | 3 | 3 | 4 | 4 | |
| S2.2.4 | 2 | 2 | 3 | 4 | | S11.2.4 | 3 | 3 | 4 | 4 | |
| S3.2.1 | 2 | 2 | 3 | 3 | | S12.2.1 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| S3.2.2 | 2 | 2 | 3 | 4 | | S12.2.2 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| S3.2.3 | 2 | 2 | 3 | 4 | | S12.2.3 | 0 | 0 | 1 | 1 | |
| S3.2.4 | 2 | 2 | 3 | 4 | | S12.2.4 | 0 | 1 | 1 | 1 | |
| S8.1.1 | 1 | 1 | 2 | 2 | | S13.2.1 | 0 | 2 | 3 | 3 | |
| S8.1.2 | 1 | 1 | 2 | 2 | | S13.2.2 | 0 | 2 | 3 | 4 | |
| S8.1.3 | 2 | 2 | 2 | 2 | | S13.2.3 | 2 | 2 | 4 | 4 | |
| S8.1.4 | 2 | 2 | 2 | 2 | | S13.2.4 | 2 | 2 | 4 | 4 | |
| S8.2.1 | 2 | 2 | 2 | 2 | | S14.2.1 | 1 | 1 | 1 | 1 | |
| S8.2.2 | 1 | 1 | 2 | 2 | | S14.2.2 | 1 | 1 | 1 | 1 | |
| S8.2.3 | 2 | 2 | 2 | 3 | | S14.2.3 | 1 | 1 | 2 | 2 | |
| S8.2.4 | 2 | 2 | 2 | 3 | | S14.2.4 | 1 | 1 | 2 | 2 | |
| S9.2.1 | 2 | 2 | 3 | 4 | | SR.1 | 1 | 1 | 1 | 1 | |
| S9.2.2 | 2 | 2 | 3 | 4 | | SR.2 | 1 | 1 | 1 | 1 | |
| S9.2.3 | 2 | 2 | 4 | 4 | | SR.3 | 1 | 2 | 3 | 4 | |
| S9.2.4 | 2 | 2 | 4 | 4 | | SR.4 | 2 | 2 | 3 | 4 | |
| S10.2.1 | 2 | 2 | 3 | 4 | | Fi.1 | 1 | 2 | 3 | 4 | |
| S10.2.2 | 2 | 2 | 3 | 4 | | Fi.2 | 1 | 2 | 3 | 4 | |
| S10.2.3 | 2 | 2 | 4 | 4 | | Fi.3 | 2 | 2 | 3 | 4 | |
| S10.2.4 | 2 | 2 | 4 | 4 | | Fi.4 | 1 | 2 | 3 | 4 | |
| S15.1 | 1 | 2 | 2.5 | 2.5 | 2.5 | S21.1 | 1 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 2 |
| S15.0 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2.5 | S21.2 | 1 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 2 |
| S16.1 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 | S22.1 | 1 | 1.5 | 1.5 | 2 | 2 |
| S16.2 | 2 | 2 | 3 | 3.5 | 3.5 | S22.2 | 1 | 1.5 | 1.5 | 2 | 2 |
| S17.1 | 1 | 1 | 1.5 | 1.5 | 2 | S23.1 | 0 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 1 |
| S17.2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2.5 | S23.2 | 0 | 0.5 | 1 | 1.5 | 1.5 |
| S18.1 | 2 | 2 | 2.5 | 2.5 | 2.5 | S24.1 | 2 | 2 | 3 | 3.5 | 4 |
| S18.2 | 2 | 2 | 2.5 | 3 | 3 | S24.2 | 2 | 2 | 3 | 3.5 | 4 |
| S19.1 | 2 | 2 | 2.5 | 2.5 | 3 | S27.1 | 2 | 2.5 | 2.5 | 3 | 3.5 |
| S19.2 | 2 | 2 | 2.5 | 2.5 | 3 | S27.2 | 2 | 2.5 | 2.5 | 3 | 3.5 |
| S20.1 | 1 | 1 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | SRoh.2.1 | 2 | 2 | 3 | 3.5 | 4 |
| S20.2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | SRoh.2.2 | 2 | 2 | 3.5 | 4 | 4 |

5.2.5 Brandverhalten

Tabelle 11 zeigt die Ergebnisse der Brandtests, die nur an ausgewählten Proben der ersten Behandlungskampagne durchgeführt wurden. Es ist die Wärmestromdichte in kW/m^2 und die Lichtabsorption in % angegeben. Nach dem in Kap. 4.3.2.6 geschriebenen Schlüssel ergibt sich daraus die Brandkennziffer. Die Abbildungen 11 und 12 zeigen grafisch jeweils die gemessene mittlere Wärmestromdichte, bzw. die maximale gemessene Lichtabsorption. Zusätzlich sind in beiden Grafiken die Klassengrenzen für die Kategorisierung der Brandkennziffer eingeblendet. Die Standardabweichung ist als Fehlerbalken dargestellt, da jeder Versuch zwei Mal durchgeführt wurde.

Außer SRoh1, den Rohspänen, haben alle Proben die Brandklasse 5 erreicht und könnten damit theoretisch zugelassen werden. Trotzdem zeigen die Hobelspansysteme ein brandtechnisch sehr unterschiedliches Verhalten. System S8.2, S9.2 und S13.2 erreichen nur knapp Brandklasse 5, der Fehlerbalken von S9.2 reicht in Klasse 4 herein. SRoh1 erreicht eine Wärmestromdichte von unter 2,7 und wird in Brandklasse 3 eingeordnet. Die restlichen Systeme liegen mit einer Wärmestromdichte von über 5,6 deutlich innerhalb der Brandklasse 5 ($\text{kW/m}^2 > 4,5$).

Tab. 11. Brennbarkeitsgrad, Qualmgrad und Brandkennziffer der untersuchten Systeme

| System | Brennbarkeitsgrad | Qualmgrad | Brandkennziffer |
|--------|-------------------------------------|----------------------|-----------------|
| | Wärmestromdichte in kW/m^2 | Lichtabsorption in % | |
| S2.2 | 6,8 | 41 | 5,3 |
| S3.2 | 6,8 | 25 | 5,3 |
| S8.1 | 6 | 13 | 5,3 |
| S8.2 | 5,4 | 16 | 5,3 |
| S9.2 | 4,6 | 21 | 5,3 |
| S10.2 | 5,9 | 12 | 5,3 |
| S11.2 | 5,6 | 37 | 5,3 |
| S12.2 | 6 | 16 | 5,3 |
| S13.2 | 5,2 | 39 | 5,3 |
| S14.2 | 6,7 | 24 | 5,3 |
| SR | 6,2 | 18 | 5,3 |
| SRoh 1 | 2,44 | 35 | 3,3 |

Kein System verursacht beim Abbrennen eine größere Lichtabsorption als 50%, so dass alle der Lichtabsorptionsklasse 3 zugeordnet wurden. Alle Standardabweichungen liegen ebenfalls unter der Klassengrenze. Dennoch zeigen die Hobelspansysteme S2.2, S11.2, S13.2 und SRoh1 eine deutlich höhere Lichtabsorption als die anderen Proben.

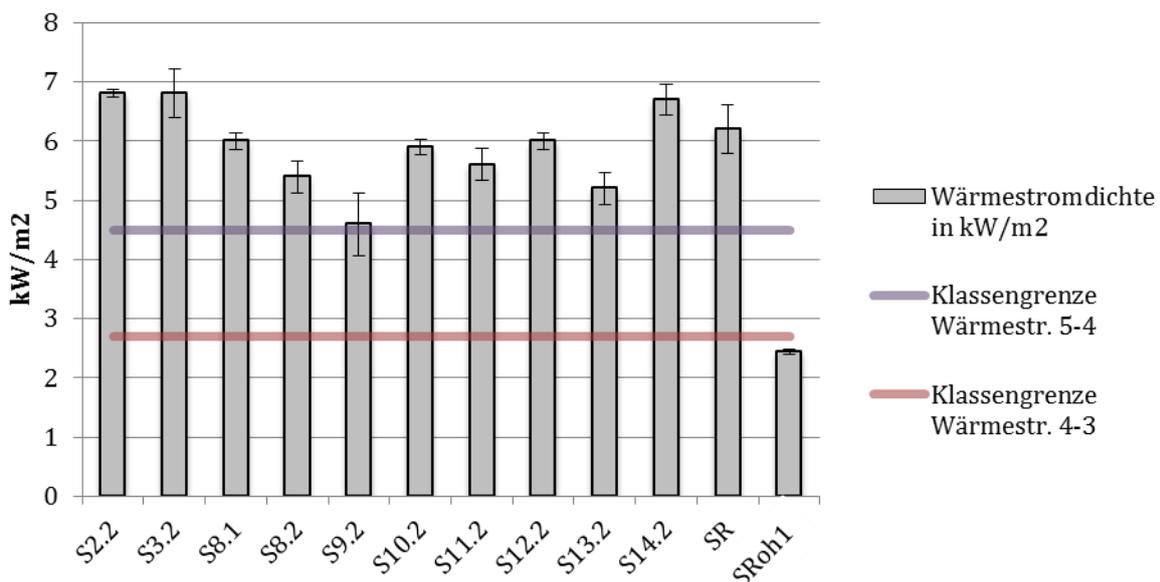


Abb. 11. Wärmestromdichte der Proben im Brandtest

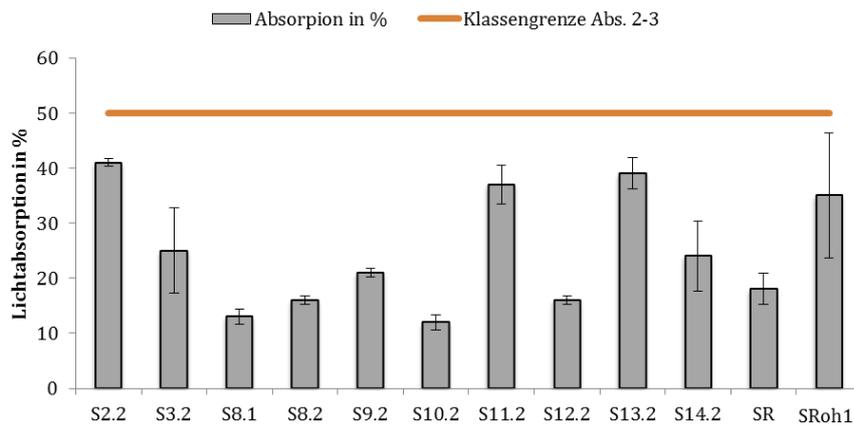


Abb. 12. Maximale Lichtabsorption während des Abbrennens der Proben

6 Diskussion

Holz bietet als nachwachsende, regional verfügbare Ressource aufgrund seiner multifunktionalen Eigenschaften eine Vielzahl von Einsatzmöglichkeiten, die weit über die Verwendung als strukturell nutzbarer Werk- und Baustoff hinausreichen. Insbesondere in seiner Anwendung im Bauwesen aber liegen die grössten Wertschöpfungspotenziale, und hier erfüllt Holz die Anforderungen an einen nachhaltigen Baustoff im Vergleich zu anderen Materialien und Stoffklassen weitgehend optimal. Insbesondere die Kombination von Eigenschaften, z.B. Tragfähigkeit und Wärmedämmfunktion, ästhetische und raumklimatische Wirkung, Gestaltungsfreiheit und bautechnisches Rationalisierungspotenzial begründen die seit einigen Jahren deutlich steigenden Zuwachszahlen der Holzverwendung im Bauwesen. Damit steigt die Notwendigkeit, die nachwachsende Ressource Holz, an die darüber hinaus energiepolitisch ebenfalls zunehmend steigende Erwartungen gestellt werden, maximal auszunutzen. Die Möglichkeit, Hobelspäne als Koppelprodukte der mechanischen Holzbearbeitung in eine stoffliche Nutzung als Dämmstoff im Hausbau zu nutzen, ist eine der vielen Optionen, Holz möglichst vollständig und in wertschöpfenden Anwendungen einzusetzen.

Das durchgeführte Forschungsprojekt „Entwicklung eines einblasbaren formstabilen Dämmstoffs aus Holzhobelspänen“ widmet sich dieser Technologie und setzt sich zum Ziel, ein bisher nicht zufriedenstellend gelöstes Problem der Hobelspandämmung zu lösen. Die in Wandsysteme mit einer Zieldichte lose eingebrachten Hobelspäne neigen dazu, sich über Kriecheffekte oder infolge von Vibrationen durch Transport und Nutzungseffekte gegeneinander zu verschieben und sich zu setzen. Dies hat zur Folge, dass die Dämmleistung der Wandsysteme abnimmt und Kältebrücken entstehen können, durch die neben Wärmeverlusten auch weitere bauphysikalische Probleme ausgelöst werden.

Das vorgestellte Forschungsprojektes hatte zum Ziel, durch das Aufbringen von nicht toxischen, chemischen Substanzen auf die Hobelspäne eine Versteifung der Spanformen zu erzielen, so dass Setzungseffekte nachweislich vermieden werden. Darüber hinaus

sollten die eingesetzten Substanzen die derzeitig industriell betriebene Ausrüstung der Hobelspäne mit Borsalzen (Borax) als Fungizid substituieren, da Bor aufgrund seiner fruchtschädigenden Wirkung auf EU-Ebene in der Diskussion steht, verboten zu werden. Dabei soll die Wärmeleitfähigkeit der modifizierten Systeme einen Wert von $0,041\text{W/m}\cdot\text{K}$ (nach SIA 279) nicht überschreiten, und die Brandkennziffer 5.3 (schwer brennbar, schwach qualmend) nach VKF-Vorschrift soll erreicht werden.

Die durchgeführten Arbeiten mit marktüblich gehandelten Hobelspänen als Ausgangsmaterial zeigten zunächst, dass es sich beim Ausgangsprodukt nicht um ein homogenes, konstant ähnliche Eigenschaften aufweisendes Sortiment handelt. Sowohl die Holzartenzusammensetzung als auch die Spanformen, die Spangeometrie und die Spanformen unterliegen grossen Schwankungen. Trotz der Bemühungen zur Vereinheitlichung des Ausgangsmaterials durch Siebung und Fraktionierung, sind Versuchsreihen von großer Anzahl nötig, um repräsentative Ergebnisse zu erhalten. Da das als Machbarkeitsstudie ausgelegte Projekt nur ein begrenztes Budget zur Verfügung stellte, konnte dem Anspruch einer ausreichenden Abstützung der Versuche mit grossen Probereihen nicht vollkommen Genüge geleistet werden. Die Anzahl von insgesamt achtzehn evaluierten Ansätzen (Hobelspansysteme) begrenzte in diesem Zusammenhang umfangreiche Versuchswiederholungen je Ansatz.

Im Folgenden werden die erarbeiteten Ergebnisse diskutiert:

6.1 Setzungsverhalten

Die Streudichte der Ansätze gibt erste Hinweise auf die Qualität der hergestellten Produkte bezüglich der Spanmorphologie und des Spangewichts. Eine niedrige Streudichte ist durch zwei wesentliche Faktoren bedingt. Einerseits ein geringes Gewicht der Späne an sich, andererseits die Morphologie der Späne, großes Volumen bei geringer Masse.

Das Gewicht eines einzelnen Spans wird durch die chemische Behandlung zum Teil stark verändert. Die Chemikalien werden in gelöster/suspendierter Form auf die Späne aufgebracht und haften dort an. Auf die Systeme S8.1 und S8.2 werden insgesamt 27,5 Gewichtsprozent der Rohspäne an Chemikalien zugegeben. Das spiegelt sich in sehr hohem Spangewicht wieder, was unter anderem für die höchsten Streudichten im Versuchsfeld verantwortlich ist (vgl. Abb. 9).

Während der Behandlung in der Versuchsanlage werden die Späne zum Teil länger als 30 Minuten in der Trommel gemischt und so einer großen und langzeitigen mechanischen Belastung (Reibung, Scherung) ausgesetzt. Wenn durch die chemische Behandlung eine starke Versprödung der Späne einsetzt, kann es leicht zu Brüchen kommen. Dadurch verschiebt sich die Partikelgrößenzusammensetzung beim Mischen in Richtung kleinerer Partikel. Das wiederum kann zu einer engeren räumlichen Anordnung der Späne führen und die Dichte erhöhen. Zu sehen ist dies am Beispiel der Ansätze S3.2, S8.1 und S8.2. Die hohe Menge Kaliwasserglas fördert diesen Effekt. Dies ist deutlich zu sehen am Vergleich zwischen der Dichte des Ausgangsmaterials und der Streudichte der jeweiligen Proben.

Besonders auffällig ist der Einfluss der mechanischen Beanspruchung im Vergleich der im Labor in Tränkform hergestellten Proben SL2, SL3 mit den entsprechenden Proben S2.2, S3.2 aus der Pilotanlage. Die Streudichte der Proben S2.2, S3.2 liegt annähernd doppelt so hoch wie bei den Pendants aus dem Labor. Durch die Tränkbadbehandlung und Trocknung im Ofen findet eine deutlich geringere mechanische Belastung statt. Bei dem Vergleich muss berücksichtigt werden, dass bei SL2, SL3 Calcium-Ligninsulfonat und bei S2.2, S3.2 Natrium-Ligninsulfonat verwendet wurde, wobei dadurch keine Auswirkungen auf die mechanische Stabilität der Späne erwartet werden.

Wird durch die Behandlung die Elastizität der Späne erhalten oder verbessert (niedriges E-Modul), beeinflusst die mechanische Belastung die Spanqualität weniger. Die Behandlung des Ansatzes S12.2 dauerte 55 Minuten, trotzdem weist die Probe mit 52kg/m^3 die geringste Streudichte der Proben aus der Pilotanlage auf. Die Probe wird nicht mit Kaliwasserglas als stabilisierende Komponente behandelt, sondern mit Chitosan. Die schonende Laborbehandlung macht sich trotzdem bemerkbar, das Pendant SL7 weist nur eine Streudichte von 31kg/m^3 auf. Ein weiterer Unterschied ist die Verwendung von Essigsäure in der Laborvariante, im Vergleich zu Phosphorsäure bei der Pilotanlagenherstellung. Da beide Säuren vornehmlich als Lösungsmittel dienen, wird durch sie kein direkter Einfluss auf das E-Modul erwartet. Die Spanqualität der Proben der der Behandlungskampagne 2 wurde insgesamt als deutlich besser als die der Proben aus Kampagne 1 taxiert. Die Späne waren mechanisch weniger zerstört, es gab nur geringe Feinanteile und wenige Holzsplitter. Dies hat sich bei der bloßen Begutachtung gezeigt, als auch bei den Setzungsversuchen auf dem Vibrationstisch. Die Gründe sind einerseits, dass hier Chitosan und Betonit als stabilisierende Komponenten eingesetzt wurden (geringer Versprödung), aber vermutlich vor allem durch die Tatsache, dass in der zweiten Kampagne die imprägnierten Späne nicht in der Drehtrommel, sondern auf einem improvisierten „Fliessbett“ (Lochblech mit Heissluftzuführung) getrocknet wurden. Das hat die Zerkleinerung der Späne durch die Kräfte in der Drehtrommel deutlich reduziert.

Da die Ansätze als Dämmmaterial in die Gefache in Wände oder Dächer eingeblasen werden sollen, ist aber vor allem setzungsfreie Dichte von Interesse. Das Dämmmaterial muss in einer so hohen Dichte eingebaut werden, dass keine Setzung mehr stattfindet. Mit den durchgeführten Setzungsexperimenten werden näherungsweise Dichten ermittelt, bei denen nur noch minimale bis keine Setzungsereignisse zu erwarten sind. Die Ergebnisse stellen somit worst-case-Werte dar, da die Versuchsdurchführung sehr intensiv ausgelegt ist. Unabhängig vom Dichteniveau kann die absolute Differenz zwischen Streu- und Enddichte als Annäherung für die Steifigkeit der Hobelspäne angesehen werden (vgl. Abb. 9). Ist die Differenz gering, kann eine geringen Setzung erwartet. Die niedrigsten Werte erzielen mit weniger als 17kg/m^3 Unterschied die Chitosanansätze S12.2, S13.2, S14.2, S20, S23 und S24. Eine sehr hohe Differenz hingegen weisen die Proben SL5, S8.2, S10.2 und SRoh auf. Für die Beurteilung der Leistungsfähigkeit wird auf SR und SRoh1 und 2 Bezug genommen. Eine Verbesserung gegenüber den Rohspänen ist in beiden Kampagnen bei fast allen Varianten zu beobachten. Die Kenn-

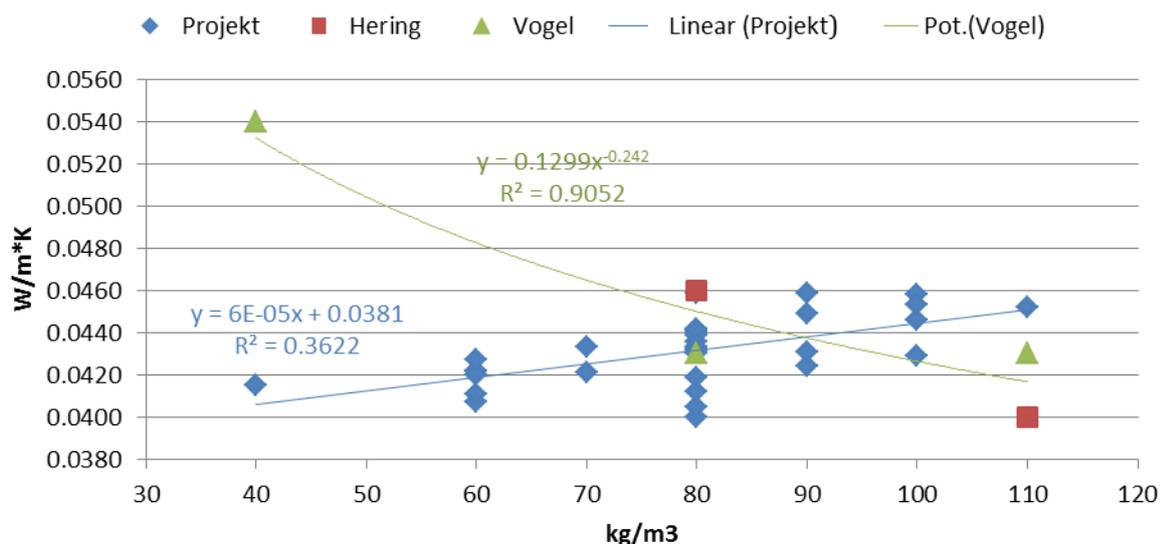
werte von SR dienen als Referenz und werden von allen Chitosanansätzen (SL7, S12.2, S13.2, S14.2, S20ff) als auch von S2.2 unterboten.

Der gewünschte Effekt der Formstabilität, bzw. Setzungssicherheit wird folglich von den mit Chitosan als Festigungskomponente behandelten Ansätzen am besten erfüllt. Im Vergleich zu den mit Kaliwasserglas behandelten Varianten sind diese Späne nicht spröde aber trotzdem formstabil. Hohe Konzentrationen an Kaliwasserglas bewirkt ein schnelles Brechen der Späne schon während der Behandlung. Die schonende Laborbehandlung der Kaliwasserglas-Ansätze bringt bei der Schüttdichte gute Ergebnisse. Doch nach den Setzungsversuchen ist auch hier ein hohes Maß an Setzung zu beobachten, was auf ein Brechen der Späne während der Versuche schließen lässt. Für die Industriebehandlung muss die Trocknung im Trommelrockner durch eine materialschonende Form des Feuchteentzugs ersetzt werden.

6.2 Wärmeleitfähigkeit

Trotz der hohen Standardabweichungen (Fehlerwahrscheinlichkeit der Messung) bei der Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit durch die einfache Ausführung und mehrerer Variablen (Gleichmäßigkeit der Rahmenbefüllung, Materialverteilung in einer Probe, unterschiedliche Dichten) müssen die Ergebnissen zur Trenderkennung herangezogen werden. Die ermittelten Standardabweichungen grenzen die Schwankungen ein, so dass ein richtungsweisender Vergleich möglich ist. Die Vergleichsbasis stellt die Enddichte der jeweiligen Probe dar.

Generell wurde in dieser Untersuchung festgestellt, dass eine geringere Dichte beim Einbringen der Späne in den Messrahmen in der Regel mit einer geringeren Wärmeleitfähigkeit einhergeht. Dies gilt für verschiedene Testdichten einer Probe, als auch für die allgemeine Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von der Materialdichte (vgl. Abb. 13).



Vogel (1999) hingegen stellt bei unbehandelten Hobelspänen eine umgekehrte Tendenz fest. Bei sehr geringer Dichte um 30kg/m^3 ermittelt er $0,051\text{-}0,056\text{W/m}^*\text{K}$. Im Dichtebereich zwischen $80 - 140\text{ kg/m}^3$ liegen seine Messungen im Schnitt bei $0,043\text{W/m}^*\text{K}$. Auch Hering (2008) stellt eine solche Tendenz für unbehandelte und thermisch modifizierte Hobelspäne fest. Man muss jedoch beachten, dass die unterschiedlich hohen Dichten unterschiedlichen Ursprungs sind. Bei Hering und Vogel wurden immer die gleichen Ausgangsmaterialien unterschiedlich stark verdichtet. Bei den Untersuchungen dieses Projekts haben alle Ansätze unterschiedliche Ausgangsdichten, Behandlungsverfahren und Morphologien. Die Ergebnisse der hohen Wärmeleitfähigkeit bei hoher Dichte lassen sich mit der Wärmebrückentheorie, wie sie auch Vogel (1999) beschreibt, erklären. Bei hohem Druck auf die Späne werden punktuelle und linienförmige Kontakte zwischen einzelnen Spänen zu flächigen Kontaktstellen, wodurch der Wärmedurchfluss gefördert wird und Hohlräume zwischen den Spänen geschlossen werden. Ein zusätzlicher Faktor für die Wärmeleitfähigkeit sind die aufgebrachten Chemikalien. Sie haben eine höhere Dichte als das Holz der Späne. Stoffe mit hoher Dichte leiten besser Wärme als Stoffe mit geringer Dichte. Über den Einfluss der mikroporösen Poren in den Spänen auf die Wärmedämmwirkung und deren Beeinflussungen durch die Behandlungsmittel können keine Aussagen gemacht werden.

Vergleichend über alle Systeme betrachtet lassen sich die Chitosanansätze SL7.60, S13.2.60 und S14.2.80 als leistungsstärkste in Bezug auf das Wärmedämmverhalten bezeichnen. Die versteifende Komponente Chitosan scheint den Spänen eine gewisse Elastizität zu wahren, so dass es nicht zu Brüchen im Material kommt. Beachtlich ist, dass vor allem S13.2.60 und S14.2.80 nicht nur bessere Werte als SR haben, sondern auch SRoh1 unterbieten können. Es wird also nicht nur ein gleichwertiges, sondern ein besseres Produkt erzeugt. Aus diesem Zwischenresultat der ersten Behandlungskampagne wurden weitere Chitosanansätze in der zweiten, prozesstechnisch optimierten Behandlungskampagne eingesetzt, die trotz guter Ergebnisse bei der Setzung nicht die erwarteten geringen Werte in der Wärmeleitung aufwiesen. Dabei fällt auf, dass alle Werte der zweiten Kampagne deutlich über $0,044\text{ W/m}^*\text{K}$ liegen, und in der zweiten Messkampagne eine nochmals höhere Standardabweichung ermittelt wurde. Diese Ergebnisse mit Einflüssen der Messapparatur in Zusammenhang zu bringen wäre Spekulation, zumal die Messung der Rohspäne (SRoh2.70) sich gut in die Messung der Rohspäne der ersten Behandlungskampagne einordnet.

Die besten Werte im Testfeld erreichen die rohen Fichten- und Douglasienespäne (Fi, Dou). Dafür ist deren Morphologie verantwortlich: die einzelnen Späne sind als zwar relativ klein und dünn angesprochen worden, waren jedoch sehr stark gekrümmt und zum Teil aufgefasert und leicht. Da sie keiner Behandlung unterzogen wurden, sind sie nicht versprödet, noch werden sie mechanisch belastet. So sind selbst bei hoher Einbaudichte noch viele kleine Hohlräume im Probenmaterial, was laut Hering (2008) für eine gute Wärmedämmung fördert.

Die vergleichsweise hohe Wärmeleitfähigkeit der CLIMAT-Probe (SR.80) mit $0,0439\text{W/m}^*\text{K}$ bestätigt den hohen Einfluss der mechanischen Belastung in der kleinen

Pilotanlage ($0,15\text{m}^3$). Zuvor durchgeführte Messungen an CLIMAT-Proben aus der Großanlage mit 4m^3 Fassungsvermögen ergaben Messwerte von $0,041\text{W/m}^*\text{K}$. Durch das über 25mal höhere Volumen dieser Anlage haben die Späne während der Behandlung vor allem Kontakt untereinander, als zu den Wänden oder der Mischspindel der Maschine. So findet eine deutlich geringere mechanische Beanspruchung statt und es kommt zu weniger Brüchen im Material. Das wiederum wirkt sich positiv auf die Eigenschaften aus und bringt so geringere Wärmeleitfähigkeitswerte mit sich.

6.3 Schimmelpilzresistenz

Mit der durchgeführten Schimmelpilzsporenbeimpfung wurden die Proben einer sehr starken Stresssituation ausgesetzt. Einerseits wurden 2g Späne mit über 15 Millionen Sporen behandelt und andererseits herrschte ein unnatürlich hoher Feuchtegehalt. Bei den Varianten ohne Agar herrschte eine Anfangsfeuchte von ca. 50%. Diese sank nach vier Wochen bei einzelnen Proben auf ca. 25%, was noch im Toleranzbereich für das Pilzwachstum liegt. Die Feuchte in den Proben mit Agar wurde nicht bestimmt, sie lag aber sehr hoch (die Späne glänzten stets, und es bildeten sich meist Kondenswassertropfen an der Deckelinnenseite des Probenbehälters).

Unter Betrachtung der zeitlichen Entwicklung lässt sich bei fast allen Proben beobachten, dass wie erwartet der Bewuchs auf Agar schneller voranschreitet als bei den Proben, die nur mit der Sporensuspension beaufschlagt wurden. Der hohe Feuchtigkeitsgehalt förderte wie erwartet das Pilzwachstum. Besonders deutlich wurde dies an der Probe CLIMAT (SR). Die Ansätze auf Agar zeigen einen starken Bewuchs (Grad 4), während die Pendants ohne Agar, also geringerer Feuchte, mit Wert 1 nur einen sehr geringen Bewuchsgrad präsentieren. Die Schutzfunktion durch einen Gewichtsprozent Borax ist also bei moderaten Feuchtegehalten durchaus gegeben. Bei höheren Feuchtegehalten müsste man den Boraxanteil erhöhen. Im ebenfalls lose eingeblasenen Wärmedämmprodukt isofloc sind beispielsweise 8% Borax zugemischt, wobei damit ebenfalls der Brandschutz gewährleistet werden soll.

Die besten Ergebnisse der hergestellten Systeme zeigen S12.2, S14.2, S20 und S 23. Dabei handelt es sich um Chitosanansätze die mit Hilfe von Phosphorsäure hergestellt wurden. Diese beiden Komponenten haben an sich schon eine fungizide Wirkung. In der Kombination scheint sich ein sehr effektiver Schutz zu bilden, der selbst bei sehr feuchten Bedingungen ein Pilzwachstum nachhaltig verlangsamt oder sogar verhindert. Bei den agarfreien Varianten von S12.2 konnte zu keinem Zeitpunkt eine Pilzaktivität nachgewiesen werden, was auf die im Vergleich zu S14.2 höhere Menge an eingebrachter Phosphorsäure (4wt%) zurückzuführen ist. S14.2 zeigt agarfrei vereinzelt punktuellen Bewuchs (Grad 2). Auf Agar liegt bei beiden Ansätzen der Bewuchsgrad eine Stufe höher. Der dritte Chitosanansatz (S13.2.) wird aufgrund der verwendeten Essigsäure als Phosphorsäurealternative mit einem Bewuchs der Stärke 4 bewertet. Chitosan alleine hat somit keine ausreichende fungizide Wirkung.

Einen ansatzweisen Schimmelschutz zeigten außerdem die Proben S8.1 und S8.2. Die Wirkung kann allerdings nicht wie erwartet vom Natriumligninsulfonat herrühren, da alle

anderen Ansätze mit dieser Behandlung praktisch keine Schutzwirkung zeigen. Es ist davon auszugehen, dass die Behandlung mit 20wt% Kaliwasserglas die Spanoberflächen großflächig verschließt, so dass die Pilzhyphen am Eindringen in das Holz gehindert werden. In diesem Zusammenhang kann keine Schimmelpilzschutzwirkung durch Natriumligninsulfonat nachgewiesen werden.

Insgesamt lassen die Ergebnisse erkennen, dass durch die Einsatz von Chitosan in Kombination mit Phosphorsäure, die Stabilität der Hobelspäne gegenüber einem Schimmelpilzbewuchs ausreichend eingestellt werden kann.

6.4 Brandverhalten

Alle behandelten und geprüften Proben haben den Brandtest bestanden, was heißt, dass Wärmestromdichten von über $4,5 \text{ kW/m}^2$ erreicht werden. Zwischen den Ansätzen kann durch eine detailliertere Bewertung der Testergebnisse noch differenziert werden.

Die relativ geringe Wärmestromdichte von S13.2 im Vergleich zu den anderen beiden Chitosanansätzen ist durch die verwendete Essigsäure im Vergleich zu der sonst benutzten Phosphorsäure als Lösungsmittel zu erklären. Die Phosphorsäure gewährt einen zusätzlichen Brandschutz zum Bentonit. Ebenfalls sehr gute Werte erreichen S2.2 und S3.2. Allerdings zeigt sich, wie beim Setzungsverhalten und der Dichte auch hier, dass eine weitere Erhöhung des Kaliwasserglasanteils keinen Vorteil bringt. S8.1 und S8.2 haben eindeutig geringere Wärmeflussdichten. Das aufgebrauchte Diammoniumphosphat bei den Proben S9.2, S10.2 und S11.2 bringt im Vergleich zu S2.2 keinen Vorteil bezüglich des Brandschutzes. Die Wärmestromdichten sind sogar wider Erwarten minimal schlechter.

Jedenfalls bewirkt jede Behandlungsvariante einen ausreichenden Brandschutz um diese Zulassungsprüfung zu bestehen. Unbehandelte Späne würden lediglich Brandklasse 3 erreichen.

6.5 Bewertung

In Tabelle 12 wird eine Zusammenstellung der Bewertung aller untersuchten Hobelspansysteme vorgenommen. Dazu wurden die numerischen Ergebnisse in jeder Teilprüfung anhand eines gutachterlich festgelegten Schlüssels mit „sehr gut = ++“, „gut = +“ oder „schlecht = -“ bewertet. Ansätze mit vielen guten oder sehr guten Bewertungen bergen demnach das größte Potenzial für eine Weiterentwicklung.

Keines der hergestellten Systeme kann in allen Kategorien überzeugen. Doch gibt es Varianten, die nur wenige Schwachstellen zeigen. Einziges Prüfmaterial ohne eine schlechte Bewertung ist das auf dem Markt eingesetzte Referenzmaterial CLIMAT (SR). Es zeigt sich, dass es sich um ein ausgereiftes Produkt handelt.

Von den neu entwickelten Ansätzen zeigen sich die Chitosanansätze besonders vielversprechend. Jede der drei Varianten zeigt zwar in einer anderen Kategorie Schwächen, doch wurde erkannt, dass mit dieser Modifikationschemikalie das grösste Potenzial vorhanden ist. S2.2 und S3.2 erzielen zwar im Setzungsverhalten und im Brandschutz gute,

bis sehr gute Werte, doch werden sie in den übrigen Prüfungen schlechter bewertet. Unerwartet schlecht im der Zielforderung Wärmedämmeigenschaften schneiden die Chitosansysteme der zweiten Behandlungskampagne ab. Die könnte prinzipiell S23 ein System mit weiter auszubauendem Potenzial sein, allerdings ist das Messergebnis des Wärmedurchgangswertes unbefriedigend. Hier sind weiter Untersuchungen anzuschliessen.

Letztlich ist neben den technischen Aspekten für die Umsetzung eines Systems deren Wirtschaftlichkeit von zentraler Bedeutung. Nur wenn ein den Herstellungskosten angemessener Marktpreis bei stabilen technischen Leistungseigenschaften erzielt werden kann, lohnt sich die Weiterentwicklung eines Ansatzes. Durch die Möglichkeit größere Mengen Chemikalien abzunehmen und zu lagern, können wirtschaftlich deutlich günstigere Einkaufspreise erzielt werden.

Tab. 12. Zusammenfassung der Ergebnisse. Bewertung nach rechts stehendem Schlüssel. Bei der Schimmelresistenz werden die Versuche ohne und mit Agar differenziert bewertet (der erste Wert o. Agar ist ausschlaggebend)

| System | Einbau-dichte | Setzungs-verhalten | Wärmeleit-fähigkeit | Brand-schutz | Schimmel-resistenz |
|--------|---------------|--------------------|---------------------|--------------|--------------------|
| Fi | | | ++ | | -/- |
| Dou | | | ++ | | |
| SRoh1 | + | - | + | - | |
| SR | + | + | + | ++ | ++/- |
| SL2 | + | + | + | | |
| SL3 | + | + | + | | |
| SL5 | - | - | + | | |
| SL7 | ++ | ++ | + | | |
| S2.2 | - | ++ | - | ++ | -/- |
| S3.2 | - | + | - | ++ | -/- |
| S8.1 | - | + | - | + | +/+ |
| S8.2 | - | - | + | + | +/- |
| S9.2 | - | + | + | + | -/- |
| S10.2 | - | - | - | + | -/- |
| S11.2 | + | + | + | + | -/- |
| S12.2 | + | ++ | - | + | ++/++ |
| S13.2 | + | ++ | ++ | + | -/- |
| S14.2 | - | ++ | + | ++ | ++/+ |
| SRoh2 | + | + | + | | - |
| S15 | + | + | - | | + |
| S16 | + | + | - | | - |
| S17 | + | + | - | | + |
| S18 | + | + | - | | + |
| S19 | + | + | - | | - |
| S20 | + | ++ | - | | + |
| S21 | + | ++ | - | | + |
| S22 | + | + | - | | + |
| S23 | + | ++ | - | | ++ |
| S24 | + | ++ | - | | - |
| S27 | + | + | - | | - |

| Einbaudichte (kg/m ³) | |
|---|----|
| < 60 | ++ |
| 60-90 | + |
| >90 | - |
| Setzungssicherheit (Diff. Kg/m ³) | |
| <18 | ++ |
| 18-30 | + |
| >30 | - |
| Wärmeleitfähigkeit (W/m ² K) | |
| <0,042 | ++ |
| 0,042-0,044 | + |
| >0,044 | - |
| Brandschutz (kW/m ²) | |
| >6 | ++ |
| 4,5-6 | + |
| <4,5 | - |
| Schimmelresistenz (Bewuchsgrad) | |
| 0-1 | ++ |
| 2 | + |
| 3-5 | - |

7 Ausblick und Empfehlungen

Das Forschungsvorhaben wurde mit dem Anspruch gestartet, anhand von zahlreichen Varianten die Möglichkeiten und Grenzen (Machbarkeit) einer Weiterentwicklung von lose eingestreuten Hobelspan Dämmsystemen aufzuzeigen. Diesem Anspruch kann das Projekt gerecht werden, da mit den ermittelten und hier vorgestellten Ergebnissen Tendenzen zur Leistungsfähigkeit der unterschiedlichen Modifikationsansätze erkannt werden können.

Aufgrund der vorliegenden Ergebnisse zu den geeigneten Chemikalien wird empfohlen die Chitosanansätze weiter zu untersuchen. Im jetzigen Stadium entsprechen sie jedoch noch nicht vollkommen den Zielen und müssen in ihrer Wirkung verstanden und in der Applikationsweise verbessert werden. Im Detail muss die Verarbeitbarkeit des Chitosans verbessert werden, da die Zubereitung große Mengen Wasser benötigt und es dennoch noch eine hohe Viskosität hat. Hier sind die am Markt erhältlichen Qualitäten (die sich im Molekulargewicht unterscheiden) ein zu beziehen. Über diese Optimierung können auch die Behandlungs- und Trocknungszeiten weiter gesenkt werden, um die mechanische Belastung der Späne weiter zu mindern. Hierzu wurde in der zweiten Behandlungskampagne bestätigt, dass eine andere Trocknungstechnik und -technologie die mechanischen Belastungen der Späne reduzieren kann und so homogener Qualitäten für den Ausbau in die Wandsysteme bereitgestellt werden können. Als Lösungsmittel hat sich Phosphorsäure bewährt, da es zudem eine schimmelhemmende Wirkung zeigt. Die Kaliwasserglasansätze sollen verworfen werden, da mit ihnen nicht die erwarteten Ziele erreicht werden. Kaliwasserglas bewirkt eine zu starke Versprödung, so dass die Späne sehr schnell brechen. Natrium-Ligninsulfonat zeigt keine schimmelpilzhemmende Wirkung. Durch das Bestehen der Brandprüfung aller Proben, sollte das Hauptaugenmerk in der weiteren Entwicklung auf die Optimierung der Wärmeleitfähigkeit und der Dichte gelegt werden, da diese Faktoren direkten Einfluss auf Kosten und Nutzen des Produkts haben. Der Schimmelschutz muss dabei erhalten bleiben.

Auch bei der Evaluation der Ansätze gibt es Verbesserungspotenzial. Zur besseren Vergleichbarkeit und Beurteilung der Spanmorphologie sollten Siebanalysen durchgeführt werden. Durch die Siebanalyse der behandelten Späne kann dann eine quantitative Aussage über eine Änderung der Korngrößenfraktionen gemacht werden. Die mechanischen Veränderungen der Späne nach der Modifikation (Versteifung) können zukünftig durch eine Messvorrichtung direkt quantifiziert werden, wie sie im Rahmen einer kürzlich abgeschlossenen Bachelorarbeit an der HFM München entwickelt wurde (Engelhard 2013). Die Interaktion der Behandlungssubstanzen mit der Holzmatrix sollte durch vertiefende materialwissenschaftliche Methoden (Elektronenmikroskopie, Röntgenstreuung, Nanoindentation) aufgezeigt werden. Insgesamt sollte man nach Möglichkeit aufgrund der hohen Streuung mehr Versuchswiederholungen durchführen, um aussagekräftigere Messwerte zu erhalten. Die Genauigkeit der Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit könnte durch Einsatz eines Zweiplattensystems verbessert werden.

8 Literatur

- Anonymus 2006. Dämmstoffmarkt verharrt auf mäßigem Niveau. Holzzentralblatt, Ausgabe 15, 437
- Eicke-Hennig W. 1997. Neue Dämmstoffe - (k)eine Alternative?. das Bauzentrum 9, S. 64 - 72
- Hering B. 2008: Bauphysikalische Eigenschaften von unbehandelten und thermisch modifizierten Holzfasern, -spänen und -wolle aus unterschiedlichen Holzarten und ihre Eignung als Rohstoff für Wärmedämmstoffe, Technische Universität Kaiserslautern
- Vogel K. 1999. Die Eignung von Holz als Wärmedämmstoff. Vergleichende Untersuchungen von Spänen und Fasern. Dissertation der Ludwig-Maximilians-Universität München. Aachen: Shaker Verlag. 125.
- Vogel K., Wegener G., Tröger F. 1997. Thermal insulation based on loose wood chips. Holz. Als Roh- Werkstoff. 55(5) 286–286
- Vogel K., Wegener G., Tröger F. 1998. Thermal insulation based on loose wood chips. in 10th European Conference and Technology Exhibition on Biomass for Energy and Industry. Würzburg, Germany.
- Vogel K., Wegener G., Tröger F. 2002. Untersuchungen zur Materialcharakteristik, Wärme-leitfähigkeit, zum Feuchte- und Setzungsverhalten. Einbau von unbehandelten Holzspänen in einem Keck GmbH-Musterhaus und begleitende messtechnische Untersuchungen. DBU-Abschlussbericht der Holzforschung München, TUM.
- Vogel K., Tröger F., Wegener G. 2006. Zehn Jahre Späneforschung für die Wärmedämmung. Mikado, 56-59.
- Woest A. 2004. Produktion loser Dämmstoffe aus Holzspänen und -fasern als höherwertige Nutzung von Industrierestholz und Schwachholz. Projekt F-2001/13. Deutsche Gesellschaft für Holzforschung München.
- Schunk C., Treml S., Tröger F. 2009. Lose Dämmstoffe aus Holz – Wärmeleitfähigkeit von speziell hergestellten Frässpänen ausgewählter Holzarten. Eur. J. Wood Prod. 2.
- Engelhardt M. 2013. Abhängigkeit des Relaxationsverhaltens schüttfähiger Dämmstoffe auf Cellulosebasis von Struktureigenschaften des Materials und bauphysikalisch relevanten Umgebungseinflüssen. Bachelor's Thesis, Studiengang der Holztechnik (B.Eng.) der Hochschule Rosenheim, Fakultät für Holztechnik und Bau an der Holzforschung München (Technische Universität München).T
- Treml S. 2011. Entwicklung von Kompositdämmstoffen auf Basis von Frässpänen aus Holz. Dissertation TU München, 185 S. + Anhang.

- Trembl S., Engelhardt M. 2013. Evaluation of settlement behaviour of loose-fill insulation material using relaxation tests. *Wood Science and Technology*, 343-351.
- Hersener J., Keller L.A. 2002. Einblasdämmstoffe aus Faserhanf und Grasfasern im Vergleich zu Altpapierdämmstoffen. Schlussbericht BFE Projekt 35006 Eidg. Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik. 34
- Nitz H., Semke H., Mülhaupt R., Abächerli A. 2001. Customized lignin. Use as non-toxic biostabilizers. *Kunststoffe* 91(11), 98–101.
- Howell, B.A., Chung R. 2004. Lignin as a base for the generation of flame retardants. *Proceedings of the NATAS Annual Conference on Thermal Analysis and Applications 32nd* 159.06.176/1-159.06.176/7.
- Oliveira A.L., Malafaya P.B., Reis R.L. 2001. Sodium silicate gel induced self-mineralization of different compact and porous polymeric structures. *Key Engineering Materials* 192-195 (Bioceramics), 75–78.
- Kharazipour A., Haars A., Shekholeslami M., Huettermann A. 1991. Enzyme-bonded wood materials based on lignin and phenol oxidases. *Adhaesion* 35(5), 30, 33–34, 36
- Hentschel, H. 1938. Modern methods of sizing paper. *Wochenblatt für Papierfabrikation* 69, 589–592.

DANKSAGUNG

Die Autoren danken (1) Frau Margrit Conradin und (2) Herrn Walter Risi, Empa Abteilung Angewandte Holzforschung für (1) die finanzielle Koordination der Projektmittel und (2) der Probenmanipulation nach Projektende.

Dem Fonds zur Förderung der Wald- und Holzforschung wird für die Bereitstellung der Fördermittel für die Durchführung der Untersuchungen herzlich gedankt.