

BBSR-  
Online-Publikation  
42/2024

# rethinking wood

## Holzpartikelgefertigte, kreislauffähige Bauteile mit hohen Krümmungsgraden

von

Prof. Philipp Eversmann  
Anne Liebringshausen  
Lisa Heinze  
Nadja Nolte  
Julia Hannu

## rethinking wood

Holzpartikelgefertigte, kreislauffähige Bauteile mit hohen Krümmungsgraden

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wohnen, Stadtentwicklung  
und Bauwesen

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

**ZUKUNFT BAU**  
FORSCHUNGSFÖRDERUNG

Dieses Projekt wurde gefördert vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Auftrag des Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) aus Mitteln des Innovationsprogramms Zukunft Bau.

Aktenzeichen: 10.08.18.7-21.22

Projektlaufzeit: 10.2021 bis 09.2023

## IMPRESSUM

### Herausgeber

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)  
im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)  
Deichmanns Aue 31–37  
53179 Bonn

### Fachbetreuer

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung  
Referat WB 3 „Forschung und Innovation im Bauwesen“  
Felix Lauffer  
felix.lauffer@bbr.bund.de

### Autorinnen und Autoren

Universität Kassel  
Fachbereich „Architektur, Stadtplanung, Landschaftsplanung“  
Fachgebiet „Experimentelles und Digitales Entwerfen und Konstruieren“  
Prof. Philipp Eversmann (Institutsleitung)  
eversmann@asl.uni-kassel.de

Anne Liebringshausen, M. Sc. (Projektleitung)  
liebringshausen@asl.uni-kassel.de

Dipl. Des. Lisa Heinze  
heinze@uni-kassel.de

Dipl. Des. Nadja Nolte  
nadjanolte@uni-kassel.de

Julia Hannu, M. Sc.

### Redaktion

Universität Kassel, Kassel  
Anne Liebringshausen

### Stand

September 2023

### Gestaltung

Universität Kassel, Kassel  
Anne Liebringshausen  
Lisa Heinze

### Bildnachweis

Titelbild: Lisa Heinze  
Lisa Heinze: S. 89–90; Nicolas Wefers: S. 83 Abb. 96, Abb. 95;  
Fachgebiet Experimentielles und Digitales Entwerfen und Konstruieren: Restliche Fotografien

### Vervielfältigung

Alle Rechte vorbehalten

Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie für die Beachtung privater Rechte Dritter. Die geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit denen des Herausgebers übereinstimmen.

### Zitierweise

Eversmann, Philipp; Liebringshausen, Anne; Heinze, Lisa; Nolte, Nadja; Hannu, Julia; 2024: rethinking wood: Holzpartikelgefertigte, kreislauffähige Bauteile mit hohen Krümmungsgraden. BBSR-Online-Publikation 42/2024, Bonn.

---

# INHALT

---

<b>KURZBERICHT</b>	<b>6</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>7</b>
<b>1 EINLEITUNG</b>	<b>8</b>
1.1 Zusammenfassung und Problemstellung	8
1.2 Forschungsfragen	8
1.3 Methodik	9
1.4 Stand der Forschung	9
1.5 Ausgangsbasis für das Forschungsvorhaben	11
1.6 Ziele	12
1.7 Prozesserläuterung	13
1.7.1 Schritt 1: Formstoffe	13
1.7.2 Schritt 2: Formstoffbinder	13
1.7.3 Schritt 3: Pressen/ Verdichten	13
1.7.4 Schritt 4: Trocknung	13
1.7.5 Schritt 5: Subtraktives Formen	13
1.7.6 Schritt 6: Nutzungsphase & Anwendung	13
1.7.7 Schritt 7: Rückführung	13
1.8 Akustik	14
1.8.1 Grundlagen der Akustik	14
1.8.2 Schallabsorption	15
<b>2 (AP 1) MATERIAL- UND PROZESSENTWICKLUNG</b>	<b>17</b>
2.1 Ermittlung von Materialeigenschaften und Stoffströmen aus Altholz	17
2.1.1 Altholz – ein industrielles Abfallprodukt ohne Abnehmer	17
2.1.2 Holzpartikel aus Restströmen	17
2.1.3 Konfektionierte Holzpartikel	18
2.1.4 Altholz	19
2.2 Untersuchungen von biobasierten Bindemitteln für Holzpartikel	20
2.2.1 Stärke	21
2.2.2 Kasein	22
2.2.3 Pflanzliche Proteine	22
2.2.4 Tierische Proteine/ Glutinleime	23
2.2.5 Chitosan	25
2.3 Entwicklung von Verfahrensprozessen	26
2.3.1 Mischen	26
2.3.2 Verdichten	26
2.3.3 Trocknungsstrategien	27
2.3.4 Schimmelvermeidung	28
2.3.5 Rohdichte/ Materialporosität	28
2.3.6 Akustische Optimierung durch digitale Fertigung	28
2.3.7 Vorgehen	29
2.4 Rezepturenentwicklung	30
2.4.1 Stärke	30
2.4.2 Kasein	34
2.4.3 Pflanzliche Proteine/ Gluten	37
2.4.4 Tierische Proteine/ Glutinleime	40
2.4.5 Chitosan	42

2.5	Faserverbund- und Sandwichelemente	44
2.6	Entwicklung von akustischen Eigenschaften	47
2.6.1	Anwendungsoptimierung	47
2.6.2	Formgebendes Verfahren	47
2.6.3	Subtraktives Verfahren	48
2.6.4	Hohlräume	49
2.6.5	Fräsgenauigkeit	50
2.6.6	Zuschnitt	52
<b>3</b>	<b>(AP 2) PRÜFVERFAHREN &amp; BAUTEILCHARAKTERISIERUNG</b>	<b>56</b>
3.1	DIN-Prüfverfahren	56
3.1.1	Druckfestigkeit nach DIN 52376	56
3.1.2	Querzugfestigkeit nach DIN EN 319	57
3.1.3	Prüfung des Brandverhaltens nach 4102-1 und Klassifizierung nach DIN EN 13501-1	58
3.1.4	Akustische Messungen	61
3.2	Analyseverfahren & Charakterisierung	66
3.2.1	Trocknungsverhalten & Strategien	66
3.2.2	Materialfeuchte	70
3.3	Nachhaltigkeitsparameter	73
3.3.1	Rückführung, Recycling & Kreislaufwirtschaft	73
3.3.2	Ökobilanzierung nach DIN EN ISO 14040/ 14044	76
<b>4</b>	<b>(AP 3) PRÄZISIERUNG, DETAILAUSBILDUNG, SKALIERUNG</b>	<b>82</b>
4.1	Designentwicklung 1:2 Demonstrator	82
4.1.1	Materialität	82
4.2	Raumakustische Orientierungsmessung Messung des Schallabsorptionsgrades im Raum	82
4.2.1	Aufgabenstellung und Ziel	82
4.2.2	Referenzraum (Ref)	82
4.2.3	Design Prüfdemonstratoren	83
4.2.4	Messmethodik und Durchführung der Messung	83
4.2.5	Auswertung	84
<b>5</b>	<b>(AP 4) BAUAUSFÜHRUNG 1:1 DEMONSTRATOR</b>	<b>85</b>
5.1	Material & Fertigungsverfahren	85
5.2	Designentwicklung 1:1 Demonstrator	85
5.2.1	Truchet-Kachel	86
5.2.2	Transformation zur 3D-Kachel	86
5.2.3	Entwicklung einer Oberflächengestaltung in Abhängigkeit zum Raum	86
5.2.4	Färbung	87
5.3	Umsetzung 1:1 Demonstrator	87
5.4	Finaler Enddemonstrator	89
<b>6</b>	<b>FAZIT &amp; AUSBLICK</b>	<b>91</b>
<b>7</b>	<b>MITWIRKENDE</b>	<b>94</b>
<b>8</b>	<b>LITERATURVERZEICHNIS</b>	<b>95</b>
<b>9</b>	<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS</b>	<b>98</b>

---

## KURZBERICHT

---

Durch Änderungen im „Erneuerbaren Energie-Gesetz (2017)“ fallen neuerdings mehrere Millionen Tonnen Altholz als Abfall an. Ziel des Forschungsprojektes ist es, das Abfallprodukt Altholz kreislauffähig in einem Zero-Waste-Verfahren zur Herstellung von Bauteilen mit hohen Krümmungsgraden, nachhaltig in die Baubranche zu implementieren. Forschungen sollen zeigen, wie sich das Material in bauaffine Prozesse einpassen lässt. Es soll ein Ausblick geschaffen werden für die Anwendung als leichte, brandsichere und präzise konfektionierte Dämm- und Akustikemente. Auch Anwendungen für den Innen-, Modell- und Möbelbau sind denkbar. In grundlegenden Materialforschungen wird Altholz in Form von Holzpartikeln in Vollverwertung und unter Zugabe von nachhaltigen biogenen Bindertypen und mit Hilfe von digitalen Fertigungsweisen neu geformt und in neue kreislauffähige Bauanwendungen mit hohen Krümmungsgraden übertragen werden.

Am Ende des Lebenszyklus können die partikelbasierten Bauteile und der beim Formungsprozess aufkommende Holzspan sortenrein rückgeführt und wiederverwendet werden. Das angestrebte Zero-Waste-Verfahren bringt den ökologischen, nachhaltigen und wirtschaftlichen Vorteil, dass ein gesundheitlich unbedenkliches, industrielles Abfallprodukt als Formstoff in Verwendung kommt. Dieser kann zudem immer wieder verwendet und neu geformt werden, wodurch ein geschlossener Materialkreislauf entsteht. Zur Vermeidung von grauer Energie und Verschwendung von Ressourcen greifen alle Verfahrensansätze bewusst auf bereits bestehende Maschinen und Werkzeuge zurück.

---

## ABSTRACT

---

Due to changes in the "Renewable Energy Act (2017)", several million tonnes of waste wood have recently been generated. The aim of the research project is to implement the waste product waste wood in a recyclable, zero-waste process for the production of building components with high curvature radii, sustainably in the construction industry. Research will show how the material can be integrated into construction-related processes. The aim is to create an outlook for its use as lightweight, fire-safe and precisely manufactured insulating and acoustic elements. Applications for interior, model and furniture construction are also conceivable. In fundamental material research, old wood will be reshaped in the form of fully recycled wood particles, with the addition of sustainable biogenic binder types and with the help of digital manufacturing methods, and transferred to new circular building applications with high degrees of curvature.

At the end of the life cycle, the particle-based components and the wood shavings produced during the moulding process can be recycled and reused. The targeted zero-waste process has the ecological, sustainable and economic advantage of using an industrial waste product that is harmless to health as a moulding material. Moreover, it can be reused and reshaped again and again, thus creating a closed material cycle. To avoid grey energy and waste of resources, all process approaches consciously use existing machines and tools.

## 1 EINLEITUNG

### 1.1 Zusammenfassung und Problemstellung

Durch Änderungen im „Erneuerbare-Energien-Gesetz (2017)“ fallen neuerdings mehrere Millionen Tonnen Altholz als Abfall an. Ziel des Forschungsprojektes ist es, das Abfallprodukt Altholz kreislauffähig in einem Zero-Waste-Verfahren zur Herstellung von Bauteilen mit hohen Krümmungsgraden, nachhaltig in die Baubranche zu implementieren.

Forschungen sollen zeigen, wie sich das Material in bauafine Prozesse einpassen lässt. Es soll ein Ausblick geschaffen werden für die Anwendung als leichte, brandsichere und präzise konfektionierte Dämm- und Akustikelemente.

In grundlegenden Materialforschungen soll Altholz in Form von Holzpartikeln in Vollverwertung und unter Zugabe von nachhaltigen biogenen Bindertypen und mit Hilfe von digitalen Fertigungsweisen neu geformt und in neue kreislauffähige Bauanwendungen mit hohen Krümmungsgraden übertragen werden. Am Ende des Lebenszyklus können die partikelbasierten Bauteile und der beim Formungsprozess aufkommende Holzspan sortenrein rückgeführt und wiederverwendet werden.

Das angestrebte Zero-Waste-Verfahren bringt den ökologischen, nachhaltigen und wirtschaftlichen Vorteil, dass ein gesundheitlich unbedenkliches, industrielles Abfallprodukt als Formstoff in Verwendung kommt. Dieser kann zudem immer wiederverwendet und neu geformt werden, wodurch ein geschlossener Materialkreislauf entsteht. Zur Vermeidung von grauer Energie und Verschwendung von Ressourcen greifen alle Verfahrensansätze bewusst auf bereits bestehende Verfahren, Maschinen und Werkzeuge zurück.

Bereits existierende planare Holzwerkstoffe auf Basis von Holzpartikeln, sind mit irreversiblen Bindertypen (Formaldehyd enthaltene Kunstharze) und Lackierungen versehen, was zu einem erschwerten Rückbau führt. Dabei liegt der Altholzanteil bei nur ca. 10 %. Die Abbildung von hohen, dreidimensionalen Krümmungsgraden ist nicht möglich — hier setzt das angestrebte Forschungsvorhaben an. Die Verwendung nachhaltiger Binder, der Verzicht auf schädli-

che Additive, eine umfassende Wiederverwertung und eine signifikante Steigerung des Anteils von Altholz im Formstoff ermöglichen vielfältige Anwendungsbereiche. Gleichzeitig fördern sie die Untersuchung der Rückbaufähigkeit und die Etablierung eines geschlossenen Stoffkreislaufs, wodurch auch die bestehende Forschungslücke geschlossen wird.

### 1.2 Forschungsfragen

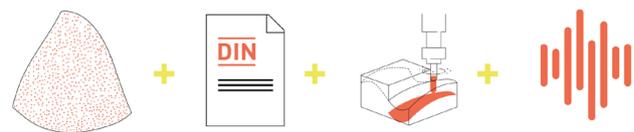


Abb.1: Anforderungen an die Bauteile bezüglich 1.) Material 2.) DIN-Normen 3.) Fabrikation 4.) Akustische Anforderungen

Folgende Forschungsfragen sollen in dem Projekt beantwortet werden:

Welche Anforderungen und Voraussetzung werden an die anwendungsspezifischen Bauelemente gestellt wie z.B. in Bezug auf Standsicherheit, Langlebigkeit und Kräfteaufnahme etc.?

Welche Anforderungen müssen im spezifischen Anwendungsfall an die Formstoffmixture gestellt werden?

Wie kann der Materialbrei zu einem Formstoffrohling geformt werden und welche Prozessschritte/ Verarbeitungsschritte sind nötig?

Welche Trocknungsstrategien (Luft- oder mechanische Trocknung) sind nötig – und wie kann Schimmel in Bauteilen vermieden werden?

Wie kann eine kontrollierte Formung und Produktion des Formstoffrohlings stattfinden?

Wie kann eine Skalierung der Elemente stattfinden?

Wie kann ein nachhaltiger Stoffkreislauf gewährleistet werden?

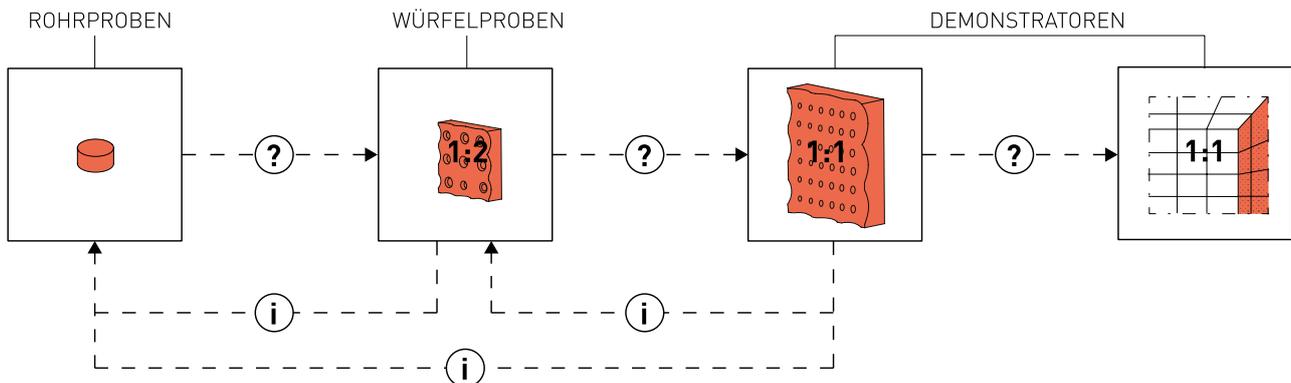


Abb.2: Methodisches Vorgehen: Skalierung und Evaluierung von Demonstratoren. Von kleinmaßstäblichen Rohrproben bis zu einem 1:1 assemblierten 1:1 Prototypen

Welche Anforderungen gibt es an die verwendeten Materialien und Verfahrenstechniken für eine sortenreine Rückführung?

### 1.3 Methodik

Das empirische Vorgehen variiert zwischen praktischen, experimentellen Forschungsarbeiten, digital- maschinell gestützten Simulations-, Analyse- und Auswertungsverfahren und Steuerung von Herstellungsprozessen.

Die Methodik in der ersten und zeit intensivsten Phase diente der Grundlagenforschung und war auf die Produktion und Machbarkeit kleinmaßstäblicher Prototypen ausgelegt, um in einem evolutionären Prozess die beschriebenen Probleme/ Forschungsfragen praktisch anzugehen und zielführende, optimierte Ergebnisse zu erlangen (siehe Abb.2). Experimente wurden dokumentiert, aufbereitet und in Bezug zueinander gesetzt und ausgewertet. Im Verlauf der folgenden Phasen wurden Forschungsergebnisse unter Zuhilfenahme von Analyseverfahren immer weiter präzisiert und DIN-Testungen und Charakterisierungen an Probekörpern als auch an Material und Bindemitteln durchgeführt. Produzierte Demonstratoren wurden hinsichtlich ihrer Präzision und Toleranzen untersucht und mit dem digitalen Modell abgeglichen. Kennwerte werden hinsichtlich ihrer Ökobilanz bewertet und in Bezug z.B. zu konventionellen Prozessen und Anwendungsbereichen gesetzt.

### 1.4 Stand der Forschung

Es existiert zum Zeitpunkt der Antragsstellung kein vergleichbarer Stand der Forschung zum Thema holzspanbasierte Bauteile mit hohen Krümmungsgraden. Tangierende Verfahren und Materialien nehmen ausschließlich Bezug auf Plattenmaterialien wie Holzwerkstoffe, welche andere Anforderungen an beispielsweise Materialstärke (Rohdichte), Festigkeit, Quell- und Schwindeigenschaften, Brandschutzklasse, Feuchtebeständigkeit, Dauerhaftigkeit, Verarbeitung, Standsicherheit und Rückbaubarkeit stellen, als die im beantragten Projekt vorgesehenen Holzpartikelelemente. Auf dem Markt stehen bereits augenscheinlich nachhaltige Akustikelemente zum Kauf zur Verfügung [1]. Als Basis dient meist Holzwolle und als Bindemittel zementbasierte Klebstoffe. Es fehlt an einer dringend benötigten Transparenz seitens der produzierenden Industrie, alle verwendeten Additive aufzuführen, um die Nachhaltigkeit eines Produktes bewerten zu können. Schädliche Additive werden in Einsatz gebracht, um geforderte Normen wie z.B. Festigkeits- und Brandschutzeigenschaften erfüllen zu können [1]. Bei näherer Betrachtung sind die Akustiklösungen nicht mehr nachhaltig, bedenkt man den Anteil grauer Energie, der im Zement steckt, welcher auch gleichzeitig einen sortenreinen Rückbau der Elemente unmöglich macht.

Das schwedische Unternehmen BAUX bietet Akustikelemente unter dem Produktnamen „Acoustic Wood Wool“ auf Basis zementgebundener Holzwolle zur Anwendung als Deckenelemente an und macht gleichzeitig alle Ingredienzien öffentlich [2]. Das Unternehmen bietet auch Beispiele für vollbiologische Verbundwerkstoffe („BAUX Pulp“ [3]) aus Zellulose, Kartoffelstärke, Weizen, Wachs und Zitrusfrüchten zur Integration an Wänden.

Ursprüngliche Holzwerkstoffe sind ein Verbund aus zerkleinertem Holz und Binder, die durch Pressen zu Platten zusammengefügt werden. Die enthaltenen Holzpartikel entscheiden über Art, Kategorie und Eigenschaft des Werkstoffs. Sie werden unterteilt in Werkstoffe auf Vollholz-, Furnier-, Span-, und Faserbasis. Eine Sonderkategorie bilden Holzwerkstoffe, die mit Kunststoffen versehen werden (WPC – Wood-Plastic-Composite). Dies macht den Werkstoff im Gegensatz zu traditionellen Holzwerkstoffen formstabiler und feuchteresistenter. Verarbeitet werden sie mit Hilfe von Verfahren der Kunststofftechnik und bilden einen großen Forschungsschwerpunkt.

Dem Vorhaben am nächsten sind Holzspanwerkstoffe, die ein breites Anwendungsspektrum haben und eine Vielzahl an Klassifizierungsmerkmalen, die sich nach Zweck, Aufbau, Herstellung, Größe und Oberfläche orientieren.

Eine normgerechte Kategorisierung erfolgt über EN 309 [4]. Holzspanwerkstoffe bestehen aus Holzspänen und einem Kunstharzleim und werden in Schichten mittels Wärme und Druck hergestellt. In der Mittelschicht wird größerer Span verwertet — in den Deckschichten feine Spanpartikel. Holzspanplatten gibt es in der Stärke von 2,5 mm (Dünnschanplatte) bis hin zu „extra Dick“ in 80 mm.

Entscheidend für den Einsatz der Platten, ob in Trocken-, Feuchtbereichen oder statisch relevanten bzw. irrelevanten Anwendungen, und für die Langlebigkeit der Holzwerkstoffe, ist der Klebstofftyp. Heute werden noch immer umweltbedenkliche Formaldehyd enthaltende Kunstharze als Bindemittel eingesetzt. Der Bindemittelanteil liegt bei Spanplatten beispielsweise zwischen 8 und 10 % [5].

Ebenso können je nach Verwendungsgebiet noch Additive hinzugegeben werden wie Flammschutz-, Holzschutz-, Hydrophobierungsmittel oder Härter, die neben Leim über die Nachhaltigkeit der Produkte entscheiden. Laut VHI „Verband der Deutschen Holzwerkstoffindustrie“ sind Bindemittel aus nachwachsenden Rohstoffen zwar in der Entwicklung, spielen aber in der Industrie noch keine Rolle.

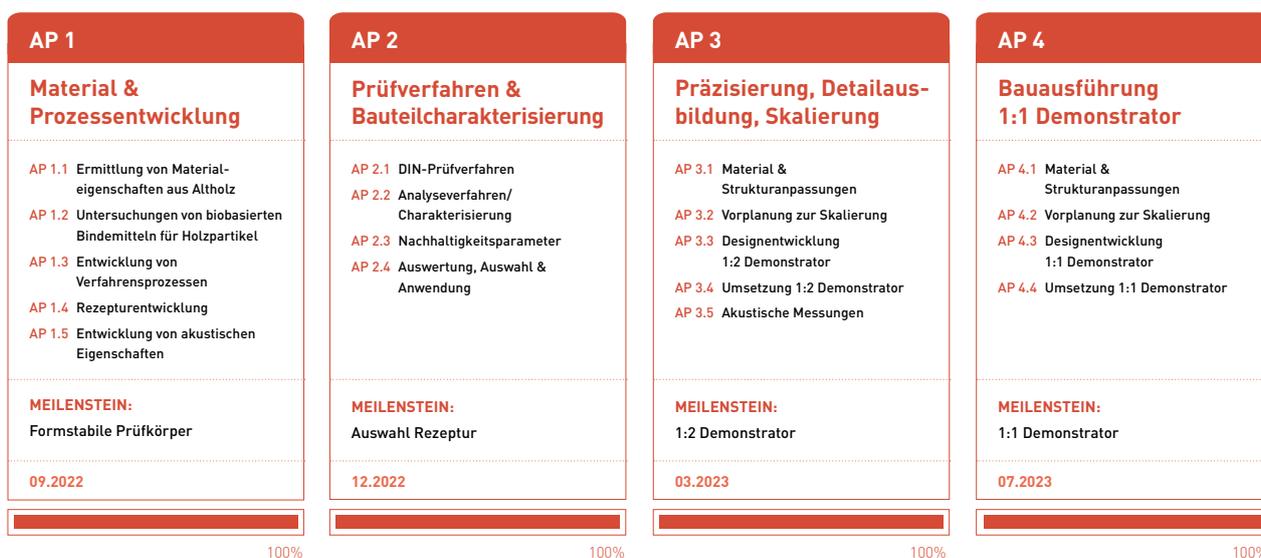


Abb.3: Aufgliederung und zeitliche Entwicklung der Forschungsmaßnahmen in Arbeitspakete (Stand 30.09.2023)

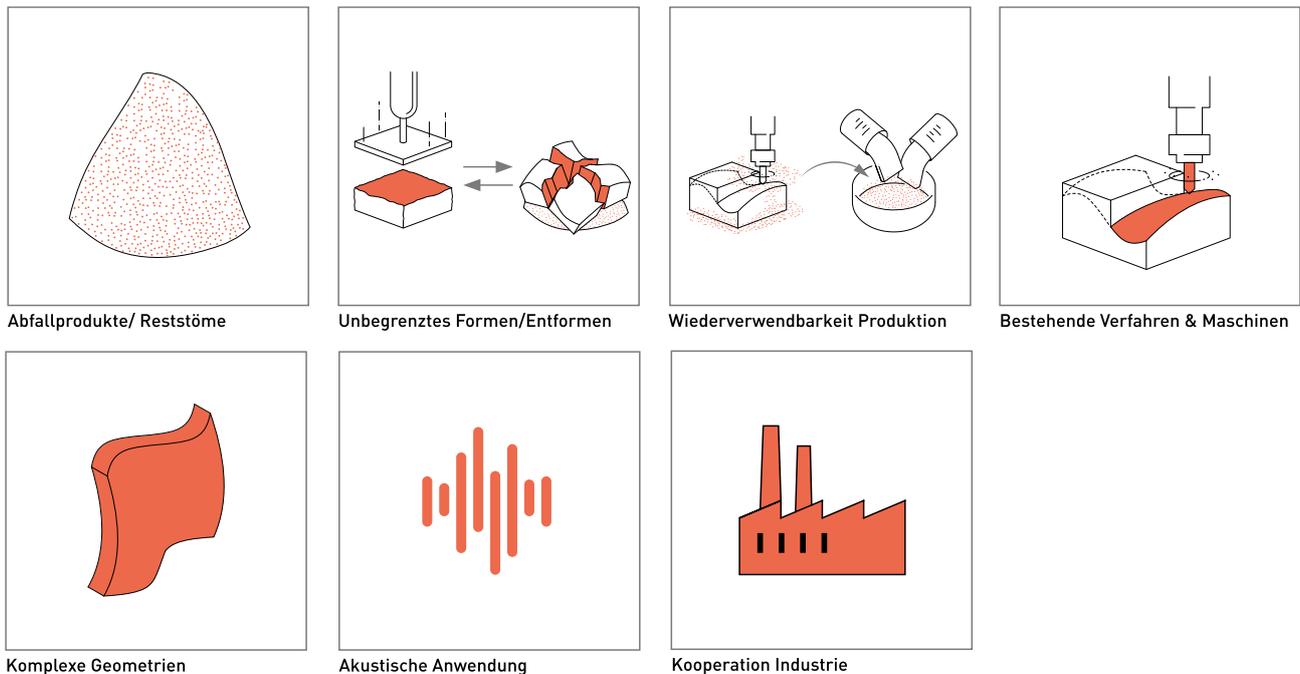


Abb.4: Ziel / Parameter des Forschungsprojektes

Der Rückbauaufwand ist hoch. Eine stoffliche Verwertung von Holzwerkstoffen ist nur bei den gesundheitlich bedenklichen und nicht nachhaltigen UF (Urea/Formaldehyd) gebundenen Spanplatten möglich. Auch zusätzliche Behandlungen wie Lackierungen erschweren den Rückbau. Eine hochwertige energetische Verwertung ist nur in speziellen Holzverbrennungsanlagen möglich, die allerdings durch Änderungen im EEG-Gesetz aktuell drastisch abgebaut werden. Zusätzlich muss zur Verwertung auch ein Ausbau der Platten gewährleistet sein [6].

### 1.5 Ausgangsbasis für das Forschungsvorhaben

Die Forschung schließt an bereits eigens gewonnene Forschungsergebnisse und Erkenntnisse an, die aus dem – von der Forschungsinitiative Zukunft Bau geförderten – Projekt mit dem Titel „Industriell nutzbare, nachhaltige und wiederverwendbare Schalungen zur Realisierung von doppelseitig gekrümmten Betonfertigteilen für energieeffizientes, ressourcenschonendes und klimagerechtes Bauen“ resultieren (SWD-10.08.18.7-18.30. Endbericht liegt vor (Stand 28.02.2021).

Ein Untersuchungsbereich waren dabei Holzpartikel-schalungen, die mit Stärke gebunden wurden. Die Ingredienzien wurden im Trockenzustand verrührt und es wurde in kurzen Intervallen Wasser hinzugegeben, bis sich eine pastöse Masse bildete. Der feuchte Formstoffbrei wurde sofort verpresst, getrocknet und mittels CNC-Fräse geformt, oberflächenbehandelt, mit Beton abgegossen und ausgeschalt. Im letzten Schritt konnten die Schalungen sortenrein in einen geschlossenen Materialkreislauf zurückgeführt werden.

Das Holzpartikel-Stärke-Verfahren weist durch seine hohe Oberflächengüte und das geringe Gewicht der Schalungen bei gleichzeitig enorm hohen Festigkeitswerten (Druckfestigkeit von 14,31 N/mm<sup>2</sup>), großes Potenzial auf, so dass weitere Forschungsarbeiten im Sinne von Nachhaltigkeitsaspekten lohnenswert erschienen.

## 1.6 Ziele

Aus der bereits genannten Problemstellung und einem Mangel an nachhaltigen Alternativen zur Realisierung von komplexen Elementen, leiteten sich für die Forschungsarbeiten folgende Umsetzungsanforderungen ab:

- (1) Verwendung von industriellen Abfallprodukten und/oder nachhaltigen, kreislauffähigen Materialien als Formstoffgrundlage
- (2) Möglichkeit eines mehrfachen Formens- und Entformens der Bauteile
- (3) Rückführung des bei der subtraktiven Bearbeitung ankommenden Formstoffspans in den Formstoffkreislauf
- (4) Anwendung von bestehenden, in der Industrie direkt umsetzbaren Fertigungsprozessen und Maschinen
- (5) Erfüllung akustischer Normen
- (6) Abbildung komplexer Geometrien
- (7) Kommunikation und Kooperation mit der Industrie, um eine Markteinführung zu ermöglichen

## 1.7 Prozesserläuterung

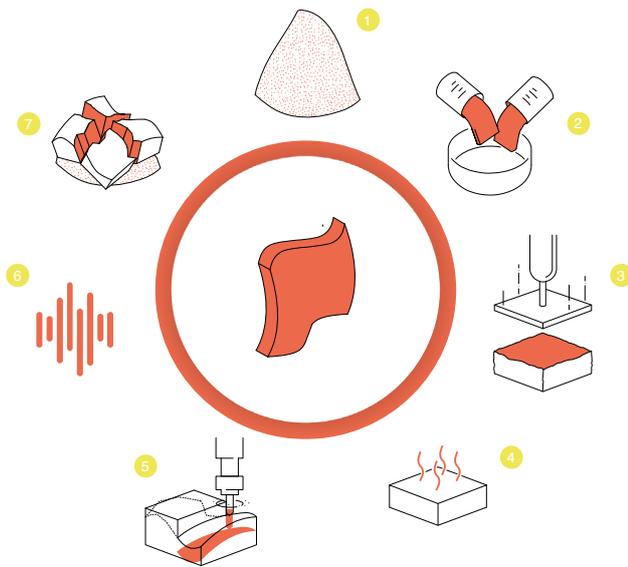


Abb.5: Prozesserläuterung zur Herstellung nachhaltiger Akustikelemente

Folgend die einzelnen Prozessschritte des Formstoffkreislaufs für die Herstellung von komplexen Akustikelementen aus Altholz:

### 1.7.1 Schritt 1: Formstoffe

Am Anfang der Prozesskette stehen Holzpartikel in Form von Altholz oder Restholz, deren Lebenszyklus in der Industrie abgeschlossen ist und/oder die ohne weitere Verwertungsstrategie deponiert werden, aber für die bevorstehenden Forschungsarbeiten wiederverwendet werden können.

### 1.7.2 Schritt 2: Formstoffbinder

Die Formstoffe sind in ihrem Zustand lose und ungebunden. Um diese zusammenzufügen, zu einem formstabilen Kollektiv, wurden im Sinne des Forschungsansatzes nachhaltige Formstoffbinder in Verwendung gebracht.

### 1.7.3 Schritt 3: Pressen/ Verdichten

Wurde der Formstoff mit Binder versehen, wird der noch feuchte Materialkuchen in Form vorgepresst und anschließend erneut heißverpresst.

### 1.7.4 Schritt 4: Trocknung

Um Energie und Ressourcen zu schonen, wurde eine sanfte Lufttrocknung durchgeführt.

### 1.7.5 Schritt 5: Subtraktives Formen

Die nun resultierenden, gebundenen und ausgehärteten Werkstoffe können zwecks Verbesserung der akustischen Leistung mit einer CNC-Fräse subtraktiv geformt werden.

### 1.7.6 Schritt 6: Nutzungsphase & Anwendung

Nutzungsphase: Die Bauteile können je nach Materialzusammenstellung unterschiedliche akustische Anforderungen erfüllen.

### 1.7.7 Schritt 7: Rückführung

Nach ihrem Lebenszyklus können die Bauteile via Zermahlungs-, Zerstoß- oder Auflösungsprozess zurückgeführt werden. Am Ende der Prozesskette wird der zurückgeführte Formstoff wiederverwendet, durchläuft erneut die Prozesskette und beginnt einen weiteren Lebenszyklus.

## 1.8 Akustik

### 1.8.1 Grundlagen der Akustik

Die Akustik hat einen großen Einfluss darauf, wie wir einen Raum erleben. Sie wirkt sich sowohl auf seine Nutzbarkeit [7] als auch auf das Wohlbefinden seiner Bewohner aus [8]. Die Akustik hängt von verschiedenen Parametern und Gestaltungen ab: von der Form des Raums, der Detaillierung der trennenden Bauteile, der Wahl der Materialien und der Oberflächenbehandlung. Im „Book of Acoustics“ [7] schreibt Dr. Mahmoud, dass es bei der akustischen Gestaltung um die Qualität der Materialien und die Positionierung der Materialien geht. Daher hat die Materialauswahl einen großen Einfluss auf die akustischen Qualitäten von Räumen. Aktuell steigt auch, durch die Verknappung von Rohstoffen und einem Paradigmenwechsel zur Vermeidung von umweltschädlichen Baustoffen, der Bedarf an nachhaltigen Baumaterialien und Lebenszyklusbewertungen von akustisch gut funktionierenden, nachhaltigen Materialien [9]. Daher empfiehlt es sich, bei der Entwicklung eines nachhaltigen Baumaterials die akustischen Auswirkungen zu inkludieren.

Schall ist die Übertragung von Schwingungen. Eine vibrierende Schallquelle versetzt Teilchen in der Luft oder einem anderen umgebenden Medium in Schwingung, die sich als Wellen komprimierter Luft durch den Raum ausbreiten. Wie wir einen Ton wahrnehmen, hängt vom Schalldruck und der Frequenz der Schallwellen ab. Der Druck ist die Stärke des Schalls, die sich an der Größe der Wellen ablesen lässt und in dB gemessen wird, üblicherweise mit einer A-Bewertung, dB(A), wenn Geräusche gemessen werden, die für den Menschen schädlich sein können [10].

Die Frequenz ist die Wellenlänge des Schalls, also die Geschwindigkeit, mit der ein Ton schwingt. Sie wird in Hertz (Hz) gemessen und bestimmt die Tonhöhe des Schalls. Der normale Hörbereich des Menschen liegt bei 20-20.000 Hz, und die menschliche Sprache hat normalerweise eine Frequenz zwischen 500 und 2000 Hz. Schall kann grob in drei Bereiche eingeteilt werden: tiefe, mittlere und hohe Frequenzen, wobei ein Bass zu den tiefen Frequenzen und eine Zimbel zu den hohen Frequenzen gehört [7].

### 1.8.1.1 Messung und Steuerung von Schall

Um den Schall zu steuern, kann man sich entweder auf die Schallquelle oder auf den Weg konzentrieren, den der Schall nimmt, nachdem er sich in Bewegung gesetzt hat. Der Schall breitet sich ohne Hindernisse in geraden Linien aus, aber wenn er auf ein Hindernis trifft, kann er eine Reihe von Verhaltensweisen zeigen: Er kann z. B. durch Beugung gebogen, reflektiert, gestreut, absorbiert oder übertragen werden. Wenn die Schallquelle selbst nicht kontrolliert werden kann, konzentriert sich die Verbesserung der Akustik darauf, das Eindringen des Schalls in den Raum zu verhindern, die Dauer des Schalls zu verkürzen oder die Bewegung des Schalls im Raum zu beeinflussen. Welche Strategie anzuwenden ist, hängt davon ab, welche Anforderungen bestehen und wofür der Raum genutzt wird [7].

Die Nachhallzeit ist ein Maß dafür, wie lange ein Geräusch in einem Raum verweilt. Ein Raum mit einer langen Nachhallzeit ist „hallig“, während ein Raum mit einer sehr kurzen Nachhallzeit akustisch tot erscheint. Bei normaler Nutzung, wie in Büros oder Klassenzimmern, ist eine kurze Nachhallzeit oft wünschenswert, während Kirchen oft eine lange Nachhallzeit haben [7].

Um die ideale Nachhallzeit zu erreichen, muss ein Gleichgewicht zwischen absorbierendem und reflektierendem Schall bestehen. Für eine homogenere oder maßgeschneiderte Schallverteilung kann es wünschenswert sein, wenn der reflektierte Schall beim Auftreffen auf eine Oberfläche gestreut wird – durch so genannte Diffusion. Wie der Schall gestreut wird hängt von der Geometrie und der Beschaffenheit der Oberfläche ab, was die beabsichtigte Streuung zu einem komplexen Thema werden lassen kann [10]. Eine zu starke Streuung kann jedoch dazu führen, dass der Ursprung des Schalls schwer zu erkennen ist, was in einigen Fällen unerwünscht ist [7]. Neben der Nachhallzeit können die akustischen Qualitäten eines Raums auch anhand von Faktoren wie Sprachverständlichkeit und Schallpegel bewertet werden [11].

## 1.8.2 Schallabsorption

Absorbierendes Material ist sowohl für die Raumakustik als auch für die Reduzierung von Umgebungslärm von großer Bedeutung, weshalb das Thema ausgiebig erforscht wird. Dennoch gibt es nicht die eine Lösung, um ein absorbierendes Material zusammenzustellen. Der Schall wird beim Auftreffen auf einen Festkörper durch zwei Mechanismen absorbiert. Der erste besteht darin, dass er durch eine viskose Grenzschicht in Bewegung gesetzt wird, der andere durch Wärmeleitung [12]. Damit der Schall absorbiert und nicht reflektiert wird, ist eine Impedanzanpassung wichtig, wobei die Impedanz ein Maß für den Bewegungswiderstand des Materials an einem bestimmten Punkt ist. Die in der Architektur verwendeten Absorber gehören in der Regel zu den Kategorien poröse Absorber, Plattenabsorber und Resonanzabsorber [11].

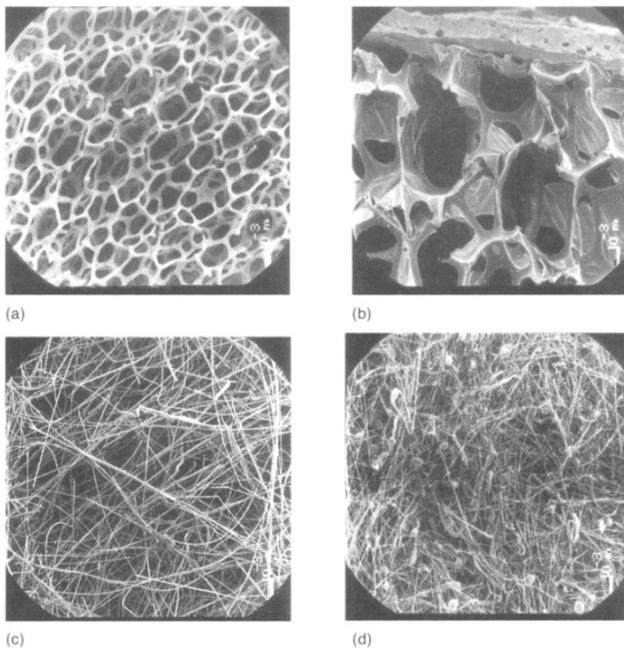


Abb.6: (a) Vollständig vernetzter Kunststoffschaum (x 14). (b) Teilweise vernetzter Kunststoffschaum (x14). (c) Glasfaser (gebundene Matte) (x 14). (d) Mineralwolle mit einer Dichte von 96 kg m<sup>-3</sup> (x 14). [A4]

Absorbierende akustische Produkte werden nach der ISO-Norm 11654 bewertet. Die Norm nennt zwei Koeffizienten, den praktischen Schallabsorptionskoeffizienten  $\alpha_p$  und den gewichteten Schallabsorptionskoeffizienten  $\alpha_w$ . Beispielsweise absorbiert ein Produkt mit dem Absorptionskoeffizienten 0,9 90 % des Schalls. Die Produkte können ferner in Absorptionsklassen von A bis E eingeteilt werden, wobei Produkte der Klasse A die höchste Schallabsorption über einen bestimmten Frequenzbereich aufweisen (A7). Absorbierende Materialien können durch ihren Geräuschreduzierungskoeffizienten (Noise Reduction Coefficient (NRC)) charakterisiert werden, der ein Durchschnitt des Streufeld-Absorptionskoeffizienten über die Frequenzen 250 Hz - 2.000 Hz ist [11].

### 1.8.2.1 Poröse Materialien

Poröse Materialien wie Kunststoffschäume, Glasfasern oder Mineralwolle haben oft einen großen Dissipationskoeffizienten, was sie zu Absorbieren mit hohen Aufnahmen macht. Sie können anhand von drei Parametern bewertet werden: Porosität, statische Permeabilität (Durchlässigkeit) und Tortuosität (kennzeichnet den Grad der Gewundenheit der Transportwege in den Poren poröser Materialien). Die Porosität ist ein Maß dafür, wie viel Luft im Gesamtvolumen vorhanden ist, während die Permeabilität ein Maß für die Porosität an der Grenzfläche und die Tortuosität ein Maß für die Geometrie der inneren Kanäle ist [A6].

### 1.8.2.2 Paneele

Plattenabsorber sind nicht-poröse, massive oder perforierte Platten mit einem Hohlraum, der mit Luft oder einem absorbierenden Material gefüllt ist [11]. Perforierte Paneele können so gestaltet werden, dass sie bestimmte Frequenzen absorbieren – wie z. B. mikroperforierte Paneele mit Perforationen in der Größenordnung von 0,2 mm, die für eine bessere Absorption niederfrequenter Töne ausgelegt sind [13]. Studien haben gezeigt, dass die Größe des Eingangsperforation ausschlaggebend dafür ist, welche Frequenzen absorbiert werden können. So werden beispielsweise zur Absorption niederfrequenter Töne kleine Eingangslöcher erfordert [12].

### 1.8.2.3 Resonatoren

Resonatoren, wie der Helmholtz-Resonator, funktionieren ähnlich wie perforierte Platten [11]. Öffnungen leiten den Schall aus dem Primärraum in einen Hohlraum, wo er eingefangen und absorbiert wird. Das gleiche Prinzip wird auch häufig bei akustischen Metamaterialien verwendet [12]. Neben den Eingangsgrößen von Perforationen beeinflussen die Tiefe und die Geometrie der Hohlräume ebenso deren Absorptionsfähigkeit [13]. Es hat sich gezeigt, dass Hohlräume mit einem Gradientenradius, d. h. konische Hohlräume, die Absorption von Frequenzen des breiten Spektrums verbessern [15], während labyrinthartige Strukturen die Absorption niedriger Frequenzen verbessern [16].

### 1.8.2.4 Absorber auf Holzbasis

Abgesehen von perforierten Holzplatten oder -paneelen gehören zementgebundene Holzpartikel zu den gängigsten Akustikprodukten auf Holzbasis [17]. Sie werden stellen-

weise aus Holzabfällen hergestellt, haben gute Dämm- und Absorptionseigenschaften und lassen sich leicht schneiden oder in Form bringen. Ein Element aus Holz und Zement mit einer Dichte von 300–600 kg/m<sup>3</sup> kann einen NRC-Wert von 0,4–0,75 aufweisen, wobei der höhere Wert im Spektrum für eine Trockendichte zwischen 500–600 kg/m<sup>3</sup> und eine Dicke von 50 mm gilt [18] [19]. Die Schichtung von Material ist in der Akustik eher die Regel als die Ausnahme [11], so dass die Absorptionseigenschaften von Holzzementplatten mitunter durch Luft- und Steinwollschichten verbessert werden. Es gibt auch Beispiele für vollbiologische Verbundwerkstoffe. Zu nennen ist hier BAUX Pulpw[3], das aus Zellulose, Kartoffelstärke, Weizen, Wachs und Zitrusfrüchten besteht und eine Dichte von etwa 120 kg/m<sup>3</sup> mit einem Schalldämmkoeffizienten von 0,35 bei einer Dicke von 20 mm aufweist. Zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Forschungsberichts (Stand 30.09.2023) sind Holzwerkstoffe mit biologischen Bindemitteln aus akustischer Sicht jedoch noch nicht so weit verbreitet oder erforscht.

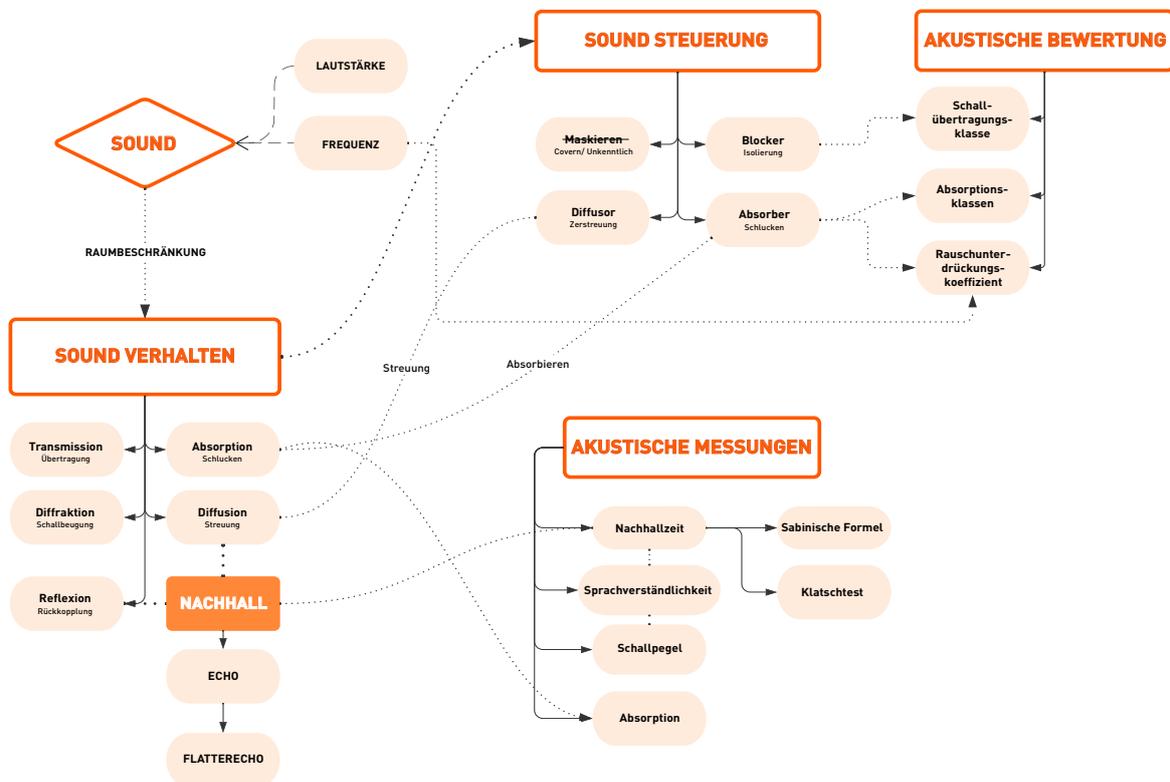


Abb.7: Visualisierung des Zusammenhangs von Soundverhalten, dessen Steuerung, akustische Messung und Bewertung

## 2 (AP 1) MATERIAL- UND PROZESSENTWICKLUNG

### 2.1 Ermittlung von Materialeigenschaften und Stoffströmen aus Altholz

#### 2.1.1 Altholz – ein industrielles Abfallprodukt ohne Abnehmer

Bei der Produktion von Schnittholz liegt der Anteil von Industrierestholz bei gut 40–50 % des Hauptprodukts, was in deutschen Sägewerken zu jährlich im Schnitt 7 Mio. Tonnen Rohstoff (Holzspan und Holzmehl) führt [20]. Knapp 3 Mio. Tonnen dieser Sägenebenprodukte werden für die Produktion von Holzpellets verwendet, wobei durch ein deutliches Überangebot und die milden Winter, die Abnahme vermindern [21].

Der überwiegende Anteil an Holzspan und Holzmehl findet Verwendung in der Herstellung von Holzwerkstoffen (Plattenwerkstoffe und Baustoffe) bzw. Zellstoffproduktion, sowie in der energetischen Verwertung. In den letzten Jahren wurde jedoch der Einsatz von Altholz für die Herstellung von Holzwerkstoffen stark ausgebaut. Und ebenso die Entwicklung im Bereich alternativer Binde- und Beschichtungskonzepte vorangetrieben [22]. Diese Ausrichtung auf Wiederverwertung und Weiternutzung in der Werkstoffindustrie senkt den Bedarf an Holzspan und Holzmehl aus der Primärproduktion drastisch, so dass große Mengen des Materials frei werden.

Und auch die energetische Verwertung von Sägenebenprodukten im industriellen Maßstab (Heizkraftwerke) verliert seit 2017 durch das „Erneuerbare-Energien-Gesetz“ (EEG 2017) zunehmend an Attraktivität. Grundsätzlich regelt das EEG die bevorzugte Einspeisung von Strom aus erneuerbaren Quellen ins Stromnetz und garantiert deren Erzeugern feste Einspeisevergütungen. Allerdings berücksichtigt das EEG 2017 Anlagen zur Gewinnung von Energie aus Altholz nicht länger. Die Betreiber fallen ab 2021 aus der EEG-Vergütung heraus und werden in Zukunft mit geförderten Anlagen konkurrieren müssen. Binnen eines Jahres fielen so bereits acht Kraftwerke aus der staatlichen Förderung – 67 Anlagen verblieben (Stand April 2019). Entsorgungsprobleme drohen und derzeit gibt es keine Antwort auf die Frage:

Wohin mit dem anfallenden Sägenebenprodukten, wenn weitere Anlagen schließen [23]?

Durch Kaskadennutzung, die Entwicklung alternativer Binde- und Beschichtungssysteme, sowie einen sinkenden Bedarf an Sägenebenprodukten als Brennstoff, werden große Mengen Holzspan und Holzmehl frei. Im Mittelpunkt muss nun die Frage stehen, welche alternativen Einsatzmöglichkeiten für diese Rohstoffe entwickelt werden können, damit, wie aktuell vielerorts der Fall, dieser nicht einfach nur verbrannt oder nutzlos deponiert wird. Das Umweltbundesamt spricht sich in diesem Zusammenhang dafür aus, dass bis 2050 die stoffliche Altholznutzung von 1,2 auf 4,2 Mio. Tonnen steigen soll. Verfahren, durch die dieses Ziel erreicht werden kann, gilt es nun zu entwickeln [24].

#### 2.1.2 Holzpartikel aus Restströmen

Gemäß dem Vorhaben, auf Restströme zurückzugreifen ergeben sich unterschiedliche Bezugsquellen und Strategien:

Holzpartikel entstehen als 1.) Neben- und Abfallprodukt bei zerspanenden Betrieben, wie etwa Sägewerken sowie aus 2.) Altholz aus Abriss oder Rückführungen und kann sowohl aus Hart- als auch Weichhölzern bestehen. Während Partikel z.B. bei Fräsprozessen resultieren, entsteht das feinere Holzmehl beim Schleifen von Holz.

Erste Materialstudien, Althölzer mit Bindern zu versehen, hat viele Forschungsfragen aufgeworfen, da die deponierten Hölzer unterschiedliche Sorten in unterschiedlichen Längen beinhaltet, war bei der Betrachtung von Proben offen, welche oder welcher Parameter für resultierende Forschungsergebnisse ausschlaggebend war. Um den Formstoff Holz zunächst als isolierten Parameter zu erforschen, wurde daher auf genormte Holzspäne und Holzmehl aus der Industrie zurückgegriffen. Hier liegen u.a. Spezifikationen und Trockenverlust, Schüttdichte, Siebrückstände und pH-Wert vor, die forschungsrelevante Informationen liefern und eingrenzen.

### 2.1.3 Konfektionierte Holzpartikel

	JELUXYL	WEHO 120/F.	WEHO 500	WEHO 500S	WEHO 800S	HAHO 120/F.	HAHO 150/30
<b>Holzsorte</b>		Weichholz	Weichholz	Weichholz	Weichholz	Hartholz	Hartholz
<b>Holzart</b>		Fichten-/Tannenholzmehl	Fichten-/Tannenholzmehl	Fichten-/Tannenholzmehl	Fichten-/Tannenholzmehl	Hartholzmehl	Hartholzmehl
<b>Spanlänge [µm]</b>		bis 120	bis 500	bis 500	bis 1.000	bis 180	bis 500
<b>Trockenverlust [%]</b>		~ 5.5	~ 5.5	~ 5.5	~ 5.5	~ 10	~ 10
<b>Schüttgewicht [g/l]</b>		~ 140	~ 130	~ 180	~ 190	~ 220	~ 240
<b>PH-Wert</b>		~ 5.5	~ 5.5	~ 5.5	~ 5.5	~ 5.5	~ 5.5

Abb.8: Untersuchte Holzmele- und Holzspansorten der Firma „Jelu“

Für eine aussagekräftige Grundlagenforschung, zur Entwicklung von Rezepturen und zur Herstellung eines Verbundwerkstoffs, bestehend aus Holzpartikeln und biogenem Bindemittel, sind zunächst Betrachtungen von einzelnen Parametern notwendig.

Um eine Konstante im Bereich Holzpartikel zu bilden, da Althölzer aus unterschiedlichen Holzarten, Formen und Größen bestehen, werden anfänglich heimische Laub und Nadelhölzer in unterschiedlichen Partikelgrößen und differenzierten Formen (länglich/ kubisch) einzeln auf den Verbund mit diversen umweltverträglichen Bindemitteln getestet. Hierzu wird vorerst auf konfektionierte Partikel aus Holz zurückgegriffen.

Bei industriell vorsortierten Holzfasern sind die Qualitäten bereits bekannt, genau definiert und liefern konstante Forschungsparameter (siehe Abb.8). Mit den Holzfasern des Unternehmens „JELU-WERK J. Ehrler GmbH & Co. KG“ wurden bereits in einem vorausgegangenen Projekt Forschungsreihen durchgeführt.

In die Forschungsarbeiten eingebunden wurden Spanlängen von 120 µm (Holzmehl) bis hin zu 800 µm (Holzfasern).

Einbezogen wurden sowohl Weichhölzer wie Fichte und Tanne, als auch Harthölzer, mit den in Abb.8 aufgeführten Partikellängen und verwendeten Produkten. Nach dem Sammeln von Grunddaten – in welcher Kombination (welche Partikel mit welchem Bindemittel korrespondieren) lassen sich anwendungsspezifische Eigenschaften erzielen – werden die Erkenntnisse auf Versuchsreihen mit Althölzern angewendet.



Abb.9: Von dem Unternehmen JELU-WERK Josef Ehrler GmbH &amp; Co. KG zur Verfügung gestellte Holzpartikel und Mehle

#### 2.1.4 Altholz

Unterschieden wird Altholz nach den Klassen A1 – A4:

Altholzklasse A1: naturbelassenes Altholz wie z.B. Paletten (lediglich mechanisch bearbeitet; unerheblicher Anteil holzfremder Stoffe).

Altholzklasse A2: behandeltes Altholz aus dem Innenbereich (gestrichen, lackiert, etc.).

Altholzklasse A3: Altholz mit halogenorganischen Verbindungen in der Beschichtung.

Altholzklasse A4: mit Holzschutzmitteln behandeltes Altholz.

Für die Holzwerkstoffherstellung sind die Altholzklassen A1 und A2 zugelassen. Die Klassen A3 und A4 kommen wegen zu hoher Fremdbelastung durch Stör-, Schad- und toxische Stoffe wie halogenorganische Verbindungen und Holzschutzmittel für diesen Anwendungsfall nicht in Frage.



Abb.10: Zur Verfügung gestelltes Altholz Klasse A1

Zur Partikelherstellung wird das Altholz von Metallen und anderen Fremdstoffen getrennt und mechanisch zerkleinert. Durch den Einsatz unterschiedlichster Rückführungswerkzeuge-Verfahren und Strategien (Mahlen, Schreddern, Zerspanen, Sieben etc.) lassen sich die gewünschten Altholz-Partikelgeometrien und Größen einstellen. Oft werden dazu Brecher und Hammermühlen eingesetzt; es sind aber auch schneidende Verfahren mit Hackern und Messerringzerspanern möglich. Schneidspäne weisen typischerweise eine günstigere Geometrie auf – entsprechenden Anlagen sind allerdings verschleißanfälliger. Zusätzlich wurden inzwischen spezielle Maschinen entwickelt, die geringeren Verschleiß und Energieverbrauch sowie eine günstigere Spangeometrie gewährleisten sollen. Beispiele hierfür sind z. B. der ClassiSizer (Fa. Dieffenbacher) und der EcoPulser (Fa. Siempelkamp).

BEZEICHNUNG	HERSTELLER	BASIS	ART/KATEGORIE	VERWENDUNG
Tecgel	Kröner	Weizenstärke	kaltquellende Stärke	Düngemittel, Klebstoffindustrie
Tigel	Kröner	Weizenstärke	kaltquellende Stärke	Düngemittel, Klebstoff
Tigel CF	Kröner	Weizenstärke	kaltquellende Stärke	Düngemittel, Klebstoff
Lightec	Kröner	Weizenstärke	kaltquellende Stärke	Waschmittel, Biotechnologie
T12	AllStarch	Weizenstärke	Kochstärke	Gipskartonherstellung
Swellstar CWS12	AllStarch	Weizenstärke	kaltquellende Stärke	Lebensmittelindustrie, Papierindustrie
WN1	AllStarch	Weizenstärke	Kochstärke	Lebensmittel, Papierindustrie
WMS	AllStarch	Wachsmaisstärke	Kochstärke	Lebensmittel-, Klebstoffindustrie
Emsize CMS 60	Emsland	Carboxymethylstärke	kaltquellende Stärke	Schlichtemittel, Klebstoffindustrie
Emsol K 55	Emsland	Hydroxypropylstärke	Kochstärke	Klebstoff-, Textil-, Papierindustrie
EMOX D 30 S	Emsland	oxidierte Stärke	Kochstärke	Bindemittel, Verdickungsmittel

Abb.11: Als Bindemittel evaluierte Stärkeprodukte aus unterschiedlichen Quellen und Derivaten

## 2.2 Untersuchungen von biobasierten Bindemitteln für Holzpartikel

Formgrundstoffe werden durch Bindersysteme an ihren Phasengrenzen zu Kollektiven gefügt. Der Formgrundstoff besteht aus Holzpartikeln und besitzt von sich aus keine bindende Funktion. Er ist auf die vermittelnde Wirkung eines Bindemittelsystems angewiesen. Dieses Bindemittelsystem ermöglicht die Herstellung von Formstoffrohlingen, die ein verdichtbares und formstabiles Kollektiv bilden. Dies ist notwendig, um den Kräfteeinwirkungen standzuhalten, denen die resultierenden Bauteile, wie sie in der digitalen Fertigung, beim Transport und beim Handling auftreten, ausgesetzt sind. Neben den Eigenschaften des Partikelmaterials hat auch das Bindemittel und dessen Anwendung (z.B. Feststoffanteil und Pressparameter) großen Einfluss auf die mechanischen Kennwerte des späteren Werkstoffes. Durch das Bindemittel und den Einsatz von zusätzlichen Additiven, können die Eigenschaften des Werkstoffes angepasst werden – wie ein Schutz gegen Feuchtigkeit (Reduktion der Quellung), ein Schutz gegen biologischen Befall oder einer Erhöhung des Brandschut-

zes. Je nach Anwendungsfall können pflanzliche/tierische/mikrobielle Leime wie Glutine, Stärke (Dextrine), und Proteine eingesetzt werden.

Aufgrund der aktuellen Situation bezüglich der Änderung der Referenzprüfmethode für den Nachweis von Formaldehyd in Deutschland (defacto Halbierung der Anforderungswerte) und der Einstufung von Formaldehyd als krebserregend trägt die Verwendung der o. g. biogenen Alternativprodukte einen großen Beitrag zur Ausrichtung der BRD und zur Entwicklung nachhaltiger Prozess- und Bauteilentwicklungen. Für die Herstellung von Holzwerkstoffen ist häufig der Einsatz von Bindemitteln notwendig. Die Wahl des Bindemittels ist von der Art des Werkstoffes, der Herstellungsmethode sowie den verwendeten Materialien abhängig. Bisher kommen hauptsächlich synthetisch-organische Binder zum Einsatz, die Verwendung von biologisch basierten Bindemitteln ist in technisch-strukturellen Anwendungsbereichen eher eine Seltenheit. Natürliche biobasierte Bindemittel bspw. aus Glutin, Stärke oder pflanzlichen bzw. tierischen Proteinen haben in den letzten Jahren an Bedeutung gewonnen.

Ebenso in einigen Forschungsbereichen Interesse geweckt, obwohl bereits seit Jahrtausenden Anwendungen von Bindern auf Basis von nachwachsenden Rohstoffen bekannt sind. Der Gedanke umweltfreundliche Bindemittel zu produzieren ist auch in der Industrie angekommen, so ist bspw. der Chemiekonzern BASF ebenfalls auf diesem Forschungsgebiet tätig und bietet in seinem Produktportfolio einen biologisch abbaubaren Binder für die Verpackungsindustrie an und der amerikanische Konzern Ashland vertreibt Bindemittel auf Basis von Naturkautschuk. Aufgrund der Emissionsproblematik spielen zudem emissionsfreie Bindemittel eine immer größere Rolle in der Holzwerkstoffindustrie. In der jüngeren Vergangenheit sind „Bio-Klebstoffe“ bspw. in der Sperrholzfertigung oder anderen Holzwerkstoffen zum Einsatz gekommen.

### 2.2.1 Stärke

Stärke als pflanzliches Bindemittel auf Kohlenhydratbasis ist ein Polysaccharid ( $C_6H_{10}O_5$ ) und damit eine organische Verbindung. Es handelt sich um einen festen, pulverförmigen, geruchslosen, weißen Stoff, der in kaltem Wasser unlöslich ist.

Stärke befindet sich in Früchten, Wurzeln und Samen vieler Pflanzen und wird gewöhnlich aus Kartoffeln, Weizen, Mais oder Reis gewonnen [25].

Unter Einwirkung von Hitze kann Stärke ein Vielfaches ihres Eigengewichts an Wasser binden, aufquellen und verkleistern. Ab einer Temperatur zwischen 47–57 °C (abhängig von der jeweiligen Stärkeart) quillt Stärke zunächst auf, die Molekülketten platzen und sie verkleistert innerhalb 55–87 °C. So entsteht Stärkekleister, der beim Abkühlen zu einem festen Stoff erstarrt. Physikalisch modifizierte Stärke, die durch ein chemisches Verfahren gewonnen wird, kann auch ohne Hitze einwirkung verkleistern. Man spricht hier auch von kaltquellender Stärke, vorverkleisterter Stärke und/ oder Quellstärke [27]. Stärkeleime kommen vorrangig in der Papierherstellung zum Einsatz. In Kombination mit Tannin können stärkebasierte Bindemittel ebenso bei der Spanplattenherstellung eingesetzt werden [28].

Untersucht wurden bereits im Vorgängerprojekt modifizierte Stärke (kaltquellend) aus Weizen, Mais und Wachsmaisbasis und Kochstärke auf Basis von Kartoffeln und Weizen (siehe Aufstellung Abb.11). Insbesondere in Form von Kartoffel-, Mais- und Weizenstärke zählt Stärke dank ihrer mannigfaltigen Einsatzmöglichkeiten in der chemisch-technischen Industrie, gemeinsam mit Holz und Zucker, zu den wichtigsten nachwachsenden Rohstoffen.

Nach einer breit aufgestellten Studie fokussierten sich die Forschungsarbeiten auf die Verwendung einer aufgeschlossenen kaltquellenden Weizenstärke mit dem Produktnamen „Tigel“ der Firma „Kröner Stärke“ mit folgenden Spezifikationen (entnommen dem firmeneigenen Produktdatenblatt):

Feuchtigkeit:	3,0 - 8,0 %
Trockensubstanz:	90,0 - 97,0 %
pH-Wert:	ca. 4,0
Protein:	max. 5,0 %
Mineralstoffe:	ca. 0,5 %
Schüttgewicht:	ca. 430 g/l

Ursprünglich findet Stärke industriell Verwendung für die Pelletierung von Düngemittel und Mineralstoffen, flüssiges Pflanzenschutz- und Düngemittel, Kohle- und Holzbriketts,



Abb.12: Mit Stärke verkleisterte Holzfasern. Vergrößerung der Oberflächen (0,6-fach und 6,6-fach)

## 2.2.2 Kasein

Die Verwendung von Kasein als natürliches Bindemittel ist nicht neu. Es ist ein Klebemittel, das in prähistorischer Zeit verwendet wurde und basiert wie noch heute auf Restströmen der Milch- bzw. Käsegewinnung [25].

Zur Gewinnung von Kasein wird die Rohmilch entrahmt. Der durch den Prozess entstehenden Magermilch wird Säure oder Lab hinzugegeben, wodurch sich das Kasein, das eigentlich benötigte Milcheiweiß, von der Molke trennt. Das Milcheiweiß wird anschließend gewaschen, getrocknet und vermahlen. Durch dieses Verfahren ist es möglich, einen hohen Reinheitsgrad des Milchproteins zu erhalten [25].

Kasein als Reststoff aus der Käseproduktion kann industriell aufbereitet als reines Pulver oder Granulat (ohne Zusatzstoffe) unter dem Namen „technisches Säurekasein“ erworben werden. Das Produkt wurde von der Firma „Hans J. Heinemann Import-Export GmbH“ zu Forschungszwecken zur Verfügung gestellt [29].

Zu Herstellung des eigentlichen Leims wird Kasein traditionell mit Sumpfkalk oder Löschkalk und Wasser versehen und als Wandputz verwendet oder als Klebstoff zum Fügen von Holzverbindungen. Seit den 1930er Jahren wird optional Kaliumsilikat hinzugegeben, um die Verarbeitungszeit des frisch angerührten Leims zu verlängern (die sogenannte Topfzeit).

Der natürliche Protein-Klebstoff ist lösemittelfrei und auch wasser- und hitzebeständig, was die Anwendung im Freien ermöglicht und als positiver Aspekt für eine breite Nutzung gewertet werden kann.

Gewinnung und Rezepturabgaben sind bis heute nahezu gleichgeblieben – nur das Feld der Anwendungen hat sich in der industriellen Zeit verändert. Früher als Kitt für ein breites Anwendungsspektrum verwendet wie z.B. kleben von brüchigen Porzelen, Steinarbeiten, Porenkitt, Spachtelmasse jeder Art, binden von Papier, Leder und Gewebe etc. findet Kasein heute als Bindemittel nur noch partiell Verwendung wie beispielsweise zur Produktion von Etikettierklebstoffen [25].

## 2.2.3 Pflanzliche Proteine

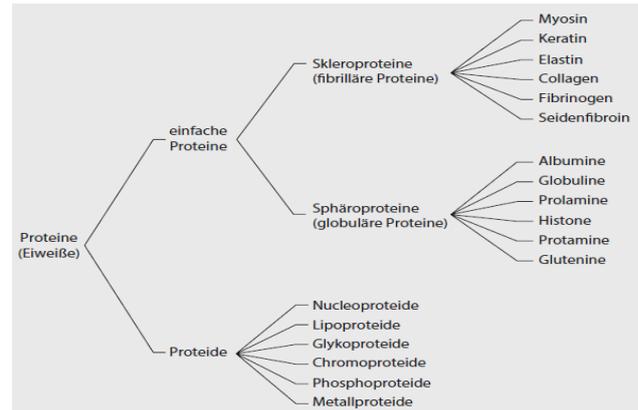


Abb.13: Einteilung Proteine [26]

Als Bindemittel eignen sich lösliche Proteine auf pflanzlicher Basis, die sich in eine unlösliche Form umwandeln lassen. Dies geschieht entweder thermisch oder durch Umsetzung mit einer reaktiven Komponente. Die Proteinstruktur ist maßgeblich für die klebtechnischen Eigenschaften verantwortlich, hierzu sollte die Struktur in einer möglichst offenkettigen, entfalteten, flexiblen Konformation vorliegen.

Eine solche Struktur ermöglicht ein Optimum an adhäsiven und kohäsiven Wechselwirkungen, da hierdurch eine ausreichende Kontaktfläche zwischen Protein und Holzoberfläche ausgebildet werden kann.

Anhand der Primärstruktur eines Proteins ist es möglich, die Klebeigenschaften vorherzusagen. Für die Holzfügung ist positiv, wenn ein Protein in einer eher offenkettigen und flexiblen Konformation vorliegt, negativ dagegen, wenn das Protein eine globuläre Primärstruktur besitzt. Pflanzliche Proteine liegen häufig in ebendieser globulären Form vor und müssen dementsprechend einer Proteinstrukturmodifikation unterzogen werden. Durch eine gezielte Modifikation, kann die Proteinstruktur kontrolliert in eine offenkettige, flexible Struktur überführt werden.



Abb.14: In die Forschungsarbeiten eingebundene Bindemittel in ihrem Ursprungszustand

Die Modifizierung ermöglicht die Protein-Entfaltung, die hydrophoben Aminosäurereste der Proteine werden aus dem Inneren der Proteinstruktur nach außen gestülpt und stehen so für adhäsive Wechselwirkungen mit bspw. dem Lignin des Holzes zur Verfügung. Diese Proteinmodifikation wurde in der Vergangenheit sehr erfolgreich auf die Modifizierung von Sojaproteinen angewandt, so dass lange Zeit in Amerika für die Sperrholzverklebung Sojaprotein basierte Klebstoffe eingesetzt wurden, bis diese jedoch von den kostengünstigeren, petrochemischen Klebstoffsystemen abgelöst wurden. Seit den 1980er Jahren wird wieder vermehrt in die Forschung proteinbasierter Klebstoffe investiert. Hierbei steht die Dimensionsstabilität der Werkstoffe sowie eine kostengünstige Modifizierung im Vordergrund. Gute Ergebnisse konnten hier mittels alkalischer Modifizierung der Proteine erzielt werden. Das alkalische Milieu bewirkt eine Denaturierung der primären Proteinstruktur und eine Freilegung der polaren bzw. unpolaren Gruppen der Proteine, so dass diese mit dem Holz in Verbindung treten können.

Als besonders vielversprechend gilt der Einsatz von marinen Adhäsiven – gewonnen aus Muscheln – mit denen die Wasserbeständigkeit auf die Proteine übertragen werden soll. Jedoch sind diese marinen Komponenten sehr hochpreisig und nur in geringen Mengen verfügbar.

#### 2.2.4 Tierische Proteine/ Glutinleime

Glutinleime sind wasserlösliche Klebstoffe die aus Restströmen der Tierverwertung resultieren (leimgebende Körper) und keine weitere industrielle Anwendung mehr finden würden und durch überwiegend (variiert nach Quelle) Auskochen gewonnen werden. Dabei ist die Bandbreite der zur Verfügung stehenden tierischen Ausgangsressourcen mannigfaltig und je nach tierischem Ursprung benannt [25]. Glutinleime sind Knochenleim, Hautleim, Hasenleim, Fischleim und Blutleim (Albumin).

Glutinleim in besonders reiner Form ist auch unter dem Begriff der Galantine bekannt und wird zur breiten Produktion von Lebensmitteln eingesetzt sowohl in der Pharmazie, zur Weinherstellung als auch in unterschiedlichen technischen Anwendungsbereichen. In Zusammenarbeit mit unserem Forschungspartner „Fritz Häcker GmbH + Co. KG“ aus Vaihingen – ein international führender Hersteller von Proteinklebstoffen – wurde eine Vorauswahl der zu testenden Glutinleime vorgenommen. Fritz Häcker produziert vorwiegend tierisch basierte Protein-Klebstoffe für ein breites Anwendungsspektrum wie z.B.: Buchdeckel (Hardcover), Buchrücken, Ordner, Schmuckschachteln, Brettspiele, Verpackungen für Spiele, Displays, Faltschachteln für die Lebensmittel-, Kosmetik- und Pharmaindustrie, Bindemittel für Streichholzköpfe etc. In die engere Auswahl kamen die Klebstoffe/ Produkte „COLASOL K 35 / Bos taurus“, „Albumin/ VP – 1002 R“ und „Knochenleim/ Glutinleim“ dessen Spezifikationen von dem Hersteller Fritz Häcker stammen (ausschließlich Chitosan).

#### 2.2.4.1 COLASOL K 35 / Bos taurus

Proteinquelle ist das deutsche Hausrind (bos taurus). Das Produkt wird als fertige, niedrig fluide Rezeptur geliefert. Die Fließfähigkeit kann über die Zugabe von Wasser gesteuert werden.

Im Einsatz als flüssiges Additiv ist COLASOL K 35 bei Raumtemperatur gebrauchsfertig und kann sofort verwendet werden. Die Dosierung hängt von der jeweiligen Anwendung ab. COLASOL kann entweder in die Leimflotte eingemischt werden oder als separate Komponente auf das Substrat aufgesprüht werden.

Colasol eignet sich in der ursprünglichen Anwendung zum Verkleben von Holz und Furnierarbeiten. Es können auch andere poröse Stoffe wie Papier, Pappe, Leder oder Textilien verklebt werden. Colasol wird unter anderem bei der Verarbeitung von formaldehydhaltigen Klebstoffen in der Holzwerkstoffindustrie, Papierverarbeitung und Textilverarbeitung als Additiv zur Leimflotte zugesetzt. Für eine Verklebung ist nur geringer Pressdruck notwendig. Es zeichnet sich besonders dadurch aus, dass es freierwirdendes Formaldehyd in seiner Matrix bindet und somit die Emission von Formaldehyd über den Lebenszyklus eines Produktes um bis zu 30 % reduziert. Colasol ist nicht entflammbar oder feuergefährlich und enthält keine organischen Lösungsmittel.

Viskosität bei 25 °C:	ca. 2500 mPas (bei 60 °C ca. 650 mPas)
Feststoffgehalt:	45,2 %
Refraktometerwert:	50 %
pH-Wert:	ca. 6,0
Dichte bei 25 °C:	1,15 g/cm <sup>3</sup>
Verdünnung:	Bei Bedarf mit kaltem Wasser oder Glycerin

#### 2.2.4.2 Albumin/ VP – 1002 R

Albumin mit dem Produktnamen VP - 1002 R ist ein niedrigviskoser Proteinklebstoff mit duroplastischen Eigenschaften. Bestandteil ist Albumin (Blut). Er wird überwiegend zur Herstellung von Platten und Formteilen aus Substraten und Fasern wie Holz, Papier, Stroh oder Schilfgräsern verwendet.

VP - 1002 R wird bei Temperaturen von 105 °C bis 200 °C aktiviert und härtet dann duroplastisch aus.

Viskosität:	80 mPas ± 20 mPas 3)
Feststoffgehalt:	41 %
pH-Wert:	8 - 9
Dichte (20 °C):	1,08
Aktivierungstemperatur:	105 °C - 200 °C
Verdünnung:	Bei Bedarf mit kaltem Wasser oder Glycerin
Farbe:	dunkelbraun rötlich

#### 2.2.4.3 Knochenleim/ Glutinleim

Knochenleim oder auch Glutinleim genannt basiert auf entfettetem, gebleichten und entmineralisierte Rinderknochen.

Es wird zwischen Knochen- (Glutin) und Knorpelleim (Chondrin) unterschieden; wobei das Glutin ein weitaus höheres Klebeverhalten als das Chondrin aufweist. Aus diesem Grund werden die Knochen von Knorpelteilen getrennt. Im nächsten Schritt werden nur die Knochenanteile weiterverwendet, entfettet, zerkleinert und im Wasser ausgekocht.

Die im Knochen enthaltenen Kollagene werden durch das Kochen gelöst und transformieren sich unter Wasseraufnahme zu Glutin. Nach dem Trocknen bildet das Glutin seine charakteristische gallertartige Masse – auch Rohleim genannt, die zu pastillen- oder perlenformartigen Darreichungen konserviert werden können [30].

### 2.2.5 Chitosan

Aus der Verarbeitung von marinen Schalentieren und mittelfristig - innerhalb von neun Jahren - zusätzlich aus der industriellen Insektenzucht entstehen enorme Abfallmengen, in denen Chitin vorhanden ist.

Allein durch die nordeuropäischen Hauptproduktionsländer der Fischereiindustrie entstehen bereits 750.000 t chitinhaltige Schalenabfälle pro Jahr. Dieser große Stoffstrom ergibt einen starken Forschungsbedarf nach neuen Techniken der Weiterverwendung und vielseitigen Anwendungsmöglichkeiten für Chitosane, zu welchen, das aus den Abfallströmen extrahierte Chitin umgewandelt werden kann. Obwohl Chitosane einige bemerkenswerte mechanische Eigenschaften vorweisen, gibt es vergleichsweise wenige Untersuchungen über den Einsatz von Chitosanen im Bauwesen. Die Herstellung von Chitosan beginnt mit der Gewinnung von Chitin aus unterschiedlichen Quellen. Deutschlandweit gibt es bisher nur wenige Hersteller von Chitosan, die sich auf die Gewinnung aus Schalentieren begrenzen.

Da das Interesse an Chitosan über die letzten Jahre enorm gestiegen ist und immer mehr wissenschaftliche Artikel aus verschiedensten Bereichen erscheinen, werden neue Möglichkeiten der Gewinnung erforscht.

Chitosan ist ein Derivat des in der Natur vorkommenden Biopolymers Chitin. Dieses kommt in der Natur z.B. Glieder- und Weichtieren sowie in der Zellwand von Pilzen vor. Dort liegt Chitin in den meisten Fällen in einer Matrix mit anderen Naturstoffen, hauptsächlich Proteinen vor. Diese Matrix unterscheidet sich von Organismus zu Organismus. Dadurch unterscheiden sich auch die Gewinnungsprozesse von Chitin aus diesen Quellen.

In der Forschung geht man davon aus, dass die bemerkenswerten mechanischen Eigenschaften von chitinhaltigen Materialien mit der Zusammensetzung und der Struktur der Matrix zusammenhängen. Generell sorgen organische Makromoleküle (auch Chitin) in der Natur für Flexibilität und Zerreißfestigkeit, während Mineralien für eine hohe Elastizität und Druckfestigkeit sowie Schutz vor Abrieb sorgen. Um Chitosan zu erhalten, muss zunächst Chitin extra-

hiert und im nächsten Schritt zu Chitosan weiterverarbeitet werden. Chitinquellen, die zurzeit für die kommerzielle Anwendung grundsätzlich interessant sind, sind Schalentiere (Krabben/ Krebse/ Garnelen), Insekten und Pilze. Weltweit wird Chitin aus Schalentier-Resten gewonnen, da dieser Abfall in großen Mengen zur Verfügung steht.

Grundsätzlich gibt es zwei verschiedene Möglichkeiten, Chitin zu extrahieren: das chemische oder das biologische Verfahren. Bei der chemischen Variante werden Säuren und Laugen verwendet, bei der biologischen Enzyme oder Bakterien. Bei Anwendung des chemischen Verfahrens kommt es zu höheren Schwankungen in der Qualität des Endprodukts im Vergleich zum biologischen Verfahren. Es ist vergleichsweise günstiger, aber umweltschädlicher, durch den Einsatz von Laugen, Säuren und Wärme-Energie.

Das biologische Verfahren benötigt weniger Zeit, Energie und Lösungsmittel und ist somit umweltfreundlicher aber teurer, da spezielle Enzyme verwendet werden. Es wird daran geforscht, die Verfahren so umweltschonend wie möglich zu gestalten. Die Wirtschaftlichkeit ist eine große Schwierigkeit bezogen auf die Optimierung [31].

## 2.3 Entwicklung von Verfahrensprozessen

### 2.3.1 Mischen

Um ein homogenes Gemisch zu erstellen und eine gleichmäßige Verteilung aller Stoffe zu gewährleisten, werden der Formgrundstoff, Formstoffbinder und ggf. weitere Additive mit einem Handrührgerät (Scheppach 230 V, 50 Hz, 1800 W) vermischt. Bei fast allen Bindern (bis auf tierische Proteine) wurden die Grundstoffe dabei zunächst trocken gemischt und in kurzen Intervallen Wasser hinzu dispergiert. Die Trockenmischdauer beträgt ca. eine Minute. Nach Zugabe des Wassers und Aktivierung des Binders wird das Gemisch in einem weiteren Durchgang für fünf Minuten nass gemischt.



Abb.15: Durchmischung einer trockenen Holzfaser-Binder Rezeptur

### 2.3.2 Verdichten

Um ein formstabiles Kollektiv zwischen Formgrundstoff und Bindemittel zu erzielen besteht die Notwendigkeit, den resultierenden Formstoffbrei zu verdichten. Dies wird in zwei Schritten durchgeführt:

#### 2.3.2.1 Vorkompaktieren

Der feuchte Formstoffbrei wird in einen Schalrahmen aus Holz gegeben. Via hydraulischer Werkstattpresse (Modell „Hydraulic Jack“ von „Tectake GmbH“ (Typ: 401670, Baujahr 2019)) wird der Kuchen 10 Minuten mit einer Kraft von 2 kN (entspricht  $\approx 200$  kg) vorgepresst. Durch die Verdich-

tung des Formstoff-Volumens kann die Rohdichte ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) gesteuert werden. Die Rohdichte setzt die Masse eines Baustoffes ins Verhältnis zu seinem Volumen.



Abb.16: Vorkompaktiertes Holzverbundelement auf Heißpresse

#### 2.3.2.2 Heiß-Pressen

Es wurde mit verschiedenen Temperaturen und Presszeiten gearbeitet um ein Minimum an Zeit und Energieaufwendung austarieren zu können. Testungen bewegten sich zwischen  $60^\circ\text{C}$  und  $200^\circ\text{C}$  und einem Zeitraum von fünf bis 120 Minuten.

Die Erhebungen wurden mittels „Seidner-Heißpresse“ durchgeführt (Typ: SWP 300 UM1, Baujahr 1973).

Die Hitzezufuhr ist nötig, um die Binder zu aktivieren und formstabile Rezepturen zu erreichen. Gleichzeitig entweicht Wasser und sorgt für eine schneller Trocknung. Entscheidend für die Durchtrocknung des Formstoff-Binder-Gemisches ist die kohärente Abhängigkeit von Höhe/ Dicke/ Plattenstärke des Werkstücks, Dichte und aufgewendete Hitzezufuhr zueinander. Es wurde ein Temperaturprofil ausgearbeitet um zu evaluieren, wann die zugeführte Hitze im Formstoffkern ankommt. Eine ausführliche Auswertung der zusammenhängenden Parameter Wärme und Trocknung finden Sie in Kapitel 2.3.3.

Der kompaktierte Formstoff wird bei pflanzlich basierten Klebstoffen und Kasein acht Minuten bei  $70^\circ\text{C}$  und einer Kraft von 3 kN (entspricht  $\approx 300$  kg) gepresst. Eine Ausnahme bilden die tierischen Proteine; hier wird zur Aktivierung des Klebstoffs eine Hitzezufuhr von  $200^\circ\text{C}$  bei ebenso acht

Minuten benötigt. Der aufzuwendende Druck (kalt (2kN), heiß (3kN)) ist bei allen Bindemitteln/ Formstoffvarianten gleich.

### 2.3.3 Trocknungsstrategien

#### 2.3.3.1 Lufttrocknung

Die gebundenen Formstoffe werden über einen gewissen Zeitraum (variiert je nach Masse und Aufbau des Endresultats offen auf einem Gitter zur Trocknung gelagert. Dabei ist die durchschnittliche Raumtemperatur, die durchschnittliche relative Luftfeuchtigkeit und Lagerung relevant für resultierende Ergebnisse. Das Trocknungsverhalten sowie zuvor genannte Trocknungsparameter wurden mittels Feuchtemessgerät über zeitlich nahe Intervalle gemessen.



Abb.17: Lagerung von Proben zur Lufttrocknung auf einem Trocknungsregal

#### 2.3.3.2 Technische Trocknung

Bezeichnet die Trocknung von Materialien mit einem hohen Feuchtigkeitsanteil mithilfe technischer Geräte wie einem Trockenschrank. Durch spezifische, konstante Einstellungen wie z.B. Temperatur, Frischluftzufuhr und Trocknungszeit, können Materialien kontrolliert entfeuchtet werden.

#### 2.3.3.3 Drywoodboxx

Das in Fulda (nahe Kassel) ansässige Unternehmen ist spezialisiert auf energieeffiziente Trocknungsanlagen für Brennholz. Mit der Entwicklung eines innovativen Verfahrens, das die räumliche Distanz zwischen Heizregister und Trockengut aufhebt, lassen sich die bei herkömmlicher Frischluft-/Abluft-Trocknung eingesetzten Umluftventilatoren, die einen hohen Verbrauch an elektrischer Energie haben, vermeiden. So lässt sich der Energieverbrauch und damit die Energiekosten sowie die Umweltbelastung verringern. Darüber hinaus lassen sich Trocknungszeiten mit dem Verfahren merklich reduzieren, da die Wärme nicht diffus im Raum gestreut wird, sondern direkt angeleitet wird.



Abb.18: Trocknung und Messung in einer Trocknungskammer nach dem Prinzip des Unternehmens Drywoodboxx

Untersuchungen an skalierten Testkörpern (unterschiedlicher Volumina) zeigten, dass die Trocknungszeiten maßgeblich von der Größe bzw. dem Volumen der Werkstücke abhängig sind. Ausschlaggebend für eine beschleunigte Trocknung ist ein geringer Abstand zwischen Kern und Oberfläche. Auf diesem Trocknungsweg wird die Feuchtigkeit aus dem Inneren nach außen transportiert. Die Trocknungszeit lässt sich folgernd über die Materialstärke einstellen und optimieren. Je geringer die Materialstärke, umso größer die Oberfläche im Vergleich zum Volumen, woraus ein beschleunigter Transport der Feuchtigkeit aus dem Kern und damit schnellerer Trocknungsprozess resultiert.

### 2.3.4 Schimmelvermeidung

Im Zusammenhang mit dem Formstoffbinder Stärke in Kombination mit Holzpulver oder Fasern konnte eine Schimmelbildung im Probeninneren beobachtet werden. Diese Erkenntnis wurde auch schon im Vorgängerprojekt beobachtet und diverse Forschungsreihen zur Behebung des Schimmelbefalls durchgeführt und zur Vervollständigung des hier vorliegenden Projektes erneut wie folgt resümiert (siehe SWD-10.08.18.7-18.30 „SUCO; Nachhaltige und wiederverwendbare Schalungen zur Realisierung komplexer Betonfertigteile“):

Es konnten potenzielle Ursachen ausgemacht werden, wie (1) der in der Rezeptur und zum Verkleistern benötigte hohe Anteil an Wasser (2) ein schlechtes Abführen des überschüssigen Wassergehalts und (3) eine mangelhafte Trocknung führten zu Schimmelbildung.

Auch die Anwendung unterschiedlicher Trocknungsverfahren und Strategien (siehe Kapitel „2.3.3 Trocknungsstrategien“) konnte die Schimmelbildung nicht verhindern.



Abb.19: Schimmelbildung im Probeninneren bei der Verwendung von den Bindemitteln Stärke und pflanzlich basierten Proteinen

Um Schimmelbildung zu vermeiden, wurde im Vorgängerprojekt die Hinzugabe von vorbeugenden Additiven getestet. Getestet wurden (1) Kochsalz, (2) Citronensäure, (3) Salicylsäure und (4) Calciumpropionat. Alle vier Additive hemmen das Wachstum von Schimmel. Jedoch stellte sich heraus, dass Kochsalz und Citronensäure die Trocknung stark verzögern und große Mengen benötigt wurden. Salicylsäure und Calciumpropionat wirken schon in geringen Mengen (nur 1% auf 100% Formstoffmasse) vorbeugend gegen Schimmel. Da Salicylsäure aber stark reizend und ätzend

wirkt, dagegen Calciumpropionat als Konservierungsmittel in der Lebens- und Futtermittelindustrie gängig ist und keine gesundheitliche Gefahr besteht, wurde Calciumpropionat vorzugsweise als schimmelhemmendes Mittel auch in diesen Forschungsarbeiten eingesetzt.

Schimmelbefall konnte ebenso bei der Verwendung von pflanzlichen Proteinen identifiziert werden, weshalb auch hier Calciumpropionat in geringer Dosis (2,6%) zugeführt wird.

Bindemittel auf Basis tierischer Reststoffe wie Kasein, Chitosan und Protein (Albumin, Colasol und Hautleim) hemmen die Schimmelbildung.

### 2.3.5 Rohdichte/ Materialporosität

Bei der Herstellung von Prüfkörpern wurden drei differenzierte Dichten angestrebt (300 kg/m<sup>3</sup>, 400 kg/m<sup>3</sup> 500 kg/m<sup>3</sup>), wodurch unterschiedliche akustische Eigenschaften eingestellt werden können (siehe Kapitel „3.1.4 Akustische Messungen“).

### 2.3.6 Akustische Optimierung durch digitale Fertigung

Zur Optimierung der akustischen Eigenschaften können die Akustikelemente zusätzlich ertüchtigt werden, für beispielsweise eine besser Absorptionsfähigkeit (siehe Kapitel „1.8 Akustik“) durch zusätzliches Einfügen von Resonatoren in die Materialien. Die Realisierung dieser Resonatoren im Formstoff kann durch zwei Strategien verfolgt werden, wie a.) Formpressen oder b.) subtraktiver Abtrag von Materialien. Weitere Informationen finden Sie in Kapitel „2.6 Entwicklung von akustischen Eigenschaften“.

### 2.3.7 Vorgehen

Hinsichtlich der Bindefähigkeit wurden innerhalb der Forschungsarbeiten eine Vielzahl an Versuchen mit unterschiedlichen Arten von Holzpartikeln und Bindern durchgeführt (siehe Matrix Abb.20), um die zum Verkleben benötigte Menge an Binder und Wasser auszutarieren. Ebenso musste evaluiert werden, welche Partikelfraktionen (Holzart, Größen und Formen) in Verwendung gebracht werden können.

Um Ressourcen zu schonen und schnelle als auch vergleichbare Ergebnisse zu erzielen, wurden zur Prüfung von Mischungsverhältnissen alle vorausgewählten Binder in Kombination mit allen zur Verfügung stehenden Holzpartikelgrößen (Abb.20) durch Rohproben mit einem Durchmesser von 7 cm und einer Höhe von 3,5 cm geprüft und in Versuchsprotokollen festgehalten.

Zur weiteren Prüfung der Rezepturen wurden die jeweils besten Ergebnisse skaliert auf 20 x 20 x 2,5 cm und 20 x 20 x 5 cm. Etwaige Probleme konnten dadurch identifiziert und entweder im gleichen Maßstab oder durch einen Rücksprung in den kleineren Maßstab behoben werden.

Da das Projekt auf die Testung einer Vielzahl an unterschiedlichen Bindern und Holzpartikeln ausgelegt ist, wurden nur die vielversprechendsten Binder hinsichtlich Klebwirkung und Erzielung eines festen Formstoffverbundes nach einer breit aufgestellten Anfangsstudie weiterverfolgt.

Im weiteren Verlauf des Projekts soll auf Basis der Erkenntnisse ein 1:1 Prototyp eines assemblierten großmaßstäblichen Akustikelements digital geplant und real umgesetzt werden.

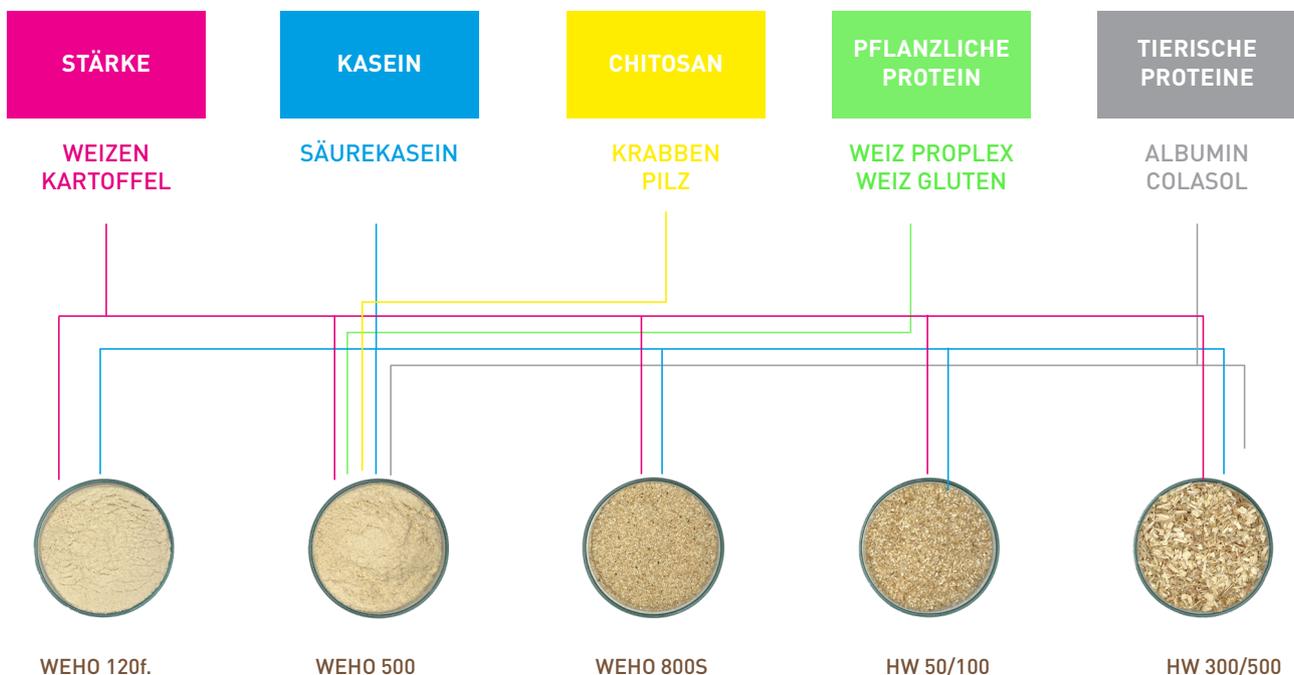


Abb.20: Kombinatorik: Innerhalb der Forschungsarbeiten miteinander geprüfte Formstoffe- und Binder

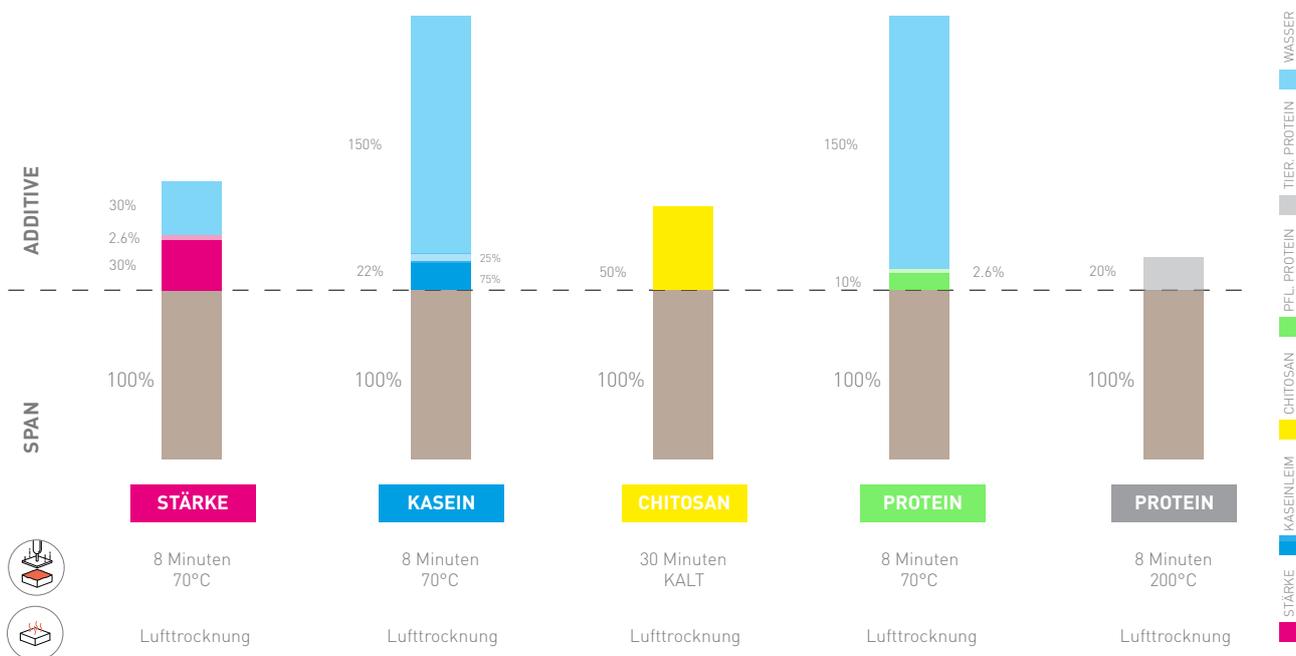


Abb.21: Gegenüberstellung aller Rezepturen. Anteil an Binder und Additiven wird auf 100% Masseanteil Holzpartikel dargestellt um eine Vergleichbarkeit zwischen den einzelnen Verfahren und Ingredienzen zu haben

## 2.4 Rezepturentwicklung

### 2.4.1 Stärke

Untersucht und unterschieden wurde zwischen modifizierter Stärke (kaltquellend) auf Weizen-, Mais- und Wachsmaisbasis und Kochstärke auf Basis von Kartoffeln und Weizen (siehe Abb.11). Folgende Forschungsfragen galt es durch die Erstellung von diversen Rezepturen und Proben näher zu untersuchen: Mischen, Verdichten, Bindefähigkeit, Standfestigkeit, Trocknung, Schimmelbildung, Rissbildung, Festigkeit, Fräsbarkeit, Oberflächengüte, Rückführbarkeit.

Es hat sich gezeigt, dass sich das folgende Standardverfahren unter Verwendung von Stärke als Bindemittel eignet:

Holzpartikel und Stärke (Typ kaltquellende, modifizierte Stärke auf Basis von Weizen. Hersteller "Kröner Stärke GmbH". Produktnamen "Tigel") werden im Trockenzustand verrührt; in kurzen Intervallen wird Wasser eingesprüht, bis sich eine breiige Substanz bildet und alle Partikel homogen vernetzt sind. Der feuchte Formstoffbrei wird nass vorgepresst, acht Minuten bei 70 °C heißgepresst und an-

schließend zur Lufttrocknung gelagert. Ab 70 °C konnte keine Signifikante Veränderung der Formstabilität erkannt werden. Hohe Temperaturen (ab 120 °C) haben die oberen Holz-Deckschichten, die mit den heißen Pressbacken in Berührungen kamen, stark versiegelt und zu höherer Oberflächenspannung geführt. Auch eine optische Veränderung tritt ein — die Kontaktflächen färben sich dunkler.

In Versuchsreihen wurde die Rezeptur mit variierenden Anteilen von Stärke und Wasser, bezogen auf den Holzspan, hinsichtlich folgender Merkmale näher untersucht und bewertet: Abrisse am Rand der Oberfläche, Porosität, Festigkeit und Rissbildungen im Probeninneren.

Der Wasseranteil variierte in den Versuchsreihen zwischen 10 % und 160 %, der Stärkeanteil zwischen 5 % und 50 %. Daraus ergaben sich folgende Ergebnisse: Der Stärkeanteil des Gemischs steht in starker Abhängigkeit zum Anteil des Wassers und umgekehrt. Aufgrund der Abhängigkeit müssen beide Ingredienzen gemeinsam betrachtet werden.

Ein zu geringer Wasseranteil, im Vergleich zur Stärke, lässt diese nicht ausreichend quellen und erzielt so keine ausreichende Vernetzung mit dem Holzspan. Bei einem sehr geringen Wasseranteil (ca. 5-30 %) ist das Gemisch trocken und bröselig, eine angemessene Bindung des Holzspans ist nicht gegeben. Mit Erhöhung des Wasseranteils steigt gleichzeitig die Bindefähigkeit und die im Mischvorgang auftretende Klümpchenbildung kann auf ein Minimum reduziert werden.

Auf die Trocknung, Schimmelbildung und Rissbildung wirkt sich ein hoher Wasseranteil negativ aus. Ein hoher, bereits gesättigter Wasseranteil im angerührten Stärke-Spangemisch, der erst zu der gewünschten Verkleisterung führt, entweicht beim Pressvorgang und gibt den Proben die gewünschte Bindung und Festigkeit. Ab einem Wasseranteil von ca. 100 % entweicht Wasser beim Pressvorgang. Für das Verpressen des Breis wird eine Kraft von 25 kN benötigt. Ab dieser Krafteinwirkung stellt sich die Komprimierung des Formstoffs ein, sodass eine höhere Kraftaufwendung keine positive Auswirkung auf das Resultat des entstehenden Körpers aufzeigt. (siehe Abb.68).

STÄRKEANTEIL [%]	BEOBACHTUNG
5	beim Mischvorgang größere Klümpchenbildung, nicht ausreichend formstabil, keine ausreichende Bindefähigkeit
10	beim Mischvorgang kleinere Klümpchenbildung, homogenes Gemisch, bereits formstabiler als bei 5%
30	beim Mischvorgang geringe Klümpchenbildung, homogenes Gemisch, sehr formstabil
50	beim Mischvorgang starke Klümpchenbildung, übersteuert, inhomogenes Gemisch, Stärkeklümpchen auf der Oberfläche erkennbar

Abb.22: Rezeptur Holzspan-Stärke: Variierender Stärkeanteil bei gleichbleibendem Wasseranteil von 100%

Als Ergebnis der Versuchsreihen ging folgende Rezeptur als Optimum hervor zur Herstellung von formstabilen Holzpartikeln-Elementen:

REZEPTUR/ STÄRKE	ANTEIL* [g]	ANTEIL [%]
Holzanteil	452 g	100 %
Binder/ Stärke	136 g	30 %
Calciumpropionat	12 g	2,6 %
Wasser	136 g	30 %

Abb.23: Rezeptur für Akustikelemente bestehend aus Holzpartikeln und Stärke. \*Die Angaben in Gramm beziehen sich auf die Produktion von 20 x 20 x 5 cm Elementen mit einer Dichte von 300 kg/m³.

PROZESS	ZEIT [Minuten]	TEMP. [°C]
Mischen/ Trocken	1	/
Mischen/ Nass	5	/
Pressen/ Kalt	10	/
Pressen/ Heiß	8	70 °C

Abb.24: Spezifikationen des Herstellungsprozesses

Calciumpropionat wird als Konservierungsstoff eingesetzt, um die Bildung von Schimmel zu verhindern (siehe Kapitel „2.3.4 Schimmelvermeidung“).

Größtenteils in Einsatz gebracht wurden Holzpartikel mit dem Produktnamen „WEHO 500“, ein Weichholz mit einer durchschnittlichen Spanlänge von 500 µm (siehe Kapitel „2.1.2 Holzpartikel aus Restströmen“). Versuche zeigten, dass auch jeder andere getestete Span der Firma „JELU-WERK J. Ehrler GmbH & Co. KG“ benutzt werden kann.

Vorstudien und Erkenntnisse aus dem Vorgängerprojekt (SWD-10.08.18.7-18.30 „SUCO; Nachhaltige und wiederverwendbare Schalungen zur Realisierung komplexer Betonfertigteile“) grenzen die Wahl der Stärke-Produkte stark ein. In Abb.11 finden Sie alle erforschten Stärkederivate, in Verwendung als Klebstoff und in Verbindung mit Holzpartikeln.



Abb.25: Rohrprobentests. Steigerung des Wasseranteils von 30% bis 200% bei gleichbleibenden Binderanteil von 10%



Abb.26: Rohrprobentests. Steigerung des Binderanteils von 20% bis 50% bei gleichbleibenden Wasseranteil von 140%

Durch das Vorwissen konnten die Forschungsarbeiten in dem vorliegenden Projekt eingrenzend auf drei verschiedene Stärke-Sorten bzw. Produkte des Herstellers „Kröner-Stärke GmbH“ fokussiert werden mit den Produktbezeichnungen: TIGEL (kaltquellende Weizenstärke), TECGEL (kaltquellende Weizenstärke) und Kartoffelstärke (warmquellend). Die Erfahrungen zeigten, dass sich vergleichend zu anderen Stärke-Produkten, mit kaltquellenden Weizenstärken formstabilere Rohlinge resultierten. Während der Projektlaufzeit wurde das Produkt TECGEL vom Markt genommen und stand nicht mehr für weitere Forschungszwecke zur Verfügung. Erste Studien zeigten allerdings, dass zwischen den beiden kaltquellenden Weizenstärken TIGEL und TECGEL keine Unterschiede bestehen bezüglich des Handlings wie Mischverhalten, Quell- und Binfähigkeit und Realisierung von stabilen Prüfkörpern, die auch optisch identisch waren.

Warmquellende Kartoffelstärke konnte nach wenigen Versuchsreihen für die weitere Verwendung als Bindemittel ausgeschlossen werden. Es musste ein erheblicher Mehranteil – im Gegensatz zu kaltquellender Weizenstärke – an Bindemittel verwendet werden, um beim Mischvorgang zu verkleben. Resümierend hat sich die kaltquellende Stärke TIGEL auf Weizenbasis etabliert.

Der Markt bietet eine Vielzahl an Stärke-Produkten, die in Versuchen alle ähnlich performten, in Bezug auf Bindungsfähigkeit und Festigkeit. Daher dient die örtliche Nähe der Produktionsstätte und der Einkaufspreis in dieser Forschungsarbeit als Auswahlkriterium. Der Preis für eine Tonne Weizenquellstärke (wie hier verwendet) liegt bei ca. 700 €/t, Kartoffelquellstärke liegt bei ca. 1000 €/t [32]. Der Trockenmischung, bestehend aus Holzpartikeln und Binder (liegt in Pulverform vor) wird zur Aktivierung des Binders Wasser hinzugegeben.

	WEHO 120F < 75 µm	WEHO 500 ~ 75 µm	WEHO 50/100 ~ 180 µm	WEHO 100/200 ~ 200-500 µm	WEHO 300/500 ~ 200-500 µm
<b>Stärke</b>	++	++	++	+++	+++

Abb.27: Auswertung der verwendeten Partikelgrößen in Verbindung mit Stärke. +++ = sehr gut / ++ = gut / + = befriedigend / - = fail



Abb.28: Gefertigte 20 x 20 x 5 cm Akustikelemente. Von links nach rechts der Fasergröße aufsteigend von Holzmehl bis zu Fasern

Es wurde zunächst davon ausgegangen, dass der Wasseranteil, entsprechend dem vorausgegangenen Forschungserkenntnissen, bei 140 % liegen sollte. Der Anteil bezieht sich in allen Versuchsreihen auf die Masse des eingesetzten Formstoffes bzw. Holzpartikel (100 %).

Der Wasseranteil konnte in weiteren Versuchsreihen auf bis zu 30 % gesenkt werden. Hier ist darauf hinzuweisen, dass der Wasseranteil auch abhängig von Partikelgrößen ist. Bei den größten Fasern HW 300 / 500 wird ein Wasseranteil von ca. 30 % benötigt, um eine stabile Bindung zu erreichen. Hingegen sollte der Wasseranteil bei den feinsten Partikeln wie WEHO 500 bei ca. 50 % liegen. Liegt der Wasseranteil bei den feinen Spänen unter 50 % wird keine ausreichende Bindung erreicht und die Proben werden porös.

Proben zeigen auf, dass Stärke eine formstabilere Bindewirkung mit Holzfasern als mit Pulvern eingeht. Dieses Erkenntnis steht konträr zu den Beobachtungen zu beispielsweise Kasein-Proben; hier konnte eine optimale Klebstruktur mit pulverartigen Holzpartikeln erreicht werden.



Abb.29: Zur Herstellung eines 20x20x5cm Holzpartikel-Werkstücks benötigte Ingredienzien in Masseanteilen dargestellt a.) Holzpartikel b.) Wasser c.) Stärke d.) Calciumpropionat

## 2.4.2 Kasein

Kasein liegt beispielsweise als Reststoff aus der Käseproduktion vor und kann industriell aufbereitet als reines Pulver oder Granulat (ohne Zusatzstoffe) zum sofortigen Einsatz unter dem Namen „technisches Säurekasein“ erworben werden. Das Produkt wurde dem Forschungsprojekt von der Firma „Hans J. Heinemann Import-Export GmbH“ zu Forschungszwecken zur Verfügung gestellt.

Zu Herstellung des eigentlichen Leims wird Kasein traditionell mit Sumpf- oder Löschkalk und Wasser versehen und als Untergrund zum Verputzen von Wänden verwendet oder als Klebstoff zum Fügen von Holzverbindungen.

Seit den 1930 Jahren wird optional Kaliumsilikat hinzugegeben, um die Verarbeitungszeit des frisch angerührten Leims zu verlängern (die sogenannte Topfzeit).

Der natürliche Protein-Klebstoff ist lösemittelfrei als auch Wasser- und hitzebeständig, was die Anwendung im Freien ermöglicht und als positiver Aspekt für eine breite Nutzung gewertet werden kann.

Es wurden verschiedene Verfahren durchgeführt, bei denen untersucht wurde, in welchen Mischverhältnissen und in welchem Zustand, Intervallen und Reihenfolge die einzelnen Komponenten – für eine ausreichende Bindungsqualität der Mischung – hinzugefügt werden müssen.

Durch bereits vorhandene Anhaltswerte zum Anrühren des Leims, konnten sich innerhalb der kleinmaßstäblichen Versuchsreihen (Rohrprobentest) zeitnah formstabile Prüfkörper einstellen:

REZEPTUR/ KASEIN	ANTEIL* [g]	ANTEIL [%]
Holzanteil	492 g	100 %
Binder/ Kasein + Kalk	136 g	22 %
Calciumpropionat	/	/
Wasser	738 g	150 %

Abb.30: Rezeptur für Akustikelemente bestehend aus Holzpartikeln und Kasein. \*Die Angaben in Gramm beziehen sich auf die Produktion von 20 x 20 x 5 cm Elemente mit einer Dichte von 300 kg/m<sup>3</sup>

PROZESS	ZEIT [Minuten]	TEMP. [°C]
Mischen/ Trocken	1	/
Mischen/ Nass	5	/
Pressen/ Kalt	10	/
Pressen/ Heiß	8	70 °C

Abb.31: Spezifikationen des Herstellungsprozesses

Anfängliche Versuche, zunächst einen Leim anzurühren und diesen dem trockenen Holzspan zuzuführen ist fehlgeschlagen, da keine ausreichende Bindung zwischen Partikeln und Leim entstehen konnte.

Das beste Ergebnis erzielt eine Trockenmischung (gleiche Anteile wie beim vorherigen Versuchsaufbau), bei der alle Komponenten Holzpartikel, technisches Säurekasein und Löschkalk trocken miteinander vermischt und mit Hilfe eines Zerstäubers Wasser hinzugegeben wurde. Dies bewirkt eine gleichmäßige Benetzung der Partikel und führt zu einer Aktivierung des Kaseins zum Verkleben.



Abb.32: Rohrprobentest. Proben 1 + 2 (von links) wurde der Binderanteil erhöht bei gleichbleibender Leimzusammensetzung. Probe 3 + 4 (von links) bei gleichbleibenden Binderanteil aber mit unterschiedlichen Gewichtungen in der Leimzusammensetzung (Verhältnis Binder zu Kalk)

Dies zeigt klar, wie wichtig und kohärent abhängig die Betrachtung von Rezepturen und Herstellungsprozessen sind. Bei gleicher Rezeptur lassen sich wie oben beschrieben unterschiedliche Ergebnisse erzielen, die nicht immer gleich mit einem Erfolg oder Scheitern der Rezepturen einhergehen.

Ergo, die Betrachtungen sind komplex und ganzheitlich zu sehen und eröffnen dadurch eine Vielzahl an Forschungsparametern, die zur Verbesserung/ Optimierung und Fein-

einstellung von Prozessen und einer umweltverträglicheren Ausarbeitung herangezogen werden müssen.

Nachdem sich alle Komponenten optisch zu einer homogenen Masse vermischt haben, wird die Masse in den Presskörper gegeben und im ersten Schritt per Handpresse in Form gebracht. In den ersten Versuchsreihen werden Rezepturen mit Hilfe von Rohrproben (ø 7 cm) entwickelt. Dabei wird ein zylinderförmiger Presskörper verwendet, in dem die Proben auf 3,5 cm Höhe komprimiert werden.



Abb.33: Mit Kasein gefertigte 20 x 20 x 5 cm Akustikelemente. Von links nach rechts der Fasergröße aufsteigend von Holzmehl bis zu Fasern

	WEHO 120F < 75 µm	WEHO 500 ~ 75 µm	WEHO 50/100 ~ 180 µm	WEHO 100/200 ~ 200-500 µm	WEHO 300/500 ~ 200-500 µm
<b>Kasein</b>	+++	+++	++	++	++

Abb.34: Auswertung der verwendeten Partikelgrößen in Verbindung mit Kasein. +++ = sehr gut / ++ = gut / + = befriedigend/ - = fail

Auffällig beim Vermischen ist eine gelbliche Verfärbung der Masse.

Der hohe Wassereinsatz bildet eines der größten Herausforderungen, den es innerhalb der Forschungen zu optimieren galt. Forschungsreihen und Recherchen zeigten auf, dass das Wasser zu Kasein/ Löschkalk Verhältnis schwer zu optimieren ist, da der Wasseranteil zur Aktivierung des Leims notwendig ist. Optimierungsversuche konnten hier nicht weiter vorgenommen werden, da sich gezeigt hat, dass 150 % Wasseranteil bereits das Minimum an Masse abbildet, damit der Leim seine Klebwirkung entfaltet. Ein Wassereinsatz unter 150 % führt zu instabilen und porösen Proben.

Auch das Verhältnis von Kasein zu Löschkalk – zur Herstellung des eigentlichen Leims – wurde austariert. Ein höherer Anteil an Kalk zu Kasein bewirkt eine negative Abtrocknung der Proben und führt zu Rissen. Als optimal hat sich ein Verhältnis von Kasein 75 % zu Löschkalk 25 % erwiesen.

Der Leimeinsatz konnte durch eine Vielzahl an Versuchen von ursprünglich 30 % auf 22 % reduziert werden.

In weiterführenden Forschungsaufbauten wurde ein Skalierungssprung vorgenommen: Es wurden Proben mit einer Größe von 20 x 20 cm und einer Höhe von 2,5 cm und 5,0 cm hergestellt. Dabei werden die vorgepressten Proben ein weiteres Mal in einer hydraulisch betriebenen Presse unter Einfluss von Wärme gepresst. Durch Rezeptur- und Prozessanpassungen konnte die Pressdauer von ursprünglich zwei Stunden bei 140 °C auf 70 °C und 8 Minuten reduziert werden.

### 2.4.3 Pflanzliche Proteine/ Gluten

Gluten ist ein Speicherprotein von Getreidearten wie z.B. Weizen, Roggen, Gerste etc. und wird auch als Klebereiweiß bezeichnet. Gluten wird in der Lebensmittelindustrie als Emulgator und Träger für Aromastoffe eingesetzt, als Geliermittel und Stabilisator, da Gluten die Eigenschaft besitzt Wasser zu binden. Gluten dient in der Lebensmittelindustrie primär als natürlicher Klebstoff wie z.B. zur besseren Bindung von Weizenmehl, was die Herstellung von Backwaren vereinfacht.

Nach einer vorausgehenden Recherchephase – zur Vorauswahl geeigneter Produkte – wurden zwei pflanzliche Proteine-Typen/ Produkte des Herstellers „Kröner-Stärke GmbH“ in die Forschungsarbeiten eingebunden. Beide Produkte werden aus Weizen gewonnen.

„Weizengluten vital“ wird in der Industrie für die Herstellung von Backwaren verwendet sowie für die Bindung von Fleischersatzprodukten. Grundlage für die Herstellung sind ausgesuchte Weizenmehlqualitäten und unbehandeltes Quellwasser. Das Eiweiß kann durch die Zugabe von Wasser hohe viskoelastische Eigenschaften erzielen.

„PROPLEX“ ist ein Bindemittel für Fleischzubereitungen und vegetarische Produkte und ist rein pflanzlich.

Da anfängliche Versuchsreihen keinen Unterschied in der Handhabung beider Produkte aufzeigten, wurde hier der Faktor der Wirtschaftlichkeit herangezogen, da PROPLEX ein vergleichsweise teures Produkt ist wurde im weiteren Verlauf auf Weizengluten vital“ zugegriffen.

Holzpartikel, Protein (Pulver) und Calciumpropionat (Pulver) werden im trockenen Zustand vermengt. Durch vorausgegangene Studien und entsprechende Erfahrungswerte wurde auch hier ein minimaler Anteil Calciumpropionat – zur Hemmung von Schimmel – der Mixtur hinzugegeben. In einem weiteren Mischvorgang wird der Trockenmischung Wasser hinzu dispergiert wodurch die einzelnen Komponenten aktiviert werden und eine Bindung ermöglicht wird.

Nachdem sich alle Komponenten zu einer homogenen Masse vermischt haben, wird der frische Formstoffbrei in einen Pressrahmen gegeben und via Werkstattpresse einer formgebenden Vorpressung unterzogen. Der komprimierte Formstoff wird auf eine Heißpresse gelegt und erneut für 8 Minuten bei 70 °C Grad und einer Kraft von 3 kN gepresst.

Identisch und entsprechend der Versuchsreihen anderer hier erforschter Bindemittel wurden zunächst Rezepturen mit Hilfe von Rohrproben entwickelt. Dabei wurde ein zylinderförmiger Presskörper verwendet, in dem die Proben auf 3 cm Höhe und einem Durchmesser von 7 cm komprimiert wurden.

Angelehnt und als Ausgangspunkt für den Umgang mit pflanzlichen Proteinen dienen Forschungserkenntnisse bzw. Rezepturen aus Stärke basierten Versuchsreihen womit sich Anfangsrezeptur wie folgt ergeben hat:

REZEPTUR/ PFL. PROTEIN	ANTEIL* [g]	ANTEIL [%]
Holzanteil	452 g	100 %
Binder/ Pfl. Protein	135 g	30 %
Calciumpropionat	12 g	2,6 %
Wasser	226 g	50 %

Abb.35: Ausgangsrezeptur basierend auf Stärke zur Herstellung von Proben auf Basis von Pfl. Proteinen

REZEPTUR/ PFL. PROTEIN	ANTEIL* [g]	ANTEIL [%]
Holzanteil	452 g	100 %
Binder/ Pfl. Protein	45 g	10 %
Calciumpropionat	12 g	2,6 %
Wasser	678 g	150 %

Abb.36: Finale Rezeptur mit reduziertem Binder- und erhöhtem Wassergehalt

Die Anteile beziehen sich zu einer besseren Vergleichbarkeit unter den Verfahren auf 100 % Holzpartikelanteil.



Abb.37: Ausschnitt aus den Forschungsreihen. Bei fast allen Proben ist erkenntlich, dass während des Trocknungsprozesses die Proben in der vertikalen Ausrichtung sich ausdehnen und zu Rissen führt

Es konnte keine ausreichende Vernetzung zwischen Binder und Holzwerkstoff erreicht werden wobei die Ausgangsrezeptur bereits das Optimum abbildet. Eine Erhöhung des Binders- (bis zu 30 %) und Wasseranteils (bis zu 500 %) ließ keine signifikant bessere Klebewirkung erzielen. Wobei zu erwähnen ist, dass ein hoher Wasseranteil förderlich für die Klebeigenschaft ist. Das Wasser tritt allerdings beim Pressvorgang wieder aus. Der Formstoffbrei konnte zwar in Form verpresst werden und die Klebeigenschaft im Nasszustand war augenscheinlich gegeben doch haben sich während der Trocknungsphase (nach ca. einer Woche) feine Risse durch die vertikale Ausdehnung („Aufquellen“) der Material-Binder-Matrix ergeben.

Auch eine Skalierung der Rezeptur hat keine positiven Effekte auf die Formstabilität und Rissbildung der Proben gezeigt. Weitere Versuchsreihen wurden zugunsten anderer Bindemittel an der Stelle abgebrochen, da eine weitere signifikante Erhöhung des Binder- als auch Wasseranteils einen negativen Aspekt auf Nachhaltigkeit als auch Wirtschaftlichkeitsfaktoren erbringen würde. Es wird davon ausgegangen, dass der in der Nahrungsmittelindustrie geschätzte Vorteil, dass Gluten Wasser bindet und eine Quellwirkung eintritt, für die im Forschungsprojekt formulierten Ziele, einen festen Formstoffverbund zu produzieren, hinderlich ist. In Betracht gezogen wurde Gluten, da dieses durch die Zugabe von Wasser viskoelastische Eigenschaften erreichen kann und ein eher elastischer Formstoff als gewinnbringend erachtet wird. Die Eigenschaften haben sich bis zum aktuellen Stand der Forschung allerdings nicht einstellen können.

PROZESS	ZEIT [Minuten]	TEMP. [°C]
Mischen/ Trocken	1	/
Mischen/ Nass	5	/
Pressen/ Kalt	10	/
Pressen/ Heiß	8	70 °C

Abb.38: Spezifikationen des Herstellungsprozesses



Abb.39: Rezeptentwicklung unter Verwendung von Gluten als Bindemittel. Variierender Wasseranteil (von links nach rechts aufsteigend) bei gleichbleibenden Formstoff- und Binderanteilen. a.) 50 % Wasseranteil, b.) 100 % Wasseranteil, c.) 150 % Wasseranteil, d.) 200 % Wasseranteil



Abb.40: Gefertigte 20 x 20 x 5 cm Akustikelemente. Von links nach rechts der Fasergröße aufsteigend von Holzmehl bis zu Fasern. Ab Fasergrößen von ~ 180 µm können keine Proben realisiert werden

	WEHO 120F < 75 µm	WEHO 500 ~ 75 µm	WEHO 50/100 ~ 180 µm	WEHO 100/200 ~ 200-500 µm	WEHO 300/500 ~ 200-500 µm
<b>Pfl. Protein</b>	+	+	-	-	-

Abb.41: Auswertung der verwendeten Partikelgrößen in Verbindung mit Pfl. Protein. +++ = sehr gut / ++ = gut / + = befriedigend/ - = fail

#### 2.4.4 Tierische Proteine/ Glutinleime

Die Klebkraft gilt laut Hersteller (Fritz Häcker GmbH) in der Anwendung als sehr hoch zu bewerten und die Klebwirkung ist reversibel und lässt sich durch eine erneute Hitze- (nicht über 70 °C) und/ oder Wasserzufuhr auflösen.

##### 2.4.4.1 COLASOL K 35/ Bos taurus

Bereits in kleinmaßstäblichen Versuchen konnte kein vernetzendes Kollektiv zwischen dem Binder Colasol und dem Füllstoff Holz (in jeglichen Partikelgrößen) erzielt werden.

Das Bindemittel konnte zwar in der ursprünglich zähen Konsistenz aufgesprüht werden, doch hat sich beim Mischvorgang klar gezeigt, dass sich bereits visuell das Bindemittel von den Holzfasern als auch Mehlen abgesetzt hat.

Auch eine Strategieänderung im Prozess durch Eintropfen des Binders und Verwendung unterschiedlicher Mischgeschwindigkeit und Zeitintervallen konnte keine Vermengung zwischen Formstoff und Binder herbeiführen.

Auch jegliche Anpassungen in der Rezeptur haben zu keinen formstabilen Proben geführt. In einer Vielzahl an For-

schungsreihen wurde zunächst nur der Binder in der vorliegenden Viskosität dem Holz – Holzfasern und Mehlen – zugesetzt. Der Binderanteil wurde immer weiter erhöht bis zu einer Übersteuerung und letztendlichen Masseanteil von 70 %. Dabei wurden augenscheinlich die größeren Partikel besser benetzt als das feine Mehl, auf dem der Binder aufliegt und geradezu abperlt – auch nach dem Mischvorgang. Die Verkantung der länglicheren Fasern bietet einen Hohlraum für den Binder doch sind nach dem Pressvorgang auch diese Proben zerfallen.

Wie durch den Hersteller empfohlen, wurde der Klebstoff durch die Zugabe von Wasser in unterschiedliche viskose bzw. fließfähigere Zustände versetzt, was ermöglichte, den Klebstoff als Suspension sprühfähiger zu gestalten. Doch war auch weiterhin im Benetzungs- als auch Mischvorgang eine optische Trennung zwischen beiden Komponenten sichtbar. Versuche, die zwar feucht benetzte Masse zu pressen, scheiterte auch hier beim Ausschalen der Körper aus der Pressform: die Proben sind zerbröseln.

Es ist davon auszugehen, dass mit prozentualer Steigerung des Wasseranteils, der eigentliche klebfähige Anteil des tierischen Proteins sinkt und die Bindewirkung schwindet.



Abb.42: Gefertigte 20 x 20 x 5 cm Akustikelemente. Von links nach rechts der Fasergröße aufsteigend von Holzmehl bis zu Fasern. Erst ab einer Fasergröße von ~ 1000 µm konnten Proben realisiert werden

Auch nach breit aufgestellten Forschungsreihen und Strategieänderungen in Rezepturen und Prozessen konnte keine formstabilen Körper realisiert werden. Das hat zu der Entscheidung geführt, das Bindemittel an dieser Stelle für weitere Forschungsarbeiten auszuschließen.

**2.4.4.2 VP – 1002 R / Albumin**

Wie das Colasol wird auch das Albumin als niedrig viskose Fertigmischung für den sofortigen Einsatz ohne Hinzugabe von Additiven geliefert.

Laut Hersteller „Fritz Häcker“ tritt eine Vernetzung zwischen 10 % und 15 % Binderanteil ein (auf 100 % Partikelanteil) wobei es bezüglich der offenporigen und stark saugenden Holzpartikeln bis dato keine Expertise gab.

Die Versuchsreihen wurden mit 15 % unverdünnten Binderanteil auf 100 % Holzpartikel begonnen und im Laufe der Entwicklungen reduziert.

Der auch sehr zähe und teils klumpige Binder konnte durch einen engen Trichter dem Mischvorgang hinzugetropft werden. Die Holzmasse wird augenscheinlich nicht benetzt, doch zeigt der Pressvorgang im Kaltverfahren, dass sich eine Klebwirkung einstellt und mit den Holzfasern „Jeluxyl HW 300/500“ formstabile Proben resultieren, welche im weiteren Verfahren für 8 Minuten heiß gepresst werden. Konträr zu den pflanzlich basierten Klebstoffen, wo eine Hitzezufuhr über 70 °C hinderlich für eine Vernetzung ist – da sich die Molekülketten aufspalten – ist zu einer Aktivierung der tierischen basierten Proteinklebstoffe eine kurze Wärmeeinwirkung ab 150 °C nötig; empfohlen werden 200 °C.

Durch eine prozentuale Reduzierung des Binderanteils von 15 % auf 10 % kann zwar noch eine Vernetzung der Holzpartikel stattfinden, doch schwindet die Bindewirkung des Albumins und die Stabilität der Prüfkörper. Eine Verwendung unter 10 % erwirkt keine Verklebung der Partikel.

REZEPTUR/ TIER. PROTEIN	ANTEIL* [g]	ANTEIL [%]
Holzanteil	452 g	100 %
Binder/ Albumin	90 g	20 %
Calciumpropionat	/	/
Wasser	/	/

Abb.43: Rezeptur für Akustikelemente bestehend aus Holzpartikeln und Albumin. \*Die Angaben in Gramm beziehen sich auf die Produktion von 20 x 20 x 5 cm Elemente mit einer Dichte von 300 kg/m³

PROZESS	ZEIT [Minuten]	TEMP. [°C]
Mischen/ Trocken	1	/
Mischen/ Nass	5	/
Pressen/ Kalt	10	/
Pressen/ Heiß	8	200 °C

Abb.44: Spezifikationen des Herstellungsprozesses

Für eine höhere Viskosität wurde ebenso die Hinzugabe von Wasser geprüft doch musste zur Einstellung der Sprühfähigkeit so viel Wasser hinzugefügt werden, dass die Klebkraft nicht mehr ausreichend vorhabenden war und die Proben nach dem Ausschalen aus der Pressform zerfallen sind. Bei Holzpulver hingegen konnte trotz Verfahrens- und Rezepturangleichungen keine Klebwirkung eintreten und es ließen sich keine Proben realisieren. Vermutet wird, dass die Oberflächenstruktur des Pulvers zu fein, trocken und geschlossen ist und der Klebstoff dadurch zum Klumpen neigt und so keine homogene Gesamtverteilung stattfinden kann. Bei Fasern hingegen verzahnt sich die offene Struktur der Faserschüttung besser mit dem Klebstoff und bilden ein Kollektiv ab.

	WEHO 120F < 75 µm	WEHO 500 ~ 75 µm	WEHO 50/100 ~ 180 µm	WEHO 100/200 ~ 200-500 µm	WEHO 300/500 ~ 200-500 µm
<b>Tier. Protein</b>	-	-	-	-	++

Abb.45: Auswertung der verwendeten Partikelgrößen in Verbindung mit Albumin. +++ = sehr gut / ++ = gut / + = befriedigend/ - = fail

#### 2.4.4.3 Knochenleim/ Glutinleim

Der in Perlenform vorliegende Warmleim muss 10 Stunden in kaltem Wasser vorquellen bevor dieser bei 60 °C in einen fluiden Zustand erhitzt werden kann. Der Binder mit dem spezifischen Produktnamen „Knochenleim“ von dem Hersteller „El Natural - Produkte aus der Natur“ bezogen.

Die Leimung ist reversibel, d.h. unter Zufuhr von Wärme kann diese ohne Beschädigung wieder gelöst werden. Der Leim trocknet glashart und besitzt eine enorme Festigkeit (Gallertfestigkeit: 170 - 190 Bloomgram). Durch Schrumpfung des Leimes, die beim Aushärten auftritt, werden die Partikel zusammengezogen. Ursprünglich findet der Leim Anwendung als Klebstoff für Papier, Pappe, Holz, Filz und Stoff.

Auch hier kann die Fließfähigkeit über die Zugabe von Wasser gesteuert werden, doch tritt hier die gleiche Problematik auf wie bei der Verdünnung anderer vorher aufgeführter Proteinklebstoffen, wodurch die Klebkraft schwindet.

Der beim Erhitzen klebrig werdende Knochenleim, der der Konsistenz von Honig ähnelt, verbindet sich auch im verdünnten Zustand nicht mit den Holzpartikeln. Bei der Zuführung von Holzpulver klumpt dieser und beim Einsatz von Fasern tritt keine Vernetzung auf.

Nur unter einem sehr hohem Bindereinsatz (60 %) findet eine Verklebung statt. Beim Pressvorgang tritt der Klebstoff allerdings in großen Maßen aus den Proben aus, was zeigt, dass eine klare Übersteuerung der Klebstoffzufuhr stattgefunden hat und der Formstoff zu gesättigt ist.

#### 2.4.5 Chitosan

Chitosan wurde ursprünglich nicht in diesem Forschungsprojekt als Bindemittel vorgesehen. Da die natürlichen als auch positiven Eigenschaften des Chitosans z.B. schimmel- als auch feuerhemmend sind, wurde das Bindemittel nachträglich inkludiert.

Wie bereits in Kapitel 2.2.5 aufgeführt, sind die Quellen zur Gewinnung von Chitosan vielfältig. Aus Kosten- als auch Verfügbarkeitsgründen wurden die ersten Versuche mit einem Chitosan auf Basis von Reststoffen der Krabbenverwertung (Schalen) verwendet. Um das in Pulverform vorliegende Chitosan-Derivat als Bindermaterial nutzbar zu machen, muss dieses zuvor mit einer Essigsäure vermennt werden wodurch ein sogenanntes Hydrogel entsteht. Entscheidend für die Fluidität des Gels ist die Verwendung der prozentualen Ausrichtung der Essigsäure, die in unterschiedlichen Konzentrationen vorliegen kann.

Zur Herstellung eines 5%igen Chitosan Hydrogels wird eine 1%ige Essigsäure aus beispielsweise 480 ml Wasser und 20 ml Essigessenz hergestellt. Die resultierende Essigsäure wird dann mit dem Chitosan vermennt, wobei 5 g Chitosan auf 100 ml Essigsäure ein 5%iges Chitosan Hydrogel ergibt. Bevor das Gel als Klebstoff angewendet werden kann, muss dieses für 24 Stunden ruhen. Die erhaltene Viskosität des Hydrogels ähnelt die eines zähflüssigen Honigs. Durch die Erhöhung des Chitosananteils in dem Hydrogel erhöht sich auch die Viskosität des Gels. Ein 15%iges Chitosan Hydrogel weist eine klebestiftähnliche Viskosität auf.

Um die Fluidität und Klebkraft des Chitosan auszutariieren wurden die Versuchsreihen mit einer bereits bekannten und oben aufgeführten Rezeptur gestartet; mit 5 %igen Chitosan Hydrogel, welches sich schnell und deutlich als zu dickflüssig darstellte. Aufgrund seiner hohen Viskosität konnten die Holzpartikel, besonders das Holzmehl, beim Mischvorgang nicht benetzt werden. Neben dem niedrigen Benetzungsgrad, konnte eine Klumpenbildung des niedrig viskosen Binders im Formstoff festgestellt werden. Das Ergebnis war ein sehr poröser Probekörper.



Abb.46: Evolutionärer Entwicklungsprozess von Rezepturerprobungen. Holzmehl und Holzpartikel werden mit unterschiedlichen Anteilen an Binder versehen bei gleichbleibenden Hydrogel Anteil

Mit dieser Kenntnis wurde ein 2 %iges Chitosan Hydrogel hergestellt, welches eine deutlich niedrigere Viskosität aufweist. Durch die erhöhte Fließfähigkeit konnte im Mischvorgang eine gleichmäßigere Benetzung der Partikel ohne Klumpen festgestellt werden und die Vorversuche galten damit als erfüllt.

Der Vorteil bei der Verarbeitung von Chitosan ist, dass auf eine Heißpressung verzichtet werden kann. Nach einem dreiminütigen Mischvorgang wird der noch feuchte Formstoffbrei für 30 Minuten kalt in Form gepresst.

Es wurden Probekörper mit einem Chitosan-Gelanteil von 12,5 % bis 25 % angefertigt. Die resultierenden Proben waren fragil und ließen schlussfolgern, dass die Holzpartikel nicht ausreichend benetzt werden konnte, also das Gel noch zu niedrig viskos ist. Der Hydrogelanteil wurde danach auf 40 % erhöht und es wurde ersichtlich, dass das Fasergemisch besser benetzt wird. Da aber besonders die Proben mit dem Holzmehl an deren Kanten noch teilweise porös waren (vgl. Abb.46), wurde der Hydrogelanteil nochmals um 10 % erhöht. Die Ergebnisse sind haptisch sehr gut ausgefallen und konnten einer händischen Druck- und Biegebelastungs-Vorprüfung standhalten.

REZEPTUR/ CHITOSAN	ANTEIL* [g]	ANTEIL [%]
Holzanteil	452 g	100 %
Binder/ Chitosan-Hydrogel	226 g	50 %
Calciumpropionat	/	/
Wasser	/	/

Abb.47: Rezeptur für Akustikelemente bestehend aus Holzpartikeln und Chitosan-Hydrogel. \*Die Angaben in Gramm beziehen sich auf die Produktion von 20 x 20 x 5 cm Elemente mit einer Dichte von 300 kg/m³

PROZESS	ZEIT [Minuten]	TEMP. [°C]
Mischen/ Trocken	/	/
Mischen/ Nass	3	/
Pressen/ Kalt	30	/
Pressen/ Heiß	/	/

Abb.48: Spezifikationen des Herstellungsprozesses



Abb.49: Links: Sandwichelement bestehend aus zwei Deckschicht aus Holzmehl und einem Kern aus Holzfasern. Rechts: Faserverbundelement aus einer Deckschicht aus Holzmehl und einem Unterbau aus Holzfasern

**2.5 Faserverbund- und Sandwichelemente**

Um die unterschiedlichen positiven Materialeigenschaften der Partikelgrößen WEHO 500 und HW 300/500 zu kombinieren, wurden 1.) Faserverbund- und 2.) Sandwichelemente produziert. Grundlage der Schichtenanordnung bildet die Fräsqualität von Holzmehlen und die akustischen Qualitäten von Holzfasern. Zur akustischen Ertüchtigung der Verbundrohlinge können Hohlräume eingefräst werden, die zusätzliche ermöglichen – neben der Materialkomponente – den Schall zu absorbieren. Da Holzmehl in Fabrikationsversuchen wesentlich höhere, randscharfe und glatte Oberflächenqualitäten aufwies, (siehe Abb.28) so wurden diese resultierend als Deckschicht angeordnet und die Holzfasern als Mittel- oder Unterschicht. Die Versuchsreihe wurde ausschließlich mit Weizenstärke als Binder ausgeführt. Hierzu wurden die bereits erprobten Rezepturen verwendet (siehe Kapitel „2.2.1 Stärke“).

eine neue Schicht eingestreut wurde. Die glatten Schichten haben kein zusammenhängendes Kollektiv gebildet; die Schichten haben sich während des Trocknungsprozesses ca. 1 mm abgesetzt und konnten mit geringem Kraftaufwand voneinander gelöst werden. Dieser Effekt kann der mechanischen Adhäsion zugeschrieben werden. Durch das Vorverdichten der Schichten ist eine glatte und porenarme Grenzoberfläche entstanden, welche die Verklammerung der beiden angrenzenden Schichten verhindert bzw. erschwert.

Durch leichte Prozessanpassung konnte der oben beschriebene Effekt behoben werden: Die vorkomprimierten Schichten müssen vor dem Einfüllen neuer Partikelschichten an der Oberfläche leicht aufgebrochen werden, damit sich einzelne Fasern aufstellen und mit der darauffolgenden Schicht verzahnen. Die Schichtelemente werden 10 Minuten kalt und im Anschluss 8 Minuten heiß verpresst.

Alle Schichten konnten formschlüssig verklammert werden und wiesen keine Luftschichten/-räume auf.

	DECK-SCHICHT	MITTEL-SCHICHT	UNTER-SCHICHT
Verbund-Element	Mehl	Faser	/
Sandwich-Element	Mehl	Faser	Mehl

Abb.50: Unterschied zwischen Verbund- und Sandwich-Element

Erste Versuche, ein Schicht-System zu entwickeln scheiterte, da die einzelnen Schichten in einen Streukasten gegeben und jede einzelne Schicht vorverdichtet wurde, bevor

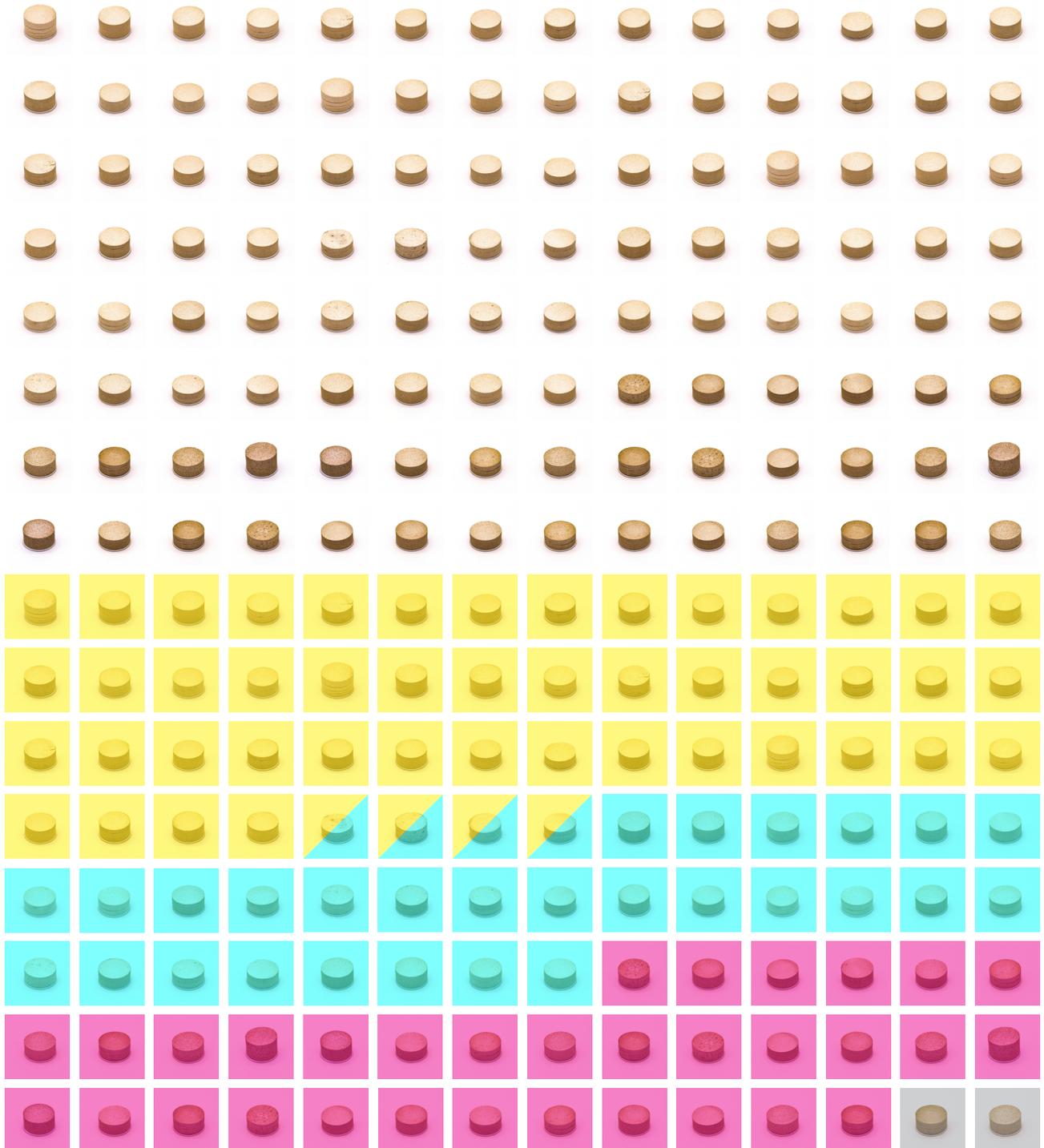


Abb.51: Rohrproben. Visualisierung des Forschungsinputs nach Bindertypen. Gelb: Stärke, Cyan: Pfl. Proteine, Magenta: Kasein, Grau: Tier. Protein

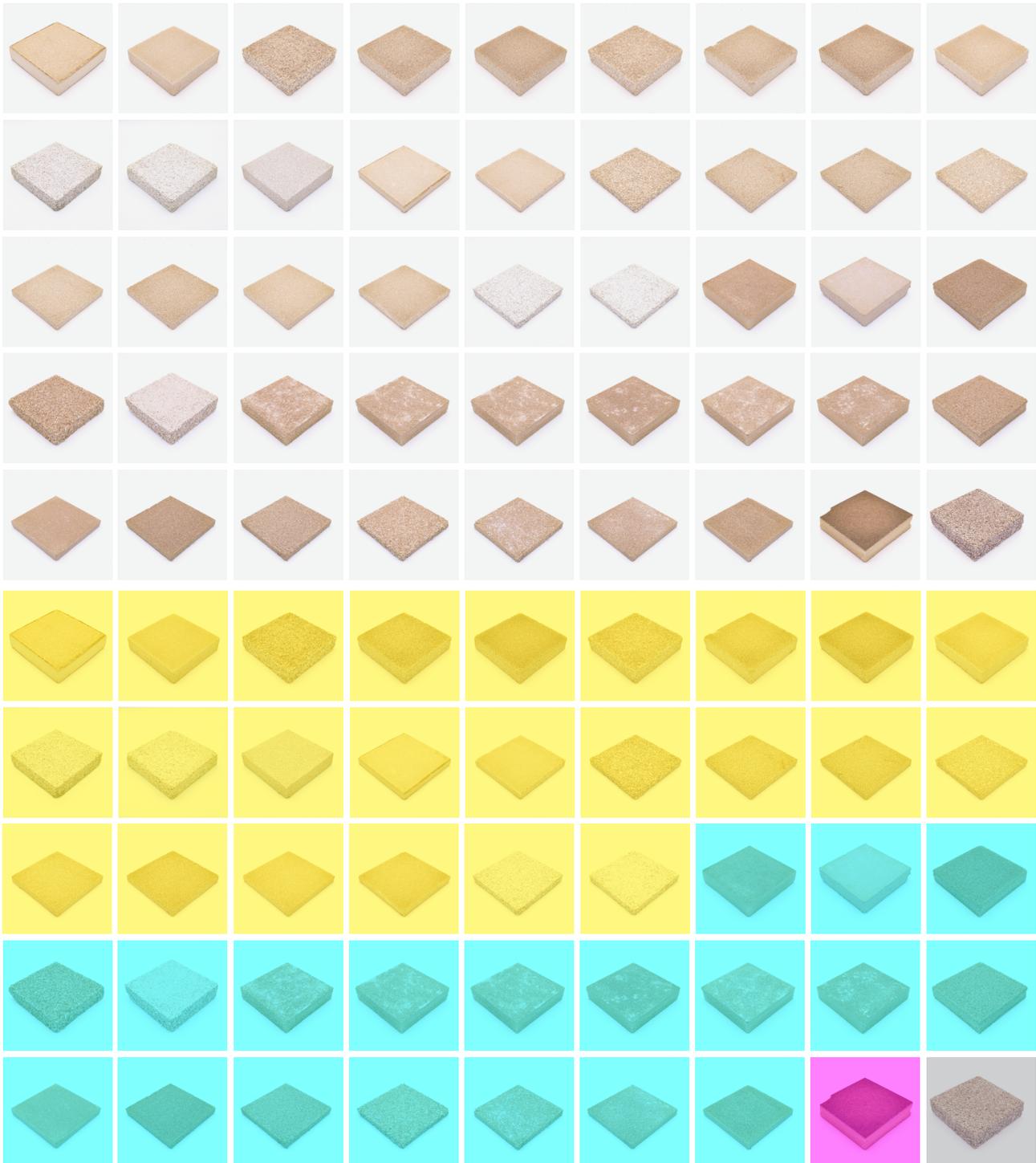


Abb.52: Skalierung. Visualisierung des Forschungsinputs nach Bindertypen. Gelb: Stärke, Cyan: Pfl. Proteine, Magenta: Kasein, Grau: Tier. Protein

## 2.6 Entwicklung von akustischen Eigenschaften

### 2.6.1 Anwendungsoptimierung

Damit ein Werkstoff eine brauchbare Alternative für die Bauindustrie darstellen kann, muss der gesamte Prozess von der Werkstoffentwicklung bis zum Bauteil betrachtet werden. Dazu gehört neben der Materialentwicklung auch die Entwicklung eines Produktionsprozesses für die Umsetzung eines bestimmten Designs zur Erfüllung gewisser Anforderungen und Anwendungen [33]. Der Übergang von Materialstudien zur Produktion von Bauteilen mit einem beabsichtigten Verwendungszweck ist wichtig, um die Stärken des Materials und die Probleme bei der Produktion weiter aufzudecken.

Obwohl es einige Beispiele für Akustikelemente auf Holzbasis gibt (siehe auch Kapitel „1.8 Akustik“), gibt es nur sehr wenig Forschung zu Akustikkomponenten auf Holzpartikelbasis insbesondere in Kombination mit natürlichen Bindemitteln.

Die hier erforschten Formstoffkollektive haben Eigenschaften gezeigt, die sowohl an Holz als auch an einen Partikelverbundstoff erinnerten [33]. Die Hypothese war, dass das Material in der Lage sein sollte, eine Absorptionsklasse C oder D zu erreichen, die durch das Einbringen von Hohlräumen weiter verbessert werden könnte [34]. Um ebenfalls Designs zu ermöglichen, die auf Diffusion abzielen, wurde während der Entwicklung auch die mögliche Notwendigkeit einer weiteren Formgebung oder Detaillierung der Geometrie in Betracht gezogen. Zur Umsetzung der akustischen Optimierung galt es entsprechende Fertigungsverfahren zu prüfen.

Zur Einbringung von akustisch wirksamen Resonatoren in die Formstoffe wurde a.) ein Formendes und b.) ein subtraktives Verfahren erprobt, die wie folgt erläutert werden.

### 2.6.2 Formgebendes Verfahren

Viele partikelförmige Verbundwerkstoffe, wie Beton oder Gips, eignen sich durch ihren fluiden Zustand für die Formgebung [33]. Mit Hilfe von Schalungen können diese Materialien in komplexe Formen mit hohen Freiheitsgraden

gegossen werden, was einen großen Vorteil bietet und als gängiges industrielles Herstellungsverfahren für stark gekrümmte Gebäudeteile gilt. Für die Herstellung von Hohlräumen ist es jedoch nicht die bevorzugte Technik. Dennoch können nicht-expandierende Hohlräume geformt werden, während komplexere Hohlräume nur durch ein Blasformverfahren [33] oder durch Aufteilung des Objekts in Segmente erreicht werden können. Das Blasformen wird in der Regel für die Bearbeitung von Kunststoffen eingesetzt. Allerdings ist die Verwendung und das auch sogenannte Extrudieren von Kunststoffen, nicht nachhaltig, da Kunststoffe einen hohen Anteil grauer Energie mitbringen. Ebenso erfordert die Aufteilung des Objekts in Segmente eine gewisse Präzision beim Formen und eine gute Verbindungstechnik für den Zusammenbau.

Ein mögliches Verfahren für das Formen der hier erforschten Formstoffverbundwerkstoffe ist angelehnt an das hitzefreie Formpressen [33], gefolgt von Wärmepressen und einer Lufttrocknung. Das Verfahren selbst reglementiert durch technische Beschaffenheiten wie z.B. Format der Pressen etc. die Ausgangsbedingungen für Größe und Form der Bauteile.

Um das Material in Geometrien zu pressen, können vorproduzierte negativ Formteile als eine Art Stempel auf die Ober- und Unterplatten der Presse montiert werden, die Wärme und Druck standhalten als auch Formen in den Formstoff übertragen können. Das Verfahren eignet sich nicht zur Realisierung von insbesondere innenliegenden komplexen Geometrien mit hohen Radien und Hinterschneidungen. Besonders schwierig ist dabei die Umsetzung von Resonatoren, dessen Öffnungen für akustische Maßnahmen vorzugsweise konisch verlaufen, um den Schall in den Formstoff zu führen und ausklingen zu lassen. Dabei ist die Eintrittsöffnung sehr eng modelliert und weitet sich im Akustikelement aus, was in der Produktion eine Schwierigkeit darstellt.

### 2.6.3 Subtraktives Verfahren

Ein alternativer Ansatz besteht darin, die Bauteile nachzubearbeiten und die Hohlräume durch ein subtraktives Verfahren herzustellen, auch Fräsen genannt. Unter Fräsen versteht man das Abtragen von Material durch ein rotierendes Werkzeug in einem bestimmten Winkel [35] – ein Fertigungsverfahren, das sowohl zur Formgebung von Objekten als auch zur Herstellung von Löchern oder Hohlräumen eingesetzt werden kann. Im vorangegangenen Forschungsprojekt [36], konnte durch eine subtraktive Bearbeitung von Blöcken aus feinen Holzpartikeln – gebunden mit Stärke – gute Ergebnisse bezüglich der Oberflächengüte, Gestaltgebung und Präzision erzielt werden. Damals konnte aufgezeigt werden, dass die Fräsgeschwindigkeit, der Vorschub und die Wahl des Fräasers für das Endergebnis von großer Bedeutung sind. Die gewonnen Erkenntnisse dienen als Ausgangspunkt für weiterführende Forschungsarbeiten.

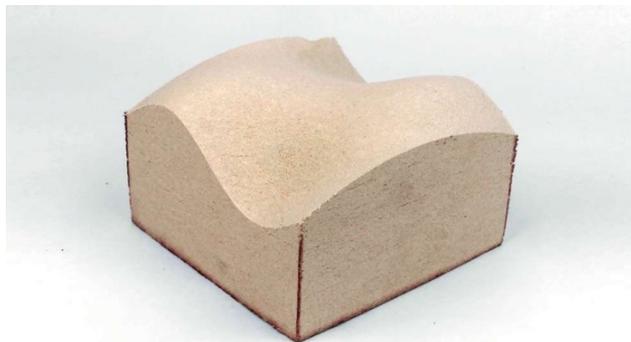


Abb.53: Resultierendes Fräsergebnis aus dem Vorgängerprojekt. Bearbeitet Holzmehl-Stärke Rohlinge

Damalige als auch aktuelle Fräsversuche wurden sowohl vor Ort, an der Universität Kassel, als auch bei den Kooperationspartnern des Projekts, der Maus GmbH, einem Unternehmen mit langjähriger Erfahrung im Fräsen, durchgeführt. An beiden Standorten wurden ausschließlich 5-Achsen-Portalfräsmaschinen eingesetzt, da sie aufgrund ihrer Bauweise unempfindlich gegen Vibrationen sind und die 5-Achsen einen hohen Freiheitsgrad bieten, der eine große Bandbreite komplexer Formen ermöglicht [37]. Die Spezifikationen sind in Abb.54 und Abb.55 aufgeführt. Dabei lag der Fokus in dem Vorgängerprojekt auf der Bearbeitung von Oberflächen. Das hier vorgestellte Projekt erweitert die Möglichkeit der Formgebung in der Oberfläche

durch den Zusatz von Einkerbungen in dem Material, durch sogenannte Resonatoren.

Ein erster Frästest wurde mit Polystyrol durchgeführt, um potenzielle Probleme bezüglich der Fräs-Konfiguration zu ermitteln, bevor mit dem Fräsen von Materialblöcken fortgefahren wurde. Die Fertigungstests wurden dann optisch auf Qualitäten wie Oberflächenstruktur, Präzision und Detaillierung bewertet und durch Fotos festgehalten.

SK-CNC PORTALFRÄSMASCHINE MIT 5 -ACHS KOPF HSD			
FRÄSER	DIM [mm]	DREHZAHL [U/min]	VORSCHUB [m/min]
1. Schaftfräser 2-Schneider VHM/Holz	Ø 8,0 L:100x40x70	12.500	6,0
2. Schaftfräser 3-Schneider Schaumstoff	Ø 8,0 L:100x40x70	12.500	6,0
3. Schaftfräser Pyramid Verzahnt VHM/Fein	Ø 8,0 L:100x40	12.500	6,0
4. Schaftfräser Pyramid Verzahnt VHM/Grob	Ø 8,0 L:100x40x70	12.500	6,0
5. V-Nutenfräser	Ø 6,0/10,0 L: 50x4,1	12.500	8,0

Abb.54: Spezifikationen des Fräs-Settings "Universität Kassel"

ZIMMERMANN FZ 32 PORTALFRÄSMASCHINE 5-ACHS			
FRÄSER	FRÄSER Ø [mm]	DREHZAHL [U/min]	VORSCHUB [m/min]
PKD-Kugelfräser 2 Schneiden	6	12 - 15.000	1,2 - 3,0

Abb.55: Spezifikationen des Fräs-Settings "Maus GmbH"

Um zu evaluieren, welche Faktoren auf das Fräsergebnis einwirken, wurden beispielsweise mehrere Fräswerkzeuge getestet und verglichen. Maus GmbH verwendete überwiegend einen Kugelkopffräser, da dieser in dem vorangegangenen Forschungsprojekt [36] die feinsten Oberflächen produziert haben, während an der Universität Kassel hauptsächlich verschiedene Arten von Schaftfräsern in den Einsatz gebracht haben. Schaftfräser sind lange Fräser mit kleinen Durchmessern und einem Schneidbereich, der sich über die Länge des Werkzeugs erstreckt [35], wodurch sie sich zum Bohren oder Eintauchen eignen. Eine Ausnah-

me bildet das Werkzeug 5 (siehe Abb.54), das nur für die Oberflächenbearbeitung getestet wurde.

#### 2.6.4 Hohlräume

Akustische Metamaterialien, Resonatoren und perforierte Platten beruhen überwiegend auf der Theorie, dass Hohlräume oder Perforationen die Absorption verbessern. Daher basiert auch das erste Design, das für die Produktionstests entwickelt wurde, auf Hohlräumen. Die Form der Hohlräume wurde auf der Grundlage der Tatsache entwickelt, dass Resonatoren und dergleichen auf sich ausdehnenden Hohlräumen beruhen, bei denen kleine Löcher zu einem größeren Innenraum führen. Die Form basiert auf der Bewegung eines 5-Achsen-Fräasers, einer 360°-Dre-

hung in einem Winkel, der einen schrägen Hohlraum mit konischem Eingang und innerer Pyramidenstruktur erzeugt. Ein recht komplexer Hohlraum, der in einer oder zwei Bewegungen entsteht, je nachdem, ob die Maschine eine volle 360°-Drehung ausführen kann. Bei Bedarf kann zusätzliches Material innerhalb der Hohlräume durch weitere Drehungen abgetragen werden, aber da Zeit und Energieaufwand immer ein Faktor in der Produktion ist, ist es wünschenswert, die Anzahl der Fahrtbewegungen zu minimieren. Da frühere Untersuchungen gezeigt haben, dass die ideale Größe der Aushöhlungen davon abhängt, welche Frequenzen absorbiert werden sollen (siehe auch Kapitel „1.8 Akustik“), wurde ein parametrisches Design-Setup entwickelt, um die Größe und Verteilung der Löcher auf einer Oberfläche zu steuern.

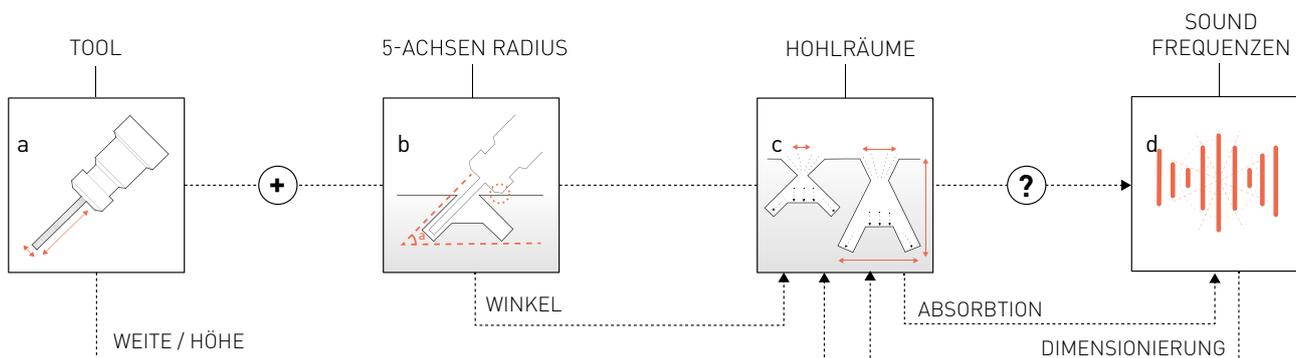


Abb.56: a) Abmessungen des Fräasers b) Reichweite der 5-Achs-Fräse c) Abmessungen der Hohlräume d) Zu absorbierende Frequenzen



Abb.57: Eingespanntes Akustikelement zur weiteren akustischen Optimierung durch Einbringen von Hohlräumen via subtraktiver Bearbeitung

Produktionsbeschränkungen wie maximaler Winkel und Tiefe wurden als Kontrollparameter verwendet, um den Prozess der Prüfung abweichender Größen zu erleichtern. Der Schwerpunkt lag dabei auf der Größe des Eintrittslochs, dem Innenwinkel und der Tiefe des Hohlraums, da diese Eigenschaften den größten Einfluss auf die Absorptionseigenschaften haben. Die Erweiterung ermöglicht eine komplexere Zusammenstellung von Hohlräumen und die Anpassung eines Bauteils an einen bestimmten Nutzen. Wie bereits erwähnt, lag der Schwerpunkt auf kleinen Eintrittslöchern und einem allmählich größer werdenden Innenradius – aber mit demselben Aufbau können auch zylinderförmige und Hohlräume unterschiedlicher Radien und Tiefen hergestellt werden.

Die Größe der herstellbaren Hohlräume wird in erster Linie durch das Fräswerkzeug bestimmt. Die maximale Tiefe hängt von der Länge des Fräasers ab und der Mindestdurchmesser des Eintrittslochs wird durch die Breite des Fräasers bestimmt. Um tiefe Aushöhlungen mit kleinen Eintrittslöchern herzustellen, ist ein langer und schmaler Fräser erforderlich, während flache Einkerbungen mit größeren Eintrittslöchern mit fast jedem Schaftfräser hergestellt werden können. Dennoch hat auch der Winkel einen gewissen Einfluss auf die Tiefe und die Größe des Eintrittslochs. Die möglichen Fräswinkel hängen von der Maschine selbst und der Geometrie des Fräskopfes ab. Bei bestimmten Winkeln kann der Fräskopf beim Fräsen in unmittelbarer Nähe der Probe auf die Probenoberfläche aufschlagen, so dass der Fräser nicht mehr greifen kann. Dies ist in Abb.56 zu sehen. Auch die Einspannung des Werkzeugs hat Einfluss auf die Reichweite.

Mit dem Aufbau in Abb.54 und dem Werkzeug 1–4 beträgt das kleinstmögliche Eintrittslochmaß 8 mm. Dieser Durchmesser wird durch den Fräser vorgegeben und vergrößert sich durch Erhöhung des Eintrittswinkels. Die kleinste erfolgreich gefräste Eintrittsbohrung für eine abgewinkelte Einfräsung lag daher bei 9,5 mm.

Bei der von der Universität Kassel verwendeten Portalfräsmaschine sind etwa 20 mm des Werkzeugs im Fräskopf eingespannt. Die Maschine kann Einhöhungen mit einem Innenwinkel von  $35^\circ$  und mehr herstellen. Aufgrund der Konstruktion dieser speziellen Maschine kann sie keine

Winkel unter  $35^\circ$  erreichen. Ebenso müssten Winkel über  $145^\circ$  auf andere Weise gefräst werden, aber diese Winkel können immer noch durch Fräsen von oben hergestellt werden.

### 2.6.5 Fräsenaugigkeit

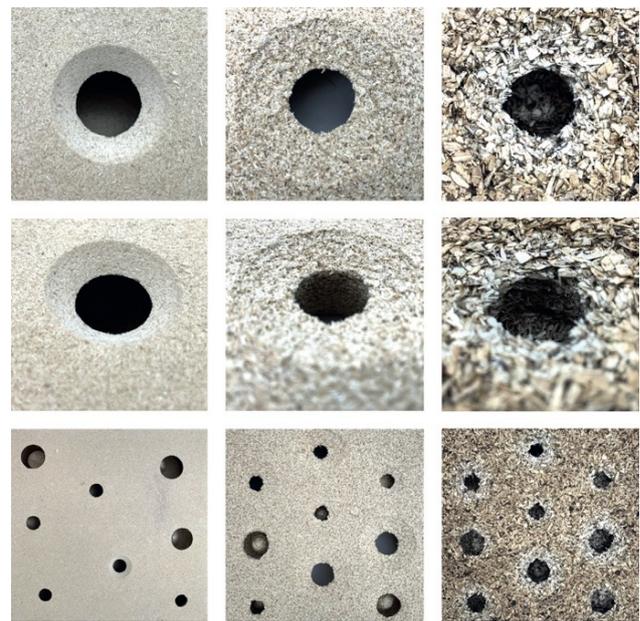


Abb.58: Feine Partikel auf der linken Seite, mittlere Partikel in der Mitte und grobe Partikel auf der rechten Seite, gefräst mit Werkzeug 1



Abb.59: Detaillierung auf feinen Partikeln  $400 \text{ kg/m}^3$  nach Wasserreduzierung, Oberflächenspuren werden mit Fräser 5 und Hohlräume mit Fräser 2 hergestellt

Beim Fräsen des Materials wurde beobachtet, dass die kleineren Partikel eine bessere Fräspräzision als die größeren Partikel ergeben, da die größeren Partikel mehr in Stücken abplatzen und Kanten und Oberflächen ungleichmäßig hinterlassen. Diese Tendenz ist am ehesten im Bereich der Eintrittslöcher und an der inneren Pyramidenstruktur zu beobachten. Mit feinen Partikeln gefräste Eintrittslöcher sind rund und scharfkantig, während sie bei größeren Partikeln eher zerklüftet sind (siehe Abb.58). Bei den inneren Pyramidenstrukturen bleibt die Form bei Nutzung feiner Partikel weitgehend intakt, während diese bei gröberen Fasern größtenteils zerstört werden. Dies ist möglicherweise darauf zurückzuführen, dass die Bindermatrix schwächer ist als die Partikel und daher beim Zerspanen zuerst bricht. Die meisten Verbundstoffe haben eine schwächere Matrix [33] aber in diesem Fall scheint der Unterschied die Ergebnisse negativ zu beeinflussen. Es wurden keine größeren Unterschiede zwischen Stärke, Kasein und tierischem Eiweiß festgestellt. Außerdem wurde bei den ersten Frästests beobachtet, dass höhere Dichten zu glatteren Oberflächen und präziseren Ergebnissen führen. Beim Fräsen von feinkörniger Stärke mit einer Dichte von  $300 \text{ kg/m}^3$  und  $600 \text{ kg/m}^3$  war ein deutlicher visueller Unterschied festzustellen, wobei die höhere Dichte schärfere Kanten und eine bessere Präzision aufwies. Nach der Reduzierung des Wassergehalts gab es jedoch nur noch geringe Verbesserungen bei der Erhöhung der Dichte, und die gleiche Präzision wurde nicht mehr erreicht.

Die Fräser 1, 2 und 6 lieferten die zufriedenstellendsten Fräsergebnisse. 1 und 2 lieferten sehr ähnliche Ergebnisse, mit dem kleinen Unterschied, dass Fräser 1 bei höheren Dichten besser war und Fräser 2 bei niedrigeren Dichten geringfügig besser. In ähnlicher Weise lieferte Fräser 6 etwas bessere Ergebnisse als 1 und 2, aber da er in einer anderen Maschine mit einer anderen Geschwindigkeit und einem anderen Vorschub eingesetzt wurde, kann er nicht direkt mit Fräser 1 und 2 verglichen werden.

Da die feinen Partikel zu einer besseren Fräspräzision führen aber anfälliger für Risse oder Abplatzungen sind wurde unter Verwendung des Binders Stärke Verbund- als auch Sandwich-Bauteil (siehe Kapitel „2.5 Faserverbund- und Sandwichelemente“) produziert um die besten Eigenschaften beider Holzpartikel zu kombinieren. Gleichzeitig

werden durch die Wahl verschiedener Partikelgrößen unterschiedliche akustische Eigenschaften abgedeckt wobei feine Partikel zur Streuung des Schalls tendieren und

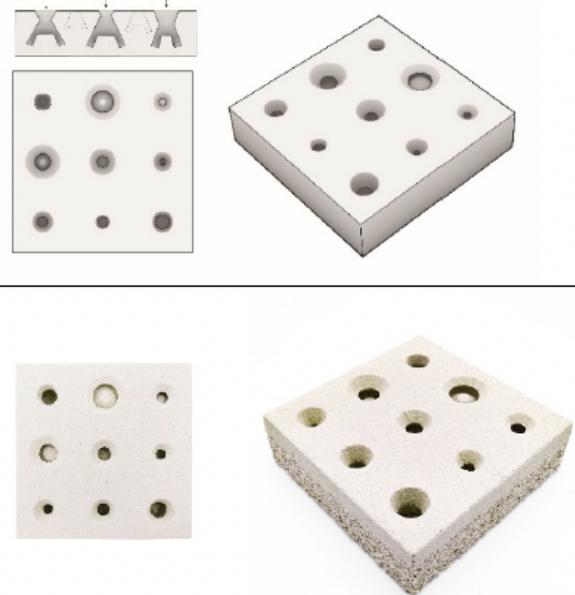


Abb.60: Vergleich von digitalem (oben) zu realem Modell (unten)

Fasern zu Absorption. Verbundbauteile bestehen aus zwei Schichten (Deckschicht: feine Partikel / Unterschicht: Fasern) und die Sandwich-Elemente aus 3 Schichten (Deckschicht: feine Partikel / Mittelschicht: Fasern / Unterschicht: feine Partikel) (siehe Abb.49).

Beim Fräsen der Sandwich- als auch Verbund-Elemente kam es zu keiner Unterbrechung zwischen den Schichten, und die Eigenschaften der einzelnen Schichten blieben intakt. Bereiche mit feinen Partikeln hatten eine bessere Definition, während Bereiche mit größeren Partikeln das Bauteil zusammenhielten. Pyramidenstrukturen blieben intakt, wenn die Spitze der Pyramide Teil der Feinteilchenschicht war. War dies nicht der Fall und befand sich die Pyramide innerhalb der Schicht mit den großen Partikeln, wurde sie auf die gleiche Weise zerstört, wie es beim Fräsen der großen Partikel beobachtet wurde.

### 2.6.6 Zuschnitt

Ein Vorteil von Holz im Vergleich zu anderen Werkstoffen ist, dass es sich leicht zuschneiden und somit während eines Bauprojekts auf der Baustelle leicht anpassen lässt. Daher wurden im Rahmen des Herstellungsprozesses verschiedene Schneidetechniken getestet. Es wurden zwei Maschinensägen und zwei Handsägen getestet: eine Tischsäge, eine Bandsäge, ein Stichsägebogen und eine Fuchsschwanzsäge. Die Spezifikationen der Sägen sind in Abb.61 zu sehen.

TYP	SCHNEIDE	GESCHWINDIGKEIT
Tischsäge, Felder K 700	Ø 315 x 3,2 x 30 mm	4700 Ø /min
Bandsäge, Metabo Bs 0633D	2240/6/0.5 ZpZ 4 mm ZAB	135 m / min
Stichsäge 13/130 mm	Fein gezahnt	Handbetrieb
Fuchsschwanz 370 mm	Holz, 12 Zähne/Zoll	Handbetrieb

Abb.61: Spezifikationen der verwendeten Sägen

Im Großen und Ganzen wurde beim Schneiden ein ähnliches Verhalten wie beim Fräsen beobachtet. Beim Schneiden der Blöcke neigen die Partikel dazu, in Stücke zu brechen und Schnitte mit gezackter Oberfläche zu hinterlassen. Wie zerklüftet diese sind, hängt von der Art der Säge ab. Im Vergleich dazu bricht das Material beim Schneiden mit der Tischsäge mit größeren Zähnen und höherer Geschwindigkeit mehr als beim Schneiden mit der etwas langsameren Bandsäge mit feineren Zähnen. Auch bei der Stichsäge brach das Material deutlich weniger als bei der Fuchsschwanzsäge, was darauf hindeutet, dass Sägen mit kleineren Zähnen zu bevorzugen sind. Das Material lässt sich zwar schneiden, aber seine brüchige Beschaffenheit hat Auswirkungen auf die Präzision und Sauberkeit der Schnitte. Dies könnte jedoch wahrscheinlich durch eine Optimierung der Geschwindigkeit und der Blattgeometrie noch verbessert werden.



Abb.62: In Verwendung gebrachte Schafffräser



Abb.63: Fräsversuche des Projektpartners „Maus GmbH“



Abb.64: Detailaufnahmen von Resonatoren

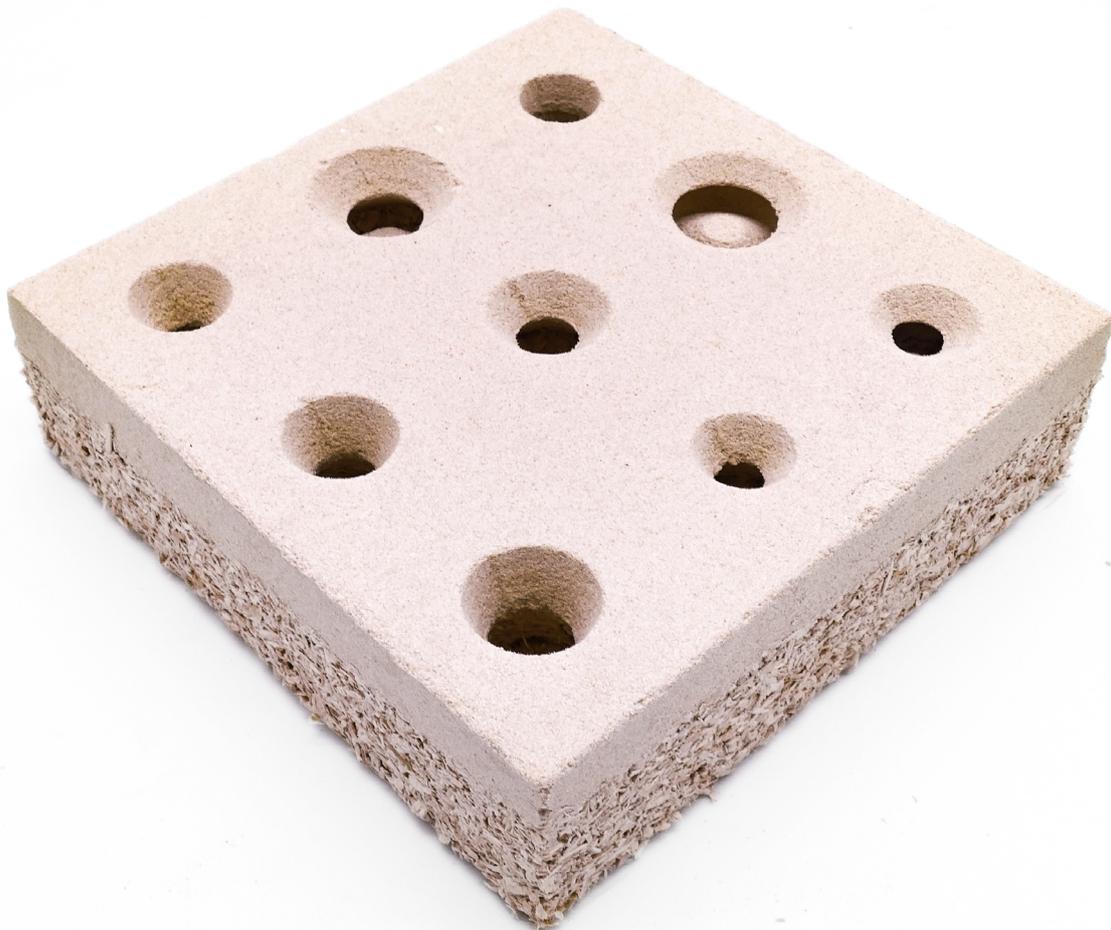


Abb.65: Abbildung eines Akustikelements bestehend aus zwei Partikelschichte und Resonatoren

### 3 (AP 2) PRÜFVERFAHREN & BAUTEILCHARAKTERISIERUNG

#### 3.1 DIN-Prüfverfahren

##### 3.1.1 Druckfestigkeit nach DIN 52376

Geprüft wurde nach DIN 52376 zur „Bestimmung der Druckfestigkeit von Sperrholz parallel zur Plattenebene“ mittels Prüfmaschine des Unternehmens „ZwickRoell“ (Modell: RetroLine/ testControl II).

Testungen wurden an Proben mit Weizenstärke, Kasein und Albumin durchgeführt – mit den Maßen 50/50/50 mm (Würfelproben). Es wurden pro Binder jeweils 6 Proben aus Holzmehl und Fasern getestet. Da sich aus der Kombination Albumin in Zusammenhang mit Holzmehl keine Prüfkörper ergeben haben, kann ergo keine Prüfung stattfinden. Albumin konnte nur im Zusammenhang mit Fasern geprüft werden. Somit wurden insgesamt 30 Proben auf Querkzugfestigkeit geprüft.

REZEPTUR	DRUCKFESTIGKEIT [N/mm <sup>2</sup> ]
Weizenstärke-Holzmehl	1,21
Weizenstärke-Span	0,92
Albumin-Span	0,34
Kasein-Holzmehl	0,57
Kasein-Span	1,03

Abb.66: Tabellarische Auswertung der Druckprüfung nach DIN 52376

In der obenstehenden Tabelle (Abb.66) werden die Durchschnittswerte der Druckfestigkeit in N/mm<sup>2</sup> angegeben. Den Ergebnissen ist zu entnehmen, dass die Weizenstärke-Holzmehl-Rezeptur mit 1,21 N/mm<sup>2</sup> die höchste Druckfestigkeit aus der Versuchsreihe aufweist. Mit 1,03 N/mm<sup>2</sup> folgt das Kasein-Faser-Gemisch und mit 0,92 N/mm<sup>2</sup> das Weizenstärke-Faser-Gemisch.

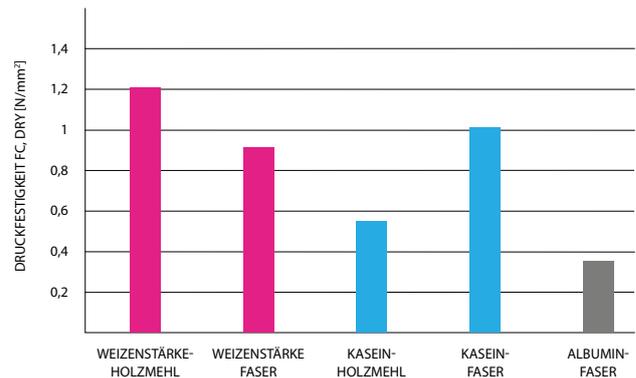


Abb.67: Grafische Auswertung der Druckprüfung nach DIN 52376

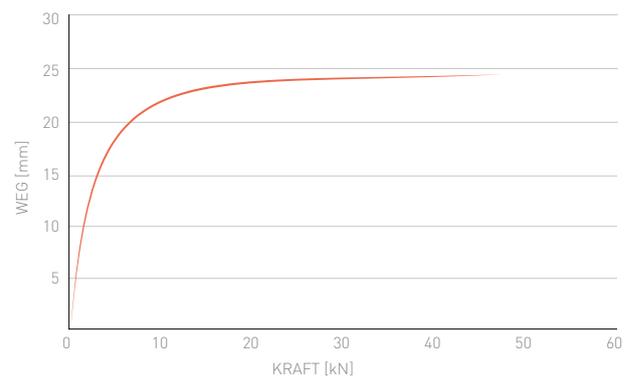


Abb.68: Zur Herstellung von Rohlingen benötigte Presskraft

Das Kasein- Holzmehl-Gemisch zeigt mit 0,57 N/mm<sup>2</sup> die zweitniedrigste Druckfestigkeit und nur das Albumin-Faser-Gemisch weist mit 0,34 N/mm<sup>2</sup> einen geringeren Druckfestigkeitswert auf. Zur Einordnung der Druckfestigkeit wurden diese mit der Druckfestigkeit der Spanplatte Typ P4 (tragende Zwecke) nach EN 312 verglichen. In dem Dickenbereich >40mm wird die Mindestanforderung von 6,1 N/mm<sup>2</sup> an die Druckfestigkeit gestellt [38], welche keiner der getesteten Binder-Gemische aufweist.

### 3.1.2 Querzugfestigkeit nach DIN EN 319

Zur Einordnung der mechanischen Eigenschaften der verschiedenen Holz-Binder-Gemische wurden Testungen durch den an der Universität Kassel ansässigen Forschungspartner dem Institut für Produktionstechnik und Logistik, Fachgebiet für Trennende und Fügende Fertigungsverfahren, Abteilung Holzbasierte Materialsysteme durchgeführt unter der Leitung von Dr. Moira Burnett.

Geprüft wurde mittels Prüfmaschine des Unternehmens ZwickRoell RetroLine/ testControl II.

Testungen wurden auch hier, identisch mit der Druckprüfung, an Proben mit den Bindern Weizenstärke, Kasein und Albumin durchgeführt. Es wurden pro Binder jeweils sechs Proben aus Holzmehl und Fasern getestet. Da sich aus der Kombination Albumin in Zusammenhang mit Holzmehl keine Prüfkörper ergeben haben, kann ergo keine Prüfung stattfinden. Albumin konnte nur im Zusammenhang mit Fasern geprüft werden. Somit wurden insgesamt 30 Proben auf Querzugfestigkeit geprüft.

Zur Bestimmung der Querzugfestigkeit von einzelnen Holz-Binder-Rezepturen wurden die Prüfkörper einer Prüfung nach DIN EN 319 unterzogen. Die Querzugfestigkeit wurde anhand von Würfelp Proben (50/50/50 mm mit einer Dichte von 300 kg/m<sup>3</sup>) ermittelt. Die durchschnittliche Festigkeitswerte sind in der nachstehenden Abb.70 durch einen Mittelwert angegeben.

REZEPTUR	QUERZUGFESTIGKEIT [N/mm <sup>2</sup> ]
Weizenstärke-Holzmehl	0,67
Weizenstärke-Span	0,56
Albumin-Span	0,34
Kasein-Holzmehl	0,0096
Kasein-Span	0,0094

Abb.69: Tabellarische Auswertung der Querzugfestigkeit nach DIN EN319

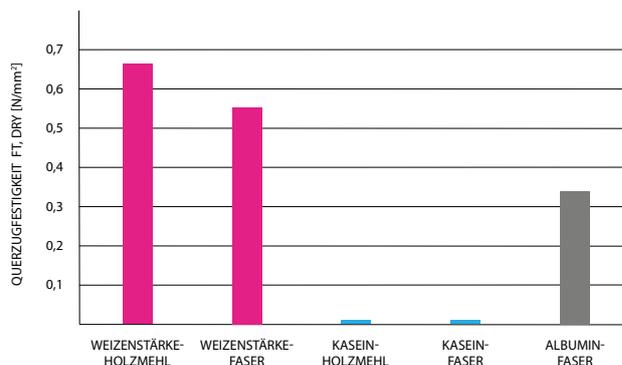


Abb.70: Grafische Auswertung der Querzugfestigkeit

Holzmehl-Gemisch mit 0,67 N/mm<sup>2</sup> die höchste Querzugfestigkeit aufweist. Mit 0,56 N/mm<sup>2</sup> folgt das Weizenstärke-Faser-Gemisch und mit 0,34 N/mm<sup>2</sup> das Albumin-Faser-Gemisch. Dagegen weisen die beiden Kaseingemische mit 0,0094 N/mm<sup>2</sup> für Faserproben und 0,0096 N/mm<sup>2</sup> für Holzmehl eine minimale (insignifikante) Querzugfestigkeit auf.

Die hier ausgewerteten Querzugfestigkeiten von Stärke (0,67 N/mm<sup>2</sup> / Dickenbereich 50 mm) und Albuminproben (0,34 N/mm<sup>2</sup> / Dickenbereich 50 mm) übertreffen die Anforderungen nach DIN EN 312 an einen Plattenwerkstoff zur Verwendung im Trockenbereich (Typ P2 / nicht tragende Plattenwerkstoffe) deutlich. Die geforderte Mindestquerzugfestigkeit laut nach DIN EN 312 = 0,20 N/mm<sup>2</sup> (Dickenbereich > 40mm).

### 3.1.3 Prüfung des Brandverhaltens nach 4102-1 und Klassifizierung nach DIN EN 13501-1

Versuchsdurchführungen wurde gemäß dem Statute der DIN 4102-1 durchgeführt.

#### 3.1.3.1 Vorbereitung der Prüfkörper

Es wurden Sandwich-Elemente nach DIN-Maßen in 90 mm (Breite ) x 250 mm (Länge) x 50 mm (Dicke) gefertigt. Die Mixtur bezieht sich auf eine etablierte Rezeptur (siehe Seite 44)

Laut Norm wurden die Proben vor der Prüfung nach DIN 50014-23/50-2 für 14 Tage im Normalklima gelagert.

Auf allen Proben wurde längsseitig eine Kontroll-Messkante in der Höhe von 150 mm in voller Probenbreite aufgebracht.

#### 3.1.3.2 Prüfkörper: Rezeptur und brandhemmende Additive

Für eine zusätzliche Brandhemmung wurde der bereits erprobten Sandwich-Rezeptur (siehe Kapitel „2.5 Faser-verbund- und Sandwichelemente“) – zu Versuchs- und Vergleichszwecken – mit unterschiedlichen biogene Brandhemmer ergänzt.

Daraus ergeben sich folgende Prüfkörper:

##### Probe B1

Die im Projekt eingesetzte Weizenquellstärke Tigel wurde durch ein patentiertes Verfahren der TU Dresden modifiziert hinsichtlich einer höheren Brandhemmung.

##### Probe B2

Die TU Dresden (Institut für Pflanzen- und Holzchemie. Ansprechpartnerin: Frau Dr. Ing. Katrin Thümmeler) hat eine eigens entwickelte modifizierte Stärke zur Anwendung als Brandhemmer entwickelt, die zu Vergleichszwecken gestellt wurde.

##### Probe B3

Probe B3 wurde ohne Zusatz von Additiven beprobt. Inhaltstoffe sind die erprobte Rezeptur aus Holzpartikeln, Weizenquellstärke Tigel, Calciumpropionat und Wasser.

##### Probe B4

Herkömmliche Rezeptur mit 10 % Rapswachs versetzt.

##### Probe B5

Herkömmliche Rezeptur mit 20 % Rapswachs versetzt.

##### Probe B6

Die Mixtur bezieht sich erprobte Rezeptur (siehe Kapitel „2.5 Faserverbund- und Sandwichelemente“).

#### Testdurchführung durch Kantenbeflammung

Die Probe wird in einen senkrechten Rahmen eingespannt. Der Brenner mit einer Flammenhöhe von 20 mm wird zur Kante der Probe gefahren und für 15 Sekunden beflammt und nach Ablauf der Zeit zurückgefahren.

#### 3.1.3.3 Prüfzeugnis

Sollte sich ein Prüfkörper nach 15 Sekunden entzünden und die Flammen über die markierte Messkante schlagen, ist die Prüfung nach DIN 4102-1 nicht bestanden. Als nicht bestanden gilt auch abtropfendes Material als auch Rauchentwicklung.

### 3.1.3.4 Versuchsdurchführung

### 3.1.3.5 Testdurchführung durch Kantenbeflammung

Die Probe wird in einen senkrechten Rahmen eingespannt. Der Brenner mit einer Flammenhöhe von 20 mm wird zur Kante der Probe gefahren und für 15 Sekunden beflammt und nach Ablauf der Zeit zurückgefahren.

PROBENUMMER	HÖHE [cm]	BREITE [cm]
B1	9,1	4,3
B2	10,5	2,8
B3	13,5	5,1
B4	11,4	6,4
B5	9,3	5,8
B6	7,4	4,2

Abb.71: Auswertung der Flammenhöhe und Breite nach doppelter Beflammungszeit (30 Sekunden) als in der DIN vorgesehen.

### 3.1.3.6 Versuchsauswertung

Alle Proben haben die Prüfung bestanden. Nach 15 Sekunden konnte kein Überschreiten der Markierung durch Flammenbildung festgestellt werden. Es konnte kein Abtropfen des Materials festgestellt werden. Moderarte olfaktorische Rauchentwicklung konnte bei Probe B6 (Kasein) festgestellt werden.

### 3.1.3.7 Beschreibung des Brandbildes siehe Abbildung 71.

Da die Prüfungen nach 15 Sekunden positiv verlaufen sind, wurde die Beflammungszeit von 15 Sekunden auf 30 Sekunden hochgesetzt. Auch nach 30 Sekunden konnte die Prüfung als bestanden angesehen werden.



Abb.72: Ergebnisse der Prüfung nach DIN 4102-1 im Vergleich. Von links nach rechts aufsteigend B1 – B6

**Klassifizierung nach DIN EN 13501-1**

Prüfverfahren	Prüfnorm	Klassen nach DIN EN 13501-1						
		A1	A2	B	C	D	E	F
Nichtbrennbarkeitsofen	DIN EN ISO 1182	X	X*					
Heizwertbestimmung	DIN EN ISO 1716	X	X*					
SBI	DIN EN 13823		X	X	X	X		
Kleinbrennertest	DIN EN ISO 11925-2			X	X	X	X	X**

X\* bei der Baustoffklasse A2 kann zwischen den Verfahren gewählt werden  
 X\*\* die Anforderungen für die Baustoffklasse E wurden nicht erreicht

Abb.73: Kategorisierung der Prüfnormen nach Klassen

Die hier durchgeführte Kleinbrennerprüfung nach DIN EN IS= 11925-2 prüft die Klassen B bis F nach DIN EN 13501-1. Die hier beprobten Prüfkörper erreichen nach DIN 4102-1 (nach doppelter Brenndauer von 30 statt 15 Sekunden) die höchste Kategorisierung von B1 „schwer entflammbar“ (siehe Abbildung 13).

**Zuordnung der bauaufsichtlichen Benennungen von Baustoffen**

(ausgenommen Bodenbeläge) zu den nationalen Klassifizierungen nach DIN 4102-1 und europäischen Klassifizierungen nach DIN EN 13501-1

Nationale Klasse nach DIN 4102-1	Bauaufsichtliche Anforderung	Europäische Klasse nach DIN EN 13501-1	Zusatzanforderungen	
			kein Rauch	kein brennendes Abfällen/ Abtropfen
A 1	nicht-brennbar	A 1	X	X
A 2	brennbar	A 2 - s1, d0	X	X
B 1 *)	schwer entflammbar	B - s1, d0 oder C - s1, d0	X	X
		A 2 - s2, d0 oder A 2 - s3, d0		X
		B - s2, d0 oder B - s3, d0		X
		C - s2, d0 oder C - s3, d0		X
		A 2 - s1, d1 oder A 2 - s1, d2	X	
		B - s1, d1 oder B - s1, d2	X	
		C - s1, d1 oder C s1, d2	X	
B 2 *)	normal entflammbar	A 2 - s3, d2 / B - s3, d2 / C - s3, d2		
		D - s1, d0 oder D - s2, d0		X
		D - s3, d0 oder E		X
		D - s1, d1 oder D - s2, d1		
		D - s3, d1 oder D - s1, d2		
B 3 **)	leicht entflammbar **)	D - s2, d2 oder D - s3, d2		
		E - d2		
		F **)		

\*) Angaben über hohe Rauchentwicklung und brennendes Abtropfen/Abfällen im Verwendbarkeitsnachweis und in der Kennzeichnung  
 \*\*) leicht entflammbare Baustoffe dürfen nicht verwendet werden. Dies gilt nicht, wenn sie in Verbindung mit anderen Baustoffen nicht mehr leicht entflammbar sind.

Abb.74: Klassifizierung der Prüfergebnisse nach B1 „schwer entflammbar“

### 3.1.4 Akustische Messungen

#### 3.1.4.1 Akustische Prüfverfahren

Zur Bestimmung des Schallabsorptionskoeffizienten eines Materials gibt es zwei primäre Prüfverfahren: das Impedanzrohr, auch bekannt als Kundtsches Rohr, und einen Hallraum. Es gibt jedoch einige grundlegende Unterschiede zwischen den beiden Prüfmethoden.

##### Impedanz-/ Kundtsches Rohr nach ISO 10534

Nach der ISO-Norm 10534 ist das Impedanzrohr für Parameterstudien bei der Entwicklung von Schallabsorbieren geeignet, da nur kleine Proben benötigt werden. Darüber hinaus kann es auch zur Bestimmung der akustischen Oberflächenimpedanz oder Oberflächenadmittanz von schallabsorbierenden Materialien verwendet werden. Die Norm besteht aus zwei Teilen, wobei Teil 1 [39] eine Methode beschreibt, die das Stehwellenverhältnis verwendet, und Teil 2 [40] eine Transferfunktionsmethode. Die Methoden sind ähnlich, aber die Messverfahren sind unterschiedlich. In beiden Fällen wird die zu prüfende Probe an einem Ende eines geraden, starren, glatten und luftdichten Rohrs befestigt, an dessen anderem Ende sich eine Schallquelle befindet. Ein erster Ton wird abgespielt und mit den reflektierten Schallwellen verglichen, die mit Mikrofonen aufgezeichnet werden, um die Absorptionseigenschaften der Probe zu bestimmen. Die Anordnung und Anzahl der Mikrofone hängt von der gewählten Prüftechnik ab.

##### Hallraum Messungen nach ISO 354:2003

Größere Objekte und Schall, der aus mehreren Richtungen kommt, können stattdessen in einem Hallraum geprüft werden. Ein Hallraum ist ein Raum, in dem die Nachhallzeit gemessen wird, bevor und nachdem das absorbierende Objekt in den Raum gestellt wird. Der Vorteil dieses Tests besteht darin, dass er einen besseren Hinweis darauf gibt, wie ein Produkt in einem realen Raum funktionieren wird, aber es sind größere Teststücke erforderlich, die in den frühen Stadien der Materialentwicklung möglicherweise nicht machbar sind. Ein weiterer Vorteil ist, dass er auch für die Prüfung von Diffusoren verwendet werden kann. Gemäß ISO 354:2003 sollte der Raum 150-500 m<sup>3</sup> groß sein, wobei

einige zusätzliche Anforderungen an die Form des Raums gestellt werden. Die Größe des Prüfkörpers hängt von der Art des Absorbers und der Größe des Raums ab [41].

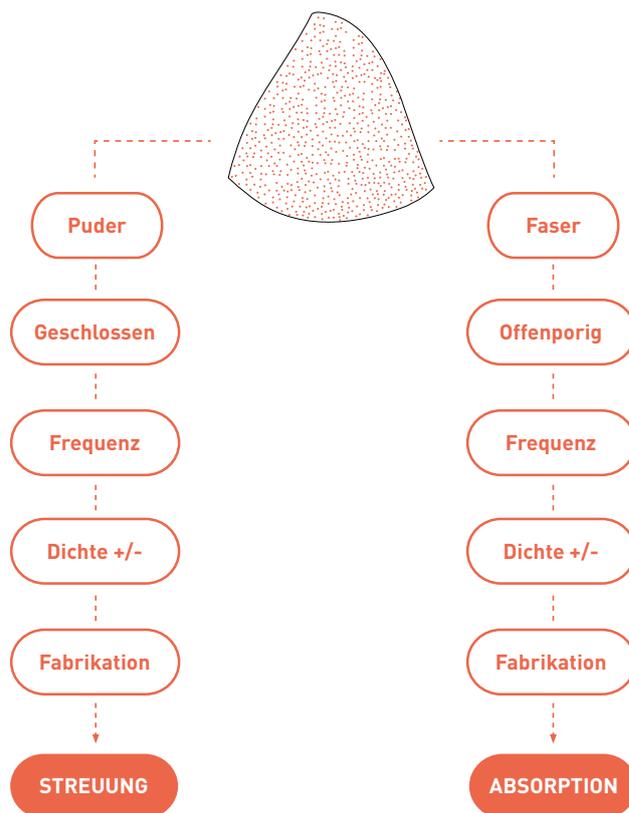


Abb.75: Mit Hilfe von spezifischen Ingredienzien, aber vorwiegend über Partikelgrößen lassen sich die Eigenschaften des Soundverhaltens in Richtung einer Streuung (Holzpuder) oder Absorption (Holzfasern) lenken

##### Luftströmungswiderstand (AFR)

Der Luftströmungswiderstand (Air-Flow Resistivity, AFR) ist eine Messung, die für poröse und faserige Materialien verwendet wird, um ihre potenziellen akustischen Eigenschaften zu bewerten [42]. Die Messung des Luftströmungswiderstands ist in der ISO-Norm 9053 [43] [44] und in der ASTM C-522 [45] definiert. Die ISO-Norm besteht aus zwei Teilen, in denen unterschiedliche Messverfahren beschrieben werden. Die erste Methode, 9053-1:2018 [43], verwendet einen statischen Luftstrom, um den Druckabfall zwischen den beiden Seiten eines Probekörpers zu messen, wenn dieser einem kontrollierten unidirektionalen Luftstrom ausgesetzt ist. Ein runder oder rechteckiger Probekörper wird in einer Messzelle montiert und der Luft-

druck wird auf beiden Seiten des Probekörpers gemessen, da eine Vorrichtung einen gleichmäßigen Luftstrom auf einer Seite des Probekörpers erzeugt. Die Messstellen sollten dicht sein. Außerdem wird die Dicke des Probekörpers gemessen und zur Berechnung des Luftströmungswiderstandes herangezogen. Bei der zweiten Methode, 9053-2:2020 [44], wird ein niederfrequenter Wechselstrom durch einen Kolben erzeugt, der auf einen Lufthohlraum wirkt. Der Hohlraum ist entweder leer und luftdicht oder mit dem Prüfling verschlossen. Der Druck im Inneren des Hohlraums wird für beide Aufbauten gemessen und verglichen, um den Unterschied zu ermitteln.

### Durchführung und Auswertung von Messungen

Insgesamt 20 Proben von 10 Typen wurden mit dem Impedanzrohr und einem Luftströmungswiderstandsmessgerät von „Saint-Gobain, Ecophon“ in ihren Prüfeinrichtungen in Hyllinge, Schweden, getestet. Für die Tests wurden 44,44 mm große Zylinderproben benötigt, aber da es sich um einen organischen Holzwerkstoff handelt, konnten solche präzisen Proben nicht hergestellt werden. Daher wurden Proben mit einem Durchmesser von ~ 40–44 mm angefertigt und anschließend im Rohr mit Klebeband abgedichtet, um eine bessere Passform zu erreichen. Die Proben hatten zwei Dicken, 25 mm und 50 mm, und waren entweder mit einem Stärke- oder Kaseinbindemittel versehen. Für beide Bindemittel und Dicken wurden zwei Partikelgrößen getestet, das größere HW 300/500 mit einer Partikelgröße von etwa 1000 µm und das kleinere WEHO 500 mit einer Partikelgröße von etwa 75 µm. Außerdem wurden vier Sandwichproben mit einem Stärkebindemittel getestet, die sowohl aus einer Schicht HW 300/500 als auch aus einer Schicht WEHO 500 bestanden.

Es muss erwähnt werden, dass die erzielten Ergebnisse durch die Tatsache beeinflusst worden sein könnten, dass die Proben nicht perfekt in das Prüfrohr eingepasst waren, was die Testergebnisse verfälschen könnte. Inwieweit sich dies auf die Ergebnisse ausgewirkt haben könnte, ist zum Zeitpunkt der Abfassung dieses Berichts nicht bekannt. Es wurden jedoch zwei Proben von jedem Typ getestet, und beide zeigten im Allgemeinen die gleichen Tendenzen. Dennoch müssen weitere Tests durchgeführt werden, um die Ergebnisse zu validieren.

Messungen Impedanz-/ Kundtsches Rohr nach ISO 10534

Für die Impedanzrohr-Messung wurde ein Aufbau nach der Norm ISO 10534-2 [44] durchgeführt und drei Mikrofone in Verwendung gebracht. Die Ergebnisse sind in Abb.76 zu sehen. Fünf Referenzfrequenzen - 124, 252, 500, 1000, 2000 Hz - wurden verwendet, um die Variation der Absorption durch verschiedene Frequenzen zu verdeutlichen. Für jede Probe wurde der praktische Schallabsorptionskoeffizient ( $a_p$ ), der gewichtete Schallabsorptionskoeffizient ( $a_w$ ) und eine Klassifizierung gemäß ISO 11654 [46] berechnet.

Impedanzrohr Einstufung,  $a_p$  und  $a_w$

Insgesamt zeigten die Proben Ergebnisse, die industriellen und porösen Absorbieren ähnlich sind; mit geringerer Absorptionsleistung bei niedrigen aber besserer Absorption bei höheren Frequenzen [47]. Bei einer Klassifizierung erhalten die Proben Absorptionsklassen von C-E, mit  $a_p$ -Werten im Bereich von 0,28–0,64 und  $a_w$  bei 0,25–0,65. Fünf der Proben erhalten die höchste Einstufung, C. Sie haben  $a_p$ -Werte im Bereich von 0,53–0,58 und  $a_w$  0,60–0,65 und beziehen sich auf alle 50-mm-Proben mit großen Partikeln oder einer Sandwichstruktur. Drei Proben erhalten die niedrigste Einstufung, E. Diese sind 25 mm hoch und beinhalten große Partikel. Sie haben  $a_p$ -Werte bei 0,43–0,44, aber  $a_w$ -Werte bei deutlich niedrigeren 0,25. Der Hauptgrund für den niedrigen gewichteten Mittelwert und die niedrige Klassifizierung ist ihre schlechte Leistung bei den niedrigen Frequenzen bis 500 Hz. Die anderen 12 getesteten Proben erhalten alle die Klassifizierung D.

TYP	HÖHE	124 Hz	252 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	a <sub>p</sub>	a <sub>w</sub>	CLASS
<b>STÄRKE</b>										
„Feine Partikel“ WEHO 500 ~75 µm	25 mm	0,08 / 0,05	0,25 / 0,16	0,33 / 0,37	0,29 / 0,54	0,37 / 0,65	0,46 / 0,77	0,30 / 0,42	0,35 / 0,40	D
„Feine Partikel“ WEHO 500 ~75 µm	50 mm	0,17 / 0,18	0,27 / 0,30	0,43 / 0,46	0,58 / 0,60	0,63 / 0,64	0,74 / 0,69	0,47 / 0,48	0,50 / 0,50	D
„Große Partikel“ HW 300/500 ~1000 µm	25 mm	0,03 / 0,03	0,06 / 0,07	0,17 / 0,24	0,70 / 0,90	0,85 / 0,67	0,81 / 0,81	0,44 / 0,45	0,25 / 0,3	E / D
„Große Partikel“ HW 300/500 ~1000 µm	50 mm	0,15 / 0,11	0,46 / 0,41	0,61 / 0,76	0,51 / 0,56	0,68 / 0,75	0,78 / 0,76	0,53 / 0,56	0,60 / 0,60	C
„Sandwich“ HW 300/500 + WEHO 500	25 mm	0,04 / 0,04	0,10 / 0,08	0,29 / 0,25	0,65 / 0,66	0,84 / 0,90	0,67 / 0,73	0,43 / 0,45	0,30 / 0,30	D
„Sandwich“ HW 300/500 + WEHO 500	50 mm	0,12 / 0,13	0,39 / 0,39	0,64 / 0,63	0,71 / 0,73	0,76 / 0,73	0,79 / 0,80	0,57 / 0,57	0,65 / 0,65	C
<b>KASEIN</b>										
„Feine Partikel“ WEHO 500 ~75 µm	25 mm	0,09 / 0,07	0,24 / 0,23	0,32 / 0,39	0,30 / 0,40	0,33 / 0,46	0,41 / 0,56	0,28 / 0,35	0,35 / 0,40	D
„Feine Partikel“ WEHO 500 ~75 µm	50 mm	0,16 / 0,19	0,26 / 0,43	0,42 / 0,51	0,51 / 0,59	0,45 / 0,59	0,46 / 0,66	0,38 / 0,50	0,45 / 0,55	D
„Große Partikel“ HW 300/500 ~1000 µm	25 mm	0,03 / 0,03	0,07 / 0,06	0,21 / 0,18	0,77 / 0,70	0,73 / 0,80	0,79 / 0,85	0,43 / 0,44	0,25 / 0,25	E
„Große Partikel“ HW 300/500 ~1000 µm	50 mm	0,08 / 0,08	0,34 / 0,28	0,83 / 0,85	0,57 / 0,90	0,81 / 0,87	0,83 / 0,85	0,58 / 0,64	0,60 / 0,55	C / D

Abb.76: Ergebnisse der Impedanzmessung. Da zwei Proben jedes Typs getestet wurden, werden zwei Werte notiert und mit "/" getrennt

### Partikelgröße

Insgesamt haben die größeren Partikel höhere Absorptionswerte als die kleinen Partikel, dies gilt für beide Bindemittel und über alle Frequenzen hinweg, wodurch diese eine höhere Einstufung erreichen. Dies gilt jedoch mit einigen Ausnahmen. Wie bereits erwähnt, erzielen 25 mm hohe Proben mit großen Partikeln eine weniger zufriedenstellende Leistung bei den niedrigen Frequenzen, während die feineren Partikel bei den gleichen Frequenzen etwas besser abschneiden. Die höhere Absorption bei niedrigen Frequenzen ist jedoch bei den 25-mm-Proben am deutlichsten, und bei den 50-mm-Stärkeproben haben die feinen Partikel beispielsweise nur geringfügig höhere Werte bei 124 Hz. Im Allgemeinen schneiden die Stärke-Sandwich-Proben auf demselben Niveau ab wie die großen Partikel, jedoch mit etwas gleichmäßigeren Werten, wobei der höchste Wert mit 0,65 für die 50-mm-Stärke-Sandwich-Proben festgestellt wurde.

### Bindemittel

Beim Vergleich der Bindemittel erzielt Stärke insgesamt etwas bessere Ergebnisse als Kasein. Dies gilt jedoch mit einigen Ausnahmen. Bei den 50-mm-Großpartikelproben schneidet das Kasein bei den Frequenzen zwischen 500-1000 Hz und 2000-4000 Hz besser ab. Betrachtet man jedoch den gewichteten Durchschnitt und die Klassifizierung, so schneidet die Stärke immer noch genauso gut oder besser ab als das Kasein. So haben beide 50-mm-Stärkeproben mit großen Partikeln einen a<sub>w</sub>-Wert von 0,6 und eine C-Klassifizierung, während eine der Kaseinproben einen a<sub>w</sub>-Wert von 0,55 und eine D-Klassifizierung aufweist. Bei den 50-mm-Feinkornproben übertrifft eine der Kaseinproben die Stärkeproben bei den niedrigsten Frequenzen. Dieses Ergebnis ist jedoch nicht eindeutig, da die andere Kaseinprobe bei der gleichen Frequenz schlechter abschneidet als beide Stärkeproben.

## Dicke

In allen Fällen übertraf die 50-mm-Probe die 25-mm-Proben mit höheren und konstanteren Werten. Am deutlichsten wird dies bei den niedrigen Frequenzen (124–500 Hz), wo die dickeren Proben durchweg besser abschneiden. Die 25-mm-Großpartikelproben erreichen jedoch bei 1000–2000 Hz Spitzenwerte, bei denen sie die 50-mm-Proben übertreffen, aber bei der Klassifizierung erhalten die 50-mm-Proben aufgrund der gleichmäßigeren Werte immer noch eine höhere Klassifizierung. Die 25-mm-Proben mit feinen Partikeln weisen im Allgemeinen konsistentere Werte auf, so dass sie alle in dieselbe Absorptionsklasse D wie die 50-mm-Proben eingestuft werden, auch wenn sie insgesamt niedrigere Werte aufweisen.

## Schlussfolgerung

Die 50-mm-Großpartikel- und Sandwich-Proben schneiden mit einer C-Einstufung am besten ab. Dies gilt jedoch nicht für eine 50-mm-Kaseinprobe mit großen Partikeln, die aufgrund ihrer schlechten Leistung bei den niedrigsten Frequenzen eine D-Einstufung erhielt. Es gibt keine großen Unterschiede zwischen den Bindemitteln, aber einen leichten Vorteil für Stärke, die im Allgemeinen höhere und konsistentere Werte aufweist. Kasein kann lokale Spitzenwerte bei bestimmten Frequenzen oder einzelne Proben aufweisen, die die Stärke übertreffen, aber die Gesamtklassifizierung gibt der Stärke einen leichten Vorteil.

## Messungen des Luftströmungswiderstand (AFR) nach ISO 9053-1: 2018

Für die Messung des Luftströmungswiderstandes (AFR) wurde die Norm ISO 9053-1: 2018 herangezogen. Die AFR-Ergebnisse wiesen größere Schwankungen auf, so dass allgemeine Tendenzen schwieriger zu erkennen sind. Die Ergebnisse sind in Abb.77 zu sehen. Neben dem AFR-Wert enthält die Tabelle auch eine Spalte für die aufgezeichneten Abweichungen zwischen den Tests. Im Allgemeinen nimmt die Zahl der Abweichungen mit dem gemessenen Wert zu. Einige Probentypen wiesen konstantere Werte auf, während andere größere Unterschiede zeigten. Die größten Unterschiede zwischen den Proben wurden bei den Proben mit feinen Partikeln festgestellt, während die größeren

Partikel konsistentere Werte aufwiesen. Die 25-mm-Feinpartikelproben wiesen den größten Unterschied zwischen den Proben auf. Die Stärkeproben wurden mit 91,0 kPa\*s/m<sup>2</sup> und 179,8 kPa\*s/m<sup>2</sup> gemessen, was einen Unterschied von 88,8 kPa\*s/m<sup>2</sup> ergibt, während die Kaseinproben mit 403,2 kPa\*s/m<sup>2</sup> gemessen wurden oder einen zu hohen Druckabfall aufwiesen, so dass der Luftströmungswiderstand nicht gemessen werden konnte.

TYP	HÖHE	AFR-value kPa*s/m <sup>2</sup>	+/- kPa*s/m <sup>2</sup>
<b>STÄRKE</b>			
„Feine Partikel“ WEHO 500 ~75 µm	25 mm	91,0 / 179,8	1,8 / 3,6
„Feine Partikel“ WEHO 500 ~75 µm	50 mm	202,6 / 258,1	4,1 / 5,2
„Große Partikel“ HW 300/500 ~1000 µm	25 mm	8,4 / 11,9	0,2 / 0,2
„Große Partikel“ HW 300/500 ~1000 µm	50 mm	24,5 / 37,9	0,5 / 0,8
„Sandwich“ HW 300/500 + WEHO 500	25 mm	211,1 / 241,0	4,2 / 4,6
„Sandwich“ HW 300/500 + WEHO 500	50 mm	62,4 / 67,6	1,3 / 1,4
<b>KASEIN</b>			
„Feine Partikel“ WEHO 500 ~75 µm	25 mm	403,2 / PDO*	8,1 / -
„Feine Partikel“ WEHO 500 ~75 µm	50 mm	90,1 / 286,4	1,8 / 5,7
„Große Partikel“ HW 300/500 ~1000 µm	25 mm	12,0 / 27,3	0,2 / 0,5
„Große Partikel“ HW 300/500 ~1000 µm	50 mm	17,8 / 19,1	0,4 / 0,4

Abb.77: Ergebnisse des Luftströmungswiderstands. Da zwei Proben jedes Typs getestet wurden, werden zwei Werte notiert und mit "/" getrennt. \* = Druckabfall Überlast

## Partikel

Insgesamt schnitten die größeren Partikel besser ab als die feinen Partikel. Die großen Partikel schnitten in einem Bereich von 8–37,9 kPa\*s/m<sup>2</sup> ab, während die größeren Partikel in einem Bereich von 90,1–403,2 kPa\*s/m<sup>2</sup> abschnitten. Die Sandwich-Proben schnitten im Bereich von 62,4–231,0 kPa\*s/m<sup>2</sup> ab und lagen damit im Mittelfeld der Partikeltypen.

## Bindemittel

Es konnte keine klare Präferenz für eines der Bindemittel festgestellt werden. Stärke schnitt mit niedrigeren und konstanteren Werten etwas besser ab, außer bei den Proben mit 50 mm großen Partikeln. Die AFR-Werte für die 50 mm großen Kaseinproben wurden mit 17,8 kPa\*s/m<sup>2</sup> und 19,1 kPa\*s/m<sup>2</sup> gemessen, während die Stärkeproben 24,5 kPa\*s/m<sup>2</sup> und 37,9 kPa\*s/m<sup>2</sup> ergaben. Damit liegen beide Typen im unteren Bereich der erreichten Prüfwerte, allerdings mit einem leichten Vorteil für Kasein. Bei den 50-mm-Feinkornproben wurde das Kasein mit 90,1 kPa\*s/m und 286,4 kPa\*s/m gemessen, während die Stärkeproben mit 202,6 kPa\*s/m und 258,1 kPa\*s/m gemessen wurden, womit das Kasein sowohl den höchsten als auch den niedrigsten Wert in dieser Kategorie erreichte.

## Dicke

Im Gegensatz zum Impedanzrohr schnitten die 25-mm-Proben mit niedrigeren Werten insgesamt besser ab als die 50-mm-Proben. Dieser Trend ist jedoch nicht bei allen Typen gleich und es wurden mehrere Ausnahmen festgestellt. Eine eindeutige Ausnahme bilden die Sandwich-Proben, bei denen die 50-mm-Probe deutlich besser abschnitt als die 25-mm-Probe, mit 62,4 kPa\*s/m<sup>2</sup> und 67,6 kPa\*s/m<sup>2</sup> im Vergleich zu 211,1 kPa\*s/m<sup>2</sup> und 241,0 kPa\*s/m<sup>2</sup>. Eine weitere Ausnahme bilden die feinkörnigen Kaseinproben, bei denen die 50-mm-Proben besser abschnitten als die 25-mm-Proben. Außerdem ergaben die 50-mm-Proben im Allgemeinen konstantere Werte.

## Schlussfolgerung

Es ist schwieriger, eindeutige Schlussfolgerungen aus den AFR-Ergebnissen zu ziehen, da die größeren Schwankungen der Ergebnisse die Erkennung allgemeiner Trends erschweren. Es ist jedoch offensichtlich, dass die Proben mit großen Partikeln und die 50-mm-Sandwichprobe am besten abschnitten, da die Proben mit großen Partikeln konstantere Werte aufwiesen als die Proben mit kleinen Partikeln. Es gibt keinen eindeutigen Unterschied zwischen den Bindemitteln, aber es lässt sich ein leichter Vorteil für Stärke erkennen, da sie im Allgemeinen mit niedrigeren und konstanteren Werten abschneidet. Dies gilt jedoch nicht für die 50 mm großen Partikelproben, bei denen Kasein die niedrigsten Werte aufweist.

Daraus lässt sich nicht schließen, welchen Einfluss die Dicke hat. Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass die Prüfmethode die Dicke bei der Berechnung des AFR-Wertes berücksichtigt. Es müssten jedoch weitere Tests durchgeführt werden, um die Ergebnisse zu verifizieren und den Grund für das abweichende Verhalten der verschiedenen Typen zu ermitteln.

## 3.2 Analyseverfahren & Charakterisierung

### 3.2.1 Trocknungsverhalten & Strategien

#### 3.2.1.1 Trocknungsprofil/ Schwinden- und Ausdehnungsverhalten

##### Lufttrocknung

Untersuchungen von Schwind und Ausdehnverhalten von Akustikelementen wurde unter der Einwirkung einer Lufttrocknung untersucht bei einer durchschnittlichen Raumtemperatur von 27° C (Schwankungen zwischen 24,5 - 27° C) und einer relativen Luftfeuchte zwischen 35–45 % durchgeführt.

Dazu wurden Proben direkt nach der Produktion und in täglichen Intervallen gewogen als auch mittig aufgesägt um die Abtrocknung beobachten zu können. Der Feuchteverlauf ist visuell sichtbar durch dunkel verlaufende Stellen im Material. Die bereits abgetrockneten Stellen heben sich klar ab durch eine helle Farbgebung (siehe Abb.78). Die hellen Strukturen wurden mit einem Messschieber vermessen und protokolliert als auch fotografisch festgehalten.

Die Ergebnisse zeigten, dass die Prüfkörper (~ Ø44 mm; Höhe ca. 50 mm) unabhängig von der Auswahl des Binders oder Partikelgrößen zu Beginn schnell abtrocknen (ca. 5 mm nach sechs Stunden im Randbereich).

Innerhalb von 24 Stunden reduzierte sich das Gewicht bei Kasein Proben um die Hälfte. Mit Weizenstärke versetzte Proben reduzierte sich das Gewicht um ca. 25 %.

Im weiteren Verlauf trockneten die Proben mit dem Stärkebinder deutlich schneller, nach ca. 48 Stunden haben die Proben ihre Gleichgewichtsfeuchte von ca. 7 % erreicht. Dabei schwinden die Proben (gilt für Fasern als auch Holzmehl gleichermaßen) in der Horizontalen um ca. 0,5 - 1 mm und in der Vertikalen quellen sie bis zu 1 mm auf.

Das Kasein-Holzmehl-Gemisch dagegen benötigt 5 Tage zum Erreichen der Gleichgewichtsfeuchte von ca. 7 %. Dabei schwinden die Proben horizontal um ca. 2 mm und vertikal um 1 mm.

Im Vergleich zu Stärkeproben (gilt für Fasern als auch Holzmehl gleichermaßen) tritt bei Kaseinproben die größte Volumenveränderung auf (dies gilt auch für Fasern und Holzmehl). Bei einer ungenügenden Pressung kann die Probe in der Vertikalen bis zu 10 mm quellen und horizontal bis zu 3 mm. Besonders bei der vertikalen Quellung sind Rissbildungen deutlich sichtbar. Im Durchschnitt liegen die Werte bei ausreichendem Pressdruck und Dauer (10 Minuten bei einer Kraft von 2 kN (entspricht ≈ 200 kg)) um 5 mm in der Vertikalen und 1,5 mm in der Horizontalen.

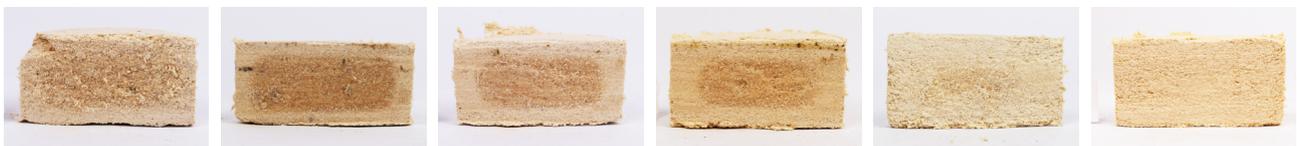


Abb.78: Trocknungsverlauf. Transport der Feuchtigkeit vom Probeninneren an die Probenoberfläche. Entwicklung über 3 Tage

## Thermische Trocknung

Untersuchungen wurden in einem Trockenschrank der Firma „memmert“ im Backverfahren durchgeführt. Dabei wurden die Proben bei einer konstanten Temperatur von 65 °C im Modus „fresh air“ gelagert.

Bei einer Temperatur von 65 °C zeigte sich, dass Stärke als auch Kaseinproben, mit Fasern als auch Holzmehl, bereits nach 24 Stunden vollständig durchgetrocknet sind. Die Proben mit Weizenstärke schwinden um 1 mm in der Horizontalen. Das Stärke-Faser-Gemisch quillt vertikal um 4 mm auf und das Stärke-Holzmehl-Gemisch um 1 mm. Die Proben mit dem Kasein-Faser-Gemisch quellten in der Horizontalen um ca. 1 mm und vertikal 11 bis zu 13 mm auf, unabhängig wie viel Kraft zur Pressung der Proben aufgewendet wurde. Die vertikale Quellung hat wie bei der Lufttrocknung eine Rissbildung zur Folge. Das Kasein-Holzmehl-Gemisch hingegen weist bei der thermischen Trocknung eine konstante Volumenveränderung auf. Vertikal schwindet diese um 1 bis 1,3 mm und horizontal 0,8 bis 1 mm.

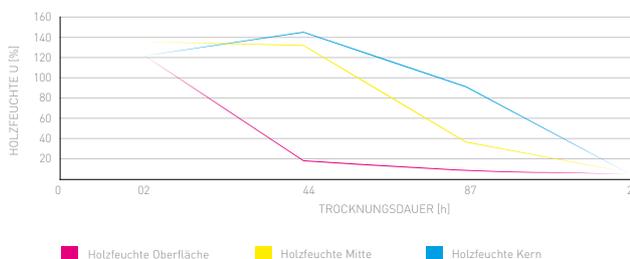


Abb.79: Trocknungszeit bezogen auf Proben (Ø75 mm; Höhe ca. 35 mm) a.) Oberfläche b.) Inneren c.) Kern

## Alternative Strategien

In dem vorliegenden Projekt konnte durch Rezeptur- und Prozessanpassungen der Wasseranteil erheblich reduziert werden, somit konnte auf thermische und alternative Trocknungsverfahren verzichtet werden.

Trotzdem stellen diese eine Alternative dar, um den Trocknungsprozess bei Bedarf – gegenüber einer Lufttrocknung – zu beschleunigen.

Zu den folgend aufgeführten Alternativen, wurde ausführlich in dem Vorgängerprojekt Bezug genommen

(SWD-10.08.18.7-18.30 „SUCO; Nachhaltige und wiederverwendbare Schalungen zur Realisierung komplexer Betonfertigteile“). Diese bieten – im Gegensatz zu einem thermischen Verfahren – eine schonendere und umweltfreundlichere Trocknung der Akustikplatten.

Zur Vervollständigung der Trocknungsstrategien werden die zwei Alternativen hier repetitiv aufgeführt. Es wird ein neuartiges und innovatives, beschleunigtes Trocknungsverfahren (Drywoodboxx) und die Entwicklung einer abgewandelten neuen Fertigungsstrategie durch die Herstellung von dünnen und schnell lufttrocknenden Halbzeugen beschrieben.

## Drywoodboxx

Zur weiteren Betrachtung und Optimierung des Trocknungsverhaltens wurden zusätzliche Rohrproben (mit dem gleichen o.g. Versuchsaufbau Ø 75 mm; Höhe ca. 34 mm) in einer Trockenkammer der Firma „drywoodboxx GmbH“ untersucht. Das in Kassel-Fulda ansässige Unternehmen ist spezialisiert auf energieeffiziente Trocknungsanlagen für Brennholz. Mit der Entwicklung eines innovativen Verfahrens, das die räumliche Distanz zwischen Heizregister und Trockengut aufhebt, lassen sich die bei herkömmlicher Frischluft-/Abluft-Trocknung eingesetzten Umluftventilatoren, die einen hohen Verbrauch an elektrischer Energie haben, vermeiden. So lässt sich der Energieverbrauch und damit die Energiekosten sowie die Umweltbelastung verringern. Darüber hinaus lassen sich Trocknungszeiten mit dem Verfahren merklich reduzieren, da die Wärme nicht diffus im Raum gestreut wird, sondern direkt angeleitet wird.

Abb.31 zeigt die untersuchten Rohrproben in der technischen Trockenkammer. Eine Feuchtemessung erfolgte mittels teflonbeschichteter Elektroden, die nach 24 Stunden in jede einzelne Probe eingesteckt wurden. Abb.32 und Abb.33 zeigt den ermittelten Holzfeuchteverlauf an der (a) Oberfläche, in der (b) Zwischenzone sowie im (c) Kern über 72 Stunden. Dabei lag die Holzfeuchte (u) zu Beginn der Untersuchungen in allen drei Zonen zwischen 120 % und 140 %. Die Oberfläche erreichte bereits nach 24 Stunden einen Wert von unter 20 %, wohingegen die Feuchte im Kern und in der Zwischenzone noch ca. 140 % betragen. Die sicht-

bare Durchtrocknung begann an der Probenoberfläche und wanderte zwischen 4 und 6 mm in Richtung Kern. An der Oberfläche nahm der Feuchtegehalt nun deutlich langsamer ab; nach 48 Stunden lag der Wert bei ca. 8 %, nach 72 Stunden bei ca. 5 %. Im Kern senkte sich der Verlauf der Holzfeuchte-Kurve nach 24 Stunden nahezu linear ab und erreichte nach 72 Stunden einen Wert von 6,5 %. Der Feuchtegehalt in der Zwischenzone lag nach 48 Stunden ungefähr in der Mitte; zwischen Oberfläche und Kern. Die sichtbare Durchtrocknung betrug 12-14 mm beginnend von der Oberfläche.

Alle drei Bereiche wiesen nach 72 Stunden eine Holzfeuchte zwischen 5 % und 6,5 % auf, sodass der Trocknungsprozess nahezu vollständig (>98 %) abgeschlossen war.

### Entwicklung eines Halbzeugs im Lagenprinzip

Um den zeitintensiven Trocknungsprozess von holzbasierten Akustikelementen zu beschleunigen, wurde im Zuge der vorausgegangenen Forschungsarbeiten ein Konzept für aufeinandergeschichtete Lagen entwickelt. Hierfür wurden im ersten Schritt geeignete Halbzeuge mit definierter Materialstärke in einem standardisierten Fertigungsprozess hergestellt.

Die Fertigung entsprach dem Vorgehen zur Herstellung von Holzspan-Stärke-Rohlingen (siehe Kapitel 1.4.1 „Stärke“). Im zweiten Schritt wurden die einzelnen Lagen mit einem eigens entwickelten Stärkekleister verleimt und miteinander verpresst. Die Oberfläche der Halbzeuge wurde hierfür

zunächst leicht angeraut und mit Wasser befeuchtet, um den Verbund der Lagen zu gewährleisten. In Versuchsreihen konnte nachgewiesen werden, dass beim Fräsen der verleimten Spanrohlinge keine Abrisse durch die einzelnen Schichten entstanden und die Oberflächenqualität ebenso unbeeinträchtigt blieb. Ein monolithisch gefertigter Holzspan-Rohling mit den Maßen 20 x 20 x 5 cm benötigt ca. sieben Tage zum Durchzutrocknen. Lagen mit einer Materialstärke von 2 cm sind hingegen – aufgrund ihrer großen Oberfläche und im Vergleich zum Volumen – bereits nach ca. einem Tag luftgetrocknet; hieraus resultiert ein Zeitersparnis von rund 90 %. Folgend werden beide Verfahren gegenübergestellt und miteinander verglichen.

#### Vorteile:

- > Zeitersparnis der Trocknung von ca. 90 % im Vergleich zu voluminösen Holzspanrohlingen
- > einfacher Herstellungsprozess dank standardisierter Fertigungsverfahren (Spanplattenindustrie)
- > beschleunigter Herstellungsprozess
- > keine Limitierung in der Höhe der Akustikelemente und damit freiere Geometriewahl
- > keine weiteren Additive zur Schimmelvermeidung notwendig

#### Nachteile:

- > mögliche Schüsselbildung der dünnen Lagen
- > zusätzliche Prozessschritte wie Verleimen und Pressen der einzelnen Lagen
- > reduzierte Fräsgeschwindigkeit aufgrund von Leimschichten

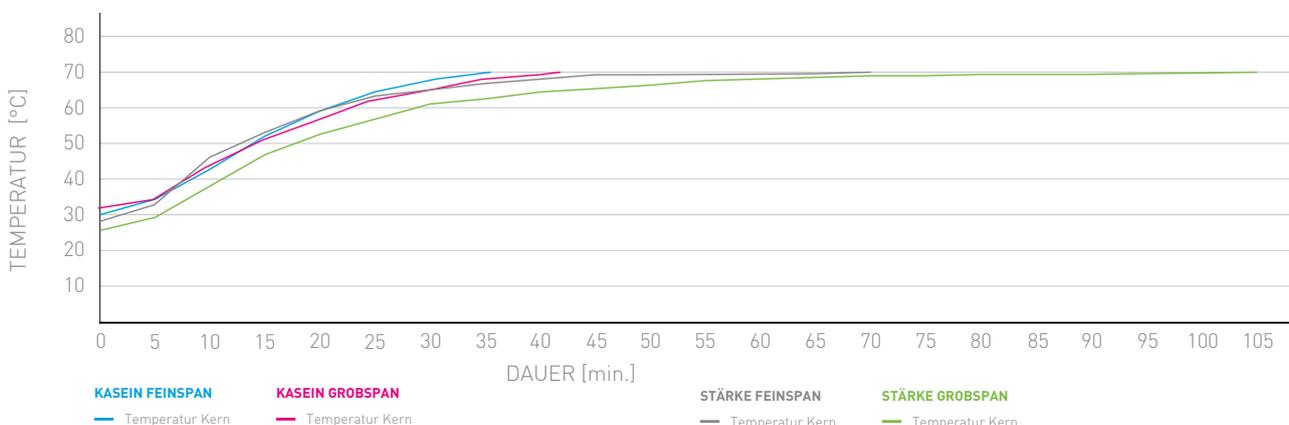


Abb.80: Temperaturverlauf zur Evaluierung, nach wieviel Minuten der Wärmeeintrag x (hier 70 °C) das Probeninnere erreicht

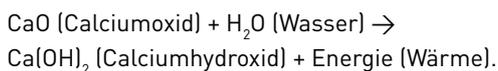
### Beschleunigte Trocknung durch Heißpressung

Neben den bereits o.g. Parametern zeigt der Temperaturertrag – bei der Heißpressung des noch feuchten Formstoffrohlings – Auswirkungen auf die Wärmebildung in den Rohlingen (Oberfläche und Kern) und dem Trocknungsverlauf. Der Versuchsaufbau unterscheidet zwischen den Bindern Stärke und Kasein als auch jeweils in den Partikelgrößen wie folgt:

- (1) Stärke Holzpulver (WEHO 500/ ~ 75 µm)
- (2) Stärke Holzfasern (HW 300/500 ~ 1000 µm)
- (3) Kasein Holzpulver (WEHO 500/ ~ 75 µm)
- (4) Kasein Holzfasern (HW 300/500 ~ 1000 µm)

Die Forschungsfrage lautet bei der Erhebung, wann die aufgewendete Temperatur von 70 °C auch im Probeninneren ankommt um auch dort eine Abtrocknung und Abtransport der eingeschlossenen Feuchte zu erzielen und somit eine Trocknung zu beschleunigen. Zur Evaluierung wurden die vorgepressten Rohlinge auf die bereits auf 70 % vorgeheizten Backen gelegt und unter Druck gepresst. Ein seitlich eingeschobenes Temperaturmessgerät wird bis in den Kern der 20 x 20 x 5 cm Proben geführt und minütlich Aufzeichnungen zum Wärmeverlauf automatisch durchgeführt.

Auffällig ist, dass Stärke-Proben bei einer niedrigeren Ausgangstemperatur starten (Faserproben: 26,5 °C, Pulverproben: 26,6 °C) als Kasein-Proben (Faserproben: 31 °C, Pulverproben: 30,6 °C). Zu vermuten ist, dass der zur Herstellung des Kaseinleims benötigte Löschkalk durch die Hinzugabe von Wasser chemisch reagiert und Wärme freisetzt. Bei der Zugabe von Wasser entsteht Calciumhydroxid. Diese Reaktion verläuft stark exotherm:



70 °C im Kern der Proben erreicht nach:

- 1.) Stärke Holzpulver (WEHO 500/ ~ 75 µm)

-> 78 Minuten

- 2.) Stärke Holzfasern (HW 300/500 ~ 1000 µm)

-> 115 Minuten

- 3.) Kasein Holzpulver (WEHO 500/ ~ 75 µm)

-> 35 Minuten

- 4.) Kasein Holzfasern (HW 300/500 ~ 1000 µm)

-> 41 Minuten

### Resümee der angewendeten Trocknungsarten

Eine schonende Raumlufттrocknung brachte lange Trocknungszeiten von ca. vier bis sechs Tagen mit sich. Durch die thermische Trocknung bei ca. 65 °C im Trockenschrank ließ sich die Dauer des Trocknungsprozess für jedes Binder-Gemisch auf 24 Stunden reduzieren. Durch den schnelleren Trocknungsprozess haben die Proben im Trockenschrank ein erhöhtes Quell- und Schwindmaß im Vergleich zu der Raumlufттrocknung erfahren. Allgemein lässt sich formulieren, dass die Prüfkörper, unabhängig ihrer Trocknungsart, in der Vertikalen eine Quellung und in der Horizontalen ein Schwinden der Volumenmaße erfahren. Nachfolgende Werte veranschaulichen den Unterschied zwischen den Trocknungsprozess im Trockenschrank und durch Raumluft. Bei dem Weizenstärke-Faser-Gemisch sind die Proben im Trockenschrank um 3 mm (Quellmaß 4 mm) mehr in der Vertikalen aufgequollen als an der Raumluft (Quellmaß 1 mm). In der Horizontalen dagegen erfahren die Proben im Durchschnitt ähnliche Volumenänderung (Schwindmaß 0,5–1,5 mm). Weiter sind die Kasein-Faser-Gemische hervorzuheben, welche abhängig ihr Fertigungsqualität unterschiedliche Schwind- und Quellmaße aufweisen. So können weniger komprimierte Probekörper in der Raumluft bis zu 11 mm in der Vertikalen und stark komprimierte Proben nur max. 4 mm quellen. Aus den erhobenen Daten lässt sich erkennen, dass die Prüfkörper im Trockenschrank eine stärkere und schnellere Volumenänderung erfahren und auch diese zu starken Rissbildung führen kann (vgl. Kasein-Faser-Gemisch). Werden die Probekörper nach 24 Stunden aus dem Trockenschrank entnommen und bei Raumluft gelagert, zeigt sich, dass die Proben innerhalb der nächsten 24 Stunden ihre Ausgleichsfeuchte erreicht

haben. Im Vergleich: die raumluftgelagerten Proben benötigen bis zu fünf Tagen, um diese zu erreichen.

Eine energieeffiziente und somit umweltschonendere als auch kostensparende Alternative bietet das Verfahren von „Drywoodboxx“. Die untersuchten Testkörper wiesen keine vermehrte Rissbildung durch Quellen auf. Untersuchungen an skalierten Testkörpern (unterschiedlicher Volumina) zeigten weiterhin, dass die Trocknungszeiten maßgeblich von der Größe bzw. dem Volumen der Proben abhängig sind. Ausschlaggebend für eine beschleunigte Trocknung ist dabei ein geringer Abstand zwischen Kern und Oberfläche. Auf diesem Trocknungsweg wird die Feuchtigkeit aus dem Inneren nach außen transportiert. Die Trocknungszeit lässt sich folgernd über die Materialstärke einstellen und optimieren. Je geringer die Materialstärke, umso größer die Oberfläche im Vergleich zum Volumen, woraus ein beschleunigter Transport der Feuchtigkeit aus dem Kern und damit schnellerer Trocknungsprozess resultiert.

### 3.2.2 Materialfeuchte

Zur Messdatenerfassung der Materialfeuchte und dazu abhängigen Parametern wie Luftfeuchte, Temperatur, Gewicht, Rissbewegung, Gewichtsmessung und Spannung wurde ein Messgerät bestehend aus einer Messeinheit (mit acht Kanälen) und einem Speichermodul sowie Auswertungssoftware des Unternehmens „Scantronic“ verwendet.

Zwischen zwei gesetzten Elektroden wird der elektrische Widerstand im Material gemessen und somit die Materialfeuchte bestimmt. Messpunkte wurden jeweils mittig und in Randbereichen gesetzt, um ein Trocknungsprofil erstellen zu können. Ebenso ist eine dauerhafte Messung in Intervallen (Sekunden/ Minuten/ Stunden/ Tage/ Wochen) möglich, um eine präzise Auswertung über das Trocknungsverhalten über einen längeren Zeitraum evaluieren zu können. Eine Software ermöglicht die Auswertung und Gegenüberstellung unterschiedlicher Messdaten in unterschiedlichen Darstellungsformen wie Grafiken oder Tabellen. Um mikrobiellen Befall zu verhindern, ist eine Entfeuchtung notwendig und die Wasseraktivität grundsätzlich auf Werte unterhalb des Wachstumsbereichs von Mikroorganismen

abzusenken. Es wurde zur Umsetzung eine relative Materialfeuchte zwischen 5 % und 15 % festgesetzt.



Abb.81: Messung des elektrischen Widerstands im Material durch Elektroden. Dauerhafte Feuchtemessung in Intervallen möglich

Alle folgenden Messungen wurden an Prüfkörpern (variierend nach Binder- und Partikeltyp (Pulver/ Partikel) mit den Maßen 20 x 20 x 5 cm und einer Dichte von 300 kg/m<sup>3</sup> durchgeführt. Die Messungen fanden im Innenraum statt, bei einer Durchschnittstemperatur von 27 °C (Schwankungen zwischen 24,5 °C bis 28,5 °C) und einer Luftfeuchte zwischen 35 % und 45 %. Daraus ergaben sich folgende Testreihen, dessen Messwerte im folgendem nach Bindertyp aufgeschlüsselt erläutert werden:

- (1) Stärke Holzpulver (WEHO 500/ ~ 75 µm)
- (2) Stärke Holzfasern (HW 300/500 ~ 1000 µm)
- (3) Kasein Holzpulver (WEHO 500/ ~ 75 µm)
- (4) Kasein Holzfasern (HW 300/500 ~ 1000 µm)
- (5) Albumin Holzpulver (WEHO 500/ ~ 75 µm)
- (6) Albumin Holzfasern (HW 300/500 ~ 1000 µm)

Die Proben haben nach der Produktion einen Feuchtegehalt von 85 % (Kern und Randbereich). Bei Faser-Proben liegt die Anfangsfeuchte im Randbereich bei 80 %; im Kern auch bei 85 %.

### 3.2.2.1 Materialfeuchte/ Stärke

Innerhalb der ersten 24 Stunden sinkt die Feuchtigkeit in Faser-Proben (Kern und Randbereich) auf 40 %. Alle folgenden Werte können grafisch aufbereitet – und im Vergleich zu anderen Bindemitteln – der Abb.82 entnommen werden.

#### Messungen im Randbereich

Nach acht Tagen erreichen Faser- als auch Mehl-Proben die Zielfeuchte von 15 % im Randbereich. Nach 12 Tagen hat sich ein Minimalwert von 10 % Materialfeuchte eingestellt.

Nach den ersten 24 Stunden sinkt die Feuchte in Holzmehl-Proben im Kern auf 55 % und im Randbereich auf 50%.

Die anfänglich starke Entfeuchtung von Holzfasern im Kernbereich stagniert nach fünf Tagen und es gibt – mit leichten Differenzen zwischen 2 % und 5 % – eine Angleichung an Holzmehl-Proben (ebenso Kern).

#### Messungen im Kernbereich

Erst nach 14 Tagen stagniert die Abtrocknung bei feinen und groben Partikeln im Kern. Es kann ein minimaler Feuchtwert U von 15 % (Mehl und Fasern) im Kern erzielt werden und wie o.g. im Randbereich nach 12 Tagen 10% (Mehl und Fasern).

Dabei hat sich gezeigt, dass Unterschiede im Trocknungsverhalten zwischen Holzmehl (WEHO 500/ ~ 75 µm) und Holzfasern (HW 300/500/ ~ 1000 µm) bestehen als auch den Messbereichen (Kern / Randbereich).

### 3.2.2.2 Materialfeuchte/ Kasein

#### Messungen im Randbereich

In den Randbereichen stellen sich bereits bei Fein- als auch Grobspanproben nach 24 Stunden eine Materialfeuchte von 30 % (von ursprünglich 80 %) ein. Ab Tag 5 gleichen sich die Feuchtwerte der Partikelgrößen bei 10 % an. Ab Tag 7 sind

die Werte unter 10 % und ab Tag 12 stellt sich eine absolute Feuchte zwischen 5 % und 6 % ein.

#### Messungen im Kernbereich

Ein Unterschied im Abtrocknungsverhalten ist bei Fein- und Grobspan im Kern zu verzeichnen. Feinspan erreicht nach 24 Stunden eine Materialfeuchte von 40 % und Grobspan 48 %. Im weiteren Verlauf gibt es ab Tag 12 eine Angleichung der Feuchte beider Partikelgrößen bei ca. 10 %. Nach 14 Tagen ist eine absolute Materialfeuchte von ca. 8 % im Kern und aller Partikelgrößen erreicht.

Resümierend kann hier bereits festgehalten werden, dass Kasein-Proben im Vergleich zu den anderen Bindemitteln die kürzeste Trocknungszeit beanspruchen. Löschkalk agiert als natürliches Fungizid und es bedarf kein Zusatz von hemmenden Additiven. Es wird davon ausgegangen, dass durch die Zugabe von Kalk der PH-Wert der Rezeptur zu „sauer“ tendiert, was zu einer natürlichen Schimmelhemmung führt.

### 3.2.2.3 Materialfeuchte/ Albumin

Die Ausgangsfeuchte beträgt 38 % und ist damit vergleichsweise niedrig im Vergleich zu anderen Bindern, dessen Ausgangsfeuchte ca. 80 % beträgt. Im weiteren Trocknungsverlauf gibt es nur leicht variierende Werte zwischen Kern- und Randbereich. Die geringe Ausgangsfeuchte hat keine Auswirkung auf die Zielfeuchte, die sich wie alle anderen Binder erst nach ein paar Tagen einstellt. Zu beobachten ist, dass auch nach ca. 16 Tagen noch ca. 18 % Feuchtigkeit vorhanden ist. Andere Binder-Variationen erlangen niedrige Zielwerte unter 10 % Restfeuchte.

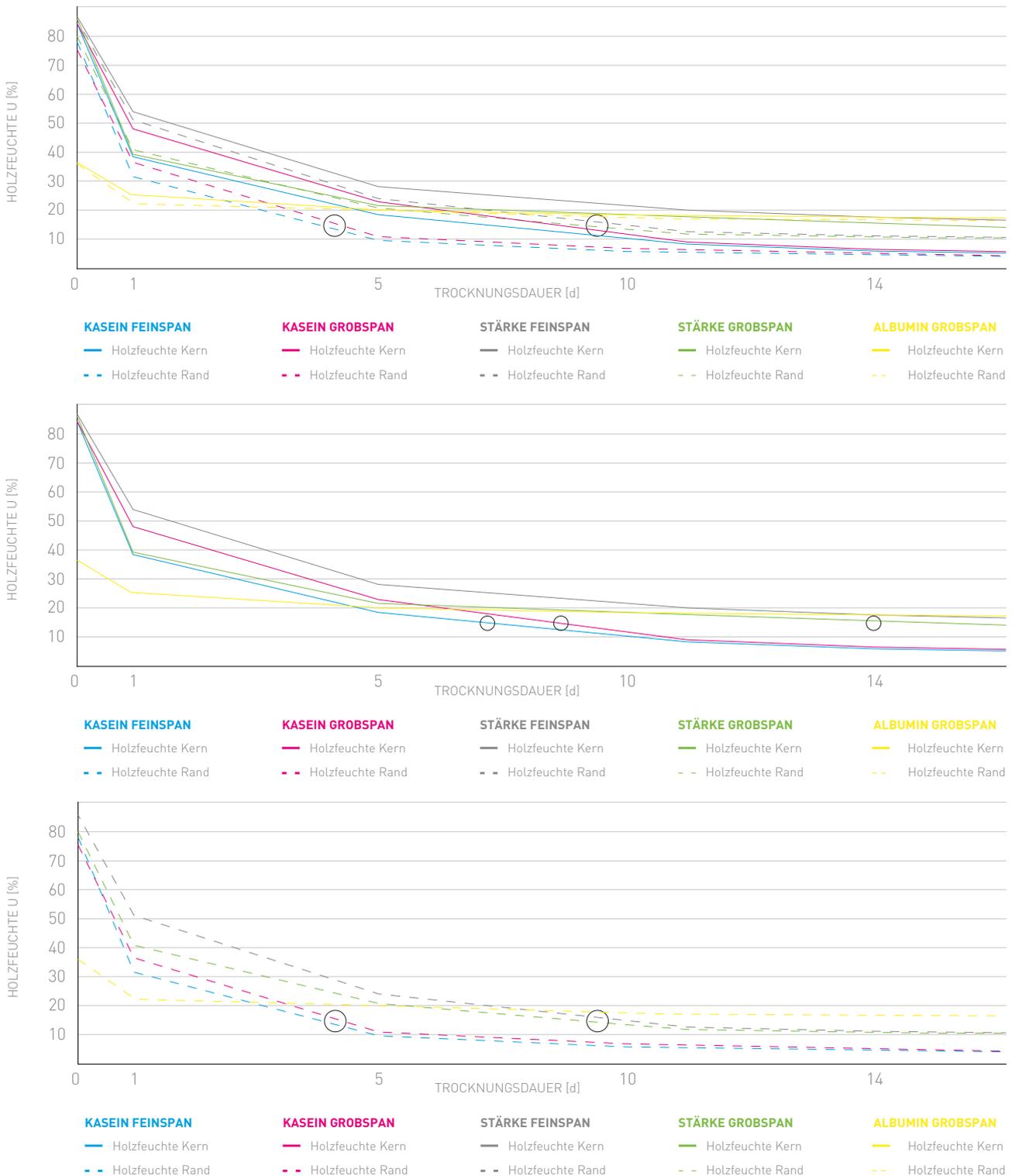


Abb.82: Auswertung der Materialfeuchte pro 1.) Bindemittel 2.) Bereich wie a.) Kern und b.) Randbereich 3.) Aufteilung nach Partikelgröße a.) Feinspan b.) Grobspan. Oben: Gesamtauswertung aller Indikatoren, Mitte: Darstellung für den Kernbereich Unten: Darstellung für Randbereich

### 3.3 Nachhaltigkeitsparameter

#### 3.3.1 Rückführung, Recycling & Kreislaufwirtschaft

Im Forschungsprojekt kam der Rückführung der Formstoffe eine besondere Bedeutung zu, denn erst durch diese wird aus den verwendeten Materialien ein Produktionskreislauf im Sinne des Zero-Waste-Gedankens.

Um ein ökologisch-nachhaltiges Verfahren zu entwickeln, sollte der Energieaufwand für die Rückführung der Formstoffe möglichst gering gehalten werden. Außerdem sollte Abstand genommen werden von Verfahren, die Emissionen bzw. gesundheitsschädliche Stoffe einsetzen, freisetzen oder schwer zu reinigendes Abwasser produzieren.

Daher setzte das Projekt auf den Verzicht von schädlichen Additiven und weiteren Zusätzen, die eine sortenreine Rückführung erschweren oder gar verhindern, um die Recyclingfähigkeit zu vereinfachen und zu garantieren.

Wie folgt werden Rückführungsstrategien erläutert, welche im Vorgängerprojekt (SWD-10.08.18.7-18.30 „SUCO; Nachhaltige und wiederverwendbare Schalungen zur Realisierung komplexer Betonfertigteile“) bereits aufgeführt wurden und hier zur Vervollständigung des vorliegenden Berichts erneut aufgeführt werden:

Studien haben aufgezeigt, dass zwei Rückführungsweisen möglich sind: Eine mechanische Aufbereitung durch Schreddern sowie das Auflösen der Körper in einem Wasserbad.

##### 3.3.1.1 Rückführung durch Schreddern

Eine Rückführung der Akustikelemente, in ihren ursprünglichen Formstoffzustand kann durch Schreddern erfolgen. Bei der Zerkleinerungsweise können durch die Wahl und einen Wechsel des Schredderwerkzeuges unterschiedliche Spangeometrien und Längen erzeugt werden (siehe Abb.84). Der lose, trockene Formstoff muss zur erneuten Formung mit Wasser angereichert werden.

Zur Evaluierung der Rückführbarkeit von Akustikpaneelen wurden Untersuchungen an Probekörpern (Rohrprobe Ø 75

mm, Höhe ca. 34 mm) unterschiedlicher Binder und Partikelgrößen durchgeführt. Diese wurden zunächst mit einem geeigneten Schredderwerkzeug (siehe u.s.) zerkleinert, um den losen Formstoff unter Beigabe von Wasser erneut zu mischen, pressen und abschließend auf einem Gitterrost an der Luft zu trocknen.

Ziel war es, folgende Parameter und Fragestellungen zu erforschen: (a) Wie muss das Element zerkleinert werden? (b) Wie fein muss der gemahlene Span sein? (c) Wie groß ist der prozentuale Materialausschuss pro Zyklus? (d) Ab welcher Wiederholungsrate muss erneut Stärke hinzugefügt werden? (e) Lassen sich die Proben auch ohne erneute Beigabe von Bindemittel rückführen? (f) Ist bei weiterer Zugabe von Bindemitteln das Recyclat aber einer bestimmten Wiederholungsrate mit dem Formstoffbinder übersättigt? (g) Wie wirkt sich eine Rückführung auf die Druckfestigkeit und Oberflächengüte der Akustikelemente aus?

Zur näheren Betrachtung der genannten Parameter wurde das Ausgangsgewicht der Proben in getrocknetem Zustand, das Gewicht des geschredderten Spans, der Verlust nach dem Zerkleinern sowie das Gewicht der verpressten Proben in feuchtem und getrocknetem Zustand gemessen.

Um geeignete Fasergeometrien und -längen zu erzeugen, wurden unterschiedliche Schredderwerkzeuge untersucht (siehe Abb.84). Studien zeigten, dass sich sowohl feineres Mehl als auch längliche Fasern für ein erneutes Verpressen eignen. Beim Zerkleinern der Probekörper ergab sich ein durchschnittlicher Materialausschuss von 1–2 % pro Zyklus. Um den Materialausschuss zu kompensieren und gleichzeitig zu erforschen, wie sich ein zusätzlicher Anteil an Bindemittel auf das Resultat auswirkt, wurde ein rezepturentsprechendes, prozentuales Maß von frischem Holz und Binder bei gleichbleibendem Wasseranteil hinzugegeben. Die Beigabe erfolgte lediglich an einem der beiden untersuchten Proben (Probe 1); der andere Probekörper (Probe 2) wurde ohne Zusätze mit gleichbleibendem Wasseranteil neu angemischt, um Aussagen über eine maximale Wiederverwendbarkeit im Ursprungszustand zu liefern.



Abb.83: (1) Span im Ausgangszustand (WEHO 500) (2) Rückführung mit Schredder-Werkzeug A (3) Schredder-Werkzeug B (4) Schredder-Werkzeug C

Durch den Zusatz von Binder und Partikel konnte das Gesamtgewicht bei Probe 1 auch nach zehn Rückführungszyklen nahezu auf einem gleichbleibenden Niveau gehalten werden, ohne feststellbaren Einfluss auf die Druckfestigkeit. Eine Übersättigung der Stärke konnte in den erforschten Zyklen nicht festgestellt werden.

Bei Probe 2 war auch nach zehn Fertigungszyklen noch genügend Stärke im Formstoff vorhanden und keine weitere Zugabe des Formstoffbinders nötig. Die Festigkeit der Probe nahm nach der ersten Rückführung zunächst ab und blieb in weiteren Zyklen nahezu kongruent. Gleichzeitig stieg die Porosität des untersuchten Probekörpers leicht an.

Beide Probekörper zeigten keinerlei Beeinträchtigungen der Oberflächengüte auf. Auch Rissbildungen oder größere Abrisse konnten nicht festgestellt werden.

Abschließend lässt sich festhalten: Je nach geforderter Festigkeit der Elemente lassen sich die Werte durch Zugabe des Binders einstellen, um auf spezifische Anforderungen reagieren zu können. Das Zerkleinern sowie erneute Anmischen und Verpressen der Formstoffmischung erfolgt ebenso umstandslos wie bei der Herstellung eines neuen Akustikelements.

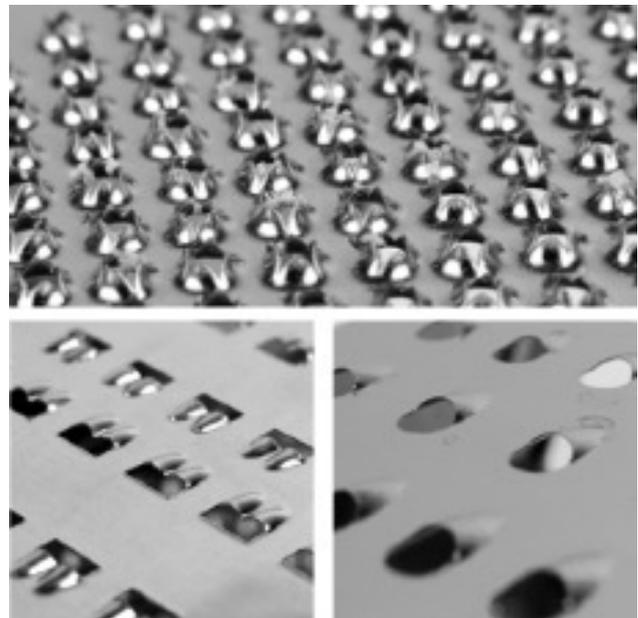


Abb.84: Schredder-Werkzeug. Oben Werkzeug A. Unten links Werkzeug B

### 3.3.1.2 Rückführung im Wasserbad

Neben einer mechanischen Rückführung durch Schreddern, kann ein Trennen von Holzpartikeln und Binder in einem Wasserbad stattfinden. Bei der Nassregenerierung entmischen sich Span und Binder. Der Binder lagert sich dabei im oberen Bereich ab, der ausfällende Holzspan sinkt in die Bodenebene des Wasserbads, kann entnommen und wieder feucht verpresst werden (siehe Abb.86). Aufgrund und hinsichtlich möglichen Verlustes der in der Akustikelementen enthaltenen Binder, wurde eine Rückführung im Wasserbad in den weiteren Forschungsarbeiten ausgeschlossen. Die Studien konzentrierten sich stattdessen auf eine o.g. Rückführung durch Schreddern.



Abb.85: Rückführung von gebundenen Elementen im Wasserbad. Zu sehen ist, dass sich die Binder an der Wasseroberfläche absetzen. Diese können abgeschöpft werden und das noch feuchte Holz erneut gepresst und in den Produktionszyklus zur Herstellung von Akustikelementen eingehen

### 3.3.2 Ökobilanzierung nach DIN EN ISO 14040/ 14044

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurde in Zusammenarbeit mit dem an der Universität Kassel ansässigen „Center for Environmental Systems Research“ unter der Leitung von Herrn Clemens Mostert und ausführend durch Hannes Meier eine Ökobilanzanalyse für holzpartikelgefertigte Akustikelemente erstellt, um Indikatoren für deren Nachhaltigkeit zu ermitteln. Dabei wurden verschiedene Bindemittel-Optionen miteinander verglichen und jeweils der Klima-, Material- und Wasserfußabdruck mithilfe der Software „openLCA“ berechnet. Dieses Dokument soll zusammenfassend einen Überblick über die angewandte Methodik und die Interpretation der Fußabdruck-Indikatoren geben. Zunächst wird im Folgenden kurz die Methodik der Ökobilanzierung und der hier verwendeten Wirkungskindikatoren erläutert.

Folgend wurde in der Zusammenarbeit eine Auswertungstabelle erstellt, in der alle Parameter und deren Massen und Zeiten zusammenlaufen und innerhalb der Forschungsarbeiten verändert und angepasst werden konnten, womit das Projektteam selbst bereits während Material- und Prozessentwicklung eine Aussage und Transparenz zu Nachhaltigkeitsfaktoren schaffen konnte.

#### 3.3.2.1 Ökobilanz

Die Ökobilanz (auch Lebenszyklusanalyse oder engl. Life Cycle Assessment) ist eine Methode zur Erfassung und Bewertung umweltrelevanter Vorgänge. Sie kann auf Produkte, Dienstleistungen, Verfahren oder Verhaltensweisen und die jeweils dafür notwendigen Produktions- und Verfahrensschritte angewandt werden. Dafür werden nach den Prinzipien der medienübergreifenden und der stoffstromintegrierten Betrachtung alle relevanten potenziellen Schadwirkungen auf die Umweltmedien Boden, Wasser und Luft sowie alle in das betrachtete System eingehenden (Inputflüsse) und von ihm ausgehenden (Outputflüsse) Stoffflüsse berücksichtigt [48].

Die Durchführung einer Ökobilanz-Studie erfolgt in vier Phasen. Zu Beginn werden das Ziel und der Untersuchungsrahmen festgelegt. Dies beinhaltet die Bestimmung der funktionellen Einheit (FE) und der Systemgrenze. Die

funktionelle Einheit beschreibt den quantifizierbaren Nutzen, der als Ergebnis des betrachteten Systems erfüllt werden soll und dient als Vergleichseinheit. So lassen sich verschiedene Arten der Zweckerfüllung miteinander vergleichen. Für diese Untersuchung wird die funktionelle Einheit auf ein Akustikelement festgelegt. Die genaue Größe wird der Einfachheit halber nicht quantifiziert. Es ist jedoch darauf zu achten, dass die verglichenen Bauteile sich hinsichtlich Volumina, Aussehen, Schalldämmung oder weiterer möglicherweise relevanter Charakteristika insoweit gleichen, dass sie in hinreichend vergleichbarer Weise den gleichen Nutzen erfüllen. Die Systemgrenze legt durch einen Satz von Kriterien fest, welche Prozesse Teil des Produktsystems und damit Gegenstand der Untersuchung sind. Für die hier durchgeführte Analyse wird nur die Herstellungsphase betrachtet. Die Nutzungs- und die Entsorgungsphase bleiben unberücksichtigt. In die andere Richtung werden alle erforderlichen Prozessketten bis zur Rohstoffgewinnung zurückverfolgt. Für die betrachteten Produktsysteme sind folglich alle Inputflüsse, die die Systemgrenze überschreiten, Elementarflüsse. Damit erfolgt eine „cradle-to-gate“-Betrachtung (ISO 14040, 2006). Die Prozesskette mit Systemgrenze ist in der Abb.86 dargestellt.

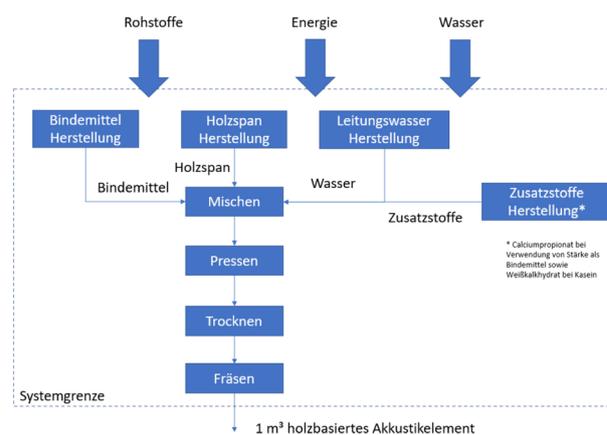


Abb.86: Prozesskette der Systemgrenzen

In der darauffolgenden Sachbilanzphase werden sämtliche Input- und Outputdaten in Bezug auf das zu untersuchende System erhoben oder gesammelt. In dieser Untersuchung wird dabei auf Daten zurückgegriffen, die in der ecoinvent Datenbank vorhanden sind. Die Phase der Wirkungsabschätzung liefert Wirkungsindikatorwerte, die mittels ausgewählter die Umweltwirkungsmechanismen beschreibenden Charakterisierungsmodelle und daraus abgeleiteter Charakterisierungsfaktoren eine quantifizierbare Darstellung der potenziellen Umweltwirkungen des betrachteten Produktsystems innerhalb verschiedener Wirkungskategorien widerspiegeln.

### 3.3.2.2 Die Fußabdruck-Indikatoren

#### Klimafußabdruck

Der Klimafußabdruck eines Produktes (Product Climate Footprint) oder kurz PCF bilanziert die Menge der lebenszyklusweit emittierten Treibhausgase in CO<sub>2</sub>-Äquivalenten (DIN EN ISO 14067:2019-02, S.16). Da unterschiedliche Treibhausgase unterschiedlich stark zum Treibhauseffekt beitragen wird jedem Gas ein Global Warming Potential (GWP) zugewiesen. Dieser Wert gibt an, wie stark das Treibhausgas im Vergleich zu CO<sub>2</sub> zum Treibhauseffekt beiträgt. Das GWP wird in der Einheit CO<sub>2</sub>-Äquivalente angegeben, wobei ein Wert von 2 bspw. bedeuten würde, dass das Treibhausgas im Vergleich zu CO<sub>2</sub> doppelt so stark zum Treibhauseffekt beiträgt. Da die Wirkung der Treibhausgase auch zeitabhängig ist, gibt es GWP-Werte für unterschiedliche Zeithorizonte bspw. 20, 100 oder 500 Jahre. In dieser Arbeit werden die GWP100-Werte der Treibhausgase verwendet, die von einem Betrachtungszeitraum von 100 Jahren ausgehen [49]. Für die Bestimmung des PCF wird der Wirkungsindikator Global Warming Impact (GWI) verwendet. Das GWI wird berechnet, in dem die emittierten Massen an Treibhausgasen mit ihren jeweiligen GWP100-Werten multipliziert und anschließend aufsummiert werden (siehe Formel). Der PCF ermöglicht somit eine Vergleichbarkeit der Klimawirkung von Produkten oder Dienstleistungen quantifiziert in der FE. Die Methode wurde nach Hischier [50] für die ecoinvent Datenbank in openLCA implementiert.

$$GWI = \sum_{i=1}^n GWP_{THG_i} \cdot m_{THG_i}$$

Abb.87: Formel zum Klimafußabdruck

### 3.3.2.3 Materialfußabdruck

Zur Bestimmung des Materialfußabdrucks eines Produkts (Product Material Footprint, PMF) werden die Indikatoren Raw Material Input (RMI) und Total Material Requirement (TMR) herangezogen. In dieser Arbeit wurde nur der RMI der Akustik Elemente berücksichtigt. Der RMI misst die Menge an genutzter Extraktion (Rohstoffe), die der Natur lebenszyklusweit zur Bereitstellung des Produktes entnommen werden. Er stellt einen Umweltbelastungsindikator dar, der die mit der lebenszyklusweiten Nutzung der Rohstoffe verbundenen Umweltwirkungen abschätzt. Im Gegensatz zum TMR umfasst er nicht die ungenutzte Extraktion, die im Naturraum entnommen und verlagert wird, aber nicht weiterverarbeitet wird und in das Wirtschaftssystem einfließt.

Statt konkrete Umweltwirkungen zu quantifizieren, ist der Materialfußabdruck eher als eine Art unspezifischer Prädiktor zu verstehen. Seine Aussagekraft liegt darin, dass mehr oder weniger jede Emission von Treibhausgasen, jeder Ausstoß von ozonabbauenden Substanzen, jeder Eintrag von Stickstoff oder Phosphor in den natürlichen Stoffkreislauf, jede Zerstörung von Ökosystemen sowie damit auch die daraus folgenden Verluste von Biodiversität, Ökosystemdienstleistungen und gesunden menschlichen Lebensjahren sich entlang der Produktionsketten jedweder Produkte, Dienstleistungen oder Projekte letztlich zu der stofflichen Entnahme von Primärmaterialien aus dem Naturraum zurückführen lassen. Gerade in einem überwiegend linearen Wirtschaftssystem ist der Ursprung von menschlich verursachten Umweltbelastungen so stets bei der Rohstoffextraktion zu finden. Je größer die gesamte Entnahme ist, desto größer lassen sich in abschätzender Weise auch daraus entstehenden Umweltwirkungen annehmen. Verschiedene Umweltindikatoren setzen an verschiedenen Punkten in dieser Wirkungskette an. Der Materialfußabdruck setzt ganz vorne bei der Extraktion an.

Als ein Beispiel von vielen komplexen Wirkungszusammenhängen kann in der Folge von Abholzung verlorener Lebensraum und CO<sub>2</sub>-Speicherkapazität genannt werden. Die Indikatoren des PMF werden berechnet, indem die Materialflüsse aus der Sachbilanz mit den materialspezifischen Charakterisierungsfaktoren für RMI und TMR multipliziert und aufsummiert werden [51].

$$RMI_{abiotic} = \sum_{i=1}^n m_{material\ i} \cdot CF_{RMI\ material\ i}$$

Abb.88: Formel zum Materialfußabdruck

**Wasserfußabdruck**

Der Wasserfußabdruck eines Produktes wird mit dem Available Water Remaining (AWARE)-Bewertungsverfahren bestimmt. AWARE ist ein Knappheitsindikator für die regionale Verfügbarkeit von Wasser. Er basiert auf dem Ansatz, dass die Wasserverfügbarkeit pro Gebiet davon abhängt in welchem Maße Menschen oder Ökosystemen dort Wasser entnehmen. Bei der Berechnung wird zunächst die Menge an verfügbarem Wasser gemessen in m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup> x Monat) bestimmt, die nach Abzug des menschlichen und ökosystemischen Bedarfs pro Flächeneinheit verbleibt. Dieser Wert wird anschließend mit dem Weltdurchschnittswert ins Verhältnis gesetzt. Der AWARE-Faktor kann Werte zwischen 0,1 und 100 annehmen. Ein Wert von 1 steht für eine regionale Wasserverfügbarkeit, die genau dem Weltdurchschnitt entspricht, wohingegen ein Wert von 5 bedeutet, dass regional fünfmal weniger Wasser als im globalen Durchschnitt verfügbar ist und ein Wert unter 1 dementsprechend, dass im globalen Vergleich eine überdurchschnittliche regionale Wasserverfügbarkeit herrscht [52].

$$WaterFP = \sum_{i=1}^n CF_{Aware\ i} \cdot m_i$$

Abb.89: Formel zum Wasserfußabdruck

**Vorgehen**

Im Folgenden soll das konkrete Vorgehen bei der Erstellung der Ökobilanz knapp erläutert werden. Die Abfolge der einzelnen Schritte wird durch die Abb.90 veranschaulicht.

Zunächst galt es, sich einen Überblick über die zu vergleichenden Alternativen zu verschaffen, um hieraus die relevanten Herstellungsprozesse entlang der gesamten Vorkette zu ermitteln. Die Alternativen unterscheiden sich durch die Verwendung verschiedener Bindemittel. Untersucht wurden als Bindemittel Stärke, pflanzliches Protein, tierisches Protein und Säure. Für jeden der Prozesse wurde im Anschluss die Verfügbarkeit der Daten überprüft, zunächst in der Datenbank ecoinvent und schließlich durch weitere Recherche nach vergleichbaren Ökobilanz-Studien. Der erste Stand dieser Prüfung wurde für die einzelnen Prozesse in den folgenden Tabellen festgehalten. Die Prozesse, für die keine verwendbaren Daten vorlagen, wurden auf der Grundlage vergleichbarer Studien in openLCA modelliert. Das genaue Vorgehen hierbei soll im Folgenden für die einzelnen Prozesse knapp erläutert werden.

Bindemittel	Datenverfügbarkeit	Modellierung
Stärke (Weizenstärke TIGEL)	Nein	maize starch production für Deutschland verfügbar; Mais wird durch Weizeninput ersetzt, Datenblatt: Verpackung in Papiersäcken mit 25 kg Nettogewicht (Papiersäcke nicht verfügbar, verschiedene Prozesse zu Papier)
Pflanzliches Protein (Weizengluten)	Nein	Weizenmehlherstellung modelliert nach Mostert; Trennung und Trocknung von Weizengluten modelliert nach Deng et al. (2013) unter Berücksichtigung des Energieaufwands
Tierisches Protein	Nein	Modellierung der Herstellung von Gelatine als mindestens ähnliches Produkt nach Sampaio et al. (2017) mit vereinfachender Ersetzung von Tilapia als in der Studie verwendeter Grundstoff auf experimenteller Ebene durch Schwein
Säure (Technisches Säurekasein)	Nein	Kasein=Protein und Grundstoff von Milch; Modellierung der Gewinnung von Kaseinmizellen-Konzentrat aus Rohmilch nach Gésan-Guiziou et al. (2019) unter Berücksichtigung von Energieaufwand und Reinigung

Prozess	Datenverfügbarkeit	Modellierung
Holzspan Herstellung	Nein	Mehrere Prozesse verfügbar zur Herstellung von wood chips; Könnten Modifizierung werden hinsichtlich Energie-, Transportinputs etc., ggf. nur Aufwand für Sammlung, Transport und Aufbereitung
Leitungswasser Herstellung	Ja	Verschiedene Prozesse verfügbar für tap water production für Region Europa ohne Schweiz oder als market Prozess Europa
Herstellung Calciumpropionat	Ja	In ecoinvent nicht verfügbar; Modellierung nach Scheffel mit vorhandenen Prozessen oder eigene Modellierung mit Abfrage der Prozessdaten bei Hersteller Addcon; Transportprozess und Energieinputs könnten gemäß des Herstellerstandorts in Bitterfeld-Wolfen angepasst werden; Verpackung dem Foto nach zu urteilen aus Plastik; ansonsten dort keine relevanten Informationen
Herstellung Weißkalkhydrat	Ja	market for lime, hydrated, packed   lime, hydrated, packed   Cutoff, U – RER Transport von der
Mischen	Ja	Berücksichtigung von Energie, Leistung und Dauer
Pressen	Ja	Berücksichtigung von Energie
Trocknen	Ja	Keine Aufwendung von Energie, Leistung und Dauer
Fräsen	Ja	Berücksichtigung von Energie, Leistung und Dauer

Abb.90: Auswertung zur Datenverfügbarkeit und Modellierung

## Stärke

In der ecoinvent-Datenbank verfügbar ist der Prozess „maize starch production | maize starch | Cutoff, U – DE“. Da es sich bei dem verwendeten Produkt TIGEL des Unternehmens „Kröner“ Stärke um Weizenstärke handelt, wurde unter der Annahme, dass gleiche Menge Weizen wie Mais benötigt werden und Prozesse ansonsten weitgehend ähnlich sind, der Mais- durch Weizeninput in gleicher Menge des Prozesses „wheat grain, Swiss integrated production“ ersetzt. Außerdem wurde der Transport unter Annahme eines mittelgroßen LKW durch den Prozess „transport, freight, lorry 7,5–16 metric ton, EURO6 | transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO6 | Cutoff, U – RER“ mit einer Strecke von 200 km zwischen dem Herstellersitz und dem Gelände der Universität Kassel modelliert.

## Pflanzliches Protein

Beim verwendeten pflanzlichen Protein handelt es sich um Weizengluten. Weizengluten wird durch physikalische Extraktion gewonnen, wenn Weizenmehl mit Wasser gemischt wird. Die Stärke wird ausgewaschen, das Gluten bleibt zurück, da es nicht wasserlöslich ist. Die Herstellung von Weizenmehl wurde nach Mostert & Bringezu [2022], die Trennung und Trocknung des Glutens unter Berücksichtigung des Energieaufwands nach Deng et al. [2013] modelliert, welche auch die untenstehende Prozesskette darstellten. Die Allokation erfolgte nach Masse. Der Transport wurde analog zum Vorgehen bei der Stärke auf Grundlage einer Distanz von 360 km.

## Tierisches Protein

Für tierisches Bindemittel wurde Gelatine als mindestens ähnliches Produkt ermittelt. Mangels besserer Daten, wurde die Ökobilanz-Studie von Sampaio et al. [2017] zur experimentellen Herstellung von Gelatine aus Tilapia-Resten als Datengrundlage verwendet. Da 80 % der Gelatine in Europa aus Schweineschwarten hergestellt wird, wurden die Tilapia-Inputs bei der Modellierung auf vereinfachende Weise durch Schwein ersetzt, welches in ecoinvent verfügbar ist.

## Kasein

Bei der Säure handelt es sich um technisches Säurekasein, welches der Hersteller Hans J. Heinemann wie folgt beschreibt: „Kasein ist ein natürliches Protein und Hauptbestandteil der Milch. Grundsätzlich unterscheiden wir zwischen technischem Säurekasein und Edible Kasein. Um Kasein zu gewinnen, wird Rohmilch entrahmt, um Magermilch zu erhalten. Durch Zugabe von Säure oder Lab trennt sich das Casein (Milchweiß) von der Molke und wird anschließend gewaschen, getrocknet und vermahlen. Auf diese Weise gewinnt man das Milchprotein in einem hohen Reinheitsgrad.“ Mit „milk production, from cow | cow milk | Cutoff, U“ ist ein Prozess zur Herstellung von Rohmilch in ecoinvent vorhanden. Die Prozesse für Entrahmung, Trennung des Kaseins durch Zugabe von Säure oder Lab, Waschen, Trocknen und Mahlen müssen modelliert werden. Als Datengrundlage dient die Studie von Gésan-Guizoui et al. [2019]. Im von ihnen untersuchten Prozess zur Trennung von Milchprotein fällt als Nebenprodukt „casein micelles concentrate“ an (siehe Markierung in Prozesskette unten). Es wurde die Annahme getroffen, dass dieses technischem Säurekasein hinreichend ähnelt und wurde daher in dieser Modellierung als Endprodukt definiert. Dadurch kommt es evtl. zu einer Vernachlässigung von Waschen, Trocknen und Mahlen mangels weiterer Informationen. Die Allokation, das heißt die anteilige Zuordnung der Gesamt-Inputs und -Outputs zum Nebenprodukt Kaseinmizellenkonzentrat erfolgte nach Volumen. Als Transportdistanz wurden 340 km angenommen.

## Holzspäne

Bezüglich der Holzspäne ist fraglich, ob diese als Reststoff bei der Bewertung belastungsfrei bleiben dürfen, wenn nur die Abfälle aus der Holzverwertung aus dem Wald gesammelt und aufbereitet werden (Variante b) oder ob auch den Holzspänen als wertvolles und weiterverarbeitetes Produkt die Aufwände aus der gesamten Herstellungskette anteilig anzurechnen sind (Variante a). Nach den Angaben des Herstellers kommen die Späne aus hierfür im Wald aufgestellten Containern, in denen Holzreste entsorgt werden können. Sie sollen somit als zum Zeitpunkt der Entnahme aus

den Containern belastungsfreier Reststoff qualifiziert werden. Zur Modellierung dieser Variante b werden alle Prozesse aus der zuvor auf der Grundlage des ecoinvent-Prozesses „softwood forestry, pine [oder spruce], sustainable forest management | wood chips, wet, measured as dry mass | Cutoff, U – DE“ (hälftige Aufteilung zwischen Kiefern- und Fichtenholz) Variante a entfernt, die bei der Bewertung von Holzspänen als Reststoff nach eigener Einschätzung nicht anzurechnen wären. Lediglich „wood chipping“ bleibt als Prozessschritt übrig. Hilfsweise wurde die Modellierung des Transports der Späne aus dem Wald geschätzt auf 5 km mit „light commercial vehicle“.

#### Übrige Prozesse

Bei den übrigen Prozessen lag eine hinreichende Datenverfügbarkeit vor oder es wurde nur der Energieaufwand berücksichtigt. Das Vorgehen lässt sich hier der oben dargestellten Tabelle entnehmen.

#### 3.3.2.4 Auswertung der Datensätze

Die Ergebnisse der Ökobilanz und der verwendeten Fußabdruck-Indikatoren können nach Eingabe der benötigten Mengen aller Bestandteile für die verschiedenen Varianten der erstellten excel-Datei entnommen werden und nach Wunsch mit den dazugehörigen Grafiken an dieser Stelle eingefügt werden.

#### 3.3.2.5 Interpretation der Datensätze

Die Interpretation kommt noch etwas auf die Ergebnisse an, die nach Eingabe der benötigten Mengen in die excel-Tabelle erlangt werden. Eine vorläufige Interpretation und ein Vergleich der Bindemittel ist auf Basis der für alle Bindemittel verwendeten Bilanzgröße von 1 kg möglich. Für die verschiedenen Varianten werden jedoch unterschiedliche Mengen an Bindemitteln und etwaigen Zusatzstoffen verwendet, weshalb sich die Ergebnisse noch verändern können.

Für die Bilanzgröße von 1 kg weist pflanzliches Protein bei allen drei Fußabdruck-Indikatoren das beste Ergebnis unter allen Bindemittel-Optionen auf. Tierisches Protein ist mit Abstand das Bindemittel mit den größten Fußabdrü-

cken. Hier ist fraglich, ob die verwendeten Daten aus einer experimentellen Studie repräsentativ für einen industriellen Prozess sind. Generell rufen Produkte auf tierischer Basis in der Regel in allen Bereichen große Umweltbelastungen hervor und sind daher aus ökologischer Sicht nicht zu bevorzugen. Stärke und Kasein befinden sich ungefähr auf einem ähnlichen Level. Stärke schneidet beim Klimafußabdruck besser ab, während Kasein bei Material- und Klimafußabdruck einen geringeren Wert aufweist. Bei der Modellierung beider Prozesse wurden viele vereinfachende Annahmen getroffen, die Ergebnisse unter Verwendung der realen Daten könnten also abweichen.

#### Limitationen

Zum Abschluss dieses Dokuments muss auf eine Reihe von Limitationen hingewiesen, welche die Grenzen der Aussagekraft einer Ökobilanz stets kennzeichnen. Der unterschiedliche Detailgrad der modellierten Prozesse kann unter Umständen dazu führen, dass umfassender modellierte Prozesse größere Fußabdrücke aufweisen, da sie mehr Herstellungsschritte einbeziehen und anders herum Prozesse mit einem geringen Detailgrad geringere Ergebnisse, als sie es unter Berücksichtigung aller relevanten Input- und Outputströme tun würden. Die vorgenommene Allokation nach Volumen oder Masse ist möglicherweise nicht überall sinnvoll, aber stellt sich mangels besserer Informationen als einzige im Rahmen dieser Arbeit realisierbare Möglichkeit dar. Das Gesetz der Massenerhaltung ist nicht überall konsequent eingehalten worden, da teils spezifischere Informationen zu Emissionsflüssen fehlten. Bei dem tierischen Protein ist fraglich, ob die Herstellung auf experimenteller Ebene vergleichbar ist mit einer industriellen Produktion. Insgesamt handelt es sich um eine relativ stark vereinfachte ökobilanzielle Analyse unter Verwendung vieler Annahmen und teils vermutlich begrenzt vergleichbarer Daten. Erste Aussagen zur Umweltbelastung der verschiedenen Alternativen lassen sich dennoch ableiten.

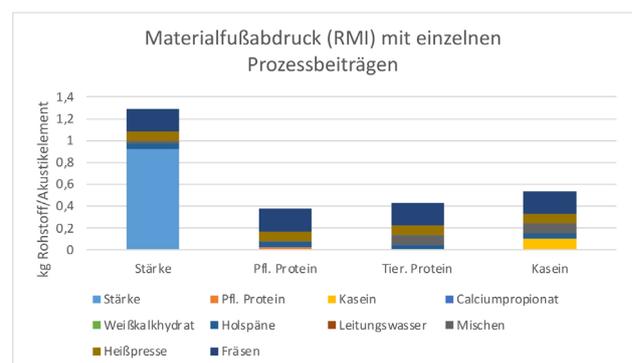
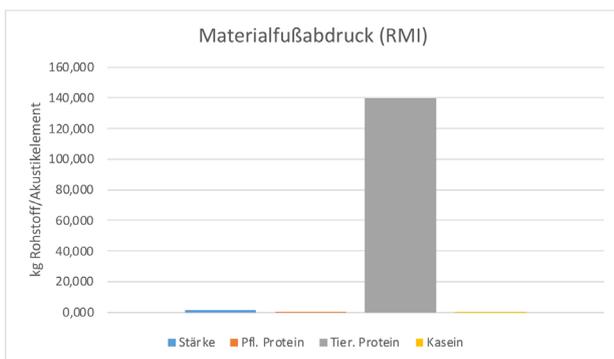
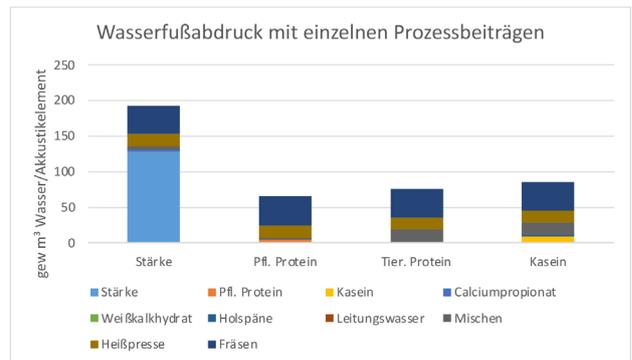
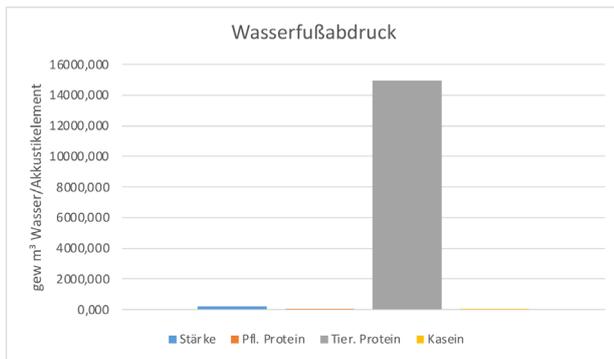
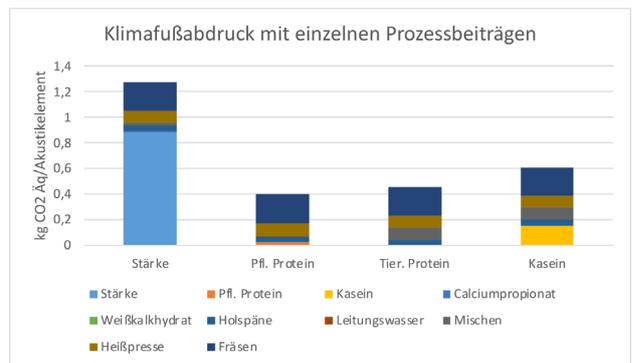
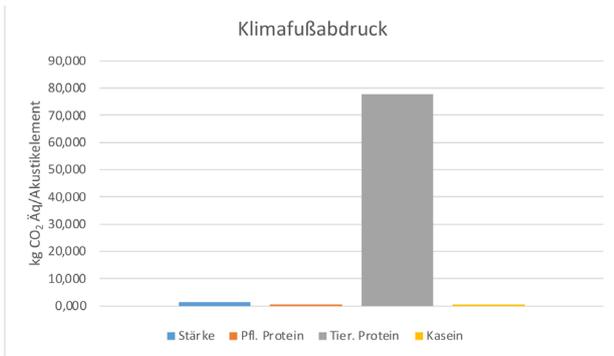


Abb.91: Die Auswertung der hier grafisch dargestellten Indikatoren (vertikal angeordneten) beinhalten tierisches Protein als Betrachtungseinheit, welches im Gegensatz zu allen anderen Bindern enorme Indikatoren aufweist, was dazu führt, dass in der Darstellung andere Binder nicht darstellbar sind

Abb.92: Vertikal aufgeführt: Indikatoren mit einzelnen Prozessbeiträgen

## 4 (AP 3) PRÄZISIERUNG, DETAILAUSBILDUNG, SKALIERUNG

### 4.1 Designentwicklung 1:2 Demonstrator

Im Forschungsprojekt entwickelte Resonatoren-Typen „Pyramiden“ wurden einer industriell etablierten Musterung „Perforation“ gegenübergestellt. Zur kontrollierten Gestaltung und Verteilung der Resonatoren wurden parametrische Werkzeuge verwendet. Die Einbringung der Resonatoren erfolgte durch Fräsen.

Um eine Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Resonatoren-Geometrien zu schaffen, wurde beiden Demonstrator-Typen das gleiche Materialvolumen in Form von Resonatoren entnommen.

Um eine Vergleichbarkeit zu schaffen und eine Anlehnung an industrielle Standards zu erzielen wurde empfohlen, die Gesamtfläche mit 20 % Resonatoren zu ertüchtigen, wodurch sich die individuellen Schemata/ Muster zusammengesetzt haben.



Abb.93: Resonatoren-Typen. Links Typ „Perforation“, rechts „Invertierte Pyramide“.

#### 4.1.1 Materialität

Sandwichelement bestehend aus zwei Schichten mit einem insg. Aufbau/ Materialdicke von 5 cm aufgeteilt in (1) Deckschicht 2 cm (2) Unterbau 3 cm in unterschiedlichen Partikelfraktionen:

(1) Unterbau aus absorbierenden groben Partikeln mit einer Fasergröße von ca. 1.000  $\mu\text{m}$ .

(2) Deckschicht aus feinen Partikeln, für eine präzise Formgebung der Resonatoren, mit einer Fasergröße von ca. 75  $\mu\text{m}$ .

Die Grobspannschicht wurde in einer 300er und die Feinspannschicht in einer 500er Dichte gefertigt.

### 4.2 Raumakustische Orientierungsmessung Messung des Schallabsorptionsgrades im Raum

#### 4.2.1 Aufgabenstellung und Ziel

Messung der frequenzabhängigen Nachhallzeit ( $T_{20}$ ). Abschätzung des Schallabsorptionsgrades bei ausreichender akustischer Wirksamkeit.

Ziel ist die Evaluierung der Wirksamkeit von Resonatoren durch eine Gegenüberstellung von Prüfdemonstratoren ( $A=1\text{m}^2$ ) wie folgt:

- (1) Demonstrator ohne Resonatoren (Prüfung der reinen Materialität)
- (2) Resonatoren „Perforation“ (siehe Abb.95)
- (3) Resonatoren „invertierte Pyramiden“ (siehe Abb.96)

#### 4.2.2 Referenzraum (Ref)

In Absprache mit Psychoakustiker Dr. Achim Klein (Eco-phon Deutschland) wurde die Messung geplant und durchgeführt. Als Referenzraum wurde ein möblierter schallharter ( $T_{20} = 0,7\text{s}$ ) Besprechungsraum der Universität Kassel ausgewählt:

$A = 25\text{m}^2$ ,  $RH = 3\text{m}$ ,  $V = 75\text{m}^3$ ;  $T_{20} = 0,7\text{s}$



Abb.94: Referenzraum

#### 4.2.3 Design Prüfdemonstratoren

In Einsatz gebracht wurden alle erforschten Erfolgsparameter. Anhand der Größe des Referenzraums wurde durch Dr. Achim Klein die Dimensionierung des Messdemonstrators auf 1 m<sup>2</sup> veranschlagt.

#### 4.2.4 Messmethodik und Durchführung der Messung

Eine Schallquelle in Form eines Dodekaeders wird im Raum positioniert, um Schallwellen zu erzeugen. Mehrere Mikrofone werden strategisch im Raum platziert, um den Schall an verschiedenen Positionen aufzuzeichnen. Die Schallquelle sendet kontrollierten Schall aus, und die Mikrofone zeichnen die akustischen Signale auf. Die aufgezeichneten Daten werden analysiert, um die gewünschten akustischen Parameter zu berechnen und zu bewerten. Hierbei kamen eine spezielle Software und Algorithmen zum Einsatz, um die Analyse zu erleichtern.

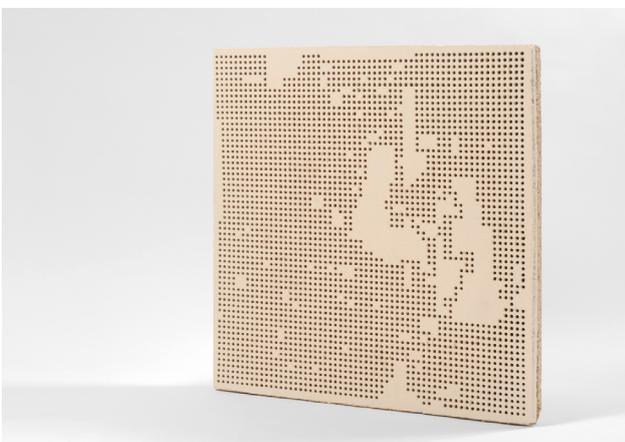


Abb.95: Demonstrator mit Resonatoren-Typ „Perforation“

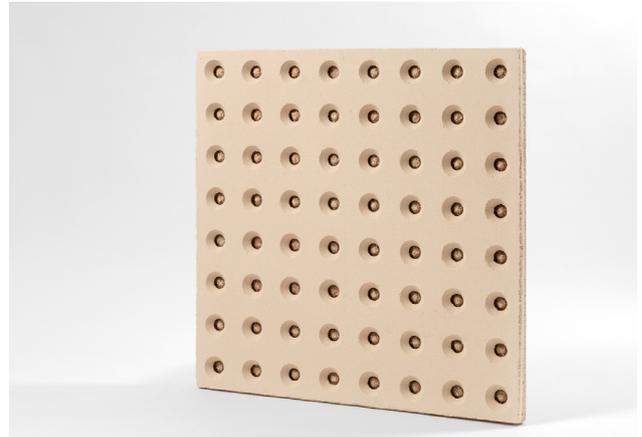


Abb.96: Demonstrator mit Resonatoren-Typ „Pyramiden“

Der Raum wird im Ist-Zustand gemessen. Danach werden die Prototypen separat und auf einem Tisch liegend (mit einem Abstandshalter) auf einem im Raum mittig stehenden Tisch platziert.

Es wurden min. 4 Messungen pro Probe in unterschiedliche Quell- und Empfängerpositionen durchgeführt. Diese wurden wie folgt benannt: Plain (Plain), Perforation (Loch) und Pyramiden invertiert (Pry). Die untersuchten Proben haben eine Fläche von je 1 m<sup>2</sup>.

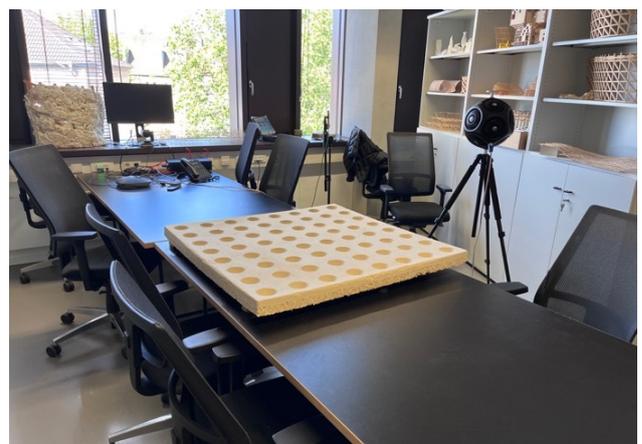


Abb.97: Referenzraum mit Probe Nr. 3 „Pyramiden“



Abb.98: Schallquelle in Form eines Dodekaeders

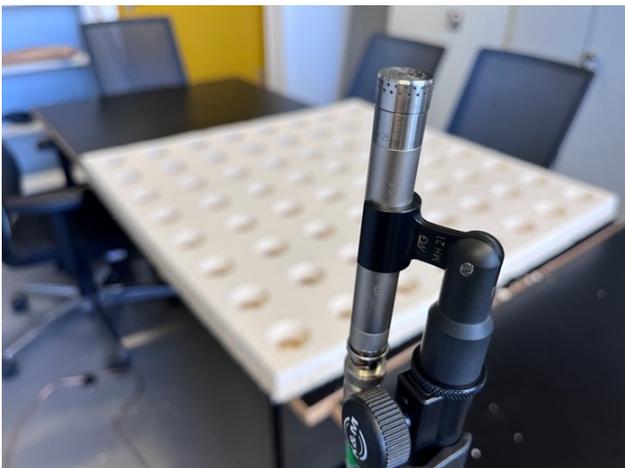


Abb.99: Messinstrument (Mikrofon)

### 4.2.5 Auswertung

Die gemessenen Proben reduzieren die Nachhallzeit (T20) im Raum. Die Einbringung der Proben zeigt eine Auswirkung auf die gemessene Nachhallzeit ( $\Delta T_{20max}$ . 0,2 s). Aufgrund der Materialeigenschaften (Porosität, Strukturfaktor), besitzen poröse Absorber eine höhere Schallabsorptionsleistung im Mitten- und Hochfrequenzbereich. Diese Tendenz kann auch hier erkannt werden: Im Mitten- und Hochfrequenzbereich kann eine Reduktion der Nachhallzeit um ca. 0,05 s festgestellt werden. Um belastbare Schallabsorptionswerte zu erhalten, sollte eine normgerechte Schallabsorptionsmessung (gemäß ISO 354) in einem Hallraum durchgeführt werden.

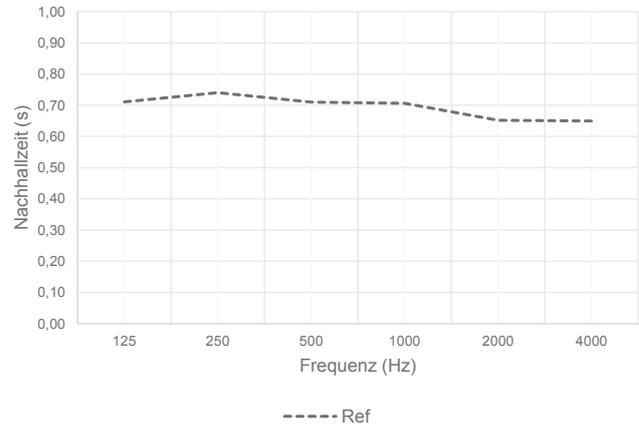


Abb.100: Nachhallzeit Referenzraum

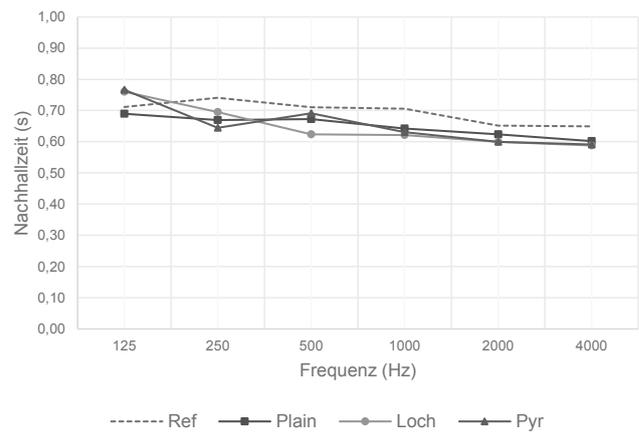


Abb.101: Nachhallzeiten mit Proben

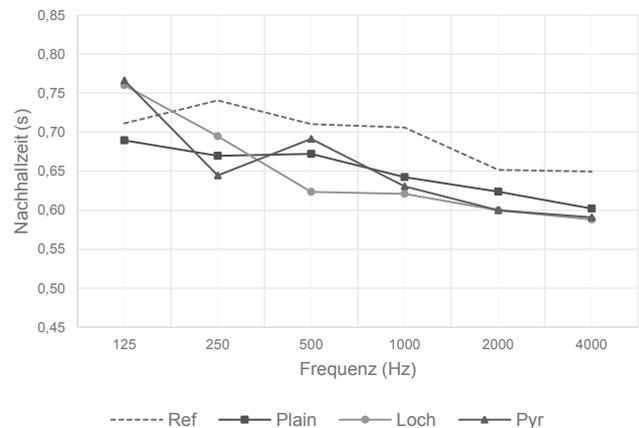


Abb.102: Nachhallzeiten „DeepDive“

## 5 (AP 4) BAUAUSFÜHRUNG 1:1 DEMONSTRATOR

### 5.1 Material & Fertigungsverfahren

Für die Gestaltung des 1:1 Demonstrators als Akustikelement, wurden bei der Wahl des Materials und des Fertigungsverfahrens, im Hinblick auf eine industrielle serielle Produktion, Anpassungen vorgenommen wie folgt:

Für die Herstellung eines Sandwichelements aus Holzmehl und Holzfasern werden drei Fertigungsschritte bei der Pressung benötigt (siehe Kapitel 2.5): Eine Vorverdichtung der ersten Schicht, sowie eine Kalt- und Warmverpressung. Für eine Reduzierung der Komplexität des 1:1 Demonstrators, wurde die Anzahl der Pressungen auf einen Durchlauf reduziert. Um gleichzeitig die jeweiligen akustischen Vorteile der Holzpartikel nicht zu eliminieren, wird ein Holzmehl (WEHO 500 ~120 µm) und zwei Arten Holzfasern (HW 300/500 ~ 300-500 µm), die sich durch unterschiedliche Partikelgrößen unterscheiden, verwendet. Welche Parameter die Positionierung der Holzpartikel im Demonstrator beeinflussen, wird im Kapitel 5.2.3 näher erklärt. Indem dreidimensionale Pressformen verwendet wurden, konnte eine komplexe Oberflächengestaltung direkt mit der Pressung realisiert werden. Auf einen zusätzlichen Fräsvorgang konnte demnach verzichtet werden.

### 5.2 Designentwicklung 1:1 Demonstrator

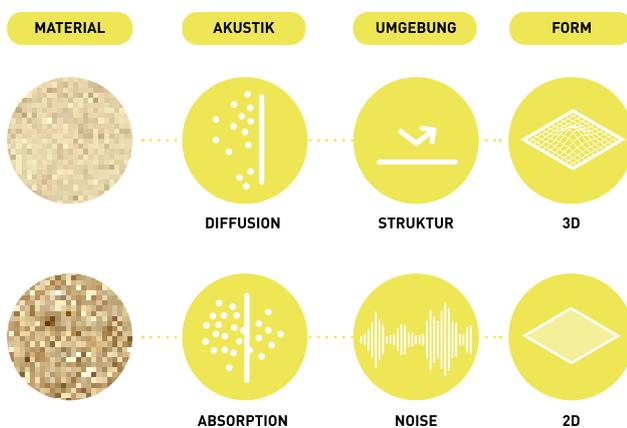


Abb. 103: Visualisierung der Gestaltungsparameter und deren Abhängigkeit zueinander

Als Parameter für die Designentwicklung dienten die Zusammenhänge zwischen dem Porositätsgrad der Materialoberfläche und deren akustischen Eigenschaften, den Störquellen in der Umgebung und der Oberflächengestaltung des Akustikelements.

So ergaben sich aus den bisherigen Forschungsergebnissen die Abhängigkeitsbeziehungen für das feine Holzmehl (WEHO 500 ~120 µm) und der groben Holzfaser (HW 300/500 ~ 300-500 µm) wie folgt:

Durch die geringe Spangröße des feinen Holzmehls (WEHO 500 ~75 µm) kann eine geschlossene Oberfläche gepresst werden, was für eine Schalldiffusion sorgt. Unter Verwendung des feinen Holzmehls können so dichte Oberflächen gestaltet werden, welche Schallreflexionen von glatten Oberflächen, wie z.B. von Decken oder von Fußböden im Raum streuen, wodurch der Nachhall reduziert wird. Auf Basis dieser Eigenschaft, wurde das feine Holzmehl für die Gestaltung von dreidimensionalen Teilflächen des Demonstrators vorgesehen, an denen Schall in unterschiedlichen Richtungen reflektiert wird.

Unter Verwendung der groben Holzfaser (HW 300/500 ~ 1000-2000 µm), entsteht eine offenporige Oberflächenstruktur. Diese sorgt für eine Absorption von jeglichem Rauschen (Geräusche von Geräten, Unterhaltungen, Radio). Da es den Schall im Gegensatz zu den Teilflächen aus feinem Holzmehl nicht reflektiert, sondern absorbiert, konnte auf eine dreidimensionale Oberfläche verzichtet werden. Somit ergeben sich zweidimensionale Teilflächen unter der Verwendung von groben Holzfasern.

Im folgenden wird die Designentwicklung des Demonstrators anhand der Teilschritte Truchet-Kachel (5.2.1), Transformation zur 3D-Kachel (5.2.2), Entwicklung eines Rapports im Abhängigkeit zum Raum (5.2.3) und Färbung (5.2.4) erläutert.

### 5.2.1 Truchet-Kachel

Ein nahtloser Rapport sollte die Teilflächen aus unterschiedlichen Partikelgrößen visuell miteinander verbinden. Inspiriert wurde die finale Gestaltung durch eine Variante der Truchet-Kachel, welche auf den Mathematiker Sébastien Truchet zurück geht [53].

Die Truchet-Variante mit Viertelkreisen, welche 1987 von Cyril Stanley Smith entwickelt wurde, dient als Basis für den Entwurf des 1:1 Demonstrators. Die Truchet-Kachel als Ausgangspunkt erschien als eine ideale Designwahl für den Demonstrator, da mit minimalen Aufwand und nur einem sich wiederholendem Element, komplizierte Muster erzeugt werden können.

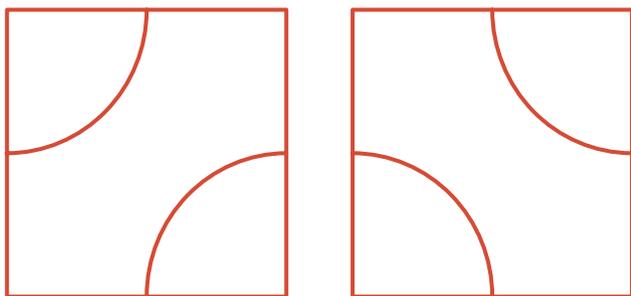


Abb.104: Grafische Darstellung einer Variante der Truchet Kachel mit zwei Viertelkreisen. Diese Kachel wurde von Cyril Stanley Smith in Anlehnung an die Truchet Kachel von Sebastien Truchet entwickelt [53].

Werden einzelne dieser simpel gestalteten Kacheln (siehe Abb.104) zu einer größeren Fläche miteinander kombiniert, entsteht, durch die Möglichkeit einer 90° Rotation der einzelnen Kacheln in eine beliebige Richtung, ein komplexes Muster (siehe Abb.105).

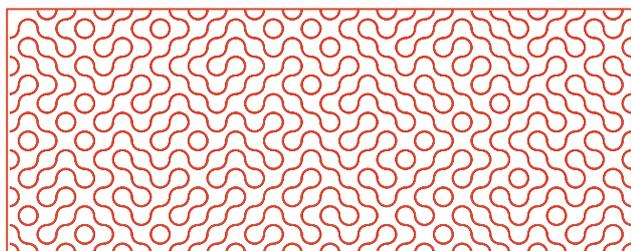


Abb.105: Grafische Darstellung der Truchet Kachel als Rapport

### 5.2.2 Transformation zur 3D-Kachel

Wie bereits in Kapitel 5.2 beschrieben, wurde für Teilflächen aus Holzmehl eine dreidimensionale Gestaltung der Oberflächen vorgesehen. Aus den zweidimensionalen Kurven der Truchet-Kachel mit Viertelkreisen konnte eine dreidimensionale Kachel entwickelt werden. Die Dreidimensionalität wurde grundsätzlich durch eine einfache Verschiebung der Endpunkte der Halbkreise in Z-Richtung erreicht. In Abb.106 sind die beschriebenen Schritte visualisiert.

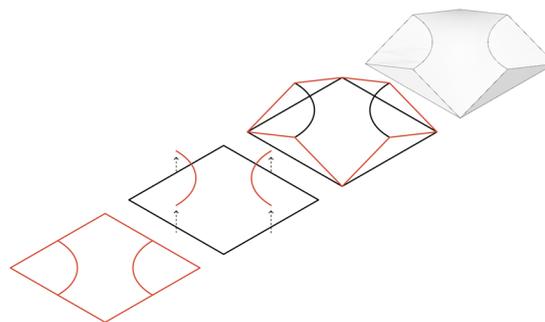


Abb.106: Grafische Darstellung der Entwicklung einer dreidimensionalen Truchet-Kachel, beginnend von der zweidimensionalen Kontur

### 5.2.3 Entwicklung einer Oberflächengestaltung in Abhängigkeit zum Raum

Ausgangspunkte für die Oberflächengestaltung des gesamten Demonstrators sind die vorher getroffenen Entscheidungen zur Verwendung von (1) feinem Holzmehl für dreidimensionale Teilflächen sowie (2) von groben Holzfasern für zweidimensionale Teilflächen.

Um fließende visuelle Übergänge zwischen den einzelnen Teilflächen zu schaffen, wurden dreidimensionale Truchet-Kacheln mit unterschiedlichen Höhen entwickelt. Dafür wurden die Endpunkte der Viertelkreise jeder Kachel in Z-Richtung um 0, 10 oder 20 mm versetzt. Aus diesem Vorgang resultieren zehn verschiedene dreidimensionale Kacheln (siehe Abb.106). Die Wahl eines Truchet-Kachel zeigt hier seine Vorteile. Durch nur ein sich wiederholendem Element, muss nur eine Grundform auf die unterschiedlichen Höhen angepasst werden.

Für eine weitere Betonung dieser Übergänge wurde für diejenigen Kacheln, die sich geometrisch in einem Zwischenbereich zwischen den drei- und zweidimensionalen Kacheln befinden eine weitere Holzfaserart (HW 100/200) mit mittlerer Partikelgröße ( ~ 500–1000 µm) verwendet.

Das Design des Demonstrators wurde für die konkrete Anwendung in einem Büroraum des Fachgebiets „Experimentelles und Digitales Entwerfen und Konstruieren“ entworfen. Die spezifische Raumarchitektur (Decken, Böden, Durchgangstüren, Fenster) und die vorhandenen Geräuschquellen (Geräte, Mitarbeitende, Umgebung) wurden als Gestaltungsparameter einbezogen (siehe Abb.119).

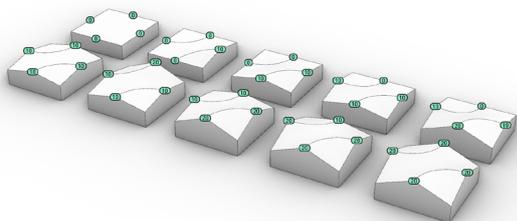


Abb.107: Rendering der zehn unterschiedlichen Kacheln mit schrittweise erhöhter Dreidimensionalität (von links oben nach rechts unten) durch Verschiebung der Endpunkte der Halbkreise auf der Z-Achse

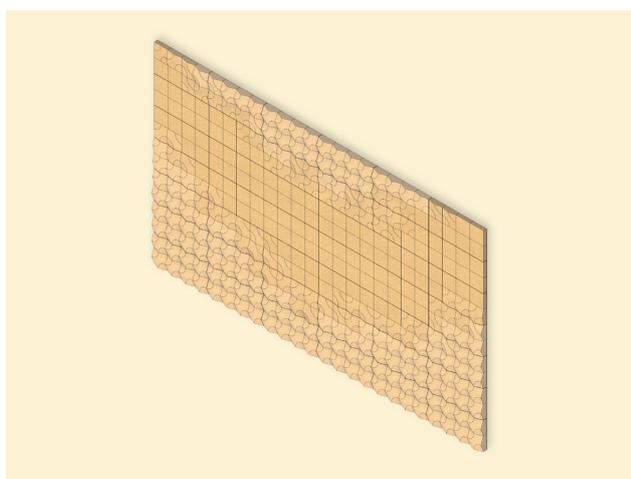


Abb.108: Rendering des finalen Entwurfs für den Enddemonstrator in Isometrischer Ansicht

#### 5.2.4 Färbung

Eine weitere Gestaltungsmöglichkeit der Akustikelemente ist die Färbung des Materials. Versuche dazu wurden mit Mineralpigmente der Firma „Kreidezeit Naturfarben GmbH“ durchgeführt [54]. Für die Herstellung eines gefärbten Panels, wurden zunächst die trockenen Bestandteile mit Farbpigmenten gemischt, danach wurde das Wasser hinzugefügt.

Farbe	Mineral
Weiß	Rutil
Schwarz	Eisen(II)oxid und Eisen(III)oxid
Spinellblau	Cobalt-Chrom-Aluminat
Ocker rot	Eisen(III)oxid
Ocker gelb	Eisenoxidhydrat

In Abb.109 sind die gefärbten Ergebnisse zu sehen. Die Färbung des Holzmehls führte zu einem homogenen Ergebnis. Die Färbung der groben und mittleren Holzfaserarten führte zu einem melierten Ergebnis



Abb.109: Gefärbte Panele in weiß, schwarz, blau, rot, ocker (v.l.n.r)

Für die Umsetzung des 1:1 Demonstrators wurde auf eine Färbung verzichtet. Das entwickelte Material und dessen akustische Eigenschaften sollten im Vordergrund stehen.

#### 5.3 Umsetzung 1:1 Demonstrator

Um die dreidimensionale Oberfläche in das Material zu pressen wurden Negativ-Pressformen der einzelnen dreidimensionalen Kacheln benötigt. Diese wurden so entwickelt, dass sie materialsparend mit dem 3D-Drucker „Formlabs Form 3+“ und aus Material „Standard-Kunstharz White“ gefertigt werden konnten. Die gefertigten Pressformen sind formstabil und es wird von keiner Materialermüdung durch den Pressvorgang ausgegangen.

Durch regelmäßiges Auftragen des Trockenschmiermittels „Cramolin Sprühflon“ lassen sich die Formen einfach von dem verpressten Material trennen.

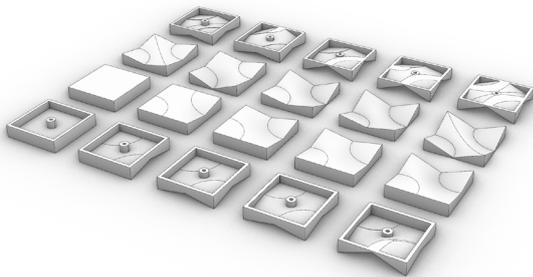


Abb.110: Rendering der zehn Pressformen mit der Ansicht von oben und unten

Das zur Verfügung stehende Pressgerät hatte eine maximale Größe von 40 x 20 cm. Daraus ergaben sich die maximalen Abmessungen einer Pressform, in welche acht einzelne Kachel-Negativformen (10 x 10 cm) eingelegt werden konnten. Die entstehende gepresste Teilfläche, bestehend aus acht Kacheln wurde als Panel bezeichnet. Die einzelnen Pressformen der Kacheln ergeben je nach Rotation in X-Richtung unterschiedliche Paneele. Somit konnte durch eine modulare Anordnung der rotierten Kacheln verschiedene Oberflächen erzeugt werden, ohne eine individuelle Anfertigung einer Pressform für das gesamte Panel.

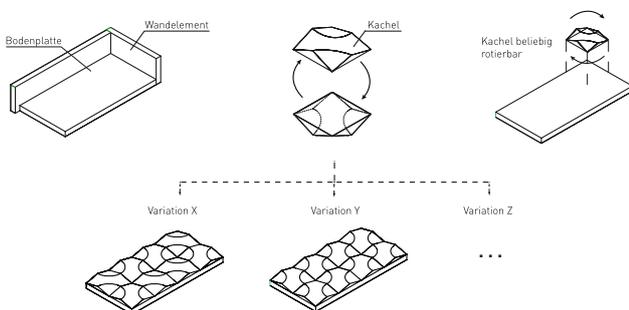


Abb.111: Grafik des Prinzips der Pressform und der Möglichkeit der Generierung von Varianten durch Rotation der einzelnen Pressform

Die Anforderungen an die Wandbefestigung waren Modularität und vor allem Reversibilität. Diese Anforderungen konnten mithilfe einer Anbringung erfüllt werden, die an ein einfaches Schlüssel-Loch-Prinzip angelehnt ist. Die be-

nötigten Komponenten sind: Holzschrauben in den Panelen und eine MDF-Platte mit eingefrästen Schlüsselöchern. Jedes Panel wurde auf das Endmaß kontrolliert und bei Bedarf an der Tischkreissäge zugeschnitten. Anschließend wurden Holzschrauben in die Paneele fest eingedreht. Die Positionen für die Schrauben wurden zuvor mit Schablonen markiert, die mit den Positionen auf der MDF-Platte übereinstimmten. Die Form der Schlüsseloch-Fräsungen wurde so angepasst, dass es möglich ist, die Paneele nach der Anbringung noch nach links oder rechts zu verschieben, um den Abstand optisch auszurichten (siehe Abb.112).

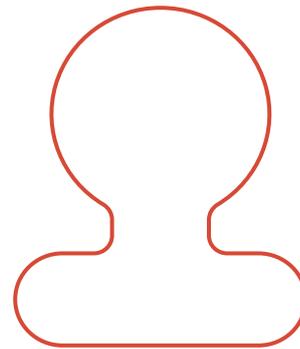


Abb.112: Grafische Darstellung des modifiziertem Schlüsselochs

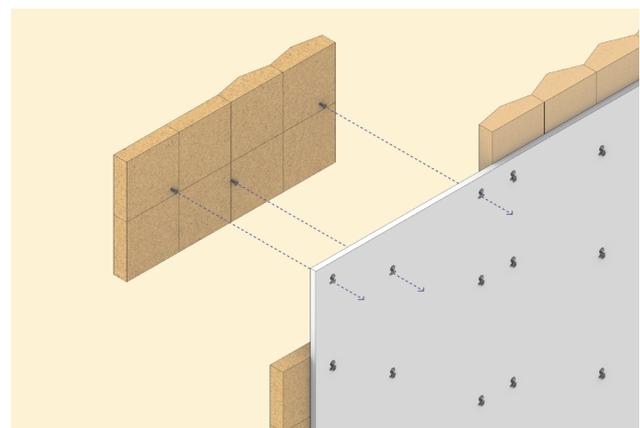


Abb.113: Explosionszeichnung der Wandbefestigung und Paneele

Die 10 mm starke MDF-Platte wurde dann zunächst an der Wand befestigt, anschließend wurden die Paneele in die Schlüsselöcher eingehängt.

#### 5.4 Finaler Enddemonstrator



Abb.114: Frontalansicht des Enddemonstrators

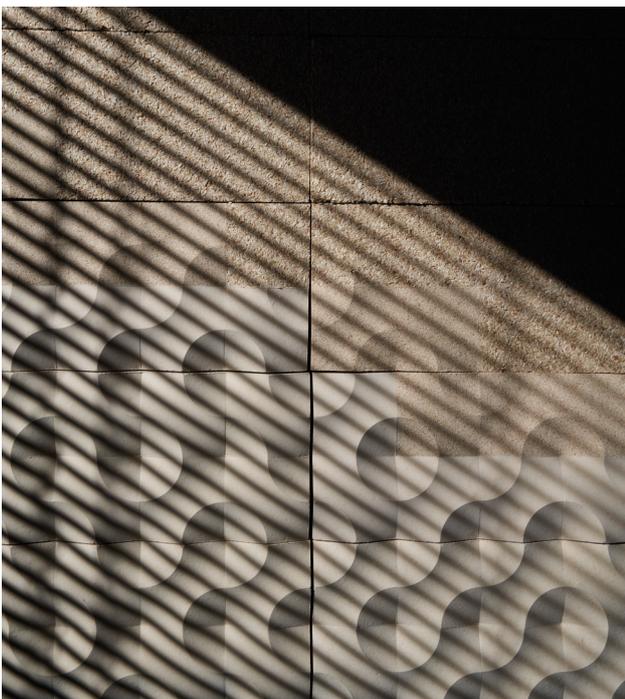


Abb.115: Nahaufnahme Enddemonstrator mit Licht- und Schattenspiel



Abb.116: Detailaufnahme eines Panels mit den drei Holzpartikeln sichtbar

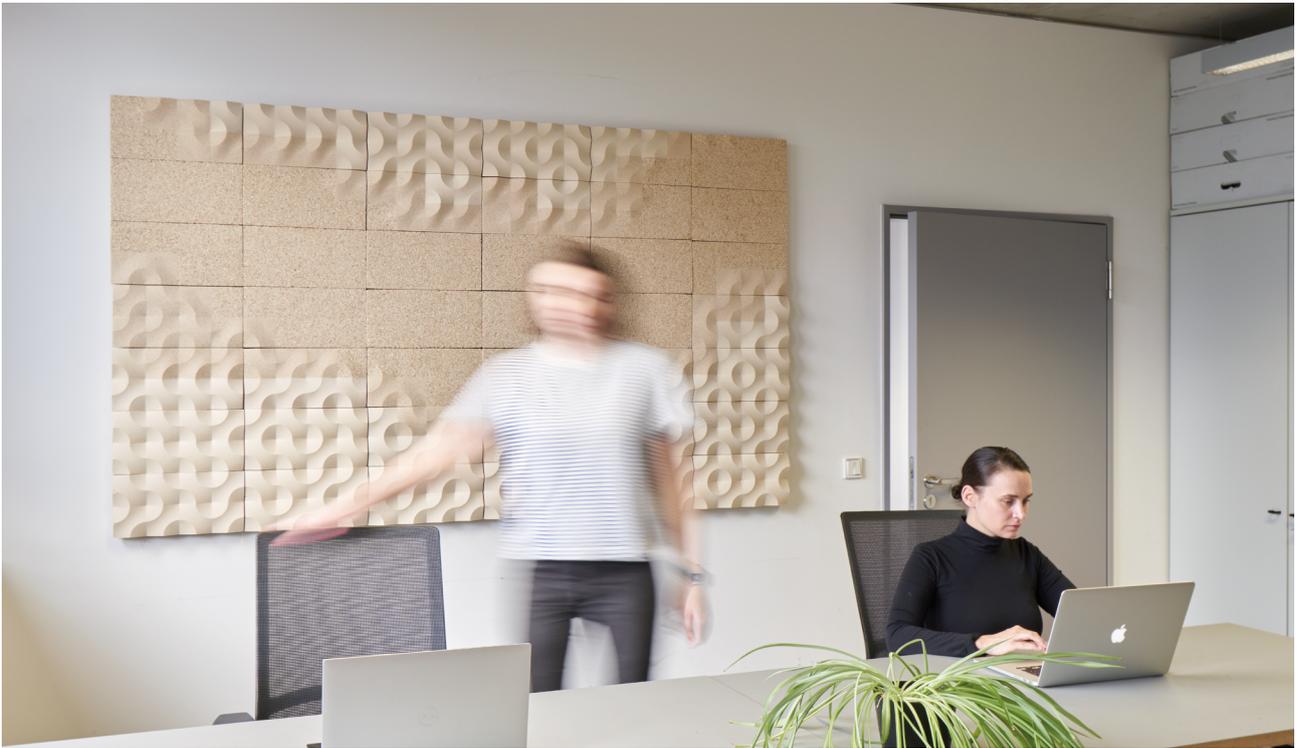


Abb.117: Ansicht auf zwei Arbeitsplätze hinter dem der Enddemonstrator sich befindet



Abb.118: Mitarbeiterin sitzt vor dem Enddemonstrator

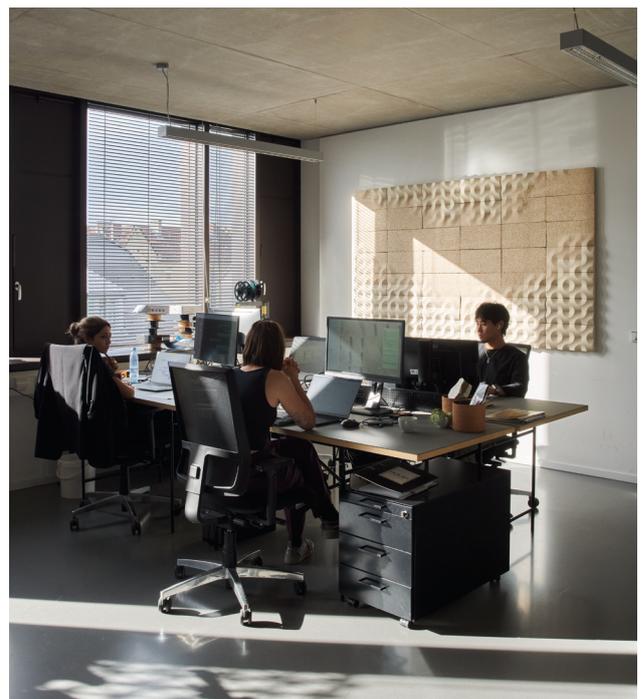


Abb.119: Foto des Enddemonstrators im genutzten Bürosetting

**6 FAZIT & AUSBLICK**



Abb.120: Aufgliederung und zeitliche Entwicklung der Forschungsmaßnahmen in Arbeitspakete (Stand 30.09.2023)

In Arbeitspaket 1 wurde eine weitgreifende Material-Grundlagenforschung betrieben zur Evaluierung einer Vielzahl an Rezepturen bestehend aus biogenen Bindemitteln und korrespondierenden Holzpartikelfractionen sowie die kohärente Entwicklung von Herstellungsprozessen zur Entwicklung von formstabilen und nachhaltigen Faserverbundwerkstoffen. Aus Phase 1 resultierende Prüfkörper wurden in Arbeitspaket 2 nach DIN-Verfahren getestet und Charakterisiert und entsprechend der Charakteristika einem Nutzen zugeordnet.

Materialforschungen zeigen, dass Kollektive aus Binder-Partikelfractionen sich unterschiedlich verhalten nach a.) Bindertyp und b.) Partikelgrößen. Eine illustrative Auswertung aller erforschten Parameter finden Sie in Abb.102.

**6.1 DIN-Prüfverfahren**

Während ein Formstoffverbund mit den Bindemitteln a.) Weizenstärke und b.) Kasein und aller getesteter Partikelgrößen realisierbar ist, ist die Umsetzung von Kollektiven unter Verwendung von pflanzlichen Proteinen nur mit sehr feinen Partikeln bzw. Holzmehlen möglich. Das zähflüssige tierische Protein agiert konträr und bildet nur ein Verbund mit groben Fasern. Auch nach Rezeptur und Prozessan-

passungen konnten keine ausreichend stabilen Prüfkörper hergestellt werden, womit die Bindemittel auf Basis pflanzlicher als auch tierischer Proteine für weitere Forschungsarbeiten ausgeschlossen wurden (Albumin-Faserverbund: 0,34 N/mm<sup>2</sup> / Pfl. Proteinen-Faserverbund: fail / Pfl. Proteinen-Holzmehlverbund: fail).

Weizenstärke-Holzmehlproben zeigen die höchsten Druck- (1,21 N/mm<sup>2</sup>) als auch Querzugfestigkeiten (0,67 N/mm<sup>2</sup>) auf wobei diese die Anforderungen nach DIN EN 312 an einen Plattenwerkstoff zur Verwendung im Trockenbereich deutlich übertreffen (Typ P2 / nicht tragende Plattenwerkstoffe / Mindestquerzugfestigkeit laut nach DIN EN 312 = 0,20 N/mm<sup>2</sup> (Dickenbereich > 40mm).

**6.2 Trocknung**

Die Trocknungszeit lässt sich über die a.) Materialstärke und b.) Trocknungsart wie Luft- oder thermische Trocknung einstellen und optimieren. Je geringer die Materialstärke, umso größer die Oberfläche im Vergleich zum Volumen, woraus ein beschleunigter Transport der Feuchtigkeit aus dem Kern an die Oberfläche resultiert und sich somit ein schnellerer Trocknungsprozess einstellt. Die Trocknungszeit verringert sich nach Partikelgrößen aufsteigend. Mit

Stärke vernetzte Elemente (mit einem Volumen von 0,002 m<sup>3</sup>) erreichen nach 14 Tagen Lufttrocknung (Holzmehl und Fasern) eine Zielfeuchte U von 15 %. Mit Kasein gebundene Proben erreichen nach 14 Tagen Lufttrocknung eine absolute Materialfeuchte von ca. 8 %.

### 6.3 Akustische Optimierung

Für eine zusätzliche akustische Ertüchtigung wie z.B. zur besseren Schallabsorption der Verbundmaterialien wurden sogenannte Resonatoren in die Materialien eingelassen wie z.B. durch Fräsen oder Formpressen. Da Forschungen gezeigt haben, dass Resonatoren sich besser in feine Oberflächen aus Holzmehl einpassen lassen, jedoch akustische Prüfungen aufzeigen, dass Fasern den Schall besser absorbieren, wurden Schicht- (2-schichtig) und Sandwichelemente (3-schichtig) aus beiden Partikelgrößen entwickelt. Die Deckschichten resultieren aus feinem oberflächenprägendem Holzmehl und der Kern aus soundabsorbierenden Fasern.

Sollte statt einer Absorption die Nutzung einer akustischen Streuung des Schalls Anwendung finden, kann dies durch die Verwendung von reinen Holzmehlen und einer resultierenden geschlossenen Oberfläche realisiert und der Schall reflektiert werden.

### 6.4 Akustische Auswertung

Akustische Messungen zeigen, dass gesondert Proben mit größeren Partikel-Strukturen (ca. 1000 µm) und Sandwich-Elemente, in Kombination mit den Bindemitteln Stärke und Kasein, hohe schallabsorbierende Eigenschaften aufweisen, die eine Klassifizierung und Industrie-einordnung/ Norm der gängigsten Absorptionsklasse C zulassen. Hier zeigt sich ein klarer Nachhaltigkeitsvorteil gegenüber bestehenden Industrieprodukten, die bei gleicher Klassifizierung schädliche Additive wie z.B. Zement enthalten.

Durch Materialeinstellungen (feinere Partikel ca. 75 µm) und Formanpassungen (additive Formen) lässt sich neben der Absorption auch eine Diffusion, eine Streuung des Schalls, erzielen.

Eine raumakustische Orientierungsmessung des Schallabsorptionsgrades zeigt eine akustische Verbesserung. Die drei gemessenen Großdemonstratoren

- (1) ohne Resonatoren
- (2) Resonatoren perforiert
- (3) invertierte komplexe Pyramiden

reduzieren die Nachhallzeit um ( $\Delta T_{20}$  max. 0,2 s). Eine feinaakustische Abstimmung der einzelnen Resonatoren-Typen konnte durch die Annäherungsmessung nicht präzise geklärt werden wobei sich eine normgerechte Schallabsorptionsmessung (gemäß ISO 354) im Hallraum empfiehlt.

### 6.5 Brandverhalten

Die hier durchgeführte Kleinbrennerprüfung nach DIN EN IS=11925-2 – an sechs unterschiedlichen Prüfrezepturen – zertifiziert die Klassen B bis F nach DIN EN 13501-1. Die hier beprobten Prüfkörper erreichen nach DIN 4102-1 (nach doppelter Brenndauer von 30 Sekunden statt 15 Sekunden) die höchste Kategorisierung von B1 „schwer entflammbar“.

### 6.6 Ökobilanzierung

Die Interpretation der Ökobilanz bewertet den Zugriff auf pflanzlich basierte Produkte – in allen drei Bilanzbereichen (Klima- Wasser- und Materialfußabdruck) als wesentlich nachhaltiger als Produkte tierischen Ursprungs, welche enorme Umweltbelastungen in allen drei Bilanzen hervorrufen und aus ökologischer Sicht in weiteren Studien zu vernachlässigen sind. So liegt beispielsweise der Klimafußabdruck (auf eine Bilanzgröße bezogen) von Stärke basierten Verbundstoff bei 0,62 kg/CO<sub>2</sub>eq und bei tierisch basiertem Faserverbund (Al-bumin) bei 77,67 kg/CO<sub>2</sub>eq.

## 6.7 Versuchsdemonstrator

Durch den 1:2 und den 1:1 Demonstrator konnte aufgezeigt werden, dass eine Produktion möglich ist. Die Oberfläche des Materials lässt sich durch zwei verschiedene Fertigungsstrategien bearbeiten: Fräsen und Formpressen. Zur Realisierung von dreidimensionalen Strukturen ergeben sich folgende Prozessstrategien: (1) Nachträgliche Bearbeitung von planaren Holzspanplatten durch Fräsung (2) Direktes Pressverfahren durch die Verwendung von dreidimensionalen Schalungen. Dadurch ist es möglich, auf unterschiedliche Variablen (Umgebungsgeräusche, Oberflächenstruktur der Umgebung) einzugehen. Das Fertigungsverfahren sowie die Kombination der Holzpartikel können zielgerichtet auf die Umgebung reagieren und einwirken.

Die Umsetzung eines 1:1-Demonstrators sowie die Skalierung der Rezeptur und die Anpassung der Misch-, Press- und Trocknungsprozesse demonstrieren die Machbarkeit des Verfahrens.

Gefertigte Holzspan-Elemente sind formstabil und halten den einwirkenden Kräften wie Transport, Handling und Einbau stand. Auch nachträgliche Bearbeitung und die Einwirkung auf das Material sind möglich, beispielsweise durch Schneidwerkzeuge wie Sägen und Verschraubungen in das Material. Dank des gewählten Schlüssel-Loch-Prinzips kann der Demonstrator problemlos montiert und demontiert werden und in seine Einzelteile zerlegt werden. Dies bietet den Vorteil, dass hergestellte Elemente problemlos zurückgeführt und in einen geschlossenen Materialkreislauf zur Produktion neuer Panel-Typen integriert werden können.

Die Möglichkeit der Färbung des Materials eröffnet weitere Gestaltungsmöglichkeiten.

## 6.8 Auswertung

Forschungen zeigen, dass bei der kaltquellende Weizenstärke Tigel die meisten positiven Eigenschaften gegenüber anderen Klebstoffen überwiegen als auch diverse Partikelgrößen verwendet werden können um differenzierte akustische- und mechanische Beschaffenheiten einstel-

len zu können. Bestwerte erreicht das Bindemittel Stärke in jeglichen Prüfverfahren als auch in der ökobilanziellen Bewertung.

Die positiv ausfallenden akustischen Eigenschaften und resultierenden Messwerte des Materials setzen den Nutzen als Akustiklösung fest.

## 6.9 Ausblick

Durch das Projekt konnte ein kreislauffähiger, brandsicherer Biobaustoff mit hohen mechanischen Eigenschaften auf Basis und Verwertung von Abfällen entwickelt werden. Es wurde ein Ausblick geschaffen als akustische Anwendung wobei sich das Potenzial des Materials für diverse Anwendungen wie z.B. Wandkonstruktionen erprobt werden kann.

## 7 MITWIRKENDE

### 7.1 Autorinnen und Autoren

Eversmann, Philipp (Universität Kassel)

Liebringshausen, Anne (Universität Kassel)

Heinze, Lisa (Universität Kassel)

Nolte, Nadja (Universität Kassel)

Hannu, Julia (Universität Kassel)

### 7.2 Studentische Hilfskräfte

Giemza, Olga

Heberle, Jonas

Kreiß, Charlotte

Simon, Björn

### 7.3 Projektpartner

Fritz Häcker GmbH + Co. KG

Maus GmbH Modell- und Formenbau

### 7.4 Materialsponsoring

ADDCON GmbH

Hans J. Heinemann Import-Export GmbH

JELU-WERK Josef Ehrler GmbH & Co. KG

Kröner-Stärke GmbH

### 7.5 Mitwirkende Forschungsinstitute

Universität Kassel

Institut für Produktionstechnik und Logistik  
Fachgebiet für Trennende und Fügende Fertigungsverfahren

Ansprechpartnerin: Dr. Moira Burnett

Universität Kassel

Center for Environmental Systems Research

Ansprechpartner: Dr. Clemens Mostert

Technische Universität Dresden

Institut für Pflanzen- und Holzchemie

Ansprechpartnerin: Dr. Ing. Katrin Thümmeler

### 7.6 Mitwirkende Unternehmen

Arup

Ansprechpartner: Albert Dwan

Ecophon

Saint-Gobain

Ansprechpartner: Dr. Achim Klein

### 7.7 Fachliche Betreuung

Lauffer, Felix

Rose, Dr. Arnd

### 7.8 Weitere Projektbeteiligte

Brinkmann, Guido (Universität Kassel)

Schön, Birgit (Universität Kassel)

## 8 LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Datenblatt „BAUX MSDS Acoustic Wood Wool“, BAUX, [Online]. Available: <https://u.pcloud.link/publink/show?code=XZDLVjVZt26O7rcn3gXrOJW1OR-PEABXe8Eak>. [Zugriff am 18.10.2022].
- [2] BAUX, „www.baux.com,“ [Online]. Available: <https://u.pcloud.link/publink/show?code=XZAREbVZ-S7iC9Tng7gyOUHWHXHUipzBF5H0Nk>. [Zugriff am 28.09.2022].
- [3] BAUX, „BAUX Acoustic Pulp,“ [Online]. Available: <https://www.baux.com/acoustic-products/pulp/>. [Zugriff am 19. Sep 2022].
- [4] A. Wagenführ, Taschenbuch der Holztechnik, Carl-Hanser-Verlag, Ed., Leipzig: 2012.
- [5] E. Koch, Flächenrecycling durch kontrollierten Rückbau: Ressourcenschonender Abbruch von Gebäuden und Industrieanlagen, Berlin: Springer, 1997, p. 195.
- [6] „Forum | Nachhaltiges Bauen,“ 2022. [Online]. Available: <https://nachhaltiges-bauen.de/baustoffe/Spanplatten>. [Zugriff am 26.07.2022].
- [7] D. Bosnyak, N. S. A. A. Mahmoud, T. Wagenham, A. Carballeira und L. Gomez-Agustina, Book of Acoustics: Making people happy at work, Stockholm, Sweden: BAUX AB, 2020.
- [8] World Health Organization, „Noise,“ 2010. [Online]. Available: <https://www.who.int/europe/news-room/fact-sheets/item/noise>. [Zugriff am 5. Sep 2022].
- [9] F. Asdrubali, S. Schiavoni und K. V. Horoshenkov, „A Review of Sustainable Materials for Acoustic Applications,“ Building Acoustics, Bd. 19, Nr. 4, p. 283 – 311, 2012.
- [10] F. J. Fahy, Foundations of Engineering Acoustics, Cambridge, MA: Academic press, 2003.
- [11] M. Long, Architectural Acoustics 2nd ed, Cambridge, MA: Academic press, 2014.
- [12] M. Yang und P. Sheng, „Sound Absorption Structures: From Porous Media to Acoustic Metamaterials,“ Annual Review of Materials Research, Bd. 47, pp. 83-114, 2017.
- [13] W. Tan, M. Afendi, R. Daud, R. Ahmad, A. Majid und C. Meng, „Sound Absorption Analysis on Micro-Perforated Panel Sound Absorber with Multiple Size Air Cavities,“ International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering, Bd. 15, Nr. 5, pp. 71-76, 2015.
- [14] K. H. Kim und G. H. Yoon, „Absorption performance optimization of perforated plate using multiple-sized holes and a porous separating partition,“ Applied Acoustics, Bd. 120, pp. 21-33, 2017.
- [15] T. E. Viagran, „Conical Apertures in Panels; Sound Transmission and Enhanced Absorption in Resonator Systems,“ Acta Acustica united with Acustica, Bd. 90, Nr. 6, pp. 1170-1177, 2004.
- [16] A. Krushynska, F. Bosia und N. Pugno, „Labyrinthine Acoustic Metamaterials with Space-Coiling Channels for Low-Frequency Sound Control,“ Acta Acustica united with Acustica, Bd. 104, Nr. 2, 2017.
- [17] N. Neithalath, J. Weiss und J. Olek, „Acoustic performance and damping behaviour of cellulose-cement composites,“ Cement and Concrete Composites, Bd. 26, Nr. 4, pp. 359-370, 2004.
- [18] Nexcom, „Material Description and History,“ [Online]. Available: <https://nexcembuild.com/wp-content/uploads/2016/09/Nexcem-Material-Properties.pdf>. [Zugriff am 19. Sep 2022].
- [19] BAUX, „Acoustic Wood Wool – Material Data Sheet,“ [Online]. Available: <https://u.pcloud.link/pu->

blink/show?code=XZAREbVZS7iC9Tng7gyOUHWXHU-pizBF5H0Nk. [Zugriff am 19 Sep 2022].

[20] „Deutsches Pellet Institut,“ [Online]. Available: <https://depi.de/de/pelletproduktion#b4v1u>. [Zugriff am 27 07 2022].

[21] C. Merforth, „Sägewerkskongress: Sind Veredelung, entfernte Märkte oder situative Mengenpufferung die Lösung für den Sägenebenproduktmarkt? Carsten Merforth,“ 01 12 2016. [Online]. Available: <https://www.ag-rohholz.de/presse/news/1112-saegewerkskongress-sind-veredelung-entfernte-maerkte-oder-situative-mengenpufferung-die-loesung-fuer-den-saegenebenproduktmarkt>. [Zugriff am 27 07 2022].

[22] „DHWR - Deutscher Holzwirtschaftsrat,“ [Online]. Available: <https://www.dhwr.de/holzwirtschaft.php>. [Zugriff am 27 07 2022].

[23] „Bundesverband der Altholzaufbereiter und -verwerter,“ [Online]. Available: <https://altholzverband.de/2018/09/17/klimaschuetzer-altholz/>. [Zugriff am 27 07 2022].

[24] „Eu-Recycling; EEG-Änderung und Verordnungsnovelle: Der Altholzmarkt steht vor einem Wandel,“ [Online]. Available: <https://eu-recycling.com/Archive/23315>. [Zugriff am 27 07 2022].

[25] C. Breuer, *Kitte und Klebstoffe. Geschichte und technische Ausführung*, Dresden: Fachbuchverlag-Dresden, 2014, pp. 83-89.

[26] Matissek et al. 2014.

[27] G. Tegge, *Stärke und Stärkederivate*, Behr's Verlag, 2004, pp. 37-49.

[28] M. Dunky und P. Niemz, *Holzwerkstoffe und Leime: Technologie und Einflussfaktoren*, Berlin/Heidelberg: Springer Verlag, 2002, pp. 414-416.

[29] „Kasein ist ein natürliches Protein,“ [Online]. Available: <https://www.heinemann-stade.de/>. [Zugriff

am 28 09 2022].

[30] „Chemie Lexikon,“ [Online]. Available: <https://www.chemie.de/lexikon/Knochenleim.html>. [Zugriff am 20 09 2022].

[31] N. Nolte, „Biomatter Building Parts / Untersuchung des Verbunds von Chitosanbiopolymer-Folien und Weidenfilament für nachhaltige Bauteile,“ 2022.

[32] M. Haermeyer, Interviewee, Verkaufsleiter Export & Geschäftsentwicklung, Kröner-Stärke GmbH. [Interview]. 16 11 2021.

[33] T. Richardson, *Composites: A Design Guide*, New York, US: Industrial Press Inc, 1987.

[34] A. Dwan, Interviewee, Acoustic Engineer, Arup. [Interview]. 30 March 2022.

[35] Cincinnati Milling Machine Company, „An Analysis Of The Process Of Milling,“ in *A treatise on milling and milling machines*, Cincinatti, Ohio, Fourteenth Thousand, 1922, pp. 122-131.

[36] M. Grohmann, P. Eversmann, A. Liebringshausen, S. Drebes, A. Göbert und C. Freudenberger, „Industriell nutzbare, nachhaltige und wiederverwendbare Schalungen zur Realisierung von doppelseitig gekrümmten Betonfertigteilen,“ Kassel, 2021.

[37] M. Maus, Interviewee, Geschäftsführer bei Maus GmbH Modell- Und Formenbau. [Interview]. 18 July 2019.

[38] H. Austria, „dataholz.eu,“ [Online]. Available: [https://www.dataholz.eu/fileadmin/dataholz/media/baustoffe/Datenblaetter\\_de/spa\\_de\\_01.pdf](https://www.dataholz.eu/fileadmin/dataholz/media/baustoffe/Datenblaetter_de/spa_de_01.pdf). [Zugriff am 27 09 2022].

[39] Acoustics — Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes — Part 1: Method using standing wave ratio, ISO

10534-1:1996, 1996.

[40] Acoustics — Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes — Part 2: Transfer-function method, ISO 10534-2:1998, 1998.

[41] Acoustics — Measurement of sound absorption in a reverberation room, ISO 354:2003, 2003.

[42] D. A. H. C. Bies, „Flow resistance information for acoustical design,“ Applied Acoustics - APPL ACOUST, Bd. 13, pp. 357-391, 09 01 1980.

[43] „Determination of airflow resistance,“ ISO 9053-1:2018, 2018.

[44] „Determination of airflow resistance,“ ISO 9053-2:2020, 2020.

[45] „Acoustical, Standard Test Method for Airflow Resistance of,“ ASTM C522-03, 2016.

[46] „Acoustics - Sound absorbers for use in buildings - Rating of sound absorption,“ ISO 11654:1997, 1997.

[47] A. Klein, Interviewee, Concept Developer for Room Acoustics at Saint-Gobain, Ecophon. [Interview]. 12 10 2022.

[48] Umweltbundesamt, „Ökobilanz,“ [Online]. Available: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaft-konsum/produkte/oekobilanz>. [Zugriff am 11 10 2022].

[49] H. Hottenroth, B. Joa und M. Schmidt, Carbon Footprints für Produkte, Bd. Handbuch für betriebliche Praxis kleiner und mittlerer Unternehmen , I. f. I. E. Pforzheim, Hrsg.

[50] R. Hischier, B. Weidema, H.-J. Althaus, C. Bauer und G. Doka, „Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods,“ 2010. [Online]. Available: [https://www.ecoinvent.org/files/201007\\_hischier\\_wei-](https://www.ecoinvent.org/files/201007_hischier_wei-)

[dema\\_implementation\\_of\\_lcia\\_methods.pdf](#) . [Zugriff am 11 10 2022].

[51] C. Mostert und S. Bringezu, Measuring Product Material Footprint as New Life Cycle Impact Assessment Method: Indicators and Abiotic Characterization Factors., 2019.

[52] A.-M. Boulay, J. Bare, L. Benini, M. Berger und et al. , The WULCA consensus characterization model for water scarcity footprints: assessing impacts of water consumption based on available water remaining (AWARE), Bd. Life Cycle Assess , 2018, p. 368–378.

[53] K. Steckles, Truchet Tilings, Heidelberg Laureate Forum, 23 02 2022 [Online]. Available: <https://scilogs.spektrum.de/hlf/truchet-tilings/> [Zugriff am 19 09 2023].

[54] Kreidezeit Naturfarben GmbH, Pigmente Produktinformation, 15 02 2017 [Online]. Available: [https://www.kreidezeitshop.de/media/pdf/b8/1f/1c/TM\\_Pigmente.pdf](https://www.kreidezeitshop.de/media/pdf/b8/1f/1c/TM_Pigmente.pdf) [Zugriff am 20 09 2023]

## 9 ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Alle verwendeten Abbildungen: Eigene Darstellungen  
Experimentelles und Digitales Entwerfen und Konstruieren  
FB06 | Architektur, Stadtplanung, Landschaftsplanung  
Universität Kassel