

# Schlussbericht

## zum Vorhaben

Thema: **Machbarkeitsstudie: Geschäumte Abstandsgewebe**  
Akronym: **TexFoam**

Zuwendungsempfänger:

**Fraunhofer-Institut für Holzforschung  
Wilhelm-Klauditz-Institut (WKI)**

Förderkennzeichen:

**2221HV091X**

Laufzeit:

**01.10.2022 bis 29.02.2024**

Monat der Erstellung:

**05/2024**

Gefördert durch:



**Bundesministerium  
für Ernährung  
und Landwirtschaft**

**aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages**

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages mit Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) als Projektträger des BMEL für das Förderprogramm Nachwachsende Rohstoffe unterstützt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der Autorenschaft.

## **Projekt- und Ansprechpartner**

### **Koordination**

**Fraunhofer Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V.**

**Fraunhofer-Institut für Holzforschung (WKI)**

**Wilhelm-Klauditz-Institut**

M. Sc. Ole Gonnsen

Fraunhofer-Anwendungszentrum HOFZET

Heisterbergallee 10 A

30453 Hannover

Tel.: +49 511 353248 - 14

E-Mail: [ole.gonnsen@wki.fraunhofer.de](mailto:ole.gonnsen@wki.fraunhofer.de)

## Inhaltsverzeichnis

<b>I.</b>	<b>Kurzbericht .....</b>	<b>1</b>
1.	Aufgabenstellung .....	1
2.	Planung und Ablauf des Vorhabens .....	5
3.	Resümee der wesentlichen Ergebnisse .....	6
	a) Arbeitspakete und Meilensteine .....	6
	b) Zusammenfassung .....	7
<b>II.</b>	<b>Ausführliche Darstellung der Ergebnisse .....</b>	<b>1</b>
1.	Erzielte Ergebnisse .....	1
	Arbeitspaket 1: Auswahl und Beschaffung Matrix- und Textilkomponenten .....	1
	Arbeitspaket 2: Auslegung und Fertigung eines Versuchswerkzeugs .....	4
	Arbeitspaket 3: Herstellung eines geschäumten Abstandgewebes .....	7
	Arbeitspaket 4: Imprägnierung und Konsolidierung der Deckschichten .....	20
	Arbeitspaket 5: Charakterisierung des Sandwichelements und Bewertung .....	37
2.	Verwertung .....	39
	a) Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen .....	39
	b) Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende .....	39
	c) Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende .....	39
	d) Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit .....	40
3.	Erkenntnisse von Dritten .....	40
4.	Veröffentlichungen .....	40



# I. Kurzbericht

## 1. Aufgabenstellung

Ziel des Vorhabens ist die Prozessentwicklung eines freiformbaren Sandwichbauteils aus Holzschaum, Naturfasergewebe und einem (teil-) biobasierten Kunststoff mit einem Technology Readiness Level (TRL) von 3. Hierfür wird Holzschaum unter Nutzung einer evakuierten Werkzeugkavität in einem Abstandsgewebe expandiert und anschließend werden durch die Flutung der Kavität mit einem duroplastischen System die Deckschichten konsolidiert. Neben der Zusammenführung verschiedener Prozessschritte zu einem One-Shot-Verfahren sind auch hinsichtlich der mechanischen Performance Vorteile des Sandwichmaterials zu erwarten: Die Stehfäden (Polfäden) verbinden die Deckschichten durch den Kern miteinander und durch die Expansion und Trocknung der Schaumsuspension in dem Gewebe wird eine zusätzliche mechanische Verzahnung von Kern- und Deckschicht erreicht. Des Weiteren erlaubt die Expansion des Schaumes in der Kavität die Abbildung von Formen, die nicht durch den schubsteifen Schaum, sondern das Textil definiert werden. Die Verwendung von Naturfasern sowie eines biobasierten Kunststoffes neben dem Holzschaum maximiert zudem den Anteil nachwachsender Rohstoffe in der fertigen Sandwichstruktur.

## Stand der Wissenschaft und Technik

### *Sandwichbauweise*

Die Sandwichbauweise bietet eine geeignete Möglichkeit, die spezifischen Festigkeiten von Strukturen aus ökonomischen und/ oder Funktionsgründen zu erhöhen (Pflug, J., Vagrimde, B., Verpoest, I. 2003). Dafür werden dünne, hoch steife Deckschichten mit einem schubsteifen Kern geringer Dichte schubfest verbunden. Der hohe Abstand der beiden Deckschichten zueinander erzeugt ein hohes Trägheitsmoment, weshalb ein Sandwichbalken bei gleicher Größe und gleichem Gewicht eine wesentlich höhere Biegesteifigkeit als ein entsprechender Festkörperbalken besitzt (DIAB AB). In der Sandwichstruktur trägt das Deckschichtmaterial hauptsächlich Zug- und Druckbeanspruchungen, die vom Biegemoment und von den Lasten in der Sandwichebene verursacht werden, während Querkräfte als Scherbeanspruchung von der Kernschicht aufgenommen werden. Neben dem Leichtbaupotenzial aufgrund des geringen Gewichts können einige weitere positive Eigenschaften von Sandwichstrukturen genannt werden (DIAB AB; Zenkert 1997; Rikards et al. 1997)

- Hohe Schlagfestigkeit
- Hohe Energie-Absorption
- Exzellentes Ermüdungsverhalten
- Gute akustische Isolierung
- Glatte Oberfläche

Die für die Deckschicht eingesetzten Materialien lassen sich in zwei Hauptgruppen unterteilen. Metallische Werkstoffe, wie Stahl, Edelstahl und Aluminiumlegierungen, bilden die erste Gruppe. Der zweiten und größeren Gruppe gehören nichtmetallische Materialien, wie faserverstärkte Kunststoffe, Furnier, Sperrholz oder Zement an. Materialien für die Kernschicht müssen einen ausreichend hohen Schubmodul aufweisen, um nicht unter der durch Schubbelastung initiierten Scherspannung zu versagen (Zenkert 1997). Die am häufigsten verwendeten Kernmaterialien sind Schaumstrukturen aus offenporig oder geschlossenporig geschäumten Metallen oder Polymeren (Schlotter 2002). Die am häufigsten verwendeten Materialien für Schaumkerne in Sandwichmaterialien sind Polyurethan (PUR), Polystyrol (PS), Polyvinylchlorid (PVC), Polymethacrylimid (PMI), Poly-isocyanurat, Polyethylen (PE), Polyetherimid (PEI), Polyphenol und Styrol-Acrylnitril (SAN).

Für die Fertigung von Sandwichmaterialien mit Schaumkern werden die Deckschichten mit diesem verklebt. Ein produktionstechnischer Nachteil dieser Art von Sandwich-Platten ist eine getrennte Fertigung von Deck- und Kernschicht. Diese bringt mit dem nachträglichen Zusammenfügen der Komponenten einen zusätzlichen Produktionsschritt mit sich. Die oft hohen Anforderungen unterschiedlichster Bauteile, insbesondere in der Automobilindustrie, bedürfen einer optimalen Materialkombination und kostengünstiger automatisierter Prozesse.

Aufgrund der Kombination von unterschiedlich steifen Materialien in Kern und Deckschicht treten bei Sandwichmaterialien strukturbedingte u. a. Versagensarten auf, die Delamination von Kern und Deckschicht als Beispiel geringer Haftung ist in Abbildung 1 dargestellt.

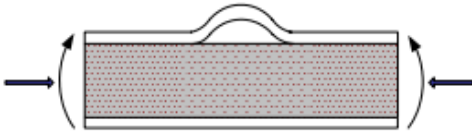


Abbildung 1 Versagen in den Sandwichbalken in Form von Delamination der Kern und Deckschicht (Zenker 1997)

Verschiedene Autoren (Lascoup et al. 2006), (Potluri et al. 2003), (Stanley, L.E. und Adams, D.O. 2001)) beschreiben das Vernähen der Deckschichten durch den Kern als eine nachgewiesene Möglichkeit, die mechanische Performance eines Sandwichmaterials weiter zu steigern bzw. die Schadenstoleranz hinsichtlich einer Delamination von Deck- und Kernschicht des Sandwichmaterials zu verbessern. Aktas führt jedoch an, dass die Nähetechnik auf weiche Materialien beschränkt ist und Industrienähmaschinen nur bedingt für Massenproduktionen geeignet sind, was zu ökonomischen Hindernissen führt (Aktas et al. 2013).

Durch die Verwendung von Abstandsgeweben lassen sich die beiden Deckschichten (Ober- und Untergewebe), inklusive Verbindung untereinander, in einem Produktionsschritt herstellen. Abstandsgewebe bestehen aus zwei Gewebelagen, die durch Polfäden verbunden sind. Polfäden werden aus Kettfäden gebildet. Für das Ober- und Untergewebe können alle gängigen Gewebearten realisiert werden (Cherif 2011).

Die Ansteuerung der Pol-Kettfäden der Abstandsgewebe erfolgt mittels Jacquard-Aufsatz. Bei der Herstellung von z. B. einer Köperbindung 2/2 auf dem oberen und dem unteren Greifer können zwei oder vier Polfäden in definierten Abständen ganz nach oben und danach ganz nach unten gefahren werden. Auf diese Weise entsteht die Verbindung zwischen Ober- und Untergewebe. Im Muster wird hierbei festgelegt, wie oft die Polfäden eine Verbindung zwischen den beiden Geweben herstellen. Zwischen den beiden Geweben können außerdem verschiedene Abstände realisiert werden.

Konventionelle Abstandsgewebe werden in der Teppich- und Veloursproduktion eingesetzt, indem die Polfäden nach dem Webvorgang geschnitten werden. Für Strukturanwendungen lassen sich Abstandsgewebe mit Harz infiltrieren. Diese Leichtbauplatten werden im Bootsbau, bei LKW-Aufbauten oder Tankauskleidungen (Fa. Wela, Hamburg) eingesetzt (Cherif 2011).

### Biobasierte Schäume

Derzeit liegen mehrere Publikationen im Bereich von biobasierten Sandwichmaterialien vor. Die Forschung zu Holzsandwichmaterialien zeigt einen steigenden Trend in der Verwendung von geschäumten Kernen, um Leichtbauwerkstoffe herzustellen (Kalia 2018). Beispielsweise besteht ein Ansatz darin, Verbundwerkstoffe mit Holz als Deckschicht und einem geschäumten Kern herzustellen, indem Mikropartikel mit expandierbarem Polystyrol geschäumt werden (Shalbafan et al. 2012). Balsaholzkerne in Kombination mit Glasfaser-Deckschichten werden beim Bau von Windkraftanlagen eingesetzt. Darüber hinaus ist Kork ein etabliertes Kernmaterial auf Basis nachwachsender Rohstoffe.

Ein formaldehyd- und bindemittelfreier Holzschäumkern mit einer geringen Dichte ist derzeit weder kommerziell erhältlich, noch grundlegend beschrieben. Bereits in den 1940er Jahren gab es zahlreiche Ansätze einen Schaum zu entwickeln (Ormell-Roselund-Verfahren, Schaumkuchen in Schweden, Kramforsverfahren in Finnland). Seit Anfang 2000 beschäftigen sich die Firma Innovation Wood sowie die Universität für Bodenkultur in Wien (BOKU, Wood K Plus) wieder mit der Entwicklung von geschäumten Holz-Getreide-Werkstoffen (Holzbrot). Die Firma Innovation Wood (kurz: iwood) hat diese Idee neu aufgegriffen und Sägemehl, Maisstärke oder Kleie aus Getreide/Reis, Hefe und Wasser zu einem »Holzbrot« gebacken, um daraus einen Werkstoff zu gewinnen. Die Rohdichten des erzeugten Materials lagen zwischen 230 kg/m<sup>3</sup> und 310 kg/m<sup>3</sup>. Auch die BOKU griff die Idee des Holzbrottes 2004 erneut auf und verwendete Weizen- bzw. Getreidemehl statt Maismehl, das dann ebenfalls mit Holzmehl, Hefe, natürlichen Zuschlagstoffen und Wasser zu einem Teig verarbeitet und gebacken wurde. Die plattenförmigen Werkstoffe besitzen Rohdichten zwischen 300 kg/m<sup>3</sup> und 450 kg/m<sup>3</sup>. Erste Ansätze aus den 1940er Jahren zur Herstellung von Holzschäumkuchen nach Ormell-Roselung wurden aufgrund zu hoher Dichten und schlechter mechanischer Eigenschaften nicht weiterverfolgt und ergebnislos beendet. Auch die Entwicklung von Plattenwerkstoffen aus »Holzbrot« ab dem Jahr 2000 wurde aus denselben Gründen nicht weiterverfolgt, erschwerend kam eine Konkurrenz zur Lebensmittelproduktion hinzu (Nutzen von Mehl). Als Lignocelluloseschäume werden aber auch weitere Entwicklungen genannt, wie z.B. Celluloseschäume (CelluTech, Schweden) oder auch Ligninschäume (z.B. Technische Universität Dresden), deren Ausgangsmaterialien auch aus Lignocellulosen hergestellt werden. Für die aktuell entwickelten Lignin- und Celluloseschäume müssen energiereiche Trennverfahren vorgeschaltet werden, die bei der Herstellung von Holzschäum entfallen. Ferner werden petrochemische Additive wie Treib- oder Bindemittel eingesetzt, sodass diese Schäume zum Teil nicht abbaubar sind (Li et al. 2017).

Weitere aktuelle Entwicklung im Bereich biobasierte Schäume wurden von der Firma Stor Enso (Verkaufsname: Papira® und Fibrease™) auf den Markt gebracht. Dieser auf Cellulose basierte Schaum ist für Schutzverpackungen, sowie Polsterung vorgesehen. Bei diesem Verfahren wird zunächst Cellulose von den restlichen Holzbestandteilen getrennt (Papierindustrie) und anschließend mit einem Tensid gemischt und

mittels Mischer aufgeschlagen. Die entstandene Schaummasse wird in eine Form überführt und wird für mehrere Stunden bis Tage getrocknet (Cucharero et al. 2021). Ebenfalls kann dieser Schaum mit biobasierten Epoxidharzen versetzt werden, um mechanische Festigkeiten zu erhöhen (Obradovic et al. 2016). Die Schäume erreichen Dichten bis ca. 100 kg/m<sup>3</sup>.

Eine weitere Schaumklasse sind die PLA-basierten Schäume, so z.B. der PLA-basierte „BioFoam®“ der Fa. Synbra. Dieser wird aus Polymilchsäure (PLA) hergestellt, die wiederum über fermentative Prozesse biotechnologisch erzeugt wird. Dabei entsteht eine gewisse Lebensmittelkonkurrenz, da für die Produktion vorrangig Mais und/oder Zuckerrohr benötigt wird (o.V.). Der Schaum selbst wird mittels Extrusionsschäumen oder Partikelschäumen in einer Form hergestellt. Der in diesem Vorhaben eingesetzte Schaum soll jedoch näher an der Struktur von lignocellulosehaltigen Materialien liegen und damit eine homogene Struktur zwischen Holz und Flachsdeckschicht ermöglichen. Damit wird auch erhofft, ein späteres einfacheres Recycling zu ermöglichen. Auch soll auf einen vorangeschalteten biotechnologischen Prozess verzichtet werden, um den Prozess möglichst einfach zu etablieren. Dem allg. Ansatz folgend die Anzahl eingesetzter Materialien in einem Verbund möglichst gering zu halten bzw. chemisch ähnliche Materialien (hier Lignocellulosen) einzusetzen, ist diese Klasse von Schäumen aus Sicht der Antragsteller für die Umsetzung des Vorhabens nicht bzw. nur bedingt zielführend, weshalb ihr Einsatz zunächst nicht weiterverfolgt wird.

Weitere biobasierte Schäume lassen sich im Bereich Ligninschäume finden. Hier finden sich eine große Bandbreite an Ansätzen z.B. (Gómez-Fernández et al. 2017); (Luo et al. 2020); (Gondaliya und Nejad 2021);(Yan et al. 2021). Das Themenfeld ist sehr komplex und umfangreich. Insgesamt lässt sich jedoch zusammenfassen, dass sich bisherige Arbeiten im Bereich Ligninschäume entweder auf die Substitution von Polyol- oder Isocyanatkomponente durch (modifiziertes) Lignin fokussiert haben oder durch Einbringen weiterer Biopolymere oder alternativer Treibmittel realisiert wurden. Dabei konnte jedoch in keinem Schaum Lignin als Hauptbindemittelkomponente eingesetzt werden, ohne dass harsche Reaktionsbedingungen (Temperatur, Druck) oder andere gesundheitsbedenkliche Komponenten (z.B. Glutaraldehyd) verwendet wurden. Insofern würde ein Schaum, in welchem Lignin als Hauptbindemittelkomponente eingesetzt wird, und in welchem keine Isocyanate verwendet werden, einen wichtigen Fortschritt gegenüber den bereits hergestellten Produkten darstellen. Neben Ligninschäumen sind auch andere biobasierte Polyurethan- oder epoxidierte Schäume bekannt, die auf die Substitution von Polyol, Epoxidharzen oder Isocyanatkomponenten setzen (z.B. Drachenkopföl – Fraunhofer IMWS/ICT) und in umfangreicher Literatur zu finden sind. Einen guten Einstieg bieten die Reviews von (Jin et al. 2019) und (Sarika et al. 2021). All diese Schäume haben jedoch ebenfalls gemeinsam, dass zuerst (Teil)Komponente aus Rohstoffen gewonnen oder extrahiert werden und anschließend chemisch modifiziert werden müssen. So liegt oft nur ein halbbiobasierter Ansatz vor. Da in dem angedachten Projekt jedoch auf eine zusätzliche chemische Modifikation verzichtet werden soll, werden diese Schäume in dem gewählten Ansatz zuerst nicht weiterverfolgt.

Am Fraunhofer WKI wurde seit etwa 2015 ein Holzschäum entwickelt, der aus reinem Holz besteht. Diese Holzschäume sind funktionale leichte Holzwerkstoffe (Dichte 40-280 kg/m<sup>3</sup>) mit einer offen-porigen Struktur. Die Festigkeit des Schaums entsteht durch holzeigene Bindungskräfte, so dass ohne Zusatz von Klebstoffen ein nachhaltiger und biologisch abbaubarer Holzschäum entsteht (Scholtyssek). Als Rohstoffe dienen meist Laubhölzer, wobei auch andere Holzarten, sowie Einjahrespflanzen und Sägereste für die Herstellung geeignet sind. Diese Rohstoffquelle umfasst somit auch derzeit wenig genutzte, aber künftig stärker fokussierte Holzarten und -reststoffe. Das aktuelle Herstellungsverfahren umfasst die Zerkleinerung und Desintegration zu einer wässrigen Suspension, die Aufschäumung mittels chemischer Treibmittel (Fenton-Reagenz in Kombination mit einem Protein) und die Trocknung der Holzschäummasse wie in Abbildung 2 sichtbar ist.

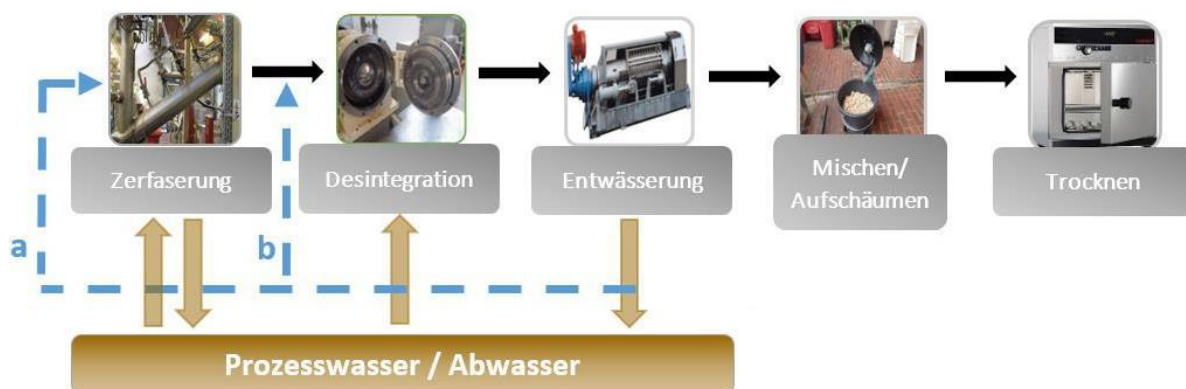


Abbildung 2: Prozessschema zur derzeitigen Holzschäumherstellung inkl. Wasser/Abwasserkonzept.

Die Eigenschaften der Holzschäume sind abhängig von Holzart und Aufschäumverhältnis (Anteil der Additive) und können für einen weiten Dichtebereich eingestellt werden. Dabei korrelieren die Festigkeiten mit der

eingestellten Dichte. Die Eigenschaften gegenüber Faserplatten und EPS sind nachfolgend tabellarisch dargestellt

*Tabelle 1: Eigenschaftsvergleich zwischen Holzschaum, einem Holzfaserdämmstoff und EPS (leichte Dämmstoffplatte).*

Eigenschaft		Holzschaum	Holzfaserdämmstoff	EPS
Dichte	[kg/m <sup>3</sup> ]	50 - 150	150-200	15-90
Druckfestigkeit	[N/mm <sup>2</sup> ]	0,1 – 0,6	~0,05	0,065-0,5
Wärmeleitfähigkeit	[W/mK]	< 0,04	0,04-0,055	< 0,035
Brandverhalten	[Klasse]	B2	B2	B1/B2

Aus der Tabelle wird ersichtlich, dass Holzschäume bei niedriger Dichte höhere Festigkeiten im Vergleich zu kommerziell erhältlichen Holzfaserdämmstoffen oder EPS-Dämmplatten zeigen und damit sowohl für den Einsatz im Bereich Dämmstoffe als auch als Plattenwerkstoff geeignet sind.

Das Herstellungsverfahren des Stora Enso Schaums ähnelt dem am WKI hergestellten Schaum wie oben beschrieben. Jedoch muss beim Stora Enso Schaum zuerst eine aufwendige Trennung von Cellulose und Lignin (Papierherstellung) erfolgen, dieser Schritt entfällt beim WKI Schaum. Ebenfalls werden beim Stora Enso Schaum geringere Druckfestigkeitswerte erwartet, da die Schaumgebung rein auf der mechanischen Wechselwirkung einzelner Fasern beruht, beim WKI Schaum jedoch zusätzlich eine Anregung der holzeigenen Bindekräfte durch das Fenton-Reagenz stattfindet. Zusätzlich werden laut Herstellerangaben biobasierte Epoxidharze für die Verbesserung der mechanischen Festigkeiten eingesetzt. Der am WKI entwickelte Schaum ist jedoch bindemittelfrei.

### *Geschäumte NFK Bauteile*

Alsubari et al geben eine gute Übersicht verschiedener Arbeiten zum Potenzial von naturfaserverstärkten Sandwichstrukturen (Alsubari et al. 2021). Es wird das grundsätzliche Potenzial von Sandwichstrukturen in Kombination mit Naturfaser herausgestellt, insbesondere jedoch auch auf den noch geringen Forschungsstand hingewiesen. Die in der Studie zitierten Arbeiten kombinieren Naturfasern mit verschiedenen Kernstrukturen, unter anderem auch mit aus PLA mittels Spritzgusses hergestellten Schaumstrukturen. Der Einsatz von Abstandsgeweben oder eine Ausbildung von dreidimensionalen Formschäumen ist in keiner der zitierten Studien zu finden. Eine weitere Arbeit befasst sich mit dem Knickverhalten eines Sandwichbalkens mit cenosphärenverstärktem Epoxidverbundstoff (syntaktischer Schaum) und Sisalgewebe/Epoxidverbundstoff-Deckschichten. Materialien mit einem geschäumten Kern aus PU-Schaum und Jute-Geweben als Deckschicht werden vereinzelt beschrieben, wobei auch hier keine Abstandsgewebe genutzt werden (Gon et al. 2012). Sandwichstrukturen, die aus Abstandsgewebe und einem geschäumten Holzkern bestehen, gibt es nach derzeitigem Stand der Recherche nicht. Das öffentlich geförderte Projekt „NF-BioPUr“ befasst sich ebenfalls mit der Herstellung von Naturfaser verstärktem Bio-Polyurethan aus PU-Schaum. Dabei kommt u. A. auch ein „One-Shot-Verfahren“ zum Einsatz. Dies beinhaltet die Ablage der unteren Textillage und ggf. der Schaumlage. Anschließend wird der PU Ansatz aufgegossen und die obere Decklage platziert. Nach Schließen des Werkzeugs erfolgt die Aushärtung (Fischer 2016). Dabei erfolgt die Umsetzung von Platten und auch hier kommen keine Abstandsgewebe zum Einsatz. Somit lässt sich zusammenfassen, dass verschiedene Studien das Potenzial biogener Sandwichstrukturen aufzeigen, was grundsätzlich die Idee des Vorhabens unterstützt. Hingegen lassen sich keine Arbeiten zu der angestrebten Expansion des Schaumes in seiner Bauteilgeometrie finden, was dessen Alleistellungsmerkmal definiert.

Das Resin Transfer Molding (RTM) Verfahren ist ein geschlossener Prozess. Das Grundprinzip basiert auf einer Imprägnierung trockener Faserhalbzeuge mittels Harzinjektion in einem Werkzeug. Das Verfahren kommt für die Produktion von kleinen bis mittlere Serien von flächigen Bauteilen in Betracht. Der Prozess setzt sich dabei aus vier Arbeitsschritten zusammen. Nach dem Einlegen eines trocknen textilen Halbzeugs, der Preform, in ein zweigeteiltes Werkzeug, schließt sich dieses und es erfolgt die Druckinjektion eines Harzsystems. Nach Erreichen eines definierten Abschaltdruckes (= Kavität gefüllt) wird das System ausgehärtet und anschließend warm entnommen (Handbuch Faserverbundkunststoffe/Composites 2013).

## 2. Planung und Ablauf des Vorhabens

Arbeitsschritte	Zeitraum	2023												Σ Personenmonate
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
<b>AP1 Auswahl und Beschaffung Matrix- und Textilkomponenten</b>														
AP1.1 Herstellung eines naturfaserverstärkten Abstandgewebes			■	■	■									0,5
AP1.2 Auswahl Matrixmaterial			■	■										0,5
<b>AP2 Auslegung und Fertigung eines Versuchswerkzeugs</b>														
AP2.1 Definition Werkzeuggeometrie			■	■	■									0,5
AP2.2 Definition der trocknungsleistung und der Feuchtigkeitsabfuhr			■	■	■									0,25
AP2.3 Werkzeugfertigung (extern)			■	■	■									
<b>AP3 Herstellung eines geschäumten Abstandgewebes</b>														
AP3.1 Herstellung der Fasersuspension						■	■	■						1
AP3.2 Einbringen der Holzfasersuspension in das Abstandgewebe						■	■	■						0,75
AP3.3 Beurteilung des Trocknungsvermögens						■	■	■						0,25
AP3.4 Beurteilung des Expansionsvermögens sowie der Grenzfläche zwischen Gewebe und Holzschaum						■	■	■						0,25
<b>AP4 Imprägnierung und Konsolidierung der Deckschichten</b>														
AP4.1 Verwendung einer duroplastischen Matrix									■	■	■	■		1
AP4.2 Verwendung einer thermoplastischen Matrix									■	■	■	■		0,5
AP4.3 Alternatve Verfahren									■	■	■	■		
<b>AP5 Charakterisierung des Sandwichelements und Verwertung</b>														
AP5.1 Charakterisierung des Sandwichelements										■	■	■		0,5
AP5.2 Ergebnisverwertung											■	■		0,25

MS 1

### Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Sämtliche Arbeiten wurden am Fraunhofer WKI umgesetzt. Es arbeiteten die Fachbereiche HOFZET (Standort Hannover) und HNT (Standort Braunschweig) zusammen, wobei die praktische Umsetzung im Technikum in Hannover/Ahlem erfolgte.

### 3. Resümee der wesentlichen Ergebnisse

#### a) Arbeitspakete und Meilensteine

Arbeitspakete (AP) (lt. Planung im Antrag)	Bearbeitungszeitraum (lt. Balkenplan im Antrag)	Zielerreichung
AP 1.1 – Herstellung eines naturfaserverstärkten Abstandsgewebes	01.10. – 31.12.2022	<u>Abgeschlossen</u> ; Es wurden drei Varianten eines Abstandsgewebes hergestellt; dabei wurde die Anzahl der Polfäden variiert sowie eine Hybridisierung mit Polyamid umgesetzt
AP 1.2 – Auswahl Matrixmaterial	01.10. – 30.11.2022	<u>Abgeschlossen</u> ; Es wurde ein biobasiertes heißhärtendes Epoxidharzsystem ausgewählt
AP 2.1 – Definition der Werkzeuggeometrie	01.11. – 31.12.2022	<u>Abgeschlossen</u> ; Ein Pyramidenstumpf mit elipsenförmiger Freiform wurde als Werkzeuggeometrie definiert
AP 2.2 – Definition der Trocknungsleistung und der Feuchtigkeitsabfuhr	01.12. – 31.12.2022	<u>Abgeschlossen</u> ; Anhand des Volumens und des Wassergehalts des Holzschlams wurde die Trocknungsleistung berechnet
AP 2.3 – Werkzeugfertigung	01.11.2022 – 31.01.2023	<u>Abgeschlossen</u> ; das Werkzeug wurde im Unterauftrag bei der Fa. TPK Kunststofftechnik gefertigt
AP 3.1 – Herstellung der Fasersuspension	01.02. – 31.03.2023	<u>Abgeschlossen</u> ; es wurden unterschiedliche Fasersuspensionen hergestellt
AP 3.2 – Einbringen der Holzfasersuspension in das Abstandsgewebe	01.02. – 31.03.2023	<u>Abgeschlossen</u> ; Die Fasersuspensionen wurden mittels Fülltülle manuell in die Abstandsgewebe eingebracht
AP 3.3 – Beurteilung des Trocknungsvermögens	01.02. – 31.03.2023	<u>Abgeschlossen</u> ; unterschiedliche Trocknungsparameter wurden untersucht
AP 3.4 – Beurteilung des Expansionsvermögens sowie der Grenzfläche zwischen Gewebe und Holzschlamm	01.02. – 31.03.2023	<u>Abgeschlossen</u> ; Das Expansionsvermögen wurde bestimmt und die Grenzfläche charakterisiert
AP 4.1 – Verwendung einer duroplastischen Matrix	01.04. – 31.07.2023	<u>Abgeschlossen</u> ; Imprägnierung der Deckschichten mittels vRTM
AP 4.2 – Verwendung einer thermoplastischen Matrix	01.06. – 31.07.2023	<u>Abgeschlossen</u> ; Einsatz von PA 11 Folien zur Imprägnierung der Deckschichten
AP 4.3 – Alternative Verfahren	01.05. – 31.07.2023	<u>Abgeschlossen</u> ; ergänzend zu AP 4.1 erfolgte der Einsatz von VARI und Handlaminat
AP 5.1 – Charakterisierung des Sandwichelements	01.07. – 30.09.2023	<u>Abgeschlossen</u> ; die hergestellten Sandwichelemente wurden mechanisch charakterisiert
AP 5.2 – Ergebnisverwertung	01.09. – 30.09.2023	<u>Abgeschlossen</u> ; Ansätze zur Projektfortführung wurden identifiziert

Meilensteine (M) (lt. Planung im Antrag)	Fälligkeit (lt. Balkenplan im Antrag)	Zielerreichung
M1 Erfolgreiche Trocknung und Expansion des Schaumes in der Werkzeugkavität	Mit Abschluss AP 3	<u>Erfüllt</u> ; Füllung eines Abstandsgewebes aus Naturfasern mit Holzschlamm und Trocknung in der Werkzeugkavität

## **b) Zusammenfassung**

Zur Umsetzung der geschäumten Abstandsgewebe wurde ein Pyramidenstumpf mit aufgesetzter Freiform als Demonstratorbauteil definiert. Das Werkzeug wurde unter Berücksichtigung der abzuführenden Wassermenge konstruiert, wobei verschließbare Öffnungen zur Evakuierung integriert wurden. Auf Grundlage der Geometrie wurden Abstandsgewebe aus Naturfasern und einer Hybridisierung mit Polyamid in 450 mm Breite umgesetzt.

Zur Füllung der Abstandsgewebe wurden unterschiedliche Holzfasersuspensionen untersucht, die in ihrer Zusammensetzung, wie z.B. Faserart, Anteil Treibmittel oder Hydrophobierungsmittel variierten. Mittels einer Fülltülle wurde die Holzfasersuspension in das Abstandsgewebe überführt und dieses wiederum zur Expansion und Trocknung in das Werkzeug. Hierbei zeigte sich, dass die manuelle Befüllung problematisch ist, als dass sich keine reproduzierbaren Füllmengen und Expansionsgrade umsetzen ließen. Dies hat zur Folge, dass es zu Einfallstellen durch den Trocknungsschwund des Holzschauams kommt. Um diesem Verhalten vorzubeugen, ist eine automatisierte Befüllung mittels Pumpe oder Schnecke notwendig, wodurch gewährleistet wird, dass die Expansion innerhalb der geschlossenen Kavität abläuft und mittels Nachdrucks dem Schwund entgegen gewirkt wird.

Die textilen Decklagen der geschäumten Abstandsgewebe wurden im nächsten Schritt mit Epoxidharz und PA11 imprägniert. Über die Hydrophobierung des Holzschauams lässt sich die Diffusion des Harzes in den Schaum beeinflussen. Eine vollständige Imprägnierung der Decklagen mittels vRTM ist nicht gelungen. Einerseits verhinderte die Individualität der einzelnen geschäumten Abstandsgewebe eine systematische Verfahrensentwicklung über die Prozessparameter. Andererseits ist das Harz meist punktuell in den Schaum eingedrungen und hat diesen gefüllt.

Grundsätzlich konnte die Machbarkeit nachgewiesen und ein TRL 3 umgesetzt werden, womit das Projektziel erreicht wurde. Für eine Überführung in eine konkrete Anwendung sind jedoch noch umfangreiche Entwicklungsarbeiten hinsichtlich einer automatisierten Befüllung sowie in der Werkzeugkonstruktion hinsichtlich Entlüftung, Harzflutung und Haftung notwendig.



## II. Ausführliche Darstellung der Ergebnisse


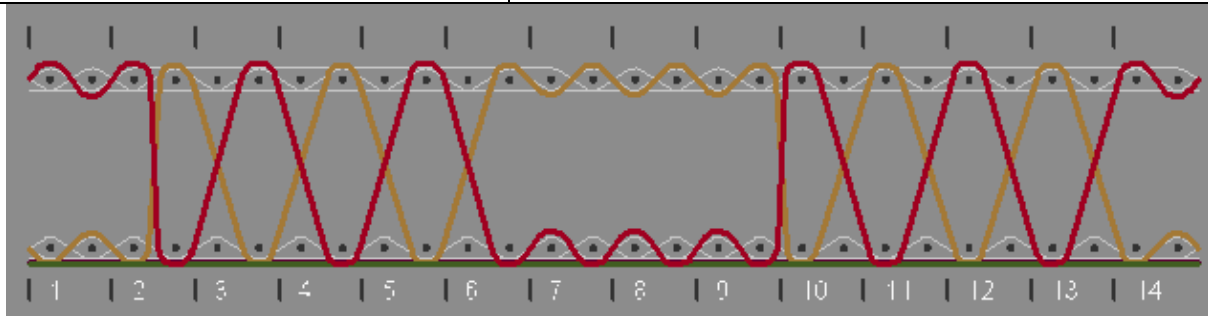
### 1. Erzielte Ergebnisse

#### Arbeitspaket 1: Auswahl und Beschaffung Matrix- und Textilkomponenten

##### AP 1.1 Herstellung eines naturfaserverstärkten Abstandgewebes

Es wurden 40 lm Abstandsgewebe aus Flachsfasern hergestellt. Der Abstand zwischen den Lagen wurde auf 50 mm festgelegt, um eine ausreichend starke Schaumschicht erzeugen zu können. Um die Befüllung mit der Schaumsuspension weiter zu erleichtern wurde ein Abstand zwischen den Polfadenreihen von 100 mm gewählt.

*Tabelle 2 Webparameter Abstandsgewebe Flachs*

<b>Konstruktion der Bindung</b>	
EP-File	Abstand_5cm.ep
Gewebeaufmachung/ Anzahl pro Webdurchgang	Abstandsgewebe
<b>Kettmaterial</b>	
Faserart	Flachs
Feinheit	200 tex
Aufmachungsart	Zwirn 200 T/m S
Gewichte im Spulengatter	Polfäden: vorne und hinten jeweils 50g Grundfäden: vorne und hinten jeweils 150g
<b>Schussmaterial</b>	
Faserart	Flachs
Feinheit	200 tex
Aufmachungsart	Zwirn 200 T/m S
<b>Einstellungen</b>	
Schüsse pro 10 cm	80
Geschwindigkeit in U/min	120
Greifer  in °	↑: 295 ↓: 295
Abstand zwischen den Polreihen in cm	10
	

Die Nutzung von konventionellen Abstandgeweben aus synthetischen Fasern für erste Versuche bringt keine Vorteile. Als Gründe sind zu nennen:

- Verfügbare Abstände liegen  $< 50$  mm  $\rightarrow$  kein Vergleich mit 50 mm möglich
- Teils sehr hohe Polfadendichte, was das Befüllen erschwert
- Synthetische Fasern bieten gegenüber den Naturfasern keinen Vorteil, was den Befüllvorgang mit Schaumsuspension und/oder Matrix betrifft
- Abstandsgewebe aus Hybridgewebe (Thermoplast/Glasfaser) sind nach Kenntnis der Autoren nicht verfügbar

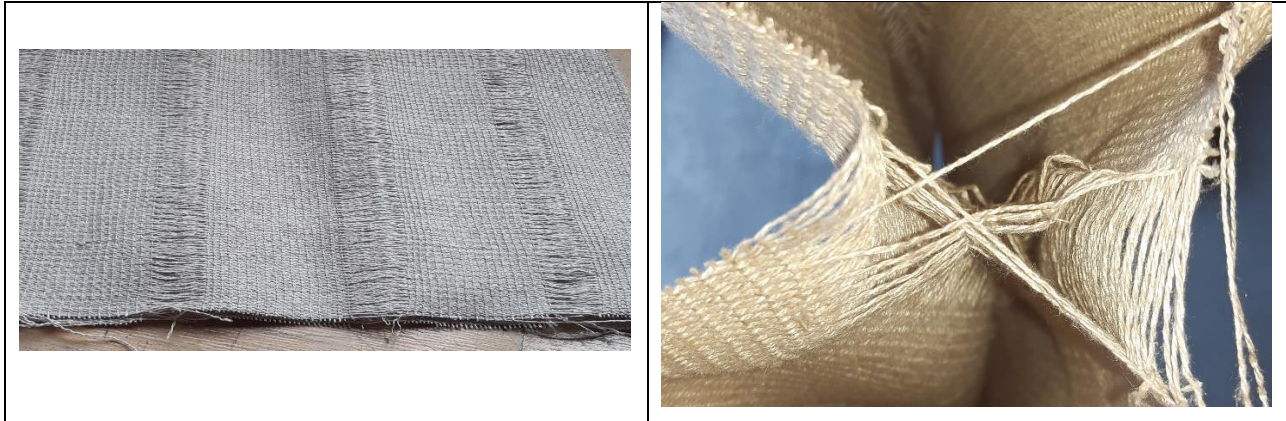


Abbildung 3 Abstandsgewebe Flachsfaser zusammengeklappt (a) und mit aufgestellten Polfäden (b)

Aufbauend auf den Webparametern aus Tabelle 2 wurde drei weiteren Geweben umgesetzt: mit halbiertes Anzahl an Polfäden, sowie ohne Polfäden. Als letztes Gewebe wurde die 25% bzw. 40% PA6 zwecks Hybridisierung eingewebt.

#### AP 1.2 Auswahl Matrixmaterial

Mit der Zielanwendung des RTM-Verfahrens lag der Fokus bei der Auswahl des Matrixmaterials auf dem prozentualen Bioanteil sowie der Verarbeit- und Verfügbarkeit. Ein möglichst hoher Bioanteil unterstützt das Studienziel eines Sandwiches mit maximalem Bioanteil. Hingegen ist die erfolgreiche technische Umsetzung des Sandwiches maßgeblich von der Verarbeitbarkeit abhängig und diese wiederum von der Verfügbarkeit. Denn es ist davon auszugehen, dass etablierte Produkte geringe Qualitätsschwankungen zwischen unterschiedlichen Chargen aufweisen. Die Verarbeitung mit der Injektionstechnik am Fraunhofer WKI setzt folgende Materialeigenschaften voraus:

- 2-Komponenten-System: Verhinderung einer Aushärtung in dem Rohrsystem der Dosieranlage
- Viskosität bei Raumtemperatur  $< 2$  Pa·s: Systeme höherer Viskosität können im Zuge der Reinigung nicht zuverlässig aus dem Rohrsystem der Anlage entfernt werden
- Umsetzung in einer Polyaddition: keine Möglichkeit der Abführung von Reaktionsprodukten aus dem Werkzeug
- Heißhärtend und Topfzeit  $> 5$  und  $< 20$  min: Einerseits ermöglichen kurze Topfzeiten eine höhere Taktrate, andererseits steigt mit Abnahme der Topfzeit das Risiko einer Aushärtung in dem Rohrsystem
- Feuchteunempfindlich: Eine Vortrocknung der Einzelkomponenten in einer evakuierten Umgebung ist nicht möglich; Reaktionen mit Feuchtigkeit beeinflussen ggf. das Reaktionsverhalten

Klassischerweise werden für das RTM Verfahren Epoxid, Polyurethan und ungesättigte Polyesterharz-Systeme eingesetzt. Hier sind nicht nur die Eigenschaften der jeweiligen vernetzten Harzsysteme ausschlaggebend für die Verarbeitung, sondern maßgeblich auch die Art der Polymerisation. Es wird in den betrachteten Harzsystemen beispielsweise zwischen Polykondensations- und Polyadditionsreaktion unterschieden. Bei diesen Polymerisationsreaktionen ist es entscheidend, eine exakte Stöchiometrie der reaktiven, funktionellen Gruppen der Reaktanden einzuhalten, um eine möglichst vollständige Polymerisation zu erhalten. Die Bildung von Nebenprodukten, wie etwa bei der Polykondensation, kann sich dabei negativ auf dem Umsatz und somit auf die resultierenden Eigenschaften auswirken. Bei einer Polykondensation entstehen polymere Verbindungen unter Abspaltung von niedermolekularen Verbindungen, wie  $H_2O$ ,  $HCl$ ,  $HCN$ ,  $CH_3OH$  oder anderen Nebenprodukten. Diese können gerade im Bereich der Verbundwerkstoffe problematisch sein, da die Fasern mit den Spaltprodukten reagieren oder diese absorbieren können. Dies kann unter anderem zu einer Faserschädigung oder zu einer ungewollten Delamination aufgrund von Quellungseffekten führen. Eine Abführung der Kondensationsprodukte ist in den anvisierten Verfahren (RTM, Vakuuminfusion) nicht möglich. Bei einer Polyaddition reagieren die funktionellen Gruppen miteinander, ohne, dass ein niedermolekulares Nebenprodukt entsteht. Dass sich ungewollte Vernetzungen, wie etwa Biurethane bei einer Polyurethan-Polymerisation bilden, ist jedoch nicht vollständig ausgeschlossen [1,2]

Polyurethane sind sehr feuchteempfindlich, was zur Bildung von Blasen/Schäumen führt. Ungesättigte Polyester reagieren unter Kondensation von Styrol, weshalb der Fokus auf der Recherche von Epoxidharzen lag. Epoxidharze sind sehr reaktive Systeme, die in einer Polyaddition irreversibel zu einer dreidimensionalen Struktur vernetzen (Elstner et al. 2008). Sie lassen sich bedingt in die Gruppe (teilweise) biobasiert, jedoch nicht biologisch abbaubar, einordnen. Biobasierte Ansätze verfolgen eine Substitution von Kohlenwasserstoffen in der Harzkomponente durch selbige Moleküle auf Basis von nachwachsenden Rohstoffen.

*Tabelle 3 Übersicht recherchierter Harzsysteme*

Produkt	Bioanteil	Verfügbarkeit	Verarbeitbarkeit	Hersteller
k. A.	45%	nein	k. A.	AEP Polymers
ONE High Biobased Laminating Epoxy Resin	29-30 %	ja	Nein, keine Heißhärtung	Entropy Resin
Gripox L	k. A.	k. A.	nein	Grizzly Leim
RESOLTECH 1070 ECO	31 %	ja	Nein, Laminierharz	Resoltech
CR75 Epoxy Resin	k.A.	ja	Nein, keine Heißhärtung	Sika Axson
Greenpoxy	28 – 56 %	ja	ja	Sicomina
Envipoxy	28 %	ja	Nein, zu hohe Viskosität	Spolchemie
Fairpoxy Laminating System	29 %	ja	Nein, Laminierharz	Frog Bio Systems B.V.
Resin Research 2000 BIO	k. A.	ja	Nein, Laminierharz	Sebase
AMPRO™ BIO	40-60 %	ja		Gurit
BIO EPOXY A+B	34 %	ja	Nein, Viskosität > 2000	V-Sure
IB2 Epoxy Infusion Bio Resin	38 %	ja		Easy Composites Ltd
EcoPoxy	>20 %	ja	Nein, Gießharz	EcoPoxy EU AG
BYOXY©	100 %	ja	BPA frei, Viskosität > 2000	BYOXY©
RESIN BIO PRO	50 %	ja	k. A.	Pébéo
Formulite	27 – 45,4% (Gesamtsystem)	ja	Viskosität passend, kein Heißhärter	Cardolite

### Weitere Systeme

Abzugrenzen von einer Substitution bestimmter petrochemischer Molekülgruppen durch identische Gruppen auf Basis nachwachsender Rohstoffe ist die Entwicklung neuer Kunststoffe, die gewisse Eigenschaften herkömmlicher Kunststoffe mit weiteren vereinen.

Tabelle 4 Weitere recherchierte Systeme, die jedoch aufgrund des Entwicklungsstandes nicht für eine Imprägnierung in Betracht gezogen wurden

Unternehmen	Anteil nachwachsender Rohstoffe	Verfügbarkeit	Verarbeitungsverfahren	Quelle
Glycix (Erscheinung von Polyester)	k. A., dafür biologisch abbaubar	nein		<a href="https://materialdistrict.com/material/glycix/">https://materialdistrict.com/material/glycix/</a>
Universitäten USA	Biologisch abbaubarer Duroplast aus Zitronensäure und Glycerol	nein		<a href="https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3972072/pdf/nihms-547046.pdf">https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3972072/pdf/nihms-547046.pdf</a>
Universität in Dakota	In Natronlauge lösbarer Duroplast	nein		<a href="https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/acs.macromol.6b00594">https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/acs.macromol.6b00594</a>
Dittrich und Axel Braun	Abbaubarer Gelatine-Leinöl Blend	nein		<a href="https://de.scribd.com/document/228415502/Naturliche-Duroplaste-pdf">https://de.scribd.com/document/228415502/Naturliche-Duroplaste-pdf</a>
Verschiedene Hersteller	Mischung aus Kasein mit verschiedenen Ölen	ja		Verwendung als Lacksystem, Quellung unter Feuchtigkeit, wenn Vernetzung nicht chemisch unterstützt, dann jedoch nicht biologisch abbaubar
BASF	100 % auf Wasserbasis	ja		<a href="https://www.reyquimtec.com.mx/wp-content/uploads/2016/07/Envirez-Linecard.pdf">https://www.reyquimtec.com.mx/wp-content/uploads/2016/07/Envirez-Linecard.pdf</a>
Bitrez Furacure	poly-furfural alcohol "PFA" bio-based polymers derived from biomass.	ja	Niedrige Viskositäten nur für Sol-vatisierung	<a href="https://www.bitrez.com/products/furacure-pfa/#toggle-id-2">https://www.bitrez.com/products/furacure-pfa/#toggle-id-2</a>

## Arbeitspaket 2: Auslegung und Fertigung eines Versuchswerkzeugs

### AP 2.1 Definition Werkzeuggeometrie

Die Technologie des direkten Schäumens in die finale Werkzeuggeometrie, also ohne Zwischenprodukt und Verschnitt des Schaumes, soll anhand einer dreidimensionalen Form aufgezeigt werden. Folgende Anforderungen wurden an die Werkzeuggeometrie gestellt:

1. Einbau in Heißpresse am Fraunhofer WKI HOFZET
  - o Standort Dosieranlage
  - o Aufnahme für ähnliche Werkzeuggeometrie vorhanden
  - o Temperierung für Trocknung notwendig
2. Abfuhr von Feuchtigkeit über Temperatur und Vakuum
  - o Abfuhr über Ober- oder Unterseite nicht möglich, da an Maschinenbett anliegend
  - o Anschlüsse vakuum- und druckdicht für späteren Injektionsvorgang
  - o Lediglich die Feuchtigkeit/Wasser ist abzuführen, nicht jedoch die Fasersuspension
  - o Gute Wärmekapazität notwendig, da direkte Beheizung des Werkzeugs nicht möglich (finanziell)
3. Abbildung einer Freiform
  - o Drapierereffekte des Halbzeugs dürfen den Machbarkeitsnachweis des Schäumens nicht einschränken
  - o Parallele Flächen für die Präparation von Prüfkörpern benötigt
4. Vermeidung von Korrosion des Werkzeugs durch die massive Präsenz von Feuchtigkeit

Es wurde sich für eine Aluminiumlegierung als Material entschieden. Eine hohe Wärmekapazität sowie hohe Feuchtigkeitsbeständigkeit erfüllen die gestellten Anforderungen. Gegenüber Stahl ist das Material etwas weicher, da jedoch keine hohen Stückzahlen im Projekt umgesetzt werden sollen, wurde dies als akzeptabel in Rücksprache mit dem Werkzeugbauer angesehen. Ein quadratischer Pyramidenstumpf stellt die Grundgeometrie dar, durch auswechselbare Einsätze lassen sich Geometrien mit parallel verlaufenden Oberflächen oder Geometrien mit einer einseitig integrierten Freiform schäumen bzw. umsetzen.

Grundsätzlich besteht das Werkzeug aus drei Einzelteilen: der Ober- und Unterseite sowie einem Rahmen. Über den Rahmen wird die Bauteilstärke von 50 mm sowie der Pyramidenstumpf definiert. Er wird fest mit der Werkzeugunterseite verschraubt. Zusätzlich erfolgt über den Rahmen die Entgasung bzw. die vakuumgestützte Trocknung der Holzfasersuspension. Die Unterseite enthält zudem eine Tasche, die den Einsatz von Wechselplatten ermöglicht. Für dieses Vorhaben wurden zwei Wechselplatten gefertigt, eine plane Platte sowie eine weitere Platte mit einer integrierten Freiform. Über einen Kanal erfolgte die Evakuierung sowie die Injektion der Matrix.

## AP 2.2 Definition der Trocknungsleistung und der Feuchtigkeitsabfuhr

Ziel ist eine Minimierung der Trocknungsdauer, was durch die Temperierung des Werkzeugs und die Senkung des Drucks auf ca. 23 mbar bzw. das Anlegen eines Unterdrucks erreicht werden soll. Auch im Vakuum muss fast die gleiche Energie zum Verdampfen von Wasser aufgebracht werden, wie bei normalem Luftdruck. Die Energieeinsparung durch Vakuumtrocknung ist unwesentlich, aber im Vakuum kann viel schneller getrocknet werden und bei viel niedrigeren Temperaturen. Da eine Überwachung des Trocknungsvorgangs im Werkzeug nicht möglich ist, ein frühzeitiges Öffnen des Werkzeugs jedoch zur Beschädigung des Schaums führen kann, ist die Wärmeleistung  $Q$  zu berechnen. Für die Wärmebilanz werden die Erwärmung des Wassers auf Siedetemperatur und das Verdampfen des Wassers bei  $\vartheta = \text{konst.} = 100^\circ\text{C}$  berücksichtigt, vgl. Abbildung 4 so dass sich ergibt:

$$Q_{\text{ges}} = Q_{\text{Aufheizen}} + Q_{\text{Verdampfen}}$$

$$Q_{\text{Aufheizen}} = 2\text{ kg} \times 1,16\text{ Wh/kg} \times 80\text{ K} = 185,6\text{ Wh}$$

$$Q_{\text{Verdampfen}} = 2\text{ kg} \times 627 = 1.254\text{ Wh}$$

$$Q_{\text{gesamt}} = 1439,6\text{ Wh} = 5182,56\text{ kJ}$$

Das Ergebnis spiegelt lediglich die Menge wider, die für das Verdampfen des Wassers benötigt wird. Da die Wärmekapazität des Holzschleims sowie der Wärmedurchlasskoeffizient und Wärmedurchlasswiderstand unbekannt sind ebenso wie die Diffusionskoeffizient der Feuchtigkeit durch den Holzschleim, ist eine genaue Modellierung des Trocknungsvorgangs in diesem Vorhaben nicht möglich.

Als Berechnungsgrundlage dient der Feststoffgehalt des Holzschlams, d.h. der Trockenmasse des Schaums und der Feststoff der Additive. Der Feststoffanteil der verwendeten Rezepturen liegt bei 16% (Feuchtegehalte der Additive berücksichtigt). Die Zielfeuchte liegt bei 5-10%. Für einen Liter Schaum und einen Ansatz mit 16% Feststoff in der Masse (Schleim + Additive + 30% Zusatzfasern) sind somit 559 g Wasser zu verdampfen um auf eine anvisierte Dichte von  $80\text{ kg/m}^3$  zu kommen. Für die in AP 3.3 umgesetzten Versuche betrug die zu verdampfende Wassermenge 2 kg.

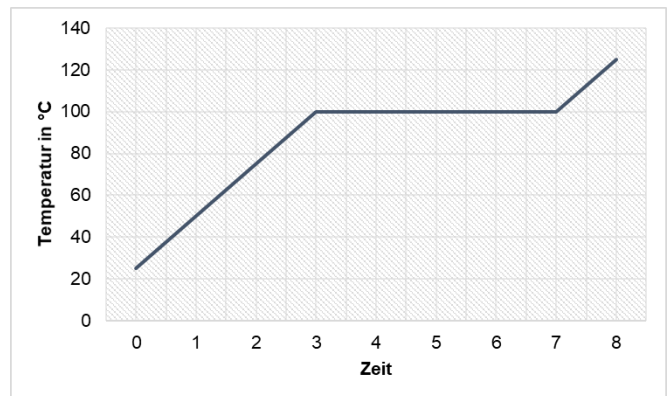


Abbildung 4 Stufen der Wärmebilanz, Aufwärmen des Wassers von 20 auf  $100^\circ\text{C}$  und Verdampfen bei  $100^\circ\text{C}$

Durch die an das Werkzeug gestellten Anforderungen sowie die Zielstellung des Vorhabens ist eine Abfuhr des Wassers bzw. der Feuchtigkeit aus der Fasersuspension lediglich über die Seite, also den Rahmen möglich. Frontseitig ist der Anguss anliegend, so dass rückseitig und über die beiden Seiten die Abfuhr über je zwei Kanäle vorgesehen ist. Die Kanäle sind über zwei Stäbe verschlossen, die die Schräge des Pyramidenstumpfes aufnehmen. Rückseitig sind die Stäbe über eine abgedichtete Platte am Werkzeug fixiert, was ein Ausrücken der Stäbe bei Injektion verhindern soll.

Für die Trocknung werden die Stäbe manuell entfernt. Über eine Gewindebohrung in den seitlichen Platten wird je ein hitzebeständiger Schlauch abgeführt. Die Dichtung zwischen Platten und Werkzeug sowie innenliegende Kanäle in der Platte verhindern das Zusammenbrechen des Vakuums bzw. ermöglichen die Abfuhr der Feuchtigkeit aus dem Werkzeug.

Somit führen drei Schläuche die Feuchtigkeit aus dem geschlossenen, beheizten und evakuierten Werkzeug ab. Die Schläuche führen über einen Adapter in einen Catch-pot. Hier kondensiert der Wasserdampf und wird in einem Eimer aufgefangen. Dadurch wird verhindert, dass Feuchtigkeit in die Vakuumpumpe gerät. Abbildung 5 zeigt das aufgebaute System außerhalb der Presse.

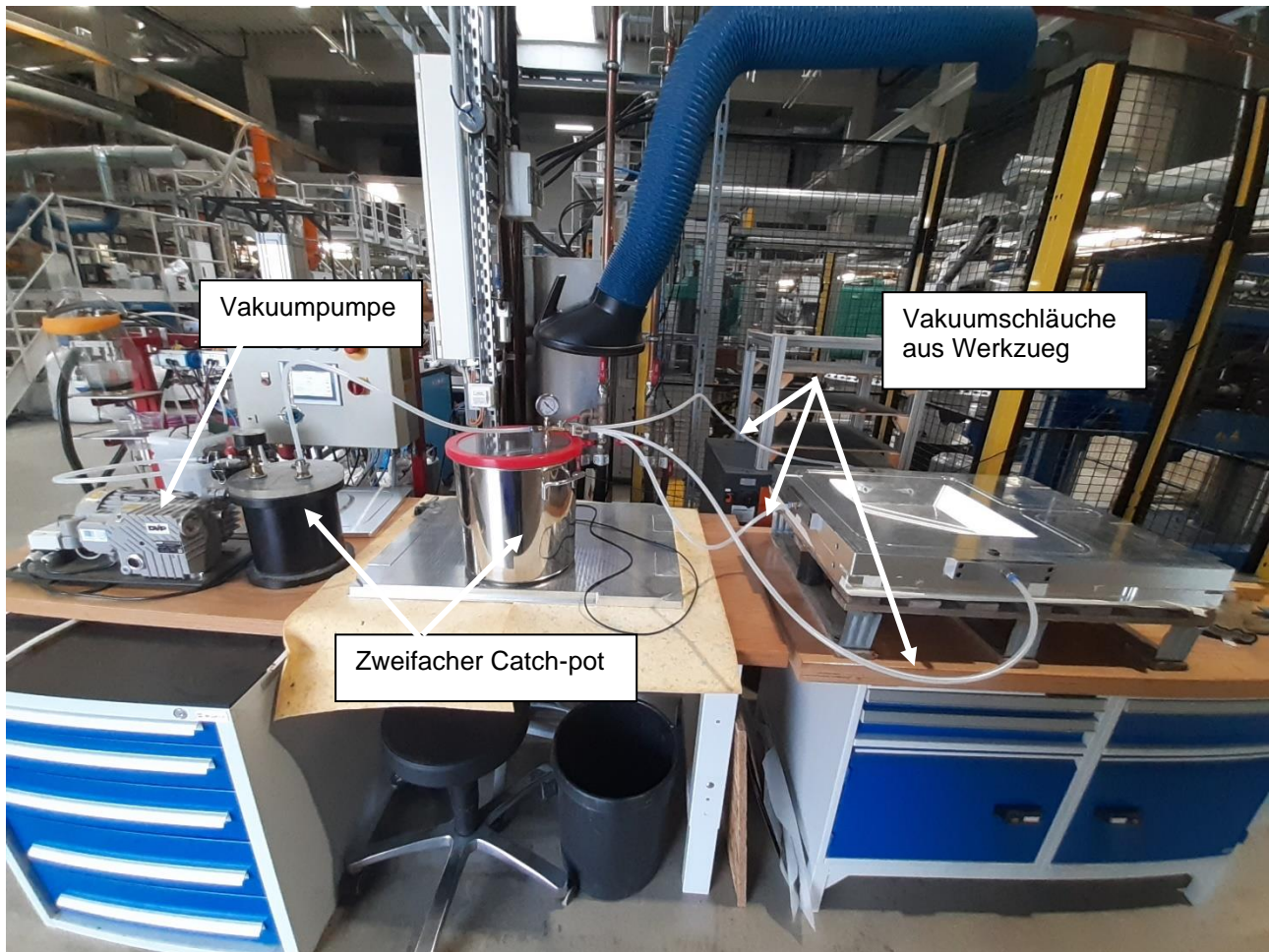


Abbildung 5 Entgasungssystem

Der zunächst eingesetzte Catch-pot musste gegen einen aktiv gekühlten Druckbehälter ausgetauscht werden, da dieser Aufbau trotz passiver Kühlung nicht ausreichte, um das verdampfende Wasser vor der Vakuumpumpe kondensieren zu lassen.

### AP 2.3 Werkzeugfertigung

Das Werkzeug wurde gemäß den Vorgaben aus AP 2.1 und 2.2 durch die Fa. TPK Kunststofftechnik gefertigt.

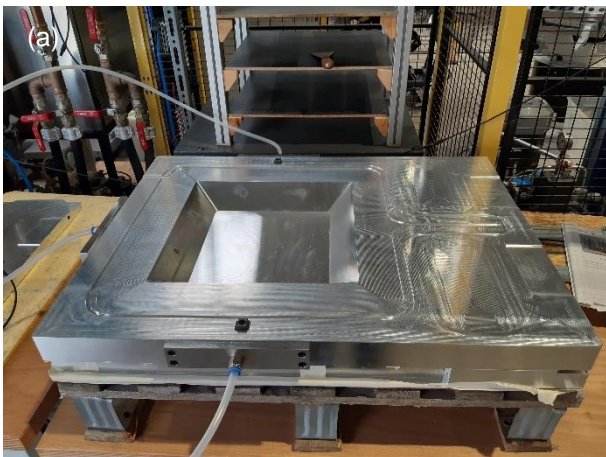




Abbildung 6 Werkzeug gefertigt durch TPK Kunststofftechnik; Werkzeugunterseite mit Rahmen (a), Entgasungspunkte geschlossen innen (b), Anschlussentgasungspunkt außen (c), Feuchtigkeitsführung im Inneren am Entgasungspunkt (d+e) und Werkzeug mit geöffneten Entgasungspunkten (f)

### Arbeitspaket 3: Herstellung eines geschäumten Abstandgewebes

#### AP 3.1 – Herstellung der Fasersuspension

Im Berichtszeitraum wurden verschiedene Holzschäume mit unterschiedlicher Dichte hergestellt. Hier werden sowohl Laubhölzer wie Buche, aber auch Nadelhölzer wie Kiefer eingesetzt. Folgende Abbildung zeigt die generelle Herstellungsübersicht über den Holzschaumprozess:

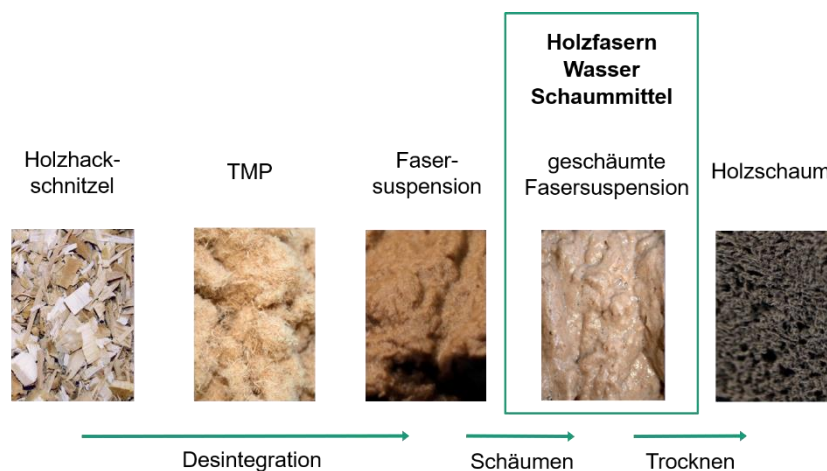


Abbildung 7: Übersicht über den Holzschäumprozess

Dabei sind folgende Einzelschritte sind zur Herstellung des Holzschäum notwendig:

- Zerkleinerung von Hackschnitzeln im Refiner (TMP-Verfahren)

- Weiterer Aufschluss im atmosphärischen Niederkonsistenzrefiner (Faserlänge ~50-100 µm). Hierbei muss je nach Material der Mahlplattenabstand variiert werden.
- Zugabe der Schäumungsreagenzien zum Holzschleim (Wasserstoffperoxid, Protein)
- Aufschäumen im Rührverfahren und spätere Formgebung
- Einfüllen der Fasersuspension in das Abstandsgewebe (AP 3.2)

Die Dichte des hergestellten Schaumes hängt von der Wahl und Menge der Aufschäumungsreagenzien ab. Dabei zeigt sich, dass Kiefer grundsätzlich höhere Querzug- und Druckfestigkeit im Vergleich zur Buche aufweist. Nadelholz weist einen höheren Ligninanteil als Laubholz auf. Dieser bewirkt, dass beim Schäumungsprozess zusätzliche Vernetzungsreaktionen zwischen dem Lignin auftreten können. Durch die zusätzliche Vernetzung können höhere Festigkeiten erreicht werden. Im Dichtebereich unter 90 kg/m<sup>3</sup>, der für die angestrebte Wärmedämmung sinnvoll ist, ist dieser Unterschied zwischen den Holzarten zu vernachlässigen. Reine TMP-Faser wurde zusätzlich verwendet und zur Herstellung des Holzschlams genutzt. Dabei wurde die Faser nach dem oben beschriebenen Prozess hergestellt und weiter zu Holzschlamm verarbeitet. Zunächst wurde aus den Fasern eine wässrige Suspension hergestellt, die Schäumungsadditive (Protein und Wasserstoffperoxid) zugegeben und durch intensives Verrühren die einfüllbare Schaumsuspension hergestellt.



Abbildung 8: Verschiedene Stufen der Holzschlammherstellung. (von links nach rechts) TMP-Faser, Faserschleim und geschäumte Fasersuspension.

Für das Projekt „TexFoam“ wurde zunächst ein Nadelholzmix mit folgenden Parametern verwendet:

Tabelle 5: Übersicht über die Schaumparameter

<b>Ausgangsmaterial</b>	Nadelholzmix (40/30/30 Kiefer/Fichte/Lärche)
<b>Additive</b>	Wasserstoffperoxid: 4-8% Protein: 5-10% TMP-Faser: 30%
<b>Eingestellte Dichte</b>	80 kg/m <sup>3</sup>

### AP 3.2 – Einbringen der Holzfasersuspension in das Abstandsgewebe

Nach der Herstellung der Schaumsuspension im Rührbehälter wird das Abstandsgewebe händisch gefüllt. Dazu kamen auch Hilfsmittel wie Einfülltüllen oder Rohrfinger zum Einsatz. Da der Schaum bereits nach ca. 5 Minuten Standzeit beginnt abzutrocknen und Reaktionswasser freisetzt, muss das Einfüllen möglichst schnell durchgeführt werden. Um verschiedene Füllmechanismen zu testen, wurde neben der Befüllung mittels Einfülltülle auch die Entfernung einiger Abstandsfäden durchgeführt und miteinander verglichen.

Grundsätzlich ließ sich die Holzfasersuspension gut in das Abstandsgewebe einfüllen, sodass im nächsten Schritt die Evakuierung und das Trocknen im Werkzeug durchgeführt werden konnte. Nachfolgend ist eine Abbildung zur Befüllung des Werkzeuges mittels Einfülltülle dargestellt:

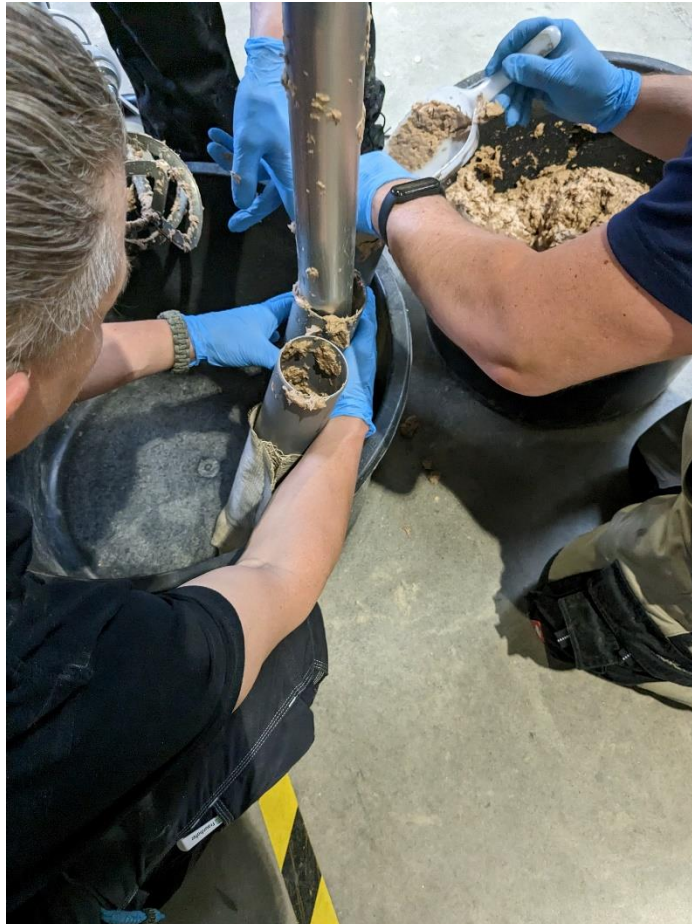


Abbildung 9: Füllen des Abstandsgewebes mit der geschäumten Fasersuspension mittels Fülltülle

Auch wenn das Einfüllen an sich gut möglich ist, ist das gleichmäßige und kontinuierliche Einfüllen des Schaumes essentiell für das spätere Schaumverhalten. Folgende Probleme haben sich gezeigt:

- Notwendige Menge schwierig zu dosieren → je nach vergangener Zeit nach Zugabe des Peroxids ist die Expansion bereits fortgeschritten, abgeschlossen und/oder verhindert ein Schließen der Presse ohne Auspressen des Schaums
- Zu wenig Material in der Form führt in Folge des Schrumpfes zu fehlerhafter Konturabbildung
- Zu viel Material (wenn einfüllbar) erhöht die Dichte

➔ Schaum ist kontinuierlich mit Nachdruck in die geschlossene Kavität zu führen und dort zu expandieren, um gleichbleibende, konturgetreue Bauteile herzustellen

Ein ungleichmäßiges Einfüllen führt zur „Phasenseparation“ in den Schaumschichten, sodass Trocknungsrisse genau an dieser Stelle auftreten. Diese Problematik konnte im Zuge der Machbarkeitsstudie noch nicht gelöst werden, da hierzu umfangreiche Entwicklungen hinsichtlich einer potentiellen Einfülltechnik notwendig sind. In Abbildung 10 bis Abbildung 13 sind verschiedene Prozessfehler abgebildet, die die o.g. noch einmal verdeutlichen.



Abbildung 10 Frühzeitiges Schäumen vor Schließen des Werkzeugs



Abbildung 11 Aus der Kavität gepresster Holzschaum aufgrund zu spätem Schließens des Werkzeugs



Abbildung 12 Wellen und unförmige Oberfläche aufgrund einer zu hohen Dichte an Polfäden



Abbildung 13 Spaltbildung am Rand aufgrund Fixierung des Gewebes durch vernähen, so dass kein Verschieben der beiden Gewebelagen gegeneinander möglich war

### AP 3.3 – Beurteilung des Trocknungsvermögens

Ziel des AP 3.3 ist die Expansion und Trocknung des Holzschleims in der Werkzeugkavität, durch welche diese gleichzeitig abgebildet wird. Zunächst wurden unterschiedliche Trocknungszyklen untersucht, um einerseits zügig zu trocknen, andererseits sollten Trocknungsfehler vermieden werden. Neben den Trocknungsparametern wurde das Schaum-Gewebe-Verhältnis gravimetrisch bestimmt. Hierfür wurde das Gewebe trocken als ganzes gewogen, sowie lediglich der Pyramidenstumpf, dass der äußere Teil keinen Schaum enthält. Dies wird als  $m_{\text{homo Tex}}$  bezeichnet. Aus der Masse des getrockneten Schaums sowie dem Volumen der Kavität lässt sich die Dichte des Schaumes berechnen. Der Schaum wurde mit einer Zieldichte von  $100 \text{ kg/m}^3$ , im Falle einer freien Expansion, eingestellt.

Die Trocknungsversuche wurden in zwei Hälften unterteilt: V1 – V10 variiert Trocknungszeit und Temperatur, sowie die Rezeptur des Holzschlaims u.a. hinsichtlich des Einsatzes von Hydrophobierungsmittel (V7+V8). Weiter wurden Hybridgewebe aus Flachs und PA 11 (V9 + V10) verwendet. Ziel der ersten Versuchshälfte war die Festlegung der Schaum- und Prozessparameter, um in der zweiten Versuchshälfte möglichst homogene geschäumte Gewebe für die Imprägnierung herzustellen. In Tabelle 6 und Tabelle 7 sind die Ergebnisse zusammengefasst.

Tabelle 6 Übersicht der ersten Versuchshälfte

Nr.	m <sub>Tex</sub> [g]	m <sub>homo Tex</sub> [g]	m <sub>Tex/Schaum</sub> [g]	Gew.-% Schaum	Dichte Schaum [g/cm <sup>3</sup> ]	T <sub>Werkzeug</sub> [°C]	t <sub>Werkzeug</sub> [min]
V1	182	141	515,3	73	0,116	90	180
V2	182,7	141	671,6	79	0,152	110	180
V3	182	141	-	-		100	180
V4	204	141	459,1	69	0,104	110	180
V5	187	141	437,6	68	0,099	110	180
V6	200	141	485,3	71	0,109	110	180
V7	190	141	514,2	73	0,116	110	180
V8	201,3	141	639	78	0,144	110	180
V9	203	141	660	79	0,149	110	180
V10	139,9	141	537,4	74	0,121	110	180

Die ersten Versuche zeigen, dass dies grundsätzlich möglich ist und auch eine freigeformte Geometrie (=Pyramidenstumpf + ellipsenförmige Extrusion bzw. Tasche) durch den Verbund abgebildet wird. Die Dichte als erste Bewertungsgröße zeigt einerseits stets Werte über 100 kg/m<sup>3</sup>, gleichzeitig variieren diese zwischen 99 kg/m<sup>3</sup> (V5) und 152 kg/m<sup>3</sup> (V2). Ein Zusammenhang von T und t mit der Dichte kann nicht hergestellt werden. Auch die Verwendung von Hydrophobierungsmittel zeigt keine erkennbaren Abweichungen. Die grundsätzlich höhere Dichte lässt sich auf die beschränkte Expansion des Schaums zurückführen bzw. eine zu große Einfüllmenge des Schaums.

Die benötigte Menge an geschäumter Fasersuspension kann aus Fasermenge, Wassergehalt, Zieldichte und Kavitätvolumen berechnet werden. Aufgrund der Dosierungsprobleme durch das händische Befüllen des Textils (vgl. AP 3.2) hat sich dieser Ansatz ohne eine entsprechende Dosiertechnik als nicht umsetzbar erwiesen, da neben der Expansion auch der Schrumpf des Schaums durch das Trocknen zu berücksichtigen ist. In Bezug auf das Abstandsgewebe können folgende Punkte festgehalten werden:

- Der Abstand zwischen den Polfäden von 100 mm (in Produktionsrichtung) ist grundsätzlich für einen Befüllvorgang geeignet
- Die Dichte der Polfäden ist zu hoch; der Holzschleim durchdringt diese nicht, was aufgrund der Schrägstellung der Polfäden zu Spannungen führt, die wiederum zum Einfall des Abstandgewebes über den Polfäden führt → es erfolgte eine Reduktion der Polfäden
- Es kommt zum Faltenwurf auf der Unterseite des Pyramidenstumpfes; vermutlich liegt die Ursache in der Verklebung der Ober- und Unterseite mittels Folienstreifen, um ein Auslaufen des Holzschleims zu verhindern → eine anderweitige Fixierung durch Klammer, punktuelles Verkleben oder Tackern hat sich für diese Geometrie als nicht erfolgreich erwiesen. Grundsätzlich ist die Gewebearchitektur im Hinblick auf spätere Anwendungen im Detail auszulegen
- Anhaftung des Textils am Werkzeug: Das Werkzeug wird mit einem pastösen Hochtemperatur Trennwachs eingetrennt. Dennoch gab es bei den ersten Versuchen mit 110°C Anhaftungen des Textils am Werkzeug, was zur Delamination zwischen Schaum und Textil führte. → Die Verwendung von Teflonfolien führt zu einer besseren Trennbarkeit, jedoch ist diese nur auf den planen Flächen verwendbar

In Abbildung 14 bis Abbildung 22 sind die Ergebnisse der Schäumungsversuche der ersten Versuchsreihe abgebildet. Versuch 1 -3 variiert die Temperatureinstellung des Werkzeugs, wobei die Trocknungszeit mit 3h im Werkzeug gleich gehalten wurde. Hierfür wurde in Vorversuchen das Werkzeug während des Trocknungsvorgangs geöffnet und die Handlebarkeit des Materialsystems geprüft. Durch das Öffnen und ggf. Anhaften an den Werkzeugen kann es zu Querkzug auf den Schaum/Textil kommen und die sich bildende Schaumstruktur zerstören. Deshalb wurde für die Versuche 1-18 ein Öffnen des Werkzeugs zu Kontrollzwecken nicht durchgeführt.



Abbildung 14 Geschäumtes Abstandsgewebe Versuch 1 nach Trocknung



Abbildung 15 Geschäumtes Abstandsgewebe Versuch 2 nach Trocknung

Die Versuche 1-6 variierten in der Zusammensetzung des Holzschlams hinsichtlich der Faserart (Nadel/Laubholz) sowie Anteile der Komponenten. Ein direkter Einfluss auf das Schaumverhalten konnte nicht gezeigt werden. Der Schaum bildet die Kontur vollständig ab. In den Ecken kommt es zu den Spannungen im Textil durch die Polfäden, so dass die Ecken nicht abgebildet wurden, der Radius des Pyramidenstumpfes hingegen schon. Versuch 1 und 2 zeigen Faltenbildung im Bereich der Polfäden und an den Randbereichen. Einerseits liegt dies an der webtechnischen Ausführung der Polfäden. Diese liegen als X vor (vgl. Abbildung 3). Der Holzschleim der über die Fülltüle in die drei Zwischenräume geführt wurde, umfließt die Polfäden nicht, sondern drückt diese bei Expansion bzw. beim Befüllen vor sich her, so dass diese auf Spannung stehen, allerdings in ihren Freiheitsgraden beschränkt sind. Dadurch kommt es zu Faltenbildung, die insbesondere in Abbildung 14 deutlich erkennbar ist.



Abbildung 16 Geschäumtes Abstandsgewebe Versuch 4 nach Trocknung

Um ein Auslaufen des Holzschlams bei der Befüllung an den Seiten zu vermeiden, wurden die zwei Gewebelagen im Randbereich an drei Seiten fixiert. Dabei wurde auf der Unterseite das Gewebe aufgeschoben, so dass eine Tasche entstand, die dem Kavitätvolumen entsprach. Bei Fixierung ohne ausreichend Gewebe aufzuschieben, kommt es zur Faltenbildung am Randbereich, wie beispielsweise in Abbildung 15 und Abbildung 21 zu erkennen. Einerseits wurde eine Lochfolie per Aufschmelzen zur Fixierung

genutzt (Versuch 1-6), andererseits wurden die beiden Gewebe vernäht (Versuche 7-10) oder punktuell mit Isocyanat Sekundenkleber oder Haftklemmen fixiert (Versuch 11-18).



Abbildung 17 Geschäumtes Abstandsgewebe Versuch 5 nach Trocknung

In Abhängigkeit der Trocknungstemperatur sind braune Verfärbungen auf dem Textil zu erkennen. Dies sind Zucker aus dem Holzschaum, die kristallisieren. Außer einem optischen Einfluss wurde kein Effekt auf die Anhaftung zum Textil festgestellt. Hingegen verstärkt sich die Haftung mit zunehmender Trocknungstemperatur zwischen Zuckern (auf den Textilien) und der Werkzeugoberfläche. Dies führt zu einer Trennung von Textil und Schaum bzw. bei unzureichender Trocknung auch zu Rissen innerhalb des Schaums selbst. Auch die Verwendung eines pastösen Trennmittels verringerte die Anhaftung des Verbunds an der Werkzeugoberfläche nicht, weshalb auf den ebenen Flächen Teflonfolien verwendet wurde, vgl. Abbildung 11.



Abbildung 18 Geschäumtes Abstandsgewebe Versuch 6 nach Trocknung



Abbildung 19 Geschäumtes Abstandsgewebe Versuch 7 nach Trocknung

Bei Versuch 7 und 8 wurde dem Holzschaum Hydrophobierungsmittel beigemischt. Ziel ist es, ein zu starkes Eindringen des Matrixkunststoffes im Schritt der Imprägnierung zu verhindern. Gleichzeitig reduziert das Hydrophobierungsmittel den Schäumungsgrad, weshalb nur geringe Anteile von 1-2 % eingesetzt werden. Während in den Versuchen 4-7 die Anzahl der Polfäden bereits reduziert wurde, um eine Füllung zu erleichtern und Faltenwurf vorzubeugen, kamen in den Versuchen 8-10 keine Polfäden zum Einsatz. Eine Verbesserung

oder Verschlechterung der Konturabbildung durch die Anwesenheit des Hydrophobierungsmittels zeigte sich nicht. Das Fehlen der Polfäden führt zu einer deutlichen Verbesserung der Oberflächen, da kein Faltenwurf entsteht. Lediglich am Rand kommt es zur Faltenbildung aufgrund der Fixierung der beiden Gewebelagen.



Abbildung 20 Geschäumtes Abstandsgewebe Versuch 8 nach Trocknung

Versuch 9 und 10 wurde mit einem Hybridgewebe durchgeführt, d.h. es sind Polyamidfäden eingewebt, die später die thermoplastische Imprägnierung ermöglichen bzw. diese erleichtern sollen. Ein Einfluss auf die Konturgebung durch das Hybridmaterial wurde nicht nachgewiesen.



Abbildung 21 Geschäumtes Abstandsgewebe Versuch 9 nach Trocknung



Abbildung 22 Geschäumtes Abstandsgewebe Versuch 10 nach Trocknung

Zusammenzufassen ist nach der ersten Versuchshälfte, dass der Schaum grundsätzlich Konturen sehr gut abbildet, jedoch durch die Verschiebbarkeit des Textils begrenzt wurde. Eine Reduzierung der Polfäden verbesserte die Verschiebbarkeit des Textils, widerspricht jedoch dem Ansatz die Mechanik des Verbundes durch die Polfäden bzw. Stehfäden zu verbessern. Wird das Abstandsgewebe außerhalb des Werkzeugs befüllt, ist ein Verschluss auf drei Seiten notwendig, um ein Auslaufen des Schaums zu verhindern. Dieser Verschluss schränkt gleichzeitig die Verschiebbarkeit ein, so dass es zum Faltenwurf kommt. Die perfekte Abbildung der elliptischen Freiform zeigt jedoch, dass die gewählte Geometrie an sich geeignet ist und auch

das Gewebe diese Umformung erlaubt. Problematisch ist die Karamelisierung der Holzzucker und die Auswaschung derselben, die zur Anhaftung an der Werkzeugoberfläche führen.

Da der Schaum zunächst durch das Treibmittel expandiert und im Zuge der Trocknung wieder schrumpft, ist neben der Füllmenge und dem Fortschritt der Expansion der Zeitpunkt der Entnahme des Materialsystems wichtig. Wird lange in der Kavität getrocknet, liegt die elliptische Freiform unten und diese wird konturgetreu abgebildet. Je nach Schaummenge, fällt die konturfreie Rückseite ein. Der Schwund nimmt von der Kante zur Mitte mit zunehmender Materialstärke zu. Wird das Materialsystem zu früh aus der Kavität herausgenommen und in den Trockenschrank auf die konturfreie Seite gelegt, kommt es zum Einfall auf der Oberseite mit der Freiform. Expandiert der Schaum bereits überwiegend außerhalb des Werkzeugs, wird dieser Effekt verstärkt. Dass das anliegende Vakuum der Expansion entgegenarbeitet und das Schaumgefüge kollabieren lässt, konnte nicht beobachtet werden.

Trotz der vakuumunterstützten Trocknung waren Trocknungszeiten unter 2h nicht umsetzbar. Nach 2h, war die Trocknung so weit vorangeschritten, dass das geschäumte Abstandsgewebe zur weiteren Trocknung in einen Umluftofen transportiert werden konnte, ohne das Fasergebilde zu gefährden. Aufgrund der Haftungsprobleme bei 110 °C trotz Teflonfolie, wurde die Werkzeugtemperatur auf 100 °C gesenkt und die Verweilzeit unter Vakuum auf 120 min festgelegt.

Für die zweite Versuchshälfte wurde der Holzschaum mit 2 % Wachs als Hydrophobierungsmittel ausgerüstet (vgl. AP 3.4) und keine weiteren Veränderungen an der Rezeptur vorgenommen. Mit Ausnahme von V11 und V18 ließen sich geschäumte Abstandsgewebe mit einer mittleren Dichte von 137 kg/m<sup>3</sup> und einer Standartabweichung von 3,14 kg/m<sup>3</sup> herstellen.

*Tabelle 7 Übersicht der zweiten Versuchshälfte*

Nr.	m <sub>Tex</sub> [g]	m <sub>homo Tex</sub> [g]	m <sub>Tex/Schaum</sub> [g]	Gew.-% Schaum	Dichte Schaum [g/cm <sup>3</sup> ]	T <sub>Werkzeug</sub> [°C]	t <sub>Werkzeug</sub> [min]
V11	185	141	591,9	76	0,148	100	120
V12	182	141	556,7	75	0,139	100	120
V13	156,7	141	550,6	74	0,138	100	120
V14	182,8	141	572,3	75	0,143	100	125
V15	175,5	141	539,7	74	0,135	100	110
V16	179	141	549	74	0,137	100	120
V17	173,3	141	531,2	73	0,133	100	15/105
V18	153,3	141	456,5	69	0,114	100	120

In Abbildung 23 bis Abbildung 30 sind die geschäumten Abstandsgewebe der Versuche 11 bis 18 abgebildet. Es wurde sich aufgrund der Impägnierversuche in AP 4.1 für eine angepasste Schaumrezeptur mit Hydrophobierungsmittel des Versuches 8 entschieden. So sollte einerseits ein ausreichendes Expansionsverhalten, gleichzeitig aber auch die Imprägnierung des Schaums mit Matrix begrenzt werden.



*Abbildung 23 Geschäumtes Abstandsgewebe Versuch 11 nach Trocknung*

Ebenfalls wurde in den Versuchen 11 bis 18 mit Einlegeblechen gearbeitet. Zwar wiesen alle Materialsysteme (vgl. Ap 3.4) einen Schwund auf, der theoretischen einen Spalt zum Fluten der Oberfläche zulässt. Jedoch war dieser sehr heterogen und insbesondere in den Randbereichen weniger ausgeprägt.



Abbildung 24 Geschäumtes Abstandsgewebe Versuch 12 nach Trocknung

Es wurden 1 mm Bleche auf alle Flächen, bis auf die Oberfläche der elipsenförmigen Freiform eingelegt. So konnte das geschäumte Abstandsgewebe bei optimaler Konturabbildung auf dieser Fläche im Werkzeug aufliegen, während alle anderen Flächen keinen Kontakt zur Werkzeugoberfläche besitzen und frei umfließbar sind.



Abbildung 25 Geschäumtes Abstandsgewebe Versuch 13 nach Trocknung

Durch die Verwendung der Bleche haben sich sehr scharfe Kanten aufgrund fehlender Radien ausgebildet, wie nahezu alle Versuche der zweiten Versuchsreihe zeigen. Durch die Reduktion der Polfäden kam es in eben diesen Bereichen nahezu zu keiner Faltenbildung. Die punktuelle Fixierung der beiden Gewebelagen bzw. auch der einseitigen Konvektion (Versuch 16 und 17) verhinderte den Faltenwurf am Rand, wie er in der ersten Versuchsreihe häufiger auftrat.

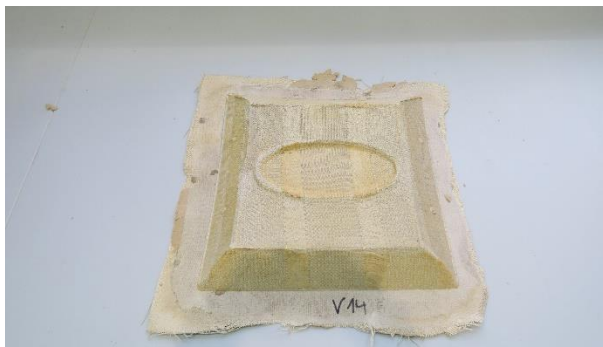


Abbildung 26 Geschäumtes Abstandsgewebe Versuch 14 nach Trocknung

In der zweiten Versuchsreihe wurde versucht, das befüllte Abstandsgewebe möglichst zügig in das Werkzeug abzulegen und dieses zu schließen, um die Expansion im Werkzeug zu verbessern. Das Werkzeug wurde schlagartig geschlossen und so auch ein großer Schwall Wasser aus dem expandierenden Schaum gedrückt. So konnte über fast alle Versuche ein ähnlicher Schaumanteil erzeugt werden.



Abbildung 27 Geschäumtes Abstandsgewebe Versuch 15 nach Trocknung

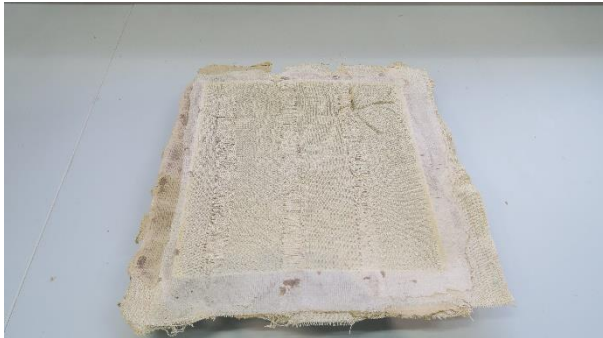


Abbildung 28 Geschäumtes Abstandsgewebe Versuch 16 nach Trocknung



Abbildung 29 Geschäumtes Abstandsgewebe Versuch 17 nach Trocknung



Abbildung 30 Geschäumtes Abstandsgewebe Versuch 18 nach Trocknung

Zusammengefasst ist es durch Anpassung des Textils und der Taschenbildung zur Befüllung mit Holzschäum gelungen den Faltenwurf zu reduzieren. Auch konnte die Menge des Schaumes über die Versuche ähnlich gehalten werden, was für einen Lerneffekt der Bearbeiter spricht. Hingegen zeigen viele der geschäumten Abstandsgewebe Einfallstellen. Diese sind einerseits auf verrutschte Einlegebleche zurückzuführen, andererseits ist die Trocknung zu scharf gewählt worden bzw. zu früh das Teil entnommen worden. Inwieweit das Hydrophobierungsmittel die Expansion einschränkte wie entgegen der Ergebnisse aus der ersten Versuchsreihe aber aus anderen Arbeiten mit dem Holzschäum bekannt ist, konnte nicht nachgewiesen werden. Letzendlich hat sich eine gewisse Reproduktion trotz manueller Befüllung eingestellt, wobei die Ergebnisse in ihrer Konturabbildung nicht das Niveau der ersten Versuchsreihe erreichten.

AP 3.4 – Beurteilung des Expansionsvermögens sowie der Grenzfläche zwischen Gewebe und Holzschaum

Das Expansionsvermögen der Schäume wurde optisch im Abgleich mit der Werkzeugkavität ermittelt. Dafür wurde an jeweils 3 Punkten die Stärke mit einem Messschieber bestimmt. Messpunkt a liegt in der elipsenförmigen Vertiefung mit einer Soll-Stärke von 40 mm, während die Messpunkte b und c in den parallelen Bereichen am Rand mit einer Soll-Stärke von 50 mm liegen.

*Tabelle 8 Expansionsvermögen Versuche 1-6*

Versuch	Messpunkt	Soll-Stärke [mm]	Ist-Stärke [mm]	Abweichung [%]
1	A	37	-	-
	B	50	40,27	-19,46
	C	50	38,9	-22,2
2	A	37	33,88	-15,3
	B	50	43,73	-12,54
	C	50	44,62	-10,76
3	A	37	25,31	-36,725
	B	50	35,78	-28,44
	C	50	35,4	-29,2
4	A	37	26,47	-33,825
	B	50	37,77	-24,46
	C	50	41,19	-17,62
5	A	37	24,96	-37,6
	B	50	37,23	-25,54
	C	50	40,94	-18,12
6	A	37	25,14	-37,15
	B	50	36,54	-26,92
	C	50	35,06	-29,88

In Tabelle 8 bis Tabelle 10 sind die prozentualen Abweichungen der Ist-Stärke gegenüber der Soll-Stärke im Werkzeug gelistet. Grundsätzlich ist die Abweichung negativ, da die Expansion immer im Werkzeug abgeschlossen ist und es durch die anschließende Trocknung zum Schwund und damit zur Abweichung kommt.

Der Schwund ist abhängig von der eingestellten Dichte und der letztendlich vorhandenen Masse an Holzschaum, sowie einer gelungenen Expansion. Bei ausreichender Expansion bildet sich Innendruck, der den Schaum gegen den Widerstand des Textils in die Kontur drückt. Je höher dieser Druck, desto besser wird die Kontur abgebildet. Das Maß der Expansion wird durch den Anteil an Treibmittel sowie den Fortschritt der Expansion gesteuert. Wird bereits nahezu vollständig expandierter Holzschaum in die Werkzeugkavität gegeben, wird diese nur schlecht abgebildet und der sich anschließende Schwund ist umso stärker zu erkennen. Ist die Expansion abgeschlossen, wird durch die Trocknung (und das Vakuum) die Feuchtigkeit abgeführt und es bildet sich die Schaumstruktur. Je nach Innendruck, Dichte und Zusammensetzung des Schaums fällt diese aus.

Ziel ist es somit die Kavität so zu befüllen, dass sich ein möglichst hoher Innendruck aufbaut, um dem Schwund entgegen zu wirken. So kann der Schaum bis zur Formstabilität trocknen und entnommen werden.

Tabelle 9 Expansionsvermögen Versuche 7-12

Versuch	Messpunkt	Soll-Stärke [mm]	Ist-Stärke [mm]	Abweichung [%]
7	A	37	30,77	-23,075
	B	50	40,02	-19,96
	C	50	38,63	-22,74
8	A	37	-	-
	B	50	37,19	-25,62
	C	50	34,52	-30,96
9	A	37	34,56	-13,6
	B	50	43,4	-13,2
	C	50	43,4	-13,2
10	A	37	40,1	0,25
	B	50	45,41	-9,18
	C	50	38,96	-22,08
11	A	36	35,23	-11,925
	B	48	41,73	-16,54
	C	48	43,98	-12,04
12	A	36	34,42	-13,95
	B	48	45,62	-8,76
	C	48	45,8	-8,4

Die Problematik des händischen Befüllens zeigt sich über alle Ergebnisse hinsichtlich des Expansionsvermögens. Mit Ausnahme von Versuch 12 liegen die Abweichungen deutlich im zweistelligen Bereich bei bis zu 60 % (Versuch 13). Häufige Ursache der Abweichung ist der Einfall der flächigen Rückseite, während die ellipsenförmige Freiform (Unterseite im Werkzeug) gut abgebildet werden kann. Für die Versuche 11-18 ist zudem zu berücksichtigen, dass sich die Abweichungen auf die kleinere Kavität beziehen, da mit Einlegern gearbeitet wurde. In Bezug auf die vollständige Kavität, wie sie zum Füllen genutzt wurde ist die Abweichung noch größer.

Aus den ermittelten Abweichungen ist kein Zusammenhang mit den verwendeten Rezepturen, Textilvarianten oder Trocknungsparametern abzuleiten. Da der Expansionsgrad zum Zeitpunkt des Schließens des Werkzeugs nicht bestimmbar ist, lässt sich nur vermuten, dass die Abweichung auf die variierende Menge an Holzschaum, sowie dessen Verteilung im Gewebesack und das Maß an Expansion nach Schließen des Werkzeugs verantwortlich für die Abweichungen ist.

Tabelle 10 Expansionsvermögen Versuche 13-18

Versuch	Messpunkt	Soll-Stärke [mm]	Ist-Stärke [mm]	Abweichung [%]
13	A	36	15,87	-60,325
	B	48	19,67	-60,66
	C	48	22,44	-55,12
14	A	36	32,35	-19,125
	B	48	42,11	-15,78
	C	48	45,15	-9,7

15	A	36	31,4	-15,1
	B	48	39,3	-21,4
	C	48	45	-10,0
16	A	36	35,01	-12,475
	B	48	44,28	-11,44
	C	48	46,07	-7,86
17	A	36	24,22	-39,45
	B	48	39,18	-21,64
	C	48	34,49	-31,02
18	A	36	23,11	-42,225
	B	48	39,48	-21,04
	C	48	40,41	-19,18

### Grenzfläche Textil und Schaum:

Es kommt nur bedingt bzw. kaum zu einer mechanischen Verzahnung von Schaum und Textil. Grund hierfür sind die relativ hohe Viskosität des Holzschleims sowie die hohe Webdichte im Gewebe. Eine Senkung der Viskosität wird hinsichtlich des zu verdampfenden Wasseranteils als nicht zielführend erachtet. Da sich das Textil und der schaum teilweise schon beim Entformen trennten, wurden die Charakterisierung mittels Zugversuches als nicht zielführend erachtet.

Folgende mechanische und hygrische Eigenschaften konnten für den Holzschaum (Zieldichte 100 kg/m<sup>3</sup>) bestimmt werden:

Table 11: Auswertung der Eigenschaften des in der Machbarkeitsstudie verwendeten Holzschaums.

Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]	Druckfestigkeit [kPa]	Wasseraufnahme (hydrophobiert) [kg/m <sup>2</sup> ]	Wasseraufnahme (unhydrophobiert) [kg/m <sup>2</sup> ]	Quellverhalten [%]	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]
100	110,4	0,65-1,5	>10	< 5%	0,04

Im Wesentlichen hängen die mechanischen und hygrischen Eigenschaften des Bauteils (ohne Harzsystem) vom Holzschaum selbst ab. Die Wärmeleitfähigkeit des Systems konnte nur für den reinen Holzschaum bestimmt werden, da kein ausreichend großer Prüfkörper zur Verfügung stand. Ein Zugversuch senkrecht zur Faserrichtung war ebenfalls nicht möglich, da keine ausreichende Haftung zwischen Holzschaum und Textil bestand (siehe oben). Die Wasseraufnahme und das Quellverhalten des Systems entspricht dem des Holzschaums.

Zusammenzufassen ist, dass keine reproduzierbare Expansion über die Versuchsreihen umgestellt werden konnte. Als Grund wird die manuelle Befüllung und das Fehlen eines Nachrückens des Schaums bis zur Formstabilität vermutet.

### Arbeitspaket 4: Imprägnierung und Konsolidierung der Deckschichten

#### AP 4.1 Verwendung einer duroplastischen Matrix und AP 4.3 Alternative Verfahren

Ziel des AP 4.1 ist die Imprägnierung und anschließende Konsolidierung der textilen Deckschichten des Schaum-Textilverbundes mit einem Epoxidharz zur Umsetzung eines Sandwichelements. Als Matrixsystem wurde das biobasierte Bisphenol Harz Greenpoxy 56 in Kombination mit dem Heißhärter SZ 8525 gewählt. Einerseits ist dies ein schnelles, heißhärtendes System, andererseits soll durch kurze Topf- bzw. eine schnelle Gelierzeit das Eindringen des Harzes in den Holzschaum reduziert werden. Die Verwendung von Hydrophobierungsmittel im Holzschaum ist ein weiterer Ansatz die Aufnahme des Harzes zu senken

### Imprägnierversuche „Holzschaum“

In den Versuchen 1-10 kamen u.a. unterschiedliche Holzschäumrezepturen zum Einsatz, die ab Versuch 11 nicht weiter variiert wurden. Ausschlaggebend für eine Rezeptur ist die Verwendung von Hydrophobierungsmittel, das sich in Vorversuchen als positiv hinsichtlich einer geringen Eindringtiefe des Harzes in den Schaum erwiesen hat.

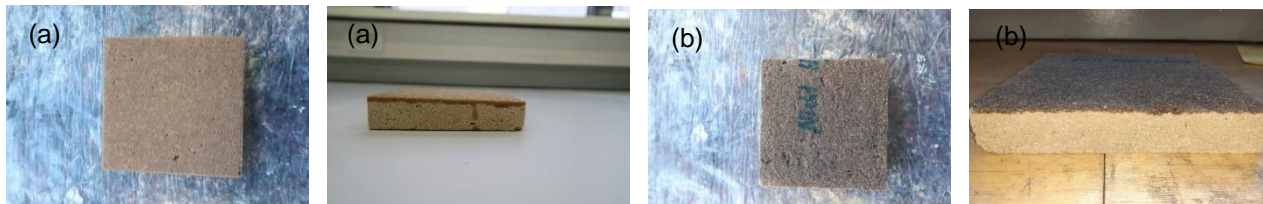


Abbildung 31 Hydrophobierter (a) und nicht hydrophobierter (b) Holzschäum, Auftrag bei RT

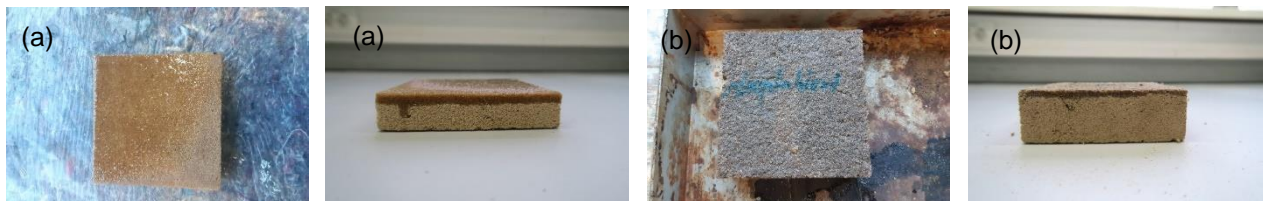


Abbildung 32 Hydrophobierter (a) und nicht hydrophobierter (b) Holzschäum, Auftrag bei RT bis zur Sättigung

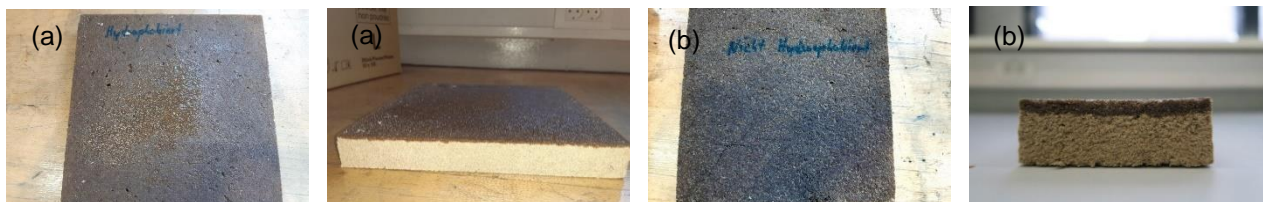


Abbildung 33 Hydrophobierter (a) und nicht hydrophobierter (b) Holzschäum, Auftrag bis zur Sättigung und Trocknung bei 80 °C

In Abbildung 31 bis Abbildung 33 sind die Ergebnisse der Imprägnierung von hydrophobierten und nicht hydrophobierten Holzschäumen abgebildet. Dabei erfolgten der Auftrag und die Härtung bei Raumtemperatur (Abbildung 31), Auftrag bis zur Sättigung und Aushärtung bei Raumtemperatur (Abbildung 32) sowie Auftrag bis Sättigung und Aushärtung bei 80 °C. Ein Unterschied lässt sich insbesondere im letzten Fall erkennen, als dass das Epoxidharz in den hydrophobierten Schaum weniger tief eindringt. Es ist zu vermuten, dass bei RT bei gleicher Harzmenge diese auch vollständig in den Schaum eindringt, jedoch das Hydrophobierungsmittel die Diffusion verlangsamt. Wird die Diffusion durch die Heißhärtung vorzeitig unterbunden, diffundiert das Harz in den hydrophobierten Schaum weniger tief ein. Dieses Verhalten entspricht grundsätzlich dem gewünschten Verhalten für die Imprägnierung im heißen Werkzeug mittels vRTM.

### Imprägnierversuche anhand von Holzschäumklötzen aus Versuchen

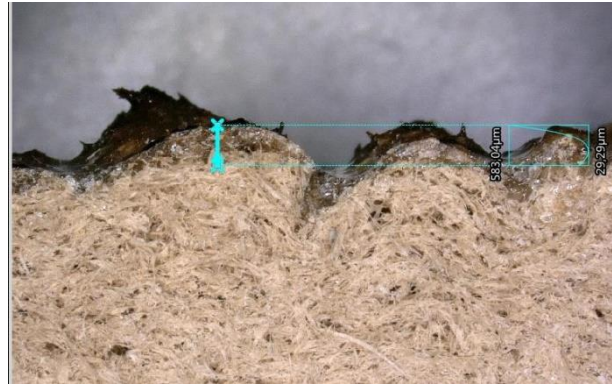
Hierzu wurden aus den jeweiligen Ansätzen des Holzschäume kleine Musterblöcke hergestellt, so dass identische Rezepturen zu den im Textil geschäumten Schaumblöcken sichergestellt sind.

In Abbildung 34 bis Abbildung 39 sind Holzschäumeansätze der jeweiligen Versuche aus der Versuchsreihe 2 abgebildet. Diese wurden anschließend mit Harz bestrichen und bei 80 °C (= Werkzeugtemperatur) ausgehärtet. Die Eindringtiefe wurde dann optisch mit dem 3D Mikroskop vermessen.



Eindringtiefe [mm]

Abbildung 34 Imprägniersuch V 11

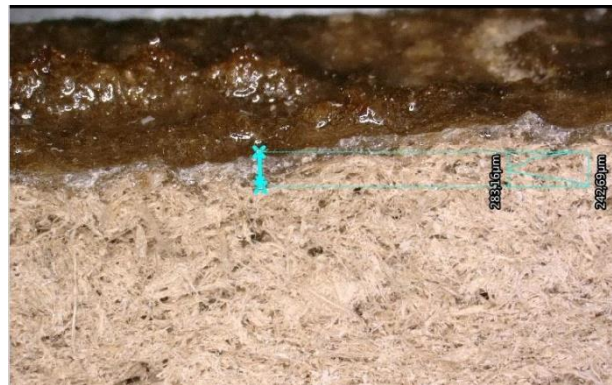


1,25



Eindringtiefe [mm]

Abbildung 35 Imprägniersuch V12



1,01

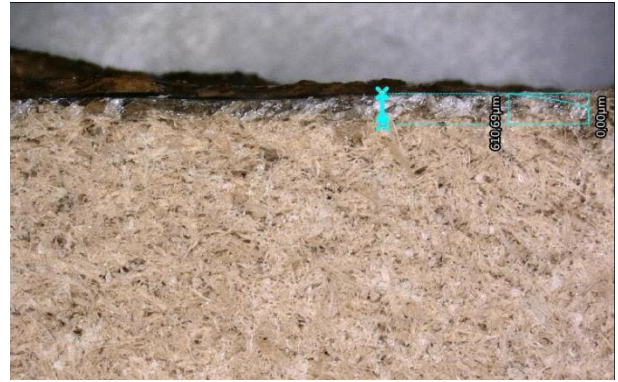


Eindringtiefe [mm]

Abbildung 36 Imprägniersuch V13



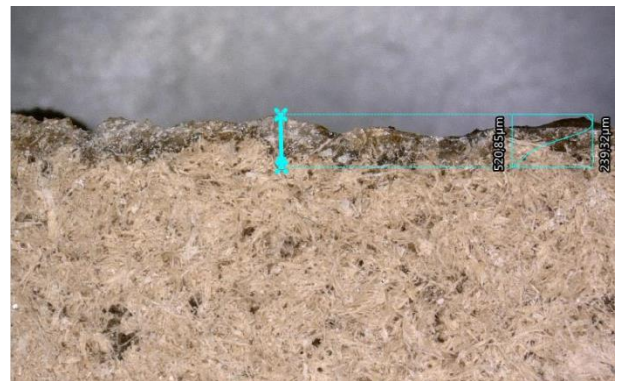
1,85



Zweite Seite Eindringtiefe [mm]

1,6

Abbildung 37 Imprägnierversuch V14



Eindringtiefe [mm]

1,5

Abbildung 38 Imprägnierversuch V 16



Zweite Seite Eindringtiefe [mm]

1,2

Abbildung 39 Imprägnierversuch V17

Alle Versuche zeigen bei atmosphärischer Heißhärtung eine Eindringtiefe zwischen 1 und 2 mm. Dies wird grundsätzlich als akzeptabel angesehen, so dass der Schaum für die weiterführenden Imprägnierungsversuche geeignet ist.

*Imprägnierungsversuche anhand der vom geschäumten Textil*

Zunächst wurde die theoretisch benötigte Harzmenge aus dem Textilgewicht ermittelt. Als Ziel wurde ein Faseranteil in den Dekschichten von 40 Gew.-% festgelegt. Mit der Annahme einer Eindringtiefe des Harzes in den Schaum von 2 mm wurde über die Werkzeugoberfläche und die Dichte des Harzes bzw. das Volumen einer 2 mm Schicht Harz angenommen und ein Zuschlag von 138 g auf die zu fördernde Menge aufgeschlagen. Die Füllmenge ist über die Anzahl der Hübe des Statikmischers einzustellen. Die Füllung wird über den Injektionsdruck reguliert, der den Druck festlegt, der maximal zu nutzen ist, um die definierte Menge an Harz in die Kavität zu fördern. Dieser wurde auf 8 bar festgelegt. Der weitere Druckaufbau mittels Nachdrucks wurde nach Vorversuchen nicht verwendet, da der Nachdruck so lange Harz fördert bis der Druck erreicht ist oder eine definierte Zeitspanne abgelaufen ist. In Vorversuchen an mit PU-Schaum gefüllten Abstandsgeweben wurde zunächst mit Nachdruck gearbeitet, um die berechnete Harzmenge zu validieren. Hierbei zeigte sich, dass bei einer ungleichmäßigen Verteilung des Harzes und einer zu großen Menge, die exotherme Aushärtung sehr extrem abläuft, was eine Beschädigung der Werkzeugoberflächen zur Folge hatte. Daher wurde die Fördermenge auf ein Maximum je Härtervorgang von 400 g beschränkt.



*Abbildung 40 Vorversuche mit PU Schaum zur Validierung der Harzmenge*

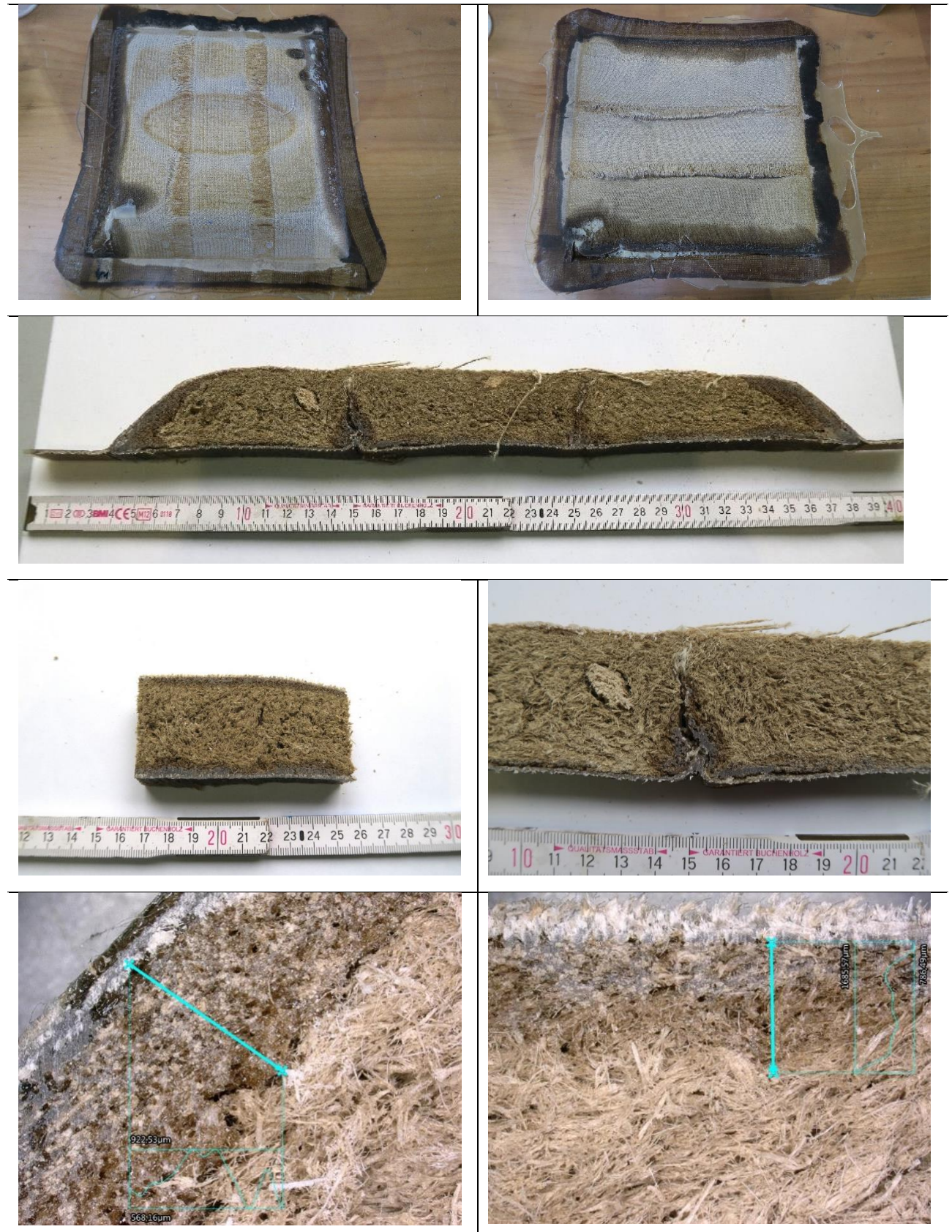
In Tabelle 12 sind die Prozessparameter der durchgeführten Imprägnierungsversuche mittels vRTM, VARI, sowie thermoplastischem Heißpressen zusammengefasst. Injektionsdrücke über 2 bar werden lediglich für Versuch 7 und 8 erreicht, die mit Hydrophobierungsmittel ausgestattet sind. Dies lässt sich für die Versuche aus der Versuchsreihe 2 nicht wiederholen. Zwar sind die Injektionsdrücke leicht höher als für Versuche 1, 2 und 6, jedoch deutlich geringer als Versuche 7 und 8, die die Auswahl der finalen Schaumrezeptur für Versuchsreihe 2 festgelegt haben.

*Tabelle 12 Übersicht der durchgeführten Imprägnierungsversuche mittels vRTM, VARI, Handlaminat und thermoplastisches Heißpressen*

Versuch	RTM			VARI	Thermoplastisches Heißpressen	
	Injektions-druck [bar]	Abschalt-druck [bar]	Füllmenge [g]	Durchgeführt	Temperatur [°C]	Matrixanteil [Gew.-%]
1	1,5	1,5	356	-		
2	1,7	2	357	-		
5	-	-	-	x		
6	1,5	1,5	378	-		
7	3,5	4	366	-		
8	5	6,5	379	-		
9				-	220	40
10				-	220	52
11	2,1	2	360	-		
12	1,8	2,1	356	-		
14	2,3	2,4	357	-		
18	1,8	1,8	321	-		

Ein grundlegendes Problem einer systematischen Versuchsplanung zur Beurteilung des Imprägniervermögens stellt die heterogene Ausprägung des Schaumes dar. Alle gefertigten geschäumten Abstandsgewebe waren Einzelstücke, so dass jeder Versuch zwar neue Erkenntnisse brachte, aber es nicht gelungen ist eine vollständige Imprägnierung der Deckschichten umzusetzen. In Tabelle 13 bis Tabelle 18 sind die Ergebnisse der Imprägnierungsversuche dargestellt. Dabei werden jeweils die Ober- und Unterseite gezeigt, sowie Querschnitte der aufgetrennten Proben, um das Imprägnierverhalten mittels 3D Mikroskop optisch zu bestimmen.

*Tabelle 13 Ergebnis der Imprägnierung des Versuch 1 mit Epoxidharz mittels vRTM*



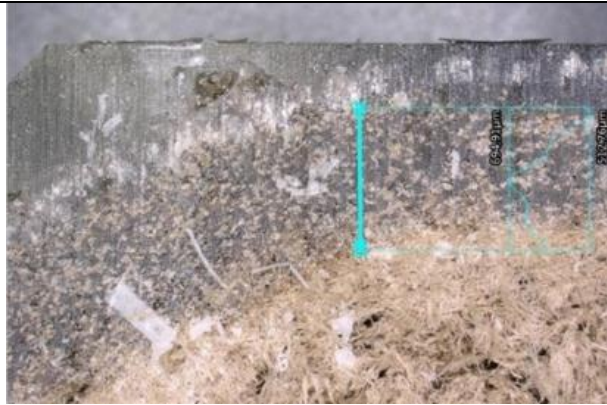
Eindringtiefe an der Schräge [mm]	7,45
Eindringtiefe an der Seite ohne Abdruck [mm]	5,5
Eindringtiefe an der Seite beim Abdruck [mm]	5,25

In Tabelle 13 sind die Ergebnisse des V1 abgebildet. Gut erkennbar ist, dass das Harz das Textil umströmt und zunächst ganzheitlich in den Bereich ohne Schaum eindringt und auch einen guten Verbund ausbildet. Auf zwei Seiten des Pyramidenstumpfes kommt es zur Imprägnierung der Schrägen, wobei das Harz bis zu 8 mm eindringt. Hierdurch war eine gleichmäßige Verteilung der kalkulierten Harzmenge nicht mehr möglich. Gut zu erkennen ist, wie das Harz durch die Kapillarwirkung an den Polfäden in den Schaum diffundiert. Wobei die Kapillarwirkung an den Polfäden scheinbar höher ist als im Holzschaum.

In Tabelle 14 sind die Ergebnisse des V2 abgebildet. Für eine bessere Verteilung wurde der textile Randbereich ohne Holzschaum entfernt. Die Imprägnierung schreitet dadurch weiter fort, aber beschränkt sich auf die Hälfte des geschäumten Abstandsgewebes. Dabei dringt das Harz lediglich ca. 5 mm in den Schaum ein. Die Stärke des Harzes erscheint jedoch stärker, da aufgrund des Schwundes sich eine nahezu gleich starke Harzschicht bildet. Die konturfreie Rückseite des Prüfkörpers betrachtet (im Werkzeug oben liegend) zeigt sich ein Austritt stark geschäumten Epoxidharzes. Der Schaum spricht für die Anwesenheit von Feuchtigkeit, trotz Trocknung vorab (12 h bei 80°C) und heißem Werkzeug. Der mittige Austritt des Harzes lässt zudem vermuten, dass das Harz durch den Schaum an die Oberfläche diffundiert, anstatt zwischen Textil und Werkzeugoberfläche entlang zu fließen. Ausgehend von der Tatsache, dass das Harz den Weg des geringsten Widerstands entlang fließt, ist zu vermuten, dass im Randbereich, das Textil stark aufbaut und das Harz hier langsamer fließt.

*Tabelle 14 Ergebnis der Imprägnierung des Versuchs 2 mit Epoxidharz mittels vRTM*



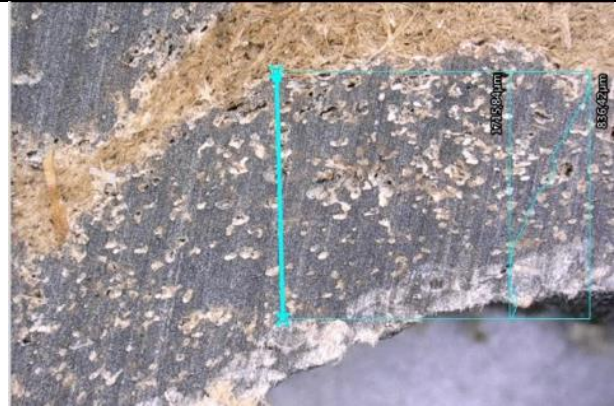
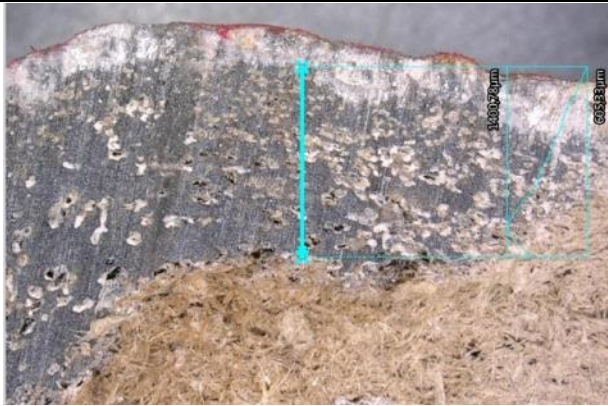


Eindringtiefe an der Schräge [mm]	3,6
Eindringtiefe an der Oberseite Abdruck [mm]	4,2
Eindringtiefe an der Unterseite [mm]	4,2 - 6,3

Im Versuch 5 (Tabelle 15) erfolgte die Imprägnierung mittels Vakuuminfusion. Über eine großflächige Fließhilfe, die aufgrund der flexiblen Vakuumfolien einen gleichmäßigen Spalt um das geschäumte Abstandsgewebe bildet, sollte das Harz schnell und gleichmäßig verteilt werden. Es zeigte sich, dass der Schaum durch den verwendeten Vakuumsack zusammengedrückt wurde, da die Druckfestigkeit des Schaumes zu gering ist. Auch verteilte sich das Harz trotz Fließhilfe nicht über das Textil, sondern führte zu einer partiellen vollständigen Imprägnierung des Schaums. Ebenfalls gut erkennbar ist die geringe mechanische Haftung zwischen Textil und Schaum. Die Fäden werden in den Schaum gedrückt, aber nicht von diesem umschlossen. Daher wurde dieser Ansatz nicht weiterverfolgt.

*Tabelle 15 Ergebnis der Imprägnierung des Versuchs 5 mit Epoxidharz mittels VARI*





Eindringtiefe der Seite mit dem Abdruck [mm]

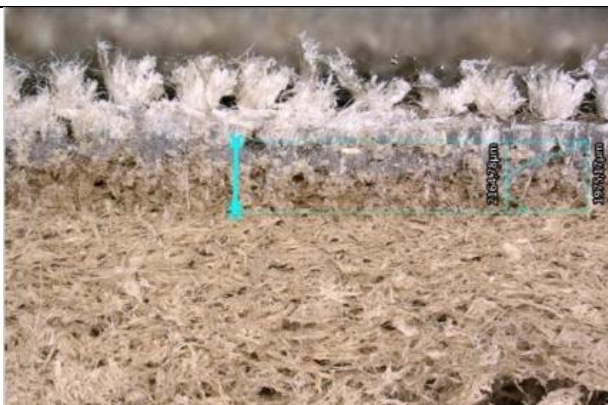
5,6

Eindringtiefe der Seite ohne den Abdruck [mm]

7,3

Die Imprägnierung des Versuchs 6 (Tabelle 16) zeigt sehr geringe Eindringtiefen von ca. 2 mm auf, was der gewünschten Eindringtiefe entspricht. Jedoch ist auch diese Imprägnierung nicht vollständig und die Kontur auf der Unterseite blieb ebenfalls trocken.

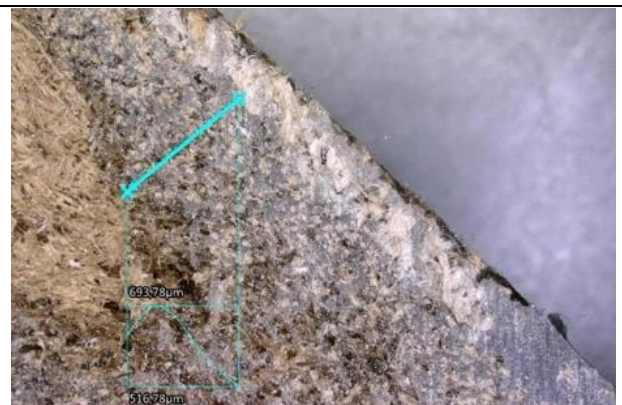
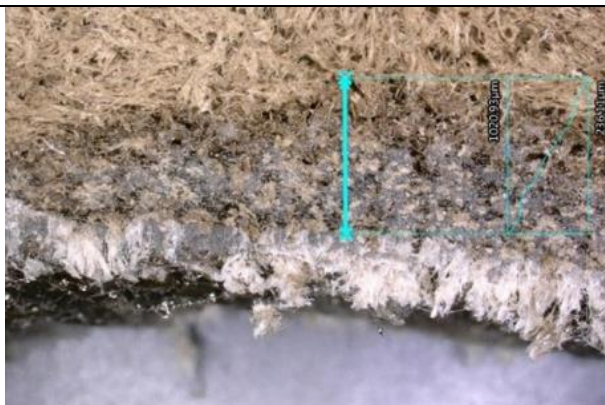
*Tabelle 16 Ergebnis der Imprägnierung des Versuchs 6 mit Epoxidharz mittels vRTM*



Eindringtiefe der Seite ohne Abdruck bei Erhebung 1 [mm]	1,89
Eindringtiefe der Seite mit Abdruck bei Erhebung 1[mm]	1,93
Eindringtiefe der Seite ohne Abdruck bei Erhebung 2 [mm]	1,61
Eindringtiefe der Seite mit Abdruck bei Erhebung 1[mm]	2,22

Versuch 7 beinhaltet Holzschaum mit Hydrophobierungsmittel. Ein Effekt konnte an dieser Stelle nicht nachgewiesen werden. Allerdings ist die Imprägnierung auch nur knapp über die Schräge hinausgekommen, da die Anlage dann das Füllmaximum erreicht hat. Zu erkennen ist, dass der Schaum in diesen Bereichen stark imprägniert ist. Dies ist nachvollziehbar, als dass das Harz von der Spitze aus zur Ober- und Unterseite des Stumpfes fließt und so von zwei Seiten in den Schaum diffundieren kann. Auch hier zeigt sich die geringe mechanische Haftung zwischen Fasern und Schaum.




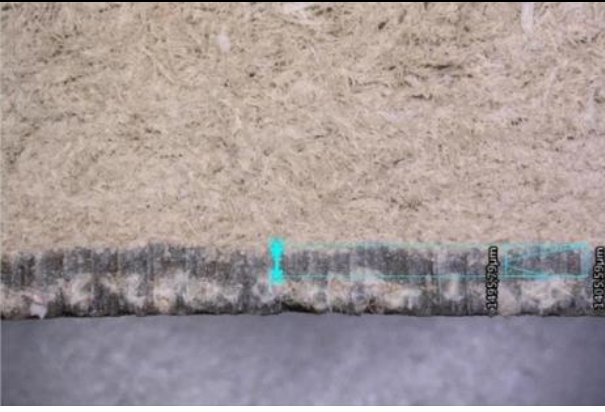
*Tabelle 17 Ergebnis der Imprägnierung des Versuchs 7 mit Epoxidharz mittels vRTM*



Eindringtiefe an der Schräge zum Abdruck [mm]	4,3
Eindringtiefe an der Seite mit Abdruck [mm]	11,3
Eindringtiefe an der Seite ohne Abdruck [mm]	4,52

In Tabelle 18 sind die Ergebnisse des Versuchs 8 dargestellt. Hier wurde ebenfalls ein Schaum mit Hydrophobierungsmittel verwendet. Auch wenn erneut keine vollständige Imprägnierung erreicht wurde, zeigen sich nur geringe Eindringtiefen von 1-3 mm, was der Zielstärke entspricht. Aufgrund dieser Ergebnisse wurde für die zweite Versuchshälfte diese Schaumrezeptur verwendet.

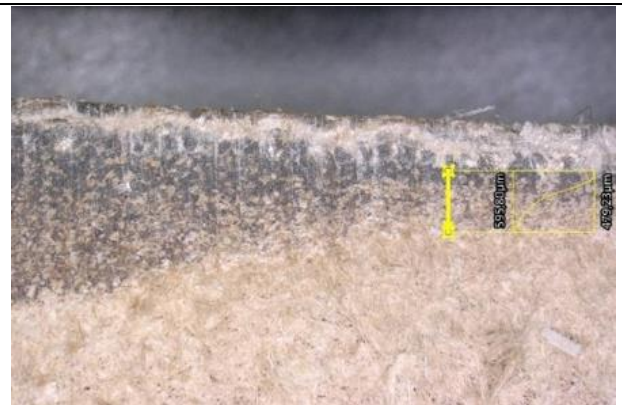
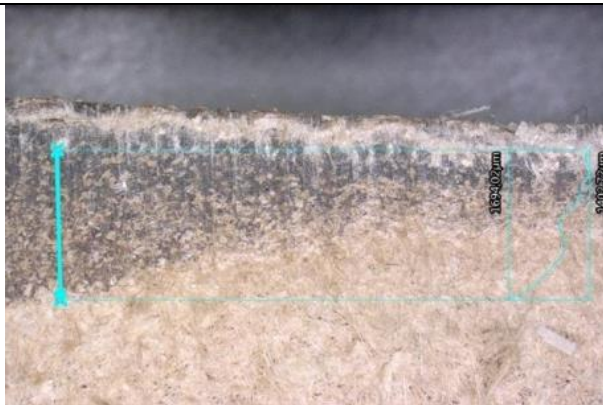
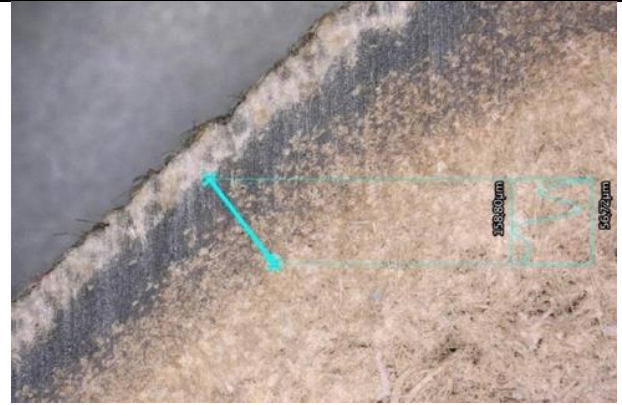
*Tabelle 18 Ergebnis der Imprägnierung des Versuchs 8 mit Epoxidharz mittels vRTM*

	
	
<p>Eindringtiefe beim Abdruck [mm]</p>	<p>3,1</p>
<p>Eindringtiefe an der Seite ohne Abdruck [mm]</p>	<p>0,95</p>

Die zweite Versuchshälfte startete mit V11, die Ergebnisse sind in Tabelle 19 dargestellt. Da Einlegebleche während der Schäumung zum Einsatz kamen, ist der Spalt zwischen Schaum und Werkzeugoberfläche teils sehr groß. Dies zeigt sich in der Imprägnierung, als dass das Harz sich in der Kontur sammelt. In einer Ecke des geschäumten Abstandgewebes hat das Harz einen Kanal durch den Schaum gebildet und ist durch diesen hindurch geflossen. Da sich punktuell so viel Harz gesammelt hat, hat sich dieses aufgrund der exothermen Reaktion verfärbt. Die Eindringtiefen variieren zwischen 3 und 9 mm und liegen damit über denen aus V8.

*Tabelle 19 V Ergebnis der Imprägnierung des Versuchs 11 mit Epoxidharz mittels vRTM*

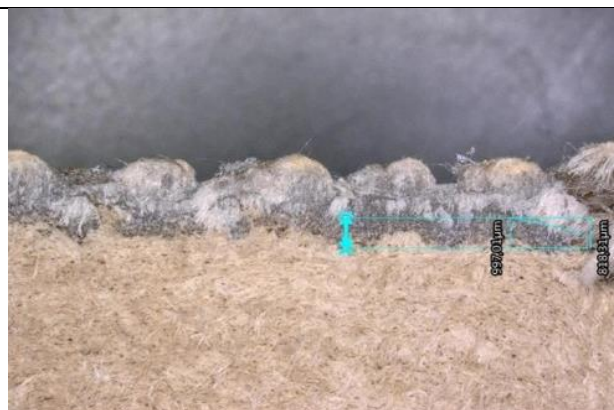
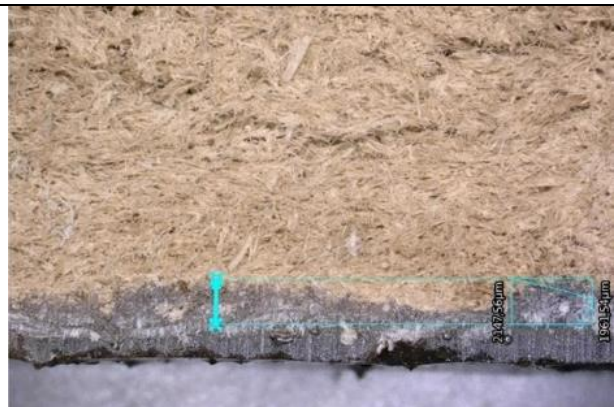




Eindringtiefe an der Erhebung [mm]	8,99
Eindringtiefe an der Schräge [mm]	3,15
Eindringtiefe an der Seite ohne Abdruck [mm]	4,8

In Tabelle 20 sind die Ergebnisse des Versuchs 12 dargestellt. Das Harz dringt von allen Seiten in das geschäumte Abstandsgewebe ein, fließt aber auch wie in Versuch 11 in den Spalt der Kavität. Das Harz zeigt Blasenbildung im Bereich des Schaumes und leichte Ansätze der Verfärbung aufgrund der Exothermie. Aus diesem Grund wurde die Füllmenge nicht erhöht. Erneutes Füllen nach Aushärtung ist nicht zielführend, da der Rand bereits imprägniert ist und damit als Sperre fungiert. Die Eindringtiefe liegt im akzeptablen Bereich, jedoch ist anzumerken, dass die Oberfläche des Verbunds in den imprägnierten Bereichen nicht ausreichend ist.

Tabelle 20 Ergebnis der Imprägnierung des Versuchs 12 mit Epoxidharz mittels vRTM

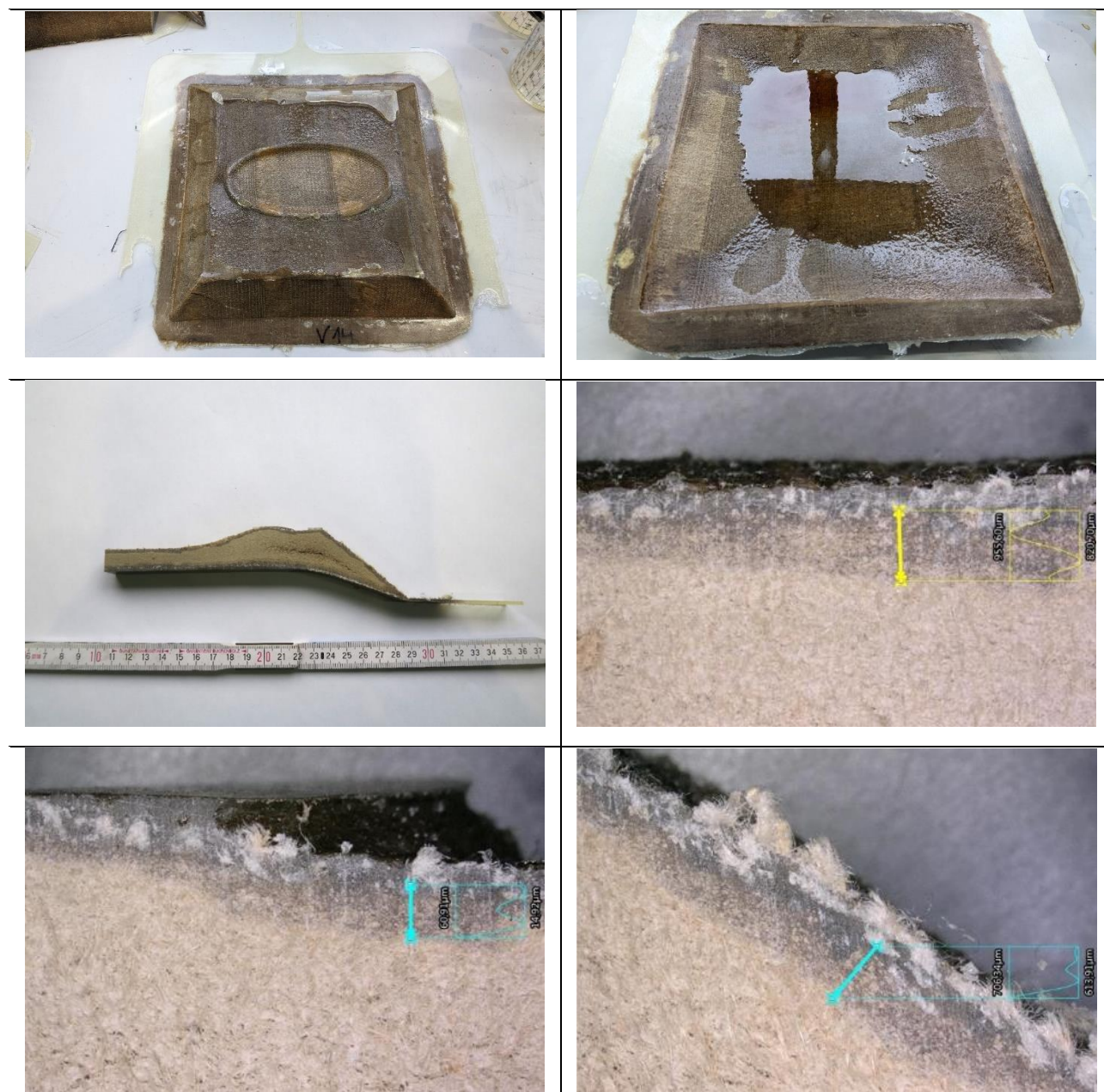


Eindringtiefe an Seite ohne Abdruck [mm]	1,4
Eindringtiefe an der Schräge [mm]	1,45
Eindringtiefe an der Seite mit Abdruck [mm]	0,9

In Tabelle 21 sind die Ergebnisse des Versuchs 14 dargestellt. Mittels vRTM konnten keine Verbesserungen gegenüber den vorangegangenen Versuchen erzielt werden. Aus diesem Grund wurde das geschäumte Abstandsgewebe bis zur Sättigung per Handlaminierten imprägniert. Ziel war es, die Eindringtiefe bei

Atmosphärendruck zu bestimmen. Mit einer Eindringtiefe von 1,8 bis 2,8 mm werden die Ergebnisse der Vorversuche grundsätzlich bestätigt. Es ist zu vermuten, dass das Harz während des RTM Prozesses das geschäumte Abstandsgewebe nicht gleichmäßig umfließen kann, was vermutlich an dessen heterogener Struktur liegt.

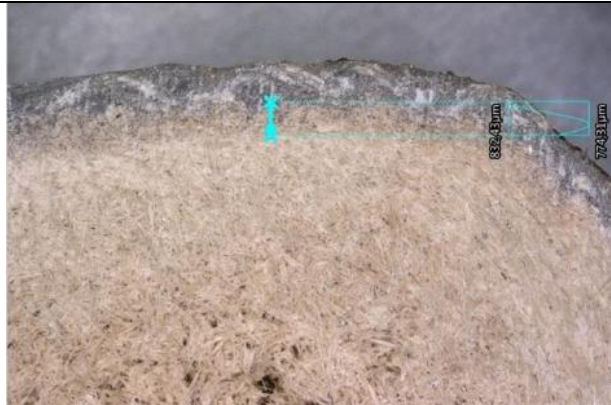
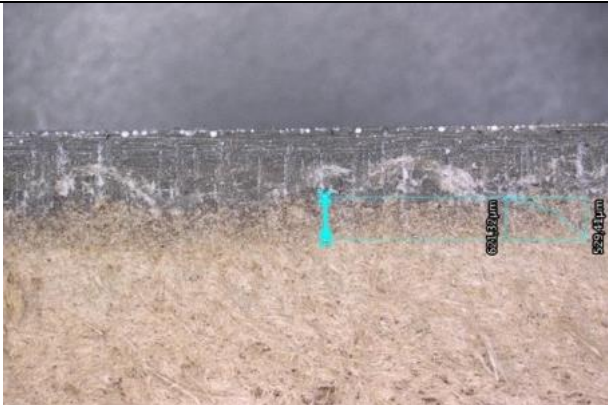
Tabelle 21 Ergebnis der Imprägnierung des Versuchs 14 mit Epoxidharz mittels vRTM und anschließendem Handlaminieren



Eindringtiefe an der Erhebung [mm]	1,85
Eindringtiefe an der Seite beim Abdruck [mm]	2,4
Eindringtiefe an der Schräge [mm]	2,35
Eindringtiefe an der Seite ohne Abdruck [mm]	2,85

In Tabelle 22 sind die Ergebnisse des Versuchs 18 dargestellt. In den imprägnierten Bereichen konnte eine wünschenswerte Oberfläche erzeugt werden: das Harz imprägniert das Textil vollständig und dringt ca. 1,5 mm in den Schaum ein. Allerdings ist dies auch wieder nur partiell gelungen.

Tabelle 22 Ergebnis der Imprägnierung des Versuchs 18 mit Epoxidharz mittels vRTM



Eindringtiefe an der Schräge [mm]	1,5
Eindringtiefe an der Seite mit Abdruck [mm]	1,3
Eindringtiefe an der Erhebung [mm]	1

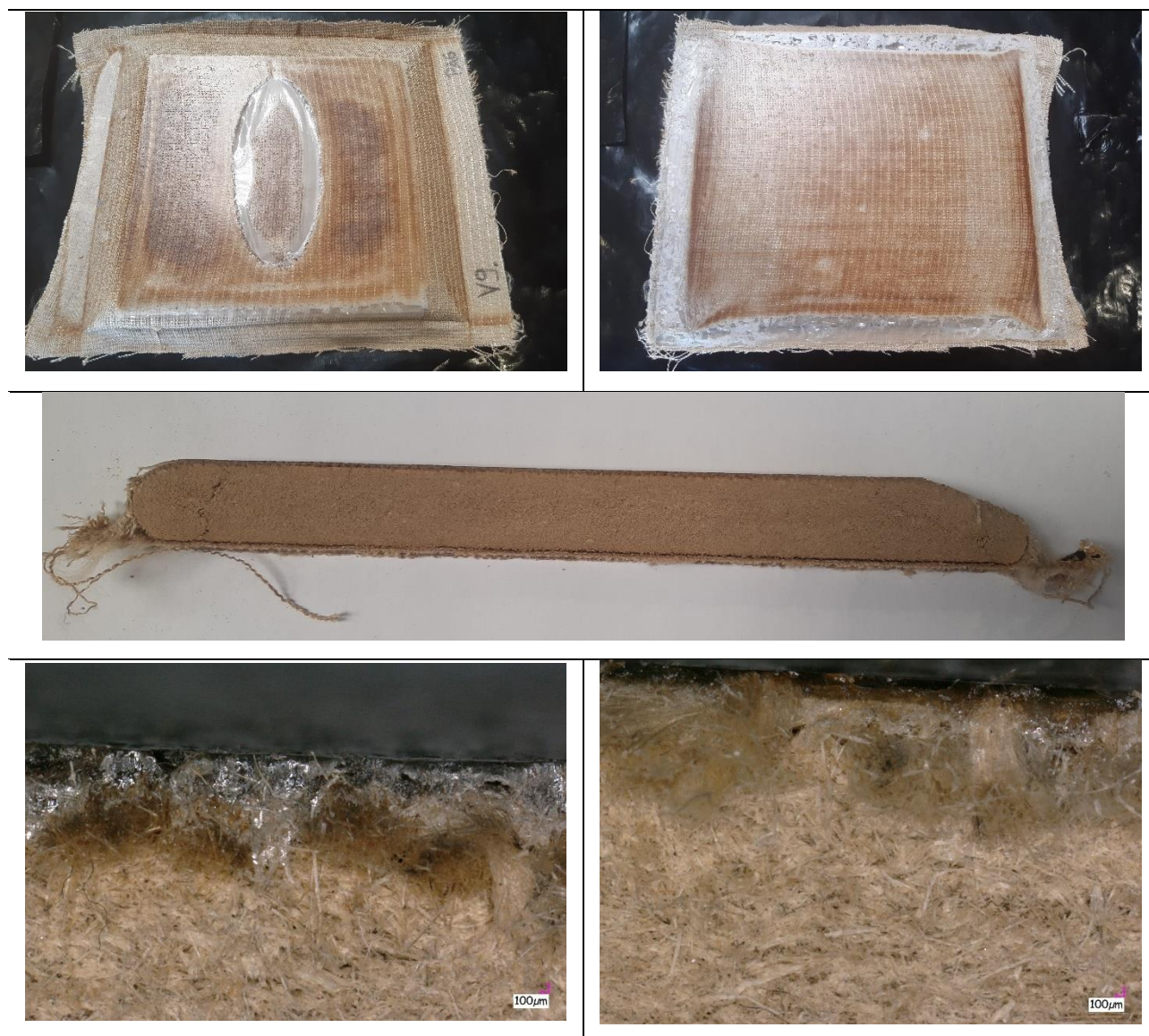
Zusammenzufassen ist, dass trotz einer nicht erfolgreichen vollständigen Imprägnierung mittels vRTM wünschenswerte Imprägnierungen von Textil und Schaum umgesetzt wurden, so dass diese einen form- und kraftschlüssigen Verbund bilden. Als Grund für die fehlerhafte Imprägnierung ist die Qualität der einzelnen Prüfkörper zu nennen sowie die Werkzeugtechnik. Hier bedarf es weitergehender Werkzeugkonstruktion, wie einer Tauchkante oder mehrerer Injektionspunkte, um den Harzfluss besser steuern zu können.

#### AP 4.2 Verwendung einer thermoplastischen Matrix

Als Alternative zur duroplastischen Imprägnierung der textilen Decklagen wurde eine thermoplastische Imprägnierung mit PA untersucht. Hierfür wurde einerseits ein Hybridgewebe aus Naturfasern und PA-Fasern verwendet, andererseits Folien mit eingelegt. Durch den Schrumpf des Holzschlams, war es nicht möglich Druck im Werkzeug auf die Oberflächen aufzubringen, weshalb die Versuche ohne Werkzeug in der Heißpresse erfolgten. Hierbei wurden lediglich die parallelen Flächen der Ober- und Unterseite imprägniert, zudem wurde der Schaum durch den Druck komprimiert, der notwendig war, um Unebenheiten der Oberflächen auszugleichen.

In Tabelle 23 sind die Ergebnisse des Versuchs 9 mit PA 11 Folie dargestellt. Dieses wurde bei 220 °C für 2 min mit 10 bar aufgepresst, bevor unter Druck auf 80 °C abgekühlt wurden. Der Holzschlams zeigt durch das Pressen ein homogenes Erscheinungsbild, lediglich an den Außenbereichen sind Brüche aufgrund der Kompression zu erkennen. Die Detailaufnahme unter dem 3D Mikroskop zeigt, dass der Thermoplast nur oberflächlich in das Textil eingedrungen ist und nicht durch das Textil bis zum Schaum vorgedrungen ist. Dies liegt an der zu geringen Temperatur bzw. zu hohen Viskosität des Polymers.

*Tabelle 23 Ergebnis der Imprägnierung des Versuchs 9 mit PA11 mittels Thermoformen*



In Tabelle 24 sind die Ergebnisse des Versuchs 10 dargestellt. Partiiell ist das Eindringen der Matrix bis zum Holzschlams zu erkennen, jedoch wird diese Tiefe als nicht ausreichend erachtet. Der Matrixanteil lag bei 52 Gew.-%, was neben dem Hybridgewebe über 2 Lagen Folie (100µm) realisiert wurden. Für eine bessere Imprägnierung sollte mit einem erhöhten Anteil an Matrix im Hybridgewebe gearbeitet werden. Durch die Wahl eines niedrig schmelzenden Polymeren z.B. PLA, kann die Prozesstemperatur gesenkt werden und es sollte eine bessere Imprägnierung erreicht werden.

Tabelle 24 Ergebnis der Imprägnierung des Versuchs 10 mit PA11 mittels Thermoformen

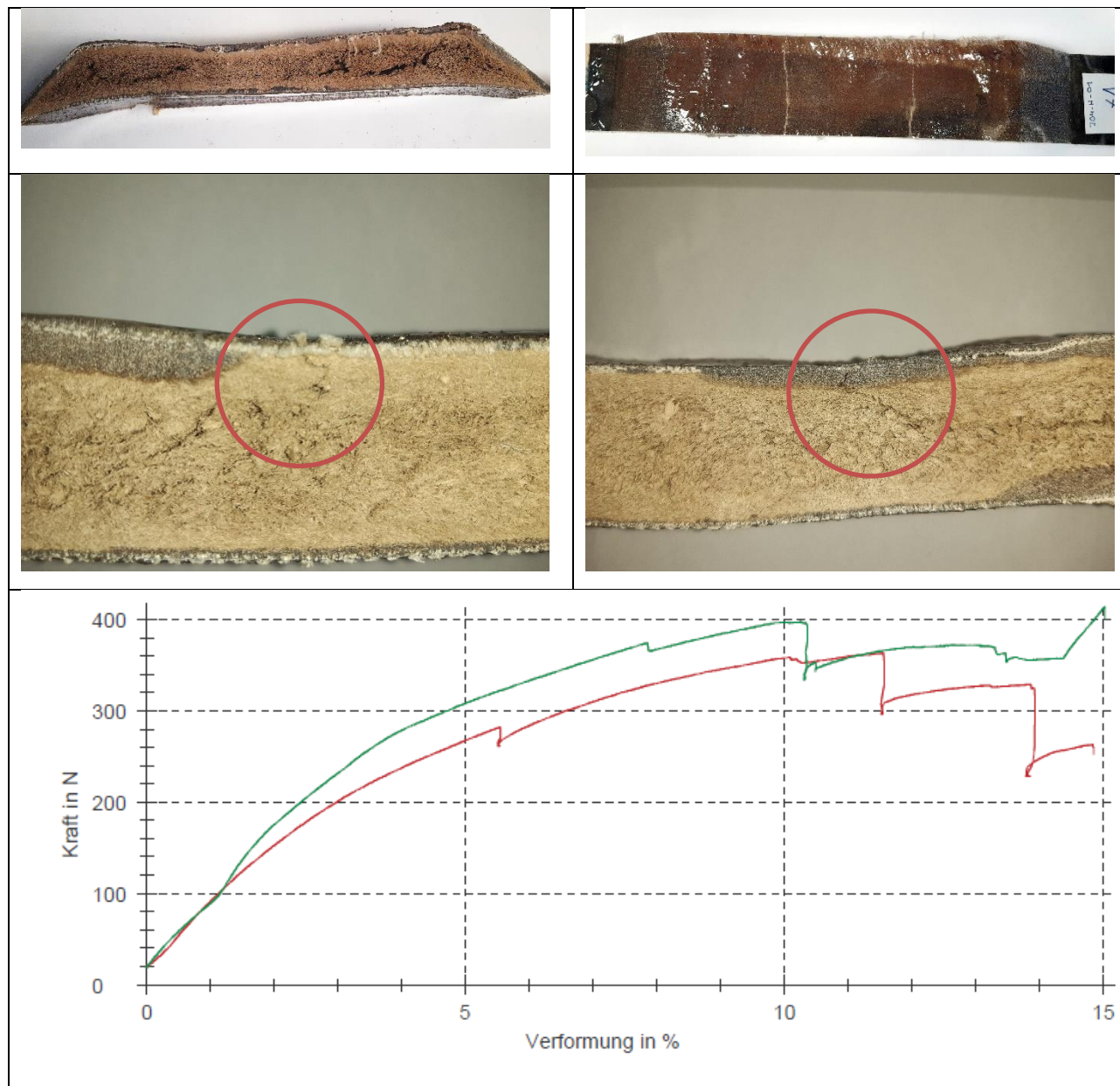


### Arbeitspaket 5: Charakterisierung des Sandwichelements und Bewertung

Ziel des AP 5 ist die mechanische Charakterisierung des imprägnierten geschäumten Abstandsgewebes. Da keine erfolgreiche Imprägnierung umgesetzt werden konnte, bzw. ausreichend große Bereiche zur Probenpräparation vorlagen, wurden ausgewählte Versuche (V1, V2, V6 und V7) per Handlaminieren imprägniert und Prüfkörper für Biege- und Querkzugprüfung versucht zu präparieren. Für die Querkzugprüfung ist dies nicht gelungen, als dass die Flächen der Ober- und Unterseite nicht parallel waren und das Aufkleben der Joche für die Prüfungen nicht möglich war, bzw. es zu Schäden beim Einspannen der Proben mit Joch in die parallele Vorrichtung kam. Daher wurden diese Versuche abgebrochen.

In Tabelle 25 und Tabelle 26 sind die Ergebnisse der 4-Punkt Biegeprüfung für die Versuche 6 und 7 dargestellt. Die gemessenen Kräfte liegen in einem ähnlichen Bereich und auch das Schadbild ist ähnlich: An den Punkten der Druckstempel versagt die Deckschicht auf Druck und es kommt an diesen Stellen zur Rissbildung im Schaum (siehe rote Kreise).

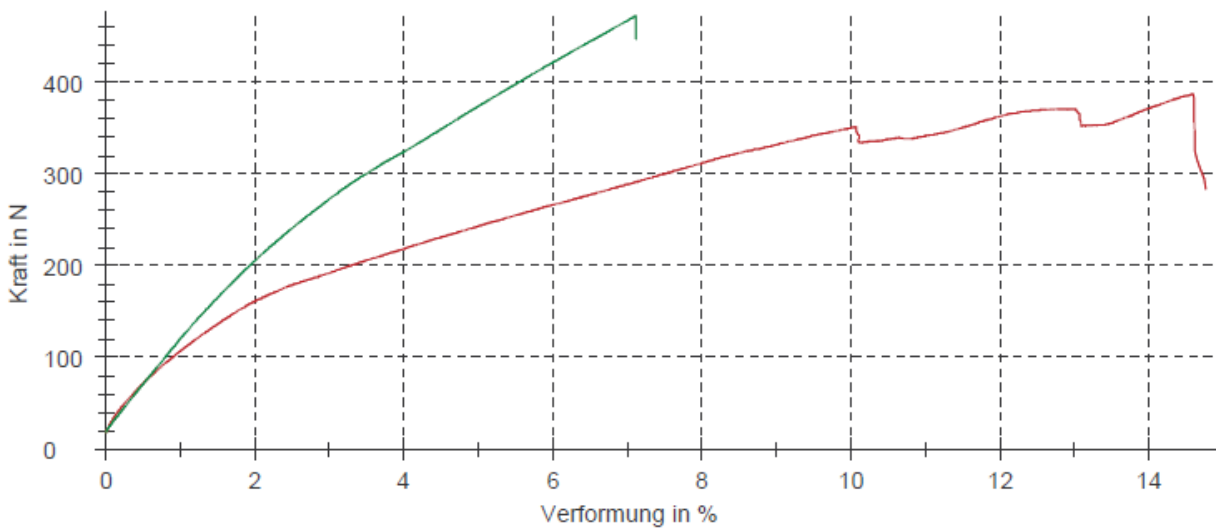
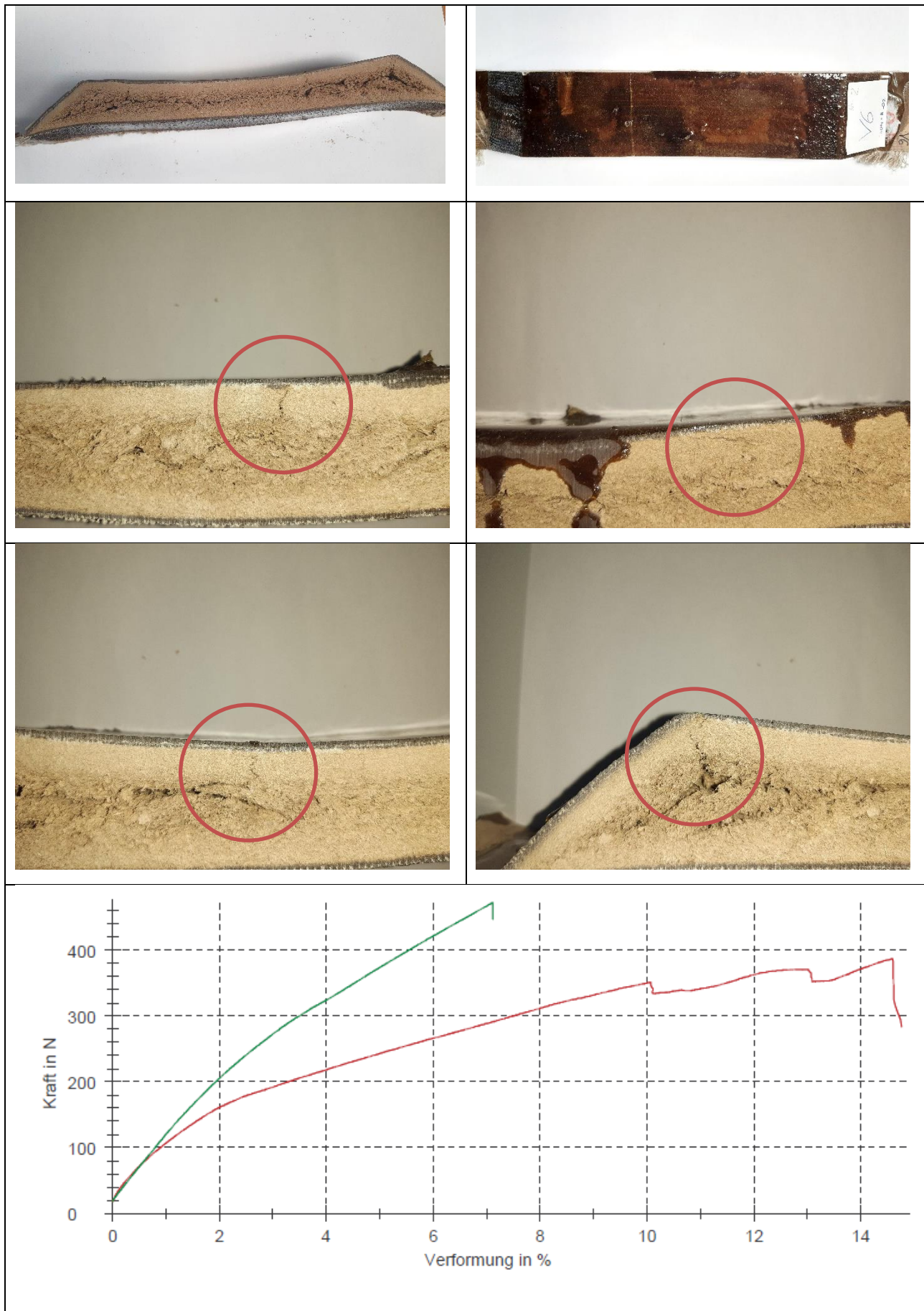
Tabelle 25 Ergebnisse der Biegeversuche an V7



Eigenschaft	$\sigma_{fM}$ [N]	$\epsilon_M$ [%]
Wert	389±36	13±2,5

Es ist zu erkennen, dass die Schäume bereits im Vorfeld sehr heterogen geschäumt, bis Trocknungsrissen aufwiesen, weshalb die Belastbarkeit der Werte in Frage zu stellen ist. Ebenso konnten aufgrund ihrer Größe je Versuch nur 2 Prüfkörper aus der Platte präpariert werden.

Tabelle 26 Ergebnisse der Biegeversuche an V6



Eigenschaft	$\sigma_{fM}$ [N]	$\epsilon_M$ [%]
Wert	430±60,5	11±5,3

Die Verwertung der gesamten Ergebnisse ist Kapitel 2 zu entnehmen bzw. dem Erfolgskontrollbericht.

## 2. Verwertung

### a) Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen

Während der Projektlaufzeit wurden keine Erfindungen und Schutzrechte angemeldet.

### b) Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende

Mit Abschluss der Machbarkeitsstudie konnte für das Materialsystem „Geschäumtes Abstandsgewebe“ mit ersten erfolgreichen Laborversuchen ein TRL von 3 erreicht werden. Die verwendete Werkzeug- (vRTM) und Textiltechnik (Doppelgreiferwebmaschine) entspricht dem Stand der Technik und ist somit einer potenziellen späteren industriellen Umsetzung nicht hinderlich. Die eingesetzten Naturfasern sind ebenfalls verfügbar und könnten ggf. durch synthetische Fasern substituiert werden, falls sie die erfolgreiche Umsetzung des Vorhabens verhindern. Das Verfahren zur Holzschäumenherstellung ist vom WKI patentiert und seit 2023 an ein Unternehmen lizenziert. Eine kommerzielle industrielle Holzschäumenanlage soll in den nächsten zwei Jahren entstehen und Ende 2025 in den Betrieb gehen. Derzeit ist die Pilotanlage aufgebaut und im Probetrieb. Somit sind das Verfahren und der Holzschäumen selbst kurz-, bzw. mittelfristig industriell verfügbar, in einem nächsten Schritt muss nun der Prozess zum Herstellen der Abstandsgewebe weiterentwickelt und etabliert werden (wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit).

### c) Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende

Nach Projektabschluss zeigt sich deutlich, dass die verfahrenstechnischen Aspekte für eine erfolgreiche Umsetzung des Materialsystems „Geschäumtes Abstandsgewebe“ im Vordergrund zukünftiger Forschung stehen. Mit Umsetzung des Meilensteins 1 konnte die Formgebung eines Abstandsgewebes durch die Expansion des Holzschäumens nachgewiesen werden. Auch wenn die Machbarkeit des formgebenden Schäumens mehrfach demonstriert werden konnte, sehen die Autoren der Studie eine fehlende Statistik der Ergebnisse aufgrund offener Fragestellung hinsichtlich des homogen und reproduzierbaren Schäumens als Hindernis einer fachlichen Veröffentlichung. Es ist daher geplant die Ergebnisse der Studie als Pressemitteilung über die Homepage des Fraunhofer WKI zu veröffentlichen. Der zweite Schritt des Verfahrens, die Imprägnierung und Konsolidierung der textilen Decklagen, konnte nur bedingt erfolgreich umgesetzt werden. Eine Veröffentlichung dieser Ergebnisse in einer Fachzeitschrift ist nicht geplant. Jedoch sind technische Fragestellungen aus den Ergebnissen abzuleiten, so dass bei einer Fortführung der Arbeiten, die Ergebnisse dieser Studie Teil einer Veröffentlichung würden. Die angefertigten Demonstratoren werden zukünftig mit einem Projektblatt auf geeigneten Messen Teil des Fraunhofer WKI Messestandes sein.

Im Fokus möglicher direkter Folgeforschung stehen folgende Punkte:

- Automatisierte und massen-/volumengesteuerte Schaumbefüllung: Für eine reproduzierbare Herstellung des Schaumkerns ist es notwendig, dass stets die gleiche Menge Schaum mit demselben zeitlichen Expansionsfortschritt dem Abstandsgewebe zugeführt wird. Dies ist manuell, aufgrund der zügigen Reaktion des Schäumungsmittels nicht umsetzbar. Ziel ist die Zuführung des sich expandierenden Holzschäumens über einen Zwangsmischer in das Abstandsgewebe, das sich in der bereits geschlossenen Kavität befindet, ähnlich einem Spritzgussprozess.
- Trocknung des Schäumens im Werkzeug: Das Vakuum unterstützt die Trocknung des Holzschäumens, jedoch zeigt sich, dass die partielle Abführung der Feuchtigkeit über Kanäle zu Fehlern in der Schaumstruktur führen kann. Dies ist zukünftig in der Werkzeugkonstruktion zu berücksichtigen. Eine Möglichkeit wäre die Verwendung von porösem Material, so dass die Feuchtigkeit über die Gesamtfläche abgeführt werden kann. Ein weiterer Ansatz zur Beschleunigung der Trocknung kann der Einsatz von Mikrowellen sein, die in ein Werkzeug zu integrieren wären.
- Werkzeugkonstruktion: In der Studie wurden Einlegebleche verwendet, um einen Spalt zu erzeugen, durch den später die Matrix geflutet werden kann. Dies hat sich als nicht praktikabel erwiesen, weshalb zukünftig mit z.B. Tauchkanten zu arbeiten ist, um eine flexible Kavitätenstärke zu realisieren. In diesem Zusammenhang ist die Trennbarkeit des Materials aus dem Werkzeug zu berücksichtigen.

Um die Ergebnisse systematisch aufzuarbeiten und die Prozessparameter festzulegen, sind umfangreiche Arbeiten, insbesondere in der Werkzeugkonstruktion und Prozessführung notwendig. Es wird geprüft inwieweit das Förderprogramm „Validierung des technologischen und gesellschaftlichen Innovationspotenzials

wissenschaftlicher Forschung – VIP+“ der geeignete Rahmen ist, um mit einem weiteren Forschungspartner das TRL so weit zu steigern, dass Wirtschaftsunternehmen für eine Umsetzung an konkreten Bauteilen akquiriert werden können. Die direkte industrielle Umsetzung wird ohne weitere Vorarbeiten als nicht erfolgreich angesehen.

#### **d) Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit**

Aus den Ergebnissen lassen sich weitere potenzielle Projektideen ableiten. Einerseits ist statt des Einsatzes von Holzschaum in einem Abstandsgewebe die Verwendung von Pilzmyzel denkbar. Dieses weist ähnlich geringe Dichten auf, es lässt sich jedoch das Problem der Trocknung umgehen.

Eine weitere Idee ist die Verarbeitung des Holzschaums über den Spritzgussprozess in dreidimensionale Bauteile oder zwecks Hinterschäumens. In diesem Zusammenhang gilt es, die Feuchtigkeit schnell, aber ohne Trocknungsfehler, aus dem Werkzeug abzuführen.

Die Erkenntnisse in diesem Vorhaben wurden WKI-intern in Abstimmungsprozesse zu neuen Projektideen eingebunden. Hieraus ergab sich unter anderem eine neue Idee zur Kombination aus bestimmten Gewebekonstruktionen (Abstandsgeweben) und Sekundärrohstoffen aus dem Faserverbundbereich. Ein Anwendungsszenario für die resultierenden Werkstoffkombinationen, für welches Fördermittel im Rahmen der KMUinnovativ-Förderrichtlinie beantragt wurden, ist der Einsatz im Bootsbau.

### **3. Erkenntnisse von Dritten**

Verschiedene wissenschaftliche Arbeiten untersuchen die Kombination aus mit Schaum gefüllten Abstandsgeweben hinsichtlich ihrer Schlagzähigkeit. So untersuchen Wang et al<sup>1</sup> ein mit flexiblem Polyurethanschaum getränktes Gewirk, welches in einem zweistufigen Verfahren mit einem Nylongewebe zu einem stoßenergieabsorbierenden Verbundsandwich kombiniert wird. Ebenfalls die Kombination aus Polyurethanschaum und einem Abstandsgewebe, jedoch mit PVC-Oberflächen untersuchten Sun et al<sup>2</sup>. Allen Arbeiten ist gemein, dass sie vielversprechende Eigenschaften hinsichtlich Schall- und Wärmeverhalten sowie erhöhten Schlageigenschaften aufweisen. Dies ist grundsätzlich vielversprechend hinsichtlich des Potenzials der im vorliegenden Vorhaben zu entwickelnden Verbänden, aufgrund der petrobasierten Materialien sowie die plane Umsetzung in mehreren Schritten, wird jedoch keine Einschränkung für die Durchführung des Vorhabens gesehen.

- Ein von der Förderinitiative Zukunft Bau (FKZ 10.08.18.7-15.52) bereits umgesetztes Vorhaben<sup>3</sup> fokussierte ebenfalls petrobasierte plattenförmige Sandwichaufbauten für Anwendungen im Hochbau.
- Die Fa. PARAT Technology GmbH + Co. KG verwendet das PBF (Particle back Foaming) Verfahren, um tiefgezogene Kunststoffteile mit XPS oder EPS Schäumen zu hinterschäumen. Auf der Agritechnica 2023 so hergestellte und präsentierte Bauteile, können über einen Schmelzefilter sortenrein recyclet werden. Material- und Verfahrensgrundlage sind eine andere, aber die Anwendung ist identisch.

Die identifizierten Erkenntnisse Dritter adressieren teils selbe Anwendungen, basieren jedoch auf anderen Material- und Verfahrensansätzen.

### **4. Veröffentlichungen**

Während der Projektlaufzeit wurden keine Veröffentlichungen geschrieben. Es wurde ein Projektflyer mit den Ergebnissen erstellt, der zur Projektpräsentation bei möglichen Partnern zur Projektförderung genutzt wurde.

---

<sup>1</sup> <https://doi.org/10.1177/1099636219859>

<sup>2</sup> <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.113549>

<sup>3</sup> <https://www.zukunftbau.de/projekte/forschungsfoerderung/1008187-1552>, zuletzt geprüft am 08.05.2023