

C. Wüstner, M. Thomas, M. Vorhof, M. Kern

Entwicklung von integral gewebten Papier-Textil-Sandwichstrukturen für Leichtbaupaneele (Hybrid High Performance Paper Weaves - HyPerWeave)

PTS-Forschungsbericht

Dezember 2024

PTS – Institut für Fasern & Papier gGmbH
Pirnaer Str. 37
01809 Heidenau
www.ptspaper.de

Ansprechpartner:

Dr. Cornell Wüstner
Tel. 03529 551-640
cornell.wuestner@ptspaper.de

Dr.-Ing. Martin Kern
Tel. 0351 463-34693
martin.kern@tu-dresden.de

PTS – Institut für Fasern & Papier gGmbH

Pirnaer Str. 37
01809 Heidenau

Technische Universität Dresden, Institut für Textilmaschinen und Textile Hochleistungswerkstofftechnik (ITM)

Hohe Str. 6
01069 Dresden

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Das Forschungsvorhaben IGF 21856 BR der kooperierenden Forschungseinrichtungen ITM und PTS wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Dafür sei an dieser Stelle herzlich gedankt.

Unser Dank gilt außerdem den im PA beteiligten Firmen der gesamten Prozesskette, Rohstoffe/Spezialchemikalien, Spezialpapierhersteller, Papierverarbeiter, Papier- und Webmaschinen- und Sondermaschinenbauer, Webereien, Leichtbauverbundhersteller sowie Leichtbauanwender, für die Unterstützung der Arbeiten.

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung	4
2	Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung	8
3	Forschungsziel	15
4	Gesamtvorgehen	18
5	Material und Methoden	20
5.1	Materialien zur Papierherstellung und Beschichtung bzw. Imprägnierung	20
5.2	Industriepapiere	25
5.3	Laborblattbildung	27
5.4	Herstellung von Hybridpapieren an der Versuchspapiermaschine	28
5.5	Laserbearbeitung der verschiedenen Materialien	30
5.6	Imprägnierung mit Flammschutzmitteln mittels Leimpresse	32
5.7	Prüfmethoden für Papier/Karton	33
5.8	Textilphysikalische Untersuchungen der Ausgangsmaterialien und der Funktionsmuster	37
6	Präzisierung der Anforderungen - ITM, PTS (vgl. Arbeitspaket 1)	40
6.1	Vorgehen	40
6.2	Ergebnisse	40
7	Struktur- und Bindungsentwicklung - ITM (vgl. Arbeitspaket 2)	42
7.1	Vorgehen	42
7.2	Ergebnisse	43
8	Simulation der Papiereigenschaften und Strukturmechanik – ITM, PTS (vgl. Arbeitspaket 3)	45
8.1	Vorgehen	45
8.2	Ergebnisse	46
9	Entwicklung der Spezial- und Hochleistungspapiere – PTS (vgl. Arbeitspaket 4)	54
9.1	Vorgehen	54
9.2	Ergebnisse	54
10	Papierprozessentwicklung auf der Versuchspapiermaschine – PTS (vgl. Arbeitspaket 5)	64
10.1	Vorgehen	64
10.2	Ergebnisse	66
11	Technologie für konturierte, definiert faltbare Papierbänder – PTS, ITM (vgl. Arbeitspaket 6)	67
11.1	Vorgehen	67
11.2	Ergebnisse	68
12	Entwicklung der Webtechnologie für HyPerWeaves – ITM (vgl. Arbeitspaket 7)	76
12.1	Vorgehen	76
12.2	Ergebnisse	77

13	Entwicklung, Fertigung und Bewertung der Demonstratoren – ITM, PTS (vgl. Arbeitspaket 8)	83
13.1	Vorgehen	83
13.2	Ergebnisse	83
14	Charakterisierung der Materialien, Papiere, HyPerWeaves und Demonstratoren – ITM, PTS (vgl. Arbeitspaket 9)	86
14.1	Vorgehen	86
14.2	Ergebnisse	87
15	Wirtschaftliche Bewertung der Prozesskette, Handlungsanweisung – PTS, ITM (vgl. Arbeitspaket 10)	91
15.1	Vorgehen	91
15.2	Ergebnisse	91
16	Schlussfolgerungen	93
17	Durchführende Forschungsstellen	94
18	Literaturverzeichnis	95

1 Zusammenfassung

Zielstellung Ziel des Projektes HyPerWeave (Hybrid High Performance Paper Weaves) war die gezielte simulationsgestützte Entwicklung eines wirtschaftlichen Herstellungsverfahrens für leistungsfähige und nachhaltige Paneele auf Basis verfügbarer Technologieansätze (Naturfaserverstärkung, Papier-Sandwichbauweise, Abstandsgewebe). Ermöglicht wurde dies, indem die mechanisch vorteilhafte Anordnung räumlich gefalteter Papierflächen mit der webtechnischen realisierten, formschlüssigen Verbindung aller Teilkomponenten. Die Grundlage für diese innovative Produktgruppe sind neue zellstoffbasierte, flammgeschützte Spezialpapiere, die durch eine zielgerichtete Zusammensetzung von Zellstoff und mineralischer Fasern an die unterschiedlichsten Anforderungen (Steifigkeit, Festigkeit, Brandschutz) anpassbar sind, sowie das für die Papierverarbeitung und Herstellung von HyPerWeaves entwickelte Webverfahren, in dem die den Sandwichkern bildenden Papiere aufgefaltet und in die gewebten Deckflächen bindungstechnisch eingebunden werden sollen. Das Projekt leistet einen Beitrag zur Entwicklung neuer Verfahren und Produkte, sowohl für nachhaltige naturfaserbasierte, als auch für hochbelastbare Leichtbau-Paneele.

Überblick wesentlicher Ergebnisse

Papierentwicklung

Die Entwicklung geeigneter Papiere aus Zellstoff, die sich insbesondere als Kernmaterial von HyPerWeaves eignen, fand zunächst am Laborblattbildner an der PTS statt. Dabei wurden umfangreiche Kenntnisse zur Papierzusammensetzung sowie zum Lagenaufbau mehrlagiger, mechanisch stabiler, steifer, gut verarbeitbarer Papiere ermittelt. Schließlich konnte eine Rezeptur für optimierte 3-lagige Papiere entwickelt werden, die sich gut für den Einsatz als Kernmaterial eignen. Des Weiteren wurde ein geeignetes 3-lagiges Industriematerial identifiziert, welches sich hinsichtlich Steifigkeit und Verarbeitbarkeit ebenfalls für die Herstellung von HyPerWeaves eignet.

Für die flammenhemmende Ausrüstung der Zellstoffpapiere wurden verschiedene industriell verfügbare sowie experimentelle Flammenschutzmittel getestet. Insbesondere eine modifizierte Stärke stellte sich als wirkungsvoll heraus und ist zudem ein nachhaltiges, biobasiertes Produkt.

An der Versuchspapiermaschine (VPM) der PTS wurde zudem ein Hybridmaterial aus Basalt- und Zellulosefasern entwickelt, welches das Potential für den zukünftigen Einsatz in HyPerWeaves für höchste Ansprüche insbesondere bezüglich der Flammfestigkeit mit sich bringt.

Papierzuschnitt

Die Herstellung von speziell zugeschnittenen Bändern wurde ausführlich im Rahmen des Projekts untersucht. Nach Erarbeitung einer geeigneten Bändergeometrie mit vorbereiteten Faltstellen wurden die beiden geplanten Verfahren (Zuschnitt über Lasertechnologie und über Rotationsstanzen) evaluiert. Beide Verfahren stellten sich als prinzipiell geeignet heraus. Das Rotationstanzverfahren konnte direkt in den Webprozess integriert werden.

Prozessentwicklung

Die Entwicklung der textilen Prozesskette auf Basis der Webtechnik am ITM der TU Dresden umfasste die Integration eines Rotationsstanz-Aggregats in einen Gewebeherstellungsprozess, die textiltechnologische Entwicklung der Decklagen für die neuartigen Leichtbau-Paneele mittels Lanzettenweben, das Aufstellen der flach gewebten Strukturen innerhalb der Webmaschine mittels Faltenrückzug und den anforderungsgerechten Abzug der aufgestellten Abstandswebstruktur mittels eines Linearabzugs. Hierfür wurden zunächst systematisch Lösungsvarianten entwickelt und diese anschließend anhand der in einer Liste gesammelten Entwicklungsanforderungen bewertet und eine Vorzugslösung ermittelt. Diese Vorzugslösung wurde abschließend an der Webmaschine umgesetzt, technologisch erprobt und für die Herstellung der Gewebemuster und Demonstratoren eingesetzt.

Demonstrator

Im Rahmen des Projekts wurden drei Demonstratoren mit unterschiedlichen Materialkombinationen in den Gewebedecklagen und der Papier-Abstandsstruktur entwickelt. Der erste Demonstrator ist ein Hybridgewebe aus Glas-Filamentgarn mit der Feinheit 2400 tex in den Kett- und Schussystemen der Decklagen und Papierbänder aus Zellstoff in Kettrichtung als Abstandsstruktur (siehe Abbildung 1-1).

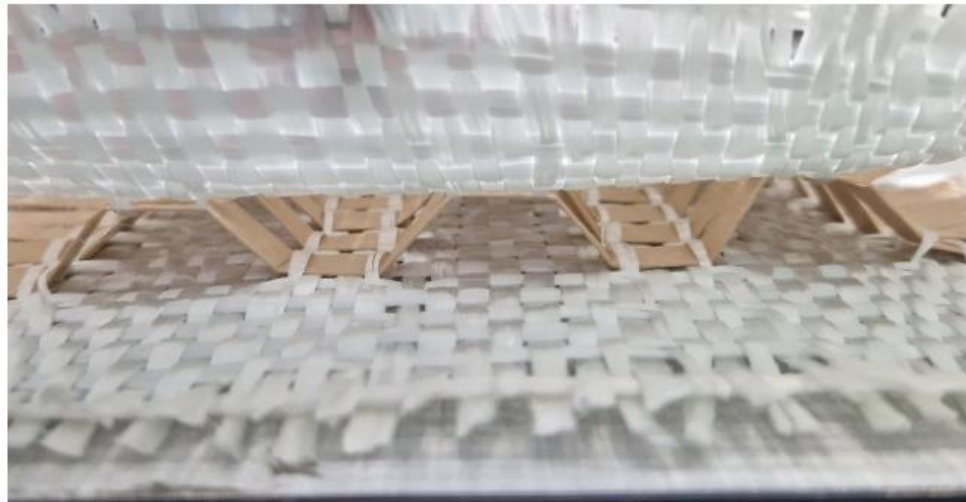


Abb. 1-1: Demonstrator aus GF-Gewebe und Zellstoffpapierbändern

Der zweite Demonstrator ist ein Gewebe ebenfalls mit den Glas-Filamentgarnen in den Decklagen, dieses Mal mit Bändern aus Basalt-Zellstoff-Papier im Abstandssystem (siehe Abbildung 1-2).



Abb. 1-2: Demonstrator aus GF-Gewebe und Papierbändern aus Zellstoff-Basaltfaser-Hybridmaterial

Ein dritter Demonstrator wurde durch Imprägnieren des Demonstrators 1 (vgl. Abbildung 1-1) mit Phenolharz erhalten. Dadurch wurde Matrix eingebracht, welche die finale Bauteilstabilität ermöglicht. Demonstrator 3 ist in Abbildung 1-3 dargestellt.

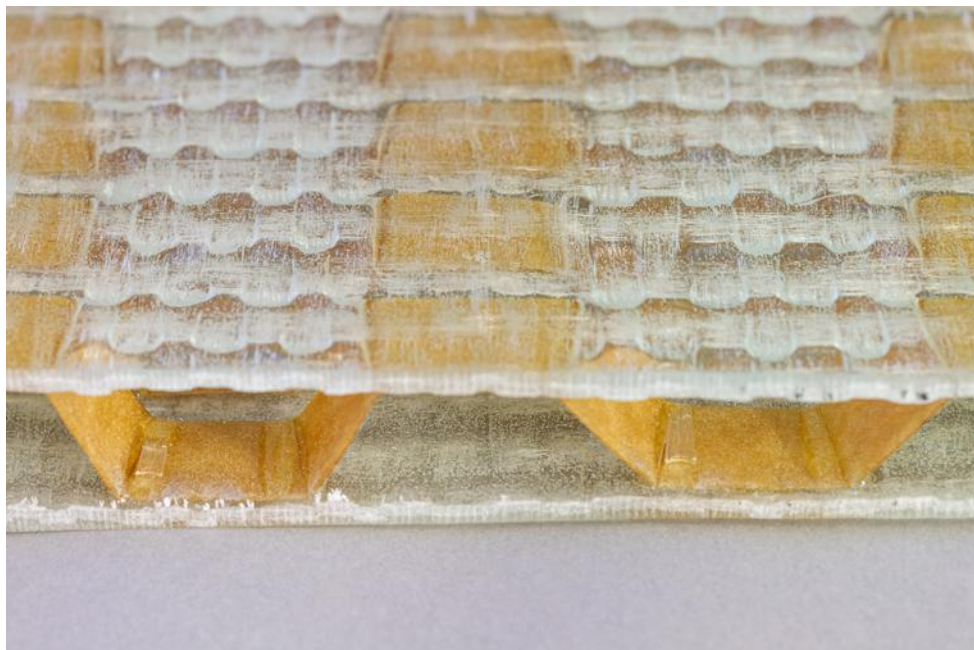


Abb. 1-3: Demonstrator aus GF-Gewebe und Zellstoffpapierbändern, imprägniert durch Phenolharz

Mit Hilfe der Demonstratoren konnten anwendungstechnische Untersuchungen durchgeführt werden, die einen Ausgangspunkt für industrielle Entwicklungen darstellen.

Zusammenfassung

Im Projekt wurde eine Prozesskette zur Bereitstellung innovativer Leichtbaupaneele erfolgreich entwickelt und umgesetzt. Die darin entwickelten Lösungen beinhalten die Entwicklung geeigneter Papiermaterialien, die sich als Kernmaterial der HyPerWeaves eignen. Für zellstoffbasierte Papiere wurden geeignete Flammenschutzmittel entwickelt, geprüft und validiert. Im Zuge dessen erfolgte die Evaluierung der Herstellung von Papierbändern. Zur Herstellung der Strukturen wurde das Lanzetten-Webverfahren entwickelt und mit einer integralen Stanz- und Zufuhrlösung der Papierbänder in den Webprozess kombiniert. Der Technolgieachweis erfolgte anhand aus Glasfasern und Papiermaterialien gefertigter Leichtbaupaneele. Diese Hybridstrukturen können als Ausgangspunkt für eine Industrialisierung des Verfahrens genutzt werden.

2 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung

Einleitung

Im Einklang mit der Klimapolitik der Europäischen Union hat die Bundesregierung für das Jahr 2030 das Ziel formuliert, die CO₂-Emissionen aus den Branchen Energie, Industrie, Gebäude, Verkehr und Landwirtschaft um 55 % gegenüber dem Jahr 1990 zu reduzieren. Dies soll u. a. durch die Förderung erneuerbarer Energiequellen und Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz, aber auch durch die branchenübergreifende Bepreisung von CO₂-Emissionen erfolgen. Maßnahmen dafür sind beispielsweise Emissionszertifikate sowie CO₂-Standards für PKW (95 g/km) [1,2] und für Nutzfahrzeuge, für die im Speziellen der CO₂-Ausstoß nach Plänen der EU ab 2025 um 15 % und ab 2030 um 30 % gegenüber 2019 reduziert werden soll [3]. Erwartungsgemäß wird in der Folge der Anteil alternativer Antriebstechnologien stark zunehmen. Jedoch wird aufgrund technologischer und logistischer Hürden voraussichtlich bis 2035 dennoch nur ein Teil der Fahrzeuge (17 %) vollelektrisch angetrieben und der Großteil als Hybrid ausgeführt und somit weiterhin auf fossile Energieträger angewiesen sein [4]. Die Umsetzung der gesetzlichen und klimapolitischen Forderungen erfordert daher nicht nur die komplexe und herausfordernde Umstellung der Energieversorgung auf alternative Quellen, sondern auch eine nachhaltige Reduzierung des Energiebedarfs beim Betrieb der Technologien sowie bei der Produktherstellung in allen Bereichen unter Anwendung von Leichtbau-Technologie-Strategien in Sektoren wie dem Fahrzeug und Gebäudebau mit der damit verbundenen Einsparung an CO₂-Emissionen. So ermöglichen moderne Leichtbaumaterialien, bspw. wie carbonfaserverstärkter Kunststoff (CFK), der vergleichsweise energieintensiv in der Herstellung ist [5], in Branchen wie der Luftfahrt immense Einsparungen an Treibstoff (pro Jahr 100 Liter Kerosin pro eingespartem Kilogramm) [6] und CO₂-Emissionen (bezogen auf die Herstellung, Nutzung und Verwertung) je nach Bauteil bereits ab 10.000 km [7]. In Branchen wie dem Fahrzeug- und Maschinenbau können ähnliche ökologische Effekte erzielt werden [8]. Die Ersparnis an CO₂-Emissionen bei der Nutzung fällt jedoch aufgrund anderer Randbedingungen niedriger aus [9, 10]. Abgesehen von speziellen Anwendungsfällen, die z. B. höchste Steifigkeit und geringe Wärmeausdehnung erfordern, stehen bei solchen neuen Leichtbautechnologien daher häufig Verstärkungen mit Glas- oder Naturfasern (z. B. Flachs, Hanf und Zellstoff i. A.) im Fokus. Insbesondere Naturfasern werden aufgrund stetiger Fortschritte bei der Faseraufbereitung und Funktionalisierung (geringe Wasseraufnahme, verbesserter Brandschutz) in zunehmendem Maße (jährliche Steigerung 5 %, [11, 12]) bei neuen Leichtbauanwendungen eingesetzt und erreichen allein materialseitig bereits in der Bauteilherstellung eine Einsparung der CO₂-Emissionen gegenüber dem Einsatz von Carbonfasern um bis zu 85 % bzw. gegenüber Glasfasern um bis zu 50 % [13]. Voraussetzung zur Umsetzung dieses Potenzials ist, dass trotz der niedrigeren Fasersteifigkeit und -festigkeit im Bauteil hinreichend gute mechanische Eigenschaften erzielt werden. Das kann für zahlreiche Anwendungen, z. B. Fahrzeugbau, Luftfahrt,

Bauwesen, durch die Sandwichbauweise erreicht werden, bei der zwei zug- und druckstabile Decklagen mit einem Kern niedriger Dichte kombiniert werden. So werden z. B. bei einer Verdopplung der Wandstärke und geringer Massenzunahme von 3 % das Flächenträgheitsmoment im Bauteil deutlich erhöht und die strukturelle Biegesteifigkeit um das 7-fache gesteigert [14]. Glas- und Naturfasern können dadurch mit hohem Leichtbaugrad und deutlich geringeren herstellungsbedingten CO₂-Emissionen im Vergleich zu anderen Leichtbaumaterialien eingesetzt werden. Die wesentlichen Voraussetzungen dafür sind:

- (1) Kern mit hoher Druck- und Schubstabilität sowie niedriger Gesamtmasse,
- (2) Brandschutz im Gesamtverbund,
- (3) hochbelastbare Verbindung zwischen Kern und Decklagen sowie
- (4) wirtschaftliche Fertigung.

Material- und Technologiekombinationen, die dieses Anforderungsprofil ganzheitlich in Materialunion erfüllen können, stehen derzeit noch nicht zur Verfügung. Etablierte Kernmaterialien (z. B. Wabenkerne, Faltkerne) erzielen zwar gute mechanische Eigenschaften [15, 16], sind jedoch teuer und aufwändig in der Herstellung. Alternative Materialien (z. B. Schäume) sind günstig in der Herstellung, verfügen jedoch weder über die hohen spezifischen Druck- und Schubkennwerte noch die erforderlichen Brandschutzeigenschaften [17, 18]. Weiterhin stellt bei allen Sandwichkonstruktionen die Klebverbindung zwischen den Lagen eine Grenzschicht dar, aus der ein schwierig zu beherrschendes Materialverhalten resultiert. Diese neigt insbesondere bei hochdynamischer Belastung (z. B. Impact) und Schubbeanspruchung zu Delaminationseffekten, aufgrund derer die Tragfähigkeit des Sandwichbauteils über dessen Lebensdauer und Nutzung nicht mehr gegeben ist [19]. Die Qualität der Klebverbindung ist nur sehr aufwändig zerstörungsfrei prüfbar (z. B. röntgenspektroskopisch, thermografisch [20]) und der Materialeinsatz in den Deckflächen wird um bis zu 60 % überdimensioniert [21], um kritischen Verformungen und Schäden entgegenzuwirken. Die genannten Aspekte macht es somit den KMU in Sondermaschinenbau, Zuliefer- und Kunststoffindustrie schwer, Sandwichpaneele mit der möglichen hohen Materialeffizienz bei gleichzeitig hohem ökologisch/wirtschaftlichen Nutzen anzubieten.

Alternative Materialien, wie textile Abstandsstrukturen, können ebenso mit einem sandwichähnlichen Aufbau hergestellt werden. Sie verfügen aufgrund der formschlüssigen, faserbasierten Verbindung der Lagen über herausragende Delaminationsbeständigkeiten [22]. Allerdings fehlt ihnen eine Kernstruktur aus räumlich schubstabilisierenden Flächen, Streifen und Bändern (analog zu den genannten Waben- und Faltkernmöglichkeiten), für die derzeit weder ökologisch und wirtschaftlich aussichtsreiche Materialien noch kommerzielle textile Verarbeitungsverfahren verfügbar sind. Ziel des Projektes „HyPerWeave“ (Hybrid High Performance Paper Weaves) ist die Überwindung dieses Zustands über eine gezielte Entwicklung eines wirtschaftlichen Herstellungsverfahrens für leistungsfähige und nachhaltige Leichtbaupaneelmaterialien auf Basis verfügbarer Technologiesystemansätze, die sich durch Naturfaserverstärkung,

Papier-Sandwichbauweise und Abstandsgewebe auszeichnen. Ermöglicht wird dies, indem die mechanisch vorteilhafte Anordnung räumlich gefalteter Papierflächen mit der textiltechnologischen durchgängig faserverstärkten formschlüssigen Verbindung aller Teilkomponenten kombiniert wird (siehe Abbildung 3-4). Die Grundlage für diese innovative Produktgruppe sind neue zellstoffbasierte gem. DIN4102–B1 schwer entflammare flammgeschützte Spezialpapiere, die durch eine zielgerichtete Zusammensetzung von Zellstoff- und Glasfasern an unterschiedliche Anforderungen hinsichtlich Steifigkeit, Festigkeit und Brandschutz anpassbar sind, sowie ein neues Webverfahren in dem die den Sandwichkern bildenden Papiere aufgefaltet und in die gewebten Deckflächen bindungstechnisch eingebunden werden. Die abzuleitende Prozesskette soll auf etablierten hochproduktiven Verarbeitungstechnologien, der Papierherstellung sowie der Webtechnik und Anwendung leistungsfähiger Materialien zur Strukturfixierung und -konsolidierung wie Stärke, Thermoplast oder Phenolharz basieren. Die Projektziele sind deshalb von Relevanz für die von KMU geprägten Branchen der Papier-, Textil- sowie Kunststoffindustrie sowie von hohem volkswirtschaftlichem und gesellschaftlichem Nutzen. Das Projekt leistet damit einen Beitrag zur Entwicklung neuer Verfahren und Produkte für naturfaserbasierte hochbelastbare Leichtbau-Paneele.

Sandwichverbunde

Schalenförmige Bauteile und Leichtbaupaneele werden sehr häufig in Sandwichbauweise sowohl auf Basis von Faser-Kunststoff-Verbunden (FKV), als auch aus zahlreichen anderen Werkstoffen, z. B. Metallen, Schäumen oder Papieren hergestellt. Die Bauteilsteifigkeit und -festigkeit kann dadurch auf ein Vielfaches der mechanischen Kennwerte der Decklagen selbst gesteigert werden. Kombiniert mit einem Kern niedriger Dichte und hoher Schub- und Druckfestigkeit kann dadurch ein fortschrittliches Leichtbaupotenzial erschlossen werden. Neben Schäumen und Vliesstoffen werden vor allem Waben- und Faltstrukturen als Kern im Sandwich genutzt [14-16]. Aufgrund der Anordnung der Wabenteilflächen und der mehrfachen Faltung werden Druck- und Schublasten mechanisch vorteilhaft in Form von komplexen Beulverformungen abgeleitet. Hierfür sind insbesondere Papiere mit ihrer hohen spezifischen In-Plane-Schubsteifig- und Beulbeständigkeiten als Kernmaterial geeignet und werden auf Basis unterschiedlicher Faserstoffe und Materialien in verschiedenen Branchen wie dem Verpackungsbereich, im Möbelbau [32], bei Dämmmaterialien [33], im Fahrzeugbau [34] sowie dem Bausektor [35, 36] eingesetzt. Beispiele dafür sind u. a. Wabenplatten aus gewellten Papierkernen und einer Papierdecklage [37]), holz-, zellstoff- und kartonbasierte Platten mit einer Kernlage aus Honigwaben [38-40] sowie Faltkernstrukturen [41-44].

Problematisch in der Auslegung und Anwendung ist bei allen Sandwichpaneelen jedoch die klebtechnische Verbindung zwischen Kern- und Decklagen, die strukturell durch kleine Flächen gekennzeichnet ist und welche die entsprechenden Bauteile gegenüber kritischen kurzzeitigen Schub- und Schälbeanspruchung bei dynamischen Lastfällen wie Impact anfällig macht. Paneeltypisch sind daher Versagensarten, wie Deckschichtknittern, Schubeinfallzonen oder Delamination, aufgrund derer die Tragfähigkeit des Sandwichverbundes dramatisch und häufig bis zum Versagen des kompletten Bauteils reduziert wird. Da Sandwichverbundbauteile nur in kritischen Bereichen (z. B. Luftfahrt) engmaschig zerstörungsfrei geprüft werden können, werden sie um 60 % und mehr der Nennt Tragfähigkeit überdimensioniert und kritische Verformungen durch eine deutlich überhöhte Steifigkeit der Decklagen abgefangen sowie besonders feinzellige, aber teure Wabenkerne zur Vergrößerung der Klebfläche eingesetzt. Technologien, mit denen diese Defizite durch eine formschlüssige Verbindung der Komponenten vermieden werden, konnten hingegen im Rahmen einer umfassenden Literatur- und Patentrecherche nicht ermittelt werden.

Flammschutz- ausrüstung

Die Einstellung anforderungsgerechter Flammschutzeigenschaften in Papieren ist Voraussetzung für eine Vielzahl an Anwendungen (z. B. Innenausbau, Transport, Mobilität) und erfordert die Zugabe bestimmter Flammschutzmittel (z. B. anorganische Salze wie Ammoniumphosphat, Ammoniumpolyphosphat, Aluminiumtrihydroxid (ATH) oder Borverbindungen) zur Reduzierung der Brennbarkeit. Da die Flammschutzmittel in der Praxis in der Regel aus wässrigen Lösungen bzw. Dispersionen durch Imprägnierung (Tauchen), Aufsprühen oder Beschichten appliziert werden müssen, ist ein zusätzlicher Bearbeitungsschritt notwendig, der die Herstellungskosten erhöht. Die eingesetzten Stoffe können zudem aus der Beschichtung durch Migration entweichen. Diese wirtschaftlichen und technologischen Nachteile für die Papierherstellung könnten minimiert werden, wenn die Flammschutzmittel direkt als Füllstoffe in das Papier eingebracht werden. Allerdings werden dabei größere Anteile des Flammschutzmittels benötigt, was die mechanischen Papiereigenschaften (Festigkeit, Biegesteifigkeit) und das Gewicht negativ beeinflussen [45]. Es besteht daher großer Forschungsbedarf für einen Flammschutz für Papiere, der eine anforderungsgerechte Einstellung der Brandschutzeigenschaften (bis DIN 4102-B1, schwer entflammbar) ermöglicht und der die mechanischen Kennwerte der Papiere nicht negativ beeinflusst. Weitere Flammschutzmittel, z. B. in Form von Feststoffen auf Phosphor-Stickstoff-Basis, werden als Beschichtungsmittel eingesetzt und erscheinen in Hinblick auf eine anforderungsgerechte Einstellung der Papiereigenschaften als Erfolg versprechend. Lösungsansätze, diese direkt als Füllstoff in Papiere zu integrieren, konnten im Zuge einer intensiven Recherche in Forschung, Entwicklung und Anwendung nicht ermittelt werden. Insbesondere für die Einstellung einer homogenen Durchmischung ist eine grundlegende Papier- und Prozessentwicklung hinsichtlich Materialzusammenstellung, Aufschluss und Mischung, Blattbildung und nicht zuletzt der Prozessführung in der Papiermaschine notwendig.

Papierbearbeitung

Im Ergebnis der Herstellung auf modernen Papiermaschinen sind Papiere generell nur als Rollenware verfügbar. Für weitere anwendungs- und produktspezifische Bearbeitungsschritte stehen verschiedene Technologien zur Verfügung, wie z. B. Kreismesser und Stanzen (mechanisch) bzw. Wasserstrahl- und Laserzuzchnitt (abtragend). Speziell beim Rotationsstanzen kann eine hohe Einstellgenauigkeit und Reproduzierbarkeit im Zuschnitt sowie dem Rillen der Faltstellen erzielt werden. Dieses Verfahren ist vor allem für große Produktionsmengen geeignet [46]. Demgegenüber ermöglicht die Lasertechnik eine höchst flexible Papierbearbeitung, z. B. mittels Laserstanzen, -gravieren und -perforieren, ohne dass das Papier mechanisch beansprucht wird [47, 48]. Weiterhin können - analog zum Rillen - Faltstellen lasertechnisch durch einen oberflächigen Materialabtrag prinzipiell vorbereitet werden, was jedoch auch die Restfestigkeit entlang der Faltlinie beeinträchtigt. Zum Zeitpunkt der Projektbeantragung wurde anhand des vorhandenen Know-hows eingeschätzt, dass weder die mechanische noch die laserbasierte Papierbearbeitung die erforderliche Bandbreite der geplanten HyPerWeave-Produkte (siehe Tabelle 3-1) mit dominant zellstoffbasierten sowie hochgradig mineralfaserbasierten Papieren prozesstechnisch abbilden kann. Deshalb sind FuE-Leistungen zur Ermittlung der verfahrensspezifischen Verarbeitungsregime notwendig. Großer konstruktiv-technologischer Forschungsbedarf besteht insbesondere für die Einbindung des Rotationstanzens in die HyPerWeave-Prozesskette, bspw. in Form einer steuerungs- und reglungstechnisch in die Webmaschine integrierten Vorrichtung. Weiterhin ist die Entwicklung eines anforderungsgerechten laserbasierten Bearbeitungsverfahrens zur späteren webprozesstechnischen Faltbarkeit der Papiere bei höchstmöglicher verbleibender Schub- und Zugfestigkeit erforderlich.

Textile Strukturen für Leichtbaupaneele

Der grundlegende Aufbau von Sandwichstrukturen mit Deck- und Kernlagen ist grundsätzlich mit allen textilen Flächenbildungsverfahren (Weben, Kettenwirken, Stricken) darstellbar. Die Decklagen werden textiltechnisch hergestellt und simultan durch ein Abstandfadensystem (Polfäden) miteinander verbunden [49]. Dieses übernimmt die Funktionen des Sandwichkernes, überträgt in begrenztem Umfang Druck- und Schublasten zwischen den Decklagen und ermöglicht eine gewisse Stabilität der daraus hergestellten, konsolidierten Paneele. Die textile „Kernlage“ ist bindungstechnisch, d. h. formschlüssig und faserbasiert, in die Deckflächen eingebunden. Kritische Kleb- oder schweißtechnische Fügebereiche entfallen. Kettengewirkte und gestrickte Abstandsstrukturen sind für eine Vielzahl an Anwendungen, z. B. Polsterung Autositze, kommerziell verfügbar. Kettengewirkte Abstandsstrukturen für den Leichtbau sind als Gitter-Abstandsgewirke (SITGRID®) für den Betonleichtbau erhältlich und gehen auf Entwicklungen am ITA [50, 51] zurück. Weiterhin können unter der Produktbezeichnung „HyperComp“ Abstandsgewirke für den Faserverbundleichtbau bezogen werden, die thermisch verformbar sind und nachträglich mit einem Schaumstoff gefüllt sowie in den Deckflächen mit zusätzlichen Glasfaserkunststoff-Lagen versehen werden [52]. Die Entwicklung der HyperComp beruht auf Forschungsergebnissen des STFI zur Entwicklung schaumgefüllter Abstandsgewirke (PaFaTherm II) [53, 54]. Weitere Forschungen erfolgten u. a. bei der CETEX (Abstandsgewirke mit variablem Abstand zwischen den Deckflächen [55]), dem ITM (gekrümmte doppelwandige Abstandsstrukturen [56]), dem TITV (Schnittschutz [57]) sowie in Kooperation von ITM, ITA und IKA (gewirkte und gestrickte Abstandsstrukturen für

Kopfaufpralldämpfungssysteme, IGF 314ZBG, IGF 17379BR [58]). Während mit industriell etablierten Strick- und Wirktechnologien senkrechte Polfäden in die Abstandsstrukturen integriert werden können, sind schräg angeordnete Polfäden nur in einer Vorzugsrichtung möglich, woraus für die hier genannten textilen Technologien eine richtungsabhängige, limitierte Schubstabilität resultiert. Diese Technologien sind somit nicht für die Herstellung der angestrebten Schubstabilen HyPerWeaves geeignet.

In konventionellen gewebten Abstandsstrukturen können senkrechte, in Dickenrichtung orthogonal verlaufende Polfäden oder in Längsrichtung (Kettrichtung) schräg verlaufende Polfäden integriert werden. Eine lastpfadgerechte Schubstabilität im späteren Paneel ist daher hier nur in der Kettrichtung realisierbar. Kommerzielle Beispiele für Paneele auf Basis von Abstandsgeweben mit Polfäden sind Produkte der Anbieter Parabeam [59] und Abet Laminati [60], die als textile Strukturen bezogen und über die Zugabe duroplastischer Harze (Phenol, Epoxid) zu FKV-Paneelen verarbeitet werden. Gegenstand der Forschung sind am DITF Abstandsgewebe mit unterschiedlichen Dicken (IGF 17409N) [61], textile Leichtbauelemente für Bauanwendungen (3dTEX) [62, 63] sowie Körperschutzsysteme in Kombination mit einer Schaumfüllung [64]. Weitere Technologien zur Ausprägung textilverstärkter Leichtbaupaneele sind sogenannte Spacer fabrics, die am ITM innerhalb des SFB 639 auf Basis der Web- und Stricktechnik entwickelt wurden (siehe Eigene Vorarbeiten) [65, 66]. Dabei verlaufen die gewebten Stege ausschließlich quer zur Verarbeitungsrichtung, wodurch die Paneele längs eine unzureichende Schubstabilität aufweisen.

Die genannten textilen Verfahren bieten gegenüber konventionellen Sandwichverbundstrukturen deutliche Vorteile (integrale Fertigung, formschlüssige Lagenverbindung und hohe Delaminationsresistenz). Schub- und Biegebeanspruchungen auf die daraus gefertigten Paneele führen jedoch zwangsläufig immer zu Biege-Deformationen der Polfäden, die aufgrund ihrer Limitierung hinsichtlich der Materialeigenschaften (E-Modul) und Querschnitt (Flächenträgheitsmoment) nur begrenzt zur strukturellen Stabilität der Paneele beitragen können, insbesondere bei steigendem Deckflächenabstand. Selbst bei Verwendung vergleichsweise zugsteifer Glasfasern (z. B. Parabeam) sind Polhöhen nur bis ca. 10 mm technisch sinnvoll einsetzbar. Lösungen für gewebte Abstandsstrukturen, die über hochgradig schubstabile Flächenelemente als Kernlage verfügen, sind nicht bekannt und ihre Entwicklung ist von einem hohen Forschungsbedarf gekennzeichnet. Es sind Paneelkerne erforderlich, mit denen eine sehr gute Verbindung zwischen dem Kern und den Decklagen mit der vorteilhaften Anordnung schub- und druckstabiler Flächenelemente, wie Waben- und Faltkerne mit einem komplexem und mechanisch vorteilhaftem Beulverformungsverhalten, kombiniert werden können. Hierzu bedarf es dringend der Forschung zu neuen Papiermaterialien, die über einen maximalen Anteil an Naturfasern verfügen, gleichzeitig den hohen Anforderungen im Brandschutz genügen und hohe gewichtsbezogene Steifigkeit und Festigkeit erzielen, die mit einem effizienten textiltechnischen Verfahren zu hochgradig delaminationsresistenten Abstandsstrukturen für Paneele verarbeitet werden können.

Vorarbeiten der PTS

Bei der PTS lagen Erkenntnisse zur Entwicklung von Papieren für flammgeschützte Leichtbauverbunde (Mineralisch hochgefüllte Papiere in IGF 16613N, Aramid- und Carbonfasern in IGF 18256BG [67]) sowie der Flammenschutzbeschichtung von Papieren (IGF 17502N [68]) vor. Gegenüber diesen Vorarbeiten hob sich die beabsichtigte Entwicklung zellstoffbasierter Papiere (neue Materialbasis) mit flammschließendem Füllstoff (statt aufwendiger und wenig effizienter Beschichtung) deutlich ab. Weiterhin wurden erste Erkenntnisse im Bereich der laserbasierten Bearbeitung von Papieren generiert, z. B. für die schadigungsminimierte Bearbeitung von Verpackungen (IGF 18421N [69]), die grundlegende Umsetzbarkeit einer sogenannten „Laser-Rillung“ zur Faltstellenvorbereitung (IGF 19315BG [70]) und dem laserbasierten Aufschmelzen von Papier (IGF 20487BR [71]). Die Übertragung dieser Ergebnisse auf die neu zu entwickelnden Papiere war auf Grund der signifikant zu ändernden Materialzusammensetzung nicht ohne zusätzlichen Forschungsaufwand möglich. Zudem musste gewährleistet werden, dass die Papiere strukturoptimal in die Textilstruktur gefaltet werden können und gleichzeitig die mechanischen Kerneigenschaften erhalten bleiben.

Die PTS hat zudem Erfahrung bei der Simulation des Kriechverhaltens von papierbasierten Verpackungen [76] sowie zur Modellierung des Umformverhaltes gerillter Kartonagen [77]. Für die Einstellung der erforderlichen Papierfestigkeit, für die Prozesseinstellung in der Bearbeitung und für die Auffaltung im Webprozess waren auf Basis des vorhandenen Know-hows neue Modelle für die Beschreibung des Materialverhaltens zu entwickeln.

Vorarbeiten des ITM

Basis für die Projektbearbeitung am ITM waren die grundlegenden Entwicklungen im SFB 639 „Spacer fabrics“ (Kammerstrukturen mit gewebten Verbindungsteilen) und dem Grundlagenprojekt ECEMP (SAB1392/225, offene 3D-Drahtstrukturen) [72 - 74]. Im BMBF-Projekt „3DProCar“ (FKZ 02P14Z020) wurden diese Techniken zur Realisierung von schalenförmigen Leichtbaustrukturen mit integrierten Versteifungsrippen weiterentwickelt [75]. Im Rahmen des Projektes IGF 20245BR erfolgte die Entwicklung von integral gewebten Fachwerkleichtbaupaneelen auf Basis von Hybridgarnen (Glasfaser/Polypropylen). Die Integration einer gefalteten Kernstruktur in ein Abstandsgewebe wurde im Vorfeld in Forschungstätigkeiten theoretisch analysiert und als äußerst vielversprechend bewertet, erforderte jedoch in der Umsetzung weitreichende technologische Entwicklungsarbeiten.

Es lagen beim ITM Strukturmodelle für verschiedene textile Halbzeuge aus Fäden (v. a. Gewebe) [78 - 80] sowie deren Anwendung in Simulationen zur Vorhersage der Verbundeigenschaften in Abhängigkeit von der Geometrie der Verstärkungsstruktur [81, 82] vor. Für die reine Anwendung im geplanten Forschungsvorhaben waren die vorliegenden Ergebnisse, Modelle und Methoden kaum geeignet. Sie boten jedoch vielversprechende Ansätze zur simulationsgestützten Entwicklung der neuen Papier-Textil-Verbunde. In Summe sollte mit dem beantragten Projekt gegenüber dem Stand der Technik und Forschung ein deutlicher technologischer Fortschritt (Papierentwicklung, Textilverfahrensentwicklung, Produktinnovation) erzielt werden, wobei das hohe Innovationspotenzial nicht zuletzt auch daran festgemacht werden kann, dass die TU Dresden im Vorfeld der Projektbeantragung den webtechnischen Ansatz zur Umsetzung der HyPerWeaves zum Patent angemeldet hatte.

Forschungsbedarf

Anhand des ermittelten Standes der Forschung und Entwicklung und einer umfassenden Patentrecherche wurde deutlich, dass verschiedenste Ansätze zur Umsetzung von Leichtbaupaneelen zur Verfügung standen. Es fehlten jedoch Konzepte für breit nutzbare nachhaltige Materialien und Technologien bzw. Strukturen für Paneele mit formschlüssiger Verbindung der Strukturelemente und einer hohen Ausnutzung der materialspezifischen Eigenschaften in den Leichtbaupaneelen. Die Aufwendungen für Materialbereitstellung und Verarbeitung sind entweder zu hoch (Wabenkerne, Spacer fabrics), technologisch limitiert (Schweiß-/Klebeverbindung) oder strukturell nur für bestimmte Paneeldicken (Abstandstextilien) geeignet. Der Einsatz von nachhaltigen Materialien, insbesondere von Spezialpapieren, ist auf Grund bisher ungenügender Eigenschaftsprofile und insbesondere der unzureichenden Brandschutzeigenschaften nur sehr begrenzt möglich. Es fehlten kostengünstige, flexible Technologien zur Realisierung anforderungsgerechter, räumlich schub- und druckstabiler sowie brandschutzgerechter Leichtbaupaneelstrukturen mit signifikant gesteigerter Delaminationsresistenz auf Basis nachhaltiger und kostengünstiger Materialien.

3 Forschungsziel**Forschungsziel und Arbeitshypothesen**

Ziel des interdisziplinären Kooperationsprojektes der Forschungseinrichtungen Papiertechnische Stiftung (PTS) und Institut für Textilmaschinen und Textile Hochleistungswerkstofftechnik (ITM) war die simulationsgestützte Entwicklung eines innovativen hybriden Papier-Textil-Sandwichmaterials (Hybrid High Performance Paper Weaves - HyPerWeaves) für Leichtbaupaneele auf Basis räumlich aufgefalteter, brandfester Papierbänder, die prozessintegriert und formschlüssig zwischen zwei gewebte Decklagen eingebracht werden (siehe Abb. 3-1). Die Gestaltung der räumlichen Faltung der Papiere führt zu einer hohen strukturellen Schub- und Biegestabilität der Paneele. Von der PTS sollte ein neues Verfahren entwickelt werden, um Papiere mit inhärenten Flamm- schutzeigenschaften (bis DIN 4102 B1) zu versehen, wodurch separate Ausrüstungs- und Beschichtungsprozesse entfallen.



Abb. 3-1: Schematische Darstellung der Verfahrensschritte und geplanten Entwicklungen

Mit dem Einsatz hochwirksamer fester Flammenschutzmittel geringer Dichte auf Phosphor-Stickstoff-Basis als Papierfüllstoff sollten Brandschutzeigenschaften erzielt werden, die im Vergleich zu konventionellen Flammenschutzbeschichtungen deutlich beständiger sind und selbst bei Beschädigung der Papieroberfläche nicht geschwächt werden. Das Verfahren sollte anhand eines Spezialpapiers (FM1) auf Basis nachwachsender Rohstoffe (Zellstoff) und eines Hochleistungspapiers (FM2) auf Basis mineralischer Fasern (Glas) umgesetzt werden.

Seitens des ITM sollte ein neues Webverfahren entwickelt werden, mit dem die neuen Papiere räumlich aufgefalt und formschlüssig über Kett- und Schussabbindung eingebunden werden können, sodass die Deckflächen und der faserbasierte Kern formschlüssig miteinander gekoppelt sind. Die aus diesen neuen HyPerWeaves gefertigten Paneele sollten gegenüber konventionellen Waben- und Schaumkernbauweisen über deutlich verbesserte Delaminations- und hohe Schadensresistenz verfügen. Die Prozesskette zur Paneelherstellung sollte so deutlich verkürzt werden (Papier-Gewebe-Beschichtung/Konsolidierung), wobei Prozessschritte zur nachträglichen Flamm- schutzausrüstung und Verklebung mit den Decklagen entfallen. Gemeinsam mit dem PA, der entlang der gesamten Prozesskette aus Unternehmen der Papier-, Textil- und Verbundwerkstofftechnik sowie Endanwendern zusammengesetzt ist, sollten alle erforderlichen Kriterien und Vorgaben für die angestrebte Produkt- und Prozessentwicklung präzisiert und ein detailliertes Anforderungsprofil erstellt werden. Teilziel war weiterhin eine grundlegende geometrische Strukturentwicklung für die Ausführung der Papierfaltung im Hinblick auf relevante mechanische Lastszenarien (z. B. Druck, Schub, Biegung) sowie Simulationen auf Basis der Finite-Elemente-Methode (FEM) zu deren Bewertung. Vielversprechende Bindungsvarianten von Kern und Decklagen sollten zielgerichtet identifiziert werden. Für die Papierentwicklung sollten verschiedene Faserstoffe (u. a. Zellstoff, Glas), Additive (u. a. Nassfest-, Binde-, Retentionsmittel) und Flammenschutzmittel (feste, organische Stoffe auf P-N-Basis) im Rahmen einer systematischen Versuchsplanung im Labormaßstab kombiniert, papiertechnologisch analysiert und bewertet werden. Das Ergebnis sind die Funktionsmuster FM1 und FM2 (siehe Tabelle 3-1), die sich in ihrer Zusammensetzung stark unterscheiden und die die Produktvariabilität

der neuen Papiere demonstrieren. Weiterhin sollten simulationsgestützte, gezielte Untersuchungen zur lasertechnischen und mechanischen Papierbearbeitung (Schneiden und Rillen) durchgeführt werden, sodass diese unabhängig von ihrer Zusammensetzung prozesseffizient zugeschnitten und für die webtechnische Verarbeitung vorbereitet werden. Für den Webprozess sollte eine neue Materialzuführung, Fachbildung (Litzenstaffelung, Trittellierung) und Warenführung (Lanzetten, Stützelemente) entwickelt und konstruktiv-technologisch umgesetzt werden. Mit den neuen Spezial- und Hochleistungspapieren waren damit die Funktionsmuster FM3 und FM4 realisiert.

Tab. 3-1: Zielstellungen für geplante Funktionsmuster und Demonstratoren

	Zielstellung	Entwicklungen	
		Papier	Gewebe
FM1	Zellstoffbasiertes Spezialpapier	x	
FM2	Glasfaserbasiertes Hochleistungspapier	x	
FM3	HyPerWeave: Kern aus FM1 und Deckfläche aus Papier FM1		x
FM4	HyPerWeave: Kern aus FM2 und Deckfläche aus Glasfasern		x
DEMO1	Paneel f. den Möbelbau/Messebau, Kern aus FM1, Decklagen: Papierstreifen FM1	Fixierung mit Stärke	
DEMO2	Hochleistungs-Leichtbaupaneel Kern aus FM2 Decklagen: Glasfilamentgarn	Konsolidierung mit Phenolharz	

Weiterhin sollten verschiedene Konzepte zur Konsolidierung erarbeitet und exemplarisch in der Entwicklung von zwei mit dem PA abzustimmender Demonstratoren erprobt werden (z. B. für Möbel- und Messebau sowie für den Transportsektor). Für den Transfer wurden alle Zwischenergebnisse dokumentiert und die Methodik in einen systematischen Workflow und in KMU-gerechte Fertigungsrichtlinien überführt. Im Abgleich mit den in

Tab. 3-1 aufgeführten Teilzielen sowie im Vergleich mit Referenz-Paneelen erfolgte eine detaillierte technologisch-wirtschaftliche Bewertung der neuen simulationsgestützten Prozesskette.

Tab. 3-1: Quantifizierbare Teilziele (im Vergleich zu Schaum- und Wabenkernbauweisen)

	Aspekt	FM1 (zellstoffbasiert)	FM2 (mineralfaserbasiert)
Spezialpapier + Hochleistungspapier	Brand-schutz/Flamm-schutz	DIN 4102 B2	DIN 4102 B1
	Flächenmasse	250 g/m ²	350 g/m ²
	Breitenbezogene Bruchkraft	20 kN/m	25 kN/m
	E-Modul	2 GPa	3 GPa

	Biegesteifigkeit L&W 5°	30 mNm	35 mNm
--	----------------------------	--------	--------

Tab. 3-2 (Fortsetzung): Quantifizierbare Teilziele (im Vergleich zu Schaum- und Wabenkernbauweisen)

		FM3 (zell- stoffbasiert)	FM4 (mineralfaserba- siert)
Paneele aus HyPerWeave	Schubfestigkeit (Verbund)	≥ 0,8 N/mm ²	≥ 3,0 N/mm ²
	Druckfestigkeit (Verbund)	≥ 1,0 N/mm ²	≥ 2,5 N/mm ²
	Beschichtung/Im- prägnierung	20 % Stärke-Beschichtung	50 % Harz
	Flächengewicht Verbund max.	1.400 g/m ²	2.500 g/m ²
	Brandschutz/ Flammschutz	DIN 4102 B2	DIN 4102 B1

Organisation

In „HyPerWeave“ fungierte die PTS als Koordinator und übernahm die Verantwortung für das Projektmanagement. Die Projektkoordination wurde von Dr. Cornell Wüstner übernommen. Der Projektkoordinator war für den Informationsfluss und die Koordination aller anfallenden Projektaktivitäten verantwortlich, wodurch eine rege und effektive Kommunikation der Partner gefördert, Projektplan und -fortschritt nachverfolgt, die weiterführende Nutzung der Projektergebnisse forciert und die Berichterstattung organisiert wurde. Er wurde durch die Projektleiter der Forschungsstelle ITM (Dipl.-Ing. Michael Vorhof und anschließend Dr.-Ing. Martin Kern) unterstützt.

4 Gesamtverfahren

Übersicht

Durch die Zusammenarbeit des Instituts für Textilmaschinen und Textile Hochleistungswerkstofftechnik (ITM) der TU Dresden und der Papiertechnischen Stiftung (PTS) in Heidenau ergaben sich beste Voraussetzungen zum Erreichen der Projektziele, da sich die Kompetenzen der Forschungsinstitute komplementär ergänzten (ITM: Entwicklung der Textiltechnologie und der textiltechnischen Realisierung der formschlüssigen Anbindung der Papierstreifen, PTS: Entwicklung von anforderungsgerechten Papierstrukturen für Leichtbau-Anwendungen). Das Vorgehen ist schematisch in Abbildung 4-1 dargestellt.

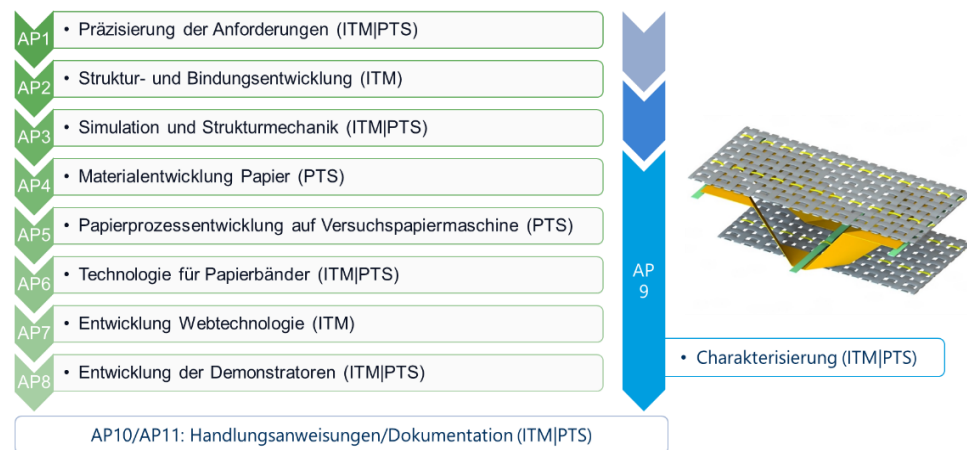


Abb. 4-1: Arbeitsplan des Projekts „HyPerWeave“

Zur Bewältigung des Arbeitsprogramms wurde eine Projektlaufzeit von 30 Monaten beantragt; durch Verzögerungen bei der Herstellung bzw. Beschaffung geeigneter Papiere erhöhte sich diese auf 35 Monate.

Vorgehen

Nach dem einleitenden **AP 1** zur Festlegung und Spezifizierung der Anforderung der zu einwickelnden Leichtbaustrukturen starteten die Arbeiten beim ITM mit theoretischen Betrachtungen zur Struktur- und Bindungsentwicklung für die geplanten HyPerWeaves (**AP 2**). Im Rahmen des **AP 3**, das von beiden Forschungsstellen bearbeitet wurde, fanden Simulation und Validierung der HyPerWeave-Struktur sowie der Papierbänder statt. Parallel dazu begann die Materialentwicklung von Papiermaterial im Labormaßstab (**AP 4**), an das sich die Herstellung bestimmter Hybridpapiere an einer Versuchspapiermaschine anschloss (**AP 5**). Die verschiedenen Papiere wurden in **AP 6** hinsichtlich der Möglichkeiten für Zuschnitt und Faltstellenvorbereitung untersucht (per Lasertechnik und Rotationsstanzen). Beim ITM erfolgte währenddessen die Entwicklung der Webtechnologie sowie der Umbau einer vorhandenen Webmaschine (**AP 7**). Daraufhin wurde im Rahmen von **AP 8** zur Herstellung von Demonstratoren übergegangen. Während der Bearbeitung der genannten Schwerpunkte erfolgten im Rahmen von **AP 9** verschiedene Untersuchungen, beispielsweise zu den Papiergrundeigenschaften, zur mechanischen Belastbarkeit von Papieren sowie den HyPerWeaves und zu Brandeigenschaften. Die erzielten Ergebnisse wurden schließlich in übersichtlicher Form (**AP 10**) sowie ausführlich in Zwischen- und Schlussberichten (**AP 11**) zusammengefasst und erläutert.

Projektbegleitender Ausschuss

Der projektbegleitende Ausschuss (PA) beinhaltete Firmen entlang der gesamten Prozesskette und führte damit Firmen aus unterschiedlichsten Wirtschaftszweigen zusammen, die üblicherweise wenig Kontakt miteinander haben.

Es waren Unternehmen aus dem Bereich Spezialchemikalien und Rohstoffe sowie Spezialpapierhersteller und -verarbeiter vertreten, die wertvolle Unterstützung für die Herstellung der Papiere gaben. Außerdem erfolgte eine Abstimmung bezüglich des Zuschnitts von Papierbändern mit Vertretern von Werkzeugen zum Papierzuschnitt sowie Laserbearbeitern. Das ITM wurde tatkräftig unterstützt von Webmaschinenherstellern und -ausrüstern. Eine Reihe von Webereien informierte sich über die technischen Umsetzungsmöglichkeiten der HyPerWeave-Herstellung. Hersteller von Papierverbunden sowie Hersteller von Leichtbaulösungen repräsentierten den Bereich der möglichen Endanwender.

5 Material und Methoden**5.1 Materialien zur Papierherstellung und Beschichtung bzw. Imprägnierung****Zellstoffe**

Als Fasermaterial kamen folgende von der PTS gemahlene Zellstoffe zum Einsatz:

- Zellstoffmischung: PM M5
- Kurzfasierzellstoff: PM KF2
- Langfasierzellstoff: PM LF2
- Langfasierzellstoff: PM LF5
- ungebleichtes Kiefern-Langfasersulfat

Tab. 5-1: Mahldaten der Faserstoffe

PTS-Bezeichnung	Schnittwinkel [°]	Spezifische Mahlkantenbelastung [Ws/m]	Spezifische Mahlenergie [kWh/t]	Schopper-Riegler-Wert [°SR]
PM M5	60	0,75	200	36
PM KF2	60	0,7	100	23
PM LF2	60	1,0	100	16
PM LF5	60	1,2	200	54

Die Faserstoffe wurden mit einem Scheibenrefiner gemahlen. Die Parameter der Mahlung sind in der Tabelle 5-1 aufgetragen. Der Schnittwinkel betrug dabei 60° und lag somit über dem Grenzwert von 50°, oberhalb dessen es zu einer stärkeren Fibrillierung der Fasern kommt und die Faserkürzung reduziert wird. Die spezifische Mahlkantenlast ist beim Langfaserzellstoff höher als bei den anderen beiden Faserstoffen. Die hohe spezifische Mahlergie trug bei dem Langfaserzellstoff und der Zellstoffmischung zu einem höheren Entwässerungswiderstand (SR) als bei dem Kurzfasierzellstoff bei. Der ungebleichte Langfasersulfatzellstoff hatte einen Entwässerungswiderstand von 32 °SR.

Basaltfasern

Es wurde eine sogenannte Uncoated Chopped Fiber (UCF), eine geschnittene Basaltfaser ohne Beschichtung geschnitten auf 6 mm Länge für die Papierherstellung auf der PTS-Versuchspapiermaschine eingesetzt. Die geschnittenen Kurzfasern sind lediglich mit einer Schlichte benetzt, die auf dem Roving aufgetragen wird. Beschichtete, aber unbeschichtete Basaltrovings mit einem Filamentdurchmesser von ca. 13 µm werden auf die gewünschte Länge geschnitten.

Polymerfasern

Des Weiteren kamen verschiedene aufschmelzbare Polymerfasern aus Polypropylen bzw. Polylactid als Teilkomponente zum Einsatz um die Steifigkeit des Gesamtmaterials zu verbessern. Die wichtigsten Daten sind in Tabelle 5-2 zusammengefasst.

Tab. 5-2: Materialdaten der eingesetzten Polymerfasern

Polymer	Feinheit [dtex]	Faserlänge [mm]	Schmelzpunkt [°C]	Dichte [g/cm ³]	Faserdicke [µm]
PLA	1,7	4; 6	160	1,25	13,2
PLA	0,6	4	160	1,25	7,8

Zudem kamen Polypropylenfasern als Kurzschnitt mit einer Länge von 4 mm zum Einsatz.

Additive

Bei der Probelattherstellung wurden Trockenfestmittel verwendet:

- 2 verschiedene kationische Kartoffelstärken
- Latex

Eine kationische Kartoffelstärke besaß einen mittleren kationischen Substitutionsgrad von 4,6 %. Der pH-Wert bei einer 30 %igen Lösung beträgt 4,6. Die Restfeuchte von 17,2 % muss bei der Einstellung des Stärkegehalts im Probelat bedacht werden.

Eine weitere kationische Kartoffelstärke wies einen geringeren Stickstoff-Substitutionsgrad von 1,2 % auf. Der pH-Wert bei einer 20 %igen Lösung beträgt 4 - 6. Die Restfeuchte von 18 % muss bei der Einstellung des Stärkegehalts im Probelat bedacht werden.

Als Nassfestmittel kam ein Polyamidoamin-Epichlorhydrin-Harz zum Einsatz.

Zur Einbindung von Flammschutzmitteln als Füllstoffen wurde zudem ein Retentionsmittel eingesetzt.

Stärke zur Imprägnierung (Versteifung)

Als Stärkebeschichtungen wurden eine native Kartoffelstärke und eine Maisstärke verwendet. Die Maisstärke war stark abgebaut und hatte einen niedrigen durchschnittlichen Polymerisationsgrad. Die native Kartoffelstärke war nicht abgebaut und hatte einen vergleichsweise hohen durchschnittlichen Polymerisationsgrad.

Modifizierte Stärke als Flammschutzmittel

Die eingesetzte Flammschutzstärke ist ein Stärke-Phosphat-Carbat. Zur Modifizierung der Stärke wird Phosphorsäure und Harnstoff verwendet. Die Reaktion von Stärke und Phosphorsäure zu Stärkephosphat, verläuft wie in Abbildung 3.9 dargestellt ab [83].

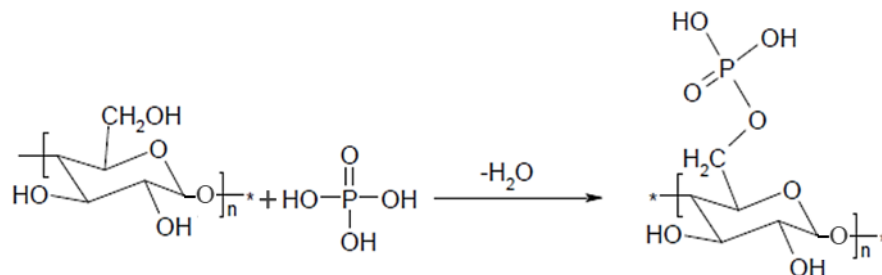


Abb. 5-1: Darstellung von Stärkephosphat (aus: [83])

Die Reaktion von Stärke und Harnstoff zu Stärkecarbamat verläuft, wie in der Abbildung 5-1 dargestellt ab.

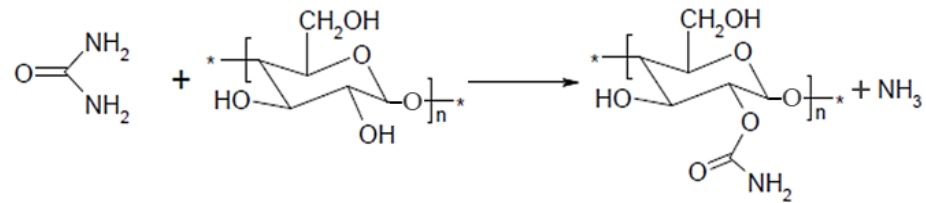


Abb. 5-2: Darstellung von Stärkecarbamat (aus: [83])

Die Synthese der Flammschutzstärke geschah im Hochkonsistenzbereich durch Nutzung der Extrusionstechnologie. Hierzu hat die PTS in den vergangenen Dekaden umfangreiches Know-how aufbauen können.

Genutzt wurde das in Abbildung 5-3 dargestellte Extrudersystem bestehend aus dem Doppelschneckenextruder *Process11* (Thermo Fisher Scientific Inc., Waltham, US) und einer definierten Schneckenkonfiguration. Die verwendeten Feststoffe (Weizenstärke (Trockengehalt TG = 88,6 %), Harnstoff (Trockengehalt TG ~ 100 %)) wurden über zwei gravimetrische MiniTwinFeeder (*DDW-*) *MT* (Kubota Brabender Technologie GmbH, Duisburg, Germany) in Block 1 mit konstanten Massendurchsätzen von m/t (Weizenstärke) = 60 g/h und m/t (Harnstoff) = 45 g/h gefördert. Die Zudosierung der Phosphorsäure (85 %ig) erfolgte mittels peristaltischer Pumpe *L/S 07522-20* (Masterflex) in Block 2 mit einem konstanten Volumenstrom von V/t (Phosphorsäure) = 0,6 ml/min. Um eine gute Vermischung (verbunden mit hohen Scherraten) der Fest-/Flüssigkomponenten zu gewährleisten, wurde bei einer vergleichsweise hohen Drehzahl der Doppelschnecken von $n = 500$ U/min extrudiert.

Gemäß Passauer [84] erfolgt die Umsetzung der oben skizzierten Reaktionen bei Reaktionstemperaturen von 135 °C bei einer Dauer von 2 h. Im Extruder liegt eine Verweilzeit von rund 1 min vor, sodass die Reaktionskinetik erhöht werden musste. Aus diesem Grund wurde die Synthese bei höheren Reaktionstemperaturen durchgeführt; konkret bedeutete dies, dass die Extrusionsversuche mit einem Temperaturgradienten beginnend bei 50 °C (Block 1) hin zu 180 °C Reaktionstemperatur (Blöcke 4 bis 8) durchgeführt wurden.

Im Ergebnis der Extrusion wird ein brauner Feststoff (siehe Abbildung 5-4) erhalten, welcher anschließend in einer Planetenmühle zu Pulver aufgemahlen wurde.

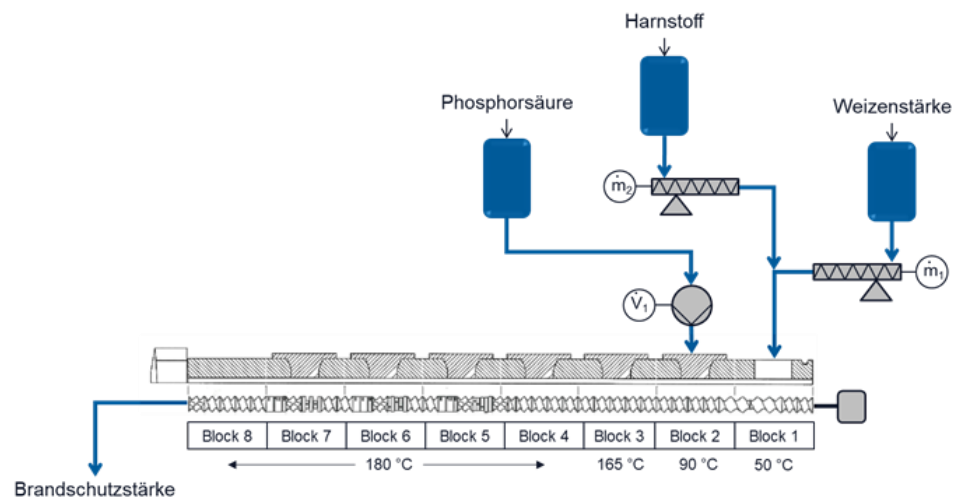


Abb. 5-3: Verfahrensschema der *in-situ* Modifizierung von Weizenstärke mit Harnstoff und Phosphorsäure zur Synthese von Brandschutzstärke



Abb. 5-4: Getrocknete Flammenschutzstärke vor der Aufmahlung

**Feste Flamm-
schutzmittel**

Es wurden 3 verschiedene feste Flammenschutzmittel auf Phosphor-Stickstoff-Basis eingesetzt. Die wichtigsten Eigenschaften werden in nachfolgender Tabelle 5-3 dargestellt (Herstellerangaben).

Tab. 5-3: Eingesetzte feste Flammenschutzmittel

Chemische Beschreibung	P₂O₅-Anteil [%]	N-Anteil [%]	Wasserlöslichkeit [g/l]
Melaminpolyphosphat	28 - 30	42 - 45	< 0,1
Modifiziertes Ammoniumpolyphosphat	72	14	5
Dimelaminpyrophosphat	31 - 33	37 - 40	< 3,5

Es wurde ein Produkt auf Basis von Blähgraphit für wässrige Anwendungen und Beschichtungen untersucht.

Die genannten Substanzen kamen als Füllstoff bei der Herstellung von Laborpapieren in AP 4 zum Einsatz.

**Weitere Flamm-
schutzmittel**

Des Weiteren kam ein Flammenschutzmittel für Holzwerkstoffe, Papier, Fasern und Dämmstoffe zum Einsatz, eine wässrige Lösung verschiedener saurer organischer und anorganischer Verbindungen.

Ein weiteres Flammenschutzmittel für Papiere bestand aus einer dünnflüssigen wässrigen Lösung von anorganischen Salzen. Es wurde empfohlen, zur Herstellung von flammhemmend bis flammfest ausgerüsteten Papieren 10 – 20 % Wirkstoff bezogen auf das Fasergewicht einzusetzen. Es ist eine farblose, klare bis schwach trübe Flüssigkeit.

5.2 Industripapiere

Vergleichskarton Für die Entwicklung eines Materialmodells (AP 3) sowie zur Untersuchung der Fallstellenvorbereitung über einen partiellen Einschnitt (AP 6) wurden vor der Entwicklung der zellstoffbasierten Papiere Vergleichsmaterialien benötigt.

Dazu kamen verschiedene Kartons zum Einsatz. Wichtige Materialdaten sind in folgender Tabelle 5-4 aufgeführt.

Tab. 5-4: Materialdaten des Vergleichsmaterials

Lagen	Grammatur [g/m ²]	Dicke [μm]	Biege­wider­stand L&W 15° [mN]	
			MD	CD
1	190	255	90	30
1	350	460	560	190
3	190	350	180	95
3	325	650	822	433

Industriekarton als Kernmaterial

Trotz der vielversprechenden Ergebnisse der Papierentwicklung (siehe AP 4, Kapitel 8), wurde im Laufe des Projekts die Beschaffung eines vergleichbaren Industriematerials notwendig, da das Material durch Einschränkungen an der Versuchspapiermaschine (nur maximal 2-lagige Papiere; nicht ausreichend hohe Flächengewichte) nicht als Rollenware herstellbar war. Dafür wurde kommerziell erhältliches Material mit vergleichbaren Eigenschaften beschafft. Dieser wurde für die Versuche zur Flamm­schutz­aus­rüs­tung (AP 4), zum Material­zuschnitt (AP 6) und zur Entwicklung des Demonstrators (AP 8) benötigt. Tabelle 5-5 zeigt die wichtigsten Materialparameter.

Tab. 5-5: Materialdaten des Industriekartons

Lagen	Grammatur [g/m ²]	Dicke [μm]	Biege­wider­stand L&W 15° [mN]	
			MD	CD
3	255	495	544	218

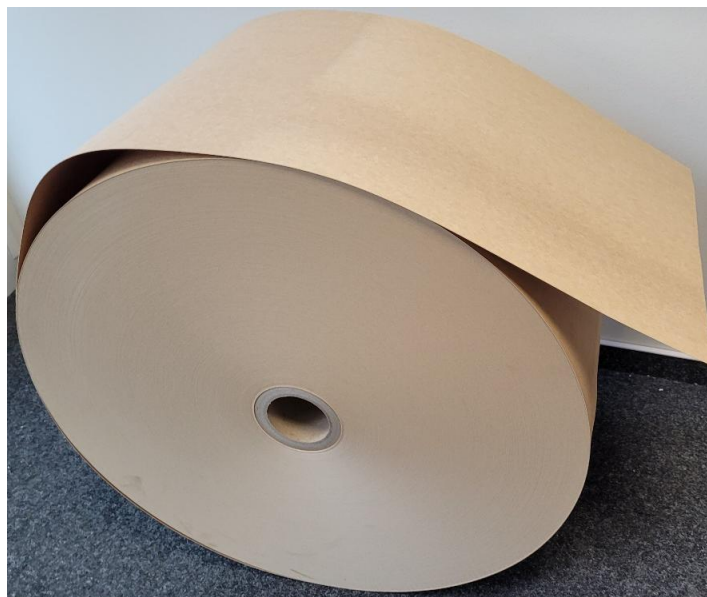


Abb. 5-3: Rollenware eines kommerziell erhältlichen Kartons

5.3 Laborblattbildung

Herstellung der Laborblätter

Laborblätter wurden nach dem Rapid-Köthen Verfahren in Anlehnung an DIN ISO 5269-2 an einem Blattbildner der Firma HAAGE gebildet (siehe Abbildung 5-5). Die Aufbereitung des Faserstoffs erfolgte nach ISO 5263.

Zu Beginn des Blattherstellungsprozesses wurden die Faserstoffe im Desintegrator für 30000 Umdrehungen in Wasser suspendiert (2 l Wasser für 30 g Faserstoff). Danach wurden im Aufschlagverteiler weitere 8 l Wasser und die Additive wie Stärke, Bindemittel (Latex) und Nassfestmittel hinzugegeben. Die Faserstoffsuspension im Aufschlagverteiler ist in der Abbildung 5-4 zu sehen.



Abb. 5-4: Faserstoffsuspension im Aufschlagverteiler

Es wurde im Anschluss so viel Faserstoffsuspension abgemessen, dass das fertige Blatt eine bestimmte Grammatur (z. B. 260 g/m²) erreicht. Diese Suspension wird dann in den Zylinder (siehe Abbildung 5-5 a, Zylinder im geöffneten Zustand) gegeben. Gleichzeitig strömte durch Düsen (b), die sich innerhalb des Zylinders befinden weitere rund 6 l Wasser nach. Es folgte eine 15-sekündiger Verwirbelung mit Luftblasen von unten, um die Fasern gleichmäßig zu verteilen. Durch das Ablassen und Absaugen (über Vakuum) des Wassers durch ein Sieb (c) hindurch verblieb nur noch eine feuchte Papierlage, welche aus den Fasern und Additiven aus der Suspension bestand. Diese feuchte Papierlage wurde im Anschluss auf ein Hilfspapier (Gautschkarton) abgeschlagen. In den nebenstehenden beheizten Trockner (d) wurde es im gepressten Zustand bei 93 - 94 °C unter Vakuum getrocknet und verdichtet.

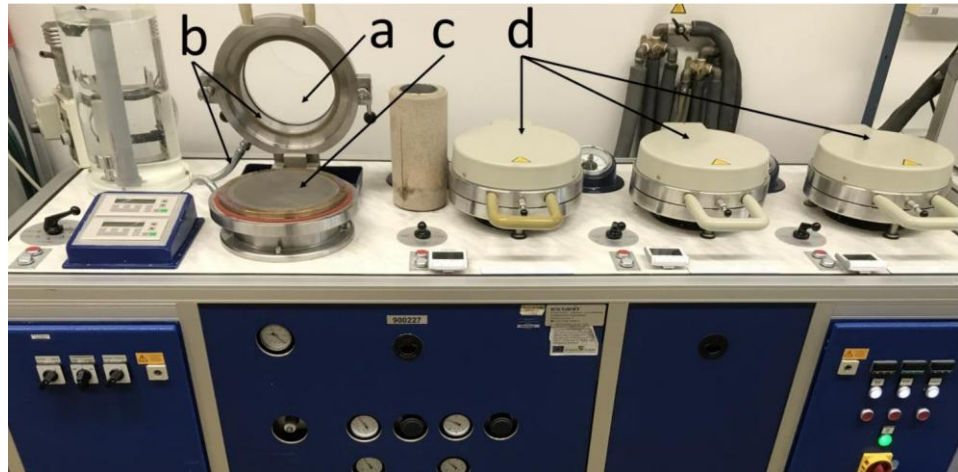


Abb. 5-5: Laborblattbildner an der PTS

Herstellung von Hybridpapieren an der Versuchspapiermaschine

Allgemeine Informationen

Die Versuchspapiermaschine (VPM) der PTS wurde von der Firma PAMA paper machinery GmbH hergestellt und besitzt eine Arbeitsbreite von 0,42 m und kann sowohl mit einem Langsieb als auch Schrägsieb betrieben werden. Die Arbeitsgeschwindigkeit kann zwischen 1 und 10 m/min variiert werden. Es sind Flächenmassen bei herkömmlichen Papieren zwischen 30 und 200 g/m² möglich.

Mit Hilfe der Maschine ist es möglich eine industrienaher Papierherstellung zu simulieren und gleichzeitig kleinere Mengen an (Spezial-)Papier zu erzeugen. Die Umsetzung von Versuchen an der VPM erleichtert deutlich die Übertragbarkeit in den Industriemaßstab.

Aufbau

Die folgenden Abbildungen (5-6 und 5-7) geben einen Eindruck von der VPM.



Abb. 5-6: VPM im Technikum der PTS

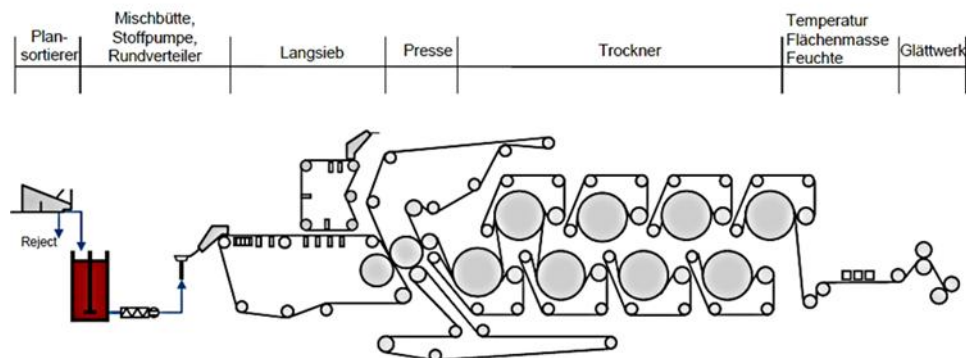


Abb. 5-7: Schematischer Aufbau der VPM

Die einzelnen Bestandteile der Maschine sind in Abbildung 5-7 dargestellt. Die Vorbereitung der Faser- und Füllstoffe erfolgt in den Mischbütten. Die Suspensionen werden anschließend über eine Stoffpumpe und einen Rundverteiler auf das Langsieb übertragen, auf dem die Entwässerung stattfindet. Anschließend wird das feuchte Papier mittels einer Pick-up-Saugpresse aufgenommen und zur Trockenpartie weiter transportiert, welche aus 8 ölbeheizten Trockenzylindern besteht (aufheizbar bis 140 °C). Nach der Trockenpartie werden Temperatur und Feuchte des Papiers bestimmt. Die flächenbezogene Masse wird vor der Aufrollung durch einen Sensor mittels β -Strahlung gemessen. Signifikante Messwertunterschiede liegen bei 5 % der Gesamt- und Ascheretention. Die Online-Formationsmessung erfolgt durch eine stationäre Version des Formationsmesssystems direkt vor der Aufrollung.

5.5 Laserbearbeitung der verschiedenen Materialien

Experimenteller Aufbau und verwendete Systemtechnik

Für die Untersuchungen zum Laserschneiden, -perforieren bzw. -gravieren von konventionellem Papier wurde eine CO₂-Laserstrahlquelle des Herstellers FEHA verwendet. Um eine schnelle Strahlableitung auf der Materialoberfläche zu erreichen, wurde ein Scanner eingesetzt, siehe Abbildung 5-8. In Kombination mit dem eingebauten F-Theta-Objektiv war die Laserbearbeitung auf einer Scanfeldgröße von 120 mm x 120 mm mit einem Fokusbrenndurchmesser d_f von 255 μm möglich.

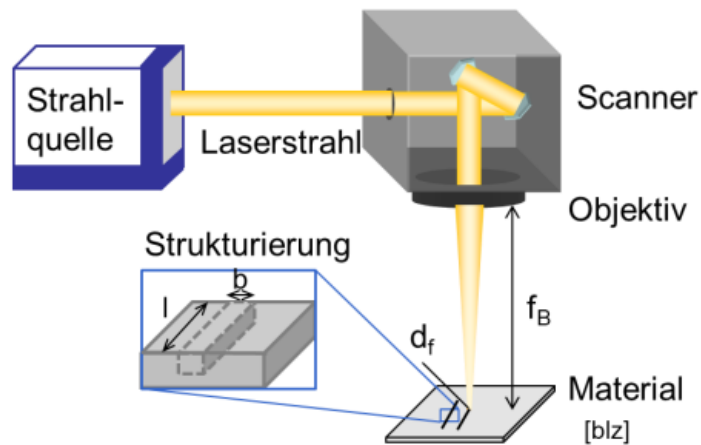


Abb. 5-8: Schema des experimentellen Aufbaus zur Laserbearbeitung

Weitere Spezifikationen des experimentellen Aufbaus sind der Tabelle 5-6 zu entnehmen.

Tab. 5-6: Spezifikationen des verwendeten Systems

Strahlquelle:	Microstorm
Hersteller:	FEHA
Wellenlänge λ :	10.600 nm
Pulsdauer τ :	> 250 ns
Max. mittl. Leistung P_{av} :	300 W
Pulsfrequenz f_p :	cw – 150 kHz
Scannerhersteller:	Scanlab
Scangeschwindigkeit v :	0 – 5000 mm/s
Scanfeldgröße:	120 mm x 120 mm
Objektiv:	F-Theta
Brennweite f_B :	150 mm
Fokusbrenndurchmesser d_f :	255 μm

Vorgehensweise zur Laserbearbeitung

Bei den Untersuchungen zur Ermittlung der Prozessparameter zur Erzeugung der vorgegebenen Strukturgeometrien wurden folgende Parameter variiert:

- Modus: cw (continuous wave, Dauerstrichmodus) oder gepulst
- Pulsfrequenz f_p
- Mittlere Laserleistung P_{av}
- Scangeschwindigkeit v
- Überfahrtenanzahl n
- Bearbeitungs- und Scanstrategie

Zur Ermittlung der Parameter für die Lasergravur der Faltpollen wurden flächige Bearbeitungsstrukturen mit einem Hatchabstand d_y von 200 μm erzeugt. Bei Proben mit Laserschnitten oder Laserperforation wurden Einzellinien verwendet. Die erzeugten Strukturen wurden anschließend anhand von mikroskopischen Untersuchungen (Auflichtmikroskopie) ausgewertet.

Hierbei wurde insbesondere auf Verbrennungen am Rande der Laserbearbeitung geachtet, da diese möglichst geringgehalten werden sollten. Für die Vermessung der Strukturgeometrie, d.h. insbesondere die Breite und die Tiefe der erzeugten Strukturen, wurde ein Laser-Scanning Mikroskop (Olympus Lext OLS 4000) mit einer lateralen Auflösung von ca. 120 nm und einer vertikalen Auflösung von 10 nm verwendet. In Abstimmung zwischen PTS und einem Laserbearbeiter wurden im Anschluss die Prozessparameter für die Falt- und Trennproben ausgewählt.

Bearbeitung im Rolle-zu-Rolle-Prozess

Die Laserbearbeitung wurde final zur Herstellung von Papierbändern Rolle-zu-Rolle-Verfahren genutzt. Der experimentelle Aufbau ist in Abbildung 5-9 dargestellt. Der eigentliche Bearbeitungsbereich ist in Abbildung 5-10 zu sehen.

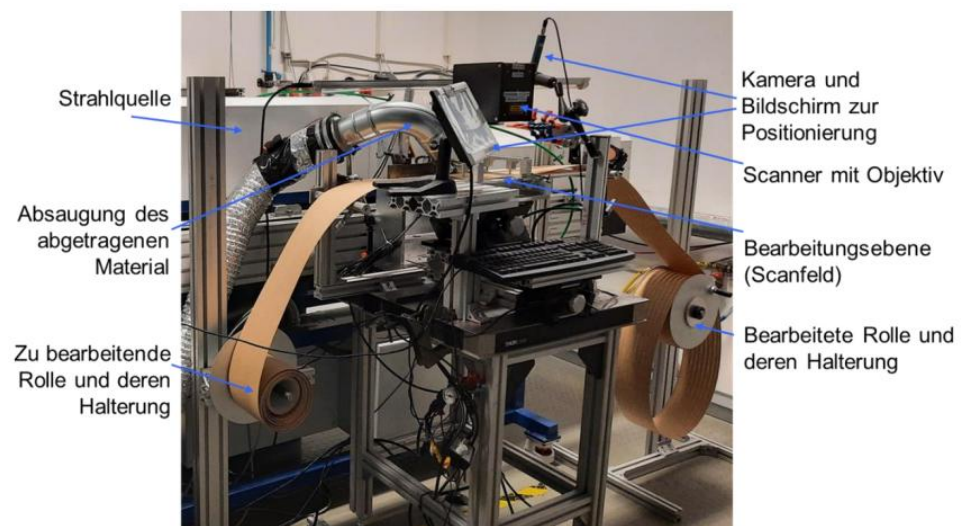


Abb. 5-9: Laserbearbeitung im Rolle-zu-Rolle-Aufbau

Bearbeitung im Rolle-zu-Rolle-Prozess

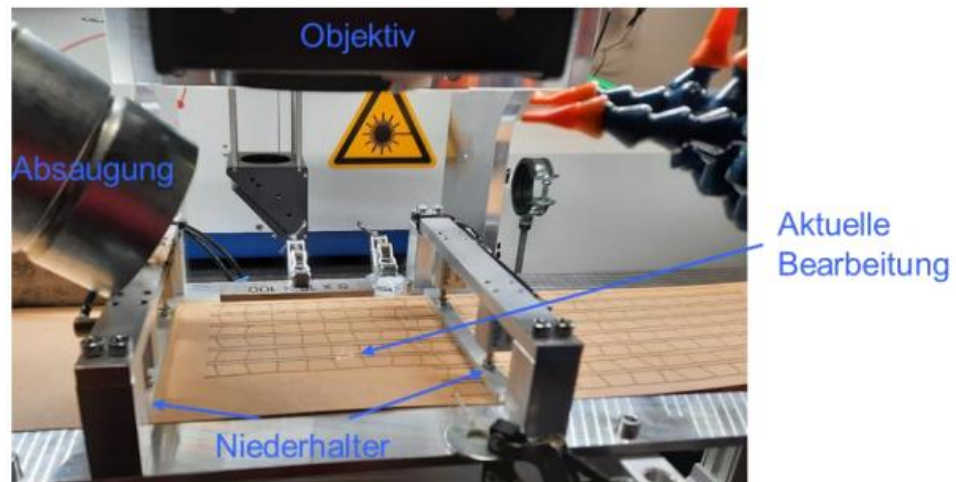


Abb. 5-10: Bearbeitungsbereich bei der Laserbearbeitung

Für den Rolle-zu-Rolle-Prozess wurde das Rollenmaterial abschnittsweise dem Bearbeitungsbereich zugeführt. Während der Bearbeitung wurde der jeweilige Abschnitt mit Niederhaltern fixiert, um ein Verrutschen oder Aufwölben zu verhindern. Nach der Laserbearbeitung wurden die Niederhalter gelöst und das Papier weitergeschoben um den nächsten Abschnitt zu bearbeiten. Die Bearbeitungsdauer je Abschnitt betrug ca. 30 s. Nach der Bearbeitung wurde das Material erneut auf eine Rolle aufgewickelt.

5.6 Imprägnierung mit Flammschutzmitteln mittels Leimpresse

Leimpresse

Zur Imprägnierung mit flüssigen Flammschutzmitteln kam eine Leimpresse der Fa. Sumet Technologies GmbH & Co. KG zum Einsatz (siehe Abbildung 5-11 a). Es handelt sich um die Coating Unit CU8 – Modul doppelseitige Leimpresse mit einer maximalen Arbeitsbreite von 300 mm, einem einstellbaren Walzendruck (1 – 2600 N), einer Geschwindigkeit zwischen 0,5 – 40 m/min sowie einem Auftragsbereich von 3 – 40 g/m², abhängig vom Feststoffgehalt des Beschichtungsmittels und der Saugfähigkeit des Substrats.

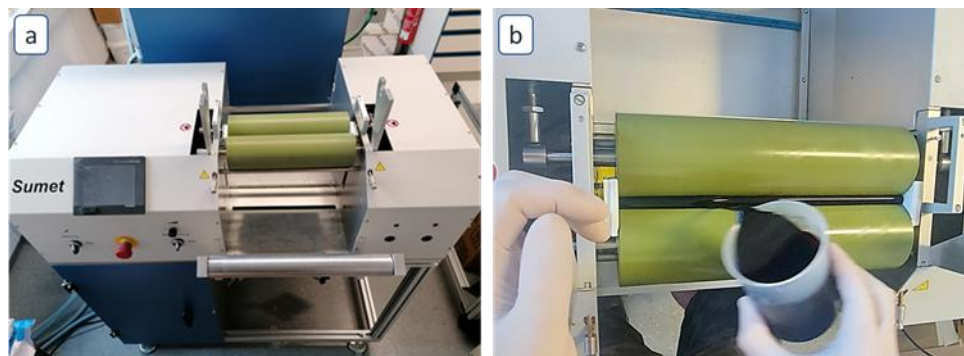


Abb. 5-11: a) Leimpresse der Fa. Sumet, b) Zugabe einer Flammschutzmittel-Lösung

Versuchsdurchführung

Die Beschichtungsflüssigkeit wird zwischen die beiden Walzen gegeben und verbleibt dort (siehe Abbildung 5-11 b). Das zu beschichtende Papier wird zwischen die Rollen geführt. Durch die Bewegung der Rollen wird es eingezogen und mit einem dünnen Film beidseitig beschichtet bzw. imprägniert. Der Walzendruck wurde zwischen 200 und 1000 N variiert. Es erfolgten bis zu 4 Imprägnierdurchgänge, zwischen denen das Material jeweils für 2 min bei 105 °C in einem Trockenschrank getrocknet wurde. Als Beispiel zeigt Abbildung 5-12 Kartons, die zwischen 1 x und 4 x mit Flammenschutzstärke imprägniert wurden.



Abb. 5-12: Mit Flammenschutzstärke imprägnierte Kartons nach unterschiedlicher Anzahl von Imprägnierdurchgängen

5.7 Prüfmethoden für Papier/Karton

Flächenbezogene Masse, Dicke, Dichte, spezifisches Volumen

Die Bestimmung der flächenbezogenen Masse erfolgte nach DIN EN ISO 536:2020-05 mittels Analysenwaage der Fa. Sartorius mit einer Genauigkeit von 1/1000 g. Die Prüffläche betrug abweichend von der Norm 100 cm².

Die Bestimmung der Dicke erfolgte nach DIN EN ISO 534:2012-02 mittels Mikrometer der Fa. Lorentzen & Wettre.

Die Dichte und das spezifische Volumen wurden aus den jeweiligen Mittelwerten von flächenbezogener Masse und Dicke berechnet.

Streifenstauchwiderstand (SCT)

Die Bestimmung des Streifenstauchwiderstandes (SCT) erfolgte nach DIN 54518:2022-01 mit dem Compression Strength Tester STFI 93381 3-1 der Fa. Lorentzen & Wettre. Der SCT ist definiert als die auf eine Probenbreite von 15 mm bezogene maximale Stauchbruchkraft in kN/m, welche die Probe einer festgelegten Stauchung bei einer freien Einspannlänge von 0,7 mm in der Blattebene entgegengesetzt.

**Zugfestigkeit,
breitenbezogene
Bruchkraft, E-
Modul**

Für die bei der Blattbildung gebildeten Papiere wurde die Zugfestigkeit nach DIN EN ISO 1924-2 mit der Universalprüfmaschine Inspekt 20 der Hegewald & Peschke Meß- und Prüftechnik GmbH bestimmt. Die Kennwerte geben die maximale breitenbezogene Zugkraft in kN/m bzw. maximale Dehnung in % an, bei der das Material versagt und die Probe reißt. Der Elastizitätsmodul wird über den maximalen Anstieg der Kraft-Dehnungskurve, multipliziert mit der Anfangslänge, dividiert durch den Querschnitt der Probe, ermittelt.

Es wurden jeweils zwei 15 mm breite Streifen pro Papiervariante zugeschnitten und mit einer Einspannlänge von 100 mm und einer konstanten Dehngeschwindigkeit von 20 mm/min geprüft.

Biegesteifigkeit

Hauptkriterium für die Materialentwicklung ist die Biegesteifigkeit. Die Bestimmung der Biegesteifigkeit nach dem Zweipunktverfahren erfolgte nach DIN 53121-1:2014-08 mit dem Biegesteifigkeitsprüfer Typ 58566 der Frank-PTI GmbH. Die breitenbezogene Biegesteifigkeit wird in Nmm angegeben und beschreibt den Widerstand, den eine einseitig eingespannte Probe einer Biegebelastung im elastischen Verformungsbereich entgegensetzt.

Dabei wird eine Probe mit einer Breite (b) von 38 mm bei einer Biegelänge von 50 mm getestet, indem sie bis zu einer Auslenkung (α) von 5° elastisch verformt wird. Als Materialantwort auf die Verformung erhält man eine Kraft (F), die in einem Kraft-Verformungsdiagramm aufgetragen werden kann, hieraus lässt sich das Elastizitätsmodul ableiten. Mit dem Elastizitätsmodul sind Proben unterschiedlicher Dicke miteinander vergleichbar. Nach Formel 5-1 wird die breitenbezogene Biegesteifigkeit (S_b) berechnet.

$$S_b = \frac{60}{\pi} \cdot \frac{F}{\alpha} \cdot \frac{l^2}{b} \quad (\text{Formel 5-1})$$

**Faltwiderstands-
prüfung**

Die Biegekräfte wurden mit dem Universal-Kraftmessgerät (CFA) der Firma Hantek untersucht. Dabei wurden die maximalen Biegekräfte bis 90° bei einer Biegung um insgesamt 90° und einer Prüfgeschwindigkeit von 90°/s ermittelt. Die Messungen wurden bei einer Probenbreite von 38 mm und eine Biegelänge von 10 mm durchgeführt.

**Rasterelektronen-
mikroskopie
(REM)**

Mit dem Rasterelektronenmikroskop JSM-6510 der Fa. JEOL wurden Oberflächen- und Querschnittsaufnahmen verschiedener Papiere aufgenommen.

Für die Aufnahmen wurden repräsentative Stellen präpariert, auf dem Proben-träger fixiert und anschließend mit Gold besputtert, um eine möglichst gleichmäßige Oberfläche, und damit verbunden, eine hohe Auflösung zu erhalten. Die Aufnahmen erfolgten im Sekundärelektronen-Modus. Die Vergrößerungen wurden jeweils entsprechend der Aufgabenstellung gewählt.

Trennkraftmessung

Die Ermittlung der Durchreißkraft beim Trennen von Papierstreifen an perforierten und teilweise dickenreduzierten Trennlinien erfolgte mittels einer selbstentwickelten Prozedur an einer Universalprüfmaschine der Fa. Hegewald & Peschke Meß- und Prüftechnik GmbH.

Abbildung 5-14 zeigt den Versuchsaufbau. Ein metallischer Prüfrahmen wird kontinuierlich mit einer Geschwindigkeit von 500 mm/min durch die Probe geführt und dabei kontinuierlich die Kraft gemessen. Für eine Parallelität von Trennlinie und Kraftleitung wurden vertikal spiegelsymmetrische Proben mit jeweils zwei Trennlinien verwendet. Das Trennwerkzeug spaltet die partiell verbundenen, flachen Probensteifen mit einer abgerundeten Kante voneinander, so dass ein Einschneiden in die Probenstreifen selbst verhindert wird. Der Mittelwert der auftretenden Maximalkräfte bei der Trennung wird zur Bewertung der Trennfähigkeit herangezogen.

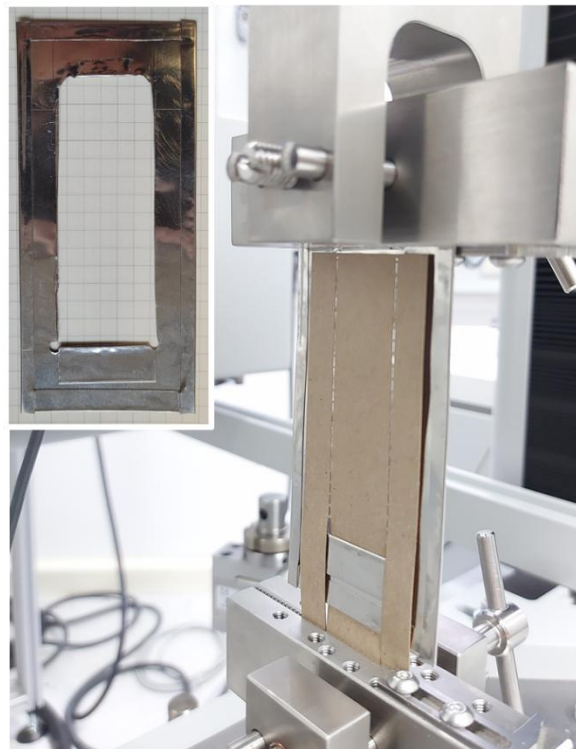


Abb. 5-14: Aufbau des Versuchsstands zur Trennkraftmessung bei der Streifentrennung; oben links: verwendeter selbstgebauter Prüfrahmen

Labor-Flammtest (PTS)

Es wird ein Material angestrebt, welches die Brandschutznorm DIN 4102-1 (Stufe B2) erreicht. Um dies im Entwicklungsprozess zu überprüfen, wurde ein orientierendes Flammtestverfahren in Anlehnung an diese Norm verwendet.

Die Probe wurde dabei senkrecht mit Hilfe einer Klemme fixiert. Beispielhaft ist dies in Abbildung 5-15 gezeigt. Die Probestreifen sind 1 cm breit und werden mit einer kleinen Flamme, die auf die Kante des Materials gerichtet ist, für ca. 2 s beflammt. Auf den Proben sind vertikale Linien angebracht, die 10 cm von der unteren Kante entfernt sind. Die Zeit vom Start der Beflammung bis zum Zeitpunkt, an dem das Material an der 10 cm Linie verkohlt, wird gemessen. Sollte die Linie nicht erreicht werden, wird die Zeit bis zum Erlöschen der Flamme gemessen. Im Fall, dass das Papier nicht entflammt, wird keine Zeit angegeben.

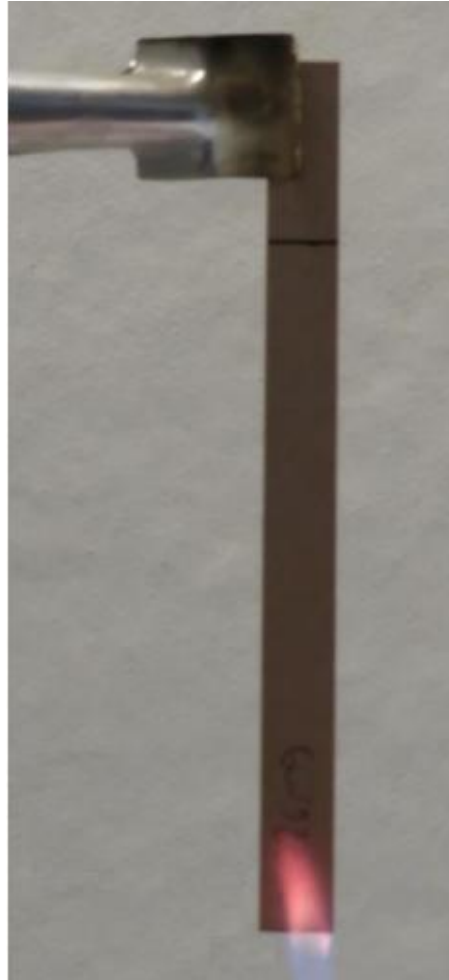


Abb. 5-15: Handflammversuch mit der eingespannten Probe (Flamme am unteren Bildrand erkennbar)

**Brandprüfung
nach DIN 4102-1**

Einige Proben wurden im Unterauftrag durch die MPA Dresden GmbH nach der DIN 4102-1 geprüft. Diese befasst sich mit dem Brandschutz von Baustoffen und Bauteilen. Es wurde flammgeschützte Kartons hinsichtlich Erreichung der Stufen B2 (normal entflammbar) und B1 (schwerentflammbar) untersucht.

Bei der Stufe B2 handelt es sich dabei um einen Kleinbrennertest, bei dem ein 190 mm × 90 mm großes Probenstück flächig bzw. an den Kanten beflammt wird. Dabei wird eine Gasflamme (20 mm hoch) 15 Sekunden lang an das Probenstück gehalten. Die Flamme wird dann entfernt und das Nachbrennverhalten beobachtet. Die Anforderungen sind erfüllt, wenn das Material nach Entfernung der Flamme innerhalb einer bestimmten Zeit erlischt bzw. die Flammenspitze nicht eine bestimmte Messmarke erreicht.

Zur Prüfung für die Stufe B1 kommt der Brandschacht-Test zum Einsatz. Vom zu prüfenden Material werden 4 Streifen mit einer Standardgröße (190 mm × 1000 mm) vorbereitet. Die Proben werden an den Wänden eines vertikalen Schachts eingesetzt, der als Brandschacht bezeichnet wird. Dieser Schacht simuliert die Bedingungen, unter denen das Material im Brandfall einem senkrecht aufsteigenden Flammenstrom ausgesetzt wäre. Eine genormte Gasflamme wird am unteren Ende des Schachts gezündet und brennt für eine festgelegte Zeitdauer von 10 min. Im Ergebnis darf zum Erreichen der Norm keine der Proben komplett verbrennen und muss im Mittel noch mindestens 15 cm Restlänge vorhanden sein. Gleichzeitig darf die Rauchgastemperatur 200 °C nicht überschreiten.

5.8 Textilphysikalische Untersuchungen der Ausgangsmaterialien und der Funktionsmuster

Bestimmung der Papierdicke Die Vermessung der Probendicke erfolgt innerhalb des Projektes in Anlehnung an DIN EN ISO 5084 mit dem Dickenmessgerät SYLVAC S229, der Fa. Karl Schröder (siehe Abbildung 5-16).



Abb. 5-16: Dickenmessgerät SYLVAC S229 der Fa. Karl Schröder KG

Dabei werden die Proben mit zwei definierten Prüfdrücken (2 kPa und 20 kPa) auf einer definierten Prüffläche (25 cm²) beaufschlagt. Das Gerät misst dabei über einen Messfühler den Abstand zur Grundplatte.

Faltprüfung an gestanzten Papiermustern

Die Ermittlung des Kaltverhaltens der Papiermuster erfolgt mittels Druckprüfung an der Zugprüfmaschine Z2.5 „Zwicki Junior“ der Firma ZwickRoell GmbH & Co. KG (siehe Abbildung 5-17).

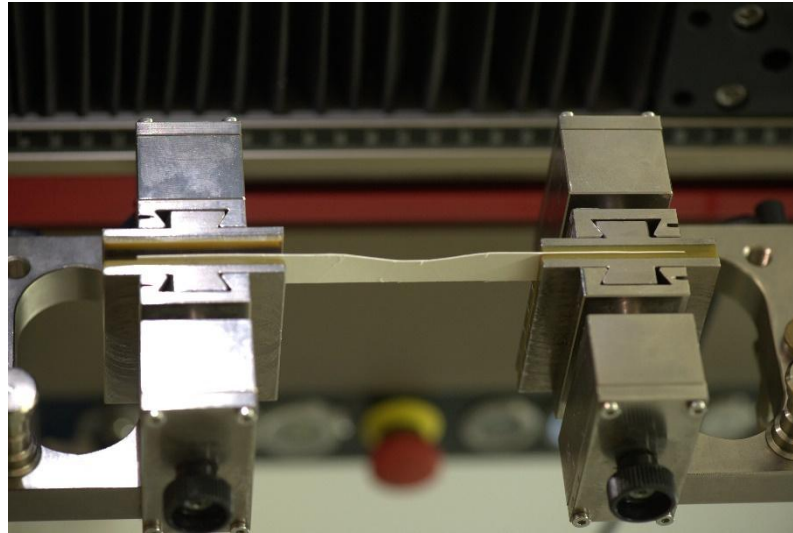


Abb. 5-17: Versuchsaufbau Kaltversuche

In dem Prüfaufbau werden die geschnittenen Papierbänder mit vorbereiteten Kaltstellen in zwei Klemmbacken eingespannt und die Klemmbacken anschließend aufeinander zubewegt. Dabei wird der Kraftverlauf über den Verfahrensweg aufgenommen und die auftretenden Kräfte bei den einzelnen Mustern untereinander verglichen.

Mechanische Prüfung der Funktionsmuster

Die Funktionsmuster und Demonstratoren wurden im Rahmen dieses Projektes auf die in Tabelle 5-6 zusammengefassten Kennwerte am ITM geprüft.

Tab. 5-6: Prüfungen an den Funktionsmustern und Demonstratoren

Kennwert/Eigenschaft	Probennahme
Faservolumengehalt	Konsolidierte Deckflächen
Imprägnierqualität	Gewebe der Deckflächen
Flächenmasse	HyperWeaves
Druckeigenschaften	FM 3 und FM 4 Demonstratoren
Schubfestigkeit	
Biegeeigenschaften	

Für die Bestimmung des Faservolumengehaltes werden Proben aus den konsolidierten Decklagen einer Veraschung bei 625 °C im Muffelofen Controller

B170 der Firma Nabertherm zugeführt. Aus den zurückbleibenden Anteilen wird anschließend der Faservolumengehalt berechnet.

Die Imprägnierqualität der Gewebelagen der Deckflächen wird mittels Lichtmikroskopie an Schlibfbildern ermittelt.

Für die Bestimmung der Flächenmasse werden Musterstücke in definierten Größen zugeschnitten und mittels einer Feinwaage die Masse der definierten Fläche ermittelt.

Die Druckeigenschaften der Funktionsmuster und Demonstratoren werden in dem in Abbildung 5-18 gezeigten Prüfaufbau an der Zugprüfmaschine Z2.5 „Zwicki Junior“ der Firma ZwickRoell GmbH & Co. KG ermittelt.

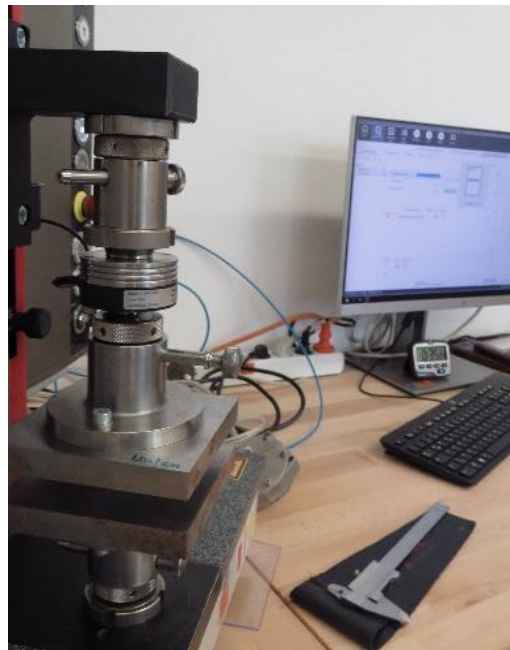


Abb. 5-18: Versuchsaufbau für Prüfung der Druckeigenschaften

Dabei werden die Proben durch zwei Platten komprimiert und die aufgebrachte Widerstandskraft über den Prüfweg aufgezeichnet.

Für die Ermittlung der Schubfestigkeit wird die bereits bei der Druckprüfung und den Falversuchen verwendete Zugprüfmaschine mit zwei außermittig angeordneten Klemmbacken eingerichtet. In diese Klemmbacken werden die vorbereiteten Probekörper eingespannt und auseinandergezogen. Der Widerstand der Struktur gegen die Verformung wird wiederum als Kraftverlauf über den Prüfweg ausgewertet.

Für die Bestimmung der Biegeeigenschaften der Demonstratorbauteile wird die am ITM vorhandene Zugprüfmaschine Z100 der Firma ZwickRoell GmbH & Co. KG mit einem 10 kN-Messkopf und einer Biegeweg-Messeinrichtung ausgestattet (siehe Abbildung 5-19).



Abb. 5-19: Versuchsaufbau für die Ermittlung der Biegeeigenschaften

6 Präzisierung der Anforderungen - ITM, PTS (vgl. Arbeitspaket 1)

6.1 Vorgehen

Ziel Im ersten Schritt sollten verschiedene Parameter rund um die Herstellung von HyPerWeaves diskutiert und festgelegt werden. Es sollten das Anforderungsprofil an die Verbunde (u. a. Flammchutzanforderungen) sowie deren Ausgangsmaterialien festgelegt werden. Des Weiteren sollte die papier- und webtechnologischen Rahmenbedingungen sowie Prozessschnittstellen zwischen Papierherstellung, -bearbeitung und Webprozess bestimmt werden. Außerdem wurde die Beschaffung von Referenzmaterialien angestrebt um Zielkennwerte zur technischen und wirtschaftlichen Bewertung zu verfeinern.

Durchgeführte Arbeiten Im Rahmen des Kick-Off-Meetings sowie durch zahlreiche individuelle Gespräche mit Industrievertretern wurden die o. g. Themen ausführlich besprochen und anschließend zwischen den Forschungsstellen ausgewertet und festgelegt.

6.2 Ergebnisse

Präzisierung des Anforderungsprofils Es wurde gemeinsam mit den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses ein umfassendes Anforderungsprofil zur Entwicklung der HyPerWeaves präzisiert. Als Ausgangsmaterialien wurden auf Papierebene ein Industriekarton, auf Ebene der Hochleistungs-Garne Glas-Filamentgarn mit der Feinheit 800 - 2400 tex und auf Matrixebene experimentelle Stärke, thermoplastischen Fasern (PLA 4 mm 0,6 dtex, PLA 4 mm 1,7 dtex, PLA 6 mm 1,7 dtex sowie PP) für den im Heißpressprozess sowie Phenolharz und Epoxidharz zur Strukturfixierung festgelegt. Darüber hinaus wurden die Schnittstellen für die Papierherstellung, -bearbeitung und die Integration in den Webprozess festgelegt. Dafür wurde eine geometrische Anordnung der Papierbänder zwischen den Kettfäden der oberen und unteren Gewebelage als technologisch

zielführend ermittelt. Weiterhin wurde das Anforderungsprofil sowie das Prüfprogramm für AP 3 und AP 9 hinsichtlich der Lastszenarien (Druck/Schub/Biegung) sowie die Flammchutzanforderungen an die Teilkomponenten und die Paneele abgestimmt. Dabei wurden folgende Eigenschaften für die Paneele festgelegt:

- Schubfestigkeit: 0,8 – 3,0 N/mm²
 - Druckfestigkeit: 1,0 – 2,5 N/mm²
 - Flächengewicht: 1.400 – 2.500 g/m²
 - Flammschutz nach DIN 4102 B2 bzw. B1
-

**Konkretisierung
der Rohstoffauswahl**

Aus der breiten Palette an Ausgangsmaterialien wurden folgende anschließend spezifiziert:

- Zellstoff (Langfaserzellstoff)
 - Flammschutzmittel (3 feste, P-N-basierte FSM)
 - Glasfilamentgarn 2400 tex
 - Papier (Rollenware bzw. in Bänderform konvertiert)
-

**Feststellung
technologischer
Rahmenbedingungen**

Papiertechnologische Parameter:

- Flächengewicht: 200 – 300 g/m²
- 1 Masse-% Stärkeanteil zur Festigkeitserhöhung und Versteifung

Webtechnologische Parameter:

- Papierverarbeitung in Kettrichtung, Faltung durch relative Bewegung zwischen Gewebeteilflächen, Abbindung der Papierbänder durch Schussfäden und Bindekettfäden
- Gewebebreite 400 mm plus Peripherie
- Papierstreifenbreite 12 mm
- Gewebehöhe ca. 10 mm (Abstand zwischen Decklagen)
- Kettichte pro Decklage 6 - 9 Fäden/cm
- Schussdichte pro Decklage 9 - 15 Fäden/cm
- Fertigung auf Schaftwebmaschine mit Linearabzug

Faserkunststoffverbundtechnologische Parameter:

- Strukturfixierung und Konsolidierung nach FM-Vorgaben
 - Konsolidierung und Formgebung auf ebenen Plattenwerkzeug und mittels Tauchimprägnierung bei 3D-Preform für die HyPerWeaves
 - Einsatz von duroplastischen Harzen (Phenol, Epoxid) durch Laminier-technik, Unterstützung durch Tränkung und nachträgliche Durchströmung
-

Festlegung einer Auswahl relevanter Referenzbauteile	<p>Im Kontext der Technologieentwicklung wurden zunächst folgende Referenzbauteile festgelegt:</p> <ul style="list-style-type: none">• Paneel zur Akustikdämmung für Inneneinrichtung• Paneel zur Herstellung von Containern• Interieurbauteile im Flugzeugbau• Paneel für den Fahrzeugausbau <p>Zielkennwerte zur technischen und wirtschaftlichen Bewertung einer KMU-gerechten Prozesskette wurden festgelegt und im Projektfortschritt stetig dokumentiert.</p>
---	--

Fazit	<p>Mit Abschluss des AP sind die Ausgangsmaterialien festgelegt und werden durch die Forschungseinrichtungen beschafft. Die Bedingungen des Webprozesses und der Papierherstellung wurden festgelegt und Referenzmaterialien bestimmt.</p> <p>Die festgelegten Parameter und Materialien dienen als Startpunkt für alle folgenden Entwicklungen. Während der Projektlaufzeit wurden jedoch noch weitere Rohstoffe und Papiere hinzugezogen, die in Abstimmung mit Vertretern verschiedener Unternehmen identifiziert wurden.</p>
--------------	--

7 Struktur- und Bindungsentwicklung - ITM (vgl. Arbeitspaket 2)

7.1 Vorgehen

Ziel	<p>Ziel des AP 2 war die geometrische Strukturentwicklung für die neuen HyPerWeaves. Auf Basis eines zu entwickelnden softwarebasierten Algorithmus wurden zunächst die zur Umsetzung der HyperWeaves erforderlichen Papierteilflächen systematisch in ihrer räumlichen Anordnung variiert. Anschließend wurden diese in die Ebene abgewickelt und durch Faltlinien miteinander periodisch in Form eines konturierten Papierbandes verbunden. Der erstellte Algorithmus gewährleistet die Kollisionsfreiheit der einzelnen Teilflächen bei den erstellten Varianten. Mit der Entwicklung der Faltgeometrien und Gewebebindungen wurde der <u>Meilenstein 1</u> erreicht.</p>
-------------	--

Durchgeführte Arbeiten	<p>Es wurde ein softwarebasierter Algorithmus zur Umsetzung der HyperWeaves entwickelt. Anschließend wurden die Abwicklungen erstellt und periodisch aneinandergelagert. Die Konturierung und Faltung wurde aus den gewählten Strukturvarianten als parametrisches Geometriemodell (SolidWorks) iterativ mit dem AP 3 abgeleitet, als Vorgabe an AP 6 übergeben sowie für die systematische Bindungsentwicklung mit der Software EAT DesignScope zur formschlüssigen Einbindung in die Gewebedeckflächen verwendet. Die Papierbänder wurden in Kettfadenrichtung für die Ableitung der erforderlichen Bindungspatronen übernommen. Die generierten Webbindungen wurden entsprechend des erforderlichen Datenformates (Vorbereitung AP 7) sowie für die KMU-gerechten Handlungsanweisungen (AP 10) aufbereitet.</p>
-------------------------------	--

7.2 Ergebnisse

Modellierung der Papierbandanordnung

Im AP 2 erfolgte die geometrische Strukturentwicklung für die neuen HyPerWeaves. Hierzu wurde der in *Abb.* dargestellte softwarebasierte MATLAB-Algorithmus entwickelt.

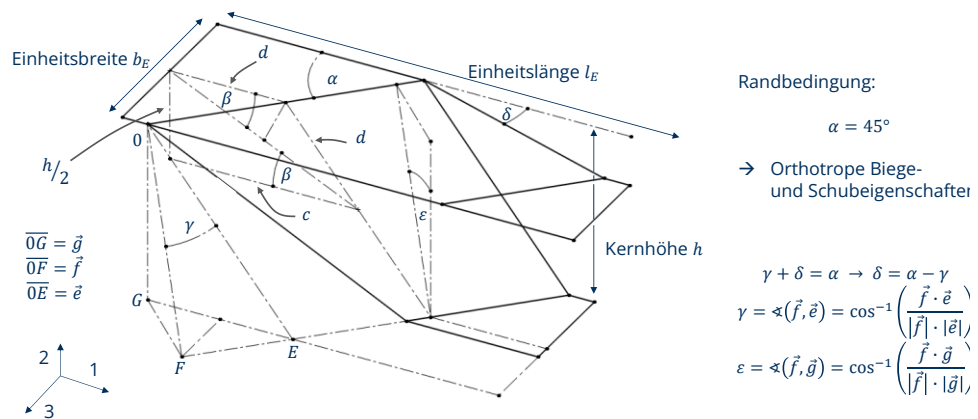


Abb. 7-1: Mathematisch-geometrisches Modell der Papierbandfaltung

Mithilfe dieses Algorithmus wurden zunächst die erforderlichen, zum Teil gefalteten Papierteilflächen systematisch in ihrer räumlichen Anordnung (abweichend von Kett- und Schussrichtung) variiert. Dabei wurden die Papierbänder in die Ebene abgewickelt und durch Faltlinien miteinander periodisch in Form eines konturierten Papierbandes gekoppelt. Zusätzlich wurde eine EXCEL- und MATLAB-basierte Routine erarbeitet, mit der die erstellten Varianten hinsichtlich Festkörperdurchdringungen einzelner Teilflächen (Kollisionsfreiheit) bewertet und entsprechend ausgewählt werden. Als Ergebnis entsteht ein parametrisches Geometriemodell der gefalteten Papierbänder, das für die Entwicklung der HyPerWeaves die elementare Grundlage darstellt.

Geometriestudien zur Papierbandfaltung

Es wurde Geometrievarianten mit unterschiedlichen Faltwinkeln für die Nutzung in den AP 3, 6 und 9 entwickelt. Dabei wurden die Zusammenhänge zwischen ϵ , Falthöhe und Einheitslänge pro Falt-Zelle beschrieben. Die Untersuchung der Zusammenhänge erfolgt anschließend anhand der gewählten Faltwinkel α von 60° bis 80° innerhalb der AP 3, 6 und 9.

Aufbereitung der Geometriemodellinformationen

Zur Generierung geschlossener Deckflächen wurden zunächst, auf Basis der gewählten Ausgangsmaterialien systematisch die Grundbindungen (Leinwand, Köper und Atlas) untersucht und auf das Potential für die bindungstechnische Ankopplung der Deckflächen an den Papierkern analysiert. Ergebnis diesbezüglich ist, dass für die gewünschte Strukturdicke und die mustergerechte Anbindung der Papierbänder lediglich leinwandbasierte (also Leinwand- oder Rips-) Bindungen mit einer Schussanbindung unter der Decklage infrage kommen. Die Vorzugslösung für die Kett- und Schussfadenverläufe mit Integration der Papierbänder ist in Abbildung 7-2 als Schussschnitt dargestellt.

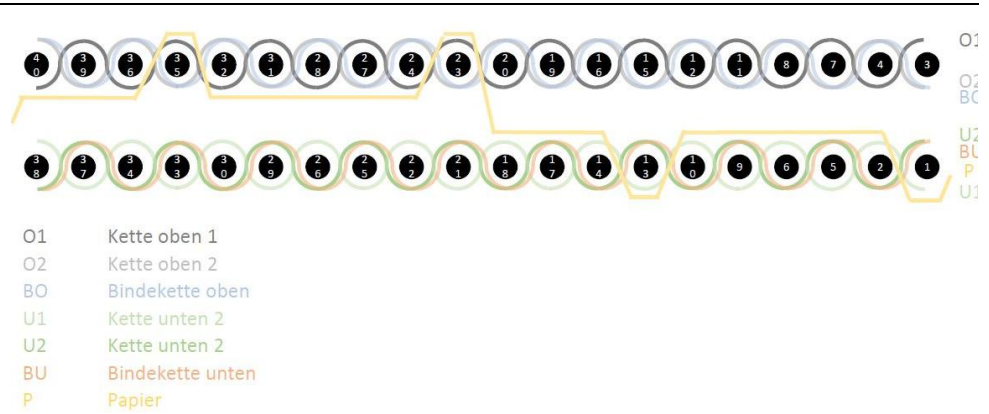


Abb. 7-2: Vorzugslösung für Gewebbindung der HyPerWeaves

Die daraus abgeleitete Gewebbindung, mit der die HyPerWeaves webtechnisch hergestellt werden, ist in Abbildung 7-3 dargestellt.

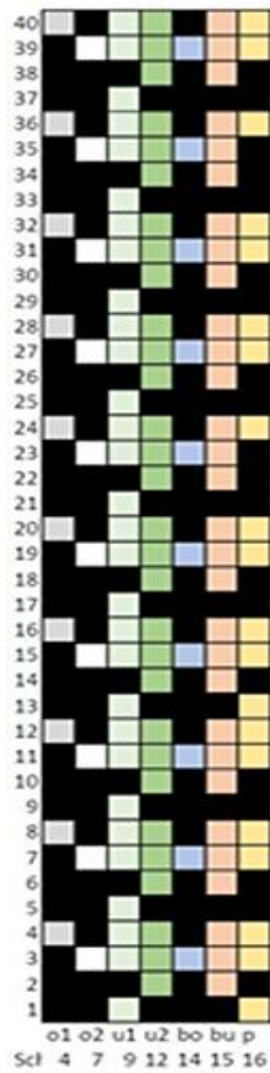


Abb. 7-3: Gewebbindung für HyPerWeaves

Die entwickelten Gewebefbindungen sind systematisch mittels der Software EAT DesignScope entwickelt worden und ergeben die in Abbildung 7-4 dargestellte Gesamtmuster.

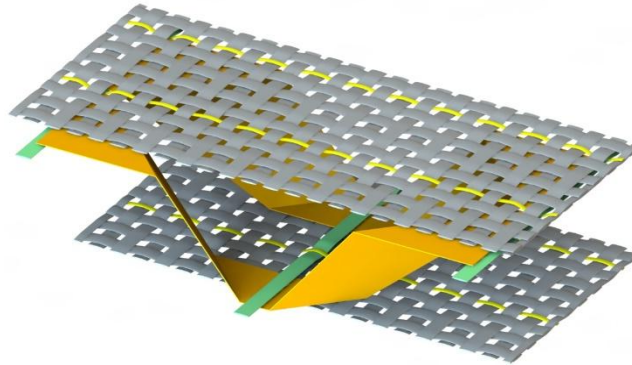


Abb. 7-4: Gewebefbindung auf Basis einer Rips-Bindung

Fazit

Die Bindungsentwicklung für HyPerWeaves mit gewährleisteter verschubsicherer Einbindung der Papierbänder in den Decklagen wurde erfolgreich umgesetzt. Die textiltechnologische Herstellung der HyPerWeaves ist vorbereitet.

8 Simulation der Papiereigenschaften und Strukturmechanik – ITM, PTS (vgl. Arbeitspaket 3)

8.1 Vorgehen

Ziel

Die Simulation von Verarbeitungseigenschaften von Papierbändern sowie die strukturmechanischen Eigenschaften beschichteter und konsolidierter HyPerWeave-Paneele mittels der Finite-Elemente-Methode (FEM) war das Ziel dieses AP. Seitens der PTS stand die Analyse des Verformungs- und Faltverhaltens von gerillten Papierbändern im HyPerWeave mithilfe numerischer Simulationen auf Basis von FEM und den Vorgaben aus AP 2 im Fokus. Das ITM beschäftigte sich mit der strukturmechanischen Simulation und daraus abgeleiteten Auslegung der HyPerWeave-Paneele. Es werden unterschiedliche FEM-Solver und Softwarelösungen eingesetzt, da sie problemspezifisch vorteilhafte Lösungsansätze und Flexibilität ermöglichen. Die teils vergleichbaren Erkenntnisse und quantitativen Ergebnisse ermöglichen zusätzlich einen doppeltnumerischen Abgleich, welches den Bedarf eines experimentellen Abgleiches teils erübrigen kann.

Durchgeführte Arbeiten - PTS

Da zum Bearbeitungszeitpunkt noch kein projektspezifisches Probematerial zur Verfügung stand, wurden zwei Ersatzmaterialien ausgewählt. Dabei wurde die Forderung von hoher spezifischer Biegesteifigkeit und Aufbau aus gleichartigen Materialeinzellagen aufgestellt. Für diese Materialien wurde das plastische Materialverhalten mittels mehrerer Prüfmethode an der PTS in Zusammenarbeit

mit ITM-Mitarbeitern (Dickenmessung, Zugversuch mit ODA, modifizierter SCT mit 5 mm Einspannlänge, 2-Punktbiegung und CRT) ermittelt.

Anschließend erfolgte eine Konvertierung in lastspezifische Ersatzmaterialverhalten in Form von multilinearen Spannungs-Dehnungs-Kurven. Zusätzlich erfolgte ein Wissenstransfer zum ITM, insbesondere zur simulativen Nachbildung der Prüfverfahren und der physikalisch richtigen Abbildung von Randbedingungen und lastspezifischem Materialverhalten.

Auf Grundlage der geometrischen Festlegungen aus AP 2 wurde ein numerisches Prognosemodell (impliziter Solver) zum Umformen der Papierbänder und des Tragverhaltens der HyperWeave-Struktur unter Druckbeanspruchung normal zur Oberfläche entwickelt. Durch Umsetzung in Form eines parametrisierten Makros wurde die Grundlage zur Untersuchung von geometrischen Parametereinflüssen geschaffen. In Abgrenzung zum entwickelten Makrostrukturmodell des ITM werden das Umformverhalten der Faltlinie und die Vorspannung aus der Umformung in der geformten Makrostruktur berücksichtigt. Durch vorteilhafte Auswahl der Randbedingungen konnte ein reduziertes Geometriemodell benutzt werden.

Bei der nachfolgenden Parameterstudie wurden die wesentlichen Einflüsse auf die Art des Versagens und das absolute Tragverhalten ermittelt.

Dadurch konnten wesentliche Gestaltungsgrundsätze zum Generieren drucksteifer Paneele abgeleitet werden, insbesondere mit Bezug zur Biegestellenvorbereitung zum Falten der Papierbänder.

Durchgeführte Arbeiten - ITM

Im Rahmen dieses AP wurde ein Modell der textilen Struktur erstellt und mit dem FE-Modell der gefalteten Papierbänder gekoppelt. Es wurde ein Modell der gewebten Deckflächen erstellt und die bindungstechnische Kopplung der Papierbänder als zusätzliches Fadensystem mittels der FEM-Software LS-Dyna auf Mesoebene (Fäden und Bänder stellen im Modell diskrete Strukturen dar) modelliert.

8.2 Ergebnisse

Prognosemodell zur Stützstruktur unter Berücksichtigung von Vorspannungen (PTS)

Das Maß der lokalen Biegesteifigkeitsminderung und Reduktion des Biegebuchmomentes hat den größten Hebel auf das Versagensverhalten der Struktur unter flächiger Druckbeanspruchung. Ein Faltfaktor nahe 1 (1 entspricht Faltarbeit ohne Biegelinienvorbereitung) bewirkt eine reine Biegeumformung beim Aufstellen des HyPerWeave-Kerns. Die großen elastischen Biegeanteile begünstigen dabei ein s-förmiges Vorformen der Wellenstege, inklusive theoretisch ebener Anbindungsflächen (siehe *Abb. 8-1*, links). Ein geringerer Faltfaktor begünstigt eine z-förmige Wellengeometrie (siehe *Abb. 8-1*, rechts). Eine zur Biegelinie nicht achsparallele Krümmung, wie sie bei der S-Form begünstigt wird, verhindert ein Ausformen der Faltlinien. Bei einer Stauchbeanspruchung des Paneels legt sich die Wellenoberfläche fortschreitend an die Decklage an (*Abbildung 8-2*). Statt einem Knickversagen der Stege

erfolgt eine Biegebeanspruchung dieser, bei wesentlich reduziertem maximalem Tragverhalten des Paneels. Daher ist eine Überprüfung der Wirksamkeit der Faltlinienvorbereitung essentiell. Es wird das Einprägen einer Sicke in die kurze Diagonale des Steges vorgeschlagen.

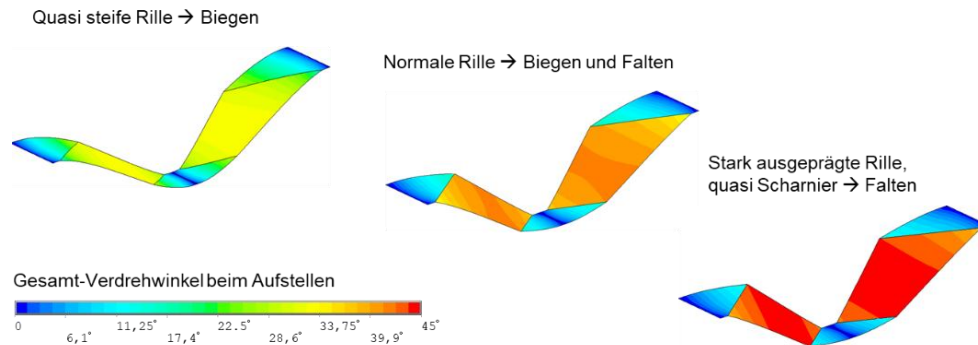


Abb. 8-1: Einfluss der Rillung auf die Ausformung der HyPerWeaves

Durch Abstimmung der Biegestellenvorbereitung kann das Paneel hinsichtlich maximaler Traglast oder maximalem Stauchweg unter Zwangskompression optimiert werden (siehe Abbildung 8-3). Eine zum formschlüssigen Verweben zusätzliche stoffschlüssige Anbindung der HyPerWeave per penetrierenden Klebstoffen versteift die Biegebruchstelle und verhindert das sukzessive Anlegen des Stegs an die Decklagen.

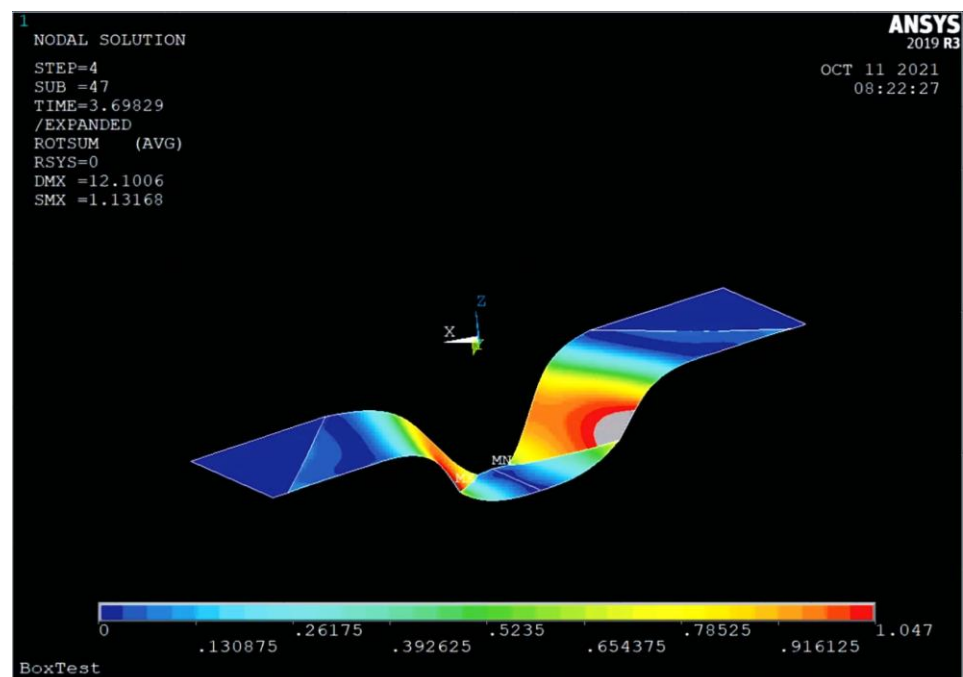


Abb. 8-2: Einfluss der Rillung auf die Ausformung der HyPerWeaves

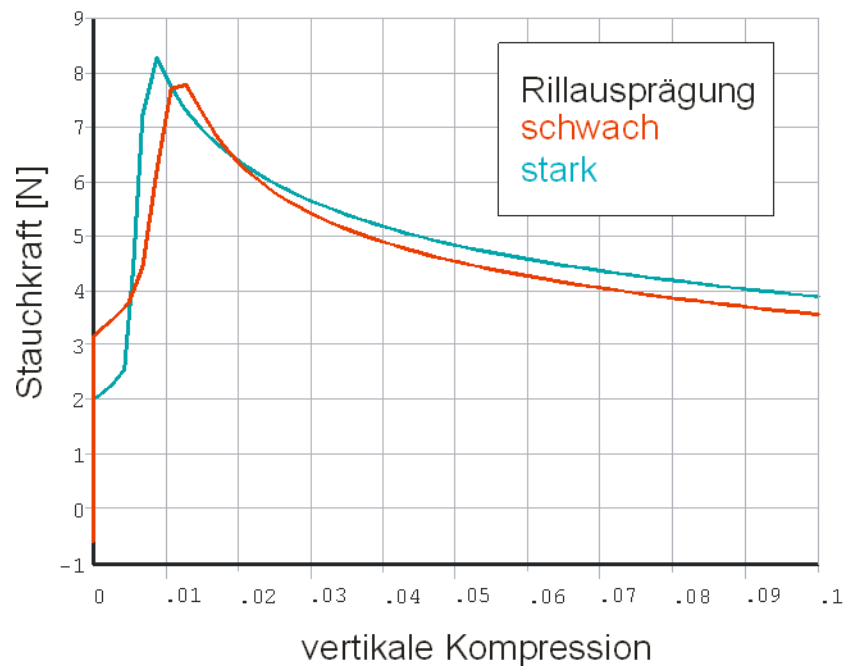


Abb. 8-3: Einfluss der Rillung auf Maxima von Stauchweg und -kraft bei Kompression des Panels

Der Anstellwinkel hat einen wesentlichen Einfluss auf die Drucksteifigkeit des Panels. Ein größerer Winkel begünstigt eine zur Stegausrichtung parallele Kraftleitung und damit erhöhte Knickstabilität (siehe Abbildung 8-4). Bei einer Auslegung sind neben dem Materialeinsatz auch die Biege widerstände der Faltlinienvorbereitungen zu berücksichtigen. Im Falle einer Vorbereitung per einstufiger Rillung beider Faltlinien ist eine der Faltlinien immer falsch orientiert. Bei einem „falschen Falten“ unter Einschluss der Rillnut kollidieren die Nutkanten bei großen Umformwinkeln, teils unter Anstieg des Biegemomentes, welches Fehlfaltungen begünstigen kann.

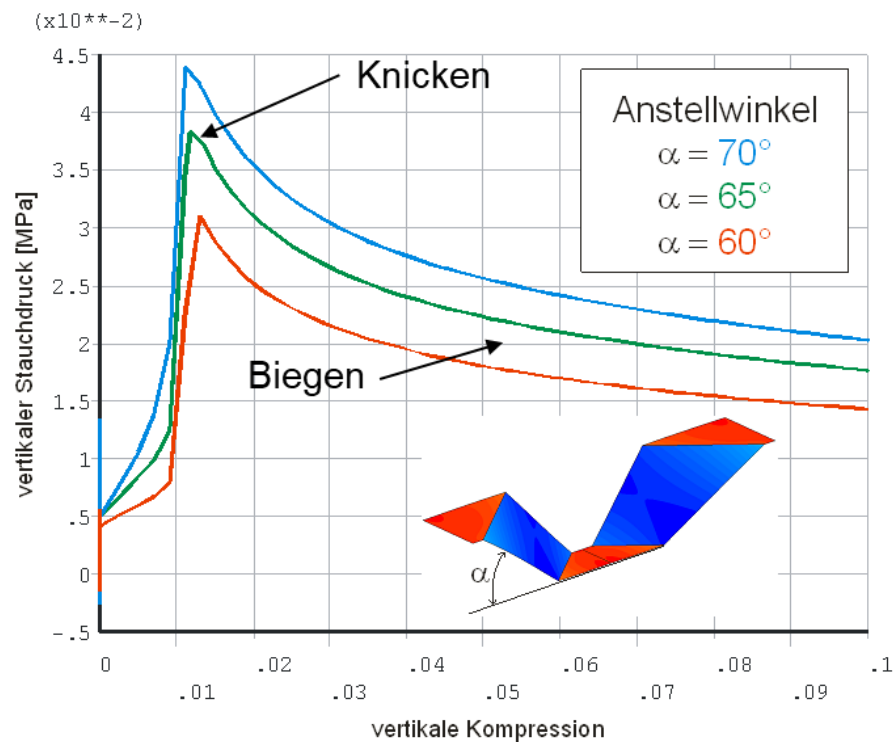


Abb. 8-4: Einfluss des Anstellwinkels auf Maxima von Stauchweg und -kraft bei Kompression des Panels

Es wurden auch alternative Falmlinien-Vorbereitungen per mechanischem Ritzen, Vollrillen und Laserablation vordiskutiert. Der Einschnitt beim lokalen Ritzen muss stets auf der späteren Zugseite erfolgen und geht bei den Hyperweave-Geometrien mit einer erheblichen lokalen Materialschwächung einher, welche die Forderung nach dem formschlüssigen Verkleben untermauert. Gemeinsam mit dem Vollrillen erfordert dies eine zweiseitige Bearbeitung des Bändermaterials. Der erforderliche Materialabtrag bei der Laserablation (Laserverdampfen) kann näherungsweise auf über 50 % der Materialdicke auf einer Breite der vierfachen Dicke abgeschätzt werden.

Bestimmung des Falterhaltens im Druckversuch

(ITM)

Das Falterverhalten wurde am Beispielmateriale (Industriekarton) bestimmt. Dieses wies eine Dicke von 0,449 mm auf. Dabei wurde das Material in unterschiedlichen Winkeln und Tiefen gerillt und das Umformverhalten bei Einbringung einer Druckkraft visuell bewertet. Die Bewertungskriterien für ein gutes Falterverhalten waren dabei die niedrige Ausbeulung der ungerillten Flächen sowie die zu verwendende Druckkraft. Die Faltergebnisse quer zur jeweiligen Materialrichtung sind in Tabelle 8-1 aufgeführt.

Die besten Faltergebnisse wurden bei einer Faltung quer zur Maschinenrichtung (MD), bei hohen Falterwinkeln und einer geringen Reststärke erhalten.

Tab. 8-1: Ergebnisse Faltverhalten (1 - schlechte Faltung | 5 - bestes Faltverhalten)

Nr.	Richtung	Faltwinkel	Residuale Stärke	Faltergebnis
2/1 R1	CD	60	0.2	1.3
2/2 R1	CD	70	0.2	2.3
2/3 R1	CD	80	0.2	3.5
2/4 R1	CD	60	0.3	1.0
2/5 R1	CD	70	0.3	1.0
2/6 R1	CD	80	0.3	1.0
2/1 R2	MD	60	0.2	3.3
2/2 R2	MD	70	0.2	3.3
2/3 R2	MD	80	0.2	5.0
2/4 R2	MD	60	0.3	1.7
2/5 R2	MD	70	0.3	2.0
2/6 R2	MD	80	0.3	2.3

Simulationsgestützte Voruntersuchung des Festigkeits- und Versagensverhaltens des Papierkernes (ITM)

Zur strukturemechanischen Simulation und Auslegung der HyPerWeave-Paneele wurde ein Modell der textilen Struktur erstellt und mit dem FE-Modell der gefalteten Papierbänder gekoppelt. Es wurde ein Modell der gewebten Deckflächen erstellt und die bindungstechnische Kopplung der Papierbänder als zusätzliches Fadensystem mittels der FEM-Software LS-Dyna auf Mesoebene (Fäden und Bänder stellen im Modell diskrete Strukturen dar) modelliert. Das FEM-Modell des Paneels besteht aus drei Komponenten: Leinwandgewebe, Faltkern und Matrix (siehe Abb. 8-5). Als Materialmodell für das Papier wurde ein orthotropes elastoplastisches Modell für Papiermaterialien verwendet (Materialtyp 274 in LS-Dyna). Zur Kalibrierung der Kennwerte des Materialmodells des Papiers wurden die Experimente für Streifenstauchwiderstand (SCT), 2-Punkt-Biegung und Streifenzugversuch numerisch modelliert und simuliert. Beispielhaft ist der Zugversuch in Abbildung 8-6 mit dem Materialverhalten in Produktionsrichtung (MD-Richtung) und senkrecht dazu (CD-Richtung) dargestellt. Das Textilmodell wurde dann in LS-Dyna kinematisch mit einem globalen FEM-Netz der Polymermatrix gekoppelt, um damit den beschichteten bzw. konsolidierten Verbund zu simulieren. Das mechanische Verhalten des konsolidierten Paneels unter Druck-, 4-Punkt-Biegung und Schubbelastungen wurde numerisch untersucht (siehe Abbildung 8-7). Abbildung 8-8 zeigt beispielhaft das FEM-Modell des 4-Punkt-Biegeversuchs und das Simulationsergebnis. Anhand der Ergebnisse wurden die in AP 2 entwickelten Bindungen bewertet und iterativ angepasst. Eine Modellvalidierung erfolgte im Abgleich mit den entsprechenden experimentellen Untersuchungen.

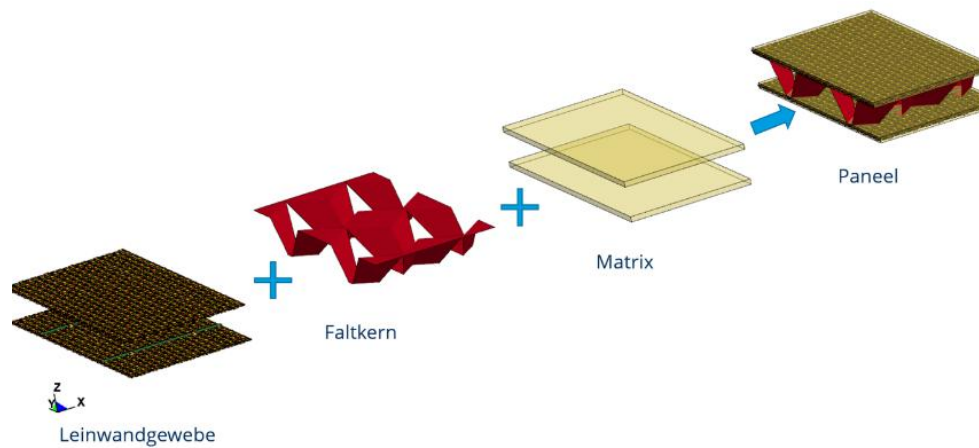


Abb. 8-5: Aufbau des FEM-Modells der Paneele

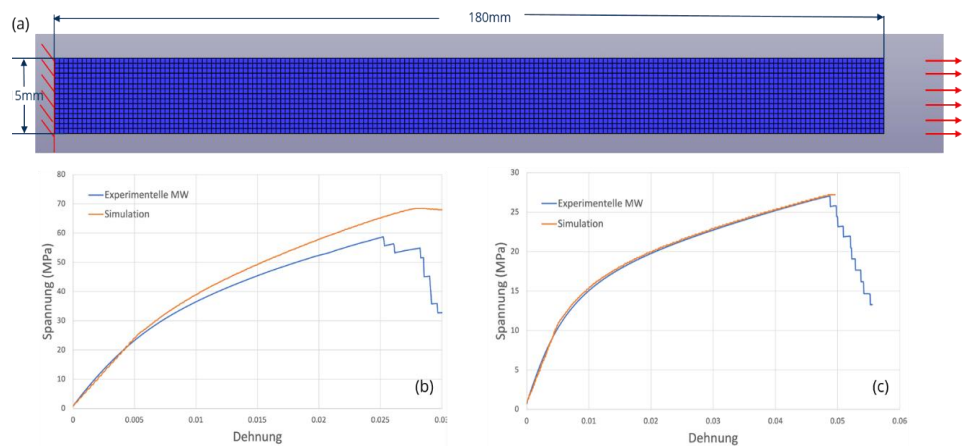


Abb. 8-6: Experimentelles und simuliertes Zugverhalten des Papiers: a) Modell inkl. Randbedingungen sowie Spannungs-Dehnungs-Verhalten in b) MD-Richtung und c) CD-Richtung

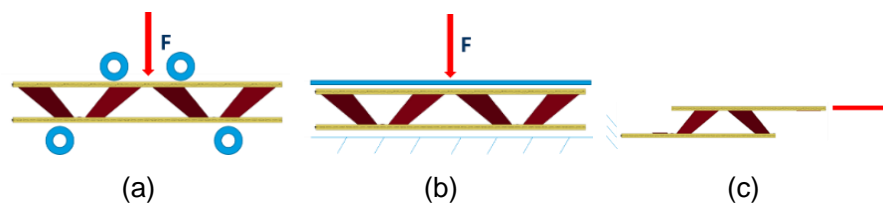


Abb. 8-7: FEM-Modelle inkl. Randbedingungen für a) 4-Punkt-Biegung nach DIN 14125, b) Druck nach DIN 53291 und c) Schub (Ersatzaufbau in Anlehnung an DIN 53294)

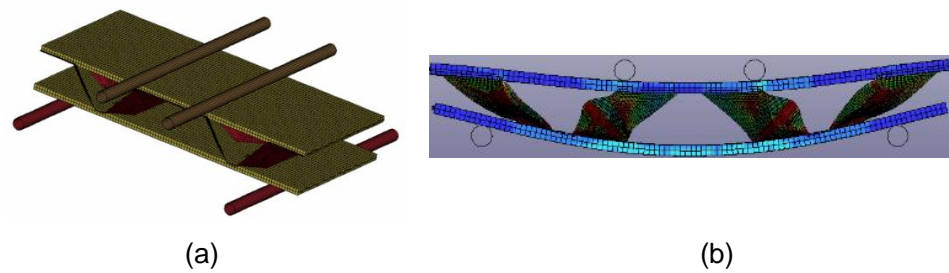


Abb. 8-8: Simulation 4-Punkt-Biegung: a) FEM-Modell, b) Simulationsergebnis

Ableitung von Vorgaben zur Geometrie und Faltstellenvorbereitung (ITM)

Die einseitig eingebrachte Faltlinienvorbereitung ist so zu orientieren, dass die Faltrichtung mit dem geringeren Rückstellverhalten am schmalen Steg-Ende erfolgt. Der Winkel der Falteinbringung hat einen signifikanten Einfluss auf die Drucksteifigkeit der Papierbänder.

Entwicklung eines FE-basierten papierspezifischen FE-Modells (ITM)

Zur Kalibrierung der Kennwerte für das FEM-Materialmodell des Papiers wurden folgende Experimente numerisch nachgebaut: Streifenstauchwiderstand (SCT), 2-Punkt-Biegung und Streifenzugversuch. Exemplarisch ist die Simulation der 2-Punkt-Biegung in Abbildung 8-9 dargestellt.

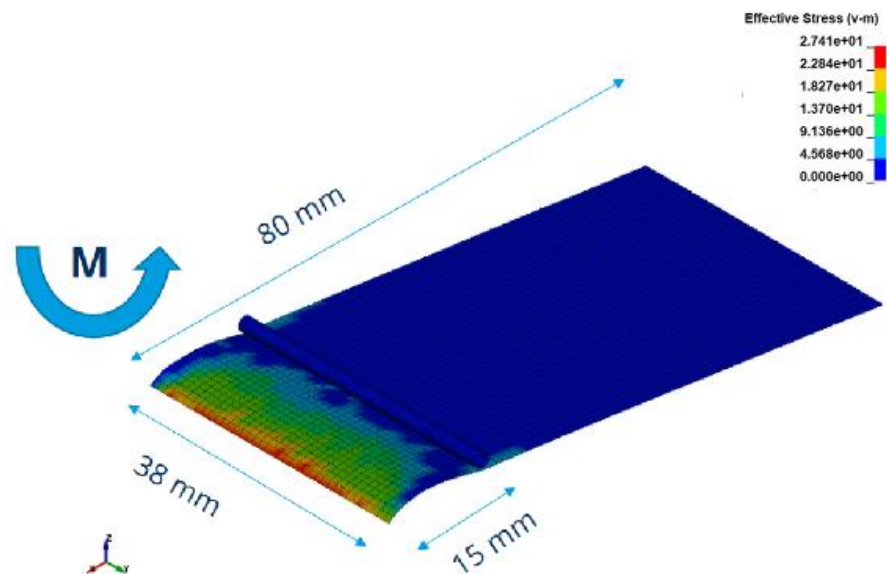


Abb. 8-9: Simulation der 2-Punkt-Biegung des Testmaterials bei 15 mm Biege­länge und unterschiedlichen Richtungen

Drei Parametersätze für Zug-, Druck- und Biegebelastung für die beiden Testmaterialien wurden erstellt und das Materialmodell für weitere Papiervarianten, die anhand dieser Parameter beschrieben und simuliert werden können, ausgearbeitet.

**Kinematische
Kopplung des
HyPerWeave-
Modelles und Si-
mulation des
mechanischen
Verhaltens kon-
solidierter Hy-
PerWeave-Pa-
neele
(ITM)**

Das FEM-Modell der HyPerWeave-Paneele besteht aus 3 Komponenten: Gewebeflächen, Faltkern und Matrix (siehe Abbildung 8-10).

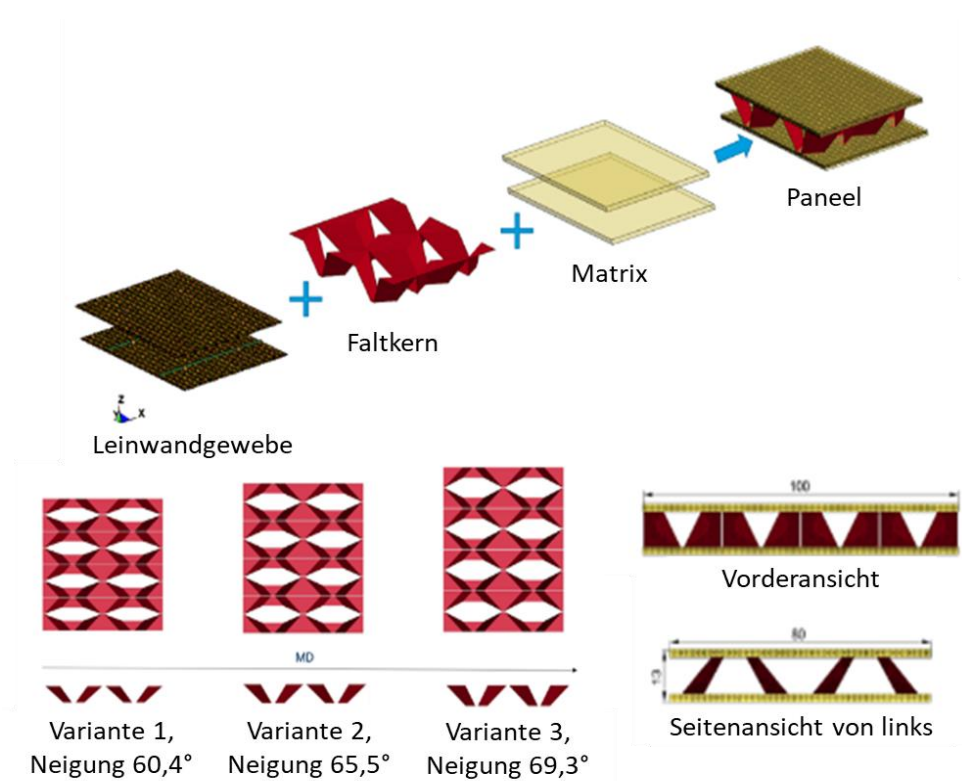


Abb. 8-10: FEM-Modell der HyPerWeave-Paneele

Die kinematische Kopplung zwischen Gewebe- und Papiermodell mit Matrix wurde in dem Modell erfolgreich realisiert. Das mechanische Verhalten des konsolidierten Paneels unter Druck-, 4-Punkt-Biegung (dargestellt in Abbildung 8-11) und Schubbelastungen für das Beispielmateriale wurde numerisch beschrieben und mit den Werten der Demonstratoren aus AP 9 abgeglichen.

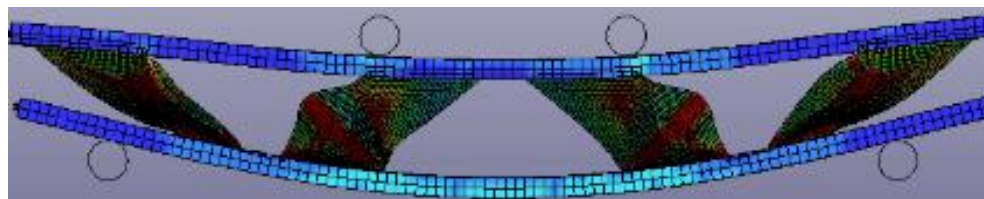


Abb. 8-11: Simuliertes Verhalten der Paneele im 4-Punkt-Biegeversuch mittels eines FEM-Modells der Paneele

Fazit

Die simulationsgestützte Entwicklung der HyPerWeaves auf Basis eines FEM-Modells wurde erfolgreich durchgeführt und die für die bindungstechnische Umsetzung notwendigen Informationen an die jeweiligen AP weitergegeben.

9 Entwicklung der Spezial- und Hochleistungspapiere – PTS (vgl. Arbeitspaket 4)

9.1 Vorgehen

Ziel An der PTS sollten in diesem AP geeignete Papiermaterialien entwickelt werden, die sich als Kernmaterial für HyPerWeaves eignen. Die Entwicklung erfolgte zunächst durch Kombination verschiedener Rohstoffe (Fasern, Additive, Flammschutzmittel) und die Variation des Lagenaufbaus am Laborblattbildner der PTS.

Durchgeführte Arbeiten

Im Rahmen von Vorversuchen wurde zunächst der Einfluss der Zugabe verschiedener Komponenten bei der Herstellung von Kartons am Laborblattbildner (Rapid-Köthen-Verfahren) untersucht. Nach der anfänglichen Erzeugung von Papieren ausschließlich aus Langfaserzellstoff (PM LF2) mit unterschiedlicher Grammatur wurden anschließend verschiedene Polymerfasern zur Versteifung zugemischt. Anschließend wurde die Verarbeitbarkeit verschiedener fester Flammschutzmittel getestet und entsprechend Laborblätter mit Flammschutzmittelanteilen von 10 – 20 % erzeugt. Diese wurden anschließend hinsichtlich mechanischer Eigenschaften, Brennbarkeit und mikroskopischem Aufbau untersucht.

Die Entwicklungen am Laborblattbildner wurden fortgesetzt, indem gezielt die Biegesteifigkeit (bzw. der Biegemodul) durch Variationen von Zellstoffen, Additiven, Lagenaufbau (einlagig, mehrlagig) und nachträglicher Stärkebeschichtung beeinflusst (erhöht) wurde. Dazu wurden Laborpapiere mit einer Dicke von ca. 400 µm hergestellt.

Mit einer optimierten Variante erfolgte im Anschluss die Untersuchung verschiedener Flammschutzimprägnierungen (Industrieprodukte und modifizierte Stärke).

Da die optimierte Variante nicht auf der Versuchspapiermaschine herstellbar war erfolgte die Suche und Beschaffung eines geeigneten, verfügbaren Ersatzmaterials, welches bereits auf dem Markt verfügbar ist.

Nach dem Wechsel auf einen geeigneten Industriekarton wurde abschließend die Flammschutzimprägnierung (Industrieprodukte und modifizierte Stärke) hinsichtlich hoher Flammenhemmung bei weitgehendem Erhalt der Steifigkeit optimiert.

9.2 Ergebnisse

**Vorversuche
(Grundpapier,
feste Flammschutzmittel,
Polymerfasern)**

Die Entwicklungen starteten mit der Erzeugung von einlagigen Testpapieren (kreisförmig, ca. 200 mm Durchmesser) am Laborblattbildner. Es wurde Papier mit dem Langfaser-Zellstoff PM LF2 in verschiedenen Grammaturen (200 bzw. 300 g/m²) unter Zugabe von 1 % Stärke hergestellt. Diese dienten als Vergleich für die Untersuchung des Einsatzes der festen Flammschutzmittel sowie der thermoplastischen Fasern.

Es wurde versucht, die verschiedenen festen Flammenschutzmittel in Anteilen von 10 und 20 % als Füllstoff in die Papiere bei einer Grammatur 200 g/m² einzuarbeiten. Als Additive bei der Blattbildung kamen zur Einbindung der Flammenschutzmittel neben 1 % Stärke noch 1 % Latex sowie 0,1 % Retentionsmittel zum Einsatz. Eine gleichmäßige Verteilung des Füllstoffes konnte nur mit 2 Varianten FSM-1 und FSM-3 erreicht werden, weshalb das nachfolgende Diagramm (Abbildung 9-1) nur Werte für diese zeigt.

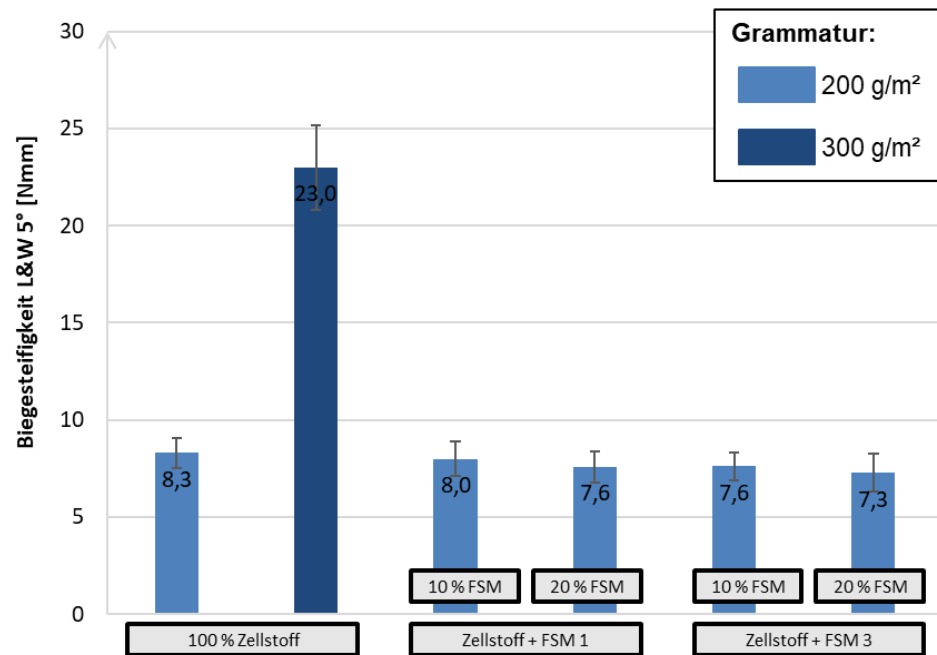


Abb. 9-1: Biegesteifigkeit verschiedener Laborpapiere in Abhängigkeit der Zusammensetzung und Dicke

Aus den Daten geht hervor, dass beim reinen Zellstoffpapier die Biegesteifigkeit erwartbar mit zunehmender Materialdicke (507 µm bei 300 g/m²; 320 µm bei 200 g/m²) stark zunimmt. Die Zugabe der Flammenschutzmittel verringert die Biegesteifigkeit geringfügig. Nachfolgend ist die Verteilung der Flammenschutzmittel im Papiergefüge anhand von REM-Aufnahmen dargestellt.

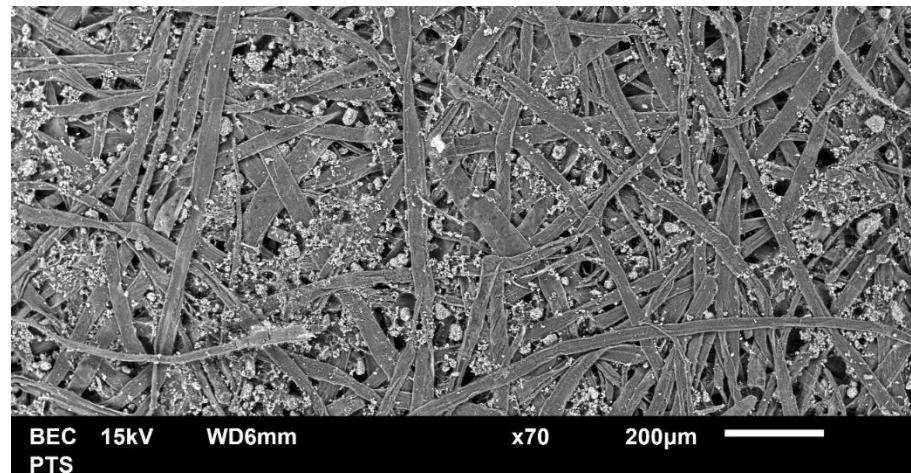


Abb. 9-2: REM-Aufnahme eines Laborblattes 10 % FSM-1

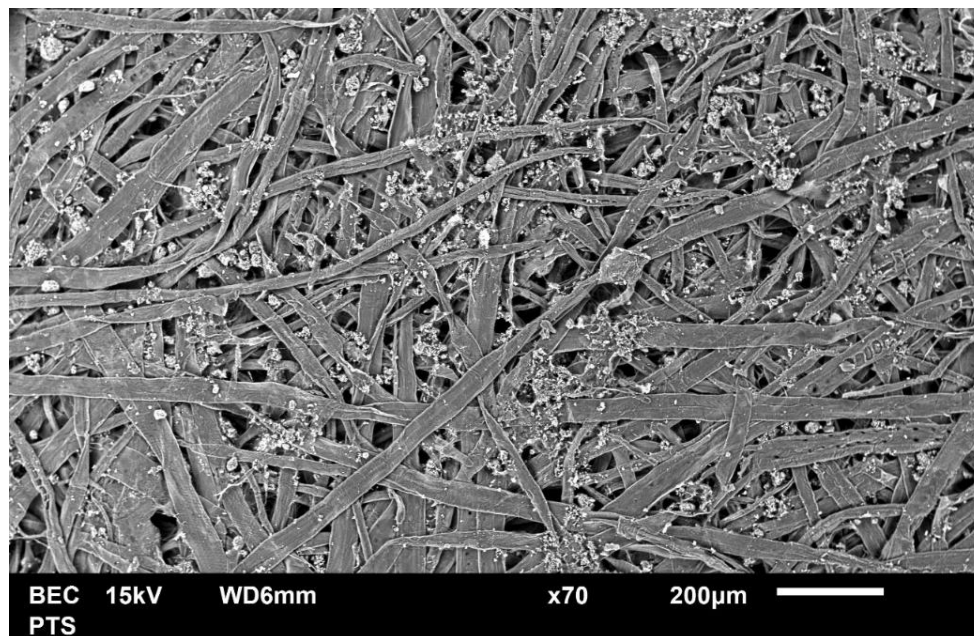


Abb. 9-3: REM-Aufnahme eines Laborblattes mit 10 % FSM-3

In beiden Abbildungen ist zu erkennen, dass das jeweilige Flammschutzmittel gleichmäßig verteilt zwischen den Zellstofffasern vorliegt. Es ist jedoch zu bemerken, dass beide Komponenten als getrennte Phasen vorliegen. Dies hatte zur Folge, dass selbst Papiere mit einem Anteil von 20 % Flammschutzmittel nur eine leicht geringere Brennbarkeit als unausgerüstete Papiere aufwiesen. Im Laborflammtest zeigten sich eine leicht verminderte Flammausbreitung sowie ein verkohlter Rückstand nach dem Brand. Insgesamt zeigte sich jedoch eine zu geringe Wirksamkeit bei nachteiligen Auswirkungen auf Preis und Mechanik des Materials. In den weiteren Arbeiten zur Papierentwicklung wurde schließlich auf feste Flammschutzmittel verzichtet und andere Flammschutzmittel über Imprägnierung einbracht, mit denen eine bessere Verteilung auf und in den Fasern möglich war.

Des Weiteren erfolgte die Zumischung von schmelzbaren Polymerfasern zur Erhöhung der Biegesteifigkeit von so gebildeten Hybridpapieren. Dazu kamen Polymerfasern (Polylactid, Polypropylen) zum Einsatz, die thermisch aufgeschmolzen werden konnten, wodurch Bindungen zwischen ihnen und den Zellstofffasern aufgebaut wurden. Es wurden Laborpapiere mit einer Grammaturn von 200 g/m² hergestellt, die neben 80 % Langfaserzellstoff (PM LF2) je 20 % von insgesamt 4 verschiedenen Polymerfasern enthielten. Die Polylactidfasern (PLA 4mm/0,6 dtex, PLA 4mm/1,7 dtex, PLA 6mm/1,7 dtex) weisen einen Schmelzpunkt von 150 – 160 °C auf, während die Polypropylenfasern (4 mm lang) bei ca. 160 °C schmelzen.

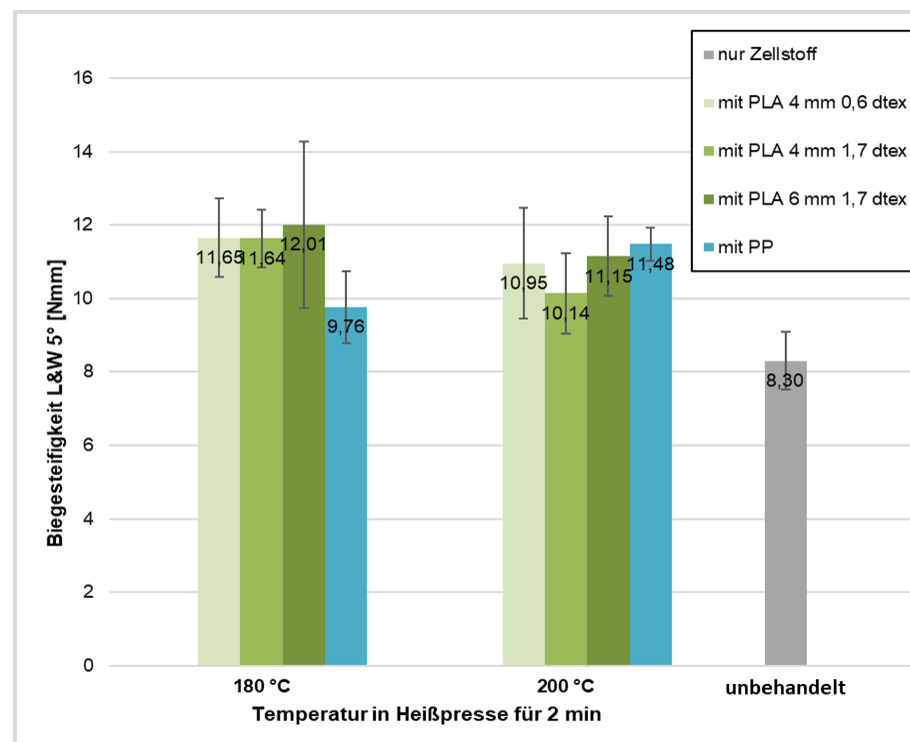


Abb. 9-4: Biegesteifigkeit verschiedener Laborpapiere in Abhängigkeit der Zugabe von synthetischen Polymerfasern sowie der jeweiligen Wärmebehandlung in der Heißpresse

Durch Zugabe und Aufschmelzen der Polymerfasern ließ sich die Biegesteifigkeit der Papiere um 18 – 45 % erhöhen. Da jedoch der Einsatz synthetischer Polymerfasern, die benötigte Energie für den Schmelzprozess sowie die schlechte Rezyklierbarkeit dem Nachhaltigkeitsgedanken der angestrebten HyPerWeaves auf Zellstoffbasis eher widersprechen, wurde im weiteren Vorgehen auf diese verzichtet.

Entwicklung der Papierrezeptur zur Herstellung der

Als entscheidender Entwicklungsparameter stand die Erhöhung der Steifigkeit im Fokus. Zunächst wurde eine Materialdicke von 400 µm festgelegt, die sich mittels Rotationsstanzen gut verarbeiten lässt.

zellstoffbasier- ten Papiervari- ante (FM1)

Zum besseren Vergleich der Materialsteifigkeit wurde das Biegemodul herangezogen, das sich über die Formel 9-1 aus den gemessenen Werten für Biegesteifigkeit und Dicke berechnen lässt.

$$E = \frac{Sb}{d^3} * 12 * 10^6 \quad (\text{Formel 9-1})$$

Dadurch können leichte Dickenunterschiede, die im Herstellungsprozess unvermeidlich sind, nicht mehr die Steifigkeit beeinflussen und die Vergleichbarkeit erhöht sich.

Die Steifigkeitserhöhung sollte durch Variation folgender Parameter erreicht werden:

- Additivmenge (Stärke, Latex)
- Lagenaufbau (einlagig, mehrlagig)
- Faserstoffe
- Nachträgliche Stärkebeschichtung

Es wurden zunächst einlagige Papiere mit folgenden Grundeigenschaften erzeugt:

- Faserstoff: 50 % Kurzfaser, 50 % Langfaser (PM M5)
- Flächengewicht rund 260 g/m²
- Dicke ca. 400 µm

An diesen erfolgte die Variation der Stärkezugabe. Es kamen 2 verschiedene kationische Kartoffelstärken zum Einsatz. Die Stärkezugabe wurde zwischen 1 und 5 % untersucht. Abbildung 9-5 zeigt die entsprechenden Ergebnisse.

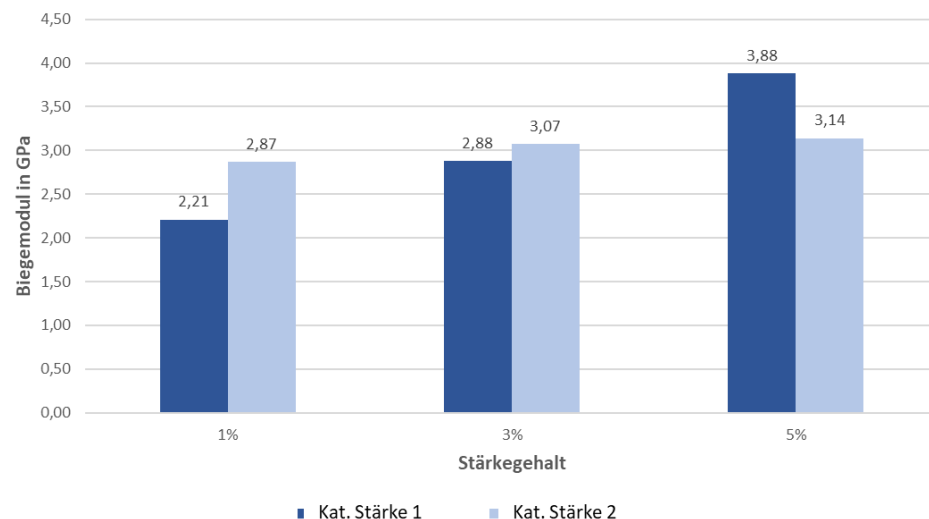


Abb. 9-5: Biegemodul der Laborkartons in Abhängigkeit von Stärkeart und -gehalt

Es zeigte bei der kationischen Stärke 1 eine große Abhängigkeit des Biegemoduls von der Stärkemenge, während die Unterschiede bei der kationischen

Stärke 2 gering ausfielen. Bei 5 % Stärkezugabe wiesen die Materialien eine hohe Klebrigkeit auf, was in der Herstellung und im Einsatz zu Problemen führen kann. Somit wurde kationische Stärke 2 mit einer Zugabe von 3 % bevorzugt.

Als nächstes erfolgte die Variation des Latexgehalts, welcher zwischen 1 und 3 % variiert wurde. Die Ergebnisse sind in Abbildung 9-6 dargestellt.

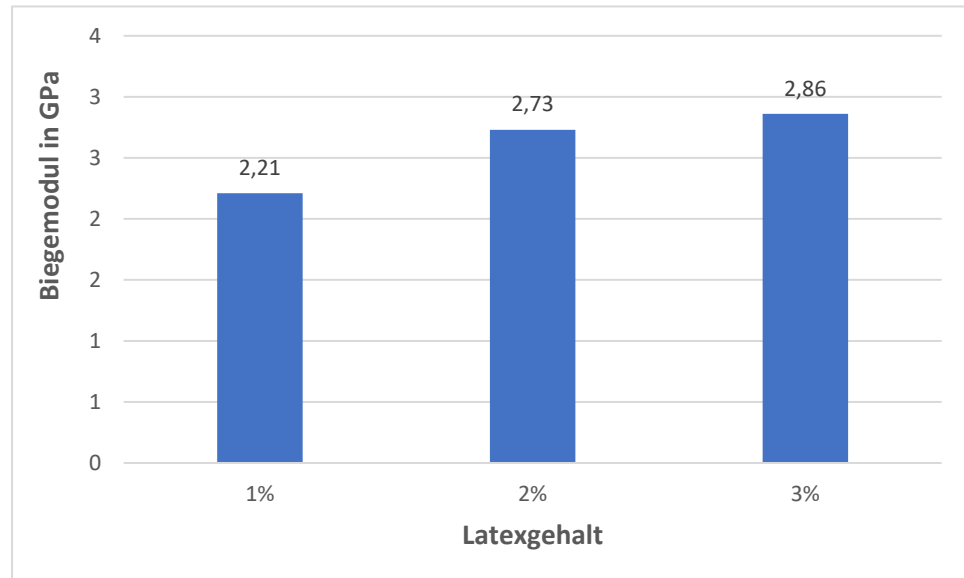


Abb. 9-6: Biegemodul der Laborkartons in Abhängigkeit des Latexgehalts

Die Verdreifachung des Latexanteils führte zu einer Steigerung des Biegemoduls von 29 %, wobei festzuhalten ist, dass sich ein erhöhter Latexanteil in jedem Fall positiv auf die Biegesteifigkeit auswirkt, wie Abbildung 9-6 zeigt. Dies ist mit einer stärkeren Vernetzung der Fasermatrix durch Latex (synthetisches Polymer) zu erklären. Zu hohe Latexgehalte sollten jedoch vermieden werden, da negative Einflüsse auf die Nachhaltigkeit und Rezyklierbarkeit der Produkte zu erwarten sind. Es ist zudem auch nur bedingt möglich den Latexgehalt bei der Papierherstellung zu erhöhen. Überschüssiger Latex wird nicht gebunden und bleibt im Prozesswasser.

Weitere Verbesserung der Steifigkeit sollte mit einer Variation des Lagenaufbaus erreicht werden. Es wurde hierfür ein 3-lagiges System mit besonders festen und biegesteifen Außenlagen entwickelt. Für die Außenlagen kam ein hochgemahlener, gebleichter Langfaserzellstoff (PM LF5) zum Einsatz; die Mittellage bestand aus Kurzfasierzellstoff (PM KF2).

In den Versuchen wurde die Dicke der Einzellagen (siehe Abb. 9-7) sowie die Stärkezugabe (1,5 und 3 %) variiert. Es sollte ermittelt werden, ob dünne Außenlagen (50 g/m²), die einen hohen Abstand aufweisen (Mittellage: 160 g/m²; Variante 1) oder dicke Außenlagen (90 g/m²) mit geringem Abstand (Mittellage: 80 g/m²; Variante 2) besser für eine hohe Gesamtsteifigkeit geeignet sind.

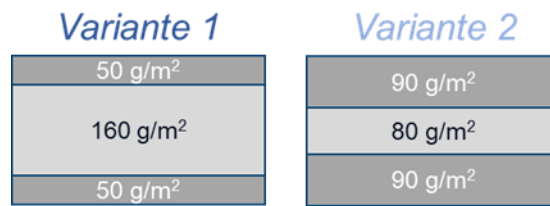


Abb. 9-7: Schematische Darstellung der Varianten der 3-lagigen Laborkartons

Die Ergebnisse des Biegemoduls nach Variation der genannten Parameter sind in Abbildung 9-8 dargestellt.

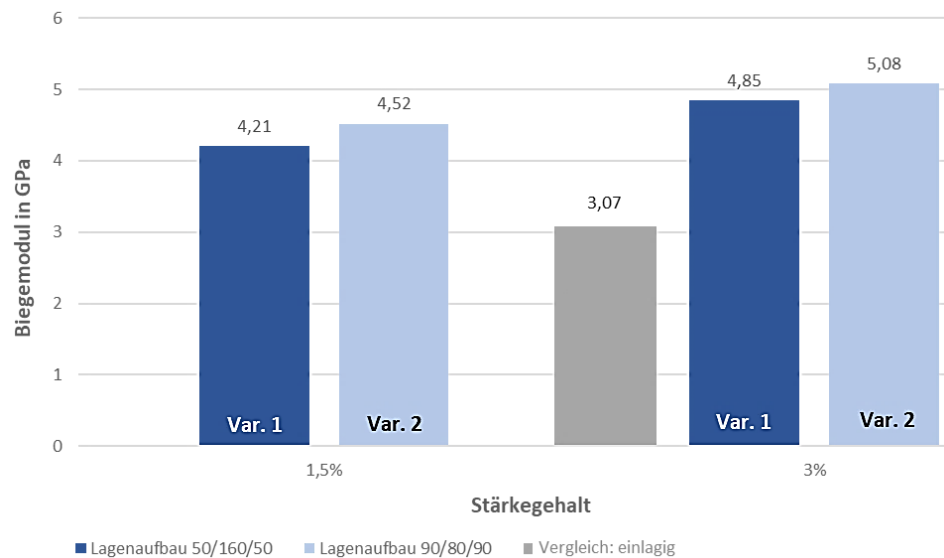


Abb. 9-8: Biegemodul der Laborkartons in Abhängigkeit des Lagenaufbaus und des Stärkegehalts

Es zeigte sich, dass der 3-lagige Aufbau einen deutlichen Vorteil hinsichtlich der Biegesteifigkeit mit sich brachte. Die dickeren Außenlagen (90 g/m²) zeigten zudem leicht erhöhte Werte beim Biegemodul und auch die höhere Stärkemenge war von Vorteil.

Im nächsten Schritt wurden die Zellstoffe der Außenlagen variiert. Es kam der ungebleichte Kiefern-Langfaser-Sulfatzellstoff (UKP) als Alternative zum gebleichten Langfaserzellstoff (PM LF5) sowie eine 50/50-Mischung dieser beiden zum Einsatz. Die weiteren Parameter waren folgende:

Die Ergebnisse zum Einfluss auf das Biegemodul lassen sich Abbildung 9-9 entnehmen, wobei der linke Balken („PM LF5“) den identischen Karton wie in Abbildung 9-8 Var. 2 (3%) darstellt und als Vergleich dient.

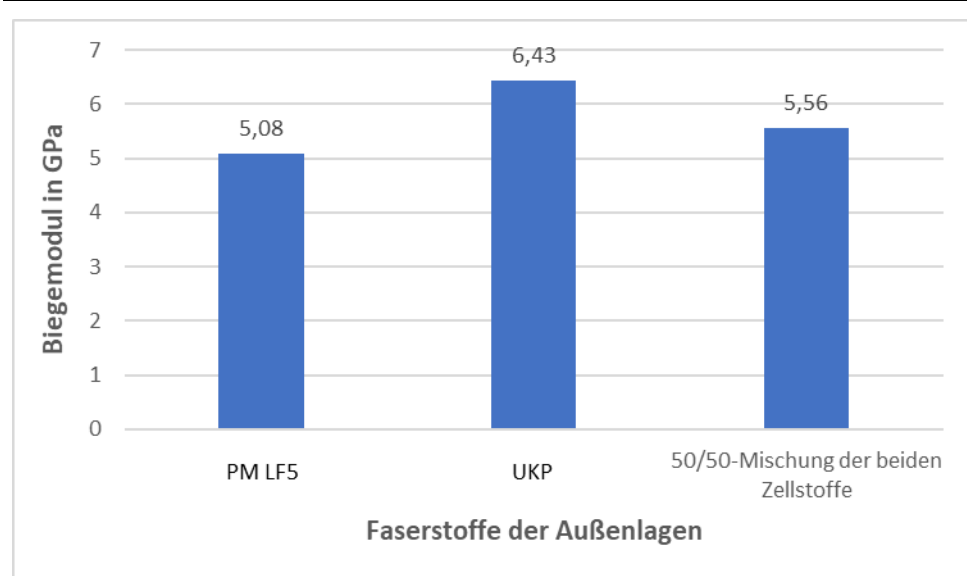


Abb. 9-9: Biegemodul der Laborkartons in Abhängigkeit des Materials der Außenlagen

Im Vergleich zur Verwendung von gebleichtem Langfaserzellstoff PM LF5 ist beim Einsatz von ungebleichtem Langfaserzellstoff UKP eine Zunahme des Biegemoduls um 27 % festzustellen. Bei Verwendung der 50/50-Mischung liegt der Wert ziemlich genau mittig zwischen den Werten der einzelnen Faserstoffe. Somit ist das UKP klar zu bevorzugen. Es ergab sich dabei jedoch nur eine Gesamtdicke von 325 μm , weshalb die Grammatur der Einzelschichten anschließend auf 97/87/97 g/m^2 erhöht wurde.

Es ergab sich damit eine Biegesteifigkeit von 29,54 Nmm, was bezogen auf die Dicke einem Biegemodul von 6,2 GPa entspricht. Die Faserorientierung ist bei der Laborblattbildung gleich in alle Richtungen der Blattebene. Durch eine zukünftige maschinelle Herstellung des Materials ist eine noch höhere Steifigkeit in Maschinenrichtung zu erwarten.

Die Umsetzung der Rezeptur an der PTS-eigenen Versuchspapiermaschine war aufgrund einer Limitierung der produzierbaren Grammatur nicht möglich. Es wurde daraufhin ein 3-lagiger Industriekarton (siehe Abschnitt 5.2.2) identifiziert, welcher nur ein etwas geringeres Biegemodul (5,6 GPa) aufweist. Die Dicke von 495 μm ist gerade noch verarbeitbar mit dem geplanten Rotationsstanzprozess. Durch die höhere Dicke als beim entwickelten Laborkarton lag die breitenbezogene Biegesteifigkeit bei ca. 55 Nmm.

Optimierung der Flammseigenschaften der zellstoffbasierten Papiervariante (FM1)

Die Optimierung der Flammseigenschaften der Kartons erfolgte nach Ausschluss der festen Flammenschutzmittel (siehe Abschnitt Vorversuche) mit verschiedenen flüssigen Systemen mittels Imprägnierung auf einer Leimpresse (siehe Abschnitt 5.2.5).

Es kam ein Industriekarton zum Einsatz, welcher mit verschiedenen Flammenschutzmitteln imprägniert wurde; es handelte sich um die modifizierte Flammschutzstärke (siehe Abschnitt 5.2.1) und 2 Industrieprodukte KFSM-1, KFSM-2. Die Auftragsbedingungen wurden auf die jeweilige Lösung angepasst und sind in Tabelle 9-1 aufgeführt.

Tab. 9-1: Auftragsbedingungen der eingesetzten Flammenschutzmittel

Flamm- schutzmit- tel	Walzen- druck Leim- presse [N]	Geschwindig- keit Leim- presse [m/min]	Feststoff- gehalt der Lösung [%]	Anzahl der Imprägnie- rungen
Flamm- schutzstärke	200	2,5	41,4	1; 2; 4
KFSM-1	1000	2,5	32	2; 3
KFSM-2	1000	2,5	25	2; 3

Nach der Imprägnierung wurde das jeweilige Verhalten im vereinfachten Brandversuch (siehe Abschnitt 5.2.6) und das dazugehörige Biegemodul bestimmt. Tabelle 9-2 zeigt die Ergebnisse; als Referenz dient jeweils der unausgerüstete Karton (Biegemodul = 5,6 GPa).

Tab. 9-2: Ergebnisse der imprägnierten Kartons

Flamm- schutz- mittel	Anzahl Imprägnie- rungen	Anteil FSM [%]	Brandverhalten	Biege- modul [GPa]	Verände- rung Bie- gemodul [%]
Flamm- schutz- stärke	1	4,9	brennt langsamer als Referenz	5,86	+ 4,6
	2	7,2	selbsterlöschend	5,95	+ 6,3
	4	14,8	nicht entflamm- bar	5,26	- 6,1
KFSM-1	2	5,2	brennt langsamer als Referenz	5,58	- 0,4
	3	7,2	selbsterlöschend	5,64	+ 0,7
KFSM-2	2	5,2	brennt langsamer als Referenz	4,43	- 20,8
	3	9,8	selbsterlöschend	3,34	- 40,4

Die Daten zeigen, dass alle 3 eingesetzten Flammenschutzmittel die Brennbarkeit deutlich herabsetzen. Ab einer Auftragsmenge von ca. 7 – 10 % wurden die Proben selbsterlöschend, d. h. nach der Entzündung brennen die Proben nur kurz und die Flamme erlischt deutlich vor dem Erreichen der Zielmarke. Die Probe mit einem besonders hohen Anteil an Flammenschutzstärke war nicht entflammbar, sondern verkohlte nur leicht bei Kontakt mit der Flamme.

Der Einfluss der Flammenschutzmittel auf den Biegemodul war recht unterschiedlich. Die Flammenschutzstärke zeigte bis zur zweimaligen Imprägnierung eine leicht versteifende Wirkung; nach der 4-maligen Imprägnierung ging die Steifigkeit jedoch zurück. KFSM-1 hatte nahezu keinen Einfluss auf die

Materialsteifigkeit (im Bereich der Fehlertoleranz), was positiv zu bewerten ist. KFSM-2 zeigte eine deutliche Reduzierung des Biegemoduls, weshalb vom weiteren Einsatz abgesehen wurde.

Es bleibt somit festzuhalten, dass sowohl die Flammenschutzstärke als auch KFSM-1 geeignete Flammenschutzmittel darstellen, welche gleichermaßen wirksam sind und sich wenig bis gar nachteilig auf die Materialsteifigkeit auswirken.

Im Anschluss erfolgten orientierende Prüfungen nach der Norm DIN 4102-1 Stufe B1 und B2 als Dienstleistung bei der MPA Dresden GmbH. Zunächst wurden Tests zur Erreichung der Stufe B1 durchgeführt, wofür lange Teststreifen (190 x 1000 mm) mit rund 11 % Flammenschutzstärke imprägniert wurden. Die Ergebnisse sind Tabelle 9-3 zu entnehmen.

Tabelle 9-3: Prüfergebnisse in Anlehnung an DIN 4102-1 B1

Flamm- schutz- mittel	Anteil FSM [%]	Restlängen		Max. Flammen- höhe [cm]	Rauchgas- temperatur [°C]
		Einzel- werte [cm]	Mittelwert [cm]		
Flamm- schutz- stärke	10,5	0; 0; 0; 0	0	> 100	379
	11,4	0; 0; 0; 0	0	> 100	417
<i>Anforderung Norm (B1)</i>		> 0	≥ 15		< 200

Die Ergebnisse der Prüfung (Stufe B1) zeigen, dass die nötigen Zielwerte noch verfehlt wurden. Die verwendete Menge an Flammenschutzmittel war somit nicht ausreichend und eine weitere Optimierung mit höherem Flammschutzmittelan- teil oder Kombinationen von verschiedenen Flammenschutzmitteln ist notwendig.

Anschließend erfolgten Tests zur Erreichung der Stufe B2. Die erhaltenen Er- gebnisse sind in Tabelle 9-4 dargestellt.

Tabelle 9-4: Prüfergebnisse in Anlehnung an DIN 4102-1 B2

Flamm- schutz- mittel	Anteil FSM [%]	Flächenbeflammung		Kantenbeflammung	
		Flammen- spitze an Mess- marke [s]	Größte Flammen- höhe [mm]	Flammen- spitze an Mess- marke [s]	Größte Flammen- höhe [mm]
Refe- renz, ohne	-	15	> 200	5	> 200
Flamm- schutz- stärke	4,9	18	180	8	> 200
	7,7	nein	95	16	160
	8,8	nein	100	15	190

Tabelle 9-4 (Fortsetzung): Prüfergebnisse in Anlehnung an DIN 4102-1 B2

Flamm- schutz- mittel	Anteil FSM [%]	Flächenbeflammung		Kantenbeflammung	
		Flammen- spitze an Mess- marke [s]	Größte Flammen- höhe [mm]	Flammen- spitze an Mess- marke [s]	Größte Flammen- höhe [mm]
KFSM- 1	6,2	15	> 200	5	> 200
	11,7	nein	90	5	> 200
<i>Anforderung Norm (B2)</i>		<i>> 20 oder nein</i>		<i>> 20 oder nein</i>	

Die Norm DIN 4102 Stufe B2 konnten nahezu erreicht werden, insbesondere durch den Einsatz von Flammschutzstärke mit Anteilen von 7,7 % und mehr. Die gezeigten Werte deuten darauf hin, dass die Stufe B2 erreichbar ist. Voraussichtlich ist dies mit einem Anteil von ca. 10 bis 15 % möglich. Zur Überprüfung sind weitere Tests notwendig.

Entwicklung des Hochleistungspapiers (FM2)

Die Entwicklung erfolgte nicht im Labor, sondern direkt an der Versuchspapiermaschine, da besonders im Fall von anorganischen Fasern die Faserausrichtung und das Fasergefüge entscheidend für die Performance sind. Die Herstellung wird im folgenden Abschnitt 10 beschrieben.

Fazit

Im Verlauf der Arbeiten von AP 4 wurden wichtige Erkenntnisse zum Aufbau mehrlagiger Kartons als biegesteifes Kernmaterial für HyPerWeaves gesammelt und eine entsprechende Rezeptur entwickelt. Durch die eingeschränkten Herstellungsmöglichkeiten an der Versuchspapiermaschine der PTS wurde zudem ein geeigneter 3-lagiger Industriekarton identifiziert, welcher passende Eigenschaften als Kernmaterial für HyPerWeaves aufweist.

Es wurden zudem geeignete Flammschutzmittel hergestellt bzw. von Industriepartnern bezogen, die eine gute Wirksamkeit ohne negative Effekte auf die Steifigkeit besitzen. Speziell das biobasierte Entwicklungsprodukt (Flammschutzstärke) besitzt das Potential, die Stufe B2 nach DIN 4102 zu erreichen.

10 Papierprozessentwicklung auf der Versuchspapiermaschine – PTS (vgl. Arbeitspaket 5)

10.1 Vorgehen

Ziel

In diesem Arbeitsschritt sollte Rollenware verschiedener Papiere an der PTS-eigenen Versuchspapiermaschine mit den benötigten mechanischen Eigenschaften erzeugt werden. Die Papierrollen sollten ausführlich charakterisiert werden und dienen als Ausgangspunkt für den Zuschnitt von Papierbändern in AP 8.

Durchgeführte Arbeiten

Zur Herstellung von Hybridmaterial mit anorganischen Fasern war es notwendig, auch ein großen Teil Zellstoff einzusetzen, der für die nötige Bindung und damit auch eine gute Materialfestigkeit und Steifigkeit sorgt. Als anorganische Faserkomponente wurden Schnitffasern aus Basalt (Kurzschnitt 6 mm) gewählt, welche eine hohe Steifigkeit im Vergleich zu anderen anorganischen Fasern wie z. B. Glas aufweisen. Daneben kam ein Langfaserzellstoff zum Einsatz, der gezielt gemahlen wurde

Das Verhältnis der Gewichtsanteile von Basaltfaser zu Zellstoff wurde variiert (30:70 und 50:50). Um auf die nötigen hohen Papierdicken zu kommen, wurde die Versuchspapiermaschine in Duplexfahrweise betrieben.

Die einzelnen Herstellungsschritte sind in Abbildung 10-1 dargestellt.



Abb. 10-1: Verschiedene Abschnitte der Erzeugung des Hybridmaterials an der Versuchspapiermaschine der PTS

10.2 Ergebnisse

Herstellung des Spezialpapiers (Zellstoff-Basalt-Hybrid)

Das Hybridmaterial wurde in beiden Mischungsverhältnissen erfolgreich als Rollenware produziert. Die beiden Varianten sind in Abbildung 10-2 (links) dargestellt. Für die weitere Laserbearbeitung im Rolle-zu-Rolle-Verfahren im Rahmen von AP 8 wurden die breiten Rollen in schmalere zugeschnitten.



Abb. 10-2: Hybridmaterial nach der Herstellung auf der Versuchspapiermaschine: die beiden Varianten in voller Rollenbreite (45 cm, links), für Laserbearbeitung zugeschnittene Schmalrolle (Breite 12 cm, rechts)

Die Hybridmaterialien wurden schließlich auf ihre Eigenschaften hin untersucht (siehe Tabelle 10-1).

Tab. 10-1: Wesentliche Eigenschaften der beiden Varianten des Hybridmaterials im Vergleich zum Industriematerial (Zellstoff)

Eigenschaft	Variante VPM1	Variante VPM2	Referenz (Industriekarton)
Basalt-Zellstoff-Verhältnis (Masse)	30:70	50:50	-
Anzahl Lagen	2	2	3
Grammatur [g/m ²]	196	193	255
Dicke [µm]	345	341	495
Biegesteifigkeit, MD [Nmm]	10,4	10,0	55,1
Biegemodul, MD [GPa]	3,04	3,02	5,6

Die Steifigkeit war erwartungsgemäß niedriger als bei der zellstoffbasierten Referenz. Die Werte zwischen beiden Hybridvarianten unterschieden sich jedoch nur geringfügig, weshalb für den Laserzuschnitt und die Webversuche die Variante VPM2 mit dem höheren Anteil an Basaltfaser gewählt wurde.

Die festgestellte Steifigkeit war ausreichend für die Verarbeitung und die Ausbildung des Kerns im Demonstrator. Die finale Versteifung erfolgte durch anschließende Phenolharzbeschichtung.

Fazit

Auf der Versuchspapiermaschine wurde erfolgreich ein Hybridpapier entwickelt und hergestellt, welches sich als Kernmaterial für HyPerWeaves eignete. Das Material wurde lasertechnisch mit dem in AP 6 entwickelten Verfahren in die entsprechende Bänderform gebracht und vom ITM auf seine Verarbeitbarkeit getestet. Schließlich wurden damit erste Demonstratoren in AP 8 angefertigt.

11 Technologie für konturierte, definiert faltbare Papierbänder – PTS, ITM (vgl. Arbeitspaket 6)

11.1 Vorgehen

Ziel

In diesem AP sollte herausgefunden werden, inwiefern sich die vorher bestimmten Bearbeitungstechnologien (Lasertechnik, Rotationsstanzen) für die Herstellung von Papierbändern mit vorgegebener Geometrie und Faltstellen eignen. Dazu wurden die Schneid- bzw. Stanzparameter variiert und die beiden Prozesse an unterschiedlichen Materialien getestet.

Durchgeführte Arbeiten - ITM

Mittels Untersuchungen an einer Zugprüfmaschine wurden in Druckversuchen die Parameter hinsichtlich einer bestmöglichen Umformung der Papierbänder im Webprozess untersucht.

Dabei wurden unterschiedliche Schnitttiefen und Faltwinkel hinsichtlich der Umformkraft und der geometrischen Ausformung der Papierbänder untersucht.

Durchgeführte Arbeiten - PTS

Die PTS beschäftigte sich mit der Laserbearbeitung von Kartons. Es wurde sowohl der Zuschnitt der Papierbänder als auch die Vorbereitung der Faltstellen betrachtet. Die Papierbänder wurden dafür nicht komplett voneinander getrennt, sondern mittels Perforation und Schwächung für einen Trennvorgang unter möglichst geringer Kraft an der Webmaschine vorbereitet. Die praktischen Versuche erfolgten nach den Vorstellungen der PTS bei einem Laserbearbeiter, die über geeignete Lasersysteme (CO₂-Laser) verfügen.

Anhand von Mustermaterial wurden die verschiedene Bearbeitungsmethoden (Schnitt, Materialabtrag, Perforation) von der PTS vorgegeben und schließlich vom Laserbearbeiter umgesetzt. Die Auswertung erfolgte mittels neuentwickelter Trennversuche und der Faltwiderstandsprüfung.

11.2 Ergebnisse

Untersuchung der Papierbänderfaltung

Zur Entwicklung konturierter und definiert faltbarer Papierbänder, mit denen im Webprozess die neuen HyPerWeave-Strukturen hergestellt werden können, wurden die in den AP 2 und AP 3 entwickelten Faltgeometrien und die simulati- onsgestützt ermittelten prozesstechnischen Vorgaben auf Zuschnitt und Falt- stellenvorbereitung (Schwächung durch partiellen Einschnitt) der entwickelten Papiere mittels Laserbearbeitung bzw. Rotationsstanzen übertragen. Für die Validierung der Simulationsergebnisse aus AP 3 wurden bei der PTS zunächst Parameterstudien an vorhandener Laborausüstung für beide Bearbeitungsstra- tegien (Stanzvorrichtung, Laborlaser) mit den FM1 und 2 durchgeführt. Dafür wurden die vorhandenen Geometrieinformationen aus den vorigen AP in Infor- mationen für den Zuschnitt und die Faltstellenvorbereitung der Papierstreifen für die Faltversuche in ein SolidWorks-Modell überführt. Anschließend erfolgte der Zuschnitt von Papierstreifenproben an einem vorhandenen Ultraschall-Plotter mit unterschiedlichen Ritztiefen. Die geschnittenen und geschwächten Proben wurden für uniaxiale Druckversuche in Papierstreifenlängsrichtung geschnitten und im Prüflabor des ITM geprüft (siehe Abbildung 11-1).

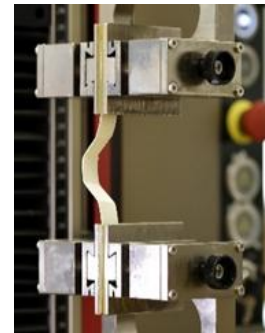
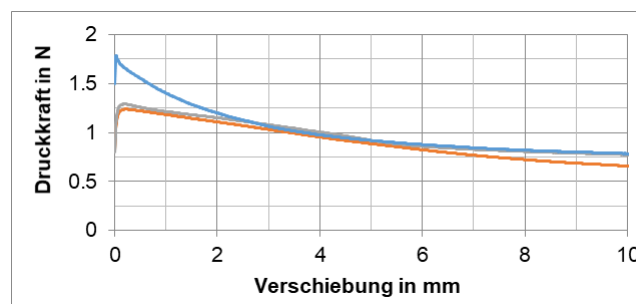


Abb. 11-1: Prüfung des Faltverhaltens der Papierbänder

Es erfolgte die Bewertung der Prüfergebnisse anhand der Kraftmessdaten und Bildauswertung des Deformationsverhaltens (Faltung vs. Biegung). Anhand die- ser Zwischenergebnisse wurden einerseits die technologischen Vorgaben für die Beschaffung der Rotationsstanzvorrichtung (ITM, AP 7) für die Integration in die Webmaschine abgeleitet. Als Bestlösung wurde bezüglich der Schwächung bei einem 0,5 mm starken Papier eine Schnitttiefe von 0,3 mm ermittelt. Die Er- gebnisse wurden anschließend in AP 3 und AP 4 zur Validierung bzw. Steue- rung der Materialentwicklung übergeben.

Anpassung der Stanzgeometrie an Rotations- stanzprozess

Auf Basis der ermittelten Vorzugsparemeter für den partiellen bzw. den komplet- ten Schnitt wurde ein geeignetes Layout für das Stanzblech (siehe Abbildung 11-2) unter Berücksichtigung notwendiger funktionaler Flächen für Faltung, Streifentrennung und Zwischenräume für abbindende Kettfäden im Webfach und in Abstimmung mit den Ergebnissen aus AP 9 generiert.

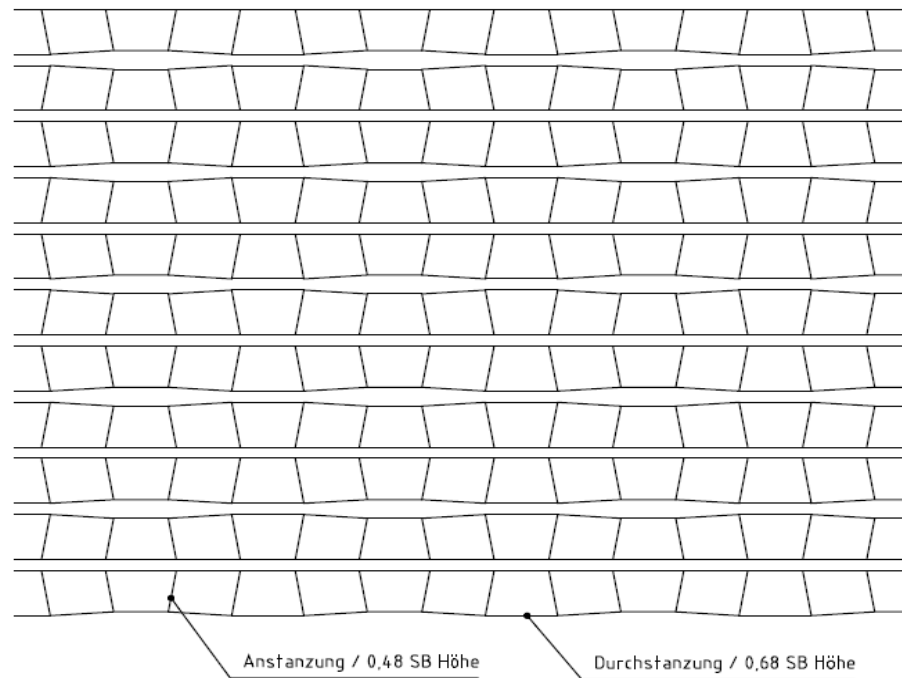


Abb. 11-2: Layout für Stanzblech

Die Stanzblechhöhe (SB Höhe) sorgt mit den unterschiedlichen Höhen entweder für die Schwächung des Materials oder das komplette Durchtrennen.

Konzeption Rotationsstanzaggregat

Auf Basis der ermittelten benötigten Schnitttiefen für die Faltung und Trennung der Papierbänder wurde das Anforderungsprofil an das Rotations- und Stanzaggregat konkretisiert und ein Lastenheft zur Ermöglichung der Einbindung des Aggregats in den Webprozess erstellt.

Zur Gewährleistung einer höchstmöglichen Flexibilität wurde das Stanzmodul mit einer Magnetwalze entwickelt (siehe Abbildung 11-3).

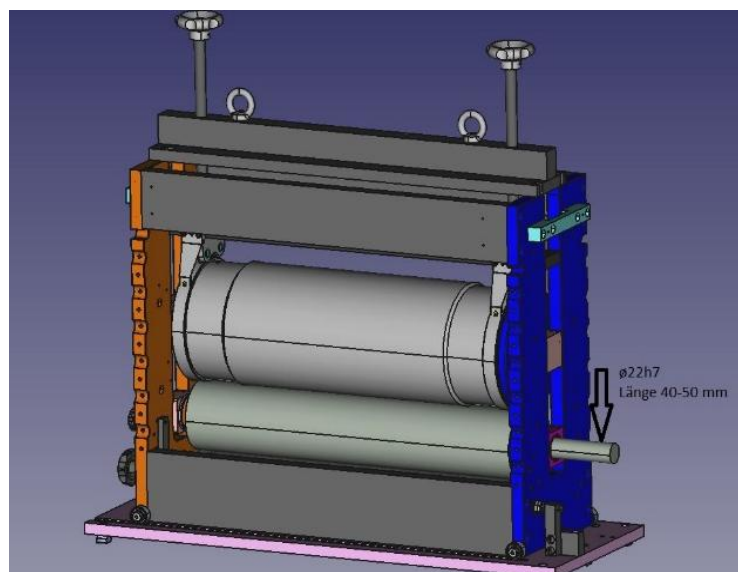


Abb. 11-3: Modell des Stanzaggregats

Durch die Verwendung einer Magnetwalze wird die Arbeit mit unterschiedlichen Stanzblechen für unterschiedliche Stanzgeometrien ermöglicht.

Anschließend wurde das entwickelte Konzept des Stanzaggregats konstruktiv umgesetzt und dem ITM für Versuche zur Verfügung gestellt.

Vorbereitung von Faltestellen durch partielle Einschnitte (Stanzen)

In dem Stanzblech wurden, gemäß den Ergebnissen der faltversuche (AP 3) bei unterschiedlichen Schnitttiefen, unterschiedliche, anforderungsgerechte Einschnittgeometrien integriert, sodass die faltprozesse definiert ablaufen können. Es wurde eine Reststärke von 0,2 mm für die Vorbereitung der Faltestellen eingestellt.

Entwicklung geeigneter Trenn- und Faltnetze über die Laserbearbeitung

Die Entwicklung erfolgte an einem Testmaterial (Kraftliner, Grammat: 275 g/m², Dicke: ca. 380 µm). Für nachfolgende falt- und trennversuche an der PTS wurden Proben mit folgenden Dimensionen bearbeitet:

- Zum Falten: 80 mm x 38 mm
- Zum Trennen: 120 mm x 80 mm

Bei den Proben musste insbesondere auf die Orientierung der Struktur in Bezug zur Strichrichtung und die Position der jeweiligen Struktur geachtet werden, siehe hierzu auch Abbildung 11-4.

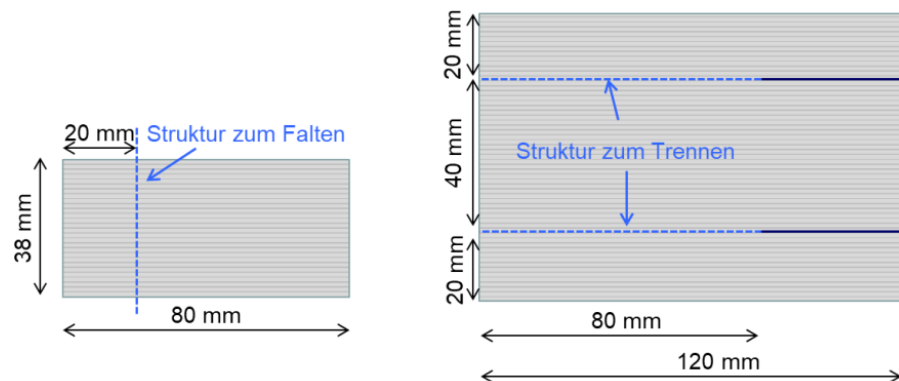


Abb. 11-4: Probengeometrie für faltversuche (links) bzw. trennversuche (rechts)

Folgende Strukturen wurden von der PTS für die Laserbearbeitung vorgegeben:

Strukturen zum Falten:

- Gravur:
 - Breite: 4 mm bzw. 2 mm
 - Tiefe: 15 %, 20 % und 30 % der Materialdicke
- Perforation:
 - Loch: ca. Ø 1,5 mm mit Steg 1 mm
 - Langloch: 1 mm x 3 mm mit Steg 1 mm

Strukturen zum Trennen:

- o Langloch (2,7 x 0,5 mm), dazwischen Stege 0,3 mm
- o Langloch/Steg wie vorher mit geschwächtem Steg

Die Herstellung der Proben erfolgte im gepulsten Modus mit einer Pulsdauer $\tau = 400$ ns bei einer Pulsfrequenz $f_p = 10$ kHz. Laut den Vorversuchen und den Erfahrungen des blz bei der Laserbearbeitung von Papier ist diese Parameterkombination am besten geeignet, um die thermische Schädigung des Papiermaterials zu minimieren.

Bei den Faltpunkten lag der Fokus des Laserstrahls auf der Oberfläche des Papiermaterials. Für die Faltpunkte wurden die Parameter in Tabelle 11-1 verwendet. Die eingebrachten Strukturen in die Faltpunkte sind in Abbildung 11-5 dargestellt. Durch die eingebrachten Strukturen wurde das Material an der jeweiligen Stelle geschwächt. Bei der „Gravur_15 %“ bspw. wurde das Material um 15 % seiner Materialdicke reduziert.

Tab. 11-1: Prozessparameter zur Bearbeitung der Faltpunkte

Variante	Mittl. Leistung P_{av} [W]	Hatchabstand dy [μm]	Scangeschwindigkeit v [m/s]	Überfahrenanzahl n
Gravur_15%	49	200	1,2	1
Gravur_20%	49	200	1	1
Gravur_30%	49	200	0,8	1
Perforation_Loch	36	-	0,8	7
Perforation_Langloch	49	-	0,8	25



Abb. 11-5: In Faltpunkten eingebrachte Strukturen: a) Gravur mit einer Breite von 2 mm, b) Gravur mit einer Breite von 4 mm, c) komplette Probe mit Lochstruktur und d) Langlochstruktur

Aus den Ergebnissen der Faltpunktprüfung ging hervor, dass der sogenannte Faltpunkt die besten (niedrigsten) Werte bei einem Materialabtrag (Gravur) von 30 % zeigte. Der Faltpunkt gibt den prozentualen Wert des Faltpunktstands im Vergleich zum unbearbeiteten Ausgangsmaterial an. Der Faltpunktstand ging auf 39 % des Ausgangswerts zurück. Die Zugfestigkeit blieb dabei

zu 52 % erhalten. Die Proben mit der breiteren Gravur (4 mm) zeigten keine Vorteile gegenüber der Gravur von 2 mm Breite. Die beiden Perforationsvarianten zeigten höhere (schlechtere) Werte beim Faltfaktor und eine geringere Zugfestigkeit.

In den Optimierungsversuchen (siehe nächster Abschnitt) wurden anhand dieser Erkenntnisse Bearbeitungsbreiten von 1 und 2 mm und ein größerer Materialabtrag (40 bis 55 %) untersucht um den Faltwiderstand an der bearbeiteten Stelle weiter zu senken.

Aufgrund der unterschiedlichen Wärmeakkumulation bei den verschiedenen Langlochgeometrien für die Falt- und Trennproben war bei den Trennproben eine Anpassung der Prozessparameter notwendig (siehe Tabelle 11-2). Des Weiteren erfolgte die Bearbeitung defokussiert bei einer Fokuslage von $dz = 4$ mm. Durch die Defokussierung vergrößerte sich der Bestahlungsdurchmesser und somit die Ablations- bzw. Schnittbreite, außerdem war dadurch eine gezieltere Einstellung des Energieeintrags möglich.

Tab. 11-2: Prozessparameter zur Bearbeitung der Trennlinien

Variante	Mittl. Leistung P_{av} [W]	Scangeschwindigkeit v [m/s]	Überfahrtenanzahl n
Schnitt	49	0,9	15
Langloch	49	0,9	10
Langloch mit geschwächtem Steg	49	0,9	10
	49	0,9	1

Für die Trennversuche wurden in die Trennproben Schnitte eingebracht, die dann in die geforderte Trennstrukturen, d. h. Langlöcher ohne bzw. mit geschwächtem Steg, übergehen (siehe Abbildung 11-6).

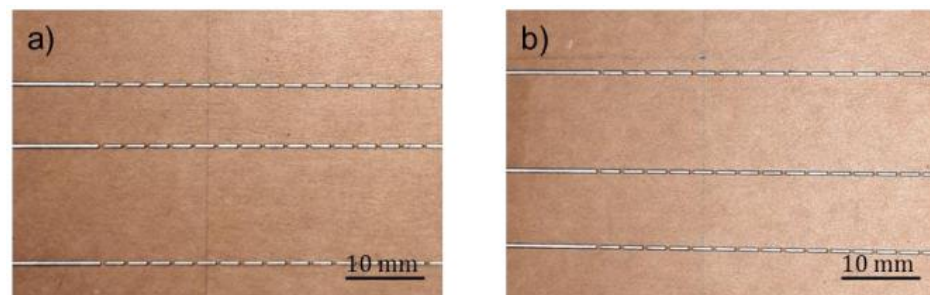


Abb. 11-6: In Trennproben eingebrachte Strukturen: a) Durchschnitt und Langlöcher und b) Durchschnitt und Langlöcher mit geschwächten Stegen

Zur Bestimmung der Trennkräfte wurde zunächst ein Peelversuch (Siegelnahtfestigkeit, DIN 55529) genutzt. Es wurde dadurch klar, dass die Perforation mit Schwächung (Verringerung der Dicke) besser geeignet war (Mittelwert Maximalkraft: 3,0 N) als ohne Schwächung (Mittelwert Maximalkraft: 3,8 N). Das Prüfverfahren wurde anschließend im Rahmen der Optimierung noch besser an die

Fragestellung angepasst. Dazu wurde nachfolgend eine deutlich größere Schwächung (bis zu 85 % der Materialdicke) untersucht.

Optimierung der Trenn- und Faltlinien

Aufgrund der Erkenntnisse aus den ersten Untersuchungen wurden die Zielparаметer für die Trenn- sowie Faltlinien weiter verfeinert. Folgende Vorgaben wurden verwendet:

- Strukturen zum Falten: Gravur
 - Breite: 2 mm bzw. 1 mm
 - Tiefe: 40 % und 55 % der Materialdicke
- Strukturen zum Trennen: Langloch mit geschwächtem Steg
 - Schwächung um ca. 70 % bzw. ca. 85 % der Materialdicke

Die Herstellung der optimierten Proben für Faltversuche erfolgte ebenfalls im gepulsten Modus mit einer Pulsdauer $\tau = 400$ ns bei einer Pulsfrequenz $f_p = 10$ kHz. Der Fokus des Laserstrahls lag bei den Faltproben auf der Oberfläche des Papiermaterials und es wurden die Prozessparameter aus Tabelle 11-3 verwendet. Bei diesen Faltproben wurden die Parameter je nach Gravurbreite unterschiedlich gewählt, da die auftretende Wärmeakkumulation während der Laserbearbeitung das Bearbeitungsergebnis beeinflusste. Die eingebrachten Strukturen in die Faltproben sind in Abbildung 11-7 dargestellt.

Tab. 11-3: Optimierte Prozessparameter zur Bearbeitung der Faltlinien

Gravurbreite [mm]	Gravur	Mittl. Leistung P_{av} [W]	Scangeschwindigkeit v [m/s]	Überfahrenanzahl n
1	Gravur_40%	42	1,1	1
	Gravur_55%	42	0,9	1
2	Gravur_40%	40	1	2
	Gravur_55%	45	1	2

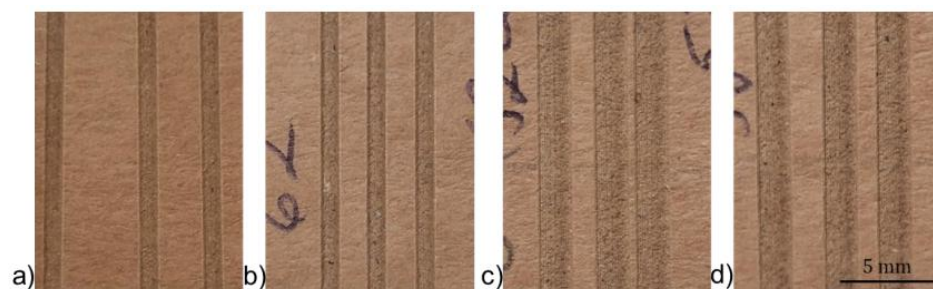


Abb. 11-7: In Faltproben eingebrachte Strukturen: Gravur mit einer Breite von 1 mm: a) Schwächung um 40 % der Materialdicke und b) Schwächung um 55 % der Materialdicke sowie Gravur mit einer Breite von 2 mm: c) Schwächung um 40 % der Materialdicke und b) Schwächung um 55 % der Materialdicke

Die Ergebnisse der Faltwiderstandsmessungen zeigten, dass eine Gravurbreite von 1 mm für ein gutes Faltergebnis ausreichte. Der Faltfaktor konnte mittels Materialabtrag um 55 % auf bis zu 14 % gesenkt werden, wodurch jedoch auch

die Zugfestigkeit auf 32 % des Ausgangswert zurückging. Ein geeigneter Materialabtrag liegt bei ca. 50 % um eine einfachere Faltung und ausreichend Restfestigkeit zu erhalten.

Da das Trennverfahren an der PTS nach den ersten Versuchen optimiert wurde, kam eine angepasste Probengeometrie zum Einsatz (siehe Abbildung 11-8).

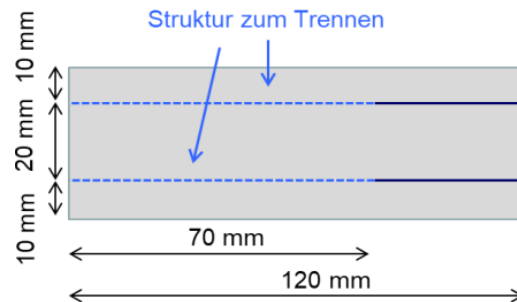


Abb. 11-8: Angepasste Probengeometrie für Trennversuche

Um das Trennen zu erleichtern, sollte die Schwächung bei den Trennproben auf 70 % bzw. 85 % der Materialdicke erhöht werden. Hierzu wurde die Anzahl der Überfahrten im Vergleich zu den ersten Parametern in Tabelle 11-4 erhöht. Die neuen Parameter sind in Tabelle 11-4 aufgeführt. In Abbildung 11-9 sind die in Trennproben eingebrachten Strukturen dargestellt.

Tab. 11-4: Optimierte Prozessparameter zur Bearbeitung der Trennlinien

Variante	Mittl. Leistung P_{av} [W]	Scangeschwindigkeit v [m/s]	Überfahrtenanzahl n
Durchschnitt	49	0,9	12
Langloch	49	0,9	10
Schwächung des Stegs um 70 %	49	0,9	3
Schwächung des Stegs um 85 %	49	0,9	4

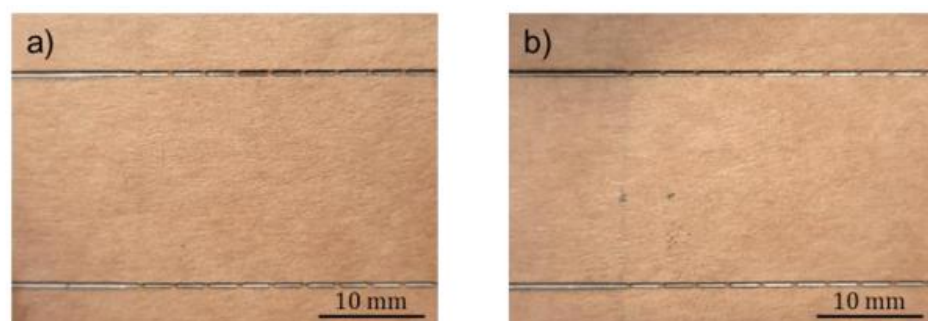


Abb. 11-9: In Trennproben eingebrachte Strukturen: a) Durchschnitt und Langlöcher mit geschwächten Stegen um 85 % der Materialdicke und b) Durchschnitt und Langlöcher mit geschwächten Stegen um 70 % der Materialdicke

Messungen der Trennkraft wurden daraufhin nach dem optimierten Verfahren mit dem selbstentwickelten Metallrahmen (siehe Abschnitt 5.2.7) durchgeführt. Dabei wurde bei 70 % Materialabtrag (Restdicke ca. 100 μm) eine durchschnittliche Maximalkraft von 6,0 N bestimmt, während bei 85 % Materialabtrag (Restdicke ca. 50 μm) die durchschnittliche Maximalkraft bei 3,0 N lag. Im letztgenannten Fall kam es jedoch teilweise zur Trennung vor der eigentlichen Messung. Somit ist eine Restdicke von rund 100 μm zu bevorzugen.

Anpassung der Prozessparameter an das Hybridpapier

Für die Bearbeitung des Hybridmaterials aus 50 % Zellstoff und 50 % Basaltfaser mussten die Einstellungen des Lasers speziell an die Basaltkomponente angepasst werden. Eine wesentliche Herausforderung bestand darin, dass der Zellstoff eine deutlich niedrigere Abtragsschwelle aufweist als die Basaltfasern. Dadurch ragen freiliegende Basaltfaserenden in die erzeugten Strukturen, siehe Abbildung 11-10. Des Weiteren war die Materialdicke der Rollenware (siehe AP 5) lokal sehr ungleichmäßig, d. h. eine angestrebte Schwächung des Materials (zum späteren, erleichterten Trennen) führte teilweise zum kompletten Durchschneiden, wodurch die Handhabung des Rollenmaterials negativ beeinflusst wurde.

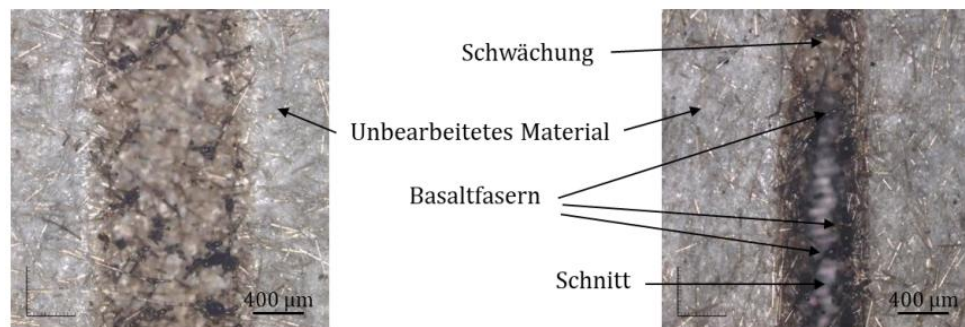


Abb. 11-10: Aufnahmen des laserbearbeiteten Spezialpapiers mit einem Laser-Scanning-Mikroskop: links: Gravur und rechts: Langlochschnitt mit geschwächtem Steg

Bei der Anpassung der Prozessparameter musste insbesondere die mittlere Laserleistung deutlich niedriger gewählt werden als beim konventionellen Material. Aufgrund der ungleichmäßigen Materialdicke musste ein Kompromiss zwischen den Anforderungen und den realisierbaren Strukturen gefunden werden. Letztendlich wurde folgender Parametersatz zur Bearbeitung ermittelt:

- mittlere Laserleistung: 30 W
- Gravur (zum Falten):
 - parallele Scanlinien $n_1 = 4$
 - Überfahrtenanzahl $n_F = 2$
- Schnitt:
 - Überfahrtenanzahl $n_C = 6$
- Schwächung:
 - Überfahrtenanzahl $n_{Sch} = 5$

Mit den genannten Parametern wurde am Hybridmaterial eine Gravurtiefe von 175 µm und eine Gravurbreite von 1,1 mm erhalten. Die Restdicke nach der Schwächung lag bei 115 µm. Mit den genannten Parametern wurde anschließend die Rollenware bearbeitet (siehe Kapitel 13).

Fazit

Im Laufe des AP konnten seitens der PTS die geeignetsten Parameter für die Laserbearbeitung von Kartonmaterial bestimmt werden. Bezüglich der Faltstellen stellte sich heraus, dass ein Materialabtrag bei einer Breite von 1 mm und einer Tiefe von ca. 50 % der Ausgangsdicke des Materials die besten Ergebnisse bezüglich Faltfaktor und Restfestigkeit brachte.

Für die Bearbeitung der Trennlinien stellte sich heraus, dass die Langloch-Perforation (Loch: 2,7 x 0,5 mm; Steg 0,3 mm, geschwächt auf ca. 100 µm) dazu geeignet war, ein leichtes Auftrennen in der Anwendung zu ermöglichen, wobei sich die einzelnen Papierbänder jedoch noch nicht vorzeitig lösten.

Es wurde zudem eine geeignete Anlage zum gleichzeitigen partiellen Einschnitt und kompletten Durchschnitt der Papierbahnen in Bänder gemeinsam mit einer Firma aus dem projektbegleitenden Ausschuss entwickelt und erfolgreich erprobt.

Diese Erkenntnisse aus diesem AP dienen zur Anfertigung der laserbearbeiteten Rollenware sowie dem prozessintegrierten Rotationsstanzprozess für die Demonstratorherstellung in AP 8.

12 Entwicklung der Webtechnologie für HyPerWeaves – ITM (vgl. Arbeitspaket 7)

12.1 Vorgehen

Ziel

Ziele von AP 7 waren die Entwicklung der HyPerWeave-Webtechnologie für die simultane Fertigung der gewebten Deckflächen und die webprozess-integrierte Auffaltung des Papierkernes mittels einer Greiferwebmaschine mit Schafffachbildung und Linearabzug.

Durchgeführte Arbeiten

Für die Zufuhr der Papierbahn bzw. der lasertechnisch vorgeschnittenen Papierbänder wurde eine vorhandene Kettablass-Einrichtung konstruktiv-technologisch erweitert, sodass auf dieser das aufgewickelte Material anforderungsgerecht eingespannt werden konnte. Für das Stanzen und den partiellen Einschnitt der Papiere des FM1 wurde entsprechend den Ergebnissen eine Rotationsstanzvorrichtung beschafft, die nicht zur Grundausstattung des ITM gehört. Diese wurde antriebs- und steuerungstechnisch als Zusatzmodul zwischen Papierzuführung und Fachbildung in die Webmaschine integriert und mit den ermittelten Parametersätzen (Vorspannung, Stanzluft, Warenschwindigkeit, Einlaufwinkel) eingestellt. Für die Fachbildung zur Bildung der Decklagen wurden Einseitenweblitzen entwickelt, die eine Herstellung der Decklagen, ohne Kollision der Litzen mit den Papierbändern ermöglichen. Die Bindungen aus AP 2 wurden in die Webmaschinensteuerung übertragen und um notwendige Zusatzfunktionen sowie Regel- und Steuerparameter ergänzt. Das Auffalten der

Papierbänder im Webprozess wurde über die folgenden zwei Lösungsansätze realisiert:

1) Längengesteuerter Rückzug der Kettfäden: Die Gewebeabschnitte wurden mit eingebundenen Papierbändern im Blattanschlag aufgeschoben und die Papierbänder aufgefaltet.

2) Lanzetten und Ausformhilfen: Die fortlaufend gebildeten zwei Gewebelagen wurden durch diese voneinander separiert und die verbindenden Papierbänder aufgefaltet.

Für den Technologienachweis der neuen Webtechnologie wurden die FM3 und 4 hergestellt. Dazu wurde die Webmaschine mit den im AP 1 festgelegten und beschafften Kett- und Schussmaterialien für die Deckflächen (Papierbänder für FM3 und Glasrovings für FM4) sowie den vorbereiteten Papierbändern für den Kern eingerüstet. Anhand der Entwicklungen wurden Versuchsträger zur Erprobung der Fixierung angefertigt. Im Ergebnis des AP 7 waren die Maschinenperipherie, Materialzuführung, Fachbildung und der Prozess zur Herstellung der HyPerWeaves erfolgreich umgesetzt sowie die ersten Funktionsmuster hergestellt.

12.2 Ergebnisse

Entwicklung des Gesamtverfahrens für die webtechnische Herstellung der HyPerWeaves

Im AP 7 erfolgte die Entwicklung der HyPerWeave-Webtechnologie für die simultane Fertigung der gewebten Deckflächen und die webprozess-integrierte Auffaltung des Papierkernes mittels einer Greiferwebmaschine mit Schafffachbildung und Linearabzug. Alle Entwicklungen erfolgen gemäß den Richtlinien VDI 2222-1 und 2225-3. Zunächst wurde eine geometrische und technologische Maschinenanalyse durchgeführt. Das Ergebnis dieser Analyse war, dass die Herstellung ausschließlich gemäß des in Abb 12-1 dargestellten Gesamtaufbaus technologisch möglich ist.

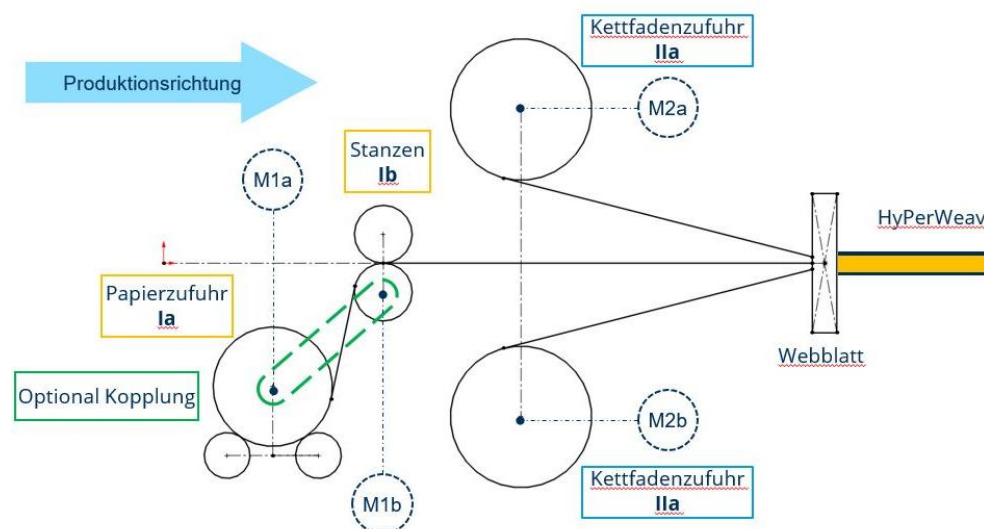


Abb. 12-1: Entwickelter Gesamtaufbau der Webtechnologie für die Herstellung von HyPerWeaves

Der entwickelte Gesamtaufbau zeigt die Zuführung der Papierbänder in Kettrichtung zwischen den Kettfadenlagen des Ober- und Untergewebes. Die Steuerung der Papierzufuhr erfolgt durch Integration eines Kettablassmotors der Webmaschine und eines Kettfadenzugkraftsensors in den Papierbänderlauf. Somit wird die Spannung auf den Papierbändern durch die Webmaschinensteuerung geregelt.

Da in diesem technologischen Ablauf eine geometrische Überdeckung der Papierbänder mit der Einhängung von Standardlitzten zur Bildung der Decklagen der HyPerWeaves zwangsläufig resultiert, werden Einseiten-Weblitzen für die Herstellung der Decklagen entwickelt (siehe nächstes Kapitel).

Die in AP 2 als Bestlösung für die Flächendichte in den Decklagen und die mustergerechte Anbindung der Papierbänder an die Decklagen ermittelte Rips-Bindung wurde in die Webmaschinensteuerung übertragen und um die im Anbindungspunkt notwendigen Regulatorstopps ergänzt. Das Auffalten der Papierbänder im Webprozess erfolgt durch einen längengesteuerten Rückzug der Kettfäden mittels der Ansteuerung der Kettbäume. Dabei werden die Gewebebereiche mit den durch Schussfäden lokal eingebundenen Papierbändern im Blattanschlag aufgeschoben und die Papierbänder aufgefaltet. Als Ausformhilfe wurde 3D-gedruckte Lanzetten entwickelt, die die fortlaufend gebildeten zwei Gewebelagen voneinander separieren und die verbindenden Papierbänder falten (siehe Abbildung 12-2).

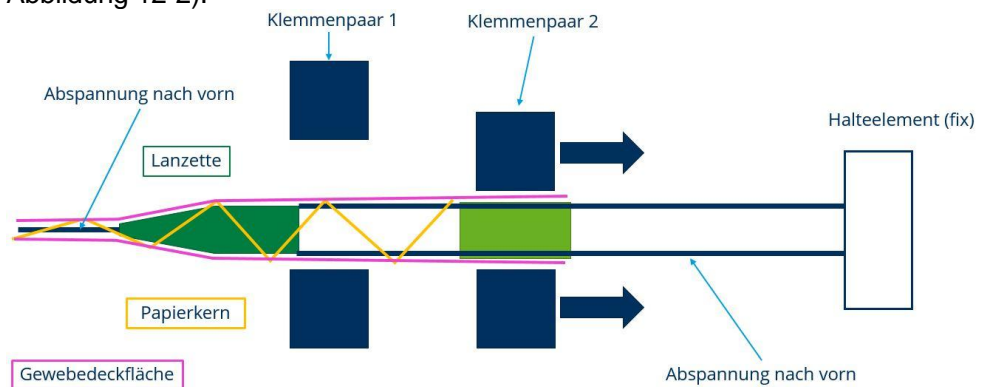


Abb. 12-2: Ausformhilfen und Abzugssystematik

Entwicklung der Einseiten- und Bänderweblitzen

Für die Fachbildung mit den Papierbändern wurden in Zusammenarbeit mit der Firma DERIX zwei neue Litzensysteme (1. Bänderlitzten für eine kollisionsfreie Führung der Papierbänder sowie 2. Einseitenlitzten für die Herstellung der Decklagen der HyPerWeaves) entwickelt.

Um die Papierbänder im Kettfadenlauf der Webmaschine stabil und drehungsfrei zu führen und die Anbindung mit den Gewebelagen zu ermöglichen, wurden Doppelweblitzen entwickelt, umgesetzt und in der Webmaschine verbaut (siehe Abbildung 12-3).

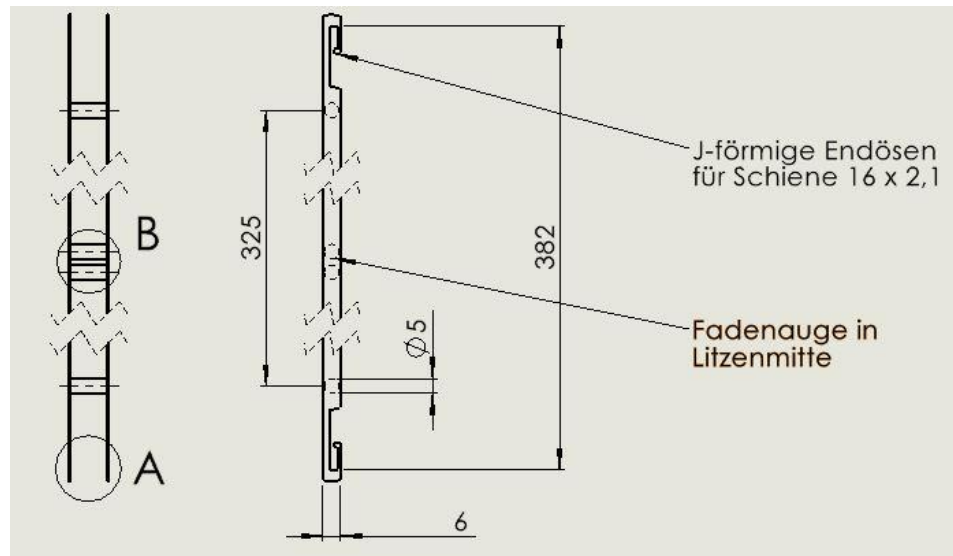


Abb. 12-3: Doppelweblitze

Da für die Herstellung der Gewebelagen aufgrund der Kollision mit den Papierbändern keine Standardlitzen verwendet werden können, wurden zusätzlich Einseitenweblitzen entwickelt. Diese Litzen sowie die Anordnung der beiden Litzentypen in der Webmaschine sind in Abbildung 12-4 dargestellt.

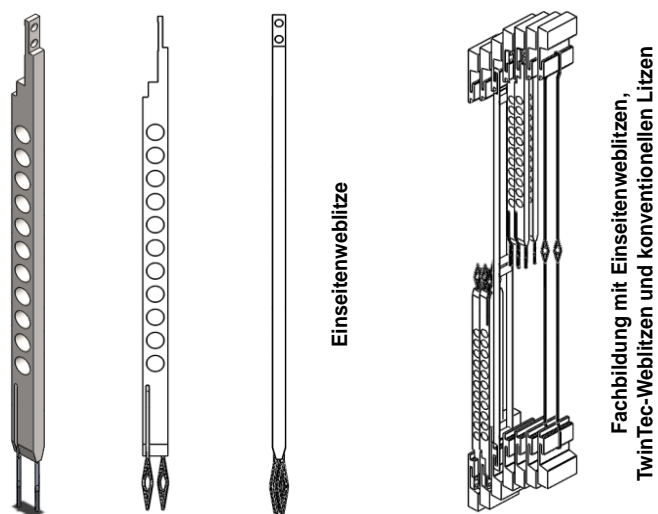


Abb. 12-4: Einseitenweblitze und Fachbildung

Mit den technologischen Entwicklungen ist die Fachbildung, die Bildung der Decklagen und die Anbindung der Papierbänder an die Decklagen ermöglicht. Nachfolgend wird die Integration des Rotationsstanzaggregates in die Webmaschine entwickelt.

Erweiterung der Materialzuführung für das Rotationsstanzaggregat

Für die Integration des Rotationsstanzaggregates in die Webmaschine wurde die Entwicklung der Papierzuführung auf Basis des Gesamtaufbaus der Webtechnologie systematisch fortgeführt. So wurde die Papierzuführung detailliert ausgearbeitet (siehe Abbildung 12-5).

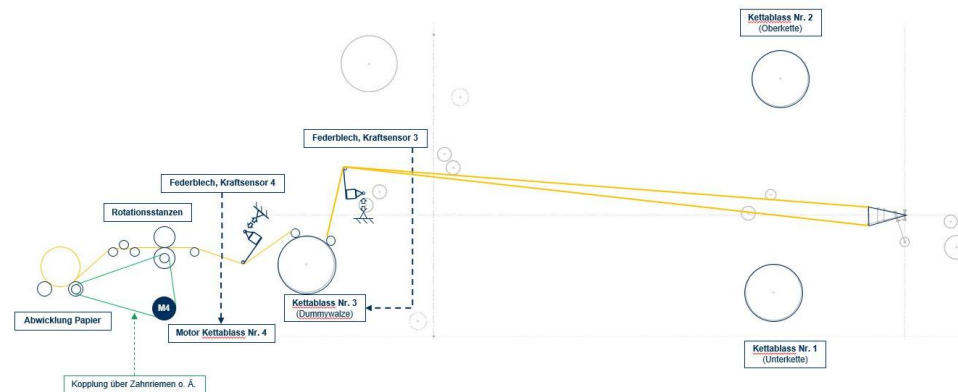


Abb. 12-5: Detaillierte Papierzuführung an der Webmaschine

Darauf aufbauend wurde ein Gestell für das Rotationsstanzaggregat entwickelt, mit dem die geometrische, technologische und steuerungstechnische Integration des Aggregats in die Webmaschine realisiert wird (siehe Abbildung 12-6).

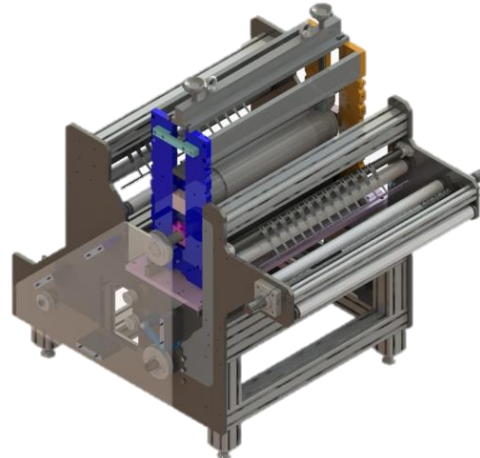

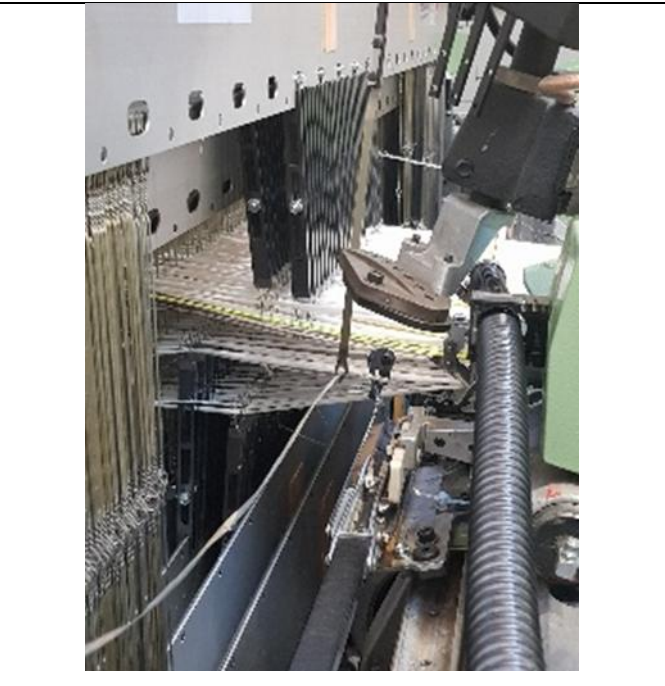



Abb. 12-6: Gestell für Rotationsstanzaggregat

Die entwickelten Lösungen für die Teilprozesse wurden anschließend an der Webmaschine appliziert und hinsichtlich der Funktionserfüllung erfolgreich getestet. Dazu wurde die Webmaschine mit Glasfilamentgarn (2400 tex) als Kettmaterial für die Deckflächen und dem Industriekarton eingerüstet.

Tab. 12-1: Webmaschinenkonfiguration für HyPerWeaves

<p>Papierzuführung (links: Gestell mit Rotationsstanzaggregat, rechts: Papierzuführung zur Fachbildung)</p>	
<p>Fachbildung</p>	
<p>Gewebeabzug</p>	

Somit ist die anforderungsgerechte Papierbereitstellung und die Inline-Fertigung der HyPerWeaves auf der Webmaschine gewährleistet

Herstellung der Funktionsmuster

Die neue Webtechnologie wurde anschließend für die Herstellung der Funktionsmuster verwendet. Die in AP 2 entwickelte Vorzugslösung für die Bindung wurde erprobt sowie die Webmaschineneinstellungen (Kettfadenspannung, Fachschluss, Abzug) systematisch an das Materialverhalten während des Blattanschlages und des Fachwechsels angepasst. Dabei ist vor allem das sehr unterschiedliche Materialverhalten der Glasfilamentgarne und der Papierbänder hinsichtlich der Zugelastizität eine signifikante Herausforderung. Auch die Einstellung der Webschäfte bezüglich der Positionierung der Einseitenlitzen ist von enormer Wichtigkeit, da bei Kollision der Einseiten-Weblitzen mit den Papierbändern das Papier sehr schnell zerreißt und eine Neueinrichtung der Webmaschine notwendig wird.

Mit der entwickelten Webanlage wurden die Funktionsmuster hergestellt (siehe Abbildung 12-7).



Abb. 12-7: Musterherstellung auf der Webmaschine

Die Herstellung der Gewebemuster zeigte, dass die entwickelte Anlage zur Herstellung der HyPerWeaves geeignet ist. Somit konnte mit der Entwicklung und Umsetzung der Demonstratoren fortgefahren werden.

Fazit

Die Entwicklung der Anlage zur webtechnischen Umsetzung der HyPerWeaves war erfolgreich. Die Herstellung der Muster hat sich mit reduzierter Maschinendrehzahl (hauptsächlich sind die geringe Zugelastizität der Papierbänder sowie die zu geringe Steifigkeit der entwickelten Konstruktion zur

Bildung der Gewebedecklagen) umsetzen lassen. Für die produktive Herstellung der HyPerWeaves ist eine steifere Anbindung der Einseiten-Weblitzen in den Webschäften elementar notwendig. Die dafür notwendige Neukonstruktion der Litzen war allerdings innerhalb der Projektlaufzeit nicht realisierbar.

13 Entwicklung, Fertigung und Bewertung der Demonstratoren – ITM, PTS (vgl. Arbeitspaket 8)

13.1 Vorgehen

Ziel Die im Projekt gewonnen Erkenntnisse dienen dazu, verschiedene Demonstratoren zu entwickeln. Diese sollten als Anschauungsobjekte dienen und damit die weiteren Schritte einer technischen Umsetzung vorbereiten. Zudem war geplant, sie als Grundlage für eine technoökonomische Bewertung heranzuziehen.

Durchgeführte Arbeiten - PTS Vonseiten der PTS wurden mit Unterstützung eines Laserbearbeiters Papierrollen vorbereitet, welche als Kernmaterial an der Webmaschine zum Einsatz kommen sollten. Die Bearbeitung erfolgte in einem Rollen-zu-Rolle-Verfahren, wodurch gezielte Faltstellen eingebracht wurden und die Papierbänder mittels Perforation leicht trennbar waren. Die Bearbeitungsparameter wurden im Rahmen des AP 6 entwickelt und werden hier angewendet.

Durchgeführte Arbeiten - ITM Für deren Entwicklung werden die in AP 2 und AP 3 entwickelten Methoden in einer CAE-Kette verknüpft und auf die konkrete Demonstrator-Entwicklung exemplarisch angewendet. Die Fixierung und Konsolidierung der HyPerWeaves zu Paneelen (DEMO1 und DEMO2) erfolgt auf Basis der Ergebnisse der zuvor hergestellten und geprüften Versuchsträger. Beide Demonstratorvarianten werden in AP 9 hinsichtlich der Druck-, Schub- und Biegeeigenschaften charakterisiert. Mit der Herstellung der Demonstratoren wurde der Meilenstein 3 erreicht.

13.2 Ergebnisse

Laserbearbeitung von konventionellem Rollenmaterial Die Bearbeitung erfolgte wie in Abschnitt 5.2.5 beschrieben. Als Material kam Rollenware des Industriekartons mit einer Grammatur von 255 g/m² und einer Dicke von 495 µm zum Einsatz, auf das die gefundenen Bearbeitungsparameter angepasst wurden. Aufgrund der Erkenntnisse aus AP 6 wurden folgende Zielwerte zum Falten bzw. Trennen vorgegeben:

Struktur zum Falten:

- Gravur, Breite: 1 mm
- Abtrag: 50 % der Materialdicke

Struktur zum Trennen:

- Langloch mit geschwächtem Steg
- Schwächung auf ca. 100 µm Restdicke

Für die Rollenbearbeitung kam das Strukturlayout (siehe Abbildung 13-1) zum Einsatz.

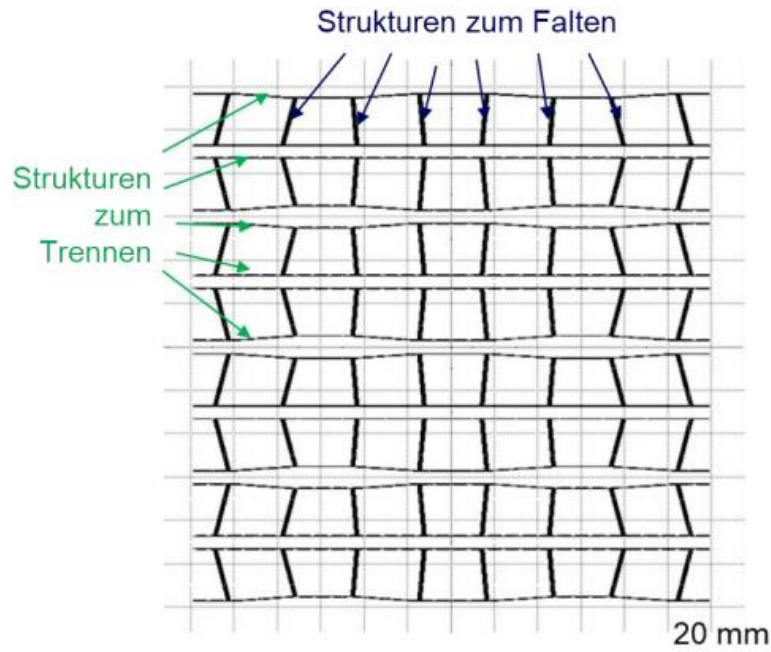


Abb. 13-1: Angepasstes Strukturlayout für die Rolle-zu-Rolle-Bearbeitung

Das Ergebnis der Bearbeitung ist in Abbildung 13-2 dargestellt.



Abb. 13-2: Bearbeitete Papierbahn mit Trenn- und Faltlinien (Industriematerial)

Die so bearbeiteten Rollen wurden vom ITM an der modifizierten Webmaschine zur Herstellung der HyPerWeaves genutzt.

Laserbearbeitung von speziellem Rollenmaterial (Zellstoff-Basalt-Hybrid)

Die Bearbeitung der Rollen des Hybridmaterials aus Zellstoff und Basaltfasern, welches im Rahmen von AP 5 entwickelt wurde, fand ebenfalls mittels des Rolle-zu-Rolle-Verfahrens statt. Das Material bestand aus 50 % Zellstoff und 50 % Basalt und hatte eine Dicke von ca. 340 µm. Die Anpassung der Prozessparameter an das Spezialpapier erfolgte an Abschnitten von einer der Spezialpapierrollen. Die Vorgaben zur Bearbeitung entsprachen den im vorigen Abschnitt gezeigten Werten. Es wurde erneut die in Abbildung 13-1 gezeigte Struktur

erzeugt. Das Ergebnis der Bearbeitung ist in den Abbildungen 13-3 und 13-4 dargestellt.



Abb. 13-3: Bearbeitete Papierbahn mit Trenn- und Faltlinien (Hybridmaterial)



Abb. 13-4: Bearbeitete Rolle aus Hybridmaterial

Auch dieses Material kam anschließend zur Herstellung der HyPerWeaves zum Einsatz.

Demonstratorherstellung

Auf Basis der Ergebnisse des AP 7 wurden die Demonstratoren (siehe Abbildung 13-5: a) Glas-Decklagen mit rein zellstoffbasiertem Papier, b) Glas-Decklagen mit Basalt-Papier und c) Verbundstruktur aus a) imprägniert mit Phenolharz) entwickelt.

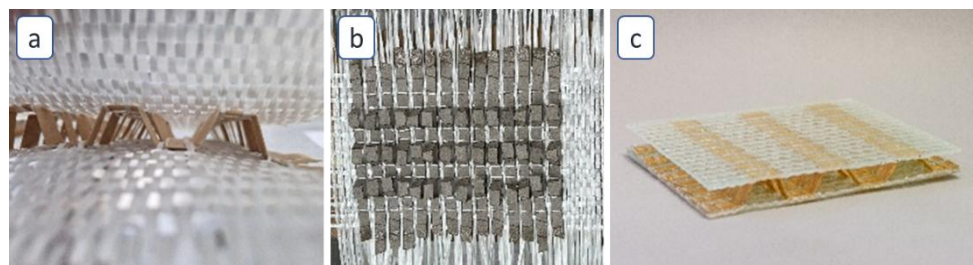


Abb. 13-5: Drei verschiedene Demonstratoren: a) Demonstrator 1 (Glas-Decklagen und Papier), b) Demonstrator 2 (Glas-Decklagen und Basaltpapier), c) Demonstrator 3 (Verbundbauteil aus Demonstrator 1, imprägniert mit Phenolharz)

Für die Entwicklung der Demonstratoren wurden die in AP 2 und AP 3 entwickelten Methoden zu einer CAE-Kette verknüpft und auf die Herstellung der Demonstratoren exemplarisch angewendet. Die Fixierung und Konsolidierung der HyPerWeaves zu Paneelen erfolgt auf Basis der Ergebnisse der zuvor hergestellten und geprüften Versuchsträger. Der konsolidierte Demonstrator wurde in AP 9 hinsichtlich der Druck-, Schub- und Biegeeigenschaften charakterisiert.

Fazit

Es wurden erfolgreich zwei unterschiedliche Gewebepreformen (Demonstratoren 1 und 2) hergestellt, von denen eine Struktur mittels Harzimpregnierung in ein Verbundbauteil (Demonstrator 3) überführt wurde. Somit wurde das angestrebte HyPerWeave-Paneel erfolgreich realisiert.

14 Charakterisierung der Materialien, Papiere, HyPerWeaves und Demonstratoren – ITM, PTS (vgl. Arbeitspaket 9)

14.1 Vorgehen

Ziel

Durch die Vielzahl an Charakterisierungsmethoden die im Rahmen dieses AP durchgeführt wurden, sollten die notwendigen Daten zur Charakterisierung von Rohstoffen, Zwischenprodukte und den finalen HyPerWeave-Paneelen gesammelt werden.

Durchgeführte Arbeiten - PTS

Die Arbeiten des AP 9 erfolgten begleitend zum Gesamtprojektfortschritt. Sie umfassen zu Beginn die Charakterisierung der Faserstoffe und Additive für die Papierentwicklung.

Die entwickelten Papiere wurden bezüglich flächenbezogener Masse, Dicke, Dichte und spezifischem Volumen geprüft. Im Rahmen von AP 4 wurden zudem Zugfestigkeit, breitenbezogene Bruchkraft und E-Modul mit der Universalprüfmaschine Inspekt 20 der Hegewald & Peschke Meß- und Prüftechnik GmbH bestimmt. Als zentraler Parameter der Papierentwicklung erfolgte die Bestimmung der Biegesteifigkeit, die insbesondere in AP 4 und 5 von Bedeutung war. In AP 4 wurden zudem Aufnahmen mit dem Rasterelektronenmikroskop gemacht um die Füllstoffverteilung zu bestimmen.

Die Bestimmung des Brandverhaltens von Papier mittels eines selbstentwickelten Versuchsaufbaus in vertikaler Richtung und mittels Untersuchungen nach DIN 4102 (MPA Dresden) dienten zur Optimierung des Brandverhaltens im Rahmen von AP 4.

Die Messung des Streifenstauchwiderstands sowie die Faltwiderstandsprüfung erfolgte zur Ermittlung der Falteigenschaften von Papierbändern mit vorbereiteten Falllinien in AP 6. Darin wurde auch die Durchreißkraft beim Trennen von Papierstreifen (selbstentwickelte Prozedur) an einer Universalprüfmaschine der Fa. Hegewald & Peschke Meß- und Prüftechnik GmbH durchgeführt.

Durchgeführte Arbeiten - ITM

Es wurden zunächst die Garne für die Gewebeerzeugung textilphysikalisch charakterisiert. Anschließend erfolgte die Prüfung des imprägnierten HyPerWeave-Demonstrators (Demonstrator 3) gemäß Tabelle 14-1.

Tab 14-1: Übersicht über Untersuchungen an den HyPerWeaves

Kennwert/Eigenschaft	Probennahme
Faservolumengehalt	Konsolidierte Deckflächen
Imprägnierqualität	Gewebe der Deckflächen
Flächenmasse	HyperWeaves
Druckeigenschaften	Demonstratoren
Schubfestigkeit	
Biegeeigenschaften	

14.2 Ergebnisse

Verwendung der Messergebnisse Die bestimmten Ergebnisse über die genannten Methoden flossen in unterschiedliche AP ein um den Projektfortschritt fortlaufend zu ermöglichen.

Analytik an den Demonstratoren Es wurden Druckprüfungen mit dem HyPerWeave-Demonstrator an der Zugprüfmaschine ZwickiJunior der Firma Zwick am ITM durchgeführt (siehe Abbildung 14-1).

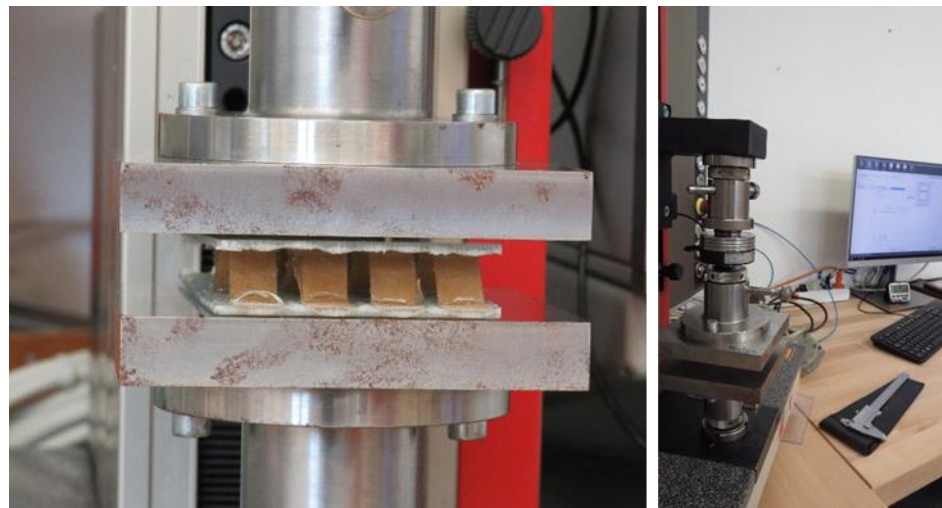


Abb. 14-1: Prüfaufbau Druckprüfungen

Das Ergebnis dieser Druckprüfungen ergab eine Maximalkraft von 1050 N auf einer Demonstratorfläche von 60 mm x 50 mm (siehe Abbildung 14-2).

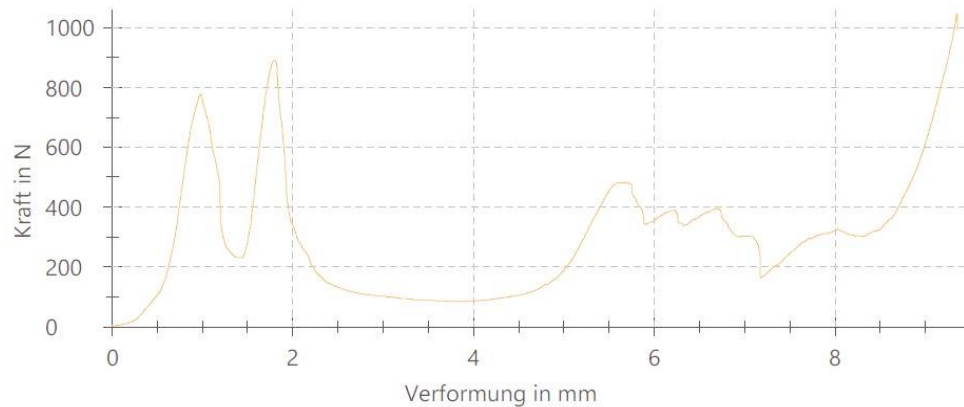


Abb. 14-2: Exemplarisches Messergebnis der Druckprüfung an HyPerWeaves

Bei einer maximalen Papierdicke von 0,6 mm, einer Streifenbreite von 12 mm, einer Streifenanzahl von 4 Stück sowie einer Stützstellenanzahl von 3 Stützstellen/Streifen ergibt sich eine maximale Stützfläche von ca. 86 mm². Somit entsteht eine Druckfestigkeit von 12 N/mm².

Des Weiteren wurden der Faservolumengehalt mittels Veraschung, die Schubfestigkeit und die Biegefestigkeit mittels Prüfungen an einer Zugprüfmaschine sowie die Imprägnierqualität mittels Schliffbildern analysiert.

Auf Basis der Veraschung von Probekörpern der HyPerWeaves konnte ein Faservolumengehalt in den konsolidierten Deckflächen von gemittelten 42,589 % ermittelt werden.

Die Schubfestigkeit der HyPerWeaves wurde gemäß dem in Abbildung 14-3 dargestellten Versuchsaufbau experimentell ermittelt.

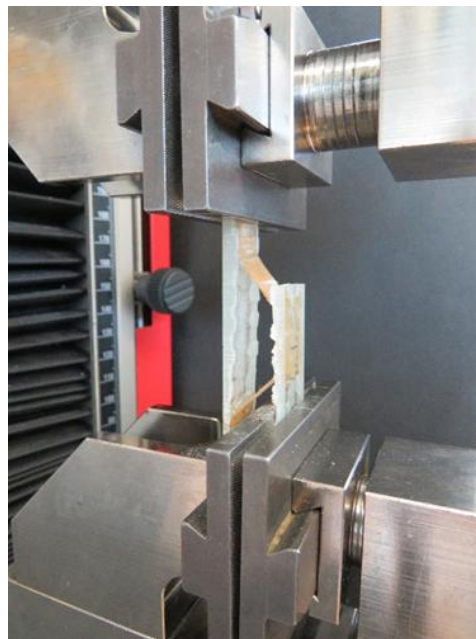


Abb. 14-3: Versuchsaufbau Schubfestigkeit

Ergebnis dieser Prüfung war eine gemittelte maximale Schubkraft von 187 N, die allerdings mit einer Streuung von 110 N einhergeht (siehe Abb. 14-4).

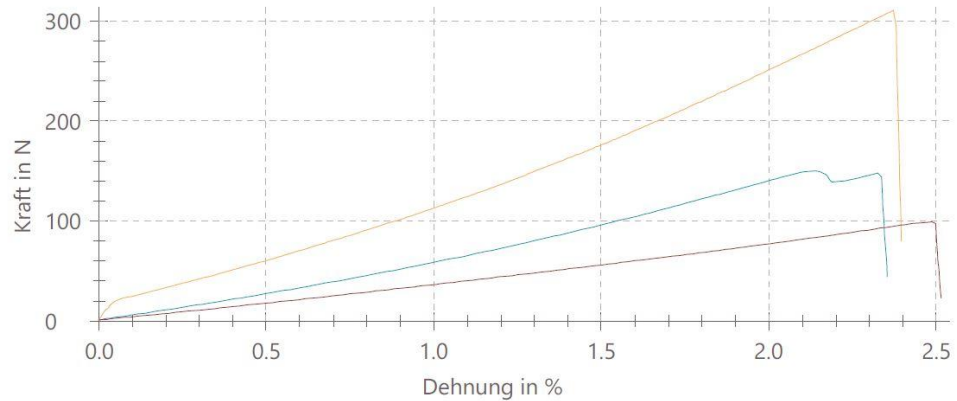


Abb. 14-4: Ergebnis Schubversuch an den HyPerWeaves

Eine Erklärung für die große Streuung liegt in der Schädigung der Papierbänder durch den Stanzprozess, der die Papierbänder während der Ausformung unterschiedlich stark schädigt.

Die Biegefestigkeit der HyPerWeaves wurde an einem Drei-Punkt-Biege-Versuchsaufbau (siehe Abbildung 14-5) ermittelt.



Abb. 14-5: Versuchsaufbau des 3-Punkt-Biegeversuchs

Als Ergebnis der 3-Punkt-Biege-Prüfung wird eine gemittelte Biege-Steifigkeit von 3,42 MPa bei den konsolidierten Proben ermittelt (siehe Abbildung 14-6).

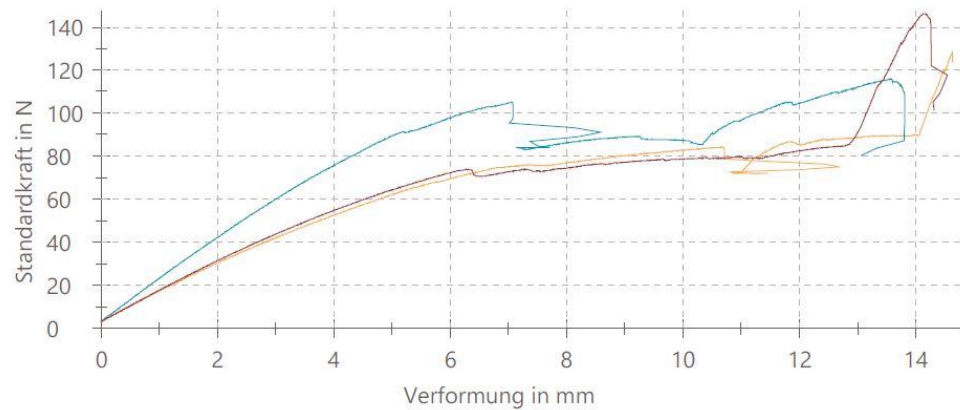


Abb. 14-6: Verlauf Schubversuch an HyPerWeaves

Auf Basis der im Antrag festgehaltenen gewünschten Eigenschaften der HyPerWeaves wurden nachfolgende Festigkeitswerte für die Demonstratoren bestimmt (siehe Tabelle 14-2).

Tab. 14-2: Vergleich der Eigenschaften der HyPerWeave-Verbunde

Aspekt	Gefordert	Erzielt
Schubfestigkeit (Verbund)	$\geq 3,0 \text{ N/mm}^2$	$2,67 \text{ N/mm}^2$ (gerechnet mit den Minimalwerten der Druckkraft)
Druckfestigkeit (Verbund)	$\geq 2,5 \text{ N/mm}^2$	12 N/mm^2

Die Ergebnisse in der Tabelle zeigen das hohe Potential der HyPerWeaves bezüglich der Druckfestigkeit. Die Schubfestigkeit bleibt nur minimal hinter den Erwartungen zurück, was durch die bereits beschriebenen Unregelmäßigkeiten im Stanzprozess und die damit verbundene Einbringung einer übermäßigen Schädigung der Papierbänder zu erklären ist. Durch eine gleichmäßigere Verarbeitung sind die geforderten Schubwerte problemlos erreichbar.

Fazit

Die Entwicklungsarbeiten wurden durch eine Vielzahl an unterschiedlichen Analysemethoden begleitet. Die Ergebnisse flossen jeweils in die einzelnen AP ein und ermöglichten die gezielte Entwicklung und Charakterisierung der Papierkernmaterialien und damit gebildeten HyPerWeaves. Als Referenz für die Entwicklung wurden die im AP 1 vorgegebenen mechanischen Eigenschaften herangezogen.

Die angepeilten Festigkeitswerte für die entwickelten HyPerWeaves wurden nahezu erreicht und können durch weitere Optimierungen übertroffen werden.

15 Wirtschaftliche Bewertung der Prozesskette, Handlungsanweisung – PTS, ITM (vgl. Arbeitspaket 10)

15.1 Vorgehen

Ziel AP 10 zielte auf eine umfassende wirtschaftliche Bewertung (inkl. Nutzwertanalyse und Wirtschaftlichkeitsbetrachtung) der entwickelten HyPerWeave-Prozesskette im Vergleich mit den vorab definierten wirtschaftlichen Zielwerten ab. In Vorbereitung auf den Transfer der Projektergebnisse für KMU sollte zudem eine KMU-gerechte Handlungsanweisung erstellt werden.

Durchführung Es wurde eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung des gesamten Herstellungsprozesses der HyPerWeaves durchgeführt. Zusätzlich wurde eine KMU-gerechte Handlungsanweisung erstellt, welche die wesentlichen Projektergebnisse zusammenfasst. Die Ergebnisse wurden bewertet, Schlussfolgerungen daraus gezogen und weitere Hinweise für eine industrielle Umsetzung abgeleitet.

15.2 Ergebnisse

Wirtschaftlichkeitsbetrachtung Im AP 10 erfolgte eine umfassende wirtschaftliche Bewertung der entwickelten HyPerWeave-Prozesskette. Hierzu wurden die Herstellkosten der HyPerWeaves unter Berücksichtigung der erforderlichen Zusatzinvestitionen ermittelt. Dabei spielen die technische Bewertung der Strukturen anhand der Prüf- und Untersuchungsergebnisse und der Vergleich der technologisch-wirtschaftlichen Leistungsfähigkeit im Vergleich mit konkurrierenden Leichtbau- und Paneeltechnologien eine übergeordnete Rolle. Die Kalkulation der Wirtschaftlichkeit des entwickelten Verfahrens wird nachfolgend erläutert. Die Kosten sind in Tabelle 15-1 aufgeführt.

Beim Luftfahrtpaneel wurden im Forschungsantrag die Materialkosten pro 1 m² für den Wabenkern und die GFK-Prepreg-Decklagen zusammen mit 40 € und für ein HyPerWeave-Paneel (z. B. DEMO2, Tabelle 3-1) mit 5 € für den Papierkern und 8 € für die GFK-Decklagen (GF-Garne, Harzdeckschicht) angenommen. Die Personalkosten werden mit 30 € beim Luftfahrtpaneel (Layup, Zuschnitt, Handhabung) und für das HyPerWeave-Paneel, aufgrund der im Vergleich zur Zielstellung reduzierten Webmaschinendrehzahl mit 37 € (Rüstvorgänge, Abtafeln) berücksichtigt. Die Maschinenkosten sind auf die notwendigen Investitionen für die Verarbeitung der Papierbahn bezogen (Investition ca. 170.000 €, Laserzuschnitt Hochleistungspapier) und betragen ca. 10 € pro 1 m² HyPerWeave (1,5 m²/h Produktionsleistung, Einschichtbetrieb, 80 % Nutzungsgrad). Bei gleichem Aufwand in der Konsolidierung (50 €/m²) ergeben sich direkte Kosten von 120 € (Stand der Technik) und 110 € (HyPerWeave-Paneel). Dies entspricht einer Ersparnis von ca. 10 % pro m². Bei einer möglichen jährlichen Marktbeteiligung in der Anlaufphase von 735.000 € (Annahme: 1,5 % von 49 Mio. € potenziellem Marktvolumen) wird vorsichtig eingeschätzt,

dass sich bei einem Einsparpotenzial von jährlich 73.500 € die notwendigen Investitionen somit innerhalb von 3 Jahren amortisieren können.

Tab. 15-1: Kosten der Herstellung von herkömmliche Luftfahrtpaneelen im Vergleich zum HyPerWeave-Paneel

Teilaspekt	Kosten für übliches Luftfahrtpaneel [€/m ²]	Kosten für HyPerWeave-Paneel [€/m ²]
Materialkosten	40	13
Personalkosten	30	37
Maschinenkosten	-	10
Konsolidierungskosten	50	50
Gesamtkosten	120	110

Die zu erwartenden Investitionskosten in neue Geräte und Anlagen werden weiterhin als durch KMU sehr gut finanzierbare Investitionen eingeschätzt. Es werden bestehende Anlagen genutzt (Papierherstellung) oder modifiziert (Rotationsstanzaggregat in industriell etablierten Webmaschine für ca. 20.000 €). Je nach Technologie und Anwendung beträgt die Amortisationsdauer somit maximal 36 Monate. Durch eingesparte Prozessschritte, wie die Wabenkernherstellung, nachträgliche Brandschutzimprägnierung oder das (meist manuelle) Verkleben von Kern und Decklagen, wird die gesamte Prozesskette deutlich vereinfacht und damit wirtschaftlicher.

Handlungsanweisung

Die Handlungsanweisung enthält die wesentlichen Projektergebnisse. Dabei handelt es sich um folgende Teilaspekte:

- Struktur- und Bindungsentwicklung
- Simulationsgestützte Auslegung der HyPerWeaves
- Herstellung der Ausgangspapiere
- Flammschutzausrüstung der Papiere
- Erzeugung der Papierbänder
- Einrichten der Webmaschine
- Webprozess
- Nachbehandlung der HyPerWeaves

Fazit

Das Ergebnis der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zeigt, dass das Verfahren, trotz reduzierter Produktionsleistung im bestehenden Stand der Technik mehr als nur konkurrenzfähig ist. Zusätzlich dazu ist der Vorteil der formschlüssigen Anbindung der Decklagen an die Kernstruktur hinsichtlich des Bauteilversagens bei mechanischer Beanspruchung der Paneele ein Türöffner für neue Anwendungen.

Die erstellte Handlungsanweisung ist der Ansatz für eine zügige Überführung der Projektergebnisse in industrielle Produkte.

16 Schlussfolgerungen

Überblick wesentlicher Ergebnisse

Papierentwicklung

Die Entwicklung geeigneter Papiere aus Zellstoff, die sich insbesondere als Kernmaterial von HyPerWeaves eignen, fand zunächst am Laborblattbildner an der PTS statt. Dabei wurden umfangreiche Kenntnisse zur Papierzusammensetzung sowie zum Lagenaufbau mehrlagiger, mechanisch stabiler, steifer, gut verarbeitbarer Papiere ermittelt. Schließlich konnte eine Rezeptur für optimierte 3-lagige Papiere gefunden werden, die sich gut für den Einsatz als Kernmaterial eigneten. Des Weiteren wurde ein geeignetes 3-lagiges Industriematerial identifiziert, welches sich hinsichtlich Steifigkeit und Verarbeitbarkeit ebenfalls für die Herstellung von HyPerWeaves eignet.

Für die flammenhemmende Ausrüstung der Zellstoffpapiere wurden verschiedene industriell verfügbare sowie experimentelle Flammenschutzmittel getestet. Insbesondere eine modifizierte Stärke stellte sich als wirkungsvoll heraus und ist zudem ein nachhaltiges, biobasiertes Produkt.

An der Versuchspapiermaschine (VPM) der PTS wurde zudem erfolgreich ein Hybridmaterial aus Basalt- und Zellulosefasern entwickelt, welches das Potential für den zukünftigen Einsatz in HyPerWeaves für höchste Ansprüche insbesondere bezüglich der Flammfestigkeit mit sich bringt.

Papierzuschnitt

Die Herstellung von speziell zugeschnittenen Bändern wurde ausführlich im Rahmen des Projekts untersucht. Nach Erarbeitung einer geeigneten Bändergeometrie mit vorbereiteten Faltsstellen wurden die beiden geplanten Verfahren (Zuschnitt über Lasertechnologie und über Rotationsstanzen) evaluiert. Beide Verfahren stellten sich als prinzipiell geeignet heraus. Das Rotationsstanzverfahren konnte direkt in den Webprozess integriert werden.

Prozessentwicklung

Die Entwicklung der textilen Prozesskette auf Basis der Webtechnik am ITM der TU Dresden umfasste die Integration eines Rotationsstanz-Aggregats in einen Gewebeerstellungsprozess, die textiltechnologische Entwicklung der Decklagen für die neuartigen Leichtbau-Paneele mittels Lanzettenweben, das Aufstellen der flach gewebten Strukturen innerhalb der Webmaschine mittels Faltenrückzug und den anforderungsgerechten Abzug der aufgestellten Abstandsgewebestruktur mittels eines Linearabzugs. Hierfür wurden zunächst systematisch Lösungsvarianten entwickelt und diese anschließend anhand der in der Anforderungsliste gesammelten Entwicklungswünsche bewertet und eine Vorzugslösung ermittelt. Diese Vorzugslösung wurde abschließend an der Webmaschine umgesetzt, technologisch erprobt und für die Herstellung der Gewebemuster und Demonstratoren eingesetzt.

Resümee

Im Laufe des Projekts wurden erfolgreich die zuvor geplanten Themen bearbeitet. Es konnten verschiedene Papiermaterialien entwickelt bzw. identifiziert werden, die sich als Kernmaterial für HyPerWeaves eignen. Für zellstoffbasierte Papiere wurden geeignete Flammschutzmittel identifiziert. Auch die Möglichkeiten zur Herstellung von Papierbändern wurden erfolgreich untersucht. Zudem wurde ein Webverfahren entwickelt mit dem die Herstellung von Hybridstrukturen aus Glasfasern und Papiermaterialien für Leichtbau-Paneele möglich ist. Diese Hybridstrukturen kann als guter Startpunkt für eine Industrialisierung des Verfahrens dienen.

17 Durchführende Forschungsstellen

Forschungsstelle 1: Forschungstiftung der Papierindustrie (PTS)
Pirnaer Straße 37
01809 Heidenau

Leiter der Forschungsstelle: Dr. Thorsten Voß
Projektleiter: Dr. Cornell Wüstner

Forschungsstelle 2: Technische Universität Dresden
Institut für Textilmaschinen und Textile Hochleistungswerkstofftechnik
(ITM)
Hohe Str. 6
01069 Dresden

Leiter der Forschungsstelle: Prof. Dr.-Ing. habil. Dipl.-Wirt. Ing. Chokri Cherif
Projektleiter: Dr.-Ing. Martin Kern

18 Literaturverzeichnis

- [1] Anonym: Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung zur Umsetzung des Klimaschutzplans 2050, https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/klimaschutzprogramm_2030_umsetzung_klimaschutzplan.pdf, (15.07.2020).
- [2] DINGES, K.; FÖRSTER, S.; BECKER, D.; HAZRAT, M.; GÜL, S.; JOHNSON, D.; EICHHORST, U.; JANSEN, U.; THOMAS, S.; THOLEN, L.; SCHÄFER-SPARENBERG, C.; SUERKEMPER, F.; KNOR, D.; WEIß, U.; SCHMOLCK, B.; LEUSER, L.; PEHNT, M.; DUSCHA, M.; FEHR, J.; WOYWODE, A.: Weiterentwicklung der Energieeffizienzpolitiken zur Erreichung der Klimaschutzziele der Europäischen Union bis 2050. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt, September 2017.
- [3] Rat der Europäischen Union: Emissionsenkung: Rat nimmt CO₂-Emissionsnormen für Lkw an, <https://www.consilium.europa.eu/de/press/press-releases/2019/06/13/cutting-emissions-council-adopts-co2-standards-for-trucks/> Brüssel: 13.06.2019.
- [4] OBERMANN, C.: Das Organoblech und seine Märkte. In: CCeV Thementag, Thermoplastprozesse 2019. Chemnitz, 28.05.2019.
- [5] HOHMANN, A.: Ökobilanzielle Untersuchung von Herstellungsverfahren für CFK-Strukturen zur Identifikation von Optimierungspotentialen Systematische Methodik zur Abschätzung der Umweltwirkungen von Fertigungsprozessketten. - ISBN 978-3-8439-4159-4.
- [6] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie: Leichtbau. <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Dossier/leichtbau.html>, (12.08.2020).
- [7] SCELSI, L.; BONNER, M.; HODZIC, A.; SOUTIS, C.; WILSON, C.; SCAIFE, R.; RIDGWAY, K.: Potential emissions savings of lightweight composite aircraft components evaluated through life cycle assessment. *Express Polymer Letters* 5(2011)3, S. 209–217.
- [8] Leichtbau BW GmbH: Mit Konzeptleichtbau ungenutzte Potenziale heben. Verbandsveröffentlichung, Stuttgart: Leichtbau BW GmbH, 2019.
- [9] KIENZLE, S.; RUDLAFF, T.: Future Vehicle Body Concepts. In: Tagung Werkstoffplus Auto. Stuttgart, Februar 2017.
- [10] HENNING KROGH: Leichtbau für E-Autos ist zu teuer. *Automobilwoche* 15, S. 22.
- [11] European Bioplastics, nova Institute: Global production capacities of bioplastics. <https://www.european-bioplastics.org/news/multimedia-pictures-videos/>, (23.07.2020).
- [12] CARUS, M.; EDER, A.; SCHOLZ, L.: Bioverbundwerkstoffe. Gülzow-Prüzen: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR), 2015.
- [13] BEUS, N.; CARUS, M.; BARTH, M.: Carbon Footprint and Sustainability of Different Natural Fibres for Biocomposites and Insulation Material. Hürth: nova-Institut GmbH, April 2019.
- [14] STARLINGER, A.: Sandwich Structures. Vortrag, Zürich, ETH Zürich, 2015.
- [15] Firma Schütz GmbH & Co. KGaA: CORMASTER® Wabentypen. <https://www.schuetz-composites.net/de/>, aufgerufen 24.08.2020.
- [16] Firma Foldcore GmbH. <http://www.foldcore.eu/>, aufgerufen am 24.08.2020.
- [17] Firma PolymerPark GmbH. <https://polymerpark.de/>, aufgerufen am 24.08.2020
- [18] SOMMER, H., HORNFECK, CH., Sandler AG (Hg.): Manufacturing of thermoplastic composite sandwich structures based on nonwoven polymeric materials. Tagungsbeitrag ADDITC 2019, Dresden, 28.11.2019.
- [19] TORSAKUL, S.: Modellierung und Simulation eines Verbundes von Sandwichplatten zur Entwicklung einer mechanischen Verbindungstechnik. Aachen: RWTH Aachen, Institut für Allgemeine Konstruktionstechnik. Dissertation, 2007.

- [20] HEIDA, J.; PLATENKAMP, D.: In-Service Inspection Guidelines for Composite Aerospace Structures. In: 18th World Conference on Nondestructive Texting. Durban: 16-20. April 2012.
- [21] SCHULTZ, M., ET AL: Buckling Design and Imperfection Sensitivity of Sandwich Composite Launch-Vehicle Shell Structures, 2016
- [22] AIMAN, D. P. C.; YAHYA, M. F.; SALLEH, J.: Impact properties of 2D and 3D woven composites. AIP Conference Proceedings 1774(2016) 1.
- [23] Statistisches Bundesamt: Produzierendes Gewerbe. https://www.destatis.de/DE/Service/Bibliothek/_publikationen-fachserienliste-4.html. (24.08.2020)
- [24] WITTEN, E.; MATHES, V.: Der Markt für glasfaserverstärkte Kunststoffe (GFK). Frankfurt: Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e. V. September 2019.
- [25] Statista GmbH: „Umsatz der deutschen Möbelindustrie nach Segmenten in den Jahren 2008 bis 2019“ <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/20281/umfrage/umsatz-in-der-moebelindustrie-nach-segmenten-seit-2008/>, (25.08.2020).
- [26] KIEL, U.; HENKE, A.: „Branchenanalyse Möbelindustrie“. Düsseldorf: Hans-Böckler-Stiftung, 2018.
- [27] Interconnection Consulting: „Sandwichpaneele bleiben trotz erhöhter Preise beliebt“, 21.02.2019, <https://www.interconnectionconsulting.com/news/sandwichpaneele/>, Interconnection Marketing u. Information Consulting Ges.m.b.H. (21.08.2020).
- [28] Statista GmbH: Kunststoffindustrie. Statistikdossier, Statista GmbH, 2019.
- [29] WAGNER, N.; CRUCIGER, CH.: Beratung zum Einsatz faserverstärkter Sandwichwerkstoffen. Mündliche Äußerung, Döbeln, 22.07.2020.
- [30] Lange + Ritter GmbH: Sandwichmaterialien - Aramidwaben. https://www.lange-ritter.de/fileadmin/user_upload/Downloads/Produkte/Sandwich/Sandwich_Aramidwaben.pdf, (17.07.2020).
- [31] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V: Charta Für Holz 2.0: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V2018.
- [32] DISSEN, G; PALM, L.; HILSE, C.: Bausatz und Einrichtungsgegenstand und Verfahren zu dessen Herstellung, Patent DE102014106608B3.
- [33] Firma Betz Dämmelemente GmbH: <https://www.betz-daemmelemente.de/> (09.07.2020).
- [34] STAMP, B.; BIEDER, H.; GREINER, R.; IWAN, S.; ZUCKER, T. NENDEL, W.: Sandwichbauteil und Verfahren zu dessen Herstellung, Patent DE102010005456A1.
- [35] TOKONABE, H.; UMEDA, K.: Vacuum heat-insulating panel and method of manufacturing the same, Patent EP1258343A2.
- [36] Forschungsprojekt BAMP! Bauen mit Papier, <https://www.tu-darmstadt.de/bauenmitpapier> (14.07.2020).
- [37] Firma SWAP (Sachsen) GmbH: <https://www.swap-sachsen.de/> (09.07.2020).
- [38] ISELI, F.: Corrugated cardboard honeycomb core, method and device for its production: Patent DE19654672A1.
- [39] Firma Yamaton Paper GmbH: <https://www.yamaton.de/en/honeycomb-boards-sandwich/> (15.07.2020).
- [40] LIPPITSCH, S.; KORN, C.; HERZBERG, M.; BRITZKE, M.; HEROLD, J. H.: Verfahren zur Herstellung von formbaren Wabenkernen, Patent DE102013008026A1.
- [41] PRICE, T.; TIMBROOK, R. L.: Structural honeycomb panel building system, Patent US6253530B1.

- [42] KLETT, Y.; DRECHSLER, K.; KOLAX, M.; WENTZEL, H. P.; KEHRLE, R.: Design of multifunctional folded core structures for aerospace sandwich applications. In: 1st CE-AS European Air and Space Conference, Berlin, 2007.
- [43] KEHRLE, R.; DRECHSLER, K.: Manufacturing of folded core structures for technical applications. In: SAMPE Europe 25th International Conference, Paris, 2004.
- [44] DOLZINSKI, W. D.; KOLAX, M.: Verfahren zur Herstellung eines beidseitig mit Deckschichten versehenen Kernverbundes sowie Kernverbund, Patent DE102008019065B4.
- [45] TREML, S.; BUDDENBER, H.; GRENZ, R.: Entwicklung nichtbrennbarer Leichtbau-Verbundsysteme auf der Basis von dünnen Brandschutzplatten mit Faserarmierung und mineralisch hochgefüllten Papieren für die Hohlraumstrukturen, AiF Abschlussbericht 16613 N, 2013.
- [46] BLECHSCHMIDT, J. (Hrsg.): Papierverarbeitungstechnik, Carl Hanser Verlag, München (2013), ISBN 978-3-446-43071-6.
- [47] KAUTEK, W.; PENTZIEN, S.; RUDOLPH, P.; KRÜGER, J.; KÖNIG, E.: Laser interaction with coated collagen and cellulose fibre composites: fundamentals of laser cleaning of ancient parchment manuscripts and paper, Appl. Surf. Sci. 127–129 (1998) S. 746–754.
- [48] FELLER, R. L.; RÄMÖ, S.: Effects of coating on laser cuttability of coated papers and boards, Master of Science Thesis, Lappeenranta University of Technology, 2004, S. 139.
- [49] CHERIF, CH. (Hg.): Textile materials for lightweight constructions. - ISBN 9783662463406.
- [50] ROYE, A.; GRIES, T.: 3-D Textiles for Advanced Cement Based Matrix Reinforcement. Journal of Industrial Textiles 37(2016)2, S. 163–173.
- [51] CURBACH, M.: Textilbeton in Theorie und Praxis, Dresden: Techn. Univ, 2011. - ISBN 978-3-86780-245-1.
- [52] STILLER, J.; SCHÄFER, K.; HELBIG, F.; TRÖLTZSCH, J.; NESTLER, D.; KROLL, L.: Material Selection and Process Configuration for Free-Form, Voluminous and Textile-Based Multi-Material-Design by the Example of a Bucket Seat. Key Engineering Materials 742(2017), S. 302–309.
- [53] SCHÄFER, K.; VALENTIN, S.; MEIER, B.; ROTH, I.; HELBIG, F.: 3D-Gewirke-Verstärkungen für neue Qualität von geschäumten Sandwichkernmaterialien. Technische Textilien - Technical Textiles 58(2015)3, S. 180–184.
- [54] HELBIG, F. U.: Druckelastische 3D-Gewirke, Saarbrücken: Südwestdeutscher Verlag für Hochschulschriften, 2011. - ISBN 978-3838126449.
- [55] TROMMER, K.; BÖHME, B.; MORGENSTERN, B.: Aufblasbare Freiformkörper durch Beschichtung dreidimensionaler Gewirke mit variablen Polfadenlängen. Gummi Fasern Kunststoffe 63(2014)11, S. 723–726.
- [56] FRANZ, CH.: New type of double-walled fibre-reinforced plastic structures in integral design for panels and pipes. In: Tectextil Forum 2019. Frankfurt am Main, Messe Frankfurt. 15.05.2019.
- [57] LIERSCH, K.; SIEGERT, D.; SCHAARSCHMIDT, H.; HAASE, S.; STEINBACH, B.: Schnittschutzeinlage aus Abstandsgewirke - der integrierte Kettensägenschutz für persönliche Schutzausrüstung., (20.09.2018).
- [58] HAUPT, M.; CHERIF, CH.; DIESTEL, O.: Entwicklung einer Pkw-Mehrkomponentenhaube mit textilen Verstärkungsstrukturen. Lightweight Design 7(2014)1, S. 10–15.
- [59] Parabeam. <http://parabeam.nl/>, (24.07.2020).
- [60] Abet Laminati. <https://abetlaminati.com/en/cataloghi/monocore-3d/>, (24.07.2020).
- [61] Frei gestaltbarer Sandwich- oder Abstandsgewebe, Technische Textilien - Technical Textiles. Technische Textilien - Technical Textiles 58(2015)1.

- [62] LÜLING, C.; IVA RICHTER, I.: Architecture Fully Fashioned - Exploration of foamed spacer fabrics for textile based building skins. *Journal of Facade Design and Engineering* 5(2017)1.
- [63] Textile Leichtbauelemente - 3dTEX. DITF Report 2017. https://www.ditf.de/files/inhalt/aktuelles/newsletter/DITF-Report-02_2017.pdf (09.09.2020).
- [64] BAUDER, H. J.: Verbesserte Funktion bei Körperschutzelementen durch Textil-Schaum-Verbunde. *Technische Textilien - Technical Textiles* 63(2020)2, S. 68–70.
- [65] MOUNTASIR, A.; HOFFMANN, G.; CHERIF, CH.; LÖSER, M.; GROßMANN, K.: Competitive manufacturing of 3D thermoplastic composite panels based on multi-layered woven structures for lightweight engineering. *Composite Structures* 133(2015), S. 415–424.
- [66] TRÜMPER, W.; LIN, H.; CALLIN, T.; BOLLENGIER, Q.; CHERIF, CH.; KRZYWINSKI, S.: Recent developments in multi-layer flat knitting technology for waste free production of complex shaped 3D-reinforcing structures for composites. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 141(2016), S. 012015.
- [67] STRAUß, J.; KUNTZSCH, T.; HÄHNEL, F.: Analyse und Simulation mechanischer Eigenschaften bei der Entwicklung adaptierter papierartiger Werkstoffe für Falz- und Honigwaben-Sandwichkerne, AiF Abschlussbericht 18256BG, 2017.
- [68] WALTHER, A.; EIBLMEIER, J.: Umweltfreundliche feuerabschirmende Perlmutter-Panzer via Selbstorganisation, AiF Abschlussbericht 17502N, 2015.
- [69] STOCKER, T.; SCHECHTEL, F.: Entwicklung eines Verfahrens zur wirtschaftlichen Anwendung der gepulsten Lasertechnologie für die Verarbeitung von Papier und Karton, AiF Abschlussbericht 18421 N, 2017.
- [70] Geißler, A.; Staudigel, C.; Stocker, T.: Verfahrenstechnische Grundlagen des Einsatzes additiver Fertigungsverfahren auf Papiersubstraten am Beispiel der lasergestützten Faltschachtelproduktion, AiF Abschlussbericht 19315 N, 2019.
- [71] ZAHEL, M.; PANZNER, M.: Entwicklung verfahrenstechnischer Grundlagen zum Schmelzen von Papierwerkstoffen unter Ausnutzung von Laserstrahlung am Beispiel eines bindemittelfreien Fügeprozesses - Papier-Laserschmelzen, laufendes AiF-Vorhaben 20487 BR, Projektabschluss 12/2020.
- [72] MOUNTASIR, A.; HOFFMANN, G.; CHERIF, CH.: Development of multilayered woven panels with integrated stiffeners in the transverse and longitudinal directions for thermoplastic lightweight applications. *Textile Research Journal* 83(2013)14, S. 1532–1540.
- [73] MOUNTASIR, A.; HOFFMANN, G.; CHERIF, CH.; Kunadt, A.; Fischer, W.-J.: Mechanical characterization of hybrid yarn thermoplastic composites from multi-layer woven fabrics with function integration. *Journal of Thermoplastic Composite Materials* 25(2011)6, S. 729–746.
- [74] SENNEWALD, C.; KAINA, S.; WECK, D.; GRUHL, A.; THIEME, M.; HOFFMANN, G.; STEPHANI, G.; BÖHM, R.; CHERIF, CH.; ANDERSEN, O.; KIEBACK, B.; HUFENBACH, W. A.: Metal Sandwiches and Metal-Matrix-Composites Based on 3D Woven Wire Structures for Hybrid Lightweight Construction. *Advanced Engineering Materials* 16(2014)10, S. 1234–1242.
- [75] Plattform FOREL: 3DProCar. <https://plattform-forel.de/3dprocar-bericht/>, (10.08.2020).
- [76] KLEEBAUER, M.: Entwicklung eines umfassenden Konzepts für optimale Rillungen bei Verpackungskartons mit wasserbasierten Barrierebeschichtungen, AiF Abschlussbericht 19313 N, 2020.
- [77] HILLER, B.; KÖSTNER, V.: Entwicklung einer kontinuumsmechanisch begründeten Methode zur Berechnung des klimaabhängigen Kriechverhaltens von Wellpappe-Verpackungen, AiF Abschlussbericht 18876 N, 2018.

- [78] DÖBRICH, O.; GEREKE, T.; DIESTEL, O.; KRZYWINSKI, S.; CHERIF, CH.: Decoupling the bending behavior and the membrane properties of finite shell elements for a correct description of the mechanical behavior of textiles with a laminate formulation. *Journal of Industrial Textiles* 44(2014)1, S. 70–84.
- [79] DÖBRICH, O.; GEREKE, T.; CHERIF, CH.: Modelling of textile composite reinforcements on the micro-scale. *Autex Research Journal* 14(2014)1, S. 28–33.
- [80] HÜBNER, M.; GEREKE, T.; CHERIF, CH.: Meso- and Macro-scale Simulation of 3D Woven Fabrics. In: *NAFEMS Seminar*. Hamburg, 2016.
- [81] DÖBRICH, O.; GEREKE, T.; CHERIF, CH.; KRZYWINSKI, S.: Analysis and finite element simulation of the draping process of multilayer knit structures and the effects of a localized fixation. *Advanced Composite Materials* 22(2013)3, S. 175–189.
- [82] DÖBRICH, O.; GEREKE, T.; CHERIF, CH.: Modeling the mechanical properties of textile-reinforced composites with a near micro-scale approach. *Composite Structures* 135(2016), S. 1–7.
- [83] ROICK, T.: Herstellung modifizierter Brandschutzstärke, Vortrag, PTS-Spezialseminar "Brandschutz für Papier und papierbasierte Verbundwerkstoffe", München, 2017.
- [84] PASSAUER, L.: Entwicklung biobasierter Flammenschutzmittel auf Basis P- und N- funktionalisierter Polyosen für den Brandschutz von Holz und Holzwerkstoff, Tätigkeitsbericht 2017 – Ergebnisse ausgewählter Forschungsprojekte, IHD Dresden,