

Bewilligungsempfänger: Deutsche Institute für Textil- und Faserforschung (DITF)

Abschlussbericht

Entwicklung von Grundelementen für einen
Baukasten für papiergarnbasierte Messe- und
Präsentationssysteme mit ganzheitlichem
Nutzungskonzept

Kurztitel: PapierEvents

Denkendorf, den 13.03.2024

gefördert unter dem Az: 37234 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

Laufzeit: 14.12.2020 - 13.12.2023

Verfasser: Viola Finckh, Kathrin Haigis, Christoph Riethmüller (DITF)

Summer Kochersperger, Samuel Schabel (Fachgebiet für Papierfabrikation und Mechanische
Verfahrenstechnik der Universität Darmstadt (PMV))

Gerd Martin, Volker Müller (GarnTec GmbH)

Karl Schairer, Nathalie Heeb (quintessence design GbR)

Peter Schult, Heidi Bach, Sven Rödiger (ROEDIG GmbH)

Inhalt

Verzeichnis von Abbildungen und Tabellen	2
Verzeichnis von Abkürzungen, Formelzeichen, Begriffen und Definitionen	4
1 Zusammenfassung	6
2 Einleitung	7
3 Hauptteil	10
3.1 Darstellung des Projektablaufs	10
3.2 Anforderungen.....	11
3.3 Papiertechnik.....	11
3.3.1 Untersuchungen - Rohstoff Papier	11
3.3.1.1 Optische Eigenschaften	11
3.3.1.2 Papiergarn mit erhöhter Festigkeit.....	12
3.3.2 Entwicklung von Sonderpapieren.....	13
3.3.2.1 Additive Herstellung von Sensorik-Papieren	13
3.3.2.2 Festigkeitsoptimierten Flächen	17
3.3.3 Grundlagen - Recycling.....	18
3.3.4 Rezyklierbarkeit von Papiergarnen.....	20
3.3.4.1 Rezyklierbarkeit von Papiergarn (naturbraun; \varnothing 1,4 mm)	20
3.3.4.2 Rezyklierbarkeit von sensorischen Papiergarnen (mit Kupferdraht)	21
3.3.4.3 Rezyklierbarkeit des Sensorgarns des Funktionsmuster „Papierbasierter Sensor“	25
3.3.5 Rezyklierbarkeit von Verbindungsstücken aus Papphülsen.....	25
3.3.6 Rezyklierbarkeit von Quellvlies.....	27
3.4 Strukturgespulte Papiergarn-Verbundwerkstoffe.....	28
3.4.1 Im Projekt eingesetzte Papiergarne	28
3.4.2 Spulstrategien	29
3.4.3 Konsolidierung	29
3.5 Entwicklung der Baukastenelemente und Funktionsintegration	30
3.5.1 Lineare und flächige Baukastenelemente	30
3.5.2 Verbindungselemente.....	33
3.5.2.1 Gespulte Verbindungselemente.....	33
3.5.2.2 Papphülsen als Verbindungselemente	34
3.5.3 Mechanische Prüfungen	35
3.5.4 Empirisches Modell zur Vorhersage der mechanischen Festigkeit	39
3.5.5 Brandversuche	39

3.5.6 Funktionsintegration	40
3.5.6.1 Beleuchtung	40
3.5.6.2 Sensorik	44
3.6 Konzeption und Umsetzung von Messe- und Eventmöbeln und deren Einzelemente	45
3.6.1 Theke	46
3.6.2 Kundenstopper DIN-A1	47
3.6.3 Schaeuelement / Pyramide	48
3.6.4 Nutzungskonzept	48
3.7 Recyclingkonzepte und Nachhaltigkeitsbetrachtung	49
3.8 Bewertung der Projektergebnisse	51
3.9 Maßnahmen zur Verbreitung der Vorhabensergebnisse	53
4 Fazit	53
5 Literaturverzeichnis	54

Verzeichnis von Abbildungen und Tabellen

Verzeichnis von Abbildungen

Abbildung 1: Arbeitspakete und Meilensteinplanung	10
Abbildung 2: Dimensionslose Streuungskoeffizienten und Absorptionskoeffizienten zur Bestimmung der Leuchtkraft und Opazität	11
Abbildung 3: Opazität und Streuung von Linters Blätter mit verschiedenen Feinstoffanteilen	12
Abbildung 4: Durchschnittliches E-Modul und Zugfestigkeit für Linters Papiere mit 0, 10, 20 und 30 % Feinstoffanteil	13
Abbildung 5: Modifiziertes Sieb zur Herstellung papierbasierter Sensoren	14
Abbildung 6: a) modifiziertes Sieb mit erstem 100 g/m ² -Papier und Kupferdrähten b) Aufbau im Blattformer, bevor das zweite Blatt hergestellt wurde	14
Abbildung 7: Trockener papierbasierter Sensor im Trockner	15
Abbildung 8: Kraft-Dehnungs-Diagramm für Sensorik-Papiere ohne Draht	15
Abbildung 9: Kraft-Dehnungs-Diagramm für Sensorik Papiere mit Draht	16
Abbildung 10: Beispiel eines Rundsiebformers	17
Abbildung 11: Funktionsmuster für einen papierbasierten Berührungssensor	17
Abbildung 12: Vergleich der Zugsteifigkeit und des Elastizitätsmoduls von Laborblättern mit UD-Papieren	18
Abbildung 13: Kupferdrahtknote in Grobrejekt zu sehen	22
Abbildung 14: Probe D5 - Grobrejekt	23
Abbildung 15: Papphülsen von Werth Metallpulver	25
Abbildung 16: Schaumentwicklung bei der Feinsortierung von Papphülsen	26
Abbildung 17: Blattklebertest für a) Grobsortierung und b) Feinsortierung	26
Abbildung 18: Grobrejekt von Quellvlies beim Recycling-Versuch	27
Abbildung 19: Sonderwickelmaschine JBF – MHW-2 im Spultechnikum der DITF	29

Abbildung 20: Umsetzung der wirtschaftlichen Herstellung von strukturgespulten stangenförmigen Elementen.....	31
Abbildung 21: Wichtige Spulparameter, mit Beispielen von Windungsverhältnissen	31
Abbildung 22: Konzept und Umsetzung der Herstellung von Platten nach Variante (3)	33
Abbildung 23: Gespulte Verbindungselemente flächig und dreidimensional	33
Abbildung 24: Mögliche Varianten zur Herstellung von stangenförmigen Verbindungselementen.....	34
Abbildung 25: Verbindungselemente aus Papphülsen – Herstellung und fertige Elemente	34
Abbildung 26: Prüflinge für die 3-Punkt-Biegeprüfung	35
Abbildung 27: Prüfaufbau der 3-Punkt-Biegeprüfung	35
Abbildung 28: Für die Demonstrator-Theke eingesetzte strukturgespulte Elemente	38
Abbildung 29: Messaufbau zur Messung der Leuchtdichte	41
Abbildung 30: Kasten und Linie zur Analyse der Leuchtdichte in der Software der Leuchtdichte- und Farbmesskamera.....	41
Abbildung 31: Beispiele für Konzept "Stabverbindung in Fläche integriert, geschlossene Fläche"	45
Abbildung 32: Beispiele für Gestaltungselemente aus Papiergarnen, inspiriert von Bambuselemente	46
Abbildung 33: Einsatzmöglichkeiten der flächigen Elemente in der Theke	46
Abbildung 34: Theke als im Projekt entwickelter und hergestellter Demonstrator und hierfür eingesetztes Spannelement.....	47
Abbildung 35: Kundenstopper als Konzept und als Demonstrator	48
Abbildung 36: Pyramidenförmiges Schaelement als Konzept und als DemonstratorF	48
Abbildung 37: Nutzungskonzept eines papiergarnbasierten Promotionsstandes	49

Verzeichnis von Tabellen

Tabelle 1: Abkürzungen	4
Tabelle 2: Formelzeichen	4
Tabelle 3: Einheiten	4
Tabelle 4: Lichttechnische Eigenschaften (Mittelwerte) von Lintersblätter mit 50 g/m ² und verschiedener Feinstoffanteile	12
Tabelle 5: Übersicht von mechanischen Eigenschaften der Sensorik Papiere mit und ohne Kupferdraht	16
Tabelle 6: Übersicht von Prüfmethode zur Bewertung der Rezyklierbarkeit von grafischen Produkten und papierbasierten Verpackungen.....	18
Tabelle 7: Rezyklierbarkeit von Papiergarn (naturbraun; 1,4 mm \emptyset) - CEPI Scorecard	20
Tabelle 8: Makrosticky Fläche [mm ² /kg] für Papiergarn-Probe (naturbraun; 1,4 mm \emptyset).....	21
Tabelle 9: Proben Bezeichnung von Papiergarnproben mit Kupferdraht	21
Tabelle 10: Rezyklierbarkeit von Probe D1 Anhand der CEPI Score Card.....	21
Tabelle 11: Rezyklierbarkeit von Probe D2 Anhand der CEPI Score Card.....	22
Tabelle 12: Rezyklierbarkeit von Probe D3 Anhand der CEPI Score Card.....	22
Tabelle 13: Rezyklierbarkeit von Probe D4 Anhand der CEPI Score Card.....	23
Tabelle 14: Rezyklierbarkeit von Probe D5 Anhand der CEPI Score Card.....	24
Tabelle 15: Rezyklierbarkeit von Probe D6 Anhand der CEPI Score Card.....	24
Tabelle 16: Zusammenfassung der Recycling-Versuche von Papiergarn mit Kupferdraht.....	24
Tabelle 17: Rezyklierbarkeit des Sensorgarns nach der CEPI Score Card	25
Tabelle 18: Rezyklierbarkeit der Papphülsen anhand der CEPI Score Card.....	27
Tabelle 19 : Rezyklierbarkeit des Quellvlieses anhand der CEPI Score Card	28

Tabelle 20: Makrosticky - Ergebnisse Quellvlies Recycling Versuch.....	28
Tabelle 21: Im Projekt eingesetzte Papiergarne	28
Tabelle 22: Gegenüberstellung der Methoden zum Klebstoffauftrag	30
Tabelle 23: Gegenüberstellung von flächigen Baukastenelementen (Platten)	31
Tabelle 24: Übersicht über die Ergebnisse der 3-Punkt-Biegeprüfungen, Vergleich verschiedener Spulstrategien.....	36
Tabelle 25: Übersicht über die Ergebnisse der 3-Punkt-Biegeprüfungen, Vergleich der in der Demonstrator-Theke eingesetzten Stabstrukturen	38
Tabelle 26: Ergebnisse der Brandversuche	40
Tabelle 27: Ergebnisse der Messungen mit der Leuchtdichte- und Farbmesskamera bei grünem Licht	42
Tabelle 28: Bewertungskriterien für die Wiedernutzung mit Bewertung.....	50

Verzeichnis von Abkürzungen, Formelzeichen, Begriffen und Definitionen

Abkürzungen

Tabelle 1: Abkürzungen

AP	Arbeitspaket
CEPI	Confederation of European Paper Industries
CO ₂	Kohlen(stoff)dioxid
DH	Doppelhub (s. auch Begriffe und Definitionen)
DITF	Deutsche Institute für Textil- und Faserforschung Denkendorf
PMV	Fachgebiet Papierfabrikation und Mechanische Verfahrenstechnik (PMV) der Technischen Universität Darmstadt
UD	unidirektional
WV	Windungsverhältnis (s. auch Begriffe und Definitionen)

Formelzeichen

Tabelle 2: Formelzeichen

L _{max}	maximale Leuchtdichte
L _{ist}	tatsächliche Länge

Tabelle 3: Einheiten

µm	Micrometer
GPa	Gigapascal
U/m	Umwindungen pro m
tex	Maßeinheit für die Masse von Garnen bezogen auf die Länge (Bsp.: 20 tex = 20 g/1000 m Garn); siehe DIN 60905, Teil 1.

Begriffe und Definitionen

Doppelhub: Die Summe zweier aufeinanderfolgender Hübe. Hin- und zurück. (nach DIN ISO 5239)

Feinrejekt: Partikel, die bei der Feinsortierung auf dem 150 µm Schlitzsieb verbleiben.

Grammatur: Flächengewicht von Papier

Grobrejekt: Partikel, die bei der Grobsortierung in der Stoffaufbereitungsanlage einer Papierfabrik entfernt werden und im Labor auf einem 5 mm-Lochsieb verbleiben.

Hub: Die Bewegung des Fadenführers zwischen zwei aufeinanderfolgenden Umkehrpunkten. (nach DIN ISO 5239)

Recyclingfähigkeit: Die Fähigkeit, ein Papierprodukt in einer Altpapieraufbereitungsanlage gemäß dem Stand der Technik aufzuschließen und aus den Sekundärfasern neues Papier auf Recyclingfaserbasis in akzeptabler Qualität herzustellen.

Schleppfehler: Der Faden wird beim Spulvorgang von dem Fadenführer beim Aufspulen hin- und her bewegt. Zwischen dem Fadenführer und dem Auflaufpunkt des Fadens auf den Spulenwickel ist beim Spulen verfahrensbedingt eine räumliche Distanz. Hieraus ergibt sich im Spulprozess ein Nacheilen des Auflaufpunktes bezogen auf die Position des Fadenführers. Es entsteht der sogenannte Schleppfehler. Der Faden wird beim Aufspulen nicht an der Stelle, wo sich der Fadenführer befindet, abgelegt. Er ist von verschiedenen Faktoren abhängig, z.B. von der Spulgeschwindigkeit. [1]

Sticky: Klebende Verunreinigung, Ausdruck aus der Papierindustrie

Windungsverhältnis: Das Windungsverhältnis WV (auch Kreuzungsverhältnis KV) bezeichnet die Anzahl Windungen pro Doppelhub des Fadenführers. Dieser wichtige Spulparameter definiert das Verhältnis zwischen Spulenumdrehung und der Fadenchangierung. [2]

1 Zusammenfassung

In diesem Projekt wurden rezyklierbare Messe- und Präsentationssysteme als Baukastensystem samt ganzheitlichem Nutzungskonzept auf der Basis von Papiergarnen entwickelt. Die anvisierten Projektziele konnten erreicht werden: die Erarbeitung von strukturgespulten Einzelementen als Baukasten für Messe- und Eventmöbel, die voll recycelfähig und zerstörungsfrei demontierbar sind, die Integration von Beleuchtungs- und Sensorikfunktionen ins Papier und ins Garn sowie die Erarbeitung von Nutzungs- und Recyclingkonzepten.

Durch die eingesetzten papier- bzw. naturbasierten Materialien kann nun eine ressourceneffiziente Entsorgung des Messestands ermöglicht werden, wodurch das gemischte Abfallaufkommen nach Messen und Veranstaltungen reduziert werden kann. Passende Verbindungstechniken der Einzelemente ermöglichen eine einfache sortenreine Trennung. Hierfür wurden verschiedene Steckverbindungselemente entwickelt und mit stab- und flächenförmigen Elementen kombiniert. Aufgezeigte Recyclingwege sind nach einer mehrfachen Nutzung die Entsorgung der Papierkomponenten über das konventionelle Altpapier und Zuführung der elektronischen Komponenten in das Elektro-Recycling. Des Weiteren wurde gezeigt, dass der Verzicht auf umweltproblematische Stoffe ohne optische und funktionale Einbußen möglich ist. Dies betrifft den zur Konsolidierung eingesetzten Klebstoff sowie das Brandschutzmittel.

Ebenfalls konnte bei den entwickelten Demonstratoren Gewicht eingespart werden. Das Gesamtgewicht der im Rahmen des Projekts umgesetzten Messetheke beträgt 5,5 kg (ohne Beleuchtung). Dieses geringe Gewicht sowie der modulare Aufbau erleichtern das Handling vor Ort. Die Zerlegbarkeit in Einzelteile ermöglichen den Transport in handlichen Kartons bzw. über den konventionellen Postweg. Dies eliminiert heute übliche Einzelfahrten.

Durch solche Leichtbaulösungen können insbesondere die Emissionen reduziert werden, welche auf dem Transportweg der Einzelteile anfallen. Am Beispiel der Demonstrator-Theke kann der Vorteil einer strukturgespulten Variante im Vergleich zu einer Theke aus 32 mm-Aluminiumprofilen mit einer 16 mm-Spanplatte dargestellt werden: Nach einer Berechnung kann die Papiergarn-Theke über 75,5 % vom Gewicht und 93,8 % CO₂ einsparen.

Die Projektergebnisse führten nach Veröffentlichungen und Diskussionen zu sehr positiven Rückmeldungen aus der Messe- und Eventbranche. Demzufolge sieht das Konsortium eine Vertiefung der im Projekt erarbeiteten Ergebnisse als wesentlichen Schritt, der bspw. in eine realen Messeanwendung umgesetzt werden kann. Ebenso bieten die Projektergebnisse großes Potential für einen Übertrag auf größere Bauteile, die größere Lasten tragen.

In zukünftigen Arbeiten und Projekten kann eine Vorbereitung der Serienfertigung erfolgen. Hierzu müssen Standardisierungen der Bauteile und der Prozesse vorgenommen sowie eine Produktionsumgebung aufgebaut werden. Alle Grundlagen wurden hierfür im Projekt erarbeitet.

Das Projekt wurde gemeinschaftlich von den Deutschen Institute für Textil- und Faserforschung, der Firma Garntec GmbH, der Designagentur quintessence design Heeb | Schairer GbR, der Rödиг GmbH sowie dem Fachgebiet Papierfabrikation und Mechanische Verfahrenstechnik (PMV) der TU Darmstadt bearbeitet. Das Projekt AZ37234 wurde durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt gefördert.

2 Einleitung

Ausgangssituation

Messen und Events verursachen große Mengen an Abfall, die branchenbedingt nicht vermeidbar sind. Die meist maßgefertigten Messe- und Eventmöbel werden häufig nach der Veranstaltung oder im Eventbereich nach der letzten Veranstaltungsserie komplett entsorgt. Eine Weiterverwendung kann oft aufgrund der Anforderungen der Kunden bezüglich Aktualität, Einsatzzweck und Ziel der Veranstaltung nicht stattfinden. Häufig fehlen messe- und eventabgestimmte Recyclingkonzepte und die Möglichkeit, die einzelnen Komponenten sortenrein zu trennen, um sie nach der Nutzungsphase nachhaltig zu recyklieren.

Die Messe- und Veranstaltungsbranche stellt einen sehr großen Markt dar. [3] [4] [5] Neue Anforderungen von Kunden, die sich von der Konkurrenz abheben wollen, und neue Trends wie die Frage nach nachhaltigen Materialien und Konzepten erfordern neue Lösungen für Messe- und Präsentationssysteme. Verstärkt wird dies durch konzernweite Nachhaltigkeitsstrategien, die den Event- und Messebereich mit ein schließen. Somit stellt ein ressourcen- und klimagerechtes Auftreten für die Messe- und Eventbranche ein großes Marktpotential dar.

Zur Überwindung der dargestellten Problematik und zur Erschließung des Marktpotenzials verfolgte das Projekt den Ansatz, Messe- und Eventmöbel auf Basis von Papiergarnen unter Nutzung der Strukturspulentechnik und von Papieren zu schaffen.

Die im Projekt an versierten Eventmöbel bestehen aus Papier bzw. aus naturbasierten Materialien, die über den Altpapierweg recycelt werden können. Werden diese Materialien bspw. mit bislang typischen Materialien wie Aluminiumprofilen verglichen, so überwiegen klare Vorteile: weniger Energieeinsatz in der Herstellung, großes Recyclingpotential, der Einsatz nachwachsender Grundwerkstoffe. Das Recycling von Aluminium ist zwar möglich, einer ökologisch und ökonomisch sinnvollen Lösung stehen jedoch häufig die fehlende Sortenreinheit im Weg, was zu einer qualitativen Abwertung des Rohstoffs führt.

Stand der Technik

Papiergarn ist ein seit langem ein bekannter Werkstoff, jedoch ist nur wenig Literatur zum Thema verfügbar.

Laut TAKASAKI, Midori, et al. konnte gezeigt werden, dass Papiergarn mit hoher Orientierung der Fasern in Richtung der Papierstreifen eine höhere Reißfestigkeit und ein höheres Elastizitätsmodul, aber eine geringe Dehnbarkeit aufweist. Weiterhin kann beobachtet werden, dass sich eine hohe Orientierung der Fasern im Papiergarn positiv hinsichtlich der Gleichmäßigkeit auswirkt. [6]

Der Einsatz von Papiergarn auf industriellen Maschinen ist grundsätzlich möglich. Für den Einsatz in Strickmaschinen ist die Wahl der geeigneten Maschengröße entscheidend, da diesem aufgrund der geringen Dehnbarkeit und allgemein schlechten Handhabbarkeit nach unten hin Grenzen gesetzt sind. Das Stricken größerer Maschen ist möglich. Ein Einsatz von Papiergarn zum Sticken auf industriellen Maschinen ist demnach zwar möglich, es besteht jedoch Verbesserungsbedarf. [7]

Im Rahmen des Webens bietet sich Papiergarn als Schussfaden für Jeansstoff an. Ein Nachteil liegt in der Verarbeitungsgeschwindigkeit. Es konnten lediglich 90 % der Vergleichsgeschwindigkeit erreicht

werden. Die Dehnung des Papier-Jeansstoffs erwies sich dagegen mit normalem Jeansstoff mittlerer Dehnbarkeit als vergleichbar. [8]

Um die Eigenschaften des Papiergarns für den Einsatz in industriellen Textilmaschinen zu verbessern, wurden verschiedene Ansätze untersucht. Durch das Verzwirnen von Papiergarn mit anderen Filamentgarnen konnte insbesondere die Reißfestigkeit und Elastizitätsmodul verbessert werden. [9] Eine Behandlung mit Wasserdampf verbessert die Dehnung und die Formstabilität. Durch eine vorherige Behandlung mit NH_3 -Lösung wird ein weiterer Anstieg der Eigenschaften gegenüber unbehandeltem Papiergarn erreicht. [10]

Die industrielle Verarbeitung von Papiergarnen zu Textilien oder zu textilen Halbzeugen stellte bislang keinen Forschungsschwerpunkt dar. Es liegen hierüber keine ausgeprägten Kenntnisse vor.

Die **Strukturspultechnik** ist ein wirtschaftlicher Prozess, um faserbasierte, leichte Strukturbauteile herzustellen. Dabei wird das Garn üblicherweise auf einen Wickelkörper, welcher direkt auf dem rotierenden Spuldorn sitzt, abgelegt. Es sind hohe Produktionsgeschwindigkeiten und hohe Automatisierungsgrade möglich. Die Geometrie ist nicht auf zylindrische Körper begrenzt. Vielmehr kann eine Vielzahl an Geometrien umgesetzt werden. Unter einem Dornkörper versteht man dabei einen formgebenden Körper, auf den direkt gespult wird und der direkt auf dem Spuldorn befestigt wird.

Bei der Strukturspultechnik können bspw. definierte Rippen, Flächen und Öffnungen erzeugt werden. Generell sind bei Strukturspulen vielzählige Strukturbilder darstellbar. Es sind durchgängige, flächige Außenkonturen, unterbrochene Rippen- bzw. Gitterstrukturen und verschiedene Durchmesser und Wickelhöhen möglich [11]. Anders als bei Garnspulen, die in einem Folgeprozess wieder abgezogen werden, wird das Gespulte mitsamt Hülse bzw. dem Dornkörper abgenommen und anschließend konsolidiert.

Für viele technische Bauteile werden bislang Hybridgarne eingesetzt, die aus einer Thermoplast- bzw. Matrix- und einer Verstärkungskomponente bestehen. Die niederschmelzende Thermoplastkomponente wird dann in einem anschließenden Schritt aufgeschmolzen und bildet eine Matrix um die Verstärkungskomponente. Schließlich kann der Wickelkörper, die Hülse bzw. der Dornkörper, auf die gespult wurde, entfernt werden, so dass ein selbsttragendes Bauteil entsteht. [12, 13]

Durch den Einsatz von auf das Papiergarn abgestimmten Matrixmaterialien bzw. natürlichen Klebstoffen können strukturgespulte selbsttragende Bauteile entstehen, die ökologische Aspekte erfüllen. Dies wurde im DBU-Projekt „PapierLicht“ [14] begonnen, technologisch zu erschließen.

Die für dieses Projekt benötigten mechanischen Verhalten von Papiergarnstrukturen sind jedoch keine weiteren Arbeiten bekannt.

Zielsetzung und Aufgabenstellung

Ziel des Projekts war es, ein auf nachwachsenden Rohstoffen basierendes, modulares System für die Messe- und Eventbranche als nachhaltige Alternative zu auf Aluminium oder Kunststoffen basierten Systemen zu entwickeln. Hierfür sollte der Rohstoff Papier in Papier- und Garnform durch andere, nachhaltige Materialien (z.B. naturbasierter Klebstoff) ergänzt und funktionalisiert und über textile und papierbasierte Verfahren zu zwei- und dreidimensionalen Systembauteilen verarbeitet werden. Nach

einer Konsolidierung entsteht so ein Verbundwerkstoff. Die Bauteile können als Mehrwegkomponente fungieren und nach der Produktlebensdauer in einfacher Weise über etablierte Recyclingwege entsorgt werden.

Alle Projektziele verfolgten dabei Nachhaltigkeit und Umweltfreundlichkeit der Materialien und Verfahren:

Ein umweltrelevantes Ziel war die Reduktion des gemischten Abfallaufkommens nach Messen und Veranstaltungen: Durch papier- bzw. naturbasierten Materialien sollte eine ressourceneffiziente Entsorgung des Messestands ermöglicht werden. Passende Verbindungstechniken der Einzelemente ermöglichen eine einfache sortenreine Trennung. Mögliche Recyclingwege sind bspw. die Entsorgung über das konventionelle Altpapier, die Kompostierung oder auch die Weiternutzung im Sinne des Upcyclings. Des Weiteren war der Verzicht auf umweltproblematische Stoffe und der Einsatz nachwachsender Materialien ein Hauptziel. Weiteres Ziel war es, Gewicht einzusparen. Durch Leichtbau können insbesondere die Emissionen reduziert werden, die auf dem Transportweg der Einzelteile anfallen.

Gleichzeitig sollten die angestrebten intrinsisch integrierten Funktionen (Beleuchtung, Sensorik) zu einer weiteren Einsparung von Gewicht und Komponenten im Vergleich zu bestehenden Systemen, führen. Ein wichtiges Ziel war, dass das System aus Mehrwegkomponenten besteht, so dass eine möglichst lange Produktlebensdauer bestehen wird. Weiteres umweltrelevantes Ziel war die Reduktion von CO₂.

Für die Umsetzung der Ziele wurden folgende Arbeiten geplant:

- **Entwicklung und Charakterisierung von Papieren und Papiergarnen**
- **Erarbeitung von Gestaltungsansätzen:**
Ein Teil der Arbeiten war, dass Gestaltungsansätze an verschiedenen Nutzungskonzepten, die eine Nachnutzung miteinschließen, gespiegelt werden, so dass funktionale Baukastenelemente entstehen.
- **Entwicklung der Verfahren:**
In verschiedenen textilen und additiven Verfahren sollten aus Papiergarn und Papier zwei- und dreidimensionale Systembauteilen, schwerpunktmäßig mit der Strukturspultechnologie, entwickelt werden, die den Anforderungen gerecht werden. Dies soll unter Beachtung relevanter Vorschriften (u.a. einschätzende Brandschutztests) und auf Grundlage von einstufigen empirischen Modellen zur Vorhersage der Festigkeit, erfolgen.
- **Entwicklung der Systemelemente und Verbindungstechniken**
- **Entwicklung und Integration verschiedener Funktionen**
Als einzuarbeitende Funktionen wurden Beleuchtungen und sensorische Elemente angestrebt.
- **Erarbeitung von Recycling- und Nutzungskonzepten**
Ziel war es, Recyclingkonzepte zu erarbeiten, in die neue Verbindungstechniken von verschiedenen Einzelementen und Materialien eingebettet werden mit dem Ziel einer nachhaltigen Wiederverwertung. Gleichzeitig sollten neue Nutzungskonzepte erarbeitet werden, welche gleichermaßen die Nachnutzung miteinschließen.
- **Erstellung von Prototypen und Muster**

3 Hauptteil

3.1 Darstellung des Projektablaufs

Bei der Umsetzung und Abfolge der Arbeitspakete wurde nach dem im Projektantrag beschriebenen und in Abbildung 1 dargestellten Ablaufplan vorgegangen.

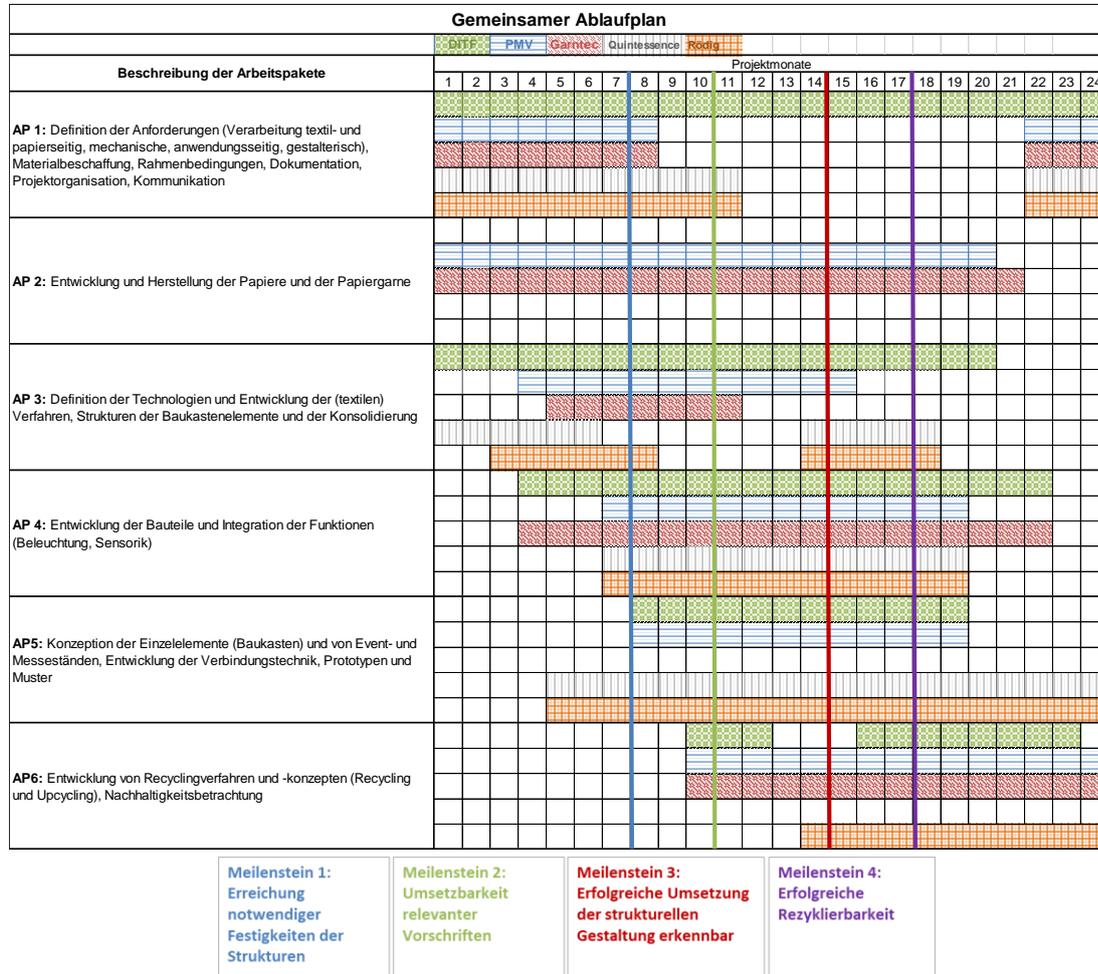


Abbildung 1: Arbeitspakete und Meilensteinplanung

Für die Erreichung der Projektziele wurden sechs Arbeitspakete bearbeitet. Das erste Arbeitspaket beschäftigte sich mit der Definition und Sammlung der Anforderungen sowie daraus abgeleitet mit der Materialbeschaffung. In einem zweiten Arbeitspaket wurden Papiere und Papiergarne hergestellt. Im dritten Arbeitspaket erfolgte die Entwicklung von kosteneffizienten Herstellverfahren für Strukturen mit hoher Steifigkeit und Festigkeit, insbesondere durch die Strukturspulentechnologie sowie additive Verfahren. Arbeitspaket 4 beschäftigte sich mit der Entwicklung der Bauteile und der Integration der Funktionen (Beleuchtung und Sensorik). In Arbeitspaket 5 wurde der Baukasten für Event- und Messemöbel sowie die erforderlichen Verbindungselemente entwickelt. Die Ergebnisse wurden in Prototypen und Mustern verdeutlicht und erprobt. Ebenfalls wurden Nutzungskonzepte erstellt. Im sechsten Arbeitspaket erfolgte schließlich eine Überprüfung hinsichtlich einsetzbarer Recyclingwege bzw. daraus resultierend die Entwicklung angepasster Recyclingkonzepte.

3.2 Anforderungen

Im ersten AP wurden die Anforderungen an die Grundelemente sowie an die angestrebten Muster und die Prototypen aufgestellt. Alle Projektpartner brachten hierbei ihr branchenspezifisches Wissen mit ein. So wurden die folgenden Hauptkategorien bearbeitet:

- Papiertechnologische Anforderungen: Flächengewichte der Papiere, Eigenschaften der Papiergarne (insbesondere Durchmesser, Zusatzstoffe)
- Textiltechnologische Anforderungen: Fadenspannungen, Fadenführungen, Konsolidierung, Dornkörper (insbesondere Dimensionen, Oberfläche)
- Mechanische Eigenschaften der Einzelbauteile und der Demonstratoren
- Anforderungen an die Funktionen (lichttechnische und sensorische)
- Gestalterische Anforderungen
- Anwendungsseitige Anwendungen (insbesondere Maße, Auf- und Abbau)
- Anforderungen für das Recycling (insbesondere Materialien, Zusatzstoffe für Brandschutz und Sensorik)
- Ökologische Anforderungen (insbesondere Materialeigenschaften, Nutzungsaspekte).

Für alle Einzelemente wurden die relevanten Herstellungsparameter in Fertigungsanweisungen dokumentiert. Für die Demonstratoren wurden ebenso Anweisungen erstellt.

3.3 Papiertechnik

3.3.1 Untersuchungen - Rohstoff Papier

3.3.1.1 Optische Eigenschaften

Um die optischen Eigenschaften des braunen Papiergarns zu testen, wurden die Streu- und Absorptionskoeffizienten gemessen. Das folgende Diagramm in Abbildung 2 zeigt die Absorption von rotem und grünem Licht durch das Papiergarn (dargestellt als Dreiecke) im Vergleich zur Absorption von grünem Licht durch weißes Papier (dargestellt als Viereck).

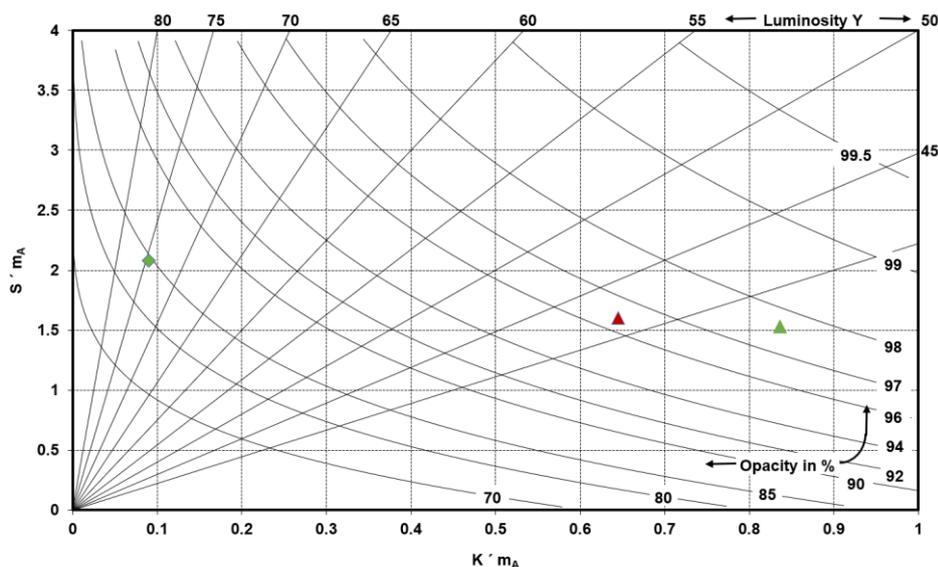


Abbildung 2: Dimensionslose Streukoeffizienten (s) und Absorptionskoeffizienten (k) zur Bestimmung der Leuchtkraft und Opazität.

Für lichttechnische Zwecke ist das braune Papiergarn nicht besonders geeignet. Die Opazität ist recht hoch und die Helligkeit (Y) gering. Dies liegt vor allem an der Färbung des Papiers. Die Grünabsorption für braunes Papier eine Helligkeit von 35 und eine Opazität von 97,5 %, während das weiße Papier eine Helligkeit von 75 und eine Opazität von 85 % aufweist.

Bessere Eigenschaften sind bei weißem Baumwoll-Linters-Papier mit einem Flächengewicht von 50 g/m² und durch Mahlung unterschiedlich eingestelltem Feinstoffanteil zu erkennen. Die Opazität, Absorption und Streuung der Linters-Papiere sind in der folgenden Tabelle 4 zusammengefasst.

Tabelle 4: Lichttechnische Eigenschaften (Mittelwerte) von Lintersblätter mit 50 g/m² und verschiedener Feinstoffanteile

Probe	Opazität in %	Standard-abweichung der Opazität in %	Streuung in m ² /kg	Standard-abweichung der Streuung in m ² /kg	Absorption m ⁻¹	Standard-abweichung der Absorption m ⁻¹
0% Feinstoff	68,61	1,13	32,46	1,48	0,21	0,01
10% Feinstoff	69,78	1,49	34,85	2,05	0,21	0,01
20% Feinstoff	70,00	4,96	35,48	5,28	0,19	0,03
30% Feinstoff	71,40	1,92	39,04	2,72	0,21	0,01

Die durchschnittliche Opazität nimmt mit zunehmendem Feinstoffanteil zu, da die Feinanteile die Poren des Papiers füllen und es dadurch undurchsichtiger wird. Dies gilt auch für die Lichtstreuung. Die Absorption bleibt gleich, da sich der im Papier verwendete Faserstoff nicht verändert hat. Insgesamt sind weiße Papiere mit einem geringen Feinstoffanteil und einem geringen Flächengewicht die besten Kandidaten für technische Beleuchtungsanwendungen. Die folgenden Diagramme in Abbildung 3 zeigen die Trends in Balkendiagrammen mit jeweiliger Standardabweichung.

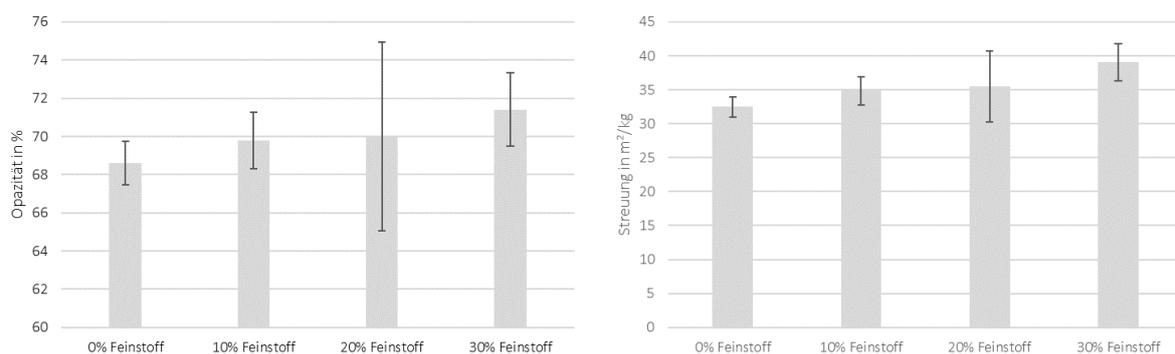


Abbildung 3: Opazität und Streuung von Linters Blätter mit verschiedenen Feinstoffanteilen

3.3.1.2 Papiergarn mit erhöhter Festigkeit

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, um die Festigkeit von Papier zu optimieren, ohne dass chemische Additive erforderlich sind. Der Rohstoff für das Papier hat einen immensen Einfluss auf die Festigkeit des Papiers, da die Faserlänge bei jedem Rohstoff unterschiedlich ist und den entscheidenden Faktor für die Papierfestigkeit darstellt. Weiterhin kann die Morphologie der Fasern durch Mahlung beeinflusst

werden, was ebenfalls erheblichen Einfluss auf die Festigkeit des Papiers hat. Zur Optimierung der Papierfestigkeit kann auch der Feinstoffanteil des Papiers mit geeigneten Faserfeinstoffen erhöht werden.

Um Papiergarn mit erhöhter Festigkeit herzustellen, wurde eine Kombination der oben genannten Parameter gewählt, um die Festigkeit des Basispapiers zu erhöhen. Als Rohmaterial wurde Baumwoll-Linters gewählt, da die Fasern für dieses Material eine Länge bis zu 6 mm haben, während handelsübliche Nadelholz-Kraftzellstoff-Fasern eine durchschnittliche Länge von ca. 2 mm haben. Lange Fasern eignen sich besser zur Lastaufnahme und können stärkere Verbindungen mit anderen Fasern eingehen, was die Festigkeit des Papiers erhöht. Anschließend wurden die ausgewählten Baumwoll-Linters durch den Voith-Laborrefiner LR 40 (Garnitur: 3-1,6-60) mit einer spezifischen Mahlergie von 100 kWh/t gemahlen, um die Faseroberfläche zu fibrillieren, was ebenfalls zu einer besseren Bindung zwischen den Fasern beiträgt. Anschließend wurde ein Teil der gemahlten Baumwoll-Linters fraktioniert und der Feinstoff abgetrennt. Die Feinstoffe wurden dann dem Baumwoll-Linters-Papier zugesetzt, um die Poren im Papier zu reduzieren und die Festigkeit weiter zu erhöhen. Die beiden nachfolgenden Diagramme für Elastizitätsmodul und Zugfestigkeit zeigen, dass ab einem Feinstoffanteil von etwa 20 % die Festigkeit des Papiers entweder abnahm oder gleichblieb. Die Fehlerbalken geben die Standardabweichung an.

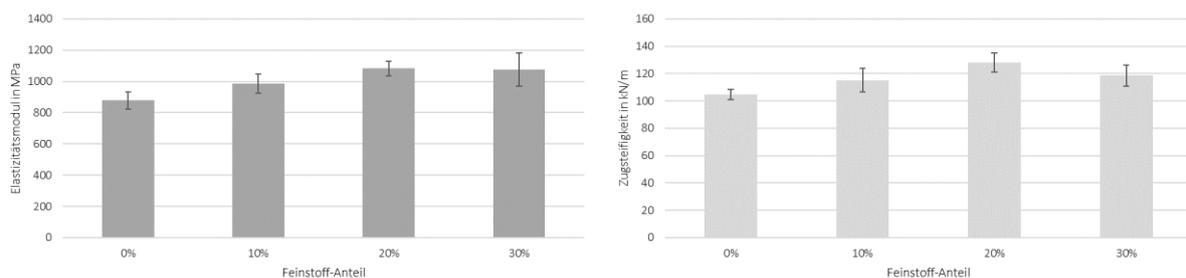


Abbildung 4: Durchschnittliches E-Modul und Zugfestigkeit für Linters Papiere mit 0, 10, 20 und 30 % Feinstoffanteil.

Diese Versuchsreihe lieferte wichtige Erkenntnisse für die Faserauswahl und die Faservorbehandlung für Rohpapiere zur Herstellung von Papiergarnen für die hier angestrebten Anwendungsfälle. Diese Optimierungsversuche konnten nur im Labormaßstab durchgeführt werden, da die technischen Kapazitäten für die Herstellung von größeren Mengen an für die Garnherstellung geeignetem Papier nicht vorhanden waren.

3.3.2 Entwicklung von Sonderpapieren

3.3.2.1 Additive Herstellung von Sensorik-Papieren

Der erste Entwurf für die papierbasierten Sensoren bestand darin, ein Sieb zu modifizieren, das im Rapid-Köthen-Blattbildner zum Einsatz kommt. Der Metallring, der das Sieb unter Spannung hält, wurde modifiziert. In den Rahmen wurden in gleichem Abstand Löcher gebohrt und kleine Stifte eingesetzt, sodass Kupferdraht um die Stifte gewickelt werden konnte (siehe Abbildung 5). Dadurch konnte der Gummiring des Blattbildners über die Drähte gleiten und diese während des Papierformungsprozesses an Ort und Stelle halten.



Abbildung 5: Modifiziertes Sieb zur Herstellung papierbasierter Sensoren

Um die Drähte erfolgreich vollständig in das Papier zu integrieren, wurden zwei Laborbögen mit ca. 100 g/m^2 erstellt. Das erste Blatt wurde normal hergestellt und getrocknet und dann auf das modifizierte Sieb gelegt. Die Kupferdrähte wurden um die Stifte gewickelt und dann wurde der gesamte Aufbau in den Blattbildner gelegt (siehe Abbildung 6). Dadurch wurde ein weiteres Papierblatt im Standardverfahren hergestellt.

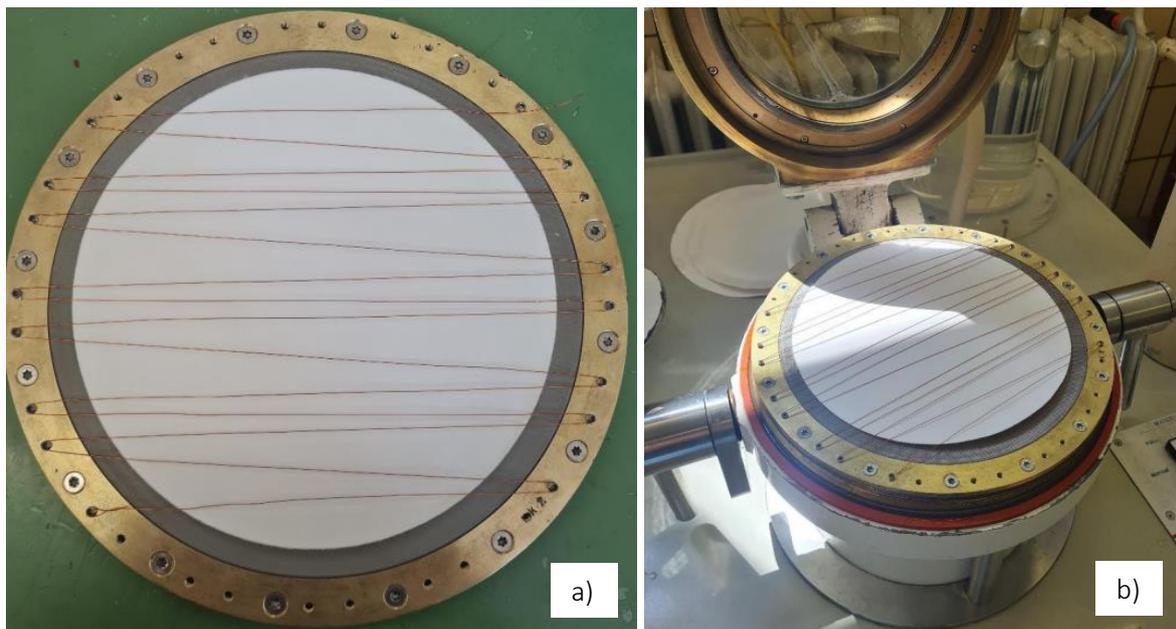


Abbildung 6: a) modifiziertes Sieb mit erstem 100 g/m^2 -Papier und Kupferdrähten b) Aufbau im Blattformer, bevor das zweite Blatt hergestellt wurde

Das Sieb mit der nassen Papiersandwichstruktur wurde vollständig aus dem Blattbildner entfernt und zusammen in einen Trockner gelegt und 20 Minuten lang bei 93 °C getrocknet. Auf der Oberseite des Papiers wurde eine Trägerkarton angebracht, um den Kontakt mit der Membran im Trockner zu verhindern.



Abbildung 7: Trockener papierbasierter Sensor im Trockner, wobei der Trägerkarton entfernt wurde (liegt unten rechts)

Mit dieser Methode wurden mehrere Blätter hergestellt und die Zugfestigkeit gemessen. Die Kupferdrähte waren weit auseinander angeordnet, so dass mehrere Proben aus dem gleichen Blatt gemäß der DIN ISO 1924-3 mit und ohne Kupferdraht ausgeschnitten werden konnten. Dies bedeutet, dass alle Änderungen im Blattbildungsprozess, die diese einzigartige Methode verwenden, ignoriert werden können. Bei der Papierproduktion im Labormaßstab kommt es leicht zu Blättern mit unterschiedlichem Flächengewicht. Dieser Faktor kann nicht ignoriert werden.

Um den Einfluss des Kupferdrahtes auf die mechanischen Eigenschaften des Papiers zu ermitteln, wurden Zugfestigkeitsprüfungen nach DIN ISO 1924-3 durchgeführt. Die Ergebnisse für die Zugfestigkeit mit und ohne Kupferdraht sind nachfolgend dargestellt. Für die beiden folgenden Diagramme wurden 4–5 Laborblätter mit jeweils zwei Messungen pro Blatt getestet.

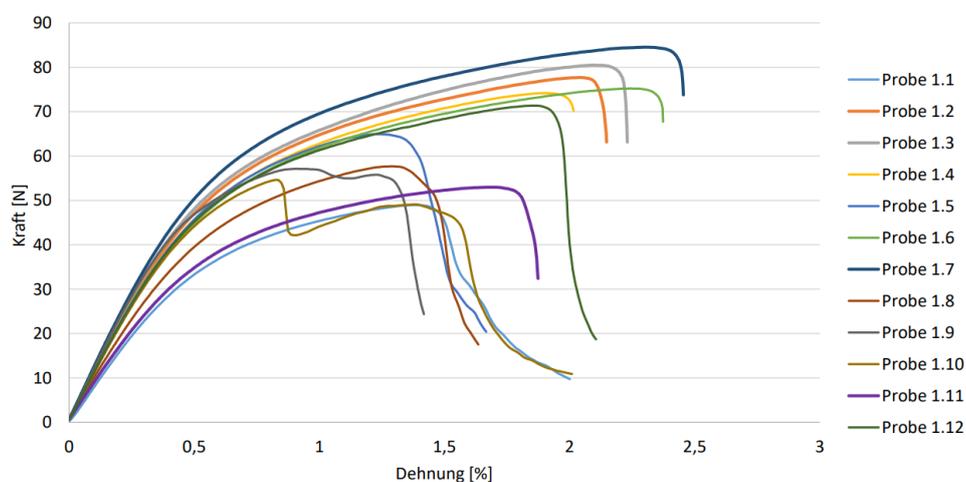


Abbildung 8: Kraft-Dehnungs-Diagramm für Sensorik-Papiere ohne Draht

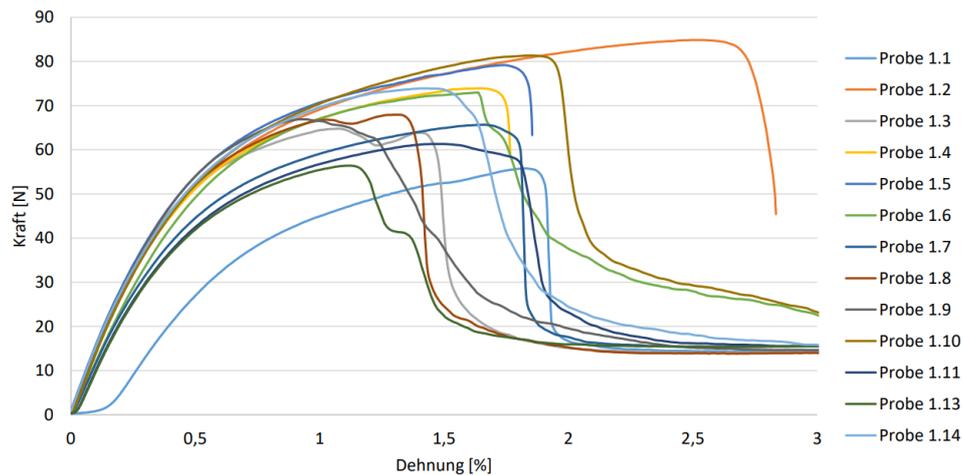


Abbildung 9: Kraft-Dehnungs-Diagramm für Sensorik Papiere mit Draht

Wichtige durchschnittliche mechanische Eigenschaften und deren Standardabweichung sind in der folgenden Tabelle für beide Probentypen (mit und ohne Kupferdraht) aufgeführt.

Tabelle 5: Übersicht von mechanischen Eigenschaften der Sensorik Papiere mit und ohne Kupferdraht

Probe	σ_T^b	σ_T^w	ε_T	W_T^b	W_T^w	E^b	E^w	E
Einheiten	kN/m	kNm/kg	%	J/m ²	J/kg	kN/m	Mnm/kg	MPa
Mit Draht								
Mittelwert	4,61	57,58	1,55	53,71	671,34	898,29	11,23	8.982,86
Standardabweichung	0,60	7,47	0,39	21,41	267,59	121,19	1,51	1211,88
Ohne Draht								
Mittelwert	4,44	55,53	1,65	55,70	696,26	704,53	8,81	7.045,33
Standardabweichung	0,80	10,06	0,51	27,11	338,89	84,68	1,06	846,76

* σ_T^b =Breite bezogene max. Zugfestigkeit, σ_T^w =Zugindex, w=Grammatur, ε_T =Bruchdehnung, W_T^b =Zugenergieadsorption, W_T^w =Zugenergieabsorptionsindex, E^b =Zugfestigkeit, E^w =Zugfestigkeitsindex, E=E-Modul

Die Proben mit dem Kupferdraht zeigen keine Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften. Sie zeigen erwartungsgemäß eine Erhöhung der Zugfestigkeit und des Elastizitätsmoduls. Die anderen gemessenen Eigenschaften ähneln denen der getesteten Proben ohne Kupferdraht.

Um dieses Konzept in einem Produktionsprozess umzusetzen, müsste das Einbringen von Kupferdrähten in den Papierherstellungsprozess integriert werden. Das ist ein vergleichbarer Prozess wie er für das Einbringen von Sicherheitsfäden bei Sicherheitspapieren, wie z. B. für Geldscheine, industriell üblich und etabliert ist. In diesem Absatz wird diese Technologie kurz beschrieben:

Eine für diese Produktionsmethode geeignete Industriemaschine ist der Rundsiebformer (siehe Abbildung 10). Mit zwei in Reihe angeordneten Rundsiebformern, könnte ein zweilagiges Papiersandwiches hergestellt werden. Die Kupferdrähte würden dabei zwischen dem ersten und dem zweiten Rundsiebformer an definierten Positionen in Laufrichtung des Papiers zwischen die beiden Papierlagen eingefügt.

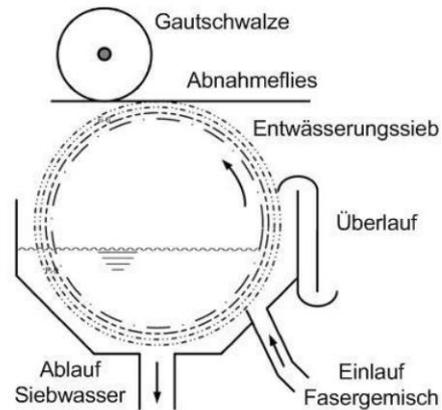


Abbildung 10: Beispiel eines Rundsiebformers

Die Entwicklung der papierbasierten Sensoren durchlief in diesem Projekt eine weitere Iteration. Dabei wurde ein mit Kupferdraht umwickeltes Papiergarn auf einer zylindrischen Hülse strukturgespult, mit Klebstoff konsolidiert, geplättet und anschließend als dichtes Sensorfeld in das Papier integriert. Anschließend wurde eine einfache Sensorelektronik an das Funktionsmuster angeschlossen und getestet. Wie in den Abbildungen unten zu sehen ist, leuchtet die LED der Elektronik rot auf, wenn das Papier berührt wird. Wenn kein Kontakt erfolgt, bleibt die LED dunkel. Dies könnte als potenzielle interaktive Oberfläche für Messestände dienen.

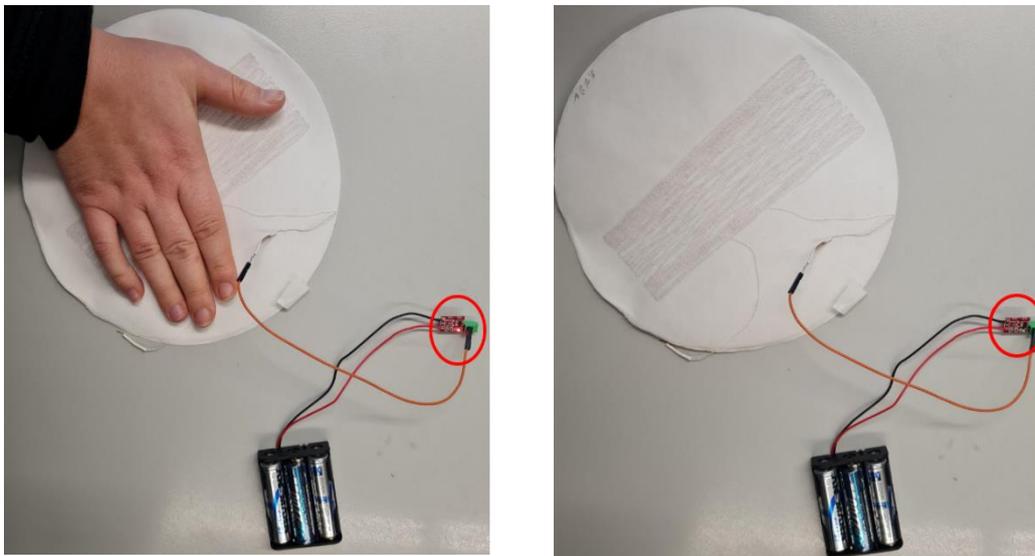


Abbildung 11: Funktionsmuster für einen papierbasierten Berührungssensor

Ein solcher Sensor wurde mit einem ähnlichen Verfahren wie dem zuvor besprochenen hergestellt. Zuerst wurde ein Laborblatt produziert und getrocknet. Um dann das Sandwich zu erzeugen, wurde der Sensor auf das trockene Blatt gelegt, das nasse Blatt vorsichtig vom Sieb auf dem Sensor abgeschlagen und dann das gesamte Konstrukt im Blatttrockner getrocknet. Dieser Sensortyp wäre auch für die Fertigung mit einem Rundsiebformer geeignet. Die Rezyklierbarkeit wurde in 3.3.4.3 untersucht.

3.3.2.2 Festigkeitsoptimierten Flächen

Eine Möglichkeit, die Festigkeit von Papier ohne Zugabe von Chemikalien usw. signifikant zu erhöhen, besteht darin, die Ausrichtung der Fasern im Papier zu ändern. Wenn die Fasern im Blatt alle in die

gleiche Richtung orientiert sind, kann das Papier größeren Belastungen in Faserrichtung standhalten. Am PMV kann hochorientiertes Papier an Prototypen im Labormaßstab hergestellt werden. Dieses unidirektionale (UD) Papier hat erhöhte Festigkeitseigenschaften und Quellvliese oder Streifen aus diesem Papier könnten verwendet werden, um sehr stabile Verbindungsstücke zu produzieren. Um die verbesserten Eigenschaften des unidirektionalen Papiers im Vergleich zu Standard-Laborbögen zu demonstrieren, wurde ein Zugprüfung mit NBSK UD und Laborblätter durchgeführt, wie in Abbildung 12 dargestellt.

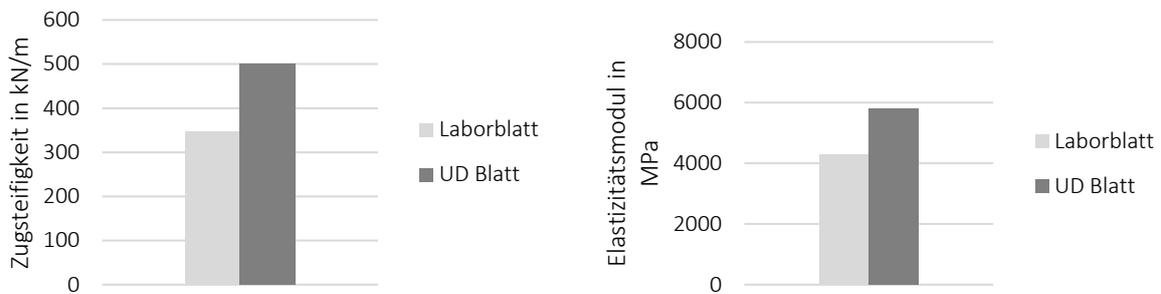


Abbildung 12: Vergleich der Zugsteifigkeit und des Elastizitätsmoduls von Laborblättern mit UD-Papieren

Das unidirektionale Papier weist hier im Vergleich zu einem Standard-Laborblatt eine um 44,4 % höhere Zugsteifigkeit und eine um 35,47 % höheres Elastizitätsmodul auf. Man erkennt, dass die mechanischen Eigenschaften stark von der Faserorientierung beeinflusst werden und dies beim Design strategisch genutzt werden kann, um stabilere Strukturen zu schaffen.

3.3.3 Grundlagen - Recycling

Zur Bewertung der Rezyklierbarkeit von Papierprodukten und papierbasierten Verpackungen existieren verschiedene Prüfmethode. Einige sind in Tabelle 6 zusammengestellt.

Tabelle 6: Übersicht von Prüfmethode zur Bewertung der Rezyklierbarkeit von grafischen Produkten und papierbasierten Verpackungen

Methode	Name
PTS-RH 021:2012 (Entwurf 2019)	Kennzeichnung der Rezyklierbarkeit von Packmitteln aus Papier, Karton und Pappe (Kat. II) sowie von grafischen Druckerzeugnissen (Kat. I)
ZELLCHEMING RECO 1, 2014	Prüfung des Rezyklierhaltens von Verpackungen (EcoPaperLoop)
UNI 11743:2019 (Aticelca MC501:2017)	Paper and board - Determination of parameters of recyclability of cellulose-based materials and products
CTP-Methode	CTP-Interne Methode zur Rezyklierbarkeitsbewertung
APCO	2022 australische Methode des Wiederaufbereitarbeit von Papier im Labormaßstab
FiberBox Voluntary Standard	Ein Standard in den USA für die Wiederaufbereitung und das Recycling von Wellpappe
CEPI	harmonisierte europäische Labortestmethode

Da im Rahmen des vorliegenden Projektes die Rezyklierbarkeit nach der CEPI-Methode geprüft wurde, wird diese im Folgenden näher beschrieben. Unter Federführung des europäischen Papierverbandes CEPI werden aktuell die in Europa üblichen Bewertungsmethode für die Rezyklierbarkeit von Papierprodukten vereinheitlicht und ein gemeinsamer Standard erarbeitet. Dabei steht bisher die Rezyklierbarkeit in einer Standardpapierfabrik im Fokus. Zu einem späteren Zeitpunkt soll auch eine Bewertungsmethode für Verpackungsmaterialien entstehen, die nur in speziell dafür ausgelegten

Papierfabriken rezykliert werden können (wie heute z. B. Getränkekartons). Für die Bewertung in diesem Projekt wurde die aktuelle CEPI-Methode für Standardpapierfabriken [15] gewählt. Die Methode wird nachfolgend kurz beschrieben:

Bei Produkten beträgt die Gesamtprobenmenge 250 g lufttrocken (lutro). Zunächst wird eine doppelte Bestimmung des Feuchtigkeitsgehalts des Produkts oder Materials gemäß ISO 638 durchgeführt. Anschließend werden die Proben in kleinere Stücke mit den Maßen 3 cm x 3 cm geschnitten. Entfernbare Nicht-Papierbestandteile sollten vor dem Zerfall von der Probe getrennt und separat gewogen werden. Das Gewicht dieser Komponenten wird dem Grobrejekt zugerechnet. Nachdem die Probe für den Recyclingtest vorbereitet wurde, wird das Verfahren mit den folgenden Schritten fortgesetzt:

1. Zerfaserung im Desintegrator

Im nächsten Schritt folgt eine Zerfaserung im Labor-Desintegrator. Hierbei werden 50 g ofentrocken (otro) des Produkts bei einem Suspensionsvolumen von 2 l für 10 min (30.000 Umdrehungen) und einer Temperatur von 40 °C aufgeschlagen. Die Desintegrationszeit kann in einer zweiten Charge unter denselben Bedingungen auf 20 Minuten verlängert werden, wenn der Grobrejekt der Probe eine erhebliche Menge an Fasermaterial enthält und die Grobrejekt über dem im Bewertungsprotokoll des CEPI definierten Schwellenwert liegt.

2. Filtrat Analyse

Unmittelbar nach der Desintegration folgt die Filtration der Suspension. Dazu wird eine bekannte Menge (ca. 100 g) über ein Filterpapier (Durchmesser 150 mm) mit einer Labornutsche filtriert. Der chemische Sauerstoffbedarf des Filtrats muss ebenfalls sofort anhand eines CSB-Küvettentests (ISO 6060) gemessen werden.

3. Bestimmung der Grobrejekt

Die Grobsortierung wird mit einem Somerville-Fraktionierer durchgeführt, der mit einer Lochplatte mit Löchern von 5 mm Durchmesser und einem Wasserdurchfluss von 8,6 l/min betrieben wird. Die Grobsiebung wird 5 min lang durchgeführt. Das Akzept wird zur weiteren Untersuchung in einem Fass gesammelt. Jeglicher auf dem Sieb verbleibende Rejekt wird dann in einem Trockner eines Blattbildners auf einem Filterpapier getrocknet und dann in einen 105 °C warmen Ofen gegeben, bis eine konstante Masse erreicht ist. Anschließend wird das Trockengewicht des Grobrejekts berechnet.

4. Bestimmung der Stoffdichte nach der Grobsortierung

Anschließend wird die Stoffkonsistenz gemäß EN ISO 4119 bestimmt.

5. Blattklebetest und Prüfung des optischen Erscheinungsbildes des Grobakzept

Nach dem Homogenisieren des groben Gutstoffs werden zwei Laborblätter mit $60 \pm 2 \text{ g/m}^2$ gebildet. Eine detaillierte Beschreibung findet man in der CEPI-Norm [15].

6. Bestimmung des Feinrejekts

Die Feinsiebung erfolgt mit dem Somerville-Fraktionierer mit einer Schlitzplatte von 150 µm breiten Schlitzen.

7. Blattklebertest und Prüfung des optischen Erscheinungsbildes des Feinakzept

Der Blattklebertest für den Feinakzept wird nach der gleichen Methodik wie der oben beschriebene vorherige Blattklebertest durchgeführt.

8. Bestimmung des Gehalts an Klebepartikeln (Makrostickies)

Die Bewertung der Makrostickies erfolgt am Grobakteps gemäß ISO 15360-2. Zunächst muss die Probe im Somerville-Fraktionierer mit der 150-µm-Schlitzplatte 10 Minuten lang fraktioniert werden. Das auf dem Sieb verbleibende Material wird weiter ausgewertet. Dieser Rejekt wird in ein separates Gefäß überführt. Um die Rejektpartikel aufzufangen, ist ein Filterpapier in den Blattbildner einzulegen. Die Stickies können sich auf dem Filterpapier im Blattbildner nicht überlappen. Ist die Konzentration an Stickies zu hoch, muss das Screening mit einer geringeren Probenmenge erneut durchgeführt werden. Das Filterpapier mit Stickies muss im Blattformer bei 93 °C für 10 Minuten mit Silikonpapier als Deckblatt getrocknet werden. Das getrocknete Blatt muss in schwarze Tinte getaucht und erneut 10 Minuten bei 93 °C getrocknet werden. Anschließend wird die Seite des Filterpapiers mit den klebrigen Partikeln mit Korundpulver bestäubt und erneut getrocknet. Das überschüssige Korundpulver wird entfernt und die Stickies anschließend mittels Bildanalyse mit einem kalibrierten Scanner und geeigneter Software beurteilt.

3.3.4 Rezyklierbarkeit von Papiergarnen

Die oben beschriebene CEPI-Methode wurde für alle in diesem Abschnitt besprochenen Versuche verwendet. Für jede Probe wurde eine Zerfaserungszeit von 20 Minuten verwendet. Dieser Abschnitt enthält hauptsächlich Bewertung mit Hilfe der aktuell gültigen CEPI Scorecard, welche die Eignung des Produkts für die Recyclingfähigkeit quantifiziert. Nähere Erläuterungen der CEPI-Methode sind in nachfolgendem Unterkapitel beschrieben.

3.3.4.1 Rezyklierbarkeit von Papiergarn (naturbraun; ø 1,4 mm)

Bei der Durchführung der CEPI-Methode für ein im Projekt eingesetztes naturbraunes Papiergarn mit 1,4 mm Durchmesser kein Grobrejekt vorhanden. Es gab etwas Feinrejekt mit einem Gewicht von 0,231 g, aber die Berechnung ergab, dass dies unbedeutend war, wenn man die gesamte 20 g-Probe betrachtete, die bei der Feinsortierung gemessen wurde. Es ist wichtig darauf hinzuweisen, wie die Ausbeute mit der CEPI-Methode berechnet wird, da dies ein wichtiger Parameter für die Bestimmung der Recyclingfähigkeit von Proben ist. Die Berechnung lautet wie folgt: $100\% - (CR [\%]) - (0,9 * FR)$. In der Berechnung wird Grobrejekt als CR in Prozent, Feinrejekt in Prozent als FR bezeichnet und 0,9 ist ein Korrekturfaktor, der experimentell ermittelt wurde.

Tabelle 7: Rezyklierbarkeit von Papiergarn (naturbraun; 1,4 mm ø) - CEPI Scorecard

Recyclability Results	Acronym	INPUT	Unit	Recyclability Score Standard Mill	Score Range
Coarse Reject	CR	0	0 - 100 [%]		
Fine Reject	FR	0	0 - 100 [%]		
Yield	Y	100,0	0 - 100 [%]	100	min -100, max 100
Visual Impurities	VI	1	1 - 4 [Level]	0	min -30, max 0
Sheet Adhesion	SA	1	1 - 3 [Level]	0	min KO, max 0
				100	/100

Die CEPI-Scorecard muss mit der Menge an Grobrejekt und Feinrejekt aus der Probe in % ausgefüllt werden. Eine Bewertung der visuellen Verunreinigungen und Adhäsion muss ebenfalls in die Bewertungskarte eingetragen werden. Basierend auf den Eingaben des Testers wird ein Recycling-Score berechnet. Die Bewertung wird hauptsächlich anhand der Faserausbeute ermittelt, es können jedoch auch optische Verunreinigungen und Probleme mit der Blattklebrigkeit ein Einfluss haben. Das zu berücksichtigendes Endergebnis wird in der unteren Zeile angezeigt.

Auch der Eindampfrückstand zeigte keine nennenswerten Probleme. Die durchschnittliche Verdampfungsrückstandsmenge betrug 0,00127 %. Selbst die Makrosticky-Bewertung zeigte unbedeutende Ergebnisse. Das bedeutet, dass das Papier im gewählten Papiergarn ideal für das Papierrecycling geeignet ist.

Tabelle 8: Makrosticky Fläche [mm²/kg] für Papiergarn-Probe (naturbraun; 1,4 mm ϕ)

Probe	100-200 μ m	200-300 μ m	300-400 μ m	400-500 μ m	500-600 μ m	600-1000 μ m	1000-1500 μ m	1500-2000 μ m
1	7,17	58,42	30,82	67,38	0	0	0	0
2	24,73	96,42	0	0	0	159,14	0	0

Die Spalten in Tabelle 8 zeigen die Anzahl der Stickies, die vom Computerprogramm mit der in der Spaltenüberschrift angegebene Größe identifiziert wurden. Die Ergebnisse der Makrosticky-Messung sind sehr niedrig, was ideal für das Papierrecycling ist.

3.3.4.2 Rezyklierbarkeit von sensorischen Papiergarnen (mit Kupferdraht)

Es wurden verschiedene Proben getestet, um den Einfluss der Kupferdrahtmenge auf den Papierrecyclingprozess herauszufinden. Die experimentelle Matrix ist in nachfolgender Tabelle zu sehen. Bei allen Proben wurde ein Papiergarn mit einem Durchmesser von 1,4 mm verwendet.

Tabelle 9: Proben Bezeichnung von Papiergarnproben mit Kupferdraht

Kern: Papiergarn, 1,4 mm Durchmesser	Umwicklung	
	1000 U/m	100 U/m
Drahtdurchmesser		
50 μ m	D1	D2
40 μ m	D3	D4
80 μ m	D5	D6

Probe D1:

Das Recycling der ersten Probe mit Kupferdraht ergab, dass der Kupferdraht Probleme beim Zerkleinern und auch bei den Sortierschritten aufwirft. Die Menge an Grobrejekt betrug bei dieser Probe 15 g und die Menge an Feinrejekt betrug 3 g.

Tabelle 10: Rezyklierbarkeit von Probe D1 Anhand der CEPI Score Card

Recyclability Results	Acronym	INPUT	Unit	Recyclability Score Standard Mill	Score Range
Coarse Reject	CR	30	0 - 100 [%]		
Fine Reject	FR	10,5	0 - 100 [%]		
Yield	Y	60,6	0 - 100 [%]	-100	min -100, max 100
Visual Impurities	VI	2	1 - 4 [Level]	-5	min -30, max 0
Sheet Adhesion	SA	1	1 - 3 [Level]	0	min KO, max 0
				-100	/100

Die CEPI-Bewertungskarte gibt an, dass Proben mit einer Gesamtbewertung von weniger als 0 nicht für das Standard-Papierfabrik-Recycling geeignet sind, sich aber möglicherweise für das Recycling in spezialisierten Papierfabriken eignen. Die Ausbeute weist darauf hin, dass die Papiere schlecht zerkleinert werden können, was in Papierfabriken beim Recycling solcher Papiere Probleme verursachen kann.

Probe D2:

Diese Probe weist weniger Windungen des Kupferdrahts pro Meter auf als Probe D1. Probe D2 hatte weniger Grobrejekt als die vorherige Probe, was aufgrund der geringeren Menge an Kupferdraht in der Probe plausibel ist. Die Menge an Feinrejekt (7,70 g) stieg im Vergleich zu Probe D1 dramatisch an und daher war die Gesamtausbeute geringer als die von D1. Die Ergebnisse sind in Tabelle 11 dargestellt.

Tabelle 11: Rezyklierbarkeit von Probe D2 Anhand der CEPI Score Card

Recyclability Results	Acronym	INPUT	Unit	Recyclability Score Standard Mill	Score Range
Coarse Reject	CR	12,75	0 - 100 [%]		
Fine Reject	FR	38,48	0 - 100 [%]		
Yield	Y	52,6	0 - 100 [%]	-100	min -100, max 100
Visual Impurities	VI	2	1 - 4 [Level]	-5	min -30, max 0
Sheet Adhesion	SA	1	1 - 3 [Level]	0	min KO, max 0
				-100	/100

Der Wert nach der CEPI-Methode weist darauf hin, dass auch dieses Papier in Standardpapierfabriken Probleme beim Recycling verursachen kann.

Probe D3:

Im Desintegrator bildeten sich Kupferdrahtknoten, welche die Weiterverarbeitung erschwerten. Ein Beispiel für einen dieser Klumpen ist in der folgenden Abbildung 13 zu sehen. Diese Klumpen führten auch dazu, dass sich mehr Rejekt bildete und dass sie das Sieb verstopften.



Abbildung 13: Kupferdrahtknoten in Grobrejekt zu sehen

Trotz 9 g Grobrejekt war die Menge des Grobrejekts geringer als bei Probe D1. Dies weist darauf hin, dass eine Verringerung des Kupferdrahtdurchmessers für den Recyclingprozess von Vorteil sein könnte.

Tabelle 12: Rezyklierbarkeit von Probe D3 Anhand der CEPI Score Card

Recyclability Results	Acronym	INPUT	Unit	Recyclability Score Standard Mill	Score Range
Coarse Reject	CR	18,03	0 - 100 [%]		
Fine Reject	FR	36,95	0 - 100 [%]		
Yield	Y	48,7	0 - 100 [%]	-100	min -100, max 100
Visual Impurities	VI	2	1 - 4 [Level]	-5	min -30, max 0
Sheet Adhesion	SA	1	1 - 3 [Level]	0	min KO, max 0
				-100	/100

Der Wert nach CEPI weist darauf hin, dass das Papier erhebliche Zerfaserungsprobleme aufweist, die erheblichen Auswirkungen auf den Prozess in der Standardpapierfabrik haben und daher nach Möglichkeit vermieden werden sollten. Dies ist die erste Probe, die laut CEPI-Recyclingbewertung in die schlechteste Kategorie fällt. Das nach der Feinsortierung entstandene Papier enthielt außerdem mehrere nicht aussortierte Kupferdrahtstücke, was äußerst unerwünscht ist.

Probe D4:

Probe D4 hatte eine der höchsten Faserausbeuten, was höchstwahrscheinlich auf die geringere Windungszahl pro Länge des Kupferdrahts zurückzuführen ist.

Tabelle 13: Rezyklierbarkeit von Probe D4 Anhand der CEPI Score Card

Recyclability Results	Acronym	INPUT	Unit	Recyclability Score Standard Mill	Score Range
Coarse Reject	CR	8,94	0 - 100 [%]		
Fine Reject	FR	32,93	0 - 100 [%]		
Yield	Y	61,4	0 - 100 [%]	-100	min -100, max 100
Visual Impurities	VI	2	1 - 4 [Level]	-5	min -30, max 0
Sheet Adhesion	SA	1	1 - 3 [Level]	0	min KO, max 0
				-100	/100

Der Wert nach CEPI weist darauf hin, dass das Papier einige Wiederaufbereitungsprobleme aufweist, die sich auf den Prozess in der Standardpapierfabrik auswirken und daher nicht häufig vorkommen sollte.

Probe D5:

Die Probe D5 zeigte die größten Schwierigkeiten beim Recycling. Nach der Desintegration waren mehrere Kupferdrahtknoten vorhanden, was bei den Screening-Schritten viele Probleme verursachte. Das Grobrejekt betrug 35,39 g (70,77 %). Die extreme Rejektmenge ist in der Abbildung 14 zu sehen.



Abbildung 14: Probe D5 - Grobrejekt

Die Sortierungsschritte erwiesen sich als wirksam beim Aussortieren der Kupferdrähte, da das fertige Papier keine sichtbaren Kupferstücke enthielt. Allerdings war der Faserverlust so groß, dass dieses Produkt für einen Recyclingprozess definitiv ungeeignet ist.

Tabelle 14: Rezyklierbarkeit von Probe D5 Anhand der CEPI Score Card

Recyclability Results	Acronym	INPUT	Unit	Recyclability Score Standard Mill	Score Range
Coarse Reject	CR	70,77	0 - 100 [%]		
Fine Reject	FR	12,82	0 - 100 [%]		
Yield	Y	17,7	0 - 100 [%]	-100	min -100, max 100
Visual Impurities	VI	1	1 - 4 [Level]	0	min -30, max 0
Sheet Adhesion	SA	1	1 - 3 [Level]	0	min KO, max 0
				-100	/100

Probe D5 hatte von allen auf Recyclingfähigkeit getesteten Proben die niedrigste Faserausbeute. Es überrascht nicht, dass das Ergebnis nach CEPI darauf hinweist, dass diese Probe erhebliche Zerfaserungsprobleme aufweist, die erhebliche Auswirkungen auf den Recyclingprozess haben und daher nach Möglichkeit vermieden werden sollten.

Probe D6:

Die Probe mit der insgesamt besten Rezyklierbarkeit war Probe D6.

Tabelle 15: Rezyklierbarkeit von Probe D6 Anhand der CEPI Score Card

Recyclability Results	Acronym	INPUT	Unit	Recyclability Score Standard Mill	Score Range
Coarse Reject	CR	8,29	0 - 100 [%]		
Fine Reject	FR	30,47	0 - 100 [%]		
Yield	Y	64,3	0 - 100 [%]	-100	min -100, max 100
Visual Impurities	VI	2	1 - 4 [Level]	-5	min -30, max 0
Sheet Adhesion	SA	1	1 - 3 [Level]	0	min KO, max 0
				-100	/100

Ähnlich wie Probe D1 wies Probe D6 eine Bewertung auf, die auf einige Probleme bei der Zerfaserung hinweist, aber das Produkt kann recycelt werden, solange es nicht in großen Mengen in eine Papierfabrik eingetragen wird.

Zusammenfassung

Eine Zusammenfassung der Ergebnisse basierend auf der Faserausbeute finden Sie in Tabelle 16.

Tabelle 16: Zusammenfassung der Recycling-Versuche von Papiergarn mit Kupferdraht

Probe	Ertrag in Prozent
D1	56,5
D2	52,6
D3	48,7
D4	61,4
D5	17,7
D6	64,3

Der Durchmesser des Kupferdrahtes scheint die Zerfaserbarkeit nicht stark zu beeinflussen. Der dominierende Faktor scheint die Dichte der Umwindungen zu sein. Proben mit einer Umwindung von 1000 U/m schnitten allgemein schlechter ab als die Proben mit 100 U/m. Die Empfehlung ist, ein Papiergarn mit möglichst wenig Kupferdraht zu wählen und die Gesamtmenge an Kupferdraht im Endprodukt zu reduzieren und die Rezyklierbarkeit zu optimieren.

3.3.4.3 Rezyklierbarkeit des Sensorgarns des Funktionsmuster „Papierbasierter Sensor“

Das in Abbildung 11 genutzte Sensorgarn, bestehend aus mit Kupferdraht umwundenen Papiergarn, wurde nachfolgend auf die Rezyklierbarkeit untersucht. Da die sensorischen Flächen einen nur geringen Teil der Messetheke ausmachen, wurden nur 2 g des Sensorgarns in den Recyclingtest einbezogen und die restlichen 48 g waren das Papiergarn, das für die gespulten Elemente verwendet wird. Es gab keine Probleme mit dem Zerfaserung der Probe. Der Grobrejekt betrug 0,561 g und das Feinrejekt betrug 0,383 g. Das für die Sensoren verwendete weiße Papiergarn (\varnothing 0,4 mm) ließ sich während der Sortierungsschritte leicht aussortieren. Die CEPI-Scorecard ergibt für dieses Produkt eine Bestnote.

Tabelle 17: Rezyklierbarkeit des Sensorgarns nach der CEPI Score Card

Recyclability Results	Acronym	INPUT	Unit	Recyclability Score Standard Mill	Score Range
Coarse Reject	CR	1,12	0 - 100 [%]		
Fine Reject	FR	1,92	0 - 100 [%]		
Yield	Y	97,2	0 - 100 [%]	94	min -100, max 100
Visual Impurities	VI	2	1 - 4 [Level]	-5	min -30, max 0
Sheet Adhesion	SA	1	1 - 3 [Level]	0	min KO, max 0
				89	/100

3.3.5 Rezyklierbarkeit von Verbindungsstücken aus Papphülsen

Verbindungsstücke für die Messetheke wurden individuell aus Papphülsen von Werth Metallpulver gefertigt. Die folgende Abbildung 15 zeigt die Beschreibung der verwendeten Papphülsen.



Außendurchmesser:	25,5 mm (+/- 0,5mm)
Farbe:	Grau
Innendurchmesser:	18mm
Länge:	150,0 mm
Produktart:	Papphülse
Weitere Namen:	Pappröllchen, Nisthülsen, Wickelhülsen, Wickelkerne, Kondensatorhülsen, paper tubes, Papierrollen, Spoletta, Spoiletta
Werkstoff:	Graukarton
Wicklung:	parallel



Abbildung 15: Papphülsen von Werth Metallpulver

Um die Papphülsen zu den für die Messetheke benötigten Formen zu verbinden, wurde ein transparenter PVAC-Kleber verwendet. Der verwendete Kleber war PVAC-Weissleim Holz Classic HV710 von Ponal. Dieser Kleber erfüllt DIN EN 204 Beanspruchungsgruppe D2. Dadurch hält der Leim kurzzeitiger Wassereinwirkung beispielsweise durch Spritzwasser oder ab einer Holzfeuchte von bis zu 18 % stand.

Für den Recyclingtest wurde das Worst-Case-Szenario untersucht. Die für den Recyclingtest verwendeten Papphülsen waren außen komplett mit Leim bedeckt. Der Kleber wurde vollständig trocknen gelassen, bevor die Proben für den Recyclingtest vorbereitet wurden. Es waren nur 0,045 g Grobrejekt vorhanden und der Feinrejekt betrug nur 0,33 g. Während der Sortierung konnte eine

Schaumentwicklung beobachtet werden. Dies ist höchstwahrscheinlich auf den Kleber zurückzuführen. (siehe Abbildung 16)



Abbildung 16: Schaumentwicklung bei der Feinsortierung von Papphülsen

Der Blattklebertest nach der Grobsiebung scheiterte höchstwahrscheinlich aufgrund des in den Proben vorhandenen Klebers. Der Blattklebertest nach der Feinsortierung verlief hingegen problemlos. Die Ergebnisse sind in Abbildung 17 abgebildet. Das bedeutet, dass die Rückstände von den Klebstoffen in der Feinsortierung einer Papierfabrik abgetrennt und ausgeschleust werden können.

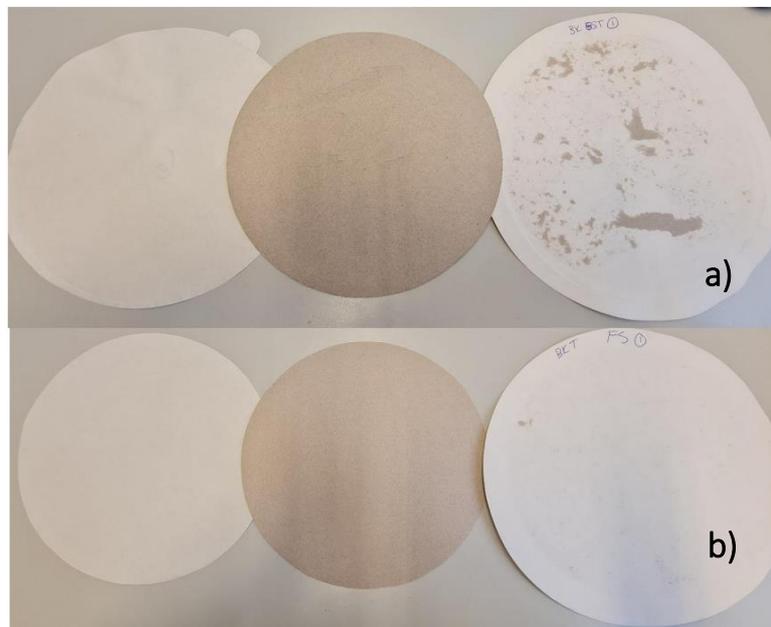


Abbildung 17: Blattklebertest für a) Grobsortierung und b) Feinsortierung

Der Blattklebertest nach der Grobsortierung ist laut CEPI jedoch kein Ausschlusskriterium. Der Blattklebertest, der in die Scorecard zur Recyclingfähigkeit eingetragen wird, ist der Blattklebertest nach der Feinsortierung. Somit erhält die Probe beim Blattklebertest die beste Bewertung der Stufe 1. Auch die Ausbeute dieser Probe ist mit 98,4 % äußerst gut. Die Scorecard (siehe Tabelle 18) zeigt, dass es für die Verbindungsstücke in der Standardpapierfabrik voraussichtlich keine Probleme gibt.

Tabelle 18: Rezyklierbarkeit der Papphülsen anhand der CEPI Score Card

Recyclability Results	Acronym	INPUT	Unit	Recyclability Score Standard Mill	Score Range
Coarse Reject	CR	0,09	0 - 100 [%]		
Fine Reject	FR	1,67	0 - 100 [%]		
Yield	Y	98,4	0 - 100 [%]	97	min -100, max 100
Visual Impurities	VI	2	1 - 4 [Level]	-5	min -30, max 0
Sheet Adhesion	SA	1	1 - 3 [Level]	0	min KO, max 0
				92	/100

Auch die bei der Auswertung vorhandenen Makrostickies waren unbedeutend. Die Werte für die Makrostickies lagen alle unter einer Anzahl von 10 Stickies pro Größen-Kategorie und kleiner als 400 µm.

3.3.6 Rezyklierbarkeit von Quellvlies

Für die Recyclingprüfung wurde von GarnTec ein typisches Quellvlies zur Verfügung gestellt. Die Idee war, das Quellvlies dazu zu nutzen, die Verbindung der Spulenelemente mit den Verbindungsstücken zu stabilisieren. Um einen realistischen Recyclingtest durchzuführen, wurden als Rohmaterial 40 g Papiergarn und 10 g Quellvlies GTST 30 (Polyester als Fasermaterial) von GarnTec verwendet. Bei der Zerkleinerung bereitete das Quellvlies große Probleme. Das Quellvlies wickelte sich um den Rotor und im Desintegrator bildete sich eine großer Materialklumpen (siehe nachfolgende Abbildung). Das Quellvlies von GarnTec ist kein Produkt auf Papierbasis, sondern besteht aus synthetischen Fasern. Auf dem Markt gibt es keine Quellvliese auf Papierbasis, es wäre aber möglich, ein Quellvlies auf Papierbasis herzustellen.



Abbildung 18: Grobrejekt von Quellvlies beim Recycling-Versuch

Der Ausschussanteil von 17,58 g führte dazu, dass die Probe den Recyclingtest sofort nicht bestand. Die Feinsortierung wurde aus diesem Grund nicht durchgeführt. Die CEPI Scorecard weist darauf hin, dass das Quellvlies nicht für das Recycling in Standardpapierfabriken geeignet ist, in anderen Fabriktypen jedoch möglicherweise recyclingfähig ist.

Tabelle 19 : Rezyklierbarkeit des Quellvlieses anhand der CEPI Score Card

Recyclability Results	Acronym	INPUT	Unit	Recyclability Score Standard Mill
Coarse Reject	CR	35,16	0 - 100 [%]	
Fine Reject	FR	0	0 - 100 [%]	
Yield	Y	64,8	0 - 100 [%]	-100
Visual Impurities	VI	2	1 - 4 [Level]	-5
Sheet Adhesion	SA	1	1 - 3 [Level]	0
				-100

Die Probe hatte keine Probleme mit Makrostickies. Bei der Bewertung erhielten beide Blattklebertests die Bestnote.

Tabelle 20: Makrosticky - Ergebnisse Quellvlies Recycling Versuch

Makrostickies Werte	Einheiten	Durchschnitt
Gesamt Makrostickies Fläche 100-2.000 µm	mm ² /kg	
Fläche ISO 100-200 µm	mm ² /kg	71
Fläche ISO 200-300 µm	mm ² /kg	137
Fläche ISO 300-400 µm	mm ² /kg	46
Fläche ISO 400-500 µm	mm ² /kg	84
Fläche ISO 500-600 µm	mm ² /kg	54
Fläche ISO 600-1000 µm	mm ² /kg	78

Die im Test gemessene Menge an Makrostickies war unbedeutend und die Probe bestand die Bewertung. Für zukünftige Arbeiten empfiehlt sich die Erstellung eines papierbasierten Quellvlieses.

3.4 Strukturgespulte Papiergarn-Verbundwerkstoffe

Ziel der Arbeiten war es, die Strukturspulentechnologie so zu entwickeln, dass Papiergarn-Elemente entstehen, die mechanische Festigkeiten und die Anforderungen erfüllen sowie Recyclingfähigkeit aufweisen. Hierfür wurden in einem ersten Schritt gemeinschaftlich Gestaltungsansätze gefunden, die dann in geeignete Dornkörper und Spulstrategien umgesetzt wurden. Die Konsolidierung erfolgte ebenfalls hierauf und wurde auf die eingesetzten Garne angepasst.

3.4.1 Im Projekt eingesetzte Papiergarne

In folgender Tabelle ist eine Übersicht der im Projekt eingesetzten Papiergarne, die alle spulentechnisch verarbeitet werden konnten.

Tabelle 21: Im Projekt eingesetzte Papiergarne

Durchmesser	Farbe	Feinheit in tex	Höchstzugkraft in cN	Dehnung in %	spezifische Festigkeit in cN/tex
0,4 mm	weiß	112	818	5,31	7,31
0,8 mm	hellgrün	334	2738	4,12	8,20
1,6 mm	rohbraun	1614	13300	3,17	8,24

Das weiße Papiergarn wurde für hinterleuchtete Strukturen, die rohbraune Variante für die Herstellung der tragenden Strukturen bei den Demonstratoren eingesetzt. Das hellgrüne Papiergarn wurde für die Verarbeitung zum Sensorgarn verwendet, um dies von den anderen Garnen hervorzuheben, da so der Anwender leicht erkennen kann, wo er berühren muss. Es wurde auch für die Herstellung von Verbindungselementen genutzt.

3.4.2 Spulstrategien

In grundlegenden Spulversuchen mit den Garnen mit großen Durchmessern wurden typische spultechnische Effekte beobachtet und in die Spulstrategie umgesetzt. Es wurden bauteilabhängig Parametersätze erarbeitet, die zu augenscheinlich guten Spulerggebnisse führten.

Für eine Reduzierung des spultypischen Schleppfehlers wurden diese Bereiche mit einer rutschhemmenden Beschichtung versehen. Ebenso erfolgte eine Anpassung des Steigungswinkels sowie der Fadenlaufgeschwindigkeit.

Zur Erzielung einer konstanten Fadenspannung konnte eine geeignete Fadenzuführung gefunden werden. Die Vorlagespulen (die Spulen, von denen das Garn im Spulprozess abgezogen wird) wurden mithilfe von Feingestricken präpariert, wodurch die Konstanz ebenfalls erhöht werden konnte. Auf der in Abbildung 19 gezeigten Spulmaschine wurden die Spulstrategien erarbeitet und die strukturgespulnten Elemente hergestellt.



Sonder-Präzisionskreuzspulmaschine JBF MHW-2

- Parallel- oder Präzisionskreuzwicklung
- Spulprogramm individuell einstellbar pro Spulstelle
- elektronischer Fadenverlegung

leicht auszutauschende Dorne: Spulendorn mit pneumatischer Hülsenklemmung, kernlos Wickeln oder Einsatz von Sonder-Dornen möglich

Möglichkeit zusätzliche Elemente an einem Profil zu befestigen

Abbildung 19: Sonderwickelmaschine JBF – MHW-2 im Spultechnikum der DITF

3.4.3 Konsolidierung

Damit der Spuldorn entfernt und so ein eigenständiges Bauteil entstehen kann, müssen die abgelegten Papiergarne konsolidiert werden. Für die Konsolidierung wurde ein stärkebasierter Klebstoff eingesetzt. Bauteile mit diesem wasserbasierten Klebstoff können über den Altpapierweg recycelt werden, was über die CEPI-Methode nachgewiesen wurde (siehe 3.3.4).

Es wurden drei Auftragsarten validiert, der Walzenauftrag nachträglich zum Strukturspulprozess, ein Auftrag während des Spulprozesses im Bad und der Walzenauftrag während des Spulprozesses. Im Anschluss an den Klebstoffauftrag erfolgte stets ein Trocknungsvorgang, der durch eine Temperaturbeaufschlagung von 60°C auf ca. eine Stunde verkürzt werden konnte.

In der nachfolgenden Tabelle sind diese drei Konsolidierungsarten erläutert und gegenübergestellt.

Tabelle 22: Gegenüberstellung der Methoden zum Klebstoffauftrag

	Walzenauftrag nachträglich zum Spulprozess	Bad	Walzenauftrag während des Spulprozesses
Beschreibung des Prozesses	Nach dem Spulprozess wird das Bauteil von der Maschine abgenommen und mittels einer Walze mit dem Klebstoff beschichtet.	Vor der Fadenablage auf dem Spuldorn wird das Garn durch ein Klebstoffbad gezogen.	Der Spulprozess wird unterbrochen bzw. die Fadengeschwindigkeit reduziert, so dass der Walzenauftrag auf dem Spuldorn durchgeführt werden kann.
Ergebnis des Klebstoffauftrags vor der Konsolidierung	Augenscheinlich dringt der Klebstoff bei dicken Garnschichten nicht bis zur untersten Garnlage durch.	Gleichmäßige Benetzung des Garns, ggf. zu große Klebstoffmenge	Gleichmäßige Benetzung des Garns
Ergebnis nach der Konsolidierung	Keine ausreichende Stabilität bei dicken Schichten wegen fehlender Klebstoffdurchdringung	Ausreichende Stabilität, gute Klebstoffdurchdringung	Gute Stabilität, gut einstellbares Klebstoffverhältnis
Beurteilung der Umsetzung im Prozess	Gut, Spulvorgang verläuft trocken, d.h. mit normal hoher Fadengeschwindigkeit	Mittel-schlecht, durch den flüssigen Klebstoff im Spulprozess ist die Fadengeschwindigkeit stark reduziert.	Gut, Spulvorgang verläuft trocken, d.h. mit normal hoher Fadengeschwindigkeit
Prozessgeschwindigkeit	mittel-hoch	mittel-hoch	mittel
Automatisierungspotential	hoch	hoch	mittel
Schlussbewertung	Keine ausreichende Stabilität bei dicken Schichten erzielbar	Reduzierte Fadengeschwindigkeit	Gutes Handling und Ergebnis

Entsprechend der gezeigten Bewertung wurde der Walzenauftrag während des Spulprozesses in der Konsolidierung gewählt. Bei einem Stangenelement mit der Gesamtfadenlänge von 65 m wurde nach je ca. 20 m dreimal Klebstoff aufgetragen.

3.5 Entwicklung der Baukastenelemente und Funktionsintegration

Es wurden verschiedene Baukastenelemente definiert, die für eine Umsetzung der festgelegten Eventmöbel erforderlich sind. Diese wurden als Muster und schließlich Prototypen gefertigt.

3.5.1 Lineare und flächige Baukastenelemente

Für eine Umsetzung der gefundenen Gestaltungsansätze wurden runde Dornkörper mit einem Außendurchmesser von 25 mm festgelegt. Hierfür wurden geeignete Maschinenaufnahmen entwickelt und hergestellt (siehe Abbildung 20), die die erforderlichen Schnittstellen zur Spulmaschine bilden. Dieser Durchmesser wurde in Vorversuchen aufgrund der Erkenntnisse zur Verarbeitung von Garnen mit größeren Garndurchmessern ermittelt. Im Projekt wurden hierzu Vorversuche mit Papiergarnen bis zu 2,0 mm Durchmesser durchgeführt. Bewertet wurden die Vormuster hinsichtlich der Präzision der Fadenablage, der darstellbaren Strukturen und der spultechnisch relevanten Parameter.

Dorn und Hülse (Metall) für stangenförmige strukturgespulte Elemente



während des Spulens



Abbildung 20: Umsetzung der wirtschaftlichen Herstellung von strukturgespulten stangenförmigen Elementen

Die stabförmigen Elemente (Rohre) bilden das Grundgerüst der Eventmöbel. Für die Herstellung der stabförmigen, linearen Baukastenelemente (nach Variante 2 in Abbildung 24) wurde ein variables Dornsystem entwickelt. Dieses erlaubte einen raschen Wechsel an der Spulstelle und bildet damit die Grundlage für eine wirtschaftliche Herstellung solcher Bauteile. Es wurden verschiedene spulentechnische Parametersätze erarbeitet und umgesetzt, die u.a. aus den in Abbildung 21 gezeigten Einflussfaktoren bestehen.

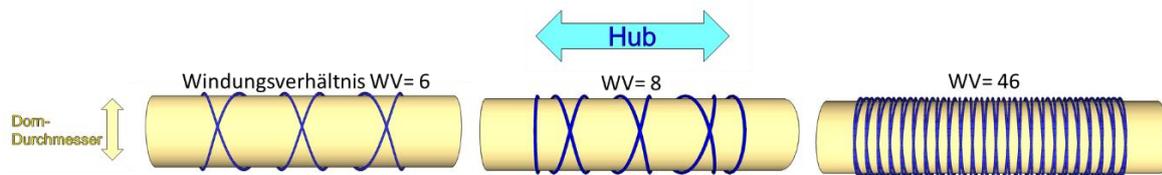


Abbildung 21: Wichtige Spulparameter, mit Beispielen von Windungsverhältnissen

Flächige Elemente können die Verkleidungen der Theke und Regalböden bilden. So mussten Anforderungen an die Optik und an eine ausreichende Festigkeit und Stabilität erfüllt werden. Als Richtwert für die Stabilität eines Regalbodens wurde gemeinschaftlich eine Last von ca. 6 kg definiert, da dieser einen Monitor bzw. Drucker tragen sollte. Darüber hinaus wurde ein Sicherheitsfaktor von 2,5 angenommen. Für die Herstellung von flächigen Baukastenelementen wurden drei Ansätze erarbeitet und untersucht: das Spulen auf einem zylindrischen Dorn mit anschließendem Aufschneiden und flach drücken, das Spulen auf einem flächigen Dorn und das Bespulen eines Kerns aus Karton. Diese werden in nachfolgender Tabelle beschrieben und bewertet.

Tabelle 23: Gegenüberstellung von flächigen Baukastenelementen (Platten)

	(1) Rund Spulen, aufschneiden, platt drücken	(2) Flach spulen	(3) Kern aus Karton
Beschreibung (Arbeitsschritte)	<ul style="list-style-type: none"> Bespulen des zylindrischen Dornkörpers Walzenauftrag und Trocknen Schnitt parallel zur Spulachse 	<ul style="list-style-type: none"> Bespulen des flachen Dornkörpers Walzenauftrag und Trocknen 	<ul style="list-style-type: none"> Montage des Kerns aus Kartonteilen, seitlich zwei bereits konsolidierte, strukturgespulte Stangen Bespulen des Kerns Walzenauftrag und Trocknen

	<ul style="list-style-type: none"> Mehrere Schichten übereinander mit Walzenauftrag und Trocknen 		
Bild während des Spulens			
Ergebnis nach Spulen	sehr gutes Spulergesultat	schlecht, flacher Dorn führt zu Schwankungen in der Fadenspannung und damit zu Unsauberkeiten in der Fadenablage.	mittel, Dornaufbau führt zu wesentlich weniger Schwankungen in der Fadenspannung und Unsauberkeiten in der Fadenablage als bei Variante 2.
Ergebnis nach Konsolidierung	schlecht <ul style="list-style-type: none"> Nur geringe Schichtdicke und relativ dünne Garne nutzbar, da beim Flachdrücken wegen größerem Umfang außen im Vergleich zu Innen eine Welligkeit entsteht. Theoretisch können viele Schichten übereinandergelegt werden, aber Kanten an den Seiten offen (kann so eher zum Ausreißen tendieren). 	mittel <ul style="list-style-type: none"> Prinzipiell: Klebstoffauftrag mit nachträglichem Walzenauftrag nur bis zu einer bestimmten Schichtdicke möglich. an den Kanten der Platte hoher Zusammenhalt der Garne, mittig weniger Zusammenhalt 	gut <ul style="list-style-type: none"> Durch den strukturellen Aufbau ist wenig Garn beim Bespulen des Kerns nötig, somit keine Probleme beim nachträglichem Walzenauftrag.
Festigkeit/Stabilität	 schlecht, bei 2,5 kg starke Durchbiegung	 mittel-schlecht, bei 15 kg leichte Durchbiegung, hinreichend für Kraftanforderung, aber optisch nicht genügend	 ausreichend hoch, bei 15 kg keine Durchbiegung
Schlussbewertung	geringe Stabilität	mittlere Stabilität	gute Stabilität, gute Konsolidierung

Für die Varianten (2) und (3) musste jeweils eine Aufnahme des Dornkörpers entwickelt werden. In Abbildung 22 ist die Umsetzung von Variante (3) gezeigt.



Abbildung 22: Konzept und Umsetzung der Herstellung von Platten nach Variante (3)

3.5.2 Verbindungselemente

Zur Verbindung der stangen- und flächenförmigen Elemente wurden Verbindungselemente definiert und entwickelt. Zudem wurden zu Beginn der Entwicklungsarbeiten die Rastermaße definiert. Es wurden verschiedene Konzepte erarbeitet und validiert.

3.5.2.1 Gespulte Verbindungselemente

Mittels dafür entwickelter Dorne wurden verschiedene Verbindungselemente gespult. Diese wurden während des Spulens ebenfalls mit dem Klebstoff konsolidiert.

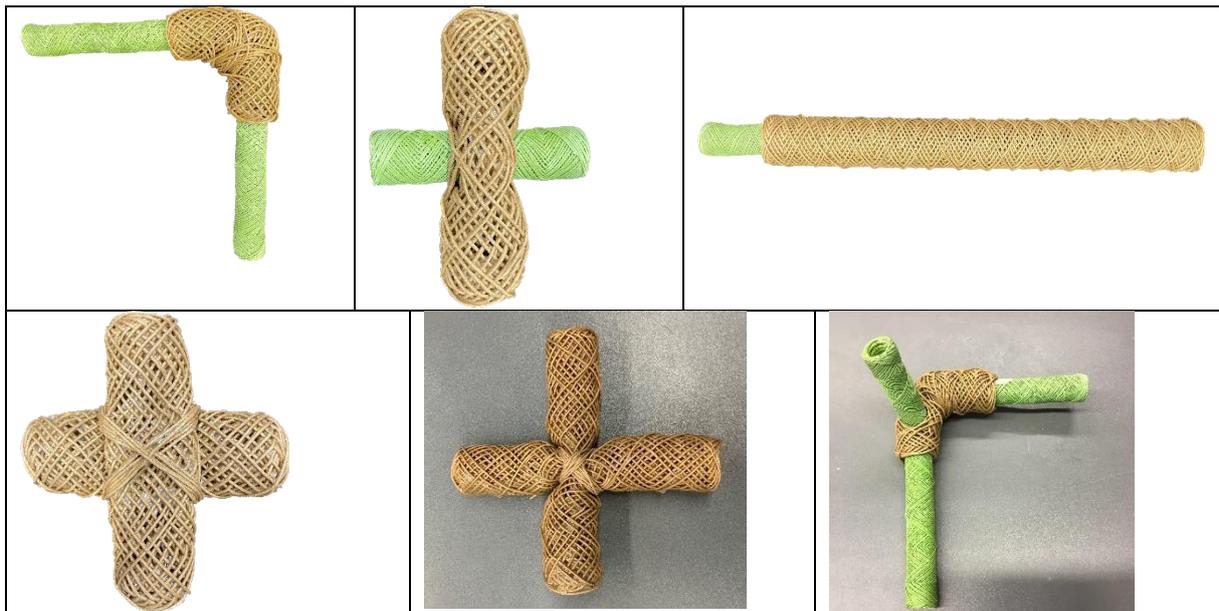


Abbildung 23: Gespulte Verbindungselemente flächig und dreidimensional

Die gespulten Verbindungselemente konnten in Funktionsmuster überführt und damit in die Demonstratoren integriert werden. Die in den obigen Abbildungen gezeigten Elemente weisen als Gemeinsamkeit auf, dass die Außenkontur bzw. der Außendurchmesser der Stabelemente auch an den Ecken beibehalten wird.

Die Spiegelung der in den Gestaltungsansätzen definierten Anforderungen war stets ein wichtiger Bestandteil der Entwicklungsarbeiten. Für die Verbindung der stangenförmigen Bauteile wurden bspw. zwei Gestaltungsansätze definiert und diskutiert. Diese sind in Abbildung 24 gezeigt. Aufgrund der größeren Flexibilität beim Herstellen und in der Montage bzw. Nutzung wurde die Variante 2 gewählt, bei der ein zusätzliches gespultes Innenstück zwei konstant rohrförmige Stangenelemente verbindet.

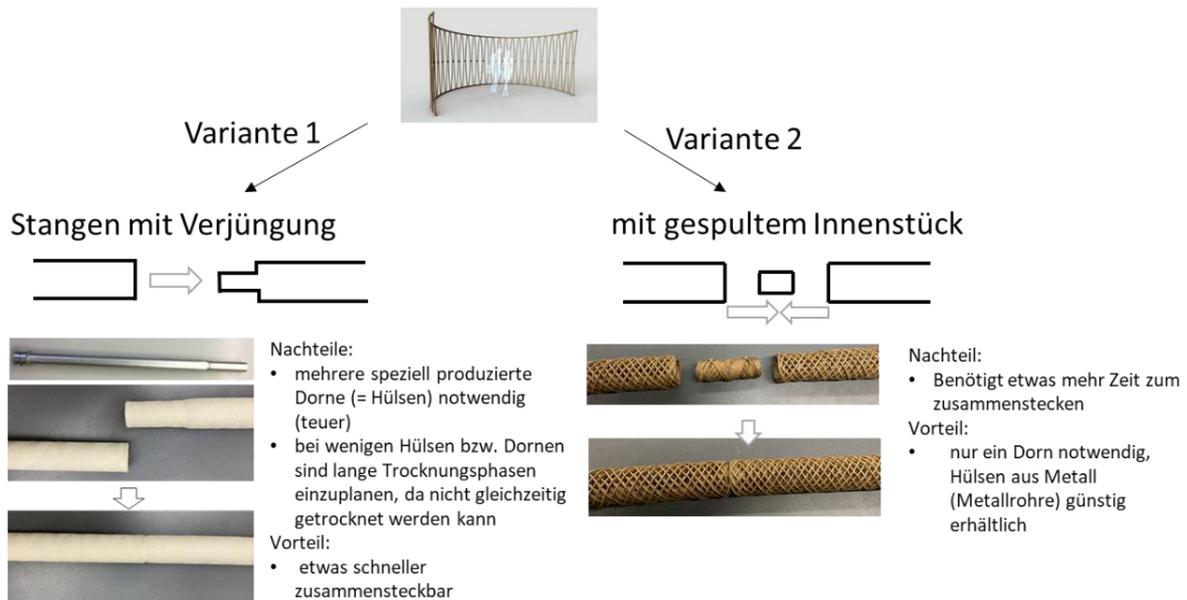


Abbildung 24: Mögliche Varianten zur Herstellung von stangenförmigen Verbindungselementen

3.5.2.2 Papphülsen als Verbindungselemente

Als weitere Variante für Verbindungselemente wurde eine Umsetzung über Elemente aus Papphülsen untersucht. Hierzu wurden Papphülsen mit einem passenden Außendurchmesser mechanisch und über Klebeverbindungen zu vergleichbaren Verbindungselementen gefügt. An den Ecken erfolgt durch diesen Aufbau jedoch nicht die Beibehaltung des konstanten Außendurchmessers.



Abbildung 25: Verbindungselemente aus Papphülsen – Herstellung (Bilder oben) und fertige Elemente (Bilder unten)

Die so entwickelten Verbindungselemente zeigen alle eine gute Recyclingfähigkeit (vgl. Kapitel 3.3.5) und entsprechen so den Projektanforderungen.

3.5.3 Mechanische Prüfungen

Die durchgeführten 3-Punkt-Biegeprüfungen (in Anlehnung zu DIN EN ISO 14125) zeigen den Einfluss des Aufbaus der stabförmigen Elemente, der durch verschiedene Spulstrategien erzeugt werden kann. Hierzu wurden die Strukturen bis auf die Spulstrategie gleich hergestellt.



Abbildung 26: Prüflinge für die 3-Punkt-Biegeprüfung

So sind das Papiergarn ($\varnothing 1,6$ mm) und der Klebstoff (Stärkeklebstoff) gleich. Bei der Herstellung der Prüflinge wurde das Windungsverhältnis (WV) geändert bzw. die aufgespulte Menge. Abbildung 27 zeigt den Prüfaufbau.

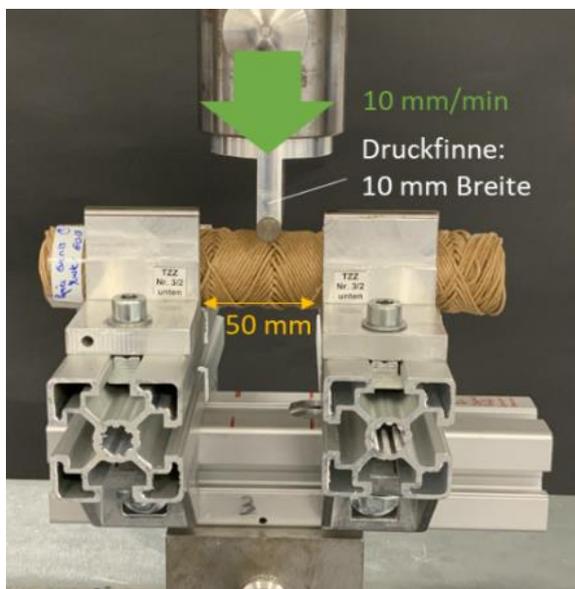
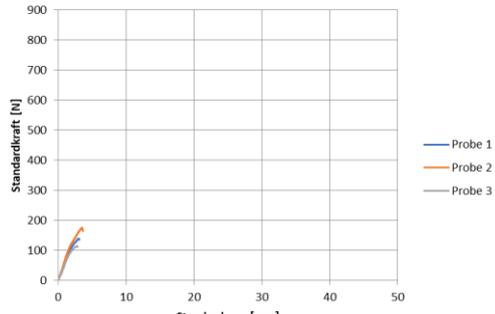
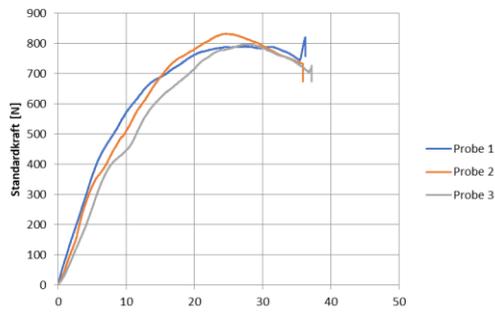
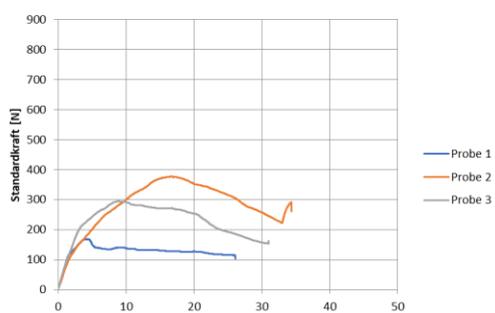
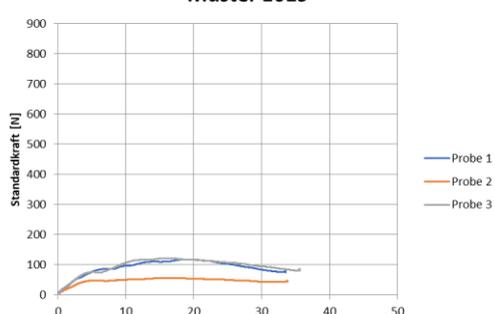
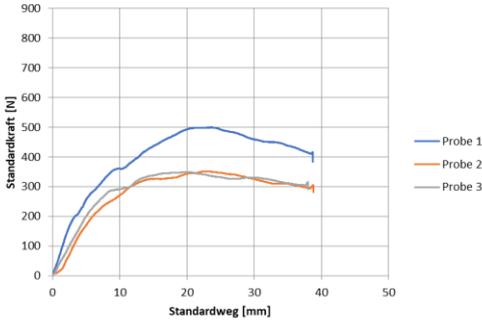
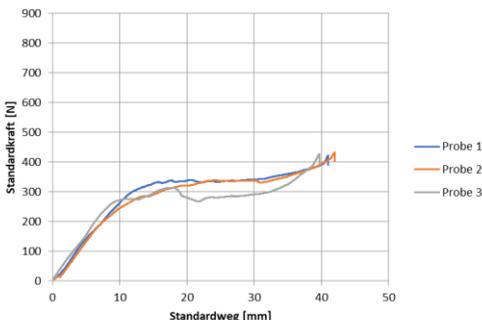


Abbildung 27: Prüfaufbau der 3-Punkt-Biegeprüfung

In Abbildung 26 sind die Prüflinge zu sehen sowie anschließend die Ergebnisse der 3-Punkt-Biegeprüfung. Es wurden pro Prüfling drei Proben untersucht.

Tabelle 24: Übersicht über die Ergebnisse der 3-Punkt-Biegeprüfungen, Vergleich verschiedener Spulstrategien

	Spulstrategie	Durchschnittliches Gewicht	Ergebnis	Ergebnis 3-Punkt-Biegeversuch
E007	Ein Doppelhub (DH) parallel gespult	1,83 g/cm	Geringe Festigkeit quer zur Spulachse wegen Parallelität der Garne.	<p>Muster E007</p> 
E013	Ein DH parallel, zwei Lagen Kreuzwicklung WV = 5,7	3,01 g/cm	Höchste Festigkeit durch doppelschichtigen Aufbau	<p>Muster E013</p> 
E018	Kreuzwicklung mit WV 8	2,21 g/cm	Geringe-mittlere Festigkeit	<p>Muster E018</p> 
E019	Kreuzwicklung mit WV = 5,7, zwei Lagen	1,28 g/cm	Geringe Festigkeit	<p>Muster E019</p> 

E020	Kreuzwicklung mit WV=5,7, sechs Lagen	2,83 g/cm	Höhere Festigkeit, mehr Garnmaterial als E019	<p style="text-align: center;">Muster E020</p> 
E021	Kreuzwicklung mit WV=5,7, zehn Lagen	4,75 g/cm	Höhere Festigkeit, mehr Garnmaterial als E019 und E020	<p style="text-align: center;">Muster E021</p> 

Der parallel gespulte Prüfling E007 zeigt die geringste Belastbarkeit, da hier keine Garne wirksam in Kraftrichtung liegen. E013 wurde entsprechend E007 gespult, zusätzlich noch zwei Lagen mit einem Windungsverhältnis gespult, welches eine Kreuzwicklung ergibt. Diese Spulstrategie führte zu der höchsten Höchstzugkraft (ca. 800 N). E018 besteht aus Papiergarn, das kreuzgewickelt ohne Abstände zwischen den Garnen gespult wurde und zeigt mittlere Festigkeit.

E019 bis E021 haben untereinander die gleiche Kreuzwicklung, unterscheiden sich jedoch in der aufgespulten Garnlänge bzw. Anzahl der Kreuzwicklungslagen. Diese deutliche Steigerung führt bei E021 nicht zu einer starken Festigkeitszunahme, jedoch wird so das Gesamtgewicht stark erhöht.

Als Ergebnis dieser mechanischen Untersuchungen wurde festgestellt, dass über die gewählte Technologie ausreichend stabile Einzelelemente hergestellt werden können. Größere Varianzen können von Konsolidierungsunterschieden resultieren.

Aufbauend auf diesen Ergebnissen wurden Strukturen für die Demonstrator-Theke (siehe Kapitel 3.6.1) erzeugt, die sowohl verfahrenstechnisch (vorzugsweise einschichtig, bis auf Strukturen, die hinterleuchtet werden), optisch, mechanisch (geringes Gewicht und ausreichend Festigkeit) überzeugten. Sie sind in Abbildung 28 abgebildet.

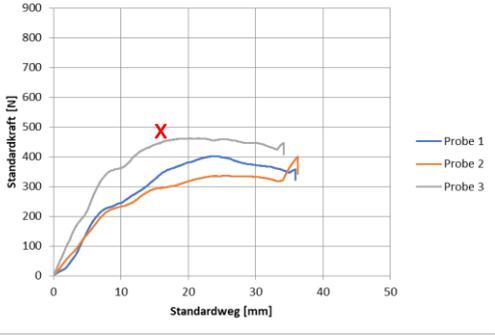


Abbildung 28: Für die Demonstrator-Theke eingesetzte strukturgespulte Elemente

Die in der Demonstrator-Theke eingesetzten Stabstrukturen zeigen folgende mechanischen Ergebnisse:

Tabelle 25: Übersicht über die Ergebnisse der 3-Punkt-Biegeprüfungen, Vergleich der in der Demonstrator-Theke eingesetzten Stabstrukturen

	Spulstrategie Ø-Länge (ohne rot markierte Strukturen)	Durchschnittliches Gewicht (ohne rot markierte Strukturen)	Ergebnis (ohne rot markierte Strukturen)	Ergebnis 3-Punkt-Biegeversuch
E038	Kreuzwicklung mit WV=5,25, L _{ist} =25,5 cm	3,28 g/cm	Mittlere Festigkeit	<p>Muster E038</p>
E039	Kreuzwicklung mit WV=5,25, L _{ist} =37 cm	3,04 g/cm	Mittlere Festigkeit	<p>Muster E039</p>

E040	Ein DH parallel und 1 Lage Kreuzwicklung, WV=15,5 mit weißem Papiergarn (0,4 mm) + zwei Lagen Kreuzwicklung mit naturbraunem Papiergarn (1,6 mm) W =15,625, List=37 cm	2,18 g/cm	Mittlere Festigkeit	<p style="text-align: center;">Muster E040</p> 
-------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------	---------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

x: Muster mit kürzerer Länge, x: Muster mit höherem Gewicht

Die Ergebnisse der in der Demonstrator-Theke verbauten Stabstrukturen zeigen ausreichend hohe Festigkeiten. Die jeweils höheren Kurven im Diagramm (markiert durch ein Kreuz) sind zu begründen mit höherem Gewicht pro Zentimeter, die vermutlich durch höheren Klebstoffanteil bzw. durch höheren Längsschumpf entstanden sind. Die Verbesserung der Gleichmäßigkeit bzw. Konstanz der gespulten und konsolidierten Strukturen kann als zukünftiges Ziel gesetzt werden. Die Kombination von verschiedenen Garnen und Windungsverhältnissen (Muster E040) zeigt die höchste Festigkeit. Sie wurde aber in der Demonstrator-Theke nur als hinterleuchtete Struktur eingesetzt, da sie verfahrenstechnisch aufwendiger ist und die erreichte Festigkeit der anderen Muster ausreichend ist.

Die mechanische Belastbarkeit von gespulten Flächen ist in der Tabelle 23 angegeben.

3.5.4 Empirisches Modell zur Vorhersage der mechanischen Festigkeit

Aus den Ergebnissen der Biege-Prüfungen konnte ein Wert für den E-Modul abgeleitet werden. Der in den bisherigen Untersuchungen maximal erreichte Wert liegt für die gespulte Struktur (Muster E13) bei etwa 2 GPa. Mit diesem Wert und der Geometrie der gespulten „Röhre“ wurde eine vereinfachte Simulationsrechnung für die Tragfähigkeit bei vertikaler Orientierung der Röhre und Belastung auf Druck durchgeführt. Grund für die Untersuchung dieses Lastfalls ist, dass das Ausbeulen der vertikalen Stäbe bzw. Röhren als die kritische Belastung für die Theke eingeordnet wurden. Die Durchbiegung der horizontalen Stäbe wird als weniger kritisch betrachtet. Für die Simulation mussten etliche Annahmen getroffen werden (z. B. für die Einleitung der Kräfte) und es wurde mit einem linearelastischen Modell gerechnet. Insofern ist das Ergebnis nur eine erste Orientierung. Die Modellierung ergab, dass die vertikalen Röhren bis zu 8 kg Last aufnehmen können, ohne durch Ausbeulen zu versagen. Für eine Theke aus den strukturgespulten Röhren, wie in Abbildung 26 dargestellt, würde das bedeuten, dass jedes Feld der Theke bei gleichmäßiger Verteilung eine Last von ca. 20 – 25 kg aufnehmen kann. Für die Anwendung als Messetheke ist diese Stabilität vollkommen ausreichend.

3.5.5 Brandversuche

Für öffentliche Räume, zu denen Messe- und Eventaufbauten gehören, gelten Vorschriften zum Brandschutz. Angelehnt an die geltenden Vorschriften wurden einschätzende Tests und Untersuchungen an den Einzelelementen durchgeführt.

Zur Erfüllung der Projektanforderungen wurden Brandschutzmittel definiert, die umweltneutral bzw. ökologisch unbedenklich sind. Die Basis des Brandschutzmittels sind halogenfreie Ammonium-Phosphor-Schwefel-Verbindungen. In Anlehnung an die Untersuchung der Brenn- und Entflammbarkeit

nach DIN 4102 „Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen“ wurden Flächen gespult und konfektioniert (230 x 90 mm), die dann nachträglich mittels Sprühauftrag mit dem Brandschutzmittel in zwei Mengen behandelt wurden. Anschließend erfolgte die Flächenbeflammung für 15 Sekunden mittels einer Propangasflamme in Längs- und in Querrichtung.

Die Ergebnisse sind in Tabelle 26 dargestellt. Sie zeigen, dass alle Proben die einstufigen Brandschutztest angelehnt an DIN 4102-1, Baustoffklasse B2 bestehen.

Tabelle 26: Ergebnisse der Brandversuche

	A	B	C
Konzentration des Brandschutzmittels (in Gewichts-%)	0	8,57	14,61
Bild	 Längsrichtung	 Längsrichtung	 Längsrichtung
Rauchentwicklung	Nein in Querrichtung Nein in Längsrichtung	Nein in Querrichtung Nein in Längsrichtung	Ja in Querrichtung Nein in Längsrichtung
Brandklasse	B2	B2	B2
Aussehen der Proben nach Brandversuch	Schwarze Stelle	Schwarze Stelle	Schwarze Stelle

3.5.6 Funktionsintegration

3.5.6.1 Beleuchtung

Ziel der integrierten Beleuchtung war es, ein funktionelles Blickfangelement als integrierter Teil der Möbelemente zu schaffen. Ein spezielles Beleuchtungsverhalten konnte so über die Anpassung der gespulten Strukturen mit streifenförmigen Leuchtmitteln im Inneren der Strukturen kombiniert umgesetzt werden. Zur Umsetzung des Ansatzes, LED-Leisten in die strukturgespulten, stabförmigen Bauelemente zu integrieren, wurden in einem ersten Schritt verschiedene Strukturen lichttechnisch untersucht. Hierfür wurden diese mit einer programmierbaren LED-Leiste im Inneren bestückt. Die hierfür erforderlichen Aufnahmen wurden konstruiert und hergestellt. Die lichttechnischen Untersuchungen wurden mit der LumiCam 4000B durchgeführt. Diese Leuchtdichte- und Farbmesskamera erfasst u.a. die Leuchtdichteverteilung und liefert so die Grundlage für eine lichttechnische Bewertung der erarbeiteten Strukturen. Als Anforderungen an die strukturgespulten, beleuchteten Stabelemente wurde einerseits eine ausreichend hohe Leuchtdichte und andererseits eine blendungsarme Beleuchtung gestellt.

Die LumiCam wurde in einem Abstand von 485 mm zu den untersuchten Proben platziert (s. Abbildung 24). In den Strukturspulelementen ist eine LED-Leiste mit zwei LED-Linien (eine nach oben und eine nach unten strahlend) platziert. Die Lichtfarbe ist über einen Taster einstellbar.

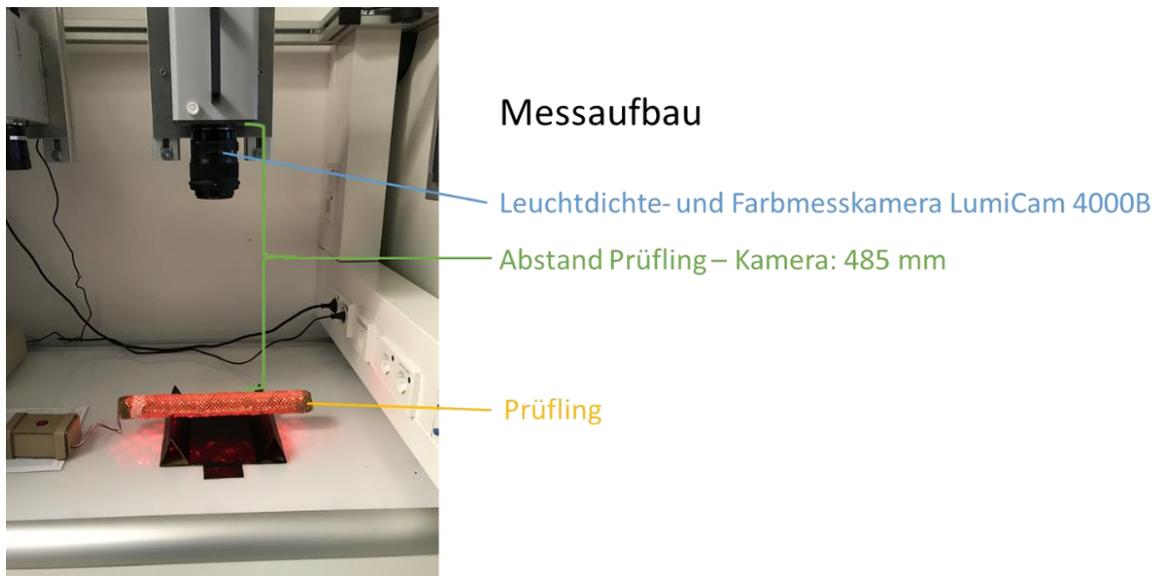


Abbildung 29: Messaufbau zur Messung der Leuchtdichte

Zuerst wurde die LED-Leiste ohne umgebende Struktur aufgenommen. Anschließend folgen die Ergebnisse mit verschiedenen strukturgespulenen Mustern. Für die Auswertung kann ein Kasten oder eine Linie über den relevanten Bildbereich gelegt werden, innerhalb bzw. entlang derer die Leuchtdichtewerte ausgewertet werden (vgl. Abbildung 30). Dabei ist der Leuchtdichtewert L_{\max} maßgeblich. Er stellt hier den höchsten Wert innerhalb eines Kastens/Linie zur Analyse in der Software der Kamera dar (Beispiel siehe Abbildung 30) und stellt das Maß der höchst möglichen Blendung dar. Auf der rechten Seite der Ergebnisse ist das Messergebnis einer eingezeichneten Linie dargestellt und gibt Aufschluss über mögliche Blendung und Gleichmäßigkeit.

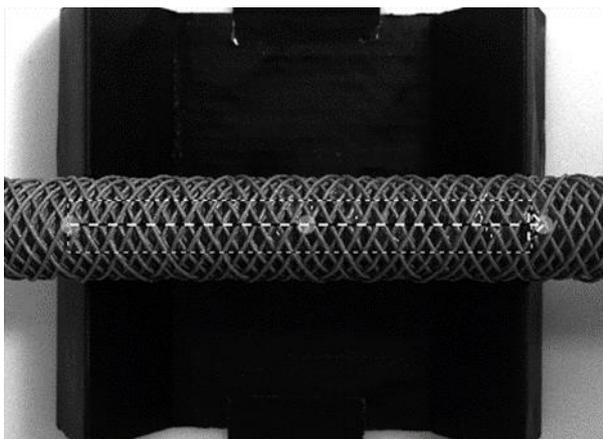
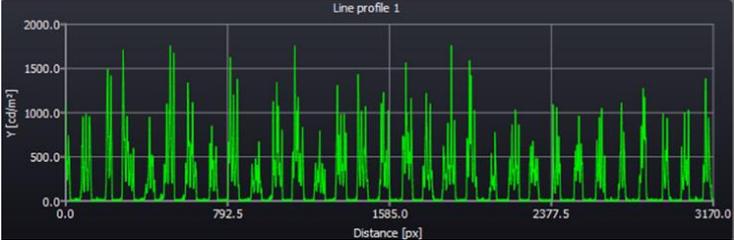
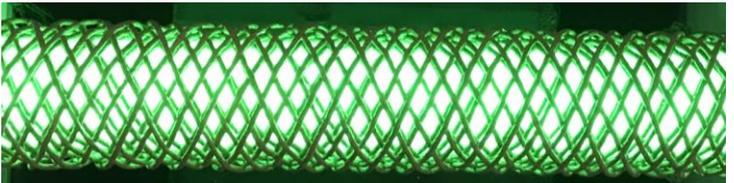
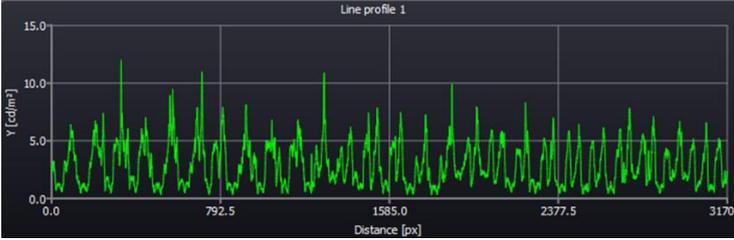
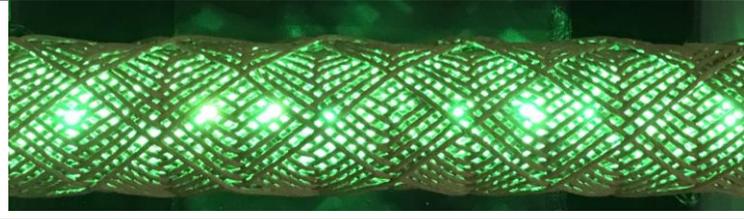


Abbildung 30: Kasten und Linie zur Analyse der Leuchtdichte in der Software der Leuchtdichte- und Farbmesskamera

Da die höchsten erreichten Leuchtdichte-Werte mit grünem Licht erzielt wurden, werden im Folgenden diese Werte aufgelistet.

Tabelle 27: Ergebnisse der Messungen mit der Leuchtdichte- und Farbmesskamera bei grünem Licht

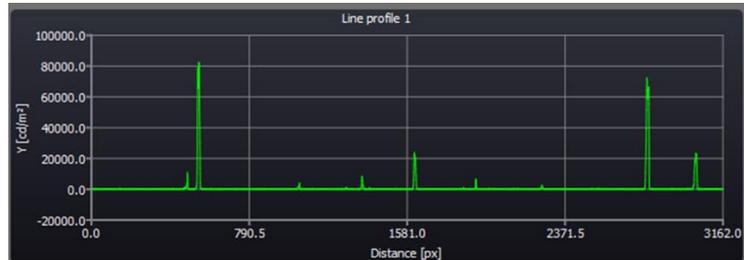
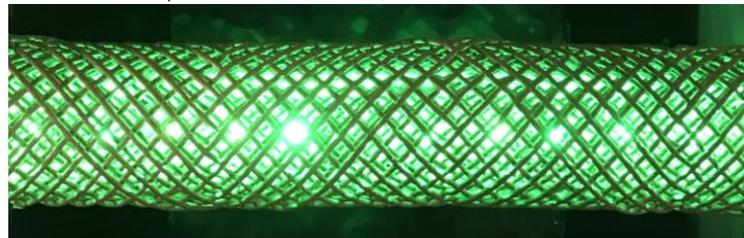
Beschreibung Muster Herkömmliches Bild des Messobjekts im Zustand: LED aus	Ergebnis bei grünem Licht (Y): - Diagramm der Leuchtdichte der Linie - L_{\max} des Analyse-Kastens
LED-Leiste 	 $L_{\max}=2.127.539 \text{ cd/m}^2$
Muster E040 2 Schichten: <ul style="list-style-type: none"> • 1. Schicht: geschlossene, kreuzgespulte Diffusorschicht aus weißem Papiergarn mit $\varnothing 0,4 \text{ mm}$ • 2. Schicht: kreuzgewickeltes naturbraunes Papiergarn mit $\varnothing 1,6 \text{ mm}$ 	 $L_{\max}=5.847 \text{ cd/m}^2$ 
Muster E025 2 Schichten: <ul style="list-style-type: none"> • 1. Schicht: parallelgespulte, geschlossene Schicht aus naturbraunem Papiergarn mit $\varnothing 1,6 \text{ mm}$ • 2. Schicht: kreuzgewickeltes, naturbraunes Papiergarn mit $\varnothing 1,6 \text{ mm}$ 	 $L_{\max}=47 \text{ cd/m}^2$ 
Muster E026 1 Schicht: <ul style="list-style-type: none"> • kreuzgewickelte, nicht ganz geschlossene Schicht aus naturbraunem Papiergarn mit $\varnothing 1,6 \text{ mm}$ 	 $L_{\max}=106.940 \text{ cd/m}^2$



Muster E028

1 Schicht:

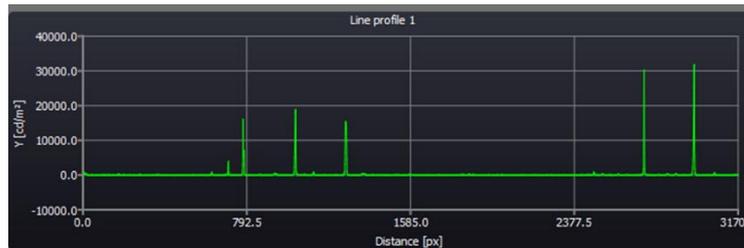
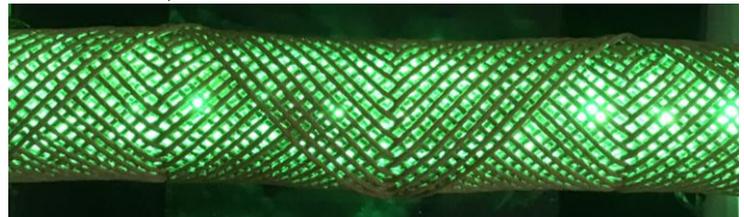
- kreuzgewickelte, nicht ganz geschlossene Schicht aus naturbraunem Papiergarn mit \varnothing 1,6 mm

 $L_{\max}=84.028 \text{ cd/m}^2$ 

Muster E029

1 Schicht:

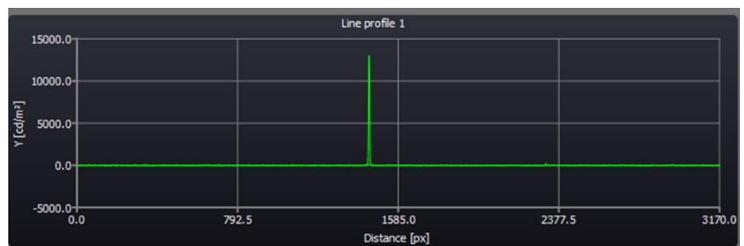
- kreuzgewickelte, nicht ganz geschlossene Schicht aus naturbraunem Papiergarn mit \varnothing 1,6 mm

 $L_{\max}=84.441 \text{ cd/m}^2$ 

Muster E033

1 Schicht:

- kreuzgewickelte, nicht ganz geschlossene Schicht aus naturbraunem Papiergarn mit \varnothing 1,6 mm

 $L_{\max}=15.788 \text{ cd/m}^2$ 

Die Messergebnisse zeigten, dass Muster E040 mit einer Diffusorschicht aus weißem Papiergarn und einer darüber gespulten Strukturschicht aus braunem Papiergarn für eine gute Sichtbarkeit ausreichend hohe, gleichmäßig verteilte Leuchtdichtewerte zeigen. Die einzelnen Peaks der Leuchtdichte, die durch die Papiergarnstrukturen und die punktförmig angeordneten LEDs auf der LED-Leiste entstehen, sind gleichmäßig verteilt und etwa gleichmäßig hoch. Gleichzeitig erfolgt dabei keine Blendung. Das unerwünschte Potential zur Blendung spiegelt sich in den gezeigten Messwerten durch einen hohen singulären Ausschlag der Leuchtdichte wider, wie er bspw. bei Muster E028 zu erkennen ist.

3.5.6.2 Sensorik

Ziel der integrierten Sensorikfunktion war es, einen Mehrwert der strukturgespulten Bauteile zu schaffen, der bei anderen, etablierten Bauweisen bislang nur durch großen Aufwand zu erzielen ist. Hierbei war es weiteres Ziel, die Sensorik unter voller Beachtung der Rezyklierbarkeit als Altpapier zu entwickeln. Die Funktion Sensorik wurde für die Umsetzung von berührungsempfindlichen Strukturen genutzt. So konnten Schaltersysteme direkt in die Systembauteile integriert werden, ohne dass weitere Komponenten (ausgenommen Kabel von dem Strukturspulelement bis zur Auswerteeinheit) benötigt werden.

Die hierfür erforderlichen sensorische Garne, die im Strukturpulprozess direkt verarbeitet werden können, wurde die Umwindetechnologie genutzt. Hierbei wird ein oder mehrere Drähte helixförmig um das Papiergarn gelegt. Auf diese Weise kann die Kapazität als Messsignal ausgelesen werden. So können verschiedene Draht-Garn-Kombinationen umgesetzt werden.

Es wurden verschiedene Feinstdrähte mit verschiedenen Umwindezahlen (Umwindungen pro m) kombiniert und in Vorversuchen über die CEPI-Methode hinsichtlich der Rezyklierbarkeit in Kapitel 3.3.4.2 untersucht. So konnten Garne gefunden werden, die einerseits gute Messsignale liefern und andererseits rezyklierbar sind. Dabei konnte festgestellt werden, dass der dominierende Faktor die Umwindezahl (Umwindungen/m) ist. Eine geringe Umwindezahl lieferte bessere Ergebnisse bei der Rezyklierbarkeit als eine höhere Umwindezahl. Entsprechend der Ergebnisse wurde bei den eingesetzten Sensorgarnen auf eine niedrige Umwindezahl geachtet.

Die Sensorgarne wurden über geeignete Spulstrategien so in die Stabelemente eingebracht, dass die sensorische Funktion störungsfrei erfüllt werden konnte. Gleichzeitig wurden Garnpositionen so gewählt, dass eine Verschiebestabilität erzielt werden konnte. Über eine entwickelte Auswerteeinheit, deren Kern ein Arduino Nano 33 BLE bildete, wurde die Kapazität erfasst.

Auf Anregung von ROEDIG GmbH wurde beschlossen, ein „Glückspiel“ zu entwickeln: Die in die Thekenoberfläche integrierten Sensorgarne erfassen eine Berührung. Diese startet eine Art Glücksrad, das über Farbänderungen (rot, blau, grün, gelb) schließlich eine zufällig ausgewählte Farbe anzeigt. Diese wird dann auf der Frontseite der Theke innerhalb der Stabelemente angezeigt. Das Programm lässt sich in zwei Modi unterteilen. Im „Grundzustand“ werden die Daten vom Capacitive-Sensor ausgewertet und nach dem Wenn-dann-Prinzip bei Überschreitung des Schwellenwerts die „Glücksrad-Sequenz“ gestartet. Der Schwellenwert wird bei Programmstart einmal kalibriert, so dass der Wert an äußere (Raum und tagesabhängige) Parameter angepasst ist. Die „Glücksrad-Sequenz“ umfasst einen Algorithmus, der zuerst zufällig Quadranten über Farbänderungen (rot, blau, grün, weiß) ansteuert und schließlich zufällig in einem Quadrat mit einer Farbe stehen bleibt. In der praktischen Anwendung kann

bei Promotioevents entsprechend der erscheinenden Farbe ein kleiner Gewinn an den spielenden Kunden übergeben werden.

3.6 Konzeption und Umsetzung von Messe- und Eventmöbeln und deren Einzelemente

Für eine Umsetzung von Messe- und Eventmöbel sind einerseits stabförmige/stangenförmige und andererseits flächige Elemente erforderlich. Zudem müssen diese untereinander und miteinander verbunden werden. So konnten die dazu gehörigen Systembauteile identifiziert werden. Diesen wurden Anforderungen und Aufgaben zugeordnet:

- Knotenelement Stab/Stab
- Stabelement
- Flächenelement
- Verbindungselemente Stab/Fläche und Fläche/Fläche
- Querverstrebung
- Sockelelement
- Beleuchtung
- Sensorisches Element

Die Stabelemente stellen das Gerüst dar und dienen der Tragfähigkeit der gesamten Konstruktion. Mögliche Querschnitte lassen sich über den Dornkörper bzw. auch über eine Nachverformung erreichen.

Es wurden verschiedene Gestaltungsansätze erarbeitet und nach einer gemeinschaftlichen Bewertung auf die Herstelltechnologien übertragen. Zur Umsetzung der Konzepte wurden schließlich geeignete Dornkörper und Spulstrategien entwickelt und hergestellt.

Basierend auf einem Flächenelement, das stabförmige Verbindungselemente integriert hat (vgl. Kapitel 3.5.1), wurden verschiedene Konzepte erarbeitet, diskutiert und bewertet.

- Reihung versetzt, Schachbrettmuster
- Konische Verbindung (Stabelement konisch)
- Geschlossene Fläche, Versatz 50 %
- Geschlossene Fläche, Versatz 15 %
- Integration von kleineren Zwischenelementen
- Geschlossene Fläche mit einem rautenförmigen Querschnitt.

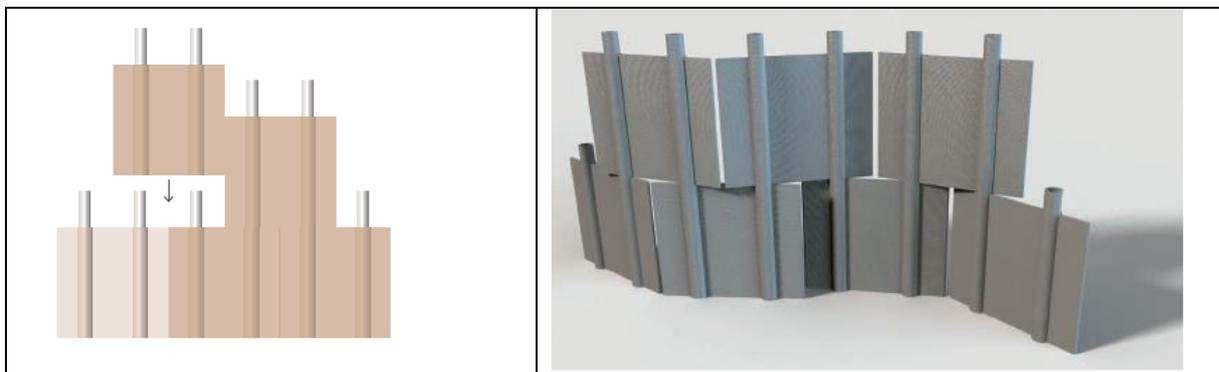


Abbildung 31: Beispiele für Konzept "Stabverbindung in Fläche integriert, geschlossene Fläche"

Die in Abbildung 31 gezeigte Stabverbindung wurde als Grundlage für weitere Ansätze definiert.

Weitere Gestaltungsansätze sind inspiriert von Bauten, bei denen Bambusstangen in teilweise gebogener Form verarbeitet werden. Hieraus ergeben sich neue Formensprachen. Zudem kann so das Potential der strukturgespulten Papiergarnstrukturen im Vergleich zu konventionellen, bereits verfügbaren Gestaltungsansätzen ausgeschöpft werden. Auch dieser Ansatz wurde im Projekt verfolgt. Ein Beispiel hierfür ist in nachfolgender Abbildung gezeigt.



Abbildung 32: Beispiele für Gestaltungselemente aus Papiergarnen, inspiriert von Bambuselementen, rechts: umgesetztes Element

3.6.1 Theke

Basierend auf den dargestellten Gestaltungsansätzen wurde eine Messetheke konzeptioniert. Hierbei wurden verschiedene Verbindungsmöglichkeiten erarbeitet und diskutiert, die funktionalen, herstellungstechnischen und optischen Anforderungen genügen müssen.

Beispielhaft sind in Abbildung 33 verschiedene Möglichkeiten zur Integration und Verbindung von flächigen mit stabförmigen, tragenden Teilen abgebildet.

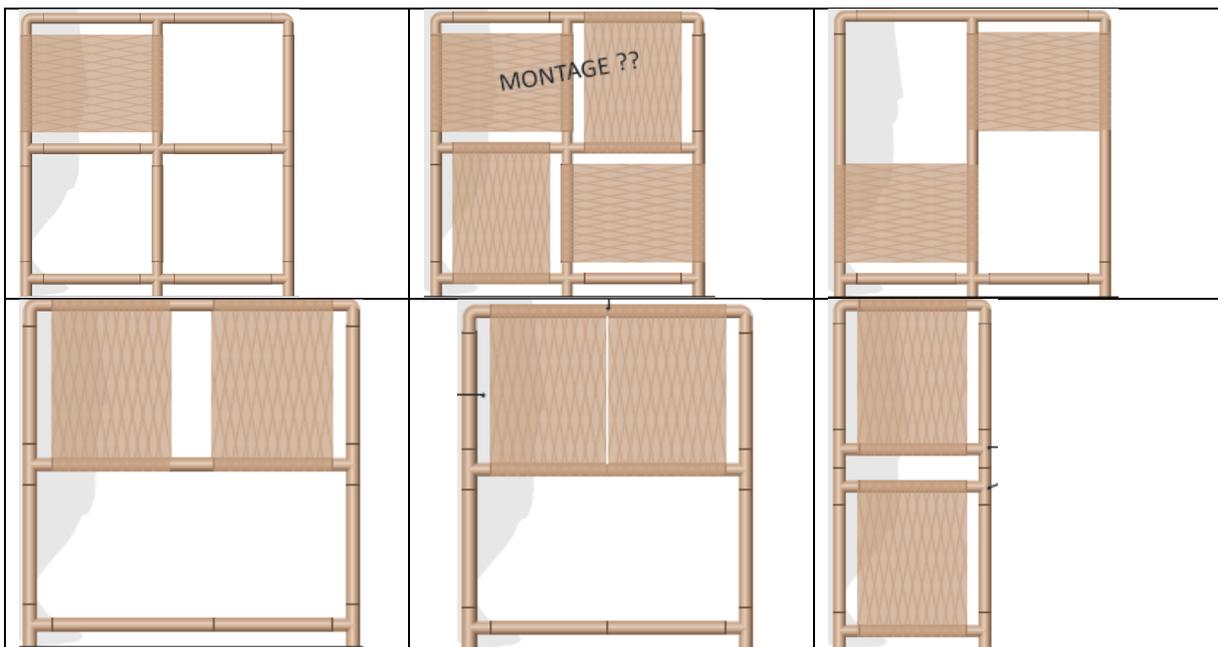


Abbildung 33: Einsatzmöglichkeiten der flächigen Elemente in der Theke

In Abbildung 34 wird die fertige Demonstrator-Theke gezeigt. Es wurden hierzu zwei Flächen gemäß Abbildung 22 hergestellt und als Ablagefläche der Theke oben eingebaut. Die vier vorne in der Mitte

liegenden strukturgespulten Stangen sind im Inneren mit LED-Stripes ausgerüstet und können somit hinterleuchtet werden. Es wurde, wie in Kapitel 3.5.6.2 erläutert, in Form eines „Glücksspiels“ ausgeführt. Für das Spannen der eingesetzten Poster sind kostengünstige Spannelemente aus Pappe eingesetzt. Die Theke wiegt 5,5 kg (ohne Beleuchtung).



Abbildung 34: Theke als im Projekt entwickelter und hergestellter Demonstrator (links) und hierfür eingesetztes Spannelement (rechts)

3.6.2 Kundenstopper DIN-A1

Als weiterer Demonstrator wurde ein Kundenstopper im DIN-A1-Format erarbeitet. In Abbildung 34 werden das Konzept sowie der umgesetzte Kundenstopper gezeigt. Alle Rahmenelemente sind strukturgespult. Die inneren Verbindungsstücke sind entweder als strukturgespulte oder als Papphülsen-Variante einsetzbar. Die Spannung des Posters erfolgt wie bei der Theke gezeigt durch einfache Papp-Spannelemente.



Abbildung 35: Kundenstopper als Konzept (links) und als Demonstrator (rechts)

3.6.3 Schaeuelement / Pyramide

Als weiterer Demonstrator wurde ein pyramidenförmiges Schaeuelement erarbeitet. In Abbildung 36 werden das Konzept sowie das umgesetzte Schaeuelement gezeigt.



Abbildung 36: Pyramidenförmiges Schaeuelement als Konzept (links) und als Demonstrator (rechts)

3.6.4 Nutzungskonzept

Für die Nutzung der entwickelten Eventmöbel wurde ein Nutzungskonzept erarbeitet. Wesentlicher Punkt des Nutzungskonzepts ist die Prüfung der Einzelemente nach dem Abbau, da hier entschieden wird, ob eine Entsorgung über den Altpapierkreislauf oder eine Weiternutzung erfolgt. Durch die gewählten Steckverbindungen der einzelnen Bauteile liegt ein geringer Komplexitätsgrad vor. Es sind bspw. alle Verbindungsstücke mit allen Seiten der stabförmigen Elemente kompatibel, so dass keine spezifischen Fachkenntnisse zum Aufbau der Demonstratoren erforderlich sind. Entsprechend werden die Schulungsunterlagen angepasst. Diese enthalten bspw. auch eine Aufbauanleitung. Die Einzelemente sind so konzipiert, dass sie in einem Standardpaket bis 10 Kilogramm versandt werden können. Das Nutzungskonzept ist in nachfolgender Abbildung dargestellt.

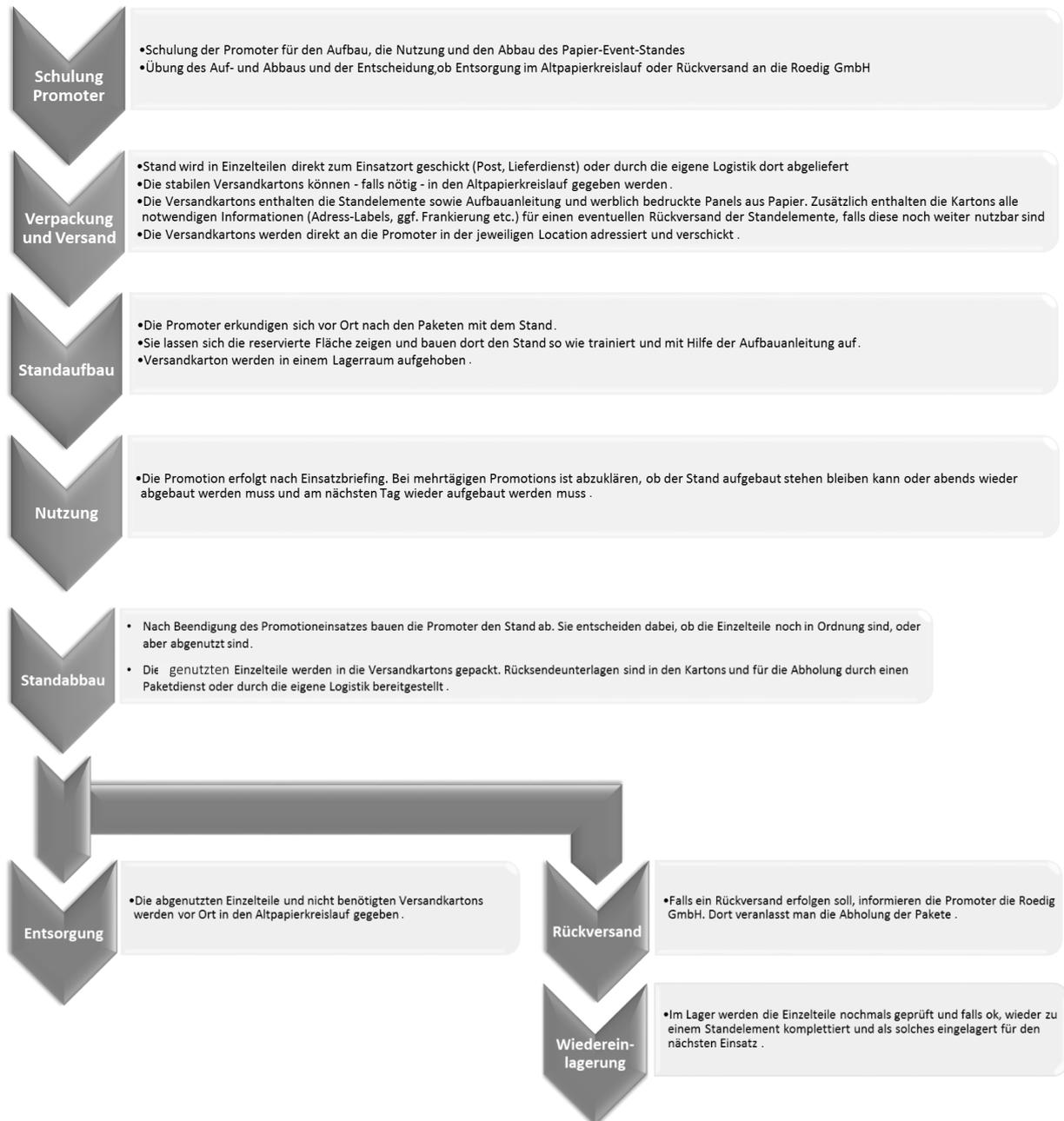


Abbildung 37: Nutzungskonzept eines papiergarnbasierten Promotionsstandes

3.7 Recyclingkonzepte und Nachhaltigkeitsbetrachtung

Nach dem Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz, KrWG [16]) stehen in §6 die Maßnahmen der Vermeidung und der Abfallbewirtschaftung in folgender Rangfolge:

1. Vermeidung
2. Vorbereitung zur Wiederverwendung
3. Recycling
4. Sonstige Verwertung
5. Beseitigung

Diese Abfallhierarchie kann auf die Projektergebnisse übertragen werden. Die **Vermeidung** von Abfällen jeglicher Art ist das wichtigste Ziel und die Pflicht der Erzeuger und Besitzer von Abfällen. Mit der Strukturspulentechnologie können Bauteile so hergestellt werden, dass keine bzw. sehr wenige Produktionsabfälle anfallen. Technologiebedingt kann das Garn beim Spulenbeginn und -ende fixiert und für das jeweils anschließende Bauteil direkt wiedereingesetzt werden. Der eingesetzte Klebstoff weist eine hohe Standzeit auf und kann bei korrekter Lagerung über mehrere Produktionstage verwendet werden.

Für die im Projekt erarbeiteten Demonstratoren bzw. die gesamten Baukastenelemente für Messe- und Eventmöbel wurden zwei sich ergänzende Recyclingwege identifiziert: die **Wiederverwendung** und die Entsorgung über das Altpapier. Durch das Stecksystem sind alle Bauteile reversibel trennbar.

Hierdurch lassen sich die meisten Ressourcen sparen, wenn wie bei den im Projekt entwickelten Elementen wesentliche Punkte erfüllt sind. Diese sind in Tabelle 28 aufgeführt und für die Projektergebnisse bewertet.

Tabelle 28: Bewertungskriterien für die Wiedernutzung mit Bewertung

Nr.	Kriterium	Bewertung für die Projektergebnisse
1	Geringes Gewicht zur Minimierung der CO ₂ -Ausstöße beim Transport	Die Einzelemente haben ein geringes Eigengewicht. Die Demonstrator-Theke wiegt komplett nur 5,5 kg (ohne Beleuchtung).
2	Geringes Packmaß zur Minimierung der CO ₂ -Ausstöße beim Transport	Die entwickelten Möbel sind demontierbar, da sie aus Steckverbindungen bestehen. So können sie vor Ort montiert und demontiert werden und verbrauchen wenig Volumen beim Transport. Eine Versendung im Paket ist sehr gut möglich.
3	Gute Trennbarkeit der einzelnen Baustoffe bei Mehrkomponentenlösungen	Durch die Steckverbindungen können die einzelnen Komponenten voneinander getrennt werden. Aktuell sind alle Teile über den Altpapierweg recycelbar, ausgenommen sind die LED-Leisten, die Kabel sowie einige wenige der hierfür erforderlichen Bauteile.
4	Ausreichend stabile Dimensionierung der Lastfälle	Die Einzelemente sind so ausgelegt, dass sie die anwendungstypischen Lasten mit ausreichend hohem Sicherheitsfaktor tragen. Die Technologien (Strukturspulentechnik, Konsolidierung) bieten zudem ausreichend Potential, die Festigkeiten deutlich zu erhöhen und so auf den Bedarfsfall anzupassen.
5	Klare Nutzungsvorgaben (Auf- und Abbauanleitungen, Auslegung für Außen- und Innenräume)	Die Nutzungsvorgaben für Promotionsanwendungen liegen vor.

Die Entsorgung über das Altpapier entspricht dem dritten Punkt der Abfallhierarchie, dem **Recycling**. Altpapier hat in Deutschland eine Recyclingquote von 79 % [17]. Die im Projekt angewendete CEPI-Methode zeigte, dass alle eingesetzten Komponenten inklusive der eingesetzten Kleb- und Hilfsstoffe über den Standard-Altpapierweg recycelt werden können. Es ist also eine hohe Rezyklierbarkeit für alle erarbeiteten Baukastenelemente gegeben.

Für die Praxis bedeutet das Folgendes: Eine Entsorgung über den Altpapierweg ist bei den meisten deutschen Messen und Einkaufszentren gut möglich. So bieten die Messen Stuttgart, Frankfurt, Düsseldorf und Hamburg voneinander getrennte Sammelcontainer für Papier und Pappe. Von den sechs ECE-Centern (die Breuningerländer Sindelfingen und Ludwigsburg, Milaneo (Stuttgart), Ettliger Tor

(Karlsruhe), Marstall-Center (Ludwigsburg) und Leo-Center (Leonberg)) können bei je dreien Papier und Pappe getrennt voneinander entsorgt werden. Diese Trennung von Papier und Pappe bewirkt eine Unterscheidung in verschiedene Qualitätsstufen, da bei Papier die einzelnen Fasern tendenziell länger sind als bei Pappe. Je länger die verfügbaren Einzelfasern sind, desto höher kann die Qualität der daraus wieder hergestellten Papiere sein.

3.8 Bewertung der Projektergebnisse

Im Projekt konnte gezeigt werden, dass mithilfe der Strukturspulentechnologie sehr leichte und trotzdem stabile Strukturkörper aus Papiergarn hergestellt werden können. Durch die Nutzung einer Konsolidierungsmethode, die auf nachwachsenden Rohstoffen im Klebstoff basiert, konnten Grundelemente für den Aufbau von Messe- und Präsentationssysteme entwickelt werden, die wieder dem Altpapierkreislauf zugeführt werden können. Die Elemente können mehrfach genutzt werden.

Die Strukturspulentechnik ist eine wirtschaftliche Technologie. Basierend auf der konventionellen Spulentechnik sind hohe Prozessgeschwindigkeiten möglich. Ebenso bietet die Technologie ein großes Potential zur Automatisierung und Individualisierung. So sind bspw. ein automatischer Hülsenwechsel zur Entnahme des fertigen Produkts und ein eigenständiges Anspulen heute maschinenbaulich bereits umsetzbar und werden in der textilen Prozesskette bereits genutzt. Ein Übertrag auf die Strukturspulentechnik ist gut möglich. So ist letztendlich auch eine wirtschaftliche Fertigung der „Stückzahl 1“ darstellbar. Ebenso wurden die Entwicklungsarbeiten im Projekt auf der Basis einer konventionellen Spulmaschine durchgeführt, die maschinenbaulich verändert wurde. Das bietet die Möglichkeit einer sehr guten Übertragbarkeit auf konventionelle Spulmaschinen. Der Spulprozess gehört zu den am häufigsten durchgeführten textilen Prozessen, da konventionelle Spulen als Garnspeicher für zahlreiche textile Prozesse notwendig sind.

Das entwickelte Konsolidierungsverfahren bietet ebenfalls großes Potential für eine technologische, wirtschaftliche Übertragung auf seriennahe Prozesse. Heute sind zahlreiche Möglichkeiten der prozessintegrierten Garnbeschichtung bzw. der Infiltrierung mit fluiden Klebstoffen bekannt. Diese können validiert und auf die vorherrschenden Gegebenheiten angepasst werden. Durch die Findung des wasserbasierten Klebstoffsystems kann die Viskosität flexibel auf die herzustellenden Strukturen und auf die Prozessbedingungen eingestellt werden.

Durch die entwickelten Messe- und Eventmöbel aus Papiergarn ist es möglich, das Abfallaufkommen nach solchen Veranstaltungen drastisch zu reduzieren. Als Entsorgungswege stehen einerseits eine Wiedernutzung aller oder einzelner Bauteile und andererseits eine Entsorgung über den in Deutschland sehr gut etablierten Altpapierweg zur Verfügung. Jeder dieser Wege stellt bereits für sich genommen eine deutliche Verbesserung der aktuellen Situation dar, bei der in den meistens Fällen eine Entsorgung über den Mischabfall erfolgt. Dies ist notwendig, da viele Messe- und Eventmöbel aus nicht-trennbaren Verbundmöbeln bestehen bzw. speziell hierfür abgestimmte Entsorgungssysteme auf Messen nicht zur Verfügung stehen.

Die Projektergebnisse können also zu maßgeblichen Verbesserungen in den folgenden Punkten beitragen.

Reduktion des gemischten Abfallaufkommens nach Messen und Veranstaltungen: Durch die eingesetzten papier- bzw. naturbasierten Materialien wird eine ressourceneffiziente Entsorgung des

Standbaus ermöglicht. Passende Verbindungstechniken der Einzelemente erlauben eine leicht zu handhabende und messe- und eventabgestimmte sortenreine Trennung.

Ressourcenschonung: Durch das intuitive Stecksystem wird es dem Nutzer einfach gemacht, die Einzelteile zu trennen und im Sinne der mehrfachen Verwendung wiedereinzusetzen und am Ende der Produktlebensdauer dem Wertstoffkreislauf (Altpapier) zuzuführen. Unterstützt wird die Mehrfachnutzung durch die hohe Stabilität der Elemente.

Leichtbaupotential bedeutet Nachhaltigkeit: Die entwickelten Messe- und Eventmöbel sind sehr leicht. Dadurch werden Emissionen durch geringeres Gewicht beim Transport eingespart. Ermöglicht durch das Stecksystem können die Aufbauten nach dem Abbau in ihre Einzelteile zerlegt werden und in kleine Packungseinheiten verpackt werden. Dadurch können beim Transport noch zusätzlich Emissionen eingespart werden, da bspw. größere Aufbauten nicht gesondert transportiert werden müssen. Werden Standbauteile direkt am Veranstaltungsort zerkleinert bzw. in der Altpapierpresse, so reduziert sich außerdem das Volumen des abzutransportierenden Abfalls deutlich. Es konnte gezeigt werden, dass durch Spulen hergestellte Strukturen ein hohes Potenzial, konstruktive Leichtbauprinzipien auszunutzen, bieten. Gleichzeitig führen die integrierten Funktionen (Beleuchtung, Sensorik) zu einer weiteren Einsparung von Gewicht und Komponenten, da sie intrinsisch eingefügt worden sind.

Papier ist nachhaltig: Das Recycling von Papier ist etabliert. Zwar gibt es auch hier Qualitätsabstufungen, die zunehmen, je öfter eine Einzelfaser den Recyclingprozess durchlaufen hat, jedoch verdeutlicht die konstant hohe Recyclingquote von 79 % die technischen Möglichkeiten hierbei. [17] Andere für Messestände eingesetzte Materialien wie typischerweise Aluminium oder Kunststoffverbünde weisen auf den ersten Blick ebenso eine hohe Recyclingquote auf. Jedoch kann diese nur eingehalten werden, wenn eine ausreichend hohe Sortenreinheit und wenn die Verfügbarkeit der zu recycelnden Materialien gegeben ist. Von Sortenreinheit spricht man bei Aluminium insbesondere bzgl. der ca. 450 verschiedenen Aluminiumlegierungen, bei denen eine untrennbare Vermischung mit anderen Metallen erfolgte. [18] Diese ist bei der Mischabfallentsorgung nach Messen und Events nur sehr selten gegeben. Für die Herstellung von einer Tonne Primäraluminium werden bspw. ca. 8-10 Tonnen, für die Herstellung der gleichen Menge Papier werden lediglich 1,25 Tonnen CO₂-Äquivalente emittiert. Bei recyceltem Papier liegt der Wert nur bei 0,42 bis 0,8 Tonnen. [19] [20]

Am Beispiel der Demonstrator-Theke kann der Vorteil einer strukturgespulten Variante im Vergleich zu einer Theke aus 32 mm-Aluminiumprofilen mit einer 16 mm-Spanplatte dargestellt werden. Die Papiergarn-Theke wiegt ohne Beleuchtung insgesamt 5,5 kg. Vergleicht man das Gewicht pro Zentimeter ergibt sich:

- Die eingesetzten strukturgespulten Röhren haben je nach Ausführung ca. 2-3 g/cm Gewicht.
- Ein quadratisches Aluprofil mit einer Kantenlänge von 30 mm wiegt 9,0 g/cm [21].

Nach einer Berechnung kann die Papiergarn-Theke über 75,5 % vom Gewicht und 93,8 % CO₂ einsparen. Zusätzlich konnte gänzlich auf umweltproblematische Stoffe verzichtet werden.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der ökologische Nutzen der entwickelten Technologie als sehr hoch einzuschätzen ist. Die erarbeiteten Projektergebnisse lassen sich gut auf weitere Anwendungsfelder übertragen, so dass von einer weiteren Umweltentlastung auszugehen ist. Hierfür müssen weitere Produkt- und Verfahrensanforderungen erarbeitet und entwickelt werden.

3.9 Maßnahmen zur Verbreitung der Vorhabensergebnisse

Im Vorgängerprojekt „PapierLicht“ wurde eine Website durch den Projektpartner quintessence design erstellt, welche unter <https://papierkonstruktion.de> aufgerufen werden kann. Diese wurde um das neue Projekt „PapierEvents“ ergänzt. Im Dezember 2023 ist ein Artikel in der Fachzeitschrift EventPartner (Ausgabe 6/2023, Titelblatt) erschienen. Eine Pressemeldung wurde am 25. Januar 2024 auf der Internetseite der DITF veröffentlicht (www.ditf.de/de/aktuelles/pressemeldungen) und wurde aktiv an Pressestellen, Firmen und Personen übermittelt. Eine weitere Veröffentlichung ist im Jahresbericht 2023 der DITF vorgesehen, der ebenfalls breit in der Industrie und Presse verteilt wird. Im Februar 2024 erfolgte mit den DITF und dem PMV Darmstadt die Aufnahme eines Radiointerview, welches bei SWR2 auf Sendung gehen wird. Demonstratoren und weitere Funktionsmuster stehen zur Anschauung bei den Projektpartnern zur Verfügung. Anhand dieser können alle Projektpartner die Ergebnisse des Projektes Unternehmensvertretern und Endkunden näherbringen. Insbesondere an den DITF und an dem PMV finden regelmäßig Veranstaltungen statt, bei denen Besucher, wie z.B. Studierende und Vertreter aus der Industrie teilnehmen. Die Ergebnisse wurden und werden weiter regelmäßig diesen Besuchern vorgestellt.

4 Fazit

Im Projekt konnte gezeigt werden, dass über die Strukturspulentechnologie mit einer geeigneten Konsolidierung Messe- und Eventmöbel hergestellt werden können, die komplett über den Altpapierweg entsorgt oder wiederverwendet werden können. Die funktionalen Anforderungen (Festigkeit, Stabilität, Beleuchtung und Sensorik) konnten erfüllt werden. Das modulare System und das geringe Gewicht der Elemente erlaubten eine nachhaltige, ressourcenschonende Nutzung. Es wurden die beiden Entsorgungswege Wiedernutzung und Entsorgung im Altpapier aufgezeigt.

Die Messe- und Eventbranche befindet sich im Umbruch. Auf Messen und Events werden nicht nur Botschaften zur Marke, zum Produkt und zum Preis transportiert. Vielmehr liegt das Augenmerk zusätzlich auf einer nachhaltigen Präsentation, da diese Hand in Hand mit der eigenen Markenbotschaft einhergeht. Unternehmen wollen und müssen nachweisen, welche umweltrelevanten Maßnahmen von ihnen getroffen werden und wie ihr Beitrag zum Umwelt- und Klimaschutz aussieht. Dies beginnt beim Messe- oder Eventauftritt, der folglich ebenso glaubwürdig nachhaltig gestaltet werden muss. Die erarbeiteten papiergarnbasierten und voll recyclingfähigen Messe- und Eventmöbel bieten hierfür also eine ideale Grundlage.

Die Projektergebnisse zeigen nach Einschätzung der Projektpartners sowie nach Gesprächen in deren wirtschaftlichem und technologischem Umfeld ein sehr großes Potential, umweltrelevante Herausforderungen der Messe- und Eventbranche wirtschaftlich zu lösen. Gleichzeitig wird eine mögliche Kundenakzeptanz als sehr hoch eingeschätzt.

In zukünftigen Arbeiten und Projekten kann eine Vorbereitung der Serienfertigung erfolgen. Hierzu müssen Standardisierungen der Bauteile und der Prozesse vorgenommen sowie eine Produktionsumgebung aufgebaut werden.

5 Literaturverzeichnis

-
- [1] Riethmüller, Christoph; Institut für Textil- und Verfahrenstechnik Denkendorf: *Gezielte nasschemische Sequenzfunktionalisierung von Garnen für den Plagiatschutz und als Sensorgarn*“, AiF-Forschungsbericht Nr.17760 N, 2016
- [2] SSM –Schärer Schweiter Mettler: *Betriebsanleitung für Präzisionskreuzspulmaschine PW2-W mit System Fastflex TM DIGICONE®*, Ausgabe V2.0, April 2006
- [3] N.N.: *Studie: Eventbranche macht 130 Mrd. Euro Umsatz*. <https://www.die-stadtzeitung.de/index.php/2020/06/19/studie-eventbranche-macht-130-mrd-euro-umsatz>, Zugriff am 28.10.2020
- [4] N.N.: *Die Gesamtwirtschaftliche Bedeutung der Veranstaltungsbranche*. Studie des R.I.F.E.L e.V., Veröffentlichung am 15.06.2020, Berlin
- [5] Hochheim, Hendrik: *Kennzahlen der Messewirtschaft*, <https://www.auma.de/de/zahlen-und-fakten/branchenkennzahlen>, Zugriff am 18.01.2024
- [6] Takasaki, Midori, et al.: *Preparation and properties of paper yarn from mulberry*. Advanced Materials Research, Trans Tech Publications Ltd, 2011. S. 575-579.
- [7] Peterson, Joel, et al.: *Mechanical-Property-Based Comparison of Paper Yarn with Cotton, Viscose, and Polyester Yarns*. Journal of Natural Fibers, 2019, S. 1-10.
- [8] Park, Tae Young; KIM, Myoung-Ok.: *Manufacture and physical properties of the denim fabrics using Hanji paper yarn as weft yarn*. Fashion and Textiles, 2018, 5. Jg., Nr. 1, S. 26.
- [9] Park, Tae Young; LEE, Seung Goo.: *Properties of hybrid yarn made of paper yarn and filament yarn*. Fibers and Polymers. 2017, 18. Jg., Nr. 6, S. 1208-1214.
- [10] Murate, Hirota, et al.: *Improvement in the stretching property of paper yarn by shape memorization produced with high-pressure steam treatment*. Sen'i Gakkaishi, 2008, 64. Jg., Nr. 3, S. 74-78.
- [11] Riethmüller, Christoph; Institut für Textil- und Verfahrenstechnik Denkendorf: *Textile Lichtrichtgitter durch Strukturspulen*, AiF-Forschungsbericht Nr. 17382 N/1, März 2014
- [12] Riethmüller, Christoph; Baesch, Bastian; Planck, Heinrich: *Strukturspule – neues Verfahren zur Herstellung intelligenter Bauteile*. Technische Textilien, 1/2011
- [13] Scharpf, Kathrin; Riethmüller, Christoph; Gresser, Götz T.: *Wirtschaftliche Herstellung von Bauteilen durch die Strukturspul- und Strukturknäueltechnik*. Technische Textilien, 4/2016
- [14] Viola Finckh, Kathrin Haigis, et al.: *Entwicklung von rezyklierbaren Leuchten aus Papier-Verbundwerkstoffen. Kurztitel: Papierlicht*. DBU-Schlussbericht, DBU-AZ: 35166, November 2020, abrufbar unter: https://www.dbu.de/OPAC/ab/DBU-Abschlussbericht-AZ-35166_01-Hauptbericht.pdf
- [15] Confederation of European Paper Industries: *Cepi Recyclability Test Method Version 2*. <https://www.cepi.org/cepi-recyclability-test-method-version-2>, Zugriff am 01.03.2024
- [16] N.N.: *Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen*. <https://www.gesetze-im-internet.de/kwrg/BJNR021210012.html#BJNR021210012BJNG000300000>, Zugriff am 01.02.2024
- [17] N.N.: *Altpapier*: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehlter-abfallarten/altpapier#vom-papier-zum-altpapier>, Zugriff am 31.01.2024

-
- [18] Schneider, Andreas: *Darum ist Aluminium nicht gut für die Umwelt*.
<https://www.quarks.de/umwelt/muell/darum-ist-aluminium-nicht-gut-fuer-die-umwelt/>, Zugriff am 31.01.2024
- [19] N.N.: *Aluminium ein Umweltproblem*. <https://www.wir-leben-nachhaltig.at/aluminium-ein-umweltproblem>, Zugriff am 26.02.2024
- [20] Bialek, Catrin; Terpitz, Katrin: *Ökobilanz: Sechs Mythen über Plastik und Papier*.
<https://www.handelsblatt.com/unternehmen/handel-konsumgueter/verpackungsindustrie-oekobilanz-sechs-mythen-ueber-plastik-und-papier/27404644.html>, Zugriff am 26.02.2024
- [21] Onlinekatalog der Firma Bosch Rexroth: *Strebenprofile*.
https://www.boschrexroth.com/ics/cat/content/assets/Online/do/Strut_profiles_MGE_DE.pdf, Zugriff am 28.02.2024