

Abschlussbericht

Entwicklung von rezyklierbaren Leuchten aus Papier-Verbundwerkstoffen

Kurztitel: Papierlicht

Denkendorf, Darmstadt, Neidenfels, Stuttgart, den 13.11.2020

DBU-AZ: 35166

Laufzeit: 21.10.2019-20.08.2020

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

Robert Götzinger, Prof. Dr.-Ing. Samuel Schabel (PMV Darmstadt)

Gerd Martin (Garntec GmbH)

Karl Schairer, Nathalie Heeb (quintessence design GbR)

gefördert durch



Deutsche
Bundesstiftung Umwelt

www.dbu.de

| | | | | | |
|--|-------------------|---|-----------------|---|--|
| 06/02 | | Projektkennblatt der Deutschen Bundesstiftung Umwelt | |  | |
| Az | 35166 | Referat | Fördersumme | | |
| Antragstitel | | Entwicklung von rezyklierbaren Leuchten aus Papier-Verbundwerkstoffen Kurztitel: Papierlicht | | | |
| Stichworte | | Papier-Verbundwerkstoffe, Papierstrukturen, Einsparung von Metall, Papiergarn, Rezyklierbarkeit | | | |
| Laufzeit | Projektbeginn | Projektende | Projektphase(n) | | |
| 10 Monate | 21.10.2019 | 20.08.2020 | 1 | | |
| Zwischenberichte | | ./. | | | |
| Bewilligungsempfänger | | DITF Denkendorf Körschtalstraße 26 73770 Denkendorf | | Tel 0711/9340-256 Fax 0711/9340-464 | |
| | | | | Projektleitung Christoph Riethmüller und Kathrin Haigis | |
| | | | | Bearbeiter Kathrin Haigis, Viola Finckh, Christoph Riethmüller, Robert Götzinger, Prof. Dr.-Ing. Samuel Schabel, Gerd Martin, Karl Schairer, Nathalie Heeb | |
| Kooperationspartner | | PMV Darmstadt, Alexanderstraße 8, 64283 Darmstadt Garntec GmbH, Staatsstraße 5, 67468 Neidenfels quintessence design GbR, Fideliostraße 20, 70597 Stuttgart | | | |
| Zielsetzung und Anlass des Vorhabens | | | | | |
| <p>In Anbetracht aktueller Klimadebatten gewinnt eine sinnvolle Ressourcennutzung zunehmend an Bedeutung. Um die lokal anfallende Ressource Altpapier zu neuen Konsumgütern zu verarbeiten, war es Ziel eine neue Werkstoffklasse aus Papiergarn-Verbänden zu entwickeln, die außerdem einen höherfunktionalen Mehrwert aufweisen. Das Ziel war, eine Leuchte herzustellen, die anders als konventionell verfügbare Papierleuchten, auf eine Trägerstruktur aus Draht verzichtet, um CO₂-Äquivalente einzusparen. Teilziel war, Papiergarne zu entwickeln, die über den Strukturspulprozess zu dreidimensionalen Formkörpern verarbeitet werden und nach der Konsolidierung freitragende Strukturen ergeben. Weiteres Teilziel war, die Leuchte in ein passendes Recyclingkonzept zur möglichst ganzheitlichen Rohstoffnutzung einzubetten. Weiteres Ziel war, das gesammelte Wissen auf weitere Anwendungsfelder zu übertragen und auszuweiten.</p> | | | | | |
| Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden | | | | | |
| <p>Zur Erreichung der Projektziele wurden die Anforderungen an die Papiergarn-Verbundwerkstoffe, Funktionsmuster und Demonstratorleuchten erarbeitet. Man entwickelte die Strukturspultechnologie sowie die geeignete Konsolidierung für Papiergarne. Hierzu gehören die Entwicklung von Wickeldornen und geeigneter Spulenaufbauten. Zur geeigneten Konsolidierung wurden verschiedene Techniken und Klebstoffe für die Umsetzung untersucht. Hierauf abgestimmt wurden Papiere und Papiergarne entwickelt und hergestellt. Ebenso wurde die Rezyklierbarkeit der Körper untersucht und erprobt. Es erfolgte die Konzeption und die Herstellung der Demonstratorleuchten. Zur Erfassung der lichttechnischen Eigenschaften wurden verschiedene Messungen durchgeführt und der Übertrag auf spulentechnisch relevante Kenngrößen erarbeitet. Zur Erarbeitung und Simulation von Designvarianten wurden verschiedene Entwicklungstools und Methoden eingesetzt. Dabei wurden ausgewählte Designvarianten in der Simulationssoftware Keyshot Pro weiterentwickelt und ausgewertet.</p> | | | | | |
| Deutsche Bundesstiftung Umwelt • An der Bornau 2 • 49090 Osnabrück • Tel 0541/9633-0 • Fax 0541/9633-190 • http://www.dbu.de | | | | | |

Ergebnisse und Diskussion

Im Projekt konnte gezeigt werden, dass es mittels der Strukturspulentechnologie möglich ist, sehr leichte, freitragende dreidimensionale Strukturkörper mit ausreichender Festigkeit aus Papiergarn herzustellen. Diese bilden gute Grundlagen für die Gestaltung von Leuchten. Für die Konsolidierung der Papiergarne wurden Klebstoffsysteme untersucht und bewertet. Dabei wurden zwei Konsolidierungsverfahren näher betrachtet. Durch die Nutzung einer Konsolidierungsmethode mit Stärkeklebstoff, welcher auf einem nachwachsenden natürlichen Rohstoff basiert und keinen Störfaktor im Recyclingprozess darstellt, konnten Leuchten entwickelt werden, die sortenrein recycelt werden können. Der Stärkeklebstoff ist im Vergleich zu den anderen untersuchten Klebstoffen ökonomisch, optisch und ökologisch im Vorteil. Die entwickelten Lampenschirm-Strukturen zeigen für diesen Einsatzzweck zudem ausreichende mechanische Stabilität und Festigkeiten und können auf ein Drahtgerüst verzichten.

Feine Papiergarne sind momentan nur mit Nassfestmittel herstellbar, welche das Recycling unter Standardbedingungen nicht ermöglichen. Größere Garne sind hingegen auflösbar und somit direkt dem Altpapierkreislauf zuführbar. In lichttechnischen Messungen wurden die Transmission und Reflexion von verschiedenen hergestellten Grundstrukturen ermittelt. Es wurden Korrelationen zwischen den Abständen der gespulten Garne bzw. dem Abdeckungsgrad und diesen Werten festgestellt. Die Aufnahmen einer papiergarnespulten Leuchte mit einer Leuchtdichtekamera zeigen im Vergleich zu einer vergleichbaren Leuchte aus gespulten PES-Garnen gleichmäßigere Werte bei etwas niedrigerer Leuchtdichte.

Die durchgeführten Simulationen zeigen eine Übereinstimmung im Erscheinungsbild mit den später erzeugten Demonstratorleuchten. Deswegen stellt dies ein geeignetes sowie effizientes Tool für die Entwicklung von Leuchten dar.

Insgesamt wurden drei Demonstratorleuchten aufgebaut, die die verschiedenen Möglichkeiten des Einsatzes von unterschiedlichen Garndicken, -farben und Strukturen verdeutlichen. Des Weiteren stehen viele Funktionsmuster in flacher und dreidimensionaler Form zum Übertrag auf andere Anwendungsfelder zur Verfügung.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Im Projekt wurde eine Website durch quintessence design erstellt (<https://papierkonstruktion.de>). Die durch PMV geplante Präsentation von Struktur-Funktionsmustern auf der Biennale (Venedig) wird durch die Corona-Krise auf das Jahr 2021 verschoben. Die Muster hierzu sowie die Demonstratorleuchten und weitere Funktionsmuster stehen zur Anschauung bei den Projektpartnern zur Verfügung. Im Rahmen der Internationale Bauausstellung 2027 (IBA 27) wurden die durchgeführten Arbeiten und Ergebnisse durch die DITF bei Veranstaltungen dem Fachpublikum vorgestellt. Die Garntec GmbH präsentierte die Ergebnisse bilateral einem Leuchtenhersteller. Eine Pressemitteilung ist seit November 2020 auf der Internetseite der DITF veröffentlicht und wird an Pressestellen, Firmen und Personen übermittelt. Im Dezember 2020 wird ein Artikel in der Fachzeitschrift P3 (Paper, Print & Packaging) in der deutschen und englischen Ausgabe erscheinen. Eine weitere Veröffentlichung ist im Jahresbericht 2020 der DITF vorgesehen.

Fazit

Im Projekt konnte gezeigt werden, dass voll recycelfähige Leuchten aus Papiergarn hergestellt werden können. Mittels der Strukturspulentechnologie ist es möglich, sehr leichte und trotzdem stabile Strukturkörper aus Papiergarnen herzustellen, die eine auf den Anwendungszweck abgestimmte Lichtlenkung bieten. Diese bilden gute Grundlagen für die Gestaltung von Leuchten. Durch die Nutzung einer Konsolidierungsmethode, die auf nachwachsenden Rohstoffen im Klebstoff basiert, konnten nun Leuchten entstehen, die dem Altpapierkreislauf zugeführt werden. Auf die Grundstruktur mit Metall kann verzichtet werden und diese tragen so zur Einsparung von CO₂ bei. Die für die Leuchten notwendigen mechanischen Kennwerte wurden bereits weit übererfüllt. Durch weitere gezielte Entwicklung von Papieren, Papiergarnen und der textilen Strukturen in Verbindung mit geeignetem natürlichen Klebstoffen hin zu hohen mechanischen Festigkeiten kann es möglich sein, leichte, stabile und rezyklierbare Konstruktionsbauteile für weitere Anwendungsfelder aus dem nachwachsenden Rohstoff Papier herzustellen. Des Weiteren wird eine Ausweitung des Recyclingpotentials hin zu dünnem Papiergarn gesehen. Zukünftige Entwicklungsschwerpunkte liegen also auf der Entwicklung von Bauteilen, die aus Papiergarnen bestehen, die uneingeschränkt dem Standard-Recyclingprozess zuführbar sind und weitere Marktfelder erschließen.

Inhalt

| | |
|---|----|
| Projektkennblatt | 1 |
| Verzeichnis von Bildern und Tabellen | 2 |
| Verzeichnis von Abkürzungen, Formelzeichen, Begriffen und Definitionen | 4 |
| 1 Zusammenfassung | 5 |
| 2 Einleitung | 6 |
| 3 Hauptteil | 8 |
| 3.1 Anforderungen und Schnittstellendefinition für Leuchten aus Papiergarnen..... | 8 |
| 3.2 Papiertechnik | 9 |
| 3.2.1 Stand der Technik - Papiergarne | 9 |
| 3.2.2 Untersuchungen - Rohstoff Papier | 10 |
| 3.2.3 UD-Papier-Garne..... | 11 |
| 3.3 Strukturgespulte Papiergarn-Verbundwerkstoffe | 15 |
| 3.3.1 Grundlagen - Strukturspultechnik | 15 |
| 3.3.2 Grundlagen - Übersicht herkömmlicher Wicklungsarten | 15 |
| 3.3.3 Formgebung mit der Strukturspultechnik mit Hülse oder Dornkörper | 16 |
| 3.3.4 Papiergarn-Struktur-Spultechnik..... | 17 |
| 3.3.5 Möglichkeiten der Strukturspultechnik..... | 18 |
| 3.3.6 Im Projekt eingesetzte Papiergarne | 20 |
| 3.3.7 Konsolidierung | 20 |
| 3.3.8 Einbringung von Farbe | 24 |
| 3.3.9 Mechanische Prüfungen | 25 |
| 3.4 Recyclingkonzepte | 26 |
| 3.4.1 Grundlagen - Recycling | 26 |
| 3.4.2 Recycling von Papiergarnen | 28 |
| 3.4.3 Recycling von Papiergarn-Verbundstrukturen | 28 |
| 3.5 Gestaltungsansätze und Simulationen | 30 |
| 3.5.1 Trends und Einordnung..... | 30 |
| 3.5.2 Gestaltungsansätze von Papiergarn-Leuchten | 31 |
| 3.5.3 Möglichkeiten in der Simulation von textilen Strukturen..... | 34 |
| 3.6 Funktionsmuster und Demonstratorleuchten..... | 35 |
| 3.6.1 Funktionsmuster | 35 |
| 3.6.2 Demonstratorleuchten..... | 36 |
| 3.7 Lichttechnische Messungen an Papiergarnstrukturen | 39 |



| | | |
|-------|---|----|
| 3.7.1 | Messungen der Leuchtdichte..... | 39 |
| 3.7.2 | Messungen der Beleuchtungsstärke..... | 40 |
| 3.7.3 | Messung der Reflexions- und Transmissionsgrade..... | 42 |
| 3.7.4 | Zusammenfassung der lichttechnischen Untersuchungen und Vergleich von Simulation und reeller Umsetzung..... | 45 |
| 3.8 | Übertrag auf andere Anwendungsfelder..... | 46 |
| 3.9 | Bewertung der Projektergebnisse..... | 46 |
| 4 | Fazit..... | 48 |
| 5 | Maßnahmen zur Verbreitung der Vorhabensergebnisse..... | 49 |
| 6 | Literaturverzeichnis..... | 50 |

Verzeichnis von Bildern und Tabellen

Verzeichnis von Abbildungen

| | |
|--|----|
| Abbildung 3-1: Auswahl an Garn-Basispapieren für die Charakterisierung | 10 |
| Abbildung 3-2: Prinzip der Fadenablegung bei einer zylindrischen Kreuzspule | 16 |
| Abbildung 3-3: Angefertigte Dornkörper am Beispiel der Demonstratorleuchte „FIVE STEMS“, mit Spulvorgang | 17 |
| Abbildung 3-4: Sonderwickelmaschine im Spultechnikum der DITF | 18 |
| Abbildung 3-5: Spultechnische Möglichkeiten | 19 |
| Abbildung 3-6: Strukturen mit unterschiedlichen Klebstoffen | 21 |
| Abbildung 3-7: Im Projekt untersuchte Konsolidierungsmethoden | 23 |
| Abbildung 3-8: Möglichkeiten der Farbeinbringung für Lampenschirme | 24 |
| Abbildung 3-9: 3-Punkt-Biegeversuch eines Papiergarn- und eines Kunststoffrohres | 25 |
| Abbildung 3-10: 3-Punkt-Biegeversuch verschiedener Röhren im Vergleich | 26 |
| Abbildung 3-11: Mögliche Formen und ihre Umsetzbarkeit durch den Spulprozess | 31 |
| Abbildung 3-12: Mögliche Umsetzungsvarianten für kombinierte Körper | 32 |
| Abbildung 3-13: Prinzip der Umstülpung von gespulten Strukturen | 32 |
| Abbildung 3-14: Gestaltungsansätze „konische Form mit Diffusor“, Zeichnungen und Visualisierungen | 33 |
| Abbildung 3-15: Gestaltungsansatz „Rohrkolben“, Zeichnung und Visualisierungen | 33 |
| Abbildung 3-16: Weitere Gestaltungsansätze, Zeichnungen und Visualisierung | 34 |
| Abbildung 3-17: Einstellen der Lichtverhältnisse eines zweiteiligen Lampenschirms | 35 |
| Abbildung 3-18: Beispiele für Funktionsmuster: Lampenschirme mit Diffusoren sowie verschiedene Papiergarnstrukturen | 36 |
| Abbildung 3-19: Demonstratorleuchte 1 „THIRTY-ONE“ aus 31 konischen Lampenschirmen in der Farbe Weiß | 37 |
| Abbildung 3-20: Demonstratorleuchte 3 „FIVE STEMS“ mit fünf „Halmen“ in den Farben Weiß und Naturbraun | 38 |
| Abbildung 3-21: Demonstratorleuchte 2 „COLORED SEVEN“ aus 7 konischen Lampenschirmen in den Farben Rot, Weiß, Naturbraun und mit unterschiedlichen Strukturen | 39 |
| Abbildung 3-22: Leuchtdichtenmessung, Lampenschirm aus PES- und Papiergarn | 40 |
| Abbildung 3-23: Leuchtdichtenmessung- Unterschied zwischen einem Polyester- und einem Papiergarn-gespultem Lampenschirm (Messung entlang einer Senkrechten) | 40 |
| Abbildung 3-24: Messprinzip der Beleuchtungsstärke mit ILT 2500 und LED: G9 neutralweiß/3,8 W .. | 41 |
| Abbildung 3-25: Ergebnisse der Beleuchtungsstärkenmessung | 41 |
| Abbildung 3-26: Ulbricht-Kugel Labspehre RTC 060 SF und Spektrometer QE Pro von Ocean Optics und Darstellung lichttechnischer Größen | 42 |
| Abbildung 3-27: Hemisphärische Reflexions- und Transmissionsgrade verschiedener Grundstrukturen | 43 |
| Abbildung 3-28: Transmissions- und Reflexionsgrade in Abhängigkeit vom Flächengewicht bzw. Abdeckungsgrad | 44 |
| Abbildung 3-29: Vergleich der simulierten Leuchte zur Demonstratorleuchte | 45 |

Verzeichnis von Tabellen

| | |
|---|----|
| Tabelle 2-1: Abkürzungen | 4 |
| Tabelle 2-2: Formelzeichen..... | 4 |
| Tabelle 3-1: Anforderungen an die Papiergarnleuchten und deren Umsetzung im Projekt | 8 |
| Tabelle 3-2: Normen und Spezifikationen zur Charakterisierung der Garn-Basispapiere | 10 |
| Tabelle 3-3: Ergebnisse der Charakterisierung der Garn-Basispapiere | 11 |
| Tabelle 3-4: Ergebnisse TSI/TSO Messungen der UD-Papiere. Gesamtmittelwerte aus 5 Bögen im Projekt hergestellten UD- Papiers mit jeweils 5 Messungen | 12 |
| Tabelle 3-5: Probandaten des im Projekt hergestellten UD-Papiers für die Zugprüfung nach DIN EN ISO 1924-2 | 13 |
| Tabelle 3-6: Ergebnisse der Zugprüfung - Auswahl..... | 13 |
| Tabelle 3-7: Einordnung der Ergebnisse der Zugprüfung..... | 14 |
| Tabelle 3-8: Im Projekt eingesetzte Papiergarne | 20 |
| Tabelle 3-9:Untersuchte Klebstoffe | 21 |
| Tabelle 3-10: Übersicht von Prüfmethoden zur Bewertung der Rezyklierbarkeit von grafischen Produkten und papierbasierten Verpackungen | 27 |
| Tabelle 3-11: Gewichtsanteile der klebstoffbeschichteten Kopierpapieren | 29 |
| Tabelle 3-12: Zusammenfassung der Recyclingergebnisse nach PTS RH 021-97 der klebstoffbeschichteten Papiere..... | 29 |

Verzeichnis von Abkürzungen, Formelzeichen, Begriffen und Definitionen

Abkürzungen

Tabelle 0-1: Abkürzungen

| | |
|-----|---|
| AP | Arbeitspaket |
| CD | Querrichtung |
| DH | Doppelhub |
| KV | Kreuzungsverhältnis, entspricht dem Windungsverhältnis WV |
| MD | Maschinenrichtung |
| MW | Mittelwert |
| PES | Polyester |
| s | Standardabweichung der Stichprobe |
| UD | unidirektional |
| V | Variationskoeffizient |
| tex | Maßeinheit für die Masse von Garnen bezogen auf die Länge (Bsp.: 20 tex = 20 g/1000 m Garn); siehe DIN 60905, Teil 1. |

Formelzeichen

Tabelle 0-2: Formelzeichen

| | |
|----------------|-------------------|
| d | Durchmesser |
| d _i | Innendurchmesser |
| T | Transmissionsgrad |
| R | Reflexionsgrad |

Begriffe und Definitionen

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

Grammatur: Flächengewicht von Papier

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

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. [19]

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. [1]

1 Zusammenfassung

In Anbetracht aktueller Klimadebatten gewinnt eine sinnvolle Ressourcennutzung zunehmend an Bedeutung. Um die lokal anfallende Ressource Altpapier zu neuen Konsumgütern zu verarbeiten, war es Ziel, eine neue Werkstoffklasse aus Papiergarn-Verbänden zu entwickeln, die außerdem einen höherfunktionalen Mehrwert aufweist. Das Ziel war, eine Leuchte herzustellen, die, anders als konventionell verfügbare Papierleuchten, auf eine Trägerstruktur aus Draht verzichtet, um CO₂-Äquivalente einzusparen. Teilziel war, Papiergarne zu entwickeln, die über den Strukturspulprozess zu dreidimensionalen Formkörpern verarbeitet werden und nach der Konsolidierung freitragende Strukturen ergeben.

Im Projekt konnte gezeigt werden, dass es mittels der Strukturspultechnologie möglich ist, sehr leichte, freitragende und dreidimensionale Strukturkörper mit ausreichender Festigkeit aus Papiergarn herzustellen. Diese bilden gute Grundlagen für die Gestaltung von Leuchten. Für die Konsolidierung der Papiergarne wurden Klebstoffsysteme untersucht und bewertet. Dabei wurden zwei Konsolidierungsverfahren näher betrachtet. Durch die Nutzung einer Konsolidierungsmethode mit Stärkeklebstoff, welcher auf einem nachwachsenden natürlichen Rohstoff basiert und keinen Störfaktor im Recyclingprozess darstellt, wurden Leuchten entwickelt, die sortenrein recycelt werden können. Der Stärkeklebstoff ist im Vergleich zu anderen untersuchten Klebstoffen ökonomisch, optisch und ökologisch im Vorteil. Die entwickelten Lampenschirm-Strukturen zeigen für diesen Einsatzzweck zudem ausreichende mechanische Stabilität und Festigkeiten und können so auf ein Drahtgerüst verzichten. Feine Papiergarne sind momentan nur mit Nassfestmittel herstellbar, welche das Recycling unter Standardbedingungen nicht ermöglichen. Größere Garne sind hingegen auflösbar und somit direkt dem Altpapierkreislauf zuführbar. In lichttechnischen Messungen wurden die Transmission und Reflexion von verschiedenen hergestellten Grundstrukturen ermittelt. Es wurden Korrelationen zwischen den Abständen der gespulten Garne bzw. dem Abdeckungsgrad und diesen Werten festgestellt. Die Aufnahmen einer papiergarnespulten Leuchte mit einer Leuchtdichtekamera zeigen im Vergleich zu einer vergleichbaren Leuchte aus gespulten PES-Garnen gleichmäßigere Werte bei etwas niedrigerer Leuchtdichte. Die durchgeführten Simulationen zeigen eine Übereinstimmung im Erscheinungsbild mit den später erzeugten Demonstratorleuchten. Deswegen stellt dies ein geeignetes sowie effizientes Tool für die Entwicklung von Leuchten dar. Insgesamt wurden drei Demonstratorleuchten aufgebaut, die die verschiedenen Möglichkeiten des Einsatzes von unterschiedlichen Garndicken, -farben und Strukturen verdeutlichen. Des Weiteren stehen viele Funktionsmuster in flacher und dreidimensionaler Form zum Übertrag auf andere Anwendungsfelder zur Verfügung.

Durch die Entwicklungen im Projekt konnten neue Anwendungsfelder für nachhaltige Konsumgüter aufgezeigt werden. Durch die gezielte Entwicklung von Papieren, Papiergarnen und der textilen Strukturen in Verbindung mit geeigneten natürlichen Klebstoffen hin zu hohen mechanischen Festigkeiten kann es möglich sein, leichte, rezyklierbare Konstruktionsbauteile aus dem nachwachsenden Rohstoff Papier herzustellen. Des Weiteren wird eine Ausweitung des Recyclingpotentials hin zu dünnem Papiergarn gesehen.

Am Projekt waren neben den Deutschen Instituten für Textil- und Faserforschung die Firma Garntec GmbH, die Designagentur quintessence design Heeb | Schairer GbR sowie das PMV (Fachgebiet Papierfabrikation und Mechanische Verfahrenstechnik) der TU Darmstadt beteiligt. Das Projekt AZ35166 wurde durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt gefördert.

2 Einleitung

Der Bedarf an nachhaltigen und ressourcenschonenden Werkstoffen wächst, insbesondere in der Baubranche. Diese zeichnen sich bspw. durch nachwachsende Grundwerkstoffe (als Primärwerkstoffe) oder durch eine Wiederverwertung als Sekundärwerkstoffe aus. Da der Rohstoff Papier in Deutschland nahezu überall verfügbar ist, liegt es nahe, diesen für die Herstellung neuer Produkte zu nutzen. Die Wiederverwertung von Altpapier zur Herstellung von Papierprodukten stellt eine nachhaltige und energiesparende Methode dar, den Rohstoff Holz zu nutzen.

Heute besitzen Papierlampenschirme meist ein Gestell aus lackiertem Draht, welches mit einem als Diffusor wirkenden Papier bespannt wird. Die Herstellung von Draht sowie dessen Lackierung ist energieaufwendig und verbraucht wertvolle, aber auch umweltschädliche Rohstoffe. Beim Drahtziehen haben die folgenden Verfahrensschritte umweltrelevante Einflüsse: Luftverunreinigungen durch Beizen, säurehaltige Abfälle und Abwasser, Verbrennungsabgase und –emissionen aus der Ofenfeuerung sowie bleihaltige Abfälle aus Bleibädern. [2] Beim Lackieren werden Löse- und Bindemittel sowie weitere schädliche Emissionen freigesetzt.

So verursacht ein Kilogramm lackierter Draht etwa 3,0 kg CO₂-Äquivalente. Papier verursacht im Vergleich dazu deutlich weniger CO₂-Äquivalente, etwa 1,25 kg pro produziertem kg Papier. Der Drahtanteil am Lampenschirm soll nun maßgeblich gesenkt werden, indem Papiergarne über die Strukturspultechnik zu selbsttragenden Strukturen verarbeitet werden. So ist aus heutiger Sicht eine **Einsparung von 2,0 bis 2,5 kg CO₂-Äquivalenten pro Leuchte** möglich. Ebenso soll durch die steuerbare Fadenablage die Abstrahlcharakteristik eingestellt und die Lichtausbeute verbessert werden.

In Deutschland gibt es etwa 40 Mio. Haushalte. Unter der Annahme, dass jeder zehnte Haushalt alle zwei Jahre eine Papierleuchte neu kauft, ergibt sich, dass bei diesem betrachteten Markt in Deutschland geschätzt jährlich 2 Mio. Papierleuchten verkauft werden können. Hierbei könnten 4.000 bis 5.000 Tonnen CO₂ eingespart werden.

Altpapier ist ein biobasierter, lokal verfügbarer Rohstoff mit großem Potential zur Rezyklierbarkeit. Heute liegt die Altpapiereinsatzquote (Altpapieranteil an der gesamten inländischen Papierproduktion) bei rund 75 Prozent. [3] Der Energiebedarf für die Herstellung von Papier wurde seit 1990 stetig gesenkt. [4] Die Verwendung von Sekundärpapier weist viele Pluspunkte auf, insbesondere bezogen auf den Energie- und Prozesswasserbedarf sowie auf die Entlastung der globalen Waldressource. [5] Außerdem werden Transportkosten eingespart, da der ansonsten benötigte Rohstoff Zellstoff aus den produzierenden Ländern (Skandinavien, Nordamerika) nicht mehr herangeschafft werden muss. [6] Es werden bei der Verwendung von Altpapier zur Herstellung von Papier weniger Chemikalien eingesetzt, da die Frischfasern nicht mehr aus dem Holzverbund herausgelöst werden müssen. [7]

Der **Beleuchtungsmarkt** ist groß und wächst auch weiterhin [8]. Der deutsche Leuchtenmarkt erreichte 2017 einen Umsatz von 5,34 Mrd. Euro. Hiervon fielen 1,22 Mrd. Euro auf Wohnraumleuchten. [9] Papierleuchten erfreuen sich heute großer Beliebtheit. Entscheidende Kauffaktoren sind der günstige Preis, das diffuse und meist warme Licht, das durch den Diffusor aus Papier erzeugt wird und die Vielseitigkeit, die u.a. auch durch das geringe Eigengewicht positiv beeinflusst wird. Papierleuchten bestehen meist aus einem Gestell aus lackiertem Draht, in das die Fassung integriert ist. Über dem Gestell ist eine dünne Schicht aus Papier, die als Diffusorschicht wirkt. Durch den Diffusor wird statt direktem Licht diffuses Licht ausgesendet, das eine geringere Blendwirkung hat.

Die **Rezyklierbarkeit** der Produkte wird im Rahmen des Projektes mit betrachtet. Es sollen hierfür bestehende Konzepte bewertet werden. Mit der Entwicklung von optisch ansprechenden, höherfunktionalen Lichtformkörpern für Leuchten ohne Drahtanteil soll bei den Endanwendern ein Bewusstsein für nachhaltigen Rohstoffeinsatz geschaffen werden. Durch die Wahl einer Papierleuchte als Alltagsgegenstand sollen auch Endkunden angesprochen werden können. Indem bereits in Einrichtungsgegenständen, die den Menschen täglich umgeben, darauf geachtet wird, umwelt- und klimafreundliche Materialien zu verwenden, soll ein Beitrag zum Umdenken geschaffen werden.

In diesem Projekt wurden Leuchten aus Papiergarn-Verbundwerkstoffen entwickelt. Diese besitzen eine stabile Trägerstruktur aus Papiergarn und verzichten so auf lackierten Draht. Die Papiergarne wurden dafür über die Strukturspulentechnologie zu dreidimensionalen Verstärkungskörpern verarbeitet. Anschließend wurden die Wickelkörper mit einem geeigneten Matrixwerkstoff konsolidiert, so dass ein stabiler Körper entsteht. Ausgehend von industriell verfügbaren Papiergarnen wurden die Papiere und Papiergarne für die Anwendung in Spul- und Wickelprozessen weiterentwickelt und optimiert. Insbesondere der Einsatz von Nassfestmitteln wurde untersucht. Außerdem wurden unidirektional orientierte Papiere entwickelt und als Grundlage für neue Papiergarnkonstruktionen mit erhöhter Festigkeit eingesetzt. Für die Gewährleistung einer anwendungsbezogenen Entwicklung und eines guten Praxisbezugs wurden Ansätze für Produktentwicklungen und -umsetzungen in Lichtformkörper und weitere Produktideen von Industriedesignern entwickelt und Transfermaßnahmen erarbeitet.

Zur Erreichung der Projektziele wurden fünf Arbeitspakete parallel bearbeitet. In einem ersten Arbeitspaket wurden die Anforderungen an die Papiergarn-Verbundwerkstoffe sowie an die angestrebten Funktionsmuster und Demonstratoren gesammelt. Besonderes Augenmerk wurde hierbei auf die Erfassung der schnittstellenrelevanten Aspekte gelegt. Das zweite Arbeitspaket beschäftigte sich mit der Entwicklung der Strukturspulentechnologie sowie der geeigneten Konsolidierung. Neben der Entwicklung von Wickeldornen und deren Aufbereitung lag der Schwerpunkt der Arbeiten auf der Entwicklung eines für Papiergarne und zur Erreichung der Anforderungen geeigneten Spulenaufbaus. Es wurden verschiedene Verfahrenstechniken und Materialien für die Umsetzung der Konsolidierung untersucht und bewertet. Im dritten Arbeitspaket wurden verschiedene Papiergarne entwickelt und hergestellt. Die Grundlagen hierfür wurden in der Papierherstellung selbst gelegt, in der Papiere hergestellt wurden, die dann zu Papiergarnen weiterverarbeitet wurden. Ebenso wurde die Rezyklierbarkeit der Körper untersucht und erprobt. Im vierten Arbeitspaket erfolgten die Konzeption und die Herstellung der Demonstratoren. Zur Erfassung der lichttechnischen Eigenschaften wurden verschiedene Messungen mit einer Übertragung auf spulentechnisch relevante Kenngrößen durchgeführt. Zur Erarbeitung und Simulation von Gestaltungs- (Design-) Varianten wurden verschiedene Entwicklungstools und Methoden eingesetzt. Zunächst wurden Strukturkörper in diversen Varianten entwickelt und bewertet. Ausgewählte Varianten wurden in Form von 3D-CAD-Datensätzen erzeugt. Nach gestalterischer Überprüfung und Bewertung der diversen 3D-Varianten wurden diese in der Simulationssoftware Keyshot Pro weiterentwickelt und ausgewertet. Das fünfte Arbeitspaket diente der Dokumentation und beinhaltete Maßnahmen zur Kommunikation.

3 Hauptteil

3.1 Anforderungen und Schnittstellendefinition für Leuchten aus Papiergarnen

Für die Entwicklung rezyklierbarer Leuchten aus Papier-Verbundstoffen wurde eine Anforderungsliste erstellt. Nachfolgende Tabelle zeigt die gesammelten Anforderungen und stellt sie gleichzeitig der Umsetzung im Projekt gegenüber.

Tabelle 3-1: Anforderungen an die Papiergarnleuchten und deren Umsetzung im Projekt

| Anforderung | Beschreibung der Anforderung | Zahlenwert bzw. Spezifizierung, Anmerkung | Umsetzung im Projekt erfolgreich? |
|---------------------------------|--|---|---|
| Eigenschaften Papiergarn | | | |
| Durchmesser | Einsatz von feinen bis groben Durchmessern. Kleine Garndurchmesser ermöglichen filigranere Strukturen. Größere Durchmesser als Stützstruktur. | 0,2-2 mm | ja, alle Garne konnten durch leichte Anpassungen der Spulmaschine verarbeitet werden |
| Kompaktheit | Eine erhöhte Kompaktheit bewirkt, dass das Garn weniger Klebstoff aufnehmen kann. | ausreichende Klebstoffaufnahme, durch Versuche festzustellen | ja |
| Farbe | Grundfarbe des Garns selbst | naturbraun, weiß | ja |
| Zusatzstoffe | weitgehender Verzicht von Zusatzstoffen, die den Recyclingprozess behindern | Verzicht von für Papiergarne benötigte Nassfestmitteln | Nassfestmittel bei feinen Garnen verhindern ein Standardrecycling |
| Festigkeit (Höchstzugkraft) | Eine Mindestfestigkeit wird im Spulprozess benötigt. | ausreichende Festigkeit für typische Produktionsgeschwindigkeiten | ja |
| Dehnung | Eine Mindestdehnung wird im Spulprozess benötigt. | ausreichende Dehnung für unproblematische Verarbeitung im Spulprozess | ja |
| Eigenschaften Klebstoff | | | |
| Viskosität | Ist prozessabhängig. Sollte nicht zu hoch sein, damit eine gute Durchdringung des Körpers bzw. Beschichtung des Garns ermöglicht wird. | | ja, alle untersuchten Klebstoffe sind durch Mischen mit Wasser in ihrer Viskosität einstellbar. Die Mindestviskosität muss eingehalten werden. |
| Grundmaterial | Muss pulpable sein, recyclingfähig und biologisch abbaubar. | | ja, der in den Demonstratorleuchten verwendete Stärkeklebstoff ermöglicht dies |
| Filmbildung | einstellbar | | ja, durch Änderung der Viskosität mittels Mischung mit Wasser |
| Sprödeheit nach Aushärten | gering | | ja, geringe Sprödeheit durch eingesetzten Stärkeklebstoff, durch Einsatz von Glycerin einstellbar |
| Recyclingfähigkeit | Für Recycelbarkeit darf der Nicht-Papieranteil einen Wert nicht überschreiten. | mind. 50% Papier | ja, der maximale Anteil des Klebstoffes der Demonstratorleuchten beträgt 34 % |
| Wickelkörper | | | |
| Dimensionen | dreidimensional | | ja |
| Strukturbeschreibung | Die Garne sollen in einer präzisen, strukturierten, rautenförmigen Wicklung oder prinzipiell flächig geschlossen abgelegt werden. | Die Papiergarne müssen - auch bei Schrägen - präzise abgelegt und fixiert werden, um den Schleppfehler oder Abrutschen der Garne zu minimieren. | ja, durch geeignete Anti-Rutsch-Folie konnte eine Minimierung des Schleppfehlers und des Abrutschens erzielt werden |
| Eigenschaften Leuchte | | | |
| Art der Leuchte | Hängeleuchte, Leuchtenobjekt | Hängeleuchte | ja |
| Fassung, Leuchtmittel | marktübliche Fassung | Standard, G9 | ja |
| Verwendungszweck | Ambiente, Stimmungslicht, Lichtobjekt | Die Lichtobjekte sollen emotionale Wertigkeit repräsentieren und dementsprechend gefallen. | ja, die Projektpartner und weitere Besucher der DITF haben die Demonstratorleuchten als emotional wertig eingestuft |
| Preissegment | mittel- bis hochpreisig | | Umsetzung in den Preissegmenten möglich |
| Zielgruppe, Trends | Trends: warm nordic design, Japandi, Wiener Geflecht, Art Déco, Modern Gam, Pastell- und Blautöne | | ja, durch Auswahl von passendem Design, der Farben und Spultechnik entsprechend, verschieden Farben durch Einfärben des Klebstoffs möglich |
| Dimensionen | variabel | 25-200 mm Durchmesser | ja, Diffusor der Demonstratorleuchte "THIRTY-ONE" ist klein und für eine G9-Fassung dimensioniert und kann als eigenständiger Lampenschirm fungieren, wie auch die Röhren der Demonstratorleuchte "FIVE STEMS", größter im Projekt hergestellter Lampenschirm hat einen Durchmesser von 210 mm, noch größere Lampenschirme sind technisch umsetzbar |
| Funktionen | Abstrahlcharakteristik einstellbar beim Einbau, in der Nutzung | durch einfachen Austausch der Lampenschirme oder durch Verdrehung zweier Lampenschirme während der Nutzung gezieltes Einstellen des Abdeckungsgrads z.B. für gezielte Fokussierung des Lichts | ja |
| Farbe | Weißes Material erhöht die Reflexion und kann zu einer erhöhten Lichtausbeute führen. Zur Erfüllung von Ambientekriterien und Trends auch andere Farben wünschenswert. | Zwingend notwendig: Weiß für höchste Lichtausbeute, Naturbraun steht für die Darstellung der Ökologie, weitere Farben | ja; umgesetzte Farben: Weiß, Naturbraun, Rot; Farben durch das eingesetzte Papiergarn oder durch Einfärbung der Klebstoffe möglich |
| Bedienung (User experience) | ein/Aus, Dimmen, Appsteuerung | | ja, bei der Demonstratorleuchte "FIVE STEMS" alle Kriterien erfüllt, bei Demonstratorleuchte "THIRTY-ONE" können die 31 Leuchtmittel in drei Kreisen getrennt geschaltet werden |
| Recycling | | | |
| Demontage | einfache Demontage der elektrischen Teile von den Papierkomponenten | Alle Teile der Leuchte sollen einfach getrennt werden können, so dass diese dementsprechenden Verwertung bzw. dem Recycling zugeführt werden. | ja, durch Stecksysteme sehr einfache Trennung möglich |
| Recycling | Die Papierleuchten sollen möglichst vollständig dem Wertstoffkreislauf zugeführt werden. | | Durch die einfache Trennung durch das Stecksystem ist dies möglich. Es wurden ausschließlich LEDs eingesetzt, die durch die richtige Entsorgung auf Sammelstellen dem Recycling zugeführt werden. Bei feinen Garnen (0,2-0,4 mm Durchmesser) ist das Standardrecycling nicht möglich. |

3.2 Papiertechnik

3.2.1 Stand der Technik - Papiergarne

Papiergarn ist ein seit langem ein bekannter Werkstoff, jedoch ist nur wenig Literatur zum Thema verfügbar. In den letzten 20 Jahren wurde vor allem Papiergarn aus Manilahanf/Abaca und Maulbeerbaumfasern untersucht. Dabei stand vor allem der Einsatz in der Textilindustrie als umweltfreundliche Alternative für herkömmliche Garne im Fokus.

Ein Papier, das besonders für die Verwendung als Papiergarn im Vordergrund steht, ist Hanji, ein traditionelles koreanisches Papier, das aus Maulbeerbaumfasern gefertigt wird. Traditionelles Hanji Papiergarn wird aus einem Papier mit einem Flächengewicht zwischen 8 und 10 g/m² gefertigt. Dieses Papier wird in Streifen einer Breite von 2 mm bis 10 mm geschnitten, welche dann miteinander verdreht werden. Die maximale Reißfestigkeit zeigen Garne mit Drehzahlen zwischen 650-700 tpm (Drehungen pro Meter). Die beobachtete Reißfestigkeit steigt mit abnehmender Streifenbreite. Es wird vermutet, dass dies auf eine stabilere und bessere Verdrehung zurückzuführen ist. Werden die Papierstreifen im Drehprozess mit Wasser befeuchtet, so lassen sich eine höhere Reißfestigkeit und Bruchdehnung sowie eine Verringerung des Elastizitätsmoduls im Papiergarn beobachten. Gewebe aus Hanji Garn haben eine exzellente Farbbeständigkeit bei Waschen und Trocknen sowie Widerstandskraft gegen Verschmutzung. [10]

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. [11]

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. Untersuchungen, die Gewebe aus Papiergarn mit Geweben aus Baumwolle, Viskose und Nylon verglichen, zeigten insbesondere, dass Papiergarn vergleichsweise eine sehr gute Beständigkeit beim Waschen aufweist. Auch nach vielfachem Waschen ließ sich beim Gewebe aus Papiergarn kein Pilling beobachten. Papiergarn verfügt über eine vergleichsweise hohe Reißfestigkeit. Einzig Nylon wies höhere Reißfestigkeiten auf. Allerdings ist die Dehnung von Papiergarn sehr viel geringer als von den Vergleichsmaterialien. Ein Einsatz von Papiergarn zum Sticken auf industriellen Maschinen ist demnach zwar möglich, es besteht jedoch Verbesserungsbedarf. [12]

Im Rahmen des Webens bietet sich Papiergarn als Schussfaden für Jeansstoff an. Eine Kombination aus Baumwolle als Kettfaden und Papiergarn als Schussfaden ermöglicht Jeansstoffe mit einem leichten Tragegefühl. Möglich wird dies durch das vergleichsweise geringere spezifische Gewicht des Jeansstoffs mit Papiergarn gegenüber einem herkömmlichen Jeansstoff mit gleicher Feinheit. Weiterhin weist der Stoff mit Papiergarn eine hervorragende Absorptionsfähigkeit und Trocknungs-geschwindigkeit auf. Bezüglich der Farbechtheit bestehen keine Nachteile gegenüber Jeansstoff aus Baumwolle. 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. [13]

Um die Eigenschaften des Papiergarne für den Einsatz in industriellen Textilmaschinen zu verbessern, wurden verschiedene Ansätze untersucht:

- a) Verzwirnen von Papiergarn mit anderen Filamentgarnen. Insbesondere die Reißfestigkeit und Elastizitätsmodul konnten hierdurch verbessert werden. [14]
- b) Behandlung mit Wasserdampf. Hierdurch lassen sich eine Verbesserung der Dehnung und der Formstabilität erzielen. Durch eine vorherige Behandlung mit NH_3 Lösung wird ein weiterer Anstieg der Eigenschaften gegenüber unbehandeltem Papiergarn erreicht. [15]

Wird ein Gewebe aus Papiergarn mit mehrwandigen Kohlenstoffnanoröhren (MWCNT) behandelt, kann beobachtet werden, dass insbesondere die Widerstandskraft gegen Abreiben ansteigt, sich die Biegelänge erhöht, die Absorptionsfähigkeit und der Knittererholungswinkel ansteigen und sich die Schutz Eigenschaft gegenüber UV-Licht verbessert. Aufgrund des sauren pH-Wertes bei der Behandlung sinken jedoch Reißfestigkeit und Dehnung des Gewebes aus Papiergarn. [16]

Papiergarn aus mit Kohlenstoffnanoröhren beschichtetem Papier eröffnet weiterhin die Möglichkeit einer Anwendung als Superkondensator. Es konnte gezeigt werden, dass ein solcher Superkondensator die siebenfache durchschnittliche Kapazität gegenüber einem Superkondensator aus Papierbögen erreicht. Weiterhin zeigte er eine exzellente Langzeitstabilität mit bis zu 10.000 Aufladezyklen. Mit diesen Eigenschaften hat ein Superkondensator aus Papiergarn großes Potential als tragbarer Energiespeicher. [17]

3.2.2 Untersuchungen - Rohstoff Papier

Für die Untersuchungen im Rahmen des Projektes wurden die vier in Abbildung 3-1 gezeigten Garn-Basispapiere ausgewählt.



Abbildung 3-1: Auswahl an Garn-Basispapieren für die Charakterisierung. V.l.n.r.: Dekopapier, rot; Dekopapier, erika; Kabelspinnpapier 16 g/qm, braun; Kabelspinnpapier 14,5 g/qm, weiß

An diesen Papieren wurden Streu- und Absorptionskoeffizienten, Farbort und Reflexionsfaktor gemessen. Die entsprechenden Normen sowie Gerät, Lichtart und Beobachter sind in Tabelle 3-2 gelistet.

Tabelle 3-2: Normen und Spezifikationen zur Charakterisierung der Garn-Basispapiere

| | |
|--------------------------|-----------------------------|
| Streukoeffizient S | DIN 54500 |
| Absorptionskoeffizient K | |
| Lab-Farbort | DIN EN ISO 1164-4 |
| Reflexionsfaktor | DIN 53145-1 |
| Lichtart / Beobachter | C / 2° |
| Messgerät | Novicolor Touchscreen 2.1.1 |

Die Ergebnisse der Messungen sind in Tabelle 3-3 zusammengetragen. Insbesondere bei den bunten Papieren konnte eine Zweiseitigkeit festgestellt werden, weshalb jeweils ein Wert pro Seite angegeben ist.

Tabelle 3-3: Ergebnisse der Charakterisierung der Garn-Basispapiere

| Prüfung | | Einheit | Dekopapier, rot | | Dekopapier, erika | | Kabelspinn- papier 16 g/qm, braun | Kabelspinn- papier 14,5 g/qm, weiß | |
|-------------------------------|----|--------------------|-----------------|---------|-------------------|---------|---|--|-------|
| | | | Seite 1 | Seite 2 | Seite 1 | Seite 2 | | | |
| Streukoeffizient S | MW | m ² /kg | 10,76 | | 19,22 | | 14,99 | 12,78 | |
| | s | m ² /kg | 3,40 | | 3,00 | | 0,45 | 0,17 | |
| | V | % | 31,59 | | 15,63 | | 2,99 | 1,35 | |
| Absorptions- koeffizient K | MW | m ² /kg | 37,51 | | 25,12 | | 7,81 | 0,82 | |
| | s | m ² /kg | 4,26 | | 2,98 | | 0,26 | 0,01 | |
| | V | % | 11,34 | | 11,87 | | 3,32 | 1,50 | |
| Reflexionsvermögen R457 | MW | % | 6,13 | 6,04 | 27,37 | 26,15 | 22,66 | 68,94 | |
| | s | % | 0,11 | 0,21 | 1,18 | 0,98 | 0,14 | 0,35 | |
| | V | % | 1,80 | 3,51 | 4,30 | 3,75 | 0,61 | 0,50 | |
| Lab-Farbtort | L* | MW | % | 41,38 | 40,53 | 54,84 | 53,85 | 67,65 | 87,04 |
| | | s | % | 0,33 | 0,40 | 0,92 | 0,78 | 0,10 | 0,20 |
| | | V | % | 0,80 | 0,99 | 1,69 | 1,45 | 0,15 | 0,23 |
| | a* | MW | % | 43,21 | 46,26 | 35,94 | 36,89 | 4,35 | -0,78 |
| | | s | % | 0,58 | 13,40 | 0,79 | 0,71 | 0,03 | 0,01 |
| | | V | % | 1,35 | 28,97 | 2,19 | 1,91 | 0,76 | -1,41 |
| | b* | MW | % | 19,73 | 18,71 | -7,79 | -7,57 | 22,91 | 1,20 |
| | | s | % | 0,20 | 0,24 | 0,29 | 0,23 | 0,17 | 0,06 |
| | | V | % | 1,02 | 1,30 | -3,70 | -3,04 | 0,72 | 4,80 |

Weißes und braunes Garn-Basispapier wurden für die Papiergarnherstellung für die Demonstratorleuchten ausgewählt, da die weißen Papiere das höchste Reflexionsvermögen aufweisen. Die (natur-)braunen Papiere unterstreichen hingegen die Natürlichkeit des Rohstoffes. Die Untersuchung der lichttechnischen Eigenschaften gibt Aufschluss für die lichttechnischen Eigenschaften von daraus hergestellten Papiergarn-Strukturen.

3.2.3 UD-Papier-Garne

Die Literaturrecherche ergab, dass ein erheblicher Einfluss von der Orientierung der Fasern im Basispapier ausgeht. Am Fachgebiet Papierfabrikation und Mechanische Verfahrenstechnik (PMV) der TU Darmstadt steht ein Blattbildner zur Verfügung, der eine hohe Orientierung der Fasern im Papier ermöglicht. Aus dem Ziel, eine möglichst unidirektionale Orientierung zu erreichen, leitet sich der Name UD-Blattbildner ab. Die damit gebildeten Papiere werden im Folgenden als UD-Papiere bezeichnet.

Um die Vergleichbarkeit zwischen Laborpapieren und kommerziell verfügbaren Papieren zu erhöhen, wurde der gleiche Zellstoff wie für die Garn-Basispapiere verwendet. Es handelt sich um einen ungebleichten Langfasersulfatzellstoff (Mischung aus Kiefer und Fichte) der für Anwendungen im Bereich der Elektrotechnik speziell gewaschen wird. Üblicherweise wird er mit 400 KWh/t auf einen Mahlgrad von 65-80 SR (Schopper-Riegler) gemahlen.

Bei der Mahlung im Labormaßstab mit einem Voith LR40 Refiner wurde ein effektiver Energieeintrag von 436 KWh/t erreicht. Der Mahlgrad betrug 50 SR.

Aus dem Stoff wurden 5 Bahnen orientierten Papiers hergestellt. Als Zielgrammatur wurden 35 g/m² festgelegt. Dies entspricht einer mittleren Grammatur für Papiergarne. Die nutzbare Bahnbreite betrug 180 mm. Die Blattbildung wurde mit einer Strahl-Sieb-Geschwindigkeitsdifferenz von -75 m/min durchgeführt. Anschließend wurden die Bahnen mit einem Trommeltrockner (Formax E-100 steel drum dryer) bei einer Trommelgeschwindigkeit der Stufe 12 und einer Temperatur von 87-90 °C getrocknet. Ziel hierbei war es, möglichst lange Streifen herzustellen, die später zu Garn weiterverarbeitet werden können.

Durch den im Vergleich zu Referenzwerten hohen Mahlgrad (50 SR statt 25 SR) kam es zu einer Verschlechterung der Entwässerung, die erfahrungsgemäß mit einer Verschlechterung der Faserorientierung einhergeht.

Die in Tabelle 3-4 zusammengestellten Ergebnisse der Messungen des Tensile Stiffness Index (TSI) und der Tensile Stiffness Orientation (TSO) (Messung der Ultraschallausbreitung zur Bestimmung des Zugfestigkeitsindex) zeigen ein TSI Max/Min-Verhältnis von 3. Dieses Ergebnis lässt auf eine erhöhte Faserorientierung schließen. Aufgrund des Blattbildungsprinzips wäre zu erwarten, dass Maximum und Minimum nahezu mit den Werten für die Maschinenrichtung (MD) und der Querrichtung (CD) übereinstimmen. Die mittels Ultraschallausbreitung gemessenen Werte sind jedoch auch abhängig von den Trocknungsbedingungen und den Zügen, die während der Herstellung auf die nasse Papierbahn wirken.

Tabelle 3-4: Ergebnisse TSI/TSO Messungen der UD-Papiere. Gesamtmittelwerte aus 5 Bögen im Projekt hergestellten UD-Papiers mit jeweils 5 Messungen

| Eigenschaft | Einheit | Mittelwerte der Mittelwerte | Standardabw. der Mittelwerte | Mittelwerte der Standardabw. | Mittelwerte der Minima | Mittelwerte der Maxima |
|-------------------|---------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------|------------------------|
| TSI Min | kNm/g | 3,30 | 0,130 | 0,07 | 3,21 | 3,39 |
| TSI Max | kNm/g | 9,96 | 0,412 | 0,34 | 9,54 | 10,35 |
| TSI Max/Min | -- | 3,00 | 0,093 | 0,12 | 2,85 | 3,15 |
| TSI Area | | 35,78 | 1,402 | 0,67 | 34,92 | 36,56 |
| TSO angle -MD | Degrees | 1,90 | 0,398 | 0,59 | 1,20 | 2,60 |
| TSO angle +MD | Degrees | -1,90 | 0,398 | 0,59 | -2,60 | -1,20 |
| TSI-MD | kNm/g | 9,94 | 0,401 | 0,33 | 9,51 | 10,33 |
| TSI-CD | kNm/g | 3,63 | 0,150 | 0,09 | 3,53 | 3,75 |
| TSI-MD/CD | -- | 2,73 | 0,077 | 0,12 | 2,56 | 2,86 |
| TSO angle +MD Min | Degrees | 66,87 | 0,399 | 0,97 | 65,44 | 67,99 |

| Eigenschaft | Einheit | Mittelwerte der Mittelwerte | Standardabw. der Mittelwerte | Mittelwerte der Standardabw. | Mittelwerte der Minima | Mittelwerte der Maxima |
|-------------------|---------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------|------------------------|
| TSO angle -MD Min | Degrees | -66,87 | 0,399 | 0,97 | -67,99 | -65,44 |

Zusätzlich zu den mittels Ultraschallausbreitung gemessenen Werten, wurden Zugprüfungen durchgeführt. In Tabelle 3-5 sind Probendicke, *Grammatur* und die Breite der Proben für die Zugprüfung nach DIN EN ISO 1924-2 gelistet. Es wird deutlich, dass die Zielgrammatur von 35 g/m² nur leicht unterschritten wurde.

Tabelle 3-5: Probendaten des im Projekt hergestellten UD-Papiers für die Zugprüfung nach DIN EN ISO 1924-2

| Serie n=10 | | Probendicke | Probenbreite | Grammatur |
|------------|-------|-------------|--------------|------------------|
| | | t | w | m |
| | | mm | mm | g/m ² |
| MD | x | 0,101 | 15 | 33,37 |
| | s | 0,004 | - | 0,06 |
| | n [%] | 3,500 | - | 0,19 |
| CD | x | 0,101 | 15 | 33,37 |
| | s | 0,004 | - | 0,06 |
| | n [%] | 3,500 | - | 0,19 |

Die Ergebnisse der Zugprüfung sind in Tabelle 3-6 zusammengestellt. Hier liegt das MD/CD-Verhältnis bei ca. 4,4 und ist somit stärker ausgeprägt als es aus den TSI-Werten hervorgeht.

Tabelle 3-6: Ergebnisse der Zugprüfung - Auswahl

| Serie n=10 | | Breiten-bezogene Bruchkraft | Bruch-kraftindex | Bruch-spannung | E-Modul | Dehnung bei Bruch | Reißlänge |
|------------|-------|-----------------------------|------------------|----------------|---------|-------------------|----------------|
| Zeichen | | S | l | σ | E* | e _B | l _B |
| Einheit | | N/m | Nm/g | Mpa | MPa | % | km |
| MD | x | 2986,62 | 89,50 | 29,57 | 2321,94 | 3,78 | 9,13 |
| | s | 102,24 | 3,06 | 1,01 | 54,87 | 0,13 | 0,31 |
| | n [%] | 3,42 | 3,42 | 3,42 | 2,36 | 3,49 | 3,42 |
| CD | x | 679,23 | 20,35 | 6,73 | 811,50 | 2,64 | 2,08 |
| | s | 36,30 | 1,09 | 0,36 | 30,56 | 0,73 | 0,11 |
| | n [%] | 5,34 | 5,34 | 5,34 | 3,77 | 27,57 | 5,34 |

Zur Einordnung dieser Ergebnisse werden sie in Tabelle 3-7 mit Garn-Basispapieren und UD-Papieren aus gebleichtem (NBSK) und ungebleichtem (UKP) Zellstoff aus früheren Arbeiten verglichen. Zur besseren Übersicht sind die Werte in Ampelfarben hervorgehoben. Die in früheren Arbeiten ermittelten

Werte der UD-Papiere liegen höher als die Garn-Basispapiere und als das UD-Papier aus dem aktuellen Projekt, was vor allem mit den Trocknungsbedingungen zusammenhängt. Die Papiere der früheren Arbeiten wurden in einem Standard Rapid-Köthen-Trockner schrumpfungsbehindert unter Vakuum getrocknet, wodurch sie gleichzeitig nassgepresst wurden. Nasspressen erhöht die Festigkeit des Papiers erheblich. Dieser Schritt fehlt bei den mit dem Trommeltrockner getrockneten UD-Papieren aus dem aktuellen Projekt. Zu beachten ist weiterhin die Grammaturn der Papiere. Verglichen mit den Papieren gleicher oder niedrigerer Grammaturn zeichnen sich die UD-Papiere durch höhere Festigkeit bei gleichzeitig höheren Dehnungen aus. Weiterhin ist zu erwähnen, dass beim UD-Papier, anders als beim Garn-Basispapier, kein Nassfestmittel eingesetzt wurde. Dieses wirkt zusätzlich festigkeitssteigernd.

Tabelle 3-7: Einordnung der Ergebnisse der Zugprüfung

| Bezeichnung | | Flächengewicht | Breitenbezogene Bruchkraft | | Zugfestigkeitsindex | | Bruchdehnung | |
|-------------------|-----------------------------------|------------------|----------------------------|-----|---------------------|-------|--------------|-----|
| | | | kN/m | | Nm/g | | % | |
| | | g/m ² | MD | CD | MD | CD | MD | CD |
| Garn-Basispapiere | Kraftpapier, e'glatt, braun | 50 | 5,2 | 2,5 | 104 | 49 | 1,9 | 2,2 |
| | Kraftpapier, e'glatt, braun | 40 | 4,2 | 2 | 104 | 49 | 1,8 | 2,1 |
| | Spinnpapier, hoch nassfest, braun | 24 | 3 | 1 | | | 2 | |
| | Spinnpapier, hoch nassfest, braun | 14,5 | 1,5 | 0,7 | | | 2 | |
| UD-Papiere | NBSK (alte Daten) | 48 | 4,7 | 1,1 | 98,8 | 22,3 | 4,4 | 3,3 |
| | UKP (alte Daten) | 50 | 5,9 | 1,3 | 114,1 | 25,34 | 3,3 | 2,3 |
| | UKP (Papierlicht) | 33 | 3,0 | 0,7 | 89,5 | 20,4 | 3,8 | 2,6 |

Insgesamt weisen die UD-Papiere großes Potenzial auf, bestehende Prozesse bzw. Produkte zu verbessern und in neuen Anwendungen eingesetzt werden zu können. In Anschlussprojekten, in denen höhere Festigkeiten gefordert sind, sollten deshalb UD-Papiere mit Nassfestmitteln, idealerweise solche, die das Recycling nicht stören, gebildet und anschließend nassgepresst werden. Hierdurch sind deutliche Festigkeitssteigerungen zu erwarten. Durch den Einsatz eines Nassfestmittels können die UD-Papierbahnen weiter zu Garn verarbeitet und die Garneigenschaften geprüft werden.

3.3 Strukturgespulte Papiergarn-Verbundwerkstoffe

3.3.1 Grundlagen - Strukturspultechnik

Die Strukturspultechnik ist ein wirtschaftlicher Prozess, um faserbasierte, leichte Strukturbauteile herzustellen. Dabei wird das Garn üblicherweise auf einer Hülse, die auf einem Spulhalter sitzt, welcher sich wiederum auf dem Spuldorn befindet, definiert abgelegt. Eine weitere Möglichkeit, das Garn abzulegen, ist ein Dornkörper, welcher direkt auf dem rotierenden Spuldorn sitzt. 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 und Durchbrüche erzeugt werden. Generell sind bei Strukturspulen vielzählige Strukturbilder darstellbar. Es sind durchgängige, flächige Außenkonturen, unterbrochene Rippen- bzw. Gitterstrukturen und verschiedene Durchmesser und Wickelhöhen möglich [18]. Anders als bei Garnspulen, die in einem Folgeprozess wieder abgezogen werden, wird der Wickelkörper konsolidiert, so dass die Hülse bzw. der Dornkörper entnommen werden kann.

Zur Herstellung von deutlichen Strukturen, wie Rippen und Durchbrüche, ist die Präzisionswicklung zu wählen, da hierbei das Windungsverhältnis bei jedem Spulendurchmesser gleichbleibend ist und der Faden nach einem bestimmten Rapport wieder aufeinandergelegt wird. Ist das gewählte Windungsverhältnis eine ganzzahlige Zahl (z.B. 8,0) oder mit nur einem Nachkommawert (z.B. 8,2), so lassen sich klare Strukturen erkennen. Für eine rein flächige Bewicklung könnte prinzipiell auch eine andere Wicklungsart angewandt werden. [19]

Es können bspw. Hybridgarne verwendet werden, die aus einer Thermoplast- bzw. Matrix- und einer Verstärkungskomponente bestehen. Die Thermoplastkomponente wird dann in einem anschließenden Schritt aufgeschmolzen und bildet eine Matrix um die Verstärkungskomponente. Schließlich können die Hülse bzw. der Dornkörper, auf die gespult wurde, entfernt werden, so dass ein selbsttragendes Bauteil entsteht.

Im Projekt wurde festgestellt, dass die bereits bestehende Strukturspultechnik generell für Papiergarne eingesetzt werden kann. Durch den Einsatz von auf das Papiergarn abgestimmten Matrixmaterialien bzw. natürlichen Klebstoffen können strukturgespulte selbsttragende Bauteile entstehen, die ökologische Aspekte erfüllen.

3.3.2 Grundlagen - Übersicht herkömmlicher Wicklungsarten

Zum näheren Verständnis werden im Folgenden die herkömmlichen Wicklungsarten vorgestellt.

Bei der Spultechnologie unterscheidet man prinzipiell die **Parallelwicklung** und die **Kreuzwicklung**. Bei der Parallelwicklung legt der Fadenführer das Garn nach jeder Umdrehung des Hülsenhalters um eine Fadenbreite seitlich versetzt ab. Dadurch werden üblicherweise sogenannte Scheibenspulen benötigt, da sonst das Garn abrutschen würde.

Bei der Kreuzwicklung wird das Garn beim Spulvorgang mit bestimmten Winkeln in Form einer Helix abgelegt, die an den Enden wieder umkehrt. Ein wichtiger Spulparameter ist das Windungsverhältnis. Es bezeichnet die Anzahl Windungen pro Doppelhub des Fadenführers und definiert somit das Verhältnis zwischen Spulenumdrehung und der Fadenchangierung.

Die herkömmlichen Kreuzwicklungsarten sind die Wilde Wicklung, Präzisionswicklung und die Stufenpräzisionswicklung.

Die **Wilde Wicklung** (auch: Zufallswicklung) zeigt einen über den gesamten Spulenaufbau konstanten Kreuzungswinkel. Das Windungsverhältnis nimmt mit zunehmendem Spulendurchmesser ab. Bei dieser Wicklungsart entstehen ohne Bildverhütungsvorrichtung sogenannte Bildzonen (auch: Bildwicklung oder Bildstörung), die beim Spulenabzug zu erhöhten Fadenzugkräften bis hin zu Fadenbrüchen führen können. Die Spule wird bei der Wilden Wicklung üblicherweise indirekt über die Abzugswalze (Nutentrommel) mittels Friktion angetrieben. Die Nutentrommel dient dabei als Fadenverlegungsorgan.

Bei der **Präzisionswicklung** bleibt das Windungsverhältnis über den gesamten Spulendurchmesser konstant. Folglich nimmt der Kreuzungswinkel bei zunehmendem Spulendurchmesser ab. Bei dieser Wicklung besteht ein festes Verhältnis zwischen der Spulendrehzahl und dem Doppelhub des Fadenführers. Üblicherweise wird bei zunehmendem Spulendurchmesser eine Reduzierung der Spulendrehzahl, bei gleichbleibender Fadenverlegung, durchgeführt.

Bei der **Stufenpräzisionswicklung** (auch: Digitalwicklung) wird die Spule schichtweise aufgebaut. Jede Schicht ist eine Präzisionswicklung. In bestimmten Abständen wird das Windungsverhältnis angepasst, sodass sich der Kreuzungswinkel nur geringfügig ändert. [1] Der Spulenantrieb und die Fadenverlegung sind voneinander getrennt. [19]

hier mit Windungsverhältnis $WV=4$

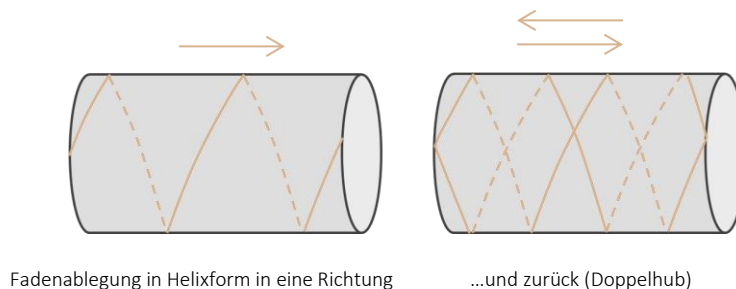


Abbildung 3-2: Prinzip der Fadenablegung bei einer zylindrischen Kreuzspule

Neben diesen „herkömmlichen“ Wicklungsarten gibt es die Möglichkeit, einen asymmetrischen Spulenaufbau mit der an den DITF entwickelten Spulentechnologie LINEARO® zu erzielen. [18] Diese ist ursprünglich für die Reduzierung der Ablaufkräfte beim Abziehen der Spulen entwickelt worden, kann aber bei der Strukturspulentechnik anderweitige gestalterische und technische Zwecke erfüllen.

Im Projekt wurde ausschließlich mit der Präzisionswicklung gearbeitet, da mit dieser flächige sowie definierte Gitter-Strukturen mit Durchbrüchen zu erreichen sind.

3.3.3 Formgebung mit der Strukturspulentechnik mit Hülse oder Dornkörper

Die Formgebung wird neben den spulentechnischen Parametern und den Garneigenschaften wesentlich vom Dornkörper bzw. der Hülse beeinflusst. Anders als beim konventionellen Spulprozess, bei dem die Hülse als Trägerstruktur für die Folgeprozesse Bestandteil der Spule bleibt, wird der Dornkörper bzw. die Hülse beim Strukturspulen wieder entfernt. Da nicht die Ablaufeigenschaften im Fokus stehen, ist eine sehr große Formenvielfalt möglich. Zu beachten ist eine Form, bei der das aufgespulte und konsolidierte Bauteil entfernt werden kann. Dies kann eine einklappbare oder hinterschneidungsfreie

Form sein. Basierend auf den Vorgaben durch die an den DITF vorhandene Spulmaschine MHW 2 wurden verschiedene Dornkonzepte entwickelt und getestet.

Üblicherweise sind Hülsen für den Spulvorgang konisch oder zylindrisch und aus Pappe oder Kunststoff. Für die Herstellung von Papiergarnstrukturen können prinzipiell Papphülsen eingesetzt werden. Diese sind als Standardprodukte erhältlich, man ist dann aber im Gegenzug auf die konische oder zylindrische Form beschränkt.

Für das Projekt wurden Dornkörper aus Aluminium gefertigt (siehe Abbildung 3-3), um formangepasste Demonstratorleuchten herstellen zu können. Diese könnten prinzipiell auch aus Materialien bestehen, die der Konsolidierungs- (bzw. Trocknungs-) temperatur standhalten, wie z.B. Holz. In nachfolgender Abbildung werden zwei im Projekt hergestellte Dornkörper gezeigt (vgl. Kapitel 3.6.2.2).

Um die konsolidierte Papierstrukturen von der Hülse bzw. dem Dornkörper ablösen zu können, ist eine Zwischenschicht notwendig, die einerseits von der Hülse bzw. dem Dornkörper lösbar ist und andererseits die Garne an ihrer vorgesehenen Position halten kann.



Abbildung 3-3: Angefertigte Dornkörper am Beispiel der Demonstratorleuchte „FIVE STEMS“, mit Spulvorgang

3.3.4 Papiergarn-Struktur-Spultechnik

Papiergarn kann prinzipiell auf herkömmlichen Spulmaschinen verarbeitet werden. Zu beachten ist, dass je nach eingesetzten Garnmaterialien und gewünschtem Verlegungswinkel des Garnes auf der Hülse bzw. dem Dornkörper, ein maximaler Neigungswinkel der zu bespulenden Oberfläche zur Spulachse besteht.

Augenmerk muss vor allem bei feinem Papiergarn auf die dem Papiergarn entsprechende Fadenführung und Fadenzugkraft gelegt werden.

Um Fadenzugkraftschwankungen bei größeren Abweichungen des Umfangs (entlang der Spulachse) des Dornkörpers auszugleichen, wurde an der verwendeten Spulmaschine (s. Abbildung 3-4) eine zusätzliche Rollfadenbremse eingebaut. Dies ist aber abhängig von der Spulmaschine zu betrachten und, Anpassungen sind dementsprechend vorzunehmen.

Der Dorn der Spulmaschine wurde so angepasst, dass die Dornkörper leicht angebracht und abgenommen werden können.

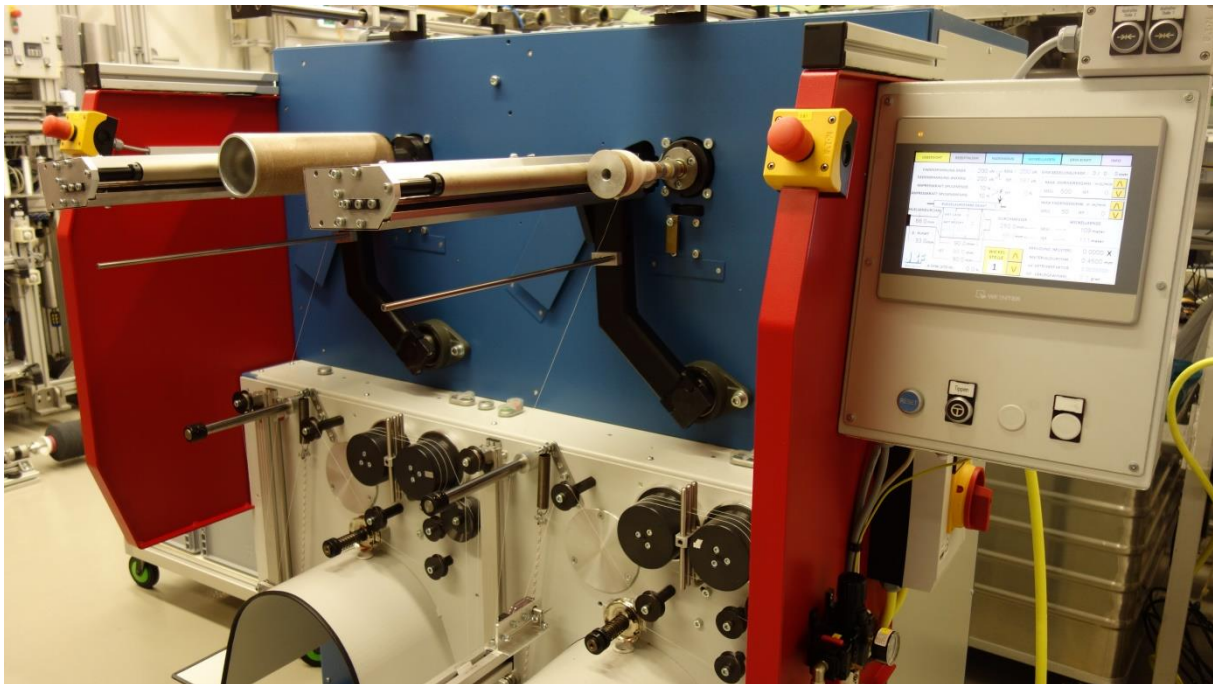


Abbildung 3-4: Sonderwickelmaschine im Spultechnikum der DITF

Im Projekt konnte somit mit leichten Anpassungen der Maschine die Papiergarne zu Papierverbund-Strukturen verarbeitet werden.

Bei der herkömmlichen Strukturspultechnik mit thermoplastischen Matrixmaterialien wurde im Vorfeld des Projektes für die Minimierung des sogenannten *Schleppfehlers* für gewöhnlich Schleifpapier auf die Hülsen aufgebracht. Da die im Projekt eingesetzten natürlichen Klebstoffe sich mit diesem verbinden, wurde nach anderen Lösungen gesucht.

Um Abrutschungen von dem Dornkörper zu vermeiden bzw. um den *Schleppfehler* zu minimieren, konnte im Projekt eine selbstklebende Anti-Rutsch-Folie identifiziert werden. Diese sitzt auf einer PTFE-Glasfaser-Folie, so dass die fertig konsolidierte Papiergarn-Struktur von dem Dornkörper gezogen werden kann.

3.3.5 Möglichkeiten der Strukturspultechnik

Im Vorfeld der Findung möglicher Designvarianten wurden Möglichkeiten der Spultechnologie zur Herstellung von Strukturen gesammelt und nach der momentanen Umsetzbarkeit bewertet. Dies diente quintessence design als Hilfestellung zur Designerstellung und ist in Abbildung 3-5 dargestellt.

| Struktur | Beschreibung | Möglich?/Einschränkung | Umsetzung/Bemerkung |
|---|---|--|--|
|  | Symmetrische Rauten Hub: linear offene Struktur Fäden direkt übereinanderliegend | ✓ |  Stärkeklebstoff mit Pflaster aufgetragen  Garn mit Dextrinklebstoff maschinell beschichtet |
|  | Symmetrische Rauten Hub: linear geschlossene/deckende Struktur | ✓ |     |
|  | Symmetrische Rauten Hub: linear offene Struktur Fäden direkt nebeneinander | ✓ nur eine Lage möglich (nicht mehrere Fäden übereinander) |  unter Zug (braunes Garn: „70-er Jahre Muster“)  Dextrinklebstoff  gewölbt |
|  | Asymmetrische Rauten Hub: linear DH: 2 unterschiedliche KV offene Struktur Fäden direkt übereinanderliegend | ✓ |  geknickt  mehrere kombiniert  Hängelampe |
|  | Asymmetrische Rauten Hub: linear DH: 2 unterschiedliche KV geschlossene/deckende Struktur | ✓ | Einsatz der symmetrischen, geschlossenen Struktur sinnvoller, da herkömmliche Maschine einsetzbar und lichttechnisch wird kaum ein Unterschied entstehen. |
|  | Symmetrische Raute Hub: exponentiell geschlossene/deckende oder offene Struktur | ✗ | Momentan keine unterschiedlichen Geschwindigkeiten des Fadenführers oder des Spulenantriebs innerhalb eines Hubs umsetzbar. Alternative: mehrere Schichten mit verschiedenen Hüben (Breiten), siehe unten |
|  | Asymmetrische Raute Hub: exponentiell geschlossene/deckende oder offene Struktur | ✗ | |
|  | Asymmetrische Raute, Hub: linear, DH: unterschiedliche KV offene Struktur, Fäden direkt übereinander (in eine Richtung) und nebeneinander liegend (in der anderen Richtung) | ✗ | Nicht umsetzbar. |
|  | Mehrere verschiedene Schichten mit unterschiedlichen Hüben kombiniert: • Symmetrisch/asymmetrisch • Offen/geschlossen bzw. deckende Struktur • Fäden nebeneinander/direkt übereinander | ✓ |   |

Abbildung 3-5: Spultechnische Möglichkeiten

3.3.6 Im Projekt eingesetzte Papiergarne

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

Tabelle 3-8: Im Projekt eingesetzte Papiergarne

| Durchmesser | Farbe | Feinheit in tex | Höchstzugkraft in cN | Dehnung in % | spezifische Festigkeit in cN/tex |
|-------------|----------|--------------------|-------------------------|-----------------|-------------------------------------|
| 0,2 mm | weiß | 33,44 | 326,6 | 4,74 | 9,77 |
| 0,4 mm | weiß | 111,98 | 818,0 | 5,31 | 7,31 |
| 0,2 mm | rohbraun | 37,06 | 242,0 | 4,97 | 6,53 |
| 0,4 mm | rohbraun | 114,44 | 719,4 | 4,82 | 4,98 |
| 0,5 mm | rohbraun | 184,40 | 1166,0 | 5,26 | 6,32 |
| 1,6 mm | rohbraun | 1614 | 13300 | 3,17 | 8,24 |
| 2,0 mm | rohbraun | 2751 | 23040 | 4,59 | 8,37 |

3.3.7 Konsolidierung

Im Vordergrund der Entwicklung der Leuchten standen der Einsatz natürlicher Werkstoffe und die Rezyklierbarkeit des verarbeiteten Papiers. Es wurde die Möglichkeit der Hybridisierung der Papiergarne durch thermoplastische, biologisch abbaubare Kunststoffe mit anschließender thermischer Konsolidierung der gespulten Struktur betrachtet. Da diese Kunststoffe jedoch bezüglich ihrer tatsächlichen biologischen Abbaubarkeit umstritten sind [20] und das Recycling in den etablierten Kreisläufen schwierig ist, wurde der Fokus auf Klebstoffe gelegt. Hierfür wurden folgende Klebstoffarten für die Konsolidierung der gespulten Strukturen näher untersucht:

- Dextrinklebstoff
- Stärkekleebstoff
- Dispersionsklebstoff
- Kunstharzklebstoff (Gummi)

Für die Untersuchungen wurde je Klebstoffart eine Struktur (siehe Demonstratorleuchte „THIRTY -ONE“ aus Kapitel 3.6.2.1) gespult. Die Klebstoffe wurden auf die Strukturen in geeigneten Viskositäten aufgetragen. Anschließend erfolgte die Trocknung im Ofen (80°C). Die Strukturen sind in nachfolgender Abbildung dargestellt.

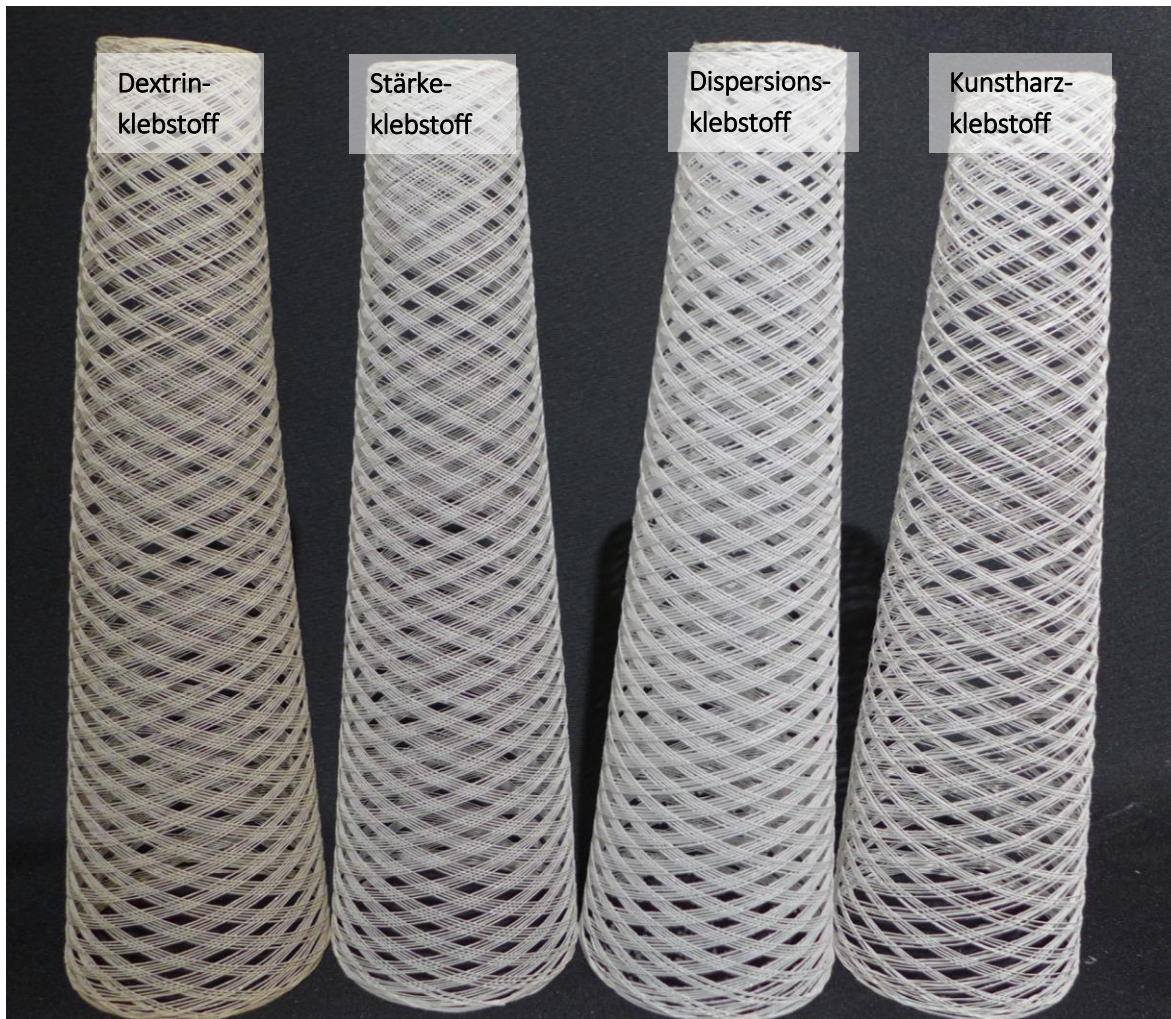


Abbildung 3-6: Strukturen mit unterschiedlichen Klebstoffen

Die Strukturen zeigen, dass alle vier Klebstoffe prinzipiell eingesetzt werden können. Die fertigen Strukturen zeigten jedoch z.T. deutliche Farb- bzw. Strukturunterschiede. Der Dextrinklebstoff zeigt schon in seinem Ausgangszustand eine sehr dunkelbraune Färbung. Obwohl er zur Einstellung einer geeigneten Viskosität mit Wasser im Verhältnis 1:2 verdünnt wurde, ist dies im Endprodukt deutlich wahrnehmbar. Bei diesem Mischungsverhältnis hat der Klebstoff darüber hinaus die Grenze zu ausreichender Klebeleistung bereits überschritten und darf nicht weiter verdünnt werden. Die mit den drei anderen Klebstoffen hergestellten Strukturen liegen farblich näher beisammen, wobei der Dispersionsklebstoff am weißesten wirkt. Dieser ist aber biologisch nicht leicht abbaubar. Die Struktur mit Stärkeklebstoff zeigt am wenigsten Filmbildung und wirkt am feinsten und am natürlichsten. In nachfolgender Tabelle sind die Klebstoffe mit ihren Eigenschaften zusammengefasst.

Tabelle 3-9: Untersuchte Klebstoffe

| | Dextrinklebstoff | Stärkeklebstoff | Kunstharzlösung | Dispersionsklebstoff |
|--------------------------|------------------|-----------------|-----------------------|-----------------------|
| Farbe | braun | beige-opak | farblos | weißlich |
| Wasserlöslichkeit | ja | ja | ja | ja |
| Biologische Abbaubarkeit | ja | ja | keine Daten vorhanden | nicht leicht abbaubar |

| | Dextrinklebstoff | Stärkeklebstoff | Kunsthharzlösung | Dispersionsklebstoff |
|---|---|------------------------|--|--|
| Viskosität Brookfield RVT | ca. 30.000 mPa*s | ca. 120.000 mPa*s | ca. 3.000 mPa*s | keine Angabe |
| Mischungsverhältnis Klebstoff zu Wasser zur Erzielung der gewünschten Eigenschaften | max. 1:2 | 1:2 | nicht zusätzlich verdünnt | nicht zusätzlich verdünnt |
| Preis pro kg | Die Klebstoffe befinden sich in der einem ähnlichen Preisniveau. Wichtiges Kriterium zur Bestimmung eines wirtschaftlichen Vorteils ist hierbei das eingesetzte Mischungsverhältnis mit Wasser. | | | keine Angabe |
| Preis bezogen auf die Anwendung (in Ampelfarben dargestellt) | + | ++ | - | keine Angabe |
| Ausschlusskriterium für die Herstellung der Demonstratorleuchten | Farbe (kann nicht als reinweißer Lampenschirm hergestellt werden), Preis | | biologische Abbaubarkeit unklar, Preis | biologische Abbaubarkeit nicht gegeben |

Unter ökologischen Aspekten betrachtet wurde der Einsatz des Dispersionsklebstoffs und des Klebstoffes auf Basis einer Kunsthharzlösung nicht weiterverfolgt.

Da die Viskositäten für jeden Klebstoff angepasst wurden, ergibt sich durch die hohe Verdünnung des Stärkeklebers, der die höchste Viskosität aufweist, bei annähernd gleichem Preis pro kg ein deutlich wirtschaftlicher Vorteil gegenüber den anderen Klebstoffen, die durch ihre niedrigere Viskosität nicht oder weniger verdünnt wurden.

Aufgrund der Ergebnisse, die den optischen, ökologischen und ökonomischen Vorteil des Stärkeklebers zeigen, wurde dieser für die Herstellung der Demonstratorleuchten gewählt.

Für die Konsolidierung von Papiergarnen wurden weiterführend folgende Verfahrenstechniken im Projekt untersucht:

1. Auftrag der Klebstoffe nach der Erstellung der Struktur
2. Einsatz von mit Klebstoff beschichteten Papiergarnen

Abbildung 3-7 stellt diese Verfahren dar.

Die Trocknung der Papiergarn-Strukturen erfolgte im Trockenschrank bei 60-80°C mit einer der Schichtdicke angepassten Trocknungsdauer. Die Strukturen können auch bei Raumtemperatur getrocknet werden, was aber zu längerer Herstellungsdauer führt.



Abbildung 3-7: Im Projekt untersuchte Konsolidierungsmethoden

Es zeigte sich, dass beide Varianten durchführbar sind und zu den gewünschten Ergebnissen führten.

Die Beschichtung des Garnes mit Klebstoff vor dem Strukturspulen in einem zusätzlichen Arbeitsschritt (2) zeigte an der fertigen Struktur eine glattere Oberfläche, welches für die Erstellung von Lampenschirmen aber als nicht relevant oder vorteilhaft eingestuft wurde. Bei dem nachträglichen Auftrag des Klebstoffes (1), kann es zu einer Filmbildung zwischen den einzelnen Garnen kommen. Bei einer geeigneten Viskosität kann dies aber verringert bzw. so weit verhindert werden, dass Betrachter dies nicht wahrnehmen.

Das Projekt hat gezeigt, dass es mit der Variante (1) möglich ist, einen stabilen Film zu bilden, um eine Diffusorschicht zu erreichen. Versuche haben gezeigt, dass die Elastizität des Films durch Zugabe von Glycerin eingestellt werden kann. Zudem kann der Klebstoff eingefärbt werden. Durch die Größe der Durchbrüche der Strukturen, kann die Ausprägung der Filmbildung und damit lichttechnische Eigenschaften gezielt eingestellt werden.

Die Ersparnis eines Arbeitsschrittes mit dem ersten Verfahren ist für die Herstellung der Demonstratorleuchten ökonomisch und ökologisch bedeutender. Die Viskosität wurde soweit angepasst, dass eine Filmbildung, da für die Demonstratorleuchten nicht erwünscht, nicht sichtbar ist. Sofern wurde für die Herstellung der Demonstratorleuchten das erste Verfahren ausgewählt.

Das Projekt hat des Weiteren gezeigt, dass ein Klebstoffauftrag bereits während der Strukturherstellung an der Spulmaschine möglich und sinnvoll sein kann. Dabei wird das Papiergarn im Rohzustand der Spulmaschine zugeführt und zur gewünschten Struktur gespult. Während des Spulvorgangs wird der Klebstoff auf das Garn direkt auf der Hülse aufgetragen. Vorteile dieses Verfahrens sind, dass der beim Spulen aufgebrauchte Klebstoff das Garn besser auf der Hülse fixieren kann. Das Verfahren ermöglicht hohe Schichtdicken, die mit den anderen Verfahren eingeschränkter möglich sind. Bislang ist das händische Auftragen arbeitsintensiv. Sinnvoll ist eine maschinelle Anpassung der Spulmaschine, um den Vorgang zu automatisieren. Nachteil besteht in begrenzten Produktionsgeschwindigkeiten.

3.3.8 Einbringung von Farbe

Abbildung 3-8 zeigt material-, spul- und verfahrenstechnische Möglichkeiten, Farbe in Lampenschirme oder Strukturen prinzipiell einzubringen. Die technische Umsetzbarkeit ist mit gelben oder grünen Haken bewertet dargestellt. Dabei bedeuten gelbe Haken, dass die Umsetzung eher schwierig oder noch weiteren Entwicklungsbedarf benötigt. Die Übersicht zeigt, dass auf vielfältige Weise Farbigkeit in die Lampenschirme eingebracht werden kann


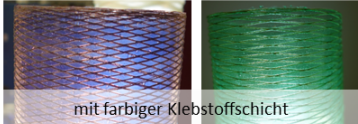



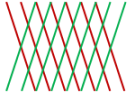










| Struktur | Beschreibung | Möglich?/Einschränkung | Umsetzung /Bemerkung |
|---|--|-------------------------|--|
|  | Verfestigte gespulte Struktur mit farbiger Diffusorschicht aus Klebstoff | ✓ |  Die Elastizität ist einstellbar. |
|  | Verfestigte gespulte Struktur mit farbiger Diffusorschicht aus Papierschicht, z.B. Pergamentpapier | ✓ Prinzipiell möglich | Nachteil: nur mit Überlappung des Papiers, Gefahr des Knickens |
|  | Verfestigte gespulte Struktur mit farbiger Diffusorschicht aus „Papierbrei“ | ✓ Prinzipiell möglich |  Diffusorschicht mit Sternenmuster |
|  | Verfestigte Struktur mit farbigen Papiergarnen, Farbwechsel von Hub zu Hub | ✓ ✓ Prinzipiell möglich | <ul style="list-style-type: none"> für mehrere Garnschichten übereinander, fortlaufend gespult, könnte Garn bereits in der passenden Länge bedruckt sein: Umsetzung eher schwierig. ✓ Garnwechsel am Ende des Hubes: vorstellbar vor allem bei hohem KV, also mit vielen Umwindungen pro Doppelhub, so dass viel Farbe eingebracht wird. Bei kleinem KV: aufwendig durch häufigen Garnwechsel. ✓ |
|  | Verfestigte Struktur mit abgegrenzten farbigen Bereichen (senkrecht zur Spulachse) | ✓ Prinzipiell möglich | |
|  | Verfestigte Struktur mit Farbverlauf (entlang der Spulachse) | ✓ Prinzipiell möglich | <ul style="list-style-type: none"> Struktur nach dem Spulen einfärben/bedrucken. Garn könnte bereits in der passenden Länge bedruckt sein: Umsetzung eher schwierig. |
|  | Verfestigte Struktur mit abgegrenzten farbigen Papiergarnen, Fäden direkt nebeneinander | ✓ |  |
| | Nur eine Farbe pro Lampenschirm einsetzen. | ✓ |  |
|  | Verfestigte Struktur mit anderen Farben innen (bunt oder einfarbig) und außen (weiß) | ✓ |  Hier: PES Garn!! |
|  | Buntes Papier mit dem Cutter ein Muster verleihen und dies als Diffusor einsetzen. | ✓ | Nachteil: Übergang zu sehen. |
|  | Leuchtmittel einsetzen, die farblich steuerbar sind. | ✓ |  |

Abbildung 3-8: Möglichkeiten der Farbeinbringung für Lampenschirme

3.3.9 Mechanische Prüfungen

3.3.9.1 Mechanische Belastbarkeit

Die Röhre der Halm-Strukturen der Demonstratorleuchte aus Kapitel 3.6.2.2. wurde auf ihre mechanische maximale axiale Belastbarkeit als einstufige Prüfung untersucht. Dazu wurde sie an beiden Enden in Harz gegossen und auf Zug belastet. Die Halm-Struktur hielt bei diesem einordnenden Test einem Gewicht von 25,1 kg stand.

Die Röhre wurde im Inneren durch Parallelwicklung für gleichmäßige lichttechnische Eigenschaften und nur einer einschichtigen äußeren Kreuzwicklung hergestellt. Die gefundene Zugkraft ist für den Anwendungszweck ausreichend. Sie kann für andere Anwendungszwecke durch Strukturen mit einem höheren Kreuzwicklungsanteil erhöht werden.

3.3.9.2 3-Punkt-Biegeversuche

Um die mechanischen Eigenschaften von hergestellten Papiergarn-Strukturen einstufen zu können, wurden 3-Punkt-Biegeversuche in Anlehnung zu DIN EN ISO 14125 durchgeführt. Eingesetzt wurden die Röhren der Halm-Strukturen der Demonstratorleuchte aus Kapitel 3.6.2.2. Abbildung 3-9 zeigt den Prüfaufbau und die Prüflinge der Papiergarn-Röhren im Vergleich mit einem Kunststoff-Rohr gleicher Geometrie direkt nach der Prüfung und in zurückgebogenem Zustand.

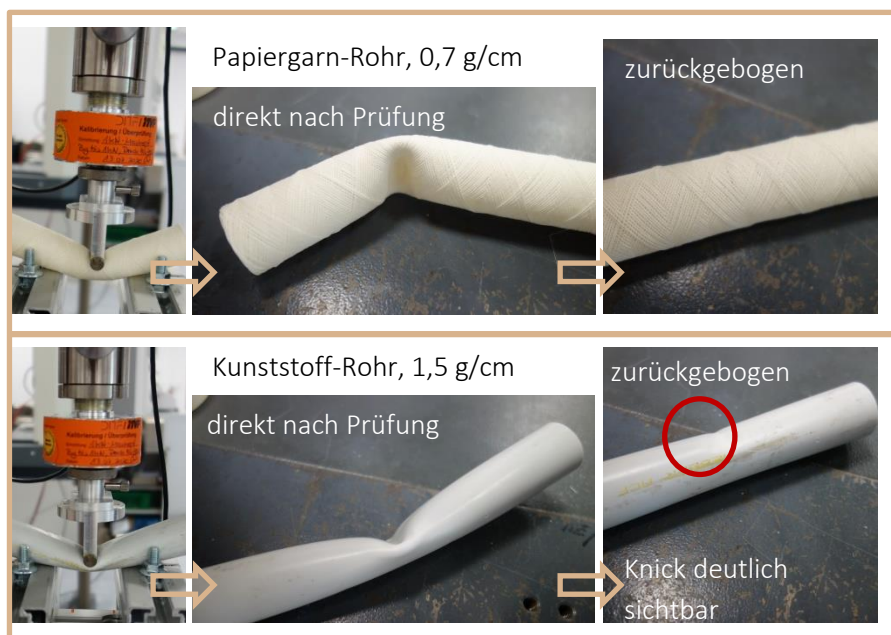


Abbildung 3-9: 3-Punkt-Biegeversuch eines Papiergarn- und eines Kunststoffrohres

Die Papiergarn-Röhren zeigen im Vergleich zu weiteren Prüflingen aus anderen Materialien nach dem Zurückbiegen eine kaum wahrnehmbare Veränderung. Die Ergebnisse sind in nachfolgendem Diagramm dargestellt.

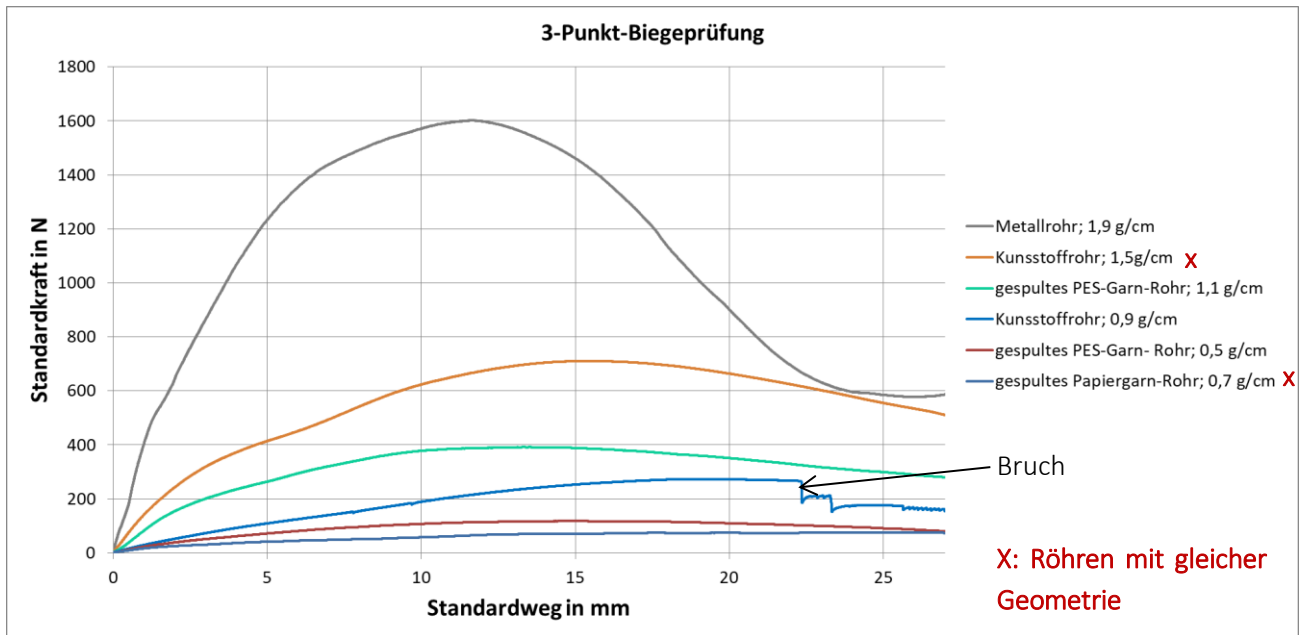


Abbildung 3-10: 3-Punkt-Biegeversuch verschiedener Röhren im Vergleich

Die Ergebnisse sind als einstufig zu verstehen, da sich die verschiedenen Röhren im Umfang, Wandstärke und Gewicht unterscheiden. So hat bzw. das gespulte PES-Garn-Rohr (grüne Kurve, $d_i=22,5$ mm) einen geringeren Umfang als das gespulte Papiergarn-Rohr (untere blaue Kurve, $d_i=26$ mm). Dies kann die niedrigere Kraftkurve des Papiergarn-Rohrs begründen. Des Weiteren ist das gespulte Papiergarn-Rohr nicht für eine maximale aufnehmbare Kraft ausgelegt, sondern lichttechnische Eigenschaften standen im Vordergrund. Für eine Erhöhung der Kraft ist, wie in 3.3.9.1 beschrieben, ein erhöhter Anteil der Kreuzwicklung empfehlenswert.

3.4 Recyclingkonzepte

3.4.1 Grundlagen - Recycling

Zur Bewertung der Rezyklierbarkeit von grafischen Produkten und papierbasierten Verpackungen existieren verschiedene Prüfmethode. Einige sind in Tabelle 3-10 zusammengestellt.

Tabelle 3-10: Übersicht von Prüfmethoden zur Bewertung der Rezyklierbarkeit von grafischen Produkten und papierbasierten Verpackungen

| Methoden | 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 |
| INGEDE Methode 2 | Bestimmung optischer Eigenschaften von Deinkingstoffen und Filtraten |
| INGEDE Methode 4 | Bestimmung von Makrostickys in Faserstoffen |
| INGEDE Methode 5 | Bewertung der Druckfarbenablösung durch Hyperwäsche mit dem Haindl-McNett-Fraktionator |
| INGEDE Methode 11 | Bewertung der Rezyklierbarkeit von Druckprodukten – Prüfung der Deinkbarkeit |
| INGEDE Methode 12 | Bewertung der Rezyklierbarkeit von Druckprodukten – Prüfung des Fragmentierhaltens von Klebstoffapplikationen |
| INGEDE Methode 13 | Bewertung der Rezyklierbarkeit von Druckprodukten – Prüfung der Bildungsrate von Makrostickys von Klebstoffapplikationen |

Da im Rahmen des vorliegenden Projektes die Rezyklierbarkeit nach der Methode PTS-RH 021/2012 geprüft wurde, wird diese im Folgenden näher beschrieben. Sie findet Anwendung bei der Untersuchung von Packmitteln aus Papier, Karton und Pappe (Kategorie II) sowie bei grafischen Druckerzeugnissen (Kategorie I).

Bei Produkten der Kategorie II beträgt die Gesamtprobenmenge 250 g lufttrocken (lutro). Teile wie Metalldeckel, Trageriemen sowie Verstärkungsleisten aus Kunststoff müssen entfernt und gravimetrisch bestimmt werden. In Kategorie II wird ein Produkt als rezyklierbar bei Anteilen <20 % und als „rezyklierbar, aber hinsichtlich der Produktgestaltung verbesserungsbedürftig“ bei Anteilen zwischen 20 % und 50 % eingestuft.

Im nächsten Schritt folgt eine Zerkleinerung des Produkts in 2 · 2 cm große Stücke und eine Zerfaserung im Desintegrator. Hierbei werden 50 g ofentrocken (otro) des Produkts (Kategorie II) bei einem Suspensionsvolumen von 2 l für 20 min. (60.000 Umdrehungen) und einer Temperatur von 40 °C aufgeschlagen. Nach Verdünnung und Homogenisierung wird eine erste Blattbildung durchgeführt.

Zur Bestimmung der Zerfaserbarkeit wird der Rückstand nach Fraktionierung mit dem Brecht-Holl Fraktionierer (0,7 mm Lochplatte) und anschließender Trocknung ausgewogen. Bei einem Rückstand von weniger als 20 Gew.-% in Kategorie II wird die Probe hinsichtlich Ihrer Zerfaserbarkeit als „rezyklierbar“ bewertet. Bei Anteilen zwischen 20 Gew.-% und 50 Gew.-% ist die Probe „rezyklierbar, aber hinsichtlich der Produktgestaltung verbesserungsbedürftig“.

Es folgt der Blattklebetest. Dabei werden zwei Laborblätter inklusive Deckblätter bzw. Gautschkartons zwischen Messingplatten erhitzt, abgekühlt und dann die Deckblätter bzw. Gautschkartons abgezogen. Mögliche Faserausrisse und Beschädigungen aufgrund von *Stickys* werden vermerkt.

Nach erneutem Sortieren (150 μ m Schlitzplatte), Trocknen und Auswiegen des Rückstandes wird wieder ein Blattklebetest durchgeführt. Es folgt die zuvor beschriebene Beurteilung. Alle einzelnen Beurteilungen werden dann zum Gesamturteil zusammengeführt.

3.4.2 Recycling von Papiergarnen

Die zu der Papiergarnherstellung eingesetzten Papiere mit einem Flächengewicht unter 40 g/m² benötigen für die Herstellung Nassfestmittel. Diese Papiere finden Verwendung in Garnen mit einem Durchmesser kleiner als 1,4 mm. Bei Garndurchmessern ab 1,4 mm kommen Papiere mit einem Flächengewicht von 40 g/m² und mehr zum Einsatz. Diese enthalten keine Nassfestmittel und sind entsprechend in der Altpapiererzeugung auflösbar.

Zur Beurteilung, inwiefern sich feines Papiergarn mit Nassfestmittel in üblichen Prozessen aufbereiten und recyceln lässt, wurden Versuche in Anlehnung an die Methode PTS-RH 021/2012 mit dem feinsten erhältlichen Papiergarn mit 0,2 mm Durchmesser aus Vorgarnresten durchgeführt. Das Garn wurde im ersten Schritt auf ca. 4 cm lange Stücke gekürzt und im Standard-Desintegrator bei einer Stoffdichte von 2,5 % und einer Temperatur von 40 °C für 20 min bei 3000 min⁻¹ desintegriert. Die Zerfaserbarkeit war unter diesen Bedingungen nicht gegeben. Das gleiche Ergebnis wurde nach weiterem Einweichen für 1 h und erneuter Zerfaserung für 20 min erreicht.

Im nächsten Schritt wurde das Garn in ca. 2 cm lange Stücke geschnitten und die Zerfaserung bei 60 °C durchgeführt. Der Versuch wurde nach 2 min abgebrochen, um den Desintegrator zu schonen, da keinerlei Fortschritt bei Zerfaserung sichtbar war. Die Garnstücke waren bei manueller Belastung noch deutlich zugfester, als es bei Papier ohne Nassfestmittel zu erwarten wäre.

Auch ein Zerfaserungsversuch nach weiteren 6 Wochen Einweichen im Kühlhaus scheiterte.

Das mit Nassfestmittel ausgerüstete Papiergarn ist somit unter Standardbedingungen nach Norm nicht recycelbar und bietet Entwicklungspotential. Die Versuchsbedingungen müssen angepasst und ggf. chemische Additive eingesetzt werden. Alternativ müsste ein anderes, recyclinggerechtes Nassfestmittel bei der Papierherstellung eingesetzt und die Verarbeitbarkeit in der Garnherstellung geprüft werden.

3.4.3 Recycling von Papiergarn-Verbundstrukturen

Aus dem vorhergehenden Abschnitt wurde deutlich, dass sich mit Nassfestmittel produzierte feine Papiergarne aktuell nicht nach dem Standardverfahren recyceln lassen. Um jedoch einen Eindruck über die Recyclingfähigkeit von Papiergarn-Verbundstrukturen ohne Nassfestmittel zu erhalten, wurden drei verschiedene Klebstoffe auf Kopierpapier, welches kein Nassfestmittel enthält, aufgetragen und daran Recyclingversuche durchgeführt. Dies simuliert die Herstellung eines Papiergarne ohne oder mit recyclinggerechtem Nassfestmittel, dessen Herstellung im notwendigen Maßstab im Rahmen dieses Projektes nicht möglich war.

Es wurden der Stärke-, Dispersions- und Kunstharzlösungsklebstoff aus Kapitel 3.3.7 eingesetzt. Der Dextrinklebstoff war zu dieser Zeit nicht verfügbar.

Der Klebstoffauftrag erfolgte mit einem Pinsel auf je 4 Blätter Kopierpapier (100 g/m²). Anschließend wurde ein zweites Blatt auf den nassen Klebstoff gelegt und das Ganze wurde trocknen gelassen. Ziel des Auftrags waren 10 % - 35 % Klebstoff (trocken) bezogen auf das Gesamtgewicht. Diese Vorgabe ergab sich durch die parallel stattfindende Entwicklung der Lampenschirme für die Demonstratorleuchten. Hierbei zeigten die Lampenschirme der Leuchte „THIRTY-ONE“ einen Klebstoffanteil von 34 %. Bei dem Diffusor waren 11 % Klebstoffanteil ausreichend. Zusätzlich wird damit auch die Anforderung erfüllt, dass das Papier mind. 50 % Gewichtsanteil besitzen muss. Um einen Vergleich ziehen zu können, sollten die Proben zudem einen ähnlichen Klebstoffauftrag aufweisen.

Die Anforderung, eine Vergleichbarkeit zu erhalten, war vor allem bei Klebstoff 1) auch nach einem zweiten Auftrag auf der Oberseite des Sandwiches nicht möglich.

Die Gewichtsbestimmung erfolgte nach Klimatisierung im Normklima (23 °C, 50 % r. h.). Die Ergebnisse sind Tabelle 3-11 zusammengetragen.

Tabelle 3-11: Gewichtsanteile der klebstoffbeschichteten Kopierpapiere

| Bezeichnung | Gewicht (Stapel) | Klebstoffanteil (gew. Kopierpapier = 100 %) | Klebstoffanteil (gew. besch. Probe = 100 %) |
|-------------------------|------------------|---|---|
| Nullprobe | 49,62 g | 0 % | 0 % |
| 1) Kunstharzlösung | 56,25 g | 13 % | 12 % |
| 2) Dispersionsklebstoff | 61,72 g | 24 % | 20 % |
| 3) Stärkeklebstoff | 68,38 g | 38 % | 27 % |

Die Ergebnisse der Recyclingversuche nach der Methode PTS-RH 021/97 sind in Tabelle 3-12 zusammengefasst.

Tabelle 3-12: Zusammenfassung der Recyclingergebnisse nach PTS RH 021-97 der klebstoffbeschichteten Papiere

| Bezeichnung | Zerfaserbarkeit | Blattklebetest | Gesamtergebnis |
|------------------------------|-----------------|----------------|----------------|
| 1) Kunstharzlösungsklebstoff | ✓ | ✓ | ✓ |
| 2) Dispersionsklebstoff | ✓ | X | X |
| 3) Stärkeklebstoff | 0 | ✓ | ✓ |

✓: geeignet bzw. positiv

0: eingeschränkt

X= nicht geeignet bzw. negativ

Klebstoff 1) ist zerfaserbar und besteht den Blattklebetest. Er erhält somit ein positives Gesamturteil. Wie bereits erwähnt lag der Klebstoffauftrag unter der Zielvorgabe der Vergleichbarkeit, sodass beim Vergleich mit den anderen Klebstoffen Vorsicht bei der Interpretation der Ergebnisse geboten ist. Klebstoff 2) fällt im Blattklebetest durch und erhält eine negative Gesamtbewertung. Klebstoff 3) ist zwar nicht vollständig zerfaserbar, denn er liegt bei der Zerfaserbarkeit bei Rückständen zw. 20 und 50 Gew.-% (vgl. Kapitel 3.4.1), ist aber dennoch eingeschränkt recyclingfähig. Er ist im Gesamtergebnis

somit positiv. Klebstoff 3) wurde aufgrund seiner Verarbeitbarkeit und seiner ökologischen positiven Eigenschaften für die weiteren Versuche im Rahmen des Projekts favorisiert.

3.5 Gestaltungsansätze und Simulationen

3.5.1 Trends und Einordnung

Quintessence design erarbeitete aktuelle Trends für das Jahr 2020 im Bereich „Wohnen“. Hierbei ist ein Trend das „*Warm Nordic Design*“. Der skandinavische Wohnstil bekommt hierbei einen frischen Look: Der klassische skandinavische Wohnstil aus minimalistischen Möbeln, hellem oder weißem Holz, gedeckten Farben (Weiß, Beige, Grau) wird mit farbenfrohen Elementen kombiniert und pastellfarbene Wände, bunte Kissen oder einzelne Möbelstücke in kräftigen Farben sorgen für gute Laune.

Ein weiterer Trend ist „*Japandi*“: Hierbei trifft Fernöstliches auf skandinavisches Design. Dabei entsteht eine „hyggelige“ Wohlfühlatmosphäre verbunden mit strenger Ästhetik. Liebliche Pastelltöne und grafische Muster treffen auf dunkle Hölzer. Die Kennzeichen dieses Trends sind:

- liebliche Pastelltöne und grafische Muster treffen auf dunkle Hölzer, farbliche Kontraste und florale Drucke
- reduziert, zeitlos und unaufdringlich: „Weniger ist mehr“
- Naturmaterialien und Leichtigkeit
- gutes Material, einfache Ästhetik
- bodennahe Sofas, Wohnzimmerische und Betten, Raumtrenner aus Reispapier und Holz, Keramikgeschirr

Der dritte Trend stellt das „*Wiener Geflecht*“ dar. Der Klassiker aus geflochtenem Peddigrohr feiert modern interpretiert ein Comeback nicht nur an Stühlen, sondern auch an Kommoden, Schranktüren, Beistelltischen, Aufbewahrungsboxen, Hängeleuchten, Heizungsverkleidung, etc. Das Geflecht kann auch aus anderen Materialien, wie Leder, Bambus und Seegrass entstehen.

Weiterer Trend ist „*Art Déco*“, wobei Modern Glam für Eleganz sorgt.

- ursprünglich entstand diese Stilrichtung um 1920 in Frankreich
- charakteristisch sind dabei viele Naturmotive, vor allem florale Elemente
- Materialien: Gold, Marmor, Samt
- üppige florale Muster
- satte dunkle Farben wie Blau und Grün

Desweiteren sind runde organische Formen im Fokus:

- ovale fließende Ränder statt klarer Kanten an Möbeln
- Retro-Flair
- vor allem bei Sitz- und Polstermöbeln, aber auch Lampen und Vasen in organischen Formen

Pastell- und Blautöne liegen ebenfalls im Trend:

- Pastelltöne
 - in Türkis, Grau oder Aqua

- Mintgrün, Altrosa oder mattes Gelb besonders an Möbeln
- kombiniert mit goldener Deko, Möbeln aus hellem Holz und Rattan oder dem Trendmaterial Terrazzo
- Blau- und Grüntöne
 - vom Farbinstitut Pantone gekürte Farbe „Classic Blue“
 - Blau in Abstufungen wie Graublau, Aqua und dunkles Ozeanblau
 - Farbvielfalt der Meere

Die ermittelten Wohntrend wurden in die Gestaltung der Gestaltungsansätze und der Demonstratorleuchten mit einbezogen.

3.5.2 Gestaltungsansätze von Papiergarn-Leuchten

Die aktuellen Trends 2020 wurden in die Gestaltung der Designs für die Muster- und Demonstratorleuchten berücksichtigt. Ebenfalls flossen die technologischen Anforderungen und Einschränkungen in die Designs ein.

Am Anfang der Designentwicklung stand die Untersuchung der möglichen Formen und Dimensionen eines Spulkörpers. Dabei wurde neben der Technik des Spulens auch Möglichkeiten der Knäueltechnik betrachtet. Rotationskörper, extrudierte Formen und komplexere Körper mit freien Formen wurden untersucht und bewertet. Im weiteren Verlauf wurde der Schwerpunkt auf die Spultechnik gelegt. Die prinzipielle Umsetzbarkeit ist in nachfolgender Abbildung dargestellt.


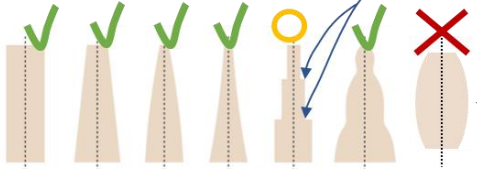

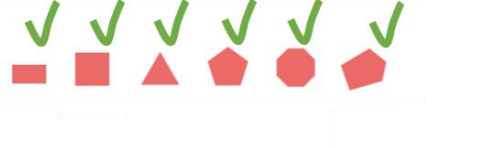





| Ansicht | Beschreibung | Querschnitte / Ansicht möglich? | Umsetzung / Bemerkung |
|---|------------------------|---|---|
|  | Runde Querschnitte |  | <ul style="list-style-type: none"> • wird bei Kanten abrutschen bzw. wird ungleichmäßig • sollte vorzugsweise abgerundet sein • Form nicht hinterschneidungsfrei |
|  | Eckige Querschnitte |  | <p>Formen möglich durch Platten mit Stäben</p>  |
|  | Unrunde Querschnitte |  | Formen z.B. mit 3D-Druck herstellbar oder aus Metall/Holz |
|  | Verdrehte Querschnitte | Alle Querschnitte prinzipiell möglich  | <p>Formen z.B. mit 3D-Druck herstellbar oder als Metallstück anfertigen lassen</p> <p>Verfestigte Struktur durch Drehen von der Form ablösen</p> |
| <p>✓: möglich ○: eingeschränkt möglich ✗= nicht möglich</p> | | | |

Abbildung 3-11: Mögliche Formen und ihre Umsetzbarkeit durch den Spulprozess

Verschiedenste Arten von mit der Spultechnik hergestellten Strukturen wurden hinsichtlich der Lichtwirkung sowie der optischen Anmutung untersucht und bewertet. Unterschiedliche Bereiche der Lichtdurchlässigkeit, das Erzeugen von Lichtstrukturen und Licht- und Schattenspiel sowie der Einsatz von farbigen Garnen ermöglichen zusätzliche Funktionen.

Ein erster Gestaltungsansatz beschäftigte sich mit einer Addierung mehrerer einzeln gespulter Körper, die ineinandergesteckt werden. Mögliche Umsetzungsvarianten sind in Abbildung 3-12 dargestellt. Verschiedene Dimensionen in der Länge der Körper, unterschiedliche Dichten der Spulstrukturen sowie versetzte Spulstrukturen wurden untersucht. Auch eine Fixierung der einzelnen Körper schon bei dem Spulvorgang ist möglich.


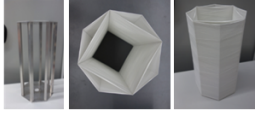







| Querschnitt | Beschreibung | möglich? | Umsetzung/Bemerkung |
|---|--|----------|--|
|  | Eckige Querschnitte, Verbindung durch Spulvorgang / Körper fixiert gespult | ✓ |  |
|      | | ✓ | Formen durch Platten mit Stäben erzielbar. |
|  | Kombination von eckigen und runden Querschnitten, Verbindung durch Spulvorgang / Körper fixiert gespult, runder Körper innenliegend | ✓ | Formen durch Platten mit Stäben sowie runder Hülse erzielbar. |
|  | | | |

Abbildung 3-12: Mögliche Umsetzungsvarianten für kombinierte Körper

Ein weiterer Gestaltungsansatz erörtert das Nachverformen nach dem Spulvorgang. Hierbei wird ein Teilbereich den Spulkörpers an einer definierten Stelle umgestülpt. Ziel war es, eine Möglichkeit zu finden, die Fassung innerhalb des Schirms zu integrieren und eine höhere Steifigkeit des Formkörpers zu erhalten. Eine Prinzipskizze ist in Abbildung 3-13 dargestellt.

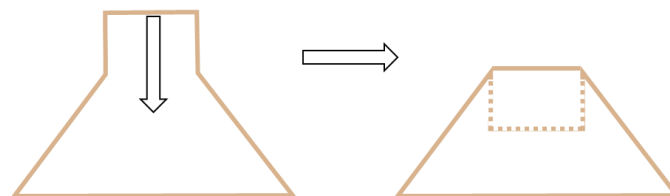


Abbildung 3-13: Prinzip der Umstülpung von gespulten Strukturen

Im weiteren Verlauf wurden Konzepte mit der Reihung mehrerer Spulkörper weiterverfolgt. Der Fokus lag dabei auf Hängeleuchten und Standleuchten. Die Integration von weiteren Funktionselementen wie Fassung, Aufhängung oder Fuß aus gespulten Garnelementen schafft eine durchgängige Materialität.

In den nachfolgenden Abbildungen wird eine Auswahl an Gestaltungsansätzen gezeigt.



Abbildung 3-14: Gestaltungsansätze „konische Form mit Diffusor“, Zeichnungen und Visualisierungen

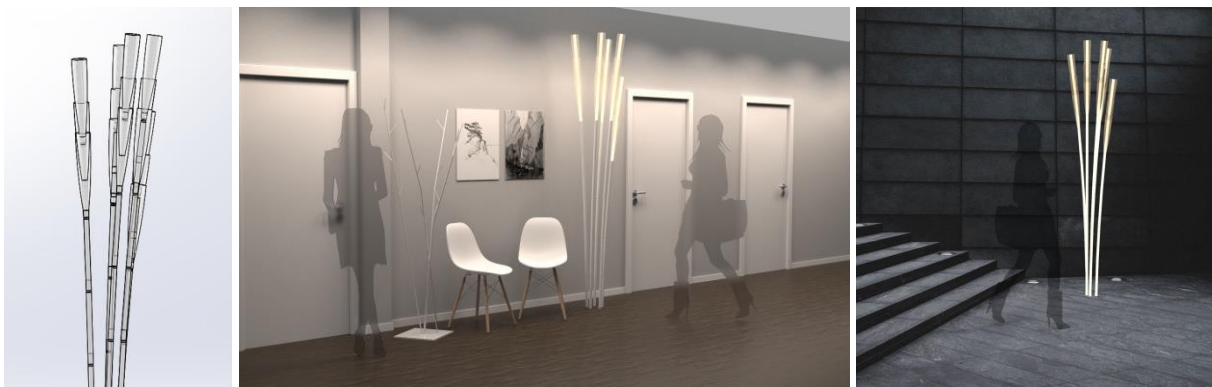


Abbildung 3-15: Gestaltungsansatz „Rohrkolben“, Zeichnung und Visualisierungen



Abbildung 3-16: Weitere Gestaltungsansätze, Zeichnungen und Visualisierung

3.5.3 Möglichkeiten in der Simulation von textilen Strukturen

Die in der Entwurfsphase erarbeiteten Gestaltungsansätze wurden im ersten Schritt in CAD (SolidWorks) umgesetzt und dimensional auf herkömmliche Leuchtmittel und ggf. entsprechende Fassungen angepasst. Ebenso wurden die von den verwendeten Spulmaschinen vorgegebenen Produktionsmaße berücksichtigt.

Im nächsten Schritt wurden die spultechnisch möglichen und sinnvollen Strukturen als α -Masken erzeugt (Adobe Illustrator).

In einem weiteren Schritt wurden die CAD-Daten sowie die ausgewählten α -Masken in ein Visualisierungsprogramm (KeyShot PRO) übertragen. Hier lassen sich die maßgeblichen Parameter für Transparenz, Opazität, Materialstärke, Materialart- und Beschaffenheit, Dicke bzw. Tiefe, Reflexionsgrad und weitere präzise einstellen. Diese definierten Materialien wurden auf die

eingesetzten Spulstrukturen angewendet. Es wurde ein räumliches Szenario aufgebaut, um Lichtwirkung und Reflexion auf typischen Wand- und Tischoberflächen zu simulieren.

Für die eingesetzten Leuchtmittel lassen sich Leistung, Abstrahlwinkel, Abfall, Leuchtmittelgröße und Farbtemperatur einstellen. Diverse Spulkörper wurden mit unterschiedlichen Leuchtmitteln ausgestattet, durchgerechnet und nachfolgend bewertet.

Nach Beurteilung aller Simulationen wurden für die ausgewählten Strukturen und Rotationskörper entsprechende Maßzeichnungen gefertigt und im Spulprozess realisiert.

Im letzten Schritt wurden die simulierten und realen Ergebnisse gegenübergestellt und bewertet (siehe Kapitel 3.7.4.).

3.6 Funktionsmuster und Demonstratorleuchten

3.6.1 Funktionsmuster

Im Projektverlauf wurden zahlreiche Funktionsmuster aus Papiergarn erstellt, welche die Bandbreite der Strukturherstellung der Papiergarne unter Einsatz der Spultechnik verdeutlichen. Es wurden Funktionsmustern angefertigt, die verschiedene Flächen- und 3D-Strukturen mit unterschiedlichen Farben des Garnes und Garnstärken zeigen, welche wiederum mit verschiedenen Spul- und Verfahrenstechniken hergestellt wurden.

Weiterführend wurden auch verschiedene Lampenschirme und Diffusoren hergestellt, die untereinander kombiniert werden können.

Abbildung 3-17 und Abbildung 3-18 zeigen eine Auswahl der im Projekt hergestellten Funktionsmuster. Dabei wird in Abbildung 3-17 die Möglichkeit der Anpassung der Lichtverhältnisse im Gebrauch verdeutlicht. Zwei gleich gespulte Lampenschirme werden ineinander gesteckt und können verdreht werden. Im rechten Bild ist der Abdeckungsgrad der Garne erhöht. Die seitliche Blendung sinkt und die Reflexion im Inneren ist erhöht. Eine gezielte Fokussierung des Lichts ist möglich.

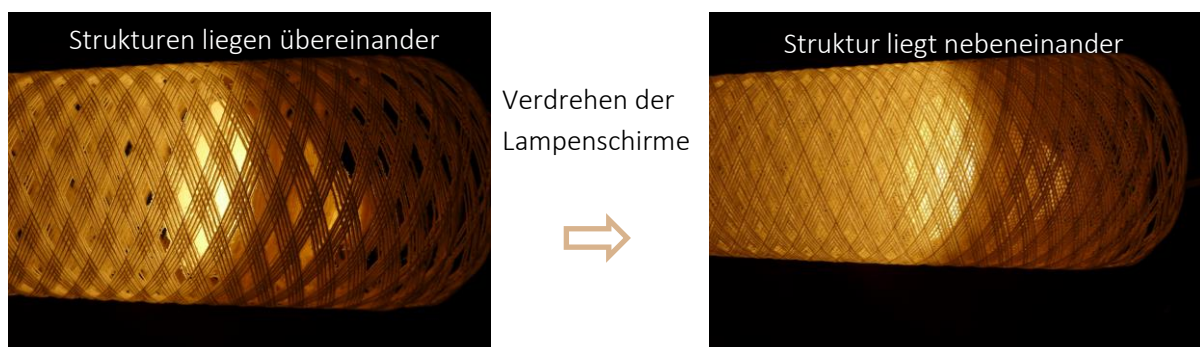


Abbildung 3-17: Einstellen der Lichtverhältnisse eines zweiteiligen Lampenschirms



Abbildung 3-18: Beispiele für Funktionsmuster: Lampenschirme mit Diffusoren sowie verschiedene Papiergarnstrukturen

3.6.2 Demonstratorleuchten

Als Vorlage für die Demonstratorleuchten 1 und 2 wurden die Designs aus Abbildung 3-14 und Abbildung 3-15 ausgewählt. Für die Umsetzung der ausgewählten Designs wurden formangepasste Dorne hergestellt. Die nachfolgend gezeigten Demonstratorleuchten sind durch Konsolidierung mit Stärkeklebstoff hergestellt worden.

3.6.2.1 Demonstratorleuchte 1 „THIRTY-ONE“

Die Demonstratorleuchte 1 besteht aus 31 konischen äußeren Lampenschirmen, die nach den Designvorschlägen von quintessence design (siehe Abbildung 3-14) hergestellt wurden. Im Inneren der äußeren Lampenschirme sitzt jeweils ein Diffusor, der wiederum die Fassung G9 mit LED (1,9 W, warmweiß) trennbar hält. Hierzu wurde ein Dorn für den Diffusor und den äußeren Lampenschirm angefertigt. Die äußeren Lampenschirme und der Diffusor sind mit weißem Papiergarn (0,4 mm) gespult und mit einem Klebstoff auf Stärkebasis verfestigt worden.



Abbildung 3-19: Demonstratorleuchte 1 „THIRTY-ONE“ aus 31 konischen Lampenschirmen in der Farbe Weiß

Eine Zugentlastung ist bei jedem Lampenschirm zwischen Fassung und der Kabel in den Leuchten integriert. Die 31 Leuchtmittel können in drei Kreisen geschaltet werden. Die äußeren Lampenschirme haben ein mittleres Gewicht von 12,9 g mit einem Gewichtsanteil des Klebstoffes von ca. 34 %. Die inneren Diffusoren wiegen ca. 15 g bei ca. 11 Gew.-% Klebstoff.

Diese Leuchte steht an den DITF zur Anschauung zur Verfügung. Die weiteren Projektpartner haben in ihren Räumen jeweils eine reduzierte Leuchte zur Präsentation bereit, welche dem Technologieübertrag dient.

3.6.2.2 Demonstratorleuchte 2 „FIVE STEMS“

Diese Demonstratorleuchte besteht aus fünf Halmen, die Rohrkolben (ähnlich Schilf) nachahmen. Sie ist leicht und recyclinggerecht trennbar. Für den sogenannten Kolben und den Halm wurde nach den Design-Vorlagen nach Abbildung 3-15 je ein Dorn angefertigt. Im Inneren sind je ein LED-Streifen integriert, die stufenlos per Fernbedienung oder App gedimmt werden können. Es wurden für den oberen Halmteil sowohl weiße wie auch naturbraune „Kolben“ aus Papiergarnen angefertigt, welche schnell gewechselt oder entfernt werden können. Die Halme stehen in einem aus Holz gefertigtem Podest mit eingestreutem Kies. Die Höhe der Leuchte (ohne Podest) beträgt ca. 2 m.



Abbildung 3-20: Demonstratorleuchte 2 „FIVE STEMS“ mit fünf „Halmen“ in den Farben Weiß und Naturbraun

Diese Leuchte ist an den DITF aufgebaut und dient dem Technologieübertrag.

3.6.2.3 Demonstratorleuchte 3 „COLORED SEVEN“

Eine weitere im Projekt erzeugte Leuchte besteht aus sieben konischen Lampenschirmen mit innerem Diffusor zur Entblendung. Die Lampenschirme zeigen verschiedene Farben (Weiß, Naturbraun, Rot) und die Variation von verschiedenen Strukturen durch unterschiedliche Garnstärken und Spultechnik. Der rote Lampenschirm wurde durch recyclinggerechtes Einfärben des Klebstoffes erzielt.



Abbildung 3-21: Demonstratorleuchte 3 „COLORED SEVEN“ aus 7 konischen Lampenschirmen in den Farben Rot, Weiß, Naturbraun und mit unterschiedlichen Strukturen

Diese Leuchte ist an den DITF aufgebaut und dient dem Technologieübertrag.

3.7 Lichttechnische Messungen an Papiergarnstrukturen

Im Projekt wurden verschiedene konsolidierte Grundstrukturen und Lichtformkörper aus Papiergarn lichttechnisch vermessen. Hierbei sind grundlegende lichttechnische Werte der Reflexions- und der Transmissionsgrad, die anhand von Grundstrukturen gewonnen wurden. Weitere Messungen, bzw. solche mit einer Farb- und Leuchtdichtekamera ermöglichen die lichttechnische Erfassung ganzer Lichtformkörper. Die gewonnen Ergebnisse der lichttechnischen Untersuchungen dienen der Einstufung, dem Vergleich und der Korrelation zu dem strukturellen Aufbau bzw. den verwendeten Materialien.

3.7.1 Messungen der Leuchtdichte

Im Dunkellabor der DITF wurden Leuchtdichtemessungen verschiedener Kombinationen von Lampenschirmen und Diffusoren mit einer Leuchtdichte- und Farbmesskamera erzeugt.

Unter anderem wurde hierbei ein PES-Lampenschirm (L12) als Vergleich zu einem reinen Papier-Lampenschirm (L13) hergestellt. Beide sind geschlossen gespult und weisen die gleiche Stärke auf. Die Ergebnisse sind in nachfolgenden Abbildungen dargestellt.

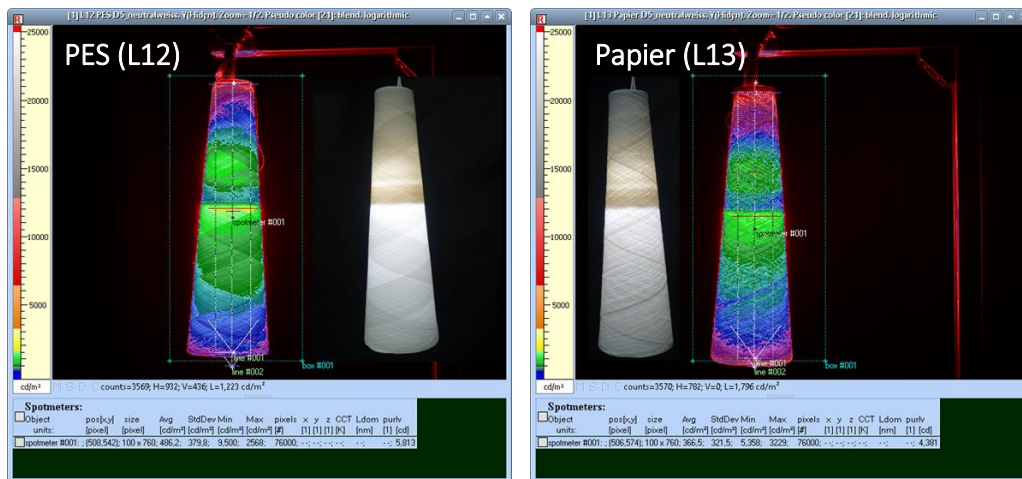


Abbildung 3-22: Leuchtdichtenmessung, Lampenschirm aus PES- (links, L12) und Papiergarn (rechts, L13)

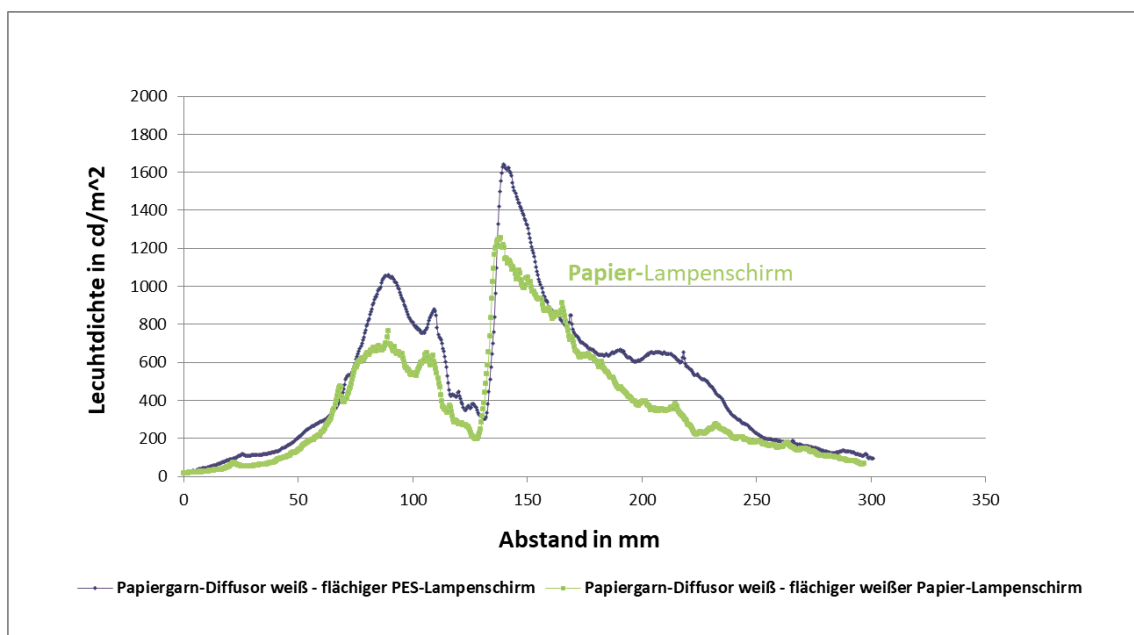


Abbildung 3-23: Leuchtdichtenmessung- Unterschied zwischen einem Polyester- und einem Papiergarn-gespultem Lampenschirm (Messung entlang einer Senkrechten)

Vergleicht man den geschlossen gespulten Polyester-Lampenschirm (blaue Linie) mit dem geschlossen gespulten Papier-Lampenschirm (grüne Linie), so zeigt der PES-Lampenschirm teils höhere Leuchtdichtewerte. Der Papier-Lampenschirm zeigt weniger hohe Spitzen.

3.7.2 Messungen der Beleuchtungsstärke

Es wurde die Beleuchtungsstärke verschiedener Kombinationen von Lampenschirmen und Diffusoren entlang einer Linie, die sich unter der Öffnung der Leuchte befindet, in dem Dunkellabor der DITF gemessen. Hierbei wurde auch der PES-Lampenschirm (L12) mit geschlossener Oberfläche als Vergleich zu dem gleich starken Papierlampenschirm (L13) mit geschlossener Oberfläche aus Kapitel 3.7.2 untersucht. Abbildung 3-24 zeigt das Messprinzip.

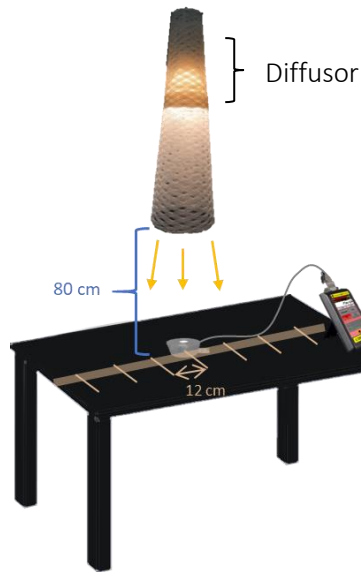


Abbildung 3-24: Messprinzip der Beleuchtungsstärke mit ILT 2500 und LED: G9 neutralweiß/3,8 W

Der Messpunkt 1 befindet sich ganz links, weitere Messpunkte liegen mit einem Abstand von 12 cm auf der Linie. Messpunkt 4 liegt direkt unter dem Lampenschirm.

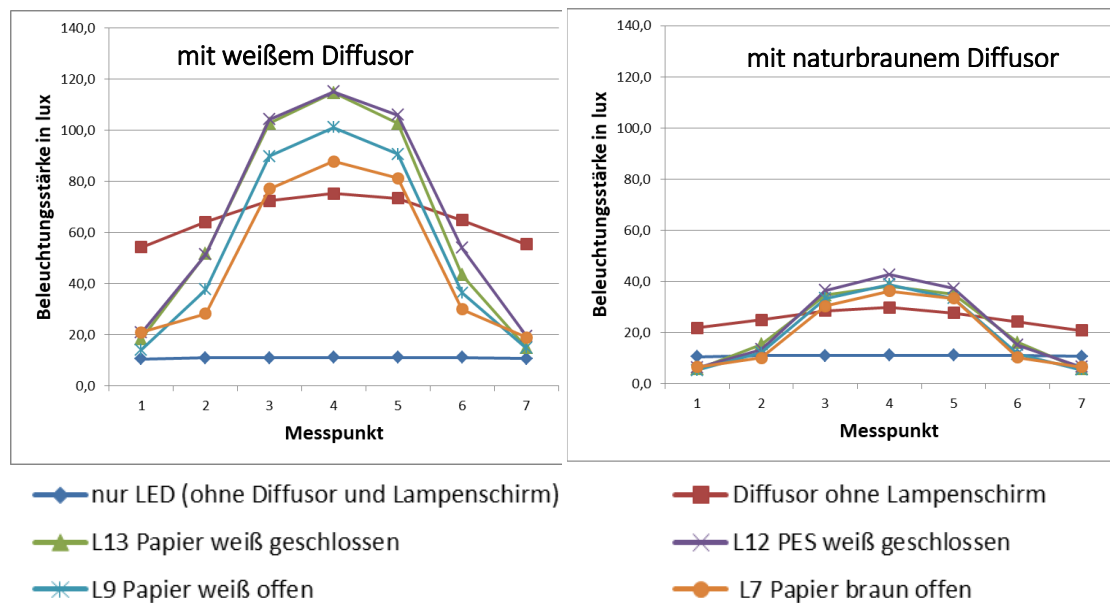


Abbildung 3-25: Ergebnisse der Beleuchtungsstärkenmessung

Die Ergebnisse in Abbildung 3-25 zeigen, dass die Messwerte der Leuchtenkombinationen im Vergleich zu den Messwerten der LED ohne Diffusor und Lampenschirm (blaue Linie) eine deutliche Fokussierung des Lichtes auf den Tisch erreichen. Bei Einsatz des weißen Diffusors im Vergleich zu einem naturbraunen Diffusor erhöht sich die Beleuchtungsstärke auf dem Tisch auf deutlich über das 2-fache.

Vergleicht man den geschlossen gespulten Polyester-Lampenschirm (lila Linie) mit dem geschlossen gespulten Papier-Lampenschirm (grüne Linie), so zeigen sie annähernd gleiche Messwerte.

3.7.3 Messung der Reflexions- und Transmissionsgrade

Die Messungen der Transmissions- und Reflexionsgrade wurden angelehnt an DIN 14500, bzw. 14501 durchgeführt. Die genutzte Messtechnik zur Prüfung und Bewertung der Grundstrukturen hinsichtlich Transmissions- und Reflexionseigenschaften besteht aus einer Lichtquelle, einer Lichtbündelungsoptik, einem Spektrometer und einer Ulbricht-Kugel. Der Hauptfokus in diesem Projekt wurde auf den sichtbaren Bereich des Lichts gelegt (380-780 nm). Für die Messung im VIS-Bereich und im NIR-Bereich wurde eine 150 W Halogenlampe verwendet. Für den VIS-Bereich wurde für die erste Versuchsreihe das USB4000 Spektrometer der Firma Ocean Optics verwendet, dies ist für Anwendungen im Bereich von 320-1080 nm konfiguriert. Zusätzlich wurde eine Ulbricht-Kugel der Firma Sphere Optics verwendet (vgl. Abbildung 3-26). Eine Ulbricht-Kugel ist eine Hohlkugel, deren Innenfläche durch einen diffusen weißen Reflektor gebildet wird. Dieses optische Gerät wird angewendet, um den von einer Probe entweder reflektierten oder durchgelassenen Lichtstrom aufzufangen. Die Hohlkugel weist Öffnungen für den Eintritt und den Nachweis des Lichtstroms auf sowie zusätzliche Öffnungen, über die die Probe und der Vergleichsprüfkörper angeordnet werden.

Im Folgenden werden die Ergebnisse des direkt-hemisphärischen Reflexionsgrades (Verhältnis des gesamten reflektierten Lichtstroms zum gerichteten einfallenden Lichtstrom) und des direkt-hemisphärischen Transmissionsgrades (Verhältnis des gesamten durchgelassenen Lichtstroms zum gerichteten einfallenden Lichtstrom) näher dargestellt. Die lichttechnischen Größen sind schematisch in Abbildung 3-26 verdeutlicht.

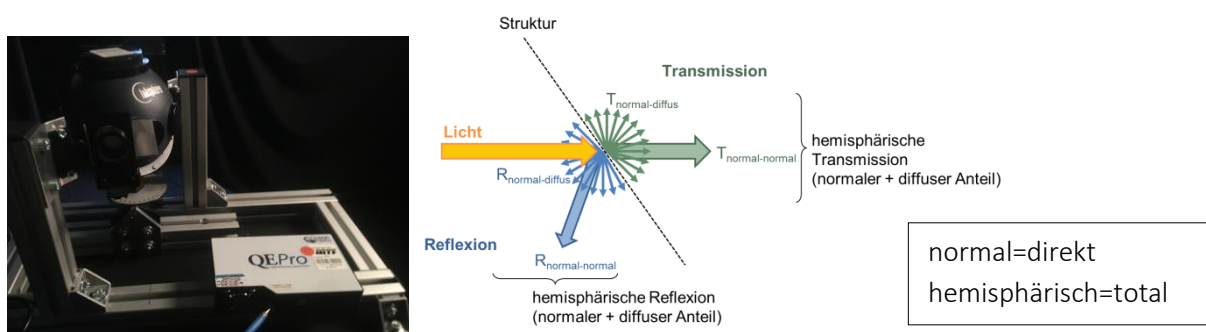


Abbildung 3-26: Ulbricht-Kugel Labosphäre RTC 060 SF und Spektrometer QE Pro von Ocean Optics (links) und Darstellung lichttechnischer Größen (rechts) [21]

Hierzu wurden verschiedene Grundstrukturen mit weißem Papiergarn (mit $d=0,4$ mm) erzeugt, die verschiedene Flächengewichte bzw. Abdeckungsgrade aufweisen. Diese wurden durch größer werdende Abstände zwischen den Garnen sowie einer einlagigen oder zweilagigen Bepulung geschaffen. Die Abstände sind direkt an einer an den DITF vorhandenen Spulmaschine einstellbar. Die Ergebnisse der Messungen sind in Abbildung 3-27 dargestellt.

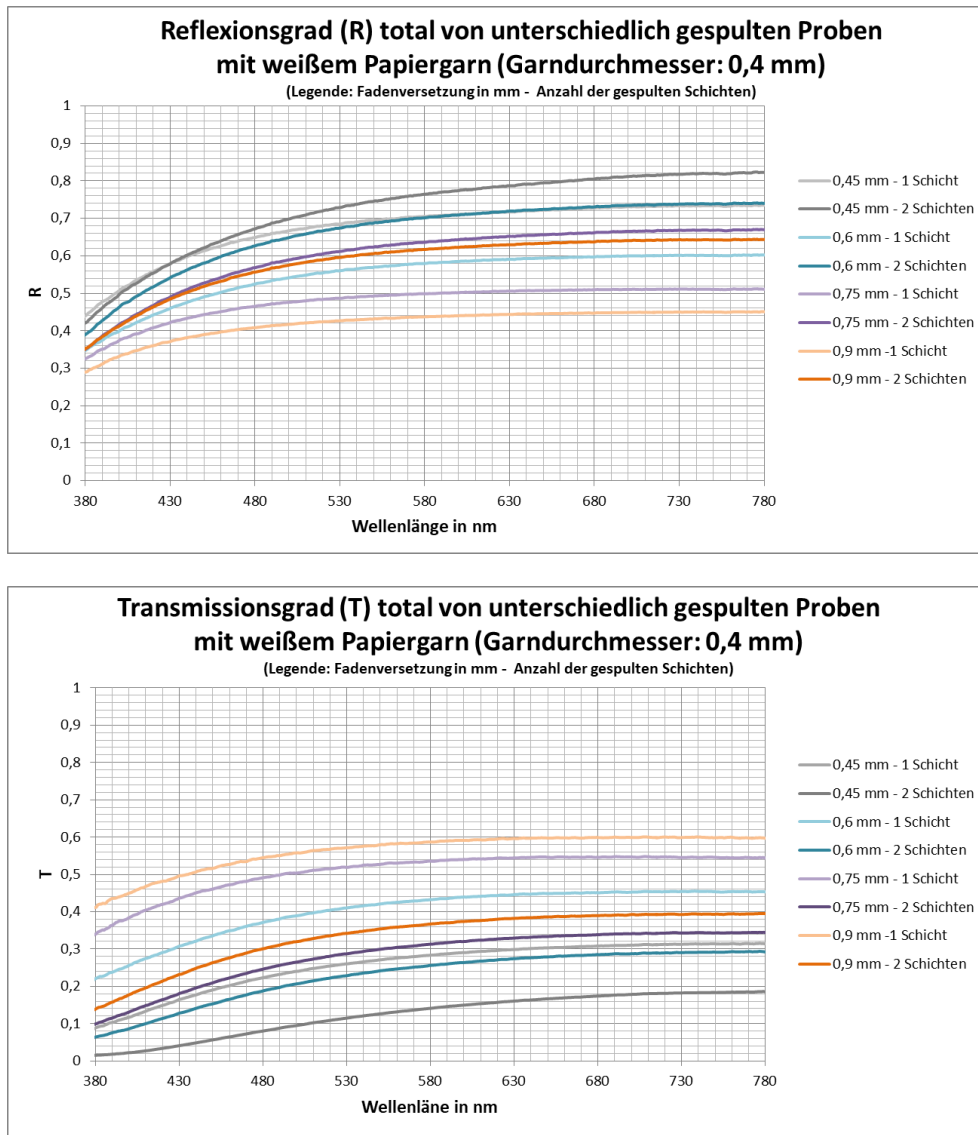


Abbildung 3-27: Hemisphärische Reflexions- und Transmissionsgrade verschiedener Grundstrukturen

Wie erwartet, sind die Reflexionsgrade der Grundstrukturen bei ansteigendem Soll-Abstand der Garne bei einem einlagigen Aufbau abnehmend. Bei zwei gespulten Lagen (Schichten) ist dies gleichermaßen gegeben. Dasselbe gilt auf umgekehrte Weise für den Transmissionsgrad: Bei zunehmendem Soll-Abstand der Garne sind die Transmissionsgrade geringer.

Darüber hinaus wurden die ermittelten Transmissions- und Reflexionsgrade bei einer Wellenlänge von ca. 500 nm auf das Flächengewicht und den Abdeckungsgrad bezogen. Der Abdeckungsgrad beschreibt die prozentuale Fläche, die von Garnen bedeckt wird. Hierbei wird primär die normal-normale Transmission berücksichtigt. Die Ermittlung des Abdeckungsgrads erfolgt optisch. Die hinterleuchtete Probe wird erfasst. Mittels einer Bildbearbeitungssoftware (NI VBAI) wird der prozentuale Anteil der Garne in einem definierten Messbereich erfasst und gezählt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 3-28 ersichtlich. Bei der Abhängigkeit von dem Flächengewicht wurde im mittleren Diagramm zwischen der Ein- und Zweilagigkeit unterschieden.



Abbildung 3-28: Transmissions- und Reflexionsgrade in Abhängigkeit vom Flächengewicht bzw. Abdeckungsgrad

Die Messungen haben gezeigt, dass der größte Zusammenhang (Bestimmtheitsmaß R^2) bei getrennter Betrachtung der Lagen in Abhängigkeit des Flächengewichts zu finden ist. Die Erklärung liegt darin, dass bei den zweiten gespulten Lagen die Garne auch übereinander liegen. Somit ist beispielsweise der

Reflexionsgrad bei einem zweilagigen Aufbau geringer als wenn die Garne bei einer Lage durch die exakte Einstellung des Abstandes gezielt nebeneinander liegen.

3.7.4 Zusammenfassung der lichttechnischen Untersuchungen und Vergleich von Simulation und reeller Umsetzung

Die lichttechnischen Messungen haben gezeigt, dass Lampenschirme aus Papiergarnen im Vergleich zu einem Lampenschirm aus PES-Garnen vergleichbarer Stärke niedrigere und gleichmäßigere Leuchtdichtewerte zeigen.

Die Messungen der Beleuchtungsstärke zeigen, dass die Lampenschirme aus Papiergarn das Licht gezielt ausrichten können und sehr von der Farbe des verwendeten Garnes abhängen. Insbesondere ist die Beleuchtungsstärke von der Farbe des geschlossen gespulten Diffusors abhängig. Bei einem naturbraunen Diffusor nimmt sie deutlich ab.

Durch Messungen der Transmission und Reflexion verschiedener Grundstrukturen konnten Basiswerte erzeugt werden, die bei der Entwicklung weiterer Leuchten zur Verfügung stehen. Es konnte eine Korrelation abhängig vom Flächengewicht, welches durch unterschiedliche Abstände der Fäden zueinander entsteht, ermittelt werden, insbesondere wenn die gespulten Schichten getrennt voneinander betrachtet werden. Ebenso zeigte der Abdeckungsgrad eine Korrelation zu den beiden lichttechnischen Werten.

Ein direkter optischer Vergleich einer simulierten Leuchte mit der entsprechend hergestellten realen Leuchte ist in der nachfolgenden Abbildung zu sehen.



Abbildung 3-29: Vergleich der simulierten Leuchte (links) zur Demonstratorleuchte (Bilder Mitte und rechts)

Die reelle Lichtsituation, wie sie das menschliche Auge wahrnimmt, ist bei Lichtobjekten fotografisch schwierig einzufangen. Die zwei rechten Bilder zeigen beide die gleiche Leuchte und versuchen dies darzustellen. Von den Projektmitgliedern und Weiteren wurden die Übereinstimmung der Simulation zur Realität subjektiv als sehr gut eingeschätzt. Deswegen stellt dies ein geeignetes sowie effizientes Tool für die Entwicklung von Leuchten dar.

3.8 Übertrag auf andere Anwendungsfelder

Das Projekt hat gezeigt, dass Papiergarn eine ökologische Möglichkeit bietet, Lampenschirme umzusetzen. Neben der Herstellung von Leuchten wird großes Potential für Konstruktionsbauteile gesehen.

Ein möglicher Einsatz wird in folgenden Bereichen gesehen:

- in der Event- und Messebranche
- Möbelbranche
- als Stecksysteme allgemein

Hierfür wird ein großes Potential in der Ausweitung der mechanischen Festigkeiten gesehen: Einige der entwickelten Strukturen zeigen gemessen am geringen Gewicht und an den eingesetzten Rohstoffen bereits ein großes Potential hinsichtlich der Festigkeit und Steifigkeit. Im abgeschlossenen Projekt erfolgt keine gezielte Forcierung dieser Potentiale, da lichttechnische Anforderungen im Vordergrund standen. Die für die Leuchten notwendigen mechanischen Kennwerte wurden bereits weit übererfüllt. Durch die gezielte Entwicklung von Papieren, Papiergarnen und der textilen Strukturen in Verbindung mit geeigneten natürlichen Klebstoffen hin zu hohen mechanischen Festigkeiten kann es möglich sein, leichte, rezyklierbare Konstruktionsbauteile aus dem nachwachsenden Rohstoff Papier herzustellen.

Neben dem Einsatz von Papiergarnen können weitere nachhaltige Materialien verwendet werden.

In die Bauteile können Funktionen integriert werden, wie beispielsweise Sensorik, Beleuchtung und Schalldämmung.

3.9 Bewertung der Projektergebnisse

Im Projekt konnte gezeigt werden, dass es mittels der Strukturspulentechnologie möglich ist, sehr leichte und trotzdem stabile Strukturkörper aus Papiergarn herzustellen. Diese bilden gute Grundlagen für die Gestaltung von Leuchten. Durch die Nutzung einer Konsolidierungsmethode, die auf nachwachsenden Rohstoffen im Klebstoff basiert, konnten nun Leuchten entwickelt werden, die wieder dem Altpapierkreislauf zugeführt werden können.

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.

Für die Entwicklung der Gestaltungen der Leuchten wurde das Softwareprogramm Keyshot Pro eingesetzt. Es konnte gezeigt werden, dass die simulierten Strukturen sehr gut mit den hergestellten Strukturen übereinstimmen. Somit bietet die genutzte Softwareumgebung gute Voraussetzungen für eine Nutzung für die vereinfachte grundlegende Simulation von den betrachteten textilen Strukturen. Dies bietet für bspw. mechanisch wenig beanspruchte Produkte gegenüber typischen aufwendigen und hochpräzisen Simulationsmethoden wie der Finite-Elemente-Methode bedeutende wirtschaftliche Vorteile. Eine Abwägung hinsichtlich der Anwendungsfälle muss produktabhängig erfolgen.

Im Hinblick des ökologischen Nutzens einer Substitution von Drahtkomponenten in Leuchten durch Papiergarn-Verbundwerkstoffe zeigen die Projektergebnisse das angestrebte Potential auf. Dieses begründet sich in den Punkten Leichtbaupotential, Einsparung von CO₂-Äquivalenten und im Recyclingpotential. Die entwickelte Leuchte THIRTY-ONE wiegt ca. 0,9 kg, wohingegen ein konventionelles Pendant mit einer Drahtunterkonstruktion als tragendes Element sowie einer darüber gespannten Papierschicht als Diffusor ca. 1,9 kg Gesamtgewicht aufweist. Durch das gewählte Design können die Leuchtmittel und elektrische Bauteile nach der Produktlebenszeit leicht und komplett von der Struktur getrennt werden und müssen deshalb hierbei nicht betrachtet werden. Bei der betrachteten konventionellen Variante verursacht Draht ca. 93 % am Gesamtgewicht. Eine Abschätzung der verursachten CO₂-Äquivalente pro Leuchte, die die Rohstoffproduktion sowie die wesentlichen Verarbeitungsschritte berücksichtigt, liefert eine Einsparung von ca. 2,4 kg pro Leuchte. Das Recyclingpotential von Drahtwerkstoffen ist zwar prinzipiell gut gegeben, jedoch muss hier vorausgesetzt werden, dass eine korrekte Trennung von Papier und Drahtkomponente durch den Endnutzer erfolgt. Gleiches gilt für Leuchtmittel und elektrische Bauteile. Dies kann erfahrungsgemäß nicht immer vorausgesetzt werden, was bei der im Projekt entwickelten THIRTY-ONE nicht erforderlich ist, da sie durch das einfache Stecksystem leicht getrennt werden kann.

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.

4 Fazit

Im Projekt PapierLicht wurden Papierleuchten aus rezyklierbaren Papiergarn-Verbundwerkstoffen entwickelt. Über die Strukturspulstechnologie wurden Papiergarnen zu freitragenden, dreidimensionalen Strukturspulkörpern entwickelt. Eine entwickelte Konsolidierung mit einem stärkebasierten Klebstoffsystem ermöglicht ausreichende Stabilitäten und Festigkeiten, der Klebstoff stellt aber kein Störfaktor im etablierten Recyclingprozess dar. Durch die Entwicklung von Leuchten, die ausgenommen der leicht lösbaren elektrischen Komponenten nur aus Papier mit rezyklierbarem Klebstoff bestehen, konnten neue Anwendungsfelder durch Beispiele für nachhaltige Konsumgüter aufgezeigt werden, die etablierten Recyclingkreisläufen zugeführt werden können. Diese verzichten, anders als konventionell verfügbare Papierleuchten, auf eine Trägerstruktur aus Draht und bieten dadurch ein enormes Leichtbaupotential und bei weiten Designmöglichkeiten einen großen Umweltnutzen.

Aktuelle Wohntrends wurden im Rahmen des Gestaltungsprozesses gefunden und mit dem Ziel bewertet, eine hohe Nutzerakzeptanz zu erreichen. Über vereinfachte Simulationen konnten vorab die Lichtwirkungen im Raum bestimmt und bewertet werden. Hieraus wurden die erforderlichen Geometrien abgeleitet und schließlich im Strukturspulprozess in den Strukturen umgesetzt. Es wurden verschiedene Papiergarne verwendet, die mit geeignetem Klebstoff konsolidiert wurden. Durch die präzise platzierten Fadenschichten im Spulprozess lässt sich das Lichtlenkungsverhalten der Leuchtenkörper gezielt einstellen. Die Leuchten wurden in ein angepasstes Recyclingkonzept zur möglichst ganzheitlichen Rohstoffnutzung eingebettet.

Durch das Projektkonsortium wurden die Projektergebnisse als positiv mit großem Potential bewertet. Folgende Forschungs- und Entwicklungsschwerpunkte wurden identifiziert, die insbesondere für eine weitere Übertragung auf weitere Anwendungsgebiete und damit für eine größere Verbreitung der entwickelten Ergebnisse notwendig sind.

- Ausweitung der mechanischen Festigkeiten: Einige der entwickelten Strukturen zeigten gemessen am geringen Gewicht und an den eingesetzten Rohstoffen bereits ein großes Potential hinsichtlich der Festigkeit und Steifigkeit. Im abgeschlossenen Projekt erfolgte keine gezielte Forcierung dieser Potentiale. Die für die Leuchten notwendigen mechanischen Kennwerte wurden bereits weit übererfüllt. Durch die gezielte Entwicklung von Papieren, Papiergarnen und der textilen Strukturen in Verbindung mit geeigneten natürlichen Klebstoffen hin zu hohen mechanischen Festigkeiten kann es möglich sein, leichte, rezyklierbare Konstruktionsbauteile aus dem nachwachsenden Rohstoff Papier herzustellen.
- Ausweitung des Recyclingpotentials: Aus gestaltungstechnischen Gründen wurden die Leuchten aus sehr dünnem Papiergarn hergestellt. Für die Herstellung dieser Garne sind sehr dünne und mit Nassfestmittel ausgerüstete Papiere erforderlich. Dadurch lassen sich die daraus hergestellten Produkte nicht in den bestehenden Recyclingkreisläufen recyceln. Entwicklungsschwerpunkte liegen also einerseits auf der Entwicklung von Bauteilen, die aus für ein Recycling geeigneten Papiergarnen bestehen, und andererseits auf der Entwicklung eines stabilen Recyclingprozesses, der auf die Eigenschaften der Papiergarne angepasst ist.

5 Maßnahmen zur Verbreitung der Vorhabensergebnisse

Im Projekt wurde eine Website durch den Projektpartner quintessence design erstellt, welche unter <https://papierkonstruktion.de> aufgerufen werden kann.

Die durch PMV geplante Präsentation von Struktur-Funktionsmustern auf der Biennale (Venedig) wird durch die Corona-Krise auf das Jahr 2021 verschoben. Die Muster hierzu stehen bis dahin zur Verfügung. Demonstratorleuchten und weitere Funktionsmuster stehen zur Anschauung bei den Projektpartnern zur Verfügung. Somit können alle Projektpartner die Ergebnisse des Projektes Unternehmensvertretern und Endkunden anhand dieser näher bringen.

Im Rahmen der Internationale Bauausstellung 2027 (IBA 27) wurden die im Projekt ausgeführten Arbeiten und Ergebnisse durch die DITF bei Veranstaltungen dem Fachpublikum vorgestellt. Die Garntec GmbH präsentierte die Ergebnisse bilateral einem Leuchtenhersteller.

Eine Pressemitteilung ist seit November 2020 auf der Internetseite der DITF veröffentlicht und wird aktiv an Pressestellen, Firmen und Personen übermittelt. Im Dezember 2020 wird ein Artikel in der Fachzeitschrift P3 (Paper, Print & Packaging) in der deutschen und englischen Ausgabe erscheinen. Eine weitere Veröffentlichung ist im Jahresbericht 2020 der DITF vorgesehen.

6 Literaturverzeichnis

- [1] SSM –Schärer Schweiter Mettler: Betriebsanleitung für Präzisionskreuzspulmaschine PW2-W mit System Fastflex TM DIGICONE®, Ausgabe V2.0 – April 2006
- [2] Referenzdokument des Umweltbundesamtes: Reference Document on best available techniques in the ferrous metals processing industry, Dezember 2001, Seite 12.
- [3] <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehlter-abfallarten/altpapier#textpart-1>, aufgerufen am 28.11.2018
- [4] <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehlter-abfallarten/altpapier#textpart-3>, aufgerufen am 13.08.2019
- [5] <https://www.umweltbundesamt.de/papier-druckerzeugnisse#textpart-2>, aufgerufen am 07.12.2018
- [6] <https://www.bvse.de/papier-recycling-2/der-altpapier-kreislauf.html>, aufgerufen am 13.08.2019
- [7] <https://www.br.de/radio/bayern1/inhalt/experten-tipps/umweltkommissar/papier-altpapier-recycling-umwelt-100.html>, aufgerufen am 13.08.2019
- [8] <https://de.statista.com/outlook/17060000/102/lampen-beleuchtung/europa>
- [9] <https://www.moebelkultur.de/news/534-mrd-euro-umsatz-im-leuchtenmarkt/>, aufgerufen am 13.08.2019
- [10] PARK, Tae Young; LEE, Seung Goo. A study on coarse Hanji yarn manufacturing and properties of the Hanji fabric. *Fibers and Polymers*, 2013, 14. Jg., Nr. 2, S. 311-315.
- [11] TAKASAKI, Midori, et al. Preparation and properties of paper yarn from mulberry. In: *Advanced Materials Research*. Trans Tech Publications Ltd, 2011. S. 575-579.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] MURATE, Hirotaka, 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.
- [16] AMINI, Atefeh, et al. Improvement in physical properties of paper fabric using multi-wall carbon nanotubes. *Journal of Nanostructure in Chemistry*, 2014, 4. Jg., Nr. 2, S. 103.
- [17] HEO, Young-Jung, et al. Large-Scale Conductive Yarns Based on Twistable Korean Traditional Paper (Hanji) for Supercapacitor Applications: Toward High-Performance Paper Supercapacitors. *Advanced Energy Materials*, 2018, 8. Jg., Nr. 27, S. 1801854.
- [18] Riethmüller, Christoph, Institut für Textil- und Verfahrenstechnik Denkendorf: „Textile Lichtrichtgitter durch Strukturspulen“, AiF-Forschungsbericht Nr. 17382 N/1 (März 2014)
- [19] 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)

-
- [20] <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3834.pdf>,
Stand: 01.10.2020
- [21] Finckh, Hermann; Riethmüller, Christoph; Horter, Hans-Jürgen; Institut für Textil- und Verfahrenstechnik
Denkendorf: „Simulation textilbasierter 3D-Lichteffekte durch Zusammenführung von FE- und
Visualisierungssoftware“, AiF-Forschungsbericht Nr. 17169 N (2015)