

Design, Fertigung und Recycling von selektiv verstärkten hybriden NFK-Komponenten

Design, Manufacturing and Recycling of Selectively Reinforced Hybrid NFRP Components

Niklas Frank^{1,*}, Johannes Baur², Christian Strohl³, Albert Albers¹, Tobias Düser¹, Peter Middendorf², Thomas Graf³

¹ IPEK – Institute of Product Engineering, Karlsruhe Institute of Technology (KIT)

² Institute of Aircraft Design (IFB), University of Stuttgart

³ Institute of Laser Technologies (IFSW), University of Stuttgart

* *Korrespondierender Autor:*

Niklas Frank
IPEK – Institut für Produktentwicklung
KIT Campus Süd
Kaiserstr. 10, Geb. 10.23
76131 Karlsruhe
☎ +4972160848727
✉ niklas.frank@kit.de

Abstract

Lightweight components with natural fibre reinforced plastics (NFRP) offer great potential in reducing energy consumption and CO₂ emissions, but the weak mechanical properties of natural fibres limit possible applications. This contribution provides an insight into the design, manufacturing and recycling of components made from selectively reinforced hybrid NFRP, with the aim of expanding the range of applications for NFRP. A design method for an effective placement of local reinforcements to increase mechanical performance is developed. Automated fibre laying techniques like Tailored Fibre Placement (TFP) and Dry Fibre Placement (DFP) are considered. Finally, a laser-based pyrolysis process was developed for CF extraction. The design method is applied using the example of a seat shell.

Keywords

design for recycling, natural fibre reinforced composites, hybrid NFRP, selective reinforcement, laser-based pyrolysis

1. Einleitung

Anhaltende Herausforderungen wie der Klimawandel und die Ressourcenknappheit stellt Produktentwickelnde vor die besondere Aufgabe ökologisch nachhaltigere Produkte zu gestalten. Im Mobilitätsbereich besteht ein großes Potenzial durch Leichtbau und der Verwendung von biobasierten, nachwachsenden Rohstoffen den notwendigen Energiebedarf und die CO₂-Emissionen zu reduzieren. Eine Möglichkeit hierfür stellt der Einsatz von naturfaserverstärkten Kunststoffen (NFK) dar. Gegenüber synthetischen Fasern, wie Kohlenstofffasern (CF) und Glasfasern (GF), weisen Naturfasern (NF) aktuell noch Defizite hinsichtlich der Materialeigenschaften auf. Insbesondere liegen die mechanischen Eigenschaften von NF deutlich unterhalb der im Leichtbau überwiegend eingesetzten CF [1]. Im Vergleich mit GF liegt die spezifische mechanische Leistungsfähigkeit von NF zwar auf einem ähnlichen Niveau, jedoch sind unter anderem die Wasseraufnahme und eine schlechte Faser-Matrix-Anhaftung bislang noch nicht überwundene Nachteile. Dies hat zur Folge, dass sich der Anwendungsbereich von NFK aktuell hauptsächlich auf geringfügig belastete Komponenten wie beispielsweise Verkleidungsteile im Fahrzeuginterieur beschränkt [1]. Großes Potential zur Erweiterung des Einsatzbereichs von NFK bieten Ansätze zur gezielten Verstärkung des nachhaltigen Verbundwerkstoffs durch synthetische Fasern. Dadurch ist es möglich, die Eigenschaften natürlicher und synthetischer Fasern zu kombinieren und die des Verbunds gezielt zu beeinflussen. Jedoch werden dabei bislang die Vorteile von NF, wie ihre biologische Basis, ihre Rezyklierbarkeit und die einfache Verarbeitung nicht genutzt [2]. Die Hybridisierung von NFK beschränkt sich meist auf Variationen von Lagenaufbauten aus flächigen NF- und GF- oder CF-Halbzeugen [3, 4]. So wurde beispielsweise festgestellt, dass eine entsprechende Anordnung der Lagen im Laminat entweder die Steifigkeits- oder die Impact-Eigenschaften positiv beeinflussen kann [1]. Erste Ansätze zum Design von hybriden NFK-Komponenten wurden bereits mit einem Patch Placement Ansatz [5] und einem variabel-axialen Tailored Fibre Placement (TFP) Ansatz [6] umgesetzt. Das Ermöglichen von Recyclingprozessen am Ende des Produktlebenszyklus wurde in diesen Designs nicht berücksichtigt. Auf Basis dieser Vorarbeiten ergeben sich die Fragen, welche Fertigungstechnologien für selektive CF-Verstärkungen zukünftig skalierbar eingesetzt werden können und wie der hybride Verbundwerkstoff trotz des Materialmix gezielt recycelt werden kann. Eine bereits abgeschlossene Untersuchung der Effektivität unterschiedlicher lokaler Verstärkungen im TFP- und im Dry Fibre Placement (DFP) Verfahren ist in [7] aufzufinden. Unter Verwendung dieser lokalen Verstärkungsansätze soll eine Designmethode zur Gestaltung hybrider NFK-Komponenten entwickelt und anhand einer Sitzschale erprobt werden. Dabei stellt sich zudem die Frage, welche Randbedingungen für das Design aus der Fertigungs- und der Recyclingtechnologie folgen und wie diese in der Berechnung lokaler Verstärkungen berücksichtigt werden können.

2. Gesamtprozess für hybride NFK

Um die nachhaltige Anwendung eines hybriden Materialansatzes zu ermöglichen, müssen die dafür notwendigen Prozessschritte näher betrachtet werden. Der Fokus liegt hierbei auf dem Design der Verstärkungen, der Fertigung des zugeschnittenen hybriden Verbundwerkstoffs, sowie der Berücksichtigung von Recyclingrouten am Ende des Produktlebenszyklus. Der Zusammenhang dieser einzelnen Schritte ist in Bild 1 dargestellt.



Bild 1: Durchgängige Prozesskette für die Entwicklung von Komponenten aus selektiv verstärkten NFK.

2.1. Materialauswahl

Als Grundmaterial für die NFK-Herstellung wird ein bidirektionales Flachfasergewebe *ampliTex™ 5040* der Bcomp Ltd. (Fribourg, CH) verwendet. Dieses Körper-Gewebe aus europäischen Flachfasern wiegt 300 g/mm². Unterschiedliche quasi-endlos Rovings und Garne aus Flachfasern werden von Herstellern wie Safilin France (Sailly-sur-la-Lys, FR), Depestele (Le Bocasse, FR) und Bcomp Ltd. (Fribourg, CH) bezogen. Für die Untersuchung von Naturfasern in Tapeform, werden Hanffaser-Tapes *HMP 220 micro 20* von der FUSE GmbH (Markkleeberg, DE) beschafft. Zusätzlich werden Endlosfaser-Rovings und -Tapes aus CF vom Typ *TRH50 30M* der Mitsubishi Chemical Group verwendet.

Als nachhaltige Matrixvarianten werden niedrigviskose, reaktive Infusionssysteme ausgewählt, da diese für das im Rahmen des Projekts eingesetzte Liquid Resin Infusion Verfahren (LRI) benötigt werden. Hierbei kommt unter anderem das biobasierte Epoxidharz *FormuLITE 2501A* mit dem Härter *FormuLITE 2002B* von der Cardolite Specialty Chemicals Europe NV (Mariakerke, BE) zum Einsatz. Dieses basiert auf einer Cashewnusschalen-Flüssigkeit und weist daher einen Bio-Anteil von 45,4 % auf, ist jedoch nicht recyclebar. Zudem wird das thermoplastische Infusionssystem *Elium® 188XO* von Arkema France (Colombes, FR) mit einem radikalischen Härterpulver *Perkadox GB-50X* von der S u. K Hock GmbH (Regen, DE) verwendet. Zwar weist dieses System keine Bio-Anteile auf, ist aber für mechanische (Regranulieren) und chemische (Solvolyse) Recyclingverfahren geeignet. Darüber hinaus ist für *Elium®* die Weiterverarbeitung in Verfahren wie Thermoformen, Schweißen und Laserzuschnitt (vgl. Kap. 2.2) möglich.

2.2. Fertigung

Eine Betrachtung der Fertigungsweisen ist wichtig, um den Gesamtprozess und die Randbedingungen der in Kap. 2.4 vorgestellten Designmethode nachvollziehen zu können. Selektive Verstärkungsstrukturen sollen auf das NFK-Grundlaminat so aufgebracht werden, dass sie einen signifikanten Steifigkeitsgewinn zur Folge haben. Als Preforming-Verfahren für die Ablage dieser Faserpfade kommen zwei Technologien zum Einsatz. Beim TFP können Faser-Rovings im 2D-Raum gekrümmt abgelegt und mit dem Grundmaterial verstickt werden. Hierfür wird die in Bild 2a abgebildete Anlage TCWM 102 der Tajima GmbH (Winterlingen, DE) verwendet. Das DFP hingegen dient der 2D-Ablage von trockenem Tape-Material mit Hilfe einer Crosslayer Portal-Anlage von der M&A Dieterle GmbH (Ottenbach, DE), dargestellt in Bild 2b. Dabei sind lediglich gerade Faserpfade fertigbar.

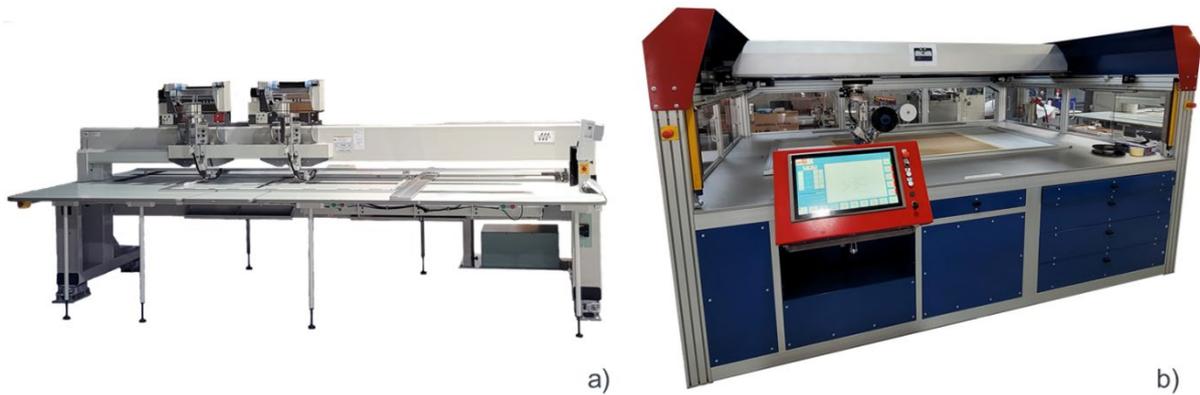


Bild 2: Preforming-Anlagen am Institut für Flugzeugbau: Mehrkopf-TFP-Anlage TCWM 102 (Tajima GmbH) (a); DFP-Anlage Crosslayer Portal (M&A Dieterle GmbH) (b).

Im nächsten Schritt werden die Preforms aus diesen Prozessen in der Werkzeugform platziert und im VAP®-Prozess mit der nachhaltigen Polymer-Matrix infiltriert und konsolidiert. Insbesondere stellen die so gefertigten Verbundwerkstoffe aus NFK mit selektiven CF-Verstärkungsstrukturen eine neue Art der Hybridisierung dar. Die sehr leistungsfähigen aber energetisch aufwändig hergestellten CF werden durch die lastpfadgerechte Auslegung bestmöglich genutzt und erweitern die Einsatzmöglichkeiten für NFK. Dennoch kann dieser hybride NFK mithilfe der in Kap. 2.3 beschriebenen Methode gezielt recycelt werden.

Für die Nachbearbeitung von (hybriden) NFK werden zudem laserbasierte Verfahren betrachtet. Konventionelle Fräsverfahren liefern meist eine schlechte Qualität der Schnittkanten [8], da die heterogenen FKV zum Ausfransen neigen (Siehe Bild 3a). Beim ebenfalls weit verbreiteten Wasserstrahlschneiden besteht die Gefahr erhöhter Wasseraufnahme durch die hydrophilen NF während des Schneidprozesses [8]. Der Komponenten-Zuschnitt mit Laseranlagen erfolgt üblicherweise im CW- (Continuous Wave) oder im UKP- (Ultra-Kurzpuls) Verfahren. In einer Parameterstudie wurden beide Zuschnittprozesse hinsichtlich der Zielgrößen Schnittqualität und Schnittgeschwindigkeit miteinander verglichen [9].



Bild 3: NFK Schnittkanten: Mechanischer Schnitt mit Fräse (a); CW-Laser-Cutting, $v_c = 8.000 \text{ mm/min}$ (b); UKP-Laser-Cutting, $v_c = 12 \text{ mm/min}$ (c) [9].

Die Studie zeigte für beide Verfahren sehr präzise Schnitte mit geringer Oberflächenrauigkeit von $R_{\max, \text{UKP}} = 9 \text{ µm}$ und $R_{\max, \text{CW}} = 23 \text{ µm}$. Zudem wird das Ausfransen der Schnittkante bei beiden Laserbearbeitungsverfahren vermieden. Wie in Bild 3b gezeigt, liefert das cw-Laserschneiden bei einer Schnittgeschwindigkeit von 8000 mm/min eine schnelle Bearbeitung mit geringer thermischer Schädigung. Das UKP-Laser Cutting, dessen resultierende Schnittkante in Bild 3c zu sehen ist, ermöglicht hingegen eine schädigungsfreie Bearbeitung mit komplexer Schnittgeometrie, allerdings bei einer niedrigen Schnittgeschwindigkeit von 12 mm/min.

2.3. Recycling

Die Hybridisierung reduziert den Energieverbrauch in der Herstellungs- sowie während der Nutzungsphase, allerdings gibt es für die Kombination aus NF/CF keine nachhaltige Recyclingmethode [10]. Daher wurde eine neuartige Separierungsmethode, die selektive laserbasierte Pyrolyse entwickelt. Bei dieser werden die thermisch hochresistenten CF durch einen defokussierten CO₂-Laser erhitzt. Hierdurch erfolgt ein Verdampfen des umliegenden Matrixmaterials und die CF kann extrahiert werden [11]. Eine NFK-Probe mit CF-Verstärkung vor (4a) und nach (4b und 4c) der laserbasierten Pyrolyse ist in Bild 4 dargestellt.

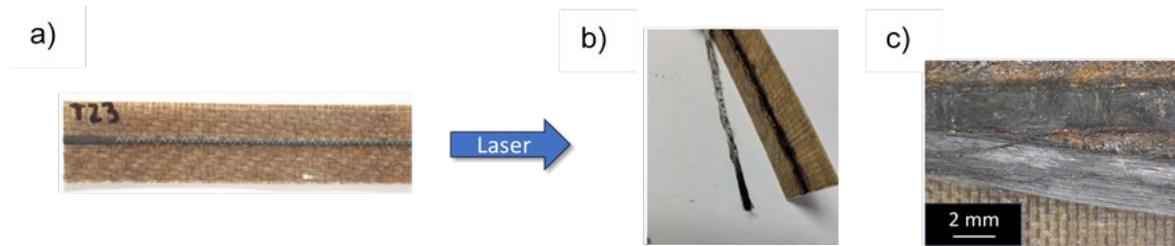


Bild 4: Probe aus NFK mit CF-Verstärkung (a); Durch laserbasierte Pyrolyse herausgelöste CF (b); Nahaufnahme der herausgelösten CF (c) [11].

Durch das Auftrennen des hybriden Verbundwerkstoffs können für die einzelnen Komponenten anschließend geeignete materialspezifische Recyclingrouten gewählt werden [12]. Eine direkte Wiederverwertung der extrahierten CF zur Fertigung neuer hybrider NFK, sowie die daraus resultierenden Anforderungen für die Designmethode ist ein Schwerpunkt der aktuellen Forschung.

2.4. Design

Zur Entwicklung einer Designmethode für die lokalen Verstärkungen wurde sich zunächst auf das DFP Verfahren konzentriert. Die daraus folgenden Fertigungsrandbedingungen beschränken sich daher auf die Tapeabmessungen. Um das laserbasierte Herauslösen von CF zu ermöglichen muss als Randbedingung für das Design die Zugänglichkeit des Lasersystems sichergestellt werden. Zusätzlich dürfen die CF nicht entlang großer Krümmungen gelegt werden, da die Fokusslänge des Lasers während des Verfahrens über die Verstärkungslänge konstant gehalten werden muss.

Zur Berechnung der lokalen Verstärkungen wird auf die in [13] bereits vorgestellte Methode verwiesen, welche als Grundlage für weitere Berechnungen dient. Hierbei werden unidirektionale Spannungszustände identifiziert und mittels eines Clusteralgorithmus zu Verstärkungsbereichen zusammengefasst. Aus den Ergebnissen der Methode wird ersichtlich, dass durch das Clustern der Hauptspannungsvektoren häufig sehr kurze Tapelängen resultieren [13]. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn keine ausgeprägten unidirektionalen Lastpfade auftreten. Um diesem Problem zu begegnen, wird die Methode durch eine vorangestellte Topologieoptimierung erweitert. Hierbei wird als Optimierungsziel die Maximierung der Steifigkeit unter Einhaltung einer minimalen Breite der Struktur, welche der Tapebreite entspricht, gewählt. Die sich aus der Optimierung einstellende Spannungsverteilung dient dann als Ausgangspunkt für den nachfolgenden Spannungsclusteralgorithmus. Da die Topologieoptimierung zu einer stärkeren Ausprägung von unidirektionalen Lastpfaden führt, wird das Berechnen von Spannungsclustern begünstigt.

Zur Berücksichtigung der Randbedingungen des Lasersystems werden die Oberflächen der Bauteilgeometrie zunächst nach der Zugänglichkeit des Lasers aussortiert. Vereinfacht kann dies durch die Auswahl aller konvexen (nach außen gewölbten) Oberflächen sichergestellt werden. Anschließend werden die ausgewählten Oberflächen nach ähnlichen

Normalenvektoren unterteilt. Diese Einteilung wird als geometrische Randbedingung im Spannungsclusteralgorithmus definiert und sorgt dafür, dass die berechneten Verstärkungen jeweils nur geringfügige Krümmungen aufweisen.

Außerdem wurde die in [13] vorgeschlagene Approximation der Tapeabmessungen geringfügig verändert, um die berechneten Spannungscluster auf Basis der Topologieoptimierung mit reduziertem Aufwand an die Tape-Abmessungen annähern zu können. Die Approximation erfolgt nun ausschließlich über die Berechnung eines minimal umschließenden Rechtecks für den jeweilig berechneten Verstärkungsbereich, welches im Anschluss auf die geforderte Tapebreite angepasst wird.

Die verschiedenen Teilschritte der Designmethode und deren Zusammenhang ist in Bild 5 dargestellt. Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse der Methode anhand eines Demonstrators diskutiert.

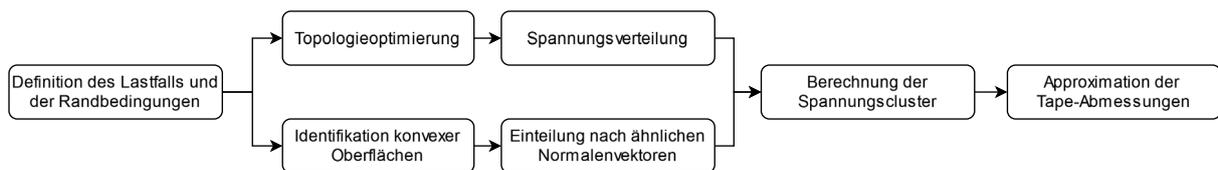


Bild 5: Darstellung der einzelnen Teilschritte der Designmethode zur Berechnung von lokalen Verstärkungen.

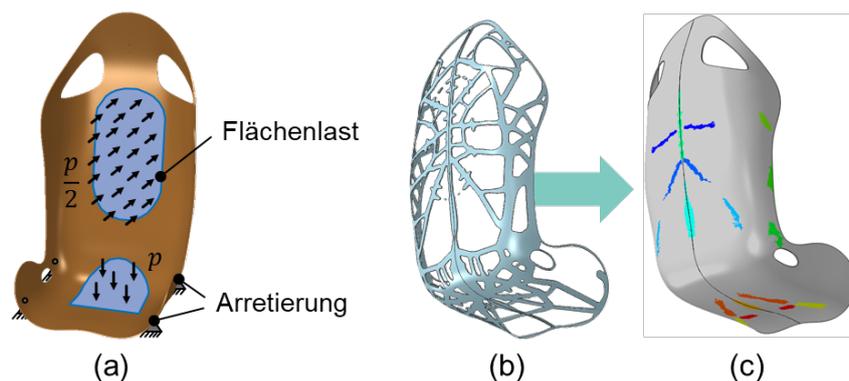


Bild 6: Vorliegender Lastfall nach [13] (a); Ergebnis der Topologieoptimierung (b) und die daraus berechneten Spannungscluster (c).

3. Ergebnis und Diskussion

Zur Demonstration der Designmethode wird eine Sitzschale ausgewählt. Für die Berechnung der Steifigkeit wird ein einzelner Lastfall betrachtet, welcher in Bild 6a abgebildet ist. Der Laminataufbau des NFK wird als quasiisotrop mit einer Gesamtdicke von 3mm angenommen, die Dicke der Verstärkungstapes beträgt 1mm. Das Ergebnis der Topologieoptimierung und die daraus abgeleiteten Verstärkungsbereiche sind in Bild 6b-c zu sehen. In Bild 7 sind die berechneten lokalen Verstärkungen ohne Approximation der Tapeabmessungen (Bild 7a) und nach Approximation der Tapeabmessungen (Bild 7b) dargestellt. Zudem wird für den Vergleich ein intuitiver Designvorschlag herangezogen (Bild 7c). Hierbei ist das Ziel mit einer geringen Menge an CF möglichst lange Tapes zu erzeugen.

Der numerisch berechnete gewichtsspezifische Steifigkeitsgewinn für den jeweiligen Designvorschlag gegenüber der nicht verstärkten Sitzschale ist in Tabelle 1 zu sehen. Es ist erkennbar, dass mit der in diesem Beitrag beschriebenen Methode eine effektive Platzierung von CF-Tapes ermöglicht wird. Zudem wird die Anforderung von geringen Krümmungen innerhalb eines Tapes für das Herauslösen mithilfe der laserbasierten Pyrolyse erfüllt. Dies ist für den Designvorschlag c) nicht der Fall.

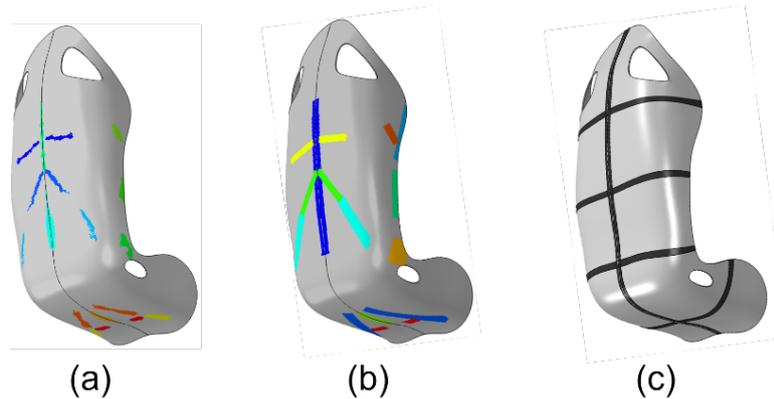


Bild 7: Vergleich unterschiedlicher Designvorschläge für lokale Verstärkungen: Berechnete Verstärkungen mithilfe der Methode ohne eine Approximation der Tapeabmessungen (a); Berechnete Verstärkungen mithilfe der Methode nach einer Approximation der Tapeabmessungen (b); Intuitiver Designvorschlag (c).

Tabelle 1: Massenspezifischer Steifigkeitsgewinn der Designvorschläge gegenüber der nicht verstärkten Struktur

	Designvorschlag a)	Designvorschlag b)	Designvorschlag c)
Massenspez. Steifigkeitsgewinn (Prozentuale Differenz der Verzerrungsenergie)	8,61%	24,62%	11,32%

4. Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag werden die notwendigen Prozessschritte einer durchgängigen Prozesskette für die Entwicklung von Komponenten aus selektiv verstärkten NFK unter Berücksichtigung der Recyclingfähigkeit vorgestellt. Der Gesamtprozess basiert dabei auf der Kombination eines für den hybriden NFK speziell entwickelten laserbasierten Trennverfahrens, geeigneter Fertigungsverfahren und einer dazu abgestimmten Designmethode. Die vorgestellte Designmethode wird zudem am Beispiel einer Sitzschale demonstriert. Durch die numerische Auswertung der gewichtsspezifischen Steifigkeit wird das Potenzial von effektiv platzierten lokalen Verstärkungen aufgezeigt.

In weiteren Forschungsvorhaben wird zur Validierung des Gesamtprozesses die hier vorgestellte Sitzschale gefertigt und in einem nachfolgenden Schritt das laserbasierte Trennverfahren angewendet. Weiter gilt es zu untersuchen, welche Eigenschaften die herausgelösten CF besitzen und inwiefern diese für weitere Anwendungen verwendet werden können. Zudem bestehen Optimierungspotenziale hinsichtlich der eingesetzten Menge an CF, sowie der Platzierung von Verstärkungen durch das TFP-Verfahren.

Danksagung

Wir danken dem Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst des Landes Baden-Württemberg (MWK) für die finanzielle Unterstützung des InnovationsCampus Mobilität der Zukunft (ICM). Die vorgestellten Ergebnisse entstanden im Rahmen des ICM Projektes EM7 - DefoRe (Design for Recycling).

Literaturverzeichnis

- [1] Shamsuyeva, Madina; Hansen, Ole; Endres, Hans-Josef: Review on Hybrid Carbon/Flax Composites and Their Properties. In: International Journal of Polymer Science 2019 (2019), S. 1–17.
- [2] Dittenber, David B.; Gangarao, Hota V.S.: Critical review of recent publications on use of natural composites in infrastructure. In: Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 43 (2012), Nr. 8, S. 1419–1429.
- [3] Flynn, Jeff; Amiri, Ali; Ulven, Chad: Hybridized carbon and flax fiber composites for tailored performance. In: Materials & Design 102 (2016), S. 21–29.

-
- [4] Dhakal, Hom Nath; Sain, Mohini: Enhancement of Mechanical Properties of Flax-Epoxy Composite with Carbon Fibre Hybridisation for Lightweight Applications. In: *Materials* (Basel, Switzerland) 13 (2019), Nr. 1.
- [5] Strohmann, Katharina; André, Nicolas; Hajek, Manfred: Hybrid Natural Fiber Composites in a Helicopter Cabin Door - Mechanical Properties and Ecological Efficiency. In: *Vertical Flight Society* (Hrsg.): 75th Annual Forum of the Vertical Flight Society, 2019.
- [6] Svidler, Rostislav; Rinberg, R.: Bio-based hybrid cabin door of ultralight helicopter with variable-axis fiber design. In: *CEAS Aeronautical Journal* 14 (2023), Nr. 1, S. 115–125.
- [7] Baur, Johannes; Helber, Florian; Middendorf, Peter; Strohl, Christian; Graf, Thomas: Untersuchungen zu Herstellung, Einsatz und Recycling von nachhaltigen FVK. In: Bonten, Christian; Kreutzbruck, Marc (Hrsg.): 28. Stuttgarter Kunststoffkolloquium. Stuttgart: IKT Universität Stuttgart (Schriftenreihe / Institut für Kunststofftechnik), 2023.
- [8] Masoud, Fathi; Sapuan, S. M.; Mohd Ariffin, Mohd Khairul Anuar; Nukman, Y.; Bayraktar, Emin: Cutting Processes of Natural Fiber-Reinforced Polymer Composites. In: *Polymers* 12 (2020), Nr. 6.
- [9] Strohl, Christian; Cirakoglu, Kathrin; Holder, Daniel; Hagenlocher, Christian; Baur, Johannes; Graf, Thomas: Laser cutting of natural fiber reinforced composites with high speed and minimum damage. In: *Lasers in Manufacturing Conference 2023 (Ablation, Drilling and Cutting)*. WLT, 2023.
- [10] Longana, Marco; Ondra, Vaclav; Yu, HaNa; Potter, Kevin; Hamerton, Ian: Reclaimed Carbon and Flax Fibre Composites: Manufacturing and Mechanical Properties. In: *Recycling* 3 (2018), Nr. 4, S. 52.
- [11] Strohl, Paul Christian; Powell, John; Baur, Johannes; Michel, J.; Holder, Daniel; Hagenlocher, Christian; Graf, Thomas: Separation of Flax and Carbon Fiber Hybrid Composites by Laser-based Pyrolysis. Accepted for publication in: 13TH CIRP Conference on Photonic Technologies (LANE 2024).
- [12] Endres, Hans-Josef; Shamsuyeva, Madina: *Composites-Recycling-Studie*. Version 1. Frankfurt am Main: AVK - Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e. V., 2023.
- [13] Frank, Niklas; Voltz, Simon; Albers, Albert; Düser, Tobias: A Method for the Selective Reinforcement of Natural Fiber Composites Considering Manufacturing Constraints. In: Endress, Felix; Rieser, Jasper; Horoschenkoff, Alexander; Höfer, Philipp; Dickhut, Tobias; Zimmermann, Markus (Hrsg.): *Proceedings of the Munich Symposium on Lightweight Design 2023*. Cham: Springer Nature Switzerland, 2024, S. 143–154.