

Bionische 3D-Schale-Rippen-Strukturen mit komplex angeordneten Versteifungselementen

Quentin Bollengier, David Rabe, Minh Quang Pham, Eric Häntzsche, Chokri Cherif

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

Abstract

Im abgeschlossenen IGF-Projekt 20793 BR erfolgte am ITM die simulationsgestützte Entwicklung, Umsetzung und Erprobung eines innovativen Verfahrens zur integralen Herstellung endlosfaserverstärkter 3D-Schale-Rippen-Textilstrukturen mit komplex angeordneten Versteifungselementen. Inspiriert von der Amazonas-Riesenseerose, deren gigantische Blätter extrem tragfähig sind, weisen diese bionischen Preformen komplex angeordnete, sich kreuzende Versteifungselemente in 0° -, 90° - sowie in $\pm 45^\circ$ -Ausrichtung und insbesondere eine durch alle Preformteile durchgehende Faserverstärkung auf. Das ermöglicht perspektivisch einen Durchbruch topologie- und strukturoptimierter, endlosfaserverstärkter 3D-Schale-Rippen-Verbundbauteile in Serienanwendungen.

Einleitung und Problemstellung

Faserverstärkte Kunststoffverbunde (FKV) weisen ein sehr hohes Potenzial zur maßgeblichen Reduktion bewegter Bauteilmassen und somit zur Steigerung der Energieeffizienz auf. Für einen Durchbruch von FKV in Serienanwendungen fehlen allerdings flexible Verfahren, die eine schnelle Umsetzung kostengünstiger, endkontur- und kraftflussgerechter 3D-Preformen bei hoher Materialeffizienz und Vermeidung von Nachbearbeitungsschritten erlauben.

Zur Erhöhung der Biege-, Beul- und Torsionssteifigkeit hochbelasteter schalenförmiger FKV-Bauteile kommen heute in vielfältigen Anwendungsfeldern Versteifungselemente wie Rippen, Spanten oder Stringer zum Einsatz. Die Bauteile werden jedoch bisher meist in Differenzialbauweise auf Preform- bzw. Bauteilebene durch nachträgliches Fügen von Schalen- und Versteifungsstruktur hergestellt. Dadurch ist die Fertigung derartiger FKV-Bauteile aktuell sehr kostenintensiv. Zusätzlich fehlt dabei prozessbedingt eine durchgehende Faserverstärkung zwischen Schale und Rippe. Das Leichtbaupotenzial von Hochleistungsfasern wird so nur teilweise ausgenutzt. Additive

Verfahren, wie das 3D-Drucken [1] oder das Spritzgießen [2], erlauben zwar die integrale Fertigung von 3D-Schale-Rippen-Strukturen mit komplexer Versteifungsstruktur, verfahrensbedingt ist jedoch die Möglichkeit der Einbringung einer Endlosfaserverstärkung in der Rippenstruktur stark begrenzt.

Im Rahmen des IGF-Projektes 18806 BR wurden am ITM grundlegende Basislösungen zur integralen Fertigung von 3D-Schale-Rippen-Mehrlagengestricken mit durchgängiger Endlosfaserverstärkung zwischen Schale und Rippenstruktur erfolgreich entwickelt und umgesetzt [3]. Allerdings konzentrierten sich die Arbeiten auf die Schaffung der technologischen Grundlagen für eine flexible Herstellung endkonturgerechter 3D-Schale-Rippen-Preformen mit ausschließlich in 90° angeordneten Rippen.

Natürliche Vorbilder zeigen jedoch, dass für eine optimale Aufnahme der auf das Bauteil wirkenden Belastungen eine komplexere Orientierung der Rippen notwendig ist. Dieses Prinzip findet sich z. B. in der komplex verrippten Struktur der Erduusschale sowie in den gigantischen und extrem tragfähigen Blättern der Amazonas-Riesenseerose (vgl. Abbildung 1) wieder, die längliche, diagonale bzw. sich kreuzende Rippen sowie ein sehr geringes Eigengewicht aufweisen.



Abbildung 1: Schwimmbblätter der Amazonas-Riesenseerose *victoria amazonica* und abgeleitetes Konzept eines bionischen FKV-Bauteiles

Für eine wirtschaftliche Nutzung dieses bionischen Prinzips in FKV-Anwendungen fehlen jedoch aktuell flexible und serientaugliche Fertigungsverfahren, die eine kosteneffiziente Umsetzung topologieoptimierter Schale-Rippen-Preformen mit derartig komplex angeordneten Versteifungselementen in Integralbauweise ermöglichen [4]. Die besondere Herausforderung für derartige Verfahren ergibt sich aus der notwendigen hohen Flexibilität zur Einstellung der je nach Anwendungs- und Lastfall extrem variierenden geometrischen sowie strukturmechanischen Anforderungen und damit der Strukturparameter, wie Rippendicke, -höhe und -ausrichtung.

Zielsetzung

Das Ziel des IGF-Forschungsprojektes 20793 BR war die simulationsgestützte Entwicklung, Umsetzung und Erprobung eines innovativen Verfahrens auf Basis der hochflexiblen Mehrlagenflachstricktechnik zur vollautomatisierten, integralen Fertigung endlosfaserverstärkter 3D-Schale-Rippen-Strukturen mit komplex angeordneten Versteifungselementen sowie kontinuierlicher, durchgängiger Faserverstärkung zwischen Schale und Rippenstruktur.

Ergebnisse

Simulationsgestützte Preform- und Technologieentwicklung

Die besondere Herausforderung im Projekt war die Entwicklung geeigneter Bindungstechniken und neuartiger Maschinenelemente zur integralen und verzugsfreien Fertigung lastgerecht ausgelegter 3D-Preformen mit komplex angeordneten Versteifungselementen in 0°, 90°- und $\pm 45^\circ$ -Ausrichtung sowie von Simulationstools für eine optimale, CAD-gestützte Auslegung daraus herstellbarer FKV-Bauteile. Nach Festlegung der Anforderungen an relevante Schale-Rippen-FKV-Bauteile und die Präzisierung typischer Lastfälle (hauptsächlich Biege-, Druck- und Torsionsbelastungen) erfolgte zunächst eine FEM-basierte Struktursimulation (Finite Elemente Methode) mit einem makroskopischen Modell. Dabei wurden die Parameter Rippendicke, -höhe sowie Wandstärke der Schale systematisch variiert, mit dem Ziel, die Zusammenhänge und die Wechselwirkungen zwischen den geometrischen Parametern und die resultierenden mechanischen Verbundeigenschaften zu ermitteln und somit die bestmöglichen Kennwerte für die Auslegung von 3D-Schale-Rippen-Textilhalbzeugen mit komplex angeordneten Versteifungselementen festlegen zu können.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Rippenhöhe eine nur geringe Auswirkung auf die resultierende Biegefestigkeit der daraus hergestellten Verbunde aufweist. Die Rippendicke und die Wandstärke der Schale weisen hingegen einen sehr hohen Einfluss auf. Als Hauptfaktor für ein frühzeitiges Bauteilversagen wurde sowohl bei dem entwickelten FEM-Modell als auch bei der durchgeführten mechanischen Charakterisierung von 3D-Verbundproben ein durch interlaminare Scherspannung ausgelöster Bruch, sog. Delamination, zwischen unterschiedlichen Verstärkungslagen identifiziert (vgl. Abbildung 2). Zur besseren Vorhersage der mechanischen Eigenschaften von FKV wurde daher ein mesoskopisches FEM-Modell entwickelt und eingesetzt [5], das in der Lage ist, 3D-Schale-Rippen-Strukturen mit einem komplexen Lagenaufbau sehr detailliert

abzubilden. Anhand dieses Modelles konnte festgestellt werden, dass die Orientierung der Verstärkungsfäden im Bereich der Rippe eine untergeordnete Rolle spielt. Ausschlaggebend für die Gewährleistung guter strukturmechanischen Verbundeigenschaften ist die Sicherstellung einer durchgängigen Faserverstärkung zwischen unmittelbar benachbarten Strukturbereichen, insbesondere an den Verbindungsstellen zwischen Rippen mit unterschiedlicher Orientierung (z. B. $0^\circ/90^\circ$), sowie der Fixierung mehrerer Verstärkungslagen mit einem einzigen Maschenfaden. Somit weist eine 2D-Verbundprobe aus vier integral gefertigten, miteinander verbundenen Verstärkungslagen mit 17,8 GPa ein um 12 % höheres Biegemodul im Vergleich zu einer aus vier Einzellagen zusammengesetzten Verbundprobe auf, die 15,9 GPa erreicht.

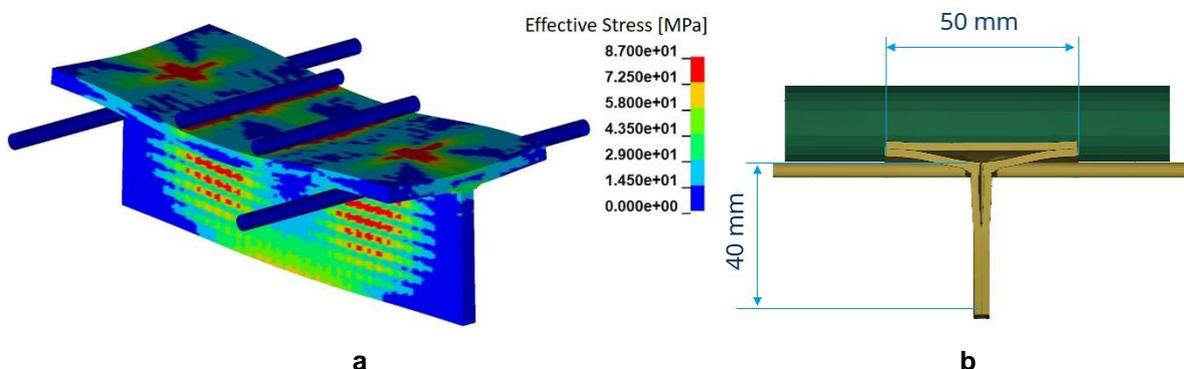


Abbildung 2: Entwickeltes makroskopische FEM-Modell für 4-Punkt-Biegeversuche (a) sowie Detailansicht der auftretenden Delamination (b)

Integral gefertigte 3D-Schale-Rippen-Strukturen

Basierend auf der durchgeführten Struktursimulation wurden der dabei ermittelte ideale Verlauf der Verstärkungsfäden iterativ mit den stricktechnisch realisierbaren Verstärkungsfadenanordnungen unter Berücksichtigung der technologischen Umsetzbarkeit verglichen und anschließend aussichtsreiche Bindungsvarianten mit lastgerecht angeordneten Verstärkungsfäden abgeleitet und festgelegt. Darauf aufbauend wurden insbesondere für die direkte Ausbildung diagonal angeordneter Rippen notwendige technologische Anpassungen an der vorhandenen Maschinenteknik abgeleitet, konstruktiv entwickelt und umgesetzt. Nach Implementierung einer neuartigen, modular in konventionelle Flachstrickmaschinen nachrüstbaren Vorrichtung für das Aufspreizen der Kettfadenschar wurden 3D-Schale-Rippen-Strukturen mit in 0° , 90° und $\pm 45^\circ$ angeordneten Rippen auf einer modifizierten Flachstrickmaschine ARIES.3D technology der Firma Steiger (Steiger Participations SA, Vionnaz/Schweiz) stricktechnisch umgesetzt (vgl. Abbildung 3).

Mit der Umsetzung der Strukturen wurde gezeigt, dass die entwickelten Bindungsvarianten als Programmiermodule bereitgestellt werden können und mit geringem Programmieraufwand in kommerzielle Softwarelösungen zur Erstellung der Maschinensteuerprogramme übertragbar sind. Diese Module können miteinander kombiniert werden und ermöglichen somit eine beträchtliche Struktur- bzw. Produktvielfalt. Im Ergebnis des abgeschlossenen Forschungsprojektes steht fortan ein robustes und erprobtes Verfahren zur integralen Fertigung endlosfaserverstärkter 3D-Schale-Rippen-Strukturen mit komplex angeordneten Versteifungselementen auf Flachstrickmaschinen zur Verfügung.

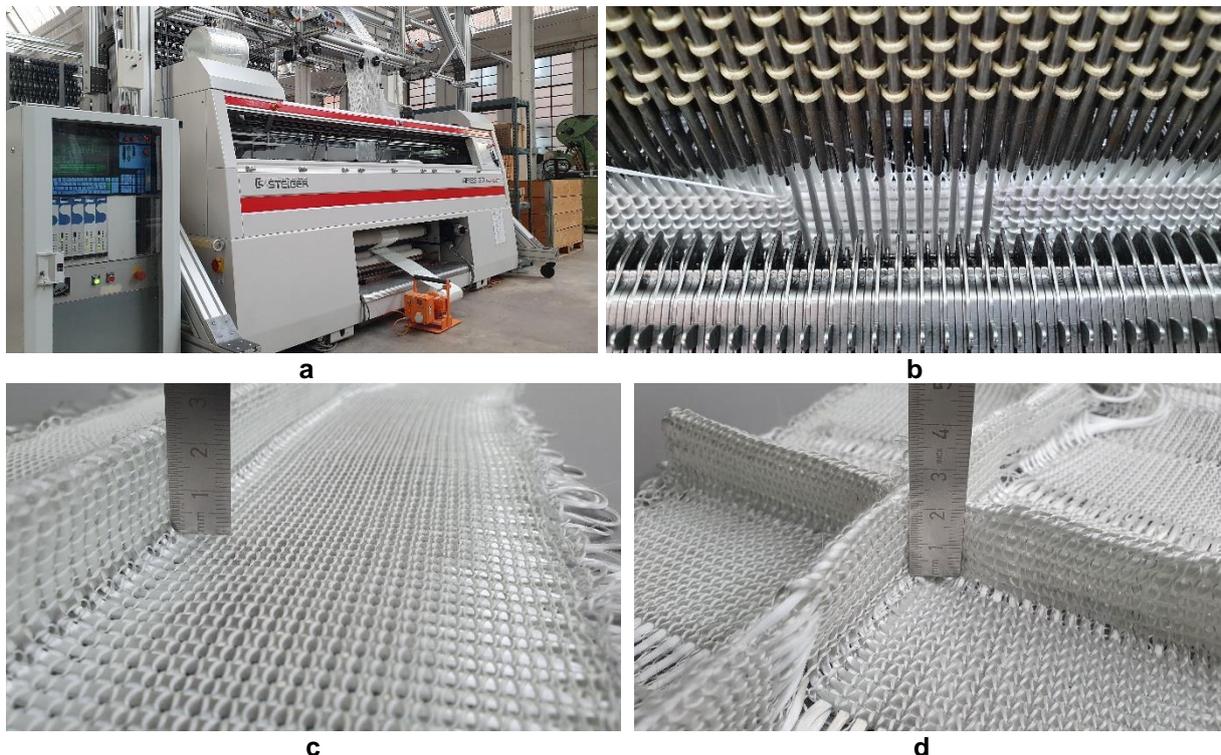


Abbildung 3: Eingesetzte Flachstrickmaschine ARIES.3D technology der Firma Steiger Participations SA (a), Detailansicht der Strickstelle (b) sowie umgesetzte 3D-Schale-Rippen-Strukturen mit 0°- (c) bzw. 0°/90°-Rippen (d)

Bauteilherstellung und Charakterisierung

Aus den integral gefertigten Preformen wurden FKV-Bauteile im SCRIMP-Verfahren (Seaman Composite Resin Infusion Molding Process) hergestellt. Dafür wurde ein Formwerkzeug mit modular einsetzbaren Metallkernen entwickelt, das die flexible Herstellung von 3D-Schale-Rippen-Bauteilen mit unterschiedlichen Rippenausrichtungen ermöglicht (vgl. Abbildung 4). Zu Vergleichszwecken erfolgte auch die Realisierung eines in Differenzialbauweise gefertigten FKV-Bauteils. Dabei wurden Schalen und

Rippenstruktur separat hergestellt und anschließend miteinander gefügt. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass für die Bauteilherstellung in Integralbauweise im Vergleich zur Differenzialbauweise deutlich weniger Arbeitsschritte erforderlich sind.

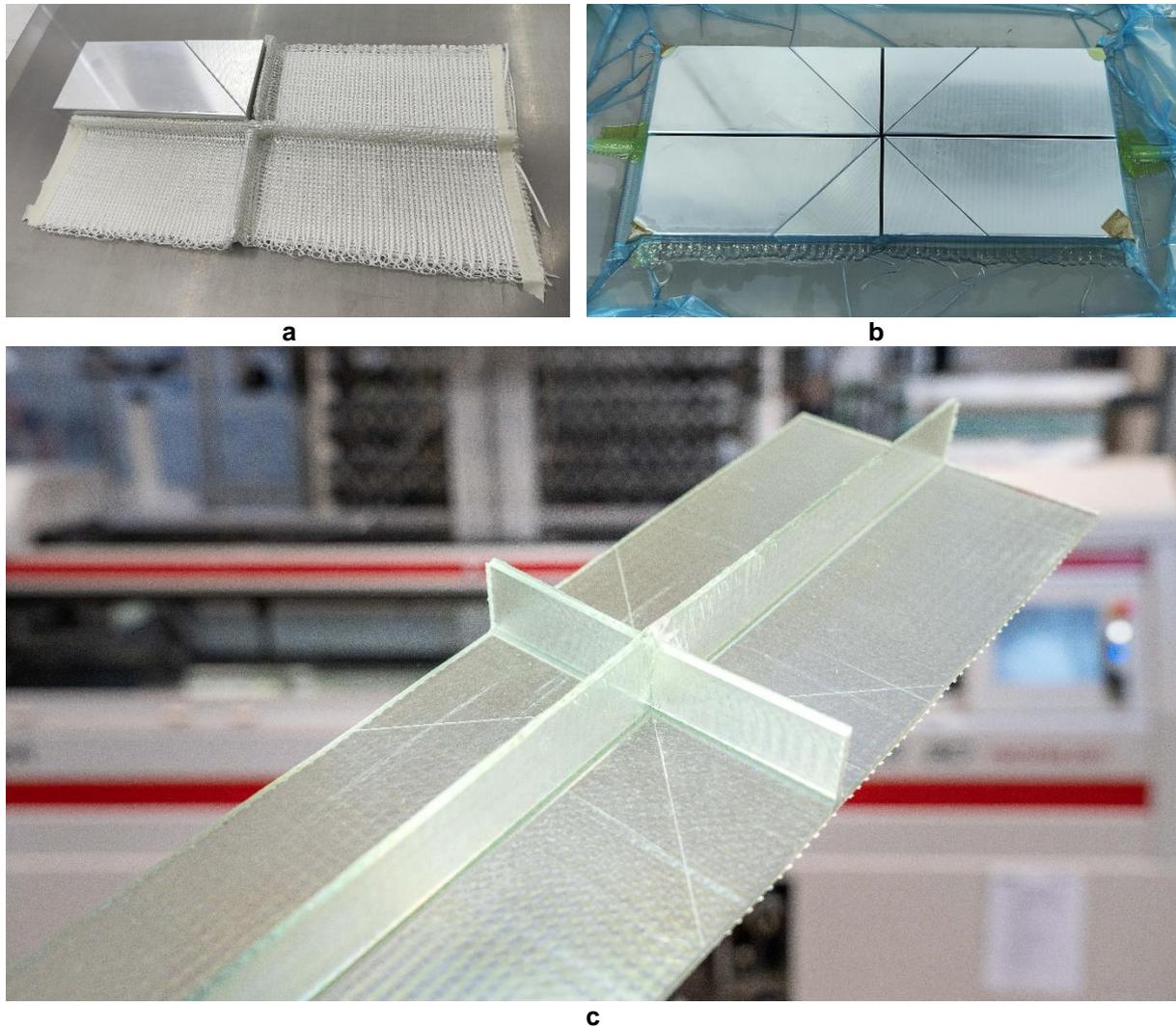


Abbildung 4: Konsolidierungsprozess: Ablage der Preform im Werkzeug (a), Infiltration im SCRIMP-Verfahren (b) sowie fertiges FKV-Bauteil (c)

Zur Validierung der entwickelten FEM-Modelle erfolgte schließlich eine umfangreiche Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften von 2D-Verbundproben mittels Zug-, Druck-, CAI- (Compression-After-Impact), 4-Punkt-Biege-, ILSS- (Interlaminare Scherfestigkeit) sowie Charpy-Schlagversuchen. Ergänzend dazu wurden in Anlehnung an DIN EN ISO 14125 auch 3-Punkt-Biegeversuche an 3D-FKV-Bauteilen durchgeführt (vgl. Abbildung 5), um die Biegefestigkeit der neuartigen 3D-Schale-Rippen-Bauteile mit komplex angeordneten Rippen zu ermitteln.

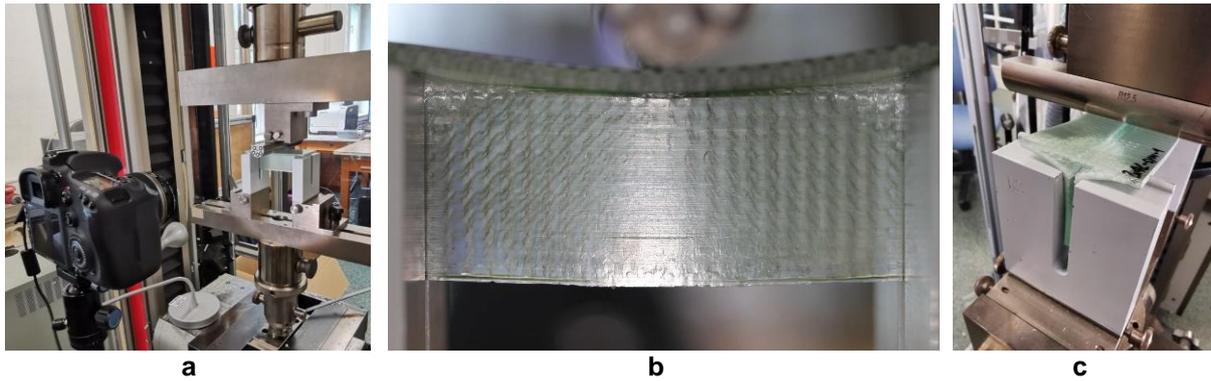


Abbildung 5: Charakterisierung von 3D-Probekörpern durch 3-Punkt-Biegeprüfung: Prüfaufbau (a), Vorder- (b) und Seitenansicht (c)

Insgesamt ist festzuhalten, dass die neuartigen 3D-Schale-Rippen-Preformen mit komplex angeordneten Versteifungselementen für die flexible Herstellung hochbeanspruchbarer FKV-Bauteile mit komplexer Versteifungsstruktur und vor allem mit einer durchgängigen Faserverstärkung zwischen Schale und Rippen sehr gut geeignet sind. Die dabei erreichbare Endlosfaserverstärkung in den Rippen stellt eine deutliche Verbesserung im Vergleich zum Stand der Technik dar. Insbesondere ermöglicht der Einsatz der neuartigen 3D-Textilhalbzeuge eine deutliche Vereinfachung des Preforming-Prozesses. Im Vergleich dazu erfordert eine Preformherstellung in Differenzialbauweise eine hohe Anzahl an 2D-Textilstrukturen, welche in aufwendigen Prozessschritten zugeschnitten, vorgeformt, gestapelt, kompaktiert und fixiert werden müssen. Bei Anwendung der Projektergebnisse ist dazu nur noch eine Positionierung der integral gefertigten 3D-Preform im Werkzeug erforderlich. Außerdem weisen die realisierten 3D-Preformen aufgrund der Fixierung einer hohen Anzahl an Verstärkungsfadenlagen durch nur einen einzigen Maschenfaden eine hervorragende Stabilität auf, was perspektivisch eine vollautomatisierte Preformherstellung mittels Robotertechnik ermöglicht. Somit sind die Voraussetzungen für eine wirtschaftliche, automatisierbare Fertigung endlosfaserverstärkter 3D-Schale-Rippen-FKV-Bauteile mit komplex angeordneten Versteifungselementen in reproduzierbare Qualität geschaffen.

Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen des IGF-Projektes 20793 BR wurde ein innovatives Fertigungsverfahren auf Basis der Mehrlagenflachstricktechnik zur integralen Herstellung lastgerecht ausgelegter 3D-Schale-Rippen-Strukturen mit komplex angeordneten Versteifungselementen entwickelt, umgesetzt und erfolgreich erprobt. Wesentliche Vorteile der Integralbauweise gegenüber der Differenzialbauweise sind ein deutlich schnellerer Preformaufbau sowie eine deutlich höhere mechanische Belastbarkeit daraus herstellbarer

FKV-Bauteile durch die durchgehende Faserverstärkung zwischen benachbarten Strukturbereichen, z. B. zwischen Schale und Rippe. Derartige Bauteile sind dadurch wesentlich materialeffizienter auslegbar. Künftig ermöglicht das entwickelte Verfahren einen Durchbruch topologie- und strukturoptimierter endlosfaserverstärkter 3D-Schale-Rippen-FKV-Bauteile in Serienanwendungen.

Potenzielle industrielle Anwendungen sind u. a. für hochbelastbare rippenverstärkte Schalen im Schienenfahrzeug-, Automobil- und Apparatebau (z. B. Türen oder Maschinenabdeckungen), Rumpfstrukturen im Schiffbau oder lasttragende Strukturen der Luft- und Raumfahrt (z. B. Flugzeugrumpf oder Isogrid-Strukturen).

Weiteres Forschungspotenzial besteht u. a. in der Weiterentwicklung der Technologie zur integralen Fertigung endlosfaserverstärkter 3D-Schale-Rippen-Strukturen mit diagonal angeordneten Versteifungselementen abweichend von der $\pm 45^\circ$ -Anordnung bzw. mit gekrümmten Rippen [6].

Danksagung

Das IGF-Vorhaben 20793 BR der Forschungsvereinigung Forschungskuratorium Textil e. V. wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Die Autoren danken den genannten Institutionen für die Bereitstellung der finanziellen Mittel sowie den involvierten Unternehmen im projektbegleitenden Ausschuss für die fachliche Unterstützung und die Bereitstellung von Versuchsmaterial. Der Forschungsbericht und weiterführende Informationen sind am Institut für Textilmaschinen und Textile Hochleistungswerkstofftechnik der TU Dresden erhältlich.

Literaturverzeichnis

- [1] Seeliger, W.; Kemper, H.-G.; Lasi, H.: Additive Manufacturing im Leichtbau. <http://www.leichtbau-bw.de/service/publikationen.html>, (04.12.2018).
- [2] ThermoPlastic composites Research Center (TPRC): Automated one-step overmolding of CF/PEEK. <https://tprc.nl/news/check-out-our-video-on-automated-one-step-overmolding-of-cpeek>, (12.12.2022).

- [3] Bollengier, Q.; Wieczorek, F.; Hellmann, S.; Trümper, W.; Cherif, C.: One-step manufacturing of innovative flat-knitted 3D net-shape preforms for composite applications. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 254 (2017), S. 1–6.
- [4] Sauer, A.: Bionik in der Strukturoptimierung. Praxishandbuch für ressourceneffizienten Leichtbau, 1. Auflage, Würzburg: Vogel Communications Group GmbH & Co. KG, 2018 - ISBN 9783834362339.
- [5] Pham, M.Q.; Wendt, E.; Häntzsche, E.; Gereke, T.; Cherif, C.: Numerical modeling of the mechanical behavior of textile structures on the meso-scale for forming process simulations of composite 3D preforms. In: Engineering Reports 4 (2022) 7-8.
- [6] Wang, D.; Abdalla, M.M.; Zhang, W.: Buckling optimization design of curved stiffeners for grid-stiffened composite structures. In: Composite Structures 159 (2017), S. 656–666.