

CF/AR/Thermoplast Hybridgarne für anforderungsgerechte thermoplastische Composites mit herausragenden, skalierbaren Steifigkeits-, Festigkeits-, Crash- und Impacteigenschaftskombinationen (Yarn Engineering)

Autoren: Matthias Overberg, Anwar Abdkader, Chokri Cherif

Institut für Textilmaschinen und Textile Hochleistungswerkstofftechnik (ITM) der TU Dresden

Einleitung, Problemstellung und Zielsetzung

Aktuelle faserverstärkte Kunststoffverbunde (Composites) werden entweder nach Steifigkeits- und Festigkeits- oder Impact- bzw. Crasheigenschaften ausgelegt. Komplexe, sich überlagernde Lastszenarien werden dabei nur sehr beschränkt berücksichtigt. Zwar gibt es erste realisierte Verbundbauteile, bspw. die B-Säule eines Automobils [1], bei denen Composites (bspw. Carbonfaserprepregs) zur Realisierung hoher gewichtsspezifischer Steifigkeiten und Festigkeiten mit metallischen Komponenten (bspw. Stahlbleche) zur Erreichung der notwendigen Schadenstoleranz kombiniert werden. Bei derartigen Konzepten erfolgt die Hybridisierung auf Makro- (Strukturebene) oder Mesoebene (Garnebene) und erfordert extrem aufwendige und kostenintensive Fertigungsprozesse [2–4]. Konzeptbedingt weisen diese Bauteile zudem stark ausgeprägte interlaminaire Grenzflächen auf, an denen durch komplexe Beanspruchungen hohe Scherspannungen entstehen, die dann zu frühzeitigen Delaminationen mit entsprechenden Strukturversagen führen [5–8]. Im Rahmen des hier vorgestellten Projekts wurden ein Konzept zur Überwindung der Nachteile und für den Einsatz bei zukünftigen Entwicklungen erarbeitet und umgesetzt. Der Ansatz besteht dabei darin, die Kombination der verschiedenen Komponenten durch Hybridisierung auf Mikroebene (innerhalb eines Garnes/Faserebene) zu gestalten und damit deren Eigenschaftspotentiale maximal auszuschöpfen. Durch den Einsatz recycelter Hochleistungsfasern ergeben sich zudem deutliche Vorteile hinsichtlich Nachhaltigkeit, Ressourceneffizienz und Wirtschaftlichkeit gegenüber konventionellen Composites.

Ziel des Projekts ist die Kreierung einer neuen auf Mikroebene hybridisierten dreikomponentigen Werkstoffklasse für thermoplastische Leichtbauanwendungen. Durch die gezielte Kombination der Verstärkungsfasern Carbon und Aramid sind über Variation der Verstärkungsfasernanteile und Faseraufmachung lastfallgerecht hohe Steifigkeiten und Festigkeiten mit hohen Crash- bzw. Impacteigenschaften kombinierbar. Abb. 1a zeigt schematisch die Eigenschaften von CF/AR Hybridcomposites nach dem Stand der Technik (Abb. 1a unten durch Ellipse hervorgehoben), aus zu entwickelnden Engineered Garnen (oben, Bereich innerhalb der gestrichelten Linien) und die theoretischen Materialpotentiale (oben, farbige Linien) jeweils in Abhängigkeit der Faservolumenanteile. Die systematische Untersuchung des Einflusses der materialspezifischen Faservolumenanteile für eine skalierbare Auslegung der Composites, erfolgte beispielhaft in fünf Stufen (CF/AR bzw. rCF/rAR: 50/0 %; 40/10 %; 25/25 %; 10/40 %; 0/50 %).

Die Entwicklungsarbeiten konzentrierten sich auf drei wesentliche Schwerpunkte. Der erste Schwerpunkt war die Weiterentwicklung der Prozesstechnik, sodass die auf Engineered Garnen basierenden Composites aufgrund geringer Faserschädigungen, einer hohen Gleichmäßigkeit und hohen Faserorientierung hohe Festigkeiten und Steifigkeiten aufweisen. Der zweite Schwerpunkt war die erstmalige Umsetzung der homogenen Durchmischung von drei Fasermaterialien auf Mikroebene, sodass gleichzeitig Steifigkeiten, Festigkeiten und ebenfalls Impact- und Crasheigenschaften signifikant erhöht werden können. Der dritte Schwerpunkt lag in der Auslegung der Engineered Garne, um so herausragende, skalierbare Steifigkeits-, Festigkeits-, Crash- und Impacteigenschaftskombinationen für verschiedenste Anforderungen gezielt einstellen zu können (Abb. 1a).

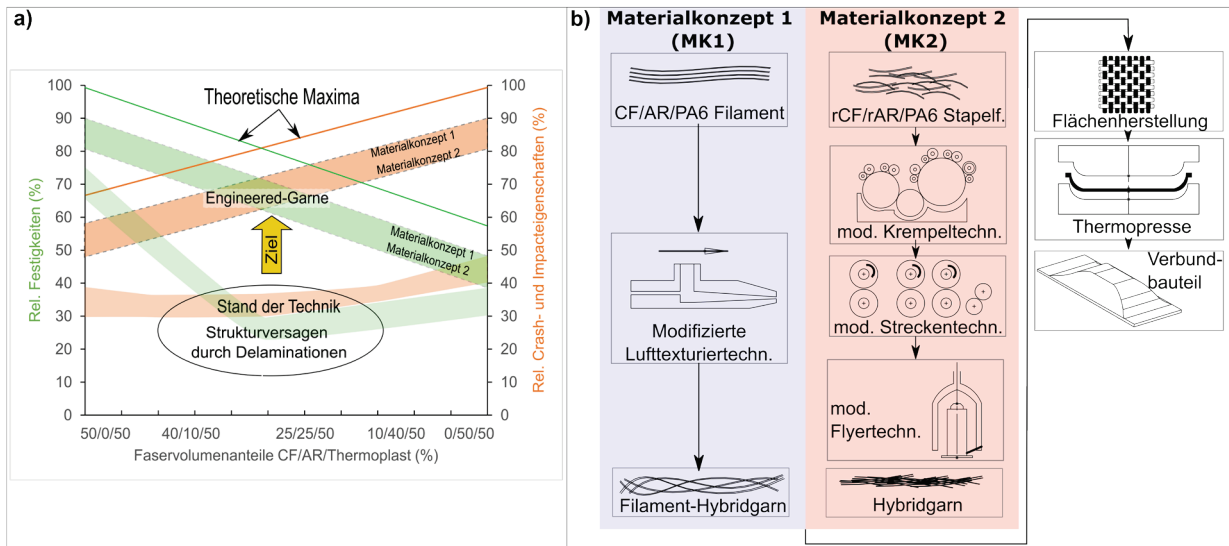


Abbildung 1: a) Schematische Darstellung der relativen Festigkeiten und Crash- bzw. Impacteigenschaften von CF/AR-Hybridcomposites in Abhängigkeit von den Faservolumenanteilen; b) Schematische Darstellung der Prozesskette zur Realisierung der Materialkonzepte

Die konkrete Umsetzung des angestrebten Ziels, Realisierung von CF/AR/PA6 bzw. rCF/rAR/PA6 Hybridgarnen zur Herstellung anforderungsgerechter thermoplastischer Composites mit herausragenden, skalierbaren Steifigkeits-, Festigkeits-, Crash- und Impacteigenschaftskombinationen, erfolgte unter Verwendung von zwei Materialkonzepten (Abb. 1b) auf Basis von zwei, in der Industrie etablierten Garnbildungstechnologien (Abb. 1a). Dabei wurden die komplexen Zusammenhänge zwischen Prozessparametern und Material-Garn-Verbundeigenschaften analysiert und für die KMU fundiertes Wissen für die Entwicklung, materialabhängige Auslegung der Engineered-Garne, die Ableitung der bestmöglichen Material- und Prozessparameter für konkrete Anwendungen sowie für die Steuerung der Fertigungsprozesse erarbeitet und in Form eines Verfahrensleitfadens aufbereitet. Die detaillierte Beschreibung der Entwicklungsarbeiten kann aus dem Abschlussbericht entnommen werden.

Entwicklung und Fertigung von Engineered Garnen auf Basis des Materialkonzepts1: Filament-Filament mittels weiterentwickelter Lufttexturiertechnologie

Mit Materialkonzept 1 (weiterentwickelte Lufttexturierung) wurden basierend auf verschiedenen Filamentgarnen Engineered Garne insbesondere mit homogener Durchmischung und geringer Faserschädigung für Composites mit höchsten strukturmechanischen Eigenschaften entwickelt. Aufbauend auf den umfangreichen Erfahrungen des ITM bei der Entwicklung zweikomponentiger Hybridgarne aus Verstärkungs- und Thermoplastfilamentgarnen auf Basis der Lufttexturiertechnologie wurden zunächst Prozessuntersuchungen mit beschafften Carbon- und Thermoplastfilamentgarnen durchgeführt. Basierend auf den Ergebnissen der Prozessuntersuchungen erfolgten umfangreiche Entwicklungen zur erstmaligen Realisierung von bei geringer Faserschädigung homogen, durchmischter dreikomponentiger Engineered Garne nach Materialkonzept 1 aus Carbon-, Aramid- und thermoplastischen Filamentgarnen. Dazu wurde ein Modul für eine schonende Voröffnung der Filamentgarne in Form von beheizten Aufspreizwalzen konstruktiv umgesetzt und in die Lufttexturiermaschine integriert (Abb. 2). Die besondere Innovation ist dabei, die deutliche Reduktion der Adhäsion der Filamente untereinander durch das simultane mechanische Aufspreizen und thermische Aufweichen der Schlichte. Damit wurde der Faserschädigung im Prozess signifikant reduziert (Faserschädigung im Garn $\leq 5\%$ gegenüber bisher mindestens 30%) und die homogene Durchmischung deutlich erhöht. Zur Realisierung

der definierten Garneigenschaften wurden Maschinenparameter, wie Überlieferungen, Liefergeschwindigkeit und Luftdruck, variiert sowie geeignete, transparente Luftdüsen auf Basis des Verwirbelungsprinzips mittels High-Speed Videotechnik analysiert. Nach erfolgreicher Entwicklung wurden fünf verschiedene Engineered Garn mit einer Feinheit zwischen 300 tex bis 500 tex und jeweils einer resultierenden Volumenanteilkombination CF/AR/PA 6 (50/0/50 %; 40/10/50 %, 25/25/50 %, 10/40/50 % und 0/50/50 %) im Composite umgesetzt. Die Engineered Garne weisen eine hohe Durchmischung und Faserorientierung bei geringer Schädigung (erhöhter Voröffnungsgrad erlaubt Luftdruckreduktion von derzeit min. 3,5 bar auf max. 2 bar) auf. Die Garne wurden charakterisiert und zur Herstellung der Flächenfunktionsmuster, Composites sowie eines Demonstrators verwendet.

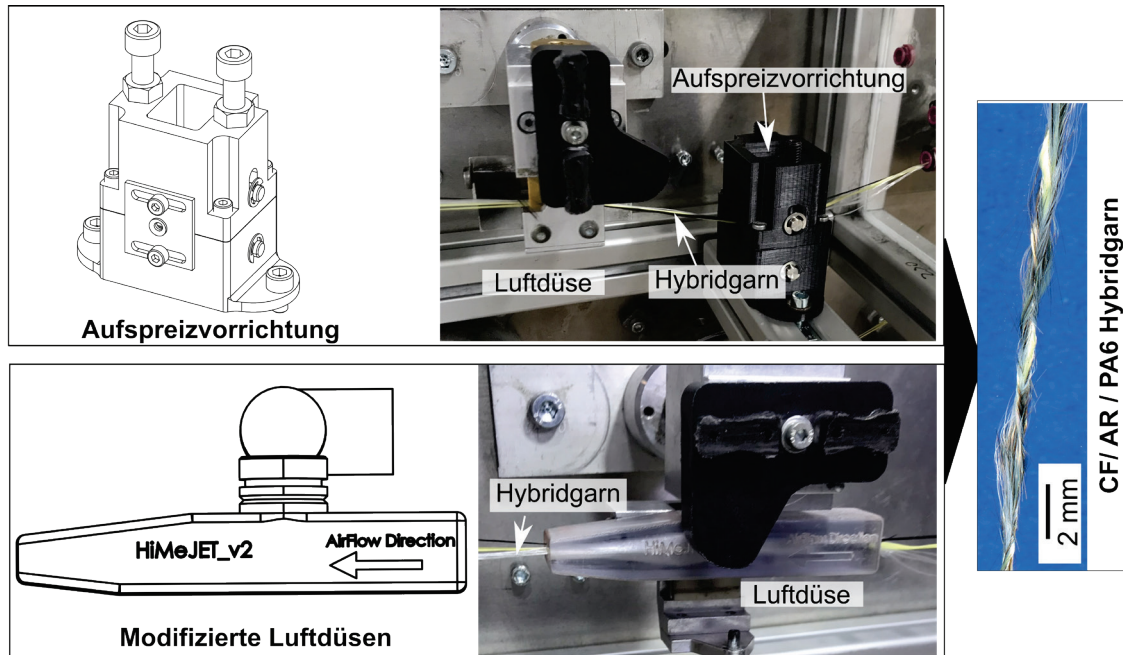


Abbildung 2: Entwicklungen an der Lufttexturieranlage nach Materialkonzept 1

Entwicklung und Fertigung von Engineered Garnen auf Basis des Materialkonzepts 2: Stapelfaser-Stapelfaser mittels weiterentwickelter Flyerspinntechnologie

Die schematische Prozesskette zur Umsetzung des Materialkonzepts 2 „Engineered Garne auf Basis von Stapelfasern“ zeigt Abb. 3. Das Materialkonzept 2 erlaubt durch ein weiterentwickeltes Flyerspinnen die Herstellung drehungsarmer Engineered Garne für Composites aus Stapelfasern mit dem besten Verhältnis aus strukturmechanischem Leistungsvermögen und Kosten. Aufbauend auf den umfangreichen Erfahrungen des ITM bei der Verarbeitung von rCF und thermoplastischen Stapelfasern erfolgten verschiedene technologisch-konstruktive Entwicklungen. Das Streckwerk des Flyers wurde hinsichtlich geringer Faserschädigung durch konstruktive Modifikation der Walzenpaarung (glatte Oberflächen) und der Ermittlung bestmöglicher Walzenbelastung sowie hoher Verzugsleichmäßigkeit durch Ermittlung der besten textiltechnologischen Einstellparameter weiterentwickelt. Weiterhin wurde eine Methodik zur Realisierung eines drehungsarmen rCF/rAR/PA 6 Garnes entwickelt. Dazu wurde ein neues Verfestigungsmodul für eine Inlinethermofixierung auf Basis eines am ITM vorhandenen Infrarotstrahlersystems konzipiert, entwickelt und umgesetzt (Abb. 3). Das neue Modul wurde am Flyer unmittelbar nach dem Streckwerksausgang integriert und im Rahmen umfangreicher Untersuchungen hinsichtlich robuster Prozessführung und Realisierung reproduzierbarer Garneigenschaften erprobt. Dabei wurden die Garndrehung sowie unterschiedliche Temperaturniveaus und Erwärmungsdauern untersucht. Schließlich wurden fünf Engineered Garne mit einer Feinheit zwischen 900 tex bis 1500 tex für je einen resultierenden Volumenanteil rCF/rAR/PA 6 im

Composite (50/0/50 %; 40/10/50 %, 25/25/50 %, 10/40/50 % und 0/50/50 %) sowie mit hohem Durchmischungsgrad, hoher Faserorientierung, geringem Schädigungsgrad umgesetzt und charakterisiert. Sie bilden die Grundlage für die Fertigung der Flächenfunktionsmuster, Composites sowie des Demonstrators.

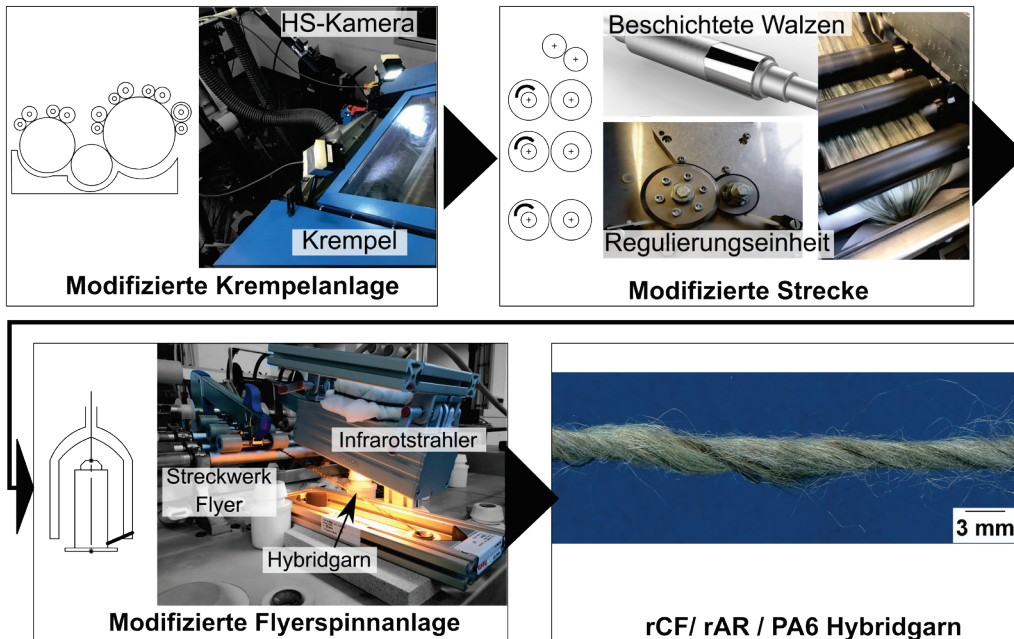


Abbildung 3: Modifikationen, Untersuchungen und Hybridgarn des Materialkonzepts 2

Ergebnisse (Auswahl)

Die textiltechnologischen Untersuchungen und anlagentechnischen Entwicklungen im Rahmen dieser Arbeit ermöglichen die Verarbeitung von CF-, AR- und PA 6 Filamentgarnen auf Basis der Lufttexturietechnologie (MK 1) und rCF, rAR und PA 6 Stapelfasern auf Basis der Flyerspinnentechnologie (MK 2) zu thermoplastischen Hybridgarnen mit hohem Durchmischungsgrad und geringer Faserschädigung. Die auf MK 1 basierenden Filamentgarne weisen prinzipbedingt periodische wechselnde kompakte und voluminöse Stellen auf und die auf MK 2 basierenden Stapelfasergarne zeigen gleichmäßige Drehung mit Kräuselung. Die Zug- und Impacteigenschaften der aus den Hybridgarnen hergestellten Verbunde sind über den Anteil der CF/rCF und AR/rAR je nach Anforderung definiert einstellbar (Abb. 4b). Die Eigenschaftsprofile unterscheiden sich nach der Auswahl des eingesetzten MK (Abb. 4a). Der Einsatz von Stapelfasern nach MK 2 erlaubt z. B. gegenüber MK 1 höhere Schlagzähigkeiten, und damit höhere Impacteigenschaften. Hingegen weisen die mit dem MK 1 hergestellten Verbunde höhere Zug- und Biegesteifigkeiten auf. Durch die variierbaren Faservolumenanteile und die Materialkonzepte ist somit die Einstellung eines breiten Eigenschaftsspektrums möglich und erlaubt eine gezielte Auslegung der Verbunde entsprechend der Anforderungen (Festigkeit, Steifigkeit und Impact- bzw. Crash).

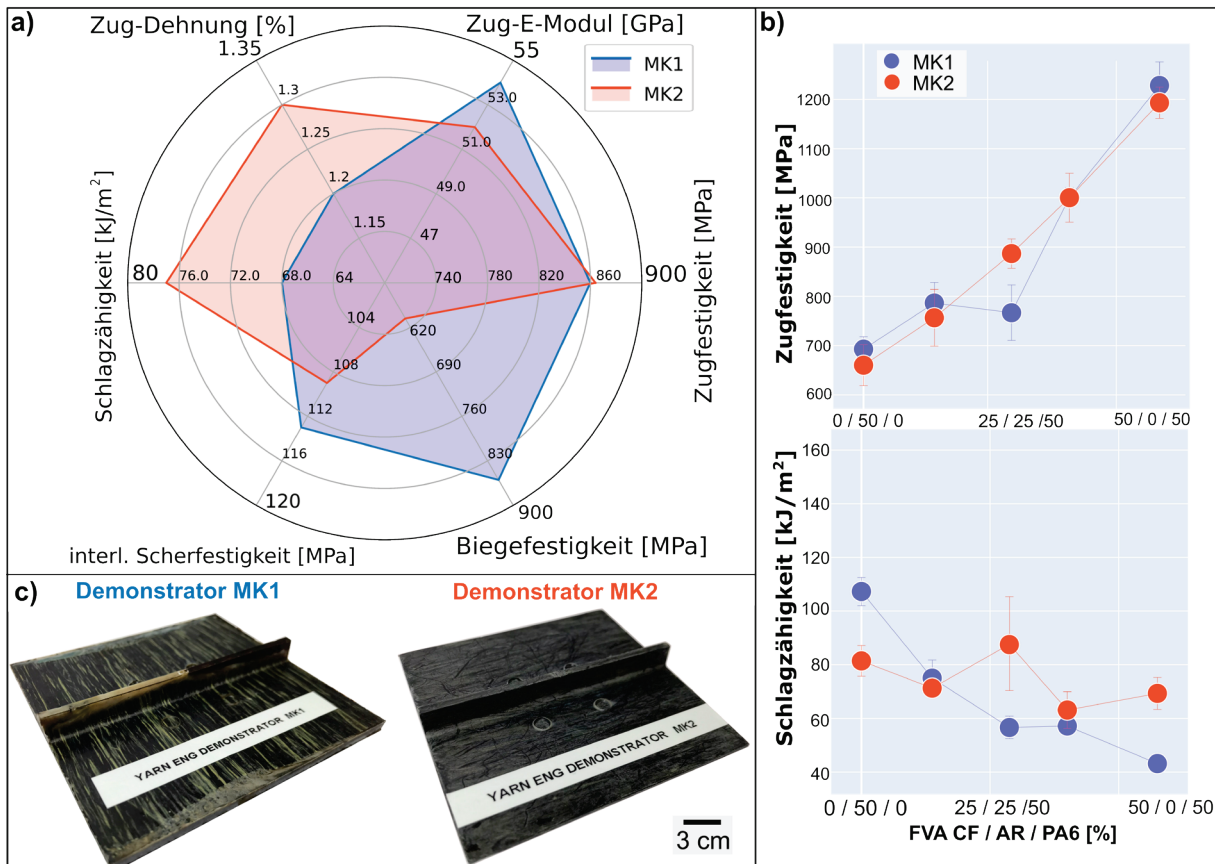


Abbildung 4: a) Eigenschaftsprofile der Verbunde auf Basis der Materialkonzepte; b) Abhängigkeit der Verbundeigenschaften von den Faservolumenanteilen; c) Demonstratorbauteile basierend auf MK1 und MK2

Abschließend wurde ein CF/AR/PA 6- bzw. rCF/rAR/PA 6-Hybridgarn mit anforderungsgerechten Eigenschaften ausgewählt und erfolgreich zu einem komplexen thermoplastischen Demonstratorbauteil (Abbildung 4 c) weiterverarbeitet.

Zusammenfassung

Im Rahmen des IGF-Forschungsvorhabens (21004 BR/1) wurden am ITM Materialkonzepte auf Basis von zwei, in der Industrie etablierten Garnbildungstechnologien realisiert und damit CF/AR/PA 6- bzw. rCF/rAR/PA 6-Hybridgarne für anforderungsgerechte thermoplastische Composites mit herausragenden, skalierbaren Steifigkeits-, Festigkeits-, Crash- und Impacteigenschaftskombinationen hergestellt. Dabei wurden die Einflüsse der Parameter der Krepel-, Strecken- und Flyerspinnanlage (MK1) sowie der Lufttexturieranlage (MK2) und der Faservolumenanteile auf die mechanischen Eigenschaften analysiert, um anforderungsgerechte und definierte Engineered Garne und darauf basierende Composites zu entwickeln. Die untersuchten Garnbildungstechnologien ergänzen sich bzw. konkurrieren teilweise untereinander, bilden dadurch aber auch ein breites Technologiespektrum ab, das eine große Breitenwirkung für die Anwendung der Ergebnisse zur Produktentwicklung in zahlreichen deutschen und oft auf wenige Technologien spezialisierten KMU der Textiltechnik erzeugt.

Danksagung

Das IGF-Vorhaben 21004 BR/1 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. Wir danken den genannten Institutionen für die Bereitstellung der finanziellen Mittel.

Literatur

1. C. MILDNER. *Numerische und experimentelle Untersuchungen des Crashverhaltens von FVK-verstärkten Metallstrukturbauteilen*. München: Verlag Dr. Hut, 2014.
2. D. NESTLER. *Beitrag zum Thema Verbundwerkstoffe - Werkstoffverbunde : Status quo und Forschungsansätze*. Chemnitz: Univ.-Verl., 2014.
3. A. V. BENEDICT. *An Experimental Investigation of GLARE and Restructured Fiber Metal Laminates*. Daytona Beach, Florida, 2012.
4. ROTHE, F., A. DÉR, P. KABALA, S. THIEDE, J. BEUSCHER, C. HERRMANN und K. DRÖDER. *Economic evaluation of alternative process chains for the large-scale manufacturing of metal-fibre laminates*. Procedia CIRP, 2019, 13-19.
5. ALDERLIESTEN, R.C. *Fatigue crack propagation and delamination growth in glare*. Delft: Delft Univ. Press, 2005.
6. M. KUHTZ, A. HORNIG, J. RICHTER und M. GUDE. *Increasing the structural energy dissipation of laminated fibre composite materials by delamination control*. Materials & Design, 2018, 93-102.
7. WISNOM, M.R. *The role of delamination in failure of fibre-reinforced composites*. Philosophical transactions. Series A, Mathematical, physical, and engineering sciences, 2012, 18501870.
8. N. MONTINARO, D. CERNIGLIA und G. PITARRESI. *Evaluation of interlaminar delaminations in titanium-graphite fibre metal laminates by infrared NDT techniques*. NDT & E International, 2018, 134-146.