

Wirtschaftliche Herstellung von Leichtbaukomponenten durch intrinsische Hybridisierung

Hybride Bauteile aus dem Rotational-Moulding-Verfahren

P. Schaible, H. Beha, H. Kuster, S. Schabel, J. Fleischer

ZUSAMMENFASSUNG Hybride Faserverbund-Metall-Bauteile eignen sich für Anwendungen als Antriebswellen, Achsen oder Zug-Druck-Stangen und besitzen aufgrund ihres hohen Leichtbaugrades ein enormes Potenzial in den unterschiedlichsten Branchen. In diesem Beitrag werden das Rotational-Moulding-Verfahren sowie aktuelle Erkenntnisse zu den mechanischen Eigenschaften dieser Hybridverbindung vorgestellt. Dies ermöglicht eine schnelle und kostengünstige Herstellung derartiger Bauteile.

STICHWÖRTER

Faserverbundwerkstoffe, Hybridisierung, Leichtbau

Hybrid components from the rotational moulding process

ABSTRACT Hybrid fibre composite-metal components are suitable for use as drive shafts, axles, or tension-compression rods and have enormous potential in a wide range of industries due to their high degree of lightweight construction. This article presents the rotational moulding process and current findings on the mechanical properties of the hybrid compound, which means that such components can be produced quickly and cost-effectively.

1 Einleitung und Stand der Technik

In den letzten Jahrzehnten rückten der Klimawandel und die Endlichkeit der Ressourcen immer mehr in den Mittelpunkt des öffentlichen Interesses. Als Reaktion auf diese Herausforderungen wurden im Pariser Klimaabkommen von 2015 neue Ziele für die Reduzierung der Treibhausgasemissionen und Umweltvorschriften verabschiedet [1]. Ein wesentlicher Faktor bei den Treibhausgasemissionen ist die Mobilität, die auch in Zukunft ein wichtiger Schlüssel für den globalen Handel sein wird.

Eine Möglichkeit, diesen Herausforderungen zu begegnen, ist der Einsatz von Leichtbauweisen, um das Gewicht und damit den Energieverbrauch zu senken. Faserverstärkte Kunststoffe (FVK) eignen sich durch ihre guten spezifischen mechanischen Eigenschaften für Bauteile mit hohen mechanischen Anforderungen und geringer Masse. Dabei kann der Energieverbrauch von beweglichen Systemen gesenkt werden, indem die Belastung bei gleicher Masse in verschiedenen Anwendungen erhöht wird.

Weiterhin sind Hybridbauteile aus faserverstärkten Kunststoffen in Kombination mit metallischen Elementen von großem Interesse. So kann nach dem Multi-Material-Design das richtige Material an der richtigen Stelle in den Einsatz gebracht werden. In diesem Sinne eignen sich metallische Elemente zur Einbringung von Lasten in den Faserverbund, der die Lasten zwischen den lasttragenden Punkten verteilt. Solche Hybridbauteile lassen sich entsprechend ihrer Fertigungsverfahren in extrinsische und intrinsische Hybride untergliedern. Als Verfahren zur intrinsischen Hybridisierung werden Fertigungsverfahren bezeichnet, bei denen der Fügeschritt der beiden Komponenten erfolgt, während eine der beiden Komponenten ur- oder umgeformt wird [2]. Vertreter für derartige Fügeverfahren bei flächigen Bauteilen sind

zum Beispiel das Resin-Transfer-Moulding (RTM)-Verfahren mit Insert-Integration [3] oder die hybride Organoblech-Umformung [4]. Bei der extrinsischen Hybridisierung erfolgt die Verbindung der beiden Fügepartner dagegen in einem nachgelagerten Prozessschritt. Beispielprozesse sind das nachträgliche Verkleben [5] oder die Bolzenverbindung [6].

Die intrinsische Hybridisierung bietet entscheidende Vorteile: Nachgelagerte Fügeprozesse entfallen, hinterschnittige, formschlüssige Fügeverbindungen sind möglich und die Fügepartner werden während der Hybridisierung toleranzausgeglichen. Auch Achsen, Wellen und Stäbe lassen sich vorteilhaft in Faserverbund-Metall-Hybridbauweise ausführen. Dabei werden in der Regel die Endstücke metallisch ausgeführt, während der Lastübertragungsbereich aus FVK besteht. Je nach Anwendungsfall können weitere metallische Lasteinleitungen zwischen den Endstücken hinzukommen, etwa Lagersitze oder Zahnräder bei Antriebswellen.

Wellen werden in vielen Anwendungen eingesetzt und sind hauptsächlich Torsionsbelastungen ausgesetzt. Außerdem spielt die kritische Biegefrequenz eine entscheidende Rolle bei der Konstruktion und begrenzt den Einsatzbereich einer Welle. Zum Beispiel können Wellen als Abtriebswellen für Getriebe, Rotorwellen für Motoren oder Gelenkwellen für Fahrzeuge eingesetzt werden. Durch die anisotropen Eigenschaften von FVK können die Eigenschaften der Bauteile an den jeweiligen Anwendungsfällen angepasst werden. Dies führt zu deutlich höheren Torsionssteifigkeiten und kritischen Biegesteifigkeiten von FVK-Wellen im Vergleich zu metallischen Wellen mit identischer Geometrie [7–9].

Am wbk Institut für Produktionstechnik wurde das hybride Rotational-Moulding-Verfahren entwickelt [10], auf das in den nachfolgenden Kapiteln eingegangen wird. In Kapitel 2 werden das Verfahren selbst sowie das mögliche Bauteilspektrum vor-

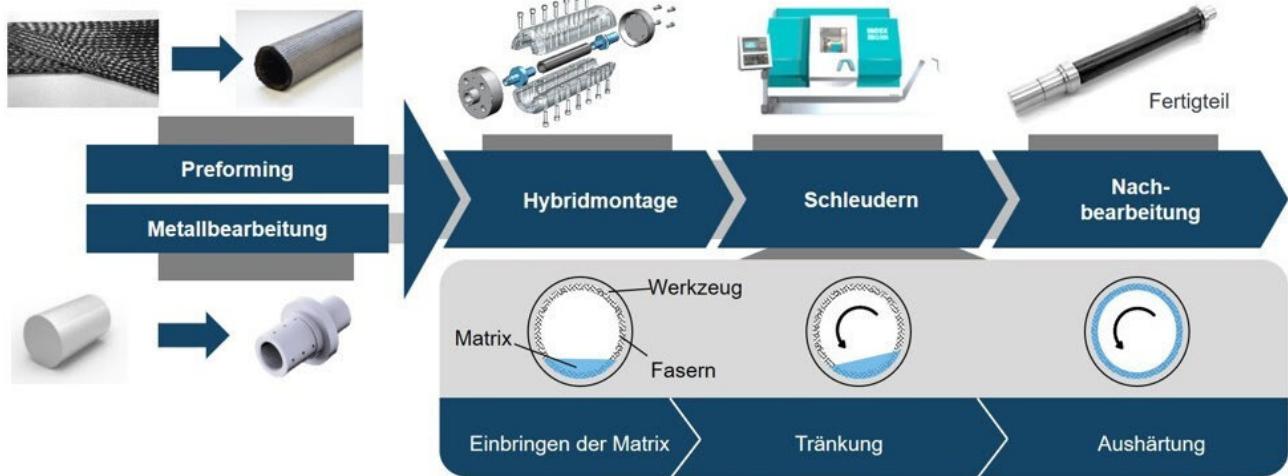


Bild 1 Prozesskette hybrides Rotational-Moulding-Verfahren [11]. Grafik: KIT / wbk

gestellt. Kapitel 3 widmet sich dem Übertrag der Erkenntnisse aus der Laborumgebung am wbk Institut für Produktionstechnik in die industrielle Fertigungsumgebung und der Identifikation von Potenzialen für die weitere Industrialisierung.

2 Intrinsiche Hybridisierung im Schleuderverfahren

Im ersten Schritt der Prozesskette werden die Lasteinleitungs-elemente hergestellt. Dabei können unterschiedliche Verfahren und Materialien zum Einsatz kommen, wie etwa eine spanende Bearbeitung von metallischen Werkstoffen oder additive Verfahren zur Herstellung von Lasteinleitungselementen aus Kunststoff oder Metall. Parallel dazu wird der Preform des Faserverbunds hergestellt. Dazu werden Flechtschläuche aus Verstärkungsfasern auf einen Dorn entsprechend der Laminatkonfiguration aufge-zogen. Zwischen den Lagen wird ein Binderpulver appliziert und thermisch aktiviert. So entsteht ein biegesteifer Faser-preform, welcher anschließend mit den Lasteinleitungselementen in einem zweiteiligen Werkzeug gefügt wird. Das Werkzeug wird verschlossen und in einer Spindel gespannt und erwärmt. Darauf-hin wird die Spindel und somit das Werkzeug in Rotation ersetzt. Durch eine seitliche Durchgangsbohrung wird ein Harz-Härter-Gemisch in das Werkzeug gegossen. In Folge der Rotation kommt es zu einer Tränkung der trockenen Fasern. Das Bauteil härtet durch die externe Temperatureinwirkung unter Rotation aus und kann nach einer definierten Zeit entnommen werden. Nach dem Entformen ist das Bauteil für einen eventuellen Nach-bearbeitungsschritt oder für den direkten Einsatz bereit, wobei eine weitere Nachbearbeitung in der Regel nicht notwendig ist [10]. Die Prozesskette ist schematisch in Bild 1 aufgezeigt [11].

In Bild 2 [12] sind exemplarische Bauteile dargestellt, die mittels Schleuderverfahren (Rotational-Moulding) gefertigt wurden, um die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten dieser Technologie zu veranschaulichen.

Bild 2 a) zeigt eine Hybridstange, die für Zug- und Druckbelastungen konzipiert ist. Sie verfügt über einen formschlüssigen Überlappbereich zwischen Metall und FVK. Für Anwendungen im Antriebsstrang eignen sich beispielsweise die Torsionswellen in Bild 2 b) und Bild 2 c). Diese weisen entweder eine rein stoff-schlüssige (zylindrische, Bild 2 b)) oder eine formschlüssige

(polygonale, Bild 2 c)) Überlappgeometrie auf. Bei den Bauteilen in Bild 2 a) bis Bild 2 c) befindet sich das Metallelement jeweils im Inneren, während der FVK außen liegt. Es sind jedoch auch formschlüssige Konstruktionen realisierbar, bei denen das Metall-element außen positioniert ist, Bild 2 d). Zur Vergrößerung der wirksamen Kraftübertragungsfläche kann das Metallelement zudem sowohl innen als auch außen an der FVK-Komponente angebracht werde, vergleiche Bild 2 e). Die in Kapitel 3 beschrie-bene FVK-Triebstockwelle, Bild 2 f), verfügt über einen zylindri-schen Überlappbereich mit achsparalleler Rändelung. Ihre Anschlussgeometrie besteht auf der einen Seite aus einem Poly-gonprofil zur Drehmomentübertragung auf ein Triebstockritzel und auf der anderen Seite aus einem Planetenradträger mit vier Bohrungen zur Aufnahme von Planetenradbolzen eines Planeten-getriebes.

Dank des breiten Spektrums an möglichen Bauteilgeometrien eignet sich das Rotational-Moulding-Verfahren für zahlreiche An-wendungen in unterschiedlichen Branchen. Neben den klassi-schen, leichtbauorientierten Bereichen wie der Luft- und Raum-fahrt oder dem Premiumsegment im Automobilbau bietet sich das Verfahren auch für hochdynamische Einsatzgebiete wie den Maschinenbau oder die Robotik an. Ein besonderer Vorteil liegt in der Möglichkeit, bereits mit geringem Harzüberschuss auf der Innenseite der Bauteile absolut zylindrische und extrem glatte Oberflächen zu erzeugen. Dies macht das Verfahren auch für den Einsatz im Chemie- und Apparatebau interessant.

Im Vergleich zu alternativen Herstellungsverfahren punktet das Rotational-Moulding durch äußerst geringe Investitionskosten in die Anlagentechnik. So kann der Einstieg in diese Technologie für kleine bis mittelgroße Serien wirtschaftlich attraktiv gestaltet werden. Zudem entfällt die Notwendigkeit eines auswaschbaren oder im Bauteil verbleibenden Kerns, wodurch sich die Prozess-kosten weiter senken. Die kurzen Tränkungswege ermöglichen zudem eine sehr schnelle Bauteilfertigung – oft innerhalb weniger Minuten – was die wirtschaftliche Effizienz zusätzlich erhöht.

3 Vom Labor in die industrielle Fertigungsumgebung

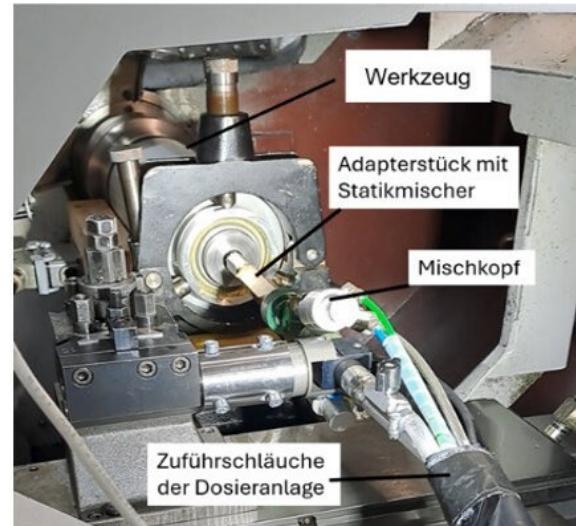
Das Rotational-Moulding-Verfahren wurde in der Vergangen-heit im Labormaßstab am wbk Institut für Produktionstechnik



Bild 2 Realisiertes Bauteilspektrum im hybriden Rotational-Moulding-Verfahren: a) Zug-Druckstrebe mit formschlüssiger Verbindungsfläche, b) Welle mit unterschiedlicher Faserverstärkung sowie Rohling der Lasteinleitungselemente, c) Welle mit Polygon-Querschnitt, d) Strebe mit Vierkant-Querschnitt und innenliegendem Faserverbund, e) Bauenteile mit Verbindungsfläche innen und außen [12], f) Triebstockwelle und Demonstrator-Bauteil des Projekts FKV-Shaft. *Grafik: KIT / wbk*



a)



b)

Bild 3 a) Verwendete Drehmaschine im Laufe des Projekts in der Projektfertigung der Framo Morat GmbH, b) Integration der Misch- und Dosiereinheit zum Eingießen des Epoxidharzes in das Werkzeug in die Drehmaschine der Framo Morat GmbH. *Foto: Framo Morat GmbH*

entwickelt und untersucht. Die Prozesskette entspricht der skizzierten Prozesskette (Bild 1). Das Preforming der Monolithen inklusive Binderapplikation wurde entweder manuell oder in einem halbautomatisierten Verfahren vollzogen [13]. Dazu wurden die Halbzeuge, in der Regel Flechtschläuche, vorkonfektioniert und auf einem Dorn befestigt. Anschließend wurde ein Binderpulver appliziert und in einem Wärmeschrank thermisch aktiviert. Dieser Vorgang wurde so oft wiederholt bis die gewünschte Konfiguration erreicht wurde.

Die Anlage für das Rotational-Moulding besteht aus einem modifizierten Dreh-Fräs-Bearbeitungszentrum (BAZ) auf Basis einer „Index IT600“ sowie einer angeschlossenen Infiltrationsanlage, die mit einer Lanze durch den Stangenlader der Hauptspindel des BAZ direkt in die Kavität des Werkzeugs Harz eingießen kann. Bei der Infiltrationsanlage handelt es sich um eine Dosier- und Misanlage der Firma Tartler des Typs „MDM 6“. Die angeschlossene Lanze ist eine Eigenentwicklung des Instituts. Das Ziel besteht in der Übertragung der Erkenntnisse aus dem Institut und

damit vom Labormaßstab in die industrielle Fertigungsumgebung. Dazu wurde eine Harrison-Alpha-400-Drehmaschine (**Bild 3a**) aus der Projektfertigung der Framo Morat GmbH umgerüstet. Die Drehmaschine wurde mit einem Heizbett mit integrierten Heizpatronen und Temperaturregelung versehen. Das Heizbett wurde von der Firma WeFoBa bereitgestellt.

Das Werkstück ist mit einem Schließmechanismus auf einer Seite auf Scharniere versehen und kann zusätzlich verriegelt werden. Weiterhin wurde der Reitstock der Maschine modifiziert, um einen Anschluss für die Tartler MDM 6 zu ermöglichen, siehe Bild 3 b). Zusätzlich wurde eine Werkerin angelernt, um sowohl das manuelle Preforming als auch das Rotational-Moulding zu übernehmen. Die mechanischen Lasteinleitungselemente verfügen über eine Achsparallel-Rändelung auf der Verbindungsfläche. Diese Form der mechanischen Bearbeitung resultiert aus Voruntersuchungen in der Laborumgebung und einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung. Die Ergebnisse sind in detaillierter Form in [14] dargestellt.

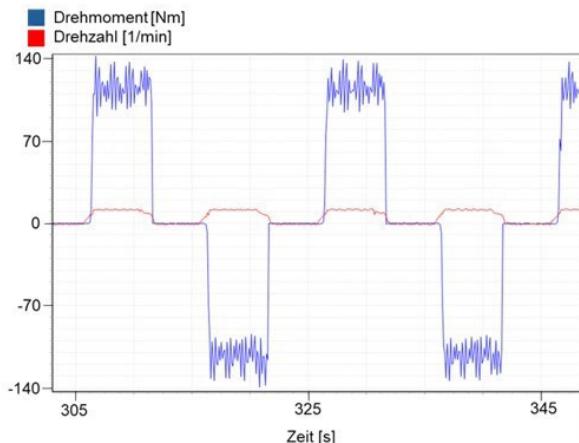


Bild 4 Last/Drehzahl-Kennkurve für die dynamischen Versuche an den Hybridwellen. *Grafik: Framo Morat GmbH*

Im Rahmen der Arbeit zur Untersuchung des Fertigungsverfahrens in der industriellen Fertigungsumgebung wurde eine Kleinserie von circa 60 Bauteilen bei der Framo Morat GmbH umgesetzt. Als Use-Case diente eine Triebstockwelle der Framo Morat GmbH aus einem Treppenlift mit einem Außendurchmesser von 31 mm und einer Länge von 230 mm (siehe Bild 2 f.). Dabei handelt es sich um keine klassische Leichtbauanwendung, vielmehr sollte die Umsetzbarkeit der Fertigungsverfahren in der industriellen Umgebung demonstriert und Lessons Learned für die weitere Industrialisierung abgeleitet werden. Verwendet wurden Kohlenstofffaser-Flechtschlüsse der Firma Siltex und eine schnell aushärtende Epoxidmatrix des Typs „SR8500/SZ8525“ der Firma Sicomin. Die gefertigten Bauteile wurden durch Torsionsversuchen auf die Verbindungsfestigkeit der Hybridbauteile untersucht. Für die Torsionsversuche wurde ein Aufbau mit einem Drehmomentsensor des Typs „DRT2-300 Nm“ von ETH Messtechnik verwendet. Die Referenz für die Versuche stellt das maximale Drehmoment von 220 Nm, welche dem spezifizierten Lastprofil des Treppenlifts entspricht.

Des Weiteren wurden bei der Framo Morat GmbH eine dynamische Prüfung zur Erprobung der Komponenten unter Wechselbelastungen durchgeführt. Die Bauteile wurden dazu in einen Treppenliftprüfstand mit anwendungsnahen Lasten montiert. Anschließend wurde ein Prüfzyklus mit 100 000 Lastwechseln bestehend aus einem Drehmoment von 120 Nm und einer Drehzahl von 10 U/min mit einem Richtungswechsel alle 10 Sekunden angewandt. Die Messung des Drehmoments erfolgte mit einem Sensor des Typs „DRFL-VI-500 Nm“ von ETH Messtechnik. Der Prüfzyklus ist in **Bild 4** dargestellt. Je Set wurden fünf Wellen zuerst dynamisch und anschließend statisch auf Torsion getestet. Alle Wellen konnten weiterhin das maximale statische Drehmoment von 300 Nm übertragen und zeigten keine signifikante Vorschädigung durch die dynamische Prüfung auf.

Im Laufe der Versuche in der industriellen Umgebung konnten unterschiedliche Erkenntnisse für die weitere Industrialisierung und Skalierung der Prozesskette gewonnen werden. Zum einen stellte sich das manuelle Preforming als aufwendig und fehleranfällig heraus. Durch die Verwendung des Binderpulvers besteht außerdem eine hohe Hürde in Form der Anforderungen an die Umgebung für das Preforming. Eine detaillierte Betrachtung von alternativen Ansätzen und der Automatisierung ist somit nötig.

Auch haben sich beim Werkzeugkonzept weitere Potenziale ergeben. Aufgrund der einseitigen Anbringung der Scharniere sind an dieser Stelle in Folge der Toleranzen Quetschungen des Preforms aufgetreten. Diese Veränderung der Faserverläufe können als Folge zu einer Schwächung der Eigenschaften des Faserverbunds führen. Aufgrund der kontaktlosen Temperierung über das Heizbett ergaben sich lange Vorwärmzeiten zu Schichtbeginn. Daher müssen in zukünftigen Betrachtungen alternative Heizkonzepte miteinbezogen werden.

4 Fazit und Ausblick

Mit dem vorgestellten Rotational-Moulding-Verfahren lassen sich Achsen, Wellen und Stäbe in Faserverbund-Metall-Hybridbauweise wirtschaftlich für vielfältige Anwendungen und Branchen herstellen. Durch die Umsetzung der Fertigung bei der Firma Framo Morat GmbH konnte die Machbarkeit des Verfahrens in realer Einsatzumgebung demonstriert werden. Somit wird die Fertigung von Hybridwellen im Schleuderverfahren ermöglicht.

Im Laufe der Versuche konnten unterschiedliche Potenziale für die weitere Industrialisierung des Verfahrens identifiziert werden. Durch eine gezielte Automatisierung im Bereich des Preformings und der Handhabung können die Produktivität des Verfahrens erhöht und die Kosten gesenkt werden, woraus eine rentablere Gesamtprozesskette resultiert.

In Folgeuntersuchungen sollte im Bereich der mechanischen Eigenschaften der Hybridwelle die Betrachtung der spezifischen Steifigkeit in Abhängigkeit der Momentübertragung und einer damit einhergehenden Gegenüberstellung zur monolithischen Welle im Fokus stehen.

FÖRDERHINWEIS

Die Forschungsarbeiten im Bereich des Rotational-Molding-Verfahrens wurden im Rahmen des Projektes „FKVShaft KK5023902KU1“ durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie gefördert. Die Autoren bedanken sich ausdrücklich bei den Fördermittelgebern für die Unterstützung des Forschungsvorhabens.

DANKSAGUNG

Die Autoren bedanken sich bei der WeFoBa Werkzeug- und Formenbau GmbH für die Entwicklung und Fertigung der Lasteinleitungselemente für die Torsionsversuche und bei der Framo Morat GmbH für die Fertigung des Werkzeugs.

LITERATUR

- [1] Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung; Klimaabkommen von Paris. Stand 2025. Internet: www.bmz.de/de/service/lexikon/klimaabkommen-von-paris-14602. Zugriff am 05.09.2025
- [2] Fleischer, J.; Ochs A.; Dosch S.: The future of lightweight manufacturing-production-related challenges when hybridizing metals and continuous fiber-reinforced plastics. International Conference on New

- Developments in Sheet Metal Forming, SheMet 2012, Stuttgart/Germany, 2012, pp. 22–23
- [3] Gebhardt J. et al.: Structure optimisation of metallic load introduction elements embedded in CFRP. Production Engineering 12 (2018) 2, pp. 131–140
- [4] Koch S. F. et al.: Intrinsic Hybrid Composites for Lightweight Structures: New Process Chain Approaches. Advanced Materials Research 1140 (2016), pp. 239–246
- [5] Kim Y. J.; LaBere J.; Yoshitake I.: Hybrid epoxy-silyl modified polymer adhesives for CFRP sheets bonded to a steel substrate. Composites Part B Engineering 51 (2013), pp. 233–245
- [6] Fink A. et al.: Hybrid CFRP/titanium bolted joints: Performance assessment and application to a spacecraft payload adaptor. Composite Science Technology 70 (2010) 2, pp. 305–317
- [7] Nadeem S. K. S.; Giridhara G.; Rangavittal H. K.: A Review on the design and analysis of composite drive shaft. Materials Today Proceeding 5 (2018) 1, pp. 2738–2741
- [8] Searle J.; Meng M.; Summerscales J.: FEA modelling and environmental assessment of a thin-walled composite drive shaft. Thin-Walled Structures 180 (2022), #109799
- [9] Mutasher S. A. et al.: Static and dynamic characteristics of a hybrid aluminium/composite drive shaft. Journal of Materials Design and Applications 221 (2007) 2, pp. 63–75
- [10] Koch S.-F.: Fügen von Metall-Faserverbund-Hybridwellen im Schleuderverfahren: ein Beitrag zur fertigungsgerechten intrinsischen Hybridisierung. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie, 2017
- [11] Nieschlag J. et al.: Finite element optimisation for rotational moulding with a core to manufacture intrinsic hybrid FRP metal pipes. Production Engineering 12 (2018) 2, pp. 239–247
- [12] Ruhland P. et al.: Hybrides Rotational-Moulding-Verfahren. wt Werkstatttechnik Online 110 (2020) 7/8, S. 517–520. Internet: www.werkstatttechnik.de. Düsseldorf: VDI Fachmedien
- [13] Ruhland P.: Prozesskette zur Herstellung von hybriden Faser-Metall-Preforms – Modellbildung und Optimierung des Binderauftrags und der Drapierung für stabförmige Bauteile. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie, 2022
- [14] Schaible P. et al.: Production and torsion testing of rotationally moulded hybrid composites drive shafts. Proceedings SAMPE Conference 23 Madrid/Spanien, 2023
-
- Patrick Schaible, M.Sc.** 
patrick.schaible@kit.edu
- Sebastian Schabel, M.Sc.** 
Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer 
Karlsruher Institut für Technologie (KIT) | wbk Institut für Produktionstechnik
Kaiserstr. 12, 76131 Karlsruhe
www.wbk.kit.edu
- Heiko Beha, B.Sc.**
- Dipl.-Ing. Holger Kuster**
Framo Morat GmbH
Franz-Morat-Str. 6, 79871 Eisenbach/Hochschwarzwald
de.framo-morat.com

LIZENZ



Dieser Fachaufsatz steht unter der Lizenz Creative Commons Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)