

Abstract:

Elastisch verformbare Umformwerkzeuge zur maßgeschneiderten Umformung von Verstärkungstextilien

Zur Herstellung von Faserkunststoffverbunden (FKV) werden ebene Verstärkungstextilien gegenwärtig durch starre Ober- und Unterwerkzeuge zu textilen 3D-Preformen umgeformt bzw. drapiert. Im Gegensatz dazu erfolgt mit dem am ITM entwickelten neuen Verfahren eine kontinuierliche Umformung der Werkzeuge, wobei die vorab eingelegten Verstärkungstextilien zu komplexen, mehrfach gekrümmten 3D-Preformen umgeformt werden. Die Produktion von profilförmigen FKV-Bauteilen kann damit mit hohem Automatisierungsgrad bei gleichzeitig hoher Prozessflexibilität und Geometrievielfalt deutlich wirtschaftlicher gestaltet werden. Die Umformwerkzeuge bestehen aus Elastomer mit integrierten Getriebeelementen zur Modifikation des Dehnungsverhaltens und ermöglichen damit bedarfsgerechte Verformungszustände. Auf Grundlage von Material- und Geometriemodellen wurden Prozesssimulationen des Umformvorgangs mit Hilfe der Finiten-Elemente-Methode (FEM) durchgeführt. Dieser Beitrag zeigt das entwickelte Fertigungsverfahren sowie die Entwicklungsschritte zur Umsetzung geeigneter Umformwerkzeuge. Final wird das neue Fertigungsverfahren dazu eingesetzt, herkömmliche Verstärkungstextilien zu 3D-Preformen umzuformen, die einen belastungsgerechten Verstärkungsfadenverlauf entlang von mehrfachen Krümmungen aufweisen. Die entwickelte Vorgehensweise zur gezielten Modifikation des Dehnungsverhaltens kann in verschiedensten Bereichen der Technologieentwicklung aufgegriffen werden.

Elastisch verformbare Umformwerkzeuge

Integrierte Getriebeelemente zur maßgeschneiderten Umformung von Verstärkungstextilien

Mit dem entwickelten Verfahren erfolgt die gezielte Umformung modifizierter, elastischer Umformwerkzeuge, wodurch die in das Werkzeug vorab eingelegte Verstärkungstextilien zu profilförmigen 3D-Preformen mit mehrfachen Krümmungen umgeformt werden können. Damit kann die Produktion von FKV-Bauteilen mit hohem Automatisierungsgrad und hoher Prozessflexibilität wirtschaftlicher dargestellt werden.

Ausgangssituation und Ansatz

Eine serienmäßige und wirtschaftlich tragfähige Anwendung von endlosfaserverstärkten Faserkunststoffverbunden (FKV) erfordert gegenüber dem Stand der Technik weiterhin eine deutliche Senkung der Herstellkosten der bereitzustellenden textilen 3D-Preformen durch die Nutzung automatisierter Prozesse. Zur Versteifung von lasttragenden Strukturen in Schalenbauweise werden gewöhnlich profilförmige Strukturen eingesetzt, wobei infolge der zunehmenden Bauteilkomplexität künftig ein Bedarf an mehrfach gekrümmten profilförmigen Strukturen z.B. mehrfach gebogene U-Profile besteht. Um die technischen und wirtschaftliche Automatisierung zur Herstellung der dafür notwendigen 3D-Preformen im Bereich kleiner bis großer Stückzahlen deutlich zu verbessern, fokussieren aktuelle Forschungsarbeiten am Institut für Textilmaschinen und textile Hochleistungs-

werkstofftechnik (ITM) daher die Entwicklung von neuartigen Fertigungstechnologien. Damit sollen ebene Verstärkungstextilien als Rollenware zu 3D-Preformen materialsparend und bestenfalls kontinuierlich umgeformt werden können. Die Umformung stellt allerdings hohe Herausforderungen an die textilen Verstärkungsstrukturen sowie die erforderlichen Fertigungstechnologien. Im Vorfeld wurden zunächst etablierte Umformverfahren der Metallverarbeitung und deren Übertragbarkeit auf textile Strukturen untersucht, wie Walzenbiegeverfahren, Rotationszugbiegen, etc.. Neben der eingeschränkten Umform- bzw. Drapierbarkeit von textilen Verstärkungsstrukturen gegenüber plastisch formbaren Werkstoffen spricht besonders die sehr geringere Biege- und Drucksteifigkeit gegen die prozesssichere Einleitung richtungsabhängiger Umformkräfte. Bedingt durch diese biegeschlaffen Eigenschaften standen daher die Möglichkeiten zur Erhöhung der Biegesteifigkeit im Vordergrund der Konzeptentwicklung. Durch die Übertragbarkeitsanalysen konnte festgestellt werden, dass Innenwerkzeuge zur Versteifung eines zu krümmenden Segmentes sowie geeignete Außenwerkzeuge zur Klemmung des Verstärkungstextiles einen wegweisenden Ansatz darstellen können. Die anvisierten Werkzeuge sind zur Erhöhung der Biege- und Drucksteifigkeit der gesamten Textilstruktur und damit zur definierten Einleitung der Umformkräfte in unterschiedlichen Richtungen geeignet. Unter Beachtung weiterer Randbedingungen, z. B. die erreichbaren Krümmungsradien, -richtungen und -anzahl, entstand der neuwertige Ansatz elastische, formbare Umformwerkzeuge einzusetzen und diese zusammen mit den vorab eingelegten Verstärkungstextil zu verformen oder, wie im vorliegenden Fall detailliert untersucht, zu biegen. Traditionelle Umformtechnologien sehen mit Ausnahme vom Diaphragmaverfahren [1] die Verwendung starrer Werkzeuge vor. Die Abbildung 1 zeigt den konzipierten Ansatz zur Umformung textiler Halbzeuge als Prozesskette. Dabei wird ein gerades U-profilförmig vorgeformtes Verstärkungstextil zu einem Bogen und damit zu einer einfach gekrümmten 3D-Preform durch sequenzielle Prozessstufen überführt. Auf dieser Grundlage wurde ein verformbares, homogenes Umformwerkzeug aus dem Silikonkautschuk ELASTOSIL RT 622 (Wacker Chemie AG) mit einer Härte von 27 Shore A konzeptioniert und final im Gießverfahren gefertigt. Weiterhin erfolgte die konstruktive Entwicklung einer Versuchseinrichtung (Abbildung 2), mit der die Verformung des Umformwerkzeuges mit zunächst konstantem Radius und einstellbaren Bogenwinkeln reproduzierbar durchgeführt werden kann.

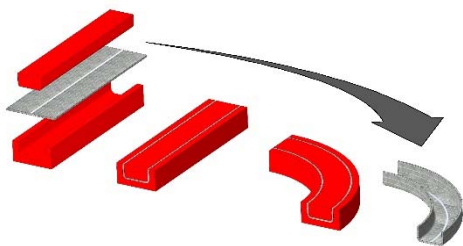


Abbildung 1: Prozesskette zur Herstellung gekrümmter textiler 3D-Preformen

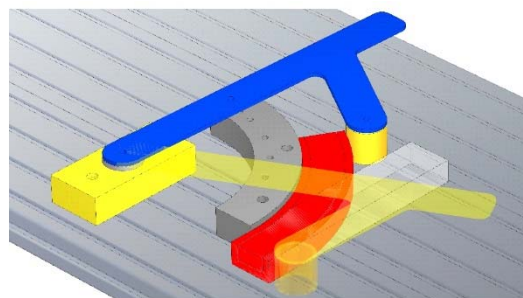


Abbildung 2: Versuchseinrichtung mit elastischem Umformwerkzeug

Simulationsgestützte Entwicklungen

Neben den praktischen Versuchen werden parallel simulationsgestützte Entwicklungswerkzeuge bereitgestellt. Diese Vorgehensweise ermöglicht die Validierung der Simulation durch praktische Versuche und schafft damit die Basis für die primär simulationsgestützte Weiterentwicklung des Ansatzes. Zeit- und kostenintensive heuristische Methoden wie „trial and error“ sind damit zukünftig vermeidbar. Als Simulationsumgebung wird die Software LS-DYNA, die für dynamische Prozesssimulationen besonders geeignet ist, verwendet. Um vorab das Materialverhalten für den Silikonkautschuk zu ermitteln, wurden uniaxiale Druckprüfversuche an Probenkörpern mit den Dimensionen 30 x 30 x 30 mm³ auf der Universal-Prüfmaschine Zwick/Roell Z100 durchgeführt und der Kraft-Wegverlauf ermittelt. Während der Messung wurde zudem die Verformung bzw. Ausbeulung der Probekörper wegabhängig erfasst. Der Druckprüfversuche wurden anschließend als Druckprüf-Prozesssimulationsmodell entwickelt und das verwendete isotrope, linear-elastische Materialmodell für den Silikonkautschuk durch Optimierungsrechnung kalibriert, bis die Kennlinien von Simulation und realem Druckprüfversuch weitgehend übereinstimmen. Damit wurde die Querkontraktionszahl des Silikonkautschuks mit $\nu = 0,479$ bestimmt. Unter Verwendung des kalibrierten Materialmodells und der CAD-Daten von Umformwerkzeug und -einrichtung wurde ein Umform-Prozesssimulationsmodell entwickelt, dass den Umformvorgang äquivalent zu den praktischen Versuchen abbildet. Die Dehnungen von Umformwerkzeug sowie das Verhalten des Verstärkungstextiles werden damit quantitativ beschrieben und zeigen das in den praktischen Versuchen beobachtete und auch theoretisch abgeleitete Verhalten. Aus strukturmechanischen Gründen weist das Umformwerkzeug bei Biegung eine Zug- und Druckseite auf (vgl. Abbildung 3). Auf der Druckseite erfolgt eine Stauchung bzw. Kontraktion, wodurch das Umformwerkzeug um ca. 3 % verkürzt wird und die Verstärkungsfasern unerwünscht zusammengeschoben bzw. onduliert werden. Auf der Zugseite, am Außenradius erfolgt die gewünschte Verlängerung bzw. Relaxation des Umformwerkzeugs, allerdings nicht im ausreichendem Maß. Ein weiterer störender Effekt tritt durch die Schubverformungen des Umformwerkzeuges in Abhängigkeit der Querschnittsgeometrie auf. Die weiteren Entwicklungen fokussieren daher auf die Veränderung dieses Verhaltens durch die Modifikation des Umformwerkzeuges.

Modifikation der Umformwerkzeuge

Um das Umformverhalten gezielt auslegen zu können, wurden verschiedene Prinzipien konzipiert. Die Zielstellung dabei war, dass die Längen auf der Außen- und Innenseite des Bogens nach der Biegung genau der Geometrie der textilen 3D-Preform entsprechen. Die Kontraktion des Werkzeuges soll vermieden und die Relaxation stark begünstigt werden, wobei ideal eine positive Dehnung $\epsilon \geq 0$ in den Bereichen anzustreben war, die die Umformung des Verstärkungstextiles maßgeblich beeinflussen. Das ist durch lokale Steifigkeitsunterschiede infolge von Materialkombinationen mit unterschiedlichen Härtegraden (Modifizierung der Materialsteifigkeit) oder infolge gezielter Strukturbildung (Modifizierung der Struktursteifigkeit) möglich. Bei der Modifikation der Materialsteifigkeit wurde das Elastizitätsmodul innerhalb des Simulationsmodells von der Innenseite zur Außenseite hin schichtweise reduziert. Die Berechnungsergebnisse zeigen eine graduelle Ver-

besserung zum gewünschten Umformverhalten. Das Dehnungsverhalten ist damit allerdings nur stark eingeschränkt modifizierbar. Notwendig wäre ein Elastomer mit graduell modifizierbarer Steifigkeit sowie entsprechende Fertigungsmöglichkeit. Durch die Modifikation der Struktursteifigkeit sind dagegen vielfältige geometrische Anordnungen unter Verwendung derzeit verfügbarer Fertigungstechniken umsetzbar. Detaillierte geometrische Untersuchungen wurden anhand von Elementarzellen mit auxetischen Materialverhalten durchgeführt. Gegenüber dem herkömmlichen Verhalten weist das auxetische Verhalten eine negative Querkontraktionszahl auf. Die Ursache dafür sind oft Getriebe-mechanismen auf molekularer, mikroskopischer oder mesoskopischer Ebene, sodass quer zur Zugrichtung eine Streckung bzw. Verbreiterung der Geometrie resultiert. Dieses Materialverhalten kann zur Modifikation mechanischer Eigenschaften, wie Dehnung oder Steifigkeit, führen [2] und ist daher Gegenstand vieler Forschungsarbeiten wie [3] sowie Patente [4]. Für die Lösung der Umformproblematik wurde der Ansatz aufgegriffen, Getriebeelemente zu konzipieren, die das Dehnungsverhalten des Umformwerkzeuges im gewünschtem Maße beeinflussen können. Die Getriebeelemente werden im 3D-Druckverfahren aus Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymer (ABS) hergestellt und vor dem Gießen des flüssigen Silikonkautschuks in die Gußform eingelegt. Die Getriebeelemente sind nach Vernetzung integraler, allerdings nicht untereinander verbundener Bestandteil der Umformwerkzeuge und ermöglichen die gezielte Modifikation des Dehnungsverhaltens. Unterschiedliche Formen der Getriebeelemente wurden mit mithilfe des Umform-Prozesssimulationsmodells untersucht. Die Abbildung 4 zeigt die Schnittdarstellung der Ergebnisse einer Umform-Prozesssimulation mit Blick auf die final umgesetzten Anordnung von Z-förmigen Getriebeelementen. Auf der Innenseite des Bogens stoßen die Elemente zusammen und verhindern damit die Kontraktion. Auf der Außenseite dagegen löst sich der Silikonkautschuk vom ABS, womit die Relaxation entsprechend der Zielstellung resultiert. Das Umformwerkzeug dehnt weitgehend genau in die anvisierte Geometrie der 3D-Preform, wobei auch der störende Effekt durch die Schubverformung vermindert werden konnte.

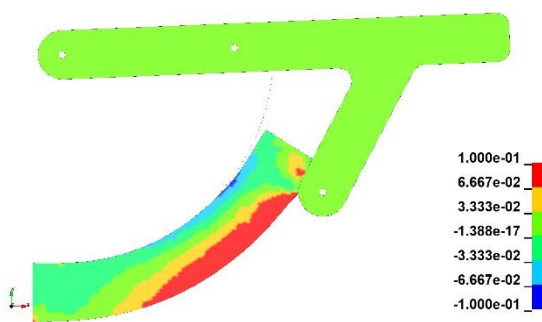


Abbildung 3: Dehnung des Umformwerkzeuges

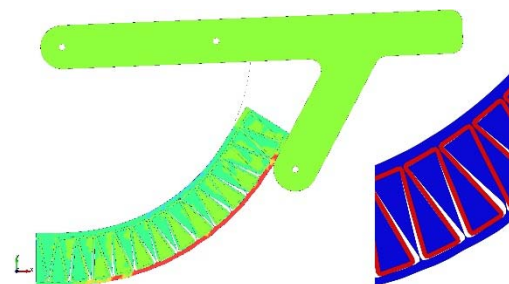


Abbildung 4: Dehnung des mit Z-förmigen Getriebeelementen modifizierten Umformwerkzeuges

Anwendung und Potenziale

Die entwickelte Vorgehensweise zur gezielten Modifikation des Dehnungsverhaltens auf mesoskopischer Ebene durch integrale Getriebeelemente kann in verschiedensten Bereichen der Technologieentwicklung aufgegriffen werden. Mit dem hier realisierten Verfahren wird die Umformung von ebenen Verstärkungstextilien zu profilförmigen 3D-Preformen für die Herstellung von FKV-Bauteilen automatisiert vorgenommen. Die Abbildung 5 zeigt das Umformergebnis eines ebenen $0^\circ/90^\circ$ biaxialen Verstärkungstextiles. Nach der Umformung folgen die ursprünglich 0° liegenden Verstärkungsfäden der gewünschten bogenförmigen Krümmung. Weiterhin wurde die in Abbildung 1 dargestellte Prozesskette zu einem quasi-kontinuierlich arbeitenden Verfahren weiterentwickelt. Die Umformwerkzeuge durchlaufen dabei ein Führungssystem aus z. B. aktiv angetriebene Walzen, womit auch die Herstellung mehrfach gekrümmter Geometrien mit unterschiedlichen Radien gelingt. Die in Abbildung 6 gezeigten FKV-Demonstratoren wurden auf Basis der mit diesem Verfahren hergestellten 3D-Preformen hergestellt. Durch die neue Fertigungstechnologie kann die Herstellung profilförmiger 3D-Preformen mit hohem Automatisierungsgrad bei gleichzeitiger hoher Prozessflexibilität und Geometrievielfalt deutlich wirtschaftlicher gegenüber dem Stand der Technik dargestellt werden. Zudem ist ein belastungsge-rechter Verstärkungsfadenverlauf entlang der Krümmung umsetzbar. Der Wirtschaftlichkeitsanalyse zufolge sind Kostenreduktionen von 10 % durch die Steigerung der Material-effizienz und bis zu 60 % durch Vermeidung manueller Arbeitsschritte möglich.



Abbildung 5: Umformergebnis



Abbildung 6: FKV-Demonstratoren

Danksagung

Das IGF-Vorhaben 19806 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 Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Wir danken den genannten Institutionen für die Bereitstellung der finanziellen Mittel und den nachfolgend aufgeführten Firmen des Projektbegleitenden Ausschusses (PA) für die fachliche Unterstützung sowie die Bereitstellung von

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Versuchsmaterial. Der Abschlussbericht und weiterführende Informationen sind am Institut für Textilmaschinen und Textile Hochleistungswerkstofftechnik der TU Dresden erhältlich.

Literaturverzeichnis

[1] Neitzel, Manfred; Mitschang, Peter; Breuer, Ulf: Handbuch Verbundwerkstoffe - Werkstoffe, Verarbeitung, Anwendung, 2., aktualisierte u. erw. Aufl., Hanser Verlag 2014, ISBN: 978-3-446-43696-1

[2] LIM, Teik-Cheng; Auxetic Materials and Structures. 2015 edition. Singapore : Springer, 2015

[3] ZHANG, Yongcun ; LI, Xiaobin; LIU, Shutian: Enhancing buckling capacity of a rectangular plate under uniaxial compression by utilizing an auxetic material. In: Chinese Journal of Aeronautics 29 (2016), Nr. 4, S. 945–951

[4] EP1661805 B1; Deckhaut für eine formvariable aerodynamische Fläche, 2006, Dittrich, K. W.

Der Autor

Dipl.-Ing. Sven Hellmann ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Textilmaschinen und Textile Hochleistungswerkstofftechnik (ITM) der TU Dresden und arbeitet im Bereich Preforming sowie Entwicklung textiler Fertigungstechnologien zur Herstellung umformgerechter Verstärkungstextilien. E-Mail: sven.hellmann@tu-dresden.de

Infokästen

Vorteile des neu entwickelten Verfahrens:

- Umformung ebener Verstärkungstextilien zu mehrfach gekrümmten 3D-Preformen mit Verstärkungsorientierung entlang der Krümmung,
- Vermeidung manueller Umformschritte,
- Hohe erreichbare Materialeffizienz

To-Dos bis zur Serienreife:

- Umsetzung eines Pilotprojektes im Rahmen von ZIM-Förderprogrammen,
- Weiterentwicklung von Verstärkungstextilien mit besseren Umformeigenschaften zum Ausgleich resultierender Faserlängenunterschiede und damit deutlicher Ausbau der Geometrievielfalt,
- Eruierung weiterer Potenziale