

Entwicklung einer Webtechnologie zur integralen Fertigung von dickwandigen durchströmbaren Rohrknotten

Autoren: Happel, Anna; Huynh, Thi Anh Mỹ; Sennewald, Cornelia; Cherif, Chokri*

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

Am ITM erfolgte im IGF-Projekt 01IF22946N (durchströmbare Rohrknotten) die komplexe Struktur- und Bindungsentwicklung eines gewebten, durchströmbaren und dickwandigen T- und Y-Rohrknottens für Composites unter Nutzung von umkehrenden Kettfäden.

Einleitung

Rohrleitungssysteme sind zentrale Funktionselemente in zahlreichen industriellen Anwendungen, insbesondere im chemischen Anlagenbau, Maschinen- und Fahrzeugbau sowie in Energie- und Umwelttechnik. Neben geraden Rohrsegmenten stellen Verzweigungen in Form von T- und Y-Rohrknotten sicherheitsrelevante Bauteile dar, deren strukturelle Integrität maßgeblich die Betriebssicherheit des Gesamtsystems bestimmt. Insbesondere bei druckbelasteten Medienleitungen treten im Übergangsbereich zwischen Hauptrohr und Abzweigung komplexe dreidimensionale Spannungszustände auf, die hohe Anforderungen an Werkstoff und Konstruktion stellen. Während für gerade Faserverbundrohre etablierte Fertigungsverfahren wie das Wickel- oder Schleuderverfahren verfügbar sind, existieren für hochbelastbare, durchströmbare Faserkunststoffverbund (FKV-)Rohrknotten bislang keine integralen, industriell skalierbaren Lösungen. Faserverstärkte Kunststoffe (FKV) bieten aufgrund ihres geringen Gewichts, ihrer hohen spezifischen Festigkeit sowie ihrer Korrosionsbeständigkeit ein erhebliches Potenzial für Rohrleitungssysteme.

Metallische Rohrverzweigungen werden üblicherweise geschweißt und sind mit hoher Masse, Korrosionsanfälligkeit sowie prüfpflichtigen Schweißnähten verbunden. Wickeltechnisch gefertigte Faserverbundlösungen ermöglichen zwar eine höhere Druckbelastbarkeit, weisen jedoch im Verzweigungsbereich eine nicht lastgerechte Faserorientierung auf, was zu Überdimensionierungen und erhöhtem Materialeinsatz führt. Daher ist der Einsatz textiltechnischer Ansätze mit lastpfadgerechter Strukturgestaltung besonders vielversprechend. Insbesondere die am ITM entwickelte Webtechnik erlaubt die bindungstechnisch komplexe Gestaltung der Rohrknotten, wobei jedoch die bisher entwickelte gewebte 3D-Knotenelemente bindungs- und technologiebedingt innen geschlossen und somit nicht für medienführende Rohrsysteme geeignet sind [1, 2]. Damit besteht ein zentraler Zielkonflikt zwischen der integralen textilen Fertigung und der notwendigen Durchströmbarkeit der Bauteile. Vor diesem Hintergrund bestand ein

erheblicher Forschungsbedarf zur Entwicklung einer neuartigen Webtechnologie unter Anwendung eines Funktionsmoduls zur Kettfadenumkehr, die erstmalig die integrale Fertigung durchströmbarer FKV-Rohrknoten mit lastpfadgerechter Faseranordnung erlaubt.

Zielsetzung und Lösungsweg

Ziel des Vorhabens war die Entwicklung einer simulationsgestützten Prozesskette zur integralen Fertigung durchströmbarer, gewebter Rohrknoten bis zum Composite für innendruckbeaufschlagte FKV-Rohrleitungssysteme. Hierzu wurde zunächst eine strukturmechanische Auslegung auf Basis makro- und mesoskopischer Finite-Elemente-Modelle durchgeführt. Ziel war die Ermittlung der Hauptspannungsrichtungen im Knotenbereich und die Ableitung einer lastgerechten Faserarchitektur, insbesondere im Abzweigungsbereich. Unter Berücksichtigung der simulierten, lastpfadgerechten Faserorientierungen wurden die vollständigen, hochkomplexen Gewebebindungen der 3D-Rohrknoten entwickelt. Zentrale technologische Innovation war die Entwicklung und Umsetzung eines modularen Zusatzsystems zur Kettfadenumkehr an Jacquard-Webmaschinen. Dieses ermöglicht erstmals die kontrollierte Umlenkung ausgewählter Kettfäden an der Gewebekante und stellt die Voraussetzung für die Ausbildung eines offenen, durchströmbaren Abzweigungsbereiches bei gleichzeitiger Realisierung einer lastpfadgerechten Verstärkungsstruktur dar. Ausschließlich unter Anwendung der Kettfadenumkehr können Faserverläufe entlang der Hauptspannungsrichtungen realisiert werden, ohne dass die innere Kavität zwischen Hauptrohr und Abzweigung strukturell getrennt wird. Materialüberdimensionierungen im Abzweigungsbereich, welche bei einer Rohrknotenherstellung im Wickelverfahren entstehen, konnten anhand dieser Methode vollständig eliminiert werden. Die Validierung erfolgte anhand von drei Funktionsmustern und einem dreidimensionalen FKV-Demonstrator in Form von T- und Y-Rohrknoten. Die entwickelten FKV-Rohrknoten wurden erfolgreich umgesetzt.

Ergebnisse

Prozesskette zur Herstellung gewebter FKV-Rohrknoten

Integral gewebte dreidimensionale FKV-Rohrknoten basieren auf schlauchförmigen Mehrlagengeweben, die auf einer Spulenschützenwebmaschine mit mindestens vier Schützen gefertigt werden. Voraussetzung für die Ausbildung einer geschlossenen Schlauchstruktur ist eine umlaufende Schussfadenführung bzw. eine geschlossene Gewebekante zur Realisierung einer übergangsfreien Rohrwandung, welche nur mittels Schützenwebmaschinen abgebildet werden kann. Die besondere Herausforderung bei der Herstellung von Rohrknoten besteht darin, neben der geschlossenen Schlauchstruktur zusätzlich eine Verzweigungsgeometrie mit kontinuierlicher Wandstruktur und gleichzeitig offener innerer Kavität zu realisieren. Der Rohrknoten wird zunächst im zweidimensionalen Zustand als 2,5D-Gewebestruktur hergestellt. Die Überführung in die dreidimensionale Geometrie erfolgt anschließend durch das gezielte, automatisierte Entfernen von

im Gewebe flottierenden Kettfadenmehrlängen, wodurch sich die Gewebestruktur in die gewünschte dreidimensionale Form aufstellt.

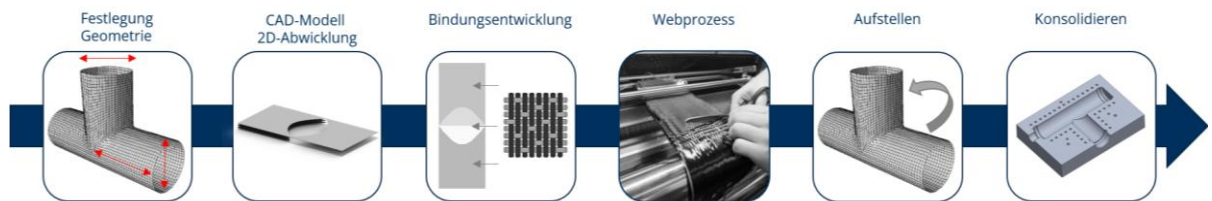


Abbildung 1: Prozesskette zur Herstellung gewebter Rohrknotten

Der vollständige Herstellungsprozess (Abbildung 1) eines integral gewebten Rohrknottes beginnt mit der Festlegung der Zielgeometrie hinsichtlich Durchmesser, Wandstärke, Rohrlängen und Abzweigwinkel. Auf dieser Basis wird ein CAD-Modell der finalen Geometrie erstellt. Die im Modell definierten Flächen werden unter Berücksichtigung des erforderlichen Lagenaufbaus in die Ebene abgewickelt, um basierend auf den abgewickelten Flächen ein Farbbild aufzustellen. Anschließend wird für jeden farbigen Bereich innerhalb des Farbbildes eine Gewebefaserbindung entwickelt und mithilfe einer Software für Bindungsentwicklung (EAT DesignScope Victor) zu einer Gesamtbindung zusammengeführt, der Maschinensteuersatz generiert und an die Webmaschine übertragen. Im anschließenden Webprozess wird das 2,5D-Halbzeug gemäß der entwickelten Bindung integral gefertigt. Nach Abschluss des Webvorgangs erfolgt das automatisierte Aufstellen des textilen Halbzeugs zu der zuvor definierten dreidimensionalen Rohrknottengeometrie.

Die Herstellung des finalen FKV-Bauteils erfolgt durch das Konsolidieren des Halbzeugs mittels RTM-Verfahren unter Verwendung eines auf den Außendurchmesser des Rohrknottes abgestimmten Werkzeugs. Nach Entnahme schließt ein finaler Zuschnitt des Bauteils den Herstellungsprozess ab.

Simulationsgestützte Auslegung von durchströmbaren Rohrknotten

Für die Entwicklung durchströmbarer Rohrknotten ist eine lastpfadgerechte Auslegung der Kettfadenscharen erforderlich. Eine zentrale Randbedingung der Simulation bestand darin, die Kett- und Schussfadenscharen so anzuordnen sind, dass keine strukturelle Trennung der inneren Kavität zwischen Hauptrohr und Abzweigung entsteht und somit die Durchströmbarkeit des Rohrknottes sichergestellt ist. Hierzu wurde zunächst die Spannungsverteilung innerhalb der Rohrknottengeometrie unter einer Innendruckbelastung numerisch ermittelt. Die höchsten Spannungen treten im Übergangsbereich zwischen Hauptrohr und Abzweigung auf (Abbildung 2). Dieser Bereich stellt somit die maßgebliche Dimensionierungszone für die Faserarchitektur dar.

Auf Basis der berechneten Spannungsverteilung wurde ein lastpfadgerechter Verlauf der Kettfäden definiert, um die zugmechanischen Kennwerte des

Kettfadenmaterials maximal auszunutzen. Dieser optimierte Fadenverlauf der Kettfadenscharen bildet die Grundlage für die Bindungsentwicklung der durchströmbaren Rohrknöten.

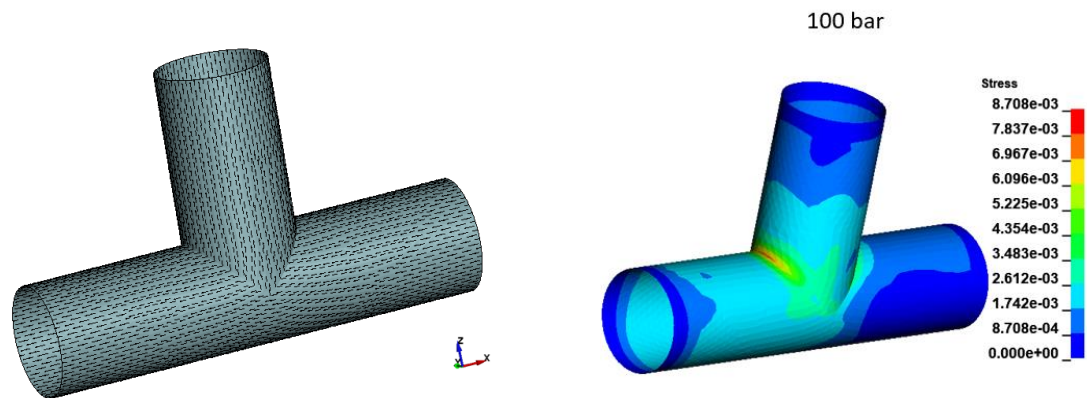


Abbildung 2: Ideale Faserorientierung für gewebte T-Rohrknöten (links); simulierte Spannungsverteilung im T-Rohrknöten (rechts)

Entwicklung von Funktionsmustern

Die Entwicklung der Gewebebindung für einen integral gewebten Rohrknöten beginnt mit einem dreidimensionalen CAD-Modell des Rohrknöten. Die simulierten Kettfadenscharen und ihr Verlauf sind in Abbildung 3 (links) farbig gekennzeichnet. Die Flächen des Modells werden anschließend in die Ebene abgewickelt und zu einem Farbbild zusammengeführt. Jeder Farbbereich repräsentiert dabei eine strukturell bedingte Änderung innerhalb des Gewebes.

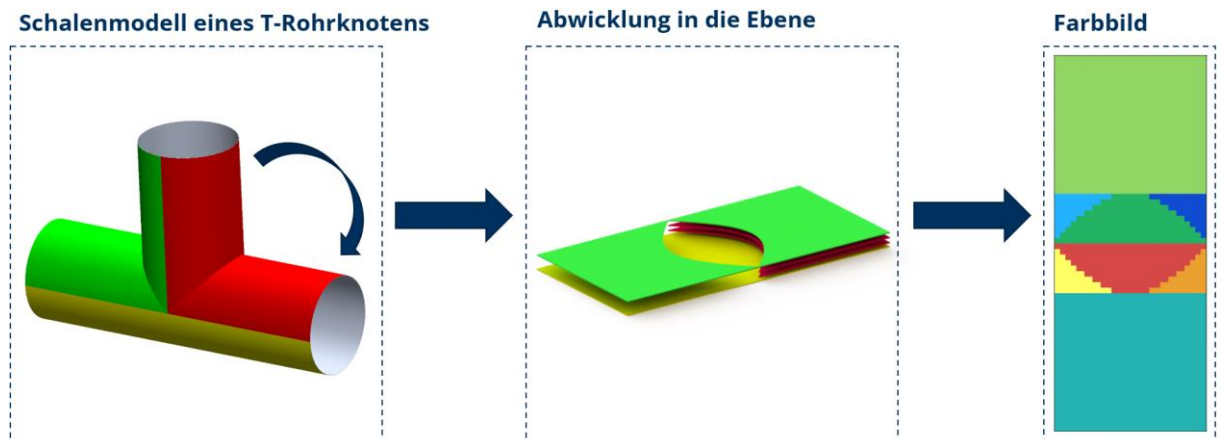


Abbildung 3: Bestimmung des Kettfadenverlaufs und Abwicklung der Gewebeflächen in die Ebene

Für jeden Farbbereich werden einzelne Gewebebindungen entwickelt, die mithilfe des Programms EAT DesignScope Victor über die Steuerung der Schützen, des Gewebeabzugs und der Zuordnung der Litzen zu einer Gesamtbindung eines integral gewebten durchströmbaren Rohrknöten kombiniert werden.

Entwicklung eines Funktionsmoduls zur Kettfadenumkehr

Die entwickelten Gewebemuster wurde auf die Spulenschützenwebmaschine „Mageba SL RTEC1200/1“ übertragen und unter Einsatz von vier Schützen gefertigt. Um den lastpfadgerechten Kettfadenverlauf realisieren zu können, bedarf es eines Zusatzfunktionsmoduls zur Verarbeitung umkehrender Kettfäden. Dieses Modul wurde unter Berücksichtigung des vorhandenen Bauraums im Abzugsbereich der Webmaschine konstruktiv als CAD-Modell ausgelegt und anschließend in die Maschine integriert. Ziel der Entwicklung war eine möglichst einfache, nachrüstbare Lösung, die ohne grundlegende Änderungen an bestehenden Webmaschinen implementiert werden kann. Das Modul ist kostengünstig umsetzbar und an andere Webmaschinen anpass- und einbaubar.

Das Funktionsprinzip zur Verarbeitung umkehrender Kettfäden basiert auf dem Verbinden je zwei definierter Kettfäden vor Beginn der Gewebeerstellung, sodass diese als Schlaufe vorliegen. Die Verbindungsstelle wird aus der Webstelle in Richtung Spulengatter verlagert, sodass sie kein Bestandteil des herzustellenden Gewebes ist. Dieser Vorgang wird wiederholt, bis sämtliche für die Umkehr vorgesehenen Kettfäden zweier Gewebelagen als Schlaufen vorliegen. Um eine, zu den regulär verlaufenden Kettfäden, vergleichbare Kettfadenzugkraft auf die in Schlaufen vorliegenden Kettfäden aufzubringen, werden die Schlaufen mithilfe des Moduls in den Gewebeabzug eingebunden. Die Kettfadenzugkräfte beider Fadentypen wurden mittels eines Fadenzugkraftmessgeräts erfasst und analysiert. Sowohl die geordnete Fixierung der Kettfadenschlaufen als auch die Integration der Schlaufen in den Gewebeabzug stellen zentrale Funktionen des entwickelten Moduls zur Kettfadenumkehr dar.

Einsatz des Funktionsmoduls und Umsetzung der Funktionsmuster

Nach Bildung der Kettfadenschlaufen wird das textile Halbzeug gefertigt. Im ersten Abschnitt des Rohrknötens liegen die schlaufenbildenden Kettfäden zunächst vollständig flottiert vor. Nach Fertigung des ovalen Abzweigungsbereichs werden diese Kettfäden erstmals in regulär in das Gewebe eingebunden. Ab dem ovalen Bereich ist der Einsatz der vier Schützen erforderlich, um die im zweiten Bereich des Rohrknötens übereinanderliegenden Schlauchgewebe darzustellen. Ein Gewebeschütze trägt innerhalb des ovalen Bereichs einen separaten Schussfaden ein, welcher die Ausbildung der ovalen Gewebekante unterstützt. Das gefertigte textile Halbzeug ist in Abbildung 4 dargestellt.

Zur reproduzierbaren Herstellung dieser komplexen Gewebebindung ist eine gleichmäßige Einarbeitung der Schussfäden essenziell. Insbesondere während der Fertigung des ovalen Bereichs müssen die Schussfäden abweichend zu einem regulären Schusseintrag über die volle Gewebebreite innerhalb der Gewebestruktur umkehren. Die präzise Steuerung dieses Prozessschrittes ist entscheidend für die geometrische Genauigkeit der späteren dreidimensionalen

Bauteilform sowie für eine gleichmäßige Faserverteilung innerhalb der Wandstruktur. Die realisierten textilen Halbzeuge sind in Abbildung 4 dargestellt.

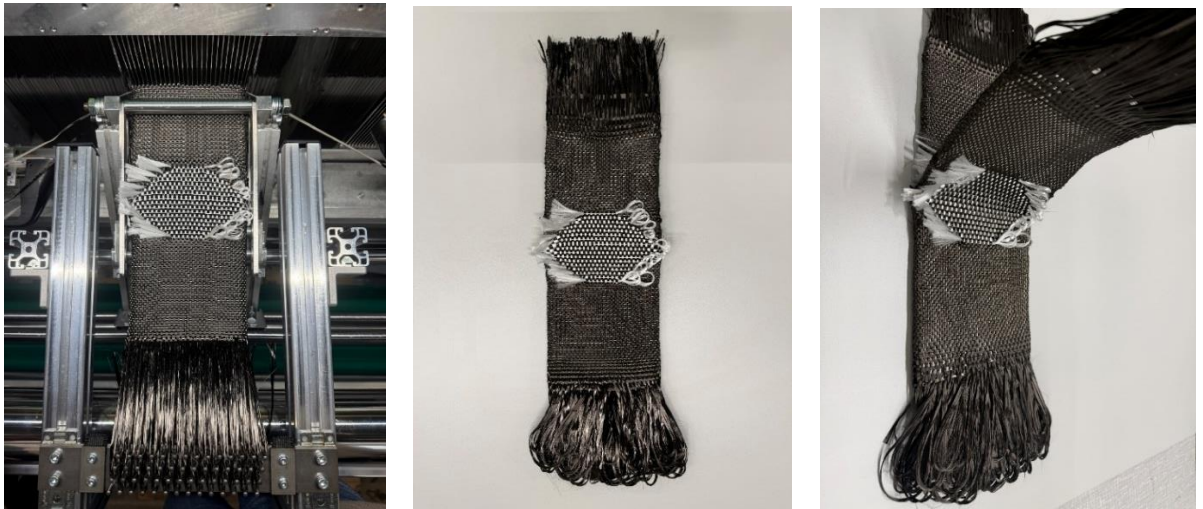


Abbildung 4: Fertigung FM3 (links); flaches Gewebe (mitte); Aufstellnachweis Funktionsmuster (rechts)

Aufstellen und Konsolidieren der gewebten Funktionsmuster

Zur Überführung des 2,5D-Halbzeugs in die dreidimensionale Struktur wird ein speziell für die durchströmbaren Rohrknoten entwickelter, automatisierbarer Aufstellprozess angewendet. Dabei wird ein formgebender Innenkern in die Schlauchstruktur eingesetzt, der die Zielkontur während des Aufstellens definiert. Das Aufstellen erfolgt durch das gezielte Eliminieren der im Zuge der geometrischen Abwicklung eingebrachten Kettfadenmehrlängen. Diese Mehrlängen werden an der Schnittkante des Gewebes aus der Struktur zurückgezogen, wobei dieser Prozessschritt mittels Robotertechnik automatisiert erfolgen kann. Dabei ist eine prozessspezifisch entwickelte Reihenfolge beim Ziehen der flottierenden Kettfäden einzuhalten, um einer Materialschädigung vorzubeugen und reproduzierbar einen präzisen Verlauf der Kettfäden nach dem Aufstellen zu erzielen. Dazu wurde ein Automatisierungskonzept für die Ausformung entwickelt.

Da die Kettfadenschlaufen im ersten Abschnitt des Gewebes bis zur Kante des Ovals flottiert vorliegen, kann die Kettfadenmehrlänge zurückgezogen werden. Auf diese Weise ist diese Kettfadenschar innerhalb des Rohrknotens nur in einer Hälfte des Gewebes eingebunden.

Nachdem das Halbzeug dreidimensional aufgestellt ist, erfolgt die Konsolidierung. Es wurde ein auf die Kontur des durchströmbaren Rohrknotens angepasstes RTM-Werkzeug dimensioniert und technologisch umgesetzt (Abbildung 5). Ergebnis nach der Konsolidierung ist ein konsolidiertes, durchströmbares T-Stück mit hochwertiger Oberflächenqualität und reproduzierbarer Kontur.

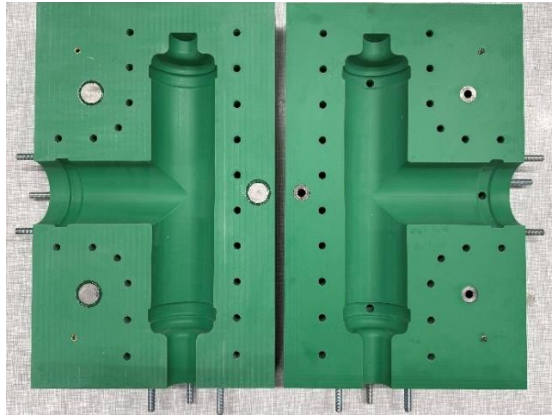


Abbildung 5: RTM-Werkzeug für die Konsolidierung (links); Rohrknoten ausgeformt (rechts)

Die Materialüberdimensionierung im Abzweigungsbereich bei im Wickelverfahren hergestellten FKV-Rohrverzweigungen konnte durch die integrale, gewebebasierte Fertigungsmethode unter Anwendung der umkehrenden Kettfäden vollständig eliminiert werden. Die Wandstärke der Rohrstruktur ist über das gesamte Bauteil konstant.

Zusammenfassung und Ausblick

Es konnten FKV- Rohrverzweigungen mithilfe eines Zusatzfunktionsmoduls für bestehende Schützenwebmaschinen erstmals integral gewebt und zugleich durchströmbar gefertigt werden. Das textile 2,5D-Halbzeug wird dabei in einem einstufigen Webprozess hergestellt. Nach einem speziell für die neuartigen Fadenverläufe entwickelten Ausformverfahren kann das Halbzeug mittels etablierter RTM-Verfahren zu einem belastbaren 3D-Leichtbauteil in Form einer FKV-Rohrverzweigung konsolidiert werden. Die entwickelte Technologie ermöglicht dabei eine lastpfadgerechte Faserorientierung im hochbelasteten Abzweigungsbereich bei gleichzeitiger Sicherstellung einer kontinuierlichen inneren Kavität, wodurch ein wesentlicher Zielkonflikt bisheriger textiler 3D-Knotenstrukturen überwunden wird. Durch die integrale Fertigung ohne nachträgliche Fügeschritte sowie die materialeffiziente lastpfadgerechte Faseranordnung ergibt sich zudem ein erhebliches wirtschaftliches Potenzial in Form reduzierter Materialverbräuche, geringerer Prozessschritte und einer verbesserten Reproduzierbarkeit der Bauteilqualität.

Die entwickelten Gewebearbeiten sowie die zugrunde liegende Methodik können KMU zur industriellen Umsetzung bereitgestellt werden. Die Geometrie des Rohrknötens (Durchmesser, Wandstärke, Rohrlängen sowie Abzweigwinkel) ist mit geringem Anpassungsaufwand individuell variierbar. Neben T-Rohrknötens können mit der neu entwickelten Methodik und Bindungssystematik auch Y-Rohrknötens hergestellt werden, sodass unterschiedliche Topologien anwendungsspezifisch ausgelegt werden können. Die im Rahmen dieses Projekts erzielten Ergebnisse bilden die Grundlage für eine skalierbare und

lastpfadgerechte Fertigung durchströmbarer FKV-Rohrknoten und sind aufgrund der modularen Technologieentwicklung und Bereitstellung von Leitfäden und Handlungsempfehlungen von den KMU der Textil- und Faserverbund-Industrie schnell implementierbar. Zukünftige Arbeiten können insbesondere auf die Erweiterung der Technologie auf größere Rohrdurchmesser, höhere Druckbelastungen sowie automatisierte Serienprozesse ausgerichtet werden. Darüber hinaus besteht Potenzial für den Einsatz in weiteren medienführenden Leichtbaustrukturen mit komplexer Verzweigungsgeometrie.

Danksagung

Das IGF-Vorhaben 01IF22946N der Forschungsvereinigung Forschungskuratorium Textil e.V., Wallstraße 58/59, 10179 Berlin wurde über das DLR im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

Die Autoren danken den genannten Institutionen für die Bereitstellung der finanziellen Mittel. Der Forschungsbericht und weiterführende Informationen sind am Institut für Textilmaschinen und Textile Hochleistungswerkstofftechnik der TU Dresden erhältlich.

Kontakt: anna.happel@tu-dresden.de
<https://tu-dresden.de/ing/maschinenwesen/itm>

Technische Universität Dresden
Fakultät Maschinenwesen
Institut für Textilmaschinen und Textile Hochleistungswerkstofftechnik (ITM)
01062 Dresden

Literatur

- [1] Matthias Hübner; Monireh Fazeli; Thomas Gereke; Chokri Cherif:
Geometrical design and forming analysis of three-dimensional woven node structures. Textile Research Journal 88(2018)2, S. 213-224
- [2] SCHEGNER, P.; FAZELI, M.; SENNEWALD, C.; HOFFMANN, G.; CHERIF, C.: *Technology Development for Direct Weaving of Complex 3D Nodal Structures*. Applied Composite Materials 26(2019)1, S. 423-432