

Simulationsgestützte Entwicklung von 3D-Preformen für homogene VARI-Infiltration komplex geformter dickwandiger Faserkunststoffverbundbauteile

Jakob Melzer, Xiaohui Zhang, Gerhard Ziegmann, Chokri Cherif,

Institut für Textilmaschinen und Textile Hochleistungswerkstofftechnik (ITM) der TU Dresden
Institut für Polymerwerkstoffe und Kunststofftechnik (PUK) der TU Clausthal

Abstrakt

Im Rahmen des IGF-Forschungsprojekts „3D-Permeabilität“ wurde eine simulationsgestützte Prozesskette zur Fertigung von Preformen mit textiltechnisch integrierten Harzfließkanälen entwickelt. Die experimentelle Validierung erfolgte anhand eines 90°-Rohrbogens. Dabei konnte nachgewiesen werden, dass durch den kombinierten Einsatz numerischer Simulationsmethoden und die Modifikation konventioneller Flachstrickautomaten dickwandige, geometrisch komplexe Faserkunststoffverbundbauteile mittels Vakuuminfusion (VARI) prozesssicher und mit homogener Harzverteilung hergestellt werden können. Die entwickelte Prozesskette bietet eine hochautomatisierbare Alternative zum konventionellen Handlaminierverfahren.

Einleitung und Problemstellung

Die Fertigung gewinkelter Rohrstücke, Flanschstutzen und Abzweigungen für Rohrleitungssysteme in der chemischen Industrie erfolgt gegenwärtig nahezu ausschließlich im Handlaminierverfahren (HLV). Dieses zeit- und kostenintensive Verfahren ist derzeit alternativlos, da bestehender hohe Anforderungen an die Wärmebeständigkeit, Flammhemmung (ASTM E-84-98, EN 13121-1, DIN 18820-1) sowie Chemikalienresistenz bestehen [1,2]. Die komplexen Bauteilgeometrien sowie die großen Wandstärken bis 35 mm führen bei der Harzinfusion zu inhomogenen Fließfrontverläufen, stark variierenden Harzfließwegen und zu Poren (Lunker) oder trockenen Stellen und machen aktuell das HLV alternativlos.

In Kooperation zwischen dem Polymerkompetenzzentrum (PUK) der TU Clausthal und dem Institut für Textilmaschinen und Textile Hochleistungswerkstofftechnik (ITM) der TU Dresden wurden neuartige Funktionsfadenstrukturen und Textilkonstruktionen entwickelt, die temporäre Strömungskanäle mit frei wählbarer Ausrichtung in einfach gekrümmte Bauteile integrieren. Als Vorzugslösung wurde die Komprimierung von Kettfäden durch Umwinden mit Garnen aus niedrighochschmelzendem Copolyester (z.B. Grilon KE60 330 dtex) identifiziert. Dieser Ansatz adressiert die wesentlichen Nachteile des HLV: die mangelnde Reproduzierbarkeit der Faserorientierung mit entsprechend hoher Streuung der mechanischen Verbundeigenschaften sowie die gesundheitliche Belastung durch offene Verarbeitung toxischer Harzsysteme.

Um das VARI Verfahren letztendlich auch für die Fertigung komplex geformter Bauteile anwenden zu können und darüber hinaus für Bauteilfertigungen ab Losgröße 1 als Alternative zum HLV zu etablieren, wurde eine Prozesskette aus Entwicklungs- und Fertigungsprozessen mit hohem Automatisierungsgrad entwickelt.

Zielsetzung

Im Zentrum des Projekts stand die Entwicklung einer Prozesskette, die exemplarisch anhand eines 90°-Rohrbogens (DN80, Druckklasse PN10) mit einer FKV-Wandstärke von ca. 4 mm und einem inneren Krümmungsradius von 60 mm erarbeitet wurde.

Zur Gewährleistung einer weitgehend porenfreien und zugleich zeiteffizienten Harzinfusion war die präzise Bestimmung des Harzfließkanalverlaufs sowie eine strömungsgünstige Positionierung der Angussstellen mittels 3D-Infusionssimulation erforderlich. Weiterhin musste eine textile Fertigungstechnologie derart befähigt werden, dass die entsprechenden strömungsgerechten und lastpfadgerechten textile Verstärkungsstrukturen gefertigt werden können. Für das Projekt wurde aufgrund der damit herstellbaren hohen Variantenvielfalt exemplarisch die hochflexible Biaxial-Flachstricktechnologie betrachtet.

Projektdurchführung und Ergebnisse

3D-INFILTRATIONSSIMULATION FÜR 3D-FKV-STRUKTUREN MIT INTEGRIERTEN HARZFLIEßKANÄLEN

Bei komplexen 3D-Faser-Kunststoff-Verbund-(FKV-)Strukturen treten insbesondere in gekrümmten Bereichen lokale Unterschiede der Harzfließgeschwindigkeit auf. Diese Effekte sind unter anderem auf eine ortsabhängige Permeabilität zurückzuführen und stellen eine zentrale Herausforderung bei Infusionsprozessen dar [3,4]. Darüber hinaus kann die Bauteilqualität während des Fertigungsprozesses durch verschiedene Faktoren wie unzureichende Harzverteilung, Lufteinschlüsse oder ungleichmäßige Benetzung beeinflusst werden. Numerische Simulationen ermöglichen es, solche potenziellen Probleme bereits in einer frühen Entwicklungsphase zu identifizieren und zu analysieren [5].

Abbildung 1 zeigt drei numerische Simulationsergebnisse einer des Harzflusses während des Infusionsprozesses in einem dreidimensional porösen Medium in Rohrbogengeometrie. Die dargestellten Infusionsstrategien unterscheiden sich hinsichtlich der Angusspositionierung: Strategie (a) und (b) verwenden eine punktförmige Injektion am inneren bzw. äußeren Rohrbogen. Beide Varianten führen zu asymmetrischen Fließfrontverläufen, wobei sich die Fließfronten am Bauteilende vereinigen. Im Gegensatz dazu ermöglicht die Strategie (c) mit ringförmiger Injektion eine gleichmäßigere und stabilere Fließfront, reduziert lokale Druckgradienten und erlaubt durch den Einsatz von Harzfließkanälen (HFK) eine robuste Prozessführung, weshalb sie als bevorzugte Infusionsstrategie für die Fertigung der 3D-gekrümmten FKV-Struktur gewählt wurde.

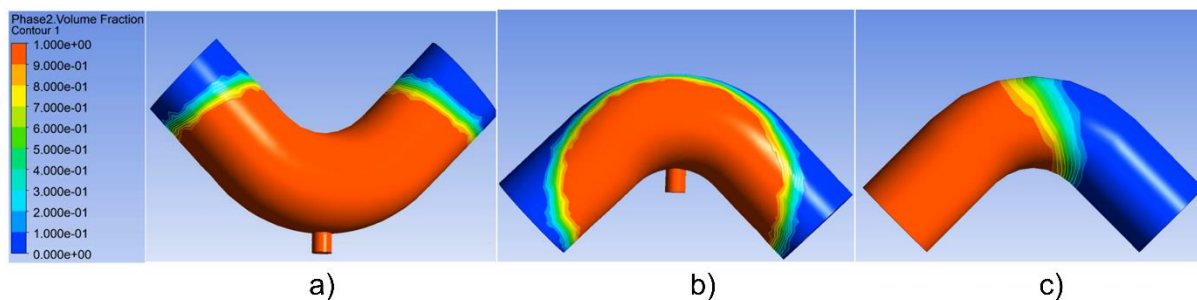


Abbildung 1: Numerische Simulation der Harzfließfront in einer 3D-gekrümmten FKV-Struktur bei unterschiedlichen Infusionsstrategien: (a) äußere Punktinjektion, (b) innere Punktinjektion, (c) ringförmige Injektion.

Abbildung 2 zeigt die zeitabhängige Sättigung des Fluids in einer numerischen Simulation des Harzflusses während des Infusionsprozesses in einem dreidimensionalen porösen Medium in Form eines Rohrbogens mit integriertem HFK. Die HFK sind regelmäßig entlang der Bauteilkontur angeordnet. In der Darstellung kennzeichnen blaue Bereiche die harzgesättigten Zonen, während weiße Bereiche luftgefüllte Regionen repräsentieren. Die initiale Harzinfiltration ist ringförmig im Bereich des Einlasses erkennbar. Im weiteren Prozessverlauf breitet sich das Harz entlang der gekrümmten Geometrie aus und infiltriert sukzessive größere Bereiche der Struktur. Die Darstellung verdeutlicht zunächst eine ungleichmäßige Entwicklung der Fließfront, die auf die längeren Fließwege im äußeren Rohrbogen zurückzuführen ist. Durch den Einsatz der HFK wird jedoch die lokale Permeabilität erhöht, wodurch der Infusionsprozess beschleunigt und die Durchtränkung der 3D-gekrümmten Struktur verbessert wird. Eine gezielte Platzierung der Fließkanäle ermöglicht zudem eine weitere Homogenisierung der Fließfront, was zu einer erhöhten Bauteilqualität des Verbundwerkstoffs führt.

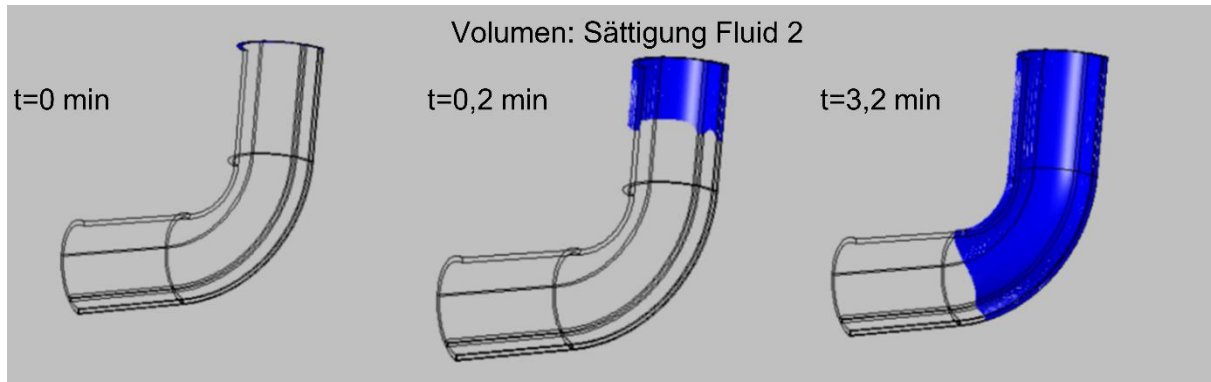


Abbildung 2: Verteilung der Fließfront in einer 3D-gekrümmten Struktur mit HFK bei $t = 0, 0.2, 3.2 \text{ min}$

Die Bestimmung der Infusionsstrategie mittels Simulation stellt einen wesentlichen ersten Schritt bei der Auslegung und Fertigung von 3D-FKV-Strukturen dar. Durch die simulationsgestützte Prozessplanung kann die gezielte Platzierung von HFK realisiert werden, wodurch eine gleichmäßige Durchtränkung über den gesamten Bauteilquerschnitt erreicht wird

TEXTILTECHNISCHE ENTWICKLUNG VON PREFORMEN MIT INTEGRIERTEN REVERSIBLEN HFK

Zur Realisierung der prozessintegrierten Kettfadenkomprimierung durch Umwinden (siehe Abbildung 3: Kettfaden-Komprimierungsmodul) wurde ein Hohlwellenmotor implementiert, durch den der zu komprimierende GF-Roving vom Kettfadenspeicher zur Strickstelle geführt wird. Das Umwindeverfahren gliedert sich in drei Phasen: Zunächst erfolgt die Fixierung des Umwindefadens durch eine im Verhältnis zur Kettfadenvorschubgeschwindigkeit hohe Umwindungsgeschwindigkeit. Anschließend wird mit konstanter, an die Vorschubgeschwindigkeit angepasster Drehzahl umwickelt, wodurch eine gleichmäßige Komprimierung des Kettfadens erreicht wird. Systematische Untersuchungen des Komprimierungsmechanismus ergaben einen optimalen Wert von 400 T/m. Zum Abschluss wird durch schnelles Über- und Umwickeln eine Verankerung des Grilon®-Umwindefadens auf dem GF-Kettfaden erzeugt.

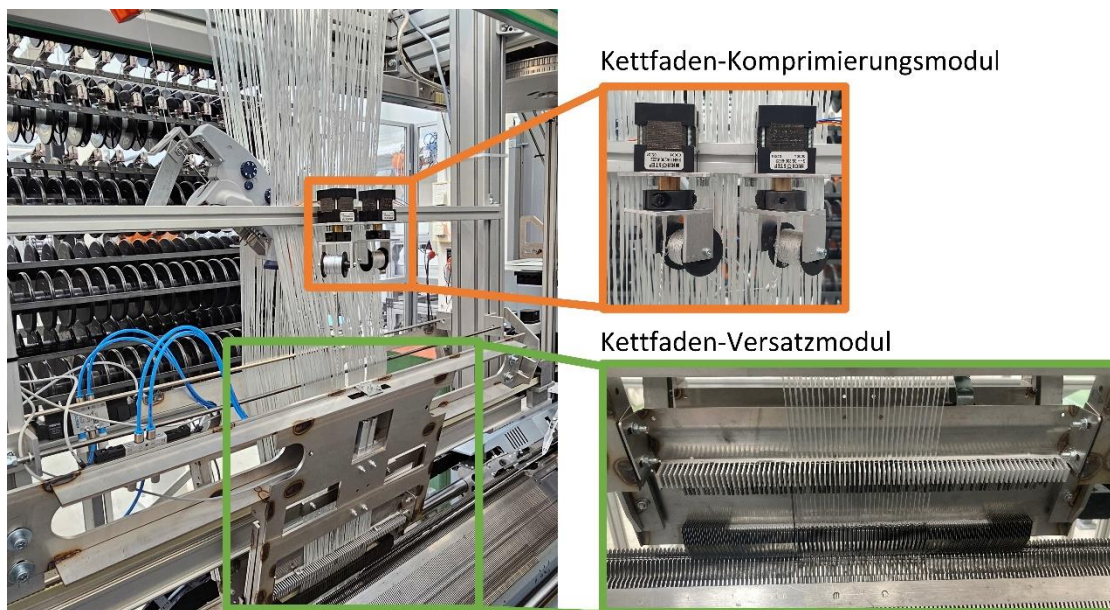


Abbildung 3: Kettfaden-Komprimierungsmodul & Kettfaden-Versatzmodul an der mit Ovalführung modifizierten Flachstrickmaschine Steiger Aries 3 am ITM

Mit dem Ziel der Validierung der Infiltrationssimulation des PUK wurde im zweiten Schritt die Möglichkeit zur lokalen Anpassung der Permeabilität in dickwandigen zweidimensionalen Strukturen geschaffen. Die Validierung erfolgte anhand eines um 90° abgewinkelten Bandes mit differierenden Fließwegen entlang der Innen- und Außenkontur. Ein kontinuierlicher Verlauf der Kettfadenverstärkung und die endkonturnahe Fertigung der Preform erfolgten durch die Nutzung der Formgebungsmöglichkeiten der Mehrlagenstricktechnik, insbesondere durch Integration von Teilschüssen.

Die globale Permeabilitätsanpassung entsprechend der 3D-Infiltrationssimulation des PUK musste durch die lokale Modifikation der Fließgeschwindigkeiten durch Variation der Anzahl und Anordnung der HFK erfolgen. Dies erforderte die Verjüngung bzw. die Erweiterung der Gestrickstruktur bei konstanter Verstärkungsfadenanzahl. Hierfür war die Entwicklung einer neuen Kettfadenschiene nötig (siehe Abbildung 3: Kettfaden-Versatzmodul). Diese ermöglicht in Kombination mit dem Maschentransfer teilungsgerechte, laterale Versatzbewegung von einzelnen oder Scharen von Kettfäden im Gestrick. Basierend auf den am ITM vorhandenen Erfahrungen zur Verstärkungsfadenzuführung an Textilmaschinen wurde eine bestehende Kettfadenschiene

weiterentwickelt und an der Flachstrickmaschine Steiger Aries.3 mit Ovalführungssystem implementiert. Für die Zuführung und den Versatz von modifizierten und nicht modifizierten Kettfäden wurden dabei die entsprechenden Kettfadenführer konstruktiv umgesetzt.

Aus der großen Variantenvielfalt herstellbarer Geometrien wurden exemplarisch 90°-Rohrbögen (DN80, Druckklasse PN10) mit einer FKV-Wandstärke von ca. 4 mm und einem inneren Krümmungsradius von 60 mm gefertigt (Abbildung 4). Die Realisierung der Rohrkrümmung erforderte eine Synchronisation der separat angesteuerten Komponenten: Ovalführung, verstellbare Kettfädenschiene, Umwindemodul sowie Strickprozess mit Teilschüssen. Beim Vollschusseintrag werden alternierend über die gesamte Strickbreite (hier 41 Nadeln) zunächst eine Maschenreihe am hinteren Nadelbett und anschließend eine Maschenreihe am vorderen Nadelbett gestrickt. Die Ovalführung bewegt sich im konventionellen Betrieb in einer kontinuierlich umlaufenden Bewegung mit konstanter Bewegungsrichtung und legt den Schussfaden alternierend am hinteren und vorderen Nadelbett ab. Bei einem Teilschusseintrag wiederum, wurde die Steuerung der Ovalführung so programmiert, dass aufgrund der resultierenden Abweichung zwischen letzter ausgewählter Nadel und der letzten Nadel im Strickbereich (d. h. bei Vollschuss) automatisch ein Teilschuss erkannt wird und demnach die Richtung der Ovalführung für die nächste Maschenreihe auf denselben Nadelbett (z. B. vorne) entsprechend geändert wird. Einen Teilschusseintrag erstreckt sich prinzipbedingt immer über 4 Maschenreihen um Vorder- und Rückseite symmetrisch zu gestalten und die ungleichmäßigen Materialspannungen über die Maschinenbreite im Abzug auszugleichen.

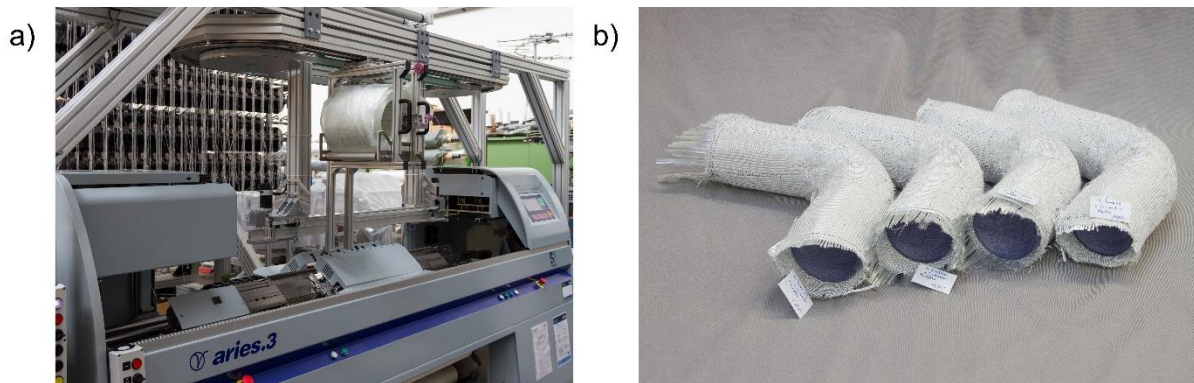


Abbildung 4: a) Aries.3 mit Ovalführung b) Preformen von Rohrbögen mit last- und flußgerechten Verstärkungsfadenlagen

Zusammenfassung

Im Rahmen des IGF-Forschungsprojekts "3D-Permeabilität" wurde eine simulationsgestützte Prozesskette zur Fertigung von Preformen mit textiltechnisch integrierten Harzfließkanälen entwickelt. Die Prozesskette ermöglicht die Herstellung von dickwandigen, geometrisch komplexen Faserkunststoffverbundbauteilen mittels Vakuuminfusion (VARI) mit homogener Harzverteilung. Durch die Kombination von numerischen Simulationsmethoden und der Modifikation konventioneller Flachstrickautomaten konnte eine hochautomatisierbare Alternative zum konventionellen Handlaminierverfahren entwickelt werden. Die Ergebnisse zeigen, dass die entwickelte Prozesskette eine präzise Bestimmung des Harzfließkanalverlaufs und eine strömungsgünstige Positionierung der Angussstellen ermöglicht, was zu einer verbesserten Bauteilqualität führt. Die entwickelte Technologie bietet ein großes Potenzial für die Fertigung von komplexen Bauteilen in der chemischen Industrie

Danksagung

Das IGF-Vorhaben 22908 BG 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. Die Autoren danken den genannten Institutionen für die Bereitstellung der finanziellen Mittel. Weiterhin danken wir den Firmen des projektbegleitenden Ausschusses für die fachliche Unterstützung sowie allen weiteren Partnern, die in der Forschungsarbeit zu diesem Themenkreis unterstützten. Der Schlussbericht ist über den Gesamtverband der deutschen Textil- und Modeindustrie e. V., Berlin beziehbar. Weiterführende Informationen sind am Institut für Textilmaschinen und Textile Hochleistungswerkstofftechnik (ITM) oder am Institut für Polymerwerkstoffe und Kunststofftechnik (PUK) erhältlich.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Autoren: Jakob Melzer, Xiaohui Zhang, Prof. Chokri Cherif, Prof. Gerhard Ziegmann

Kontakt: jakob.melzer@tu-dresden.de

xiaohui.zhang@tu-clausthal.de

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

<https://tu-dresden.de/mw/itm>

Technische Universität Clausthal
Institut für Polymerwerkstoffe und Kunststofftechnik
38678 Clausthal-Zellerfeld

<https://www.puk.tu-clausthal.de/>

Referenzen

- [1] A.-I. V. Ku, *Handbuch Faserverbundkunststoffe: Grundlagen, Verarbeitung, Anwendungen*. Springer-Verlag, 2009.
- [2] "DECHEMA | Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V." Accessed: Jan. 07, 2026. [Online]. Available: <http://www.dechema.de/>

- [3] D. May *et al.*, “In-plane permeability characterization of engineering textiles based on radial flow experiments: A benchmark exercise,” *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.*, vol. 121, pp. 100–114, Jun. 2019, doi: 10.1016/j.compositesa.2019.03.006.
- [4] R. Tonndorf, D. Aibibu, and C. Cherif, “Isotropic and Anisotropic Scaffolds for Tissue Engineering: Collagen, Conventional, and Textile Fabrication Technologies and Properties,” *Int. J. Mol. Sci.*, vol. 22, no. 17, p. 9561, Jan. 2021, doi: 10.3390/ijms22179561.
- [5] D. Abliz and G. Ziegmann, “Liquid Composite Molding Processes,” in *Acting Principles of Nano-Scaled Matrix Additives for Composite Structures*, M. Sinapius and G. Ziegmann, Eds., Cham: Springer International Publishing, 2021, pp. 79–88. doi: 10.1007/978-3-030-68523-2_5.