

# Schlussbericht

zu IGF-Vorhaben Nr. 18315 BG

## Thema

Entwicklung eines simulationsgestützten Verfahrens zur schnellen Imprägnierung großer und komplexer Strukturen auf Basis neuartiger textiler Halbzeuge mit integrierten temporären Strömungskanälen

## Berichtszeitraum

01.01.2016 - 28.02.2019

## Forschungsvereinigung

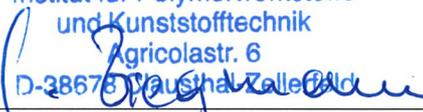
DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V.

## Forschungseinrichtungen

1. Institut für Polymerwerkstoffe und Kunststofftechnik (PUK), TU Clausthal
2. Institut für Textilmaschinen und Textile Hochleistungswerkstofftechnik (ITM), TU Dresden

Clausthal, 14.06.2019

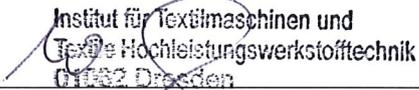
Ort, Datum

  
Institut für Polymerwerkstoffe  
und Kunststofftechnik  
Agricolastr. 6  
D-38678 Clausthal-Zelle  


Prof. Dr.-Ing. Gerhard Ziegmann (PUK, TU Clausthal)

Dresden, 14.06.2019

Ort, Datum

  
TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DRESDEN  
Institut für Textilmaschinen und  
Textile Hochleistungswerkstofftechnik  
01062 Dresden  


Dr.-Ing. Wolfgang Trümper (ITM, TU Dresden)

Gefördert durch:

## *Zusammenfassung*

Ziel des interdisziplinären, branchenübergreifenden Projektes war die Entwicklung eines Verfahrens zur simulationsgestützten, textiltechnischen Integration temporärer, sich nach der Infiltration schließender Strömungskanäle in Verstärkungshalbzeuge. Im zu entwickelnden Verfahren sollten die Infiltrationszeiten zur Herstellung komplex geformter, großflächiger FKV-Strukturen mit homogener Faserverteilung im Infusionsverfahren in reproduzierbar hoher Qualität drastisch reduziert werden. Im Fokus stand hierbei die Variation der Permeabilität der Halbzeugstruktur durch die Integration von Kanälen für die Optimierung des Infiltrationsprozesses. Dafür wurden am ITM neuartige Funktionsfadenstrukturen und Textilkonstruktionen mit temporären Strömungskanälen entwickelt. Für grundlegende Permeabilitätsuntersuchungen erfolgten die Entwicklung und Umsetzung textiler Funktionsmuster mit fertigungstechnisch integrierten Strömungskanälen in Schuss- und in Kettrichtung. Darüber hinaus wurde eine Anordnung der Strömungskanäle mit davon abweichender, frei wählbarer Ausrichtung für 3-dimensionale komplexe Bauteile entwickelt. Für eine dennoch homogene Faser-Matrixverteilung im Bauteil und somit gleichbleibend hohen mechanischen Eigenschaften konnten die Strömungskanäle nach dem Infiltrationsprozess aber vor Abschluss der Harzvernetzungsreaktion wieder geschlossen werden, indem die Funktionsfäden im Harzsystem temperaturinduziert aufgelöst und die komprimierten Rovings freigegeben wurden. Für die erfolgreiche Steuerung dieses Prozesses wurden die Wechselwirkungen und Zusammenhänge zwischen der Dimensionierung (Höhe, Breite) und Anordnung der Strömungskanäle, dem temperaturabhängigen Auflöseverhalten der Funktionsfäden und der Prozessparameter bei der Harzinfiltration, im Hinblick auf die Modellaufbereitung für eine Fließsimulation systematisch untersucht. Mit Hilfe geeigneter Messmethoden wurde die Ausbreitung der Fließfronten in den Strömungskanälen und Verstärkungsfasern (Dual-Scale-Eigenschaften) der Funktionsmuster charakterisiert. Diese Ergebnisse sind Voraussetzung für die gezielte Anpassung der Simulationswerkzeuge für eine zielgerichtete Auslegung der textilen Halbzeuge. Der Nachweis einer erfolgreichen simulationsgestützten Auslegung derartiger Strukturen erfolgte anhand der Umsetzung von zwei Demonstratoren (Klöpferboden, Motorhaube). Die Ergebnisse zeigen, dass je nach Bauteilgröße und Komplexität unter Verzicht von Fließhilfen eine Reduktion der Infiltrationszeiten von bis zu 50% erreicht werden kann. Somit ist eine wesentliche Steigerung der Wirtschaftlichkeit der Bauteilherstellung ohne Beeinträchtigung der Imprägnierqualität realisierbar. Mit Unterstützung des branchenübergreifend zusammengesetzten projektbegleitenden Ausschusses wurden von den FE die ermittelten Ergebnisse für eine breite industrielle Anwendung von Harzinfusionsverfahren als Leitfaden für die KMU zusammengefasst, der diesen nach Projektende zur Verfügung steht.

**Das Ziel des Forschungsprojekts wurde erreicht.**

## *Danksagung*

Das IGF-Vorhaben 18315 BG der Forschungsvereinigung DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V., Theodor-Heuss-Allee 25, 60486 Frankfurt am Main 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 PA für die fachliche Unterstützung sowie die Bereitstellung von Versuchsmaterial.

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Ashland Industries Deutschland GmbH

BÜFA Composite Systems GmbH & Co. KG

Cosmol Multiphysics GmbH

EMS-CHEMIE (Deutschland) GmbH

Euros mbH

F. A. Kümpers GmbH & Co. KG

FIBER-TECH Products GmbH

Hexion GmbH

Kobleder GmbH

P-D Glasseiden GmbH

RCS GmbH

SGL Carbon SE

STEULER-KCH GmbH

STS Textiles GmbH & Co. KG

sys-T-matic

Tartler GmbH

DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V.

Strucnamics Engineering GmbH

## Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Problemstellung .....	5
2	Stand der Technik.....	7
2.1	Angepasste Faserverbundhalbzeuge.....	7
2.2	Permeabilität .....	8
2.3	Eigene Vorarbeiten .....	10
3	Zielsetzung und Lösungsweg .....	13
4	Arbeitsschritte .....	15
4.1	Definition von Funktionsmustern und FKV-Demonstratoren, Ableitung des Anforderungsspektrums sowie Materialauswahl und -charakterisierung.....	15
4.2	Bindungstechnische Modellierung biaxial verstärkter ebener Halbzeuge mit textiltechnisch integrierten Strömungskanälen und Generierung geometrischer 3D-Modelle .....	17
4.3	Entwicklung einer Methode zur Quantifizierung von Dual-Scale-Effekten.....	23
4.4	Entwicklung und Umsetzung modifizierter Funktionsfäden bzw. -fadenstrukturen....	31
4.5	Experimentelle Untersuchungen zur Umsetzung textiler 2D-Funktionsmuster mit textiltechnisch integrierten Strömungskanälen .....	39
4.6	Charakterisierung der Textilhalmbeuge im Hinblick auf die Strömungskanäle, die Kompaktierungseigenschaften und die Imprägnierbarkeit.....	43
4.7	Makro- und Meso-Modellierung der Dual-Scale-Eigenschaften als Funktion der textilen Eigenschaften des Halbzeuges.....	51
4.8	Untersuchungen zur Auswirkung der Strukturbeeinflussung auf die mechanischen Eigenschaften mit und ohne Auflösung des Funktionsfadens .....	53
4.9	Demonstratorherstellung, Analyse und Interpretation der Arbeitsergebnisse.....	57
4.10	Erstellung von KMU-Leitfaden und Wirtschaftlichkeitsbetrachtung.....	62
5	Gegenüberstellung der Projektziele mit den Projektergebnissen .....	67
6	Verwendung der Zuwendung und Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	70
7	Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen der erzielten Projektergebnisse .....	71

8	Innovativer Beitrag und industrielle Anwendungsmöglichkeiten der Forschungsergebnisse .....	73
9	Fortgeschriebener Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft .....	74
10	Abbildungsverzeichnis .....	77
11	Tabellenverzeichnis .....	79
12	Abkürzungsverzeichnis .....	80
13	Literaturverzeichnis .....	80

## 1 Einleitung und Problemstellung

Der Stellenwert des Leichtbaus nimmt aufgrund des globalen Strebens nach Energie- und Ressourceneffizienz stetig zu. Konventionelle metallische Konstruktionswerkstoffe können die Leichtbauanforderungen nur teilweise befriedigen und werden zunehmend durch hochfeste Faserkunststoffverbunde (FKV) ersetzt. Während der Projektlaufzeit wuchs der Markt für FKV aus Glasfaserverstärkung (GF) kontinuierlich um 2 % jährlich, wobei die Infusionsverfahren gegenüber anderen Herstellungsverfahren einen überdurchschnittlichen Anstieg aufwiesen. Für die kommenden Jahre wird weiterhin ein stetiges Wachstum des FKV-Markts vorhergesagt [1]. Der weitere Ausbau von Anwendungsfeldern erfordert eine kosteneffizientere Fertigung u.a. durch Minimierung der Produktionskosten und -zeiten sowie die Bereitstellung hochqualitativer und hochbelastbarer FKV. Für einen industriellen Durchbruch wird eine Reduzierung der Fertigungskosten um bis zu 90 % gefordert [2]. Besonders für mittlere und große Bauteilserien, z.B. im Fahrzeug-, Maschinen- und Anlagenbau, ist es notwendig, die Materialeigenschaften in geschickter Weise voll auszunutzen und kurze Prozesszykluszeiten zu gewährleisten. Ziel der Untersuchungen im vorliegenden Projekt ist daher, die Entwicklung einer Technologie zur Minimierung der Taktzeiten der FKV-Herstellung ohne negative Beeinträchtigung der mechanischen FKV-Bauteileigenschaften voranzutreiben.

Neben Prepregs, die aufgrund hoher Halbzeug- und Verarbeitungskosten nur in ausgewählten Bereichen (z.B. Motorsport, Luftfahrt) Anwendung finden, werden in der Industrie immer häufiger das sogenannte Liquid Composite Moulding-Verfahren eingesetzt. Hierzu zählen das Resin-Transfer-Moulding (RTM) und das Vacuum Assisted Resin Infusion (VARI). Beim RTM-Verfahren werden trockene textile Halbzeuge lagenweise oder als Preform in ein zweiseitiges Werkzeug eingelegt. Nach Verschließen des Werkzeugs wird ein niedrigviskoses, meist duromeres Matrixsystem mit Überdruck injiziert. Durch Evakuierung der Form vor der Infiltration können eine Blasenbildung minimiert und eine durch Lufteinschlüsse verursachte Reduktion der mechanischen Eigenschaften vermieden werden [3]. Nach vollständiger Imprägnierung wird das Harz meist bei erhöhter Temperatur ausgehärtet. Anschließend kann das Bauteil entformt und nachbearbeitet werden. Der Prozess mit geschlossener Form erlaubt die Serienfertigung endkonturnaher, formfallender Bauteile. Nachteilig bei diesem Verfahren sind die hohen, durch sehr langen Fließwege bei der Harzinfiltration bedingte Taktzeiten von oft mehreren Stunden insbesondere bei der Umsetzung großer bzw. komplexer Bauteile, wie sie sehr häufig, z.B. im Chemie- und Anlagenbau, im Maschinenbau sowie in der Windenergie vorkommen. Zusätzlich entstehen insbesondere in komplex geformten Preformbereichen oft trockene Stellen und damit Fehlstellen im Verbundbauteil, da diese Bereiche häufig stark kompaktiert und dadurch schwer zu infiltrieren sind. In der Praxis werden zur Beschleunigung der Harzverteilung und Verbesserung der Imprägnierqualität deshalb

komplexe Füllsysteme mit mehreren Angüssen und Vakuumentlüftungen oder Tauchkanalwerkzeuge eingesetzt. In diesem Zusammenhang wurden spezielle Sonderverfahren entwickelt, wie das Spaltimprägnierverfahren oder das Fast-Injection-Moulding, wobei hier ein wesentlicher Nachteil in dem erheblichen Mehraufwand bei der Werkzeuggestaltung und -herstellung besteht. Die Herstellung großflächiger Bauteile, meist im sog. VARI-Verfahren, erfordert die Verwendung aufwendiger Harzverteiler- und Fließunterstützungssysteme. Die Auslegung und Anordnung der Systeme erfolgt häufig auf Basis von Erfahrungswerten und den Ergebnissen zeitaufwendiger, experimenteller Versuche im Trial-and-Error-Verfahren. Zusätzlich ist der Infiltrationsaufbau generell sehr komplex und durch einen hohen Anteil manueller Arbeit sehr zeitaufwändig [4]. Die im Anschluss an die Bauteilaushärtung meist erforderliche Entfernung von Fließhilfen und Harzverteilermedien führt zudem zu einem hohen Abfallaufkommen. Für eine wirtschaftliche Fertigung sind jedoch kurze Zykluszeiten und eine hohe Fertigungsqualität bei effizientem Materialeinsatz unumgänglich.

Die Infiltrationszeit wird durch das Imprägnierverhalten der Verstärkungsstruktur bestimmt [5] und kann über die Materialkenngröße Permeabilität beschrieben werden. Die Morphologie bzw. geometrische Struktur des zu imprägnierenden, porösen Mediums [6, 7] und damit des textilen Halbzeuges sind bestimmend für die Permeabilität. Die geometrische Struktur der textilen Halbzeuge ist eine Funktion des textilen Fertigungsverfahrens, der eingesetzten Fadenmaterialien, der gewählten Bindungsart, der Fadenorientierung und der Maschineneinstellwerte. Ein Ansatz zur Erhöhung der Permeabilität textiler Halbzeuge und zur Verkürzung der Infiltrationszeit besteht in der gezielten Einbringung großer, ungestörter Fadengassen als Strömungskanäle zwischen den Rovings. Existierende Ansätze sind auf offenbleibende, unidirektionale Strömungskanäle beschränkt [8], die allerdings aufgrund des ungleichmäßigen Fasergehaltes zu einer Verringerung der mechanischen Eigenschaften des FKV [6, 9] führen. Eine flexiblere Harzverteilung ist auch mit zusätzlich eingebrachten, hochpermeablen Schichten (Fließhilfen) zwischen den textilen Lagen erreichbar [10]. Allerdings stellen diese Fließhilfen Störstellen mit verringerten mechanischen Eigenschaften im FKV dar. So wurde in diesem Projekt nach einem neuen Ansatz gesucht, um die teilweise mehrstündige Harzinfiltration, die bei der Herstellung großflächiger, komplexer FKV-Bauteile bis zu 50 % der Fertigungszeit betragen kann [11], zu verkürzen.

Ein erfolgversprechender Ansatz zur Erreichung hoher Faservolumenanteile (FVG), guter mechanischer Kennwerte, signifikant kürzerer Infiltrationszeiten und einer hohen Bauteilqualität ist die gezielte Integration temporärer, sich nach dem Infiltrationsprozess schließender Strömungskanäle mit großem Querschnitt in textile Halbzeuge. Durch die Beschleunigung und die gezielte Steuerung des Harzflusses ist so eine deutlich schnellere und bessere Im-

prägnierung textiler Strukturen bei der Herstellung großflächiger und komplexer FKV-Bauteile erreichbar. 11 Das Schließen der Strömungskanäle wird hierbei über den Einsatz matrixlöslicher Funktionsfäden realisiert. Hinsichtlich der Anordnung und der konkreten Dimensionierung der temporären Kanäle, der Auflösung der Funktionsfäden sowie der Entwicklung simulationsgestützter Methoden für eine zukünftige, zielgerichtete Entwicklung permeabilitätsangepasster textiler Strukturen besteht hoher Forschungsbedarf.

## **2 Stand der Technik**

### **2.1 Angepasste Faserverbundhalbzeuge**

Die Verwendung trockener Faserstrukturen (z.B. Gewebe, Gelege, Gestricke) hat für die FKV-Bauteilherstellung mit einem definiert hohen Faservolumengehalt einen sehr großen Stellenwert [12]. Die vollständige Imprägnierung der Fasern mit Harz ist dabei entscheidend für die mechanischen Eigenschaften des FKV-Bauteils, wobei die Dauer der Infiltration maßgeblich die Kosten der Herstellung und damit des Bauteils bestimmt.

Zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit ist die Reduktion der Infiltrationsdauer insbesondere bei der Herstellung großflächiger bzw. komplex geformter Bauteile für Serienanwendungen von höchster Priorität. Ein Ansatz hierzu ist die Anpassung des Fertigungsprozesses z. B. durch Verwendung spezieller Werkzeugkonzepte, wie das Spaltimprägnierverfahren [13], das Fast-Injection-Moulding / Polyflex [14] und das Compression-RTM [15]. Alle Verfahren beruhen im Wesentlichen auf dem Prinzip, durch Erhöhung des Infiltrationsdrucks eine schnellere Imprägnierung der textilen Strukturen zu erreichen. Zur Sicherstellung einer hohen und reproduzierbaren Bauteilqualität unter Einhaltung erforderlicher Bauteiltoleranzen ist jedoch die Verwendung komplexer und teurer Werkzeuge erforderlich, was nur für eine Großserienbauteilfertigung wirtschaftlich darstellbar ist. Zusätzlich führen die hohen Infiltrationsdrücke häufig zu starken Schädigungen der textilen Halbzeuge (fibre washing).

Ein weiterer Ansatz ist die Anpassung der Textilmorphologie und somit der Permeabilität der Faserhalbzeuge durch die gezielte Einbringung großer, ungestörter Fadengassen als Strömungskanäle zwischen den Rovings. Erste Ansätze sind auf bleibende, unidirektionale Strömungskanäle beschränkt [8], die allerdings aufgrund des ungleichmäßigen Fasergehaltes zu einer Verringerung der mechanischen Eigenschaften des FKV [6, 9] führen. Eine flexiblere Harzverteilung ist auch mit zusätzlich eingebrachten, hochpermeablen Schichten (Fließhilfen) zwischen den textilen Lagen erreichbar [10]. Allerdings stellen diese Fließhilfen Störstellen im FKV dar und die Imprägnierdauer bleibt hoch.

Durch die im Rahmen des Projekts angestrebte, gezielte Integration temporärer Strömungskanäle mit geeignet ausgebildeten Querschnitten in die textilen Strukturen besteht ein hohes

Potenzial zur Steigerung der Permeabilität und damit zur signifikanten Reduktion der Infiltrationszeit bei niedrigerem Druckgradienten. Die genannten Nachteile bezüglich der mechanischen Eigenschaften sind somit vermeidbar. Gleichzeitig ist der Einsatz preisgünstiger Werkzeuge möglich. Im Ergebnis der von den Antragstellern durchgeführten Literatur- und Patentrecherchen ist festzustellen, dass bisher keine derartigen Ansätze verfolgt werden.

Die Umsetzung temporärer Strömungskanäle in den textilen Strukturen ist z. B. durch den zielgerichteten Einsatz auflösbarer Funktionsfäden, wie Grilon® oder PRIFORM® erreichbar. Derartige Fäden sind kommerziell verfügbar und bereits Bestandteil eigener wissenschaftlicher Untersuchungen, z. B. im IGF-Projekt 17493 BR. Schwerpunkt der Untersuchungen ist hier eine temporäre Fixierung der Verstärkungsfäden durch den Einsatz der Funktionsfäden als Bindermaterial sowie deren Auflösung im Harz zur gezielten Einstellung der mechanischen Eigenschaften des FKV. Aus diesen Untersuchungen liegen Erkenntnisse zum temperatur- und zeitabhängigen Auflöseverhalten von matrixlöslichen Funktionsfäden vor [16, 17], die für die im Projekt vorgesehene Auslegung und Umsetzung textiler Strukturen sowie Simulationsmodelle eine gute Basis bilden. Eine temporäre Veränderung der Morphologie textiler Strukturen ist bisher nicht Gegenstand dieser Untersuchungen. Für die Entwicklung und Umsetzung geeigneter textiler Halbzeuge mit temporären Strömungskanälen besteht somit hoher Forschungsbedarf.

## **2.2 Permeabilität**

Der Leitgedanke der theoretischen, simulativen Ansätze der Permeabilitätscharakterisierung ist die Vorhersage der makroskopischen Tränkbarkeit eines Textils (Permeabilität) durch Modellierung einer repräsentativen Volumeneinheit auf der Meso-Ebene. Hier sind beispielhaft die Arbeiten aus den Forschungsgruppen um Advani/ Simacek (University of Delaware) [18], Ermanni/ Schell (ETH-Zürich) [19], Lomov/ Verpoest (KU Leuven) [20, 21] und Long/ Endruweit (University of Nottingham) [22] zu nennen. Diese und weitere Arbeiten [6] nutzen jedoch keine reale, sondern wenig realitätsnahe, modellhafte Textilmorphologien mit meist elliptischen Rovingquerschnitten. Die Folge sind starke Abweichungen zwischen den Ergebnissen der Simulation und der Validierungsexperimente [20, 25]. Weiterhin wird die Annahme getroffen, dass Faserbündel eine homogene Faserverteilung mit konstantem Filamentabstand aufweisen. Wie Schliffbilder zeigen, ist dies oft nicht der Fall [23]. Für die Validierung existiert zudem noch kein einheitlicher Standard zur experimentellen Ermittlung der Permeabilität. Im Rahmen der internationalen Konferenz Flow Processes in Composite Materials (FPCM), die zu den bedeutendsten Konferenzreihen im Bereich der Fließprozesse in Textilien gehört, wurde in zwei Ringversuchen die Messung der Permeabilität an einem konkreten

Verstärkungshalbzeug durchgeführt [24, 25]. Die Ergebnisse legen nahe, dass bei der Simulation des Fließverhaltens die Zusammenhänge zwischen den Parametern der textilen Struktur und dem makroskopischen Fließverhalten aktuell nicht ausreichend betrachtet oder die Eingangsparameter nicht hinreichend durch Messwerte validiert wurden [27]. Daher besteht hier ein hoher Forschungsbedarf.

Von großer Bedeutung ist zudem die Diskrepanz zwischen dem Strömungsfluss in den Kanälen und dem kapillaren Fluss in den Rovings, die als Dual-Scale Effekt bezeichnet wird. Zahlreiche Arbeiten betrachten die Wirkung von Kapillarität und Dual-Scale Effekt auf die Simulation, z.B.:

- Blasenentstehung durch Kapillaritätseffekte [27, 28],
- Modellierung von Multiskaleneffekten in der Fließsimulation [29, 30] und
- Einfluss der Dual-Scale Effekte auf die Permeabilität [31].

In der Modellierung zur Fließsimulation sind die Parameter jedoch nicht physikalisch begründet und es liegen nur Grundlagenuntersuchungen auf numerischer Basis vor [32, 33]. Bei der Bestimmung der Einflüsse von Multiskaleneffekten wurden zudem keine klaren Tendenzen festgestellt, ob der Einfluss gesättigter oder ungesättigter Permeabilität größer ist. Die „Permeabilität“ als wissenschaftlicher Ausdruck ohne Ausgrenzung anderer Einflüsse, wie Benetzungseffekte, ist derzeit somit nicht klar definiert und eine Trennung der Einflüsse dringend notwendig [34].

Die Ermittlung von Methoden zur Beschreibung von Kapillareffekten bei der Infiltration von Fasern bzw. textilen Flächengebilden und die Nutzung für die zukünftige Auslegung textiler Strukturen sind Bestandteile des AiF-Projektes 18514 N2. Hier wird die drucklose Imprägnierung textiler Strukturen bei entsprechend geringen Fließgeschwindigkeiten mit Fluiden wie Wasser betrachtet. Der Einsatz der textilen Strukturen erfolgt vornehmlich in rein textilen Anwendungen und damit Nicht-FKV-Anwendungen. Eine Berücksichtigung des für die FKV-Auslegung besonders relevanten Dual-Scale-Effektes erfolgt in diesen Untersuchungen nicht. Die Ergebnisse sind somit nicht auf die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens vorgesehene Infiltration textiler Strukturen mit FKV-Harzsystemen mittels Druck bei hoher Fließgeschwindigkeit anwendbar.

Aus dem Fehlen belastbarer Berechnungsmodelle ergibt sich somit ein hoher Forschungsbedarf für die simulationsgestützte Entwicklung textiler Halbzeuge mit integrierten, anforderungsgerecht ausgebildeten, temporären Strömungskanälen sowie für geeignete Infiltrationsstrategien und die Bestimmung der resultierenden Auswirkungen auf die Imprägnierbarkeit.

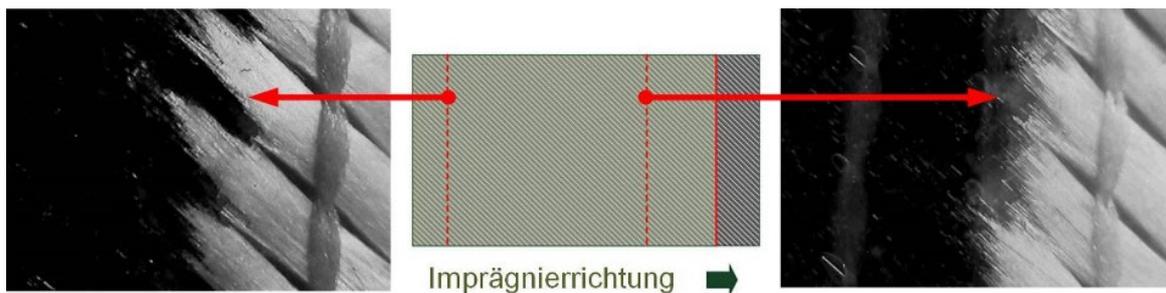
## 2.3 Eigene Vorarbeiten

Für den vorliegenden Schlussbericht wurden gemeinsam durch die Forschungseinrichtungen (FE) erste orientierende Vorversuche mit matrixlöslichen Funktionsfäden in textilen Halbzeugen durchgeführt. Als Funktionsfaden diente Grilon® der Firma EMS-Chemie AG, das zur Komprimierung einzelner Rovings und damit zur lokalen Inhomogenisierung der Fadenanordnung in textilen Strukturen versuchsweise als Zusatzfaden in biaxial verstärkte Gewebe auf CF-Basis integriert wurde. Anschließend erfolgte die Analyse des Auflöseverhaltens der Funktionsfäden sowie der Entspannung und räumlichen Ausdehnung der nicht mehr komprimierten Rovings während der Infiltration mit Epoxidharz im VARI-Verfahren. Mit diesen Untersuchungen konnte der prinzipielle Nachweis geführt werden, dass über die Verwendung geeigneter Funktionsfäden und textiltechnischer Bindungen gezielt temporäre Kanäle in textile Strukturen eingebracht werden können, die während der Infiltration nicht durch den Vakuumaufbau geschlossen werden, sondern stabil existieren und die durch eine sich daran anschließende Auflösung der Funktionsfäden vor Abschluss der Harzvernetzungsreaktion eine Homogenisierung der Fadenanordnung im FKV zulassen. Neben dem untersuchten matrixlöslichen Grilon® sind dafür auch Grilon®-Varianten nutzbar, die sich erst bei thermischer Aktivierung auflösen. Die Formstabilität der textilen Struktur während der Infiltration ist damit gewährleistet und die Auflösung der Funktionsfäden gezielt über die Temperatur steuerbar [35]. Die Vorversuche zeigen, dass hier hohes Potenzial zur Senkung der Infiltrationszeit um mindestens 30 % vorhanden ist. Für die vollständige Ausschöpfung des Potenzials besteht jedoch hoher Forschungsbedarf.

Am ITM liegen umfangreiche Arbeiten zur Modellierung und Simulation textiler Prozesse und zum Verzerrungsverhalten textiler Verstärkungsstrukturen vor, was Grundlage für die vorgesehene Generierung der geplanten 3D-Modelle für die spätere Fließsimulation ist [36]. Zudem wurden im DFG-Projekt CH 174/8-1 auf Basis vorliegender Erfahrungen die Auflösung der Mesostruktur (Poren zwischen Fäden) und Mikrostruktur (Poren im Faden) abgebildet und wichtige Barriereigenschaften sowie die Partikelanlagerung im Gewebe simuliert. Darauf aufbauend wurde der Einfluss der Webparameter auf die Porenmorphologie untersucht, sodass eine Zuordnung des Einflusses der Konstruktions- und Prozessparameter zur 3D-Porenmorphologie und zu den resultierenden Gewebeeigenschaften erfolgen kann. Durchgehende Kanäle zwischen den Fäden, wie im beantragten Projekt, waren dabei nicht Gegenstand der Untersuchungen. Die gewonnenen wissenschaftlichen Erkenntnisse und Erfahrungen und die entwickelten Methoden zur Charakterisierung der Porenmorphologie werden für die Bearbeitung des beantragten Projektes genutzt und gezielt in Richtung durchgehender sowie komplex angeordneter Kanäle weiterentwickelt.

Weitere Versuche am PuK bestätigen, dass während der Harzinfiltration sog. Dual-Scale Effekte auftreten. Bei hoher Fließgeschwindigkeit fließt Harz zwischen den Rovings in das textile Halbzeug (Abb. 1, links) und die aus vielen Filamenten bestehenden Rovings werden erst nachträglich, im Wesentlichen durch Kapillareffekte, imprägniert. Bei geringer Fließgeschwindigkeit dominieren dagegen Kapillaritätseffekte innerhalb der Faserbündel, was dazu führt, dass diese zuerst benetzt werden (Abb. 1, rechts). Die Untersuchung und Quantifizierung der Möglichkeiten zur Beeinflussung der Harzinfiltration über eine angepasste Textilmorphologie ist bisher nicht Gegenstand von Forschungsarbeiten und daher ein Schwerpunkt dieses Forschungsvorhabens.

Bei beiden Fließfrontausbildungen nach Abb. 1 treten Imprägnierfehler durch Lufteinschlüsse in oder zwischen den Rovings auf. Die Betrachtung der Dual-Scale Effekte und die experimentellen Kapillaritätsuntersuchungen stellen neben der Untersuchung des Einflusses von Funktionsfadenmaterialien somit einen besonderen Schwerpunkt der Forschungsarbeiten dar. Dual-Scale Effekte werden in vorhandenen numerischen Modellen zudem bisher nicht berücksichtigt.



**Abbildung 1: Fließfrontausbildung für hohe (links) und niedrige Fließgeschwindigkeit (rechts) [37]**

Um die realen Fließvorgänge zu charakterisieren, ist eine richtungsabhängige Bestimmung der Permeabilität erforderlich. Am PuK wurde dafür ein Versuchsstand konzipiert und technisch umgesetzt [38]. Für die im Projekt geplante zielgerichtete Simulation des Fließprozesses sind konstruktive Anpassungen jedoch unerlässlich.

Das PuK befasste sich vor Projektstart umfassend mit der werkstofflichen und prozesstechnologischen Charakterisierung, Beschreibung und Verarbeitung von FKV für unterschiedliche Industriebereiche. Hierbei wurden alle üblichen textilen Verstärkungsmaterialien (Glas-, Kohlenstoff- und Naturfasern) sowie thermoplastische und duromere Matrices [39, 40, 41] betrachtet. Strukturen mit integrierten temporären Strömungskanälen waren bisher jedoch nicht Gegenstand solcher Untersuchungen.

Das Thema Permeabilität stellt aber einen Schwerpunkt der Forschungen am PuK dar, z. B. zur Entwicklung simulationstechnisch optimierter Infiltrationsstrategien [27] oder zur simula-

tiven Darstellung des Durchströmverhaltens einer repräsentativen Einheitszelle [42]. Im Gegensatz zu den Ansätzen von Verleye et. al. [21] findet dabei eine generische Geometrie Verwendung, die aus Schliffbildern realer Geometrien abgeleitet ist.

Zur Materialcharakterisierung hinsichtlich der Permeabilität wurde am PuK ein verbessertes optisches Messsystem erarbeitet, welches es erlaubt, den Vorgang der Fließfrontausbreitung an definierten Textilien ein- und zweidimensional zu erfassen [43, 44]. Darüber hinaus befassen sich Arbeiten am PuK intensiv mit dem „Dual-Scale-Flow“, insbesondere mit der aktiven Beeinflussung der Kapillarität von Rovingbündeln zur Gestaltung verbesserter Infiltrationsstrategien, wobei zur Betrachtung des Kompaktierungs- und Relaxationsverhaltens bei unterschiedlichen Temperaturen sowie im trockenen und nassen Zustand Prüfeinrichtungen zur Verfügung stehen, die bisher zur empirischen Materialmodellierung genutzt wurden [45, 46, 47]. Die Erkenntnisse zur Simulation parallel ablaufender Reaktions- und Strömungsvorgänge in der Prepreg-Presstechnik wurden z. B. im ZIM-Projekt KF2056502VT9 am Beispiel einer Blattfeder für Schwerlasttransporter erfolgreich in die Industrie transferiert. Das ITM verfügt über langjährige Erfahrungen bei der anforderungsgerechten Entwicklung von Fadenkonstruktionen und von textilen 2D- und 3D-Flächengebilden für technische Anwendungen [48, 49, 50, 51, 52, 53]. Weiter stehen im Bereich Textilchemie umfangreiche Erfahrungen und Möglichkeiten zur Modifikation und Beschichtung von Fadenmaterialien zur Verfügung [54, 55].

Auf den Gebieten textile Flächenbildung, Textilchemie und textile Ausrüstung verfügt das ITM über ein breites Spektrum moderner Maschinenteknik, die zur textiltechnischen Umsetzung neuer verarbeitungs- und beanspruchungsgerecht aufgebauter textiler Verstärkungshalbzeuge für die im Rahmen des Projektes angestrebten Funktionsmuster und Demonstratoren genutzt wird [56].

Die Weiterentwicklung der Flachstricktechnik zu einer unikalen Basistechnologie für biaxial verstärkte, funktionalisierte, bahnenförmige bzw. near-net-shape Strukturen für Leichtbauanwendungen (Mehrlagengestricke (MLG)) ist seit mehreren Jahren Forschungsschwerpunkt am ITM [57, 58, 59]. So sind lokal angepasste textile Halbzeuge mit guten Verbundeigenschaften daraus hergestellter FKV realisierbar. Diese Entwicklungen bilden eine hervorragende Grundlage für die im Projekt angestrebten temporären Strömungskanäle im Halbzeug während der textilen Fertigung. Die Ergebnisse der Untersuchungen zum Einfluss der im Strickprozess realisierten Textilmorphologie des MLG auf die Permeabilität sind anschließend, auf Basis der umfassenden Kompetenzen und maschinellen Ausstattung des ITM, auf weitere hochproduktive Fertigungsverfahren (z. B. Weben, Multiaxialwirken) übertrag- und anwendbar. Das versetzt das ITM in die Lage, Einschätzungen über die Realisierbarkeit tex-

tiler Strukturen mit verschiedenen konventionellen sowie konstruktiv modifizierten Maschinen zu treffen und die benötigten Verstärkungsstrukturen umzusetzen. Das dafür erforderliche Know-how des ITM im Bereich der Antriebs- und Steuerungstechnik wurde in den vergangenen Jahren deutlich erweitert und ebenfalls im Projekt genutzt [58, 60, 61, 62, 63].

Die Zusammenführung der Kompetenzen von PuK (Prozessoptimierung, Simulation, FKV-Herstellung) und ITM (Entwicklung und Realisierung anforderungsgerechter textiler Strukturen) bildet somit die erforderliche technische und personelle Grundlage für die erfolgreiche, im Projekt vorgesehene Umsetzung neuartiger und an den Infiltrationsprozess angepasster Verstärkungsstrukturen zur Verwirklichung einer Fertigungstechnologie für qualitativ hochwertige, große und komplexe FKV-Bauteile, wie sie mit den zugrunde liegenden Fertigungsverfahren aktuell nur mit hohem Material- und Zeitaufwand sowie mit erheblichen finanziellen Mitteln realisierbar sind.

### **3 Zielsetzung und Lösungsweg**

Ziel des interdisziplinären, branchenübergreifenden Projektes ist die Entwicklung eines Verfahrens zur simulationsgestützten, textiltechnischen Integration temporärer, sich nach der Infiltration schließender Strömungskanäle in Verstärkungshalbzeuge sowie einer effizienten Fertigungstechnologie mit, gegenüber dem Stand der Technik, drastisch verkürzten Infiltrationszeiten zur Herstellung komplex geformter, großflächiger FKV-Strukturen mit homogener Faserverteilung im Infusionsverfahren in reproduzierbar hoher Qualität. Dadurch wird ein richtungsweisendes Verfahren zur signifikanten Minimierung der Taktzeiten der FKV-Herstellung zur Verfügung gestellt. Im Fokus der Forschungsarbeiten steht die Variation der Halbzeugstruktur durch die Integration von strömungstechnisch optimierten Kanälen für eine zielgerichtete Beeinflussung des Harzinfiltrationsprozesses durch die Verbesserung der Kapillarität und der Permeabilität. Für eine homogene Faser-Matrixverteilung im Bauteil werden die Strömungskanäle nach dem Infiltrationsprozess aber vor Abschluss der Harzvernetzungsreaktion wieder geschlossen.

Um dies zu erreichen, wurden am ITM neuartige Funktionsfadenstrukturen und Textilkonstruktionen mit temporären Strömungskanälen entwickelt. Für grundlegende Permeabilitätsuntersuchungen erfolgen zunächst die Entwicklung und Umsetzung textiler Funktionsmuster mit fertigungstechnisch integrierten Strömungskanälen als Fließhilfe für Harzsysteme in Schuss- und in Kettrichtung (Funktionsmuster 1 und 2). Für die spätere Umsetzung komplexer 3D-Bauteilgeometrien sollen in darauf aufbauenden grundlegenden Untersuchungen bindungstechnische Möglichkeiten zur Realisierung einer Anordnung der Strömungskanäle mit davon abweichender, frei wählbarer Ausrichtung entwickelt werden (Funktionsmuster 3).

Der wesentliche Ansatz für die Ausbildung bzw. das Verschließen temporärer Strömungskanäle ist der Einsatz matrixlöslicher Funktionsfäden. Das über die Temperatur steuerbare Auflösungsverhalten der Funktionsfäden (z.B. Grilon®) in duromeren Harzsystemen erlaubt z.B. die Freigabe während der textilen Fertigung komprimierter Verstärkungsfaserovings und damit eine gezielte Strukturveränderung, durch die die temporären Strömungskanäle unter Ausbildung einer homogenen Verstärkungsstruktur vor der vollständigen Vernetzung der Harzsysteme verschlossen werden können. Für die erfolgreiche Steuerung dieses Prozesses werden die Wechselwirkungen und Zusammenhänge zwischen der Dimensionierung (Höhe, Breite) und Anordnung der Strömungskanäle, dem temperaturabhängigen Auflösungsverhalten der Funktionsfäden, der Vernetzungstemperatur und der Prozessparameter bei der Harzinfiltration, wie Harztemperatur oder Druck, systematisch untersucht sowie für die Nutzung in einer Fließsimulation aufbereitet.

Mit Hilfe geeigneter Messmethoden wird die Ausbreitung der Fließfronten in den Strömungskanälen und Verstärkungsfasern (Dual-Scale-Eigenschaften) der Funktionsmuster in Abhängigkeit von der Dimensionierung und Anordnung der Strömungskanäle charakterisiert. Diese Ergebnisse sind Voraussetzung für die gezielte Anpassung der Simulationswerkzeuge für eine spätere zielgerichtete Auslegung der textilen Halbzeuge. Der Nachweis, einer erfolgreichen simulationsgestützten Auslegung derartiger textiler Verstärkungsstrukturen erfolgt anhand der Umsetzung von Demonstratoren.

Mit Unterstützung des PA, der branchenübergreifend entlang der gesamten Prozesskette zusammengesetzt ist, werden von den Forschungseinrichtungen (FE) die anhand der Funktionsmuster und zweier Demonstratoren ermittelten Ergebnisse für eine breite industrielle Anwendung von Harzinfusions- und -injektionsverfahren als Leitfaden für die KMU zusammengefasst, der diesen nach Projektende zur Verfügung steht.

Aus der Zielsetzung ergeben sich die folgenden Arbeitsschritte im Projekt:

- AS 1 Definition von Funktionsmustern und FKV-Demonstratoren, Ableitung des Anforderungsspektrums sowie Materialauswahl und -charakterisierung
- AS 2 Bindungstechnische Modellierung biaxial verstärkter ebener Halbzeuge mit textiltechnisch integrierten Strömungskanälen und Generierung geometrischer 3D-Modelle
- AS 3 Entwicklung einer Methode zur Quantifizierung von Dual-Scale-Effekten
- AS 4 Entwicklung und Umsetzung modifizierter Funktionsfäden bzw. -fadenstrukturen
- AS 5 Experimentelle Untersuchungen zur Umsetzung von textilen 2D-Funktionsmustern mit textiltechnisch integrierten Strömungskanälen

- AS 6 Charakterisierung der Textilhalbzeuge im Hinblick auf die Strömungskanäle, die Kompaktierungseigenschaften und die Imprägnierbarkeit
- AS 7 Makro- und Meso-Modellierung der Dual-Scale-Eigenschaften als Funktion der textilen Eigenschaften des Halbzeuges
- AS 8 Untersuchungen zur Auswirkung der Strukturbeeinflussung auf die mechanischen Eigenschaften mit und ohne Auflösung des Funktionsfadens
- AS 9 Demonstratorherstellung, Analyse und Interpretation der Arbeitsergebnisse
- AS 10 Erstellung eines KMU-geeigneten Leitfadens und Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

## **4 Arbeitsschritte**

### **4.1 Definition von Funktionsmustern und FKV-Demonstratoren, Ableitung des Anforderungsspektrums sowie Materialauswahl und -charakterisierung**

Beim Auftakttreffen des PA und in den nachfolgenden bilateralen Gesprächen zwischen Vertretern des PA und der Forschungseinrichtungen (FE) wurden die Materialsysteme: Verstärkungs-, Matrix-, und Funktionskomponente, sowie die Demonstratoren und die Anforderungen an die relevanten FKV-Bauteile festgelegt. Als relevante Produktgruppen und damit einhergehende Lastfälle wurden definiert:

- Großflächige Bauteile im Chemie- und Anlagenbau (innendruckbeaufschlagt, temperaturwechselbelastet, chemisch medienbeansprucht)
- Bauteile aus dem Maschinen- und Anlagenbau, sowie der Verkehrstechnik, z.B. Windkraftflügel, Raketenboostergehäuse, Motorhaube (komplexe Beanspruchungszustände, spezielle Anforderungen je nach Anwendung).

Die Funktionsmuster wurden präzisiert und festgelegt. Demnach sollten temporäre Strömungskanäle in verschiedenen Orientierungen realisiert werden. Daraus resultierten die drei Funktionsmuster (FM), welche Kanäle in verschiedenen Orientierungen vorsehen:

- FM1: in Schussrichtung (SR)
- FM2: in Kettrichtung (KR)
- FM3: in frei wählbarer Orientierung

Neben den Funktionsmustern wurden ebenso die Anforderungen an das zu entwickelnde Verfahren präzisiert. Dieses sollte im Vergleich zum Referenzprozess, einem Standard-VARI-Prozess mit entsprechenden Fließhilfen und Angussstrategien, eine gleichschnelle oder gar beschleunigte sowie weiterhin vollständige und hochqualitative Imprägnierung des trockenen Verstärkungshalbzeuges sicherstellen. Durch die angestrebte, höhere Permeabilität des Textils selbst sollte zusätzlich die Komplexität der Infiltrationsstrategie (Einsatz von

einer Vielzahl von Angüssen und Steigern) reduziert werden. Im selben Zug wird eine Reduktion der Verbrauchsmaterialien zur Sicherstellung der vollständigen Imprägnierung, wie Fließmedien, Harzverteilerkanälen und verschiedenen gearteter Folien, angestrebt. Die Erfüllung der genannten Anforderungen soll zu einer Reduktion der Gesamtprozesszeit führen, u.a. durch die Reduktion der Vorbereitungszeit vor der Infiltration und der Infiltrationszeit selbst. Das führt im Ergebnis zur Senkung der Produktionskosten unter Erhaltung der mechanischen Eigenschaften des Verbundbauteils.

Für den Nachweis der Leistungsfähigkeit wurden zum Ende des Projektes umzusetzende Demonstratorbauteile ausgewählt. Da die Herstellung von Formwerkzeugen hohe Kosten verursacht und einen zusätzlichen hohen Aufwand in der Projektbearbeitung bedeutet, wurden in Abstimmung mit dem PA folgende zwei Demonstratorbauteile ausgewählt:

- Klöpperboden (Bauteil aus dem Chemie- und Anlagenbau): Infiltrationsform wurde bereitgestellt von PA-Mitglied Fa. STEULER-KCH GmbH (Abbildung 2 a) und
- PKW-Motorhaube: Infiltrationsform am ITM (Abbildung 2 b) direkt verfügbar.

Beide Bauteile stellen eine großflächige gekrümmte Form dar und sind daher für das Aufzeigen der Vorteile des neuartigen Verfahrens bestens geeignet.



a)



b)

**Abbildung 2: Formwerkzeuge a) Demonstrator 1 Klöpperboden, b) Demonstrator 2 PKW-Motorhaube**

In Abstimmung mit den PA-Mitgliedern wurde beschlossen, für die Untersuchungen Glasfasern (GF) als Verstärkungsfasermaterial zu verwenden, weil diese hauptsächlich im anvisierten Anwendungsbereich Anlagenbau Verwendung finden. Die GF werden vom PA-Mitglied P-D Glasseiden GmbH Oschatz kostenneutral bereitgestellt. Zum Einsatz kam der assemblierte Roving EC 2400-350 als Schuss- und Kettfadenmaterial. Als Maschenfaden

werden ebenfalls Glasfasergarne mit einer Feinheit von 200 tex eingesetzt. Die Eigenschaften der Fadenmaterialien wurden aus dem Datenblatt entnommen und sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

**Tabelle 1: Fadenmaterialien der textilen Basisstruktur**

	Faser	Hersteller	Typ	Feinheit [tex]
Schussfaden	GF	P-D Glasseiden GmbH	EC 2400	2400
Kettfaden				
Maschenfaden	GF	Textilglas Technologie GmbH & Co. KG	2 x EC9 34x3	200

Durch das ITM erfolgte in enger Abstimmung mit dem projektbegleitenden Ausschuss neben der Materialauswahl auch die Vordimensionierung der textilen Halbzeuge. Da vor allem großflächige Bauteile von der verbesserten Imprägnierbarkeit profitieren sollen, die typischerweise aus textilen Halbzeugen mit hohem Flächengewicht hergestellt werden, wird ein hohes Flächengewicht von mindestens 1000 g/m<sup>2</sup> vorgesehen.

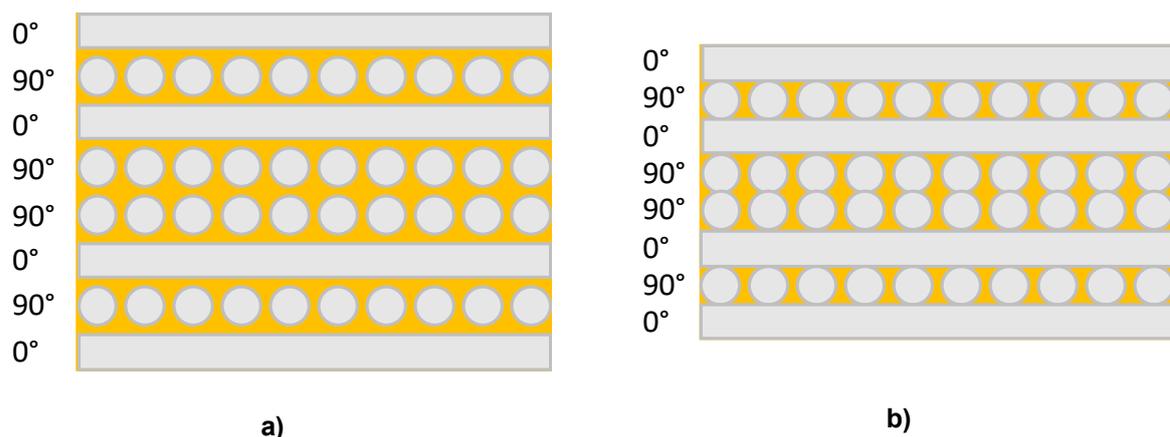
Die Matrixsysteme wurden ebenfalls durch Mitgliedsfirmen des PA bereitgestellt. Untersucht wurden das Epoxidharzsystem von Hexion EPIKOTE™ RIMR 135, das Vinylesterharzsystem Derakane Momentum™ 411-350 von Ashland und das styrolfreie Harzsystem von BÜFA BÜFA®-laboratory sample VII. Auch für die Matrixsysteme wurden die Kennwerte den Datenblättern entnommen. Die fehlenden aber prozessrelevanten Kennwerte wurden in den folgenden Arbeitspaketen jeweils untersucht und charakterisiert. Von der EMS Chemie GmbH wurden die thermoplastischen Grilon-Fadenstrukturen MS-300, KE-60 und K-85 als Funktionsmaterialien zur Verfügung gestellt. Die Eignung dieser für die vorgesehene Anwendung erfolgte in den folgenden Arbeitsschritten.

## **4.2 Bindungstechnische Modellierung biaxial verstärkter ebener Halbzeuge mit textiltechnisch integrierten Strömungskanälen und Generierung geometrischer 3D-Modelle**

Die Untersuchungen zur Herstellung temporär ausgebildeter Strömungskanäle erfolgten nach Vorschlag der Mitglieder des PA an Mehrlagengestrickten (MLG). Dieses Flächenbildungsverfahren bietet eine hohe Flexibilität hinsichtlich einer definierten Einstellung unterschiedlicher Strukturparameter und erlaubt so umfassende Untersuchungen bei geringem Maschinenrüstaufwand. Die dabei erzielten Ergebnisse sind dann in einfacher Art und Weise auf andere Flächenbildungsverfahren übertragbar, wie Weben oder Multiaxialwirken.

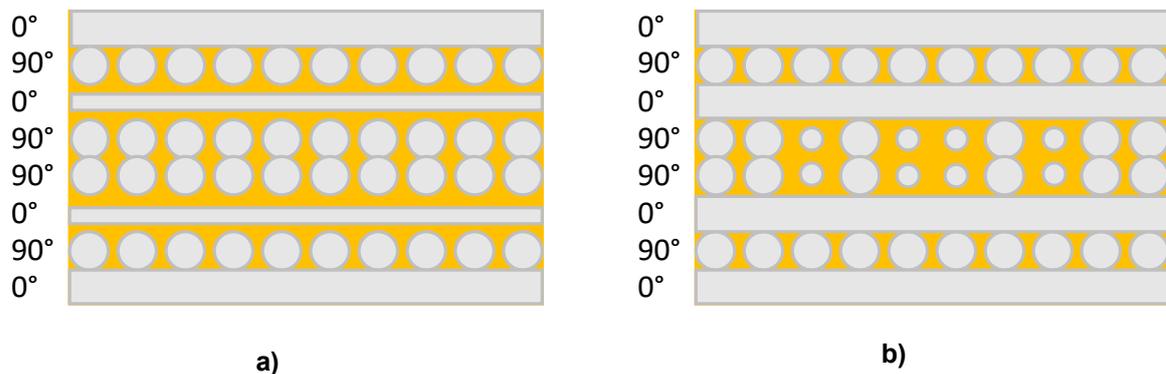
Prinzipiell sind temporäre Strömungskanäle lokal in einer Verstärkungslage auf verschiedene Wege umsetzbar. Zunächst wurde dazu grundsätzlich theoretisch betrachtet, wie ein Fließkanal ausgebildet sein muss und welche Parameter einstellbar sind bzw. einen Einfluss auf die Ausbildung während der Infiltration haben.

Für die Untersuchungen wird von einem industriell üblichen biaxialen Lagenaufbau ausgegangen, der in Abbildung 3 schematisch stark vereinfacht dargestellt ist. Die orange Markierung kennzeichnet den zur Verfügung stehenden Raum für das Durchströmen der textilen Struktur mit dem Matrixsystem im unkompaktierten (a), sowie im kompaktierten Zustand (b). Zu erkennen ist, dass der Kompaktierungsvorgang die für das Durchströmen des Harzes und das Tränken der textilen Struktur zur Verfügung stehende Fläche reduziert. Jedoch wird die Infiltration mit höherer Kompaktierung aufgrund der geringeren Fläche für das Durchströmen des Harzes schwieriger. Somit steigt entweder die Infiltrationsdauer oder es sind zusätzliche Fließmedien erforderlich, um diese konstant zu halten. Andererseits steigt mit höherer Kompaktierung der Faservolumengehalt im späteren FKV-Bauteil.



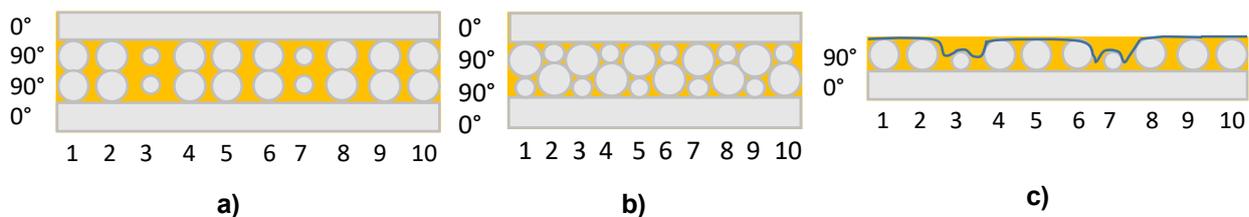
**Abbildung 3: Schematischer Lagenaufbau im a) unkompaktierten und b) kompaktierten Zustand – (orange markiert Fläche für das Durchströmen des Harzes)**

Das Ziel im Rahmen des Projekts ist die Anpassung des Lagenaufbaus temporär in Teilbereich, so dass eine lokal erhöhte Durchlässigkeit des textilen Aufbaus für das Matrixsystem auch im kompaktierten Zustand erreicht werden kann. In Abbildung 4 sind dazu beispielhaft modifizierte bzw. kompaktierte Rovings in 0°- (a) und 90°- (b) Richtung dargestellt, über die eine solche höhere Durchlässigkeit für das Matrixsystem erreicht werden kann.



**Abbildung 4: Schematische Darstellung eines kompaktierten Lagenaufbaus mit modifizierten Rovings in a) 0°- und b) 90°-Richtung (orange markiert Fläche für das Durchströmen des Harzes)**

Diese Modifikation kann prinzipiell und gezielt in jeder Lage, bzw. an jeder Stelle im textilen Lagenaufbau erfolgen. Über die Anzahl und Position der modifizierten Rovings ist die Breite bzw. die Tiefe des Fließkanals einstellbar. Abbildung 5 zeigt wiederum schematisch verschiedene prinzipiell mögliche Lagenaufbauten unter Verwendung kompaktierter Rovings.

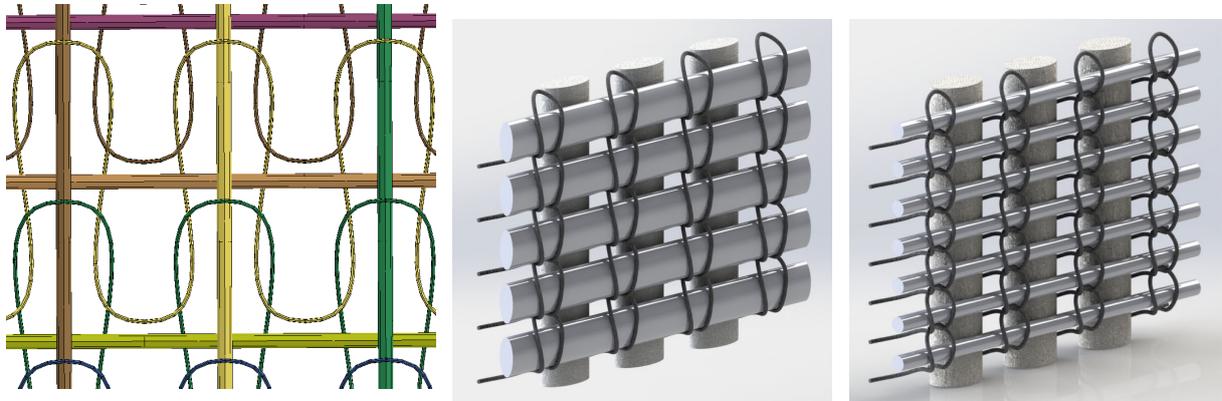


**Abbildung 5: Schematische Darstellung kompaktierter Lagenaufbauten und Modifikation in a) jeder vierte SF, sowie jeder zweite SF, alternierende Schichtung (b), c) biaxialer Aufbau mit Vakuumpolie (blau)**

In den weiteren Arbeiten ist zu untersuchen, inwieweit sich derartige Modifikationen auf die Kompaktierung und Permeabilität der Strukturen auswirken. Wird zum Beispiel jeder vierte Schussfaden (SF) modifiziert (Abbildung 5 a), entsteht prinzipiell ein Fließkanal und führt zu einer erhöhten Permeabilität der Struktur. Allerdings besteht die Gefahr, dass bei einer ungünstigen Anordnung der modifizierten Rovings die Struktur bereits bei der textilen Herstellung kompaktiert wird (Abbildung 5 b) oder die zur Kompaktierung verwendeten Folien in die Bereiche der Fließkanäle rutschen (Abbildung 5 c). In beiden Fällen werden dann die Fließkanäle verschlossen und effektiv die Permeabilität reduziert. Effekte dieser Art werden in den AP 5 und 6, der experimentellen Umsetzung der textilen Strukturen und während der textiltechnischen Charakterisierung, sowie in den Kompaktierungstests untersucht.

Für eine grundlegende Einschätzung der über die Modifikationen erzielbaren Effekte wird zunächst eine textile Basis- bzw. Vergleichsstruktur als biaxial (0°/90°) verstärktes MLG ohne integrierte Strömungskanäle entwickelt.

Parallel zu den textiltechnischen Entwicklungen erfolgte die Erstellung von 3D-CAD-Modellen der vorgesehenen MLG-Varianten für die Simulation des Permeabilitätsverhaltens (Abbildung 6).



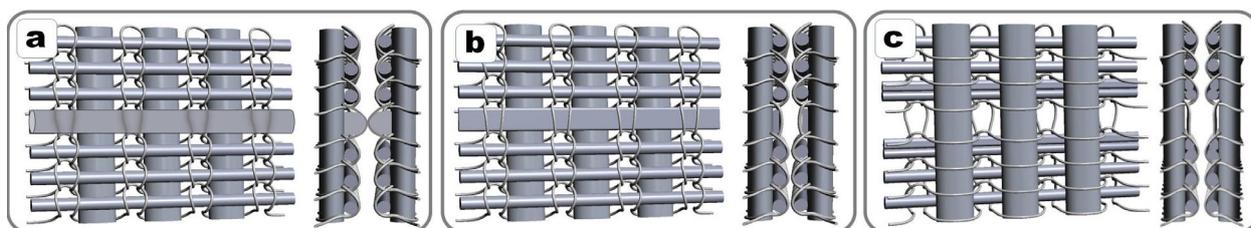
**Abbildung 6: Schematische Darstellung des parametrisierbaren 3D-CAD-Modells mit unterschiedlichen MF-, KF- und SF-Materialien**

Der Aufbau der Modelle erlaubt über eine entsprechende Parametrisierung die individuelle Anpassung des MLG. Dadurch sind z. B. unterschiedliche Fadenmaterialien für die Kett- (vertikal  $\square$   $0^\circ$ -Fasern), Schuss- (horizontal  $\triangleq$   $90^\circ$ -Fasern) und Maschenfäden (verbindende Schlaufenstruktur) abbildbar. Zusätzlich ist auch die Größe der Modelle skalierbar.

Das komplexe Zusammenspiel der an der Maschine einstellbaren Prozessparameter (Spannungen einzelner Fadensysteme, Kuliertiefe, Abzugskraft/-weg) und die bindungstechnischen Möglichkeiten wurden anhand der Basisstruktur untersucht und in der textiltechnischen Charakterisierung (AS 6) die Auswirkungen auf die textile Struktur erfasst. Die gewonnenen Erkenntnisse wurden für die weitere Strukturentwicklung genutzt.

Das nicht modifizierte MLG-Verstärkungshalbzeug dient auch als Basis- bzw. Referenzstruktur, für die grundlegenden Versuche zur Quantifizierung der Dual-Scale-Effekten (PuK, AS 3), der mechanischen Verbundeigenschaften (AS 8) und der Bewertung der Eigenschaftsänderungen durch die angedachten Strukturmodifikationen.

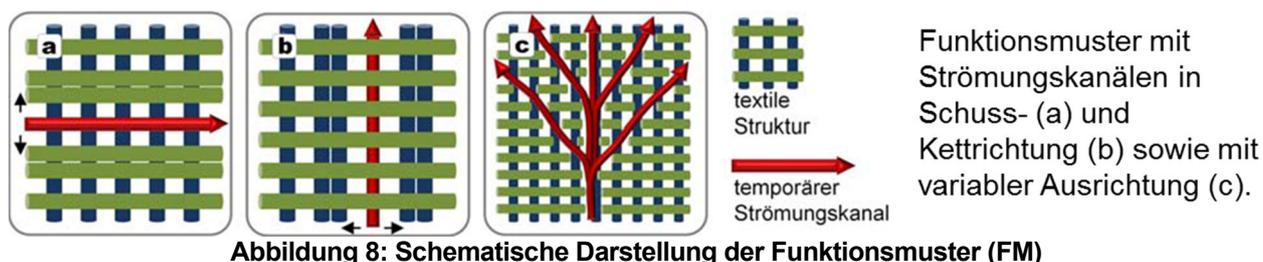
Für die Erzeugung der temporären Strömungskanäle in der textilen Struktur werden verschiedene Varianten in Betracht gezogen (vgl. Abbildung 7).



**Abbildung 7: Schematische Darstellung der Varianten zur lokalen Strukturmodifikation: a) manipulierte Verstärkungsfaserrovings, b) Bändchenstrukturen, c) bindungstechnisch kompaktierte Bereiche**

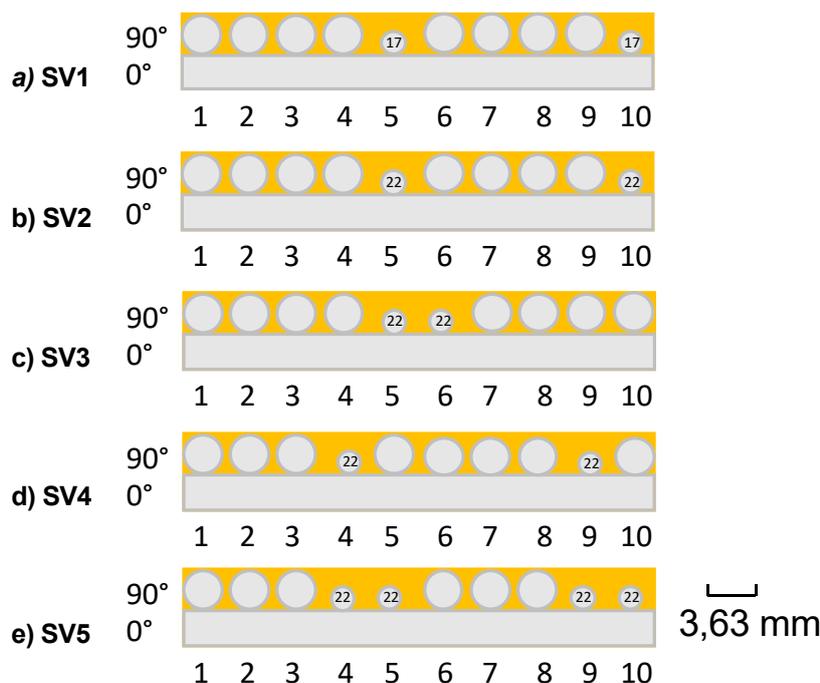
Eine Variante zur Erzeugung von Strömungskanälen ist die lokale Einbringung von manipuliertem Fadenmaterial, z. B. kompaktierten Verstärkungsfaserrovings (Abbildung 7 a) oder geformten Bändchenstrukturen (Abbildung 7 b). Eine weitere Variante ist die lokale bindungstechnische Kompaktierung von Bereichen direkt über die Bindungstechnik (Abbildung 7 c).

Basierend auf der theoretischen Vorbetrachtung zur Einbringung von temporären Strömungskanälen in die textile Struktur wurden in Absprache mit dem PA 3 FM festgelegt (Abbildung 8).



**Abbildung 8: Schematische Darstellung der Funktionsmuster (FM)**

In FM1 (Abbildung 8 a) wurden Strömungskanäle in SR, 90°-Richtung (vgl. Abbildung 3-Abbildung 5) in die textile Struktur eingebracht. Variabel ist dabei die Anzahl der eingebrachten modifizierten Fäden und deren Position. Dies erfolgt an der Strickmaschine durch den Einsatz von mind. 2 Schussfadenführern – Schussfadenführer 1 für die nicht kompaktierten Rovings und Schussfadenführer 2 für die kompaktierten Rovings. Somit ist die Einbringung und Variation von Schussfadenmaterial sehr variabel und ohne großen Rüstaufwand umsetzbar. In der Folge wurden fünf Varianten unter Veränderung der eingebrachten modifizierten Fäden (entwickelt in Arbeitsschritt 4) und der Position entwickelt. Die Bewertung der Varianten hinsichtlich der Permeabilität ist Gegenstand des Arbeitsschritt 5. Die entwickelten Schussvarianten (SV) sind schematisch in Abbildung 9 gezeigt.



**Abbildung 9: Schematische Darstellung der entwickelten modifizierten textilen Strukturen in Schussrichtung: SV 1-5: a)-e)**

Die schematisch dargestellten textilen Strukturen entsprechen biaxial verstärkten MLG. Die Herstellung erfolgt auf einer Strickmaschine Steiger Aries 3 mit der Feinheit E7. Dadurch ergibt sich ein Abstand von zwei benachbarten Nadeln und ein theoretischer Kettfadenabstand von 3,63 mm. Beispielsweise wird bei SV1 jeder 5.te Schussfaden (90°) durch einen modifizierten Schussfaden mit der Nummer 17 (entwickelt in Arbeitspaket 4) ersetzt. Die Verwendung der jeweiligen modifizierten Garnvarianten ist ein Vorzugsergebnis aus der iterativen Bearbeitung von Arbeitsschritt 4 und 5.

Funktionsmuster 2 beinhaltet eine Modifikation der textilen Strukturen in KR, 0°-Richtung (siehe Abbildung 8 (b), vgl. Abbildung 3-Abbildung 5). Während der Bearbeitung wurde ersichtlich, dass aufgrund der biaxialen Struktur keine neuen Erkenntnisse im Vergleich zur Strukturvariation in Schussrichtung gewonnen werden konnten. Eine Variation von KF-Material ist mit einem erheblichen Mehraufwand im Vergleich zur Variation in SR verbunden, da die Maschine umgerüstet werden muss (Tausch von KF-Spulen, Neueinzig des Materials durch komplette KF-Zuführung). Somit wurde in Abstimmung mit dem PA festgelegt, dass eine weitere Variantenentwicklung in KR zunächst nicht weiterverfolgt wird. Die entsprechenden Erkenntnisse aus der Anpassung der Schussfäden sind direkt übertragbar. Dies wird auch für die Umsetzung der Vorzugslösung im Rahmen des iterativen Entwicklungsprozesses zur Demonstratorfertigung (Arbeitsschritt 9) genutzt, um je nach Geometrie eine optimale Infiltration der Strukturen zu gewährleisten.

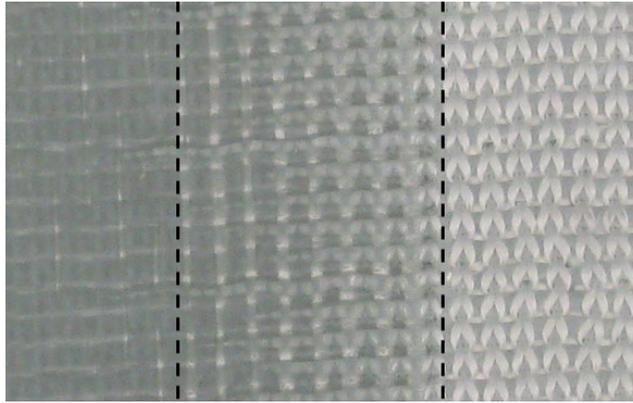
Ausgehend von den Erkenntnissen zur Umsetzung von Strömungskanälen in Schuss- und Kettrichtung erfolgten weiterhin grundlegende Entwicklungen und Untersuchungen zur frei wählbaren Anordnung temporärer Strömungskanäle in biaxial verstärkten MLG (vgl. Abbildung 8 c). Dabei wurden bindungstechnische Varianten für frei wählbare Kanalanordnungen/Orientierungen entwickelt und im Arbeitsschritt 5 experimentell umgesetzt. In den Untersuchungen hat sich allerdings gezeigt, dass die bindungstechnischen Anforderungen hochkomplex sind. Insbesondere kann mit den bisher gefundenen Lösungen bei einer freien Anordnung winkliger Fließkanäle noch kein ausreichendes Schließen der Fließkanäle erreicht werden. Daher besteht hier noch erheblicher Forschungsbedarf.

Für die Umsetzung der MLG-Verstärkungshalbzeuge in AS 5 (siehe Kapitel 4.5) wurden entsprechend Maschinensteuerdatensätze generiert, die sich individuell auf die Integration von temporären Strömungskanälen anpassen lassen. Die Integration der Kanäle erfolgte sowohl über bindungstechnische Maßnahmen als auch über die Funktionsfäden.

Die entwickelten Varianten der Einbringung der Strömungskanäle wurden nach den Kriterien: Fertigungsaufwand, Herstellbarkeit, Imprägnierbarkeit und Kostenaufwand für den Zusatzmaterialanteil theoretisch vorbewertet, um in Kombination mit der praktischen Umsetzung in AS 5 Vorzugsvarianten auswählen zu können.

### **4.3 Entwicklung einer Methode zur Quantifizierung von Dual-Scale-Effekten**

Bei der Imprägnierung von textilen Halbzeugen treten sogenannte Dual-Scale-Effekte auf. Da die Textilien aus Rovings, Faserbündeln aus mehreren tausend Einzelfilamenten, hergestellt werden, die in der geforderten Orientierung miteinander verwebt, vernäht oder verstrickt werden, liegt zwischen den Rovings ein wesentlich größerer Abstand als zwischen den Einzelfilamenten im Roving vor. Dadurch ist der Fließwiderstand des Textils zwischen den Rovings durch den größeren Abstand geringer, wodurch ein flüssiges Medium an diesen Kanälen schneller durchfließt als in den Rovings (siehe Abbildung 1 in Kapitel 2.3). Dementsprechend läuft die Fließfront bei der Imprägnierung aufgrund der angelegten Druckdifferenz zwischen den Rovings vor und die Rovings selbst werden im Anschluss überwiegend über Kapillarkräfte imprägniert. So entstehen bei der Imprägnierung drei charakteristische Bereiche (siehe Abbildung 10): vollständig imprägniert, teilweise imprägniert und nicht imprägniert.

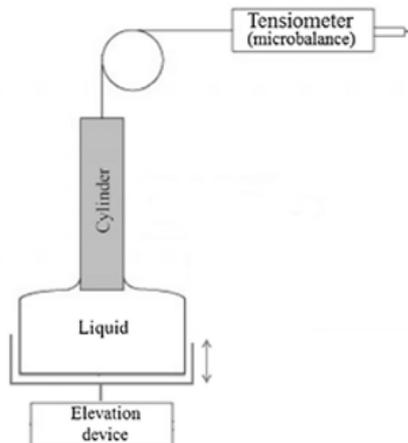


**Abbildung 10: Drei charakteristische Bereiche bei einer Harzinfusion: vollständig imprägniert (links), teilweise imprägniert (Mitte) und nicht imprägniert (rechts)**

Dieses Phänomen der Dual-Scale-Effekte wird in diesem Projekt genutzt, um die Permeabilität der eingesetzten textilen Halbzeuge lokal so zu erhöhen, dass eine schnellere Imprägnierung der Faserverbundstrukturen möglich ist, um so die Prozesszeiten zu verkürzen. Indem textiltechnisch die Abstände zwischen den Rovings erhöht werden, kann das Harzsystem in diesen Strömungskanälen aufgrund des geringeren Fließwiderstands beschleunigt vorlaufen. Die Dual-Scale-Effekte können aber auch zu Lufteinschlüssen in den Bauteilen führen, vor allem beim Einsatz von multiaxialen Aufbauten. Da das Harzsystem in den Fließkanälen vorläuft, kann es jeweils hinter den quer zur Fließrichtung liegenden Rovings die Fließfront schließen und so die Luft in den Rovings einschließen. Dies führt zu Mikroporen. Wenn der anliegende Druckgradient bei der Infusion zu gering wird, was bei der Imprägnierung von längeren Bauteilen öfter der Fall ist, wird die Fließfrontgeschwindigkeit hauptsächlich durch den Kapillardruck innerhalb der Rovings vorangetrieben. In diesem Fall läuft die Fließfront in den Rovings vor (siehe Abbildung 1), wodurch vermehrt Makroporen in den Kanälen entstehen. Für jedes Textil gibt es ein ideales Infusionsdruckfenster und dementsprechend Fließrate, in dem die Anzahl an Makro- und Mikroporen minimal ist.

Aufgrund der oben genannten Phänomene müssen die Dual-Scale-Effekte quantifiziert werden, damit das zu entwickelnde Textil mit temporären Strömungskanälen in Bezug auf eine möglichst schnelle aber dennoch blasenfreie Imprägnierung hin optimiert werden kann. In der Fließsimulation wird das Vorlaufen der Fließfront in den Strömungskanälen vorhergesagt und die zeitlich und lokal abhängige Fließfrontgeschwindigkeit bestimmt. Mithilfe des am Ende dieses Kapitels beschriebenen Zusammenhangs zwischen der Fließfrontgeschwindigkeit und des Gehalts an Makro- und Mikroporen kann dann mithilfe der Fließsimulation die Porosität des Bauteils näherungsweise festgestellt werden. Für die Simulation müssen verschiedene Materialkenndaten bestimmt werden, die die Permeabilität des Textils und somit das Füllverhalten beeinflussen. Hierzu zählen die Kapillarität innerhalb der Rovings als auch die Permeabilität des Textils.

Zur Messung des Kapillardrucks innerhalb eines Rovings wurde ein Tensiometer verwendet. Hierzu wird der Roving in das Tensiometer eingespannt und definiert in die Flüssigkeit eingetaucht (siehe Abbildung 11).

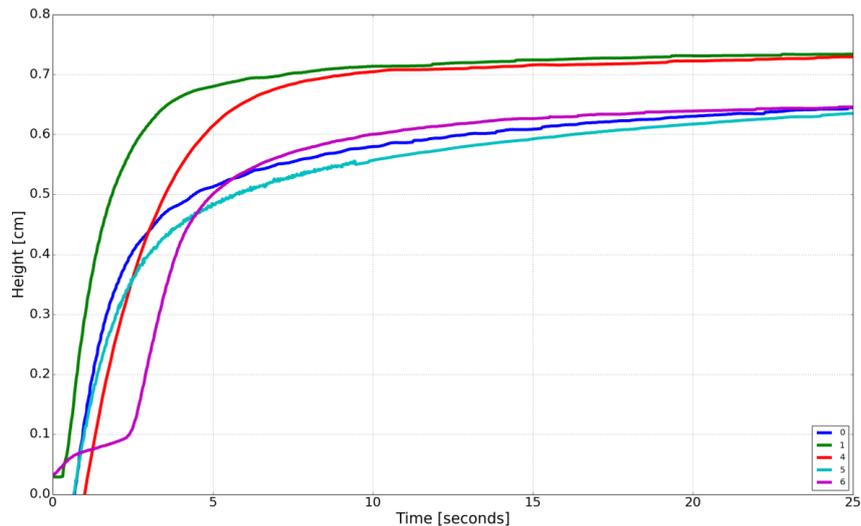


**Abbildung 11: Schematischer Aufbau einer Tensiometermessung**

Um den Kapillardruck  $p_c$  ermitteln zu können, muss sich ein Kräftegleichgewicht in dem Roving zwischen der Gewichtskraft der aufgestiegenen Flüssigkeit und der Kapillarkraft einstellen. Das Tensiometer misst zum einen die Gewichtsveränderung des Rovings, um hiermit die Gewichtskraft und dadurch den Kapillardruck zu bestimmen. Zum anderen kann die Steighöhe  $d_H$  im Roving bestimmt werden. Der Zusammenhang zwischen dem Kapillardruck und dem Quotienten aus der Oberflächenspannung  $\sigma \cos\theta$  und der Steighöhe ist in der unteren Formel 1 zu erkennen.

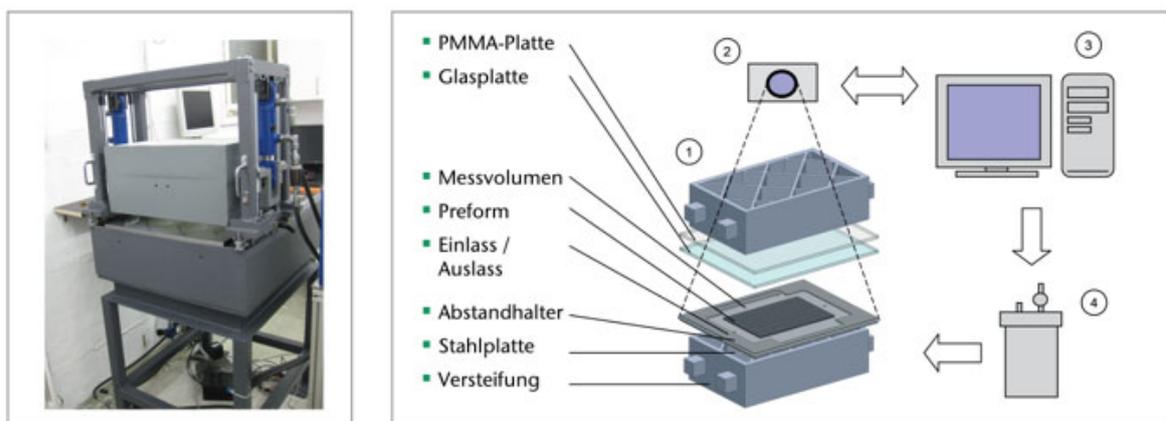
$$p_c = \frac{\sigma * \cos\theta}{d_H} \quad (1)$$

In Abbildung 12 ist exemplarisch die Steighöhe im Glasfaserroving bei der Tensiometermessung aufgezeigt. Es ist zu sehen, dass sich die Steighöhe einem Grenzwert annähert, bei dem das Kräftegleichgewicht eingestellt ist. Aus diesem Grenzwert kann dann die Oberflächenspannung ermittelt werden.



**Abbildung 12: Tensiometermessung der Steighöhe vom Glasfaserroving**

Am Institut für Polymerwerkstoffe und Kunststofftechnik steht ein eigens entwickelter Aufbau zur Messung der Permeabilität von Textilien zur Verfügung (siehe Abbildung 13). Hierbei werden die Textillagen auf einer Stahlplatte positioniert und mit einer durchsichtigen Glasplatte abgedeckt, damit der Fließfrontverlauf mit einem Kamerasystem ausgewertet werden kann. Mit einem Drucktopf wird über den Einlass das Textil mit einer Flüssigkeit bekannter Viskosität unter konstanten Druck infundiert. Mit entsprechenden Drucksensoren wird der Druckgradient während der Infusion gemessen. Mit einer entsprechenden massiven Versteifungsstruktur der Apparatur wird verhindert, dass sich die Glasplatte durch den Innendruck verformt und somit die Messung verfälscht. Mit den Abstandshaltern kann die Kavitätshöhe und somit der Faservolumengehalt bei der Messung eingestellt werden.

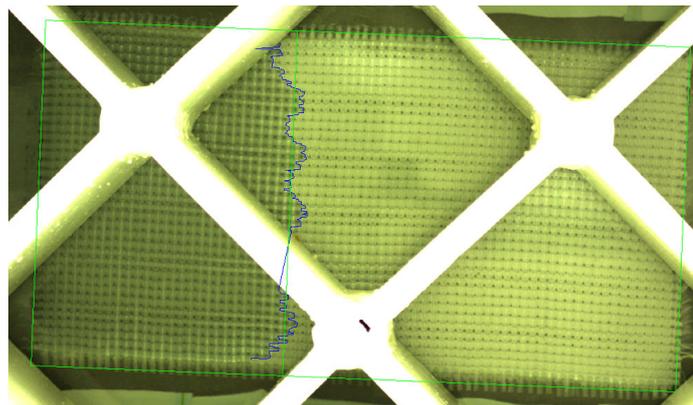


**Abbildung 13: Permeabilitätsmessstand**

Bei der Messung sind somit die Porosität  $\rho = 1 - \text{FVG}$  des Textils, die Viskosität der Flüssigkeit  $\eta$  und der Druckgradient  $\Delta p$  bekannt. Während der Messung wird der Fließfrontverlauf entlang die X-Achse über die Zeit  $t$  aufgenommen. Somit kann mithilfe des für eindimensionale Strömungen vereinfachten Gesetzes von Darcy die Permeabilität  $K$  des Textils bestimmt werden [24,25]:

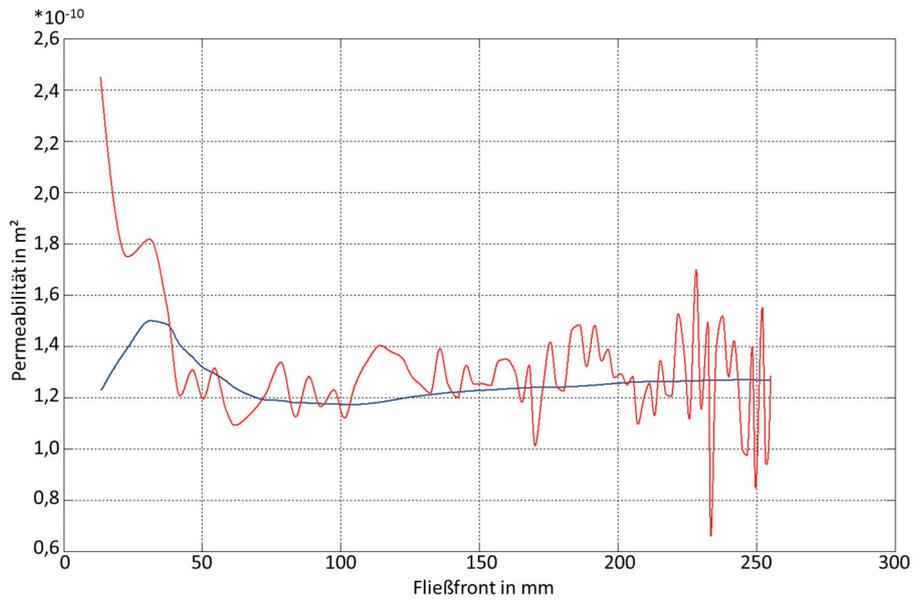
$$K = - \frac{x^2 * \rho * \eta}{2 * \Delta p * t} \quad (2)$$

Die entwickelte automatisierte Bildauswertung erkennt zu jedem Zeitpunkt der Messung die Fließfront (blaue Linie) und homogenisiert diese über die Breite des Textils (grüne Linie) und berechnet so zu jedem Zeitpunkt die Permeabilität des Textils (siehe Abbildung 14). Die Homogenisierung der Fließfront kann dahingehend angepasst werden, dass die verschiedenen Fließfrontgeschwindigkeiten in den eingebrachten Strömungskanälen und den restlichen Textil unterschieden und bestimmt werden können. So ist die Charakterisierung der lokalen Permeabilität möglich.



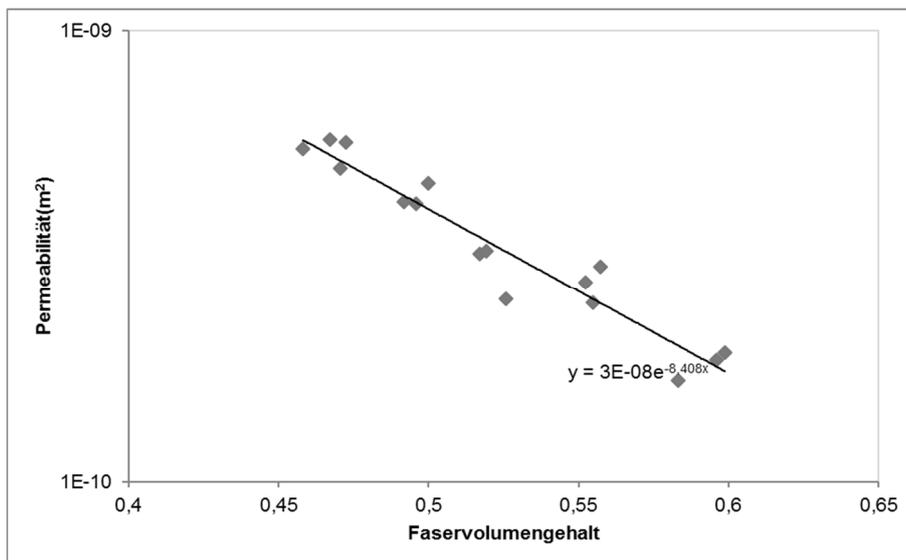
**Abbildung 14: Fließfronterkennung des Permeabilitätsmesszustandes**

In einem nächsten Schritt wird die örtliche Permeabilität über die Fließfrontposition aufgetragen. Die starke Schwankung der lokal ausgewertete Fließgeschwindigkeit führt zu einer fluktuierenden Kurve (siehe Abbildung 15 rot), deshalb wird parallel eine globale Permeabilität – homogenisiert bis auf den letzten betrachteten Zeitschritt – ausgewertet (siehe Abbildung 15 blau). Die globale Permeabilität des Textils mit dem vorgegebenen Faservolumengehalt wird aus dem letzten Grenzwert der Kurve entnommen.



**Abbildung 15: Permeabilität in Abhängigkeit der Fließfrontposition**

Die Permeabilität ist stark vom Faservolumengehalt des Aufbaus abhängig. Um höhere Faservolumengehalt zu erreichen, werden die Fasern stärker kompaktiert, was die Hohlräume reduziert und verengt. Dadurch wird der Fließwiderstand erhöht und folglich die Permeabilität exponentiell reduziert. Um diese Abhängigkeit zu charakterisieren, wird die beschriebene Permeabilitätsmessung bei mehreren Faservolumengehalten durchgeführt. Dieser Zusammenhang ist beispielhaft für ein Textil in Abbildung 16 dargestellt.



**Abbildung 16: Abhängigkeit der Permeabilität vom Faservolumengehalt**

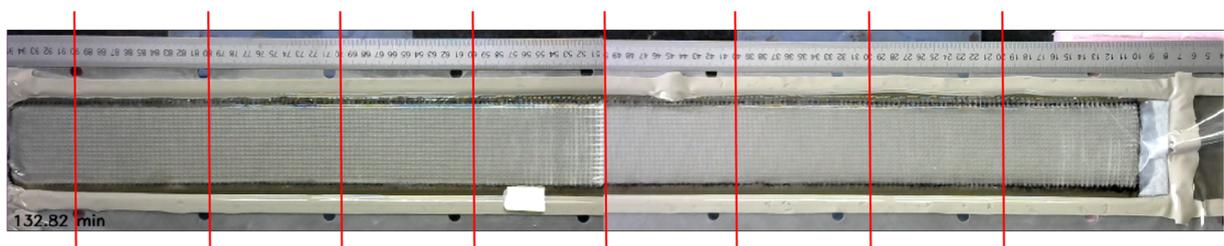
Die Dual-Scale-Effekte sind maßgeblich für die Poren in infusionstechnisch hergestellten Faserverbundbauteilen verantwortlich. Dementsprechend können diese auch am besten über

den Porengehalt in den Bauteilen quantifiziert werden. In vorhergehenden Forschungen konnte gezeigt werden, dass der Porengehalt in direktem Zusammenhang mit der Kapillarzahl  $Ca$  steht [31-33]. Diese dimensionslose Kennzahl gibt das Verhältnis von Viskositätskräften (Produkt aus dynamischer Viskosität  $\eta$  und Fließfrontgeschwindigkeit  $v$ ) zu Oberflächenspannungen  $\sigma \cos\theta$  an Phasengrenzen wieder.

$$Ca = \frac{\eta \cdot v}{\sigma \cdot \cos\theta} \quad (3)$$

Die Viskosität des Harzsystems kann mit einer Rheometermessung einfach bestimmt werden. Die Oberflächenspannung kann aus den Kapillaritätsmessungen mit Formel 1 berechnet werden. Die Fließfrontgeschwindigkeit kann entweder wie in den Permeabilitätsmessungen experimentell bestimmt oder in einer Fließsimulation ermittelt werden. Wird das Harzsystem vereinfacht als newtonsche Flüssigkeit angesehen, können die Viskosität und die Oberflächenspannung als konstant angesehen werden. Das führt dazu, dass die Kapillarzahl direkt proportional zur Fließgeschwindigkeit ist.

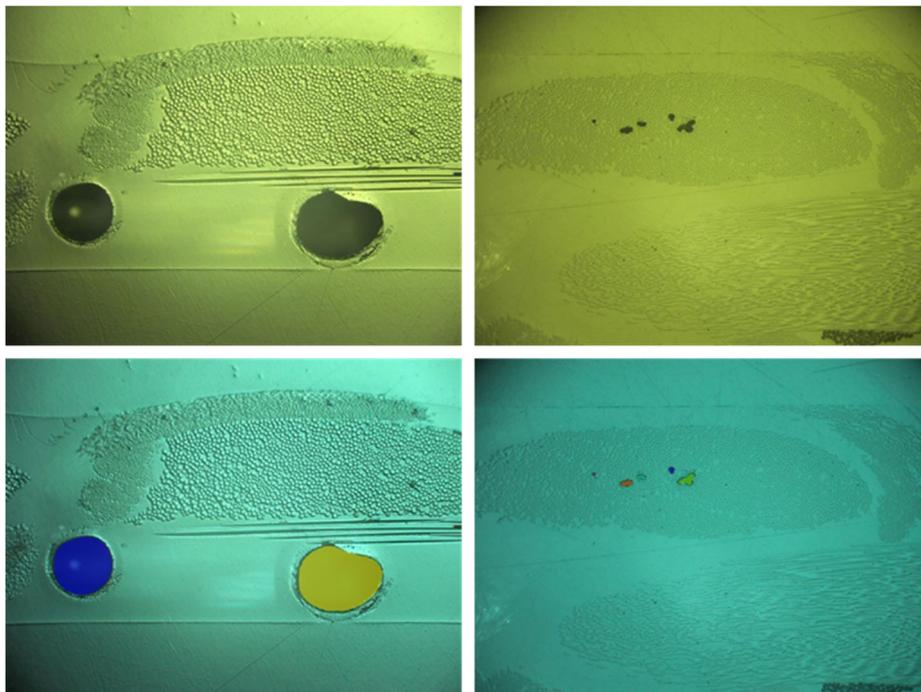
Um die Dual-Scale-Effekte zu quantifizieren wurde an einer Methode zur Aufnahme des Porengehalts in Abhängigkeit der Kapillarzahl beziehungsweise der Fließfrontgeschwindigkeit gearbeitet. Hierzu wurden glasfaserverstärkte Kunststoffplatten im VARI-Verfahren gefertigt. Während der Infusion wurde die Fließfrontgeschwindigkeit über die Länge der Platte dokumentiert. Nach dem Aushärten wurde in definierten Abständen in Infusionsrichtung der Platte der Porengehalt bestimmt (siehe Abbildung 17). Da zusätzlich zum Porengehalt auch in Makro- und Mikroporen unterschieden werden sollte, um das ideale Druckfenster bestimmen zu können, führt eine Dichtebestimmung mit anschließender Faservolumengehaltsbestimmung hier nicht zum Ziel. Aufgrund der Dicke der Platte und der großen Probenanzahl konnte die Röntgen-Mikrocomputertomographie ebenfalls für die Bestimmung der Poren nicht genutzt werden. So wurden letztendlich in definierten Abständen Querschnitte von den Platten angefertigt, diese eingebettet und Mikroskopiebilder angefertigt.



**Abbildung 17: Infusionsaufbau zur Bestimmung des Porengehalts mit gekennzeichneten Querschnitten**

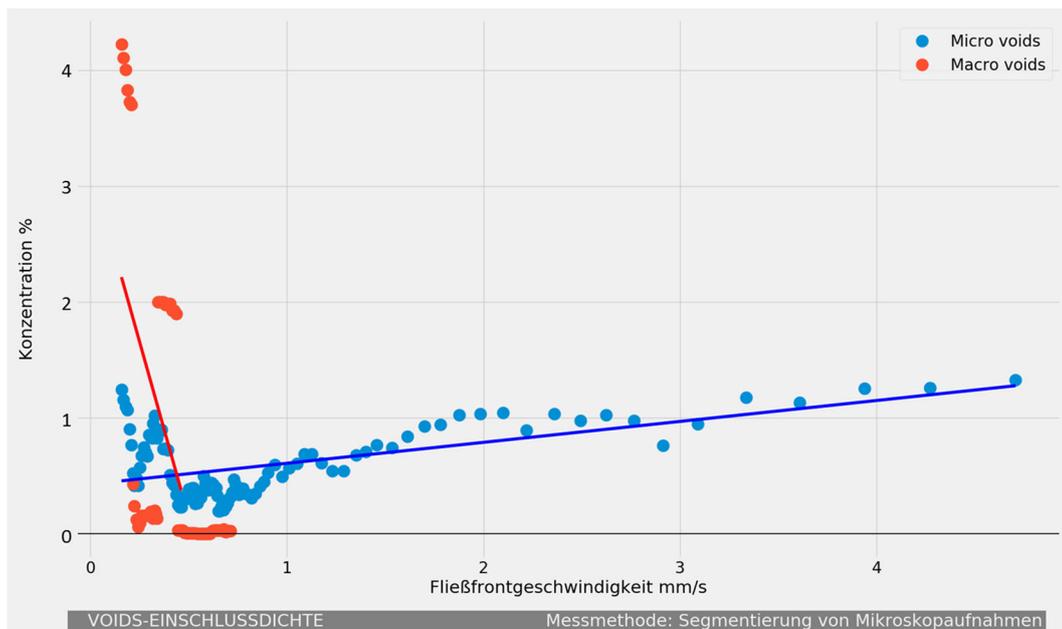
Aufgrund der großen Menge an Mikroskopieaufnahmen wurde zur Detektion der Poren ein Neuronales Netz eingesetzt. Hierfür werden zunächst an einem sogenannten Lerndatensatz

von ungefähr 20 Bildern die Poren mithilfe einer Bildbearbeitungssoftware manuell markiert. Der Lerndatensatz wird dann dem öffentlich erhältlichen Neuronalen Netz „Mask R-CNN“ zur Verfügung gestellt, das für die Erkennung von Umrissen vor allem in der Personenerkennung beim autonomen Fahren eingesetzt wird. Im Lernprozess werden dem neuronalen Netz die Fläche, Position und Art (Makro-/Mikroporen) zugewiesen. Nach dem Lernprozess kann das Programm die restlichen Bilder selbstständig und automatisiert auswerten. Ein Beispiel für die korrekte Erkennung der Makro- und Mikroporen ist in Abbildung 18 zu erkennen. Es ist ebenfalls zu erkennen, dass der Funktionsfaden, im rechten Bild unten rechts zu sehen, durch das Neuronale Netz nicht fälschlicherweise als Pore erkannt wird.



**Abbildung 18: Schlichtbilder von Makroporen (links) und Mikroporen (rechts) mit automatisierter Bilderkennung (unten)**

Mithilfe der Ergebnisse aus dem neuronalen Netz kann nun der Porengehalt an Makro- und Mikroporen in Abhängigkeit der Fließfrontgeschwindigkeit aufgetragen werden. In Abbildung 19 ist dieser Verlauf für das Basistextil SV0 zu sehen. Es zeigt sich der zuvor erläuterte Zusammenhang. Bei geringen Fließgeschwindigkeiten überwiegen die Kapillarkräfte und es kommt vermehrt zu Makroporen. Mit steigender Fließgeschwindigkeit überwiegen die Viskositätskräfte und es kommt vermehrt zu Mikroporen. Um ein Bauteil mit weniger als 1% Luftgehalt herzustellen, soll die optimale Fließgeschwindigkeit kann in diesem Fall bei ca. 0.5-3 mm/s angesetzt werden.



**Abbildung 19: Konzentration der Makro- und Mikroporen in Abhängigkeit der Fließfrontgeschwindigkeit beim Basistextil**

Die Fließgeschwindigkeit während des Infusionsprozesses kann über den Infusionsdruck geregelt werden. Hierbei müssen die angestrebten hohen Fließgeschwindigkeiten für eine möglichst kurze Infusionszeit mit dem entstehenden Porengehalt im Bauteil abgewägt werden. Zu diesem Zwecke kann die Fließsimulation in Verbindung mit der Dual-Scale-Modellierung in Kapitel 4.7 genutzt werden.

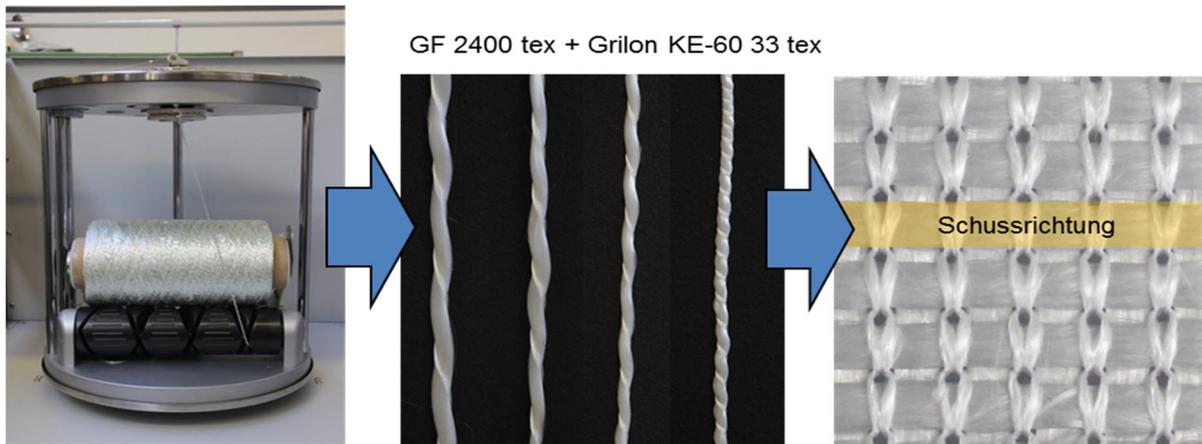
#### 4.4 Entwicklung und Umsetzung modifizierter Funktionsfäden bzw. -fadenstrukturen

Zur gezielten Beeinflussung der Permeabilität der MLG-Verstärkungshalbzeuge durch die Konstruktion von temporären Fließkanälen erfolgte die Entwicklung kompakterer Faden- und Bändchenstrukturen. Die verfolgten Ansätze dabei waren:

- 1. Ansatz: lokale Ausbildung von Strömungskanälen durch den Einsatz von mit matrixlöslichen Fäden umwickelten und somit temporär kompaktierten Rovings

Die Entwicklung der durch matrixlösliche Fäden kompaktierten Verstärkungsfaserrovings basierte auf dem Umwinden der ausgewählten GF-Garne (siehe Kapitel 4.1) mit matrixlöslichen Fäden an der am ITM vorhandenen AGTEKS Laborzwirnmachine Direct Twist. Als matrixlösliche Fäden wurden im Ergebnis der Untersuchungen am PuK zum Löslichkeitsverhalten in den im Projekt vorgesehenen Matrixsystemen die Garne KE-60 und MS-300 ausgewählt.

Im Rahmen einer Parameterstudie wurden unter Variation von Fadenspannung, Abzugsgeschwindigkeit, Anzahl der Umwindgarne und Dichte der Umwindungen insgesamt 30 Varianten der Funktionsfäden auf Basis des GF-Rovings 2400 tex und des Grilon KE-60 angefertigt. Die Prozesskette von der Garnumwindung in den verschiedenen Varianten bis hin zur Einbringung ins Flächengebilde ist in Abbildung 20 dargestellt.



**Abbildung 20: Entwicklung und Umsetzung modifizierter Funktionsfäden und Einbringung ins Flächengebilde**

**Tabelle 2: Hergestellte temporär kompaktierte Verstärkungsfaserrovings**

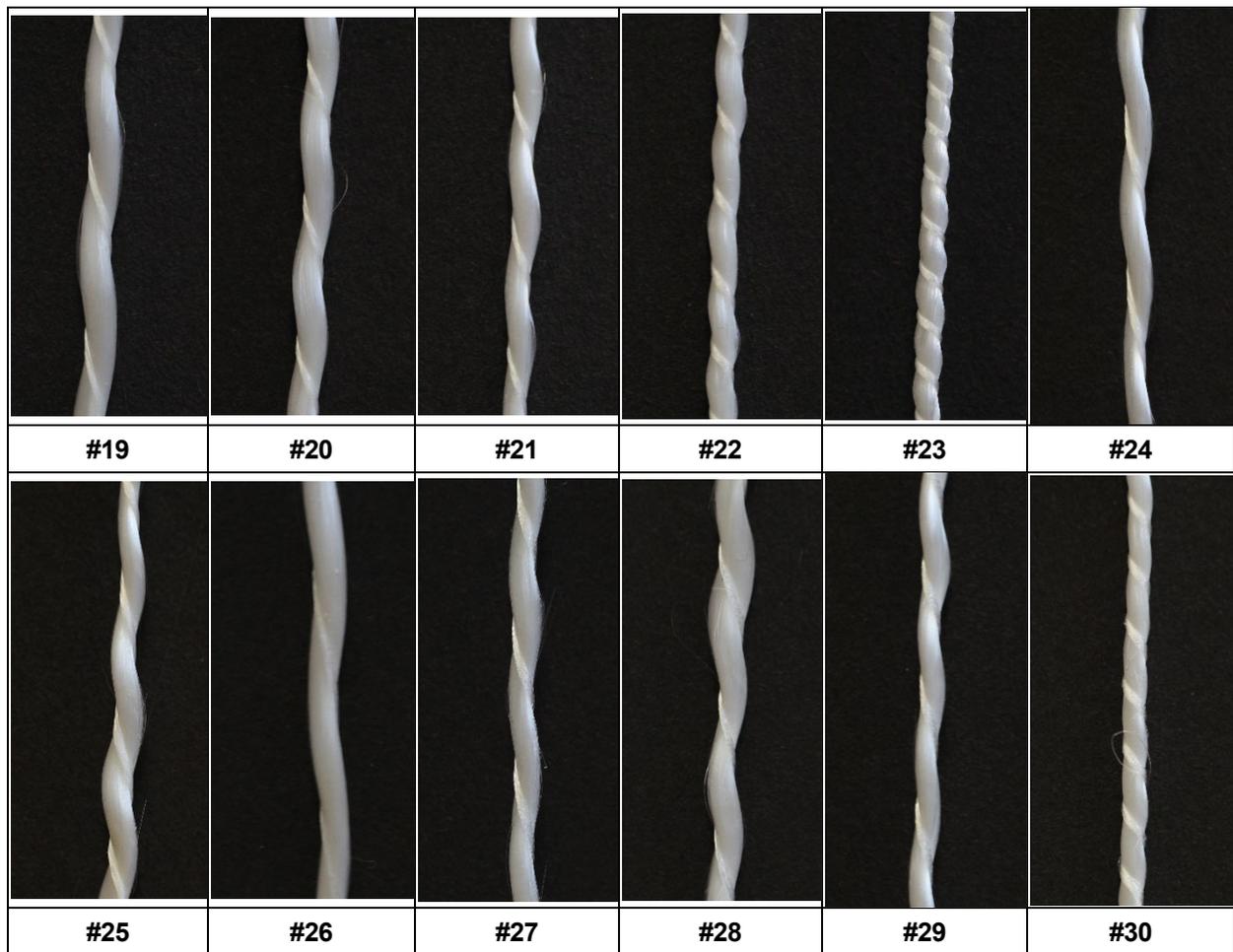
Bezeichnung	Material	T/Min	T/m	m/min	Einstellung Fadenbremse	Einstellung Seelenbremse	Kommentar	Umwindungsabstand berechnet in mm	geprüft ca. in mm
#1	4-fach MS 300	1400	100	14,00	FB normal	SB 2. Loch	spleißt und verzwirrt sich	10,00	35
#2	4-fach MS 300	1400	150	9,33	FB normal	SB 2. Loch	kaum Unterschied zu #1	6,67	38
#3	4-fach MS 300	1400	200	7,00	FB normal	SB 2. Loch	Mitte relevant	5,00	15
#4	4-fach MS 300	2100	200	10,50	FB normal	SB 2. Loch	starker Twist, Abw. ungewöhnlich	5,00	35
#5	4-fach MS 300	2100	250	8,40	FB normal	SB 2. Loch	Foto Twist und Speißen	4,00	21
#6	4-fach MS 300	2100	300	7,00	FB normal	SB 2. Loch		3,33	7
#7	4-fach MS 300	2800	300	9,33	FB normal	SB 2. Loch	Unterschied zu #6 unlogisch	3,33	11
#8	4-fach MS 300	3500	300	11,67	FB normal	SB 2. Loch	ungleichmäßig	3,33	12
#9	4-fach MS 300	3500	350	10,00	FB normal	SB 2. Loch		2,86	9
#10	4-fach MS 300	4000	400	10,00	FB normal	SB 2. Loch		2,50	7
#11	1-fach KE60	2800	200	14,00	FB normal	SB 2. Loch	lässt sich leicht verarbeiten	5,00	22
#12	1-fach KE60	2800	250	11,20	FB normal	SB 2. Loch		4,00	16
#13	1-fach KE60	2800	300	9,33	FB normal	SB 2. Loch	onduliert stark	3,33	13
#14	1-fach KE60	2800	300	9,33	FB offen	SB 2. Loch		3,33	13
#15	1-fach KE60	3500	350	10,00	FB normal	SB 2. Loch		2,86	12
#16	1-fach KE60	3500	350	10,00	FB normal	SB offen	onduliert stark	2,86	10
#17	1-fach KE60	3500	400	8,75	FB normal	SB 2. Loch	onduliert stark	2,50	9
#18	1-fach KE60	3500	450	7,78	FB normal	SB 2. Loch		2,22	8
#19	1-fach KE60	4550	450	10,11	FB normal	SB 2. Loch		2,22	8
#20	1-fach KE60	4550	500	9,10	FB normal	SB 2. Loch		2,00	8
#21	1-fach KE60	4550	550	8,27	FB normal	SB 2. Loch	unregelmäßig über die Länge	1,82	7
#22	1-fach KE60	4550	700	6,50	FB normal	SB 2. Loch		1,43	4
#23	1-fach KE60	8000	1000	8,00	FB normal	SB 2. Loch	gerissen	1,00	4
#24	2-fach KE60	4000	300	13,33	FB normal	SB 2. Loch	unregelmäßig über die Länge	3,33	8
#25	2-fach KE60	4000	400	10,00	FB normal	SB 2. Loch	unregelmäßig ü. L., onduliert stark	2,50	8
#26	2-fachMS300	2000	200	10,00	FB normal	SB 2. Loch		5,00	11
#27	2-fachMS300	2500	300	8,33	FB normal	SB 2. Loch		3,33	10
#28	2-fachMS300	2800	400	7,00	FB normal	SB 2. Loch	sehr plattes Garn	2,50	7
#29	2-fachMS300	3500	400	8,75	FB normal	SB 2. Loch		2,50	7
#30	2-fachMS300	3500	500	7,00	FB normal	SB 2. Loch	Foto Twist	2,00	6

Innerhalb der 30 verschiedenen Garnvarianten wurde die Materialauswahl (MS300 / KE 60), sowie die zugeführte Materialmenge (1-fach / 2-fach / 4-fach) variiert, sowie die Zuliefergeschwindigkeiten der Einzelkomponenten (T/min, T/m, m/min). Alle hergestellten Varianten sind in Tabelle 2 mit den Produktionsparametern aufgelistet.

Die resultierenden Funktionsfadenstrukturen sind in Tabelle 3 abgebildet. Vergleicht man die verschiedenen Varianten miteinander ist die hohe Varianz, eingestellt durch die oben genannten Parameter gut erkennbar.

**Tabelle 3: Übersicht aller hergestellten Umwindegarne (GF EC2400 + Grilon [MS300 / KE 60])**

					
#1	#2	#3	#4	#5	#6
					
#7	#8	#9	#10	#11	#12
					
#13	#14	#15	#16	#17	#18



In den Untersuchungen zeigt sich allerdings, dass Grilon MS-300 bei der Verarbeitung auf der Zwirnmachine aufspießt. In der Folge entstehen an Fadenumlenkstellen Fadenbrüche, die zu Maschinenstillständen führten. Eine Anpassung der Fadenführung ist prinzipbedingt nicht möglich. Mit dem Grilon MS-300 ist somit bis auf kleiner Probenmenge keine reproduzierbare Garnherstellung möglich. Bei der Verarbeitung des Grilon KE-60 treten keine derartigen Probleme auf. Eine fehlerfreie Garnherstellung ist möglich. Somit wird in den nachfolgenden Versuchen ausschließlich das matrixlösliche Garn Grilon KE-60 eingesetzt.

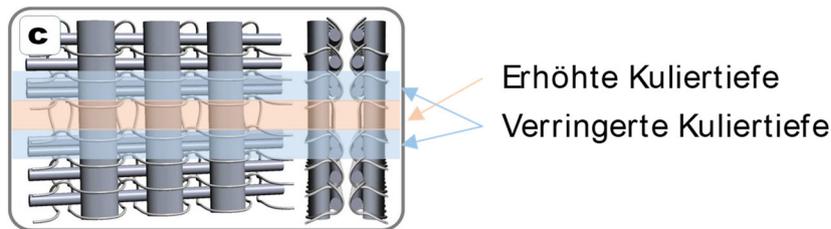
Um grundlegende Erkenntnisse zum Auflösungsverhalten und dem Schließen der Fließkanäle nach Auflösen der entwickelten Funktionsgarnvarianten im Matrixsystem zu erhalten, wurden zunächst Mustermengen angefertigt, die für Versuchsversuche bzw. die experimentellen Untersuchungen in AS 6 eingesetzt wurden. Durch anschließende Untersuchungen aussichtsreicher Funktionsfäden am PUK zum Löslichkeitsverhalten und Versuchsversuchen als Schussfaden an der Flachstrickmaschine Steiger aries 3D, wurde als Vorzugsvariante die Funktionsfadenvariante #22: GF2400 tex + 1xKE60\_700tpm ausgewählt.

- 2. Ansatz: Bändchen

Die Entwicklung der Bändchen für die Generierung von Fließkanälen in den MLG-Verstärkungshalbzeugen erfolgte auf Basis der Spreiztechnik. Dazu wurden Vorversuche durchgeführt, wobei das Aufspreizen und das Aufbringen eines matrixlöslichen Pulverbinders erprobt wurden. Der homogene Pulverauftrag und das thermische Aktivieren des Pulverbinders stellte eine besondere technologische Herausforderung dar. Bei der im Projekt vorgesehenen Entwicklung von Bändchenstrukturen zur Generierung der Fließkanäle hat sich gezeigt, dass die Imprägnierung der aufgespreizten Garne mit Bindermaterialien nicht ausreichend ist, um nach dem thermischen Aktivieren der Binder eine gleichmäßig kompakte Bändchenstruktur zu erreichen bzw. dass diese bei der textilen Verarbeitung durch Umlenkungen an den Fadenführungselementen und bei der Maschenbildung wieder aufgelöst wird. Auch mit der Erhöhung des Binderanteils konnte dieses Problem nicht zufriedenstellend gelöst werden. Durch einen hohen Binderanteil entsteht eine steife Garn- bzw. Bändchenstruktur deren textile Verarbeitbarkeit nicht mehr gegeben ist. Entsprechend wurde daher die Entwicklung von Bändchenstrukturen in Abstimmung mit dem PA als nicht erfolgversprechend eingestellt.

- 3. Ansatz: bindungstechnische Kompaktierung von einzelnen Verstärkungsfaserrovings / lokale Kompaktierung des Flächengebildes

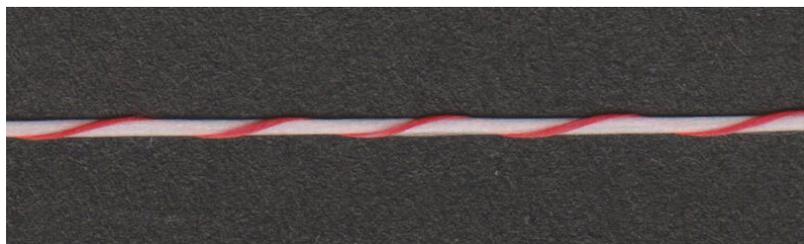
Durch eine lokale Variation der Maschinenparameter (Kuliertiefe, Abzug, Materialauswahl, etc.) kann die textile Verstärkungsstruktur ebenfalls kompaktiert werden. In Verbindung mit der Variation des Fadenmaterials ergibt sich hier eine hohe Anzahl einstellbarer Parameter. Verfahrenstechnisch können prinzipiell Kuliertiefe sowie das Maschen- und das Schussfadenmaterial dabei innerhalb einer Strickreihe und die Abzugseinstellungen je Strickreihe variiert werden. Somit ist die lokale Kompaktierung und Ausbildung eines Fließkanals auch nur über einen Teilbereich der Produktionsbreite möglich. Allerdings ist der Aufwand für derartige Einstellung aktuell sehr hoch. Für die grundlegenden Untersuchungen im Rahmen dieses Projekts erfolgen alle Anpassungen zunächst jeweils für eine komplette Maschenreihe. Die Kompaktierung wird durch die lokale Variation der Kuliertiefe unter Anpassung des Abzuges realisiert (siehe Abbildung 21). Durch eine erhöhte Kuliertiefe wird die Maschenlänge im jeweiligen Bereich erhöht, was bei konstantem Abzug zur Folge hat, dass benachbarte Schussfäden einen größeren Abstand zueinander aufweisen, so dass zwischen diesen mehr Raum entsteht. Dieser Effekt lässt sich verstärken, indem in der Maschenreihe vorher und nachher die Kuliertiefe verringert wird, und somit die Schussfäden hier einen geringeren Abstand aufweisen.



**Abbildung 21: Schematische Darstellung der lokalen bindungstechnischen Strukturkompaktierung**

Durch die lokale Nutzung eines matrixlöslichen Maschenfadensystems in den entsprechenden Maschenreihen kann diese Kompaktierung im Bauteilherstellungsprozess durch Temperatureinwirkung aufgehoben werden. Durch den aufgrund der Kompaktierung bei der Infiltration wirkenden Druck werden die lokal freigegebenen Schussfäden dann verschoben und es entsteht eine gleichmäßige Verstärkungsstruktur.

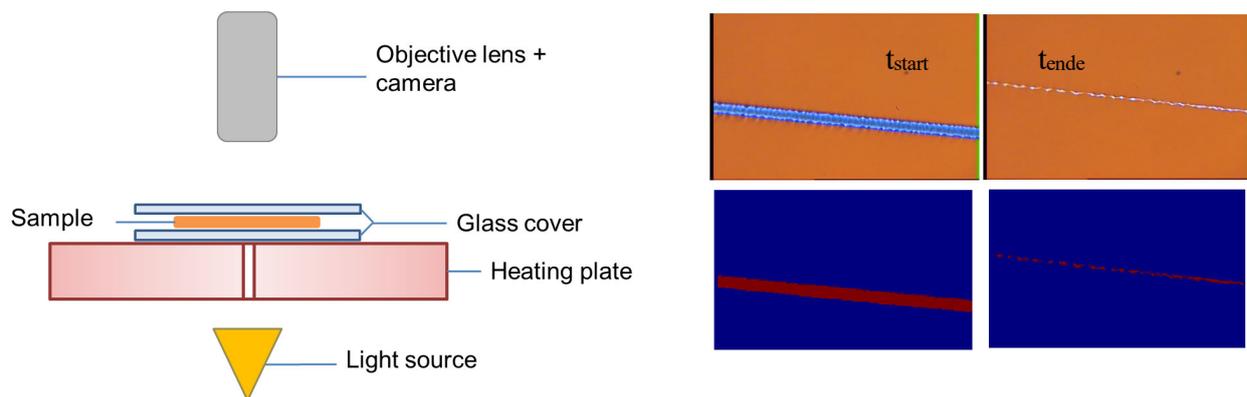
Die Herausforderung bei der Garnentwicklung für den Maschenfaden besteht darin, ein Garn bereitzustellen, das eine sehr definierte Bewegung der Schussfäden erlaubt. Dazu muss einerseits sichergestellt sein, dass der entsprechende Raum für die Bewegung der Schussfäden bereitgestellt wird, andererseits die Maschenstruktur als solche aber intakt bleibt. Daher wurde für das Schließen der Gassen ein angepasster Maschenfaden angefertigt, bei dem das Funktionsgarn Grilon KE-60 als Kernmaterial mit einem Glasfasergarn umwunden wurde. Das so hergestellte Material ist in Abbildung 22 exemplarisch dargestellt.



**Abbildung 22: Angepasster Maschenfaden aus Grilon KE-60 (weiß) und GF (rot)**

Durch das Umwinden des Grilonfadens mit GF, liegt diese nicht gestreckt vor. Wird der Grilonkern nach der Infiltration der textilen Struktur während der Bauteilherstellung temperaturinduziert aufgelöst, wird die durch das Umwinden eingebrachte Fadenreserve des GF-Maschenfadens freigegeben. Somit wird eine lokal begrenzte Bewegung der Kett- und Schussfäden und in der Folge das Schließen der zuvor gebildeten Gasse ermöglicht. Die experimentelle Herstellung der verschiedenen Funktionsmuster und der Nachweis des Prinzips erfolgte im Rahmen des Arbeitspaktes 5 (Kapitel 4.5).

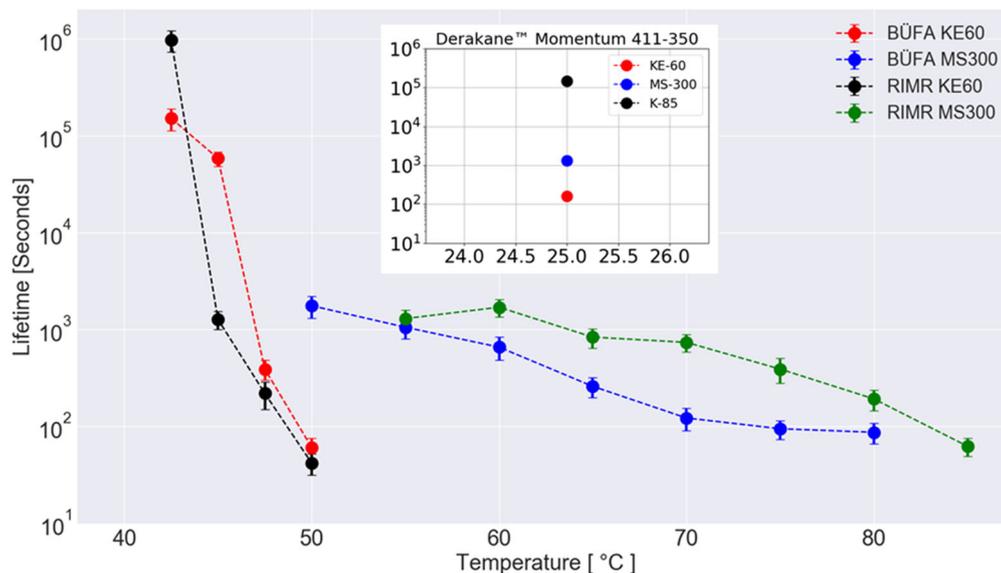
Von der Firma EMS Chemie GmbH wurden als möglicher Funktionsfaden die drei verschiedenen thermoplastischen Grilon-Fadenstrukturen MS-300, KE-60 und K-85 für die Untersuchungen zur Verfügung gestellt. Um festzustellen, welche Funktionsfäden sich in Kombination mit welchen Harzsystemen konzeptionell für die Anwendung in diesem Projekt eignen, wurden am Institut für Polymerwerkstoffe und Kunststofftechnik Vorversuche zur Löslichkeit der drei unterschiedlichen Funktionsfäden in den drei unterschiedlichen Harzsystemen (siehe Tabelle 4) durchgeführt. Hierfür wurde ein Durchlichtmikroskop mit einer integrierten Heizplatte und einem Kamerasystem verwendet (siehe Abbildung 23 links). Das Harzsystem wird zwischen zwei Glasplatten auf die Heizplatte aufgebracht. Innerhalb des Sichtbereichs wird ein einzelner Funktionsfaden in das Harzsystem eingebracht und dessen Kontur während des AuflöSENS aufgenommen. Um die Löslichkeit der Systeme mithilfe der Mikroskopaufnahmen quantitativ vergleichen zu können, wurde eine schnelle Bild-Analyse-Methode entwickelt, die in dem Mikroskopbild den Funktionsfaden einfärbt und dessen Dicke bestimmt (siehe Abbildung 23 rechts). Wenn der Funktionsfaden nicht mehr als durchgängige Linie erkennbar ist, wird die bis dahin vergangene Zeit als Lebensdauer des Funktionsfadens im Harzsystem definiert.



**Abbildung 23: Schematische Darstellung des Mikroskopaufbaus (links) und die Bewertung des Auflösungsverhaltens mit der Bild-Analyse-Methode (rechts)**

Es konnte gezeigt werden, dass der Funktionsfaden K-85 in den untersuchten Harzsystemen nicht löslich und somit für die weiteren Untersuchungen nicht geeignet ist. Das Vinylesterharzsystem (Momentum 411-350) von Ashland wurde aus Sicherheitsgründen nur bei Raumtemperatur untersucht, da laut Sicherheitsdatenblatt der Flammpunkt bei 29,4°C liegt und die Untersuchungen in einem offenen System durchgeführt wurden. Die Messungen zeigen, dass für die beiden Funktionsfäden KE-60 und MS-300 im Vinylesterharz die Löslichkeitsgeschwindigkeiten vergleichsweise hoch sind. Somit eignet sich dieses Harzsystem zur Auflösung der Funktionsfäden. Dieses Harzsystem wird jedoch für die weiteren Un-

tersuchungen zunächst nicht weiter betrachtet, weil der niedrige Flammpunkt die Einsatzmöglichkeiten einschränkt und so die Untersuchungen in diesem Projekt mit dem Ziel ein möglichst breites Anforderungsspektrum abzudecken nicht dargestellt werden können.



**Abbildung 24: Vergleich des Auflöseverhaltens der Funktionsfäden KE-60 und MS-300 in den Harzsystemen RIMR 135 und BÜFA Labormuster VII in Abhängigkeit der Temperatur**

Die verbleibenden beiden Funktionsfäden KE-60 und MS-300 zeigen jeweils in den beiden Harzsystemen von Hexion und BÜFA ein jeweils ähnliches Auflöseverhalten in Abhängigkeit der Temperatur (siehe Abbildung 24). Beim MS-300 ist ein Auflösen ab 50 °C zu beobachten. Mit einer Erhöhung der Temperatur auf 80 °C kann eine Verkürzung der Lebensdauer von ca. 20 min auf 2 min erreicht werden. Beim Funktionsfaden Grilon KE60 wurde bei Temperaturen unter 45 °C keine Auflösung festgestellt. Wird die Temperatur hier erhöht, steigt das Auflöseverhalten signifikant, sodass bei 50 °C bereits eine Lebensdauer von unter 2 min erreicht ist. In Tabelle 4 sind die Ergebnisse des Auflöseverhaltens der Funktionsfäden in den Harzsystemen zusammenfassend dargestellt.

Somit kann bei beiden Funktionsfäden in diesen Harzsystemen das Auflöseverhalten über die Temperatur gesteuert werden. Bei einer Infusion bei Raumtemperatur bleibt dadurch die Textilstruktur mit den Strömungskanälen erhalten. Beim anschließenden Aushärtprozess findet dann die Auflösung in einem ausreichend kurzen Zeitraum statt, damit die Auflösung vor der Aushärtung abgeschlossen ist. Da beim Funktionsfaden Grilon KE-60 die Lebensdauer schon bei geringen Temperaturerhöhungen signifikant absinkt, ist dieser im besonderen Maße für den beschriebenen Anwendungsfall geeignet. Dementsprechend wurde sich für alle nachfolgenden Untersuchungen auf den Funktionsfaden Grilon KE-60 konzentriert.

**Tabelle 4: Die untersuchten Matrizen und Funktionsfäden**

Hersteller/Matrix \ Funktionsfäden		EMS-CHEMIE AG		
		Grilon MS-300	Grilon KE-60	Grilon K-85
Hexion Specialty Chemicals B.V.	EPIKOTE™ Resin MGS RIMR 135	Löslich	Löslich	Nicht löslich
BÜFA Composite Systems GmbH&Co. KG	BÜFA®-laboratory sample VII	Löslich	Löslich	Nicht löslich
Ashland Technologies GmbH	Derakane Momentum™ 411-350	Löslich, aber niedriger Flammpunkt	Löslich, aber niedriger Flammpunkt	Nicht löslich

#### 4.5 Experimentelle Untersuchungen zur Umsetzung textiler 2D-Funktionsmuster mit textiltechnisch integrierten Strömungskanälen

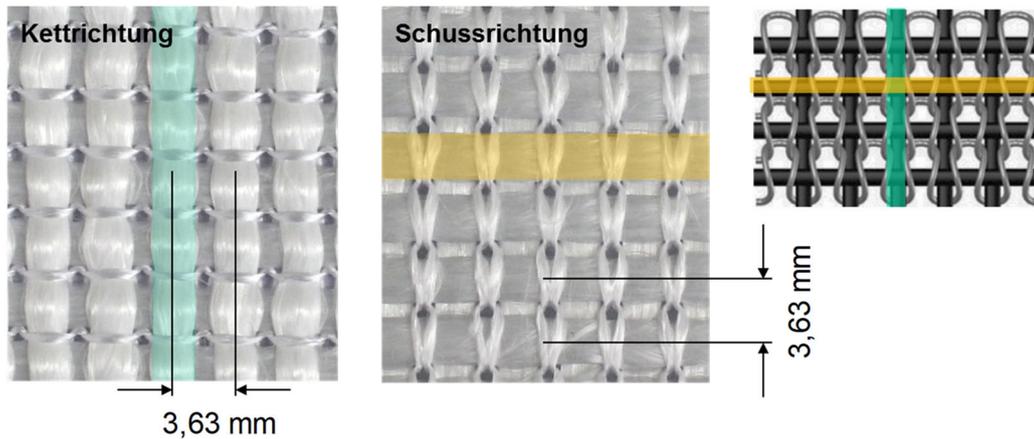
Für die Umsetzung der theoretisch entwickelten MLG-Verstärkungshalbzeuge wurde eine Flachstrickmaschine vom Typ Steiger Aries 3D mit der Feinheit E7 (7 Nadeln/Zoll) ausgewählt und angepasst. Diese Flachstrickmaschine bietet das Potential sämtliche Parameter (Verarbeitung von modifizierten Garnmaterial, Schuss- und Kettfadendichte, Fadenspannungen, Kuliertiefe, Bindung, Abzugskraft und -weg), die zur Einstellung der Permeabilitätseigenschaften bisher absehbar sind, bedarfsgerecht einzustellen. Für die Basisvariante wird jeweils das gleiche Fadenmaterial bei identischer Schuss- und Kettfadendichte verwendet. Aus der Verarbeitung der genannten Fadenmaterialien auf der Flachstrickmaschine resultiert ein MLG-Verstärkungshalbzeug mit folgenden Eigenschaften:

- RL-Bindung
- 28 dm<sup>-1</sup> Schuss- und Kettfadendichte
- ca. 1470 g/m<sup>2</sup> Flächenmasse
- 1,05 mm theoretisch konsolidierte Verbunddicke pro Lage bei 55 Vol.-% GF

Die in AS2 theoretisch entwickelten Varianten der drei Funktionsmuster wurden unter Verwendung der hergestellten Funktionsfadenstrukturen aus Kapitel 4.4 experimentell umgesetzt. Nach der Einrüstung der Maschine erfolgten Strickversuche zur Analyse des komplexen Zusammenspiels von bindungstechnischen Möglichkeiten und Prozessparametern zur Identifizierung geeigneter Kombinationen für die Herstellung von MLG-Verstärkungshalbzeugen durch die sich die Permeabilitätseigenschaften gezielt einstellen lassen.

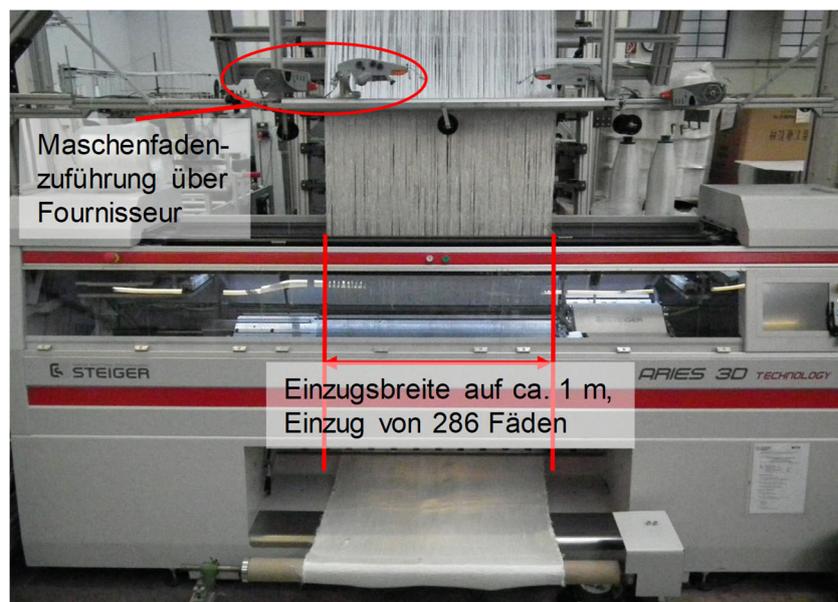
In diesem Prozess wurde der Einfluss der Maschinenparameter und Materialparameter auf die Struktureigenschaften (Geometrie der Strömungskanäle) festgestellt. Das Zusammenspiel der bindungstechnischen Möglichkeiten und Maschinenparameter wurde iterativ an der Maschine ermittelt und so die passenden Parameter für die Herstellung der MLG-Strukturen mit integrierten Kanälen gefunden.

In Abbildung 25 ist die zuerst entwickelte und angefertigte textile Basisstruktur dargestellt. Diese dient zu Vergleichszwecken mit den modifizierten Strukturen.



**Abbildung 25: Angefertigte textile Basisstruktur**

Eine schädigungsarme Zuführung und Einstellung der Fadenspannungen wurde gewährleistet durch die Zuführung der Kettfäden vom Spulengatter (möglichst wenige Kontaktpunkte). Das Maschenfadensystem wurde wie an Strickmaschinen üblich über einen Fournisseur spannungsreguliert zugeführt. Dieser ist in Abbildung 26 zu erkennen.



**Abbildung 26: Steiger Aries 3D Strickmaschine (Feinheit: E7) mit eingezogenem KF-Material (1 m Produktionsbreite)**

Der Schussfaden wurde der Strickstelle über ein System aus Führungsrollen und einen materialangepassten und -schonenden Fadenführer zugeführt (siehe Abbildung 27).

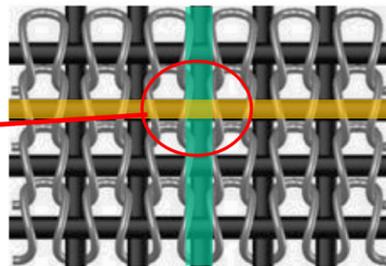
Steiger Aries 3D, Feinheit E7 (7 Nadeln/Zoll)



Fadenführerröhrchen für Kettfaden

Schussfadenführer

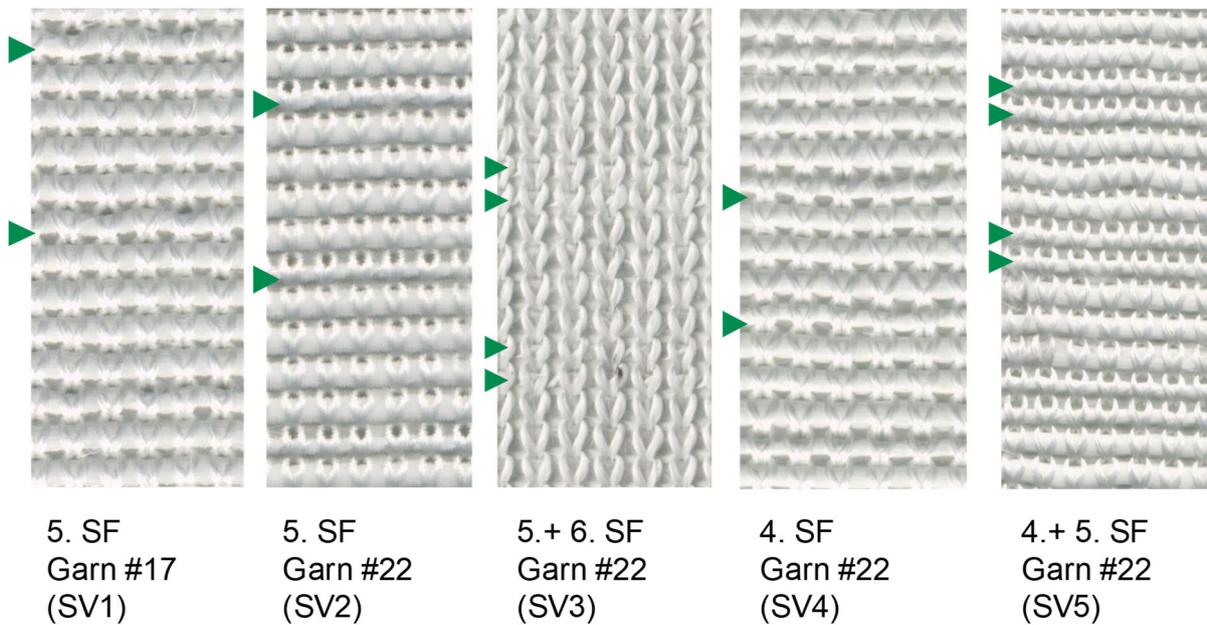
Schuss- und Kettfaden werden durch den Maschenfaden am Kreuzungspunkt fixiert



Biaxial verstärktes Mehrlagengestrick

Abbildung 27: Fadenzuführsystem an der Strickmaschine

Als Ergebnis der Fertigungsversuche zeigte sich, dass diese textile Basisstruktur mit sehr guter Reproduzierbarkeit gefertigt werden kann. Ausgehend von dieser Variante erfolgte in iterativer Vorgehensweise die theoretische Entwicklung von jeweils 5 MLG-Verstärkungshalbzeugen in AP 2. Zur Einbringung der Strömungskanäle in die textilen Strukturen erfolgten in Schuss- und Kettrichtung Verarbeitungsversuche der in AS 4 angefertigten kompaktierten Garne, die keine Verarbeitungsschwierigkeiten aufzeigten. Entsprechend der in AP 2 theoretisch entwickelten Varianten mit temporären Fließkanälen in Schuss- und Kettrichtung wurden Mustermengen angefertigt, an denen zunächst Untersuchungen zur Permeabilität durchgeführt werden, um in iterativer Vorgehensweise Vorzugsvarianten zu ermitteln.



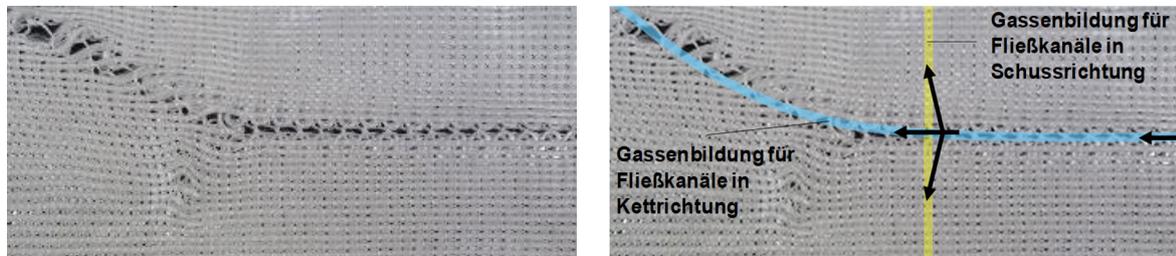
**Abbildung 28: In SR modifizierte MLG-Strukturen SV1-SV5**

Nach den Verarbeitungsversuchen ausgewählter Funktionsfäden aus AP 4 wurden mit der Vorzugsvariante die experimentellen Untersuchungen zur Umsetzung der MLG-Varianten mit Strömungskanälen in Schuss- und Kettrichtung sowie mit frei wählbarer Anordnung temporärer Strömungskanäle fortgesetzt. Erprobt wurde dabei die Erzeugung von integrierten Strömungskanälen durch die lokale Anpassung der Schuss- und Kettfadendichten über die Variation der Kett-, Schuss- und Maschenfadenspannungen, der Kuliertiefe. Der Einfluss der Parameter auf die Halbzeugeigenschaften wurde ermittelt und bewertet. In Abbildung 29 ist eine entwickelte Gestrickstruktur zur Einbringung eines Fließkanals in frei wählbarer Orientierung dargestellt. In diesem Fertigungsversuch wurde auf die Einbringung von Kett- und Schussfäden verzichtet, um den eingebrachten Fließkanal besser sichtbar zu machen.



**Abbildung 29: Frei orientiert eingebrachter Fließkanal, Verzicht auf Kett- und Schussfäden für verbesserte Sichtbarkeit der Bindungstechnik**

Für die Umsetzung von textilen 2D-Funktionsmustern mit frei wählbarer Anordnung der temporären Strömungskanäle wurden Untersuchungen zur Ausbildung der Strömungskanäle in Kettrichtung durch bindungstechnische Variationen ausgeführt. Dazu wurde die Einbindung der Funktionsgarne aus AP 4 in Schussrichtung systematisch untersucht (Abbildung 30).



**Abbildung 30: MLG Struktur mit frei wählbarer Anordnung temporärer Strömungskanäle**

Die Einbringung von frei orientierbaren temporären Fließkanälen wurde im Grundsatz durch die Technologie ermöglicht. Jedoch besteht bzgl. des Wiederverschließens der Fließkanäle nach Abschluss der Infiltration vor allem in gekrümmten dreidimensionalen Bauteilbereichen mit hoher Wandstärke noch Forschungsbedarf.

Die reproduzierbare Herstellung von Strukturen der Funktionsmuster 1-3 wurde erfolgreich gezeigt. Die Technologie zur Einbringung von temporären Strömungskanälen in einer textilen Verstärkungsstruktur wurde an MLG erprobt. Die Ergebnisse sind auf andere textile Flächenbildungsverfahren, wie das Weben oder Wirken übertragbar.

#### **4.6 Charakterisierung der Textilhalbzeuge im Hinblick auf die Strömungskanäle, die Kompaktierungseigenschaften und die Imprägnierbarkeit**

Am ITM erfolgte unmittelbar nach der Fertigung der textilen Proben eine grundlegende textile Charakterisierung der Halbzeuge. Hierbei wurde das Warenbild auf Gleichmäßigkeit und Fehlstellen begutachtet, sowie Flächengewicht, Fadendichten und Maschenlängen bestimmt. Die Ergebnisse werden in einer Datenbank erfasst und mit dem PUK ausgetauscht. Die Kennwerte für die textile Basisvariante sind in Tabelle 5 aufgeführt. Im Abgleich mit der theoretischen Auslegung in AS 2 konnte eine gute Übereinstimmung zwischen den erwarteten und den erzielten Werten festgestellt werden. Die erreichte Qualität des Warenbildes ist sehr gut, gleichmäßig, sowie frei von Fehlstellen.

Neben den Kennwerten der textilen Basis- bzw. Vergleichsvariante wurden die entwickelten Textilstrukturen, welche in Schussrichtung modifiziert wurden, im gleichen Verfahren grund-

legend textiltechnisch charakterisiert. Diese sind ebenfalls in Tabelle 5 abgebildet. Die Flächenmasse der modifizierten Varianten ist im Vergleich zur Referenzstruktur erhöht. Dies lässt sich einerseits durch die Einbringung des Zusatzmaterials (Kompaktierfadensystem Grilon) begründen. Andererseits mit der im Folgenden erklärten Schussfadendichte. Die Maschenlänge entspricht der in den ausgeformten Maschen enthaltenen Fadenlänge. Diese wurde über die SV nahezu konstant gehalten. Die maximale Abweichung beträgt 4% bezogen auf die Referenzstruktur. Die Kettdichte, entspricht einem textilphysikalischeren Kennwert und repräsentiert die Anzahl von Kettfäden auf einer definierten Breite. In diesem konkreten Fall ist dieser maßgeblich abhängig von der Maschinenfeinheit der Strickmaschine, da die Kettfäden zwischen den Nadeln positioniert sind. Die Schussdichte ist das Pendant zur Kettdichte, jedoch quer zur Produktionsrichtung. Wird eine gleichmäßige Verstärkungswirkung längs und quer zur Produktionsrichtung angestrebt, sollte das Verhältnis von Kett- zu Schussdichte zu 1:1 eingestellt werden. Durch die Einbringung des modifizierten, kompaktierten Materials, bei zunächst konstanten Maschinenparametern, kommt es zu erhöhten Schussfadendichten in den erzeugten Varianten. Dies ist durch eine entsprechende Anpassung der Maschinenparameter ausgleichbar.

**Tabelle 5: Textilphysikalische Kennwerte der textilen Basis- und Modifikationsvarianten SV1-SV5**

Kennwert	Einheit	Referenz	SV1	SV3	SV4	SV5
Flächenmasse	g / m <sup>2</sup>	1552	1788,2	1868,9	2053,1	1929,7
Maschenlänge	mm	14,6	14,7	14,5	14,0	14,3
Kettdichte	dm <sup>-1</sup>	27,2	27,7	27,7	27,9	27,7
Schussdichte	dm <sup>-1</sup>	27,2	31,3	32,6	34,0	32,9

An den textilen Strukturen wurden im nächsten Schritt am PuK die Kompaktierungseigenschaften bestimmt, um daraus den erwartbaren Faservolumengehalt bei den nachfolgenden Permeabilitätsmessungen und der Infusionen im VARI-Verfahren unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Kanäle und deren Anordnungen bestimmen zu können.

Zur Bestimmung der Kompaktierung wird die in Abbildung 31 dargestellte Vorrichtung in einer Zwick-Universalprüfmaschine verwendet. Zwei Lagen textile Struktur werden dazu auf eine definierte Druckplatte von 50 x 50 cm<sup>2</sup> aufgelegt und die Messvorrichtung zur Simulation des VARI-Verfahren bis zu einem Druck von 1,2 bar zusammengefahren. Während des Versuches wird der sich ergebende Plattenabstand, der der späteren Bauteildicke entspricht, über dem Kompaktierungsdruck aufgenommen. Mit dem bekannten Flächengewicht der textilen Strukturen ist dann der Faservolumengehalt berechenbar. Der in Abbildung 31 sichtbare Überlaufkanal erlaubt mit dieser Vorrichtung auch Durchführung von Nasskompaktierungen.

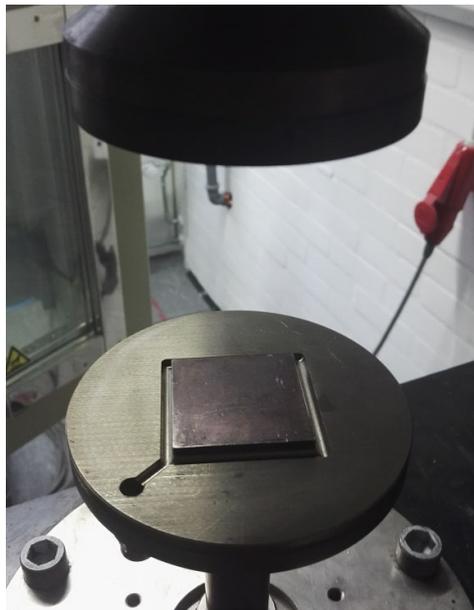


Abbildung 31: Vorrichtung zur Messung der Kompaktierung

In Abbildung 32 sind die Kompaktierungsmessungen der Version SV5 des Mehrlagengestricks in verschiedenen Lagenanordnungen dargestellt, wobei das Textil trocken war. Wie zu erwarten, ist ein höherer Faservolumengehalt erreichbar, wenn die beiden Lagen des Textils so angeordnet sind, dass in der Symmetrieebene die Fasern in der gleichen Richtung liegen. In diesem Fall können die Faserbündel in die jeweiligen Zwischenräume der Gegenseite rutschen, was die Packungsdichte erhöht (siehe Abbildung 5 b).

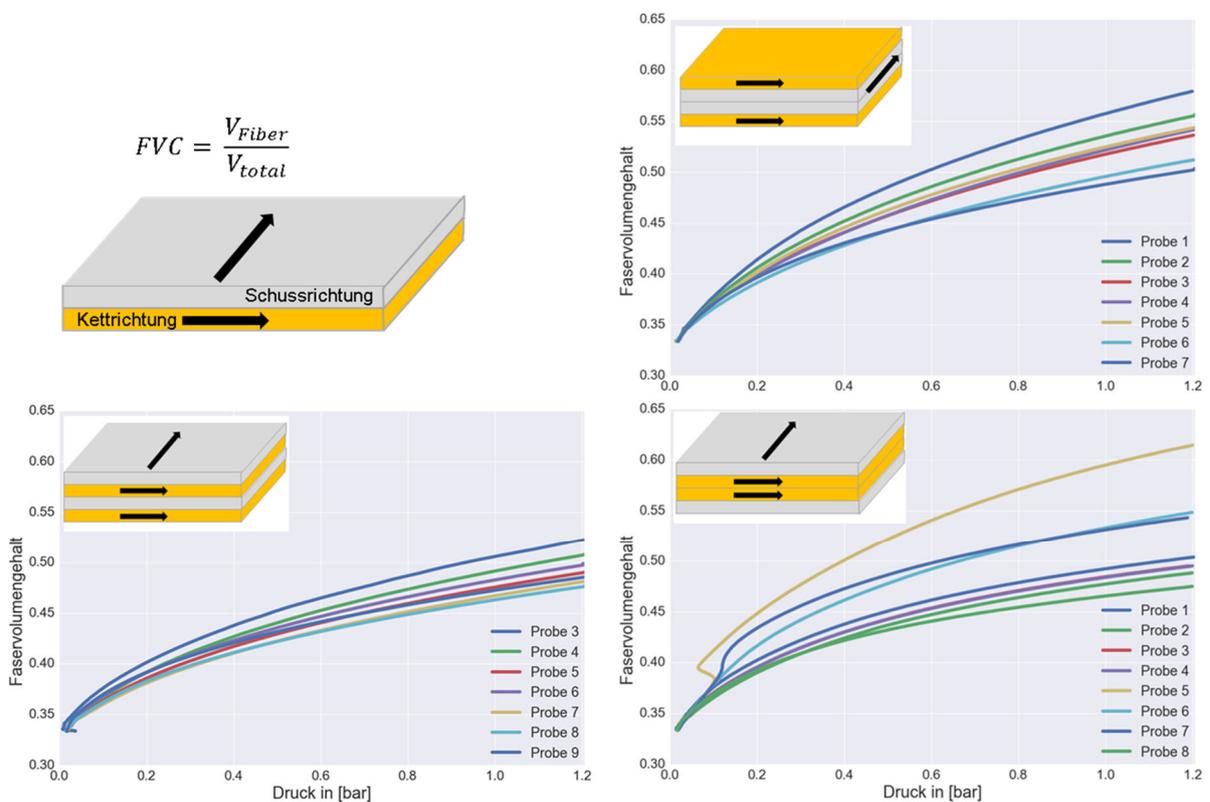


Abbildung 32: Kompaktierungsmessungen für unterschiedliche Anordnungen des Textils SV5

Im Gegensatz dazu wird dies durch senkrecht zueinander ausgerichteten Faserlagen an den Kreuzungspunkten der Rovings verhindert. Ein Vergleich der Kompaktierung von aufeinanderliegenden Lagen in Kettrichtung und Schussrichtung zeigt, dass in Schussrichtung eine höhere Kompaktierung erreicht werden kann. Es ist zu vermuten, dass durch die Strömungskanäle in Schussrichtung die Faserbündel enger ineinander rutschen können. Dementsprechend sollte beim Einsatz der textilen Strukturen darauf geachtet werden, dass nicht zwei modifizierte Schussrichtungen direkt übereinanderliegen, weil sonst die Strömungskanäle verschlossen werden können.

In Abbildung 33 und Abbildung 34 sind exemplarisch die Ergebnisse der Kompaktierungsmessungen vom Basistextil SV0 und der modifizierten Variante SV3 zu sehen. Bei beiden Messungen wurden anhand der genannten Begründung die Lagen wie in Abbildung 32 unten links ausgerichtet, da dies einer anwendungsnahen Anordnung entspricht. Die Messungen wurden sowohl trocken als auch nass durchgeführt. Bei der nassen Kompaktierung wurden die Textillagen zunächst für 30 min bei 80 °C in einem Harzbad eingelegt, sodass sich bei den modifizierten Varianten der Funktionsfaden lösen konnte.

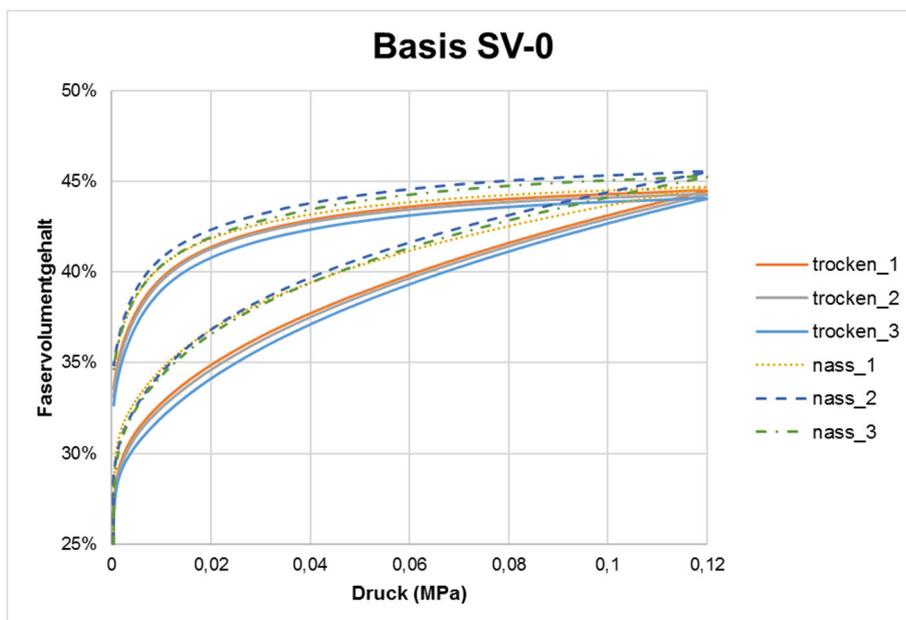
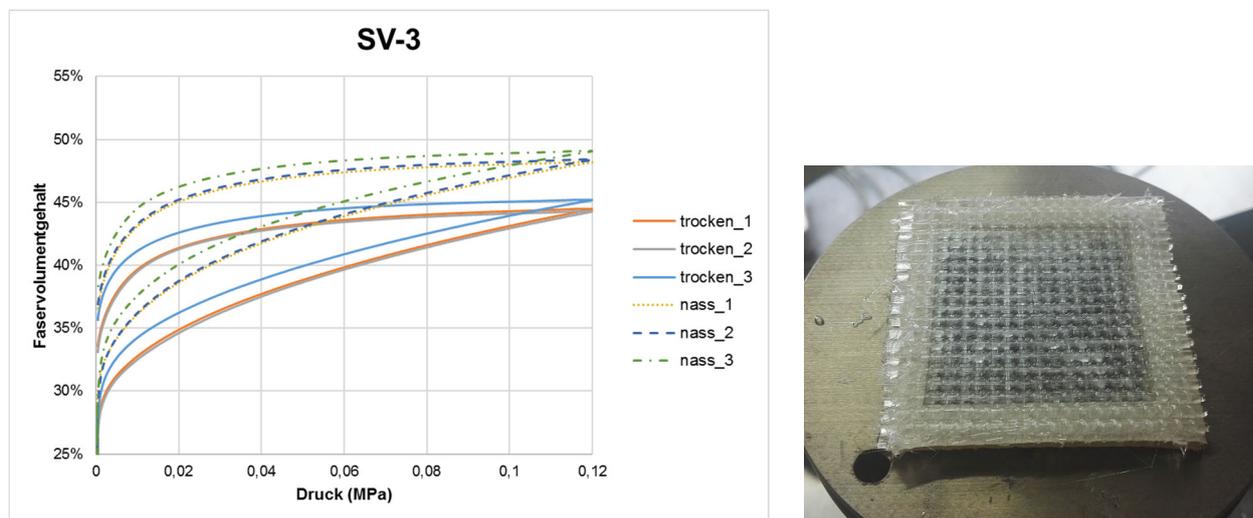


Abbildung 33: Kompaktierungsmessungen vom Basistextil SV0, trocken und nass

Beim Basistextil wird bei einem maximalen Druck von 1,2 bar ein Faservolumengehalt von ungefähr 44 % erreicht (siehe Abbildung 33). Die aufgenommene Rückstellkurve zeigt, dass ein gewisses Maß der Kompaktierung des Textils erhalten bleibt. Bei der nassen Kompaktierung ist nur eine sehr geringe Erhöhung des Faservolumengehalts gegenüber der trockenen Messung festzustellen. Die geringe Erhöhung ist damit zu begründen, dass durch die

Flüssigkeit im Textil die Filamente besser aneinander abgleiten können. Insgesamt bleibt aber die Struktur des Textils vom trockenen Zustand erhalten.

Beim modifizierten Textil SV3 (siehe Abbildung 34) wird bei der Messung im trockenen Zustand bei einem maximalen Druck von 1,2 bar ebenfalls ein Faservolumengehalt von ungefähr 44 % erreicht. Bei der nassen Kompaktierung hingegen ist eine Erhöhung des Faservolumengehalts auf ungefähr 49 % festzustellen. Durch die Vorbehandlung konnten sich die Funktionsfäden auflösen, wodurch die Textilstruktur stärker komprimiert werden konnte. In Abbildung 34 ist rechts eine nasse Kompaktierungsprobe vom Textil SV3 dargestellt, an der erkennbar ist, dass sich die Funktionsfäden vollständig aufgelöst haben. Durch die Tränkung im Harzsystem werden die Glasfasern transparent, der thermoplastische Funktionsfaden bleibt aber opak und wäre damit gut sichtbar. In der Probe ist dieser aber nicht mehr erkennbar.

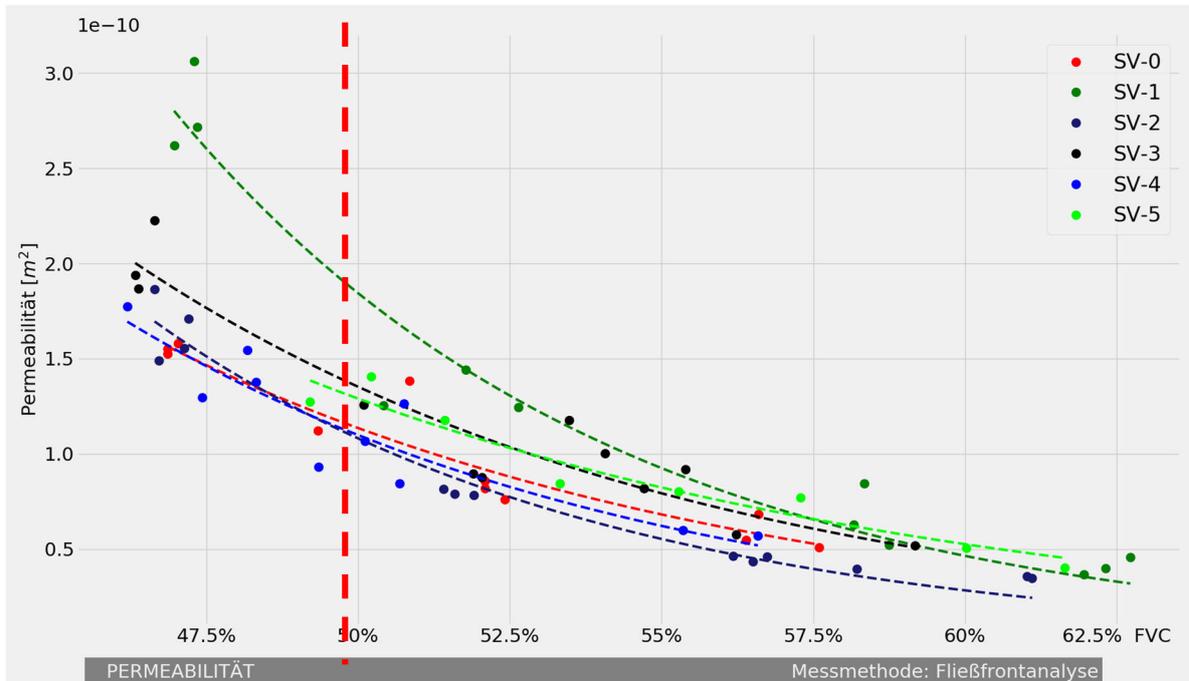


**Abbildung 34: Kompaktierungsmessungen vom Textil SV3, trocken und nass (links); nasse Kompaktierungsprobe (rechts)**

Mit den gemessenen Faservolumengehalten resultiert bei einem Unterdruck beim VARI-Verfahren von 800 mbar und einem Aufbau mit zwei Lagen beim Basistextil trocken eine Bauteildicke von 2,91 mm und nass von 2,83 mm. Beim modifizierten Textil wird sich aufgrund des höheren Flächengewichts trocken eine Bauteildicke von 3,63 mm und nass von 3,20 mm ergeben. Die Bauteildicken werden bei den Permeabilitätsversuchen als Kavitätshöhe verwendet, um den Faservolumengehalt exakt einstellen zu können.

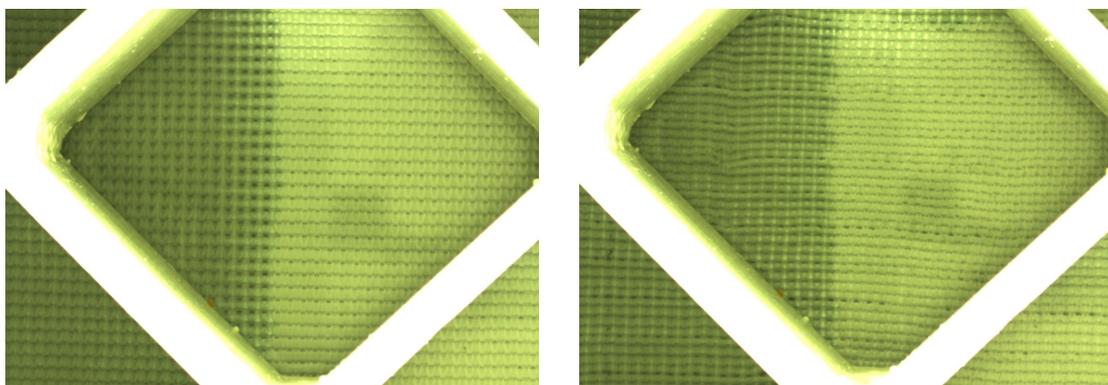
Durch die Nasskompaktierung konnte nachgewiesen werden, dass durch die Auflösung des Funktionsfaden eine deutliche Relaxation der Textilstruktur stattfindet, die bereits bei den geringen Drücken im VARI-Verfahren durch eine Verringerung der Bauteildicke um ca. 0,4 mm sichtbar wird. Dementsprechend wurde auf eine Messung der Relaxation während des Auflösungsprozesses verzichtet.

Anschließend an die Kompaktierungsversuche wurden sowohl vom Basistextil als auch von den fünf textilen Funktionsmustern mit Strömungskanälen (siehe Abbildung 28), die in Arbeitspaket 5 gefertigt wurden, die Permeabilität gemessen. Die Ergebnisse der Permeabilitätsmessungen sind in Abhängigkeit vom Faservolumengehalt in Abbildung 35 dargestellt.



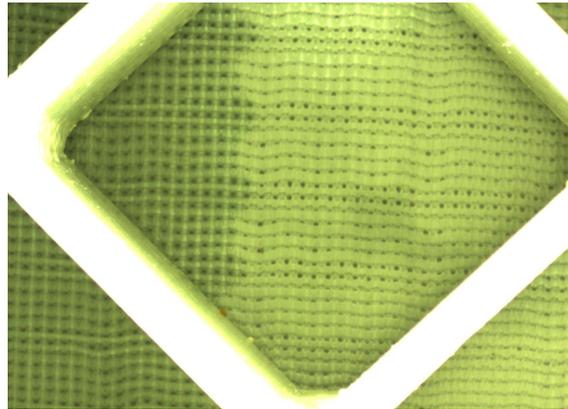
**Abbildung 35: Permeabilität in Abhängigkeit des Faservolumengehaltes**

Die Ergebnisse zeigen, dass im Rahmen der Standardabweichung kein Unterschied zwischen der Permeabilität der modifizierten Versionen SV2 und SV4 und dem Basistextil SV0 zu erkennen ist. Dieses Verhalten spiegelt sich auch im Fließfrontverlauf wieder, der in Abbildung 36 zu sehen ist. Bei der Version SV4 ist ebenfalls wie beim Basistextil eine gerade Fließfront zu erkennen. Ein Vorlaufen der Fließfront innerhalb der Strömungskanäle hingegen ist nicht zu beobachten.



**Abbildung 36: Fließfrontverlauf bei den Permeabilitätsmessungen vom Basistextil (links) und der modifizierten Version SV4 (rechts)**

Bei den modifizierten Versionen SV3 und SV5 ist ein deutlicher Anstieg der Permeabilität gegenüber dem Basistextil zu beobachten. Dadurch, dass jeweils zwei Funktionsfäden nebeneinander in Schussrichtung in das Textil eingebracht sind, kommt es zu einem signifikanten ausgeprägten Strömungskanal. Dadurch kann das Harzsystem in diesem Kanal vorlaufen und die Fließgeschwindigkeit wird dementsprechend erhöht. Der charakteristische wellenförmige Verlauf der Fließfront mit den Maxima in der Mitte der Strömungskanäle ist in Abbildung 37 zu sehen.



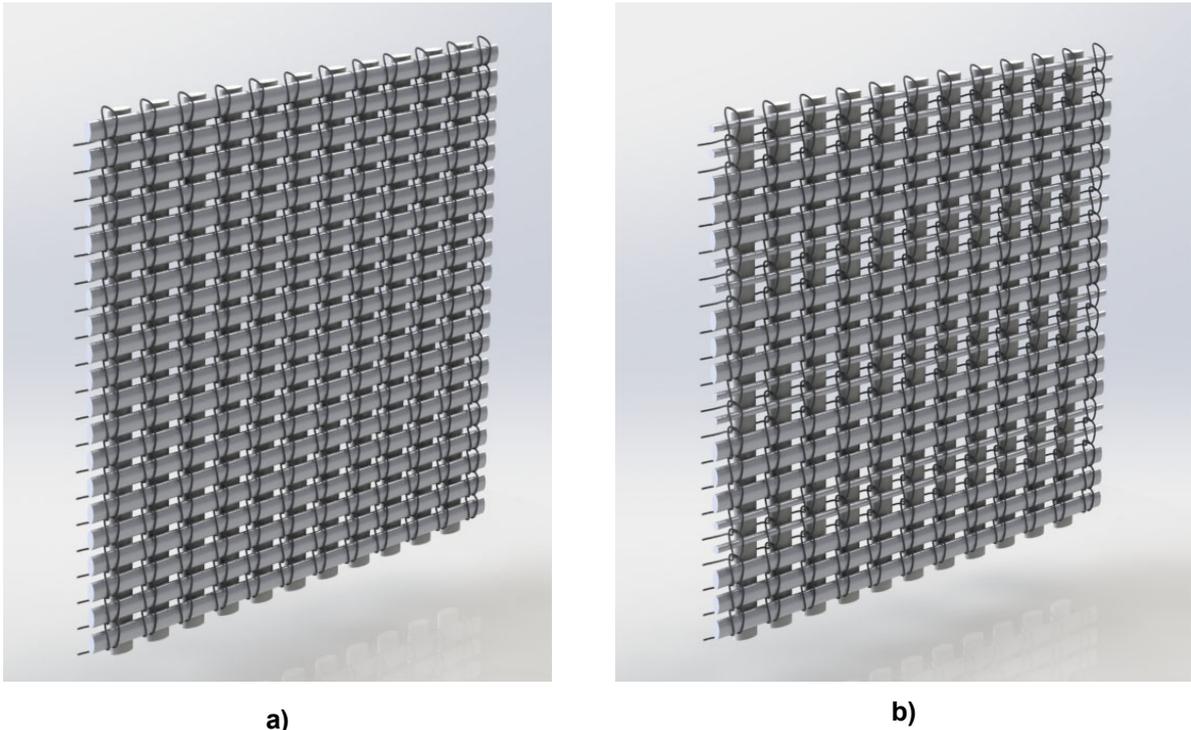
**Abbildung 37: Fließfrontverlauf bei der Permeabilitätsmessung von der modifizierten Version SV3**

Die modifizierte Version SV1 weist bei geringen Faservolumengehalten eine im Vergleich sehr hohe Permeabilität auf. Bei geringen Faservolumengehalten fehlte diesem Textil durch den Funktionsfaden die innere Stabilität, sodass es durch den Injektionsdruck zu einer Faserverschiebung kommen konnte, die die Messungen verfälscht hat. Ab einem Faservolumengehalt von 55 % wird das Textil so stark komprimiert, dass die Faserverschiebung verhindert wird. Ab diesem Faservolumengehalt ist die Permeabilität dann auch mit den anderen Textilien vergleichbar. Zusätzlich ist der Funktionsfaden stark onduliert, was zu einem Abfall der mechanischen Eigenschaften im Faserverbund führt, wodurch dieses Funktionsmuster für weitere Versuche ausgeschlossen wurde.

Wird ein Faservolumengehalt von 50 % betrachtet, der typisch für industrielle Anwendungen im VARI-Verfahren ist, dann kann aufgrund der Textilstruktur mit Strömungskanälen in den Versionen SV3 und SV5 eine Erhöhung der Permeabilität um etwa 20 % beobachtet werden. Bei geringeren Faservolumengehalten ist der Einfluss sogar noch größer. Somit kann durch die eingebrachten Strömungskanäle eine erhebliche Beschleunigung des Imprägnierprozesses erreicht werden.

Aufgrund der Ergebnisse der Permeabilitätsmessungen werden die Versionen SV1, SV2 und SV4 bei den Untersuchungen zu den mechanischen Eigenschaften und beim Demonstratorbau nicht weiter betrachtet.

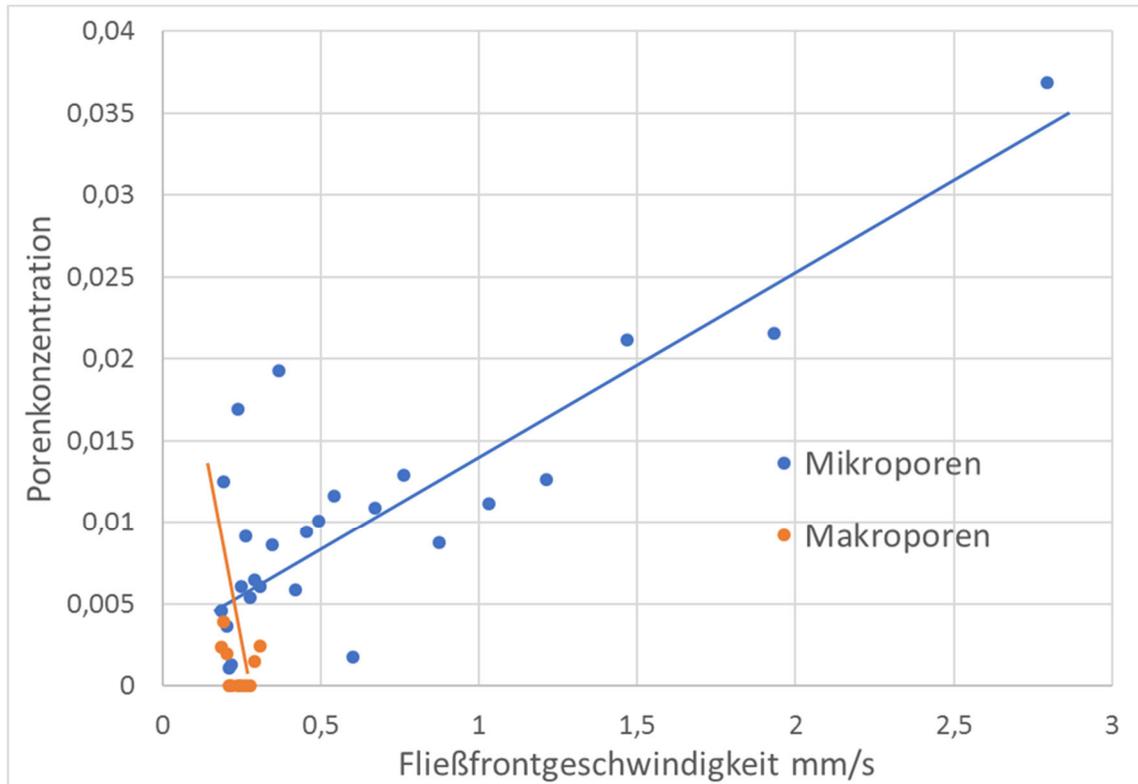
Unter Beachtung der ermittelten Kennwerte der textilphysikalischen Charakterisierung und der Bestimmung der Permeabilität der modifizierten Varianten wurden die 3D-CAD-Modelle angepasst. Beispielhaft sind in Abbildung 38 die 3D-CAD-Modelle der Referenzstruktur (a) und der SV5 (b) dargestellt. Die erhöhte Permeabilität in SV5 wird durch kompaktierte Rovings (jeweils 4. & 5. Schussfaden) repräsentiert. Das Verhältnis der Querschnitte von un-kompaktierten und kompaktierten Roving zeigt dabei den Anstieg der Permeabilität durch Querschnittsminimierung des Verstärkungsfadenmaterials.



**Abbildung 38: Schematische Darstellung der 3D-CAD-Modelle der Referenzstruktur (a) und SV5 (b)**

Um die Dual-Scale-Eigenschaften und damit die Imprägnierqualität der modifizierten textilen Funktionsmuster mit integrierten Strömungskanälen erfassen zu können, wurden auch hier die Porenkonzentration an Makroporen und Mikroporen in Abhängigkeit von der Fließgeschwindigkeit bestimmt. Das Ergebnis ist in Abbildung 39 exemplarisch für das Funktionsmuster SV5 dargestellt. Auch beim Funktionsmuster SV5 ist der charakteristische Verlauf der Porenkonzentration in Abhängigkeit von der Fließfrontgeschwindigkeit zu erkennen. Mit steigender Fließgeschwindigkeit nimmt die Anzahl der Makroporen ab und die Anzahl der Mikroporen zu. Im Gegensatz zum Basistextil (siehe Kapitel 4.3) ist aber insgesamt die Konzentration an Makroporen signifikant geringer, die Konzentration an Mikroporen jedoch ist wesentlich höher. Durch das Vorlaufen der Fließfront in den Strömungskanälen werden bei gleicher Fließfrontgeschwindigkeit wesentlich mehr Mikroporen in den Rovings eingeschlossen, da diese früher von der Fließfront umschlossen werden. Makroporen hingegen können

in den breiten Strömungskanälen nicht festgehalten werden und werden bei der Infusion mit der Strömung ausgetragen.



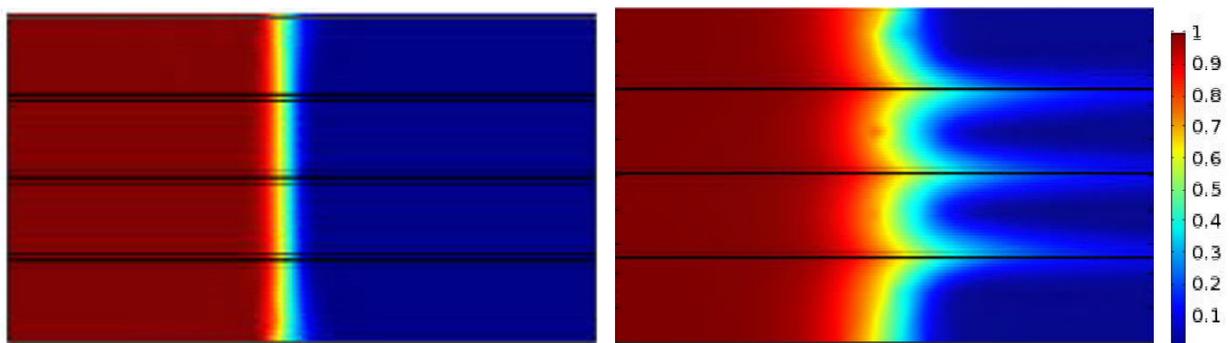
**Abbildung 39: Konzentration der Makro- und Mikroporen in Abhängigkeit der Fließfrontgeschwindigkeit beim Funktionsmuster SV5**

Bei einer Fließfrontgeschwindigkeit von 3 mm/s liegt beim Funktionsmuster SV5 eine Mikro-porenkonzentration von ca. 4 % vor. Diese Porenkonzentration ist beim Basistextil an Makroporen vorhanden. Makroporen lassen die mechanischen Eigenschaften von Faserverbunden wesentlich stärker abfallen als Mikroporen. Dementsprechend sind die Funktionsmuster mit Strömungskanälen nicht nur in Bezug auf die reduzierten Infusionszeiten, sondern auch in Bezug auf die Porenkonzentration und –verteilung zu bevorzugen.

#### **4.7 Makro- und Meso-Modellierung der Dual-Scale-Eigenschaften als Funktion der textilen Eigenschaften des Halbzeuges**

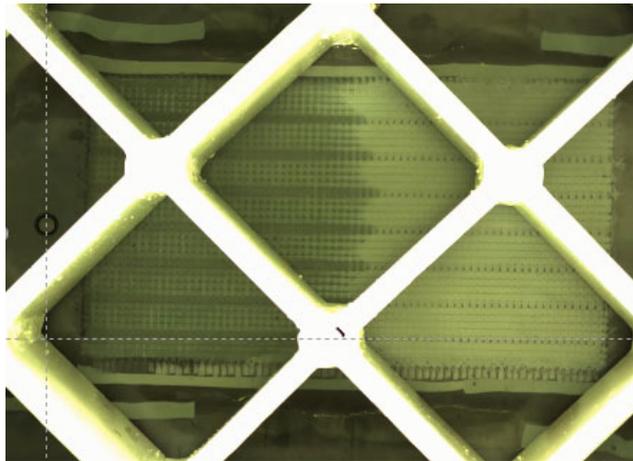
Bei der Modellierung der Fließvorgänge von Matrices in technische Textilien sind folgende drei Modellierungsansätze zu unterscheiden: Makromodellierung mit der Homogenisierung des gesamten Textils, Mesomodellierung mit der Unterscheidung der eingebrachten Fließkanäle und der Homogenisierung des restlichen Textils, und Mikromodellierung mit der voll-

ständigen Auflösung der mikroskopischen Textilstruktur. In der Regel wird das Imprägnierverhalten von Harz im Textil als Zwei-Phasen-Fluss im homogenisierten porösen Medium simuliert. Diese Methodik der Makromodellierung ist in der Praxis weit verbreitet und auch akzeptiert, da die vollständige Auflösung der mikroskopischen Textilstruktur sehr viel Aufwand in der Charakterisierung und Berechnung mit sich bringt und trotz der Vereinfachung kann sie die Fließfrontentwicklung gut und berechnungstechnisch effizient beschreiben. Allerdings hat diese Methode die Nachteile, dass die komplexen Fließvorgänge, vor allem die Vorläufe aufgrund der temporären Fließkanäle und damit verbundene mögliche trockene Stellen oder Lufteinschlüsse, nicht gut darstellen kann.



**Abbildung 40: Modellierung der Dual-Scale-Effekte Makromodellierung(Links) - und Mesomodellierung (Rechts)**

Es wurden zunächst die Fließvorgänge mit einem homogenisierten Modell simuliert, wie in Abbildung 40 (Links) zu sehen ist. Es ist klar zu sehen, dass nur eine homogene Fließfront zu erkennen ist. Diese bietet aufgrund der Homogenisierung keine Möglichkeit, die komplexen Imprägniervorgänge gut zu beschreiben. Im Vergleich, die Imprägnierversuche mit den modifizierten Textilien zeigen ein eindeutige Dual-Scale-Fließverhalten mit klar erkennbaren Vorläufen in den temporären Kanälen und ein Nachlauf in den anderen Bereichen des Textils (siehe Abbildung 41). In einem zweiten Schritt, wurde eine Mesomodellierung des Textils in der Simulation eingesetzt, dass die Eigenschaftsunterschiede der verschiedenen Bereiche berücksichtigt. Dabei werden die Permeabilitätskennwerte der Kanalbereiche analytisch ermittelt und für die übrigen Bereiche die schon ermittelten Permeabilitäts- und Kapillaritätswerte eingesetzt. Wie in der Abbildung 40 (Rechts) eindeutig zu erkennen ist, kann ist so die skalenübergreifende Modellierung der Fließvorgänge in den eingesetzten Textilien viel besser beschreib- und nachbildbar. Die Meso-Modellierung liefert so wichtige Randbedingungen für die Weiterentwicklung der Textilströmungskanäle (Abstand, Größe, Materialparameter, Prozessbedingungen usw.), um einerseits den Imprägnierprozess zu beschleunigen und andererseits trockene Stellen und Lufteneinschlüsse zu vermeiden.



**Abbildung 41: Dual-Scale-Effekte bei der Imprägnierprozess**

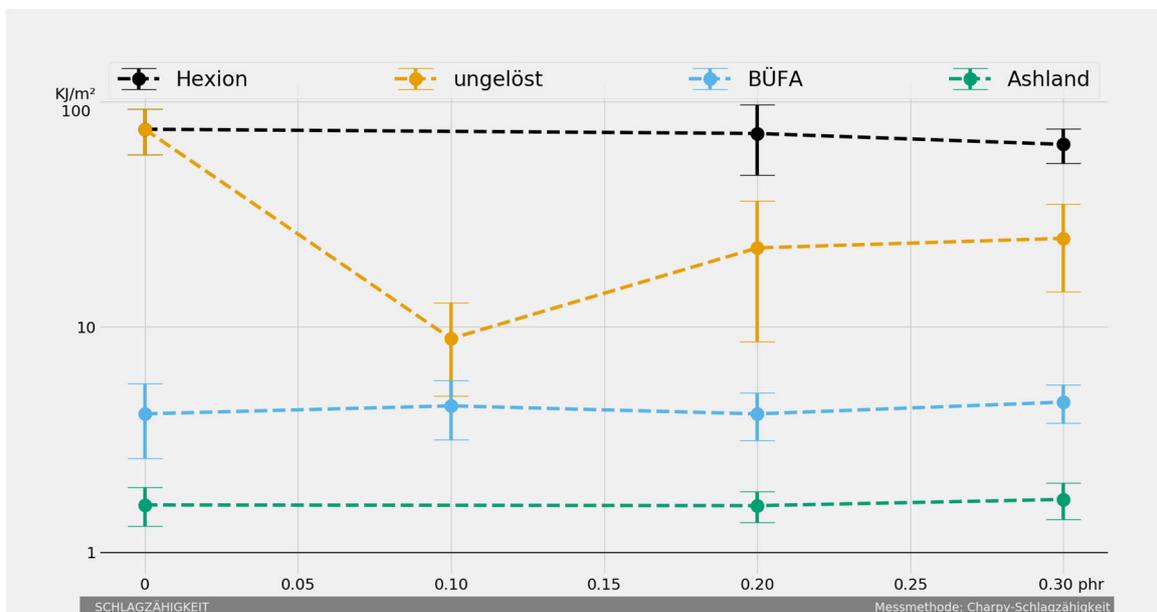
Der dritte Ansatz – Mikromodellierung – wurde aufgrund der Komplexität bei der Beschreibung der Mikrostruktur des Textils und der für die numerischen Verfahren zur Simulation erforderlichen sehr hohen Rechnerleistung im Rahmen des Projektes planungsmäßig nicht durchgeführt.

Der gewählte Ansatz aus der Kombination einer Makro- und Meso-Modellierung bietet dagegen den Vorteil einer einfachen Umsetzung der Simulation in den KMU mit nur wenigen Kennwerten von Textil und Harzsystem. Aus der Fließsimulation können die Fließgeschwindigkeiten der Fließfront bestimmt und daraus Aussagen über die Porenentwicklung im Bauteil abgeleitet werden.

#### **4.8 Untersuchungen zur Auswirkung der Strukturbeeinflussung auf die mechanischen Eigenschaften mit und ohne Auflösung des Funktionsfadens**

Neben der beschleunigten Infiltration ist von Bedeutung, dass die textiltechnisch integrierten Strömungskanäle keine Verringerung der mechanischen Eigenschaften des Faserverbunds bewirken. Das würde dazu führen, dass zur Erhaltung der Bauteilperformance entsprechend mehr Material zum Einsatz kommen müsste. Um dies zu verhindern, wurden die Strömungskanäle so konzipiert, dass sie sich nach der Infiltration durch die Auflösung des Funktionsfadens wieder schließen können. Um zu überprüfen, inwiefern die Modifizierung des Textils und der Funktionsfäden die mechanischen Eigenschaften beeinflussen, wurden Zugfestigkeit und Biegesteifigkeit der so erzeugten Faserverbunde getestet. Zu Vergleichszwecken wurden dabei auch Verbunde mit nicht geschlossenen Fließkanälen untersucht.

Zusätzlich beeinflusst auch der aufgelöste Funktionsfaden die mechanischen Eigenschaften der Matrix. Um diesen Einfluss zu quantifizieren, wurde die Schlagzähigkeit von Reinharzproben mit unterschiedlichen Mengen aufgelösten Funktionsfadens (Grilon KE-60) untersucht. Zur Herstellung der Reinharzproben für die Schlagzähigkeitsuntersuchungen wurde ein Werkzeug aus Silikonkautschuk entwickelt und hergestellt. In die Kavitäten wurden ebenfalls der Funktionsfaden eingebracht und durch Temperatureinwirkung die Auflösung gesteuert. Gleichzeitig wurden mit demselben Harzsystem (RIMR 135, Firma Hexion) zusätzlich Proben mit nicht aufgelöstem Funktionsfaden angefertigt.



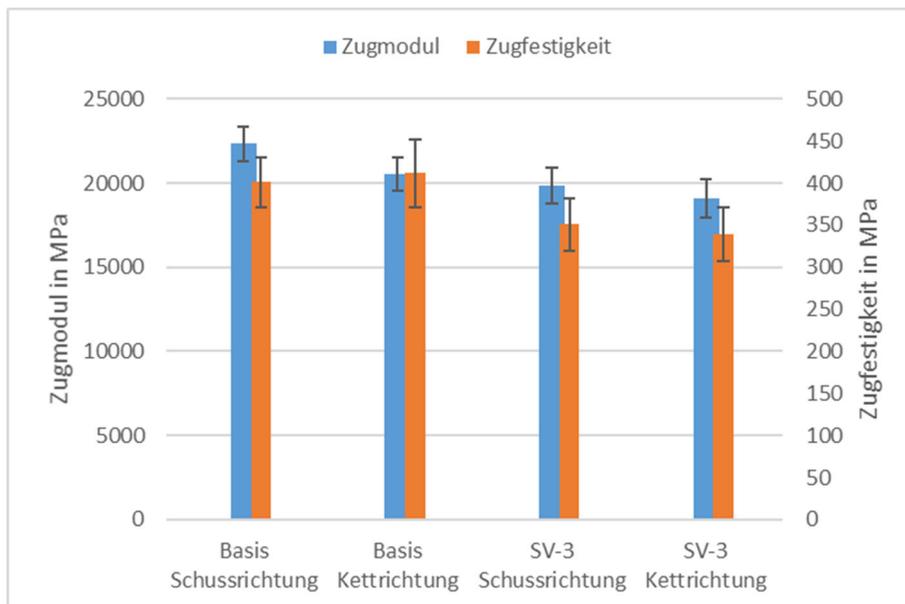
**Abbildung 42: Schlagzähigkeit der Reinharzproben der zur Verfügung gestellten Harzsysteme**

Die Reinharzproben wurden mit einem Pendelschlagwerk auf die Schlagzähigkeit hin untersucht. Die Ergebnisse der Prüfungen sind in Abbildung 42 zu sehen. Der Einfluss des aufgelösten Funktionsfadens auf die Schlagzähigkeit der Harzsysteme ist sehr gering und innerhalb der Standardabweichung vernachlässigbar. Ist der Funktionsfaden jedoch nicht aufgelöst, führt dies zu einer starken Absenkung der Schlagzähigkeit. Dies ist damit zu begründen, dass die Fäden zu einer mechanischen Schwachstelle innerhalb der Matrix führen, an der die Rissausbreitung eingeleitet wird.

Die mechanischen Eigenschaften wurden beispielhaft am Funktionsmuster SV3 im Vergleich zum Basistextil SV0 untersucht. Die Erkenntnisse sind auf das Funktionsmuster SV5 übertragbar, da die beiden Funktionsmuster einen vergleichbaren Aufbau besitzen. Es wurden Faserverbundplatten im VARI-Verfahren mit dem Harzsystem RIMR 135 von Hexion hergestellt. Um Proben mit unaufgelöstem Funktionsfaden zu erhalten, wurden die Platten

bei Raumtemperatur ausgehärtet und anschließend im Ofen getempert. Um eine Auflösung des Funktionsfadens zu erreichen, wurden die Faserverbundplatten direkt nach der abgeschlossenen Infusion im Ofen ausgehärtet. Durch die kurze Lebensdauer des Funktionsfadens bei erhöhten Temperaturen über 50 °C konnte der Funktionsfaden vollständig aufgelöst werden, bevor das Harzsystem den Gelpunkt erreicht hat.

Da die verschiedenen Funktionsmuster stark unterschiedliche Flächengewichte haben, woraus im VARI-Verfahren unterschiedliche Probendicken resultieren, wurde die Kennwerte der mechanischen Messungen so angepasst, dass diese auf den Faservolumengehalt der Proben normiert sind. Hierfür wurde zunächst der Faservolumengehalt der Platten durch eine Dichtemessung und einen Veraschungsversuch nach DIN EN ISO 1172 bestimmt. Der Faservolumengehalt betrug beim Basistextil 38 % und beim Funktionsmuster SV3 35 %. Beim VARI-Verfahren lag ein Unterdruck von 800 mbar an. Die Kompaktierungsmessungen in Kapitel 4.6 sagen bei einem Druck von 800 mbar jeweils einen Faservolumengehalt von ca. 41 % voraus. Die Differenz ist durch den Porengehalt zu erklären, der beim Funktionsmuster durch die erhöhte Fließgeschwindigkeit etwas höher als beim Basistextil ausfällt (siehe Abbildung 19 und Abbildung 39). Zusätzlich ist die Faservolumengehaltsbestimmung mit einem gewissen Fehler versehen, da die notwendige Probengröße aufgrund der niedrigen Plattendicke nicht eingehalten werden konnte.

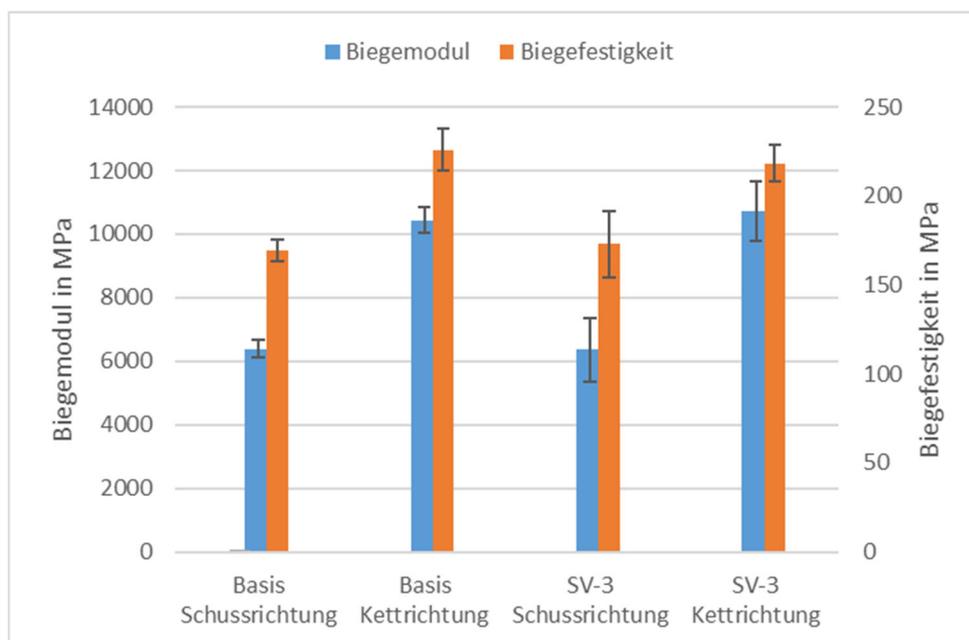


**Abbildung 43: Zugmodul und Zugfestigkeit vom Basistextil und Funktionsmuster SV3**

Die Zugversuche wurden an Proben mit unaufgelöstem Funktionsfaden durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Abhängigkeit von der Probenentnahme in Kett- bzw. Schussrichtung in

Abbildung 43 dargestellt. Die Kennwerte des modifizierten Textils SV3 wurden auf den Faservolumengehalt des Basistextils normiert. Im Rahmen der Standardabweichung ist weder im Zugmodul als auch in der Zugfestigkeit ein signifikanter Unterschied zwischen der Kett- und Schussrichtung der Textilien zu erkennen. Es zeigt sich aber, dass die Zugeigenschaften des Funktionsmusters SV3 etwas geringer sind als die des Basistextils. Das lässt darauf zurückschließen, dass durch die Funktionsfäden die Eigenschaften verringert werden, da so harzreiche Bereiche in der Probe entstehen, die als Schwachstellen Ausgangspunkte für die Rissentstehung sind.

Werden nun die Faserverbundproben betrachtet, bei denen der Funktionsfaden aufgelöst wurde, kann diese Verringerung der mechanischen Eigenschaften nicht mehr beobachtet werden. Es wurden für Faserverbundproben aus Basistextil und dem Funktionsmuster SV3 mit aufgelöstem Funktionsfaden 3-Punkt-Biegeprüfungen durchgeführt. Die Kennwerte des modifizierten Textils SV3 wurden auch in dieser Prüfung auf den Faservolumengehalt des Basistextils normiert. Die Ergebnisse sind in Abbildung 44 zu sehen.



**Abbildung 44: Biegemodul und Biegefestigkeit vom Basistextil und Funktionsmuster SV3**

Es ist zu erkennen, dass im Rahmen der Standardabweichung die Biegeeigenschaften vom Basistextil und dem Funktionsmuster SV3 übereinstimmen. Das heißt, dass nach dem Auflösen des Funktionsfadens die anfänglichen Störungen in der Struktur ausgeglichen werden konnten. Die Unterschiede der Kennwerte in Bezug auf die Probenentnahme in Schuss- und Kettrichtung ergeben sich aus dem Versuchsaufbau der 3-Punkt-Biegeprüfungen. So befinden sich auf der Unterseite der Probe, die auf den beiden Auflagern aufliegt, die Fasern

einmal parallel und einmal quer zur Probenlänge. Gerade die Biegeprüfung reagiert empfindlicher auf Fehler im Textil und Lufteinschlüsse, was sie für den Vergleich der Textilien ideal macht. Bis auf eine etwas höhere Standardabweichung bleiben aber die Ergebnisse zwischen dem modifizierten Textil SV3 mit aufgelöstem Funktionsfaden und dem Basistextil gleich. Mithilfe der Kennwerte aus der 3-Punktbiegeprüfung können auch Rückschlüsse für die späteren Demonstratoren gezogen werden, weil in beiden Fällen eine Biegebelastung den Hauptbelastungsfall darstellt. Somit sind die Kennwerte der Biegeprüfungen für dieses Projekt besonders aussagekräftig.

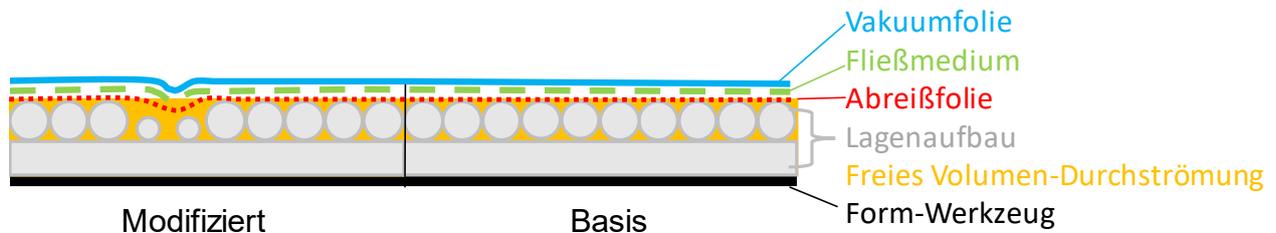
Aus den diskutierten Ergebnissen lässt sich schlussfolgern, dass mit den hergestellten textilen Strukturen nicht nur die Infusionszeit erheblich verkürzt werden kann, sondern dass durch diese neuartige Technologie auch keine Einbußen in den mechanischen Eigenschaften der Faserverbundstruktur zu erwarten sind, sofern der Funktionsfaden aufgelöst wird. Weitere umfangreiche mechanische Kennwerte müssen in nachfolgenden Projekten erarbeitet werden.

#### **4.9 Demonstratorherstellung, Analyse und Interpretation der Arbeitsergebnisse**

Zur Darstellung der Projektergebnisse wurden geeignete Demonstratoren hergestellt. Bereits in AS1 wurde festgelegt, dass zum einen ein Klöpperboden und zum anderen eine PKW-Motorhaube betrachtet werden. Für die Herstellung der 3D-FKV-Bauteile wurden vorab simulativ entsprechende 2D-Abwicklungen zur Realisierung der 3D-Geometrien erstellt und die Strukturen entsprechend der Anforderungen textiltechnisch hergestellt. Dabei war die strömungsseitig optimierte Positionierung der Fließkanäle ein Auslegungskriterium und erfolgt unter Verwendung der in Kapitel 4.7 entwickelte Fließsimulation, um eine möglichst schnelle Imprägnierung zu ermöglichen und durch den Fließfrontverlauf bedingte Fehlstellen wie trockene Stellen zu vermeiden.

Als erstes wurde am ITM der Demonstrator PKW-Motorhaube unter Zuhilfenahme von Fließhilfen infiltriert. Dabei ging es darum, auftretende Prozesszeitverkürzungen in einem seriennahen Prozess zu ergründen. Das Infiltrationswerkzeug ist in Abbildung 45 schematisch dargestellt. Der im Werkzeug abgelegte Lagenaufbau der modifizierten und der Basis-Textilien wird mit einer Abreißfolie überdeckt und auf dieser das Fließmedium platziert. Der Aufbau wird durch eine Vakuumfolie verschlossen. Zu Vergleichszwecken wurde die Preform des Demonstratorbauteils aus zwei Hälften aufgebaut. Auf der linken Seite wurde das angepasst hergestellte mit Strömungskanälen modifizierte Halbzeug der Variante SV5 (4. & 5. KF: modifiziertes KF-Garn #22, siehe Kapitel 4.4 & 4.5) verwendet. Die Modifikation auf der linken

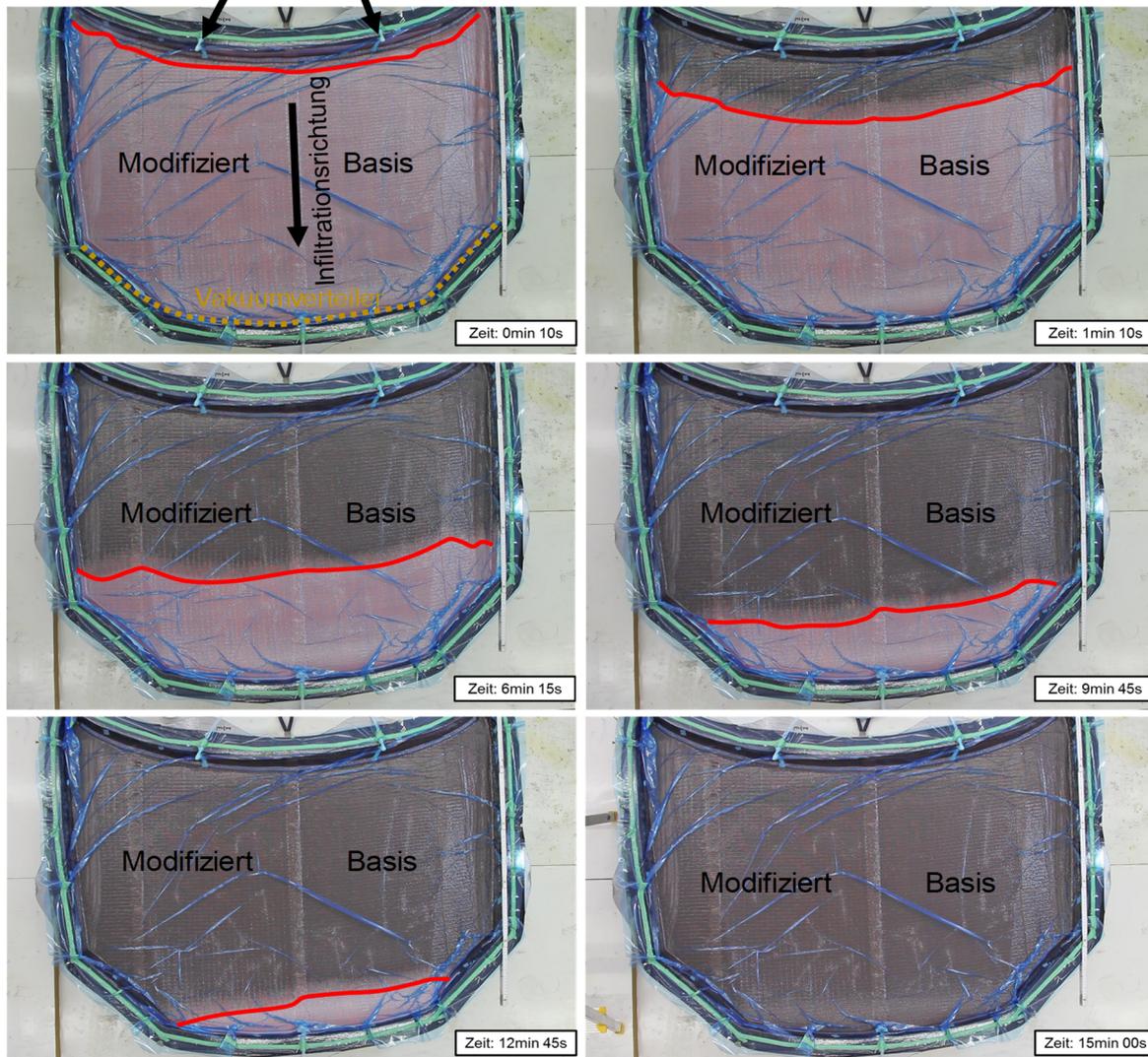
Seite ist auch in Abbildung 45 noch einmal schematisch dargestellt. Durch die eingebrachten kompaktierten Rovings entsteht in diesem Bereich ein Volumen, welches dem Matrixsystem als Fließkanal dient. Schematisch ist dies durch die orange Färbung des Hintergrunds dargestellt. Auf der rechten Bauteilseite wurde die Vergleichsstruktur ins Werkzeug eingelegt, um so einen direkten Vergleich der textilen Strukturen im selben Werkzeug während des Infiltrationsprozesses mit Fließhilfe zu ermöglichen.



**Abbildung 45: Schematische Darstellung des Infiltrationsaufbaus zur Herstellung des Demonstratorbauteils 2: Motorhaube**

Der Infiltrationsprozess wurde mithilfe einer Kamera videotechnisch dokumentiert. In Abbildung 46 sind 6 Standbilder aus dem Verlauf abgebildet. Die extrahierte Bildfolge zeigen den Prozessfortschritt und die Zustände zum jeweilig angegebenen Zeitpunkt im Infiltrationsprozess. Im ersten Bild zum Zeitpunkt „10 s“ ist die ausgebildete Fließfront nach dem Start der Infiltration zu erkennen. Weiterhin ist die Infiltrationsrichtung, im Bild von „oben“, den Angusspunkten, nach „unten“, zum Vakuumverteiler, markiert. Das duromere Matrixsystem wird aus einem gemeinsamen Reservoir zugeführt, um eventuell auftretende Differenzen in der Viskosität durch marginal unterschiedliche Mischungsverhältnisse auszuschließen. Durch diese parallele Zuführung bildet sich eine gleichmäßige Fließfront über die gesamte Bauteilbreite aus. Über den Infiltrationsverlauf von 15 Minuten ist mithilfe der Aufnahmen ersichtlich, dass die Infiltration im linken, mit modifizierten Fäden versehenen Bauteilbereich, im Vergleich zum Bereich der Basisvariante (rechts) etwas beschleunigt erfolgt. Die erkennbare Differenz fällt jedoch recht gering aus. Dies ist zurückzuführen auf die sehr hohe und damit prozessdominierende Permeabilität der eingesetzten Fließhilfen. Das Matrixsystem strömt durch den Bereich der höchsten Permeabilität, den Weg des geringsten Widerstandes. In diesem ersten Prozess stellt dies die Fließhilfe dar. Deshalb ist der sichtbare Unterschied marginal.

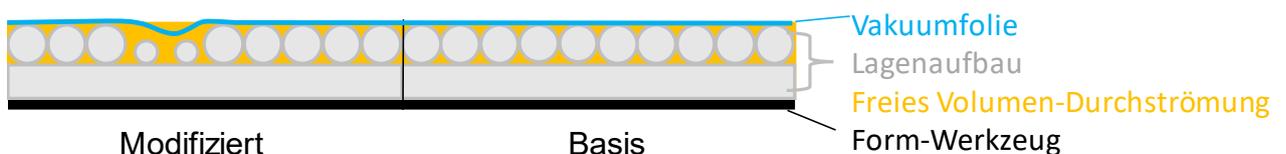
Angusspunkte



**Abbildung 46: Extrahierte Bildserie aus dem Bauteilherstellungsprozess des Demonstratorbauteils 2: PKW-Motorhaube**

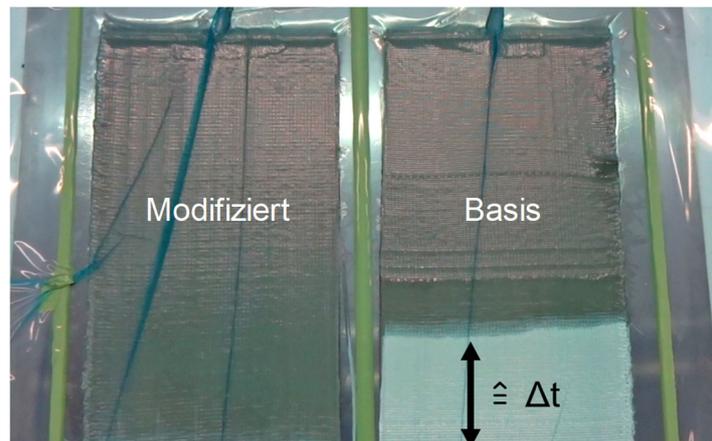
Im nächsten Schritt wurden am ITM zwei ebene Platten (500 mm x 250 mm) ohne die Verwendung von Fließhilfen infiltriert und konsolidiert. Somit wurde der Einfluss der textiltechnischen Modifikation an einer einfachen ebenen Demonstrationsgeometrie veranschaulicht (siehe Abbildung 47).

- Platte 1: Funktionsmuster SV5 mit modifizierten KF (4.&5. KF #22)
- Platte 2: MLG-Basisstruktur



**Abbildung 47: Schematische Darstellung des um die Abreißfolie und das Fließmedium reduzierte Infiltrationsaufbaus bei der Herstellung der Probenplatten**

Wieder wurden beide textilen Strukturen, Basis und modifiziert, zeitgleich und unmittelbar nebeneinander mit dem gleichen Matrixsystem infiltriert. Die für die Infiltration des Bauteils notwendige Menge an Matrix fließt ausschließlich durch die im Lagenaufbau vorhandenen Kapillaren. Somit wird der Einfluss durch die Strukturmodifikation deutlicher. In Abbildung 48 ist die Momentaufnahme (nach  $t_m=8$  min) des abgeschlossenen Infiltrationsprozesses der Probenplatte mit modifiziertem Material abgebildet. Die Infiltration der Probenplatte mit der Basis-Struktur dauerte  $t_b=14$  min.



**Abbildung 48: Momentaufnahme zum Zeitpunkt ( $t=8$  min) der vollständigen Infiltration der Probenplatte mit modifizierter Struktur und markierter Differenz des Fließfrontfortschritts**

Markiert ist die Differenz des Fließfrontfortschritts. Dieser entspricht für den Versuchsaufbau einer zeitlichen Differenz von  $\Delta t=6$  min und damit einer Senkung der Infiltrationszeit durch die Strukturmodifikation um 42,8%.

Die Fließfrontgeschwindigkeit in der Probenplatte mit Basistextil sinkt gegen Ende des Infiltrationsprozesses stark ab. Die Verringerung der Fließgeschwindigkeit ergibt sich aus einem Druckabfall im Aufbau, der durch den Fließwiderstand hervorgerufen wird. Der Fließwiderstand wird durch die Permeabilität des Textils bestimmt. Je geringer die Permeabilität ist, desto höher ist der Fließwiderstand. Die Permeabilität ist im modifizierten Textil gegenüber dem Basistextil erhöht und damit der Fließwiderstand geringer. Das Basistextil weist dagegen einen deutlich höheren Fließwiderstand auf. Dementsprechend ist der absolute Druckabfall im Basistextil höher und die Fließgeschwindigkeit nimmt während des Infiltrationsprozesses stärker ab. Die Oberfläche der beiden Faserverbundplatten ist nach der Auflösung des Funktionsfadens gleichwertig hoch.

Im Anschluss an die Platten wurde am PuK als Demonstrator 1 ein Klörperboden hergestellt. Der Klörperboden stellt eine dreidimensionale Schale dar. In einem ersten Schritt wurde

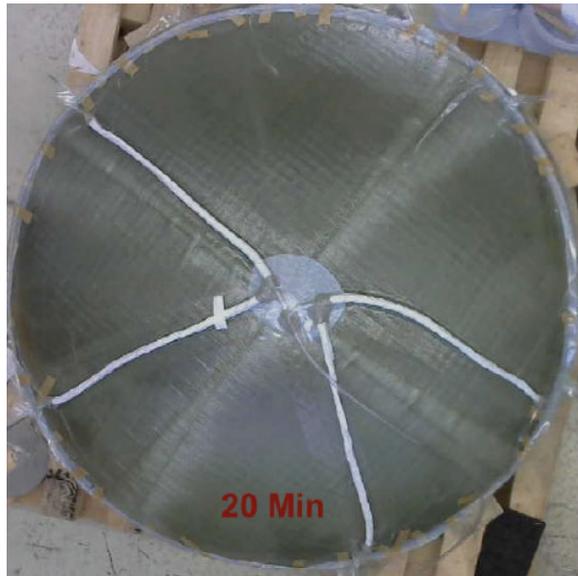
zunächst parallel jeweils ein Viertel des Klörperbodens mit dem Basistextil und ein Viertel mit dem Funktionsmuster SV5 gefertigt, um bei der Infusion einen direkten Vergleich der beiden Textilien zu ermöglichen. Der Aufbau des VARI-Versuches, der in Abbildung 49 zu sehen ist, entspricht dem der auch bei den Platten eingesetzt wurde.



**Abbildung 49: Vergleich der Infiltrationszeit beim Demonstrator 1 Klörperboden: a) Momentaufnahme der vollständigen Infiltration vom modifizierten Textil, b) Momentaufnahme der vollständigen Infiltration vom Basistextil**

Das Textil wird auf die Form aufgelegt und luftdicht mit einer Vakuumfolie verschlossen. Beide Aufbauten werden am unteren Rand aus einem Harzreservoir über einen Linienanschluss infundiert. Die Schussfadenrichtung und damit auch die Strömungskanäle sind jeweils in Fließrichtung radial vom Umfang ins Zentrum orientiert. Der Infiltrationsprozess wurde per Video dokumentiert. In Abbildung 49 sind zwei Standbilder dieser Aufnahme zu sehen. Das linke Bild zeigt nach knapp 20 min das Ende der Infusion des Bereichs des modifizierten Textils. Das rechte Bild zeigt das Ende der Infusion des Basistextils, das erst nach knapp 43 min erreicht wurde. Dementsprechend konnte durch die Integration der Strömungskanäle eine Senkung der Infiltrationszeit von über 50 % erreicht werden. In beiden Fällen erfolgte eine vollständige Imprägnierung mit hoher Imprägnierqualität.

Nach dem Vergleich der beiden Textilien wurde mit dem modifizierten Textil SV5 ein vollständiger Klörperboden gefertigt. Auch hier konnte nach nur 20 min eine vollständige und fehlerfreie Imprägnierung erreicht werden (siehe Abbildung 50).



**Abbildung 50: Vollständig imprägnierter Klöpperboden im VARI-Aufbau**

Insgesamt liegt bei allen Demonstratoren eine hohe Verbundqualität vor. Allerdings erfolgt aufgrund der Bauteilgröße eine Auhärtung lediglich bei Raumtemperatur, so dass hier die an den Plattenproben nachgewiesene Auflösung des Funktionsfadens nicht gezeigt werden konnte. In Bezug auf die Strömungskanäle und die mechanischen Eigenschaften der Demonstratoren können aber die notwendigen Rückschlüsse aus den Untersuchungen in Kapitel 4.8 gezogen werden.

#### **4.10 Erstellung von KMU-Leitfaden und Wirtschaftlichkeitsbetrachtung**

Zur **Auslegung infiltrationsoptimierter textiler Verstärkungsstrukturen** wird der Einsatz **numerischer Simulationsmethoden** empfohlen. Anhand der konkreten Anforderungen an das Herstellverfahren und das resultierende Bauteil lassen sich mittels einer Prozesssimulation gezielt geeignete Varianten der textilen Verstärkungsstruktur auswählen, ohne dazu aufwändige Versuche durchführen zu müssen. Die notwendigen Kennwerte für die Simulation, besonders für die Harzsysteme, liegen teilweise bereits in den Datenblättern der Lieferanten vor. Die notwendige Kennwertermittlung für die textile Verstärkungsstruktur, insbesondere Kompaktierung, Permeabilität, Kapillarität können kostengünstig z. B. an einem universitären Institut oder einem entsprechenden Dienstleister in Auftrag gegeben werden. Für die in diesem Projekt genutzten Mehrlagengestricke liegen die Kennwerte bereits vor, sodass Parameter wie die Position und Anzahl der integrierten Strömungskanäle simulativ ermittelbar sind. Die entwickelten Modelle auf Makro- und Mesoebene erlauben die Durchführung der

Simulationen auf handelsüblichen Desktop-PC's. Voraussetzung ist lediglich der Erwerb einer entsprechenden Lizenz des Simulationsprogramms. Somit stehen diese Möglichkeiten allen interessierten KMU zur Verfügung.

Das gewünschte, im Vergleich zur Ausgangsstruktur verbesserte Infiltrationsverhalten, erfordert den Einsatz **von modifizierten Verstärkungsfäden, bzw. modifizierten Verstärkungsstrukturen**. Zur Herstellung der modifizierten Verstärkungsfäden hat sich das Umwinden und folglich Kompaktieren von Verstärkungsfaserrovings als besonders positiv erwiesen. Insbesondere durch die Einstellung der Umwindung durch die Variation der Materialzufuhr der Komponenten lässt sich die temporäre Kompaktierung der Verstärkungsfaser verändern. Somit lässt sich ein Umwindeabstand zwischen 4 und 35 mm einstellen, wobei dieser Abstand die Kompaktierung des umwundenen Garns justiert. Feinjustierungen im Materialverhalten können durch Anpassung der Maschinenparameter, bspw. die Überlieferung und der Fadenbremsen, erfolgen. Für den späteren Einsatz in den Textilien hat sich ein Umwindeabstand von ca. 4 mm als besonders geeignet erwiesen, da es zu keiner Ondulation des Rovings kommt und eine ausreichende Kompaktierung zur Ausbildung der Strömungskanäle erreicht wird. Die entsprechend notwendige Maschinenteknik ist im Markt vorhanden und bei einer Vielzahl von Unternehmen vorhanden. Somit sind die entsprechenden Funktionsfäden direkt herstellbar.

Die Herstellung **modifizierter 2D-Verstärkungsstrukturen** wurde im Projekt aufgrund der einfachen Modifizierbarkeit der Strukturen mittels der Mehrlagenflachstricktechnik durchgeführt. Die Modifikation der Permeabilität kann mittels der eingebrachten modifizierten Verstärkungsfasern oder der Parametervariation an der Maschine selbst erfolgen. Bei der Einbringung der modifizierten Verstärkungsfasern kann die Anzahl und der Abstand der Fadenstrukturen variiert werden. Zusätzlich kann über die Parametervariation der Strickmaschine in Verbindung mit der Auswahl des Maschenfadensystems die Struktur strömungstechnisch angepasst werden. Durch eine bindungstechnische Modellierung der mithilfe der Fließsimulation entwickelten Strukturen werden die entsprechenden Maschinensteuerdatensätze zur Textilproduktion generiert.

Die Einbringung von kompaktierten Fadenstrukturen oder das Kompaktieren der Struktur durch die Bindestruktur selbst führt zu einer erhöhten lokalen Permeabilität durch die Strömungskanäle, wodurch **die Infiltration der textilen Struktur mit dem Matrixsystem vereinfacht bzw. beschleunigt** wird. Hier kann eine Verkürzung der Infiltrationszeit gegenüber dem Basistextil von ca. 50 % erreicht werden. Am effektivsten haben sich hierbei modifizierte

Verstärkungsstrukturen erwiesen, bei denen in Schussrichtung in gewissen Abständen zwei durch den Funktionsfaden kompaktierte Verstärkungsfaserverovings nebeneinander eingebracht werden. Dies entspricht in diesem Bericht den Funktionsmustern 3 und 5.

Das jeweilige kompaktierte System, das durch einen thermoplastischen Funktionsfaden zusammengehalten wird, kann nach Abschluss der Infiltration in ausgewählten Harzsystemen temperaturinduziert aufgelöst werden. Dadurch, dass die Auflösung der Funktionsfäden im Zeitfenster vor der Aushärtung des Harzsystems stattfindet, können sich die integrierten Strömungskanäle wieder vollständig schließen. Es konnte nachgewiesen werden, dass es so zu **keiner Beeinträchtigung der mechanischen Eigenschaften der Faserverbundstruktur durch die Modifizierung des Textils** kommt. Auch die Auflösung des thermoplastischen Funktionsfadens in der duroplastischen Matrix hat keinen erkennbaren Einfluss auf die mechanischen Kennwerte. Die Verbundqualität ist gleichbleibend hoch und reproduzierbar. Somit muss das KMU für die strukturmechanische Auslegung seiner Faserverbundbauteile keine Veränderungen durch die Strömungskanäle beachten.

Die Integration von kompaktierten Fadenstrukturen in textile Flächengebilde, bzw. die bindungstechnische Kompaktierung wurde an Mehrlagengestricken umgesetzt. **Die Technologie ist aber einfach auf andere textile Flächenbilderverfahren übertragbar.** Beispielsweise könnten kompaktierte Rovings als temporäre Fließhilfe als Kett- oder Schussfaden im Webverfahren, oder als abgelegte Fasern in Multiaxialgelegten Anwendung finden. Eine bindungstechnische Modifikation ist nur bei textilen Verfahren, welche eine Bindefadensystem aufweisen, anwendbar, wie dem Multiaxiallegeverfahren. Für die Fließsimulation zur strömungstechnischen Auslegung der Textilien müssen die entsprechenden Kennwerte für die Permeabilität, Kapillarität und Dual-Scale-Eigenschaften für die Textilart bestimmt werden. Liegen diese Kennwerte nicht vor, können diese kostengünstig an einer entsprechenden universitären Einrichtung ermittelt werden.

### **Wirtschaftlichkeitsbetrachtung**

Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wird anhand eines Klöpperbodens aus dem Chemie- und Anlagenbau und eines Rotorblattes aus der Windkraftindustrie durchgeführt. Hierbei werden hauptsächlich der notwendige Materialeinsatz, die Arbeitszeit und die Zeit der Werkzeugbelegung kalkuliert und verglichen sowie notwendige Investitionen zur Prozessumstellung betrachtet.

Klöpferboden – Vergleich Handlaminierten und modifiziertes VARI-Verfahren

In Kapitel 4.9 wurde als Demonstrator ein Klöpferboden DN 1000 mit einer Werkzeugform der Firma STEULER KCH hergestellt, an dem auch die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung durchgeführt werden soll. Der Klöpferboden dieser Größe weist eine Dicke von 10 mm auf, wobei die Fläche einer Textillage ca. 1 m<sup>2</sup> beträgt. Der Klöpferboden wird zurzeit im Handlaminierverfahren hergestellt. Hierbei wird mit 8 Lagen einer Glasfasermatte von 450 g/m<sup>2</sup> Flächengewicht und 7 Lagen eines Glasfasergewebes von 900 g/m<sup>2</sup> Flächengewicht eine Gesamtmasse von ca. 9,3 kg Textil in diesem Bauteil verarbeitet. Beim Handlaminierverfahren kann nur ein vergleichsweise geringer Fasermassengehalt bzw. Faservolumengehalt erreicht werden, wodurch die eingesetzte Harzmenge bei ca. 20 kg liegt. Wird der Klöpferboden hingegen mit dem modifizierten Textil SV3 im VARI-Verfahren hergestellt, müssen von dem Textil mit einem Flächengewicht von 1800 g/m<sup>2</sup> lediglich 6 Lagen eingesetzt werden, was einer Textilmasse von ca. 10,8 kg entspricht. Im VARI-Verfahren kann ein wesentlicher höherer Massengehalt von über 60 % erreicht werden, wodurch nur noch eine Harzmenge von ca. 7,4 kg benötigt wird. Da im VARI-Verfahren gegenüber dem Handlaminierten Harz im peripheren Aufbau wie Schläuchen verbleibt und eine gewisse Durchlaufmenge einkalkuliert wird, wird für den Prozess ein Harzpuffer hinzugefügt, sodass insgesamt ca. 10 kg Harzverbrauch angesetzt werden.

In der Firma werden zurzeit 480 min Arbeitszeit zum Handlaminierten des Klöpferbodens benötigt. Für diesen Zeitraum, zusätzlich der Aushärtung und Entformung, ist die Werkzeugform belegt. Beim VARI-Verfahren fallen einige Zusatzarbeiten, wie die Werkzeugbelegung mit dem Textil und die Anfertigung des Vakuumaufbaus an, für die eine Arbeitszeit von 120 min angesetzt wird. Die Infusion der modifizierten Textilien mit Strömungskanälen selbst dauert bei der Bauteildicke von 10 mm und einer gewissen Durchlaufzeit zum Austragen von Lufteinschlüssen ca. 60 min. Somit beträgt die Werkzeugbelegung vor der Aushärtung und Entformung insgesamt 180 min. Ein Vergleich der beiden Verfahren ist in Tabelle 6 zu sehen.

**Tabelle 6: Vergleich der Klöpferbodenherstellung durch Handlaminierten und mittels VARI-Verfahren mit modifiziertem Textil**

	<b>Handlaminierten</b>	<b>VARI-Verfahren</b>	<b>Einsparung</b>
Textillagen	15	6	60 %
Textilmasse	9,3 kg	10,8 kg	-16 %
Harzmasse	20 kg	10 kg	50 %
Bauteilgewicht	29,3 kg	18,2 kg	37,9 %
Fasermassengehalt	31,7 %	59,3 %	
Arbeitszeit	480 min	180 min	62,5 %
Werkzeugbelegungszeit	480 min	180 min	62,5 %

In der Tabelle 6 sind die Vorteile und die Einsparpotentiale des in diesem Projekt entwickelten Verfahrens gegenüber dem Handlaminierverfahren sehr deutlich sichtbar. Durch den Einsatz der modifizierten Textilien im VARI-Verfahren können das Bauteilgewicht und der Materialeinsatz drastisch reduziert werden. Zwar muss beim VARI-Verfahren der zusätzliche Materialeinsatz an Verbrauchsmaterial für Schläuche, Vakuumfolie, Dichtband etc. beachtet werden. Die Einsparung am sehr teuren Harzsystem überwiegt aber wesentlich diese Mehrkosten und den eventuell höheren Preis für die modifizierten Textilien. Durch das eingesetzte Verfahren kann ein signifikant höherer Fasermassengehalt erreicht werden, was sich zusätzlich positiv auf die mechanischen Eigenschaften gegenüber dem handlaminierten Bauteil auswirkt. Die Arbeitszeit und Werkzeugbelegungszeit kann um über 60 % reduziert werden, was dem Unternehmen wirtschaftlich einen enormen Vorsprung ermöglicht. Beim Umstieg auf das VARI-Verfahren mit dem modifizierten Textil können die an der Firma vorhandenen Werkzeugformen verwendet werden, sodass die Investitionskosten sehr gering bleiben. Es muss, wenn nicht bereits vorhanden, eine Vakuumanlage mit einem entsprechenden Verteilersystem installiert werden. Die Mitarbeiter benötigen eine Schulung für das neue Verfahren. Als Nebeneffekt ist zu beachten, dass das VARI-Verfahren ein geschlossenes Verfahren darstellt und somit keine die Arbeitssicherheit und den Personenschutz betreffende Dämpfe entstehen – der Arbeitsplatz ist also wesentlich arbeitsfreundlicher und weniger belastend.

#### Windrotorblatt – Vergleich VARI-Verfahren und modifiziertes VARI-Verfahren

Als zweites Beispiel für eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung des entwickelten Verfahrens wurde ein Windrotorblatt für eine Windkraftanlage mit einer Leistung von 3 MW ausgewählt. Die industriellen Daten wurden hierbei von einem Unternehmen des PA (Namen beim ITM erfragbar) als Expertenauskunft zur Verfügung gestellt. Das exemplarisch betrachtete Windrotorblatt mit ca. 70 m Länge und 15 t Masse wird zurzeit im VARI-Verfahren hergestellt. Damit diese sehr großflächige Faserverbundstruktur mit Wanddicken von 5-50 mm in einer wirtschaftlichen Zeit infundiert werden kann, werden aktuell mehrere Infusionsstrategien miteinander kombiniert. Über dem gesamten Aufbau befindet sich eine Fließhilfe, die nach der Aushärtung entfernt wird. Da dies für die Infusion über die gesamte Bauteildicke nicht ausreichend ist, befinden sich auch zwischen mehreren Schichten im Rotorblatt Fließhilfen, die nach der Aushärtung im Bauteil verbleiben. Zusätzlich kommt ein komplexes Angussystem zum Einsatz, um das Harzsystem vor der Infusion so zu verteilen, dass die Infusionswege möglichst kurz und trockene Stellen im Bauteil vermieden werden.

Durch den Einsatz der modifizierten Textilien mit integrierten Strömungskanälen kann auf die zuvor eingesetzten Fließhilfen verzichtet werden. Auch vereinfachte Angussstrategien sind durch deren Einsatz möglich. Zusätzlich ist das Bauteil mit ca. 550 kg weniger Harz

herstellbar, das aktuell in den Fließhilfe verbleibt. Ca. 200 kg davon werden aktuell nach der Aushärtung gemeinsam mit der Fließhilfe entsorgt. Ca. 350 kg verbleiben im Bauteil, ohne dort wesentlich zu den mechanischen Eigenschaften des Rotorblattes beizutragen. Durch das Vermeiden von im Bauteil verbleibenden Fließhilfen ist die Bauteilmasse reduzierbar und damit eine höhere Bauteilperformance erreichbar.

Bereits durch die nicht mehr notwendigen Fließhilfen und ggf. aufgrund reduzierter Bauteilmassen ggf. geringere notwendige Verstärkungslagenanzahl, kann die Vor- und Nachbereitungszeit für den VARI-Auf- bzw. Abbau signifikant verkürzt werden. Aufgrund der Infiltrationsergebnisse der Motorhaube in Kapitel 4.9 ist bei Einsatz der modifizierten Textilien zusätzlich eine Verkürzung der Infiltrationszeiten von mind. 20-30 % erwartbar. In Summe wird so die Arbeitszeit und die Werkzeugbelegungszeit für jedes Windrotorblatt um mind. 20 % gesenkt. Zusätzlich verringern sich die Materialkosten für jedes Rotorblatt und der Prozessabfall wird signifikant reduziert. Investitionskosten fallen für die Umstellung des VARI-Verfahrens nicht an. Somit ist die Wirtschaftlichkeit des in diesem Projekt entwickelten VARI-Verfahrens mit modifizierten Textilien durch integrierte Strömungskanäle fundiert nachgewiesen.

## 5 Gegenüberstellung der Projektziele mit den Projektergebnissen

Tabelle 7: Gegenüberstellung der Projektziele und -ergebnisse

Projektziele	Erreichte Ergebnisse
<b>AS1:</b> Definition Funktionsmuster und Konkretisierung geeigneter Demonstratoren, Präzisierung der Anforderungen, Materialauswahl	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Präzisierung der Demonstratoren</li> <li>• Ableitung der Anforderungen</li> <li>• Materialauswahl</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Festlegung der Demonstratoren KFZ-Motorhaube und Klöpferboden</li> <li>• Anforderungen der Industrie aufgenommen</li> <li>• Auswahl der Faserstoffe und Harzsysteme mit PA erfolgreich abgestimmt</li> </ul>
⇒ Keine Abweichung vom Projektantrag	
<b>AS2:</b> Bindungstechnische Modellierung der Strömungskanäle	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Entwicklung der Bindungstechnik zur Herstellung der Fließkanäle</li> <li>• Prozessparameter Analyse im Zusammenspiel mit Bindungstechnik</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bindungen für alle Funktionsmuster erfolgreich entwickelt</li> <li>• Verfahrensgrenzen der Parameter analysiert und optimale Betriebszustände festgelegt</li> </ul>
⇒ Keine Abweichung vom Projektantrag	

Projektziele	Erreichte Ergebnisse
<b>AS3:</b> Entwicklung einer Methode zur Quantifizierung von Dual-Scale-Effekten	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Entwicklung von Methoden zum Messen der Eingangsgrößen für die Modellierung der Dual-Scale-Eigenschaften</li> <li>• Entwicklung einer Methode zur Quantifizierung der Dual-Scale-Eigenschaften</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Methoden zum Messen der Kapillarität der Rovings sowie der lokalen und globalen Permeabilität der Textilien wurden entwickelt</li> <li>• Als Methode zur Quantifizierung der Dual-Scale-Eigenschaften wurde der Gehalt an Mikro- und Makroporen in Abhängigkeit der Kapillaritätszahl eruiert</li> </ul>
⇒ Keine Abweichung vom Projektantrag	
<b>AS4:</b> Entwicklung und Umsetzung modifizierter Funktionsfäden bzw. -fadenstrukturen	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Entwicklung und Umsetzung der drei vorgeschlagenen Ansätze</li> <li>• Umfangreiche Parameterstudien</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ansätze erfolgreich entwickelt und umgesetzt. Ansatz 3 (Umwicklung mit Grilon) als Vorzugslösung</li> <li>• In Abstimmung mit PA nur weitere Analyse des dritten Ansatzes. Erfolgreiche Durchführung der Parameterstudien</li> </ul>
⇒ Keine Abweichung vom Projektantrag	
<b>AS5:</b> Experimentelle Untersuchungen zur Umsetzung von textilen 2D-Funktionsmustern mit textiltechnischen integrierten Strömungskanälen	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Konkrete Umsetzung der Funktionsmuster und von Vergleichsstrukturen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Erfolgreiche Umsetzung der für die Bewertung und Analyse benötigten Strukturen</li> </ul>
⇒ Keine Abweichung vom Projektantrag	
<b>AS6:</b> Charakterisierung der Textilhalbzeuge im Hinblick auf die Strömungskanäle, die Kompaktierungseigenschaften und die Imprägnierbarkeit	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Charakterisierung durch textilphysikalische Untersuchungen</li> <li>• Charakterisierung der Kompaktierung</li> <li>• Charakterisierung der Imprägnierbarkeit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Textilphysikalische Eigenschaften der Strukturen wurden bestimmt</li> <li>• Die Kompaktierung der Strukturen mit gelöstem und ungelöstem Funktionsfaden wurde bestimmt</li> </ul>

Projektziele	Erreichte Ergebnisse
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Die Imprägnierbarkeit der Textilien wurde mithilfe von Permeabilitätsmessungen sowie Analyse der Poren und Dual-Scale-Eigenschaften charakterisiert</li> <li>• Zwei bevorzugte Funktionsmuster wurden eruiert</li> </ul>
⇒ Keine Abweichung vom Projektantrag	
<b>AS7:</b> Makro- und Meso-Modellierung der Dual-Scale-Eigenschaften als Funktion der textilen Eigenschaften des Halbzeuges	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Makro- und Meso-Modellierung der Imprägnierprozesse mit und ohne integrierte Fließkanäle</li> <li>• Darstellung der realen Fließprozesse</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Erfolgreiche Umsetzung der Makro- und Meso-Modellierung der Imprägnierprozesse mit und ohne integrierte Fließkanäle</li> <li>• Erfolgreiche Validierung der Simulation anhand der Experimente</li> </ul>
⇒ Keine Abweichung vom Projektantrag	
<b>AS8:</b> Untersuchungen zur Auswirkung der Strukturbeeinflussung auf die mechanischen Eigenschaften mit und ohne Auflösung des Funktionsfadens	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Charakterisierung der Strukturbeeinflussung mit und ohne Auflösung des Funktionsfadens in Hinblick auf: <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Schlagzähigkeit</li> <li>○ Faservolumengehalt</li> <li>○ Lufteinschlussdichte</li> <li>○ Zugfestigkeit</li> <li>○ Biegefestigkeit</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Schlagzähigkeit, Faservolumengehalt, Lufteinschlussdichte, Zugfestigkeit und Biegefestigkeit wurden charakterisiert</li> <li>• Ohne Auflösung des Funktionsfadens ist eine Verringerung der Eigenschaften erkennbar</li> <li>• Mit Auflösung des Funktionsfadens sind die mechanischen Eigenschaften von Modifizierung und Basistextil vergleichbar</li> </ul>
⇒ Keine Abweichung vom Projektantrag	
<b>AS9:</b> Demonstratorherstellung, Analyse und Interpretation der Arbeitsergebnisse	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Umsetzung der 3D-FKV-Demonstratoren</li> <li>• Charakterisierung der Demonstratoren</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Umsetzung FKV-Demonstrator Klöpperboden und KFZ-Motorhaube</li> </ul>

Projektziele	Erreichte Ergebnisse
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dokumentation des Infiltrationsverlaufs</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dokumentation des Infiltrationsverlaufs und Rückschlüsse auf die Eignung der modifizierten textilen Strukturen</li> </ul>
⇒ Keine Abweichung vom Projektantrag	
<b>AS10:</b> Erstellung eines KMU-Leitfadens, Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zusammenfassen der Ergebnisse in übersichtlicher Form für die KMU</li> <li>• Bewertung des wirtschaftlichen Einflusses der neuen Technologie</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Erstellung eines KMU-Leitfadens</li> <li>• Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für neue Technologie erstellt</li> </ul>
⇒ Keine Abweichung vom Projektantrag	
<b>AS11:</b> Berichterstattung	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verwertung der Ergebnisse laut Verwertungsplan</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Präsentation der Ergebnisse laut Verwertungsplan</li> </ul>
⇒ Keine Abweichung vom Projektantrag	

## 6 Verwendung der Zuwendung und Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

In der folgenden Tabelle 8 sind die bewilligten und abgerechneten Personalmonate des wissenschaftlichen Personals für das Projekt dargestellt. Die Finanzierungsmittel für Personalausgaben wurden in der abgerufenen Höhe verbraucht. Die Personalmittel waren zur Durchführung des Projektes in vollem Umfang angemessen und notwendig.

Tabelle 8: Bewilligte und eingesetzte Personenmonate (PM)

Forschungseinrichtung	Bewilligte PM HPA-A	Eingesetzte und abgerechnete PM HPA-A
PuK (FE 1)	29,5	29,5
ITM (FE 2)	27	27

Die im Rahmen des Forschungsvorhabens durchgeführten Arbeiten waren für die Erfüllung der im Antrag aufgeführten Arbeitsschritte im Bewilligungszeitraum notwendig und angemessen. Die Personalmittel wurden entsprechend dem Arbeitsplan verwendet und abgerechnet. Der im Projektplan veranschlagte Personaleinsatz und die damit verbundenen Ausgaben waren zur Durchführung des Forschungsvorhabens und zur Erreichung der Projektziele angemessen und im beantragten Umfang notwendig.

Leistungen Dritter sowie Gerätebeschaffungen waren im Projekt nicht vorgesehen und wurden nicht in Anspruch genommen.

## **7 Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen der erzielten Projektergebnisse**

Die Stärke der deutschen Unternehmen beruht insbesondere auf einem technologischen Vorsprung gegenüber Wettbewerbern aus dem Ausland und den daraus resultierenden Innovationen. Der umfassende Einsatz von FKV in mittleren und großen Serien erfordert die Entwicklung bzw. Weiterentwicklung der Fertigungsprozesse, sodass bei ressourcenschonendem Materialeinsatz eine effiziente und kostengünstige Herstellung von FKV-Bauteilen in Infusionsprozessen möglich wird. Ziel des abgeschlossenen Forschungsprojektes war die Entwicklung eines Verfahrens zur simulationsgestützten, textiltechnischen Integration temporärer, sich nach der Infiltration schließender Strömungskanäle in Verstärkungshalbzeuge sowie einer effizienten Fertigungstechnologie mit, gegenüber dem Stand der Technik, drastisch verkürzten Infiltrationszeiten zur Herstellung komplex geformter, großflächiger FKV-Strukturen mit homogener Faserverteilung im Infusionsverfahren in reproduzierbar hoher Qualität.

Das Projekt leistet durch die Entwicklung anforderungsgerechter textiler Verstärkungsstrukturen mit gezielt integrierten temporären Strömungskanälen, die sich nach der Infiltration schließen, geeigneter Infiltrationsstrategien und simulationsgestützter Auslegungsmethoden sowie der Erstellung eines KMU-geeigneten Leitfadens für die industrielle Umsetzung einen wesentlichen Beitrag zur industriellen Gemeinschaftsforschung für den wettbewerblichen Vorsprung deutscher Unternehmen. Erreicht wird dies durch den Einsatz anforderungsgerechter Verstärkungsstrukturen mit temporären Strömungskanälen, was gleichzeitig auch eine Infiltration bei geringerem Druck und damit unter Verwendung einfacher und preiswerter Formwerkzeuge erlaubt. Weiterhin entfällt zukünftig die Entwicklung und Umsetzung bisher erforderlicher komplexer Angussysteme und -strategien bei gleichzeitiger Vermeidung von

Produktionsabfällen wie Fließhilfen. Durch die gesteuerte Matrixverteilung bei belastungsgerechter Faserausrichtung im Bauteil sind trockene Stellen vermeidbar, was zu einer deutlichen Senkung der Ausschussquote führt. Damit hat das Projekt einen deutlichen Beitrag zur Erfüllung volkswirtschaftlicher und gesellschaftlicher Ziele (z.B. Ressourceneffizienz) geleistet. Das Projekt leistet weiterhin einen wesentlichen Beitrag zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit von KMU des chemischen Anlagen- und Apparatebaus, des Maschinen- und Fahrzeugbaus aber auch der Windenergie bei der Herstellung großer sowie komplexer FKV-Bauteile. Durch die Ergebnisse dieser Forschungen werden die KMU so in die Lage versetzt, die Erweiterungen aktueller bzw. die Erschließung neuer Geschäftsfelder für FKV voranzutreiben.

Durch die Erkenntnisgewinne entlang der gesamten Wertschöpfungskette der FKV-Herstellung, von der Bereitstellung der Verstärkungsfasern über die Herstellung der neuartigen textilen Halbzeuge bis hin zur verbesserten Bauteilherstellung, ist der Nutzerkreis der Ergebnisse sehr vielschichtig. Auf der Herstellerseite umfasst der potentielle Nutzerkreis vor allem Vertreter aus der KMU-dominierten Textilindustrie. Dazu zählen ca. 100 Hersteller textiler Flächengebilde (Stricken, Wirken, Weben), rund 10 Hersteller von Textilmaschinen bzw. Textilmaschinenkomponenten. Für diese KMU der Textilindustrie werden durch die zu entwickelnden Halbzeuge neue Einsatzgebiete technischer Hochleistungstextilien erschlossen, besonders in großen und komplex geformten FKV-Bauteilen.

Der stark KMU-dominierte Bereich der FKV-Herstellung und -Anwendung profitiert zudem von den Erkenntnissen zum verbesserten Infiltrationsprozess (z.B. verringerte Infiltrationszeiten, höhere Bauteilkomplexität und -qualität, keine Fließhilfen) sowie dessen Beeinflussung durch die neuen textilen Halbzeuge mit temporären Strömungskanälen. Mindestens 150 KMUs von FKV-Bauteilherstellern stehen weiterentwickelte textile Halbzeuge mit temporären Strömungskanälen für angepasste Infiltrations- und Aushärteprozesse bei Infusionsverfahren zur Verfügung, die die Herstellung von FKV mit deutlich höherer Qualität und Produktivität unter Verwendung bestehender bzw. weniger großer, steifer und damit teurer Formwerkzeuge erlauben.

Auf der Anwenderseite im Chemie- und Anlagenbau können die Ergebnisse von mindestens 10 Herstellern des Chemieapparatebaus genutzt werden. Hier werden viele großflächige FKV-Bauteile zurzeit noch im Handlaminierverfahren hergestellt. Das Einsparpotential an manueller Arbeitszeit der Mitarbeiter ist hier signifikant. Zusätzlich können durch den Einsatz des Infusionsverfahrens die mechanischen Eigenschaften der Bauteile verbessert werden. Zudem sind die Forschungsergebnisse im Maschinen- und Fahrzeugbau sowie in der Windenergie bei der Herstellung der Rotorblätter einsetzbar.

Es wird deshalb eingeschätzt, dass mindestens 100 KMU einen direkten Nutzen aus den Forschungsergebnissen ziehen können. Durch die mit der Steigerung der Wirtschaftlichkeit der FKV-Herstellung und der Qualität der FKV-Bauteile einhergehende Senkung der Bauteilherstellungskosten wird eine Erweiterung von FKV-Anwendungen auf sehr kostensensitive Branchen erwartet.

## **8 Innovativer Beitrag und industrielle Anwendungsmöglichkeiten der Forschungsergebnisse**

Die sehr guten wirtschaftlich/ technischen Erfolgsaussichten für eine zeitnahe industrielle Umsetzung der Ergebnisse durch die KMU der Textil- und der FKV-Industrie nach Projektende und der direkte Nutzen ergeben sich aus dem kontinuierlich wachsenden Markt für duroplastische FKV in Serienanwendungen. In den letzten Jahren stieg der Absatz von mit dem RTM-Verfahren hergestellten GF-FKV um über 2 % jährlich mit steigender Tendenz [1]. Dies belegt, dass der FKV-basierte Leichtbau zu den zukunftssträchtigen Schlüsseltechnologien zählt und insbesondere die KMU der Textil-, Kunststoff-, FKV-, Zuliefer- und Anwenderindustrie daran partizipieren können. Durch Nutzung der erzielten Forschungsergebnisse werden gerade diese Unternehmen in die Lage versetzt, selbstständig bzw. gemeinsam die Entwicklung und textil- bzw. kunststofftechnische Umsetzung qualitativ hochwertiger großer bzw. komplexer FKV-Bauteile im RTM-Verfahren, bei kurzen Taktzeiten voranzutreiben, ohne teure technologische Veränderungen ihrer Formwerkzeuge vornehmen zu müssen.

Dieses große Interesse wurde in bilateralen Beratungen und den Projektreffen deutlich hervorgehoben. Mit der Zusammenstellung der Firmen des PA aus verschiedenen Branchen (Textiltechnik, Harzhersteller, Werkzeug- und Anlagenbau) und den Anwenderbereichen (Chemie- und Anlagenbau, Windenergiesektor, Bahntechnik) wird die gesamte Prozesskette vom Faserstoff, über den Faden, die Flächenbildung, Infiltration & Konsolidierung bis zum Faserverbundbauteil und zusätzlich die simulationsgestützte (Formfüllsimulation, Strömungssimulation, bindungstechnische Simulation der Textilien) Auslegung der Halbzeuge und Infusionsprozesse abgebildet. Ein großer Teil der Firmen entlang dieser Prozesskette sind klein- und mittelständisch ausgeprägt und können aus den Ergebnissen des Projektes einen unmittelbaren Nutzen ziehen. Aufgrund der großen Relevanz der Thematik sowie des großen Interesses der beteiligten Firmen werden die wirtschaftlich technischen Erfolgsaussichten des Projekts insgesamt als sehr gut eingeschätzt. Mit den am Ende der Projektlaufzeit hergestellten Demonstratoren konnte nachgewiesen werden, dass Anwendungsmög-

lichkeiten im Chemie- und Anlagenbau, sowie der Transportindustrie und Windenergie liegen. Im Chemie- und Anlagenbau würde die neu entwickelte Technologie sogar das noch gängige Handlaminierverfahren ersetzen können.

Für die KMU-dominierte Textilindustrie liegt der konkrete Nutzen der Ergebnisse in der Bereitstellung einer Technologie zur Herstellung neuartiger maßgeschneiderter textiler Halbzeuge für die effiziente Weiterverarbeitung zu komplexen großflächigen FKV-Bauteilen mit dem vorhandenen Maschinenpark und damit ohne signifikante Maschinenanpassungen. Die industrielle Umsetzung ist somit ein Beitrag zur Etablierung dieser Firmen als Zulieferer für FKV-Hersteller, was die Wettbewerbsfähigkeit gegenüber Herstellern konventioneller textiler Verstärkungsstrukturen deutlich verbessert.

Es ist davon auszugehen, dass nach Projektende innerhalb von ca. 12 Monaten die Unternehmen am Anfang der Prozesskette die individuell notwendigen Weiterentwicklungen so vorangetrieben haben, dass eine Simulation sowie die Umsetzung der Prozessoptimierung im industriellen Maßstab möglich werden. Insbesondere der Einsatz der Simulationsmethoden zur infiltrationsbezogenen Auslegung der Bauteile wird dabei den Einsatz der Forschungsergebnisse in der industriellen Praxis beschleunigen. Den Firmen werden mit den entwickelten Formulierungen Werkzeuge gegeben, mit denen sie die Bauteile und die Herstellprozesse selbst optimieren können und somit die Entwicklungszeit erheblich verkürzen. Damit steht die Prozessoptimierung 1 bis 2 Jahre nach Projektende den Herstellern textiler Halbzeuge sowie den Bauteilherstellern zur Verfügung. In Folge dessen können ab ca. 2 bis 3 Jahren nach Projektende erste Serienanwendungen für Bauteile auf Basis der neuartigen modifizierten permeabilitätsoptimierten Verstärkungsstrukturen starten. Somit können in laufenden Prozessen große Mengen an momentan erforderlichen Fließhilfen, welche nach dem Bauteilherstellungsprozess entsorgt werden müssen, eingespart werden. Zusätzlich dazu kann der Leichtbaufaktor bestehender Produkte durch die Einsparung von großvolumigen, nach der Bauteilherstellung mit Matrix gefüllten, integrierten Fließhilfen erhöht werden. In der Entwicklung neuer Produkte kann durch die bereitgestellten Simulationsmethoden die textile Struktur von Beginn an mit integrierten temporären Fließkanälen versehen werden. Für die Neuentwicklung von Produkten und die Umstellung etablierter Infusionsverfahren mit der in diesem Projekt entwickelten Methode steht den KMU ein Leitfaden zur Verfügung, der die Auswahl innerhalb der großen Masse an Parametern erleichtert. Zusätzlich stehen die beiden FE interessierten Firmen für eine Beratung der entwickelten Verfahren zur Verfügung.

## **9 Fortgeschriebener Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft**

Die während der Projektlaufzeit durchgeführten Transfermaßnahmen in die Wirtschaft sind in Tabelle 9 erfasst.

**Tabelle 9: Maßnahmen zum Ergebnistransfer während der Projektlaufzeit**

Maßnahme / Ziel	Rahmen	Zeitraum
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ laufende Information PA/Diskussion von Teilzielen, Arbeitsschritten und Ergebnissen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ PA-Sitzungen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Sitzung erfolgte 23.09.2016</li> <li>▪ Sitzung erfolgte 16.05.2017</li> <li>▪ Sitzung erfolgte 06.02.2018</li> <li>▪ Sitzung erfolgte 25.09.2018</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Treffen mit Firmenvertretern des PA</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Gespräche in den FE und bei den Firmen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Erfolgt</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Gewinnung weiterer KMU entlang der Projektprozesskette für Mitarbeit im PA / Erweiterung der Kompetenz und Einwerbung vAW</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ bilaterale Beratungen auf Fachtagungen und Messen und bei Besuchen von KMU-Vertretern am ITM</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Regelmäßige Aktualisierung während der Projektbearbeitung</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ gezielte Ansprache geeigneter KMU für Mitarbeit im PA</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Beratungen, auf Fachtagungen und Messen (JEC, Techtexil, ADITC, SAMPE Dtl., Materialica, CCeV, CFK-Valley)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ SAMPE Europe 09/16</li> <li>▪ K-Messe 10/16</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Veröffentlichungen im Internet / Projektbekanntmachung und Ergebnisvorstellung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Internetseiten der FE, Forschungsinformationssystem der TU Dresden</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Regelmäßige Aktualisierung während der Projektbearbeitung</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Bekanntmachung der Ergebnisse innerhalb der Forschungsvereinigung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Vortrag bei Sitzung des Arbeitsausschusses Konstruktion und Festigkeit im chemischen Apparate- und Anlagenbau der DE-CHEMA</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 13.12.2016</li> <li>▪ 16.03.2018</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Bekanntmachung von Forschungsergebnissen, Ausstellung der Demonstratoren auf renommierten Fachtagungen und Messen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Techtexil</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ II/2017</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Vorträge, Poster, Wissenschaftliche Publikationen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ ADD-ITC 2017</li> <li>▪ CZM-Absolvententag</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ IV/2017</li> <li>▪ III/2018</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Realisierung von drei Funktionsmustern und eines FKV-Demonstrators (verbleibt an FE)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Präsentation von Funktionsmustern und FKV- Demonstrator</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Erfolgt</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ergebnisübernahme in die Lehre / Projektmitarbeit von Studenten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Praktika, Bachelor, Diplom, Master, SHK</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Während der Projektbearbeitung, Masterarbeit, SHK</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ausstellen der Demonstratoren und Diagrammen in Vitrinen an den FE</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ anschauliches Bekanntmachen der Ergebnisse für Fachbesucher</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Am PUK, ITM</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Zusammenstellung der Forschungsergebnisse</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Zwischenbericht</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 28.02.2017</li> <li>▪ 28.02.2018</li> </ul>

Die Transfermaßnahmen zwischen Projektabschluss und Berichtslegung sind in Tabelle 10 zusammengefasst.

**Tabelle 10: Maßnahmen zum Ergebnistransfer zwischen Projektabschluss und Berichtslegung**

Maßnahme / Ziel	Rahmen	Zeitraum
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Bekanntmachung und Wertstellung der Ergebnisse</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Einreichung des Projektes beim AVK-Innovationspreis</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 03/2019</li> <li>▪ 06/2019 als Gewinner nominiert</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Bekanntmachung der Ergebnisse innerhalb der Forschungsvereinigung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Vortrag bei Sitzung des Arbeitsausschusses Konstruktion und Festigkeit im chemischen Apparate- und Anlagenbau der DE-CHEMA</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 26.03.2019</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Bekanntmachung von Forschungsergebnissen, Ausstellung der Demonstratoren auf renommierten Fachtagungen und Messen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Techtexil</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ II/2019</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Zusammenstellung der Forschungsergebnisse</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Abschlussbericht</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ II/2019</li> </ul>

Die geplanten Transfermaßnahmen nach Abschluss der Berichtslegung sind in Tabelle 11 zusammengefasst.

**Tabelle 11: Maßnahmen zum Ergebnistransfer nach Abschluss der Berichtslegung**

Maßnahme / Ziel	Rahmen	Zeitraum
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ergebnisvorstellung und -diskussion in den Arbeitskreisen der AiF-Mitgliedsvereinigung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Sitzung des Arbeitskreises „Technische Textilien“ des FKT</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ III/2019</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ausstellen der Demonstratoren und Auswertebilder in Vitrinen an den FE</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ anschauliches Bekanntmachen der Ergebnisse für Fachbesucher</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ ab 7/2019</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Veröffentlichung der Projektergebnisse im Internet / Ergebnisvorstellung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Internetseiten FE, Forschungsinformationssystem TU Dresden, FKT-Forschungshighlights</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 7/2019</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Veröffentlichungen in Fachzeitschriften</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Projektbekanntmachung und Ergebnisvorstellung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Kunststoffe, Composites Part A/Part B</li> <li>▪ Technische Textilien</li> <li>▪ Jahresbericht der FE</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ergebnisübernahme in die Lehre / Ergebnisvermittlung an Firmenmitarbeiter - Verbreitung und Anwendung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ VL „Technische Textilien“ und Praktika für Textil-, Wirtschaftsingenieur- und Leichtbaustudenten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ab WS 2019/2020</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Bekanntmachung von Forschungsergebnissen, Ausstellung der Demonstratoren auf renommierten Fachtagungen und Messen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Composites Europe</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 09/2019</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Beratung von Unternehmen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ auf Anfrage</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ ab 7/2019</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Bereitstellung des Abschlussberichtes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ auf Anfrage</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ ab 7/2019</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Nutzung der Forschungsergebnisse zur Realisierung weiterer Forschungsvorhaben</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ z.B. im Rahmen von IGF und ZIM</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ III/2019</li> </ul>

Aufgrund des großen Interesses aus der Wirtschaft wird eingeschätzt, dass die nach Projektende geplanten Transfermaßnahmen ebenfalls sehr gut umsetzbar sind.

In Zusammenhang mit dem Vorhaben wurden die folgenden Veröffentlichungen auf Tagungen publiziert:

- ADD-ITC 2017: „Investigation on the Quantification of the Dissolution Behaviour of Thermoplastic Functional Threads in a Thermosetting Resin“
- CZM-Absolvententag: “Einsatz von neuronalen Netzen bei der Mikroskopie”

## 10 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Fließfrontausbildung für hohe (links) und niedrige Fließgeschwindigkeit (rechts) [37] .....	11
Abbildung 2: Formwerkzeuge a) Demonstrator 1 Klöpperboden, b) Demonstrator 2 PKW-Motorhaube.....	16
Abbildung 3: Schematischer Lagenaufbau im a) unkompaktierten und b) kompaktierten Zustand – (orange markiert Fläche für das Durchströmen des Harzes).....	18
Abbildung 4: Schematische Darstellung eines kompaktierten Lagenaufbaus mit modifizierten Rovings in a) 0°- und b) 90°-Richtung (orange markiert Fläche für das Durchströmen des Harzes) .....	19
Abbildung 5: Schematische Darstellung kompaktierter Lagenaufbauten und Modifikation in a) jeder vierte SF, sowie jeder zweite SF, alternierende Schichtung (b), c) biaxialer Aufbau mit Vakuumfolie (blau) .....	19
Abbildung 6: Schematische Darstellung des parametrisierbaren 3D-CAD-Modells mit unterschiedlichen MF-, KF- und SF-Materialien.....	20
Abbildung 7: Schematische Darstellung der Varianten zur lokalen Strukturmodifikation: a) manipulierte Verstärkungsfaserrovings, b) Bändchenstrukturen, c) bindungstechnisch kompaktierte Bereiche .....	21
Abbildung 8: Schematische Darstellung der Funktionsmuster (FM).....	21
Abbildung 9: Schematische Darstellung der entwickelten modifizierten.....	22
Abbildung 10: Drei charakteristische Bereiche bei einer Harzinfusion: vollständig imprägniert (links), teilweise imprägniert (Mitte) und nicht imprägniert (rechts) .....	24
Abbildung 11: Schematischer Aufbau einer Tensiometermessung .....	25
Abbildung 12: Tensiometermessung der Steighöhe vom Glasfaserroving.....	26
Abbildung 13: Permeabilitätsmessstand .....	26
Abbildung 14: Fließfronterkennung des Permeabilitätsmessstandes .....	27
Abbildung 15: Permeabilität in Abhängigkeit der Fließfrontposition .....	28
Abbildung 16: Abhängigkeit der Permeabilität vom Faservolumengehalt .....	28

Abbildung 17: Infusionsaufbau zur Bestimmung des Porengehalts mit gekennzeichneten Querschnitten.....	29
Abbildung 18: Schliffbilder von Makroporen (links) und Mikroporen (rechts) mit automatisierter Bilderkennung (unten) .....	30
Abbildung 19: Konzentration der Makro- und Mikroporen in Abhängigkeit der Fließfrontgeschwindigkeit beim Basistextil .....	31
Abbildung 20: Entwicklung und Umsetzung modifizierter Funktionsfäden und Einbringung ins Flächengebilde .....	32
Abbildung 21: Schematische Darstellung der lokalen bindungstechnischen Strukturkompaktierung.....	36
Abbildung 22: Angepasster Maschenfaden aus Grilon KE-60 (weiß) und GF (rot).....	36
Abbildung 23: Schematische Darstellung des Mikroskopaufbaus (links) und die Bewertung des Auflöseverhaltens mit der Bild-Analyse-Methode (rechts) .....	37
Abbildung 24: Vergleich des Auflöseverhaltens der Funktionsfäden KE-60 und MS-300 in den Harzsystemen RIMR 135 und BÜFA Labormuster VII in Abhängigkeit der Temperatur .....	38
Abbildung 25: Angefertigte textile Basisstruktur .....	40
Abbildung 26: Steiger Aries 3D Strickmaschine (Feinheit: E7) mit eingezogenem KF-Material (1 m Produktionsbreite) .....	40
Abbildung 27: Fadenzuführsystem an der Strickmaschine .....	41
Abbildung 28: In SR modifizierte MLG-Strukturen SV1-SV5 .....	42
Abbildung 29: Frei orientiert eingebrachter Fließkanal, Verzicht auf Kett- und Schussfaden für verbesserte Sichtbarkeit der Bindungstechnik .....	42
Abbildung 30: MLG Struktur mit frei wählbarer Anordnung temporärer Strömungskanäle .	43
Abbildung 31: Vorrichtung zur Messung der Kompaktierung.....	45
Abbildung 32: Kompaktierungsmessungen für unterschiedliche Anordnungen des Textils SV5 .....	45
Abbildung 33: Kompaktierungsmessungen vom Basistextil SV0, trocken und nass.....	46
Abbildung 34: Kompaktierungsmessungen vom Textil SV3, trocken und nass (links); nasse Kompaktierungsprobe (rechts) .....	47
Abbildung 35: Permeabilität in Abhängigkeit des Faservolumengehaltes .....	48
Abbildung 36: Fließfrontverlauf bei den Permeabilitätsmessungen vom Basistextil (links) und der modifizierten Version SV4 (rechts).....	48
Abbildung 37: Fließfrontverlauf bei der Permeabilitätsmessung von der modifizierten Version SV3 .....	49

Abbildung 38: Schematische Darstellung der 3D-CAD-Modelle der Referenzstruktur (a) und SV5 (b).....	50
Abbildung 39: Konzentration der Makro- und Mikroporen in Abhängigkeit der Fließfrontgeschwindigkeit beim Funktionsmuster SV5 .....	51
Abbildung 40: Modellierung der Dual-Scale-Effekte Makromodellierung(Links) - und Mesomodellierung (Rechts).....	52
Abbildung 41: Dual-Scale-Effekte bei der Imprägnierprozess .....	53
Abbildung 42: Schlagzähigkeit der Reinharzproben der zur Verfügung gestellten Harzsysteme .....	54
Abbildung 43: Zugmodul und Zugfestigkeit vom Basistextil und Funktionsmuster SV3.....	55
Abbildung 44: Biegemodul und Biegefestigkeit vom Basistextil und Funktionsmuster SV3	56
Abbildung 45: Schematische Darstellung des Infiltrationsaufbaus zur Herstellung des Demonstratorbauteils 2: Motorhaube .....	58
Abbildung 46: Extrahierte Bildserie aus dem Bauteilherstellungsprozess des Demonstratorbauteils 2: PKW-Motorhaube .....	59
Abbildung 47: Schematische Darstellung des um die Abreißfolie und das Fließmedium reduzierte Infiltrationsaufbaus bei der Herstellung der Probenplatten .....	59
Abbildung 48: Momentaufnahme zum Zeitpunkt (t=8 min) der vollständigen Infiltration der Probenplatte mit modifizierter Struktur und markierter Differenz des Fließfrontfortschritts..	60
Abbildung 49: Vergleich der Infiltrationszeit beim Demonstrator 1 Klörperboden: a) Momentaufnahme der vollständigen Infiltration vom modifizierten Textil, b) Momentaufnahme der vollständigen Infiltration vom Basistextil .....	61
Abbildung 50: Vollständig imprägnierter Klörperboden im VARI-Aufbau.....	62

## 11 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Fadenmaterialien der textilen Basisstruktur .....	17
Tabelle 2: Hergestellte temporär kompaktierte Verstärkungsfaserrovings .....	32
Tabelle 3: Übersicht aller hergestellten Umwindgarne (GF EC2400 + Grilon [MS300 / KE 60]) .....	33
Tabelle 4: Die untersuchten Matrizen und Funktionsfäden.....	39
Tabelle 5: Textilphysikalische Kennwerte der textilen Basis- und Modifikationsvarianten SV1-SV5 .....	44
Tabelle 6: Vergleich der Klörperbodenherstellung durch Handlaminiere und mittels VARI-Verfahren mit modifiziertem Textil .....	65
Tabelle 7: Gegenüberstellung der Projektziele und -ergebnisse .....	67
Tabelle 8: Bewilligte und eingesetzte Personenmonate (PM).....	70

Tabelle 9: Maßnahmen zum Ergebnistransfer während der Projektlaufzeit .....75  
 Tabelle 10: Maßnahmen zum Ergebnistransfer zwischen Projektabschluss und  
 Berichtslegung .....76  
 Tabelle 11: Maßnahmen zum Ergebnistransfer nach Abschluss der Berichtslegung .....76

## 12 Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
FE	Forschungseinrichtungen
FKV	Faserkunststoffverbunde
FM	Funktionsmuster
FPCM	Flow Processes in Composite Materials
FVG	Faservolumengehalt
GF	Glasfaserverstärkung
IGF	Industrielle Gemeinschaftsforschung
ITM	Institut für Textilmaschinen und Textile Hochleistungswerkstofftechnik
KR	Kettrichtung
MLG	Mehrlagengestrick
PA	Projektbegleitender Ausschuss
PM	Personenmonate
PUK	Institut für Polymerwerkstoffe und Kunststofftechnik
RTM	Resin-Transfer-Moulding
SF	Schussfaden
SHK	Studentische Hilfskraft
SR	Schussrichtung
SV	Schussvarianten
VARI	Vacuum Assisted Resin Infusion

## 13 Literaturverzeichnis

- [1] Witten, E.: Composites-Marktbericht 2018. AVK, 2018.
- [2] P. Trechow: Um die breite Kundschaft zu überzeugen, ist Carbon noch zu teuer. [www.vdi-nachrichten.com](http://www.vdi-nachrichten.com), (27.2.2015).
- [3] Zhu, H.; Wu, B.; Li, D.: Influence of Voids on the Tensile Performance of Carbon/epoxy Fabric Laminates. *Journal of Materials Science & Technology* 27, 2011, S. 69-73.

- [4] Ehrenstein, G. W.: Faserverbund-Kunststoffe. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2006 - ISBN 3446227164.
- [5] Bear, J.: Dynamics of fluids in porous media; Repr. New York: Dover, 1998.
- [6] Nordlund, M.; Penha, D.J.L.; Stolz, S.: A new analytical model for the permeability of anisotropic structured porous media. *International Journal of Engineering Science* 68, pp. 38-60, 2013.
- [7] Rieber, G.; Wirjadi, O.; Mitschang, P.: Correlation of permeability values with flow channel diameters determined by 3D-image analysis of a woven textile. *Proceedings of the FPCM10*, July 11<sup>st</sup>-15<sup>th</sup>, Monte Verità, Ascona, Schweiz, 2010.
- [8] Bakker, S.: Infusionsoptimierte Carbon UD Gelege für die Fertigung von dicken Kohlefasergurten für Rotorblätter. In: *Tagungsband. 8<sup>th</sup> Aachen Dresden International Textile Conference*, Dresden, 2014.
- [9] Nordlund, M.; Lundstrom T.S.: Effect of multi-scale porosity in local permeability modeling of non-crimp fabrics. *Transport in porous media* 73, 2008, 109-124.
- [10] Heider, D., et al.: Infusion design methodology for thick-section, low-permeability preforms using interlaminar flow media. *Composites: Part A* 38 (2007), pp. 525-534.
- [11] Friedrich, M.: *Perspektiven einer automatisierten RTM-Fertigung*, Wissenschaftstag 2009, Braunschweig, 2009
- [12] Cherif, Ch., et al.: *Textile Werkstoffe für den Leichtbau*. Berlin: Springer, 2011.
- [13] Michaeli, W.; Fischer, K.: Untersuchungen zur Fertigung von flächigen Bauteilen aus faserverstärkten Kunststoffen mithilfe des Spältimprägnierverfahrens, *Kunststofftechnik*, 4-2008, S. 1-29.
- [14] Ruiz, E., et al.: Flexible injection: a novel LCM technology for low cost manufacturing of high performance composites. Part I - experim. investigation, *FPCM9*, Montreal, 2008.
- [15] Bhat, P.; Merotte, J.; Simacek, P.; Advani S.G.; Process analysis of compression resin transfer molding, *Composites: Part A* 40 (2009) pp. 431–441.
- [16] Barandun, G. A., et al: Advanced Material and Tooling Concept for a RTM Helicopter Fitting. *Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Conference on Flow Processes in Composite Materials (FPCM10)* July 11<sup>st</sup>-15<sup>th</sup>, Monte Verità, Ascona, CH, 2010.
- [17] Wong, D. W.Y., et al.: Improved fracture toughness of carbon fibre/epoxy composite laminates using dissolvable thermoplastic fibres. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* Volume 41, Issue 6, November 2010, pp. 759-767.
- [18] Hwang, W.R.; Advani S.G.: Numerical simulations of Stokes Brinkman equations for permeability prediction of dual scale fibrous porous media. *Physics of Fluids* 22, 2010.
- [19] Schell, J. S. U., et al.: Numerical prediction and experimental characterisation of meso-scale-voids in liquid composite moulding. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 38(12), 2007, pp. 2460–2470.
- [20] Verleye, B., et al.: Permeability of textile reinforcements: Simulation, influence of shear and validation. *Composites Science and Technology* 68 (2008) pp. 2804-2810.

- [21] Verleye, B., et al.: Permeability prediction for the meso-macro coupling in the simulation of the impregnation stage of Resin Transfer Moulding. *Composites Part A* 41(1), 2010, pp. 29-35.
- [22] Endruweit, A.; Long, A. C.: Analytical Permeability Modelling for 3D Woven Reinforcements. *Proceedings of 17<sup>th</sup> International Conference on Composite Materials (ICCM-17)*, Edinburgh, 2009.
- [23] Cherif, Ch.; Hoffmann, G.: Ondulationsfreie Verstärkungsgewebe aus groben Hochleistungsgarnen mit einstellbarer Strukturdichte für Verbundwerkstoffe (17493 BR). Dresden: TU Dresden, Maschinenwesen, Abschlussbericht, 2014.
- [24] Arbter, R.; Beraud, J.M., et.al.: Experimental determination of the permeability of textiles: A benchmark exercise. *Composites Part A* 42, 2011, pp. 1157-1168.
- [25] Vernet, N. et al.: Experimental determination of the permeability of engineering textiles: Benchmark II. *Composites Part A* 61, 2014, pp. 172-184.
- [26] Zeng, X.; Brown, L.P.; Endruweit, A.: Geometrical modelling of 3D woven reinforcements for polymer composites: Prediction of fabric permeability and composite mechanical properties. *Composites Part A* 56, 2014, 150-160.
- [27] Gourichon, B.; Deleglise, M.; et.al.: Dynamic void content prediction during radial injection in liquid composite molding, *Composites: Part A* 39 (2008), S. 46–55.
- [28] Leclerc, J.S., Ruiz, E.: Porosity reduction using optimized flow velocity in Resin Transfer Molding, *Composites: Part A* 39 (2008) pp. 1859–1868.
- [29] Munagavalasa, M.S.; Pillai, K.M.: A Deviation from Darcy's Law due to Unsaturated Flow in Dual Scale Porous Media. *Journal of Porous Media* 12, 2009, pp. 327-344.
- [30] Tan, H.; Pillai, K.M.: Fast liquid composite molding simulation of unsaturated flow in dual-scale fiber mats using the imbibition characteristics of a fabric-based unit cell. *Polymer Composites* 31, 2010, pp. 1790-1807.
- [31] Zhou, F.; Alms, J.; Advani, S.G.: A closed form solution for flow in dual scale fibrous porous media under constant injection pressure conditions. *Composites Science and Technology* 68, 2008, pp. 699-708.
- [32] Simacek, P.; Neacsu, V.; Advani, S.G.: A phenomenological model for fiber tow saturation of dual-scale fabrics in liquid composite molding. *Polymer Composites* 31, 2010, pp. 1881-1889.
- [33] Jeffrey M. L., et al.: Modeling the impact of capillary pressure and air entrapment on fiber tow saturation during resin infusion in LCM, *Composites: Part A* 40 (2009) pp. 1053–1064.
- [34] Naik, N.K.; Sirisha, M.; Inani, A.: Permeability characterization of polymer matrix composites by RTM/VARTM. *Progress in Aerospace Sciences* 65, 2014, pp. 22-40.
- [35] EMS-Chemie AG: GRILON Fusible Bonding Yarn. Domat/Ems, (8.8.2014), EMS-GRIL-TECH - Firmenschrift.

- [36] Döbrich O., et al.: Decoupling the bending behavior and the membrane properties of finite shell elements for a correct description of the mechanical behavior of textiles with a laminate formulation. *Journal of Industrial Textiles*, 44(1), (2014) pp. 70-84.
- [37] Josch, L.E.: Langzeitverhalten von glasfaserverstärkten Kunststoffbauteilen am Beispiel von Losflanschen. Clausthal-Zellerfeld: Papierflieger, 2010. - Dissertation, TU Clausthal, 2010.
- [38] Schell, J. S. U., Siegrist, M., Ermanni, P.: Experimental Determination of the Transversal and Longitudinal Fibre Bundle Permeability. *Applied Composite Materials*, 14(2), (2007) 117–128.
- [39] Wu, W.; Abliz, D.; Jiang, B.Y.: A novel process for cost effective manufacturing of fiber metal laminate with textile reinforced pCBT composites and aluminium alloy. *Composites Structures* 108, 2014, pp. 172-180.
- [40] Abliz, D.; Duan, Y.G.: Curing Methods for Advanced Polymer Composites – A Review. *Polymers & Polymer Composites* 21, 2013, pp. 341-348.
- [41] El-Sabbagh, A.; Steuernagel, L.: Improving the impact strength of natural fibre thermoplastic composites. *Journal of Biobased Materials and Bioenergy* 6, 2012, pp. 346-354.
- [42] Li, S.; Warrior, N.; Zou, Z.: A unit cell for FE analysis of materials with the microstructure of a staggered pattern. *Composites Part A* 42(7), pp. 801-811, 2011.
- [43] Aranda, S.; Berg, D.C.; Dickert, M.: Influence of shear on the permeability tensor and compaction behaviour of a non-crimp fabric. *Composites Part B* 65, 2014, pp. 158-163.
- [44] Dickert, M., et al.: RTM-Technologien zur Fertigung von hochsteifen textilverstärkten Topologiestrukturen in Hybridbauweise. Vortrag, Hofer Vliesstofftage, Frankfurt a. M., 2011.
- [45] Aranda, S.: Modelling of the compaction behaviour of complex laminates during the VAP/MVI Process, Airbus PhD Day 2010, Airbus Operations GmbH, Hamburg, 2010.
- [46] Klunker, F., et al.: Permeability measurement of flow enhancement layers by an indirect measurement technique using flow simulation. In: *Proceedings. 29<sup>th</sup> Int. SAMPE Europe Conf.*, 2008.
- [47] Klunker, F.: Aspekte zur Modellierung und Simulation des Vacuum Assisted Resin Infusion. Dissertation, TU Clausthal, 2008.
- [48] Younes, A.; Seidel, A.; Rittner, S.; Cherif, Ch.; Thyroff, R.: Innovative textile Bewehrungen für hochbelastbare Betonbauteile. *Beton- und Stahlbetonbau Spezial* (2015)1, DOI: 10.1002/best.201400101, S. 16-21.
- [49] Schulz, Chr.: Entwicklung einer Technologie für die Herstellung textiler Halbzeuge für thermoplastische Verbundwerkstoffe auf Basis der Mehrlagenflachstricktechnik. Dresden, TU Dresden, Fak. Maschinenwesen, Dissertation, 2013.
- [50] Sennewald, C.; Kaina, S.; Weck, D.; Gruhl, A.; Thieme, M.; Hoffmann, G.; Stephani, G.; Böhm, R.; Cherif, Ch.; Andersen, O.; Kieback, B.; Hufenbach, W.: Metal sandwiches and metal-matrix-composites based on 3D woven wire structures for hybrid lightweight

- construction. *Advanced Engineering Materials (AEM)* 16 (2014)10, DOI: 10.1002/adem.201400180, S. 1234–1242.
- [51] Haupt, M.; Sachse, C.; Diestel, O.; Cherif, Ch.: 3D-spacer fabrics for damping applications in personnel protective equipment (PPE). *Techtextil Symposium 2015*, Frankfurt/Main, 2015.
- [52] Hufnagl, E.; Waldmann, M.; Hund, H., Krzywinski, F.; Cherif, Ch.: Schöne neue Welten mit textilem Membranbau - Krafftflussgerechte Textilien für Membranen auf Basis der Multiaxial-Kettenwirktechnik. *Kettenwirkpraxis* 48(2014)1, S. 20-22
- [53] Häntzsche, E.; Müller, R.; Ruder, T.; Nocke, A.; Cherif, Ch.: Integrative manufacturing of textile-based sensors for spatially-resolved structural health monitoring tasks of large-scaled composite components. *Material Science Forum* 825-826 (2015), DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.825-826.571, pp. 571-578
- [54] Käßler, I.; Hund, R.-D.; Cherif, Ch.: Surface modification of carbon fibres using plasma technique. *Autex Research Journal* 14(2014)1, pp. 34-38.
- [55] Shayed, M. A., et al.: Improvement of thermo-mechanical properties of basalt fiber using heat resistant polymeric coatings. *Fibers and Polymers* 15(2014)10, pp. 2086-2094.
- [56] Cherif, Ch.: Technologies for production of multi-functional and multi-material textile reinforcements for lightweight structures – requirements and trends. Vortrag / ICS - Innovative Composites Summit, Atlanta (USA), 2014
- [57] Staiger, E.; Diestel, O.; Cherif, Ch.; Bräunling, S.; Hardtmann, A.: Multi-material components based on hybrid-yarn textile and sheet metal. *Techtextil Symposium 2015*, Frankfurt/Main, 2015
- [58] Lin, H.; Krzywinski, S.: 3D multilayer knitted preforms for composite applications with load adapted thread orientation. 14<sup>th</sup> AUTEX World Textile Conference, Bursa, 2014.
- Beschreibung [59] Trümper, W.: Entwicklung einer unikalen Technologie für das direkte 2D- und 3D-Preforming von Mehrlagengestricken. Dresden, TU Dresden, Fak. Maschinenwesen, Dissertation, 2015.
- [60] Sankaran, V.; Ruder, T.; Rittner, S.; Hufnagl, E. und Cherif, Ch.: A multiaxial warp knitting based yarn path manipulation technology for the production of bionic-inspired multifunctional textile reinforcements in lightweight composites. In: *Journal of Industrial Textiles* 2014; online publiziert 20. Oktober, 2014
- [61] Younes, A; Seidel, A; Rittner, S.; Cherif, C.; Thyroff, R.: Innovative textile Bewehrungen für hochbelastbare Betonbauteile. In: *Beton und Stahlbetonbau Spezial*; Ausgabe A1740 "Verstärken mit Textilbeton", Januar 2015, Seite 16-21
- [62] Matthäi, P.; Döbrich, O.; Cherif, Ch.: Development of a novel technology for new generation of non-crimp fabrics – manufacturing and simulation. *Advanced Materials Research* (2014)936, pp. 1821-1824

- [63] Mountasir A., Hoffmann G., Cherif Ch., Löser M., Großmann K.: Static behaviour of three-dimensional composite based on multi-layered woven spacer preforms, 15th World Textile Conference AUTEX, Bucharest, Romania, 2015
- [64] Hufnagl, E.; Waldmann, M.; Engler, T.; Cherif, Ch.: Spreizen von Carbonfaser-Heavy Tows und deren Weiterverarbeitung. Technische Textilien 55(2012)5, S. 196-198