

IVW - Schriftenreihe Band 140

Institut für Verbundwerkstoffe GmbH - Kaiserslautern

Oliver Rimmel

**Grundlagen der Imprägnierung von
Dry Fiber Placement Preforms**

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <<http://dnb.ddb.de>> abrufbar.

Bibliographic information published by Die Deutsche Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data is available in the Internet at <<http://dnb.ddb.de>>.

Herausgeber: Institut für Verbundwerkstoffe GmbH
Prof. Dr.-Ing. Ulf Breuer
Erwin-Schrödinger-Straße
TU Kaiserslautern, Gebäude 58
67663 Kaiserslautern
<http://www.ivw.uni-kl.de>

Verlag: Institut für Verbundwerkstoffe GmbH

Druck: pri-me Printservice & Medienservice
Barbarossastr. 1
67655 Kaiserslautern
D-386

© Institut für Verbundwerkstoffe GmbH, Kaiserslautern 2020

Alle Rechte vorbehalten, auch das des auszugsweisen Nachdrucks, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe (Photographie, Mikroskopie), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und das der Übersetzung.

Als Manuskript gedruckt. Printed in Germany.
ISSN 1615-021X
ISBN 978-3-944440-37-8

Grundlagen der Imprägnierung von Dry Fiber Placement Preforms

Vom Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik
der Technischen Universität Kaiserslautern
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing. Oliver Rimmel

aus Homburg/Saar

Tag der mündlichen Prüfung:	06. April 2020
Prüfungsvorsitzender:	Prof. Dr.-Ing. Paul Ludwig Geiß
1. Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Peter Mitschang
2. Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Peter Middendorf

D386

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand in den Jahren 2015 bis 2019 während meiner Beschäftigung an der Institut für Verbundwerkstoffe GmbH (IVW) in Kaiserslautern.

Mein herzlicher Dank gilt meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Peter Mitschang für die Betreuung dieser Arbeit. Weiterer Dank gilt Prof. Dr.-Ing. Peter Middendorf für die Zweitbegutachtung meiner Arbeit sowie Prof. Dr.-Ing. Paul Ludwig Geiß für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes und allen dreien dafür, dass in diesen außergewöhnlichen Zeiten meine Prüfung stattfinden konnte.

Ein besonderer Dank geht an Dr.-Ing. David May, der mich als Vorgesetzter und Freund gefördert und gefordert hat, durch viele fachliche Diskussionen meinen Horizont erweitert hat und durch die Freiheit zur Entwicklung meiner persönlichen Arbeitsweise ganz besonders zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat.

Ich bedanke mich herzlich bei allen Mitarbeiter_innen der IVW GmbH für die gute und kollegiale Zusammenarbeit, die es immer zu einer Freude gemacht hat, auf die Arbeit zu gehen.

Den guten Austausch unter den Mitarbeiter_innen der Abteilung, den Zusammenhalt und die viele geteilte Freude werde ich in guter Erinnerung behalten.

Speziell erwähnen möchte ich Martina Hümbert und Jens Mack, denen ich dafür danke, dass sie mich in Richtung der Verbundwerkstoffe begeistert haben und mich ermuntert haben, als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut anzufangen. Matthias Domm hat als mein erster Bürokollege dafür gesorgt, dass ich mich sofort willkommen fühlte, mich sehr gut eingearbeitet und war vor allem über all die Jahre ein guter Freund. Das gleiche gilt für Stephan Becker, der es auf seine unvergleichliche Art immer verstanden hat, meine Stimmung wieder aufzuhellen. Christian Goergen war nicht nur, aber besonders im letzten Jahr als Bürokollege während der „heißen Phase“ sowohl auf der Arbeit als Diskussionspartner als auch privat eine große Bereicherung. Julian Weber hat als treuer Freund im letzten Jahr mit vielen gemeinsamen Gesprächen und Unternehmungen sowie Ablenkung vom noch ausstehenden Arbeitsberg die Fertigstellung dieser Arbeit für mich sehr leicht gemacht.

Danke an Tim Schmidt, der unermüdlich mit mir über Simulationen in GeoDict diskutiert hat, immer hervorragende Ideen beigesteuert hat und durch seine Integrität und Loyalität ein starker Kollege in der Doktorandenvertretung war.

Natürlich gilt mein Dank ebenso Benedikt Bergmann, Steven Brogdon, Volker Disandt, Holger Franz, Florian Gortner, Timo Grieser, Andrea Hauck, Andreas Krämer, Florian Kühn, Alexander Nuhn, Jan Eric Semar, Stefan Weidmann und Björn Willenbacher.

Ich bedanke mich bei den Student_innen, die mich bei den anfallenden Arbeiten tatkräftig unterstützt haben. Zum Gelingen dieser Arbeit haben darüber hinaus einige der von mir betreuten Student_innen besonders beigetragen, mein Dank gebührt daher Jens Felten, Lea Göbel, Tobias Knuth, Andreas Krämer, Christina Ruschel, Salome Wolf und vor allem Sascha Mostofi, der mit seiner Arbeit einen wichtigen Beitrag für den experimentellen Teil dieser Arbeit geleistet hat.

Ganz besonders bedanken möchte ich mich bei meiner Familie, die mich immer ermutigt hat neue Ziele anzugehen, und mich dabei nach Kräften unterstützt hat.

Kaiserslautern, im April 2020

Oliver Rimmel

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis verwendeter Abkürzungen	IV
Verzeichnis verwendeter Formelzeichen	V
Kurzfassung	VI
Abstract	VII
1 Einleitung und Zielsetzung	1
1.1 Herausforderndes Imprägnierverhalten von DFP-Preforms	3
1.2 Aufbau und Zielsetzung der Arbeit	5
2 Stand der Technik	7
2.1 Einleitung	7
2.2 Dry Fiber Placement im Kontext der Prozesskette im Flüssigimprägnierverfahren	9
2.2.1 Einleitung Preform-LCM	9
2.2.2 Direkte Preform-Herstellung mittels Dry Fiber Placement	11
2.2.3 Herleitung einer Definition für das Dry Fiber Placement-Verfahren	14
2.3 Theoretischer Hintergrund für die analytische und simulative Modellierung der Permeabilität	15
2.3.1 Modellierung der Mikroebene	18
2.3.2 Modellierung der Mesoebene	20
2.3.3 Modellierung der Makroebene	23
2.4 Einflüsse der Preformstruktur auf die Permeabilität	23
2.4.1 Einfluss der textilen Parameter bei Geweben	23
2.4.2 Einfluss der textilen Parameter bei Gelegen	24
2.4.3 Detaillierter Einfluss von Vernähungen	25
2.4.4 Einfluss des Bindermaterials	27
2.4.5 Zusammenfassung Einflüsse der Textilstruktur	27
2.4.6 Vergleich der Struktur von Dry Fiber Placement Preforms verglichen mit Preforms aus textilen Halbzeugen	28
2.5 Permeabilität von Dry Fiber Placement Preforms	29
2.6 Einflüsse der Preformstruktur auf mechanische Eigenschaften	31
2.7 Faserwelligkeit: Einfluss auf Preformpermeabilität und Charakterisierung	32
2.7.1 2D-Verfahren	34
2.7.2 3D-Verfahren	35
2.8 Schlussfolgerungen und Ableitung der durchzuführenden Arbeiten	36

3 Experimentelle Betrachtung der strukturellen Einflüsse von DFP-Preforms auf die Dickenpermeabilität	39
3.1 Materialien	39
3.2 Methoden	41
3.2.1 Herstellung der Preforms	41
3.2.2 Permeabilitätsmessung	44
3.3 Voruntersuchung zum Einfluss der Preformstruktur auf die Dickenpermeabilität	46
3.3.1 Ansatz	46
3.3.2 Versuchsplan	47
3.3.3 Ergebnisse	47
3.4 Einfluss der Vernähung auf das Kompaktierungsverhalten	56
3.4.1 Vorgehen der Kompaktierungsprüfung	56
3.4.2 Ergebnisse der Kompaktierungsprüfung	57
3.5 Detaillierte Untersuchung des Einflusses der Vernähung auf die Dickenpermeabilität	59
3.5.1 Versuchsplan	60
3.5.2 Ergebnisse	64
3.5.3 Einfluss des Faserdurchmessers und den Einfluss des entfernten / nicht entfernten Unterfadens auf die Dickenpermeabilität	71
3.6 Einfluss der Vernähung auf die mechanischen Eigenschaften	75
3.6.1 Vorgehen	75
3.6.2 Ergebnisse mechanische Prüfung	76
4 Simulative Betrachtung der strukturellen Einflüsse von DFP-Preforms auf die Dickenpermeabilität	80
4.1 Mikromodellierung	80
4.1.1 Generierung von Faserstrukturen	80
4.1.2 Lösen des mathematischen Problems	81
4.1.3 Festlegung von Randbedingungen	82
4.1.4 Betrachtung der statistischen Verteilung von Permeabilitäten von zufällig generierten Einheitszellen	85
4.1.5 Betrachtung der benötigten Voxelauflösung für die exakte Berechnung der Mikropermeabilität	86
4.1.6 Bestimmung der benötigten Einheitszellengröße zur exakten Berechnung der Mikropermeabilität	87
4.1.7 Vergleich simulativ und experimentell ermittelter Permeabilitäts-kennwerte	91

4.1.8 Erweiterung auf eine dreidimensionale Betrachtung der Faserstruktur	94
4.2 Mesomodellierung	102
4.2.1 Rovingquerschnittsform	102
4.2.2 Ablagesequenz der Rovings („Makro-Gewebe“)	104
4.2.3 Vernähung	105
4.3 Zusammenfassung Modellbildung	107
5 Ableiten von Gestaltungsempfehlungen und Möglichkeiten zur Abschätzung des Imprägnierverhaltens	110
5.1 Optimierung durch Materialauswahl	110
5.1.1 Auswahl des Rovings	110
5.1.2 Auswahl des Bindermaterials	110
5.1.3 Auswahl eines Bindertapes	111
5.2 Optimierung durch Prozessparameter bei der Ablage	112
5.3 Optimierung durch Hinzufügen eines weiteren Verarbeitungsschrittes	113
6 Zusammenfassung	115
7 Literaturverzeichnis	117

Verzeichnis verwendeter Abkürzungen

Kurzform	Beschreibung
μCT	Mikro-Computertomograph
AFP	Automated Fiber Placement
ARTM	Advanced RTM
CCD	Charge Coupled Device
CF	Kohlenstofffaser
CFD	Computational Fluid Dynamics
CRTM	Compression RTM
DFP	Dry Fiber Placement
FE	Finite Elemente
FKV	Faser-Kunststoff-Verbund
FVG	Faservolumengehalt
GF	Glasfaser
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
LCM	Liquid Composite Moulding
REM	Rasterelektronenmikroskop
RöMi	Röntgenmikroskop
RTM	Resin Transfer Moulding
RVE	Repräsentatives Volumenelement
UD	Unidirektional
XPS	Expandiertes Polystyrol

Verzeichnis verwendeter Formelzeichen

Lateinische Zeichen	Einheit	Beschreibung
A	m ²	Querschnitt
C		Konstante
C ₀		Materialabhängige Konstante
C ₁		Konstante
d ₁		Stichdichte
d _p	m	Partikeldurchmesser
K	m ²	Permeabilität
K ₁	m ²	Höchste Permeabilität in Ebenenrichtung
K ₂	m ²	Niedrigste Permeabilität in Ebenenrichtung
K ₃	m ²	Dickenpermeabilität
K _⊥	m ²	Permeabilität senkrecht zur Faser
q	m ³ /s	Volumenstrom
r _f	m	Faserradius
V _f	1	Faservolumenanteil
V _{fmax}	1	Maximaler Faservolumenanteil
ΔL	m	Fließlänge
Δp	Pa	Druckunterschied
Δx	m	Fließlänge
Griechische Zeichen	Einheit	Beschreibung
α	m	Amplitude
ε	1	Porosität
η	Pa*s	Viskosität
λ	m	Wellenlänge
τ	1	Turtuosität

Kurzfassung

Flüssigimprägnierverfahren erlauben die effiziente Herstellung von Faser-Kunststoff-Verbund-Bauteilen in hohen Stückzahlen. Das Dry Fiber Placement ist ein Verfahren, um hierzu bei geringen Verschnitttraten textile Vorformlinge (Preforms) herzustellen, die eine optimale Faserausrichtung und –platzierung ermöglichen. Hinsichtlich der Imprägniereigenschaften sind die so hergestellten Preforms jedoch herausfordernd, da sie im Vergleich zu konventionell verwendeten Textilien (Gewebe oder Gelege) über eine wesentlich geringere Permeabilität verfügen. Daher wurde im Rahmen dieser Arbeit das Imprägnierverhalten dieser Preforms grundlegend experimentell und simulativ untersucht. Hierbei wurden Strukturvariationen auf Mikroebene (zwischen einzelnen Fasern) und auf Mesoebene (zwischen Fasersträngen) betrachtet. Aus den gewonnenen Erkenntnissen wurden Gestaltungsempfehlungen abgeleitet, die zukünftig eine Optimierung der Preforms hinsichtlich ihrer Imprägniereigenschaften ermöglichen.

Abstract

Liquid composite moulding processes allow the efficient production of fiber reinforced polymer composite components in larger batch production. Dry Fiber Placement is a process used to produce textile preforms at low scrap rates allowing optimum fiber alignment and positioning. Yet, their impregnation properties are challenging compared to conventional textile materials as their permeability is significantly lower. Hence, this work deals with fundamental examination of their impregnation behaviour using experimental and simulative approaches. For this purpose, structural variations on micro scale (in between single fibers) and on meso scale (in between fiber strands) are considered. Using the gained knowledge, design recommendations have been developed to enable optimization of preforms regarding their impregnation behaviour.

1 Einleitung und Zielsetzung

Die Verwendung von Faser-Kunststoff-Verbunden (FKV) ermöglicht durch hohe spezifische (gewichtsbezogene) Steifigkeiten und Festigkeiten Gewichtseinsparungen im Vergleich zu metallischen Bauteilen. Dies geht jedoch üblicherweise mit deutlich höheren Bauteilkosten einher. Um die industrielle Anwendung von FKV zu erhöhen, ist es daher maßgeblich die Kosten zu reduzieren. Ein wichtiger Ansatzpunkt ist hierbei die Reduktion der Herstellungskosten, da in der Reduktion der Kosten der verwendeten Fasern und Matrix nur ein geringes Potential gesehen wird [1]. Für die Produktion von Hochleistungsbauteilen in größeren Stückzahlen erfahren Flüssigimprägnierverfahren (LCM von engl. Liquid Composite Moulding) wie das Resin Transfer Moulding (RTM) unter anderem wegen des Automatisierungspotentials eine zunehmende Verbreitung. In der RTM-Prozesskette wird ein endkonturnaher trockener Vorformling (Preform) hergestellt, in dem die Fasern hinsichtlich Position und Orientierung im Prinzip so vorliegen, wie sie auch im finalen Bauteil vorliegen sollen. Anschließend wird die Preform mit einem Harzsystem getränkt. Derzeit werden diese Preforms meist unter Verwendung von konventionellen textilen Halbzeugen wie Geweben oder Gelegen hergestellt. Die Notwendigkeit, aus diesen flächigen Halbzeugen Zuschnitte herzustellen, führt zu Produktionsabfällen von bis zu 50 % [2–5]. Darüber hinaus ist eine absolut lastgerechte Ausrichtung der Fasern im Bauteil schwierig zu erreichen. Eine Möglichkeit, diese Nachteile zu umgehen, ist die Verwendung von direkten Preformingtechnologien, bei denen die endkonturnahe Preform unter Verwendung von Rovings in einem einzelnen Prozessschritt aufgebaut wird. Ein vielversprechendes Beispiel ist das Dry Fiber Placement (DFP). Bei diesem Verfahren werden nicht vorimprägnierte Faserstränge (Rovings) entlang ihrer Hauptachse diskontinuierlich richtungs- und positionsvariabel abgelegt, um in LCM-Prozessen weiterverarbeitet zu werden. Um eine Anhaftung zwischen den Rovings und dem Werkzeug bzw. bereits abgelegten Fasern herzustellen, werden polymere Bindermaterialien verwendet, die thermoplastische oder duroplastische Kunststoffe sein können. Im Zuge des Ablageprozesses wird der Binder angeschmolzen und wieder solidifiziert, während die Fasern auf das Substrat gepresst werden, um sie zu einer Preform zu verbinden (Abbildung 1.1).

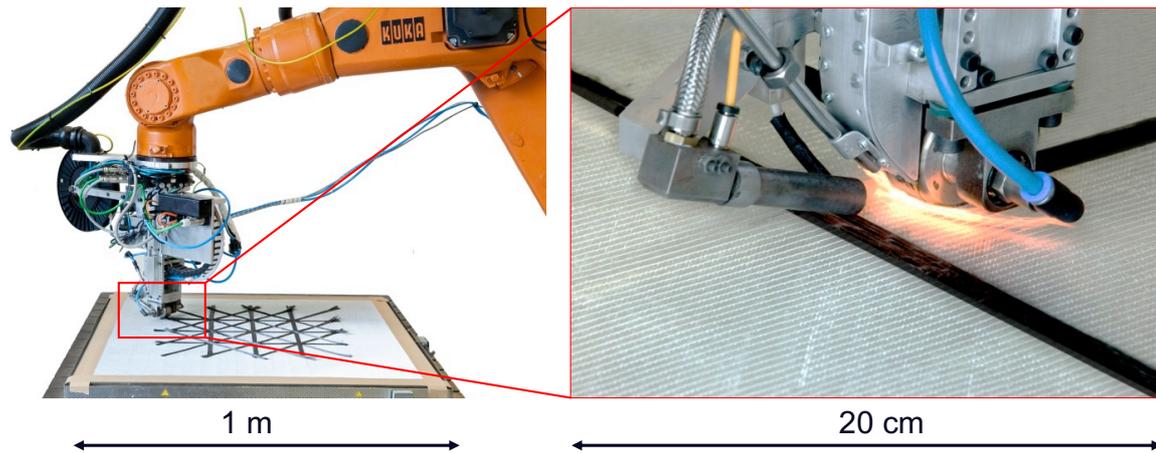


Abbildung 1.1: Ablage von Kohlenstofffaserrovings im DFP-Verfahren, links: Übersicht, rechts: Detail

Durch die Ablage einer Vielzahl von Bahnen und Lagen kann eine komplexe Preform mit angepasster Faserverteilung entsprechend der auf das spätere Bauteil wirkenden Lasten, hergestellt werden. Neben der quasi verschnittfreien Preformherstellung können weitere Materialeinsparungen dadurch erzielt werden, dass komplett neue Bauteildesigns durch die im Vergleich zu konventionellen Preformingtechnologien gewonnenen Freiheitsgrade geschaffen werden können. Beispielsweise können Lasteinleitungselemente, Kernmaterialien oder Funktionselemente direkt integriert werden. Durch parallele Ablage vieler Stränge können Produktionsraten von bis zu 250 kg/h erreicht werden [6], je nach Preformgeometrie und –größe werden aber auch deutlich geringere Raten von etwa 5 kg/h angegeben [7].

Als Beispiel sei die kommerzielle Luftfahrt angeführt. Diese ist ein sehr stark wachsender Markt. Gemäß Prognosen von Airbus [8] werden bis zum Jahr 2038 zur Deckung eines zu erwartenden Passagierzahlenwachstums von 4,3 % pro Jahr ca. 39.200 neue Flugzeuge mit einer Kapazität von mindestens 100 Passagierplätzen benötigt. Hiervon seien 14.200 als Ersatz für bestehende Flugzeuge am Ende ihrer Lebensdauer und 25.000 zur Bedienung der wachsenden Nachfrage. Die Sparte der „kleinen“ Flugzeuge, zu denen bspw. die Familien Airbus A220, A320 sowie Boeing 737 gehören, mache hierbei 76 % der Verkäufe aus.

Die am meisten verbreiteten Modelle Boeing 737 und Airbus A320 wurden erstmalig 1968 [9] bzw. 1987 [10] in Dienst gestellt. Aufgrund des Alters der Flugzeugmuster besitzen diese nur einen geringen Anteil von FKV am Strukturgewicht, zum Beispiel von ca. 10 % bei der A320 [11]. Der russische Flugzeugbauer Irkut zielt mit der Neu-

entwicklung MC-21 (Abbildung 1.2) auf diesen Markt der Kurz- bis Mittelstreckenflugzeuge (Single Aisle). Um Gewichtseinsparungen im Vergleich zu metallischen Komponenten mit geringen Kosten zu verbinden, soll das DFP-Verfahren zur Herstellung von Preforms für die Flügelschalen und –stringer angewandt werden [7, 12]. Erste Tests sowie der Erstflug im Jahr 2017 hierzu waren bereits erfolgreich [13], ein Auslieferungsbeginn in 2020 ist geplant.



Abbildung 1.2: Oben: Irkut MC-21 [14], Links unten: Ablage einer Flügelschale im DFP-Verfahren [12], Rechts unten: Fertiggestelltes Bauteil [12]

Insbesondere die Imprägnierung eines solch großen Bauteils (Länge der Einzeltragflächen ca. 16 m) erforderte hierbei ein besonderes Augenmerk [12].

Während die Materialeffizienz von DFP-Preforms sehr vorteilhaft ist, gibt es auch einen großen Nachteil im Vergleich zu klassischen textile Halbzeugen: das wesentlich schlechtere Imprägnierverhalten.

1.1 Herausforderndes Imprägnierverhalten von DFP-Preforms

Als Beispiel ist die Permeabilität, also die Durchlässigkeit der Struktur gegenüber des Fluids, bei einem Faservolumengehalt von 50 % im Bereich von $1 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$ bis $5 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$, also typischerweise 1-2 Größenordnungen unter der konventioneller Halbzeuge. Abbildung 1.3 zeigt beispielhaft die unterschiedliche Struktur von DFP-Preforms im Vergleich zu textilen Halbzeugen. Gewebe und Gelege besitzen durch die Verwebung bzw. Verwirrung bereits Fließkanäle auf der Mesoebene, die den

Harzfluss deutlich begünstigen können. Die DFP-Preform hat eine sehr homogene, dichte Faserstruktur, die diese Fließkanäle nicht beinhaltet.

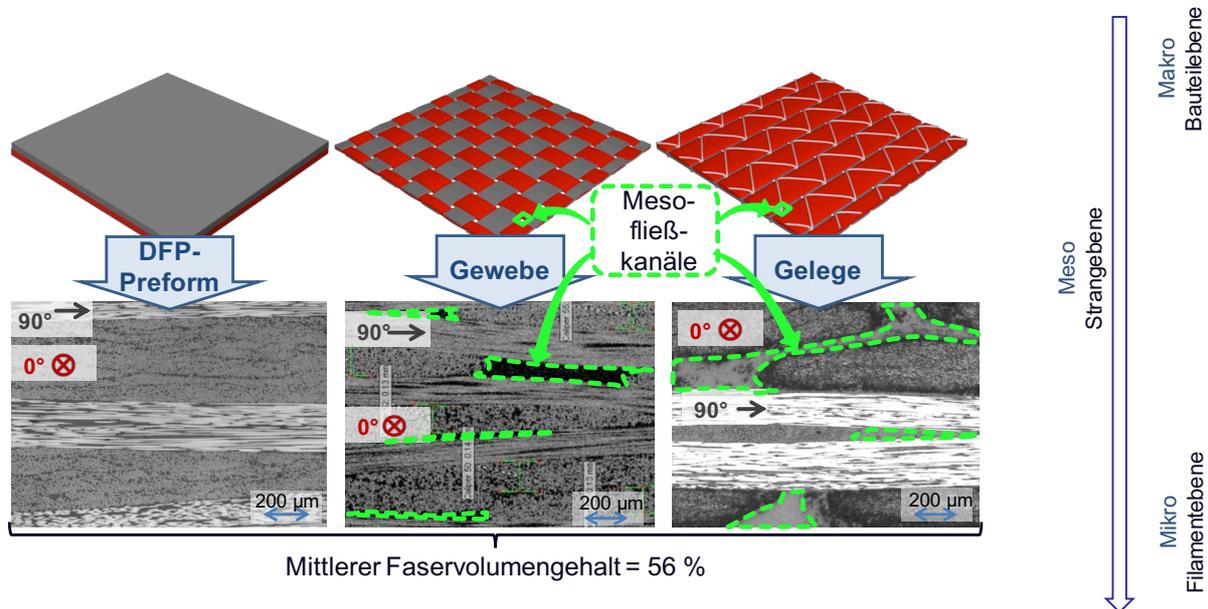


Abbildung 1.3: Unterschiedliche Struktur von DFP-Preforms im Vergleich zu textilen Halbzeugen

Als Konsequenz wird die Imprägnierungszeit (Zeit bis zur vollständigen Füllung der Kavität) in LCM-Prozessen wesentlich verlängert. Daher können DFP-Preforms nur mit Harzsystemen mit reduzierter Reaktivität imprägniert werden. Dies widerspricht der Forderung nach kürzeren Zykluszeiten und der Nutzung von schnellhärtenden Harzsystemen in industriellen Anwendungen mit großen Stückzahlen. Höhere Injektionsdrücke sind eine Möglichkeit, die Imprägnierzeit zu verkürzen, es werden bei Hochdruck-Compression RTM (CRTM)-Prozessen während des Schließens des Werkzeuges sehr hohe hydrodynamische Drücke erreicht. Dies kann allerdings zu einer hydrodynamischen Kompaktierung und somit zu einer weiteren Reduktion der Permeabilität führen [15]. Außerdem birgt dies die Gefahr einer permanenten Preformdeformation und es wird sehr aufwändige und teure Anlagentechnik benötigt.

Prozesse wie das CRTM führen die Imprägnierung in Dickenrichtung durch [16], der Hauptfließweg ist also im Vergleich zu gängigen Prozessen nicht über lange Wege in Ebenenrichtung, sondern in die meist eher geringe Bauteildicke. Durch das große Aspektverhältnis beispielsweise von KFZ-Bauteilen, die eine große Fläche aber eine

geringe Dicke besitzen, kann dieser Vorteil sehr effizient genutzt werden. Daher bietet das CRTM ein hohes Potential für DFP-Preforms. Trotzdem ist die Dickenpermeabilität zu niedrig, um ausreichende Prozesssicherheit in akzeptabler Zeit zu erreichen. Daher müssen Konzepte identifiziert werden, die die Möglichkeit zur Verbesserung der Dickenpermeabilität auf ein vergleichbares Niveau, wie das von konventionellen Textilien bieten.

Derzeit existieren keine systematischen Studien bezüglich des Imprägnierverhaltens von DFP-Preforms und der Möglichkeiten zur Beeinflussung, lediglich einzelne Aspekte werden aufgegriffen.

Gelingt es, die strukturellen Einflüsse auf verschiedenen Skalenebenen auf die Permeabilität der Preforms ausreichend zu verstehen, kann die Permeabilität von Dry Fiber Placement Preforms durch gezielte Strukturvariationen beeinflusst werden. Um dieses Verständnis herzustellen, können analytische, simulative und experimentelle Ansätze miteinander kombiniert werden, wie in Abbildung 1.4 verbildlicht.

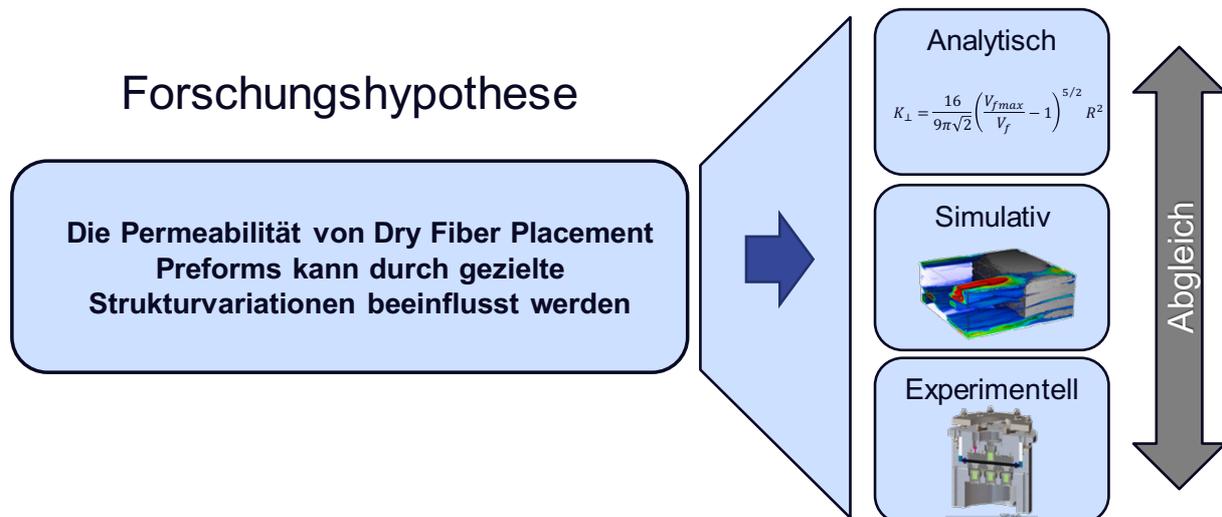


Abbildung 1.4: Forschungshypothese dieser Arbeit

1.2 Aufbau und Zielsetzung der Arbeit

Ziel der Arbeit ist es, das Imprägnierverhalten von DFP-Preforms umfassend zu erforschen, um dieses gezielt anhand der vorliegenden Struktur beschreiben und vorhersagen zu können. Die Anwendung des gewonnenen Wissens soll es ermöglichen, für zukünftige Prozess- und Bauteilentwicklungen gezielte Maßnahmen ergreifen zu können, um diese Preforms möglichst schnell und prozesssicher zu imprägnieren.

Der Aufbau der Arbeit ist in Abbildung 1.5 dargestellt und wird im Folgenden detailliert.

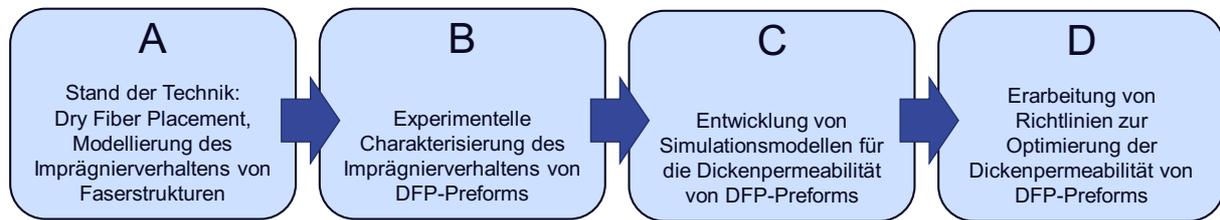


Abbildung 1.5: Aufbau der Arbeit

- A: Zu Beginn wird zum genauen Verständnis des Prozesses eine Einleitung in die Preform-LCM-Prozesskette gegeben, und das DFP-Verfahren als Verfahren zur Herstellung von Preforms eingeführt und definiert. Der Stand der Technik hinsichtlich der Modellierung des Imprägnierverhaltens von Faserstrukturen wird recherchiert, darauf aufbauend wird dargestellt, wie sich verschiedene textile Parameter und Prozessparameter auf die Permeabilität auswirken.
- B: Aufbauend auf den Ergebnissen aus dem Stand der Technik werden zunächst mögliche Strukturvariationen experimentell auf ihre Wirksamkeit zur Erhöhung der Dickenpermeabilität überprüft. Das wirksamste Konzept wird im nächsten Schritt detaillierter untersucht, um den Einfluss möglicher Prozessparameter auf dieses Verhalten zu verstehen. Im Rahmen von mechanischen Prüfungen wird darüber hinaus abgeklärt, inwiefern diese Optimierung der Permeabilität mit Änderungen der mechanischen Eigenschaften einhergeht.
- C: Basierend auf dem durch experimentelle Charakterisierung erarbeiteten Verständnis über den Einfluss der Preformstruktur auf die Permeabilität werden Simulationsmodelle zur numerischen Nachbildung entwickelt. Hierzu werden Richtlinien erarbeitet, wie ein solches Modell aufgebaut werden muss, um realistische Ergebnisse zu erzeugen. Mittels der Richtlinien werden experimentell durchgeführte Variationen nachgebildet, um die Modelle zu verifizieren.
- D: Mit dem Vorwissen aus experimenteller und simulativer Charakterisierung werden Richtlinien erarbeitet, die die gezielte Optimierung einer DFP-Preform hinsichtlich einer prozesstaughichen Dickenpermeabilität erlauben.

2 Stand der Technik

2.1 Einleitung

Faser-Kunststoff-Verbunde bezeichnet eine Gruppe von Materialien, die die positiven Eigenschaften zweier Eingangsmaterialien in einem Verbund positiv miteinander kombinieren. Durch bestimmte Kombinationen von Verstärkungsfasern mit einer polymeren Matrix können so Werkstoffe entstehen, die beispielsweise eine attraktive gewichtsbezogene spezifische Steifigkeit und Festigkeit und somit ein großes Leichtbaupotential besitzen. Generell können die Gründe zur Verwendung von Faser-Kunststoff-Verbunden in drei Hauptgruppen einsortiert werden, wie in Abbildung 2.1 dargestellt:

1. Produkte aus Faser-Kunststoff-Verbunden besitzen bei Konsumenten einen sehr guten Ruf, technisch anspruchsvoll zu sein, besonders im High-End-Bereich von Sportgeräten und Fahrzeugen herrscht daher eine große Bereitschaft, viel Geld auszugeben. Typische Produkte finden sich hierbei zum Beispiel im Fahrradbereich, wo Rahmen und Laufräder aus FKV höchste Leistungsfähigkeit versprechen.
2. Durch die geschickte Kombination von Faser- und Matrixmaterial sowie die werkstoffgerechte Auslegung eines Bauteils können im Vergleich zu klassischen Konstruktionswerkstoffen Gewichtseinsparungen erzielt werden. Insbesondere im Transportbereich, also bei Fahrzeugen und Flugzeugen aller Art, können durch Gewichtseinsparungen Treibstoff und somit Emissionen eingespart werden und darüber hinaus ggf. auch eine höhere Nutzlast erzielt werden. Im Bereich von Flugzeugen ist daher aufgrund des hohen Anteils von Kraftstoffkosten an den Kosten im Produktlebenszyklus eine große Investitionsbereitschaft festzustellen, die sich in einem seit Jahrzehnten steigenden Anteil von FKV in strukturellen Bauteilen zeigt.
3. In bestimmten Bereichen können die technisch bedingten Eigenschaften überhaupt nur mit FKV erreicht werden, da metallische Werkstoffe hierzu nicht in der Lage sind. Ein typisches Beispiel sind Rotorblätter in Windkraftanlagen, die eine enorme Bauteilgröße erreichen. Die geforderte Steifigkeit, zum Beispiel um eine Kollision des Rotorblattes mit dem Turm durch Durchbiegung

bei hohen Windlasten zu vermeiden, kann bei den Gewichtsrestriktionen nur mit FKV erreicht werden. Eine ähnliche Motivation ist bei der Herstellung von Segelflugzeugen anzutreffen. Mit klassischen Bauweisen (z. B. Holzbauweise) konnte die geforderte Oberflächengüte für ein Laminarprofil für Hochleistungs-segelflugzeuge nicht mehr erreicht werden, daher setzte die Akaflieg Stuttgart bei dem Muster fs-24 Phönix bereits 1957 glasfaserverstärkten Kunststoff für die Tragflächen ein [17]. Je nach technischer Anwendung ergibt sich eine Vielzahl an Anforderungen, die teils nur mit FKV erreicht werden können (bestimmte thermische Ausdehnungskoeffizienten, elektrische Isolierwirkung, Transparenz für elektromagnetische Strahlung, usw.).

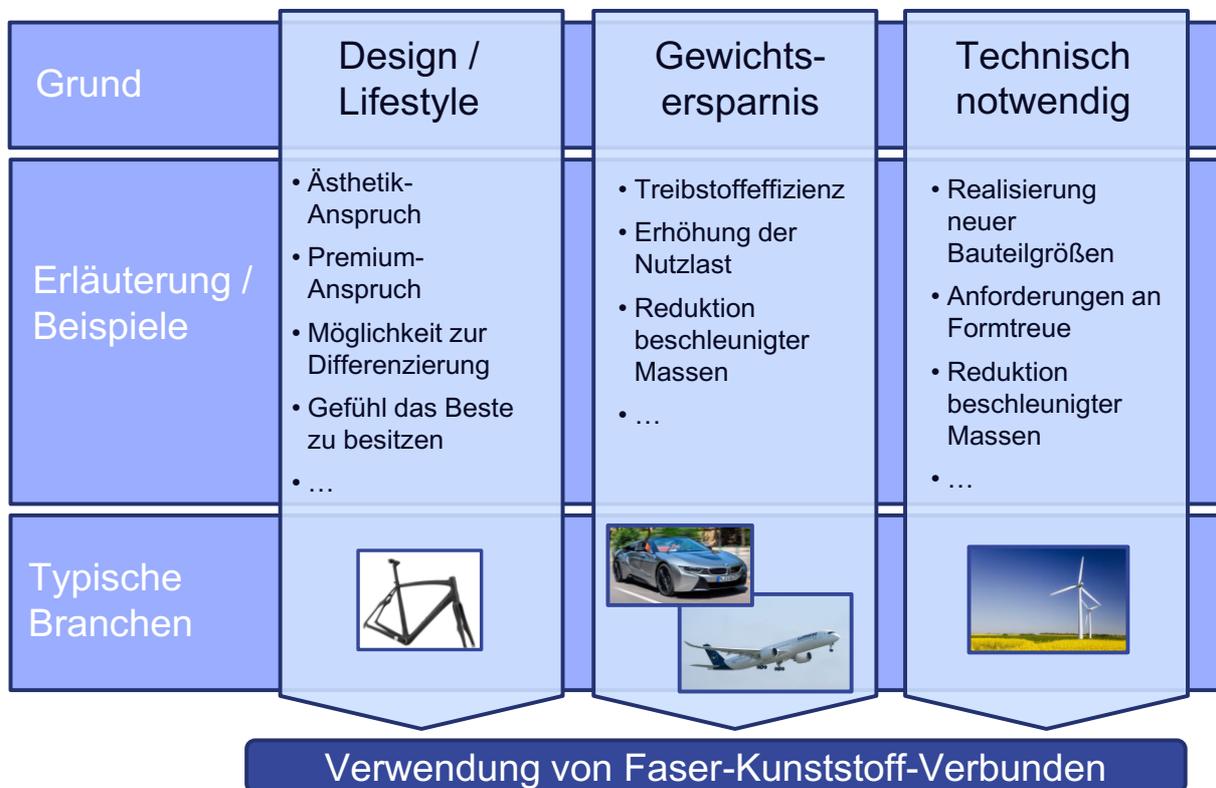


Abbildung 2.1: Gründe zur Verwendung von Faser-Kunststoff-Verbunden (teilweise nach [1])

Zur Herstellung von FKV existiert eine Vielzahl von Herstellungsprozessen, die sich nach Art des Matrixsystems (thermoplastisch oder duroplastisch), Art der Faserverstärkung (kurz-, lang- oder kontinuierlich verstärkt) und typischen Bauteilgeometrien (flach, rotationssymmetrisch, komplex, usw.) und den zu produzierenden Stückzahlen unterscheiden [18].

Insbesondere in Märkten, die von größeren Stückzahlen getrieben werden (z. B. Automobilindustrie mindestens 100.000 Stück pro Jahr), liegt ein Fokus auf der Reduktion von Zykluszeiten, um Kosten einzusparen. Eine Prozesskette, die sich besonders für die Produktion von Bauteilen in größeren Stückzahlen eignet, ist die Preform-LCM-Prozesskette, die im Folgenden beschrieben wird. Die Verwendung eines duroplastischen (also eines nicht nach der Aushärtung nochmals schmelzbaren) Matrixsystems bietet darüber hinaus im Vergleich zu schmelzbaren Thermoplasten Vorteile bei chemischen und thermischen Beständigkeit.

2.2 Dry Fiber Placement im Kontext der Prozesskette im Flüssigimprägnierverfahren

2.2.1 Einleitung Preform-LCM

Die Preform-LCM-Prozesskette besteht aus mehreren Schritten, die von den Verstärkungsfasern zum fertigen Bauteil führen (Abbildung 2.2). Diese wird hier kurz an einem Beispiel des indirekten Preformings mit flächigen Halbzeugen erläutert.

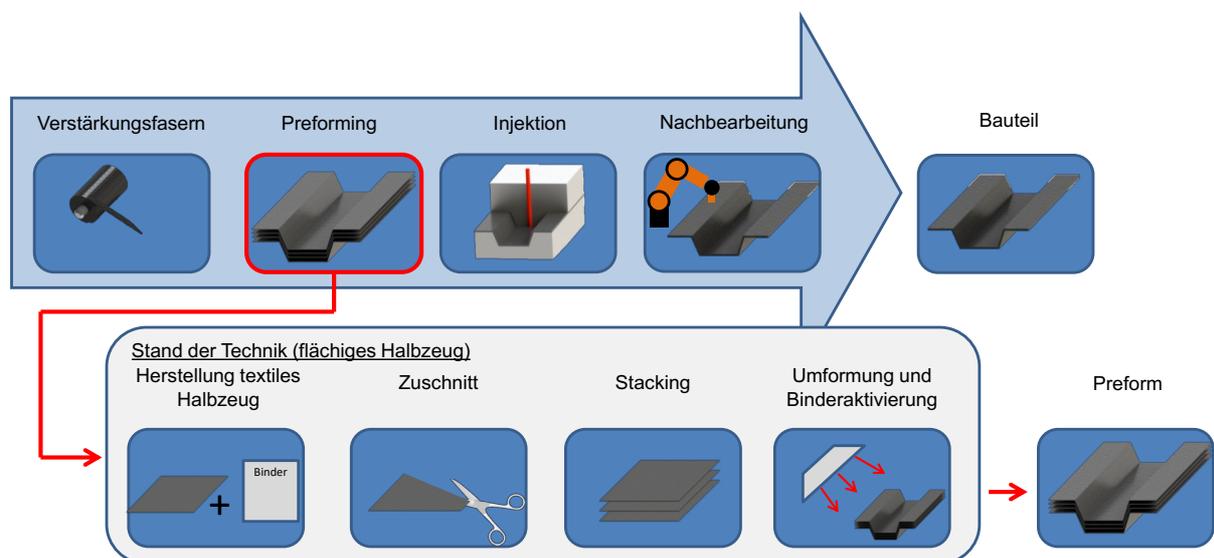


Abbildung 2.2: Preform-LCM-Prozesskette mit Preforming durch flächiges Halbzeug

Zunächst werden die Verstärkungsfasern, die in Form eines Rovings vorliegen, in einem textilen Prozess zu einem Halbzeug verarbeitet. Typische Halbzeuge sind hierbei Gewebematerialien sowie Gelegematerialien, die sich in ihrer textilen Architektur unterscheiden, jedoch beide flächige Halbzeuge sind. Sie enthalten die Endlosfasern in zwei oder mehr Hauptrichtungen. Basierend auf dem flächigen Halbzeug

wird dann ein Zuschnitt vorgenommen, um die benötigten Einzellagen der Verstärkungsstruktur zu erhalten. Diese werden dann entsprechend des angezielten Lagenaufbaus übereinandergelegt, ggf. erfolgt bei nicht ebenen Bauteilen eine Umformung und thermische Binderaktivierung. An diesem Punkt spricht man von einer Preform, also einem textilen Vorformling. Diese Preform kann auch Teil einer zusammengesetzten größeren Preform sein, dann spricht man von einer Sub-Preform.

Nach dem Preforming erfolgt die eigentliche Harzinjektion in einem LCM-Verfahren. Nach einer etwaigen Randbesäumung steht am Schluss der Prozesskette das fertige Bauteil.

Da zwischen dem ursprünglichen Eingangsmaterial, dem Roving, und der fertigen Preform noch diverse Prozessschritte stehen, spricht man beim dargestellten Preforming-Verfahren von einer indirekten oder sequentiellen Preform-Herstellung. Abbildung 2.3 zeigt zur Abgrenzung die unterschiedlichen Wege der direkten und sequentiellen Preformherstellung.

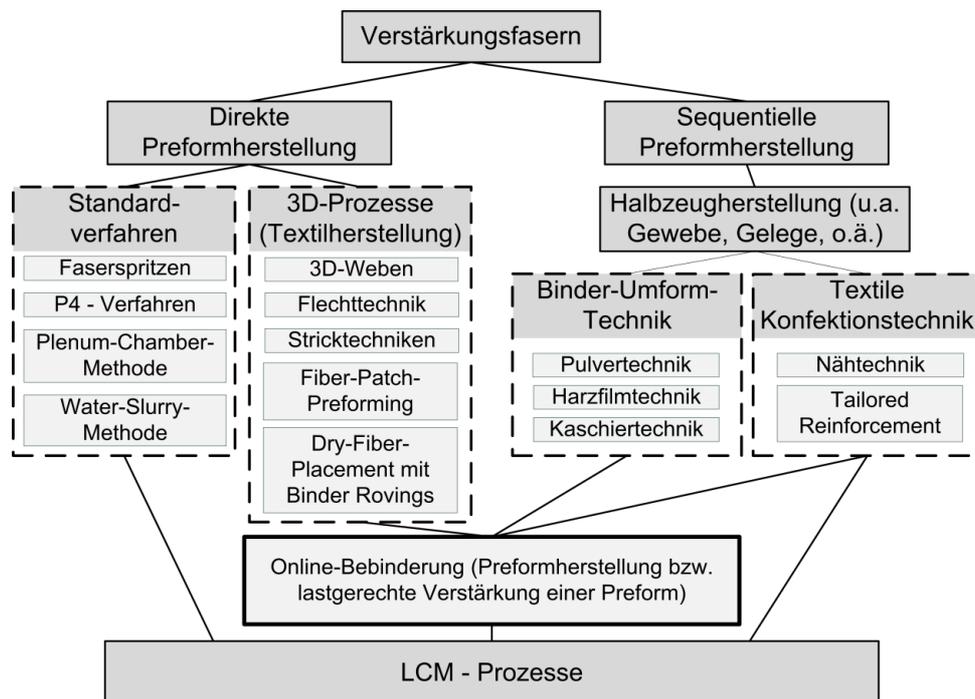


Abbildung 2.3: Preforming in der LCM-Prozesskette, direkte und sequentielle Verfahren ([15] nach [19])

2.2.2 Direkte Preform-Herstellung mittels Dry Fiber Placement

Abweichend von der sequentiellen Preform-Herstellung wie zuvor dargestellt, bietet die direkte Preform-Herstellung die Herstellung der Preform ohne Zwischenschritte [15, 18]. Diese kann jedoch auch zur Herstellung von Sub-Preforms für eine größere bzw. komplexere Preform verwendet werden.

Wenn aus flächigen Halbzeugen Zuschnitte herzustellen sind, führt dies zu einer sehr großen Materialausschussrate von bis zu 50 % [2–5]¹. Darüber hinaus ist eine absolut lastgerechte Ausrichtung der Fasern im Bauteil schwierig zu erreichen bzw. der Verschnittanteil nimmt zu. Eine Möglichkeit, diese Nachteile zu umgehen ist die Verwendung von direkten Preformingtechnologien wie dem Dry Fiber Placement (DFP). DFP erlaubt die direkte Herstellung von endkonturnahen Preforms unter Verwendung von Rovings in einem einzelnen Prozessschritt. Beim Dry Fiber Placement wird mittels automatisierter Ablegevorrichtungen, die beispielsweise durch einen Industrieroboter oder eine Portalanlage bewegt werden können, der Lagenaufbau hergestellt. Um eine Anhaftung der Rovings an der Werkzeugoberfläche bzw. an den zuvor abgelegten Lagen herzustellen, ist die Fixierung der Fasern auf der zu belegenden Fläche notwendig. Dies kann zum Beispiel durch Polymerbinder in Form eines Bindervlieses oder eines Binderpulvers erfolgen. Diese Bindermaterialien werden in aller Regel im Rahmen eines Halbzeugherstellungsschrittes auf das Rovingmaterial aufgebracht und ermöglichen die Verarbeitung unter Anwendung eines Konsolidierungsdruckes sowie einer Wärmeeinbringung zur Binderaktivierung. Die Wärmeeinbringung kann durch Heißluftgebläse [20], Infrarotstrahler oder auch Laser-Wärmequellen erfolgen [21]. Neben den zusätzlichen Kosten für den Halbzeugschritt bedingt die Nutzung eines vorbebinderten Halbzeugs allerdings auch eine geringe Flexibilität des Prozesses, da auf verfügbare Faser-/Binderkombinationen im vordefinierten Verhältnis zurückgegriffen werden muss. Dadurch wird die lokale Einstellung des Bindergehalts an kritischen Stellen (beispielsweise sehr kleine Biegeradien) verhindert. Zielführend ist es daher, im Ablegeprozess die Binderapplikation durch eine sogenannte Online-Bebinderung variabel zu gestalten. Dann kann ohne Einschrän-

¹ Abhängig von der Komplexität und Form der herzustellenden Preforms. Höhere Komplexität und Abweichung von ideal rechteckigen Zuschnitten bedingt üblicherweise steigende Materialausschussraten.

kung von einem direkten Preformingverfahren gesprochen werden, wie auch in Abbildung 2.4 dargestellt.

In der Literatur werden hier auch die Begriffe „Tow Placement“, „Fiber Placement“ oder „Dry-Fiber-Placement“ verwendet [22–28]. Eine verbreitete Einschränkung ist die Reduktion des Verfahrens auf die Ablage von vorbebinderten Tapes oder Rovings [20, 27]. Eine Bebinderung des Rovingmaterials direkt im Prozess, die ein echtes direktes Preforming ermöglicht, wurde durch Mack [15] am Institut für Verbundwerkstoffe entwickelt und ermöglicht die Verwendung einer freien Kombination von Faser- und Bindermaterial direkt im Ablageprozess unter Verwendung von kommerziell erhältlichen Standardmaterialien [29]. Im Vergleich zu fertigen Bindertapes entsteht so eine wesentlich höhere Flexibilität der verwendeten Materialien sowie eine Kostenersparnis.

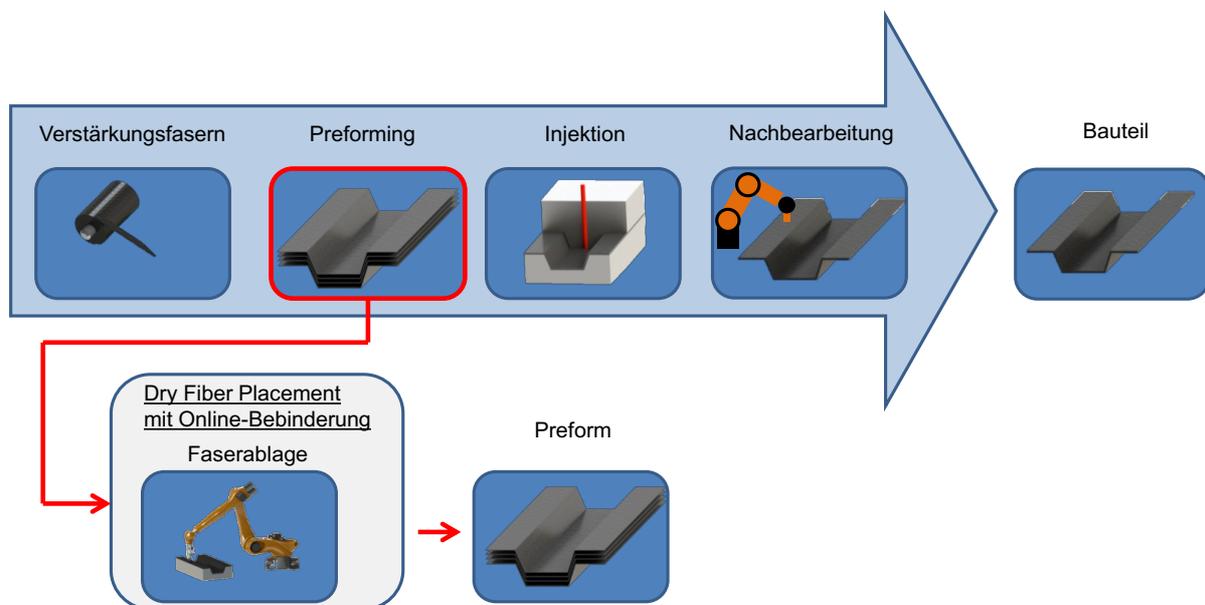


Abbildung 2.4: Preform-LCM-Prozesskette mit direktem Preforming durch Dry Fiber Placement

Das Bindermaterial kann sowohl thermoplastischer als auch duroplastischer Art sein. In erhältlichen Halbzeugen wird es pulver-, flüssig- oder gitterförmig aufgebracht [20, 30].

Neben dem direkten Preforming besteht auch die Möglichkeit, flächige Preforms, die aus textilen Halbzeugen hergestellt wurden, gezielt mittels Einzelrovings lastgerecht zu verstärken [20, 22]. Eine Kombination des DFP mit weiteren Preformingverfahren

wie dem Tailored-Fiber-Placement (Aufsticken eines Rovings auf ein Substrat zur Preformherstellung) ist ebenso denkbar.

Die gängigste Art und Weise zur technischen Umsetzung der Ablage ist die Nutzung eines Tapelegekopfes, wie er auch zur Ablage von vorimprägnierten Tapes verwendet wird (Abbildung 2.5). Ein Roving oder Halbzeug wird von einer Spule zur Ablagestelle geführt und von einer Konsolidierungsrolle auf die Ablagefläche gepresst. Eine Erwärmung dient je nach Prozessvariante zur Binderaktivierung (DFP), Aufschmelzen des Thermoplasts (Thermoplast-Tapelegen) oder Erhöhung des Tacks zur erhöhten Haftung (Duroplast-Tapelegen). Mittels einer Schneideinheit wird am Ende der Bahn getrennt. [15]

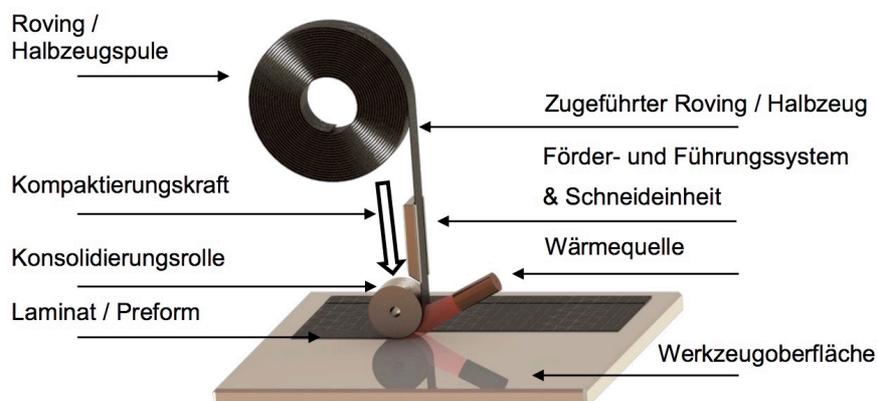


Abbildung 2.5: Komponenten des TLK [15]

Gängige industrielle Anwendungen der Legeverfahren sind im Bereich der mit einem Duroplast vorimprägnierten Halbzeuge zu finden [18] und werden oftmals als Automated-Fiber-Placement (AFP) oder Automated-Fiber-Laying bezeichnet [15]. Die Weiterverarbeitung erfordert hierbei aufgrund des vorimprägnierten Halbzeugs keinen Imprägnierungs- sondern nur noch einen Aushärtungsschritt, der im Autoklaven oder außerhalb im Vakuumaufbau durchgeführt werden kann.

Ein ähnliches Halbzeug, die hier kurz zur Abgrenzung dargestellt werden, sind thermoplastische Tapes, die vollständig mit einer vollständigen Matrix vorimprägniert sind [31]. Diese werden während des Legeprozesses entweder mittels Aufschmelzen aneinander „angeheftet“, wonach eine weitere Konsolidierung im Autoklaven oder eine Presse durchgeführt werden muss oder direkt in-situ zum fertigen Bauteil konsolidiert. Hierbei liegt die Herausforderung darin, eine vollständige Konsolidierung direkt im Ablageprozess herbeizuführen. Es muss also eine vollständige Aufschmelzung

des abzulegenden Tapes sowie ein ausreichendes Anschmelzen des darunterliegenden bereits abgelegten Tapes erfolgen und die Konsolidierung muss im schmelzflüssigen Zustand beider Fügepartner erfolgen. Das Aufschmelzen erfolgt üblicherweise mittels Laser [32] oder Heißgasdüse [33, 34]. Es existieren aber auch Ansätze zur Erwärmung über den Joule-Effekt unter Ausnutzung der elektrischen Leitfähigkeit der Kohlenstofffaser [35]. Unter Verwendung optimaler Prozessparameter entsteht direkt im Ablageprozess ein fertiges Bauteil mit geringem Porengehalt [34, 36, 37]. [15]

Im Dry Fiber Placement hingegen werden nicht vorimprägnierte Faserstränge verwendet, die lediglich durch ein Bindermaterial im Preforming zusammengefügt werden. Da weder ein Aufschmelzen (Thermoplast) noch Aufheizen zur Erhöhung der Klebrigkeit (Duroplast) einer Matrixmenge im Bereich von ca. 50 Vol.-% erfolgen muss, sondern nur das Bindermaterial thermisch aktiviert ist, liegt hier ein Potential zur schnelleren Ablage der Fasern. Auf jeden Fall muss aber in einem nachgelagerten Prozessschritt die Imprägnierung mit einem Matrixmaterial stattfinden.

2.2.3 Herleitung einer Definition für das Dry Fiber Placement-Verfahren

Das Dry Fiber Placement ist also ein eigenständiges Preformverfahren. In der Literatur findet man dieses und ähnliche Verfahren oftmals unter wechselnden Begrifflichkeiten, daher soll an dieser noch einmal eine deutliche Abgrenzung von anderen Verfahren und Definition erarbeitet werden.

Wie bereits zuvor dargelegt zeichnet sich das Dry Fiber Placement dadurch aus, dass nicht vorimprägniertes Fasermaterial in Form eines Stranges paralleler Einzel Fasern auf einer Fläche abgelegt wird, wie auch in diversen Quellen zu finden [12, 20, 30, 38–41]. Im Optimalfall besitzt das abgelegte Material einen Rechteckquerschnitt, womit sich bei der Ablage benachbarter Bahnen eine flächige Struktur ohne Lücken und Überlappung erreichen lässt. Weiterhin ist ein wichtiger Faktor zur Definition die lastgerechte Orientierung der Fasern [21, 39–41]. Im Gegensatz zum Fiber Patch Preforming, das sich durch das Anheften von bereits vor der Ablage hergestellten Abschnitten auszeichnet [42], erfolgt das Schneiden der Stränge während bzw. nach der Ablage und nicht davor [22, 43]. Die Ablage findet diskontinuierlich statt [41].

Zusammengefügt ergibt sich hiermit eine wie folgt lautende Definition des Verfahrens:

„Diskontinuierliche richtungs- und positionsvariable Ablage von nicht vorimprägnierten Fasersträngen entlang deren Hauptachse zur Weiterverarbeitung im Flüssigimprägnierverfahren“.

2.3 Theoretischer Hintergrund für die analytische und simulative Modellierung der Permeabilität

Bei der Auslegung eines Flüssigimprägnierverfahrens zur Herstellung eines Bauteils ist die Permeabilität der Preform, also deren Durchlässigkeit gegenüber dem Injektionsmedium, ein entscheidender Parameter der direkt die Fließgeschwindigkeit und somit die Prozessdauer beeinflusst.

Bei der Modellierung der Permeabilität von Preforms für die Nutzung in Flüssigimprägnierprozessen bei der Herstellung von FKV-Bauteilen müssen mehrere Skalenebenen für die auftretenden Fließeffekte sowie deren Interaktion betrachtet werden (Abbildung 2.6).

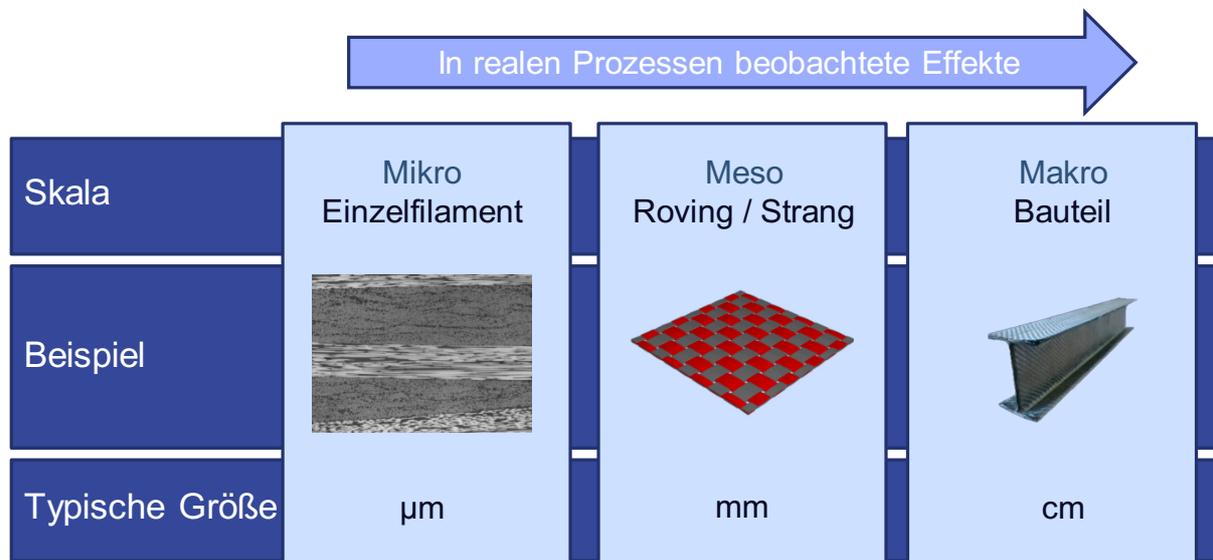


Abbildung 2.6: Relevante Skalenebenen für die Beschreibung des Fließverhaltens

Nach dem Bottom-Up-Prinzip werden die folgenden Definitionen im Rahmen dieser Arbeit genutzt, um das Fließverhalten zu beschreiben:

- Mikroebene: Beschreibt Fließeffekte zwischen einzelnen Fasern, also z. B. innerhalb eines Rovings oder einer ähnlichen Struktur, in der die Fasern nahezu parallel ausgerichtet vorliegen (typischerweise μm)
- Mesoebene: Beschreibt Fließeffekte zwischen Rovings oder Faserbündeln (typischerweise mm)
- Makroebene: Beschreibt die im Prozess zu beobachtenden Fließeffekte auf Bauteilebene (typischerweise cm), verursacht durch das Zusammenwirken aller Skalen zu einer homogenisierten Permeabilität

Der Fluss eines Fluids durch ein poröses Medium wie eine textile Preform können als Mittelwert über alle betrachteten Ebenen für den gesättigten Zustand unter bestimmten für diese Art von Prozessen relevanten Randbedingungen [18, 44, 45] (schleichende Strömung, newtonsches, inkompresibles Fluid) durch das Gesetz von Darcy beschrieben werden [46]. Danach kann im eindimensionalen Fall die Permeabilität K berechnet werden, indem das Produkt aus Volumenstrom q , der Fluidviskosität η und der Fließlänge Δx auf den durchströmten Querschnitt A und den Druckunterschied Δp bezogen werden, wie in Formel (1) gezeigt.

$$K = -\frac{q \eta \Delta x}{A \Delta p} \quad (1)$$

Dementsprechend beschreibt die Permeabilität im Kontext von LCM-Prozessen die Durchlässigkeit einer Preform für den Harzfluss. Um die 3-dimensionale Strömung zu beschreiben, werden vier charakteristische Werte benötigt: Die höchste und niedrigste Ebenenpermeabilität (K_1 und K_2), deren Orientierungswinkel zur Materialhauptachse (β) sowie die Dickenpermeabilität (K_3), wie in Abbildung 2.7 gezeigt.

In üblichen LCM-Prozessen, wird die Imprägnierung hauptsächlich in Ebenenrichtung vorgenommen. Da das Aspektverhältnis vieler FKV-Bauteile größer als 1:100 ist, weisen diese eine große Oberfläche bei vergleichsweise geringer Dicke auf. In neueren Ansätzen wie dem Advanced oder Compression RTM [47] wird hauptsächlich durch die Dicke imprägniert. Durch die erhebliche Verkürzung der Fließwege können kürzere Zykluszeiten erreicht werden. Alle drei Permeabilitätswerte (K_1 , K_2 und K_3) sind für die Verwendung von DFP-Preforms in LCM-Prozessen relevant.

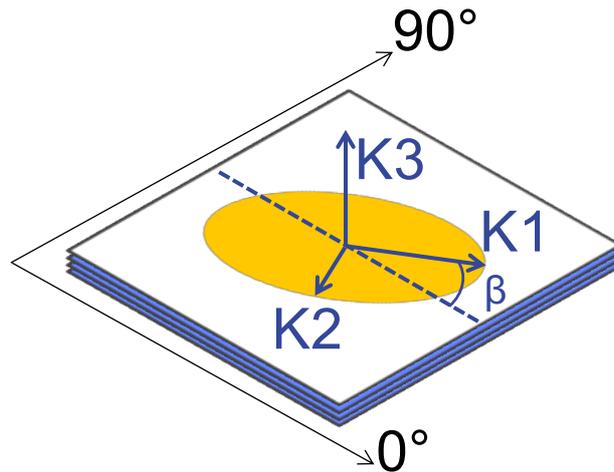


Abbildung 2.7: Skizze zur Definition der Permeabilitäten K1, K2 und K3

Beginnend bei der Geometrie des durchströmten Materials, ist die Kozeny-Carman-Gleichung [48, 49] (Formel (2)) ein Ansatz zur Modellierung der Permeabilität. Sie wurde ursprünglich für poröse Schichten aus sphärischen Partikeln entwickelt und benötigt die experimentelle Ermittlung eines Geometriefaktors C . Die ermittelten Werte der Konstante sind streng auf das gemessene Material und die verwendete Porosität beschränkt [50]. Darüber hinaus ist aufgrund der Herkunft der Gleichung von sphärischen Partikeln keine Unterscheidung der Fließeffekte in Faserrichtung und senkrecht dazu möglich.

$$q = - \frac{\varepsilon^3 \cdot \Delta p \cdot A \cdot d_p^2}{(1 - \varepsilon)^2 \cdot \eta \cdot \Delta L \cdot C} \quad (2)$$

d_p ist der Partikeldurchmesser, ε ist die Porosität, C ist eine empirische Konstante. Für Anwendungen mit weitestgehend gleichen Partikeln ist die Kozeny-Carman-Gleichung gut anwendbar und weit verbreitet [51]. Ähnlich zum Gesetz von Darcy werden die Fluidviskosität η und die Fließlänge ΔL sowie der durchflossene Querschnitt A und der Druckverlust Δp zur Berechnung des volumetrischen Flusses verwendet. Sie beschreibt einen schleichenden Fluss. Anstatt der Verwendung eines Wertes für die Permeabilität enthält sie Variablen zur Beschreibung des Porenraums. Der Porengehalt geht in der dritten Potenz ein. Die Kozeny-Carman-Konstante setzt sich aus zwei Anteilen zusammen, der materialabhängigen Konstanten C_0 und der Tortuosität τ :

$$C = C_0 \cdot \tau^2 \quad (3)$$

Die Konstante C_0 ist hierbei eine empirische, materialabhängige Konstante. Die Tortuosität beschreibt die Konnektivität der Porenräume und wird definiert als das Verhältnis der Strecke, die ein Partikel bei der Durchströmung des Porenraums zurücklegt bezogen auf die Bezugslänge in Richtung des globalen Druckunterschiedes, die allerdings in der Praxis für ein gegebenes Material sehr schwierig zu bestimmen ist [52]. Die Kozeny-Carman-Gleichung wird weithin verwendet, um Permeabilitäten textiler Strukturen über mehrere Skalenebenen zu berechnen, auch wenn dies den ursprünglichen Zweck und die Anwendbarkeit überschreitet [52, 53]. Die Richtungsabhängigkeit der Permeabilität von Faserstrukturen kann hiermit nicht abgebildet werden.

Zur korrekten Beschreibung der Permeabilität muss diese allerdings auf den einzelnen Ebenen getrennt betrachtet werden.

2.3.1 Modellierung der Mikroebene

Wie bereits dargestellt, ist die Kozeny-Carman-Gleichung in ihrer Anwendbarkeit auf Faserstrukturen sehr beschränkt. Daher entwickelten Gebart et al. [54] basierend darauf einen analytischen Ansatz um die Permeabilität von Schichten aus parallelen Fasern in quadratischer und hexagonaler Packung sowohl in Faserrichtung als auch senkrecht zur Faserrichtung zu beschreiben. Hierzu wurde ein Geschwindigkeitsprofil über einen variablen Querschnitt integriert, der aus einer repräsentativen 2D-Zelle entwickelt wurde. Dieser Ansatz ist zur Beschreibung der Mikropermeabilität weit verbreitet. Für den Fall quer zur Faserrichtung ergibt sich umgestellt nach der Permeabilität:

$$K_{\perp} = C_1 \cdot \left(\sqrt{\frac{V_{fmax}}{V_f}} - 1 \right)^{\frac{5}{2}} \cdot r_f^2 \quad (4)$$

Mit den Konstanten C_1 , angepasst an die analytischen Ergebnisse und dem maximalen Faservolumengehalt V_{fmax} je Packungsart, wie in Tabelle 2.1 dargestellt, kann dann die Permeabilität berechnet werden.

Tabelle 2.1: Werte für die Berechnung der Permeabilität quer zur Faserrichtung nach Gebart, entnommen aus [50]

Faseranordnung	C_1	$V_{f,max}$
Quadratisch	$\frac{16}{9 * \pi * \sqrt{2}}$	$\frac{\pi}{4}$
Hexagonal	$\frac{16}{9 * \pi * \sqrt{6}}$	$\frac{\pi}{2 * \sqrt{3}}$

Die größte Limitation resultiert aus der Annahme der quadratischen oder hexagonalen Faserpackung, die nicht der beobachteten Realität in Mikrostrukturen entspricht. Aus diesem Grund existieren einige Erweiterungen dieser Arbeiten, die eine mathematische Gleichung an vorliegende Ergebnisse (d. h. Experimente oder Simulationen anpassen), wie in Tabelle 2.2 dargestellt.

Tabelle 2.2: Vergleich der wichtigsten analytischen Ansätze zur Beschreibung der Permeabilität zwischen Einzelfilamenten

Ansatz	Annahme	Mathematische Umsetzung	Umsetzung	Herleitung
Gebart et al. [54]	Quadratische oder hexagonale Packung der Fasern	Potenzgesetz		Analytische Verwendung d. Navier-Stokes-Gleichung
Chen und Papatthanasίου [55]	Zufällige Faserverteilung	Potenzgesetz		Anpassung einer mathematischen Gleichung an vorhandene Ergebnisse
Yazdchi et al. [56]	Zufällige Faserverteilung	Potenzgesetz		
Gommer et al. [57]	Zufällige Faserverteilung	Multiple lineare Regression		

Letztendlich werden also analytische Ansätze an die Realität angepasst, indem numerische Modelle verwendet werden. Die Nützlichkeit dieses Vorgehens ist fragwürdig, da letztendlich daraus kein Erkenntnisgewinn mehr zu ziehen ist. Wenn die Struktureigenschaften ohnehin ausreichend bekannt sind, um ein virtuelles Abbild zur Strömungssimulation zu erstellen, können die generierten Ergebnisse auch direkt weiterverwendet werden, ohne analytische Gleichungen darauf anzupassen.

Zu diesem Schluss kommen auch Donohue et al. [53], die ausdrücklich davor warnen ein Modell zur Permeabilitätsbeschreibung mittels dieser Gleichungen zu verwenden, das nicht ausdrücklich auf das zu beschreibende Material angepasst wurde. Aus diesem Grund wird diese Art von Problemen oftmals mittels numerischer Methoden adressiert. Hierzu werden zufällige Faseranordnungen digital generiert und das Strömungsproblem mittels computerimplementierter Solver gelöst. Mögliche Methoden beinhalten unter anderem die Lösung der Navier-Stokes-Gleichung auf einer gegebenen Struktur, variierend in den getroffenen Annahmen für die Erstellung des verwendeten FE-Netzes und der verwendeten Randbedingungen sowie der resultierenden Rechenzeiteffizienz. Die Nutzung der Lattice Boltzmann-Methode [58] löst die Boltzmann-Gleichung auf einem Netz unter Berücksichtigung der Interaktion physikalischer Partikel. Die Navier-Stokes-Gleichung kann aus der kinetischen Boltzmann-Gleichung abgeleitet werden. Bei der Boundary-Element-Methode [55, 59–61] wird ein FE-Netz über die zu modellierenden Oberflächen gelegt, dieser Ansatz ist besonders effizient für Problemstellungen mit einem kleinen Verhältnis zwischen Oberfläche und Volumen [62]. Im Gegensatz dazu wird bei der Immersed-Boundary-Methode [63] ein kartesisches Netz generiert und die poröse Struktur mittels Randbedingungen modelliert, die an den Oberflächen der Körper anliegen. Computational Fluid Dynamics (CFD)-Solver lösen diskretisierte physikalische Gleichungen mittels expliziter Euler-Verfahren [64] und wurden in einer Vielzahl an Arbeiten verwendet [57, 65–68].

Weitere Ansätze nutzen in OpenFoam implementierte Solver zur Lösung des Strömungsfeldes [69, 70] und stehen in Verbindung mit Ansätzen zur Entwicklung eines digitalen Prototyps [71].

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein LIR-Tree Ansatz zur Netzgenerierung verwendet [72, 73]. Auf diesem Netz wird die stationäre Stokes-Gleichung gelöst. Der Solver ist in der GeoDict-Software [74] integriert und wird später detaillierter beschrieben.

2.3.2 Modellierung der Mesoebene

Die Berechnung der Permeabilität auf der Mesoebene bedeutet die Ermittlung einer mittleren Permeabilität über mehrere geometrische Eigenschaften einer Faserstruktur hinweg, z. B. gleichzeitiges Fließen innerhalb von Rovings und um diese herum.

Dies bedeutet, dass der berechnete Wert für die Fließgeschwindigkeit ein Mittelwert oder zusammengesetzter Wert resultierend aus dem Fließen auf zwei verschiedenen Skalenebenen ist. Da übliche textile Verstärkungsmaterialien wie Gewebe oder Gelege große Fließkanäle beinhalten, die die Gesamtpermeabilität des Materials entscheidend bestimmen [75, 76], ist es eine gängige Annahme, dass nur undurchlässige Rovings auf Mesoebene in die Berechnung einbezogen werden. Diesen wird eine Permeabilität von 0 [39] bzw. eine zuvor analytisch berechnete Permeabilität zugewiesen, die beispielsweise auf den Modellen von Gebart basiert [54]. Es ist offensichtlich, dass diese Annahme nur gelten kann solange das Fließen, das durch die Mikropermeabilität verursacht wird, im Vergleich zum gesamten Fließen vernachlässigbar ist. Pillai et. al. [77] kamen zu dem Schluss, dass Bereiche mit niedriger Permeabilität nur vernachlässigt werden können, wenn deren effektive Permeabilität bei einem FVG von 50 % höchstens 10 % der Permeabilität der hochpermeablen Zonen beträgt. Ähnliche Ergebnisse wurden in weiteren Arbeiten berichtet [78–80]. Neben dem Porengehalt hat ebenso die Morphologie des Porenraums einen großen Einfluss auf die Permeabilität. Für Gewebe und Gelege beinhaltet die textile Architektur Meso- (zwischen Rovings oder Textillagen) und Mikroporenräume [77, 81]. Der Fluss durch mikroskalige Porenräume ist einige Dekaden geringer als durch mesoskalige Porenräume [82]. Daher haben vor allem Mesofließkanäle in Fließrichtung, wie sie beispielsweise durch Vernähen eingebracht werden können² einen großen Einfluss. Wenn die poröse Struktur als undurchlässiger Block mit Kapillarröhren in Fließrichtung angenommen wird (vereinfachtes Modell 1. Ordnung), kann der Einfluss der Vernähung auf einer theoretischen Basis modelliert werden. Das Gesetz von Hagen-Poiseuille [83] erlaubt die Berechnung des resultierenden Flusses innerhalb einer Röhre abhängig vom Druckunterschied (Formel (5))

$$q = -\frac{\pi \cdot r^4 \cdot \Delta p}{8 \cdot \eta \cdot \Delta L} \quad (5)$$

Mit r als Rohrdurchmesser, ΔL mit der Fließlänge (korrespondieren mit Röhrenlänge). Q , Δp und η sind definiert als Volumenstrom, Druckverlust und Viskosität. Für dieses einfache Modell 1. Ordnung, kann diese Gleichung zusammen mit dem Gesetz von Darcy nach Δp aufgelöst und gleichgesetzt werden. Die Permeabilität kann

² Analog zu der Verwirkung in Gelegematerialien

dann als $r^2/8$ abgeleitet werden. Dies zeigt, dass für die gleiche totale durchströmte Fläche eine kleine Anzahl großer Fließkanäle eine höhere Permeabilität aufweist als eine große Anzahl kleiner Fließkanäle. Daher zeigt bspw. ein Gelege bei gleichem durchschnittlichen Faservolumengehalt eine höhere Permeabilität. Im Gelege werden die Mesofließkanäle während der Verwicklung im Herstellungsprozess eingebracht und führen zu einer deutlich erhöhten Imprägnierbarkeit.

Neben dem totalen Volumen und der Verteilung der Fließkanäle hat auch deren Turtuosität (wie sehr diese gekrümmt sind) eine hohe Relevanz, da diese die Permeabilität verringert. Scheidegger [84] schlug beispielsweise eine Reduktion des berechneten Flusses durch einen Fließkanal mit Hilfe eines Turtuositätsfaktors vor, der als Verhältnis zwischen der tatsächlichen Fließkanallänge und Dicke der porösen Struktur dargestellt werden kann. Daher reduziert die starke Turtuosität in textilen Halbzeugen sehr deutlich die Permeabilität. Der Vorteil des Vernähens, zum Beispiel in Gelegen ist der durchgehende Fließkanal ohne Turtuosität durch die Preformdicke. Darüber hinaus erklärt die Theorie der Turtuosität warum die Permeabilität in Ebenenrichtung, also in Faserrichtung, üblicherweise eine Größenordnung über der Dickenpermeabilität liegt.

Im Vergleich zu textilen Halbzeugen besitzt eine DFP-Preform bei für die Anwendung in Hochleistungsbauteilen ab 50 % FVG eine reine Mikropermeabilität (vgl. Abbildung 1.3). Daher ist die Annahme, für DFP-Preforms ohne inhärente Fließkanäle auf Mesoebene keine Mikropermeabilität zu betrachten, fraglich.

Beim Aufbau eines Meso-Modells mit der Forderung nach einer exakten Reproduktion des Fließens auf Mikro- und Mesoskala müssen sehr große und daher auch rechenintensive Modelle aufgebaut werden, da eine sehr große Anzahl von Faser mit einem Durchmesser im Bereich einiger μm ausreichend detailliert abgebildet werden müssen, während gleichzeitig ein Bereich in der Größe einiger mm oder cm modelliert werden muss, um ein repräsentatives Volumen zu bilden. Aus diesem Grund ist es zielführend, ausreichend genau Mittelwerte der Mikropermeabilität zu bestimmen und diese in ein größerskaliges Meso-Modell zu übernehmen, um die Permeabilität großer Einheitszellen berechnen zu können ohne geometrische Eigenschaften auf Mikro-Ebene abbilden zu müssen.

2.3.3 Modellierung der Makroebene

Das Fließen auf Makroebene wird üblicherweise betrachtet, wenn die Füllzeit oder Füllbarkeit von Preforms in Flüssigimprägnierverfahren ermittelt oder optimiert werden sollen. Die Permeabilitätswerte, die als Eingangsgröße für diese Simulationen dienen, entstammen üblicherweise der experimentellen Permeabilitätsermittlung von repräsentativen Lagenaufbauten. Hierbei wird die Preform als poröser Block angenommen, wobei Effekte auf darunterliegenden Ebenen durch die Homogenisierung nicht betrachtet werden. Da diese Simulationen bereits weit verbreitet sind und nicht im Fokus dieser Arbeit liegen, sei auf entsprechende Literatur verwiesen [85–87].

2.4 Einflüsse der Preformstruktur auf die Permeabilität

Für textile Halbzeuge wie Gewebe und Gelege wurden bereits einige Untersuchungen hinsichtlich des Einflusses textiler Parameter auf die Permeabilität durchgeführt.

2.4.1 Einfluss der textilen Parameter bei Geweben

Einfluss auf K1 und K2

Für Gewebe berichten diverse Arbeiten von einem deutlichen Einfluss der Webart auf die Ebenenpermeabilität. So berichtete Shafi ([88] nach [89]) von einem stärkeren Gradienten des Permeabilitäts-Faservolumengehalt-Zusammenhangs für ein Leinwandgewebe verglichen zu einem Atlasgewebe. Das Leinwandgewebe besitzt eine größere Anzahl an Kreuzungspunkten, die zur Bildung von Mesofließkanälen führen können [90]. Ebenso zeigten Pearce et al. [91] eine höhere Ebenenpermeabilität eines Köpergewebes im Vergleich zu einem Atlasgewebe. Sie führen an, dass das Köpergewebe im Vergleich zum Atlasgewebe eine höhere Permeabilität habe, da die wenigen größeren Fließkanäle im Köpergewebe insgesamt das Fließen mehr erleichtern als viele kleine. In Untersuchungen von Rieber et al. [88] weisen Köpergewebe insbesondere eine niedrigere K2-Permeabilität bei vergleichbarer K1-Permeabilität auf und besitzen so eine höhere Anisotropie als Leinwandgewebe. Als Vergleichsgröße führen sie eine Dichtheit des Gewebes ein, wie Rieber ebenso in seiner Dissertation [44] erklärt. Aus Fadendichte und Titer kann dann die Dichtheit eines Gewebes bestimmt werden. Die Anisotropie des Fließverhaltens sei durch den Crimp zu erklären, der sich aus Kettfadenspannung, Fadendichte, Titer und Webart ergibt.

Lu et al. [92] berichten, dass bei gleicher Fadendichte das Leinwandgewebe den höchsten Fließwiderstand aufweist und das Atlasgewebe den geringsten. Allgemein leitet Summerscales empirisch ([88] nach [93]) her, dass bei gebündelten Faserpaketen eine höhere Permeabilität entstehe als bei homogener Faserverteilung.

Auch Parnas [90] stellte fest, dass die Ebenenpermeabilität stark mit der Struktur der Verwebung korreliere, solange die anderen textilen Parameter in der Untersuchung konstant gehalten werden. Das untersuchte Material mit der größten Faserondulation, nämlich das Köpergewebe, habe eine größere Permeabilität als ein Atlas 1/8-Gewebe, das Atlas 1/5-Gewebe liege genau dazwischen.

Einfluss auf K3

Hinsichtlich der Dickenpermeabilität existieren weniger Untersuchungen, da weiterhin ein großer Anteil von Bauteilen in der Ebene imprägniert wird. Mitschang et al. [94] zeigten, dass K3 für Leinwandgewebe zwischen 31 % und 112 % höher sei als für ein Köpergewebe.

2.4.2 Einfluss der textilen Parameter bei Gelegen

Gelege unterscheiden sich maßgeblich in ihrer Herstellung und Struktur von Geweben, da hier keine Verwebung von Garnen stattfindet, sondern ebene Faserschichten durch einen Verwirkungsschritt miteinander verbunden werden. Maßgebliche Fließkanäle, die für die Imprägnierung genutzt werden können, entstehen hierbei durch diese Verwirkung, da zwischen den dichten Faserpaketen Freiräume geschaffen werden, sei es durch Bündelungseffekte in Ebenenrichtung oder durch das in Dickenrichtung verlaufende Verwirkungsgarn.

Einfluss auf K1 und K2

Arnold [95] stellte fest, dass bei gleichen sonstigen Parametern eines Halbzeuges eine größere Stichelänge zu einer höheren Ebenenpermeabilität führe, da im Vergleich zu einer kleineren Stichelänge die Faserbündel loser vorlägen. Der Bindungstyp beeinflusse dabei durch die Wirkrichtung die Bildung von Garnbündelungen und damit auch die Ebenenpermeabilität.

Einfluss auf K3

Hinsichtlich der Dickenpermeabilität sei ein deutlicher Einfluss der Faserorientierung im Vergleich zur Herstellungsrichtung festzustellen, da eine unterschiedliche Bündelung bei $\mp 45^\circ$ -Gelegen im Vergleich zu einer höheren Permeabilität als bei $0^\circ/90^\circ$ -Gelegen führe. Die Dicke bzw. der Titer des Nähfadens habe in den Messungen keinen signifikanten Einfluss gezeigt, da bei dem verwendeten Aufbau aus 24 Einzellaagen jede Lage individuell vernäht sei und somit keine durchgehenden Fließkanäle entstünden. Bei sinkender Stichelänge steige die Dickenpermeabilität. Daraus leitet er ab, dass für die Dickenimprägnierung bei dem von ihm untersuchten Materialien vorzugsweise $\mp 45^\circ$ -Gelege mit kleiner Stichelänge zu verwenden seien.

2.4.3 Detaillierter Einfluss von Vernähungen

Einfluss auf K1 und K2

Lundström [96] stellte fest, dass das Fließen durch die Fließkanäle zwischen einzelnen Bündeln einen wesentlich größeren Beitrag zur Gesamtpermeabilität leiste als das Fließen innerhalb der Bündel.

Vergleichbar zur inhärenten Verwirkung von Gelegen beeinflusst eine Vernähung von Preforms, wie sie beispielsweise zur Montage von Subpreforms zu einer Gesamtpreform [18] verwendet wird, die Permeabilität.

Hierbei können Vernähungen als zusätzliche Hindernisse zu einer Permeabilitätsreduktion [97] führen, da diese zu einer Fließwegverlängerung führen. In einer Studie von Talvensaaari et al. [98] führt die Verdichtung des Nahtabstands zu einer Erhöhung der Permeabilität, allerdings wurden die Versuche mit sehr hohen Fadenspannungen durchgeführt, die zu einer starken Bündelung der Fasern führen und somit Fließkanäle schaffen können [99].

Rieber et al. [99] führten Versuche bei niedrigeren Fadenspannungen durch, bei denen bei Verdichtung des Nahtabstands die Gesamtpermeabilität sinkt. Es konnte gezeigt werden, dass bei Einbringung von Nähten 45° zur K1- Richtung die Orientierung der Fließfrontellipse maßgeblich verändert werden kann und bei Nähten in $\pm 45^\circ$ eine kreisförmige Fließfront erreicht werden kann.

Einfluss auf K_3

Versuche zu vernähten Preforms führte Drapier [100] durch, der die Permeabilität verschiedener vernähter und unvernähter Lagenaufbauten in Dickenrichtung verglich. Er stellte fest, dass die Dickenpermeabilität bei den unvernähten Preforms nicht von der Stapelfolge abhängt, da bei homogenen Einzellagen keine signifikanten Nestingeffekte auftraten. Durch Einbringung einer Vernähung würde die Permeabilität sehr stark gesteigert und somit sei die Erreichung einer „ordentlichen Verarbeitbarkeit“ machbar. Bei einer bekannten Permeabilität bei einer Stichdichte $d_1(K_{33}^{d1})$ sei die lineare Umrechnung der Permeabilität derselben Preform auf eine andere Stichdichte $d_2(K_{33}^{d2})$ mit

$$K_{33}^{d1} = K_{33}^{d2} \frac{d_1}{d_2} \quad (6)$$

eine sehr gute Näherung, da bei jeder gegebenen Stichdichte die Fließrate außerhalb der durch Vernähung eingebrachten Fließkanäle anteilmäßig sehr klein sei. Sämtliche Versuche mit vernähten Preforms fanden nur mit den $0^\circ/90^\circ$ -Lagenaufbauten statt, eine rein unidirektionale Preform wurde nur unvernäht getestet. Es konnte daher keine Aussage getroffen werden, inwiefern dieser Zusammenhang auch für den alternierenden Lagenaufbau gilt.

Hinsichtlich der Dickenpermeabilität nachträglich vernähter textiler Halbzeuge stellt Becker [45] fest, dass durch Einbringung der Nähte die Dickenpermeabilität je nach Nähparametern zwischen 17 % und 22 % gesteigert werde. Die Verwendung eines dickeren Nähfadens erzeuge hierbei einen größeren Fließkanal als die eines dünneren Nähfadens und somit eine höhere Permeabilitätssteigerung. Weiterhin wird berichtet, dass nach Entfernung des Unterfadens nach dem Vernähen im Vergleich zur lediglich vernähten Probe eine nochmals höhere Permeabilität gemessen wurde. Dies sei darauf zurückzuführen, dass durch die Entfernung des Unterfadens die Porosität wieder gesteigert werde und somit mehr Porenraum zum Fließen zur Verfügung stehe. Es sei festzustellen, dass die entstandenen Fließkanäle nach Entfernung des gesamten Nähfadens wieder verschwinden und somit durch reines Durchstechen der Preform keine signifikante Permeabilitätssteigerung erreicht werden könne.

2.4.4 Einfluss des Bindermaterials

Bei der Verbindung mehrerer Subpreforms zu einer Gesamtpreform bzw. von Einzelschichten zu einer Preform werden oftmals Bindermaterialien verwendet, die meist als schmelzbares Zusatzmaterial, zum Beispiel in Form eines Pulvers oder eines Vlieses vorliegen. Zur Aktivierung und Herstellung der gewünschten Haftung werden diese thermisch aktiviert (i. e. angeschmolzen). Becker [45] stellt für ein Bindervlies fest, dass dieses im nicht aktivierten Zustand als Barriere in den Grenzbereichen zwischen Einzelschichten wirke und damit eine Kompaktierung des Aufbaus durch den Fluiddruck (hydrodynamische Kompaktierung) vermindere, somit erfolge die Kompaktierung nur durch Garndeformation und die Dickenpermeabilität werde reduziert. Im aktivierten Zustand erfolge das Verschließen von Fließkanälen und somit ebenfalls eine Reduktion der Dickenpermeabilität.

Eine leicht zunehmende Dickenpermeabilität bei zunehmendem Bindervolumengehalt in der Preform wird von Shih et al. [101] sowie eine leicht zunehmende Ebenenpermeabilität von Rohatgi und Lee [102] berichtet. Caglar et al. [103] berichten im Gegensatz dazu von einer Reduktion der Ebenenpermeabilität durch Binderpartikel, die Fließkanäle versperren.

2.4.5 Zusammenfassung Einflüsse der Textilstruktur

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Permeabilität der textilen Strukturen sehr stark mit der Inhomogenität innerhalb der Strukturen korreliert. Wenn diese sehr homogen vorliegen und sich die Porosität auf viele kleine Fließkanäle verteilt, ergibt sich tendenziell eine kleinere Permeabilität als bei einer inhomogeneren Struktur mit einer geringen Anzahl an größeren Fließkanälen. Die Einbringung zusätzlicher Ondulationen in Form von Kreuzungspunkten bei Geweben, die Förderung von Bündelungseffekten bei Gelegen und das Einbringen von Stichkanälen in Dickenrichtung tragen so jeweils zu einer höheren Permeabilität bei. Je nach Art des angestrebten Prozesses (Ebenen- oder Dickenimprägnierung) muss beachtet werden, welche Strukturänderungen ggf. auch eine Richtungspermeabilität erhöhen, dafür aber eine andere senken.

2.4.6 Vergleich der Struktur von Dry Fiber Placement Preforms verglichen mit Preforms aus textilen Halbzeugen

Wie bereits dargestellt, werden Preforms für LCM-Prozesse oftmals mithilfe von textilen Halbzeugen wie Geweben oder Gelegen hergestellt.

Durch die Herstellungsart besitzen diese eine spezifische Struktur der enthaltenen Faserstränge. Im Falle von Geweben erfolgt die Verwebung einer Vielzahl von Fasersträngen [18], aus der die Webstruktur entsteht. Je nach Bindungsart (z. B. Leinwand-, Köper- oder Atlasbindung) enthalten diese eine kleinere oder größere Anzahl an Kreuzungspunkten, die zu Ondulationen der Faserstränge führen. Hieraus entstehen dann Porenräume auf Ebene der Stränge (Mesoebene), die um ein Vielfaches größer sind als die Porenräume zwischen einzelnen Fasern (Mikroebene). Durch die Größe dieser Porenräume entsteht eine höhere Permeabilität der Gesamtstruktur und es kann eine schnellere bzw. einfachere Imprägnierung erreicht werden.

Auch Gelege besitzen eine herstellungsbedingte Struktur, die Mesofließkanäle hervorruft, nämlich die zur Fixierung der Einzellagen eingesetzte Verwirkung ähnlich einer Vernähung [18]. Die Verwirkung führt zur Bündelung der zuvor homogen vorliegenden Faserbahnen mit entsprechenden Fließkanälen sowie zu Fließkanälen in Dickenrichtung des Halbzeuges.

Dry Fiber Placement Preforms hingegen werden aus parallelen Bahnen flächig aufgebaut und bestehen in vielen Fällen, vergleichbar zu Gelegen vor dem Verwirkungsschritt, aus sehr homogenen Faserlagen aus weitestgehend parallel angeordneten Fasern. Fließkanäle existieren hierbei nur auf der Mikroebene, also zwischen einzelnen Fasern. Der Vergleich zwischen DFP-Preforms, Geweben und Gelegen und den enthaltenen Mesofließkanälen ist in Abbildung 2.8 dargestellt.

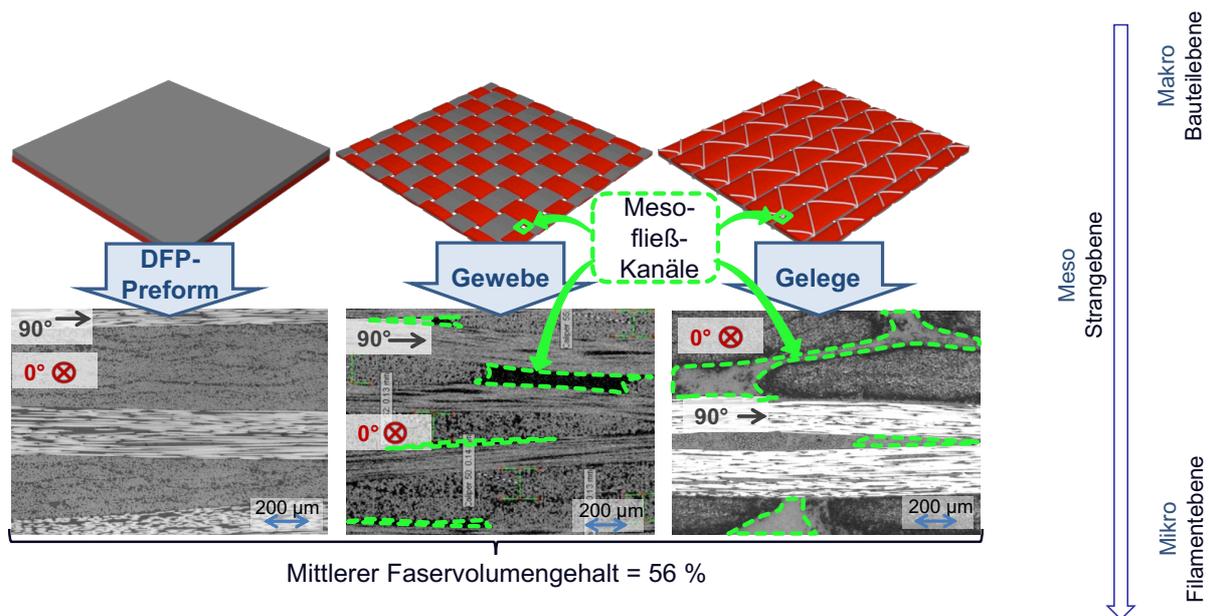


Abbildung 2.8: Unterschiedliche Struktur von DFP-Preforms im Vergleich zu Geweben und Gelegen

2.5 Permeabilität von Dry Fiber Placement Preforms

Der Hauptfokus bisheriger Forschungsarbeiten hinsichtlich der Permeabilität von DFP-Preforms ist die Untersuchung ablagebedingter Einflüsse auf spätere Imprägnierungsschritte. Rudd et al. [23] entwickelten ein theoretisches Modell zur Vorhersage der Permeabilität abhängig von der Faserwelligkeit in Ebenenrichtung. Allerdings wurden diese Untersuchungen bei einem Faservolumengehalt von unter 45 % durchgeführt, der für Hochleistungsbauteile eine eher geringe industrielle Relevanz besitzt. Der Einfluss von Rovingverschiebungen wurde von Belhaj et al. [22] untersucht. Neben einer Referenzpreform, bei der alle Rovings parallel nebeneinander angeordnet waren, wurden Preforms hergestellt, die Lücken oder Überlappungen von 2 mm bei jedem 5. Roving aufwiesen (siehe Skizze Abbildung 2.9).

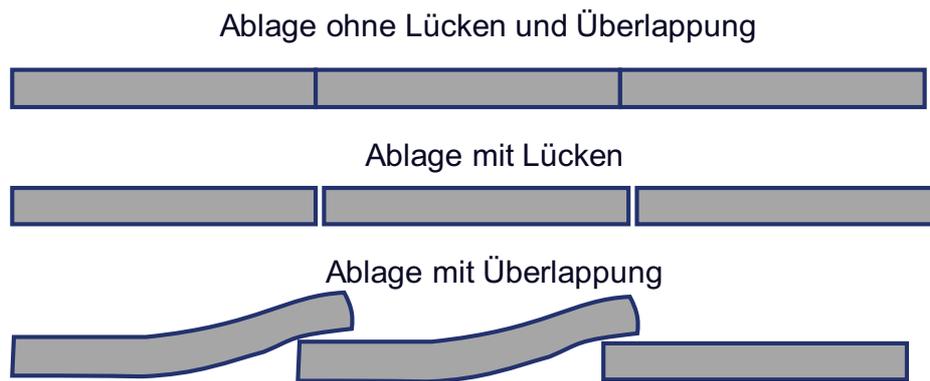


Abbildung 2.9: Skizze zur Ablage der Rovings nebeneinander, mit Lücken bzw. mit Überlappung

Die Permeabilität mit den Überlappungen war etwa 30 % niedriger als für die anderen Ablagemuster, die sich in einem sehr engen Bereich bewegten. Allerdings wurde nur eine Ebenenrichtung (in Richtung der Faserorientierung) gemessen. Graupner et al. [104] betrachteten Lücken zwischen Rovings statt als ablagebedingten Fehler als eine Methode, die Dickenpermeabilität zu beeinflussen. Die Anzahl und Breite der Rovingabstände wurden variiert. Die Dickenpermeabilität konnte im Vergleich zur Referenz ($\approx 1,5 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$) um etwa zwei Dekaden gesteigert werden, indem nach jedem 4. Roving eine Lücke von 4 mm eingefügt wurde. Allerdings wurde hierdurch der Faservolumengehalt gleichzeitig von 54,9 % auf 47,7 % reduziert, was mit der entsprechenden Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften einhergehen kann. Die Erhöhung der Permeabilität erfolgt hier sowohl durch die Erhöhung der Inhomogenität als auch durch die Reduktion des Faservolumengehalts. Ähnliche Experimente von Marquart et al. [105] haben ebenso Lücken in Preforms auf ihren Einfluss auf die Dickenpermeabilität untersucht. Sie schlussfolgern, dass in einem Aufbau von 12 Einzellagen ($+45^\circ$, -45° , $[0^\circ]_8$, -45° , $+45^\circ$) das Einfügen von Lücken in den 0° -Lagen eine deutliche Erhöhung der Dickenpermeabilität ergab, während das Einfügen von Lücken in den 45° -Lagen nur einen kleinen Effekt hatte. Dieses Verhalten ist zu erwarten, da zwischen den einzelnen 0° -Lagen kein Versatz eingebracht war und somit die entstandenen Lücken durchgängig $2/3$ der Preformdicke durchdrangen. Im Vergleich dazu führt die Präsenz von Lücken in senkrecht aufeinanderliegenden 45° -Lagen nur zu sehr kleinen Überlappbereichen. Arbeiten von Aziz et al. [39] waren auf die simulative Abbildung von DFP-Preforms mit Lücken fokussiert. Die getroffene Annahme beinhaltet, dass die Fließgeschwindigkeit innerhalb der durch die Lücken

eingebrachten Fließkanäle wesentlich höher ist als die Fließgeschwindigkeit in der umgebenden dichten Faserstruktur. Daher wird die Fluidströmung nur innerhalb der Lücken betrachtet. Allerdings wird nicht definiert, für welche Breiten und Anzahl von Lücken die Annahmen valide sind, vor allem da dieser Ansatz eine Preform ohne Lücken mangels abbildbarer Fließkanäle nicht erfassen kann. Eine weitere Forschungsarbeit [106] befasst sich mit Lücken, die zur Optimierung der Permeabilität eingebracht wurden sowie der Varianz der Lückenbreite und der daraus resultierenden Varianz in der Permeabilität.

Darüber hinaus befasst sich eine Arbeit von Umer et al. [107] mit der kombinierten Einbringung von Lücken mit hochpermeablen Vliesen um die komplette Imprägnierung sicherzustellen.

2.6 Einflüsse der Preformstruktur auf mechanische Eigenschaften

Bei der Betrachtung struktureller Veränderungen wie Nähen oder Tufting³ um die Permeabilität der Preforms zu erhöhen, muss deren Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften ebenso berücksichtigt werden. Beim Vernähen muss die Faserstruktur von der Nadel durchdrungen werden und das verbleibende Nähgarn kann zu Verschiebungen, Knicken oder Brechen der Fasern führen. Im Vergleich zur unbehandelten Preform könnte eine Reduktion der mechanischen Eigenschaften resultieren. Allerdings müssen teils gegenläufig wirkende Effekte berücksichtigt werden. Kang et al. [109] berichten aus ihren experimentellen Ergebnissen, dass die Einbringung von Fasern in Z-Richtung (Dickenrichtung) durch das Zusammenhalten von Fasern und Erhöhung des Faservolumengehalts potentiell die Zugfestigkeit und den Zugmodul in Faserrichtung vergrößern kann. Andererseits führt Heß [110] an, dass durch Vernähen eine Veränderung des Zugmoduls von einer Reduktion um 29 % bis zu einer Steigerung um 4 % erreichen kann, je nach experimentellem Aufbau und Nähparametern. Die maximale beobachtete Reduktion der Zugfestigkeit betrug 36 %. Er führt an, dass eine reine Betrachtung der Stichdichte nicht ausreichend sei, den Einfluss der Vernähung auf die mechanischen Eigenschaften zu beschreiben, da keine klare Tendenz aus den experimentellen Daten zu entnehmen sei [111]. Nach Mouritz [112] ist der relevanteste Effekt für die reduzierte Festigkeit und Steifigkeit die Deformation

³ Einseitiges Durchstechen der Preform mit einem Nähfaden, wobei dieser durch Reibung eine Schlaufe bildet, die in der Preform verbleibt [18, 108].

von Faserbündeln, da die Fasern der Vernähung ausweichen. Der Anteil an gebrochenen Fasern sei mit unter 0,5 % eher gering. In einer folgenden Publikation [113] wurde eine breite Literaturstudie mit Auswertung von Messergebnissen aus verschiedenen Quellen vorgenommen. Es wurde festgestellt, dass die maximale lokale Faserauslenkung durch Vernähen in den meisten Fällen 20° betrage und dass der Auslenkungseffekt an der Preformoberfläche durch die Fadenspannung größer sei als in der Preform. Die resultierenden Faserondulationen können zu einer signifikanten Reduktion der In-Plane-Eigenschaften führen. Während der E-Modul vom mittleren Ausrichtungsfehler der Faser abhängt, würden andere Eigenschaften wie Druckfestigkeit, Zugfestigkeit, Biegefestigkeit, Druck- und Zug-Dauerfestigkeit von den lokalen Extremen des Ausrichtungsfehler der Fasern beeinflusst [113, 114]. In der von Mouritz betrachteten Literatur wurden verschiedene Auswirkungen der Vernähung von leicht verbesserten Eigenschaften bis hin zu Verschlechterung um etwa 20 % festgestellt. Trotz der potentiellen Reduktion der In-Plane-Eigenschaften könnten Crash und Out-of-plane-Eigenschaften durch erhöhten Einzellagenzusammenhalt vergrößert werden.

Die erwähnten Ergebnisse betrachten größtenteils Preforms, die mit textilen Halbzeugen hergestellt werden, die durch ihre Struktur bereits einen gewissen Anteil an Ausrichtungsfehlern beinhalten. Im Vergleich dazu könnten DFP-Preforms bei Einbringung einer Vernähung ein unterschiedliches Verhalten aufweisen, da die Fasern in der unbehandelten Preform wesentlich ausgerichtet vorliegen.

2.7 Faserwelligkeit: Einfluss auf Preformpermeabilität und Charakterisierung

Die Kenntnis der Preformstruktur auf mehreren Ebenen ermöglicht die genaue Nachbildung der Preform auf Modellebene.

Bezüglich der Mikrostruktur würden Fasern im Idealfall vollständig parallel und gestreckt vorliegen. Durch Schwankungen bei der Herstellung des Rovings, im Falle der textilen Halbzeuge bei der Textilherstellung sowie bei der Preformherstellung aus textilen Halbzeugen oder Rovings können hierbei jedoch Ondulationen entstehen.

Die Welligkeit von Fasern, die beobachtet wird, kann hierbei meist in zwei Ebenen eingeteilt werden [23, 115]:

1. Welligkeit in der Ebene, die durch Handling und Drapierung von Textilien eingebracht wird bzw. bei der Ablage im DFP entstehen kann.
2. Welligkeit in Dickenrichtung, die vor allem bei Textilien bei der Verwebung entsteht (Crimp)

Meist wird die Welligkeit von Fasern mit einer Sinusschwingung approximiert, die mittels einer Wellenlänge λ und einer Amplitude α beschrieben werden (Abbildung 2.10). Daraus lässt sich auch ein Welligkeitsverhältnis $\frac{\alpha}{\lambda}$ ableiten.

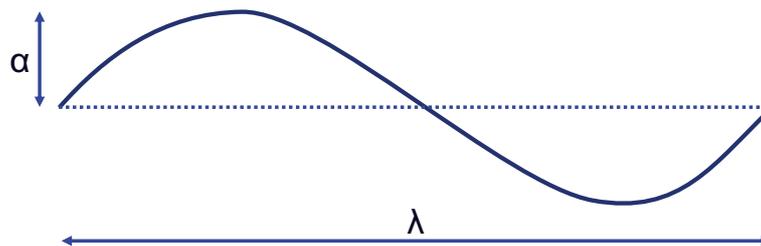


Abbildung 2.10: Beschreibung der Sinusschwingung einer Faser mittels Wellenlänge und Amplitude

Durch die Welligkeit liegen die Fasern lokal nicht mehr in der Vorzugsrichtung vor, wodurch sich lokal die Abstände zwischen benachbarten Fasern und somit die Fließkanäle verändern [57]. Rudd et al. [23] verglichen zur Betrachtung dieses Einflusses experimentell generierte Daten⁴ mit einer analytischen Annahme⁵ und kamen zu dem Schluss, dass die Permeabilität in Faserrichtung bei steigender Welligkeit sinke und dass sich die Permeabilität quer zur Faserrichtung mit steigender Welligkeit erhöhe (Abbildung 2.11).

Soll nun für eine gegebene Preformstruktur die Faserausrichtung und –welligkeit charakterisiert werden, bieten sich hierfür bildgebende Methoden an. Diese lassen sich grundsätzlich in 2D-Verfahren sowie 3D-Verfahren einteilen.

⁴ Ablage von welligen Fasersträngen durch CNC-Ansteuerung

⁵ Die Hauptpermeabilitäten in und quer zur Faserrichtung werden auf den lokal geänderten Ausrichtungswinkel transformiert und über den Verlauf der Schwingung integriert

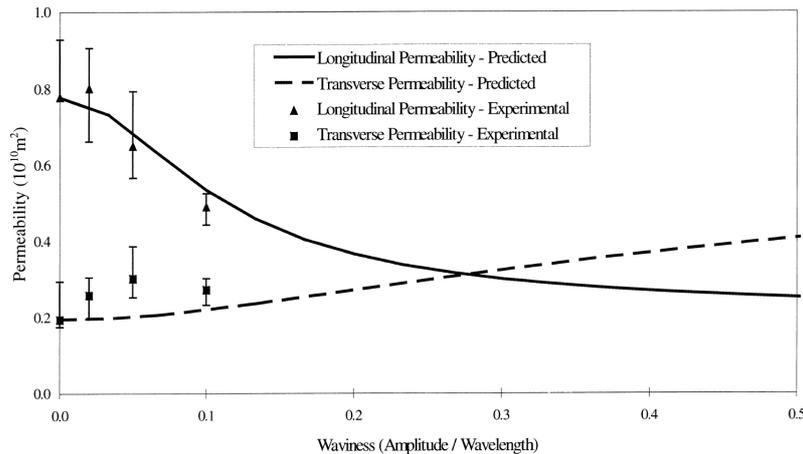


Abbildung 2.11: Permeabilität in und quer zur Faserrichtung in Abhängigkeit der Welligkeit [23]

2.7.1 2D-Verfahren

Zweidimensionale Verfahren sind dazu in der Lage, einen Flächenschnitt aus einem gegebenen Material zu betrachten. Hierzu werden beispielsweise Schiffe aus einer (üblicherweise mit Matrix imprägnierten und im Falle von Duroplasten ausgehärteten) Preformstruktur angefertigt und diese dann mittels eines Licht- oder Rasterelektronenmikroskopes ausgewertet. Diese unterscheiden sich bezüglich der erzielbaren Auflösung und des erreichbaren Kontrastes zwischen Fasern. Das Rasterelektronenmikroskop erreicht eine sehr hohe Punktauflösung von $0,0005 \mu\text{m}$, ist allerdings aufgrund der ähnlichen Dichte zwischen Kohlenstofffasern und Matrix nicht in der Lage diese mit einem guten Kontrast abzubilden. Für die Charakterisierung von Glasfasern in Matrix entstehen allerdings sehr gute Kontraste. Das Lichtmikroskop erreicht nur etwa $1/40$ dieser Auflösung, erzielt aber aufgrund der unterschiedlichen Reflektionseigenschaften einen sehr guten Kontrast zwischen Kohlenstofffasern und Matrix [116, 117].

Es kann zwischen zwei verschiedenen Arten von angefertigten Schliffen unterschieden werden:

1. Schiffe senkrecht zur Hauptfaserrichtung zeigen diese im Querschnitt. Anhand des beobachteten Faserquerschnitts (Ellipse) kann im Falle einer Faserausrichtung, die nicht exakt senkrecht zur Schnittebene liegt, grundsätzlich ein Orientierungswinkel ermittelt werden. Aufgrund von Formschwankungen der Fasern und nicht auszuschließenden Fehlern während der Probenpräpa-

ration sind hierbei jedoch große Schwankungen zu erwarten [115, 118]. Bei Präparation in einem Winkel von 5° zur Hauptrichtung können die Ergebnisse verbessert werden, da Ausbrüche reduziert werden können. Aufgrund der gemessenen lokalen Faserorientierung in einem Schliff ist jedoch nicht zwischen einer globalen Fehlerorientierung und der Welligkeit der Faser zu unterscheiden, es kann lediglich eine statistische Beschreibung lokaler Faserfehlerorientierungen über eine Vielzahl von Schliffen vorgenommen werden [115].

2. Schliffe möglichst parallel zur Faser sollen die Welligkeit abbilden. Hierzu muss aber die Faserwelligkeit bei der Präparation so getroffen werden, dass die Faser die Präparationsebene nicht nur lokal durchstößt, sondern möglichst lange darin liegt. Voraussetzung hierfür ist darüber hinaus, dass die Welligkeit nur in einer Ebene liegt.

2.7.2 3D-Verfahren

Moderne 3D-bildgebende Verfahren wie die 3D-Mikro-Computertomographie (μ CT) [119–123] sowie die 3D-Röntgenmikroskopie (RöMi) [117, 124] erweitern die Möglichkeiten der Strukturcharakterisierung ganz erheblich, da ein dreidimensionales Abbild der Struktur erzeugt wird, die hierbei in Voxel (Abbildung des Raumes durch Würfel gleicher Kantenlänge) unterteilt wird. Jedes Voxel wird hierbei durch einen Grauwert repräsentiert, analog zu Pixeln in 2D-Verfahren.

Ähnlich wie Aufnahmen im Rasterelektronenmikroskop wird bei der Aufnahme von Kohlenstofffasern, die von Matrix umgeben sind wegen der ähnlichen Dichte im μ CT ein schlechter Kontrast erzeugt, der die Segmentierung⁶ und quantitative Auswertung erschwert bis unmöglich macht. Für Glasfasern wird ein guter Kontrast erzielt.

Das Röntgenmikroskop wandelt die Röntgenstrahlung mittels eines Szintillators in optisches Licht um, wonach die optische Vergrößerung des Bildes mittels Linsen und die Aufnahme mittels eines lichtempfindlichen CCD-Sensors erfolgt. Hierbei kann durch die Nutzung der Phasenkontrast-Bildgebungstechnik ein wesentlich höherer Kontrast erzeugt werden, sodass sich auch Kohlenstofffasern sehr gut von der um-

⁶ Segmentierung bedeutet, dass anhand eines Schwellwertes für die Grauwerte zwischen den Materialien getrennt wird. Am Schluss ist also jedem Pixel (2D-Verfahren) oder Voxel (3D-Verfahren) ein Material zugeordnet. Im Falle von Faser und Matrix ist das Modell also binär (Wert 0 oder 1)

gebenden Matrix segmentieren lassen. Abweichend von den 2D-Verfahren, die für die Schliffpräparation eine stabile Einbettung in ein Harzsystem erfordern, können in den 3D-Verfahren grundsätzlich auch trockene Strukturen ohne Matrix untersucht werden, soweit diese ausreichend resistent gegen die bei der Aufnahme auftretenden Vibrationen sowie Erwärmung durch Strahlung sind. Mit der steigenden Datenmenge steigt auch die zu verarbeitende Menge an Informationen, das Ergebnis einer Aufnahme kann im Bereich einiger (3-15) Gigabyte liegen. Die Verarbeitung und Segmentierung erfordern daher einen recht hohen Rechenaufwand und eine manuelle Auswertung gestaltet sich schwierig. Daher müssen hierzu zunehmend Verfahren zur automatisierten Segmentierung und Analyse dieser Daten entwickelt werden. Aktuelle Entwicklungen beschäftigen sich hierbei beispielsweise mit Ansätzen der künstlichen Intelligenz, um einzelne Fasern aus der Gesamtheit zu extrahieren (Abbildung 2.12) und diese dann im nächsten Schritt hinsichtlich ihrer Morphologie zu analysieren [125].

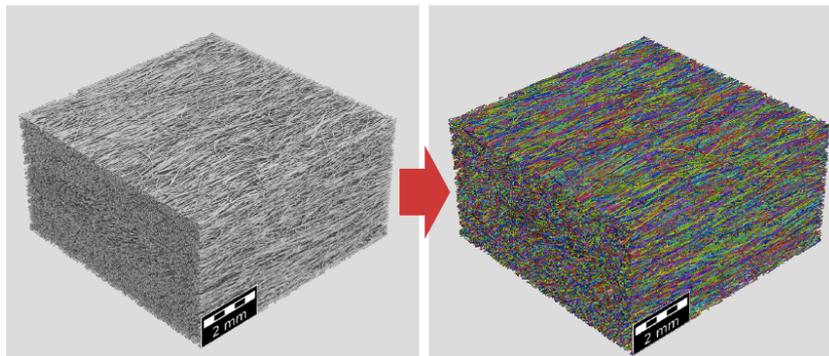


Abbildung 2.12: Segmentierung und Markierung einzelner Fasern in einem μ CT-Scan mittels Ansätzen künstlicher Intelligenz [125]

2.8 Schlussfolgerungen und Ableitung der durchzuführenden Arbeiten

Zusammenfassend lässt sich also feststellen, dass die Permeabilität von textilen Halbzeugen sowie Preforms oftmals aus drei verschiedenen Richtungen betrachtet wird. Die Zusammenhänge sind in Abbildung 2.13 dargestellt und werden im Folgenden erläutert.

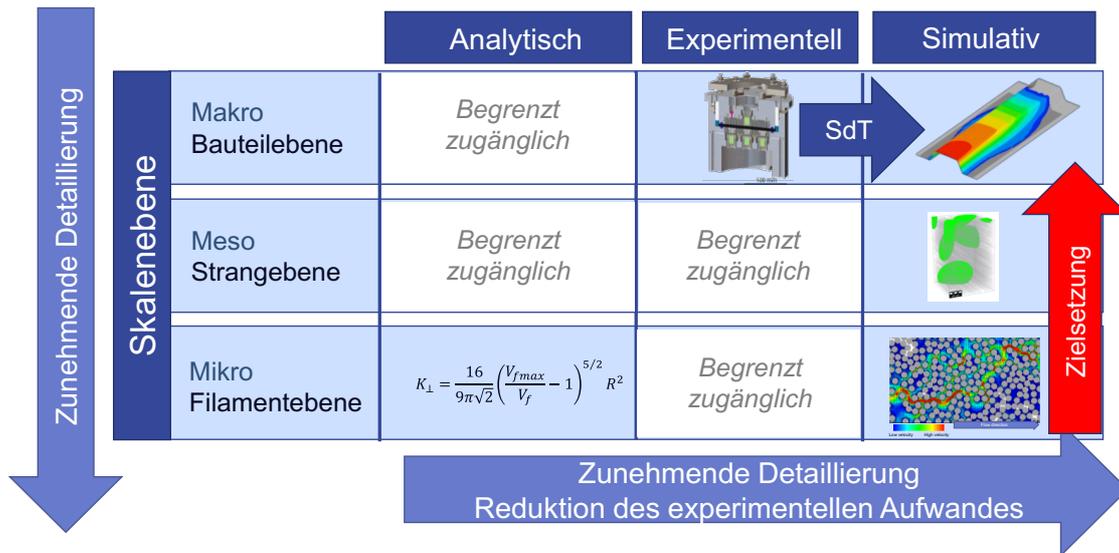


Abbildung 2.13: Darstellung der Abdeckung der Permeabilität verschiedener Skalenebenen durch analytische, experimentelle und simulative Ansätze

Beginnt man mit **analytischen Ansätzen**, erfolgt die Bestimmung der Permeabilität üblicherweise auf der Mikroebene, da sich insbesondere homogene Faserpackungen und die daraus entstehenden regulären Porenräume recht gut analytisch beschreiben lassen. Sobald man nicht mehr über reguläre Packungen, sondern über zufällige Anordnungen spricht, steigt die Komplexität des zu beschreibenden Porenraums sehr stark an, sodass die analytische Beschreibung an ihre Grenzen stößt. Aus diesem Grund erscheint eine analytische Betrachtung für die gegebene Problemstellung nicht als zielführend.

Verglichen hierzu erfolgt die **experimentelle Betrachtung** der Permeabilität üblicherweise auf der Makroebene, da dann die beobachteten Effekte gut messbar sind und die Messungen robuster sind. Zielt man in Richtung der Meso- oder Mikroebene, steigt der Aufwand zur Probenpräparation erheblich an und die verwendete Messtechnik müsste in der Lage sein, sehr kleine Fließraten und Drücke zu erfassen. Darüber hinaus ist mit einer erheblich steigenden Streuung der Ergebnisse zu rechnen, da kleinere Materialvariationen einen größeren Einfluss auf das Messergebnis haben.

Auf **simulativer Ebene** erfolgen derzeit hauptsächlich Füllsimulationen von realen Bauteilen anhand experimentell ermittelter Permeabilitätsdaten. Die hierfür verwendeten Daten sind jedoch nur Mittelwerte aus mehreren Messungen auf großen Skalenebenen. Lokale Effekte, wie sie durch Materialabweichungen, die bei der Herstel-

lung der Halbzeuge oder der Herstellung der Preform hervorgerufen werden, können hierbei kaum abgebildet werden.

Daher soll im Rahmen dieser Arbeit für Dry Fiber Placement Preforms eine Methodik entwickelt werden, mittels simulativen Ansätzen die Permeabilität schrittweise von der Mikro- bis in die Makropermeabilität zu beschreiben. Experimentelle Ansätze werden verwendet, um einen Überblick über wirkende strukturelle Effekte in Dry Fiber Placement Preforms zu erhalten und ein gutes Verständnis über die Preformstruktur bei der Validierung der simulativen Ergebnisse anwenden zu können.

Aufgrund der geringen Permeabilität von DFP-Preforms ist eine Imprägnierung in Dickenrichtung mittels Verfahren wie CRTM vorteilhaft, da diese erheblich die Fließwege verkürzen. Da diese Permeabilität gleichzeitig üblicherweise weit unter der Ebenenpermeabilität liegt und somit kritischer ist, erfolgt in dieser Arbeit eine Fokussierung auf die Untersuchung der Dickenpermeabilität.

Aufgrund der größeren Anschaulichkeit werden zunächst die experimentellen Untersuchungen dargestellt (Kapitel 3), danach folgen die generierten analytischen und simulativen Modelle (Kapitel 4). Zuletzt werden aus den gewonnenen Erkenntnissen Gestaltungsrichtlinien abgeleitet, die bei der Gestaltung von Dry Fiber Placement Preforms hinsichtlich einer prozesstauglichen Permeabilität helfen (Kapitel 5).

3 Experimentelle Betrachtung der strukturellen Einflüsse von DFP-Preforms auf die Dickenpermeabilität

Zur experimentellen Untersuchung struktureller Einflüsse auf die Permeabilität wurde ein zweistufiges Vorgehen gewählt. Zunächst erfolgt im Rahmen einer Vorbetrachtung eine Untersuchung von gezielten Beeinflussungen der Preformstruktur auf mehreren Skalenebenen hinsichtlich ihrer Effektivität zur Erhöhung der Permeabilität, danach wird die wirksamste Methode anhand ihrer Parameter ausdetailliert.

3.1 Materialien

Für diese Parameterstudie wurde ein Kohlenstoffaserveroving des Herstellers SGL (SGL Sigrafil 50k C030, 3300 tex) [126] verwendet. Die relevanten Materialdaten sind in Tabelle 3.1 zusammengefasst.

Tabelle 3.1: Eigenschaften des verwendeten Kohlenstoffaserverovings [126]

Filamentanzahl	Garnfeinheit	Dichte	Einzelfilament- durchmesser	Zugfestigkeit	Zug-E-Modul	Bruchdehnung	Einzelfilament- widerstand	Schichttyp	Schichtegrad
	tex	g/cm ³	µm	GPa	GPa	%	µΩm		%
50k	3300	1,8	7	4,0	240	1,7	15	Epoxid	1,0

Für die mit Glasfasern durchgeführten Versuche wurde ein Roving Typ Single-End SE 1200 Type 30 von Owens Corning [127] mit einer Filamentanzahl von 4000, einer Garnfeinheit von 2400 tex sowie einer Dichte der Glasfasern von 2,55 g/cm³ verwendet, wie in Tabelle 3.2 dargestellt.

Tabelle 3.2: Eigenschaften des verwendeten Glasfaserrovings [127]

Filamentanzahl	Garnfeinheit	Dichte	Einzelfilamentdurchmesser	Zugfestigkeit	Interlaminarescherfestigkeit	Bruchdehnung	Einzelfilamentwiderstand	Schichttyp	Schichtegrad
	tex	g/cm ³	µm	GPa	MPa	%	µΩm		%
4k	2400	2,55	16	2,71	66,3	-	-	Epoxid	-

Ein Bisphenol-A-basiertes Bindersystem (LT 3366) von Huntsman Advanced Materials, Schweiz [128] wurde zur Fixierung der Rovings bei der Ablage genutzt. Die Eigenschaften sind in Tabelle 3.3 dargestellt.

Tabelle 3.3: Eigenschaften des Bindermaterials

Dichte bei 25 °C	Flammpunkt
g/cm ³	°C
1,17 – 1,19	≥ 215

Einige Preforms wurden vernäht, um die Permeabilität zu beeinflussen. Hierzu wurden Polyester-Nähfäden eingesetzt. Als Oberfaden wurden die Umspinnzwirne Saba C 35 (84,8 tex) sowie Saba C 80 (46,2 tex) von Amann verwendet. Als Unterfaden wurde der glattere Serafil 30 Multifilamentfaden von Amann mit einer Feinheit von 90 tex eingesetzt. Die Daten sind in

Tabelle 3.4 zusammengefasst. Die Angaben zum Fadendurchmesser wurden mit der Annahme eines kreisförmigen Querschnittes bestimmt.

Tabelle 3.4: Eigenschaften der eingesetzten Nähfäden von Amann [129]

Nähfaden	Tex Nr.	Dichte in g/cm ³	Farbe	Fadendurchmesser in µm
Saba C 35	80	1,5	weiß	268
Saba C 80	40	1,5	weiß	198
Serafil 30	90	1,5	weiß	276

3.2 Methoden

3.2.1 Herstellung der Preforms

Zur Herstellung der Preforms im Dry Fiber Placement-Verfahren werden die einzelnen Rovings sequentiell in Bahnen nebeneinander zu Einzellagen abgelegt. Da die Fasern wie vom Hersteller auf Spule angeliefert, deutliche Breitenschwankungen aufweisen, werden diese zunächst mittels einer Aufspulvorrichtung durch eine Spreizeinheit gezogen, hierbei auf eine definierte Breite gespreizt und dann auf eine Transferspule aufgespult [15].

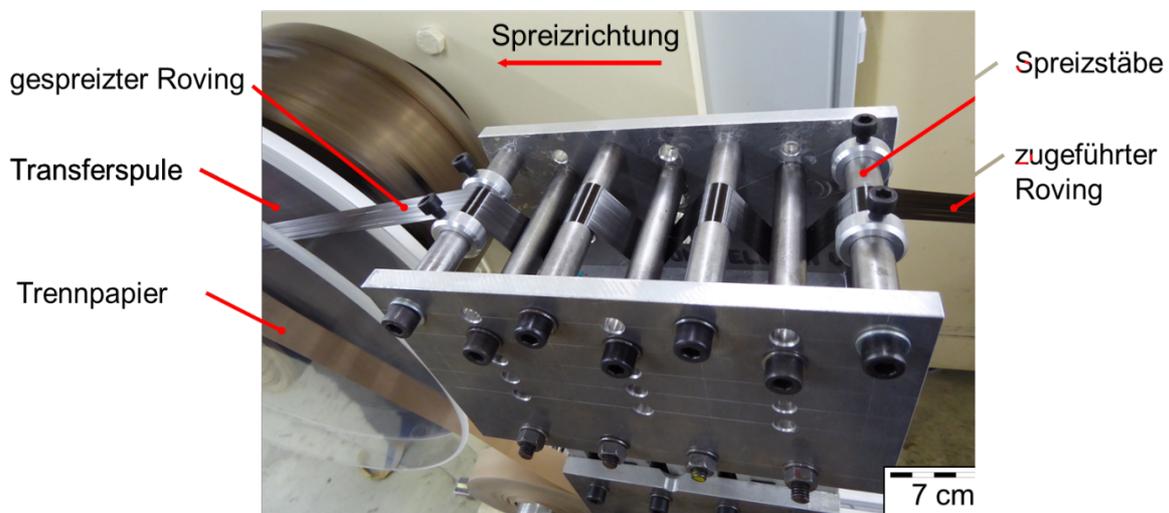


Abbildung 3.1: Spreizeinheit zum Anbau an Wickelmaschine

Die angelieferte Spule wird am Spulenständer aufgespannt. Der Roving wird über ein Führungsgatter umgelenkt und der Spreizeinheit zugeführt, wo durch mehrfache Umlenkung der Fasern ein Spreizeffekt entsteht. Die Rovingbreite wird mittels Begrenzungsvorrichtungen eingestellt. Der gespreizte Roving wird mittels Zuführung von Trennpapier auf einer Transportspule gespeichert. Im Anschluss erfolgt ein erneutes Umspulen, um den Roving möglichst spannungsfrei und ohne Trennpapier auf einer Kunststoffspule für die Ablage verwenden zu können.

Zur Ablage der Preforms wurde ein vorhandener Thermoplasttapelegeprüfstand um die notwendigen Komponenten erweitert und die Steuerungssoftware adaptiert.

Dieser Prüfstand wurde konzipiert, um vorimprägnierte Thermoplasttapes und bebinde Rovings auf einem ebenen Werkzeug definiert ablegen zu können. Hierbei ist der Tapelegekopf (sog. Endeffektor) fest gelagert, und das Werkzeug bewegt sich

darunter durch. Dieses wird durch einen Motor während der Ablage in Längsrichtung der Fasern bewegt, zwischen den Einzelbahnen wird der Bahnabstand durch Bewegung des Werkzeugs um eben diesen durch einen Motor eingestellt. Das Werkzeug ist zur Ablage von Fasern 90° zur Vorzugsrichtung händisch drehbar, hierdurch sind alternierende Lagenaufbauten möglich. Der Gesamtaufbau ist in Abbildung 3.2 dargestellt.

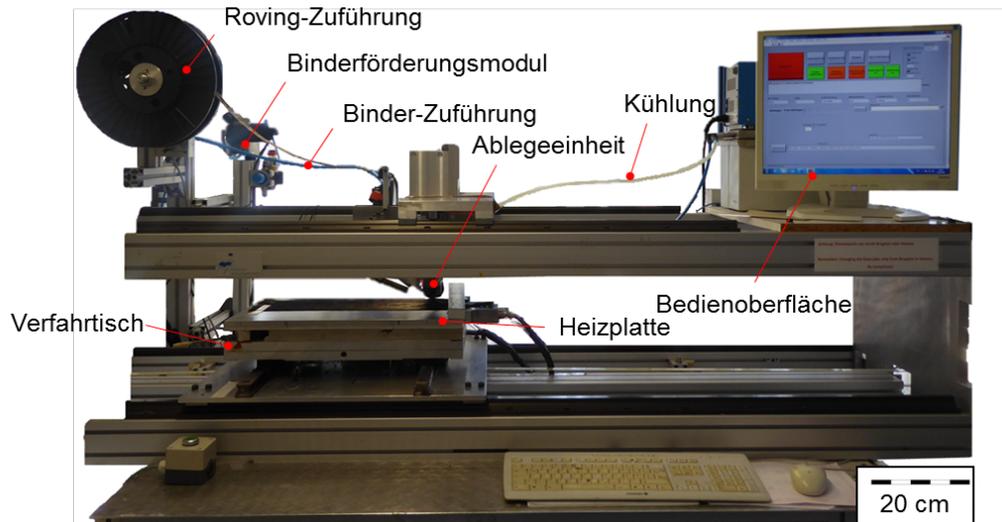


Abbildung 3.2: Thermoplasttapelegeprüfstand (THP III) zur Ablage von DFP-Preforms

Es erfolgt eine Regelung der Temperaturen der Heizplatte sowie der Konsolidierungsrolle, der zugeführten Gasmengen für die Heißgasdüse und der Verfahrgeschwindigkeit der Heizplatte während der Ablage.

Zur Verarbeitung von zuvor unbedinderten Rovings wurde der Prüfstand um die in situ-Zuführung von Binderpulver im Ablegepunkt ergänzt (Abbildung 3.3).

Die Erwärmung des Bindermaterials erfolgt über eine Heißgasdüse, welche ein Sauerstoff-Wasserstoffgemisch verwendet. Der Roving wird über eine breitenangepasste Führung bereitgestellt, die innengekühlte Kompaktierungsrolle drückt den Roving an das Substrat an. Das bewegliche Werkzeug ist als Heizplatte ausgeführt und kann temperaturgesteuert werden.

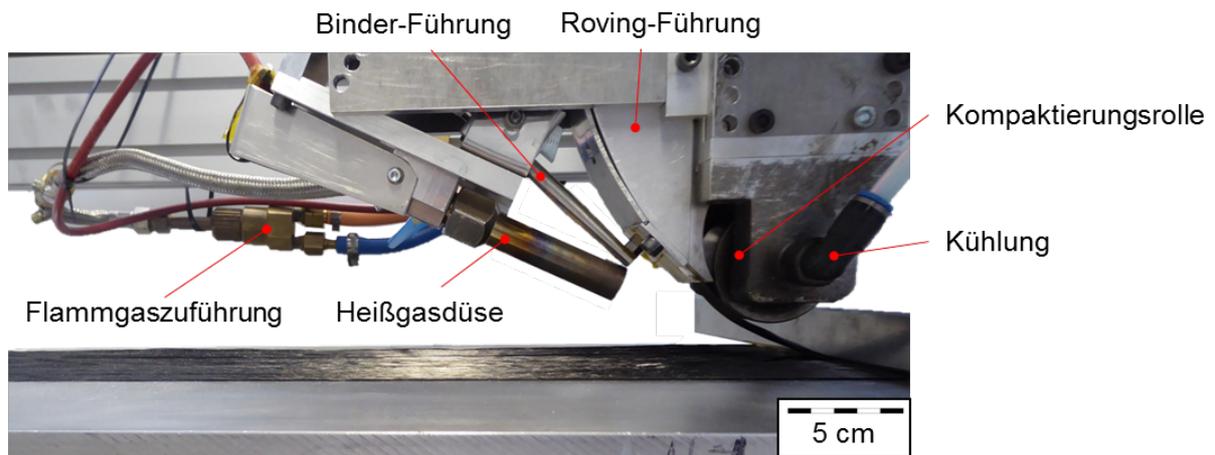


Abbildung 3.3: Ablegeeinheit am Tapelegeprüfstand mit hinzugefügter Binderzuführung

Um das Bindermaterial im Ablagepunkt zuführen zu können, wurde die von Mack [15] entwickelte Bebindereinheit am Prüfstand angebaut (Abbildung 3.4). Diese fördert das Bindermaterial mittels eines drehzahlgesteuerten Sperrrades in einen vorbeigeführten Luftstrom.

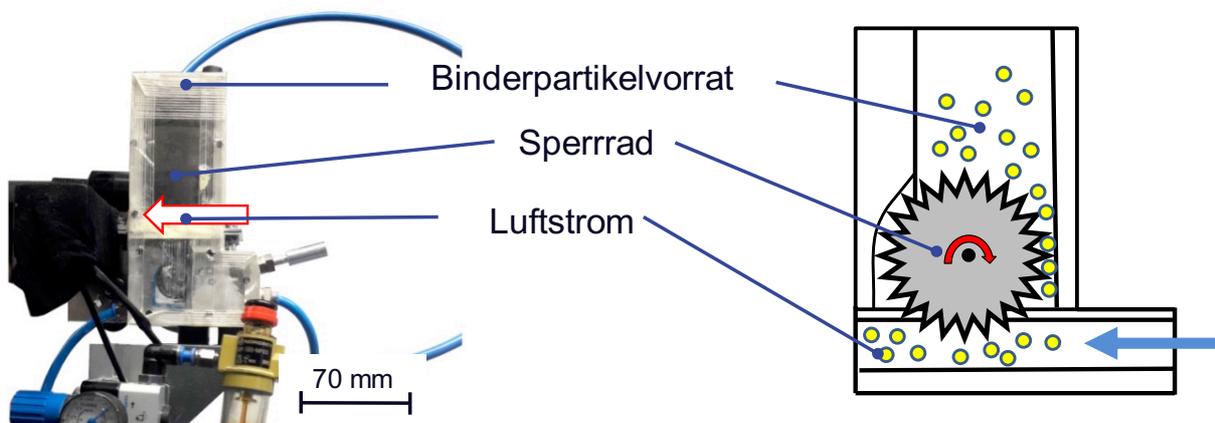


Abbildung 3.4: Binderförderungsmodul von Mack [15]

Dieser transportiert das Binderpulver bis in den Ablagepunkt. Über ein zwischengeschaltetes 5/2-Wege-Magnetventil kann hierbei die Binderförderung schnell ein- und ausgeschaltet werden. Die Einstellung der Bindermenge erfolgt über die Regelung der Sperrradgeschwindigkeit, die hierbei ermittelte Ausbringungsmenge je Zeit und die Ablagegeschwindigkeit. Im Anschluss an die Ablage wurde jede einzelne Preform gewogen, um die Konstanz der eingebrachten Materialmengen sicherzustellen. Die Parameter der abgelegten Preforms sind in Tabelle 3.5 dargestellt.

Tabelle 3.5: Übersicht über die abgelegten Preforms

Versuchstyp	Fasertyp	Größe in mm x mm	Bahnen	Lagen	Lagen- aufbau	Flächengewicht Fasern in g/m ²
Permeabilitäts- messungen	CF	380x144	6	8	[0] ⁸ [0/90] ⁴	1079
	GF	380x144	28	4	[0] ⁴ [0/90] ²	1920
Zugversuche	CF	280x240	10	7	[0] ⁷	944
		280x120	5			
Biegeversuche	CF	280x120	10	14	[0] ¹⁴	1888
Kompaktierungs- versuche	CF	280x240	10	8	[0] ⁸	1079
		240x216	9			

3.2.2 Permeabilitätsmessung

Zur Durchführung der Dickenpermeabilitätsmessungen wurde die HyKoPerm2-Messzelle ([130–132], Abbildung 3.5) genutzt. Die Messungen wurden im gesättigten Zustand durchgeführt. Als Messfluid kam Rapsöl der Firma Bellasan zum Einsatz, da es nichtreaktiv ist, im Messbereich ein newtonsches Fließverhalten aufweist sowie einfach zu entsorgen ist [44]. Die Viskosität (73 mPas bei RT) und Oberflächenspannung (33,67 mN/m bei RT) liegen im Bereich von typischen Epoxidharzen bei Verarbeitungstemperatur.

Die Probe wird in der Messeinrichtung von unten nach oben mit einem Differenzdruck von 1 bar durchströmt, dabei kann der sich einstellende Volumenstrom werden. Hieraus lässt sich mittels des Gesetzes von Darcy die Dickenpermeabilität ermitteln.

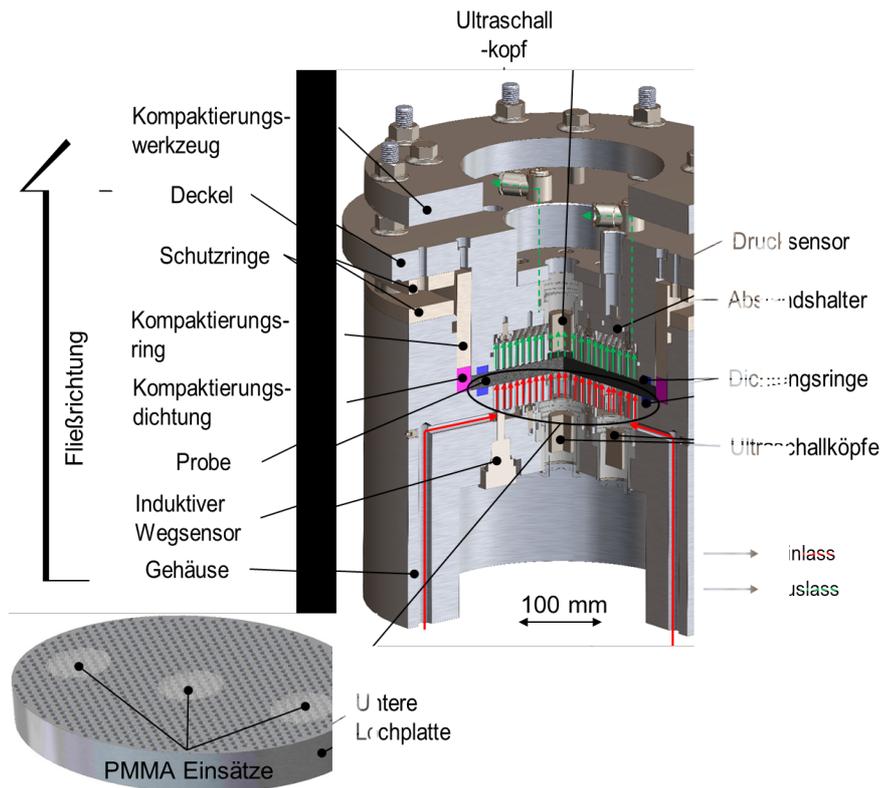


Abbildung 3.5: CAD-Darstellung der HyKoPerm2-Messzelle mit eingebauten Ultraschallköpfen [131]

Die Proben für die Permeabilitätsmessung in der HyKoPerm-Messzelle werden aus den Preforms entnommen, indem elliptische Fixierungsrahmen oberhalb und unterhalb der Preform miteinander verschraubt werden. Im nächsten Schritt können diese dann ohne Faserverschiebungen oder ähnliche Beeinträchtigungen zu verursachen ausgeschnitten bzw. ausgestanzt werden und anschließend in die Messzelle überführt werden (Abbildung 3.6).

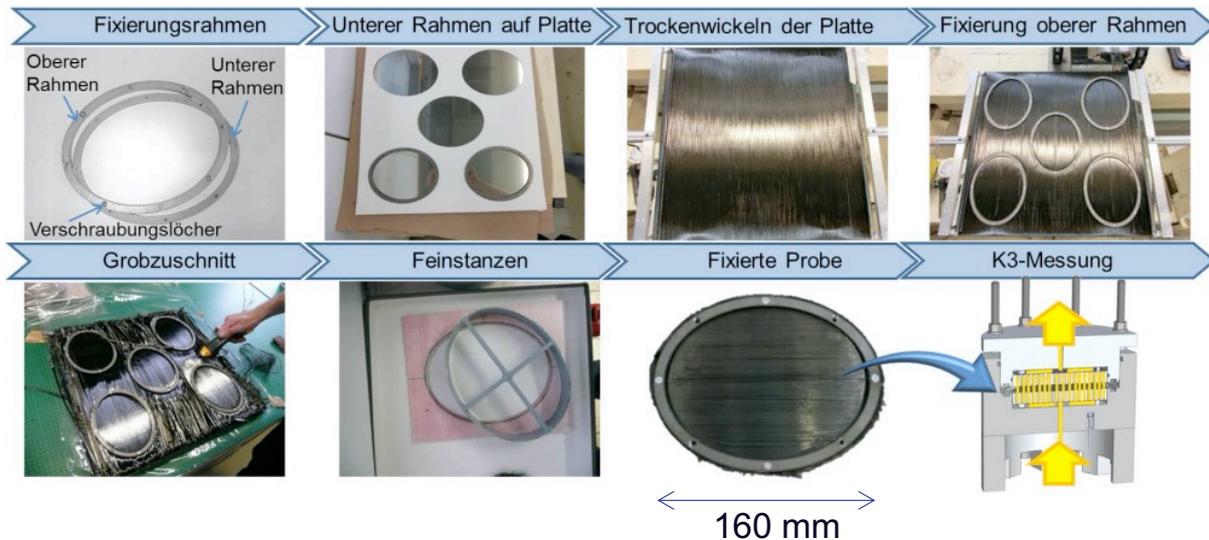


Abbildung 3.6: Applizieren der Fixierungsrahmen zur Messung der Dickenpermeabilität an DFP-Preforms

3.3 Voruntersuchung zum Einfluss der Preformstruktur auf die Dickenpermeabilität

In einem ersten Schritt erfolgt das Screening verschiedener Strukturvariationen, um sie auf ihre Effektivität hinsichtlich der Verbesserung der Dickenpermeabilität zu untersuchen.

3.3.1 Ansatz

Um die Eigenschaften der Preform hinsichtlich der Imprägnierbarkeit zu beeinflussen, wird die Struktur auf mehreren Ebenen verändert. Die eingebrachten Variationen beeinflussen die Struktur wie folgt:

- Mikrofließkanäle eingebracht durch Veränderung des Binderanteils
- Mikrofließkanäle eingebracht durch gezielte Selektion der Binderpartikelgröße
- Mesofließkanäle eingebracht durch Veränderung der Ablagesequenz
- Mesofließkanäle eingebracht durch einen Vernähungsschritt.

Um die Effekte dieser Strukturvariationen auf die Dickenpermeabilität der Preforms zu untersuchen, wurden Proben hergestellt und deren Dickenpermeabilität mit dem HyKoPerm2-Messsystem gemessen.

3.3.2 Versuchsplan

Eine Übersicht der durchgeführten Versuche ist in Tabelle 3.6 dargestellt. Der jeweils modifizierte Parameter ist farbig hinterlegt. Der Bindergehalt wird berechnet als die hinzugefügte Masse bezogen auf die Masse des unbehandelten Rovings. Die Partikelgröße wurde von der angelieferten Mischung durch Aussieben verschiedener Partikelgrößen variiert.

Tabelle 3.6: Versuchsplan

Preform	Bindergehalt	Partikelgröße	Lagenaufbau	Nachbehandlung
	Gewichts-%			
1	4,07	Referenzmischung ⁷	(0/90) ⁴	-
2	6,23	Referenzmischung.	(0/90) ⁴	-
3 (Referenz)	7,06	Referenzmischung	(0/90) ⁴	-
4	9,28	Referenzmischung	(0/90) ⁴	-
5	9,76	Referenzmischung	(0/90) ⁴	-
6	7,06	> 250 µm	(0/90) ⁴	-
7	7,06	125 µm < d < 250 µm	(0/90) ⁴	-
8	7,06	Referenzmischung	Modifiziert (siehe Text)	-
9	7,06	Referenzmischung	(0/90) ⁴	Vernähen

Die einzelnen Messungen wurden zur statistischen Absicherung mit je Parametersatz drei Proben durchgeführt.

3.3.3 Ergebnisse

Bindergehalt

Es ist zu betrachten, wie die Variation des Bindergehaltes die Dickenpermeabilität beeinflusst. Das Bindermaterial wird im Prozess appliziert, um die Rovings während der Ablage zu fixieren. Die Präsenz von Binderpartikeln kann kleine Fließkanäle zwischen den Rovings schaffen und potentiell die hydrodynamische Kompaktierung während der Injektion reduzieren, da Nestingeffekte vermindert werden. Allerdings wird durch die enthaltenen Binderpartikel (vgl. Abbildung 3.7) gleichzeitig auch der für das Fluid verfügbare Porenraum reduziert, was wiederum zu einer Verminderung

⁷ Siehe Messung der Partikelgrößen in Kapitel 3.3.3

der Permeabilität führen kann. In der durchgeführten Studie wurde der Binderanteil (bezogen auf die Masse des Rovings) zwischen 4,07 und 9,76 Gew.-% variiert (Abbildung 3.8).

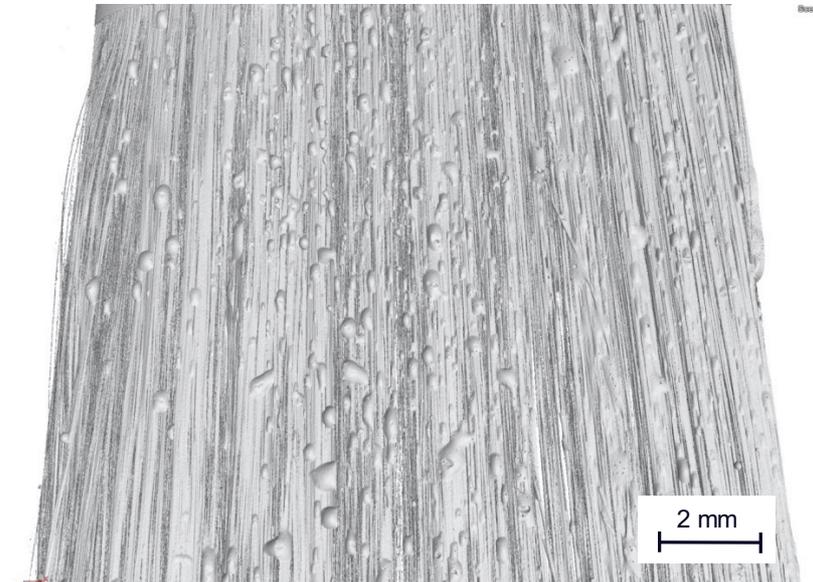


Abbildung 3.7: μ CT-Scan eines bebinderten Rovings

Eine leichte Erhöhung der Permeabilität bei höherem Binderanteil kann beobachtet werden. Der angenommene positive Effekt von mehr Binderpartikeln in der Preform könnte aber bei höheren Bindergehalten durch lokale Blockierung des Fließens aufgehoben werden. Das Ergebnis zeigt, dass positive und negative Effekte eng miteinander einhergehen und eine gezielte Permeabilitätserhöhung durch Variation des Bindergehaltes fraglich ist. Weiterhin zeigt das Ergebnis, dass der Bindergehalt sorgsam gewählt werden muss, um ein wiederholbares Imprägnierverhalten zu erreichen. Der beobachtete Variationskoeffizient der Dickenpermeabilität erhöht sich von 5,31 % bei einem Bindergehalt von 4,07 % auf 24,75 % bei einem Bindergehalt von 9,76 %. Darüber hinaus könnte ein sehr hoher Bindergehalt auch zu Einflüssen auf die mechanischen Eigenschaften des fertiggestellten Bauteils führen, die ebenso berücksichtigt werden müssen.

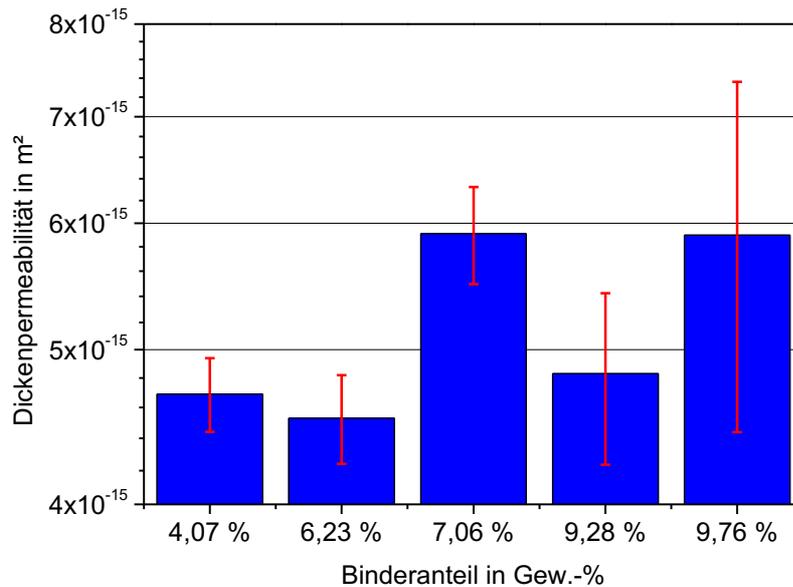


Abbildung 3.8: Dickenpermeabilität der Preforms bei 52-55 % mit verschiedenen Binder-Massgehalten

Binderpartikelgröße

Neben der Menge des Bindermaterials kann auch die Größe der einzelnen Binderpartikel variiert werden. Das Bindermaterial wurde in einem Siebturm analysiert. Etwa 50 % der Binderpartikel haben eine Größe zwischen 125 und 250 μm und etwa 26 % sind größer als 250 μm (Abbildung 3.9). Der Durchmesser der verwendeten Kohlenstofffasern beträgt im Vergleich dazu 7 μm , die Abstände zwischen einzelnen Fasern liegen im Bereich weniger μm , somit ist ein Passieren der Faserschicht durch die Binderpartikel nicht möglich.

Der Einfluss der Binderpartikelgröße auf die Dickenpermeabilität wurde durch Verwendung der ausgesiebten Einzelpartikelgrößen untersucht. Für den Vergleich wurde die Dickenpermeabilität unter Verwendung von mittelgroßen und großen Binderpartikeln im Vergleich zur angelieferten Mischung ermittelt. Die Verarbeitung der kleinsten Binderpartikel alleine war aufgrund von Limitationen des Binderaustragsystems technisch nicht durchführbar (verstärktes Austreten der Partikel durch die Dichtungen). Alle Messungen wurden bei einem Bindergehalt von ≈ 7 Gew.-% durchgeführt.

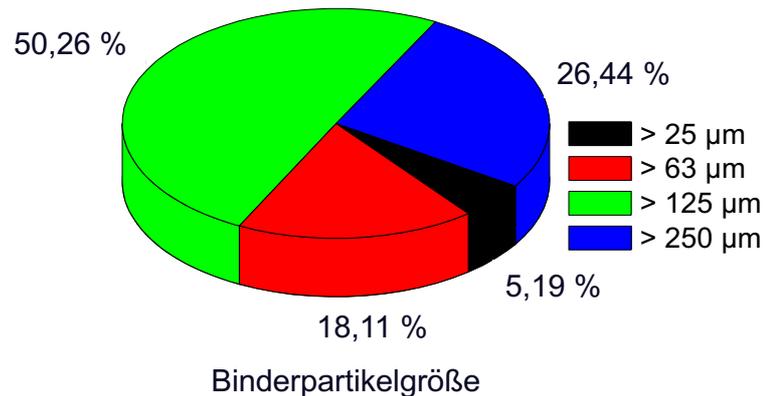


Abbildung 3.9: Zusammensetzung der Binderpartikelgrößen im angelieferten Zustand. Vergleichbar zu den Effekten, die hinsichtlich des Bindergehalts beschrieben wurden, wird angenommen, dass größere Partikel durch Verringerung der lokalen Verschiebung von Einzelfasern zu einer höheren Permeabilität beitragen können. Da die durchgeführten Messungen bei gleichem Bindergehalt mit unterschiedlichen Binderpartikelgrößen durchgeführt wurden, verändert sich die Anzahl der enthaltenen Binderpartikel und die beobachteten Effekte können für größere Partikelgrößen teilweise aufgehoben werden. Dies wird auch in den Ergebnissen beobachtet (Abbildung 3.10).

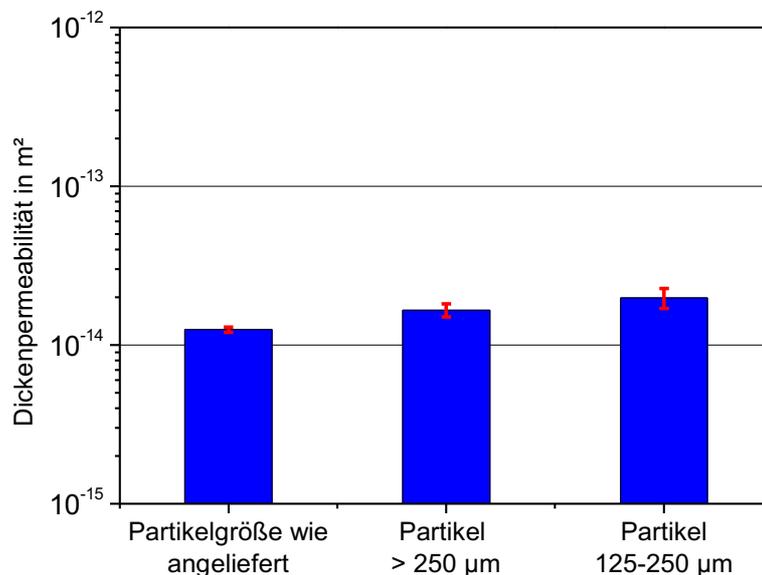


Abbildung 3.10: Vergleich der Dickenpermeabilität für verschiedene Binderpartikelgrößen

Modifikation der Ablagesequenz

Ein Grund für die Abwesenheit von Mesofließkanälen in DFP-Preforms verglichen zu textilen Halbzeugen sind die parallelen Ablagepfaden, die zu einer sehr gleichmäßigen Faserverteilung quasi ohne Ondulationen führen. Eine potentielle Möglichkeit das Imprägnierverhalten zu verbessern ist die Modifikation der Ablagesequenz des Materials, um sanfte Ondulationen hervorzurufen. In dieser Studie wurden zwei verschiedene Ablagestrategien zur Herstellung einer $[0/90]_n$ -Preform verglichen. Für die Referenzpreform wurden 8 alternierende Lagen in 0° und 90° gelegt, wobei die Rovings möglichst lücken- und gassenfrei nebeneinander positioniert wurden. Zur Veränderung der Struktur wurde eine Preform gelegt, welche aus 2·8 alternierenden 0° und 90° -Lagen besteht (Schematische Darstellung in Abbildung 3.11), wobei die Rovings jeweils mit einer Lücke von einer Rovingbreite positioniert wurden (fertiggestellte Preform in Abbildung 3.12, links).

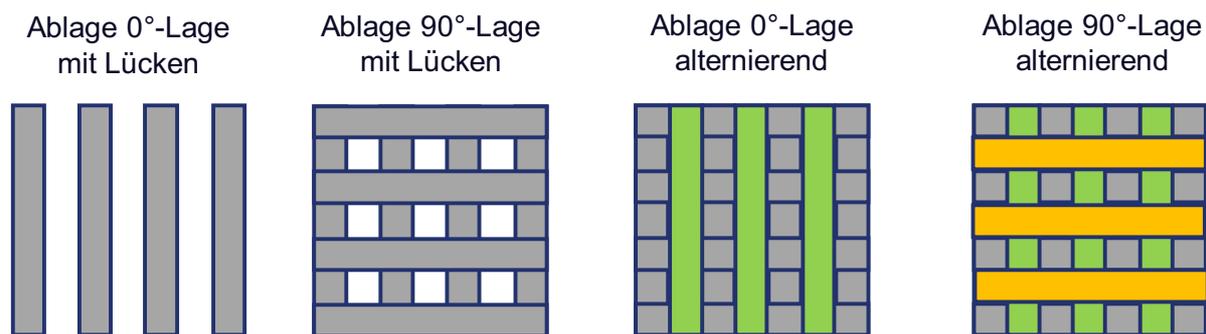


Abbildung 3.11: Schematische Darstellung der alternierenden $0/90^\circ$ -Ablage

Dies führt zum gleichen Flächengewicht und daher bei gleicher Kavitätshöhe zum gleichen Faservolumengehalt, wobei die Rovings verglichen zur Referenz leicht onduliert vorliegen. In Gewebematerialien führt diese Ondulation zu einer höheren Permeabilität im Vergleich zu den DFP-Preforms, da Lücken auf Mesoebene zwischen den Rovings entstehen. Allerdings enthält die hier hergestellte Preform keine Knotenpunkte. Als Ergebnis wurde die Dickenpermeabilität bei gleichem Faservolumengehalt um Faktor 2,2 erhöht (Abbildung 3.12, unten).

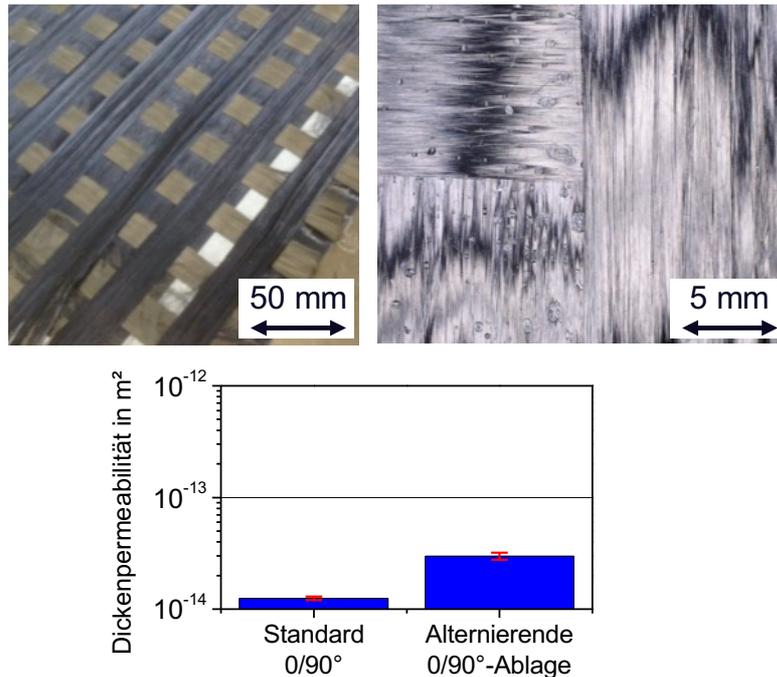


Abbildung 3.12: Preform mit verändertem Lagenaufbau, Foto (oben links), Oberflächenmikroskopie (oben Mitte) und Vergleich der Permeabilität mit der Referenzpreform (unten)

Durch die Ondulation der Fasern weist diese Preform im nicht kompaktierten Zustand eine höhere Dicke verglichen mit der Referenzpreform und würde daher in einem Vakuuminfusionsprozess eine höhere Enddicke aufweisen. Die Messungen hier wurden jedoch bei gleichem mittleren Faservolumengehalt durchgeführt, wodurch die gesteigerte Permeabilität kein Resultat einer veränderten Gesamtporosität, sondern nur der gesteigerten Inhomogenität der Porosität ist.

Zusammenfassend wurde die Permeabilität der Preform im Vergleich zur Referenz mehr als verdoppelt. Allerdings muss beachtet werden, dass diese Veränderung nur für die Herstellung eines $[0/90]_n$ -Lagenaufbaus verwendet werden kann. Trotzdem ist der Ansatz, durch gezielt gelegte Lücken, die erst in der nächsten Lage geschlossen werden sanfte Ondulationen einzubringen eine effektive Variante zur Steigerung der Permeabilität bei einer geringen zu erwartenden Einbuße der mechanischen Eigenschaften, da die Radien der Faserkrümmung im Vergleich zu Gewebematerialien wesentlich größer sind. Der Variationskoeffizient der Permeabilität betrug 4,03 % für die Referenzpreforms und 7,45 % für die veränderte Ablagesequenz

Einbringen von Fließkanälen durch Vernähen

Neben Geweben zeigen auch Gelege ein Imprägnierverhalten, das durch weite industrielle Anwendung nachweislich großserientauglich ist. Da diese im Vergleich zu Geweben keine Mesofließkanäle durch Verwebung aufweisen, kann die vergleichsweise hohe Permeabilität in Dickenrichtung durch die faserfreien Regionen in Dickenrichtung durch die enthaltene Verwicklung erklärt werden [133]. Der Einfluss einer solchen Strukturvariation auf DFP-Preforms wurde auch für diese Studie untersucht. Die Preforms wurden mittels eines Doppelsteppstiches (Fadenspannung des Oberfadens 122 cN) vernäht, der Unterfaden wurde im Anschluss entfernt. Hierfür erfolgte die Einstellung der Unterfadenspannung so, dass die Knoten unterhalb der Preform lagen, der Unterfaden lag also gestreckt vor. Der verwendete Faden war ein Amann Saba C50 mit einem Stichabstand von 3 mm. In Summe wurden auf der für die Messung verwendeten Ellipsenfläche 1070 Stiche in einem Rechteckmuster mit einer Musterweite von 10 mm eingebracht, wie in Abbildung 3.13 zu sehen. Wie auch in der Oberflächenmikroskopie zu erkennen ist, werden die Fasern an der Oberfläche zu Bündeln zusammengezogen und Lücken in der Preform entstehen.

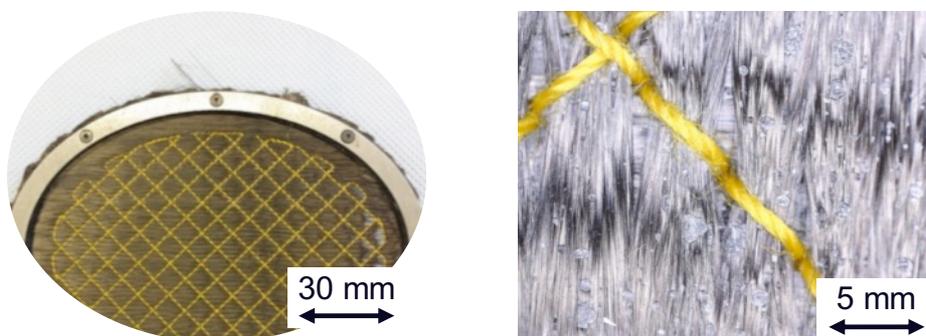


Abbildung 3.13: Vernähte Preform für die Dickenpermeabilitätsmessung (links), Oberflächenmikroskopie der Preform (rechts)

Diese Lücken sollen als Fließkanäle sowohl in Dicken- als auch in Ebenenrichtung wirken. Im Schliff einer im VARI-Verfahren injizierten Preform (Abbildung 3.14) und in einem μ CT-Scan (Abbildung 3.15) können die Fließkanäle ebenfalls beobachtet werden.

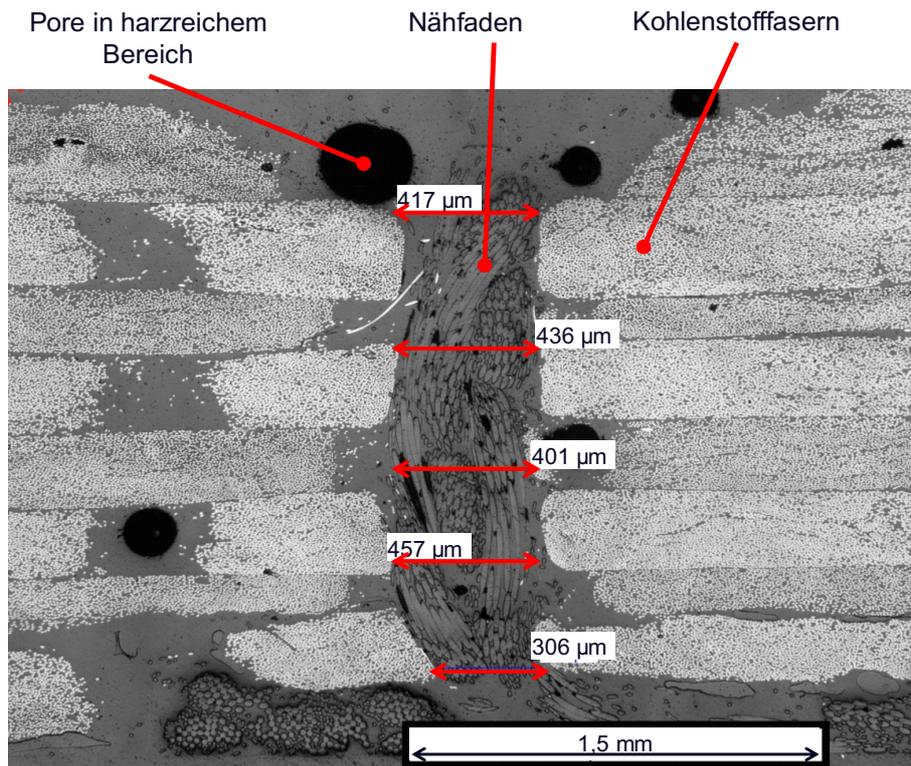


Abbildung 3.14: Schliff (Fasern in $\pm 45^\circ$) einer vernähten Preform nach VARI-Injektion.

Der μ CT-Scan zeigt, dass die eingebrachten Fließkanäle die Form einer Sammellinse haben, da die Fasern um den Stichpunkt herum umgelenkt werden. Die durch den Nähfaden eingebrachte Spannung auf die Fasern kompaktiert diese lokal (in der Folge steigt in den Bündeln der Faservolumengehalt). Dies verursacht einen größeren Porenraum direkt um den Nähfaden. Insgesamt erfolgt bei gleicher Kavitätshöhe jedoch keine Reduktion des Faservolumengehaltes⁸, somit wäre jeder Einfluss auf mechanische Eigenschaften nur durch eingebrachte Ondulation bzw. Einzelfaserschädigung zurückzuführen. In Summe führt der durchgeführte Nähvorgang zu einer Vergrößerung der Dickenpermeabilität um etwa Faktor 30 im Vergleich zur Referenzpreform (Abbildung 3.16). Die Erhöhung des Variationskoeffizienten erfolgte von 4,03 % bei der Referenzpreform auf 7,20 % bei der vernähten Preform.

Soll dieses Verfahren zur Herstellung von Near-net-shape-Preforms verwendet werden, muss beachtet werden, dass die Anwendbarkeit des Vernähungsschrittes je nach gewünschter Preformgeometrie, insbesondere bei 3D-Geometrien, beschränkt

⁸ Der Faservolumengehalt bleibt gleich, der Porengehalt sinkt aufgrund des hinzugefügten Nähfadens.

sein kann. Des Weiteren ist dies ein zusätzlicher Prozessschritt, der ggf. die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens reduzieren kann.

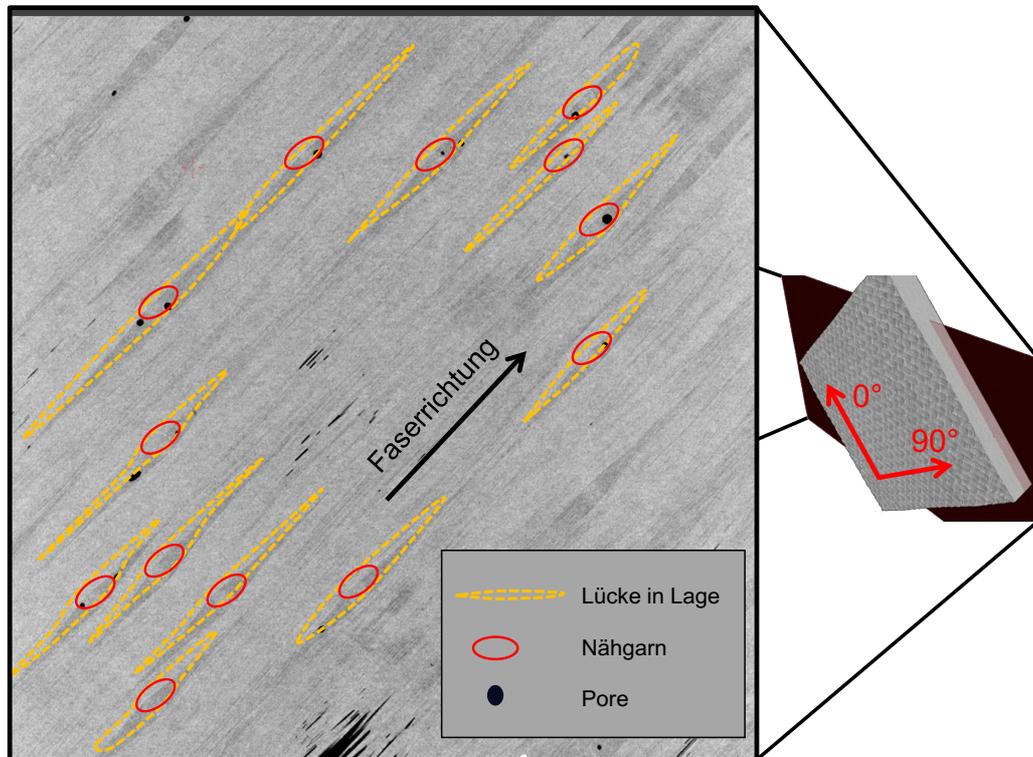


Abbildung 3.15: μ CT-scan der injizierten DFP-Preform. Horizontaler Schnitt durch eine Lage mit Garn und dadurch verursachte Lücken in der Faserstruktur

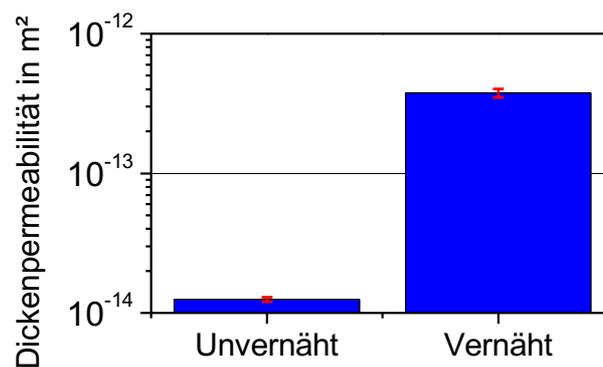


Abbildung 3.16: Vergleich der Dickenpermeabilität zwischen Referenzpreform und vernähter Preform

3.4 Einfluss der Vernähung auf das Kompaktierungsverhalten

3.4.1 Vorgehen der Kompaktierungsprüfung

Das Kompaktierungsverhalten der Preform hat im LCM-Prozess einen großen Einfluss, da sowohl beim Schließen der Kavität auf den Soll-Faservolumengehalt als auch beim Injizieren der Matrix Kompaktierungseffekte auftreten können. Daher werden trockene Preforms auf ihr Kompaktierungsverhalten untersucht. Hierzu werden Kompaktierungsproben mit einem Durchmesser von 100 mm aus DFP-Preforms ausgestanzt (Abbildung 3.17). Je Versuchsvariante wurden 4 Proben getestet, die Nähparameter sind in Tabelle 3.7 dargestellt.

Tabelle 3.7: Näheinstellungen der Kompaktierungsproben

Variante	Stich- abstand	Naht- abstand	Nähfaden	Faden- spannung	Verschiebung	Lagen- aufbau
Referenz	-	-	-	-	-	[0] ₈
5 mm Näh	5 mm	5 mm	Saba C35	122 cN	Keine	[0] ₈
15 mm Näh	5 mm	15 mm	Saba C35	122 cN	Keine	[0] ₈

Aus einer Preform können 4 Kompaktierungsproben ausgestanzt werden. Am Rand der Probe entsteht aufgrund des auf 240 x 180 mm² begrenzten Nähfeldes ein kleiner unvernähter Teil (Abbildung 3.17), der allerdings weniger als 5 % der Probenfläche beträgt und daher vernachlässigt wird.

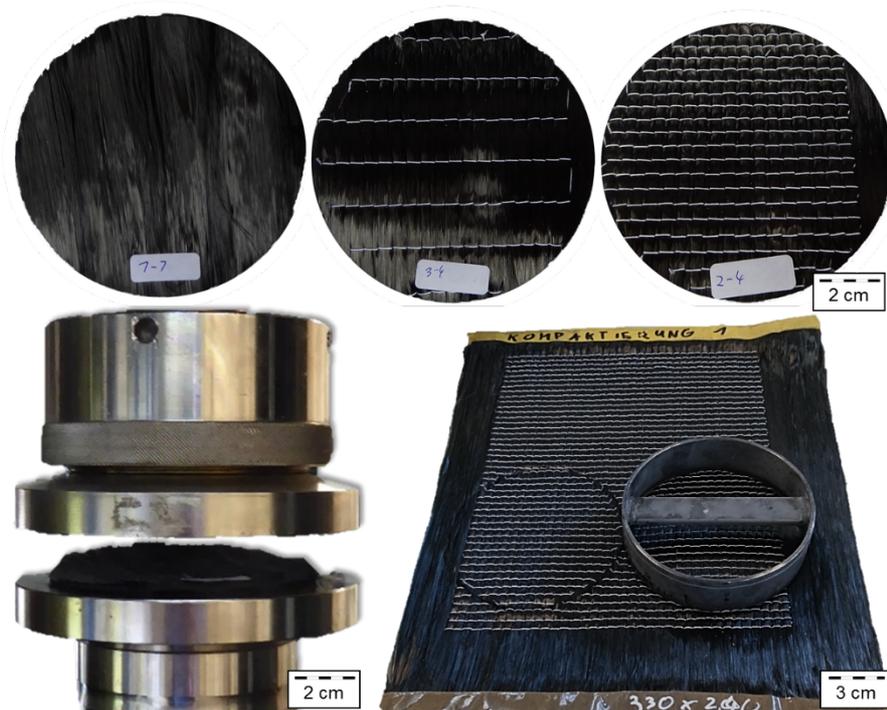


Abbildung 3.17: Oben: ausgestanzte Kompaktierungsproben (v. l. n. r.: Referenz, 15 Näh, 5 mm Näh); unten: zwischen die Prüfstempel eingelegte Probe (links) und Ausstanzen der Proben aus einer Preform (rechts)

Nach Vorbereitung der Proben werden diese auf einer Universalprüfmaschine⁹ zwischen zwei kreisrunden Prüfstempel kompaktiert. Die Nachgiebigkeit der Maschinenbauteile wird durch vorheriges Durchfahren der Prüflasten aufgenommen und von den späteren Ergebnissen subtrahiert, um die reine Kompaktierung der Proben aufnehmen zu können. Zunächst wird eine Vorkraft von 5 N aufgebracht, was dem Schließen der Prüfvorrichtung entspricht. Anschließend wird mit 1 mm/min bis zur maximalen Kraft von 20.000 N belastet und diese Kraft für 1 min gehalten. Im Folgenden wird bis zu einer Kraft von 55 N entlastet. Dieser Zyklus wird fünffach wiederholt, um Setzeffekte in der Preform beobachten zu können.

3.4.2 Ergebnisse der Kompaktierungsprüfung

Mittels des zuvor ermittelten Flächengewichtes der Preform kann aus dem aufgezeichneten Stempelabstand der aktuelle Faservolumengehalt zu jedem Zeitpunkt während der Messung berechnet werden. Das Ergebnis ist die aufgewendete Kompaktierungskraft in Abhängigkeit des erreichten Faservolumengehalts, wie in Abbil-

⁹ ZwickRoell 1474

Abbildung 3.18 zeigt den Verlauf der ersten Kompaktierung von unvernähten und vernähten Preforms. Bei der Betrachtung der aufgezeichneten Verläufe ist ersichtlich, dass der Kraftanstieg der vernähten Preforms bei wesentlich niedrigeren FVG beginnt als bei den unvernähten Preforms. Weiterhin ist zu erkennen, dass der enge Nahtabstand von „5 mm Näh“ einen zusätzlichen Kompaktierungswiderstand im Vergleich zu „15 mm Näh“ erzeugt. Konkret wird zur Kompaktierung der Preform auf 55 % FVG bei den unvernähten Preforms eine Kraft von 415 N (Mittelwert) benötigt, während beim Nahtabstand 15 mm bereits das 2,7-fache (1542 N) und bei 5 mm Nahtabstand das 12,4-fache (5567 N) benötigt wird. Hieraus kann darauf geschlossen werden, dass die Vernähung einen erheblichen zusätzlichen Kompaktierungswiderstand erzeugt. Eine mögliche Erklärung ist die starke Bündelung der Fasern während des Vernähens, die lokale sehr kompakte Faserpakete erzeugt, die bereits sehr dicht vorliegen. Diese werden durch den Nähfaden gegen seitliches „Verrutschen“ gesperrt, hierdurch muss zur Kompaktierung eine sehr große Kraft aufgewendet werden. Darüber hinaus nimmt der Nähfaden ebenso ein Volumen ein und wirkt somit der Kompaktierung entgegen. Dieses ist jedoch im Vergleich zu den vorhandenen Kohlenstofffasern sehr gering und daher vernachlässigbar.

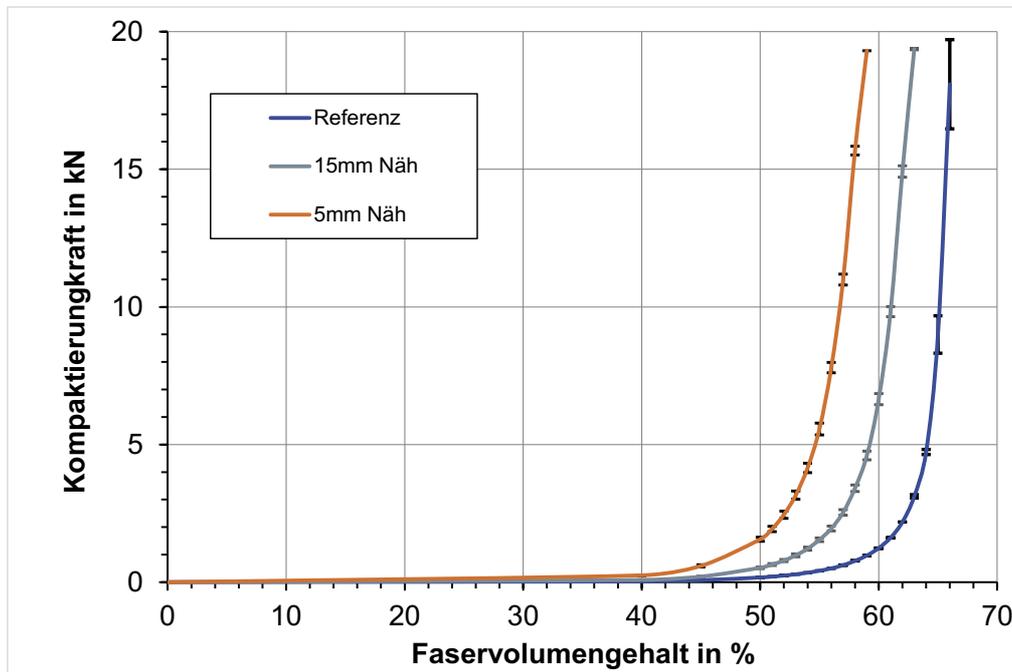


Abbildung 3.18: Vergleich des Verlaufs der ersten Kompaktierung von unvernähten und vernähten Preforms.

Betrachtet man nun die benötigte Kraft zur Kompaktierung der Proben auf einen FVG von 55 % für die vernähten und unvernähten Proben zeigt sich, dass alle Konfigura-

tionen mit steigender Anzahl der Zyklen die Kompaktierungskraft wesentlich abnimmt. Die Verhältnisse zwischen den verschiedenen Konfigurationen, d. h. dass die unvernähte Preform am leichtesten zu kompaktieren ist und mit verringertem Nahtabstand die Kompaktierungskraft weiter steigt, bleiben über die Zyklen gleich.

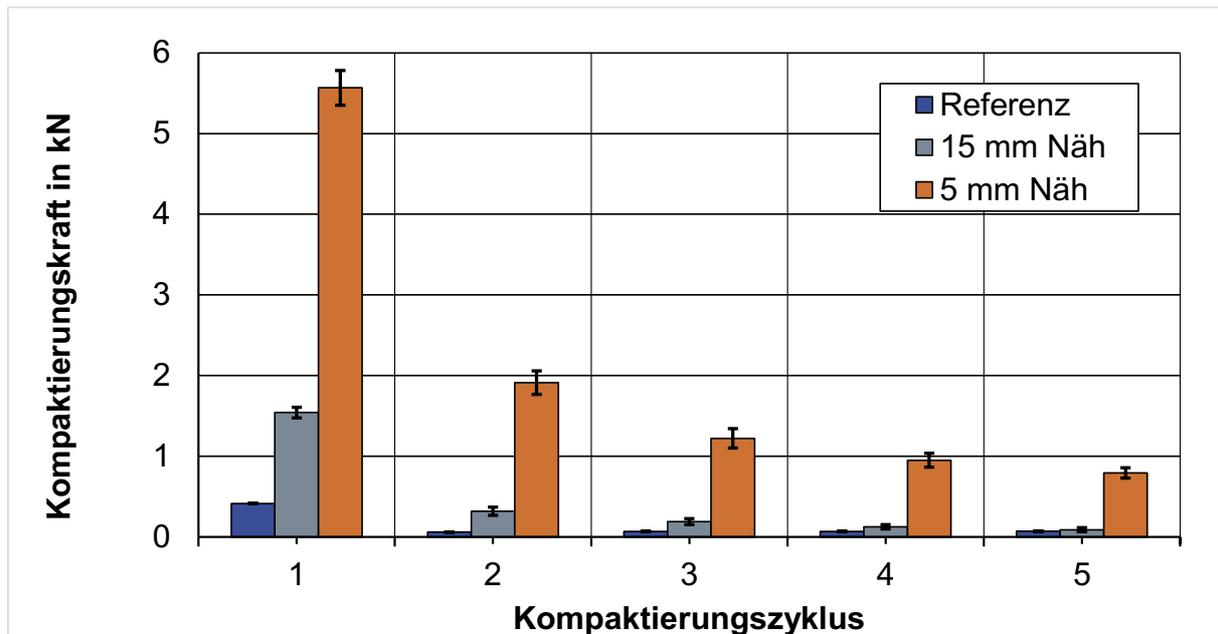


Abbildung 3.19: Benötigte Kompaktierungskraft zur Kompaktierung der Preform auf 55 % FVG bei steigender Zahl der Kompaktierungszyklen

3.5 Detaillierte Untersuchung des Einflusses der Vernähung auf die Dickenpermeabilität

In den Voruntersuchungen konnte gezeigt werden, dass sich die Dickenpermeabilität von Dry Fiber Placement Preforms durch Vernähung sehr stark beeinflussen lässt.

Dies wird im Folgenden genutzt, um gezielt eine Variation der Permeabilität auf Mesoebene vorzunehmen und einzelne Einflüsseffekte zu untersuchen.

Wie bereits dargestellt, ist bei textilen Halbzeugen die Permeabilität hauptsächlich auf der Makroebene zugänglich, gängige Messungen werden an Lagenaufbauten aus mehreren Einzellagen in Ebenen- und Dickenrichtungen durchgeführt. Die spezielle Struktur von Dry Fiber Placement Preforms ermöglicht hierbei die Messung einer nahezu ungestörten Mikropermeabilität, da bei einer reinen 0°-Ablage eine sehr große Preformstruktur aus nahezu homogen parallel angeordneten Fasern entsteht. Mittels Einbringung der Vernähung kann dann im nächsten Schritt die Mesostruktur

gezielt variiert werden, um deren Einfluss auf die Permeabilität zu untersuchen (Abbildung 3.20).



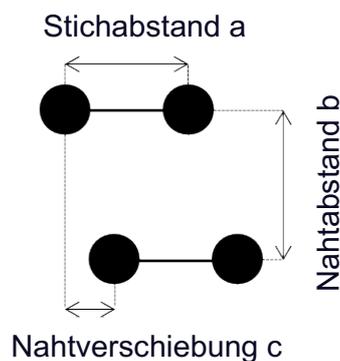
Abbildung 3.20: Übersicht über die Untersuchung der Permeabilität von Dry Fiber Placement Preforms auf Mikro- und Mesoebene

3.5.1 Versuchsplan

Zunächst wird die Untersuchung der Dickenpermeabilität von unvernähten und vernähten Preforms in Abhängigkeit des Faservolumengehaltes (bei 50, 55 und 60 %) bei einem Differenzdruck von 1 bar untersucht und dargestellt. Die verwendeten Preform- und Nähparameter sind in Tabelle 3.8 dargestellt. Es erfolgt eine enge Vernähtung mit einem Stich- und Nahtabstand von jeweils 5 mm, um eine starke Beeinflussung der Permeabilität zu erreichen.

Tabelle 3.8: Preform- und Nähparameter zum Vergleich von Referenz- und vernähten Preforms

Typ	Stichabstand	Nahtabstand	Nähfaden	Faden-Spannung	Nahtverschiebung	Lagenaufbau
Referenz	-	-	-	-	-	$[0]_8$
Vernäht	5 mm	5 mm	Saba C80	Normal	Keine	$[0]_8$



Im zweiten Schritt werden Nähparameter gezielt variiert, um ihren Effekt und die Wechselwirkungen zu untersuchen.

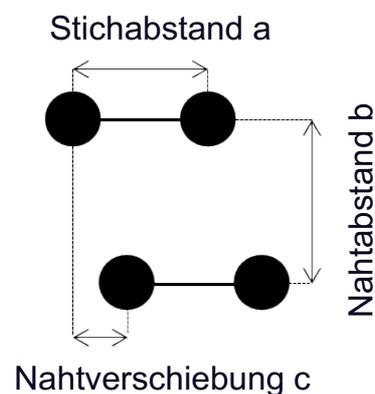
Während des Vernähens der Preform können verschiedene Parameter potentiell einen Einfluss auf die Dickenpermeabilität haben:

- Fadenspannung des Oberfadens: Beeinflussung der Größe des durch den Nähfaden offengehaltenen durchgängigen Fließkanals, indem Einzelfasern zur Seite gezogen werden
- Titer des Oberfadens: Beeinflussung der Größe des durch den Nähfaden offengehaltenen durchgängigen Fließkanals durch größeren Nähfadendurchmesser
- Stichabstand der Einzelstiche: Beeinflussung der Anzahl der Fließkanäle
- Nahtabstand: Beeinflussung der Anzahl der Fließkanäle
- Nahtverschiebung: Beeinflussung der Interaktion der Einzelstiche benachbarter Nähte
- Lagenaufbau: Beeinflussung der Geometrie der durchgängigen Fließkanäle

Die Faktoren und verwendeten Stufen sind in Tabelle 3.9 aufgeführt und verbildlicht.

Tabelle 3.9: Faktoren zur Untersuchung der Nähparameter.

Faktor	Name	Steps	
		-1	1
A	Fadenspannung	Erhöht	Normal
B	Fadenlängengew.	80 tex	40 tex
C	Stichabstand a	5 mm	15mm
D	Nahtabstand b	a	2a
E	Nahtverschiebung c	0	0,5a
F	Lagenaufbau	$[0]_8$	$[0/90]_4$



Die DFP-Preforms wurden an einer Pfaff-Nähmaschine Typ 3574 vernäht. Hierzu werden die Proben in einen Spannrahmen eingelegt und entsprechend des Stichprogramms zum jeweiligen Parametersatz vernäht. Aufgrund des Randabstandes von ca. 20 mm ist durch die Klemmung keine Beeinflussung der Vernähung zu erwarten.

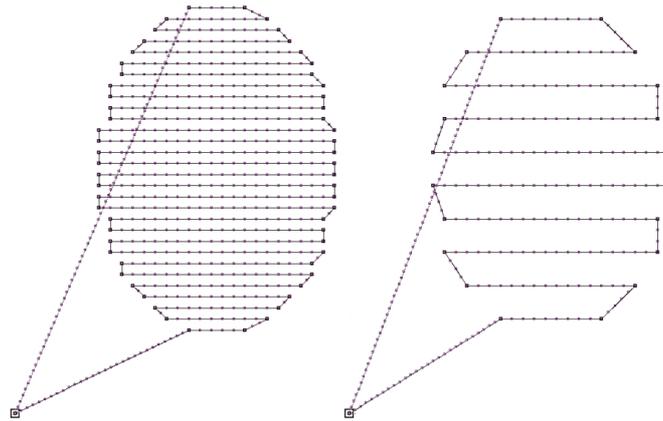


Abbildung 3.21: Beispielhafte Nähprogramme mit Nahtabstand 5 mm (links) sowie 15 mm (rechts)

Die Proben werden mit einem Doppelsteppstich Typ 30 vernäht. Bei einem Teil der Preforms wird der Unterfaden nach dem Nähen entfernt. Bei diesen dienen zwei 3 mm dicke Selitac Faltplatten aus extrudiertem Polystyrolschaum (XPS) sowie eine Vakuumfolie als Unterlage, sodass außerhalb der Preform regelmäßige Schlaufen entstehen und der Unterfaden gestreckt vorliegt. Durch die glatte Oberfläche des Serafil 30 Unterfadens und der Vakuumfolie lässt sich der Unterfaden leicht entfernen. Das Vorgehen ist in Abbildung 3.22 und Abbildung 3.23 dargestellt.

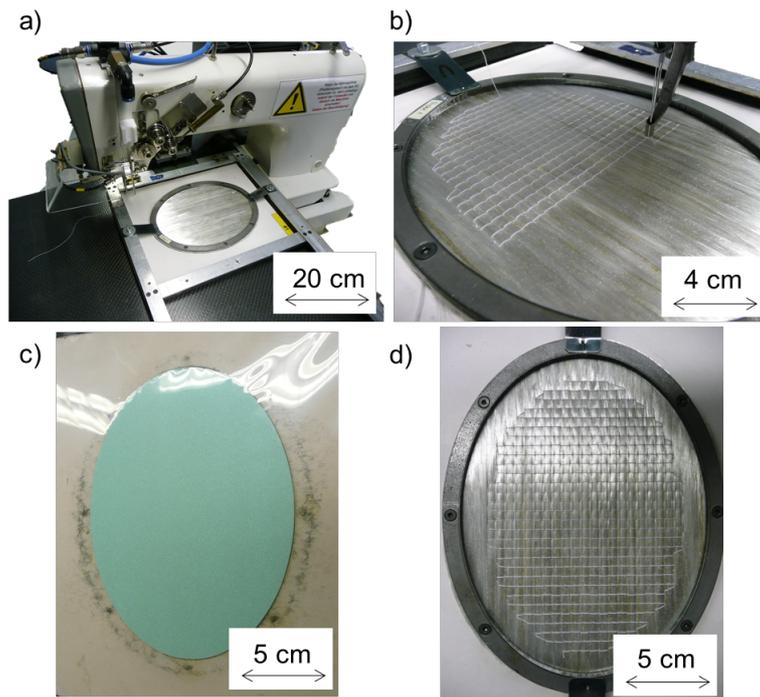


Abbildung 3.22: a) Pfaff-Nähmaschine mit eingespannter Ellipse b) Proben während des Nähvorgangs c) Probe mit zwei XPS-Platten und Vakuumfolie von unten d) in Nährahmen eingespannte Probe

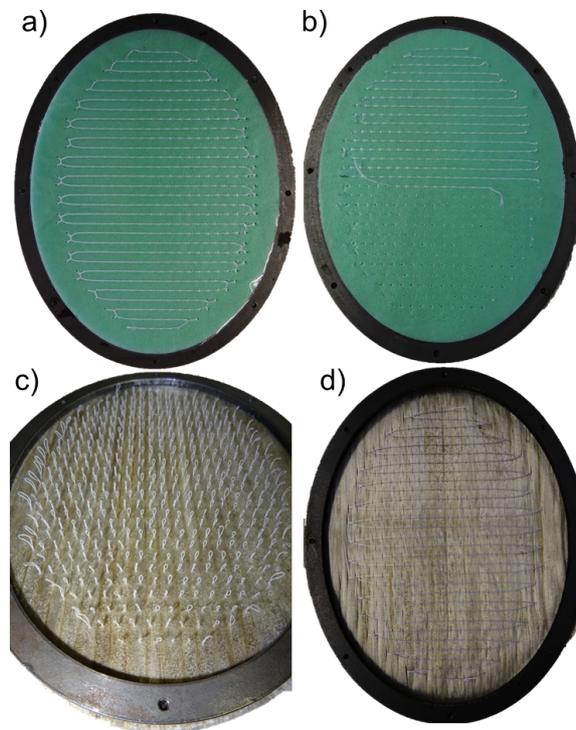


Abbildung 3.23: Probenunterseiten a) Naht vor dem Entfernen des Unterfadens b) Naht beim Entfernen des Unterfadens c) quasi-getuftete Probe nach entfernen der XPS-Platten d) Probe mit vorhandenem Unterfaden

3.5.2 Ergebnisse

Die Diskussion erfolgt zunächst anhand der CF-Preforms, die GF-Preforms werden getrennt diskutiert.

CF-Preforms

Im Vergleich zu den Referenzpreforms führte die Vernähung zu einer signifikanten Erhöhung der Dickenpermeabilität um bis zu Faktor 50 bei einem Faservolumengehalt von 50 % (Abbildung 3.24).

Bei steigendem Faservolumengehalt (durch Kompaktierung nach dem Vernähen) sinkt die Dickenpermeabilität der Preforms aufgrund der reduzierten Porosität. Die Referenzpreforms zeigen eine Reduktion von K_3 um 17 % von 50 zu 55 % FVG und um 22 % von 55 zu 60 %. Unter Berücksichtigung der Standardabweichung dieser Messungen, kann eine nahezu lineare Abnahme der logarithmisch aufgetragenen Permeabilität bei steigendem FVG angenommen werden. Dies ist ein Verhalten das auch in theoretischen Modellen wie dem von Gebart gezeigt wurde [54].

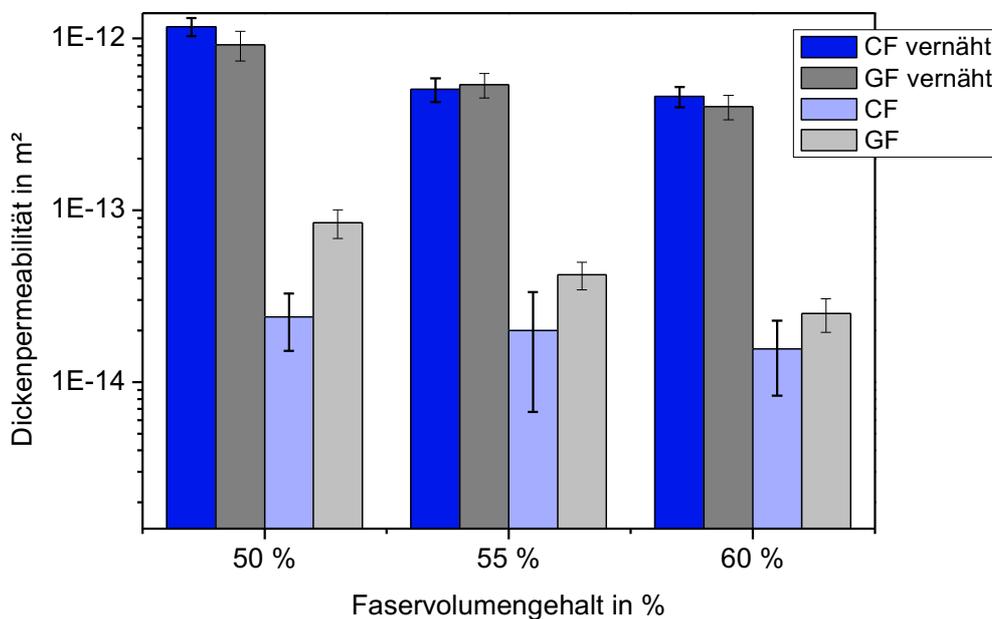


Abbildung 3.24: Messung der Dickenpermeabilität der Referenz- und vernähten Preforms bei 5 mm Stichabstand, 5 mm Nahtabstand, Titer 40 Denier, Fadenspannung 122 cN, keine Verschiebung, UD-Lagenaufbau

Im Vergleich dazu zeigen die vernähten Proben einen anfänglichen Abfall von K_3 um etwa 57 % von FVG 50 % zu 55 %, bei der nächsten Steigerung des FVG um 5 %

sinkt K3 nur noch um 9 %. Daher kann von einem degressiven Rückgang der Permeabilität bei gesteigertem FVG ausgegangen werden. Wenn man die Mikrostruktur der unvernähten und der vernähten Preform (Abbildung 3.25) vergleicht, kann hierzu eine Hypothese aufgestellt werden.

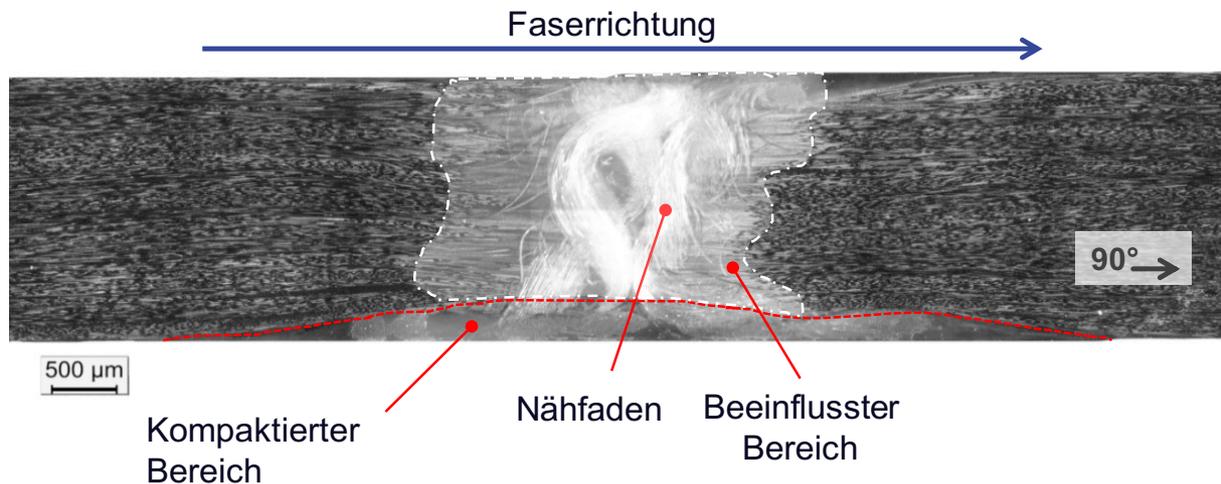


Abbildung 3.25: Schliff durch vernähte Preform mit Darstellung des durch den Nähfaden beeinflussten Bereichs

Die unvernähte Preform weist eine gleichmäßige Porosität von Mikrokanälen zwischen Einzelfasern auf, die während der Kompaktierung auf den FVG vor der Messung im gesamten Volumen gleichmäßig geschlossen werden, daher ist die Änderung von K3 nahezu linear. Im Vergleich dazu weist die vernähte Preform eine stark ungleichmäßige Porosität auf. Bei der Kompaktierung der Preform werden sich zunächst die Fasern in Richtung der offenen Stichkanäle verschieben und diese teils verschließen, wodurch eine starke Reduktion von K3 stattfindet. Bei weiterer Kompaktierung wirkt allerdings die Vernähung und Präsenz des Nähfadens als Kompaktierungshindernis und die Mikroporosität der umgebenden Faserstruktur verringert sich. Die Mesofließkanäle um den Nähfaden werden jedoch durch diesen offengehalten. Diese Erklärung zum Kompaktierungsverhalten wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit durch Kompaktierungsmessungen verifiziert werden.

Der Unterschied der Preformstruktur kann auch bei der Betrachtung der Standardabweichung der Messungen beobachtet werden. Die Referenzproben zeigen eine Standardabweichung der Dickenpermeabilität von etwa 66 % des Messwertes, die vernähten Proben jedoch nur 16 %. Dies kann wiederum durch die Dominanz des

Fließens durch die eingebrachten Fließkanäle erklärt werden. Da diese den größten Anteil des gemessenen K_3 ausmachen, führen diese gleichmäßig verteilten geometrisch definierten Fließkanäle zu einer kleinen Standardabweichung. Dagegen neigt die reine Mikropermeabilität der Referenzpreforms zu einer starken Beeinflussung durch Varianz bei der Ablage wie Faserondulationen sowie Schwankungen des Eingangsmaterials.

Glasfaserpreforms

Betrachtet man nun die Glasfaserpreforms im Vergleich zu den Kohlenstofffaserpreforms, so ist bei den unvernähten Preforms zunächst eine deutlich höhere Dickenpermeabilität der Glasfaserpreforms über alle FVG hinweg festzustellen. Dies kann gut über die größeren Fließkanäle zwischen einzelnen Fasern aufgrund des größeren Faserdurchmessers erklärt werden.

Hinsichtlich der vernähten Preforms liegen CF und GF auf einem vergleichbaren Niveau innerhalb des Vertrauensbereiches der Standardabweichung. Somit kann vermutet werden, dass die durch Vernähen eingebrachten Fließkanäle ausreichend dominant sind, dass der Faserdurchmesser keinen signifikanten Einfluss auf die Permeabilität hat.

Zur Untersuchung der Effektivität der einzelnen Parameter werden diese entsprechend des Vorgehens der statistischen Versuchsplanung [134] durch Subtrahieren der Mittelwerte aller Messungen auf den entsprechenden Stufen berechnet. Die berechneten Effekte sind in Tabelle 3.10 dargestellt. Der Vergleich des berechneten Effektes mit der beobachteten Zufallsstreuung zeigt, ob dieser signifikant (ein wahrer Effekt) ist.

Tabelle 3.10: Effekte der Faktoren auf die Dickenpermeabilität bei 1 bar Druckdifferenz

K3 in m ²	Faktor A: Fadenspannung	Faktor B: Fadenlängengewicht	Faktor C: Stichabstand a	Faktor D: Nahtabstand b	Faktor E: Nahtversch. c	Faktor F: Lagenaufbau
Stufe +	Normal	40 tex	15 mm	2a	0,5 a	[0/90] ₈
Mittelwert +	$1,64 \cdot 10^{-13}$	$1,21 \cdot 10^{-13}$	$3,97 \cdot 10^{-14}$	$1,08 \cdot 10^{-13}$	$1,70 \cdot 10^{-13}$	$4,81 \cdot 10^{-14}$
Stufe -	Erhöht	80 tex	5 mm	a	a	[0] ₈ (UD)
Mittelwert -	$1,84 \cdot 10^{-13}$	$2,27 \cdot 10^{-13}$	$3,08 \cdot 10^{-13}$	$2,40 \cdot 10^{-13}$	$1,78 \cdot 10^{-13}$	$3,00 \cdot 10^{-13}$
Effekt	$-2,07 \cdot 10^{-14}$	$-1,06 \cdot 10^{-13}$	$-2,68 \cdot 10^{-13}$	$-1,31 \cdot 10^{-13}$	$-8,23 \cdot 10^{-15}$	$-2,52 \cdot 10^{-13}$

Abbildung 3.26 zeigt, dass Titer, Stichabstand, Nahtabstand und Lagenaufbau wahre Effekte sind, während Fadenspannung und Nahtverschiebung zufällige Effekte sind.

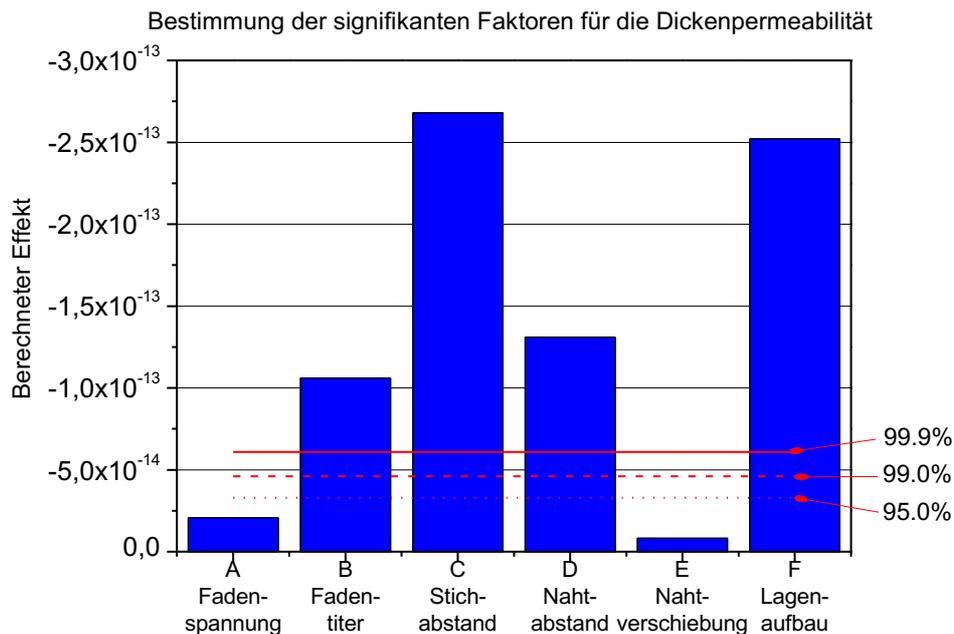


Abbildung 3.26: Wahre Effekte oberhalb des Konfidenzintervalls und zufällige Effekte unterhalb des Konfidenzintervalls für die Dickenpermeabilität

Bei der Betrachtung der Fadenspannung während der Vernähung und deren Einfluss auf K3 kann festgestellt werden, dass nahe der Preformoberfläche eine Bündelung von Fasern stattfindet (Abbildung 3.27). Wenn man die hierdurch entstehenden Fließkanäle vergrößern möchte, könnte man die Fadenspannung erhöhen. Dies könnte allerdings zur Beschädigung der Preform bzw. der Fasern führen oder durch

die Ondulation zu verringerten mechanischen Eigenschaften des Bauteils. Darüber hinaus ist der Effekt durch das Entfernen des Unterfadens durch die zur Verfügung stehende Reibung begrenzt, sodass Rückstelleffekte (insbesondere durch die nachfolgende Kompaktierung auf den Mess-FVG) nicht ausgeschlossen werden können. Insgesamt wird so die Effektivität der Fadenspannung begrenzt.

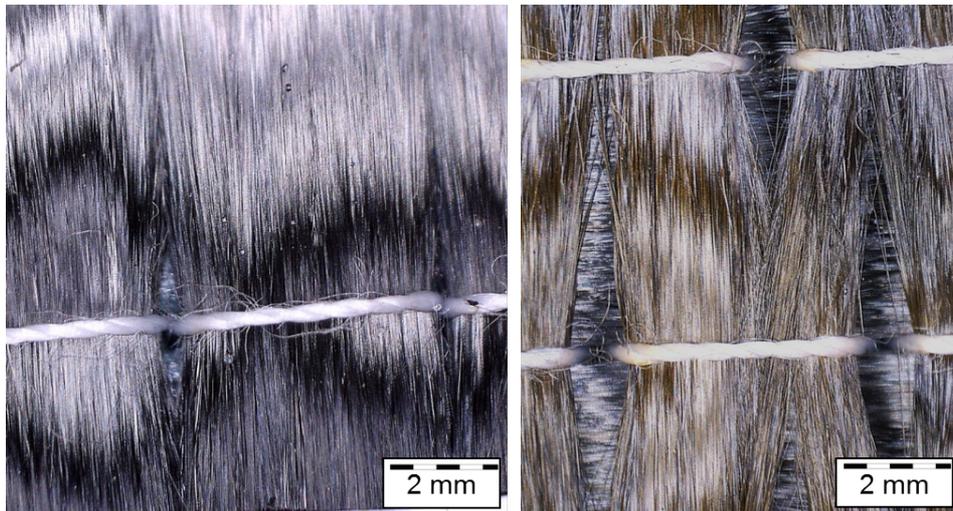


Abbildung 3.27: Verdeutlichung des Faserbündelungseffektes bei höherer Fadenspannung auf der Preformoberseite, links: reiner UD-Aufbau, rechts: 0/90°-Aufbau

Die Dickenpermeabilität wird beeinflusst durch die Anzahl und Größe der eingebrachten Fließkanäle. Daher zeigt der Nähfadentiter ebenso einen Effekt auf die Dickenpermeabilität wie die gesamte Stichdichte, die durch Einzelstichabstand und Nahtabstand bestimmt wird.

Eine Verschiebung der Naht führt nicht zu einer signifikanten Veränderung von K_3 , da sich die Stichdichte der Preform hierdurch nicht ändert. Erwartete Wechselwirkungen zwischen Stichen benachbarter Nähte wurden nicht beobachtet. Vermutlich wird dieser Effekt erst bei sehr kleinen Nahtabständen relevant.

Dagegen führte ein geänderter Lagenaufbau von 0° zu einem alternierend 0/90°-Aufbau zu einer starken Verringerung der Permeabilität. Ein möglicher Grund hierfür ist ein unterschiedliches Nestingverhalten. Während ein reiner UD-Lagenaufbau homogenes Nesting und daher eine homogene Mikroporosität aufweist, führt der Winkelunterschied der Einzellagen zwischen 0° und 90° -Lagen zur Präsenz von Zwischenschichten mit reduziertem Faservolumengehalt. Um den Gesamfaservolu-

mengehalt zu erreichen, muss sich in den Einzellagen durch Kompaktierung ein höherer Faservolumengehalt einstellen, der schlussendlich zu einer Verringerung der Gesamtpermeabilität führt. Für eine vernähte Preform kann in Abbildung 3.27 erkannt werden, dass die oberen Lagen eine wesentlich stärkere Faserbündelung erfahren, da die Einzellage auf der unterliegenden Lage „rutschen“ kann. Durch die limitierte Überlappung der entstehenden Lücken ist die Fläche des entstehenden projizierten Fließkanals für den 0/90°-Lagenaufbau kleiner (Abbildung 3.28). Im Falle des reinen UD-Lagenaufbaus ergibt sich ein größerer, durchgehender Fließkanal.

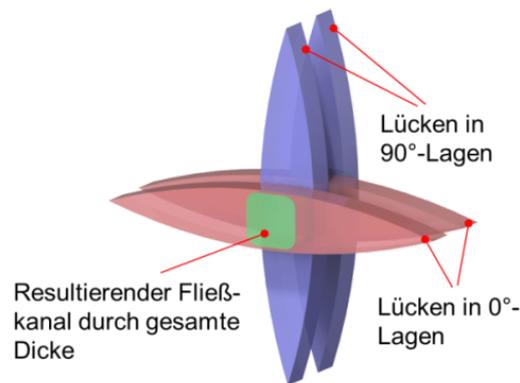


Abbildung 3.28: Schematische Darstellung des resultierenden Fließkanals in einem 0/90°-Lagenaufbau durch Vernähen

Neben den isolierten Effekten der Einzelparameter, müssen für ein volles Verständnis auch deren Interaktionen betrachtet werden. Die signifikanten Interaktionen sind in Abbildung 3.29 dargestellt. Es kann ein gegenläufiges Verhalten einiger Faktor bei Interaktion mit anderen Faktoren festgestellt werden. Die wichtigsten Korrelationen sind:

- Ein höherer Nähfadentiter erhöht K3 mehr bei geringeren Einzelstichabständen
- Ein höherer Nähfadentiter erhöht K3 mehr bei geringen Nahtabständen
- Im Falle des UD-Lagenaufbaus erhöht sich K3 bei einem höheren Nähfadentiter. Für einen 0/90°-Lagenaufbau hat ein geänderter Nähfadentiter wenig Auswirkung auf K3
- Die Erhöhung von K3 bei geringerem Nahtabstand ist bei geringeren Einzelstichabständen höher, da die Stichdichte durch beide Faktoren erhöht wird

- Die Erhöhung von K3 durch einen geringeren Einzelstichabstand ist beim UD-Lagenaufbau wesentlich höher als beim 0/90°-Lagenaufbau
- Die Erhöhung von K3 durch einen geringeren Nahtabstand ist beim UD-Lagenaufbau wesentlich höher als beim 0/90°-Lagenaufbau

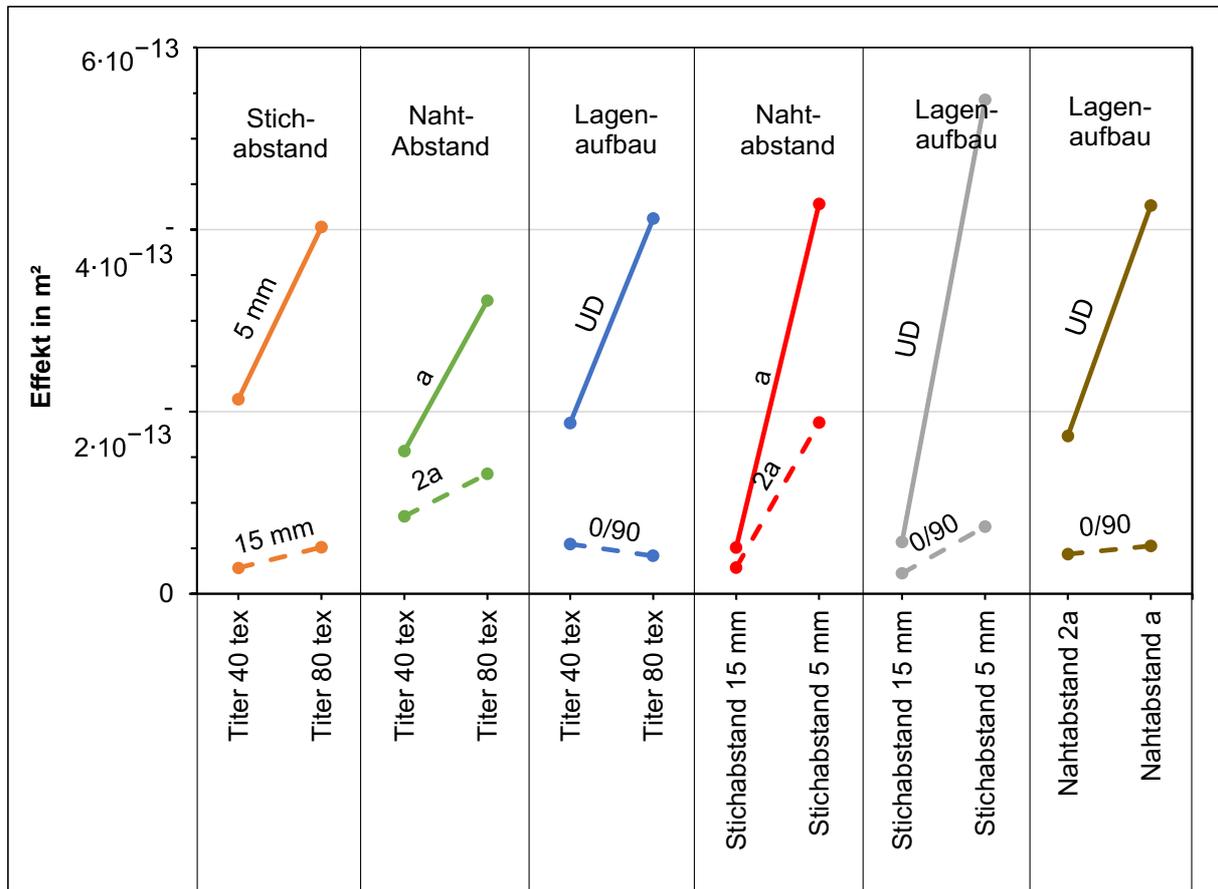


Abbildung 3.29: Effekte der signifikanten Interaktionen

Die Kombination von Einzelstichabstand und Nahtabstand führt zu einem kalkulierbaren Faktor der Stichdichte, dies bedeutet Anzahl der Stiche pro Fläche. Bei der Betrachtung von K3 für verschiedene Kombinationen dieser Faktoren kann festgestellt werden, dass K3 nahezu linear mit ansteigender Stichdichte ansteigt (Abbildung 3.30). Dies ist ein Resultat der Dominanz der Fließkanäle auf K3 im Vergleich zur wesentlich geringeren Mikroporosität zwischen den einzelnen Fasern. Dies trifft sowohl bei Betrachtung des reinen UD-Lagenaufbaus als auch des 0/90°-Lagenaufbaus zu.

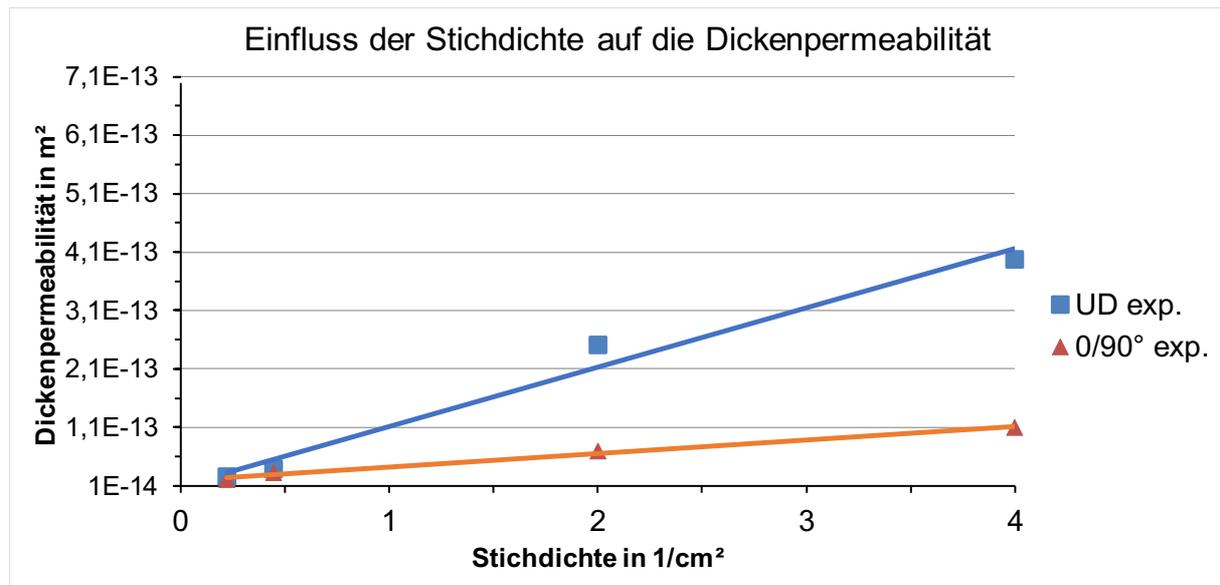


Abbildung 3.30: Dickenpermeabilität von vernähten Preforms bei verschiedenen Stichdichten mit Titer 40 tex, UD-Lagenaufbau bzw. 0/90°-Lagenaufbau

In Kapitel 2.4.3 wurde bereits ein Ansatz von Drapier [100] dargestellt, der die Umrechnung der Dickenpermeabilität auf andere Stichdichten ermöglicht.

$$K_{33}^{d_1} = K_{33}^{d_2} \frac{d_1}{d_2} \quad (7)$$

Auch in den hier gezeigten Ergebnissen erscheint diese Korrelation gültig. Diese Korrelation kann mit der vorliegenden Datenbasis allerdings nur im betrachteten Parameterraum bestätigt werden, ob eine Extrapolation möglich ist, kann nicht festgestellt werden. Trotzdem erlaubt dieser Schluss zumindest annäherungsweise die Abschätzung einer benötigten Stichdichte zur Erreichung einer bestimmten Dickenpermeabilität mit Kenntnis eines Permeabilitätswertes bei einer Stichdichte, wenn eine Sollpermeabilität beispielsweise für eine gegebene Imprägnieraufgabe vorgegeben ist.

3.5.3 Einfluss des Faserdurchmessers und den Einfluss des entfernten / nicht entfernten Unterfadens auf die Dickenpermeabilität

Wie bereits in Kapitel 3.5.2 gezeigt, haben vor allem der Fadendurchmesser, der Stichabstand, der Nahtabstand und der Lagenaufbau einen Einfluss auf die Dickenpermeabilität von vernähten Preforms.

Die Fadenspannung des Oberfadens sowie die Nahtverschiebung zeigten keinen signifikanten Einfluss auf die Permeabilität. Da in den durchgeführten Untersuchungen jeweils der Unterfaden entfernt wurde und ein „Springback“ des Oberfadens durch die Entfernung beobachtet wurde, soll nun ergänzend ein weiterer Versuchsplan durchgeführt werden, bei dem zusätzlich die Entfernung des Unterfadens als Faktor untersucht wird. Die bereits zuvor relevanten Faktoren Lagenaufbau und Nahtabstand werden wieder integriert, auf den Stichabstand wird verzichtet, da dieser vergleichbar zum Nahtabstand die Stichdichte variiert. Ebenso wird der Nähfadentiter nicht weiter betrachtet. Von besonderem Interesse ist schlussendlich die Interaktion zwischen dem vorhandenen oder entfernten Unterfaden sowie der Fadenspannung, da vermutet wird, dass die Fadenspannung bei vorhandenem Unterfaden einen größeren Einfluss auf die Permeabilität hat, da die Fadenspannung im vernähten Zustand erhalten bleibt. Die untersuchten Faktoren und Stufen sind in Tabelle 3.11 dargestellt.

Tabelle 3.11: Faktoren und Stufen für den ergänzenden Versuchsplan

A	Lagenaufbau	+	[0°]4
		-	[0°/90°]2
B	Unterfaden	+	vorhanden
		-	entfernt
C	Fadenspannung	+	normal (122 cN)
		-	erhöht (165 cN)
D	Nahtabstand	+	5 mm
		-	15 mm

Um die Anzahl der Einzelmessungen zu reduzieren, wird wiederum ein fraktionell faktorieller Versuchsplan aufgestellt. Dieser enthält zunächst eine Anzahl von $2^{4-1} = 2^3 = 8$ Messungen, mit je einer Versuchswiederholung ergeben sich 16 Einzelmessungen. Da mit dieser Anzahl an Versuchen Zweifaktorwechselwirkungen nicht klar auseinandergelassen werden können, wird zusätzlich nach Bekanntsein der Ergebnisse der ersten 16 Messung eine Faltung auf einen signifikanten Faktor mit Wechselwirkungen bei einem konstant gehaltenen nicht signifikanten Faktor durchgeführt, um die Auflösung des Versuchsplanes nach 8 weiteren Messungen erhöhen zu können und somit auch die Wechselwirkungen korrekt bestimmen zu können.

Für diese Versuche wurde abweichend von den vorherigen Versuchen ein Glasfaser-
roving verwendet, da die Preformherstellung im Zusammenhang mit Versuchen zum
Einfluss des Faserdurchmessers auf die Permeabilität erfolgte. Da bereits in Kapitel
3.5 gezeigt wurde, dass sich vernähte Preforms unabhängig vom Faserdurchmesser
ähnlich verhalten, wird angenommen, dass die Ergebnisse hierbei vergleichbar sind.

Als Ergebnis der Messungen (Tabelle 3.12) wurde festgestellt, dass nur die Faktoren
Lagenaufbau und Nahtabstand signifikant sind (d. h. p-Wert größer 0,05). Unterfaden
und Fadenspannung sind als Einzelfaktoren nicht signifikant. Es besteht jedoch eine
Wechselwirkung zwischen den Faktoren Lagenaufbau und Unterfaden sowie Unter-
faden und Nahtabstand.

Tabelle 3.12: Darstellung der p-Werte aller Einzelfaktoren sowie der signifikanten
Wechselwirkungen

Faktor / WW	Name	p-Wert	Signifikant
A	Lagenaufbau	< 0.0001	Ja
B	Unterfaden	0,0561	Nein
C	Fadenspannung	0,0870	Nein
D	Nahtabstand	0,0004	Ja
AB	Lagenaufbau / Unterfaden	0,0008	Ja
BD	Unterfaden / Nahtabstand	0,0002	Ja

Die Steigung der signifikanten Faktoren ist in Abbildung 3.31 dargestellt. Erwar-
tungsgemäß, also vergleichbar zu den bisherigen Ergebnissen ergibt sich bei den
vernähten Preforms eine höhere Permeabilität im Falle eines reinen UD-
Lagenaufbaus. Ebenso ergibt sich eine höhere Permeabilität bei geringerem Nahtab-
stand durch die erhöhte Stichtichte.

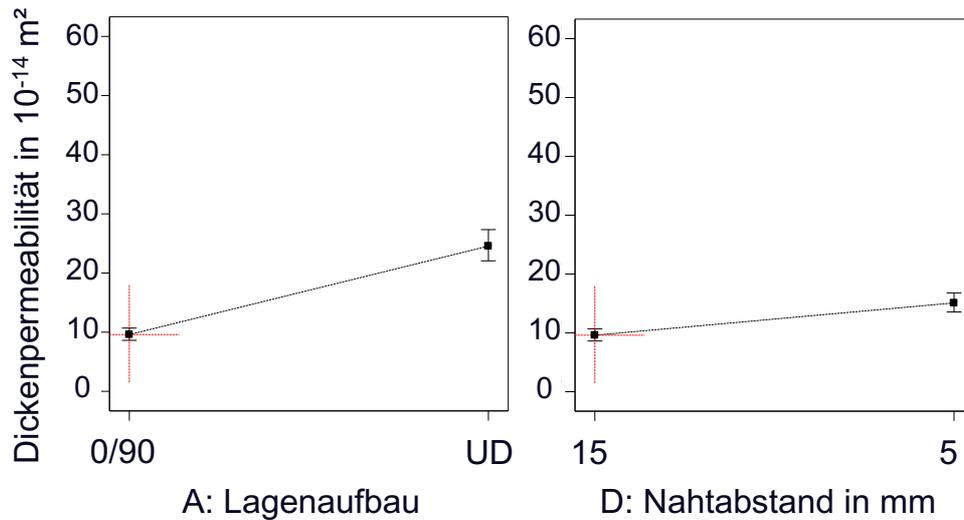


Abbildung 3.31: Verlauf der Permeabilität über die Faktoren Lagenaufbau und Nahtabstand

Die signifikanten Wechselwirkungen sind in Abbildung 3.32 dargestellt. Im Falle des unidirektionalen Lagenaufbaus entsteht bei vorhandenem Unterfaden eine höhere Permeabilität. Beim 0/90°-Lagenaufbau entsteht hingegen keine signifikante Änderung. Dies könnte dadurch erklärt werden, dass sich beim UD-Lagenaufbau ein größerer Fließkanal durch die aufrechterhaltene Fadenspannung offenhält, beim 0/90°-Lagenaufbau wiederum aber durch die kleine projizierte Fließfläche jedoch nicht zur Geltung kommt.

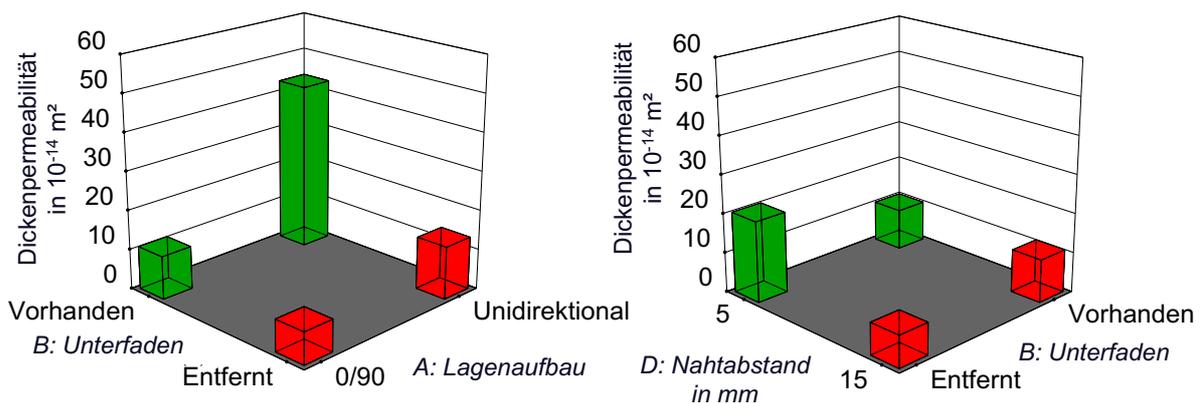


Abbildung 3.32: Signifikante Wechselwirkungen, Links: Lagenaufbau und Unterfaden, Rechts: Unterfaden und Nahtabstand

Bei vorhandenem Unterfaden ergibt sich keine signifikante Änderung der Permeabilität mit geringerem Nahtabstand. Bei entferntem Unterfaden jedoch steigt die Perme-

abilität deutlich mit geringerem Nahtabstand. Hierbei könnte ein Effekt der gesteigerten Porosität in der Messzelle mit entferntem Unterfaden liegen, schlussendlich kann diese Wechselwirkung jedoch nicht abschließend erklärt werden.

3.6 Einfluss der Vernähung auf die mechanischen Eigenschaften

3.6.1 Vorgehen

Bei einer so tiefgreifenden Manipulation der Preformstruktur, wie sie durch das Vernähen vorgenommen wird, sollte auch der Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften des Verbundes betrachtet werden. Um dies zu vergleichen wurden Referenzpreforms sowie mit zwei verschiedenen Nahtabständen vernähte Preforms (siehe Tabelle 3.13) im RTM-Verfahren mit dem Harzsystem RIMR 935 und dem Härter RIMH 936 von Hexion imprägniert.

Tabelle 3.13: Vernähparameter für die Herstellung der Preforms für die mechanische Untersuchung des Verbundes

Typ	Stich-abstand a	Naht-abstand b	Näh-faden	Faden-spannung	Verschiebung c	Lagenaufbau
Referenz	-	-	-	-	N/A	UD
5 mm Näh	5 mm	5 mm	Saba C35	normal	Keine	UD
15 mm Näh	5 mm	15 mm	Saba C35	normal	Keine	UD

Mit den eingestellten Kavitätshöhen wurde für die Zugprüfungen ein theoretischer Faservolumengehalt von 55,1 % sowie von 53,6 % für Biegeprüfungen errechnet.

- Für die Zugprüfungen nach DIN EN ISO 527-5 wurden Probekörper der Abmessungen 250 x 15 x 1 mm³ hergestellt, die Prüfgeschwindigkeit betrug 1 mm/min. GFK-Aufleimer mit einem $\pm 45^\circ$ -Lagenaufbau wurden an den Enden zur Lasteinleitung und Vermeidung von Einspannungsbrüchen aufgeklebt. Für die Referenzproben mit Aufleimern wurde ein Versagen an den Rändern der Aufleimer festgestellt, die Messergebnisse waren aufgrund einer großen Standardabweichung nicht verlässlich. Daher wurden für das Laminat, das aus der Referenzpreform hergestellt wurde, Prüfkörper ohne Aufleimer verwendet, wodurch die Standardabweichung signifikant reduziert werden konnte.

- 3-Punkt-Biegeprüfungen wurden nach DIN EN ISO 14125 mit einer Auflagerdistanz von 80 mm, einer Testgeschwindigkeit von 5 mm/min sowie Probekörpern der Abmessungen 100 x 15 x 2 mm³ durchgeführt.

Wie in Abbildung 3.33 gezeigt, wurde für die Zugprüfung nur der mittlere Teil des Probekörpers mit einer Vernähung versehen. Dies ist zulässig, da mittels Makrowegaufnehmern in diesem Bereich die Dehnung gemessen wurde. Der Einspannungsbereich ist somit nicht von der Vernähung beeinflusst.

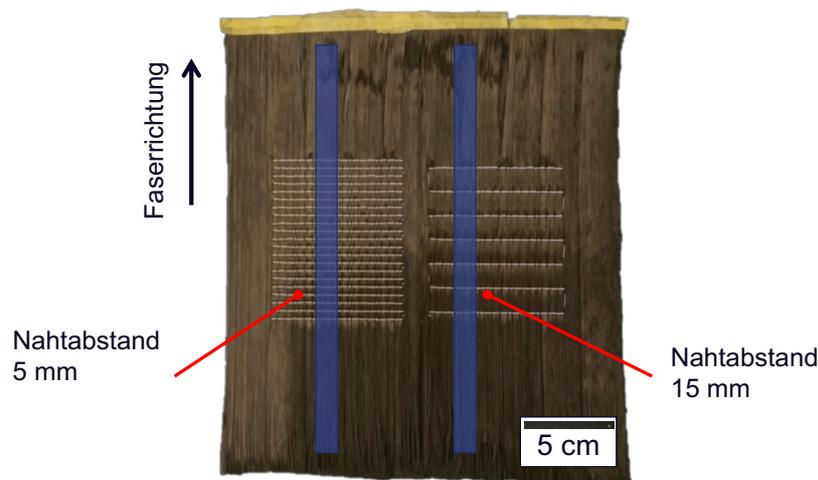


Abbildung 3.33: Abbildung der vernähten Preform zur Probenherstellung für die Zugprüfung mit Visualisierung der Probenentnahmestelle nach Plattenherstellung

Im Falle der Biegeprüfungen wurde die gesamte Fläche der Probekörper vor der Injektion vernäht.

3.6.2 Ergebnisse mechanische Prüfung

Zugprüfung

Die Ergebnisse der Zugprüfung sind in Abbildung 3.34 dargestellt. Beim Vergleich von 15 mm Nahtabstand mit Referenzpreforms kann kein klarer Trend bei den mechanischen Eigenschaften festgestellt werden, da die Abweichungen im Bereich der Standardabweichung der Ergebnisse liegen. Die Preform mit 5 mm Nahtabstand zeigt jedoch einen messbaren Abfall des Elastizitätsmoduls. Die Reduktion der Zugfestigkeit ist im Bereich der Standardabweichung und daher nicht signifikant. Nur ein kleiner Anteil der Fasern sind von ihrer Ursprungsrichtung abgelenkt. Darüber hinaus

kann die ursprüngliche Faserausrichtung ohne Vernähung nicht als perfekt angenommen werden, da auch im Rovingmaterial eine gewisse Welligkeit der Fasern vorliegt. Daher ist die Reduktion des Elastizitätsmoduls sehr klein.

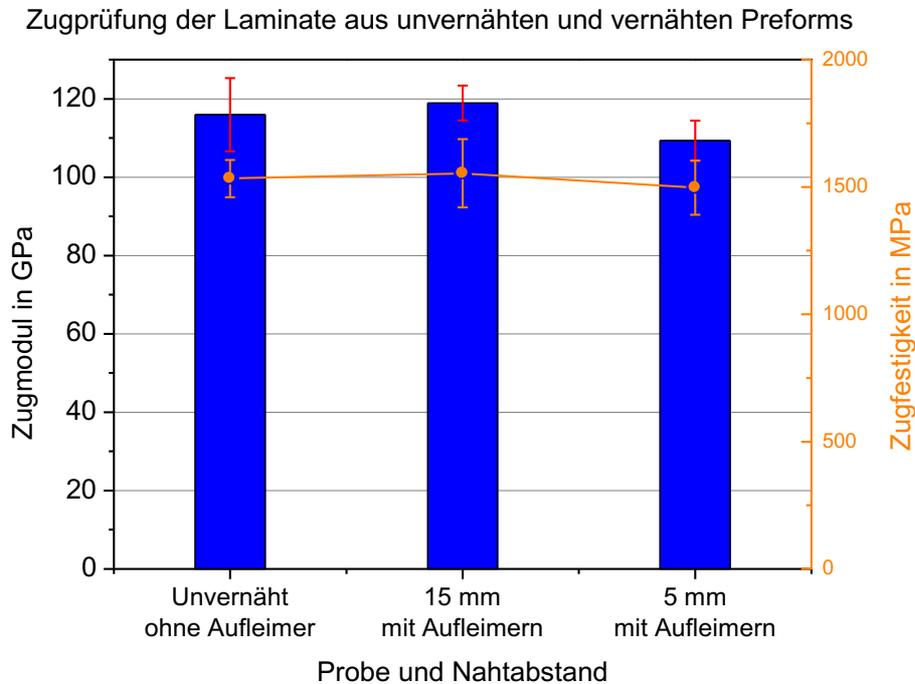


Abbildung 3.34: Ergebnisse der Zugprüfung für Platten hergestellt aus Referenzpreform und vernähten Preforms mit 5 mm Einzelstichabstand, Nahtabstand wie abgebildet, Titer 80 Denier, Standardfadenspannung, keine Nahtverschiebung, UD-Lagenaufbau, FVG 55,1 %

Hinsichtlich des Bruchverhaltens kann bei den Proben mit vernähter Preform nach Versagen festgestellt werden, dass dieses jeweils an einer Naht beginnt (Abbildung 3.35). Mehrere Effekte können begründend für dieses Verhalten sein. Die großen harzreichen Zonen können möglicherweise als Rissinitiator dienen, da diese lokal zu einer Dehnungsüberhöhung führen. Darüber hinaus kann lokal die Festigkeit durch Knicken oder Biegen von Fasern reduziert werden und somit ein Riss dort entstehen. Im Vergleich dazu weisen die Referenzproben Risse entlang der Faserrichtung auf, die an augenscheinlich zufälligen Stellen entstehen. Dies können zum Beispiel kleine Inhomogenitäten sein, die durch das Eingangsmaterial oder durch die Verarbeitung eingebracht werden.

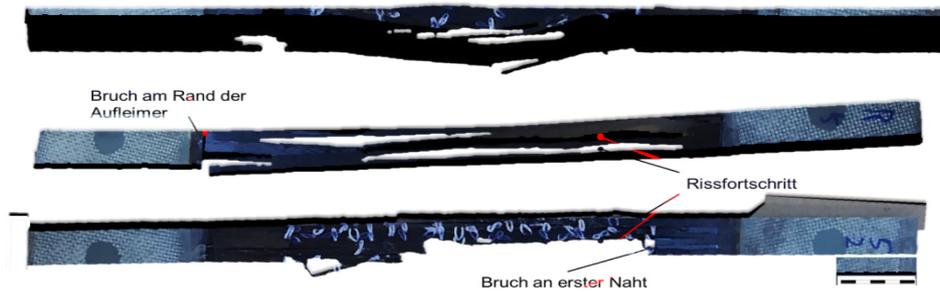


Abbildung 3.35: Probekörper für die Zugprüfung nach dem Test, unterschiedliches Bruchverhalten bei Laminat hergestellt aus Referenzpreform (oben) sowie aus vernähter Preform (unten)

Biegeprüfung

In der Biegeprüfung kann ein deutlicher Einfluss der Vernähung der Preform auf die Lamineigenschaften festgestellt werden (Abbildung 3.36). Es erfolgt eine deutliche Reduzierung des Biegemoduls um etwa 23 % (von 109,6 GPa zu 84,1 GPa) bei Präsenz von Nähten mit 5 mm Nahtabstand in der Preform. Die Biegefestigkeit wird um etwa 29 % reduziert (von 1324 MPa zu 945 MPa).

3-Punkt-Biegeprüfung der Lamine aus unvernähten und vernähten Preforms

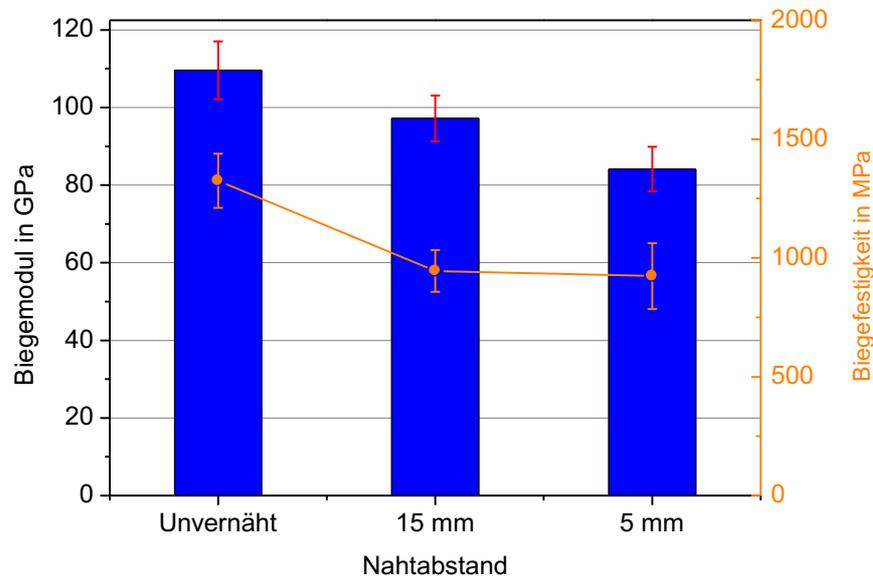


Abbildung 3.36: Biegeeigenschaften von Platten hergestellt aus Referenzpreform und vernähten Preforms mit 5 mm Einzelstichabstand, Titer 80 tex, Fadenspannung 122 cN, UD-Lagenaufbau, FVG 53,6 %

Während der Biegemodul mit höherer Stichdichte weiter reduziert wird, bleibt die Biegefestigkeit annähernd konstant. Es kann angenommen werden, dass die Präsenz einer Vernähung generell zu einer Schwachstelle im Material führt. Die getesteten Probekörper zeigten ein Druckversagen an der Vernähung, was diese Vermutung unterstützt. Durch die Präsenz des Oberfadens, der zwischen den Einzelstichen verläuft, werden die Faserbündel während der Harzinjektion lokal niedergedrückt, hierdurch entsteht eine Welligkeit der Fasern in Dickenrichtung. Dies ist auch im Dunkelfeldmikroskopie-Schliff in Abbildung 3.25 zu erkennen.

4 Simulative Betrachtung der strukturellen Einflüsse von DFP-Preforms auf die Dickenpermeabilität

Im zuvor dargestellten experimentellen Teil konnte bereits ein Einblick in die Auswirkungen von strukturellen Einflüssen auf die Dickenpermeabilität gewonnen werden. Nicht alle denkbaren Strukturvariationen können direkt experimentell umgesetzt werden. Ein mögliches Beispiel wäre hierbei die Welligkeit der Fasern bzw. die Beeinflussung der Rovingform während der Ablage. Zur Erweiterung der Betrachtungsmöglichkeiten soll daher im Rahmen dieser Arbeit eine Methodik zur Modellierung der Permeabilität von DFP-Preforms auf allen Skalen entwickelt werden. Die Entwicklung und Evaluation der entsprechenden Methoden, Randbedingungen und Parameter werden in den folgenden Abschnitten betrachtet. Die einzelnen diskutierten Themen sind in Abbildung 4.1 dargestellt.

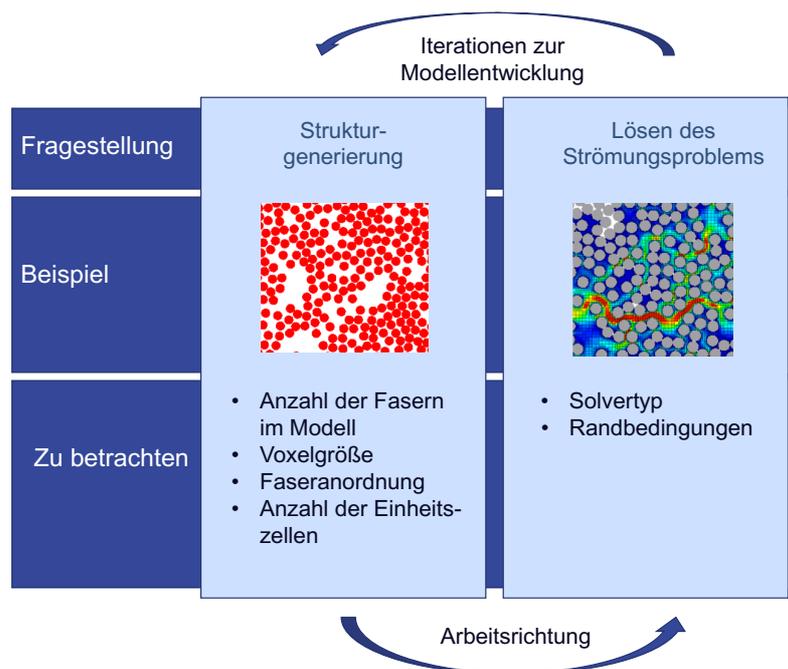


Abbildung 4.1: Darstellung der Themen und Fragestellungen, die für die Modellentwicklung betrachtet werden

4.1 Mikromodellierung

4.1.1 Generierung von Faserstrukturen

Die im Rahmen dieser Arbeit simulativen Untersuchungen wurden mittels der Software GeoDict der Firma Math2Market GmbH [74] durchgeführt. Diese ermöglicht die

Generierung von Mikrostrukturen und die Anwendung physikalischer Gesetze mittels einer Vielzahl an Solvern. Faserstrukturen wurden mittels des GeoDict-Moduls FiberGeo erstellt. Der Algorithmus verteilt Fasern anhand des vorgewählten Faservolumengehaltes mit zufälligen Mittelpunkten im Raum. Anschließend werden dadurch entstandene Überlappungen durch die zufällige Verschiebung einzelner Fasern um ein Voxel entfernt, bis kein oder eine einstellbare maximale Überlappung übrigbleibt. Der Anfangspunkt für diese Generierung ist der sogenannte Random Seed, der Startwert für die Initialisierung der Zufallszahlengeneratoren. Daher wird bei gleichem Random Seed und sonstigen gleichen Parametern immer die gleiche Struktur generiert. Durch Variation des Random Seeds können statistisch variierende Strukturen generiert werden. In realen Strukturen würde jeder 2D-Schnitt durch die Struktur eine zufällige Faseranordnung darstellen und die Permeabilität für den 3D-Fall wäre nahe der gemittelten Permeabilität einzelner 2D-Sektionen, wenn angenommen wird, dass nur ein kleiner Teil des Fließens in senkrechter Richtung stattfindet. Das Rechengebiet wird in Voxeln generiert, die kubische Volumenelemente gleicher Größe darstellen. Jedem Voxel wird eine Material-ID zugeordnet, sodass ein Voxel entweder Teil eines Volumenkörpers (in diesem Fall Faser) oder des porösen Raums zwischen Fasern sein kann. Im Rahmen dieser Arbeit wurde zunächst die Annahme paralleler geradliniger Fasern getroffen und daher die Tiefe des Modells (in Faserrichtung) nur genutzt, um Randeffekte zu vermeiden.

4.1.2 Lösen des mathematischen Problems

Der verwendete Solver zur Analyse des Fließens durch die porösen Faserstrukturen löst die stationären Stokes-Gleichungen auf einem Gitter aus Voxeln. Zur Lösung des Problems wird ein größenvariables Netz generiert, das an den Rändern der Volumenkörper sehr fein aufgelöst ist und geometrische Details gut nachempfunden, während größere Porenräume durch weniger einzelne Zellen abgebildet werden. Der weiche Übergang zwischen diesen Bereichen wird durch Nachbarbedingungen (Größenverhältnis angrenzender Zellen zueinander) sichergestellt. In Summe ist dieses Verfahren sehr Speicher- und Rechenzeiteffizient [72, 73] und kann daher zumindest für kleine Einheitszellen auch auf üblichen Desktop-Workstations verwendet werden. Ein Beispiel eines adaptiven Netzes ist in Abbildung 4.2 dargestellt.

Der Solver wurde im Rahmen einer Benchmark sowohl auf generischen Strukturen mit analytisch zugänglicher Permeabilität als auch anhand realer poröser geologischer Materialien evaluiert [64] (bezeichnet als VBS-3).

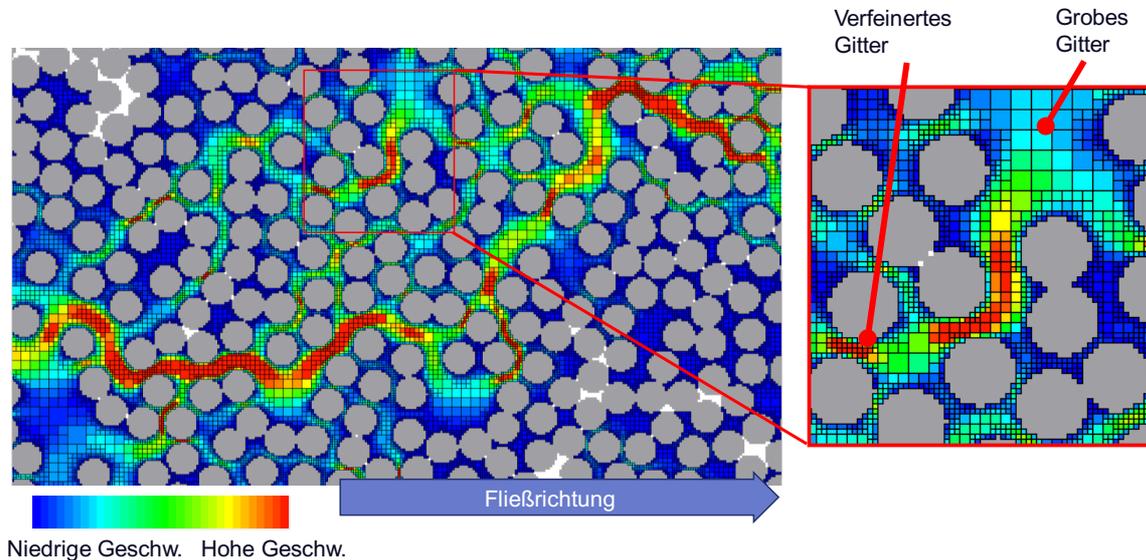


Abbildung 4.2: Beispiel eines adaptiven Netzes zur Berechnung des Fließens senkrecht zu kreisrunden Fasern

In den hier durchgeführten Berechnungen wurde ein Druckverlust von 0,02 Pa zwischen Ein- und Auslass eingestellt und die Berechnung des Strömungsfeldes (und daraus abgeleitet die Permeabilität) wurde mittels der Eigenschaften eines inkompressiblen Fluids vorgenommen. Anhand der Annahme eines kriechenden Fließens eines Newtonschen Fluids könnten Druckverlust und Fluidviskosität ohne Änderung der berechneten Permeabilität variiert werden, lediglich die ermittelte Fließgeschwindigkeit würde abweichen. Dies wurde exemplarisch validiert. Als Erfolgskriterium am Ende einer Berechnung wurde ein Kriterium verwendet, das aus der asymptotischen Konvergenz der berechneten Werte eine Abschätzung des Endwertes vornimmt und bei einer Abweichung des aktuell berechneten Wertes von weniger als 3 % davon die Berechnung beendet.

4.1.3 Festlegung von Randbedingungen

Zur Berechnung des Fließens in einer Einheitszelle muss eine Annahme über die Fließbedingungen an den Rändern der Einheitszelle angenommen werden. Die sinnvolle Wahl dieser Randbedingungen ist essentiell für die realistische Berechnung der

Ergebnisse. Die Ermittlung der korrekten Randbedingungen in Fließrichtung, tangential dazu und an den Faserrändern wird im Folgenden beschrieben.

Randbedingungen in Fließrichtung

Abbildung 4.3 zeigt einen graphischen Vergleich der wählbaren Randbedingungen in Fließrichtung. Diese sind periodisch, symmetrisch bzw. periodisch mit implizit hinzugefügten Ein- und Ausströmbereichen.

Im Falle von periodischen Randbedingungen wird das Rechengebiet implizit in Fließrichtung wiederholt. Da zufällige Faseranordnungen zur Berechnung der Permeabilität senkrecht zur Faser keine inhärente Periodizität besitzen, neigt diese Randbedingung zur Berechnung von zu kleinen Fließgeschwindigkeiten und Permeabilitäten. Dies kann dadurch erklärt werden, dass an Ein- und Auslass Fließkanäle zusammenreffen müssen, um ein Fließen zu ermöglichen. Im Vergleich dazu wird für symmetrische Randbedingungen das Rechengebiet implizit gespiegelt, sodass das Zusammentreffen von Ein- und Auslasskanälen sichergestellt ist. Während dies in diesem Fall realistischere Strömungsbilder als periodische Randbedingungen liefert, ist die Rechenzeit über dreimal so hoch. Als Alternative können zwischen den periodisch wiederholten Rechengebieten Ein- und Ausströmbereiche hinzugefügt werden, um das Fließen zwischen den periodischen Gebieten auszugleichen. In den durchgeführten Berechnungen wurden jeweils 10 Voxel hinzugefügt, es wurde verifiziert, dass größere Ein- und Ausströmbereiche keine weitere Veränderung der Permeabilität erzielen. Wie in Abbildung 4.3 gesehen werden kann, trifft die somit ermittelte Permeabilität den Wert der symmetrischen Randbedingungen unter Erzielung der kürzesten Rechenzeit. Diese Feststellungen wurden exemplarisch bei Faservolumengehalten zwischen 50 und 60 % jeweils für 10 zufällige Einheitszellen überprüft. Aus diesem Grund werden im Folgenden in Fließrichtung periodische Randbedingungen mit impliziten Ein- und Ausströmbereichen gewählt.

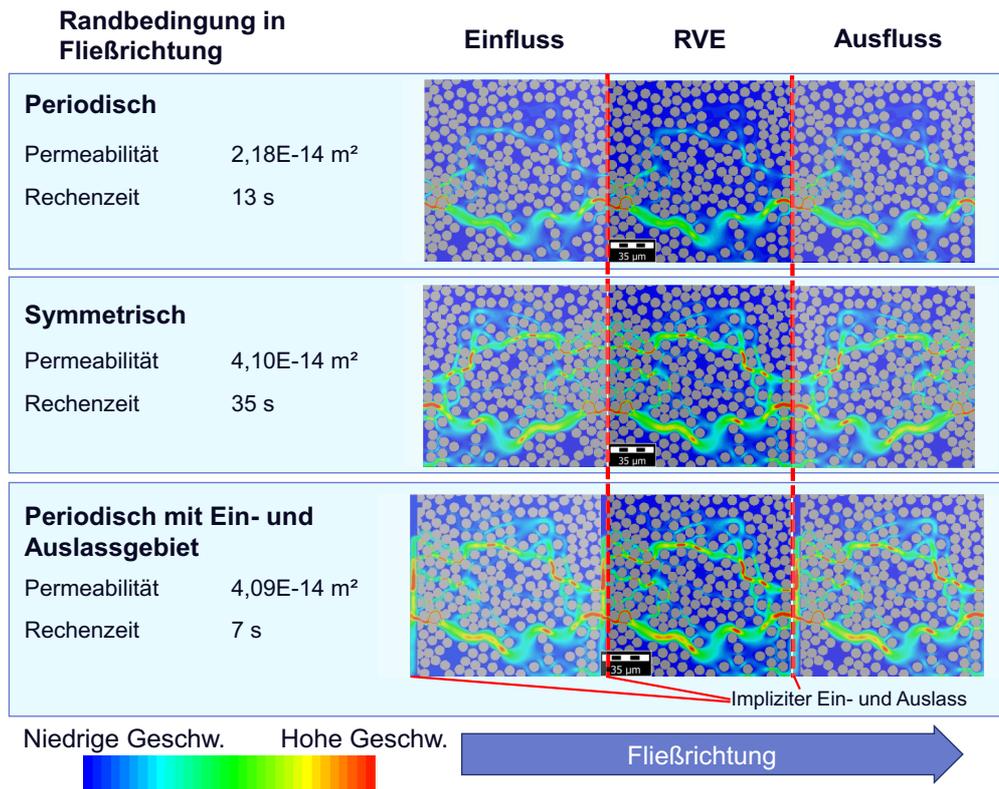


Abbildung 4.3: Visualisierung der Randbedingungen in Fließrichtung

Randbedingungen transversal zur Fließrichtung

Vergleichbar zu den Randbedingungen in Fließrichtung gibt es verschiedene Randbedingungen transversal zur Fließrichtung. Wie in Abbildung 4.4 dargestellt, zeigen periodische, symmetrische und No-Slip Randbedingungen unterschiedliche Verhalten. Periodische Randbedingungen wiederholen implizit den Rechenbereich an den transversalen Rändern. Wenn in der Struktur Fließkanäle vorherrschend sind, die senkrecht zur Hauptfließrichtung eine Strömung ermöglichen, werden potentiell höhere Permeabilitäten errechnet, da an einer Stelle herausströmende Fluidanteile in der Nachbarzelle eine „Abkürzung“ nehmen können und später wieder einfließen können. Aus diesem Grunde scheinen symmetrische Randbedingungen realistischer da kein Fluidaustausch zwischen benachbarten Zellen stattfindet. Eine weitere Möglichkeit wäre die No-Slip-Randbedingung. Da in diesem Falle der gesamte tangentiale Zellenrand als reibende Wand agiert, wird das gesamte Fließen ausgebremst und niedrigere Permeabilitäten entstehen. Darüber hinaus erhöht sich die Rechenzeit deutlich. Aus diesen Gründen werden im Weiteren tangential symmetrische Randbedingungen verwendet.

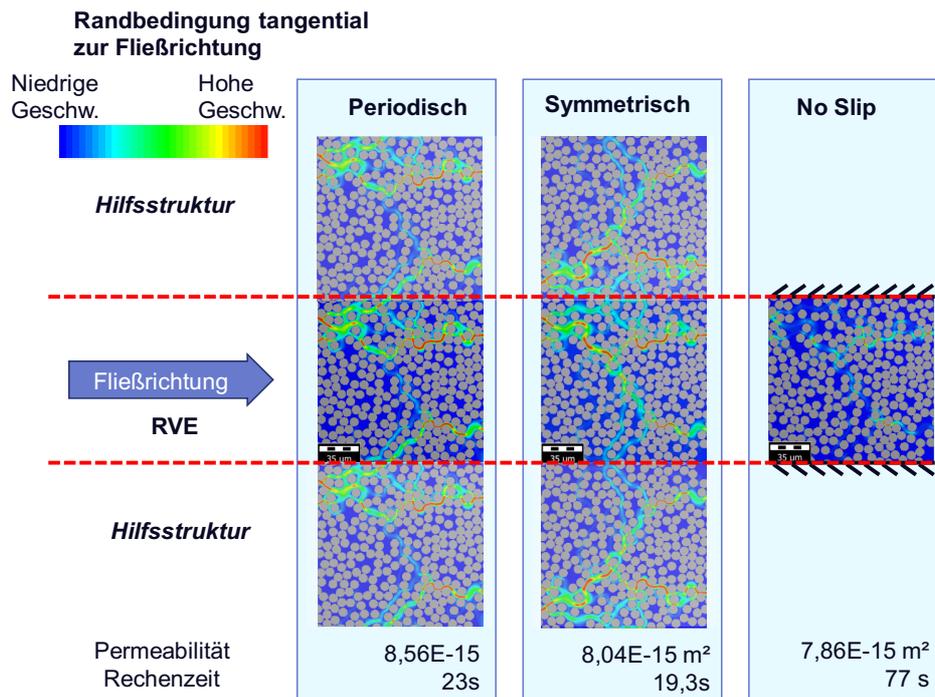


Abbildung 4.4: Visualisierung von Randbedingungen transversal zur Fließrichtung

Randbedingungen an Fasergrenzen

Vergleichbar zu realen Strukturen wird an den Fasergrenzen eine No-Slip Bedingung¹⁰ angenommen, die eine Grenzschicht mit Geschwindigkeitsgradient ausbildet.

4.1.4 Betrachtung der statistischen Verteilung von Permeabilitäten von zufällig generierten Einheitszellen

Berechnete Permeabilitäten zufälliger Faseranordnungen zeigen eine starke statistische Streuung. Um einen realistischen Mittelwert zu errechnen, muss eine repräsentative Probe aus der statistischen Population entnommen werden. Aus diesem Grund wurden exemplarisch Permeabilitätswerte von 1000 zufälligen Faseranordnungen mit ansonsten unveränderten Eingangsparametern berechnet. Das Histogramm in Abbildung 4.5 zeigt, dass die Werte ähnlich zu einer Gauß-Verteilung statistisch verteilt sind. Im Shapiro-Wilk-Test¹¹ wurde eine Korrelation von 99 % erreicht. Daher kann davon ausgegangen werden, dass übliche Stichprobenanzahlen zur Ermittlung eines Erwartungswert in einer standardverteilten Population genutzt werden können.

¹⁰ d. h. Strömungsgeschwindigkeit direkt an der Fasergrenzfläche 0.

¹¹ Mathematische Prüfung auf Normalverteilung einer statistischen Grundgesamtheit [135].

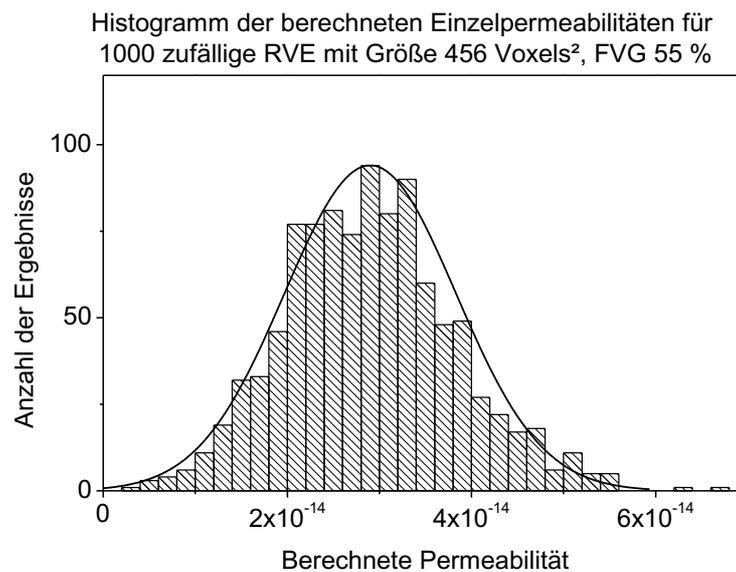


Abbildung 4.5: Histogramm der berechneten Permeabilitäten zufälliger Einheitszellen

4.1.5 Betrachtung der benötigten Voxelauflösung für die exakte Berechnung der Mikropermeabilität

Zur exakten Berechnung des Fließverhaltens innerhalb einer Struktur muss diese ausreichend fein diskretisiert werden. Im Falle von kreisrunden Fasern in einem Rechengebiet, das durch kubische Voxel diskretisiert wird, ist es offensichtlich, dass die Voxelgröße deutlich kleiner sein muss als der Faserdurchmesser um annähernd runde Fasern zu modellieren. Größere Voxel führen zu „pixeligen“ (in der 2D-Ansicht) und daher „rauen“ Fasern, die durch die zusätzlichen Kanten das Fließen behindern. Während der Lösung des Problems verwendet der Solver allerdings nicht das Voxelgerüst, sondern generiert ein adaptives Netz, so dass etwaige Unterschiede der berechneten Permeabilitäten nur auf die unterschiedliche Diskretisierung der Fasern zurückzuführen sind.

Es wird davon ausgegangen, dass bei Unterschreitung einer gewissen Voxelgröße eine Konvergenz der Mittelwerte der berechneten Permeabilität erreicht wird, da die verbliebenen Rauigkeiten der Faserdarstellung keine Reduktion der Permeabilität mehr bewirken.

In der durchgeführten Variation der Voxelgröße kann gesehen werden, dass ein Konvergenzeffekt der Permeabilitäten bei einem Verhältnis Voxelgröße zu Faserdurchmesser von etwa 1/10 erreicht wird (Abbildung 4.6). Im Falle des angenomme-

nen Faserdurchmessers von $7\ \mu\text{m}$ entspricht dies einer Voxelgröße von kleiner gleich $0,7\ \mu\text{m}$. Bei größeren Voxelgrößen werden große Standardabweichungen beobachtet, der untere Wert des 1σ -Vertrauensbereichs liegt bereits unter 0, da einzelne Berechnungen eine Permeabilität von 0 ergeben. In diesem Fall führen zu grobe Faserdarstellungen zu lokal blockierten Fließwegen, die bei kleineren Voxelgrößen noch durchlässig wären. Dieser Effekt ist verstärkt bei höheren FVG zu beobachten, da der Porenraum zwischen den Fasern weiter reduziert wird und eine grobe Faserabbildung das Fließen senkrecht zur Faserrichtung behindert.

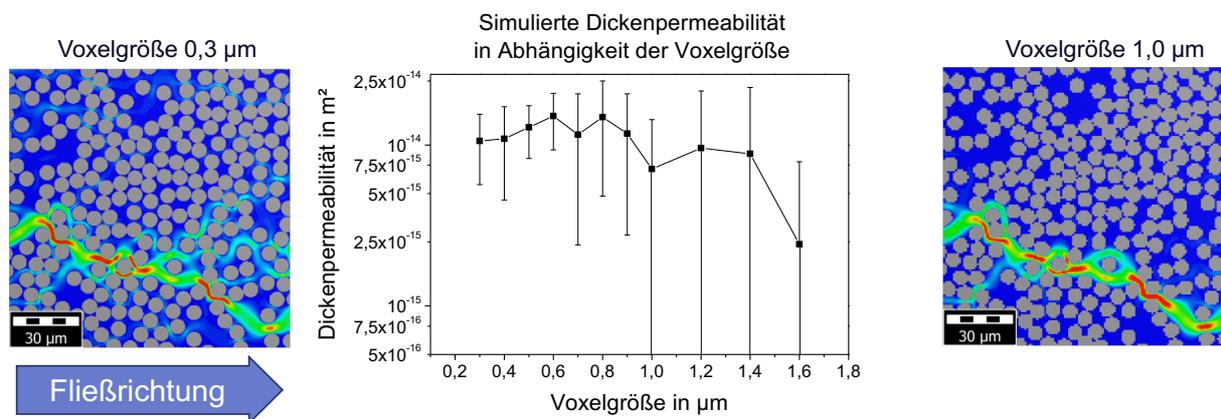


Abbildung 4.6: Simulierte Dickenpermeabilität bei FVG 55 % abhängig von der Voxelgröße.

4.1.6 Bestimmung der benötigten Einheitszellengröße zur exakten Berechnung der Mikropermeabilität

Ein repräsentatives Volumenelement (RVE) beinhaltet eine Struktur, die typisch für das zu modellierende Material ist, mit der Anforderung, eine „ausreichende Anzahl mikrostruktureller Elemente [zu beinhalten], sodass die Randbedingungen an der Oberfläche des Composites nicht die effektiven Eigenschaften beeinflussen“ [136]. Diese Definition wurde für die Berechnung der mechanischen Eigenschaften von FKV eingeführt, kann aber auf die Berechnung der Fließeigenschaften übertragen werden.

Bei der Betrachtung regulärer Faseranordnungen wie in [54] kann eine Einheitszelle sehr klein sein, da eine periodische Anordnung mittels einiger weniger Fasern ausreichend beschrieben werden kann. Für zufällige Anordnungen muss jedoch eine große stochastisch mögliche Menge verschiedener Porenräume zwischen Einzelfasern berücksichtigt werden, weshalb eine gewisse Anzahl von Fasern in einem RVE

enthalten sein muss. Die Variabilität möglicher Porenräume lässt sich unter anderem dadurch erklären, dass lokale Faseranhäufungen sowie größere Einzelporen zwischen denselben lokal zu sehr großen Fließkanälen führen können. Es gibt einen Zusammenhang zwischen der Größe und der benötigten Anzahl der betrachteten Einheitszellen um einen sinnvollen Mittelwert zu errechnen.

In den durchgeführten Validierungssimulationen wurde die RVE-Größe variiert mit 256^2 , 356^2 und 456^2 Voxel senkrecht zur Faserrichtung und einer konstanten Tiefe von 64 Voxel in Faserrichtung bei einer Voxelgröße von $0,5 \mu\text{m}$. Es wurde verifiziert, dass eine in Tiefenrichtung größere Einheitszelle zu keiner Veränderung der errechneten Permeabilität führt. Entsprechend der eingestellten Auflösung enthielten die RVE 251, 490 bzw. 785 Einzelfasern. Das Ergebnis ist in Abbildung 4.7 dargestellt.

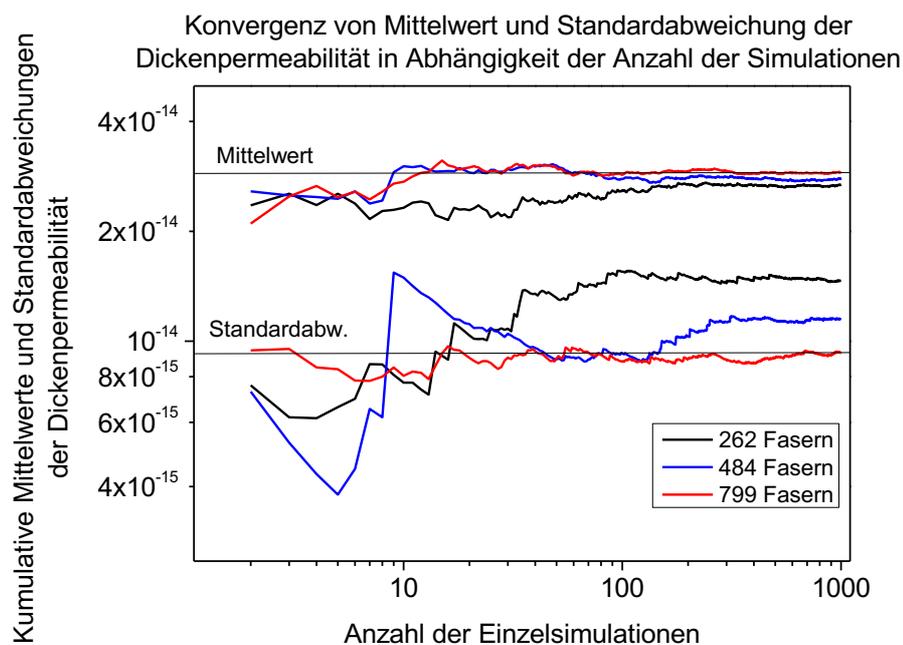


Abbildung 4.7: Betrachtung der benötigten Anzahl von Simulation zur Konvergenz des Mittelwertes der berechneten Permeabilität

Bereits bei 10 Einzelsimulationen konvergiert der Mittelwert in Richtung des Mittelwertes von 1000 Simulationen. Für die größeren RVE wird eine schnellere Konvergenz beobachtet. Dies kann durch die größere enthaltene statistische Varianz in einer einzelnen Einheitszelle erklärt werden. Insbesondere für die kleinste betrachtete RVE ist darüber hinaus eine höhere Wahrscheinlichkeit einzelner Ausreißerergebnis-

se mit einer Permeabilität von 0 festgestellt worden, die in realen Strukturen nicht realistisch ist.

Wie bereits zuvor dargestellt, liefern so 10 einzelne Simulationen einen glaubhaften Mittelwert. Um dies nochmals zu verifizieren, wurden die 1000 Einzelergebnisse in Blöcke verschiedener Größe geclustert, um zu betrachten ob jeweils bei Betrachtung von 10 einzelnen Berechnungen ähnliche Ergebnisse entstehen. Aus einem Block wurde jeweils der Mittelwert berechnet und über die Gesamtsumme der Mittelwerte die Standardabweichung der Mittelwerte. Zum Beispiel wurden zur Betrachtung von Blöcken aus 50 Einzelergebnissen insgesamt 20 Blöcke verglichen, um insgesamt die 1000 Werte abzudecken. Das Ergebnis ist in Abbildung 4.8 dargestellt. Es kann erkannt werden, dass bei einer größeren Anzahl in einem Block enthaltener Einzelsimulationen eine geringe Wahrscheinlichkeit besteht, einen sehr stark abweichenden Mittelwert zu erreichen. Abhängig vom geforderten Maß an Exaktheit muss eine ausreichende Anzahl an Einzelsimulationen ausgewählt werden.

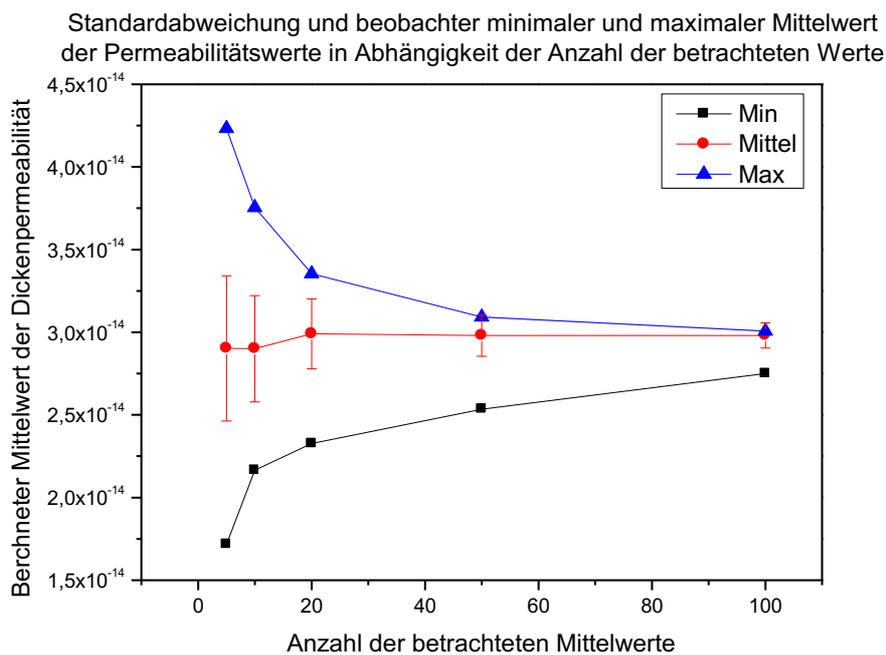


Abbildung 4.8: Betrachtung der zu erwartenden Streubreite des errechneten Mittelwertes abhängig von der Anzahl der Einzelsimulationen

Anhand dieser Betrachtungen kann nun eine Berechnung der Permeabilität quer zur Faserrichtung über einen technisch relevanten Bereich der Faservolumengehalten zwischen 40-70 % vorgenommen werden (Abbildung 4.9).

Die ermittelten Ergebnisse lassen sich mit einer exponentiellen Funktion der Form

$$K_{quer} = K_0 + A_1 \left(1 - e^{-\frac{v_f}{t_1}} \right) \quad (8)$$

mit einer Korrelation von $R^2 = 0,99$ sehr gut annähern. Zum Vergleich mit dem gängigsten Ansatz zur analytischen Ermittlung der Permeabilität quer zur Faserrichtung von Gebart et al. ist der Verlauf ebenfalls in der Abbildung dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die analytisch ermittelten Werte für den quadratischen und hexagonalen Fall jeweils deutlich unter den simulativen Werten liegen. Dies ist zu erwarten, da eine reguläre Packung insgesamt homogener ist, die zufällige Packung wie in der Simulation hat größere und kleinere Fließkanäle und daher eine etwas höhere Permeabilität. Die Steigung der Gerade in der logarithmischen Darstellung ist für den hexagonalen Fall jedoch vergleichbar. Die quadratische Packung neigt bei sehr hohen Faservolumengehalten zu einer starken Abnahme der Permeabilität, da die Fließkanäle sehr klein werden. Somit ist der reale Fall der zufällig verteilten Fasern gleichzeitig auch der Bestfall der höchsten Permeabilität.

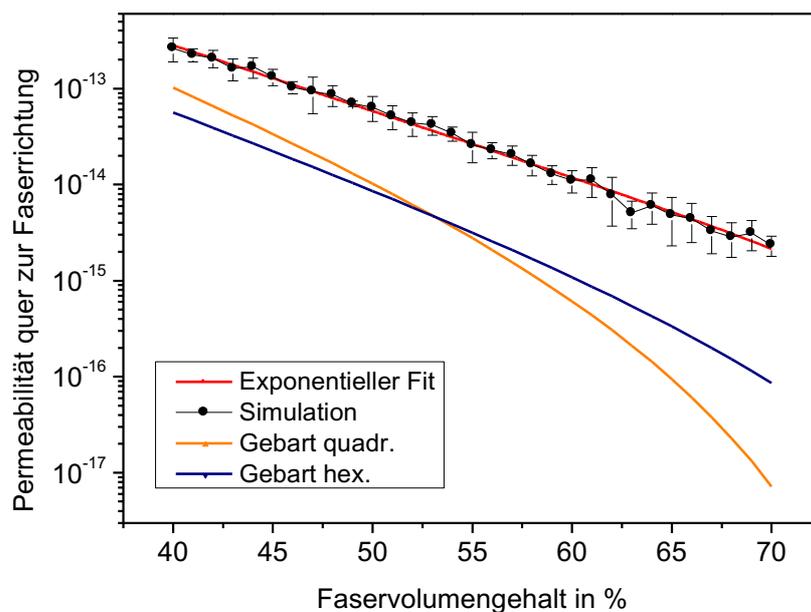


Abbildung 4.9: Permeabilität quer zur Faserrichtung von 40-70 % FVG

Die ermittelten Konstanten für den exponentiellen Fit sind in Tabelle 4.1 dargestellt.

Tabelle 4.1: Konstanten für den exponentiellen Fit der Permeabilitätswerte quer zur Faserrichtung

Konstante	Wert
K_0	$-4,074 \cdot 10^{-16}$
A_1	$1,493 \cdot 10^{-13}$
t_1	6,38

4.1.7 Vergleich simulativ und experimentell ermittelter Permeabilitätskennwerte

Nachdem in den vorhergehenden Abschnitten die Anforderungen und Randbedingungen an die Simulationsmodelle festgelegt wurden, werden nun die Simulationsergebnisse auf Mikroebene mit experimentell ermittelten Permeabilitätskennwerten verglichen.

Berechnung einer Mesopermeabilität mit Binderpartikeln unter Berücksichtigung der Mikroebene

Wie bereits diskutiert, kann die gemessene Permeabilität einer DFP-Preform mittels eines reinen Mikrofließens approximiert werden, da keine Mesofließkanäle in der Preform enthalten sind. Die Binderpartikel, die für den Zusammenhalt der Preform hinzugefügt werden, können jedoch einen Einfluss auf das Fließverhalten innerhalb der Preform haben. Daher wurde eine RVE anhand der oben entwickelten Richtlinien modelliert. Ellipsoide Binderpartikel mit einem berechneten Volumengehalt von 3,7 % (wie auch in der realen Preform) wurden hinzugefügt. Wie in der realen Preform auch festzustellen, schließen die Binderpartikel teilweise Fasern ein. In diesem Fall werden in der Generierung der zu simulierenden Struktur die Binderpartikel den Fasern überlagert. Um trotzdem den richtigen Bindervolumengehalt zu erzeugen, wird nur der nicht überlagernde Anteil zur Dosierung des Bindermaterials in der Strukturgenerierung verwendet. In der realen Preform wurde der Faservolumengehalt der Preforms unabhängig vom Bindergehalt eingestellt, daher korrespondiert der Faservolumengehalt nicht direkt mit der Preformporosität. Für die Partikelgrößen wurden die realen Partikelgrößen für das Bindermaterial verwendet (Größtenteils 100-250 μm Länge der größten Halbachse). Die einzelnen Schritte der Modellgenerierung sind in Abbildung 4.10 dargestellt. Die Mindestgrößen für die RVE-Erzeugung wurden gegenüber den quasi-2D-Modellen für die reine Mikropermeabilität vergrößert, um eine ausreichende Anzahl von Binderpartikeln zu enthalten. In Summe wurden

366 x 549 x 366 Voxel der Größe 0,7 μm verwendet, in der RVE sind daher ca. 1300 einzelne Fasern enthalten. Wie in den obigen Betrachtungen wird die statistische Abdeckung durch Berechnung der Permeabilität 10 zufälliger RVE erreicht.

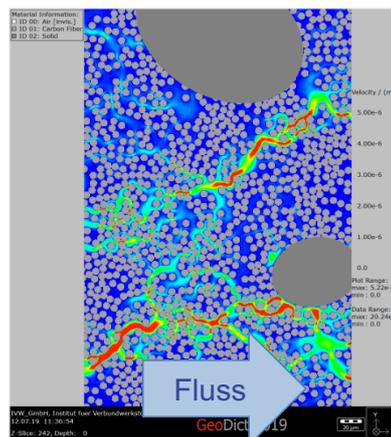
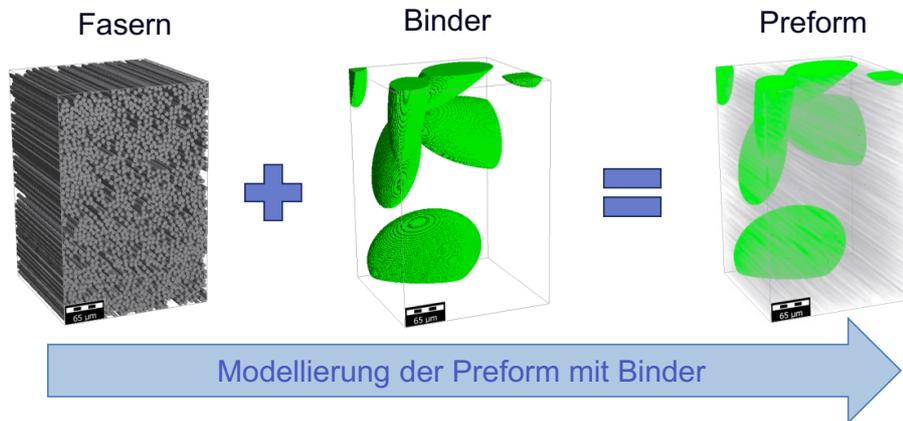


Abbildung 4.10: Modellierung einer Preformstruktur mit Binder, Beispiel eines Querschnittes durch resultierendes Strömungsfeld mit Binderpartikeln als Strömungshindernis

Um die berechneten Werte in einen vergleichbaren Rahmen zu stellen, zeigt Abbildung 4.11 einen Vergleich der Permeabilität senkrecht zur Faserrichtung zwischen simulierten und experimentell ermittelten Werten (aus Kapitel 3.4).

Da eine reine UD-Preform ohne Vernähung weder Meso- noch Makrofließkanäle und nur zufällig verteilte Fasern enthält, wird angenommen, dass die Mikropermeabilität dieser Struktur mit der simulierten Mikropermeabilität verglichen werden kann. Im Vergleich zu den experimentellen Kennwerten liegen die simulierten Werte bei 50 % FVG etwa dreimal so hoch und bei 60 % FVG auf vergleichbarem Niveau. Eine mög-

liche Erklärung hierfür ist die Fasermobilität auf Mikroebene¹² in realen Strukturen bei niedrigen FVG, die zu einer Veränderung der Faserposition und daher zu einer Reduktion der Permeabilität im Vergleich zu den in der Simulation nicht mobilen Fasern führen kann. Statistisch betrachtet ist bei 50 % FVG eine höhere Streuung der Faserpositionen denkbar, da mehr Porenraum zur Verfügung steht. Darüber hinaus wurde ein möglicher Effekt der Binderpartikel, die mechanisch die Faserposition beeinflussen können, hier nicht berücksichtigt. Es kann im Diagramm erkannt werden, dass die Permeabilität mit hinzugefügten Binderpartikeln etwa 10 % unter der Permeabilität ohne Binderpartikel liegt.

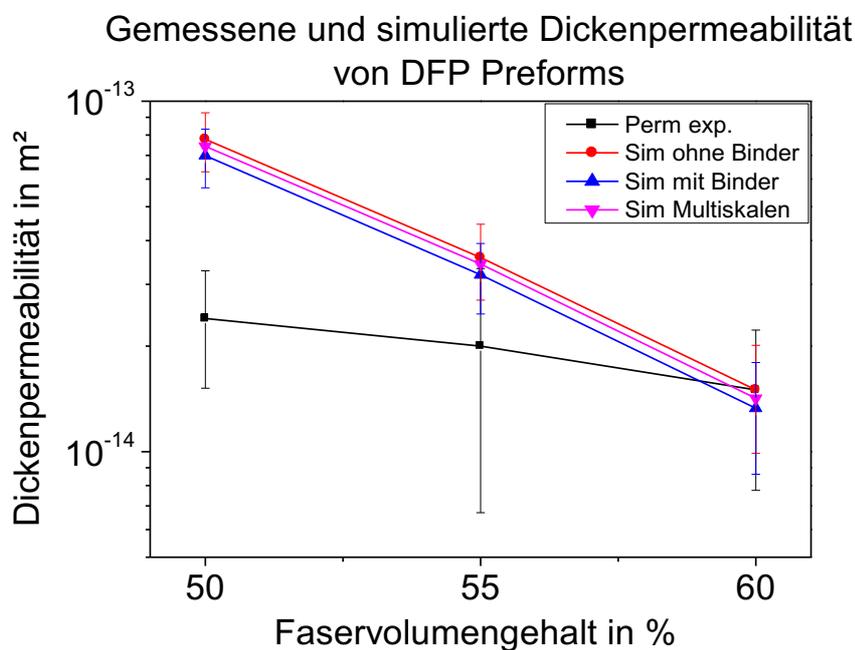


Abbildung 4.11: Vergleich der experimentellen und simulativen Ermittlung der Permeabilität senkrecht zur Faserrichtung von 50-60 % FVG

Der Zusammenhang zwischen Bindervolumengehalt in der Preform und der Permeabilität der Preform senkrecht zur Faserrichtung ist in den durchgeführten Simulationen fast linear. Beim Vergleich dieser Ergebnisse zu den experimentellen Ergebnissen (Kapitel 3.3.3), ist dies widersprüchlich, da diese eine leicht ansteigende Permeabilität mit höherem Bindergehalt nahelegen. Dies wird auch von Shih et al. [101] sowie von Rohatgi und Lee [102] berichtet. In der Simulation jedoch wurde eine Reduktion der Permeabilität beobachtet, die durch eine reduzierte Porosität erklärt werden kann, wie auch von Caglar et al. [103] berichtet. Es ist zu vermuten, dass die

¹² Also z. B. „Verrutschen“ einer Einzelfaser in einen Zwischenraum zwischen zwei anderen Fasern

Binderpartikel in der realen Preform zu einer Inhomogenität der Faserstruktur und somit zu lokal größeren Zwischenfaserfließkanälen führen, die einen stärkeren Effekt als die in den Simulationen beachtete Reduktion der Porosität haben, da in der Simulation die Binderpartikel ohne Faserbewegung überlagert wurden und keine Inhomogenität verursachen.

Berechnung der Mesopermeabilität mit Binderpartikeln mit homogenisierter Mikropermeabilität (Multiskalenmodell)

Wie bereits zuvor erwähnt, ist es bei größeren Rechenmodellen effizient, einen Multiskalenansatz zu verfolgen anstatt jedes Detail auch auf höhere Ebenen zu transferieren. Aus diesem Grund wurden hier zum Vergleich die berechneten Permeabilitäten für die Mikroebene verwendet, um diese einem soliden Volumenkörper zuzuweisen. Dann wird dieser wiederum mit statistisch verteilten Binderpartikeln überlagert, die ebenso die Porosität verringern und wie zuvor als Strömungshindernis agieren. Da in diesem Modell keine Einzelfasern aufgelöst werden müssen, ist die Voxelgröße nur durch die Größe der Binderpartikel limitiert (größter Durchmesser des Ellipsoids $125\ \mu\text{m}$ anstatt $7\ \mu\text{m}$ Einzelfaserdurchmesser), daher wurde ein Modell mit einer Größe von 256^3 Voxeln von $10\ \mu\text{m}$ modelliert. Wie bereits bei der Berechnung der Mesopermeabilität unter Berücksichtigung der Einzelfasern ergibt sich hier in der logarithmischen Darstellung ein linearer Zusammenhang zwischen Faservolumengehalt und Permeabilität. Die Permeabilitätswerte liegen tendenziell etwas höher als in der detaillierten Modellierung und etwas unter den Werten für die reine Mikropermeabilität ohne Binderpartikel. Eine mögliche Erklärung ist die Präsenz von lokalen Fließkanälen um Binderpartikel herum in der Mikroauflösung, die aufgrund der schlechteren Detaillierung im Multiskalenansatz nicht abgebildet werden können. Daher ist für die hier noch darstellbare Einheitszellengröße mit Einzelfasern der Einzelfaseransatz zu bevorzugen. Sobald größerskalige Strukturvariationen berücksichtigt werden müssen, ist allerdings aufgrund der Rechenleistung der Multiskalenansatz zu wählen.

4.1.8 Erweiterung auf eine dreidimensionale Betrachtung der Faserstruktur

In den bisherigen Simulationen auf Mikroebene wurde vereinfachend angenommen, dass durch die Berechnung von Permeabilitäten vieler zufälliger Einheitszellen auf

2D-Ebene eine Annäherung an den 3D-Fall vorgenommen werden kann. Um dies zu verifizieren, erfolgt nun eine Erweiterung auf den 3D-Fall (Abbildung 4.12).



Abbildung 4.12: Erweiterung der Einheitszelle auf 3D

Anhand der getroffenen Randbedingungen im Solver entspricht die Permeabilität weiterhin paralleler Fasern in einer 3D-Berechnung den Ergebnissen des reinen 2D-Falls. Reale Faserstrukturen weisen jedoch eine erheblich größere Komplexität auf. Die betrachteten Einflussgrößen sind im Einzelnen:

- Faserwelligkeit: Reale Fasern liegen nicht vollständig gestreckt vor, gängige Beschreibungsansätze betrachten daher eine sinusförmige Welligkeit mit Wellenlänge und Amplitude
- Faserausrichtung: Fasern liegen nicht immer vollständig gerade in der Preform vor, zum Beispiel können während des Ablageprozesses Winkelabweichungen entstehen. Einzelne Fasern können vom globalen Faserwinkel abweichen
- Faserdurchmesser: Kohlenstofffasern weisen einen Faserdurchmesser von ca. 7 μm auf, Glasfasern ca. 12 μm . Faserdurchmesser können darüber hinaus durch den Herstellungsprozess schwanken

Wie bereits in Kapitel 2.7 betrachtet, kann der Winkel, in dem die Fasern in der Preform zur Hauptachse vorliegen sowie die Welligkeit und die Schwankung dieser Einflussgrößen einen Einfluss auf die Permeabilität der Preform haben.

Vereinfachend wird hier anhand von Schlifffbildern ermittelt, welche Faserwinkel in der Ebene zu erwarten sind, um diese bei der späteren Modellierung weiter zu verwenden. Da die Ermittlung der Welligkeit voraussetzen würde, dass eine Faser mindestens eine gesamte Wellenlänge im Schliff zu sehen wäre, dies aber im 2D-Schnitt

nicht der Fall ist und eine Betrachtung des 3D-Falls sehr komplex wäre, wird hier nur der lokale Winkel eines geraden Teilstegments betrachtet. Die Auswertung erfolgt anhand per Zufallsverfahren ausgewählter Teilstücke und ist in Abbildung 4.13 dargestellt.

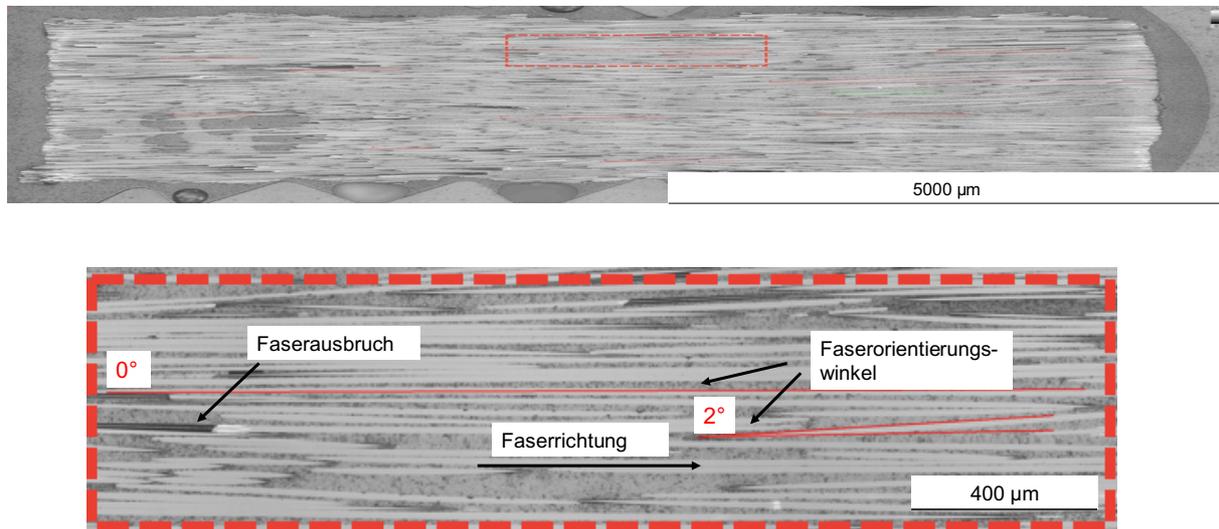


Abbildung 4.13: Beispielhafte Darstellung der Ermittlung des Winkels einzelner Fasern

Dies wurde bei Schliffen je einer imprägnierten GF- und CF-Preform (FVG ca. 55 %) durchgeführt. Der ermittelte Mittelwert aus 30 Messungen und die Standardabweichungen sind in Tabelle 4.2 dargestellt. Der Mittelwert ist lediglich ein Maß dafür, wie gut die Preform im Schliff ausgerichtet war, das relevante Maß ist die Standardabweichung.

Tabelle 4.2: Mittelwert und Standardabweichung von je 30 gemessenen In-Plane-Faserwinkel von GF- und CF-Preforms

Preformtyp	Mittelwert in °	Standardabweichung in °
Glasfaser	0,46	2,03
Kohlenstofffaser	-0,06	1,24

Um den Einfluss dieser Parameter konkret zu betrachten, wurde ein Versuchsplan der Art I-optimal¹³ gewählt, da in der Simulation alle Parameter einzeln und in belie-

¹³ Der optimale Versuchsplan bietet sich an, wenn eine große Anzahl an Faktorstufenkombinationen bei einem vorgegeben Versuchsumfang abgebildet werden sollen. Der I-optimale Plan wird gewählt,

bigen Zwischenschritten dargestellt werden können. Somit kann ein breiter Parameterraum sehr gut und ohne Lücken abgedeckt werden. Die gewählten Grenzen der Parameter sind in Tabelle 4.3 dargestellt. Diese wurde anhand der real angetroffenen Werte aus Tabelle 4.2 ausgewählt, um deren Einfluss auf die Permeabilität abzubilden.

Tabelle 4.3: Parameterraum für die 3D-Mikropermeabilitätssimulation

Faktor	Name	Grenzen	
		Niedrig	Hoch
A	Wellenlänge Sinus	500 μm	3000 μm
B	Amplitude Sinus	0 μm	50 μm
C	Faserdurchmesser	7 μm	12 μm
D	Varianz Faserdurchmesser	0 %	10 %
E	Mittlerer Faserwinkel	0°	5°
F	Standardabweichung Faserwinkel	1°	3°

Die Modellbildung erfolgte mit der Software Design Expert 12. Zur Abdeckung des Parameterraums werden die Faktoren unabhängig voneinander variiert. Abbildung 4.14 zeigt beispielhaft in einer zweidimensionalen Darstellung die Verteilung einzelner Simulation über die Faktoren Faserwinkel und Sinus-Amplitude.

sodass der gewichtete Mittelwert der Quadrate (mittlere Breite des Vertrauensbereiches für das Regressionsmodell) möglichst klein sein soll [134].

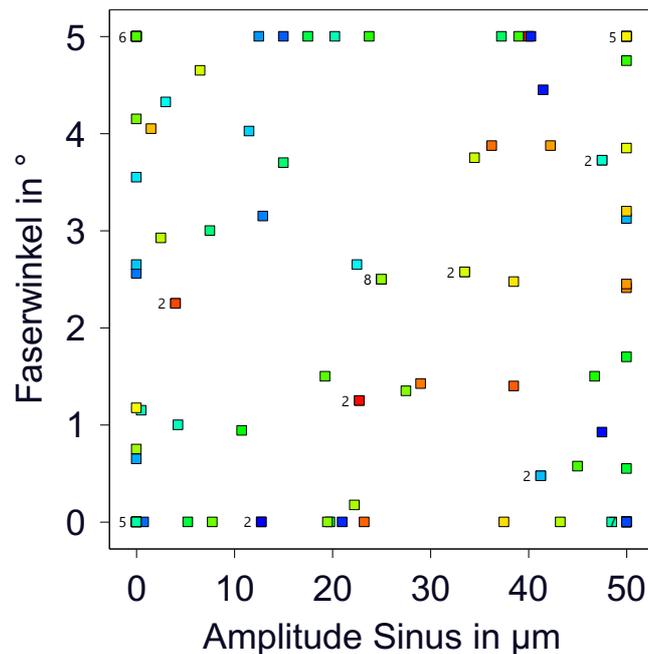


Abbildung 4.14: Darstellung des Parameterraums des I-optimalen Versuchsplans anhand der Beispiele Faserwinkel und Sinus-Amplitude. Kombinationen mit Zahlen stellen Variation anderer Parameter in der gleichen 2D- Kombination der gezeigten Parameter dar

Anhand der Ergebnisse können nun die Einzelfaktoren sowie deren Interaktionen auf Signifikanz untersucht werden und die Zusammenhänge im nächsten Schritt grafisch dargestellt werden. Die Unterscheidung erfolgt dabei anhand des p-Wertes. Beträgt dieser weniger als 0,05, ist der Faktor bzw. die Faktoreninteraktion signifikant. Wie in Tabelle 4.4 dargestellt, sind die Faktoren „Wellenlänge Sinus“, „Amplitude Sinus“ sowie „Faserdurchmesser“ signifikant. Dahingegen konnte für „Varianz Faserdurchmesser“, „Mittlerer Faserwinkel“ sowie „Standardabweichung Faserwinkel“ im betrachteten Parameterraum keine Signifikanz festgestellt werden.

Die Wechselwirkungen AB, BF und CE sind ebenso signifikant, wie im Weiteren detailliert wird.

Tabelle 4.4: Darstellung der p-Werte aller Einzelfaktoren sowie der signifikanten Wechselwirkungen

Faktor / WW	Name	P-Wert	Signifikant
A	Wellenlänge Sinus	< 0,0001	Ja
B	Amplitude Sinus	< 0,0001	Ja
C	Faserdurchmesser	< 0,0001	Ja
D	Varianz Faserdurchmesser	0,9692	Nein
E	Mittlerer Faserwinkel	0,1334	Nein
F	Standardabweichung Faserwinkel	0,1867	Nein
AB	Wellenlänge Sinus / Amplitude Sinus	< 0,0001	Ja
BF	Amplitude Sinus / Standardabweichung Faserwinkel	0,0249	Ja
CE	Faserdurchmesser / Mittlerer Faserwinkel	0,0252	Ja

Der Verlauf der Permeabilitätswerte mit sich ändernden Hauptfaktoren A, B und C sind in Abbildung 4.15 dargestellt.

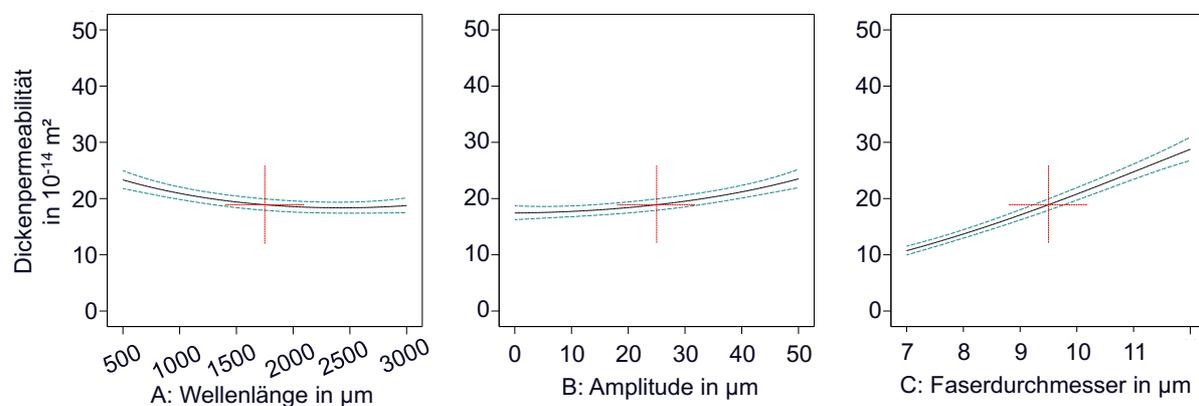


Abbildung 4.15: Veränderung der Dickenpermeabilität mit den Faktoren A, B und C

Anhand deren Verlauf lässt sich erkennen:

- A: Bei niedriger Wellenlänge der Fasergeometrie erfolgt eine leichte Steigerung der Dickenpermeabilität im Vergleich zu höheren Wellenlängen. Je kürzer die Wellenlänge ist, desto öfter „schwingt“ die Faserkontur in der betrachteten Einheitszelle. Stärkere „Schwingung“ führt dabei zu einer höheren Inhomogenität und somit auch zu einer leicht höheren Permeabilität

- B: bei höherer Amplitude der Sinusform ist eine höhere Dickenpermeabilität festzustellen. Dies lässt sich vergleichbar zu A erklären
- C: Mit höherem Faserdurchmesser steigt die Dickenpermeabilität. Dies ist zu erwarten, da die Mikroporenräume zwischen Einzelfasern für größere Einzelfasern größer sind und somit größere Fließkanäle zur Verfügung stehen.

Neben den Einzelfaktoren sind auch deren Wechselwirkungen relevant. Soweit nicht anders benannt, werden die Wechselwirkungen zwischen den Faktoren in der Mitte des Parameterraums der anderen Faktoren dargestellt. In Abbildung 4.16 ist die Wechselwirkung zwischen Wellenlänge und Amplitude dargestellt. Es ist zu erkennen, dass – erwartungsgemäß – bei Amplitude 0 die Permeabilität über die Wellenlänge konstant ist, da die Faser keine Sinusform annimmt. Mit sinkender Wellenlänge und steigender Amplitude steigt aufgrund wachsender Inhomogenität die Dickenpermeabilität.

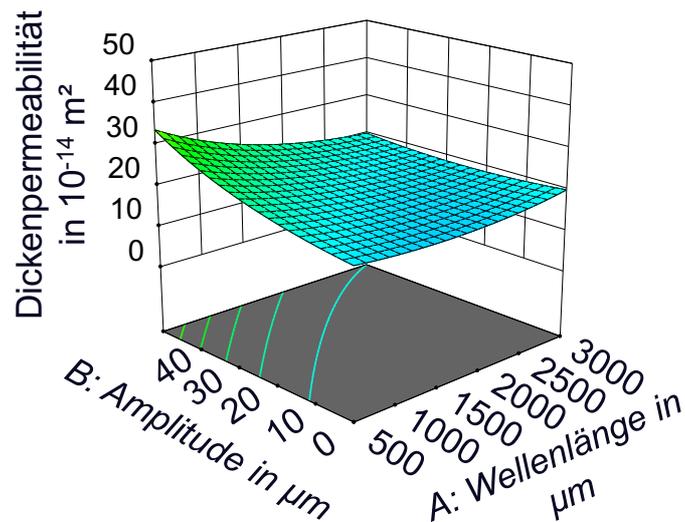


Abbildung 4.16: Wechselwirkung zwischen Wellenlänge und Amplitude

In Abbildung 4.17 ist die Wechselwirkung zwischen Amplitude der Sinusform und der Standardabweichung des Faserwinkels dargestellt. Bei größerer Amplitude erfolgt eine (sehr) leichte Steigerung der Permeabilität mit abnehmender Standardabweichung des Faserwinkels. Bei Amplitude 0 hat die Standardabweichung des Faserwinkels hingegen keinen Einfluss auf die Permeabilität.

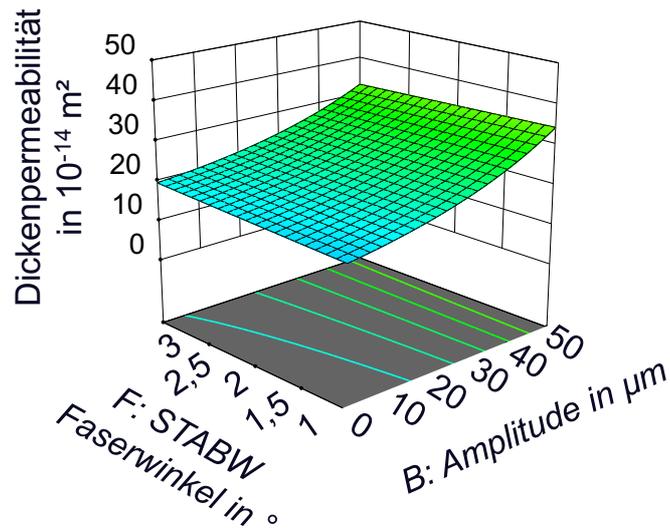


Abbildung 4.17: Wechselwirkung zwischen Amplitude und Standardabweichung Faserwinkel

Die Wechselwirkung zwischen Faserdurchmesser und Faserwinkel ist in Abbildung 4.18 dargestellt. Bei höheren Faserdurchmessern sinkt die Permeabilität leicht mit kleinerem Faserwinkel. Bei niedrigen Faserdurchmessern hingegen steigt die Permeabilität leicht mit sinkendem Faserwinkel.

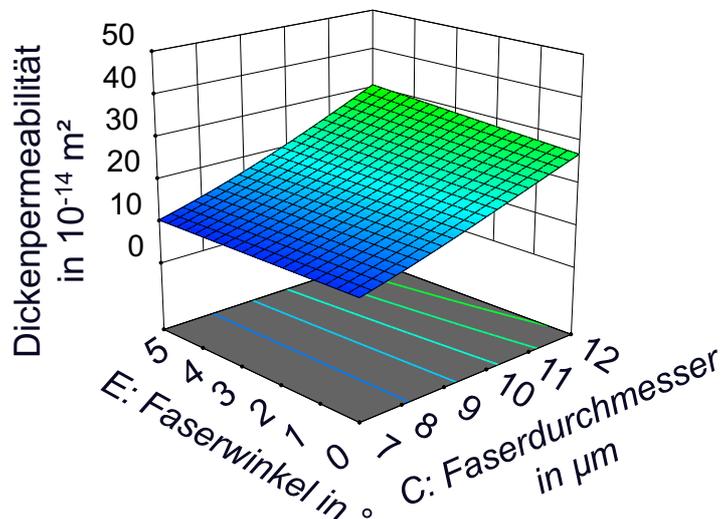


Abbildung 4.18: Wechselwirkung zwischen Faserdurchmesser und Faserwinkel

Zusammenfassend konnte festgestellt werden, dass vor allem der Faserdurchmesser der Einzelfasern einen recht großen Einfluss auf die Permeabilität hat und durch Verwendung von dickeren Fasern eine Permeabilitätssteigerung erreicht werden könnte. Die Parameter hinsichtlich der Wellenform der Fasern (Amplitude und Wellenlänge) sind zwar statistisch signifikante Faktoren, erzielen aber keine praktisch

relevante Veränderung der Permeabilität, da sie weder ausreichend effektiv noch im Prozess gut beeinflussbar sind. Somit war die zuvor getroffene Annahme, dass es zur Bestimmung der Mikropermeabilität ausreicht, eine größere Anzahl zufälliger Faseranordnungen paralleler Fasern zu betrachten, zutreffend. Hierdurch kann sowohl bei der Generierung der Faserstrukturen als auch bei der Lösung des Strömungsproblems Rechenaufwand und Zeit gespart werden.

4.2 Mesomodellierung

Anhand der zuvor gezeigten Ergebnisse hinsichtlich der Mikrostruktursimulation können diese nun auf Preformstrukturen übertragen werden, die auf der Mesoebene variiert wurden. Wie bereits in Kapitel 3.3 experimentell und in Kapitel 4.1.8 simulativ gezeigt, hat eine reine Variation der Mikrostruktur keinen praktisch relevanten Einfluss auf die Dickenpermeabilität. Daher werden im Folgenden nur Ansätze weiter betrachtet, die die Mesostruktur der Preform beeinflussen.

4.2.1 Rovingquerschnittsform

Bei der Ablage von DFP-Strukturen erfolgt im Idealfall eine Ablage der Rovings in parallelen Bahnen, wobei bei wenig schwankender Rovingbreite und guter Maschinengenauigkeit weder Lücken noch Überlappungen entstehen. In diesem Fall sind die einzelnen Bahnen und Lagen nach der Ablage bzw. der späteren Imprägnierung und Aushärtung mit dem Harzsystem nicht mehr voneinander zu separieren. Genau dieser Aspekt führt wie in Kapitel 2.4.6 gezeigt zu der niedrigen Permeabilität von DFP Preforms verglichen zu konventionellen textilen Halbzeugen. Wird nun hypothetisch angenommen, dass es anlagentechnisch möglich sei, einen Roving statt in einer „Rechteckform“ in einem elliptischen Querschnitt abzulegen und beizubehalten, könnten Mesofließkanäle vergleichbar zu textilen Halbzeugen entstehen, da mit Ellipsen keine vollständige Querschnittsfüllung möglich ist.

In diesem Beispiel wird die Permeabilität einer reinen Mikrostruktur mit 50 % FVG, die wie zuvor erarbeitet simulativ bestimmt wurde, mit einer Mesostruktur, die elliptische Faserbündel mit einem FVG von 64 % enthält, verglichen¹⁴. Die Gesamtfläche der betrachteten Einheitszellen wurde hierbei konstant gehalten, das Aspektverhält-

¹⁴ 64 % errechnen sich daraus, dass der Gesamtfaservolumengehalt über die Einheitszelle bei 50 % konstant gehalten wird, durch den enthaltenen Ellipsenquerschnitt allerdings weniger Raum für die Fasern zur Verfügung steht.

nis der Ellipsen wurde zwischen 1:13 bis 1:1 variiert. Die Flächen der Faserpackung und des umgebenden Porenraums verändern sich also nicht, lediglich deren Form.

Das Ergebnis der Berechnung der Mesopermeabilität ist in Abbildung 4.19 dargestellt.

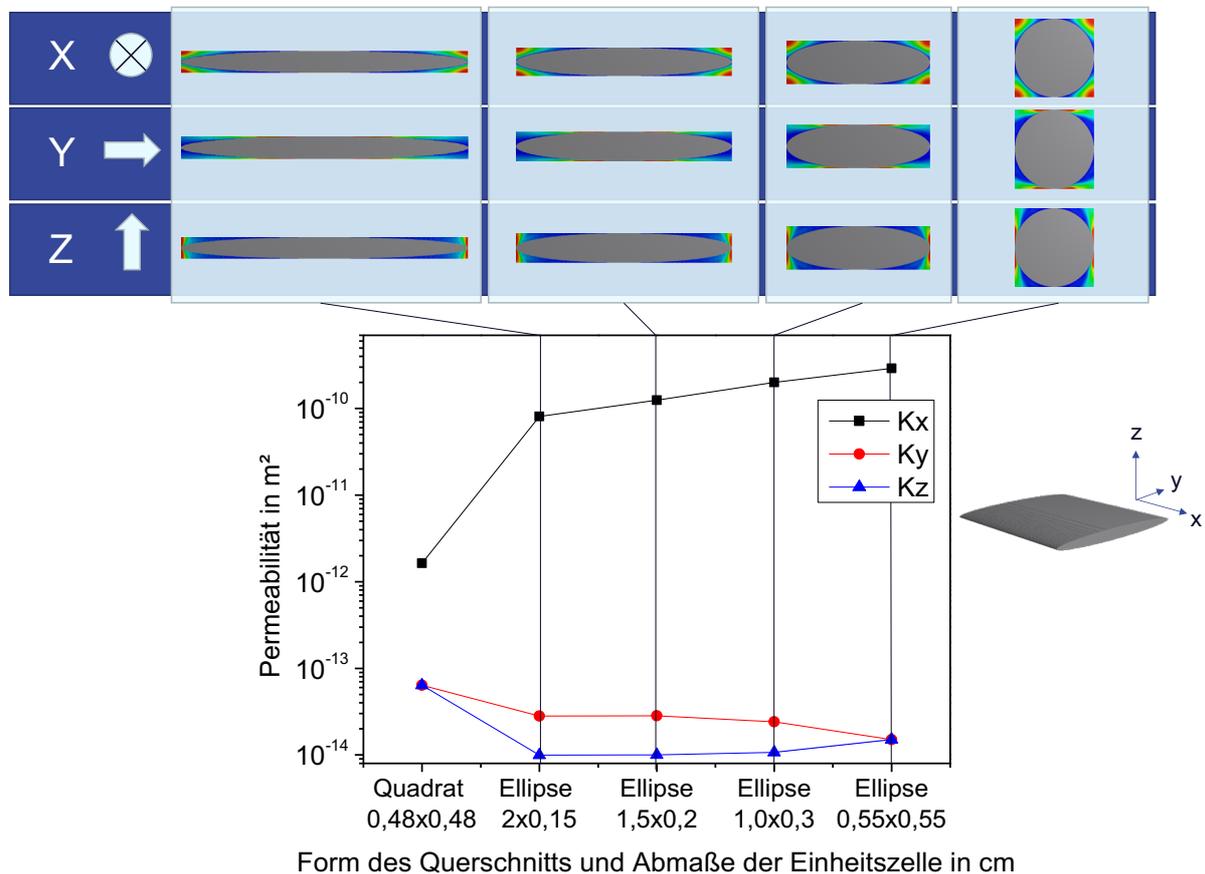


Abbildung 4.19: Vergleich der Mesopermeabilität von Ellipsen mit verschiedenen Aspektverhältnissen verglichen mit reiner Mikropermeabilität. Gesamtfaservolumengehalt jeweils 50 %

Die Permeabilität in Faserrichtung (x-Richtung) steigt im Vergleich zur reinen Mikropermeabilität deutlich an und mit sinkendem Aspektverhältnis weiter. Dies ist damit zu begründen, dass die Fließkanäle bis hin zur Kreisform immer größer werden. Gleichzeitig sinkt die Permeabilität in y-Richtung und z-Richtung, da ein großer Anteil der zu durchfließenden Länge die Permeabilität der Mikrostruktur mit 64 % FVG besitzt und die leichter zu durchfließenden Mesofließkanäle dann nur einen geringen Anteil ausmachen. Die hier getroffene Symmetrierandbedingung impliziert, dass der nächste Roving jeweils direkt an der Kante des ersten Rovings anliegt und dass zwischen ihnen keinerlei offener Mesofließkanal zurückbleibt.

4.2.2 Ablagesequenz der Rovings („Makro-Gewebe“)

Eine Strukturvariation, die bereits in Kapitel 3.3 experimentell betrachtet wurde, ist die Modifikation der Ablagesequenz, um gezielt Ondulationen bzw. Kreuzungspunkte in die Preformstruktur einzubringen. Anhand der durch optische Vermessung und Schliffbilder vorgenommenen Charakterisierung der realen Preform wurde eine Modellierung in GeoDict vorgenommen. Hierzu wurde zunächst ein Textil mit diesen geometrischen Parametern erstellt, dies anhand Symmetriebedingungen zugeschnitten, die Einzellagen kompaktiert (Vorgehen analog zu [137]) und zu einer Preform gestapelt (Abbildung 4.20).

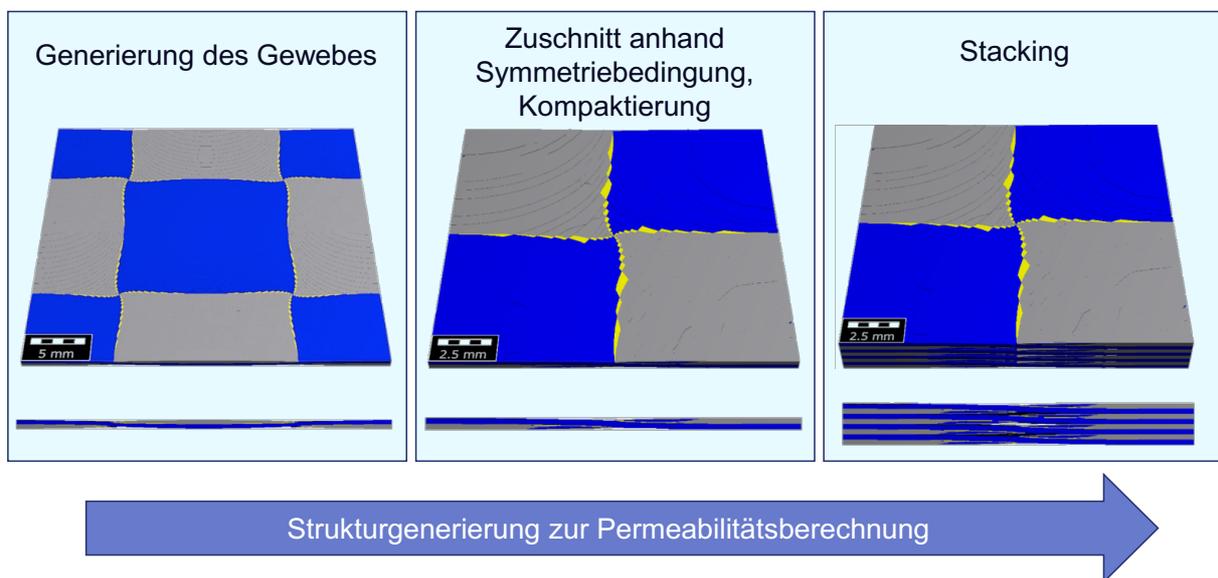


Abbildung 4.20: Generierung eines digitalen Modells für die Modifikation der Legesequenz

Im Anschluss wurde den Rovings, die als Festkörper modelliert wurden, die entsprechende Permeabilität in die drei Raumrichtungen zugewiesen und diese somit als poröse Festkörper (Faservolumengehalt 63 %) behandelt. Die Permeabilität in Faserichtung wurde analog zum zuvor beschriebenen Vorgehen ermittelt. Schlussendlich kann so eine Strömungsberechnung auf der generierten Struktur durchgeführt werden. Es ist anhand der dargestellten Strömungsgeschwindigkeiten (Abbildung 4.21) gut zu erkennen, dass insbesondere der Kreuzungspunkt in der Mitte des Lagenaufbaus erheblich zur Gesamtströmung in Dickenrichtung beiträgt. Aufgrund des Aufbaus der Einzellagen ohne Versatz (wie auch in der realen Preform) liegen die Kreuzungspunkte exakt übereinander und begünstigen so erheblich das Fließen.

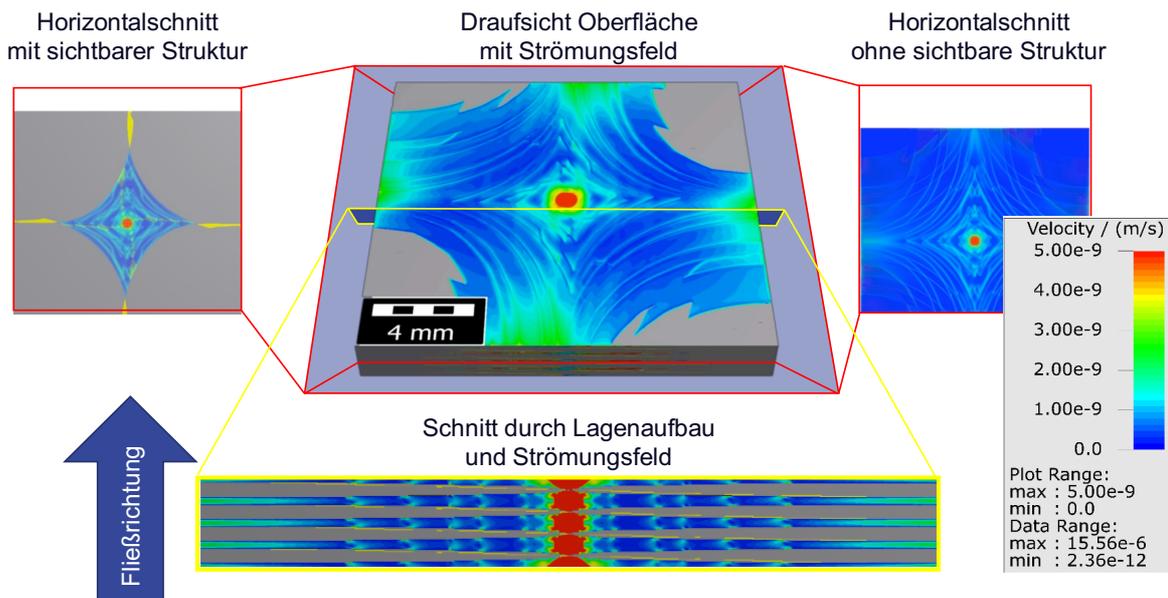


Abbildung 4.21: Visualisierung des erzeugten Strömungsfeldes für die Modifikation der Legesequenz

Der Vergleich der Permeabilitäten zwischen Experiment und Simulation ist in Tabelle 4.5 dargestellt. Die Permeabilitätssteigerung des modifizierten Lagenaufbaus konnte in der Simulation gezeigt werden, allerdings liegt das ermittelte Ergebnis noch unter dem Messergebnis. Ein möglicher Grund hierfür ist die Eigenschaft des starren Simulationsmodells, dass sich keine Verschiebungen durch die Fluidströmung ergeben können. In der reellen Preform könnte es an den Kreuzungspunkten durch das Fluid zu einer Aufweitung kommen, die die Permeabilität erhöht. Trotzdem kann der Effekt der Modifikation gut dargestellt werden und das Fließverhalten kann anhand des berechneten Strömungsfeldes gut nachvollzogen werden.

Tabelle 4.5: Dickenpermeabilität für modifizierten Lagenaufbau

Art	Dickenpermeabilität in m^2
Unmodifizierte Preform gemessen	$1,25 \cdot 10^{-14}$
Modifizierter Lagenaufbau gemessen	$2,98 \cdot 10^{-14}$
Modifizierter Lagenaufbau simuliert	$2,10 \cdot 10^{-14}$

4.2.3 Vernähung

Im experimentellen Teil wurde bereits gezeigt, dass die größte Effektivität hinsichtlich der Verbesserung der Dickenpermeabilität durch Vernähen erreicht werden konnte.

Daher soll auch dieser simulativ abgebildet werden. Aus den Ergebnissen aus Kapitel 3.4 wurden die Permeabilitätswerte für Stichdichten in einem Bereich von $0,22\text{-}4\text{ cm}^2$ jeweils für den reinen unidirektionalen Lagenaufbau und den $0/90^\circ$ Lagenaufbau extrahiert. Für die Faktoren Fadenspannung und Verschiebung wurden die Mittelwerte verwendet, diese hatten aber ohnehin keinen signifikanten Einfluss auf die Dickenpermeabilität. Für die Fadenfeinheit wurde der Faden mit 40 tex modelliert. Zum Aufbau einer Einheitszelle¹⁵ (Abbildung 4.22) wurde diese zunächst als poröser Körper mit zugewiesener Permeabilität (aus Mikropermeabilitätssimulation, FVG 60 %) modelliert.

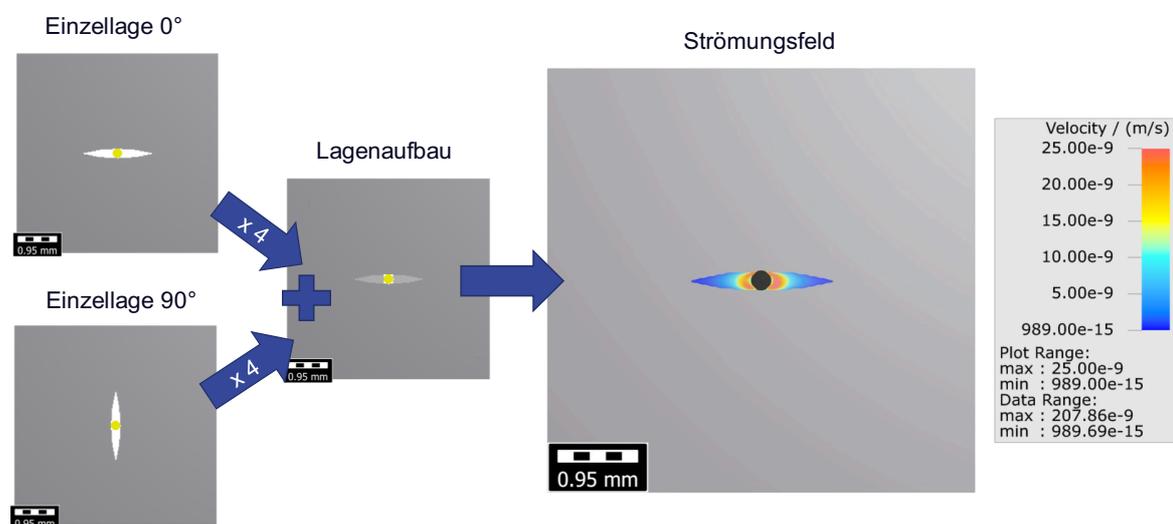


Abbildung 4.22: Vorgehen zur Ermittlung der Permeabilität einer vernähten Preform. Ein augenförmiger Ausschnitt, wie er auch in realen Preforms in Schliften oder im μCT beobachtet und vermessen werden kann (bereits in Abbildung 3.15 dargestellt), wird aus dem Körper ausgeschnitten und um den Nähfaden in der Mitte des Ausschnittes ergänzt. Dieser erhält ebenso eine zugewiesene Permeabilität, die simulativ abgeschätzt wurde. Im Falle des $0/90^\circ$ -Lagenaufbaus werden dann insgesamt Einzellaugen mit den um 90° verdrehten Ausschnitten aufeinandergesetzt und im Anschluss eine Strömungssimulation durchgeführt.

Wie in den Ergebnissen in Abbildung 4.23 zu erkennen, können mittels der Simulationen die experimentellen Werte recht gut abgebildet werden. Die ermittelten Werte liegen in einem vergleichbaren Bereich und die unterschiedlichen Steigungen zwi-

¹⁵ Die Größe der Einheitszelle wird so gewählt, dass jeweils ein Stich enthalten ist, die umgebende poröse Struktur wird dann an die zu simulierende Stichdichte angepasst.

schen dem UD-Lagenaufbau und dem 0/90°-Lagenaufbau können deutlich nachvollzogen werden, somit ist auch der kompliziertere Fall der reduzierten Fläche des durchgehenden Fließkanals im 0/90°-Lagenaufbau gut abgebildet. Wie auch bei den experimentellen Ergebnissen kann ein nahezu linearer Zusammenhang zwischen der Stichdichte und der ermittelten Dickenpermeabilität angenommen werden.

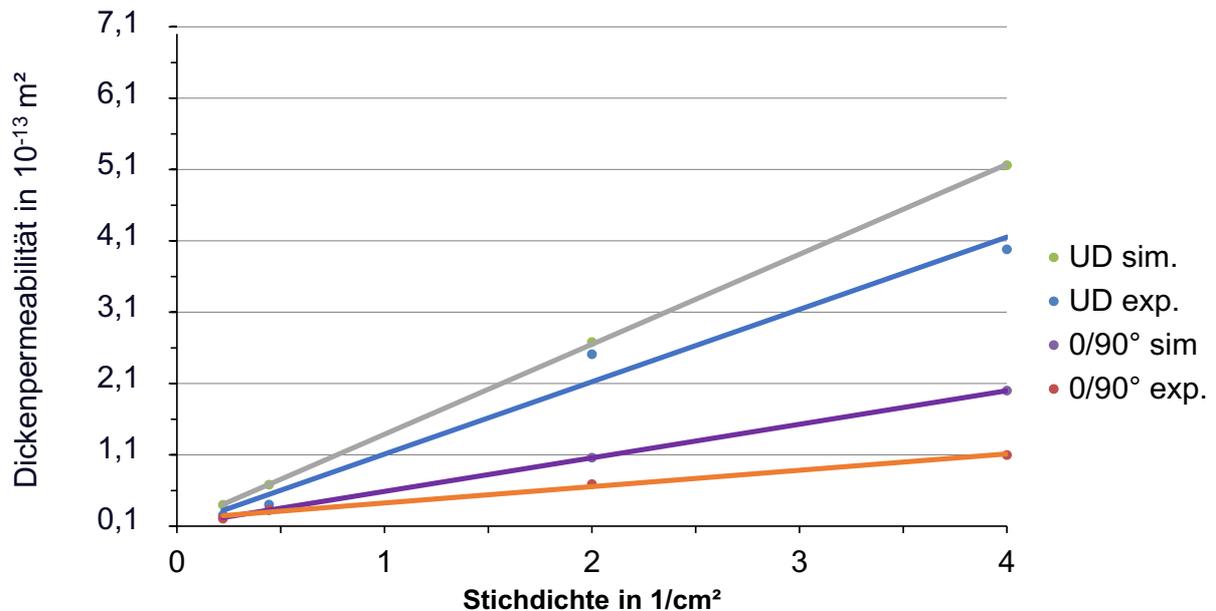


Abbildung 4.23: Vergleich experimentell und simulativ ermittelter Permeabilitäten für vernähte Preforms bei verschiedenen Stichdichten für UD- und 0/90°-Lagenaufbau

4.3 Zusammenfassung Modellbildung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde die numerische Berechnung der Permeabilität senkrecht zur Faserrichtung auf mehreren Ebenen betrachtet. Es wurde gezeigt:

Für reine Mikrostrukturen

- Bei der Berechnung der Permeabilität auf kleinen zufälligen RVE kann eine zufällige statistische Verteilung der Ergebnisse ähnlich einer Gaußverteilung beobachtet werden. Dies führt zu der Annahme, dass die Berücksichtigung von 10 zufälligen RVE pro Parametersatz zu einer zuverlässigen statistischen Abdeckung führt.
- Um geometrische Feinheiten von Einzelfasern ausreichend abzubilden, muss die Voxelgröße kleiner als ein Zehntel des Faserdurchmessers gewählt werden.

- Eine RVE sollte mindestens 800 einzelne Fasern enthalten
- Für die Übertragung des Modells von der Mikro- auf die Mesoebene können bei der Betrachtung von nicht variierten DFP-Preforms Binderpartikel im Modell hinzugefügt werden. Die zwei Ansätze, entweder die Permeabilität auf Mesoebene unter Berücksichtigung von Einzelfasern oder ohne Berücksichtigung von Einzelfasern zu berechnen, zeigen ähnliche Ergebnisse innerhalb einer Abweichung von 5 %. Mögliche Erhöhungen der Permeabilität durch die Binderpartikel (Einbringung von Inhomogenitäten) konnten allerdings nicht abgebildet werden.
- Im Vergleich zu Messungen an realen DFP-Strukturen liegen die simulierten Werte für die Mikropermeabilität bei 50 % FVG etwa dreimal höher, während sie bei 60 % FVG eine gute Übereinstimmung zeigen.

Für Strukturvariationen zur Erhöhung der Dickenpermeabilität

Die Nutzung von Multiskalenmodellen, also die Annäherung quasi homogener Preformbereiche durch Zuweisen einer Permeabilität und Modellierung der Struktur auf Mesoebene ist eine zulässige Vereinfachung. Im Einzelnen konnte festgestellt werden:

- Die Veränderung der Rovingquerschnittsform kann simulativ für den Idealfall abgebildet werden, was experimentell nicht möglich ist. Die Wahl von idealen Ellipsen ohne explizite Lücken zwischen Einzelrovings hat vor allem eine Erhöhung der Permeabilität in Faserrichtung zur Folge, senkrecht dazu ist kein signifikanter Einfluss festzustellen, weder in Ebenen- noch in Dickenrichtung.
- Die Einbringung von Ondulationen durch Modifikation der Ablagesequenz kann gut simulativ modelliert werden, weitere darauf basierende Strukturvariationen können daraus abgeleitet werden.
- Die Vernähung der Preforms konnte ebenso gut abgebildet werden, der Unterschied in der Steigung der linearen Annäherung an die Werte zwischen UD- und 0/90° Lagenaufbauten nähert die experimentellen Ergebnisse gut an.

Insgesamt wurde gezeigt, dass sich Preformstrukturen auch deutlich unterhalb der üblicherweise betrachteten Makroebene gut simulativ abbilden lassen. Hierzu wurden Richtlinien zur Modellierung der Strukturen auf Mikroebene entwickelt und dargestellt. Diese Richtlinien lassen sich auf eine Vielzahl weiterer Preformarten über-

tragen, zum Beispiel auch auf Gewebestrukturen. Die Modellierung erfordert hierbei vor allem eine gute Kenntnis der Preformstruktur. Es konnte festgestellt werden, dass die simulativen Ergebnisse vor allem von der Güte der Strukturabbildung abhängen. Soweit eine Struktur nach der Modellierung augenscheinlich der Realität entspricht, besteht eine hohe Wahrscheinlichkeit, dass auch die hierauf berechneten Strömungsfelder realistisch sind. Dies ist beispielsweise bei der Berechnung der Mikropermeabilitäten deutlich, bei der die Einzelfasern bei ausreichender Auflösung nicht nur konvergierende Permeabilitätsergebnisse zeigen, sondern auch optisch „rund“ aussehen. Eine unrealistisch aussehende Struktur wird mit sehr großer Wahrscheinlichkeit keine sinnvolle Strömungsberechnung ermöglichen. Durch simulative Modellierung konnten Strukturvariationen betrachtet werden, die experimentell nicht ohne weiteres zugänglich sind. So ist eine gezielte exakte Beeinflussung des Faserwinkels und der Faserwelligkeit schwer durchführbar. Ebenso ist die Beeinflussung der Rovingform wie simulativ betrachtet in der Realität zunächst nicht zugänglich. Trotzdem muss die Simulation mittels einiger Experimente an den Realfall angepasst werden.

5 Ableiten von Gestaltungsempfehlungen und Möglichkeiten zur Abschätzung des Imprägnierverhaltens

Ziel dieses Kapitels ist es, aus den im Rahmen dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnissen Richtlinien zu erarbeiten, die bei der Entwicklung einer DFP-Preform zur Verarbeitung im LCM-Verfahren gedacht ist, zu einer möglichst guten Dickenpermeabilität und somit zu einer schnellen und sicheren Imprägnierung führen. Die gezeigten Maßnahmen werden unterschieden nach dem Zeitpunkt, zu dem diese im Laufe der Entwicklung anzuwenden sind, nämlich während der Auswahl der Materialien, während der Einstellung des Ablageprozesses sowie beim Hinzufügen eines etwaigen weiteren Verarbeitungsschrittes.

5.1 Optimierung durch Materialauswahl

Ein wichtiges Kriterium für die Permeabilität der DFP-Preform ist die Auswahl der zu verwendenden Eingangsmaterialien, also üblicherweise der Fasern (in Form eines Rovings) sowie eines Bindermaterials (Tabelle 5.1).

5.1.1 Auswahl des Rovings

Hinsichtlich des verwendeten Fasermaterials konnte durch Vergleich von Preforms hergestellt aus Kohlenstofffasern und Glasfasern gezeigt werden, dass der Faserdurchmesser einen signifikanten Einfluss auf die Preformpermeabilität hat. Aufgrund der sich ergebenden Fließkanäle sind Fasern mit einem größeren Durchmesser vorteilhaft. Im Beispiel zeigten Kohlenstofffaserpreforms mit einem Faserdurchmesser von 7 μm im Vergleich zu Glasfaserpreforms mit einem Faserdurchmesser von 12 μm eine geringere Permeabilität um ca. 72 % (FVG 50 %), 53 % (FVG 55 %) bzw. 38 % (FVG 60 %).

5.1.2 Auswahl des Bindermaterials

Es konnte gezeigt werden, dass im Falle der Verwendung von pulverförmigem Bindermaterial grundsätzlich größere Binderpartikel zu einer höheren Preformpermeabilität führen. Diese können zwischen den Einzelrovings als „Abstandhalter“ dienen und somit Fließkanäle freihalten. Es ist allerdings zu beachten, dass größere Binderpartikel auch insgesamt ein größeres Volumen einnehmen, um einen ähnlichen Preformzusammenhalt zu erreichen.

In den durchgeführten Experimenten wurde ein duroplastisches Bindermaterial auf Bisphenol-A-Basis verwendet, das wie ein Thermoplast unter Hitzeeinfluss angeschmolzen werden kann. Wenn das Bindermaterial online während der Ablage beigefügt wird, wäre es ggf. möglich, nicht schmelzbare Partikel beizufügen, die während der Imprägnierung als Abstandhalter dienen können. Wenn diese beispielsweise aus dem später verwendeten Matrixsystem bestehen, wäre trotzdem eine Matrixkompatibilität gegeben und somit keine Beeinflussung der Verbundeigenschaften zu befürchten.

Bei der Verwendung von Rovings, die mittels aufkaschiertem Vlies anhaften können, ist mit dem Effekt des Abstandshalters nicht zu rechnen, da der Binder hier in sehr feinen Fäden vorliegt, die diese Funktion nicht erfüllen können.

5.1.3 Auswahl eines Bindertapes

Soll keine Online-Bebinderung verwendet werden, also statt Rovings und Bindermaterial als Einzelmaterial ein vorbebindertes Halbzeug (Bindertape) verwendet werden, kann die Vorbebindung genutzt werden, um eine bestimmte Rovingform einzustellen. Es wurde gezeigt, dass Inhomogenität in der Preform grundsätzlich zu höheren Permeabilitäten führen kann. Wird das Bindertape durch die Vorbebindung in einer Ellipsenform gehalten, können zwischen den einzelnen Strängen Fließkanäle offengehalten werden, die die Permeabilität verbessern können. Wenn darüber hinaus eine Matrixkompatibilität gegeben ist, können die Rovings nach der Imprägnierung durch Auflösung des Binders in der Matrix zu einer homogeneren Faserstruktur „verschwimmen“.

Eine denkbare Möglichkeit zur Herstellung einer Inhomogenität des Bindertapes ist die Umspinnung des Rovings mit einem Hilfsgarn. Im Vergleich zum Bindermaterial könnten hierdurch gezielt Fließkanäle offengehalten werden, die insgesamt die Imprägnierung erleichtern.

Tabelle 5.1: Optimierungsparameter Materialauswahl

Kategorie	Eigenschaft	Veränderung Permeabilität
Rovingauswahl	Faserdurchmesser größer	↑
Binderauswahl	Binderpartikelgröße	↑
	Binderpartikelmenge	●
	Binderpartikel teilweise nicht schmelzbar	↑
Bindertapeauswahl	Fixierte Ellipsenform	↑
	Binderpartikelmenge	●
	Umspinnung	↑

5.2 Optimierung durch Prozessparameter bei der Ablage

Bei der Ablage der Rovings im DFP-Verfahren kann durch die CNC-Ansteuerung des Legekopfs grundsätzlich eine gewisse Manipulation der Rovingstruktur erfolgen. Wie im Beispiel experimentell und simulativ gezeigt, kann ähnlich zu einem Gewebe durch ein alternierendes Ablagemuster durch Provokation von Ondulationen die Permeabilität gesteigert werden. Darüber hinaus wurde bereits in anderen Arbeiten gezeigt, dass willkürlich eingebrachte Gaps bei der Ablage als Fließkanäle dienen können. Eventuell auftretende Verschlechterungen der mechanischen Eigenschaften sind zu beachten. Bei der Verwendung von Pulverbinder ist es grundsätzlich zu favorisieren, diesen nur leicht anzuschmelzen, um die Anhaftung zwischen mehreren Rovings zu ermöglichen. Wird dieser zu weit angeschmolzen, kann aufgrund von Kapillarkräften eine „Migration“ des Bindermaterials in den Roving stattfinden, womit der Effekt der offengehaltenen Fließkanäle zwischen zwei Rovings nicht mehr auftritt. In diesem Fall kann es darüber hinaus zu einem „Verkleben“ der Rovings kommen, wodurch die Permeabilität beeinträchtigt werden kann. Die Prozessparameter der Wärmequelle sollten also sorgfältig eingestellt werden. Die Parameter sind in Tabelle 5.2 zusammengefasst.

Tabelle 5.2: Optimierungsparameter Ablageprozess

Kategorie	Eigenschaft	Veränderung Permeabilität
Ablagesequenz	Begünstigung von Ondulationen durch alternierende Ablage	↑
	Abstände zwischen benachbarten Rovings	↑
Prozessführung	Bindermaterial nur angeschmolzen, nicht in Roving migriert	↑

5.3 Optimierung durch Hinzufügen eines weiteren Verarbeitungsschrittes

Im Rahmen der Arbeit wurde gezeigt, dass die Dickenpermeabilität durch Vernähen der Preform sehr stark erhöht werden kann (Tabelle 5.3).

Bei Verwendung der Vernähung korreliert die Dickenpermeabilität sehr stark mit der Stichdichte (vgl. Abbildung 3.30), die mittels Stichabstand und Nahtabstand genau eingestellt werden kann. Zur Ermittlung der Steigung des linearen Zusammenhangs zwischen Stichdichte und Dickenpermeabilität genügt je Parametersatz die Messung der Permeabilität bei zwei verschiedenen Stichdichten, weitere Stichdichten können dann interpoliert bzw. in Grenzen auch extrapoliert werden. Die Verwendung eines dickeren Fadens ermöglicht eine weitere Erhöhung der Permeabilität. In Fall der Vernähung ist – soweit aus Sicht der Bauteilauslegung machbar - ein UD-Lagenaufbau zu bevorzugen, da in diesem Fall größere Fließkanäle durch die gesamte Preformdicke entstehen. Im Sinne einer optimalen Imprägnierung ist es vorteilhaft, eine möglichst homogene und dichte Verteilung der Stiche über die Preformfläche zu erreichen.

In der durchgeführten Parameterstudie hat sich herausgestellt, dass sich die Faden- spannung des Oberfadens und die Präsenz des Unterfadens nicht wesentlich auf die Dickenpermeabilität auswirken. Aus diesem Grund – und zur Vereinfachung der Preformherstellung – ist es also vollkommen ausreichend, ein reines Tufting anstelle einer Vernähung als weiteren Verarbeitungsschritt in Betracht zu ziehen, wodurch die Preform nur von einer Seite zugänglich sein muss und kein Unterfaden benötigt wird.

Ein weiterer Vorteil der Vernähung ist die deutliche Erhöhung des Kompaktierungswiderstandes der Preform im Vergleich zum unvernähten Zustandes, was insbeson-

dere bei Verwendung von Dickenimprägnierungsverfahren mit höheren Injektionsdrücken vorteilhaft ist.

Tabelle 5.3: Optimierungsparameter Vernähen / Tuften

Kategorie	Eigenschaft	Veränderung Permeabilität
Materialauswahl	Nähfadendurchmesser größer	↑
Prozessparameter	Fadenspannung erhöht	●
	Unterfaden entfernt (bzw. Tufting statt Vernähen)	●
	Stichdichte erhöht	↑
	Lagenaufbau UD statt 0/90°	↑

6 Zusammenfassung

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, ein grundlegendes Verständnis des Imprägnierverhaltens von Dry Fiber Placement Preforms zu schaffen.

Zu diesem Zweck wurde eine umfassende Versuchsreihe durchgeführt, die Strukturvariationen der Preforms auf verschiedenen Skalenebenen untersuchte. Es konnte gezeigt werden, dass durch die Manipulation der Mikrostruktur eine geringe Beeinflussung der Dickenpermeabilität erreicht werden kann. Hierbei zeigte die Variation der eingesetzten Binderpulvermenge sowie der Binderpartikelgröße, dass die Binderpartikel eine Inhomogenität der Mikrostruktur hervorrufen können. Größere Binderpartikel besitzen das Potential, größere Fließkanäle zwischen Fasersträngen offenzuhalten, bergen aber auch das Risiko bei vollständigem Aufschmelzen in die Faserstränge zu migrieren und somit die Permeabilität zu verringern. Diese Variation kann sehr einfach durch Austausch des Bindermaterials umgesetzt werden. Die Änderung der Prozessführung, in diesem Fall die Variation des Ablagemusters, führte zu einer deutlichen Erhöhung der Dickenpermeabilität um etwa Faktor 2. Die Permeabilität liegt damit aber weiterhin noch deutlich unter der textiler Halbzeuge.

Als wichtigste Möglichkeit zur Beeinflussung der Dickenpermeabilität wurde die Durchführung einer Vernähung identifiziert, die eine Erhöhung um bis zu Faktor 30 ermöglicht. Die Parameter, die bei der Vernähung eingestellt werden können, wurden auf ihre Wirkung und Interaktion untersucht. Ebenso wie auf der Mikroebene führt die Veränderung eines Parameters, der die Inhomogenität steigert, zu einer Verbesserung der Permeabilität. So führen die Verwendung eines dickeren Nähfadens sowie die Erhöhung der Stichdichte durch Verringerung von Stich- und Nahtabstand zu deutlichen Erhöhungen der Dickenpermeabilität. Im Vergleich wirkte sich die Veränderung der Fadenspannung im betrachteten Bereich nicht wesentlich auf die Permeabilität aus. In Interaktion hiermit war auch der Einfluss des entfernten Unterfadens nicht signifikant, daher ist die Durchführung eines Tuftingschrittes ausreichend, solange der Faden während der Imprägnierung in der Preform bleibt. Der Lagenaufbau hat bei vernähten Preforms einen entscheidenden Einfluss, da er wesentlich die Fläche des durchgehenden Fließkanals beeinflusst.

Die Verbesserung der Dickenpermeabilität durch Steigerung der Preforminhomogenität geht im Beispiel der Vernähung mit einer Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften des daraus hergestellten Laminats einher. Während die Zugeigenschaften nahezu unverändert bleiben, ist eine deutliche Reduktion um bis zu 30 % der im Biegeversuch ermittelten Steifigkeiten und Festigkeiten zu beobachten.

Die Verwendung simulativer Methoden zur Permeabilitätsbestimmung erlaubt die Betrachtung von Strömungseffekten, die für das Auge bzw. Messmittel nicht ohne weiteres zugänglich sind. Darüber hinaus kann der experimentelle Aufwand deutlich verringert werden, wenn simulative Methoden effizient angewendet werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurden Richtlinien erarbeitet, die bei der Generierung realistischer Modelle unterstützen. Wenn eine Faserstruktur auf Mikroebene modelliert wird, müssen die Fasern ausreichend fein abgebildet werden, um eine realistische (runde) Form zu gewährleisten. Die benötigte Auflösung beträgt dabei etwa 1/10 des Faserdurchmessers. Da in der realen Preform zufällige Faseranordnungen anzutreffen sind, sollte eine für die Mikropermeabilitätssimulation verwendete Einheitszelle etwa 800 Einzelfasern beinhalten und es sollten je Parametersatz 10 zufällige Einheitszellen betrachtet werden.

Es konnte gezeigt werden, dass kleinere Inhomogenitäten in der Faserausrichtung, wie sie in realen Rovings anzutreffen sind, nur einen sehr kleinen Einfluss auf die Dickenpermeabilität haben und somit in der Praxis kaum von Nutzen sind, um das Imprägnierverhalten zu verbessern.

Mit den aus der Mikrosimulation gewonnenen Permeabilitätswerten können größerskalige Modelle aufgebaut werden, die die Strukturvariation auf der Mesoebene beschreiben. Es wurde verifiziert, dass die experimentell ermittelten Ergebnisse bezüglich der Rovingablagesequenz und der Vernähung simulativ zugänglich sind und weitestgehend realistisch abgebildet werden. Darüber hinaus kann so der Einfluss der Rovingquerschnittsform betrachtet werden, der experimentell nicht ohne Weiteres abzubilden ist.

Anhand des insgesamt gewonnenen Wissens wurden schlussendlich Richtlinien entwickelt, die bei der Auslegung einer Preformherstellung – sowohl material- als auch prozesseitig – hinsichtlich der Dickenpermeabilität unterstützen.

7 Literaturverzeichnis

- [1] R. Lässig, et al., *Serienproduktion von hochfesten Faserverbundbauteilen: Perspektiven für den deutschen Maschinen- und Anlagenbau*. Roland Berger Strategy Consultants. 2012.
- [2] Sächsisches Textilforschungsinstitut e. V., "Zweites Leben für Carbonfasern," *Autoland Sachsen*, Nr. 1, S. 56–57, 2014.
- [3] R. Emmerich und J. Kuppinger, "Kohlenstofffasern wiedergewinnen: Welches ist der richtige Weg für das Recycling von CFK?," *Kunststoffe*, 6/2014, S. 92–97, 2014.
- [4] T. von Reden, "MAI Carbon," Augsburg, Mrz. 2016.
- [5] S. Coutandin und M. Spadinger, "ResSub - Ressourceneffizienz im RTM-Prozess: Reduktion des Faserverschnitts durch Subpreforming," 2015.
- [6] Compositence, *Faserablage: Die moderne Technik - Compositence*. Verfügbar unter: <http://www.compositence.com/fiber-placement/faserablage/> (22.01.2020).
- [7] G. Gardiner, *Resin-infused MS-21 wings and wingbox*. Verfügbar unter: <https://www.compositesworld.com/articles/resin-infused-ms-21-wings-and-wingbox> (25.01.2018).
- [8] Airbus, *Global Market Forecast 2019-2038*. Verfügbar unter: <https://www.airbus.com/aircraft/market/global-market-forecast.html> (25.11.2019).
- [9] N. Klussmann und A. Malik, *Lexikon der Luftfahrt*, 2. Aufl. Berlin, New York: Springer, 2007. ISBN 3-540-20556-X.
- [10] Aerotelegraph, *Der fitte Jubilar von Airbus*. Verfügbar unter: <https://www.aerotelegraph.com/jubilaeum-airbus-a320-25-jahre> (25.11.2019).
- [11] U. Breuer, "Herausforderungen an die CFK-Forschung aus Sicht der Verkehrsflugzeug-Entwicklung und Fertigung," 10. Nationales Symposium SAMPE Deutschland e. V., 2005.
- [12] Jeff Sloan, *Infused wing sheds light on aerocomposites future: In the Irkut MS-21 infused and co-cured wings, the aerocomposites industry gets a glimpse of how out-of-autoclave technologies might be applied to primary aircraft structures*. Verfügbar unter: <https://www.compositesworld.com/articles/infused-wing-sheds-light-on-aerocomposites-future> (02.10.2018).
- [13] Airliners, *Der Ersatz aus dem Osten, der (noch) keiner ist*. Verfügbar unter: <https://www.airliners.de/der-ersatz-osten/51916> (25.11.2019).
- [14] Irkut Corporation, *Irkut MC21 Gallery*. Verfügbar unter: <http://mc21eng.irkut.com/gallery/photo/> (25.11.2019).
- [15] J. Mack, "Entwicklung eines adaptiven Online-Bebinderungsprozesses für die Preformherstellung: Dissertation," Institut für Verbundwerkstoffe, Technische Universität Kaiserslautern, Kaiserslautern, 2015.
- [16] R. Chaudhari, et al., "Compression RTM - A new process for manufacturing high volume continuous fiber reinforced composites," 5th International CFK-Valley Stade Convention. STADEUM Stade, Germany, Jun. 2011.
- [17] D. Museum, *Deutsches Museum: Akaflieg Stuttgart fs-24 Phönix, 1957*. Verfügbar unter: <https://www.deutsches-museum.de/sammlungen/verkehr/luftfahrt/segelflugzeuge/phoenix/> (24.10.2019).

- [18] M. Neitzel, P. Mitschang und U. Breuer, Hg., *Handbuch Verbundwerkstoffe: Werkstoffe, Verarbeitung, Anwendung*, 2. Aufl. München: Hanser, 2014.
- [19] C. Weimer, "Zur nähtechnischen Konfektion von textilen Verstärkungsstrukturen für Faser-Kunststoff-Verbunde," Zugl.: Kaiserslautern, Univ., Diss., 2002, Institut für Verbundwerkstoffe, Technische Universität Kaiserslautern, Kaiserslautern, 2002.
- [20] J. Mack und P. Mitschang, "Efficient and Flexible Technology for Binder Roving Manufacturing," *KMUTNB: IJAST*, S. 1–8, 2015. DOI 10.14416/j.ijast.2015.03.002
- [21] A. Kolbe, et al., "Automated manufacturing of stiffened composite shells using dry fibre material," *JEC COMPOSITES MAGAZINE*, 2017. Jg., Nr. 117, S. 31–34.
- [22] M. Belhaj, et al., "Dry fiber automated placement of carbon fibrous preforms," *Composites Part B: Engineering*, 50. Jg., S. 107–111, 2013. DOI 10.1016/j.compositesb.2013.01.014
- [23] C.D. Rudd, et al., "Tow placement studies for liquid composite moulding," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 30. Jg., Nr. 9, S. 1105–1121, 1999. DOI 10.1016/S1359-835X(99)00010-X
- [24] B. Shirinzadeh, et al., "Trajectory generation for open-contoured structures in robotic fibre placement," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 23. Jg., Nr. 4, S. 380–394, 2007. DOI 10.1016/j.rcim.2006.04.006
- [25] T. Dierssen, et al., "Solution for Dry-Fiber-Placement with a Standard Articulating Robot System," in *SAE Technical Paper Series*: SAE International400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States, 2010.
- [26] R. Klomp-de Boer, *Automated Preform Fabrication by Dry Tow Placement: NLR-TP-2008-789*. Amsterdam, 2008.
- [27] A. Mills, et al., "Resin Transfer Moulding of highly loaded Carbon Fibre Composite Aircraft Spars using novel fabrics and tow placement techniques," *SAMPE Journal*, 2007. Jg., Volume 43, Number 3, S. 67–72.
- [28] L. Yan, et al., "An accurate approach to roller path generation for robotic fibre placement of free-form surface composites," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 30. Jg., Nr. 3, S. 277–286, 2014. DOI 10.1016/j.rcim.2013.10.007
- [29] O. Rimmel, et al., "Automatisierte Faserdirektablage mit Online-Bebinderung," *Lightweight Design*, 2018. Jg., 2/2017, S. 56–61.
- [30] L. Veldenz, et al., "Material selection for automated dry fiber placement using the analytical hierarchy process," *Advanced Manufacturing: Polymer & Composites Science*, 2. Jg., S. 1–14, 2019. DOI 10.1080/20550340.2018.1545377
- [31] G. Beresheim, "Thermoplast-Tapelegen - ganzheitliche Prozessanalyse und -entwicklung: Dissertation," Institut für Verbundwerkstoffe, Technische Universität Kaiserslautern, 2002.
- [32] C. M. Pistor, et al., "On-line consolidation of thermoplastic composites using laser scanning," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 30. Jg., Nr. 10, S. 1149–1157, 1999. DOI 10.1016/S1359-835X(99)00030-5
- [33] X. Guan und R. Pitchumani, "Modeling of spherulitic crystallization in thermoplastic tow-placement process: heat transfer analysis," *Composites Science and Technology*, 64. Jg., Nr. 9, S. 1123–1134, 2004. DOI 10.1016/j.compscitech.2003.08.011

- [34] M. A. Khan, et al., "Tracing the Void Content Development and Identification of its Effecting Parameters during in Situ Consolidation of Thermoplastic Tape Material," *Polymers and Polymer Composites*, 18. Jg., Nr. 1, S. 1–15, 2010. DOI 10.1177/096739111001800101
- [35] F. Helber, et al., "Intrinsic fibre heating: a novel approach for automated dry fibre placement," *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 406. Jg., S. 12064, 2018. DOI 10.1088/1757-899X/406/1/012064
- [36] R. Schledjewski, "Thermoplastic tape placement process – in situ consolidation is reachable," *Plastics, Rubber and Composites*, 38. Jg., 9-10, S. 379–386, 2009. DOI 10.1179/146580109X12540995045804
- [37] M. A. Khan, et al., "Identification of some optimal parameters to achieve higher laminate quality through tape placement process," *Adv. Polym. Technol.*, 29. Jg., Nr. 2, S. 98–111, 2010. DOI 10.1002/adv.20177
- [38] A.-S. Lectez, et al., "Three-dimensional mechanical properties of dry carbon fiber tows subjected to cyclic compressive loading," *Journal of Composite Materials*, 52. Jg., Nr. 19, S. 2661–2677, 2018. DOI 10.1177/0021998317752229
- [39] A. R. Aziz, et al., "Transverse permeability of dry fiber preforms manufactured by automated fiber placement," *Composites Science and Technology*, 152. Jg., S. 57–67, 2017. DOI 10.1016/j.compscitech.2017.09.011
- [40] M. Y. Matveev, et al., "Uncertainty in geometry of fibre preforms manufactured with Automated Dry Fibre Placement and its effects on permeability," *Journal of Composite Materials*, 52. Jg., Nr. 16, S. 2255–2269, 2018. DOI 10.1177/0021998317741951
- [41] J. Ufer, et al., "Reibverhalten von trockenen Faserstrukturen aus einem direkten Faserablageprozess," *Zeitschrift Kunststofftechnik*, 2016. Jg., 12 (2016) 4, S. 312–337, 2016.
- [42] O. Meyer, "Kurzfaser-Preform-Technologie zur kraftflussgerechten Herstellung von Faserverbundbauteilen," Dissertation, Fakultät Luft- und Raumfahrttechnik und Geodäsie der Universität Stuttgart, Universität Stuttgart, Stuttgart, 2008.
- [43] S. Carosella, et al., "Neue Wege des Faserlegens: Kompakte Anlage verarbeitet pulverimprägnierte Faserbänder effizient zu Preforms," *Kunststoffe*, 2019. Jg., 02/2019, S. 33–36, 2019.
- [44] G. Rieber, "Einfluss von textilen Parametern auf die Permeabilität von Multifilamentgeweben für Faserverbundkunststoffe," Zugl.: Kaiserslautern, Techn. Univ., Diss., 2011, Institut für Verbundwerkstoffe GmbH, Technische Universität Kaiserslautern, Kaiserslautern.
- [45] D. Becker, "Transversales Imprägnierverhalten textiler Verstärkungsstrukturen für Faser-Kunststoff-Verbunde," Institut für Verbundwerkstoffe, Technische Universität Kaiserslautern.
- [46] H. Darcy, *Les Fontaines Publiques de la ville de Dijon*. Paris: Libraire des Corps Imperiaux des Ponts et Chaussés et des Mines, 1856.
- [47] P. Bhat, et al., "Process analysis of compression resin transfer molding," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 40. Jg., Nr. 4, S. 431–441, 2009. DOI 10.1016/j.compositesa.2009.01.006
- [48] J. Kozeny, "Über Die Kapillare Leitung Des Wassers Im Boden," *Wien. Akad. Wissenschaften*, 1927. Jg., Nr. 136, S. 271–306.
- [49] P. C. Carman, *Flow of Gases through porous media*. London: Butterworths, 1956.

- [50] B. T. Åström, et al., "On Flow through Aligned Fiber Beds and Its Application to Composites Processing," *Journal of Composite Materials*, 1992. Jg., Vol. 26, No. 9, S. 1351–1373, 1992.
- [51] B. R. Corrochano, et al., "A new methodology to estimate the steady-state permeability of roast and ground coffee in packed beds," *Journal of Food Engineering*, 150. Jg., S. 106–116, 2015. DOI 10.1016/j.jfoodeng.2014.11.006
- [52] T. J. Donohue und C. M. Wensrich, "Improving permeability prediction for fibrous materials through a numerical investigation into pore size and pore connectivity," *Powder Technology*, 195. Jg., Nr. 1, S. 57–62, 2009. DOI 10.1016/j.powtec.2009.05.012
- [53] T. J. Donohue und C. M. Wensrich, "A numerical investigation of the void structure of fibrous materials," *Powder Technology*, 186. Jg., Nr. 1, S. 72–79, 2008. DOI 10.1016/j.powtec.2007.11.002
- [54] B. R. Gebart, "Permeability of Unidirectional Reinforcements for RTM," *Journal of Composite Materials*, 1992. Jg., 26(8), S. 1100–1133.
- [55] X. Chen und T. D. Papathanasiou, "The transverse permeability of disordered fiber arrays: A statistical correlation in terms of the mean nearest interfiber spacing," *Transp Porous Med*, 71. Jg., Nr. 2, S. 233–251, 2008. DOI 10.1007/s11242-007-9123-6
- [56] K. Yazdchi, et al., "Microstructural effects on the permeability of periodic fibrous porous media," *International Journal of Multiphase Flow*, 37. Jg., Nr. 8, S. 956–966, 2011. DOI 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2011.05.003
- [57] F. Gommer, et al., "Influence of the micro-structure on saturated transverse flow in fibre arrays," *Journal of Composite Materials*, 372. Jg., S. 002199831774795, 2018. DOI 10.1177/0021998317747954
- [58] A. Nabovati, et al., "A general model for the permeability of fibrous porous media based on fluid flow simulations using the lattice Boltzmann method," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 40. Jg., 6-7, S. 860–869, 2009. DOI 10.1016/j.compositesa.2009.04.009
- [59] X. Chen und T. D. Papathanasiou, "Micro-scale modeling of axial flow through unidirectional disordered fiber arrays," *Composites Science and Technology*, 67. Jg., 7-8, S. 1286–1293, 2007. DOI 10.1016/j.compscitech.2006.10.011
- [60] T. D. Papathanasiou und P. D. Lee, "Morphological Effects on the Transverse Permeability of Arrays of Aligned Fibers," *Polymer Composites*, 1997. Jg., Vol. 18, No. 2, S. 242–253.
- [61] T. D. Papathanasiou, "On the effective permeability of square arrays of permeable fiber tows," *International Journal of Multiphase Flow*, 23. Jg., Nr. 1, S. 81–92, 1997. DOI 10.1016/S0301-9322(96)00057-2
- [62] J. T. Katsikadelis, *Boundary elements: Theory and applications*, 1. Aufl. Amsterdam, New York: Elsevier, 2002. ISBN 0-080-44107-6.
- [63] Y. Matsumura und T. L. Jackson, "Numerical simulation of fluid flow through random packs of cylinders using immersed boundary method," *Physics of Fluids*, 26. Jg., Nr. 4, S. 43602, 2014. DOI 10.1063/1.4870246
- [64] N. Saxena, et al., "References and benchmarks for pore-scale flow simulated using micro-CT images of porous media and digital rocks," *Advances in Water Resources*, 109. Jg., S. 211–235, 2017. DOI 10.1016/j.advwatres.2017.09.007
- [65] Z. Cai und A. L. Berdichevsky, "Numerical simulation on the permeability variations of a fiber assembly," *Polymer Composites*, 1993. Jg., Vol. 14, No. 6, S. 529–539.

- [66] C. C. Wong, et al., "Comparisons of novel and efficient approaches for permeability prediction based on the fabric architecture," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 37. Jg., Nr. 6, S. 847–857, 2006. DOI 10.1016/j.compositesa.2005.01.020
- [67] F. Gommer, et al., "Stochastic reconstruction of filament paths in fibre bundles based on two-dimensional input data," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 76. Jg., S. 262–271, 2015. DOI 10.1016/j.compositesa.2015.05.022
- [68] E. E. Swery, et al., "Predicting permeability based on flow simulations and textile modelling techniques: Comparison with experimental values and verification of FlowTex solver using Ansys CFX," *Journal of Composite Materials*, 50. Jg., Nr. 5, S. 601–615, 2015. DOI 10.1177/0021998315579927
- [69] J. Dittmann, et al., "Transient dual-phase void prediction in microscopic carn models with," ICCM22. Melbourne, AU, Aug. 2019.
- [70] J. Dittmann und P. Middendorf, "Experimental validation of numerical dual-scale permeability prediction," FPCM14. Lulea, Sweden, 2018.
- [71] J. Dittmann und P. Middendorf, *Der digitale Prototyp*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2019.
- [72] S. Linden, *The LIR Space Partitioning System applied to the Stokes Equations*. Kaiserslautern, 2014.
- [73] S. Linden, et al., "The LIR space partitioning system applied to the Stokes equations," *Graphical Models*, 82. Jg., S. 58–66, 2015. DOI 10.1016/j.gmod.2015.06.003
- [74] B. Planas, *Math2Market GmbH: GeoDict - The Digital Material Laboratory*. Verfügbar unter: <https://www.geodict.com/Solutions/aboutGD.php?Language=en> (11.12.2018).
- [75] O. Rimmel, et al., "Impact of stitching on permeability and mechanical properties of preforms manufactured by dry fiber placement," *Polym. Compos.*, 1. Jg., Volume 40, Issue 4, S. 1631–1642, 2018. DOI 10.1002/pc.24911
- [76] O. Rimmel, et al., "Maximizing the out-of-plane-permeability of preforms manufactured by dry fiber placement," *Advanced Manufacturing: Polymer & Composites Science*, 2. Jg., 3-4, S. 93–102, 2017. DOI 10.1080/20550340.2016.1260900
- [77] K. M. Pillai und S. G. Advani, "Numerical and analytical study to estimate the effect of two length scales upon the permeability of a fibrous porous medium," *Transp Porous Med*, 21. Jg., Nr. 1, S. 1–17, 1995. DOI 10.1007/BF00615332
- [78] E. Syerko, et al., "A numerical approach to design dual-scale porosity composite reinforcements with enhanced permeability," *Materials & Design*, 131. Jg., S. 307–322, 2017. DOI 10.1016/j.matdes.2017.06.035
- [79] D. Salvatori, et al., "Permeability and capillary effects in a channel-wise non-crimp fabric," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 108. Jg., S. 41–52, 2018. DOI 10.1016/j.compositesa.2018.02.015
- [80] M. A. Ali, et al., "In-plane virtual permeability characterization of 3D woven fabrics using a hybrid experimental and numerical approach," *Composites Science and Technology*, 173. Jg., S. 99–109, 2019. DOI 10.1016/j.compscitech.2019.01.030
- [81] C. Binétry, et al., "The interactions between flows occurring inside and outside fabric tows during rtm," *Composites Science and Technology*, 57. Jg., Nr. 5, S. 587–596, 1997. DOI 10.1016/S0266-3538(97)00019-5

- [82] P. B. Nedanov und S. G. Advani, "Numerical computation of the fiber preform permeability tensor by the homogenization method," *Polym. Compos.*, 23. Jg., Nr. 5, S. 758–770, 2002. DOI 10.1002/pc.10474
- [83] J. Poiseuille, *Le Mouvement des Liquides Dans Les Tubes De Petits Diamètres (The Movement of liquids in tubes of small diameters)*. Paris: Imprimerie Royale, 1844.
- [84] A. E. Scheidegger, *The physics of flow through porous media*. Toronto: Univ. of Toronto Press, 1963.
- [85] B. Liu, et al., "Modelling and simulation of resin transfer moulding (RTM)—gate control, venting and dry spot prediction," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 27. Jg., Nr. 2, S. 135–141, 1996. DOI 10.1016/1359-835X(95)00012-Q
- [86] Y. C. Lam, et al., "Numerical simulation of the mould-filling process in resin-transfer moulding," *Composites Science and Technology*, 60. Jg., Nr. 6, S. 845–855, 2000. DOI 10.1016/S0266-3538(99)00192-X
- [87] J. Seuffert, et al., "Simulating Mold Filling in Compression Resin Transfer Molding (CRTM) Using a Three-Dimensional Finite-Volume Formulation," *J. Compos. Sci.*, 2. Jg., Nr. 2, S. 23, 2018. DOI 10.3390/jcs2020023
- [88] G. Rieber, et al., "Influence of textile parameters on the in-plane Permeability," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 52. Jg., S. 89–98, 2013. DOI 10.1016/j.compositesa.2013.05.009
- [89] V. Shafi, "Beitrag zur Charakterisierung der Permeabilität flächiger Verstärkungsmaterialien," Institut für Verbundwerkstoffe, Technische Universität Kaiserslautern.
- [90] R. S. Parnas, et al., "A permeability database for composites manufacturing," (en), *Polymer Composites*, 18. Jg., Nr. 5, S. 623–633, 1997. DOI 10.1002/pc.10313
- [91] N.R.L. Pearce, et al., "An investigation into the effects of fabric architecture on the processing and properties of fibre reinforced composites produced by resin transfer moulding," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 29. Jg., 1-2, S. 19–27, 1998. DOI 10.1016/S1359-835X(97)00028-6
- [92] W.-M. Lu, et al., "Fluid Flow Through Basic Weaves of Monofilament Filter Cloth," *Textile Research Journal*, 66. Jg., Nr. 5, S. 311–323, 1996. DOI 10.1177/004051759606600505
- [93] J. Summerscales, "A model for the effect of fibre clustering on the flow rate in resin transfer moulding," *Composites Manufacturing*, 4. Jg., Nr. 1, S. 27–31, 1993. DOI 10.1016/0956-7143(93)90013-X
- [94] P. Mitschang, et al., "Influence of textile parameters on the through-thickness permeability of woven textiles," FPCM11. Auckland, NZ, Jul. 2012.
- [95] M. Arnold, "Einfluss verschiedener Angusszenarien auf den Harzinjektionsprozess und dessen simulative Abbildung," Institut für Verbundwerkstoffe, Technische Universität Kaiserslautern, Kaiserslautern.
- [96] T.S. Lundström, "The permeability of non-crimp stitched fabrics," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 31. Jg., Nr. 12, S. 1345–1353, 2000. DOI 10.1016/S1359-835X(00)00037-3
- [97] C.-H. Chiu und C.-C. Cheng, "In-Plane Permeability of Stitched MMWK Laminates in Resin Transfer Molding," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 21. Jg., Nr. 5, S. 391–408, 2002. DOI 10.1177/0731684402021005440

- [98] H. Talvensaari, et al., "Permeability of stitched preform packages," *Composite Structures*, 71. Jg., 3-4, S. 371–377, 2005. DOI 10.1016/j.compstruct.2005.09.033
- [99] G. Rieber und P. Mitschang, "2D Permeability changes due to stitching seams," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 41. Jg., Nr. 1, S. 2–7, 2010. DOI 10.1016/j.compositesa.2009.09.006
- [100] S. Drapier, "Influence of the stitching density on the transverse permeability of non-crimped new concept (NC2) multiaxial reinforcements: Measurements and predictions," *Composites Science and Technology*, 62. Jg., Nr. 15, S. 1979–1991, 2002. DOI 10.1016/S0266-3538(02)00127-6
- [101] C.-H. Shih, et al., "Vacuum-assisted resin transfer molding using tackified fiber preforms," *Polym. Compos.*, 22. Jg., Nr. 6, S. 721–729, 2001. DOI 10.1002/pc.10574
- [102] V. Rohatgi und L. J. Lee, "Moldability of Tackified Fiber Preforms in Liquid Composite Molding," *Journal of Composite Materials*, 31. Jg., Nr. 7, S. 720–744, 1997. DOI 10.1177/002199839703100705
- [103] B. Caglar, et al., "Permeability of textile fabrics with spherical inclusions," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 99. Jg., S. 1–14, 2017. DOI 10.1016/j.compositesa.2017.03.031
- [104] R. Graupner, "Material efficient dry fiber placement preforming process with adapted lay-up strategies for off-plane impregnation," 5th anniversary of LCC Symposium. Munich, 2014.
- [105] M. Marquart, et al., "Development of an innovative preforming process for the high-volume automotive sector," FPCM12. Enschede, Twente, 2014.
- [106] M. Y. Matveev, et al., "Uncertainty in geometry of fibre preforms manufactured with Automated Dry Fibre Placement and its effects on permeability," *Journal of Composite Materials*, 15. Jg., S. 1–15, 2017. DOI 10.1177/0021998317741951
- [107] R. Umer, et al., "The Low Velocity Impact Response of Nano Modified Composites Manufactured Using Automated Dry Fibre Placement," *Polymers & Polymer Composites*, Vol. 24, No.4, S. 233–240, 2016.
- [108] C. Cherif, *Textile Werkstoffe für den Leichtbau: Techniken - Verfahren - Materialien - Eigenschaften*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011. ISBN 9783642179914.
- [109] T. J. Kang und S. H. Lee, "Effect of Stitching on the Mechanical and Impact Properties of Woven Laminate Composite," (en), *Journal of Composite Materials*, 1994. Jg., Nr. 28, S. 1574–1587, 1994.
- [110] H. Heß und N. Himmel, "Structurally stitched NCF CFRP laminates. Part 1: Experimental characterization of in-plane and out-of-plane properties," *Composites Science and Technology*, 71. Jg., Nr. 5, S. 549–568, 2011. DOI 10.1016/j.compscitech.2010.11.012
- [111] H. Heß, *Experimentelle Charakterisierung und kontinuumsmechanische Simulation des Versagensverhaltens strukturell vernähter Faser-Kunststoff-Verbunde*. Kaiserslautern: Inst. für Verbundwerkstoffe, 2009. ISBN 9783934930841.
- [112] A. P. Mouritz, et al., "A review of the effect of stitching on the in-plane mechanical properties of fibre-reinforced polymer composites," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 28. Jg., Nr. 12, S. 979–991, 1997. DOI 10.1016/S1359-835X(97)00057-2

- [113] A. P. Mouritz und B. N. Cox, "A mechanistic approach to the properties of stitched laminates," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 31. Jg., Nr. 1, S. 1–27, 2000. DOI 10.1016/S1359-835X(99)00056-1
- [114] C. Fiebig und M. Koch, "The influence of fiber undulation on the mechanical properties of FRP-laminates," 58th Ilmenau Scientific Colloquium. Ilmenau, 2014.
- [115] P. J. Joyce, et al., "A Technique for Characterizing Process-Induced Fiber Waviness in Unidirectional Composite Laminates-Using Optical Microscopy," *Journal of Composite Materials*, 31. Jg., Nr. 17, S. 1694–1727, 1997. DOI 10.1177/002199839703101702
- [116] E. Macherauch und H.-W. Zoch, *Praktikum in Werkstoffkunde*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2011. ISBN 978-3-8348-0343-6.
- [117] X.-W. Yu, et al., "Analysis of yarn fiber volume fraction in textile composites using scanning electron microscopy and X-ray micro-computed tomography," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 68. Jg., 073168441881194, 2018. DOI 10.1177/0731684418811943
- [118] S. Mönnich, et al., "Analysis of Fibre Orientation using μ CT Data," Dynamore Users Conference. Strasbourg, 2011.
- [119] J. Kastner, et al., "Quantitative Messung von Faserlängen und -verteilung in faserverstärkten Kunststoffteilen mittels μ -Röntgen-Computertomographie," Jahrestagung Zerstörungsfreie Materialprüfung. Fürth: DGZfP, 2007.
- [120] J. Kastner, "Mikro-Radiografie und Mikro-Computertomografie mit Absorptions- und Phasenkontrast für die Materialcharakterisierung," 17. Seminar Aktuelle Fragen der Durchstrahlungsprüfung und des Strahlenschutzes. Dresden, 2017.
- [121] Willems, et al., "Bestimmung der Faserorientierung langglasfaserverstärkter Thermoplaste mittels bildoptischer Analyse und Computertomografie," DGZfP-Jahrestagung 2018. Leipzig, 2018.
- [122] S. H. Bateni, "Der "scharfe" Blick ins Werkstück: Struktur- und Ortsauflösung in der Röntgentomografie," *QZ Qualität und Zuverlässigkeit*, 61. Jg., Nr. 8, 2016.
- [123] Quality Engineering, *Technologien und Trends der industriellen Röntgentechnik Röntgen und CT*. Verfügbar unter: <https://quality-engineering.industrie.de/allgemein/roentgen-und-ct/> (27.11.2019).
- [124] Zeiss, *ZEISS Xradia 520 Versa: Submicro X-ray Imaging: Extending the Limits of Your Exploration*. Verfügbar unter: <https://www.zeiss.com/content/dam/Microscopy/us/download/pdf/Products/xradia520versa/xradia-520-versa-product-information.pdf> (27.11.2019).
- [125] A. Grieser, et al., "FiberFind: Machine learning-based segmentation and identification of individual fibers in μ CT images of fibrous media," 8th GeoDict User Meeting. Kaiserslautern, 2019.
- [126] SGL Carbon SE, "Die Möglichmacher: Unsere Carbon-Endlosfasern SIGRAFIL,"
- [127] Owens Corning Composite Materials, LLC., "SE 1200 TYPE 30® SINGLE-END ROVING,"
- [128] Huntsman Advanced Materials (Switzerland) GmbH, "Araldite LT 3366," 2011.
- [129] Amann & Söhne GmbH & Co. KG, "Produktprogramm,"
- [130] B. Willenbacher, et al., "Novel measurement system for determining textile behavior during out-of-plane impregnation," ICCM22. Melbourne, AU, Aug. 2019.
- [131] B. Willenbacher, et al., "Metrological determination of inhomogeneous hydrodynamic compaction during unsaturated out-of-plane permeability measurement

- of technical textiles,” *Advanced Manufacturing: Polymer & Composites Science*, 5. Jg., Nr. 2, S. 51–54, 2019. DOI 10.1080/20550340.2019.1598049
- [132] D. Becker und P. Mitschang, “Measurement System for On-Line Compaction Monitoring of Textile Reaction to Out-of-Plane Impregnation,” *Advanced Composites Letters*, 23. Jg., Nr. 2, 2014. DOI 10.1177/096369351402300202
- [133] D. Becker und P. Mitschang, “Influence of preforming technology on the out-of-plane impregnation behavior of textiles,” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 77. Jg., S. 248–256, 2015. DOI 10.1016/j.compositesa.2015.05.001
- [134] W. Kleppmann, *Versuchsplanung: Produkte und Prozesse optimieren*, 9. Aufl. München: Hanser, 2016. ISBN 3446447164.
- [135] S. S. SHAPIRO und M. B. WILK, “An analysis of variance test for normality (complete samples),” *Biometrika*, 52. Jg., 3-4, S. 591–611, 1965. DOI 10.1093/biomet/52.3-4.591
- [136] Y. W. Kwon, et al., *Multiscale Modeling and Simulation of Composite Materials and Structures*. Boston, MA: Springer Science+Business Media, LLC, 2008. ISBN 9780387363189.
- [137] T. Schmidt, et al., “A Novel Simulative-Experimental Approach to Determine the Permeability of Technical Textiles,” *KEM*, 809. Jg., S. 487–492, 2019. DOI 10.4028/www.scientific.net/KEM.809.487

Betreute studentische Arbeiten

Sopp, Fabian: Konstruktion eines Tapelegekopfes zum Ablegen von Bindertapes.

IVW-Bericht 15-055, 2015

Valerius, Lukas: Charakterisierung von Verstärkungsmaterialien für einen kosteneffizienten Prepreg-Pressprozess. IVW-Bericht 16-002, 2016

Mostofi, Sascha: Prepreg-Handlingmethoden zur kosten- und zeiteffizienten Herstellung von FKV-Bauteilen. IVW-Bericht 16-046, 2016

Manuel, Lea: Durchführung einer Parameterstudie zum Thermoplasttapelegen mit Tapes aus GF-PP. IVW-Bericht 16-018, 2016

Alfa, Benedikt: Entwicklung einer Messumgebung zur Qualitätskontrolle des Rovingspreizprozesses. IVW-Bericht 16-033, 2016

Weidmann, Stefan: Entwicklung einer Bebinderungseinheit zur Herstellung von Bindertapes für den Tapelegeprozess. IVW-Bericht 16-026, 2016

Zantopp, Tina: Qualitätskontrolle von thermoplastischen Tapes. IVW-Bericht 16-055, 2016

Meeß, Joachim: Betrachtung des Einflusses von Recyclingprozessen auf die mechanischen Eigenschaften von Faser-Kunststoff-Verbunden. IVW-Bericht 17-005, 2017

Engel, Selin: Untersuchung der mechanischen Eigenschaften von Prepregmaterialien in Abhängigkeit des Aushärtungsgrades. IVW-Bericht 17-010, 2017

Mostofi, Sascha: Experimentelle Validierung von Möglichkeiten zur Steigerung der Permeabilität von Dry-Fiber-Placement Preforms zur Herstellung von Faser-Kunststoff-Verbunden. IVW-Bericht 17-046, 2017

Schmidt, Tim: Entwicklung einer Verstreckungseinheit zur Verbesserung der Faserausrichtung in einem Herstellungsprozess für Stapelfaser-Bindertapes. IVW-Bericht 17-026, 2017

Nissen, Johannes: Entwicklung einer angetriebenen Kompaktierungsrolle für Tapelegeprozesse. IVW-Bericht 18-027, 2018

Kochems, Thomas: Analytische und simulative Betrachtung des Imprägnierverhaltens von Dry Fiber Placement Preforms. IVW-Bericht 18-037, 2018

Keiper, Alexander: Konstruktion einer Binderfördereinheit zur Prozessoptimierung des Dry Fiber Placement. IVW-Bericht 19-010, 2019

Ruschel, Christina: Einfluss des verwendeten Fasermaterials auf die Permeabilität von Dry Fiber Placement Preforms. IVW-Bericht 19-012, 2019

Knuth, Tobias: Dry Fiber Placement - Abgrenzung zu anderen Preformingverfahren und Ausarbeitung von Prozessgrenzen. IVW-Bericht 19-041, 2019

Göbel, Lea: Experimentelle Quantifizierung der Faserausrichtung in Dry Fiber Placement Preforms. IVW-Bericht 19-045, 2019

Publikationen

Zeitschriften (mit wissenschaftlicher Qualitätssicherung)

Rimmel, O.; Becker, D.; Mitschang, P.: Maximizing the out-of-plane permeability of preforms manufactured by dry fiber placement, 2017, AMPCS

Rimmel, O.; May, D.; Mitschang, P.: Impact of Stitching on Permeability and Mechanical Properties of Preforms Manufactured by Dry Fiber Placement, 2018, Polymer Composites

Rimmel, O.; May, D.; Goergen, C.; Poeppel, A.; Mitschang, P.: Development & Validation of Recycled Carbon Fiber – Based Binder Tapes for Automated Tape Laying processes, 2018, Journal of Composite Materials

Rimmel, O.; May, D.: Modeling transverse micro-flow in Dry Fiber Placement preforms, 2019, Journal of Composite Materials (online erschienen am 4.11.2019)

Zeitschriften (ohne wissenschaftliche Qualitätssicherung)

Rimmel, O.; Mack, J.; Becker, D.; Mitschang, P.: Automatisierte Faserdirektablage mit Online-Bebinderung, 2017, Lightweight Design

Rimmel, O.; Mack, J.; Becker, D.; Mitschang, P.: Automated Direct Fiber Placement with Online Binder Application, 2017, Lightweight Design

Rimmel, O.; Gemperlein C.: RAD NEU ERFUNDEN – Fahrradteile aus duroplastischen Prepregs mit weniger Energie schneller produzieren, 2017, CCeV Magazin

Rimmel, O.; Schmidt, T.; May, D.; Mitschang, P.; Poeppel et. al.: Recycling langer Kohlenstofffasern – Entwicklung eines bebinderten LrCF-Bandes mit hoher Faserorientierung, Kunststoffe 2017

Rimmel, O.; Schmidt, T.; May, D.; Mitschang, P.; Poeppel et. al.: Recycling of Long Carbon Fibers – Development of a Binded LrCF Tape with High Fiber Orientation, Kunststoffe int. 2017

Rimmel, O.; May, D.; Mitschang, P.: Dry Fiber Placement as an efficient way to manufacture carbon composites - enhancing processability in liquid composite molding by stitching, Advances in Engineering 2018

Symposien- und Konferenzbeiträge (Vorträge)

Rimmel, O.; Mitschang, P.: Qualitätsindex für thermoplastische Tapes, 2016, CCeV AG Thermoplaste

Rimmel, O.; Becker, D.; Mack, J.; Mitschang, P.: MAXIMIZING THE OUT-OF-PLANE PERMEABILITY OF PREFORMS MANUFACTURED BY DRY FIBER PLACEMENT, 2016, ECCM17

Rimmel, O.; May, D.; Gemperlein, C.; Mitschang, P.: EFFECTS OF FAST PREPREG PRESSING ON LAMINATE QUALITY AND MECHANICAL PROPERTIES, 2017, ICCM21

Rimmel, O.; May, D.; Mitschang, P.: STITCHING PREFORMS MANUFACTURED BY DRY FIBER PLACEMENT TO OPTIMIZE PERMEABILITY: AN EXPERIMENTAL EVALUATION, 2018, FPCM 14

Rimmel, O.; May, D.: Combining experimental and simulativ approaches for full understanding of Dry Fiber Placement Preforms, GeoDict User Meeting 2018

Rimmel, O.; May, D.: MULTI SCALE SIMULATION OF FLOW IN DRY FIBRE PLACEMENT PREFORMS, 2019, ICCM22

Rimmel, O.; May, D.: Digitized design of textiles and permeability measurement allows time- and cost efficient material selection, GeoDict User Meeting 2019

Symposien- und Konferenzbeiträge (Poster)

Mack, J.; Rimmel, O.; Mitschang, P.: Online Binder Application for Load-optimized Preforms, 2015, IVW-Kolloquium

Rimmel, O.; May, D.: Experimentell-simulativer Ansatz zur ganzheitlichen Optimierung der Imprägnierbarkeit von Dry Fiber Placement Preforms, DGM Symposium Verbundwerkstoffe 2019

Rimmel, O.; May, D.: Holistic Approach for Modelling Impregnation Behaviour of Dry Fiber Placement Preforms, GeoDict User Meeting 2019

Rimmel, O.; Schmidt, T.; May, D.: Digitized Design of Textiles and Permeability Measurement Allows Time- and Cost Efficient Material Selection, GeoDict User Meeting 2019

Lebenslauf

Name Oliver Rimmel

Studium

10/2008 – 12/2014 Maschinenbau und Verfahrenstechnik mit Vertiefungen Werkstofftechnik / Verbundwerkstoffe, Technische Universität Kaiserslautern

Schulbildung

08/1999 – 03/2008 Burggymnasium Kaiserslautern, Allgemeine Hochschulreife