

IVW - Schriftenreihe Band 131

Institut für Verbundwerkstoffe GmbH - Kaiserslautern

Christoph Kracke

**Dimensionierung werkzeugseitiger
Fließkanäle im RTM Prozess**

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: Technische Universität Kaiserslautern
ZBT – Abteilung Foto-Repro-Druck

D 386

© Institut für Verbundwerkstoffe GmbH, Kaiserslautern 2019

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 978-3-944440-28-6

Dimensionierung werkzeugseitiger Fließkanäle im RTM Prozess

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

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

vorgelegte

Dissertation

von

Herrn

M.Sc. Christoph Kracke

aus Vilsbiburg

2019

Betreuer der Dissertation: Prof. Dr.-Ing. Peter Mitschang

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis verwendeter Abkürzungen.....	IV
Verzeichnis verwendeter Formelzeichen.....	V
Kurzfassung.....	VIII
Abstract.....	IX
1 Einleitung und Zielsetzung	1
1.1 Potenziale von Verteilersystemen	4
1.2 Zielsetzung und Herangehensweise.....	5
2 Stand der Technik.....	7
2.1 Grundlagen RTM Prozessführung.....	7
2.1.1 Einflussfaktoren während der Harzinjektion	9
2.1.2 Einfluss und Entstehung von Defekten während der Injektion	13
2.2 Interaktion zwischen Fließkanal und Verstärkungsstruktur.....	14
2.3 Optimierung von Verteilersystemen für das RTM Verfahren	18
2.3.1 Aufbau der RTM Füllsimulation	18
2.3.2 Virtuelle Optimierung der Fließkanalpositionierung	19
2.4 Angussysteme im Spritzguss.....	22
2.5 Durch Fließkanäle entstehende Defekte	24
2.6 Zusammenfassung Stand der Technik	27
3 Einfluss von Fließkanälen auf die Formfüllung.....	28
3.1 Theoretische Betrachtung der Fließkanalauslegung	28
3.2 Material, Vorrichtung und Methoden.....	32
3.2.1 Verstärkungsstruktur und Fluid.....	32
3.2.2 Prüfstands Aufbau und Übersicht zu den verwendeten Werkzeugeinsätzen.....	33
3.2.3 Experimentelle Fließfrontvisualisierung.....	35

3.2.4	Aufbau der Füllsimulation	38
3.3	Untersuchung des Fließkanalquerschnitts.....	39
3.4	Einfluss der Ausrichtung des Fließkanals relativ zum Lagenaufbau	41
3.5	Variation der Fließkanalquerschnittsgröße über die Fließkanallänge	42
3.6	Validierung der experimentellen Ergebnisse	45
3.7	Simulative Extrapolation der Fließkanalquerschnittsgröße	47
3.8	Mehrkanalsystem	54
3.9	Auswirkung auf die Prozessstabilität	57
3.9.1	Versuchsplan und Probenvorbereitung	58
3.9.2	V Versuchsergebnisse zur Prozessstabilität.....	60
4	Einfluss von Fließkanälen auf Bauteilgewicht und -festigkeit	65
4.1	Auswirkung von Fließkanalverteilersystemen auf das Bauteilgewicht.....	66
4.2	Material, Methodik und Versuchsplan.....	67
4.3	Versuchsergebnisse zur Fasereinschwemmung in den Fließkanal	72
4.4	Einfluss auf die Bauteilfestigkeit	75
5	Auslegungsrichtlinien und Anwendungsbeispiele	79
5.1	Richtlinien zur Verteilersystemgestaltung.....	79
5.2	Anwendungsbeispiele.....	84
5.3	Einbindung der Fließkanaldimensionierung in die Topologieoptimierung.....	89
6	Zusammenfassung	90
	Literaturverzeichnis	94
	Betreute studentische Arbeiten	103
	Publikationen	104
	Lebenslauf.....	105

Verzeichnis verwendeter Abkürzungen

Kurzform	Beschreibung
1D	Eindimensional
2D	Zweidimensional
3D	Dreidimensional
A1	Wirkungsbereich orthogonal zu den Fließkanalseiten
A2	Wirkungsbereich in Verlaufsrichtung des Fließkanals
Abb.	Abbildung
bzw.	Beziehungsweise
bspw.	Beispielsweise
CFRP	Carbon Fibre Reinforced Plastic
d.h.	Das heißt
e. V.	Eingetragener Verein
FEM	Finite Elemente Methode
FID	Forminnendrucksensor
FK	Fließkanal
FVG	Faservolumengehalt
mech.	Mechanische
OWZ	Obere Werkzeughälfte
R	Referenz
RTM	Resin Transfer Moulding Verfahren
s.	Siehe
sog.	Sogenannte
UWZ	Untere Werkzeughälfte
WKZ	Werkzeug

Verzeichnis verwendeter Formelzeichen

Lateinische Zeichen	Einheit	Beschreibung
a	m/s^2	Beschleunigung
A_{real}	m^2	Querschnittsfläche des Fließkanals im realen Werkzeug
A_{sim}	m^2	Modellierte Fläche, die der realen Fläche des Fließkanals entspricht.
A_x	m^2	Stirnfläche eines Fahrzeugs
C_{rot}		Faktor zur Berücksichtigung rotatorisch beschleunigter Massen
C_w		Luftwiderstandbeiwert
D	mm	Durchmesser
d_{FK}	mm	Modellierte Breite des Fließkanals für die Simulation
f_R		Rollwiderstandskoeffizient
F_w	$kg\ m / s^2$	Fahrwiderstand
F_x	N	Kraft in Richtung der x-Achse
g	m/s^2	Erdbeschleunigung
h_{real}	mm	Höhe des Fließkanals im realen Werkzeug
h_{sim}	mm	Höhe des Fließkanals im Modell
K	m^2	Permeabilität
K_1	m^2	Permeabilität in der ersten Hauptrichtung der Ebene
K_2	m^2	Permeabilität in der zweiten Hauptrichtung der Ebene
K_3	m^2	Transversale Permeabilität
K_{FK}	m^2	Ersatzpermeabilitätswert eines Fließkanalquerschnitt
K_{VS}	m^2	Ersatzpermeabilitätswert eines Versorgungsfließkanals
K_{VT}	m^2	Ersatzpermeabilitätswert eines Verteilerfließkanals
K_{Tex}	m^2	Isotrope Permeabilität einer textilen Verstärkungsstruktur
L	m	Länge Fließkanal
m_F	kg	Gesamtfahrzeugmasse

P	Pa	Injektionsdruck
P_1	Pa	Druck an Position 1
P_2	Pa	Druck an Position 2
$p_{\text{Mischkopf}}$	Pa	Injektionsdruck am Mischkopf
p_{Umgebung}	Pa	Umgebungsdruck
$p_{\text{Vakuumpumpe}}$	Pa	Vakuumdruck
r	mm	Radius des Fließkanals
R^2		Bestimmtheitsmaß
Re		Reynoldszahl
t_{inj}	s	Injektionszeit gemessen im Experiment
t_{sim}	s	Injektionszeit Simulation
v_F	m/s	Fließgeschwindigkeit
v_F	m/s	Fahrzeuggeschwindigkeit
v_{rel}	m/s	Relative Fahrzeuggeschwindigkeit
v_z	m/s	Strömungsgeschwindigkeit in z-Richtung
w_h	mm	Wellenhöhe der Ondulation von Fasern einer Lage im Fließkanalbereich
w_w	mm	Wellenweite der Ondulation von Fasern einer Lage im Fließkanalbereich
X	mm	Distanz
Y	mm	Distanz

Griechische Zeichen	Einheit	Beschreibung
α_{St}	°	Steigungswinkel
ρ_L	g / m ³	Luftdichte
η	Pa·s	Viskosität
σ_{inj}	s	Standardabweichung der experimentellen Injektionszeit
Φ	%	Faservolumengehalt

Kurzfassung

Für individuelle und nachhaltige Mobilität ist Leichtbau unverzichtbar. Die effiziente Ressourcennutzung ist dafür eine technische Notwendigkeit. Das Gewicht eines Fahrzeugs beeinflusst die Auslegung von Antriebsleistung, Speicherkapazität und Strukturintegrität. Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe ermöglichen über die Kombination von gewichtsbezogen hoher Festigkeit eine Gewichtsreduktion. Durch das Resin Transfer Molding Verfahren können entsprechende Komponenten in hoher Stückzahl hergestellt werden. Zur weiteren Verbreitung des Werkstoffs ist eine Reduktion der Herstellkosten notwendig. In dieser Arbeit werden zu diesem Zweck werkzeugseitige Fließkanäle untersucht. Diese verkürzen den Fließweg, den das Fluid durch die niedrigpermeable Verstärkungsstruktur fließen muss. Zur Charakterisierung der Auswirkung von Fließkanälen auf den Fließfrontverlauf und die Injektionszeit wird ein Versuchswerkzeug mit transparenten Werkzeughälften verwendet. Dadurch können Fließfrontverläufe quantitativ mit einer Auflösung von einem Zeitwert pro $0,14 \text{ mm}^2$ miteinander verglichen werden. Eine parabolische Querschnittsform ist hinsichtlich dem Verhältnis von Ersatzpermeabilität und Querschnittsflächengröße optimal. Eine kontinuierliche Vergrößerung der Fließkanalquerschnittsgröße wirkt sich degressiv auf die Injektionszeit aus. Dadurch kann der Zusammenhang zwischen Fließkanalquerschnittsgröße und Permeabilität der Verstärkungsstruktur quantifiziert werden. Die Untersuchungen zeigen, dass die Reduktion des Fließwegs mit Hilfe von Fließkanälen auch die Auswirkung von Falten in der Verstärkungsstruktur auf den Fließfrontverlauf minimiert. Bei der Untersuchung verschiedener, möglicher Einflussparameter auf die Fasereinschwemmung in Fließkanäle werden die Fließkanalquerschnittsgröße, Durchströmung und die relative Lagenorientierung identifiziert. Durch die Verwendung von kleinen, schmalen Fließkanalquerschnitten (Fließkanalbreite $< 1,5 \text{ mm}$) kann eine Ondulation der Fasern vermieden werden. Durch die kleinen Fließkanalquerschnitte kann die Erhöhung des Bauteilgewichts minimiert werden. Die Versuchsergebnisse werden in Richtlinien zur Auslegung der Fließkanalquerschnittsform und -größe zusammengefasst. Abschließend werden die ermittelten Wirkzusammenhänge anhand eines Beispielbauteils, Stirnwand einer Karosseriestruktur, validiert.

Abstract

Lightweight structures are essential for individual and sustainable mobility. The vehicle's weight is an important factor to dimension the driving power, battery capacity and structural integrity. Therefore the efficient utilization of resources is necessary. Carbon fiber reinforced plastics (CFRP) enable a weight reduction due to their excellent anisotropic strength. Through Resin Transfer Molding (RTM) process CFRP car components can be produced in quantity. Nonetheless for a further dissemination it is required to strengthen the economic competitiveness of CFRP. Therefore flow channels on the tool surface were investigated to reduce the longest flow length the fluid has to flow through the textile reinforcement. In general, flow channels enable a faster injection and a reduction of the required injection pressure. Furthermore, they also support the fluid distribution in the mold.

Different flow channel cross section shapes have been evaluated to characterize the influence on the flow front progression and injection time. It was shown that a parabolic cross section geometry is the optimal shape in regard to the ratio of cross section size and permeability of the flow channel. The area of effect of a flow channel was separated into an area orthogonal to the direction of the flow channel and the flow front progression in direction of the flow channel. The relevance of each area depends on the part geometry, the course of the flow channel and the orientation of the permeability tensor. The effect of flow channels on the flow front progression in the RTM process was evaluated with a transparent mold. The injection was characterized with $1.4 \text{ E}07$ individual local time stamps through sequential evaluation of the flow front progression. One timestamp represented the fill time of its position in the mold. This corresponds to a resolution of one timestamp per 0.14 mm^2 . The influence of the flow channel cross section was experimentally investigated in three consecutive steps. The substitute permeability of the cross sections were: $4.2 \text{ E-}08 \text{ m}^2$, $5.1 \text{ E-}07 \text{ m}^2$ and $1.5 \text{ E-}06 \text{ m}^2$. The corresponding filling simulation confirmed that an increasing flow channel cross section has a diminishing influence on the overall injection time. In the next step the relation between the orientation of the permeability tensor and the flow channel area of effect was shown. The optimal orientation between them depends on the intended course of the flow path. The flow path should be parallel to the direction with the highest permeability to minimize the injection time.

The simulation was extended to investigate the diminishing relation between the permeability of the textile reinforcement and the flow channel section size. In the first step, the flow channel cross section was varied in a range from $E-10 \text{ m}^2$ to $E-07 \text{ m}^2$. The results showed that the fluid distribution slows down over the length of the flow channel for smaller cross sections. This could result in a V-shaped flow front between parallel flow channels, which helps to avoid air entrapments between them. The same effect occurred with an increasing flow channel length. In addition, the influence of different permeability values has been assessed. For these simulations, an isotropic in-plane permeability tensor was assumed. In summary, the optimal cross section depends on the permeability of the textile reinforcement. An equation, which describes the ratio between the permeability of the reinforcement structure and the flow channel cross section, has been derived for the given arrangement through logarithmic regression.

In regards to the process robustness, a suitable configuration of the reinforcement structure and a realistic defect was evaluated in preliminary tests. The defect, a fold in a layer, was modeled with either two or three stripes of reinforcement structure. Furthermore, the orientation of the stripes and the overlapping length of the flow channels was varied. The prepared textile reinforcement was evaluated with laser triangulation, to create a height profile map of the flat dry textile. Excluding the location and intensity of the artificial fold the measurement results showed linear fiber densifications in the 45° layers. However, the effect on the flow front has been minor though.

The affected area was visualized for the experiments with an artificial fold. A fold does not only effected the area directly next to it, but moreover the area in flow direction after it. The cone shaped area was influenced by the intensity and relative orientation to the flow front of the fold. However the effect of the fold was minimized with the flow channel distribution system. The flow channels shortened the flow path to the fold and the flow path after the fold. While the injection time increased by up to 44% for the worst fold configuration with short flow channels, the same fold configuration only led to an increase of 5% for long flow channels. The same effect was observed for the standard deviation. The comparison of upper and lower tool half showed that the fluid progressed faster in the flow channel than through the adjacent textile reinforcement.

The impregnation time difference and corresponding area increased over the flow channel length.

Experimental investigations on real parts have shown that flow channels can affect the structure of the textile reinforcement underneath them, where the fibers can be drawn into the flow channel. Increased roving cross sections are characteristic for this effect. The influencing factors were characterized in a RTM experiment and evaluated with micrographs and static tensile and compression tests. Specimens with small flow channel cross sections reached one hundred percent of the reference tensile strength. However, wider cross section shapes led to a significant fiber inwash. This inwash of fibers into the flow channel caused an undulation of load carrying fibers leading to a three-dimensional stress field in the area. The tensile strength was reduced by up to 70% depending on the undulation. The presented experiments showed that apart from the cross-sectional area, the position along the flow channel and the relative fiber orientation to the flow channel can have an influence on the fiber inwash into the flow channel. The flow channel itself though, did not have a negative impact on the tensile and compression strength.

The results were summarized in design guidelines. These design guidelines have been evaluated with an existing RTM tool. This RTM tool is used to manufacture bulk heads for the car body structure. The filling simulation for the part has shown that the desired filling behavior can be achieved. The early filling behavior, which has been observed with short shots (parts where the mold is not completely filled), confirms the guidelines. Race tracking was observed in radial areas in the mold leading to air entrapments in the final part. Therefore, the local permeability distribution after the draping process has to be considered for an effective flow channel arrangement. The design guidelines support the flow channel dimensioning for the corresponding permeability of the textile reinforcement. In conclusion flow channels are an effective and necessary element of RTM tools to reduce the injection time, to guide the flow front progression through the mold and to achieve a robust filling behavior.

1 Einleitung und Zielsetzung

Mobilität stellt ein Grundbedürfnis des Menschen dar. Die Erfüllung dieses Bedürfnisses durch Automobile mit konventionellen Antrieben steht vor dem Wandel. Einerseits erfordern begrenzte Ressourcen eine effiziente Antriebstechnik, andererseits muss die Mobilität unter Berücksichtigung des Klimawandels nachhaltig und umweltschonend realisiert werden [1]. Gleichzeitig wandert die Bevölkerung vom Land hin zu Ballungszentren [2]. Darüber hinaus wächst der Anteil von individueller Mobilität auf Basis von Dienstleistungen [3].

Diese Rahmenbedingungen stellen Automobilhersteller vor die Herausforderung, mehrere Entwicklungen zur selben Zeit zu realisieren. Unabhängig von der Antriebsart stellt das Fahrzeuggewicht einen wesentlichen Stellhebel für die benötigte Energie zur Fortbewegung dar. Beschrieben wird dieser Zusammenhang mit der Fahrwiderstandsgleichung [4]:

$$F_W = (1 + C_{rot}) \cdot m_F \cdot a_F + m_F \cdot g \cdot f_R(v_{Fa}) \cdot \cos \alpha_{St} + m_F \cdot g \cdot \sin \alpha_{St} + \frac{\rho_L}{2} \cdot c_w \cdot A_x \cdot v_{rel}^2 \quad (1)$$

Die Parameter der Fahrwiderstandsgleichung sind wie folgt definiert [4]:

F_W	Fahrwiderstand	C_{rot}	Faktor zur Berücksichtigung rotatorisch beschleunigter Massen
m_F	Gesamtfahrzeugmasse	A	Beschleunigung des Fahrzeugs
G	Erdbeschleunigung	ρ_L	Luftdichte
f_R	Rollenwiderstandskoeffizient	c_w	Luftwiderstandsbeiwert
α_{St}	Steigungswinkel	A_x	Stirnfläche des Fahrzeugs
v_{Fa}	Fahrzeuggeschwindigkeit	v_{rel}	Relative Fahrzeuggeschwindigkeit

Aus der Fahrwiderstandsgleichung geht hervor, dass mit Ausnahme des Luftwiderstands, der Fahrzeugwiderstand direkt von der Gesamtfahrzeugmasse abhängt. Leichtbau stellt somit ein wichtiges Fundament für nachhaltige und effiziente Mobilität dar. Das Fahrzeuggewicht wird durch verschiedene Einflussfaktoren wie Sicherheit, Komfort und Fahrleistung beeinflusst. Die Gewichtsmehrung führt zu einer Spirale: Durch ein höheres Gewicht muss die Motorleistung angepasst werden. Dies bedingt wiederum eine Veränderung des Fahrwerks, Antriebsstrangs und des

Tankvolumens und führt zu einer weiteren Gewichtsmehrung. Leichtbau ermöglicht, insbesondere mit Blick auf die Elektromobilität, diese Spirale herumdrehen [5]. Der Zusammenhang ist in Abbildung 1.1 dargestellt. Leichtbau führt zu einer reduzierten Gesamtmasse des Fahrzeugs, wodurch weniger Antriebsleistung erforderlich ist. Einerseits wird für eine geringere Antriebsleistung auch weniger Energie benötigt. Andererseits wird durch Weiterentwicklungen bei der Batterietechnologie die Energiedichte erhöht. Die dadurch verringerte Speichermasse ermöglicht eine Reduktion der Strukturmasse. Die Spirale dreht sich dadurch weiter hin zu einem geringeren Gesamtgewicht.

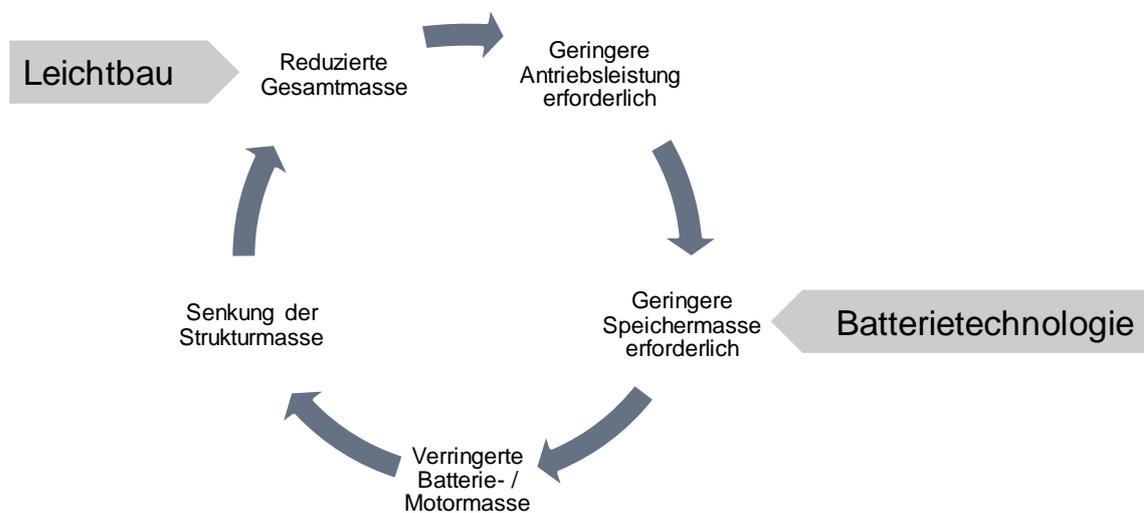


Abbildung 1.1: Leichtbauspirale für Elektrofahrzeuge nach [5].

Leichtbau in Bezug auf Elektromobilität von Automobilen wird neben strukturellen Optimierungen, integraler Bauweise mit Fokus auf der Vermeidung von Verbindungselementen, auch über bisher noch nicht etablierte Werkstoffe wie kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe realisiert [6]. Bei funktionsgleicher Auslegung lassen sich wesentlich leichtere Komponenten darstellen [4]. Die sehr hohen, anisotropen mechanischen Eigenschaften führen zu einer steigenden Verbreitung [7]. Nach den Marktberichten des Carbon Composite e.V. wächst der jährliche Bedarf an Kohlenstofffaser um ca. 10 % pro Jahr ([8], [9] und [10]). Der primäre Nachteil sind allerdings die hohen Kosten für Kohlenstofffasern mit hohen mechanischen Eigenschaften.

Der Einsatz von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen im Automobilbau benötigt auch Herstellverfahren mit denen sich ausreichende Stückzahlen pro Jahr realisieren

lassen. Das sogenannte Resin Transfer Moulding (RTM) Verfahren ermöglicht dies [11]. Das Verfahren ist in Abbildung 1.2 skizziert.

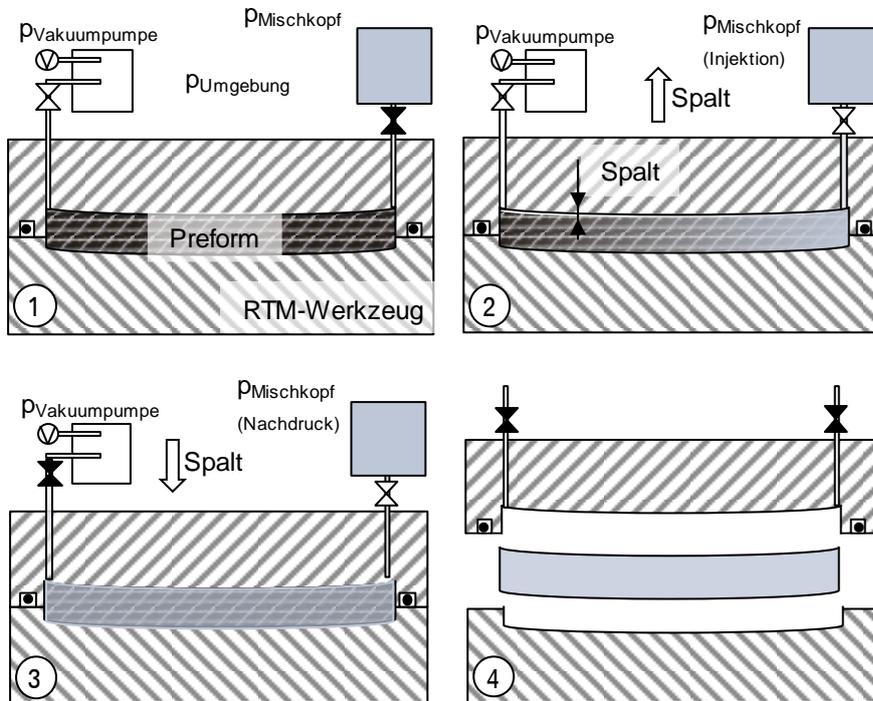


Abbildung 1.2: Verfahrensführung des RTM Verfahrens.

Bei diesem Verfahren wird zunächst in eine geschlossene Form ein sogenannter Preform eingelegt. Als Preform wird die umgeformte, textile Verstärkungsstruktur bezeichnet, welche bereits die Kontur des späteren Bauteils aufweist. Nach Verschluss der Form wird über einen Kessel mit angeschlossener Vakuumpumpe evakuiert. Danach wird die Matrix von einem Mischkopf aus mit Überdruck in die Form injiziert. Um den Fließwiderstand innerhalb der Form zu reduzieren, wird das Werkzeug ggf. einen Spalt geöffnet. Nach Abschluss der Nachdruckphase (Schritt 3), die der Schwindung der Matrix entgegenwirkt, wird das Werkzeug wieder vollständig geschlossen. Nach ausreichender chemischer Vernetzung der Matrix kann das Bauteil entnommen werden. Die Matrix ermöglicht die Krafteinleitung in die Fasern und schützt diese vor äußeren Umwelteinflüssen. Mit diesem Verfahren lassen sich, beispielsweise im Vergleich zu Harzinfusionsverfahren, kürzere Taktzeiten realisieren [12].

Die sehr geringe Permeabilität der Verstärkungsstruktur und lange Fließwege in der Form können hinsichtlich der zu erreichenden Taktzeit (Injektionszeit) zu einem hohen

Injektionsdruck führen. Deswegen wird für den Prozess ein Matrixsystem mit einer möglichst geringen Viskosität (z.B. ein Epoxidharz [11]) bevorzugt verwendet. Eine kürzere Injektionszeit ermöglicht eine Werkzeugtemperaturerhöhung durch die eine schnellere Vernetzung und somit Aushärtung der Matrix ermöglicht wird. Neben der Injektionszeit sind geringe Forminnendrucke und eine hohe Prozessstabilität wichtig. Die im Verlauf der Verstärkungsstrukturherstellung eingebrachte Variation der Materialeigenschaften (z.B. Variation des lokalen Flächengewichts) beeinflusst die Prozessstabilität [13] und kann zu höheren Ausschussquoten und zusätzlichen Kosten führen. Der Forminnendruck beeinflusst, über die mit ihm verbundenen notwendigen Werkzeugschließkräfte und abhängig von der zulässigen Werkzeugverformung, die Kosten für Werkzeuge und Anlagen [7,14], da diese entsprechend für größere Kräfte ausgelegt werden müssen.

1.1 Potenziale von Verteilersystemen

Neben der Optimierung der Permeabilität von Verstärkungsstrukturen (siehe auch [15,16]) und dem Viskositätsverhalten der Matrix (s. auch [17]) ist eine Verkürzung des Fließwegs ein wesentlicher Stellhebel zur Effizienzsteigerung des Verfahrens [18]. Hinsichtlich der Optimierung von Verteilerstrukturen lassen sich Grundaspekte bereits von bestehenden, natürlich gewachsenen Verteilersystemen ableiten. Beispiele hierfür sind die Nervatur von Blättern, der menschliche Blutkreislauf oder der Aufbau der Lunge. In Bezug auf die Nervatur zeigt sich bereits ein wiederkehrendes Muster bestehend aus wenigen großen und zentralen Wegen, die von vielen kleinen und flächig verteilten Wegen versorgt werden [19]. Analog ist der Blutkreislauf in Bezug auf Aorta und beispielsweise Arteriolen aufgebaut [20]. In der Lunge findet sich dies in dem Übergang von der Trachea bis in die Alveolar-Strukturen. Zwar ist der Durchmesser der Trachea erheblich größer als der der Alveolar-Strukturen, aber durch die sehr viel höhere Anzahl haben die Alveolaren eine erheblich größere Oberfläche. Diese wird in diesem Fall für einen effizienten Gasaustausch benötigt [21].

Im RTM Verfahren kann der maximale Fließweg, den die Matrix durch die Verstärkungsstruktur zur Formfüllung fließen muss, über werkzeugseitige Fließkanäle reduziert werden. Dadurch kann eine weitergehende Effizienzsteigerung des RTM Verfahrens hinsichtlich Forminnendruck / Injektionszeit und eventuell Prozessstabilität ermöglicht werden. Die Abbildung 1.3 visualisiert die Analogie zwischen dem Aufbau

einer Lunge (linke Seite, Abbildung aus [21]) und dem Aufbau des Verteilersystems im Werkzeug und einem Kohlenstofffasergelege im RTM Verfahren. In Bezug auf die Lunge können die durch die Vernähung geschaffenen Zwischenräume in der Verstärkungsstruktur mit den Alveolar-Strukturen verglichen werden [22]. In diesen wird die Matrix in der Fläche verteilt. Das Angussssystem entspricht hingegen Trachea und Bronchien. Es resultiert die Fragestellung wie diese aussehen müssen, um ein optimales Ergebnis hinsichtlich der Injektion im RTM Verfahren zu erzielen.

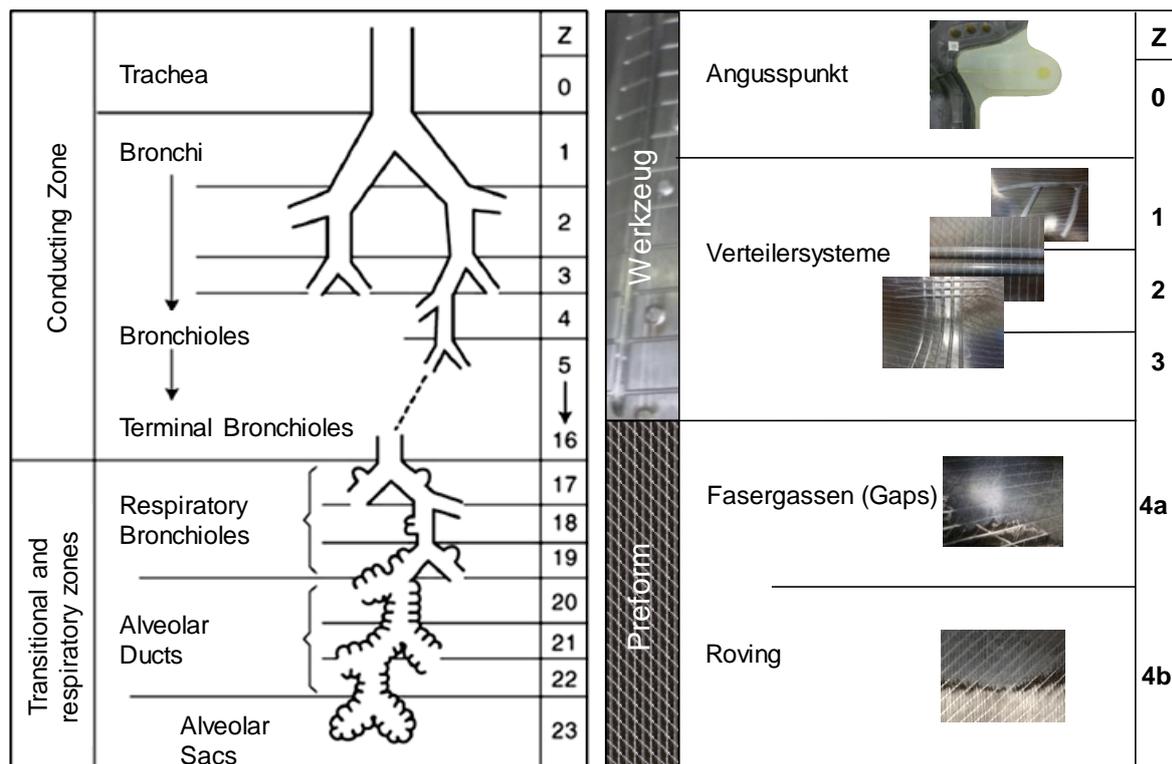


Abbildung 1.3: Analogie zwischen dem Aufbau einer Lunge (linke Seite, Abbildung aus [21]) und der Matrix Verteilungsstruktur innerhalb eines RTM Werkzeugs.

1.2 Zielsetzung und Herangehensweise

Das Ziel der Arbeit ist die Untersuchung der Interaktion zwischen einem werkzeugseitig eingebrachten Verteilersystem (bestehend aus Fließkanälen) und der im Werkzeug befindlichen Verstärkungsstruktur zur optimalen Dimensionierung des Fließkanalquerschnitts. Hierzu werden sowohl die Auswirkung auf die Injektionszeit und den Fließfrontverlauf innerhalb der Form als auch die Robustheit gegenüber textilen Merkmalen (wie zum Beispiel Faserbündelverdichtungen) analysiert. Darüber hinaus wird die Auswirkung auf die resultierenden Bauteileigenschaften hinsichtlich Gewicht und statischer Festigkeit untersucht.

Die Ergebnisse der Arbeit können zur Auslegung des Verteilersystems hinsichtlich der für die Injektion und Bauteileigenschaften optimalen Fließkanalquerschnittsgröße und -form genutzt werden.

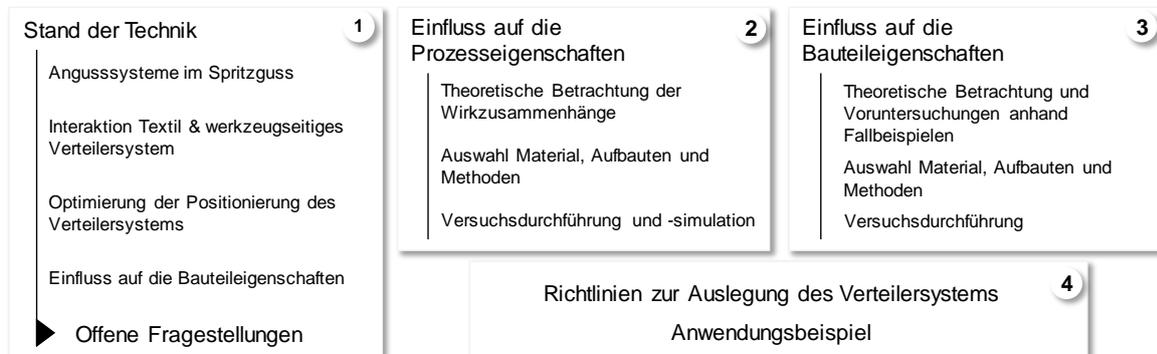


Abbildung 1.4: Herangehensweise der Arbeit.

Der Aufbau der Arbeit ist in Abbildung 1.4 gezeigt. Im ersten Schritt werden im Stand der Technik die Erkenntnisse in Bezug auf Verteilersysteme aus Angusssystemen im Spritzguss, Untersuchungen zur Optimierung der Positionierung und dem Einfluss von Fließkanälen auf die Eigenschaften von Bauteilen aufgezeigt. Darauf aufbauend wird der Einfluss auf das Füllverhalten untersucht. Hierzu erfolgt zunächst eine theoretische Vorbetrachtung, um die zu untersuchenden Einflussparameter festzulegen. Diese werden experimentell untersucht und dann simulativ validiert. Die beobachteten Wirkzusammenhänge werden anschließend extrapoliert. Zur Untersuchung der Robustheit gegenüber der Variation der Verstärkungsstruktur wird ein exemplarischer Lagenaufbau zerstörungsfrei mit Hilfe von Lasertriangulation geprüft. Zusätzlich sind in einen Teil der Aufbauten lokale Gelegestreifen (150mm x 10mm.) mittig eingelegt, um exemplarisch den Einfluss von Falten zu untersuchen. Bei den anschließenden Injektionsversuchen wird anhand der sich ergebenden Zeitdifferenz zwischen dem Fließfrontverlauf im Versuch und einer definierten Referenz der Einfluss der Variation analysiert. Im nächsten Abschnitt werden die Einflüsse verschiedener Fließkanalgeometrien auf die mechanischen Eigenschaften untersucht. Dadurch soll eine optimale Prozessführung realisiert werden bei einer gleichzeitig möglichst geringen Beeinträchtigung der Bauteileigenschaften. Abschließend werden die untersuchten Wirkzusammenhänge in Richtlinien überführt, anhand eines Anwendungsbeispiels evaluiert und die mögliche Integration in eine numerische Optimierung aufgezeigt.

2 Stand der Technik

Der Stand der Technik ist in fünf Abschnitte unterteilt. Zu Beginn werden die Grundlagen der RTM Prozesstechnik erklärt und die in dieser Arbeit betrachtete Verfahrensführung von anderen abgegrenzt. Zur Identifikation von möglichen Einflussfaktoren auf die Auslegung von Fließkanälen im RTM Prozess werden zunächst die Analogien zum Spritzguss beschrieben. Anschließend werden die vorhandenen Quellen zur Interaktion zwischen Verstärkungsstrukturen und Fließkanälen analysiert. Hinsichtlich der Anordnung des Verteilersystems in der Form werden die bereits untersuchten Optimierungsansätze aufgezeigt. Außerdem werden, ausgehend von verfügbaren Schliffbildern von Fließkanälen aus bestehenden Bauteilen, die Einflussparameter auf die mechanischen Bauteileigenschaften identifiziert. Zum Schluss werden die sich ergebenden, offenen Fragestellungen aufgezeigt.

2.1 Grundlagen RTM Prozessführung

Das RTM Verfahren zeichnet sich gegenüber anderen Verfahren durch eine kurze Taktzeit, die Darstellbarkeit von großen Bauteilen mit hohen Umformgraden, hohen mechanischen Eigenschaften und einer guten Bauteiloberflächenqualität aus ([11], [7], [23] und [24]). Im Folgenden werden die wichtigsten Aspekte des Verfahrens näher erklärt. Dabei wird im ersten Schritt die betrachtete Prozesskette und Verfahrensführung definiert und anschließend die dem Verfahren zu Grunde liegenden Wirkzusammenhänge aufgezeigt. Außerdem sollen die zu berücksichtigenden Verfahrenseffekte und möglicherweise entstehende Bauteilmerkmale erläutert werden.

Die in dieser Arbeit betrachtete Abfolge ist in Abbildung 2.1 dargestellt. Bei der Prozesskette im RTM Verfahren wird aus den Fasern zunächst eine Verstärkungsstruktur, in diesem Fall ein Gelege, hergestellt. Aus den unterschiedlich ausgerichteten Gelegen werden die geschichteten Lagenaufbauten, die sogenannten Stacks, hergestellt. In diesem Schritt werden außerdem über Orientierung und Flächengewicht der Einzellagen bereits die späteren mechanischen Eigenschaften eingestellt. Die nächsten Prozessschritte können sich bis zur Harzinjektion im Detail unterscheiden.

Nach der Herstellung des Lagenaufbaus wird dieser im nächsten Schritt erhitzt, umgeformt und anschließend beschnitten. Der entstehende Vorformling, der sog. Preform, hat bereits die Form des späteren Bauteils.

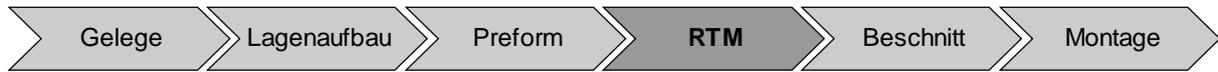


Abbildung 2.1: Betrachtete Prozesskette zur Herstellung eines faserverstärkten Kunststoffbauteils für den Verbau in einer Karosserie.

Durch die Unterteilung eines dreidimensionalen, flächigen Bauteils, wie einem Seitenrahmen, in einzelne Teilabschnitte, kann zum einen eine lastpfadgerechte, lokale Faserorientierung erreicht werden [25]. Zum anderen können die Teilabschnitte konturnäher abgebildet werden. Beispielhaft ist diese Aufteilung in Abbildung 2.2 gezeigt.

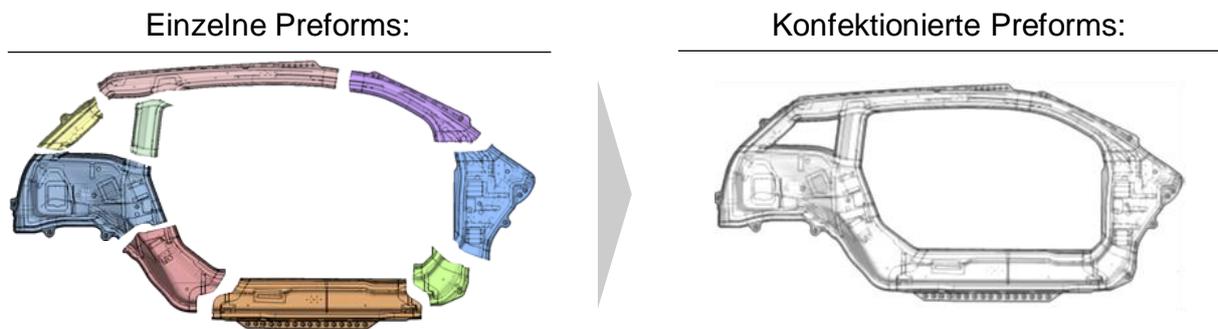


Abbildung 2.2: Beispielhafter Aufbau eines Seitenrahmens aus einzelnen Preforms

Dadurch reduziert sich die notwendige Menge an Kohlenstofffasern zur Herstellung eines Bauteils. Allerdings müssen die einzelnen Teilabschnitte vor der Harzinjektion zusammengefügt werden. Um eine ausreichende Kraftübertragung zwischen den einzelnen Teilabschnitten des Bauteils zu realisieren, müssen diese sich überlappen. Die konfektionierten Preforms werden anschließend in das RTM Werkzeug eingelegt. Die Prozessführung im RTM Verfahren kann sich im Detail unterscheiden, wesentliche Aspekte sind:

- Vakuumführung in der Form / während des Prozesses
- Faserfixierung in der Form
- Druck- und/oder Austragsleistungsgesteuerte Harzinjektion
- Werkzeugbewegung während der Injektion (Spaltinjektion)

Beim betrachteten Verfahren wird die Form vor und während der Injektion über Entlüftungsbausteine evakuiert. Entlüftungsbausteine sind translatorisch öffnende Werkzeugelemente, die eine Entlüftung der geschlossenen Form ermöglichen. Diese werden zeitgesteuert während der Injektion geschlossen, sodass kein Harz in die Baugruppe fließen kann. Nach der Aushärtung des Bauteils kann dieses entnommen werden. Das Bauteil kühlt in einer definierten Geometrie ab, um einen thermischen Verzug zu vermeiden. Das abgekühlte Bauteil wird beschnitten und anschließend in der Karosserie verbaut.

2.1.1 Einflussfaktoren während der Harzinjektion

Damit die Preforms während der Harzinjektion ihre relative Position im Werkzeug behalten, müssen diese, auch unter Berücksichtigung eines Werkzeugspalts, hinreichend fixiert sein. Hierzu sind die Preforms umlaufend, die Überlappungsbereiche ausgenommen, geklemmt. Die Klemmung wird über eine lokale Erhöhung des Faservolumengehalts erreicht. Neben der Faserfixierung behindert der umlaufend erhöhte Faservolumengehalt auch ein ungewolltes Voraneilen des Harzes im Bereich zwischen Klemmung und Dichtung. Dazu wird die Reaktion der Verstärkungsstruktur auf eine in Dickenrichtung wirkende Kraft genutzt, das sogenannte Kompaktierungsverhalten. Das Kompaktierungsverhalten beschreibt den Zusammenhang zwischen der auf die Verstärkungsstruktur wirkenden Schließbewegung /-kraft und dem in sich Zusammenschieben der Verstärkungsstruktur. Sie setzt sich aus einem elastischen (reversiblen) und einem viskosen (irreversiblen) Anteil zusammen. Die Reaktion der Verstärkungsstruktur hängt darüber hinaus auch von der Geschwindigkeit der Schließbewegung ab. Nach Abschluss des Schließvorgangs relaxiert die Verstärkungsstruktur durch Translation und Rotation der Filamente und Filamentbündel. Dadurch sinkt die notwendige Schließkraft nach dem vollständigen Schließen der Form. Darüber hinaus nimmt der Kompaktierungswiderstand durch wiederholtes Kompaktieren ab [26–28].

Je nach Verfahrensführung wird das Matrixsystem anschließend druck- oder austragsleistungsgesteuert in die Form injiziert. Um eine möglichst geringe Zykluszeit zu erreichen, wird die Matrix mit einem hohen Volumenstrom in die Form injiziert. Als Grundgleichung für den physikalischen Zusammenhang zwischen Fließgeschwindigkeit, Permeabilität der Verstärkungsstruktur, Druckdifferenz,

Viskosität des Fluids und dem Fließweg kann das Darcy Gesetz verwendet werden ([7] und [29]):

$$v = - \frac{K \cdot \Delta P}{\eta \cdot \Delta x} \quad (2-1)$$

- v: Fließgeschwindigkeit [m/s]
- K: Permeabilität [m²]
- ΔP: Druckdifferenz [Pa]
- η: Viskosität [Pa·s]
- Δx: Fließweg [m]

Vor Verwendung der Gleichung sind allerdings die verschiedenen Randbedingungen für den Gültigkeitsbereich zu prüfen:

Tabelle 2.1: Randbedingungen für den Gültigkeitsbereich des Gesetzes von Darcy nach [7].

Randbedingung	Physikalische Bedeutung
Schleichende Strömung	Reynoldszahl < 1 D'Alembert'sche Trägheitskräfte des Fluids sind vernachlässigbar.
Newtonsches Verhalten des Fluids	Die Viskosität ist unabhängig von der Scherrate im Fluid.
Inkompressibles Fluid	Die Dichte des Fluids ist konstant.
Isothermer Prozess	Die Temperatur ist über den Prozess konstant.
Mechanisch starres Faserhalbzeug	Die Permeabilität der Verstärkungsstruktur ist konstant.
Keine Kapillarwirkung in der Faserstruktur	Fluid fließt nur auf Grund des Druckunterschied.

Das Kriterium der schleichenden Strömung kann mit der Reynoldszahl geprüft werden [30].

$$Re = \frac{v \cdot \rho \cdot \sqrt{K}}{(1 - V_F) \cdot \eta} \quad (2-2)$$

- Re: Reynoldszahl
- ρ: Dichte [kg/m³]
- V_F: Faservolumengehalt
- Restliche Größen s. Darcy Gleichung

Ausgehend von realistischen Werten für die einzelnen Faktoren wird auf Basis der Gleichung 2-2 eine schleichende Strömung angenommen. In [31] wird eine Größenordnung von 0,1 für die Reynoldszahl im RTM-Prozess abgeschätzt.

Die Viskosität charakterisiert die Fließfähigkeit vom Fluid. Auf Grund der niedrigen Permeabilität und langen Fließwege werden für den RTM Prozess meist niedrigviskose Matrixsysteme verwendet. Bei duroplastischen Epoxidharzen besteht das Fluid aus Harz und Härter. Beide Komponenten werden vor der Injektion vermischt. Durch Vernetzung der Moleküle verfestigt sich die Matrix und gibt dem Bauteil seine Steifigkeit. Das Viskositätsverhalten von reaktiven, duroplastischen Matrixsystemen hängt unter anderem von der Verarbeitungstemperatur und Scherrate ab. Als Grenze für die Fließfähigkeit kann eine Viskosität von 300 mPa·s angenommen werden [17]. Der Viskositätsverlauf während der Injektion kann in einen abfallenden, einen quasi konstanten und einen steigenden Abschnitt unterteilt werden [32,16].

Die Modellierung des Reaktions- und Viskositätsverhaltens wird unter anderem von [17] für schnell aushärtende Matrixsysteme charakterisiert. Selbst die Bestimmung der Viskosität während der Injektionszeit im RTM Prozess ist messtechnisch aufwendig und Bestandteil aktueller Forschung. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei herkömmlichen Rheometern das Zeitintervall zwischen Mischen und Messen länger ist als die eigentliche Injektion im Hochdruck RTM Prozess [16]. In der Prozesssimulation ist für die Berechnung der Viskosität während der Injektion ein Materialmodell für das Viskositätsverhalten hinterlegt [33]. Allerdings muss dieses auch das initiale Viskositätsverhalten beschreiben. In [16,34] wird eine Viskositätsmessung beschrieben mit der sich dieses Verhalten bestimmen lässt. Dazu wird, anstatt eines Fluids mit einer bekannten Viskosität, ein Material mit einer bekannten Permeabilität in eine Form eingebracht. Die Viskosität des Fluids ist in diesem Fall unbekannt und wird bei einer Injektion mit konstantem Druck über den Fließfrontfortschritt gemessen (analog Methoden zur Permeabilitätsbestimmung aus [35]).

In Experimenten zur Charakterisierung der Prozesseigenschaften wird häufig ein Ersatzfluid (z.B. Sonnenblumen- oder Rapsöl) verwendet. Insbesondere zur Bestimmung der Permeabilität werden solche Fluide eingesetzt (Beispielsweise in [35]). Für dieses Ersatzfluid kann während der Injektion eine konstante Viskosität

angenommen werden. Voraussetzung ist der in den Randbedingungen aufgeführte isotherme Prozess.

Die textile Permeabilität ist für Gelege anisotrop. Bei niedrigen Injektionsdrücken wird die Annahme einer steifen textilen Struktur als zutreffend angenommen [36]. Sie kann durch einen Tensor 2. Grades beschrieben werden. Unter Annahme von Symmetriebedingungen und einer zu den Hauptachsen kongruenten Strömungsrichtung kann die Permeabilität durch die folgenden Werte beschrieben werden [37–39]:

- K1 und K2 für die jeweils maximale und minimale Richtung in der Ebene
- K3 Dickenrichtung

Den größten Einfluss auf die Permeabilität hat der Faservolumengehalt [40]. Durch eine höhere Kompaktierung der Verstärkungsstruktur verkleinern sich die Zwischenräume in denen das Fluid fließen kann. In [15] werden verschiedene Einflussparameter auf die Permeabilität von Geweben untersucht, wobei ein Schwerpunkt auf dem Einfluss der Lagenanzahl liegt. Ähnliche Einflüsse als Grundlage zur Permeabilitätsbestimmung sind beispielweise in [41] für Gelege beschrieben. Die aktuellen Verfahren aus [35] zur Charakterisierung der Permeabilität beziehen sich immer auf einen unidirektionalen Lagenaufbau. Um aus den Permeabilitäten der einzelnen Lagen die Permeabilität für den Gesamtaufbau zu bestimmen wird folgende Gleichung von [33,42–44] als zutreffend bewertet:

$$K_{i,eff} = \frac{\sum_{j=1}^n K_{i,j} d_{i,j}}{\sum_{j=1}^n d_{i,j}} \quad (2-3)$$

Allerdings ist der Gültigkeitsbereich auf die Rahmenbedingungen aus Tabelle 2.1 beschränkt. Darüber hinaus merken Luce et al. [42] an, dass die Interaktion zwischen den Einzellagen und deren transversaler Permeabilität nur eingeschränkt berücksichtigt wird.

Für den Fluidfluss in Dickenrichtung zeigt sich ein Einfluss der hydrodynamischen Textilkompaktierung [45]. Dieser wird in der Messzelle aus [46–48] zur Bestimmung der transversalen Permeabilität berücksichtigt, wodurch eine präzise Bestimmung der K3 Permeabilität möglich wird. Darüber hinaus wird die Auswirkung von Einflussfaktoren wie beispielsweise Lagenanzahl und Vernähung untersucht.

Neben Permeabilität und Viskosität verbleibt dementsprechend als letzter Parameter der Darcy Gleichung der Fließweg, da der Injektionsdruck am Angusspunkt über die Maschinenparameter eingestellt wird. Alternativ zum Injektionsdruck wird die Austragsleistung eingestellt, sodass beide Parameter direkt beeinflussbar sind. Wie in der Einleitung beschrieben, lässt sich der Fließfrontverlauf über die Einbringung von Fließkanälen beeinflussen. Diese verkürzen den Weg, den das Fluid durch die Verstärkungsstruktur fließen muss. In der Arbeit von Hintermann wird dies bereits als Potential zur Reduktion der Zykluszeit ausgewiesen und zur weiteren Untersuchung empfohlen [49].

2.1.2 Einfluss und Entstehung von Defekten während der Injektion

Neben den Wirkzusammenhängen zwischen den einzelnen Einflussparametern sind die während der Injektion auftretenden Defekte ein Bestandteil der Prozesstechnik [50]. Beispiele hierfür sind Lufteinschlüsse und Faserverlaufsänderungen. Lufteinschlüsse können in von außen sichtbare und innenliegende Bereiche differenziert werden. Sie können durch zusammenlaufende Fließfronten während der Formfüllung entstehen und durch verschiedene Ursachen hervorgerufen werden [51]. Neben dem Fließfrontverlauf ist auch das erreichte Vakuum in der Form entscheidend. Selbst bei einem idealen Fließfrontverlauf können sonst trockene Bereiche im Bauteil verbleiben, da die Fließfront die noch in der Kavität verbleibende Luft auf einzelne, kleine Bereiche verdichtet. Innenliegende Lufteinschlüsse entstehen beispielsweise auf Grund von Fließgeschwindigkeitsunterschieden inner- und außerhalb von Faserbündeln. Diese sind meist schwierig zu erkennen und können sich als kleinere Wölbungen auf der Bauteiloberfläche abzeichnen [51]. Außenliegende Trockenbereiche führen generell zum Ausschuss des Bauteils und müssen deswegen unbedingt vermieden werden. Innenliegende Lufteinschlüsse müssen zur Beurteilung möglicher Funktionsbeeinträchtigungen aufwendig mit geeigneten Prüfverfahren (wie z.B. Ultraschallprüfung) vermessen und genau hinsichtlich ihrer Größe und Ausprägung charakterisiert werden.

Zur Vermeidung von Trockenstellen sollte das punktuelle Zusammenlaufen der Fließfront vermieden werden. Dies wird jedoch durch lokale Veränderungen der Verstärkungsstruktur während der Drapierung negativ beeinflusst. Während der Faservolumengehalt bei konstanter Kavitätshöhe bereits durch die Scherung der

Verstärkungsstruktur verändert wird, können durch die Umformung der Verstärkungsstruktur auch Wellungen, Falten und Faserbündelverschiebungen entstehen [52]. Durch die dichtere Anordnung der Fasern in Bereichen mit Wellungen und Falten wird der Faservolumengehalt bei konstanter Kavitätshöhe erhöht. Dies führt wiederum zu einer Reduktion der Permeabilität und somit auch zu einem veränderten Fließfrontverlauf [53].

Neben den durch die Drapierung der Verstärkungsstrukturen auftretenden Defekten, können auch während dem RTM Prozess selber noch weitere Defekte auftreten. Einer der wichtigsten Faktoren ist die Veränderung der Kompaktierung in radialen Bereichen. Durch die erhöhte Kompaktierung der Verstärkungsstruktur im Radius entsteht ein ungewollter faserfreier Zwischenraum am Außenradius. Dieser Zwischenraum bewirkt dann ein Voraneilen des Fluids und im schlimmsten Fall innenliegende Lufteinschlüsse im Innenradius. Nach Möglichkeit sollte dies durch eine Optimierung des Drapier-Werkzeugs vermieden werden [54–57,33]. Oben beschriebene Einflussfaktoren gliedern sich ausgehend von [58] in die in Abbildung 2.3 aufgeführten Prozessmerkmale .

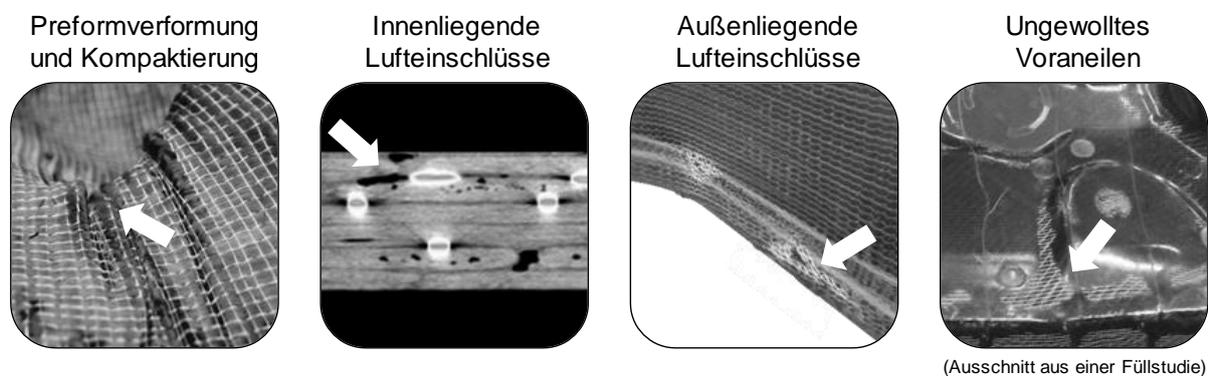


Abbildung 2.3: Auswahl an bei der Prozessführung zu berücksichtigenden Merkmalen.

Über eine gezielte Führung der Fließfront innerhalb der Form sollte das Auftreten von qualitätsrelevanten Defekten vermieden werden [51]. Fließkanäle stellen hierzu eine wichtige Möglichkeit zur Lenkung des Fließfrontverlaufs dar.

2.2 Interaktion zwischen Fließkanal und Verstärkungsstruktur

Faserfreie Zwischenräume führen zu einem Voraneilen (engl. „Race Tracking“) der Matrix [59]. Diese Zwischenräume können zum einen durch einen zu kurzen Beschnitt der Verstärkungsstruktur und zum anderen durch Freiräume im Außenradiusbereich

entstehen [54,55,57]. Durch Einbringung von Fließkanälen in die Werkzeugoberfläche wird das Voraneilen in faserfreien Zwischenräumen zur Bauteilfüllung genutzt. Im Folgenden werden aus den existierenden Untersuchungen die Einflussparameter für die Dimensionierung der Fließkanäle abgeleitet.

In [59,60] werden von Bickerton et al. Fließkanäle gezielt zur Bauteilfüllung verwendet. Anhand einer rechteckigen und einer quadratischen Kavität werden verschiedene Fließkanalkonfigurationen untersucht. Um diese in Relation zur Verstärkungsstruktur zu setzen und in der Füllsimulation zu modellieren, wird eine Ersatzpermeabilität für den Fließkanalquerschnitt eingeführt. Die Ersatzpermeabilität lässt sich analog über Gleichsetzen der Hagen-Poiseuille und Darcy Gleichung ermitteln [61,60,59]:

$$Q = -A \frac{r^2}{8 \mu L} \Delta P = -\frac{K A}{x_f \mu} \Delta P \quad (2-4)$$

$$K_{FK} = \frac{r^2}{8} \quad (2-5)$$

Daraus ergibt sich, dass selbst für einen Fließkanal mit einer Breite von 1 mm die Größenordnung der Permeabilität des Fließkanals die der Verstärkungsstruktur um ein vielfaches übersteigt. In [59,60] zeigen Bickerton et al. dass die gewählte Modellierung des Fließkanals mit einer Ersatzpermeabilität zu einer guten Übereinstimmung zwischen Simulation und Experiment führt.

Die Ergebnisse aus der ersten Untersuchung von [60] sind ausschnittsweise in Abbildung 2.4 dargestellt. Die Abbildung zeigt die Relation der Fließfrontausbreitung wenn das Fluid das Ende vom Fließkanal erreicht. Die Breite des rechteckigen Fließkanals wird in drei Abstufungen, 2 mm, 5 mm und 8 mm, variiert. Anhand von Fließfrontvisualisierungsexperimenten mit einem Ersatzfluid mit konstanter Viskosität wird der Fließfrontfortschritt in der Form anschließend bewertet. Die Fließkanäle führen im Experiment zu einer Reduktion des Injektionsdrucks bei konstantem Volumenstrom. Neben der Reduktion der Injektionszeit und / oder des Injektionsdrucks ist vor allem der Fließfrontverlauf entscheidend [62]. Die durchgeführten Versuche in [60,59] zeigen wie Fließkanäle eine Veränderung des Fließfrontverlaufs ermöglichen. Aus Abbildung 2.4 geht hervor, dass die Größe des Fließkanalquerschnitts einen wesentlichen Einfluss auf den Fließfrontverlauf hat. Auch die Versuche in [60] zeigen einen Unterschied zwischen kleinen und großen Fließkanälen. Beim direkten Vergleich von dem 2 bzw. 5 mm breiten Fließkanal zeigt sich ein größerer Unterschied in Bezug

auf die Relation zwischen der Fließfront im Fließkanal und in der Verstärkungsstruktur. Dieser Unterschied ist nicht zwischen 5 und 8 mm Breite zu beobachten.

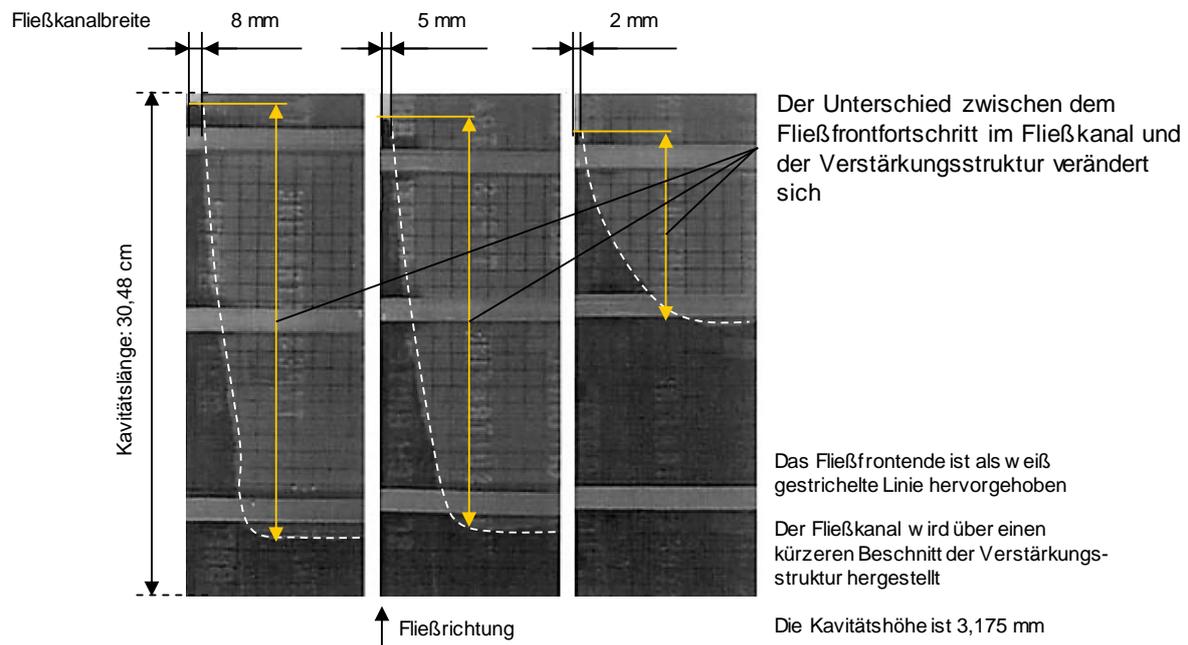
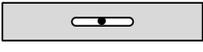
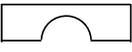
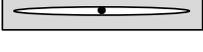


Abbildung 2.4: Füllbildmomentaufnahmen von Fließfrontvisualisierungsversuchen aus [59] zum ungewollten Voraneilen der Fließfront (gestrichelte weiße Linie) bei verschiedenen Fließkanalbreiten im Niederdruck RTM Verfahren mit Testfluiden (konstante Viskosität).

Gleichzeitig ist die Größenordnung der Permeabilität von den verwendeten Vlies Verstärkungsstrukturen in [59] (zwischen $2,12 \text{ E-}08 \text{ m}^2$ und $5,63 \text{ E-}10 \text{ m}^2$) und [60] (zwischen $4,56 \text{ E-}09 \text{ m}^2$ und $5,66 \text{ E-}10 \text{ m}^2$) erheblich höher als die Größenordnung von Kohlenstoffasergelegen. Die Beobachtungen zeigen, dass das Verhältnis von Ersatzpermeabilität des Fließkanalquerschnitts und Permeabilität der Verstärkungsstruktur den Fließfrontverlauf beeinflusst.

In [63] untersucht Arnold den Einfluss verschiedener Angusszenarien. Die untersuchten Fließkanalquerschnitte sind in Tabelle 2.2 dargestellt. Die gewählten Querschnittsformen umfassen Halbkreisquerschnitte, angewinkelte Querschnitte und einen auslaufenden Halbkreisquerschnitt. Die Länge des Angusskanals wird zwischen 100 mm und 400 mm variiert. In der Untersuchung kann kein Einfluss des Fließkanalquerschnitts nachgewiesen werden. Allerdings kann ein geringer Einfluss der Fließkanallänge beobachtet werden.

Tabelle 2.2: Übersicht über die in [63] untersuchten Angussleisten und Fließkanalquerschnitte.

Draufsicht	Querschnitt	Eigenschaften
		Punktanguss \varnothing 9,4 mm
		Linienanguss 100 mm: Querschnitt halbrund
		Linienanguss 400 mm: Querschnitt halbrund
		Linienanguss 400 mm: Querschnitt winklig
		Linienanguss 360 mm: Querschnitt halbrund auslaufend

Das verwendete Versuchswerkzeug ist in Abbildung 2.5 dargestellt. Die verschiedenen Fließkanäle werden mit Hilfe unterschiedlicher Werkzeugeinsätze am Rand der Kavität realisiert (Angussposition links / rechts). Ausgehend von der Darcy Gleichung und den Untersuchungen aus [60,59] wird deutlich, dass die verwendeten Fließkanalquerschnitte zu groß sind, um zu wesentlichen Unterschieden in den Fließfrontverläufen zu führen. Darüber hinaus verlaufen die Fließkanäle nur am Rand des Bauteils und nicht über die Bauteiloberfläche. Zwar hat das Werkzeug auch einen Anguss im Zentrum der Kavität, bei diesem handelt es sich aber um einen Punktanguss ohne abzweigende Fließkanäle. Dies führt zu einer nur geringen Reduktion des Fließwegs.

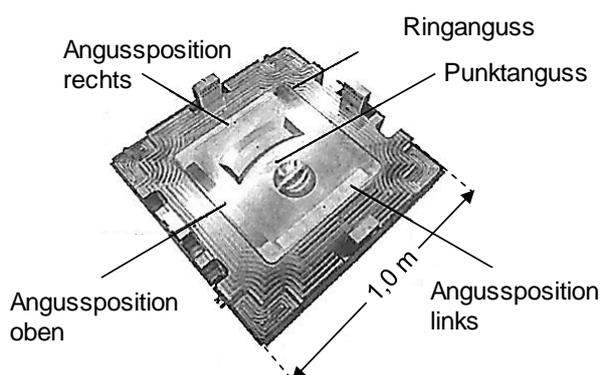


Abbildung 2.5: Schematische Darstellung des Oberwerkzeugs, das in [63] verwendet wird. Beschriftet sind die unterschiedlichen Angusspositionen.

Abschließend kann für die weiteren Untersuchungen zusammengefasst werden, dass die Fließkanalquerschnittsgröße den Fließfrontverlauf beeinflussen kann. Die Position

des Fließkanals ist in Kombination mit seiner Länge ein wesentlicher Faktor für die erreichbare Reduktion der Injektionszeit.

2.3 Optimierung von Verteilersystemen für das RTM Verfahren

Ausgehend von den vorangegangenen Untersuchungen können bereits wesentliche Zusammenhänge zwischen Fließkanalverteilersystem und Verstärkungsstruktur identifiziert werden. Neben diesen Wirkzusammenhängen ist auch die Positionierung der Fließkanäle ausschlaggebend für die Minimierung von Zykluszeit und Injektionsdruck. Außerdem vermeidet die gezielte Führung der Fließfront innerhalb der Kavität Lufteinschlüsse. Eine experimentelle Optimierung der Fließkanalanordnung würde eine iterative Änderung des Werkzeugs bedeuten. Dies ist unter Berücksichtigung der Fertigungskosten und des Zeitaufwands nicht wirtschaftlich. Daraus folgt der Bedarf für eine virtuelle Optimierung der Positionierung des Fließkanalverteilersystems. Im folgenden Abschnitt soll zunächst der Aufbau der virtuellen Modellbildung erklärt und anschließend der Stand der Technik hinsichtlich der Positionsoptimierung von Fließkanälen dargestellt werden. Das Kapitel wird mit einer Übersicht zu den sich ergebenden noch offenen Fragestellungen abgeschlossen.

2.3.1 Aufbau der RTM Füllsimulation

Ausgehend von den Wirkzusammenhängen und den auftretenden Fertigungsdefekten ist für eine möglichst präzise Füllsimulation ein sequentieller Aufbau der virtuellen Prozesskette notwendig. [33] und [34] zeigen eine Kopplung der Drapier- und Füllsimulation. Mit dieser direkten Kopplung ist es möglich, den Einfluss von Fehlerquellen, wie zum Beispiel manuellen Eingaben oder Materialeigenschaften, auf die Füllsimulation wesentlich zu reduzieren.

Die Eigenschaften der Verstärkungsstruktur folgen aus der Drapiersimulation des Lagenaufbaus und fließen zusammengefasst als positionsspezifische Permeabilitätswerte, Faservolumengehaltswerte und Luftspaltwerte in die Modellierung der Kavität für die Füllsimulation ein [33]. Die Ergebnisse aus der Drapiersimulation werden den entsprechenden Datenpunkten des Netzes für die Füllsimulation zugewiesen.

Die Modellierung der Verstärkungsstruktur hinsichtlich Preformdicke und lokaler Permeabilität in Kombination mit den Werkzeugflächen ist die Grundlage für die Füllsimulation. Hierzu ist es besonders wichtig alle auftretenden faserfreien

Zwischenräume zu modellieren, um das in [54,55,59] beschriebene Voraneilen der Fließfront zu berücksichtigen. Insgesamt wird durch den Prozessfluss eine sehr präzise Simulation des Prozesses möglich (Steigerung auf eine potentielle Gesamtgenauigkeit von 84% lt. [33]).

Fließkanäle und Entlüftungspunkte werden nach wie vor als Randbedingung im Vorfeld vom Anwender vorgegeben. Eine numerische Optimierung der Fließkanalanordnung ist Bestandteil aktueller Forschung [61,64–67]. Diese Optimierung ermöglicht die direkte Einflussnahme auf den Fließfrontverlauf.

In [60] wird die Modellierung von Fließkanälen für die Füllsimulation evaluiert. Hierzu wird die 2D und 3D Darstellung gegenüber gestellt (s. Abbildung 2.6). Bei der 2D Darstellung wird der Fluidfluss in transversaler Richtung nicht berücksichtigt. Dieser ist im 3D Modell zwar enthalten, jedoch führt die 3D Modellierung der Kavität zu einer erheblichen Steigerung des Rechenaufwands.

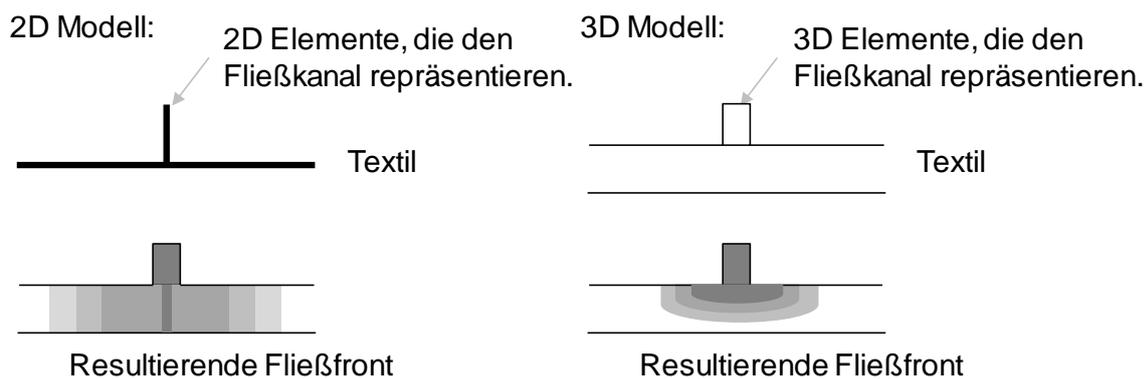


Abbildung 2.6: Auswirkung der Fließkanalmodellierung nach [60].

Da in den Untersuchungen aus [59,60] eine sehr gute Übereinstimmung vom experimentellen und simulierten Fließfrontverlauf erreicht wird, stellt die 2D Modellierung eine hinreichende Näherung dar. Dies gilt allerdings nur, sofern die transversale Strömung innerhalb des Lagenaufbaus vernachlässigbar ist.

2.3.2 Virtuelle Optimierung der Fließkanalpositionierung

Zwar ermöglicht die Füllsimulation bereits die virtuelle Darstellung des RTM Prozesses, die eigentliche Optimierung der Prozessführung wird aber weiterhin auf Basis menschlicher Expertise durchgeführt. Hierzu wird die Position der Fließkanäle im virtuellen Modell manuell variiert um das gewünschte Füllbild zu erreichen [68]. Dies ist auf Grund der Vielzahl von durchzuführenden Simulationen aber zeitaufwendig. Die

heterogene Permeabilitätsverteilung erschwert die optimale Positionierung zusätzlich, da der Fließfrontverlauf lokal variiert und die Auswirkung der Fließkanalposition auf den Fließfrontverlauf nicht immer gleich ersichtlich ist. In [61,66,67] werden deswegen numerische Optimierungsverfahren zur Berechnung der optimalen Fließkanalanordnung untersucht. Im Folgenden werden die wesentlichen Eckpunkte zur Berechnung der Fließkanalanordnung aufgezeigt.

Als Grundlage für die Optimierung wird ein vereinfachtes Modell der Kavität herangezogen. Die in den Quellen verwendeten Modelle beinhalten nicht die lokale Permeabilitätsverteilung basierend auf der Drapiersimulation, sondern weisen einzelnen Flächen der Kavität jeweils konstante Permeabilitätswerte zu. Dies führt dazu, dass insbesondere die durch die Drapierung entstehenden lokalen Defekte nicht berücksichtigt werden.

Die Zielgrößen der Optimierung des RTM Prozesses bestehen aus der Minimierung von Zykluszeit / Injektionsdruck und möglichst wenigen Punkten, an denen die Fließfront zusammenläuft [69]. Der erste Ansatz beeinflusst die Zielgrößen über die Positionierung des Angusspunktes und eine geeignete Position der Entlüftungspunkte [70–75]. Die Position der Entlüftungspunkte ergibt sich aus den Punkten an denen die Fließfront lokal zusammenläuft. Die Anzahl dieser Punkte sollte minimal sein, da durch das Zusammenlaufen ein erhöhtes Risiko für einen Lufteinschluss besteht. Darüber hinaus sind mit jedem Entlüftungspunkt auch steigende Werkzeugkosten verbunden. Außerdem können sich Entlüftungspunkte auch auf der Bauteiloberfläche abzeichnen [71,74].

Über die Position des Angusspunkts lässt sich der Fließfrontverlauf wesentlich beeinflussen. In [74] wird aufgezeigt, wie die optimale Position auf der Bauteiloberfläche heuristisch bestimmt werden kann. Der Rechenaufwand ist abhängig von der Anzahl der variablen Parameter sowie vom verwendeten Optimierungsalgorithmus [70]. Um den Rechenaufwand zu reduzieren wird von [71] das Modell auf die relativen Fließwege beschränkt. Dies basiert auf der Annahme, dass das Fluid entlang des Weges mit dem geringsten Widerstand fließt. Durch die gezielte Beeinflussung des Volumenstroms / des Injektionsdrucks einzelner Angusspunkte einer Kavität zeigen [76,77] wie der Fließfrontverlauf während der Injektion verändert werden kann. Dadurch können trotz ungewollten Voraneilens des Fluids Lufteinschlüsse vermieden werden.

Das erschließbare Potential über die Variation des Angusspunktes ist begrenzt. Die Fließwege innerhalb der Form lassen sich nur eingeschränkt reduzieren. Deswegen verfolgt [78] die weitergehende Optimierung der Formfüllung mit Fließkanälen. Die Optimierung der Positionierung der Fließkanäle mit Hilfe eines genetischen Optimierungsalgorithmus zeigt [61]. Hierzu wird die fließwegbasierte Netzmodellierung des Bauteils um die Permeabilität erweitert. Dadurch ist berücksichtigt, dass der kürzeste Weg durch die Form nicht notwendigerweise auch der Weg des geringsten Widerstandes ist. Die Zielgrößen für den zur Optimierung verwendeten genetischen Algorithmus bestehen aus dem Fließwiderstand, der Anzahl an Fließkanalpunkten und der Anzahl an Entlüftungspunkten. Die Anzahl der Fließkanalpunkte stellt die gegenläufige Optimierungsgröße dar. Ohne einen sich negativ auswirkenden Einflussparameter, wäre das Optimum der minimal erreichbare Fließweg innerhalb der Form. Die damit verbundene hohe Anzahl an Fließkanälen würde zu einer wesentlichen Mehrung des Bauteilgewichts führen. Die in Abbildung 2.7 aufgezeigte Lösung für einen Gleitersitz weist ein verzweigtes Verteilersystem und acht Entlüftungspunkte auf. Unter Annahme eines umlaufend evakuierten Randbereichs würde sich diese Anzahl auf einen Entlüftungspunkt reduzieren.

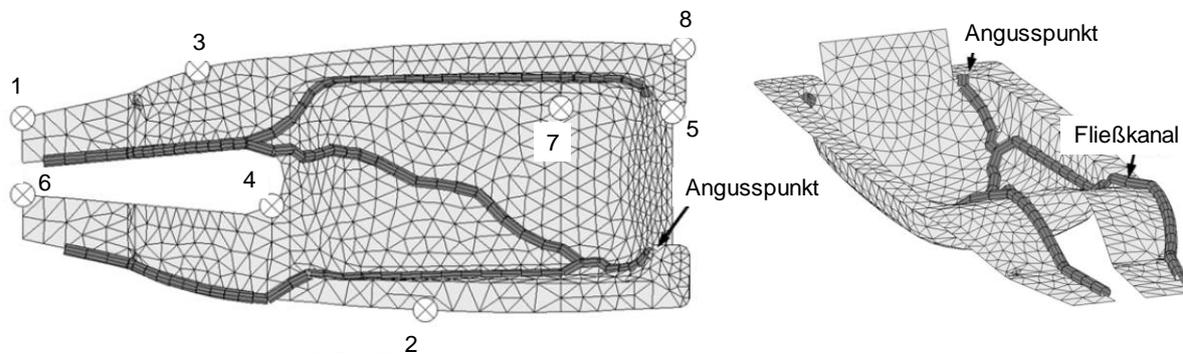


Abbildung 2.7: Berechnungsergebnis des genetischen Optimierungsalgorithmus für die Fließkanalverteilung am Beispiel eines Gleitersitzes aus [61].

Die Annahme einer umlaufenden Evakuierung wird von [64,65] aufgegriffen und weitergeführt. Dazu wird, neben den bereits aufgeführten Optimierungsgrößen, auch die Fließfrontlängenverteilung berücksichtigt um ein gleichmäßiges Füllverhalten zu erreichen. Für die Positionierung der Fließkanäle wird angenommen, dass die Fließfront am Rand des Bauteils enden sollte. Darüber ergibt sich für den ersten initialen Fließkanal eine Mittellinie. Diese Mittellinie wird in [67] für die rechenaufwandseffiziente Positionierung genutzt. Ein wesentlicher Aspekt ist an

dieser Stelle die Untergliederung des Verteilersystems in verschiedene Abschnitte. Die Mittellinie ist die erste Stufe der Verzweigung, von dieser zweigt die nächste Stufe ab. Diese zweite Stufe wird ebenfalls mit Hilfe von geometrischen Zusammenhängen abgeleitet.

Die zentrale Annahme der Optimierungsansätze ist die Reduktion des Modells auf die relativen Fließwege sowie die Permeabilität, wodurch der Rechenaufwand reduziert wird. Diese wird allerdings bisher nur flächenbezogen modelliert. Die punktspezifischen lokalen Permeabilitätseigenschaften, die durch eine sequentielle Modellbildung erschlossen werden können, sind bisher noch nicht berücksichtigt. Die Fließkanalquerschnittsgröße wird nicht gezielt mit in die Optimierung eingebunden. Die bestehenden Untersuchungen aus [61, 64, 66] beziehen sich auf vakuumgestützte Verfahren mit einseitig flexibler Formhälfte. Die dazu verwendete Folie passt sich der Form an, eine präzise Dimensionierung von Fließkanalquerschnitten ist daher schwierig. In Bezug auf den Anwendungsfall in einer Karosseriestrukturkomponente, ergeben sich außerdem noch weitere Randbedingungen. Durch das Zusammenfügen der Einzelkomponenten entstehen Flächenrestriktionen, die beispielsweise den Bauraum begrenzen. Dadurch ist der Bereich auf der Bauteiloberfläche, welcher für die Positionierung von Fließkanälen zur Verfügung steht, beschränkt. Außerdem ergibt sich im selben Kontext die Verfügbarkeit von Flächen, die gewichts- und funktionsneutral für die Positionierung von beispielsweise Entlüftungspunkten, Überlaufkavitäten oder Auswerfern genutzt werden können. Diese Restriktionen sollten ebenfalls bei der Optimierung des Fließkanalverteilersystems berücksichtigt werden.

2.4 Angusssysteme im Spritzguss

Werkzeugseitige Fließkanäle werden auch im Spritzguss zur gleichmäßigen Weiterleitung der Schmelze in die einzelnen Kavitäten eines einzelnen Werkzeugs genutzt. Auf Grund von Analogien zwischen dem RTM und dem Spritzgussverfahren sind im Folgenden die Eigenschaften und Anforderungen von Spritzgussverteilersystemen aufgezeigt. Mit den Eigenschaften des Verteilersystems wird der Werkzeugfüllvorgang innerhalb der einzelnen Kavitäten beeinflusst. Die wirtschaftlichen Zielgrößen sind die Zykluszeit, Bauteilqualität und ein möglichst geringer Materialverlust. In Anlehnung an [14,79] lässt sich das System in die in Abbildung 2.8 dargestellten Abschnitte unterteilen.

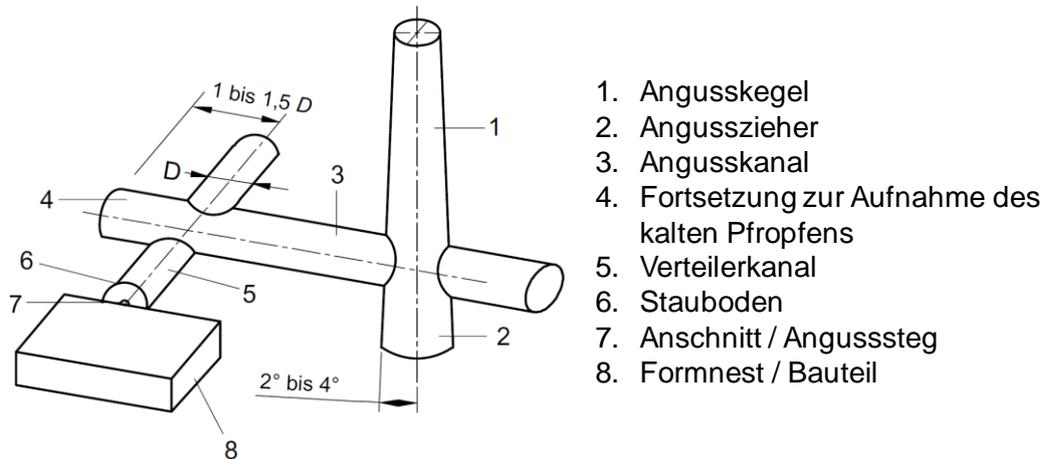


Abbildung 2.8: Definition des Spritzgussangussystems aus [79].

Bei Werkzeugen mit mehr als einer Kavität nimmt der Angusskegel die thermoplastische Schmelze auf und leitet sie in die Angusskanäle. Diese verteilen die Formmasse zu den Einzelkavitäten. Der Anschnitt dient an dieser Stelle als Drossel und besitzt mehrere Funktionen [14]:

- Leichte Trennung des Angussystems vom Bauteil
- Vermeidung von sogenannten Schwimmhäuten
- Erwärmung der Schmelze in Folge von Scherung am kleinen Querschnitt
- Balancierung der Formfüllung über individuelle Dimensionierung der Anschnitte jeder Kavität

Die Angusskanäle können darüber hinaus in beheizte (Heißkanal) und nicht beheizte Kanäle (Kaltkanal) differenziert werden [79]. Heißkanäle sind temperiert, sodass keine erstarrende Randschicht an den Kanalauswänden entsteht.

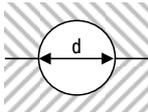
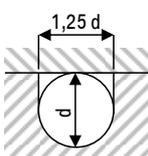
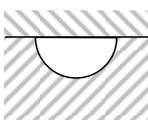
Tabelle 2.3: Einflussgrößen auf das Spritzguss Angussystem nach [14].

Formteil	Formmasse
<ul style="list-style-type: none"> • Geometrische Gestaltung • Volumen • Wanddicke • Qualitätsanforderungen • Maßhaltigkeit • Optische u. mechanische Eigenschaften 	<ul style="list-style-type: none"> • Viskosität • Chem. Aufbau • Füllstoffe • Erstarrungszeit • Erweichungsbereich • Temperaturempfindlichkeit • Schwindungsverhalten

Die Einflussgrößen aus [14], die die Dimensionierung des Angussystems beeinflussen, sind in Tabelle 2.3 aufgeführt. Neben den Einflussgrößen auf die

Dimensionierung der Angussystemquerschnitte, sind in [14], [80], [81] und [82] darüber hinaus die verschiedenen denkbaren Fließkanalquerschnittsformen bewertet. Die Übersicht zu den einzelnen Formen ist in Tabelle 2.4 dargestellt.

Tabelle 2.4: Vergleich unterschiedlicher Fließkanalquerschnitte für Spritzgusswerkzeuge basierend auf [65], [67], [68] und [69].

Fließkanalquerschnitt	Vorteile und Nachteile von gegebenen Fließkanalquerschnitten in Spritzgusswerkzeugen
 <p>Kreis</p>	<ul style="list-style-type: none"> + Geringste Oberfläche bezogen auf den Querschnitt, geringste Abkühlung, geringste Wärme- und Reibungsverluste + Die Formmasse erstarrt im Zentrum eines runden Kanals zuletzt. Dadurch eine gute Nachdruckwirkung – Die aufeinander abgestimmte Bearbeitung von beiden Werkzeughälften ist schwierig und teuer
 <p>Parabelförmig</p>	<ul style="list-style-type: none"> + Gute Annäherung an einen kreisförmigen Kanal + Einfachere Herstellung, da Einarbeitung nur in einer Werkzeughälfte erfolgt – Wärmeverluste und Abfall etwas größer gegenüber Rundkanal
 <p>Halbkreis</p>	<p>Ein halbkreisförmiger Querschnitt hat keine Vorteile gegenüber einem parabelförmigen Querschnitt und sollte deswegen vermieden werden.</p>

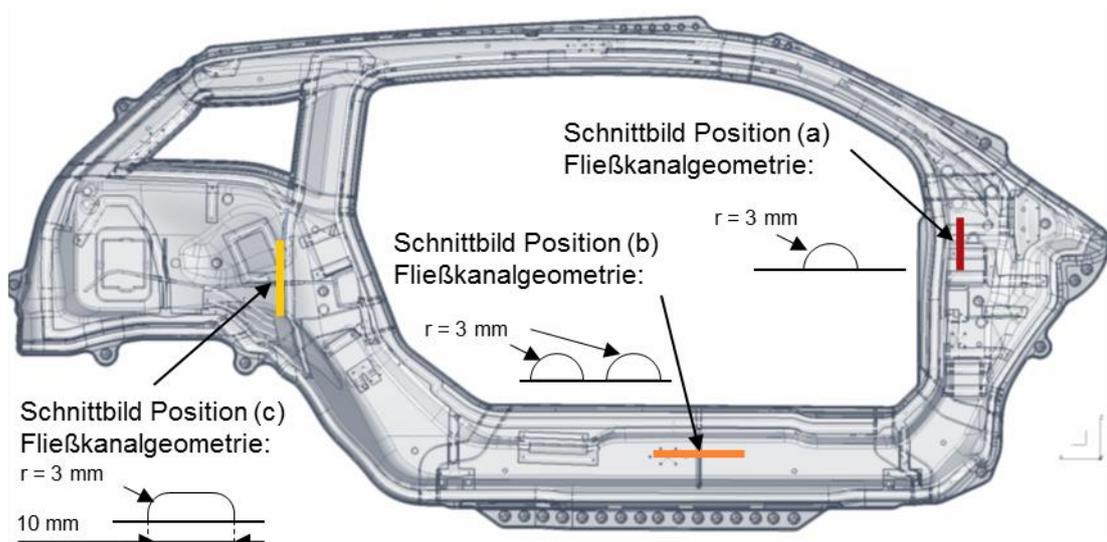
Die Kriterien berücksichtigen die zuvor beschriebene Unterscheidung der Angusskanäle hinsichtlich Formmasse- und Wärmeverlust. Als Optimum wird ein Kreisquerschnitt gewertet. Das optimale Verhältnis von Umfang und Querschnittsfläche führt zu den geringsten Wärme- und Reibungsverlusten. Neben den prozessbezogenen Einflussparametern muss auch die fertigungstechnische Machbarkeit berücksichtigt werden. Für den Kreisquerschnitt müssen beide Werkzeughälften bearbeitet werden. Die nächstbeste Lösung ist der parabelförmige Querschnitt. Er entspricht einer Näherung an den kreisrunden Querschnitt. Weitere Querschnitte wie beispielsweise ein Halbkreis oder rechteckiger Querschnitt sind negativ bewertet und sollten vermieden werden.

2.5 Durch Fließkanäle entstehende Defekte

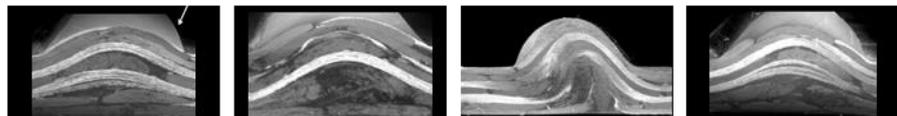
Die Auswirkung von Fließkanälen auf die Injektionszeit den Injektionsdruck und den Fließfrontverlauf im Speziellen ist basierend auf den bestehenden Untersuchungen positiv zu bewerten. Allerdings können sich Fließkanäle auch auf die resultierenden

Bauteileigenschaften auswirken. Für das Bauteilgewicht zeigt dies exemplarisch die in [61] verwendete Fitness-Funktion zur numerischen Optimierung des Fließkanalverteilersystems. In dieser Funktion ist das Gewicht als negativer Bewertungsfaktor aufgeführt. Die Mehrung des Bauteilgewichts skaliert mit dem Volumen der Fließkanäle, die auf der Bauteiloberfläche verbleiben.

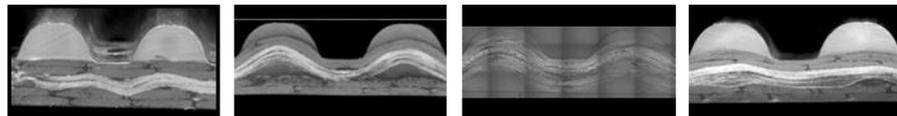
Für den Einfluss von Fließkanälen auf die Bauteileigenschaften werden Beobachtungen aus der Serienproduktion von automobilen Karosseriekomponenten, wie zum Beispiel dem von der BMW AG entwickelten Seitenrahmen des Fahrzeugmodells BMW i3, mit einbezogen. Die für die folgenden Untersuchungen relevanten Erkenntnisse sind in diesem Abschnitt beschrieben. Die Fließkanäle, welche beim Seitenrahmen und auch anderen Karosserieelementen des i3 eingesetzt werden, sind meist als Halbkreis mit Radius 3 mm ausgeführt.



Schnittbilder von
Position (a)



Schnittbilder von
Position (b)



Schnittbilder von
Position (c)

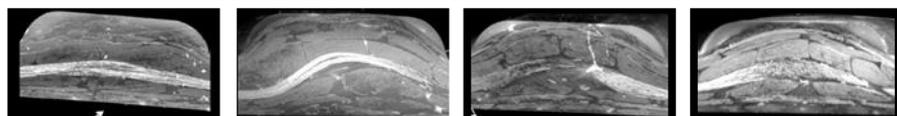


Abbildung 2.9: Beispiel Schlißbilder von Fließkanälen eines Seitenrahmens der BMW i3 Karosseriestruktur an A-Säule (a), Schweller (b) und C-Säule (c).

Obwohl viele Fließkanäle über die Bauteile verlaufen, ist bei keinem Bauteil ein Einfluss der Fließkanäle auf den Bauteilverzug zu beobachten. Die Fließkanäle auf der Bauteiloberfläche zeigen allerdings unregelmäßig nach dem RTM Prozess eine dunkle Trübung, die darauf hindeutet, dass die Fließkanäle mit Fasern gefüllt sind. Die korrespondierenden Schliffbilder von Bauteilen, auf denen sich Fließkanäle befinden, zeigen eine lokale Veränderung des Faserverlaufs. Ein nicht kraftflussgerechter Verlauf, Ondulation, der Fasern führt zu einer Schwächung der mechanischen Eigenschaften. In der Abbildung 2.9 ist schematisch der Seitenrahmen eines BMW i3 abgebildet. Die unterhalb des Seitenrahmens dargestellten Schliffbilder entstammen jeweils den blau skizzierten Positionen a, b und c. Auf den Schliffbildern ist der Schnitt orthogonal zum Fließkanal zu sehen.

Der Fließkanal auf Schliffbild a zeigt einen Halbkreisquerschnitt ($r = 3 \text{ mm}$). Auffällig ist, dass die Fasern in den freien Querschnitt ausgelenkt werden. Auf den Schliffbildern zu Position b sind zwei halbkreisförmige (jeweils $r = 3 \text{ mm}$) Fließkanäle zu sehen, die parallel zueinander verlaufen. An dieser Stelle ist zu sehen, dass sich die Auslenkung der Fasern zwischen einzelnen Bauteilen wesentlich unterscheiden kann. Auf den Schliffbildern an Position c füllen die Fasern reproduzierbar den breiten, beinahe rechteckförmigen, Querschnitt ($r = 3 \text{ mm}$, 10 mm breit). Die Faserbündel scheinen sich auszudehnen. Ein direkter Zusammenhang mit den Verstärkungsstruktur- oder Prozesseigenschaften ist nicht bekannt.

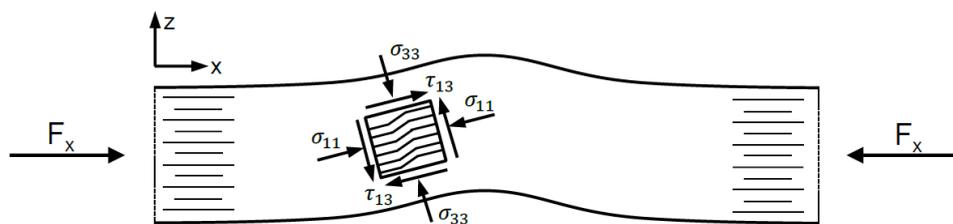


Abbildung 2.10: Schematische Darstellung der Spannungszustände in einer ausgelenkten Lage aus [83].

Ausgehend von der beobachteten Ondulation der Fasern im Fließkanalquerschnitt, wird eine Reduktion der Festigkeit vermutet. Diese skaliert mit der Ausprägung der Ondulation. In der Darstellung in Abbildung 2.10 aus [83] wird der Wirkzusammenhang zwischen dem Faserverlauf und den auftretenden Spannungen aufgezeigt. Die Faserwelligkeit induziert ein geometrieabhängiges, dreidimensionales Spannungsfeld. Durch die auftretende transversale Dehnung der Fasern entstehen interlaminare

Zugspannungen. Die resultierenden Spannungen sind eine Kombination aus interlaminarer Normalkraft und den wirkenden Scherkräften. Eine außen anliegende Zugbelastung würde zu einem Glätten der Fasern führen, während eine Druckbelastung zu einer Verstärkung der Auslenkung führt. Die damit verbundenen Versagensmechanismen werden von [83] primär auf ein Matrixversagen zurückgeführt.

Zusammenfassend zeigen die Schliffbilder und der Wirkzusammenhang zwischen Ondulation und mechanischer Festigkeit des Bauteils, dass eine Auswirkung von Fließkanälen auf die Bauteileigenschaften zu berücksichtigen ist. Es fehlen bisher Untersuchungen des Wirkzusammenhangs, der zur Entstehung der Auslenkung der Fasern führt. Dementsprechend konnten in der Vergangenheit auch keine Rückschlüsse gezogen werden, wie eine Ondulation der Fasern vermieden werden kann. Es zeigt sich jedoch, dass die Fließkanäle eine lokale Schwächung des Laminats darstellen können, die den Anwendungsbereich von Fließkanälen auf der Bauteiloberfläche limitiert.

2.6 Zusammenfassung Stand der Technik

Hinsichtlich dem Stand der Technik ergeben sich folgende Eckpunkte:

- Reduktion der Injektionszeit oder des Injektionsdrucks im RTM Verfahren ist mit Fließkanälen möglich.
- Auf Basis der Einflussfaktoren auf Spritzgussverteilersysteme sind unter anderem folgende Einflussparameter für die Dimensionierung des Fließkanalquerschnitts relevant: Bauteilvolumen, Fließweg und Wanddicke.
- Untersuchungen zum Voraneilen des Fluides (sog. „Race Tracking“) in faserfreien Zwischenräumen zeigen, dass der Einfluss der Fließkanalgröße auf den Fließfrontverlauf und die Injektionszeit vermutlich asymptotisch verläuft.
- Eine numerische Optimierung der Fließkanalverteilung ist, basierend auf vereinfachten Simulationsmodellen (zonenspezifisch homogene Permeabilitätsverteilung), möglich.

Zusammenfassend fehlt für die Auslegung von werkzeugseitigen Verteilersystemen für den RTM Prozess bisher die Charakterisierung der Wirkzusammenhänge zwischen Verstärkungsstruktur und werkzeugseitigen Fließkanälen. Die bestehenden Untersuchungen deuten darauf hin, dass durch geeignete Dimensionierung des

Fließkanalquerschnitts der Fließfrontverlauf beeinflusst werden kann. Darüber hinaus kann die Injektionszeit / der Injektionsdruck über die Position und Länge des Fließkanals minimiert werden. Für die Verwendung von Fließkanälen zur Prozessoptimierung ist deren Auswirkung auf die Bauteileigenschaften von Bedeutung. Durch die Vermeidung der Auslenkung von Fasern im Fließkanal und der damit verbundenen Reduktion der Festigkeit, lässt sich der Anwendungsbereich von Fließkanälen wesentlich erweitern.

3 Einfluss von Fließkanälen auf die Formfüllung

Dieses Kapitel untersucht die Auswirkungen von Fließkanälen auf die Injektion im Rahmen einer Parameterstudie, um die Dimensionierung des Fließkanalquerschnitts zu charakterisieren. Zielgrößen sind der Fließfrontverlauf, die Injektionszeit und die Prozessstabilität. Prozessstabilität bezieht sich in diesem Kontext zum einen auf die lokale Variation des Fließfrontverlaufs und zum anderen auf die Variation der insgesamt resultierenden Injektionszeit zur vollständigen Füllung der Kavität. Zunächst wird mit Hilfe einer theoretischen Vorbetrachtung, in Bezug auf die Zielkriterien, die optimale Querschnittsform für einen Fließkanal im RTM Werkzeug hergeleitet. Anschließend werden die Methoden, Materialien und Versuchsaufbauten sowie das verwendete Simulationsmodell vorgestellt.

Im Rahmen der Parameterstudie wird der Einfluss drei verschiedener Fließkanalquerschnittsgrößen untersucht. Anschließend wird der Einfluss der Orientierung von K1 und K2 auf die Wirkungsbereiche des Fließkanals gezeigt. Eine Veränderung des Fließkanalquerschnitts über die Fließkanallänge wird anhand eines am Rand der Form verlaufenden Fließkanals dargestellt. Danach werden diese Erkenntnisse auf Mehrkanalsysteme übertragen. Abschließend wird analysiert welchen Einfluss Fließkanäle auf die Prozessstabilität haben.

3.1 Theoretische Betrachtung der Fließkanalauslegung

Insgesamt können aus den Eigenschaften und Anforderungen von Verteilersystemen im Spritzguss bereits mögliche Einflussparameter auf das Verteilersystem im RTM Prozess identifiziert werden:

- Bauteilvolumen und –geometrie
- Fließweg

- Qualitätsanforderungen
- Optische und mechanische Eigenschaften
- Permeabilität der Verstärkungsstruktur
- Bauraum
- Verbindungsflächen

Bauteilvolumen und –geometrie sind direkt übertragbar. Die Wanddicke des Bauteils fließt im RTM Prozess über den Faservolumengehalt in die Permeabilität ein (s. auch Formel 2-1). Durch das homogen temperierte Werkzeug und die isotherme Prozessführung entsteht keine ausgeprägte erstarrte Randschicht an der Werkzeugoberfläche.

Diese Parameter werden in den folgenden Kapiteln experimentell und simulativ untersucht. Zunächst kann auf Basis der Modellierung der Ersatzpermeabilität eines Fließkanals eine Fließkanalquerschnittsform berechnet werden. Hierzu sind bei Anwendung der Gleichungen die Randbedingungen aus Tabelle 2.1 zu berücksichtigen. Abbildung 3.1 zeigt schematisch die Unterschiede zwischen einer Rohrströmung und einem Fließkanal im RTM Prozess.

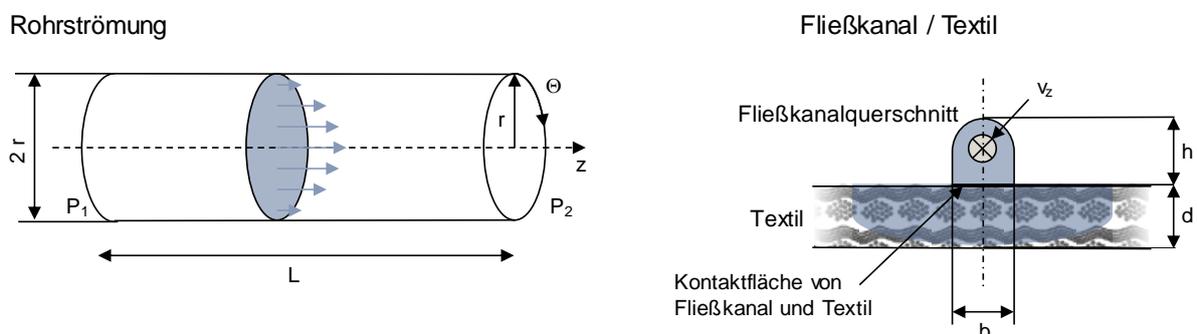


Abbildung 3.1: Darstellung eines Fließkanals als Rohrströmung (links) und ein Querschnitt durch die Kavität zur Visualisierung der Grenzfläche von Fließkanal und Verstärkungsstruktur in der Kavität (rechts).

Bei Fließkanälen, die über die Bauteiloberfläche verlaufen ist der Querschnitt immer zur Verstärkungsstruktur hin offen, das heißt aus dem Fließkanal fließt kontinuierlich zur offenen Seite des Fließkanals das Fluid in die Kavität. Dementsprechend wird erwartet, dass die Kontaktfläche zwischen Fließkanal und Verstärkungsstruktur einen Einfluss hat.

Der optimale Fließkanalquerschnitt kann sich in Abhängigkeit von der gewünschten Zielgröße unterscheiden. Im ersten Schritt werden vier Zielgrößen formuliert:

- Fließkanalvolumen
- Kontaktfläche zwischen Fließkanal und Faserhalbzeug
- Verfügbare Fließkanalhöhe
- Fließkanallänge

Für ein möglichst geringes Fließkanalvolumen, entsprechend einer geringen Gewichtszunahme des Bauteils in Folge des zusätzlichen Matrixmaterials, lässt sich der optimale Fließkanalquerschnitt als Quotient aus Ersatzpermeabilität (m^2) und Querschnittsfläche (m^2) ausweisen. Dadurch ist die Hierarchie der Querschnittsformen identisch zum Spritzguss. Die einzelnen Querschnittsformen sind in der Abbildung 3.2 gezeigt. Als Maßstab für die Querschnittsformen wird deren Höhe verwendet, da diese durch den zur Verfügung stehenden Bauraum begrenzt ist. Der Kreis stellt das optimale Verhältnis aus Umfang und Querschnittsfläche dar. Die nächst beste Annäherung an den Kreisquerschnitt ist ein parabolischer Querschnitt, da der Fließkanal im RTM Werkzeug auf Grund der eingelegten Verstärkungsstruktur nur einseitig wirken kann.

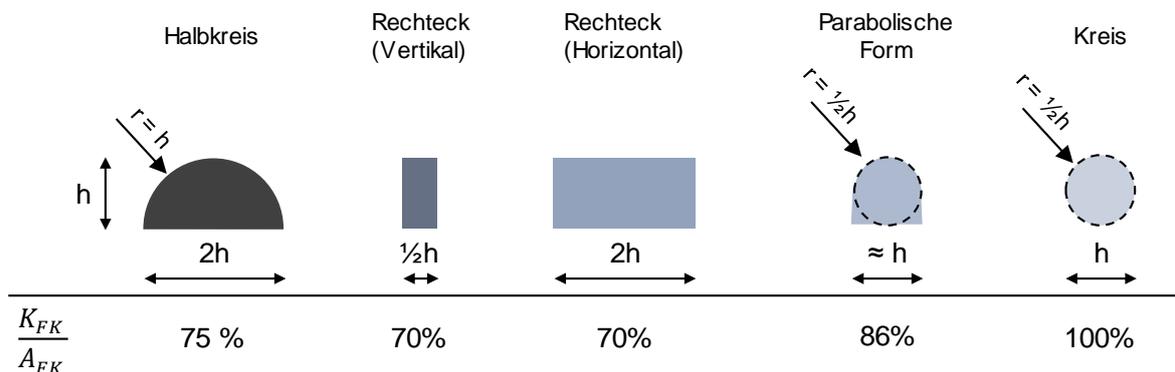


Abbildung 3.2: Vergleich verschiedener Fließkanalquerschnitte hinsichtlich der flächenspezifischen Ersatzpermeabilität.

Eine breitere Ausführung des Fließkanals bei gleicher Höhe führt zu einer höheren Ersatzpermeabilität, da die Ersatzpermeabilität von der Größe der Querschnittsfläche abhängt. Dies führt auch zu einer größeren Kontaktfläche zwischen Fließkanal und Faserhalbzeug und einer größeren Gewichtserhöhung.

Auf Basis der oben beschriebenen Modellierung bewegt sich die Ersatzpermeabilität für einen Halbkreisquerschnitt zwischen $1,56 \text{ E-}08 \text{ m}^2$ ($r = 0,5 \text{ mm}$) und $1,56 \text{ E-}06 \text{ m}^2$ ($r = 5 \text{ mm}$). Unter Annahme einer ebenen Permeabilität der Verstärkungsstruktur (Annahme jeweils für K_1 und K_2) in einem Bereich von $10 \text{ E-}12 \text{ m}^2$ bis $10 \text{ E-}10 \text{ m}^2$ wird

das Fluid überwiegend den Fließkanal füllen bevor es sich in der Verstärkungsstruktur weiter verteilt, da die Ersatzpermeabilität 156, bzw. $1,56 \cdot 10^6$, mal so groß ist wie die angenommene Permeabilität für die Verstärkungsstruktur.

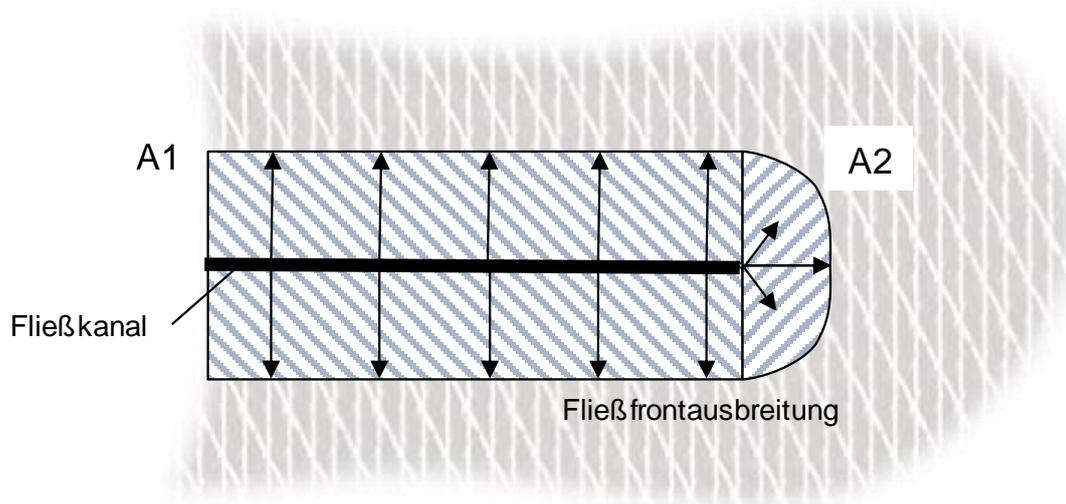


Abbildung 3.3: Wirkungsbereiche eines Fließkanals: Orthogonal zu den Seiten des Fließkanals (A1) und halbkreis- / ellipsoidförmig vom Ende des Fließkanals aus (A2).

Diese Annahme stimmt mit dem in [59,60] experimentell gemessenen Füllverhalten überein. Daraus lässt sich der in Abbildung 3.3 gezeigte Wirkungsbereich eines Fließkanals skizzieren.

Der Wirkungsbereich gliedert sich in die Ausbreitung orthogonal zu den Seiten des Fließkanals (A1) und die Ausbreitung halbkreis- / ellipsoidförmig vom Ende des Fließkanals aus (A2). Die exakte Form der Ausbreitung hängt dabei vom Permeabilitätstensor der Verstärkungsstruktur ab. Je nach Ausrichtung der Hauptachsen relativ zum Fließkanal verändert sich die jeweilige Ausprägung von A1 und A2. Einerseits verkürzt ein längerer Fließkanal den Fließweg, den das Fluid ausgehend vom Fließkanal noch durch die niedrigpermeable Verstärkungsstruktur fließen muss. Andererseits hängt die Relation von A1 und A2 zueinander von der Länge des Fließkanals ab. Je länger der Fließkanal ist, desto mehr Fluid fließt von den Seiten des Fließkanals aus in die Verstärkungsstruktur. Die Dimensionierung des Fließkanalquerschnitts hängt wesentlich von der Länge des Fließkanals und der Permeabilität der Verstärkungsstruktur ab, da durch den Anfangsquerschnitt des Fließkanals das gesamte Fluid zur Versorgung des Fließkanalwirkungsbereichs fließen muss.

3.2 Material, Vorrichtung und Methoden

In diesem Kapitel werden die verwendeten Hilfsmittel zur Untersuchung des Füllverhaltens beschrieben. Der erste Abschnitt befasst sich mit dem verwendeten Kohlenstofffasergelege und dem Ersatzfluid für die Fließfrontversuche. Der zweite Teil beschreibt den Prüfstand und das eingesetzte Werkzeug. Danach werden die verwendeten Methoden zur Auswertung der Messdaten erklärt.

3.2.1 Verstärkungsstruktur und Fluid

Für eine materialgerechte Gestaltung sollte der Lagenaufbau eine kraftflussgerechte, anisotrope Ausrichtung der mechanischen Eigenschaften besitzen. Aus diesem Grund wird für die Füllversuche der in Tabelle 3.1 aufgeführte Lagenaufbau verwendet. Zur Haftung der Einzellagen im Verbund (Stack) wird ein Pulverbinder verwendet. Die Faserbündel der Gelege sind mit einem Franse (0° Lagen) oder Trikot (+/- 45° Lagen) Stich vernäht. Der Lagenaufbau besteht außen aus zwei 150 g/m² Lagen in ±45° Richtung und zwei 600 g/m² Lagen in der Mitte, welche die Vorzugsrichtung abbilden. Die mit Hilfe einer 1D Messzelle (Spezifikation des Messaufbaus siehe [35]) gesättigt gemessene Permeabilität des Lagenaufbaus ist für einen Faservolumengehalt von 51% (bei Kavitätshöhe = 2,1 mm) $K_1 = 1,3 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2$ und $K_2 = 5,5 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$.

Tabelle 3.1: Spezifikation des für die Charakterisierung der Formfüllung verwendeten Lagenaufbaus

Orientierung	Flächengewicht Kohlenstofffasern [g/m ²]	Flächengewicht Glasfaden [g/m ²]	Flächengewicht Binder [g/m ²]
45	154	6,5	10
-45	154	6,5	10
0	614	13,7	10
0	614	13,7	10
-45	154	6,5	10
45	154	6,5	10

Basierend auf der Epoxidharz Materialcharakterisierung aus [17] wird als Zeitintervall für die Fließfähigkeit der Matrix die Zeit vom Mischen der Einzelkomponenten bis zum Erreichen einer Viskosität von 300 mPas definiert. Dieser Zeitraum ist im Vergleich zur

Gesamtaushärtezeit gering. Bei dem in Abbildung 3.4 verwendeten Epoxidharz ist dieser Zeitpunkt bei 120 °C nach ca. 27 s erreicht.

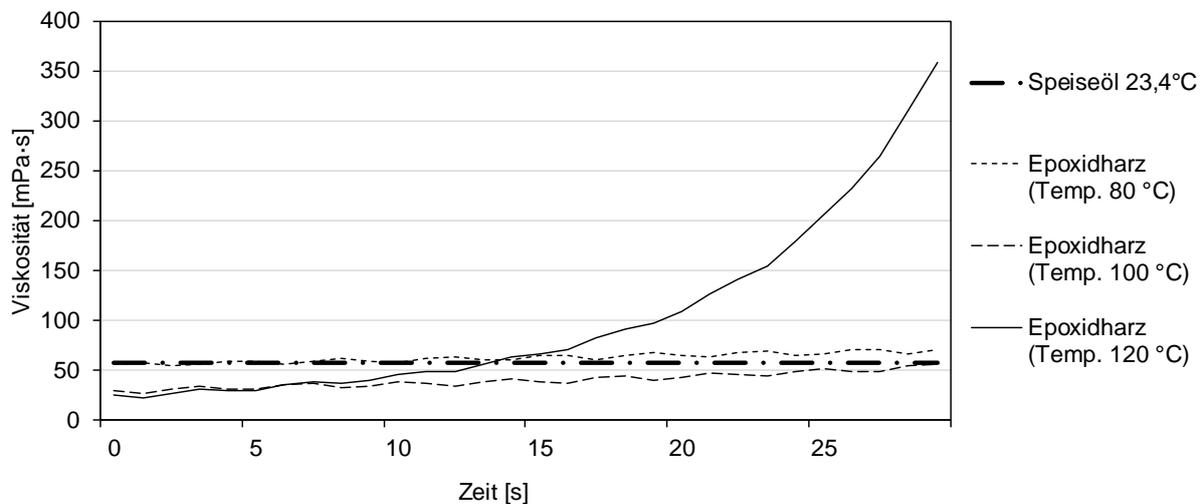


Abbildung 3.4: Viskositätsvergleich zwischen der Rheometermessung zum verwendeten Speiseöl und einem schnellaushärtenden Epoxidharz aus [17].

Zur Beurteilung des Fließverhaltens innerhalb der Kavität ist die Aushärtung nicht relevant. Deswegen wird für die Versuche ein Ersatzfluid verwendet. Hierzu bietet sich herkömmliches Rapsöl an. Die mit einem Rheometer gemessene Viskosität des verwendeten Rapsöls ist 58,7 mPas bei 23,4° C. Ausgehend vom Viskositätsverlauf des Epoxidharzes bei bis zu 100 °C wird dies als vergleichbar angenommen, unter der Bedingung das die Injektion vor dem Viskositätsanstieg abgeschlossen ist.

3.2.2 Prüfstands Aufbau und Übersicht zu den verwendeten Werkzeugeinsätzen

Zur Evaluierung der Interaktion zwischen Geleigen aus Kohlenstofffasern und auf der Werkzeugoberfläche eingearbeiteten Fließkanälen wird ein Versuchsaufbau mit einer transparenten Kavität verwendet. Der Versuchsaufbau ist übernommen aus [62,84] und ist in Abbildung 3.5 dargestellt. Auf der linken Seite der Abbildung ist die Universalprüfmaschine mit gerüstetem Versuchswerkzeug zu sehen. Über die Traverse (2) wird die Bewegung des Werkzeugs gemessen, die Kraft wird über die Kraftmessdose (1) aufgezeichnet. Das Werkzeug selbst besteht aus einem Trägerwerkzeug und zwei Werkzeugeinsätzen für Ober- (A) und Unterwerkzeug (B). Die Werkzeugeinsätze bestehen aus Acrylglas.

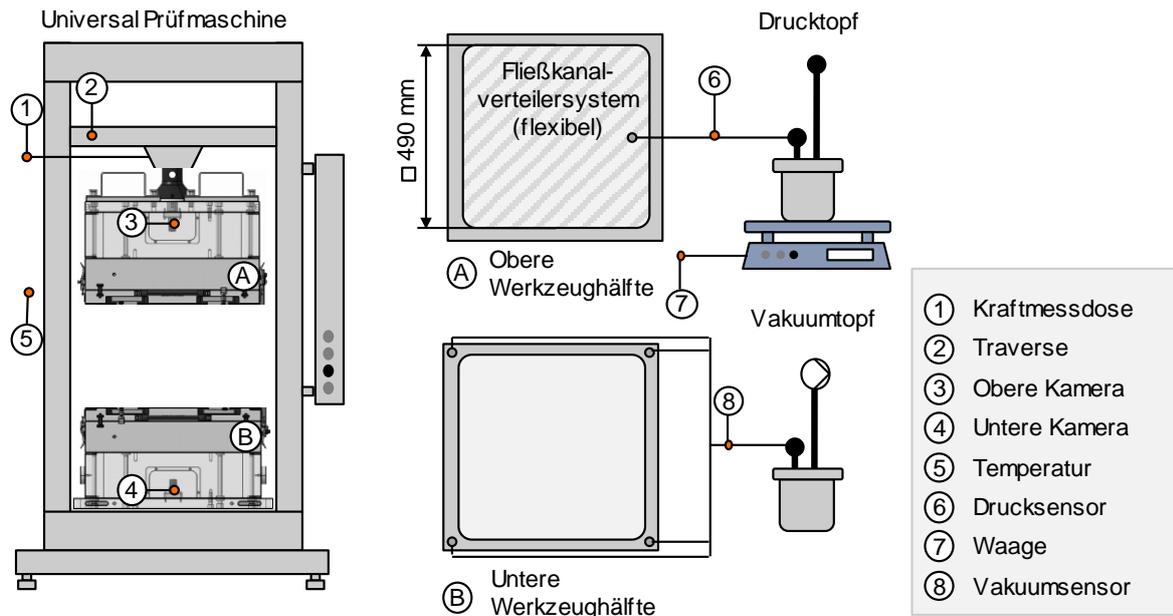


Abbildung 3.5: Fließfrontvisualisierungswerkzeug zur Untersuchung von Füllvorgängen in Verstärkungsstrukturen basierend auf [62,84].

Über den Werkzeugeinsätzen befindet sich eine Verbundglasplatte um gegebenenfalls eine Verformung der Kavität durch den Forminnendruck zu minimieren. Im Trägerwerkzeug ist in jede Seite eine Kamera des Typs DMK 72BUC02 der Firma The Imaging Source Europe GmbH ((3) und (4)) integriert. Die Kameras erfassen den Füllvorgang mit einer Auflösung von 2592x1944 Pixeln. Über diese ist eine kontinuierliche Aufzeichnung des Fließfrontfortschritts während der Injektion möglich. Das Fluid wird mit ~2 bar Relativdruck über einen Drucktopf injiziert. Umlaufend um die Kavität befindet sich ein Klemmbereich, in dem die Verstärkungsstruktur stärker kompaktiert und dadurch fixiert wird. Die Durchbiegung des Acrylglas in Folge des Injektionsdrucks wird exemplarisch gemessen und für die Ergebnisinterpretation berücksichtigt.

Die Raumtemperatur wird über einen Temperaturmessfühler (5) aufgezeichnet, da das Öl bei Raumtemperatur gelagert ist. Der entstehende Massestrom wird über die Gewichtsänderung an der Waage unter dem Drucktopf (7) aufgezeichnet. Der verwendete Injektionsdruck wird über einen Drucksensor an Position 6, nah am Einlass in die Kavität, überwacht. Die Werkzeugeinsätze beinhalten das Verteilersystem und sind austauschbar. Im Unterwerkzeug befindet sich an den Ecken jeweils eine Bohrung, über die die Form entweder gefüllt oder evakuiert werden kann. Das Vakuum wird über einen Vakuumpopf mit angeschlossener Vakuumpumpe

hergestellt und ist während der Formfüllung aktiv. Das Vakuum wird mit dem Vakuumsensor an Position 8 überwacht.

3.2.3 Experimentelle Fließfrontvisualisierung

Zum im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Programm, zur automatischen Extraktion des Fließfrontfortschritts aus den aufgezeichneten Bildern, wird die „Matlab, Version R2013 b“ Software von Mathworks verwendet. Im ersten Schritt wird das Kamerabild auf den äußeren Werkzeugbereich beschnitten und anschließend entzerrt. Das entzerrte Bild wird auf den Bildbereich der Kavität zugeschnitten. Aus den Bildausschnitten wird die Fließfront über die Binarisierung des Bilds extrahiert. In diesem Schritt ist ein ausreichender Kontrast zwischen trockener und getränkter Verstärkungsstruktur entscheidend für die erreichte Präzision. Bei ausreichendem Kontrast ist die Erfassung des Fließfrontfortschritts auch über einen statischen Grenzwert für die Grauwertverteilung möglich. Der Ablauf mit jeweils einem Beispielbild für die einzelnen Auswerteschritte ist in Abbildung 3.6 dargestellt.

Der zeitliche Fortschritt der Fließfront wird über die Überlagerung der Einzelbilder bestimmt. Hierzu wird im ersten Schritt ein Array mit der gleichen Größe wie dem Bildausschnitt erstellt. Die einzelnen Werte des Arrays entsprechen somit den Pixeln des Bildausschnitts. An den Pixeln, an denen im Einzelbild eine Veränderung der Fließfront erfasst wird, wird den Arraywerten der korrespondierende Zeitwert zugewiesen. Dieser Schritt wird iterativ für alle aufgezeichneten Bilder durchgeführt. Dadurch entsteht der zeitliche Verlauf des Fließfrontfortschritts mit einer Auflösung von einer Füllzeit pro $0,14 \text{ mm}^2$ ($1,4 \text{ E}07$ einzelne Zeitwerte pro Experiment).

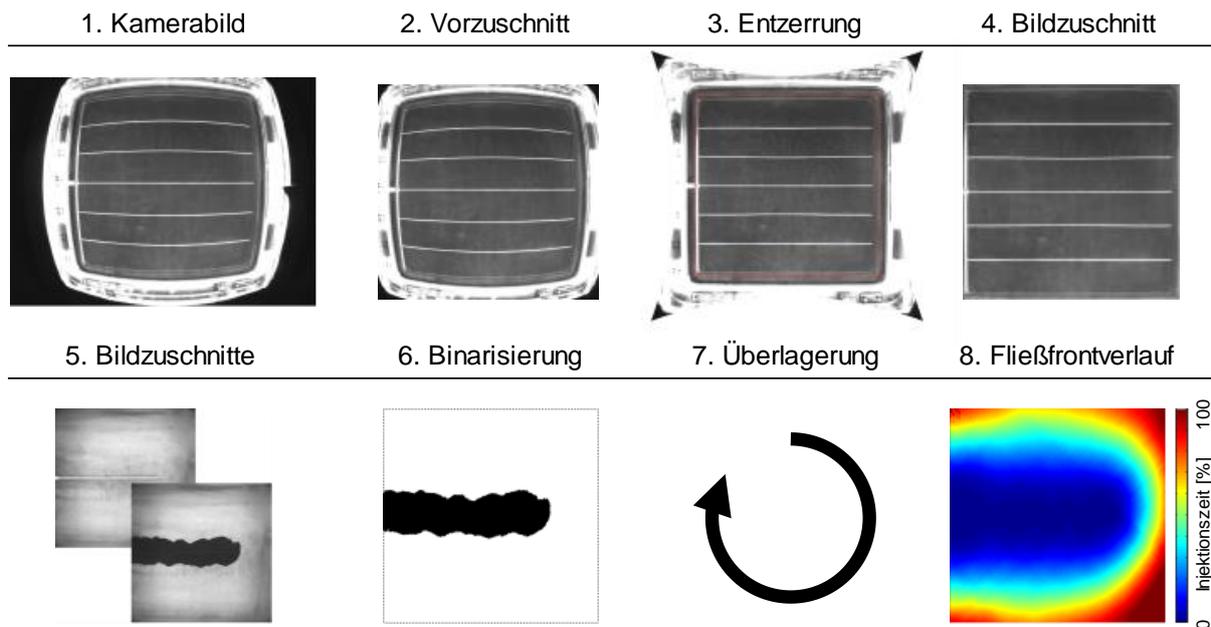


Abbildung 3.6: Methodische Vorgehensweise zur Fließfront - Bildauswertung.

In den vorangegangenen Arbeiten ist auf Grund der unzureichenden Kontrastwirkung die automatisierte Auswertung bisher nur eingeschränkt, teils nicht, möglich [62]. Für die automatisierte Auswertung und eine hohe Ergebnislösung sind die folgenden Aspekte bei der Messdatenaufzeichnung entscheidend. Die matte Werkzeugoberfläche erzeugt einen guten Kontrast zwischen getränkten und trockenen Fasern. Im Rahmen dieser Arbeit sind verschiedene Methoden zur Kontrastverbesserung getestet worden. Als zielführend hat sich eine sandgestrahlte Oberfläche erwiesen. Die Trennschicht zwischen Acrylglas und Verbundglas ist durch ein Fluid aufgefüllt um einen direkten Kontakt herzustellen. Dadurch wird das einfallende Licht diffus gestreut und eine möglichst homogene Beleuchtungsstärke erreicht.

Die Zentrierung und Skalierung des Bilds wird über einen festen Ablauf zwischen Kamerabild und Bildzuschnitt erreicht (s. auch Abbildung 3.6), in dem die Parameter der Funktionen im Programmcode fix vorgegeben sind. Dadurch zeigen alle erfassten Bildzuschnitte den gleichen Kavitätsbereich. Über eine Normierung mit einem definierten Schachbrettmuster kann den einzelnen Bildpunkten eine räumliche Koordinate zugewiesen werden. Über diesen Ablauf kann eine maximale Positionsabweichung zwischen den Experimenten von 0,136 mm erreicht werden. Darüber hinaus kann über die Normierung auch der Fließfrontverlauf zwischen Ober- und Unterseite miteinander verglichen werden. Die maximale Differenz zwischen zwei Punkten auf den beiden Seiten hat in der Normierung, auf Basis des verwendeten

Schachbrettmusters, 3,7 mm betragen. Durch die Subtraktion des zeitlichen Fließfrontverlaufs von Ober- und Unterseite kann die prozentuale Abweichung der Trängung von Ober- und Unterseite bestimmt werden. Das Vorgehen ist in Abbildung 3.7 visualisiert.

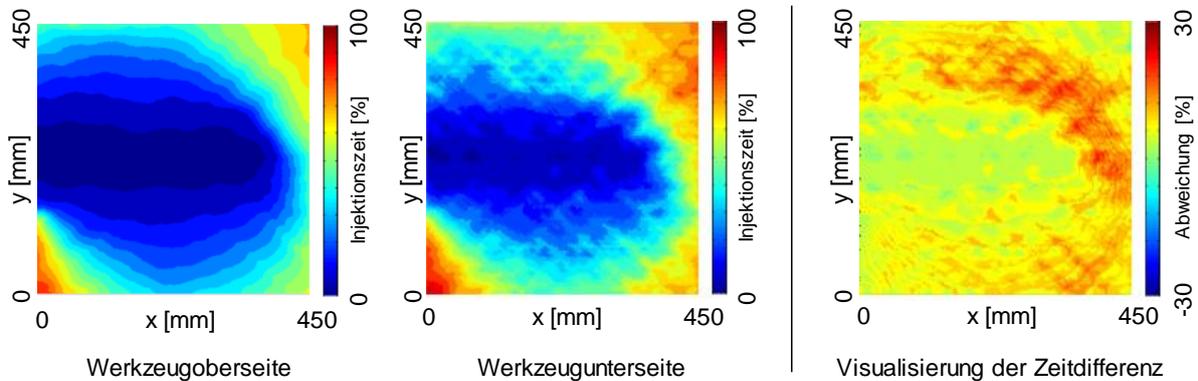


Abbildung 3.7: Abgleich zwischen dem Fließfrontverlauf an der oberen und unteren Werkzeughälfte.

Aus der Normierung resultiert die Möglichkeit, einen direkten Vergleich zwischen Versuchsaufbauten durchzuführen. Zunächst lässt sich aus Versuchswiederholungen ein gemittelter Fließfrontfortschritt bilden. Dazu wird bildpunktspezifisch ein mittlerer Trängungszeitpunkt bestimmt. Die Form gilt als gefüllt, wenn der mit der Kamera erfasste Bildbereich mit Fluid gefüllt ist. Dies ist beispielhaft in Abbildung 3.8 dargestellt. Das Bild auf der linken Seite stellt den gemittelten Fließfrontfortschritt für einen Referenzlagenaufbau dar. Das zweite Bild zeigt den gemittelten Fließfrontfortschritt für einen Lagenaufbau, in dem sich eine Faserverdichtung aus zusätzlichen Lagenausschnitten befindet.

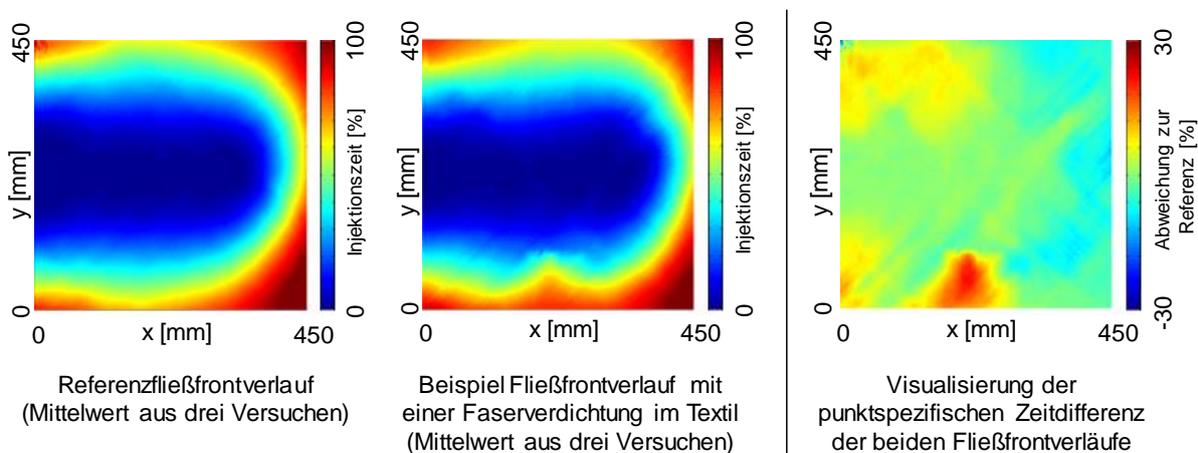


Abbildung 3.8: Visualisierung der punktspezifischen Zeitdifferenz zwischen zwei gemittelten Fließfrontverläufen.

Beide Zeitverteilungen lassen sich voneinander subtrahieren und dadurch die punktspezifischen Unterschiede im Fließfrontfortschritt visualisieren (Abbildung 3.8, rechtes Bild). Über dieses Vorgehen lassen sich Versuche direkt miteinander vergleichen und auf die Unterschiede im Füllverhalten reduzieren.

3.2.4 Aufbau der Füllsimulation

Die Konfigurationen der durchgeführten Experimente werden simuliert. Durch die Füllsimulation können die beobachteten Wirkzusammenhänge validiert und die Fehlerbetrachtung prozessspezifischer Störgrößen auf die Füllsimulation evaluiert werden. Darüber hinaus lassen sich die in den Experimenten nur punktuell erfassten Zusammenhänge zwischen Parametern durch die Simulation inter- und extrapolieren. Im Folgenden wird kurz der Aufbau der Simulation erklärt.

Das mit der Software „Catia V5“ von Dassault Systèmes erstellte Werkzeugmodell wird im ersten Schritt in der Software „Hyper-Mesh v13.0“ von Altair Engineering, Inc. eingelesen. Daraus wird eine Oberfläche generiert, die der des Werkzeugs entspricht. Auf dieser Fläche werden die Fließkanäle modelliert. Die Fließkanäle werden zunächst als Linien auf der Werkzeugoberfläche eingezeichnet. Aus diesen werden dann die Fließkanäle als orthogonal zur Werkzeugoberfläche verlaufende Flächen generiert. Ausgehend von den Flächen des Werkzeugs und der Fließkanäle wird das FEM Netz für die Füllsimulation generiert.

In „RTM View 2015.0“ von der ESI Group werden die prozessspezifischen Randbedingungen festgelegt. Die Verstärkungsstruktur-, Porositäts- und Fließkanaleigenschaften werden durch die zugehörige Permeabilität (K_1 , K_2 und K_3) und Elementdicke abgebildet, die flächenspezifisch zugewiesen werden. Dazu werden verschiedene Vereinfachungen angenommen. Die Permeabilität des multiaxialen Lagenaufbaus wird ausgehend von der gemessenen Permeabilität des Gesamtaufbaus modelliert. Einerseits wird angenommen, dass die Interaktion zwischen Fließkanälen und Verstärkungsstruktur primär von der Größenordnung und Ausrichtung der Permeabilität abhängt und die getroffene Vereinfachung die Wirkzusammenhänge nicht verfälscht. Andererseits werden Simulation und Experiment miteinander abgeglichen, wodurch die Annahmen (s. Diskussion zu Abbildung 3.1) überprüft werden können.

Die Ersatzpermeabilität des Fließkanals wird, ausgehend von der im Kapitel 2.2 diskutierten Modellierung und Bestimmung der Ersatzpermeabilität, von faserfreien Zwischenräumen berechnet. Das Netz entspricht in der Modellierung einem rechteckigen Fließkanal. Im Experiment wird hingegen der parabolische Fließkanalquerschnitt verwendet. Dadurch wird der Fließkanal in der Simulation auf die Ersatzpermeabilität K_{FK} und das Volumen des realen Fließkanals normiert. Mit diesen Größen und der in der Modellierung vorgegebenen Höhe und Länge des Kanals wird dann die Dicke des Fließkanals in der Simulation berechnet, Parameter d in der Abbildung 3.9. In dieser Abbildung sind die zur Modellierung herangezogenen geometrischen Größen dargestellt. Das Ergebnis wird in Bezug auf den zeitlichen und prozentualen Verlauf der Füllung mit den Ergebnissen aus den Experimenten verglichen und hinsichtlich der Dimensionierung der Fließkanäle ausgewertet.

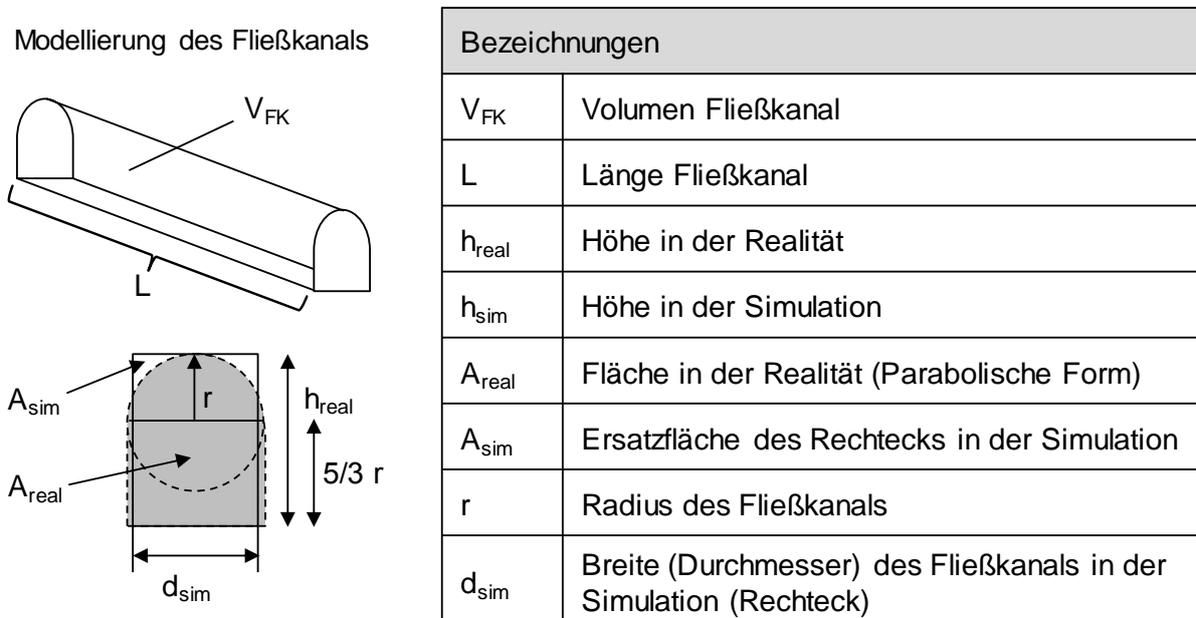


Abbildung 3.9: Modellierung des Fließkanals in der Netzerstellung.

3.3 Untersuchung des Fließkanalquerschnitts

Basierend auf den bereits bestehenden Untersuchungen aus Kapitel 2.2 und den aus dem Stand der Technik abgeleiteten Fragestellungen wird im ersten Schritt die Interaktion zwischen einem einzelnen Fließkanal und der vorgegebenen Verstärkungsstruktur in Bezug auf den Füllverlauf untersucht. Ziel der Untersuchung ist die hinsichtlich dem Füllverhalten optimale Dimensionierung des Fließkanals, sowie dessen relative Orientierung zur Verstärkungsstruktur. Für die Versuche wird ein

parabolischer Querschnitt verwendet. Für die Verstärkungsstruktur wird der in Kapitel 3.2.1 beschriebene Lagenaufbau verwendet.

Der erste Versuch untersucht drei verschiedene Fließkanalquerschnitte. Der Lagenaufbau wird einmal parallel und einmal um 90° gedreht zum Fließkanal untersucht. Die drei Fließkanalquerschnitte und eine schematische Darstellung des Werkzeugeinsatzes zeigt Abbildung 3.10.

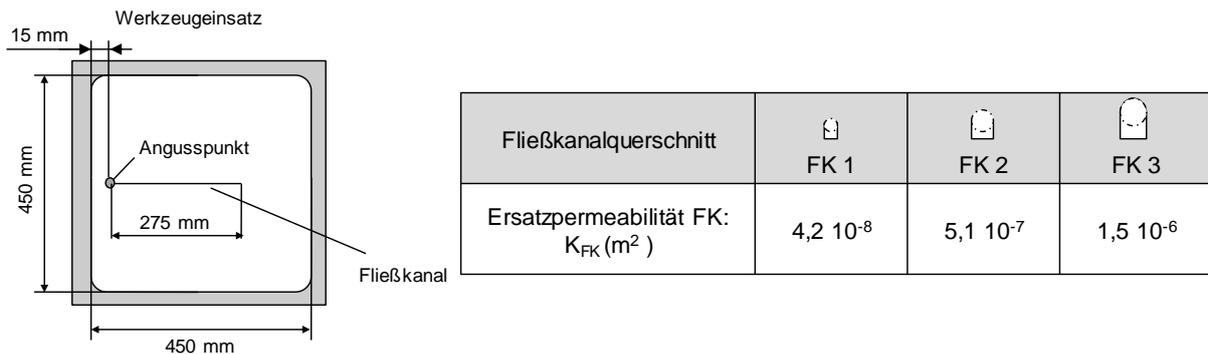


Abbildung 3.10: Übersicht zu den drei verwendeten Fließkanalquerschnittsgrößen.

Die Versuchsergebnisse sind in Tabelle 3.2 dargestellt. Für den sehr kleinen Fließkanalquerschnitt (FK1) stimmt die experimentell bestimmte Injektionszeit mit der Injektionszeit aus der Simulation sehr gut über ein. Für Fließkanal 2 und 3 (FK2, FK3) gibt es wesentliche Abweichungen. Im Experiment füllt sich die Form, unabhängig vom Lagenaufbau, wesentlich schneller als in der Simulation. Aus den Experimenten und der Simulation mit FK1 geht hervor, dass es wesentliche Unterschiede zwischen der Injektionszeit in Bezug auf die Ausrichtung des Lagenaufbaus gibt. Für FK2 und FK3 sind die Ergebnisse nicht eindeutig. Während ein großer Unterschied zwischen FK1

und FK 2 besteht, ist der Unterschied zwischen FK2 und FK3 wesentlich geringer. Dies geht einher mit den Untersuchungen in [59, 60].

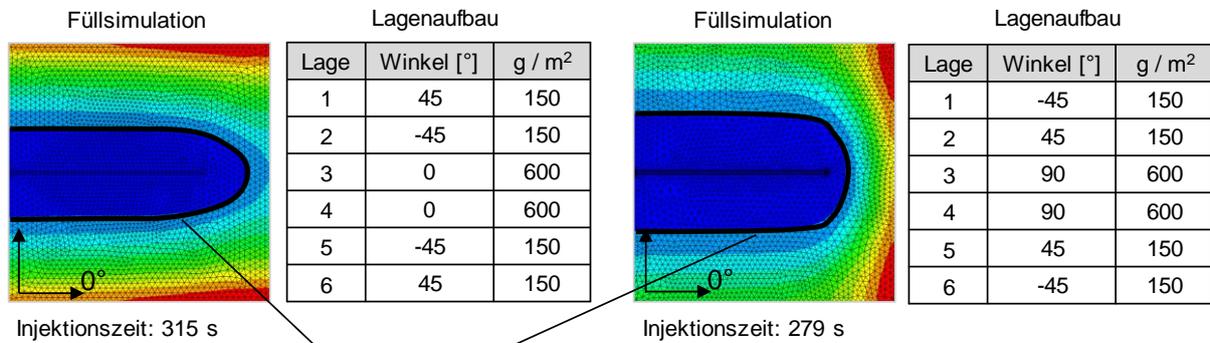
Tabelle 3.2: Ergebnisübersicht zu den drei getesteten Fließfrontquerschnitten und den beiden Ausrichtungen des Lagenaufbaus.

Fließkanalquerschnitt	 FK 1		 FK 2		 FK 3	
Permeabilität des FK $K_{FK} (m^2)$	4,2 10 ⁻⁸		5,1 10 ⁻⁷		1,5 10 ⁻⁶	
Orientierung des gesamten Lagenaufbaus relativ zum Fließkanal	0°	90°	0°	90°	0°	90°
Injektionszeit Experiment $t_{inj.} (s)$	271	315	71	66	52	47
Standardabweichung Injektionszeit $\sigma_{inj.} (s)$	14,61	8,97	3,88	11,99	8,01	1,67
Injektionszeit Simulation $t_{sim.} (s)$	279	315	153	205	152	205

3.4 Einfluss der Ausrichtung des Fließkanals relativ zum Lagenaufbau

Die Abhängigkeit der Injektionszeit von der Ausrichtung des Lagenaufbaus relativ zum Fließkanal lässt sich mit Hilfe des Fließkanaleinflussbereichs (siehe Abbildung 3.3) erklären. Der Fließkanal wirkt zum einen orthogonal zu seiner Verlaufsrichtung (s. auch Fläche A1 in Abbildung 3.3). Sofern die noch zu füllende Fläche in dieser Richtung größer ist als in paralleler Richtung zum Fließkanal, ist eine Ausrichtung der K1-Permeabilität der Verstärkungsstruktur orthogonal zum Fließkanal günstig. Zum anderen wirkt der Fließkanal in Richtung des Fließkanalendes (s. auch Fläche A2 in Abbildung 3.3). Er verkürzt den maximalen Weg, den das Fluid noch durch die Verstärkungsstruktur fließen muss. Dies ist beispielhaft in Abbildung 3.11 dargestellt. Die Abbildung soll den unterschiedlichen Fließfrontverlauf durch die variierende Orientierung des Lagenaufbaus relativ zum Fließkanal visualisieren. Auf der linken Seite sind die beiden 600 g/m² Lagen parallel zum Fließkanal ausgerichtet, die Fließfront orientiert sich entsprechend und fließt vorzugsweise in Richtung des Fließkanals. Im rechten Bild sind die beiden Lagen orthogonal zum Fließkanal orientiert. Dadurch fließt die Fließfront vorzugsweise auch in diese Richtung und dieser

Wirkungsbereich des Fließkanals ist ausgeprägter. Gleichzeitig wird dadurch auch verändert wo und wie die Fließfront am Ende zusammen läuft, was aus der Form der entsprechenden Bereiche in der Füllsimulation hervorgeht.



Unterschiedlich ausgeprägte Fließfront für die Wirkungsbereiche A1 und A2 des Fließkanals.

Abbildung 3.11: Auswirkung der Ausrichtung des Fließkanals und des Permeabilitätstensors der Verstärkungsstruktur hinsichtlich dem entstehenden FK-Wirkungsbereich.

3.5 Variation der Fließkanalquerschnittsgröße über die Fließkanallänge

In Spritzgusswerkzeugen wird der Fließkanalquerschnitt vom Angusspunkt aus angepasst um ein simultanes Füllen der einzelnen Formnester zu realisieren. Durch den größer werdenden Querschnitt wird ein Druckabfall in Folge der Scherung im Fließkanal kompensiert. In diesem Abschnitt wird eine Querschnittsänderung des Fließkanals über die Länge hinsichtlich der Auswirkung auf den Fließfrontverlauf und die Injektionszeit untersucht.

Um einen langen Fließkanal im verwendeten Prüfstand zu realisieren, verläuft der Fließkanal umlaufend am Rand der Kavität entlang. Abbildung 3.12 zeigt schematisch den Verlauf des Fließkanals sowie die einzelnen Fließkanalquerschnitte. Eine sich ändernde Querschnittsflächengröße bei gleichbleibenden Proportionen des Querschnitts ist aus fertigungstechnischen Gründen nicht möglich. Deswegen wird der sich verändernde Fließkanalquerschnitt über eine sich linear verändernde Eintauchtiefe des Fräsers realisiert.

In der Abbildung 3.12 ist dies exemplarisch für den Verlauf des kleiner werdenden Fließkanalquerschnitts dargestellt. Am Angusspunkt A startet der Fließkanalquerschnitt mit einer Ersatzpermeabilität von $6,70 \text{ E-}07 \text{ m}^2$. Die Eintauchtiefe

verringert sich dann linear bis zum Eckpunkt. Zielgröße ist hierbei die Höhe des nächsten Fließkanalquerschnitts für den Abschnitt 1 bis 2. Am Punkt 1 verjüngt sich der Querschnitt bei konstanter Höhe dementsprechend auf den Querschnitt des nächsten Fließkanals. Die Veränderung des Fließkanalquerschnitts erfolgt bis zum Endpunkt 4 analog.

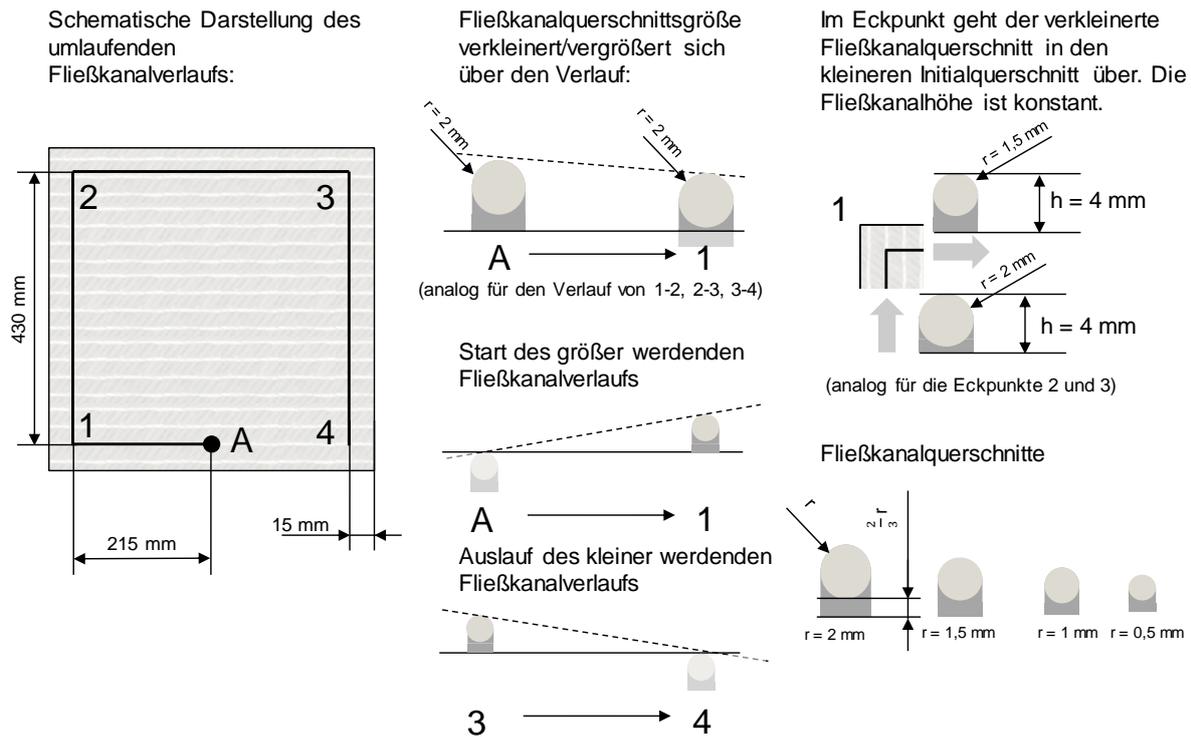


Abbildung 3.12: Schematische Darstellung der Fließkanalquerschnittsgrößenvariation über die Fließkanallänge.

Beim größer werdenden Querschnitt beginnt der Fließkanal am Angusspunkt eben. Vom Angusspunkt aus taucht der Querschnitt, analog dem kleiner werdenden Fließkanalquerschnitt, soweit ein bis die Höhe des nächsten Fließkanals erreicht wird. Neben einem größer und kleiner werdenden Fließkanalquerschnitt ist der dritte Fall ein konstanter Fließkanalquerschnitt. Die drei Konfigurationen sind ergänzend auch in einer Füllsimulation dargestellt. In der Füllsimulation wird die Fließkanalquerschnittsgröße vereinfacht und nur abschnittsweise verändert. Dadurch ist ein direkter Vergleich zwischen Versuch und Simulation nur qualitativ möglich.

Die Ergebnisse sind in Abbildung 3.13 dargestellt. Für den gleichbleibenden Querschnitt stimmen Simulation und Experiment unter Berücksichtigung der

unterschiedlichen Modellierung gut überein. Sowohl die Füllzeit als auch der Fließfrontverlauf werden gut vorhergesagt. Der Versuch mit einem größer werdenden Querschnitt zeigt die mögliche Drosselwirkung bei Fließkanälen auf. Zwar ist eine vollständige Formfüllung in der Simulation möglich. Das Experiment hingegen wird auf Grund der eingeschlossenen Luft bei 1959 s abgebrochen. Eine vollständige Füllung ist nicht möglich. Die Simulation zeigt qualitativ ebenfalls die beobachtete Drosselwirkung.

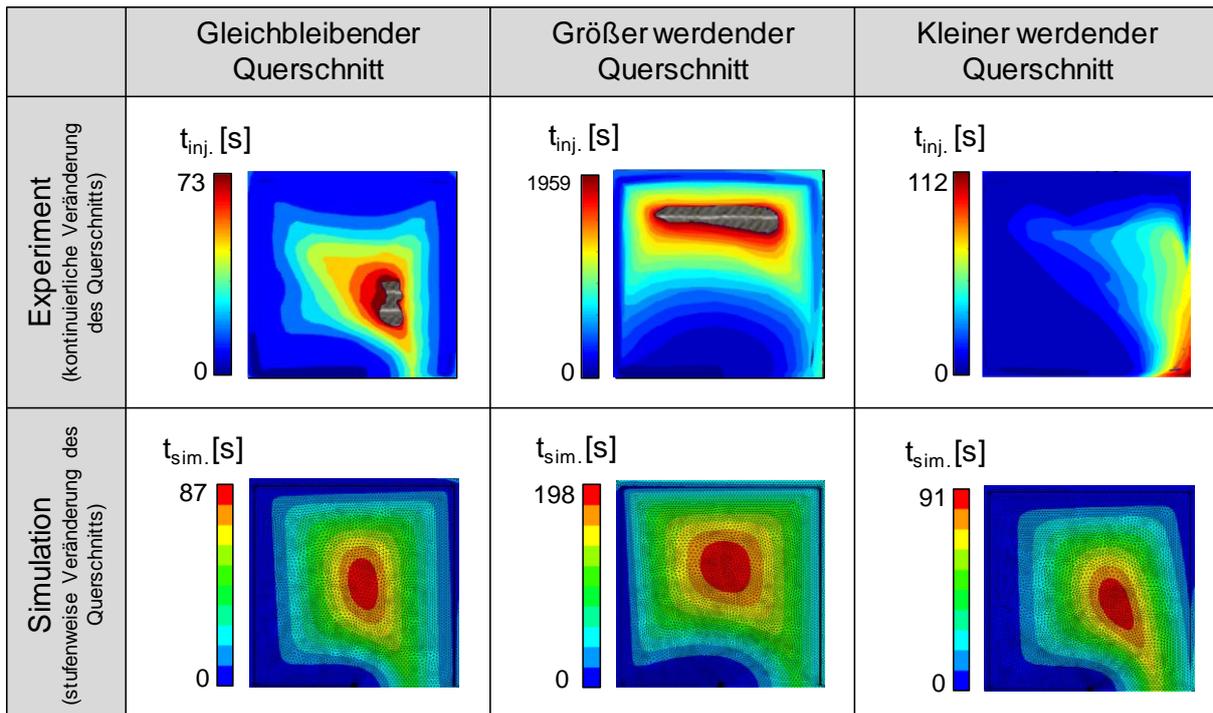


Abbildung 3.13: Qualitativer Vergleich des Fließfrontverlaufs bei gleichbleibendem, sich vergrößernden und verjüngendem Fließkanalquerschnitt im Versuch und der Füllsimulation. Versuch: Größenänderung kontinuierlich, Simulation: Größenänderung abschnittsweise.

Im dritten Fall des kleiner werdenden Querschnitts kann die Formfüllung im Experiment positiv beeinflusst werden. Es ist nicht nur eine vollständige Formfüllung möglich, sondern auch eine Verschiebung des Fließfrontendes zum Rand der Kavität. Die Unterschiede zur Füllsimulation entstehen durch die unterschiedliche Modellierung, Simulation und Versuch zeigen aber qualitativ den gleichen Effekt.

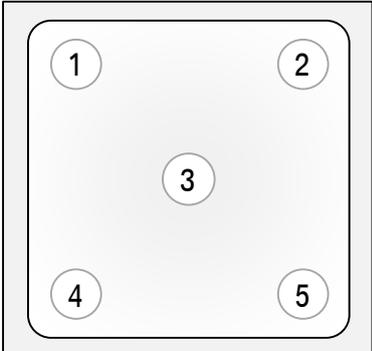
Neben der Möglichkeit das Füllverhalten gezielt über eine kontinuierliche Reduktion des Querschnitts positiv zu beeinflussen, visualisiert der Versuch auch die Notwendigkeit eines geschlossenen Verlaufs zwischen Verteilerkanälen und Angusspunkt. Insbesondere bei realen Anwendungen ist ein ununterbrochenes

Verteilersystem nicht immer möglich. Begrenzungen hinsichtlich des zur Verfügung stehenden Bauraums oder lokalen Verbindungsflächen limitieren den Anwendungsbereich von Fließkanälen. Eine Unterbrechung des Fließkanals wirkt wie eine Drossel, da das Fluid zunächst durch die niedrigpermeable Verstärkungsstruktur zum Fließkanal fließen muss.

3.6 Validierung der experimentellen Ergebnisse

Die kontinuierliche Visualisierung des Fließfrontverlaufs bietet wesentliche Vorteile hinsichtlich der Charakterisierung des Füllverhaltens. In Kombination mit der räumlichen Zentrierung der Bildpunkte ermöglicht der Prüfstand das direkte, statistisch auswertbare Vergleichen von Verstärkungsstrukturen und Werkzeugeinsätzen. Allerdings muss bei der Verwendung von Acrylgleaseinsätzen sowohl die Fertigungstoleranz als auch die druckabhängige Wölbung des Acrylglasses berücksichtigt werden. Im Folgenden wird anhand der Versuchsreihe zum Einfluss der Fließkanalquerschnittsgröße der Fehlereinfluss der beiden Störgrößen evaluiert.

Zunächst ergeben sich bereits bei der Herstellung der Werkzeugeinsätze Formtoleranzen. In Abbildung 3.14 sind die Messwerte für die Kavitätshöhenverteilung dargestellt.



Messpunkt	1	2	3	4	5
 FK 3	1,94 mm	1,91 mm	2,23 mm	1,88 mm	1,94 mm
 FK 2	1,84 mm	1,95 mm	2,33 mm	1,82 mm	1,82 mm
 FK 1	1,91 mm	1,92 mm	2,16 mm	1,90 mm	1,92 mm

Abbildung 3.14: Gemessene Kavitätshöhe an fünf verschiedenen Punkten der drei Acrylgleaseinsätze für die Untersuchung des Einflusses der Fließkanalquerschnittsgröße.

Diese werden mit Knetabdrücken in der Mitte und den vier Eckpunkten gemessen. Es zeigt sich eine leichte Wölbung (0,25 bis 0,51 mm) des Acrylglasses zur Mitte des Einsatzes hin. Die Varianz der Einzelpositionen hingegen variiert nur gering. Daraus lässt sich ableiten, dass ein Fehlereinfluss auf das Experiment hinsichtlich der resultierenden Formfüllung zu erwarten ist. In Bezug auf die Mess- und

Simulationsergebnisse zeigt sich, dass bei dem kleinen Fließkanal nur ein geringer Unterschied zwischen Simulation und Experiment besteht. Im Kontrast hierzu ergeben sich sehr große Unterschiede zwischen Simulation und Experiment bei den beiden größeren Fließkanalquerschnitten.

Neben der herstellungsbedingten Varianz der Kavitätshöhe wölbt sich das Acrylglas in Folge des Forminnendrucks während der Injektion. Zur Bestimmung dieser Durchbiegung wird mit einem Höhentastgerät die relative Werkzeugbewegung während einem statischen Druck in der Verstärkungsstruktur gemessen. Die Messwerte sind in Abbildung 3.15 dargestellt. Die Druckmessung startet im evakuierten Zustand, 0 bar entsprechen somit einem Vakuum in der Form. Anschließend wird die Form mit Druckluft gefüllt und der Druck schrittweise erhöht. Es zeigt sich, dass sich das Werkzeug bereits bei 3 bar relativem Druck verformt. Bei diesem Druck werden 0,18 mm an der oberen Werkzeughälfte und 0,22 mm an der unteren Werkzeughälfte gemessen. Eine Verformung in dieser Größenordnung kann das Füllverhalten beeinflussen und erklärt die schnellere Injektion im Experiment im Vergleich zur Injektion in den Ergebnissen aus Tabelle 3.2.

Gemessene Wölbung der Kavität FK 3 durch den anliegenden Injektionsdruck für die Positionen 1 und 2:



Abbildung 3.15: Durchbiegung des Acrylglases in Folge von Durchströmung mit Druckluft.

Allerdings stimmen die experimentellen und simulierten Werte für den kleinen Fließkanalquerschnitt sehr gut überein. Die nicht mehr parallel zum Fließkanal verlaufende Fließfront deutet für den kleinen Fließkanalquerschnitt auf einen Druckverlust über die Fließkanallänge hin. Abbildung 3.16 zeigt exemplarisch den Vergleich der Forminnendruckverteilung bei kleinem und großem Fließkanalquerschnitt. Der Forminnendruck fällt über die Fließkanallänge ab, sodass während der Injektion der Forminnendruck deutlich geringer ist als beim großen

Fließkanalquerschnitt. Dadurch ist die Wölbung beim kleinen Fließkanalquerschnitt wesentlich geringer und dadurch auch der Fehler zur Simulation entsprechend kleiner.

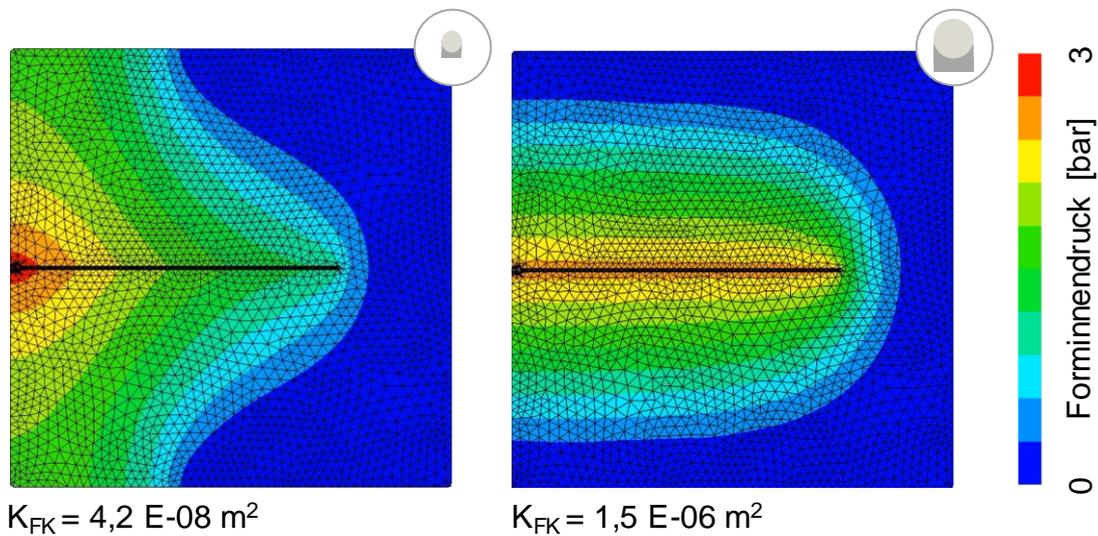
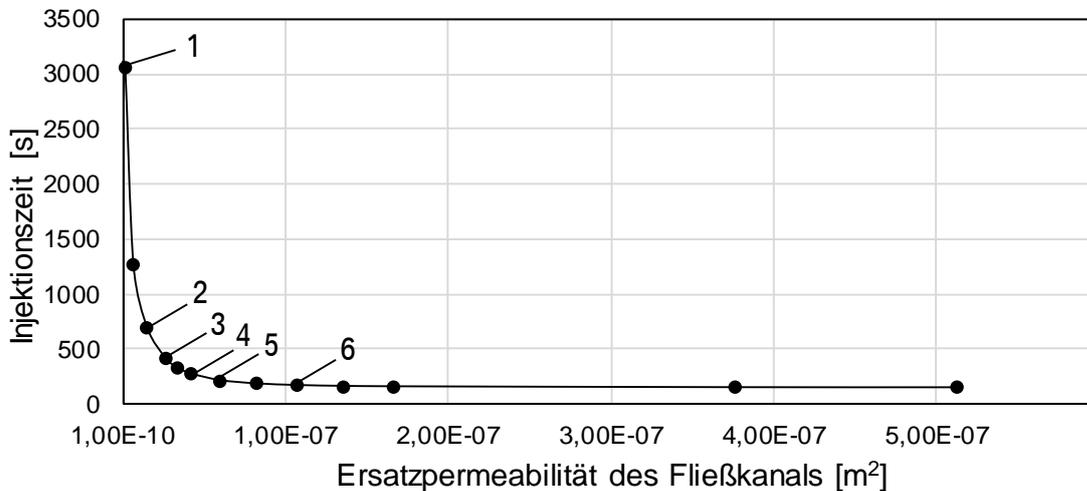


Abbildung 3.16: Vergleich der simulativen Forminnendruckverteilung zwischen kleinem und großem Fließkanalquerschnitt während der Injektion (siehe auch Abbildung 3.10).

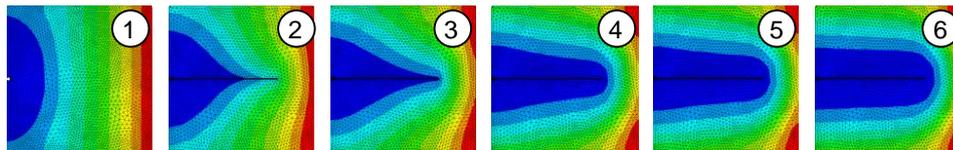
3.7 Simulative Extrapolation der Fließkanalquerschnittsgröße

Der, ausgehend von [59,60] und den experimentellen Ergebnissen, erwartete asymptotische Verlauf zwischen der Ersatzpermeabilität des Fließkanals, der Permeabilität der Verstärkungsstruktur und der daraus resultierenden Injektionszeit soll durch weitere Füllsimulationen komplementiert werden. Hierzu wird der Radius des Fließkanals kontinuierlich von 0,2 mm ($K_{FK} = 6,7 \text{ E-}09 \text{ m}^2$) bis 1 mm ($K_{FK} = 1,67 \text{ E-}07 \text{ m}^2$) in 0,1 mm Schritten variiert. Zusätzlich werden noch zwei weitere Stützstellen für einen Fließkanalradius von 1,5 mm ($K_{FK} = 3,77 \text{ E-}07 \text{ m}^2$) und 1,75 mm ($K_{FK} = 5,13 \text{ E-}07 \text{ m}^2$) simuliert. Der sich daraus ergebende Verlauf der Injektionszeit in Abhängigkeit von K_{FK} ist in Abbildung 3.17 dargestellt. Unter dem Verlauf der Injektionszeit ist für ausgewählte K_{FK} der sich verändernde Fließfrontverlauf visualisiert. Zunächst wird mit dem konvergierenden Verlauf der Injektionszeit der vermutete Verlauf der Ersatzpermeabilität des Fließkanals bestätigt. Es gibt eine maximale Größe des Fließkanalquerschnitts, ab der sich bei einer weiteren Vergrößerung die Injektionszeit nicht mehr weiter reduziert. Darüber hinaus reichen bereits sehr kleine Querschnittsgrößen aus, um die Injektionszeit wesentlich zu reduzieren. Dies ergänzt die Beobachtungen in [59, 60] und erweitert wesentlich die gewonnenen Erkenntnisse aus [63]. Es konnte kein Einfluss der

Fließkanalquerschnittsgröße festgestellt werden, da die betrachteten Querschnitte zu groß dimensioniert gewesen sind.



Simulativer Fließfrontverlauf



K_{FK} [m²]: -/- 1,51 E-08 2,68 E-08 6,03 E-08 8,20 E-08 1,36 E-07

Abbildung 3.17: Simulative Exploration des Zusammenhangs zwischen der Ersatzpermeabilität des Fließkanals und der Injektionszeit.

Neben dem asymptotischen Verlauf der Injektionszeit in Abhängigkeit zur Fließkanalquerschnittsgröße ergeben sich weitere Potentiale aus dem veränderten Fließfrontverlauf. Mit abnehmender Ersatzpermeabilität des Fließkanals breitet sich die Fließfront zunehmend nicht mehr parallel zu den Seiten des Fließkanals aus. Durch einen Druckverlust über die Fließkanallänge entsteht eine angewinkelte Fließfront. Der Druckverlust führt zwar zu einer höheren Injektionszeit, kann aber vor allem zu einer Vermeidung von parallel aufeinander treffenden Fließfronten genutzt werden. Exemplarisch ist der Wirkzusammenhang qualitativ in der Abbildung 3.18 gezeigt, in dem zwei repräsentative Fließfrontverläufe nebeneinander gelegt sind. Bei großen Fließkanalquerschnitten können bei parallel zueinander laufenden Fließkanälen lokale Lufteinschlüsse entstehen, da die lokale Variabilität der Verstärkungsstruktureigenschaften berücksichtigt werden sollte. Dies stellt eine Herausforderung, der mit

Hilfe einer Topologie-Optimierung bestimmten Verteilersysteme aus den Quellen [61, 66, 67], dar.

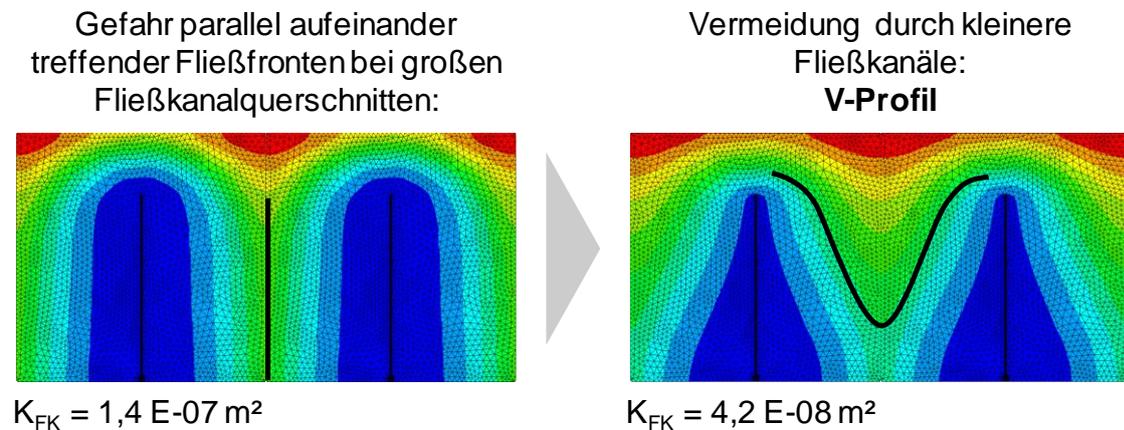


Abbildung 3.18: Schematische Darstellung der Entstehung eines V-Profiles durch geeignete Dimensionierung des Fließkanalquerschnitts zur Vermeidung parallel aufeinander treffender Fließfronten bei parallel angeordneten Fließkanälen.

Bei den in diesen Quellen berechneten Verteilersystemen treten wiederholt parallel zueinander laufende Fließkanäle auf. Ausgehend von den Untersuchungen zum Einfluss der Fließkanalquerschnittsgröße zeigt die linke Seite schematisch den Fließfrontverlauf für den Fließkanal mit einer Ersatzpermeabilität von $1,4 \text{ E-}07 \text{ m}^2$. Um die Auswirkung für nebeneinander angeordnete Fließkanäle hervorzuheben, ist schematisch der Fließfrontverlauf daneben eingezeichnet. Die Fließfront würde entlang der schwarzen Linie parallel aufeinander treffen. Bereits kleine Unterschiede im Faservolumengehalt, hervorgerufen beispielsweise durch Variation im Herstellungsprozess (beschrieben unter anderem in [13]), können in der Realität in diesem Fall zu Luft einschließen zwischen den Fließkanälen führen. Bei gleichem Vorgehen für den kleineren Fließkanalquerschnitt ($K_{FK} = 4,2 \text{ E-}08 \text{ m}^2$) zeigt sich zwischen den Fließkanälen ein sogenanntes „V-Profil“. Die Fließfront würde in diesem Fall nicht parallel aufeinander treffen.

Neben der Extrapolation in Bezug auf den Fließkanalradius lässt sich ein ähnlicher Effekt über die Fließkanallänge erzeugen. Der Fließkanal hat eine erheblich höhere Ersatzpermeabilität als das verwendete Gelege. Das Fluid eilt deswegen auch zuerst im Fließkanal vor. Allerdings muss durch den Anfang des Fließkanals der vollständige Volumenstrom zur Versorgung des gesamten Wirkungsbereichs des Fließkanals strömen. Solange der Fließkanalquerschnitt groß genug gewählt ist, verläuft die Fließfront annähernd parallel zum Fließkanal. Bei einem kleineren Fließkanal entsteht

ein größerer Druckverlust der den Verlauf der Fließfront verändert. Dieser Effekt entsteht auch über einen längeren Fließkanal. Der orthogonal zum Kanal verlaufende Wirkungsbereich skaliert mit der Länge des Fließkanals. Somit wird mit steigender Länge ein größerer Druckverlust zwischen Fließkanalanfang und -ende erzeugt. Dementsprechend zieht sich das V-Profil in die Länge.

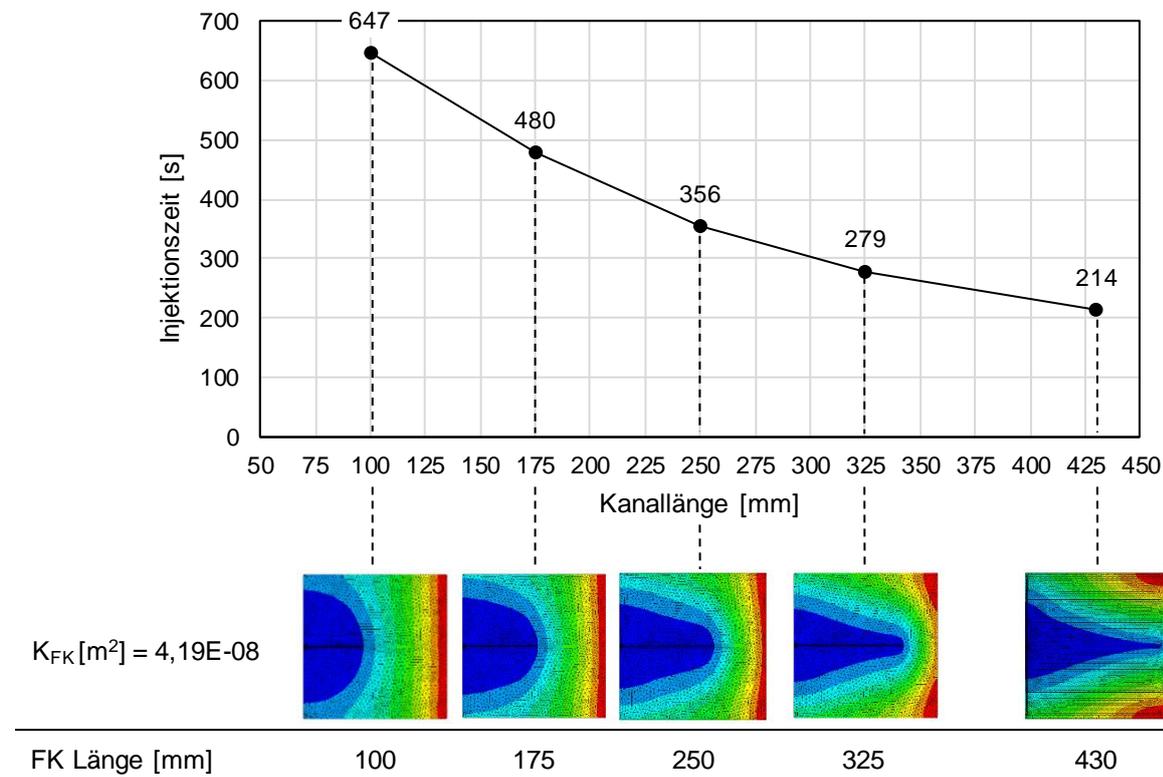


Abbildung 3.19: Simulative Extrapolation der Fließkanallänge hinsichtlich der sich ergebenden Injektionszeit und des sich ergebenden Fließfrontverlaufs.

In Abbildung 3.19 ist zum einen der Verlauf der Injektionszeit und zum anderen auch der sich verändernde Fließfrontverlauf dargestellt. Im nächsten Schritt wird über eine erweiterte Extrapolation die Abhängigkeit von der Permeabilität der Verstärkungsstruktur gezeigt.

Die vorangegangene Beschreibung zur Verteilung des Volumenstroms betrifft auch die Permeabilität der Verstärkungsstruktur. Von ihr hängt der vom Fließkanal abzweigende Volumenstrom ab. Bei einer höheren Permeabilität der Verstärkungsstruktur kann mehr Fluid schneller vom Fließkanal aus in die Verstärkungsstruktur strömen. Dieser Zusammenhang wird auf Basis von einzelnen Füllsimulationen in Abbildung 3.20 gezeigt. In der Abbildung ist der Verlauf der Injektionszeit in Abhängigkeit der Ersatzpermeabilität des Fließkanals für sechs

verschiedene isotrope Permeabilitätswerte gezeigt. Auf der Ordinate ist die Reduktion der Injektionszeit in Prozent im Vergleich zur Referenz ohne Fließkanal dargestellt. Auf der Abszisse ist die Ersatzpermeabilität des Fließkanals dargestellt.

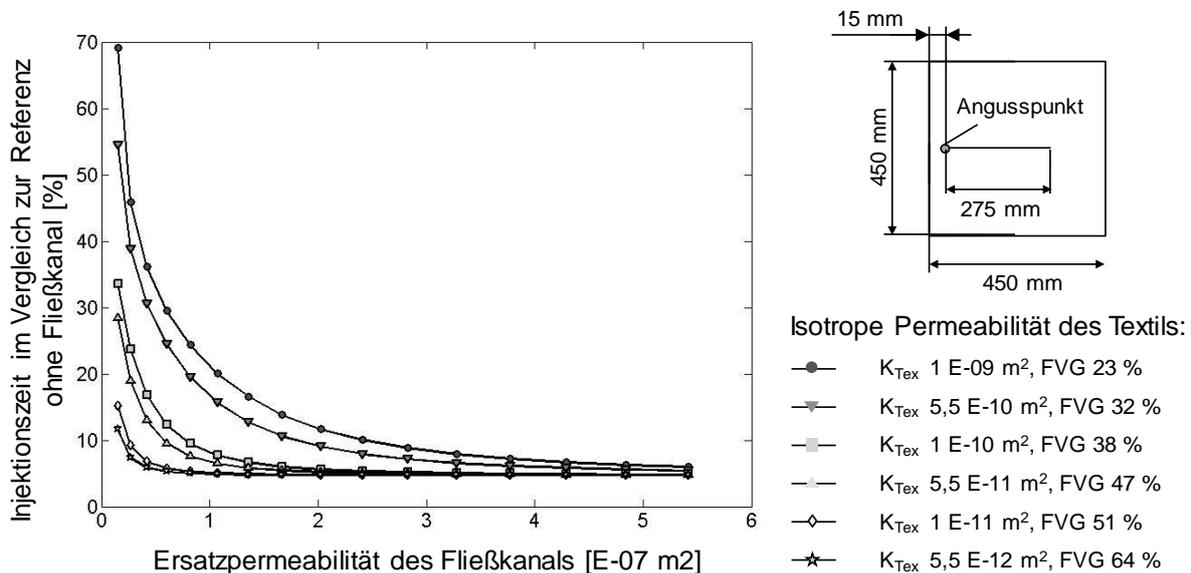


Abbildung 3.20: Simulative Extrapolation der Injektionszeit in Abhängigkeit von der Permeabilität der verwendeten Verstärkungsstruktur.

Aus den Ergebnissen lässt sich ableiten, dass für Verstärkungsstrukturen mit einer niedrigen Permeabilität bereits sehr kleine Fließkanalquerschnitte zu einer wesentlichen Reduktion der Injektionszeit führen. Gleichzeitig muss bei einer sehr hohen Permeabilität der Verstärkungsstruktur der Fließkanal für dieselbe prozentuale Reduktion wesentlich größer dimensioniert werden.

Basierend auf der in Abbildung 3.20 dargestellten Extrapolation lässt sich über eine geeignete Regression der Zusammenhang zwischen Ersatzpermeabilität des Fließkanals und Permeabilität der Verstärkungsstruktur formell beschreiben. Das Vorgehen zur Bestimmung der Gleichung ist in Abbildung 3.21 gezeigt. Es wird eine Kavität (450 mm x 450 mm) betrachtet mit einem Fließkanal, der vom Rand mittig über eine Länge von 275 mm verläuft. Für die eingelegte Verstärkungsstruktur werden sechs verschiedene, jeweils isotrope, Permeabilitätswerte angenommen. Daraus lässt sich durch eine schrittweise Veränderung des Fließkanalradius / der Fließkanalersatzpermeabilität die Reduktion der Injektionszeit bestimmen. Die Reduktion der Injektionszeit wird auf die Variante ohne einen Fließkanal referenziert.

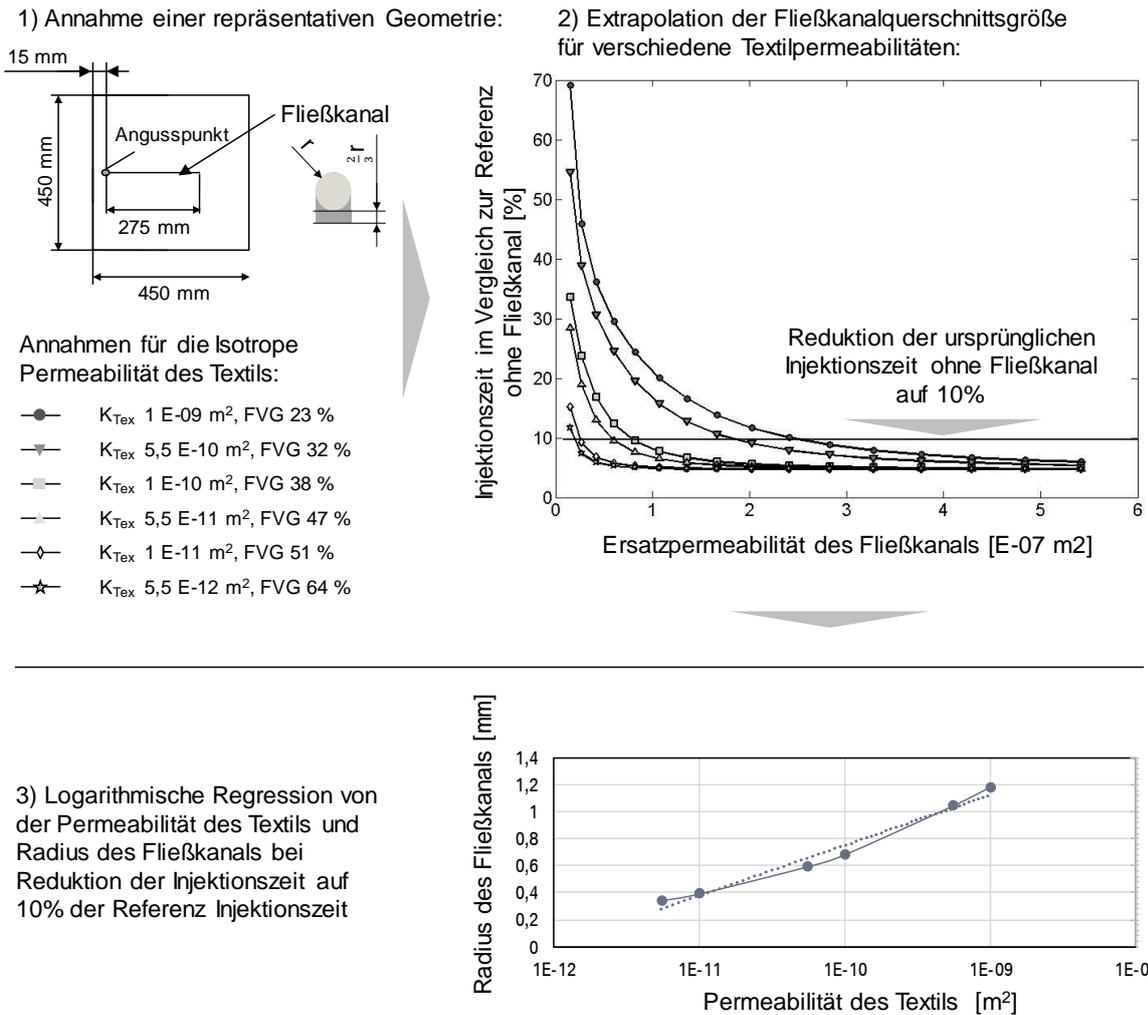


Abbildung 3.21: Ermittlung des Fließkanalradius in Abhängigkeit von der Permeabilität mit Hilfe von logarithmischer Regression auf Basis der Injektionszeitreduktion um 90%.

Für die optimale Ersatzpermeabilität des Fließkanals wird eine prozentuale Reduktion der Injektionszeit um 90% angenommen. Dieser Wert kann in Abhängigkeit vom gewünschten Fließfrontverlauf auch anders gewählt werden (s. auch Abbildung 3.17). Die Ersatzpermeabilitäten der Fließkanäle bei einer Reduktion der Injektionszeit um 90% werden mit Hilfe von geeigneten, auf Interpolation basierenden, Näherungslinien bestimmt. Basierend auf dem größten Bestimmtheitsmaß R wird jeweils ein Polynom 6. Grades für die Näherungslinien verwendet. Hieraus ergibt sich die Kombination aus Permeabilität der Verstärkungsstruktur und zugehöriger Ersatzpermeabilität des Fließkanals, bzw. Radius des Fließkanals.

Im dritten Schritt kann aus den sechs Datenpaaren eine Regressionsgleichung bestimmt werden (Formel 3-1). Für den betrachteten Anwendungsfall wird eine logarithmische Regression verwendet.

$$r_{\text{Fließkanal}} = (0,162 \ln(K_{\text{Tex}}) + 4,475) \text{mm} \quad (3-1)$$

Zwar ist das Bestimmtheitsmaß R^2 mit 97,26% sehr gut, allerdings ergeben sich Grenzen und Rahmenbedingungen für die Anwendung der Gleichung. Der sich aus der Gleichung ergebende Fließkanalradius ist in Abbildung 3.22 für einen Wertebereich der Permeabilität von $1\text{E-}13 \text{ m}^2$ bis $1\text{E-}08 \text{ m}^2$ dargestellt.

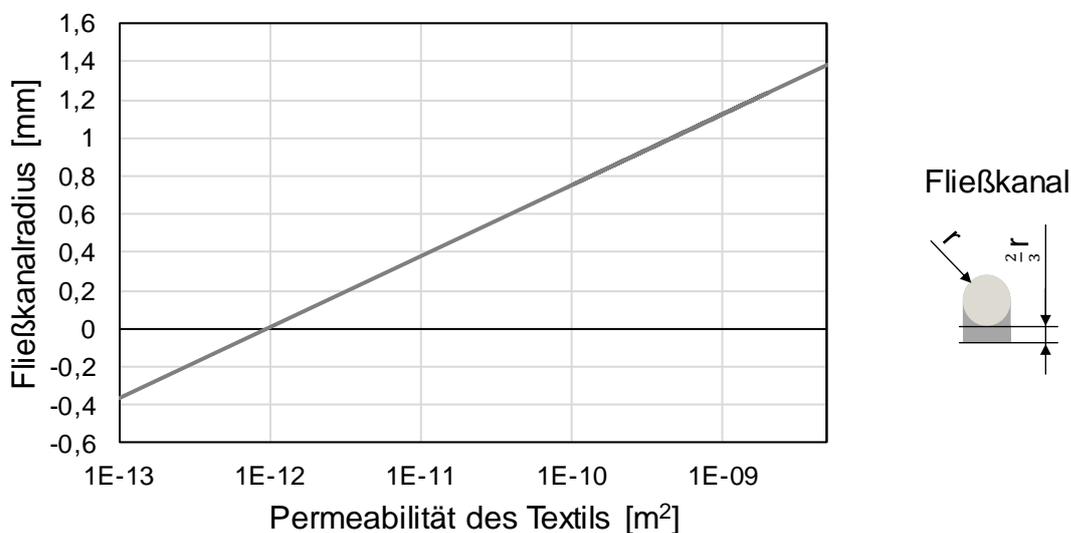


Abbildung 3.22: Visualisierung der Gleichung zwischen Fließkanalradius und Permeabilität der Verstärkungsstruktur für eine Reduktion der Injektionszeit um 90% für die getroffenen Annahmen hinsichtlich Kavität, Permeabilität und Fließkanalposition.

In der Abbildung wird der begrenzte Gültigkeitsbereich ersichtlich, da der Regression keine physikalischen Wirkzusammenhänge zu Grunde liegen. Bei einer Permeabilität von $10 \text{ E-}12 \text{ m}^2$ wechselt der Fließkanalradius zu einem negativen Wert. Dementsprechend kann die Gleichung für Verstärkungsstrukturen mit einer Größenordnung der Permeabilität kleiner als $\text{E-}12 \text{ m}^2$ nicht verwendet werden. In diesem Bereich finden sich vor allem Verstärkungsstrukturen, die eine sehr dichte Faserstruktur und zumeist auch keine Vernähung aufweisen. Die durch die Vernähung erzeugten Freiräume zwischen den Fasern stellen ebenfalls Fließkanäle dar. Darüber hinaus sollte beachtet werden, dass nicht jede mathematische Lösung im Werkzeug

darstellbar ist. Durch Anforderungen hinsichtlich der fertigungstechnischen Machbarkeit ergeben sich Grenzen bezüglich der realisierbaren Granularität des Fließkanalquerschnitts.

Die Geometrie des Bauteils beeinflusst die Fließkanalquerschnittsgröße über den Volumenstrom, der durch den Fließkanal zur Füllung der jeweiligen Bauteilabschnitte fließen soll. Die Fließkanalquerschnittsgröße begrenzt den Volumenstrom bei konstantem Injektionsdruck. Je höher der Volumenstrom durch den Fließkanal sein soll, desto größer muss der Fließkanalquerschnitt dimensioniert werden (s. auch Abbildung 3.17). Sofern der Fließkanal kleiner ist als der optimale Fließkanalquerschnitt, führt dies zu einem Druckabfall, der den Fließfrontverlauf beeinflusst. Die Fließfront breitet sich in diesem Fall wieder angewinkelt zum Fließkanal aus. Alternativ führt ein wesentlich größerer Fließkanalquerschnitt zu keiner Veränderung der Fließfront oder des Forminnendrucks im Fließkanalbereich. Darüber hinaus sollte für die optimale Positionierung des Fließkanals die Ausrichtung der Hauptrichtungen der ebenen Permeabilität in Bezug zum Wirkungsbereich des Fließkanals berücksichtigt werden (s. auch Abbildung 3.3). Neben der prozessbezogenen Optimierung sollte bei der Dimensionierung auch die Auswirkung auf die Bauteileigenschaften mit einbezogen werden.

3.8 Mehrkanalsystem

Das in Abbildung 3.18 schematisch dargestellte V-Profil ermöglicht Fließkanäle parallel zueinander anzuordnen, ohne ein erhöhtes Risiko für Lufteinschlüsse durch lokale textile Schwankungen. Zur Versorgung der einzelnen, über die Fläche parallel zueinander verteilten, Verteilerkanäle wird ein weiterer Fließkanal benötigt. In Bezug auf das gewünschte Füllverhalten lässt sich über diesen auch der Fließfrontverlauf beeinflussen. Abbildung 3.23 zeigt beispielhaft den Zusammenhang zwischen Versorgungs- und Verteilerkanal.

Im ersten Beispiel sind beide Fließkanalarten so groß dimensioniert, dass das resultierende Füllverhalten im Konvergenzbereich der Abbildung 3.17 liegt. Dadurch breitet sich das Fluid parallel zu den Seiten des Fließkanals aus. Die Füllsimulation zeigt, dass die Kanäle im Randbereich in den ersten Zeitschritten mit weniger Fluid versorgt werden. Das führt dazu, dass sich das Fluid vom Angusspunkt aus schneller ausbreitet. Ein ähnlicher Füllverlauf ist zu beobachten, wenn beide Fließkanalarten mit

einer Ersatzpermeabilität von $4,19 \text{ E-}08$ ausgeführt sind. In diesem Fall bildet sich ein V-Profil in Kombination mit einem schnelleren Ausbreiten des Fluids vom Zentrum aus.

Füllsimulation zur Veranschaulichung des Fließfrontverlaufs:

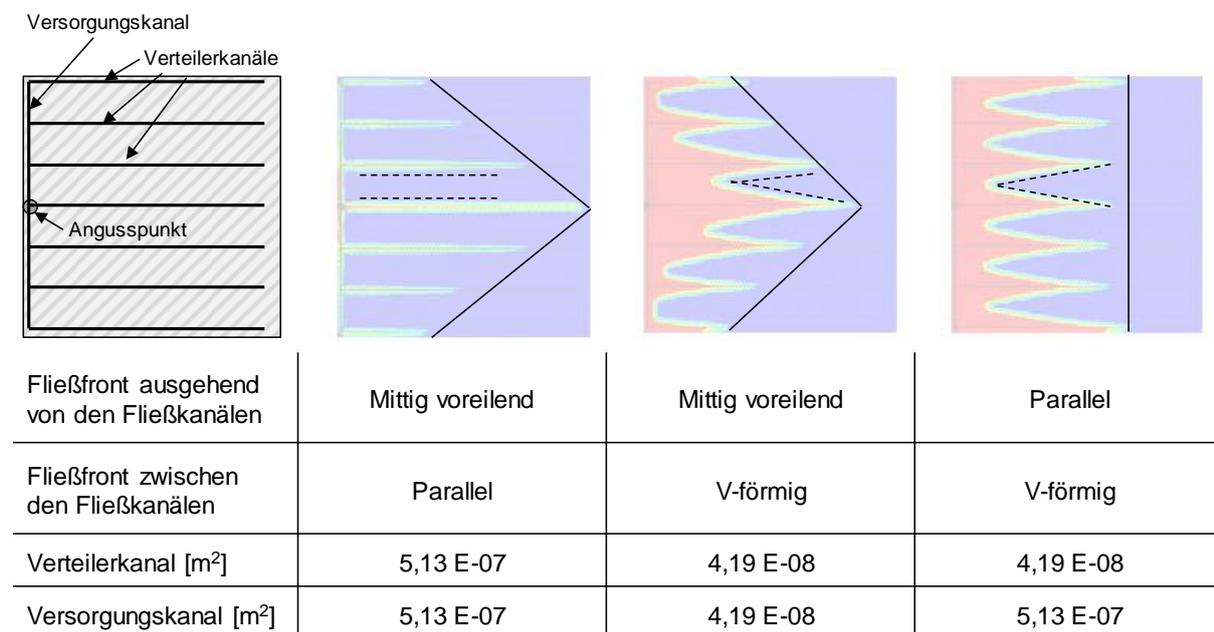


Abbildung 3.23: Exemplarische Übersicht zu dem Einfluss der Relation zwischen Versorgungskanal und Verteilerkanälen hinsichtlich dem Fließfrontverlauf.

Im dritten Beispiel ist der Versorgungskanal wesentlich größer als die Verteilerkanäle. Dadurch breitet sich das Fluid gleichmäßig in den Verteilerkanälen aus. In diesem Kontext ist es denkbar, dass je nach Bauteilgeometrie sowohl die Kombination aus einem kleinem Versorgungskanal und gleichgroßen Verteilerkanälen als auch die Kombination aus großem Versorgungskanal und kleinen Verteilerkanälen zielführend ist.

Betrachtet man die Fallbeispiele aus den Optimierungsansätzen von [66] und [67], öffnet dies weitere Freiheitsgrade zur Beeinflussung des Fließfrontverlaufs zur Vermeidung von zusammenlaufenden Fließfronten. Hinsichtlich der Anordnung der Fließkanäle parallel zueinander sind verschiedene Einflussmöglichkeiten denkbar. Die Abbildung 3.24 zeigt den Füllvorgang für unterschiedlich lange, parallel angeordnete Fließkanäle. Der Injektionsdruck in der Simulation ist 3 Bar. Eine Verlängerung der Verteilerkanäle zur Verkürzung des Fließwegs durch die Preform führt zu einer Reduktion der Injektionszeit. Im ersten Schritt führt eine Verlängerung von 100 mm auf 275 mm zu einer Reduktion der Injektionszeit von 432 s auf 128 s. Darüber hinaus reduziert sich die Injektionszeit auf 29,4 s durch die Verlängerung auf 430 mm.

Gleichzeitig existiert eine Wechselwirkung zwischen der Orientierung des Lagenaufbaus (Ausrichtung der K1 Permeabilität) und der Länge der Verteilerkanäle. Während bei den ersten beiden Konfigurationen der Fließkanaleffektbereich A2 (s. auch Abbildung 3.3) hinsichtlich längstem Fließweg ausschlaggebend ist, verändert sich dies bei Verteilerkanälen mit 430 mm Länge. In dieser Konfiguration ist der längste Fließweg in der Form der Abstand zwischen zwei Fließkanälen.

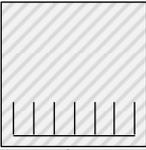
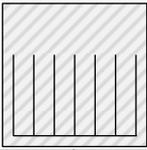
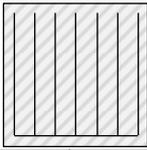
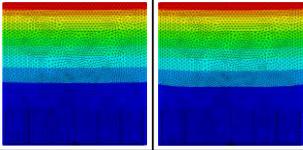
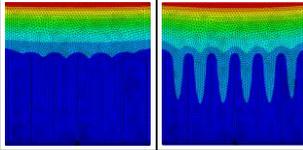
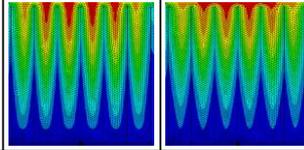
Schematische Fließkanalanordnung						
Fließfrontverlauf (Simulation)						
Relative Ausrichtung von den beiden mittleren 0° Lagen						
Länge der Fließkanäle [mm]	100	100	275	275	430	430
Injektionszeit [s] (Simulation)	432	235	128	82	29,4	29,3

Abbildung 3.24: Einfluss der Länge von Fließkanälen auf den Fließfrontverlauf und die Injektionszeit in der Füllsimulation.

Im nächsten Versuch wird der Abstand zwischen zwei Verteilerkanälen zueinander untersucht. Hierzu wird wieder die Orientierung des Lagenaufbaus variiert. Die Ergebnisse der Füllsimulation sind in Abbildung 3.25 dargestellt. Zunächst ist der Einfluss der Orientierung des Lagenaufbaus (Ausrichtung der K1) zu beobachten. Gleichzeitig können die resultierenden Injektionszeiten auch wieder durch den Fließkanalwirkungsbereich erklärt werden. Zwar führt die dichtere Anordnung der Fließkanäle zu einer weiteren Reduktion der Injektionszeit, aber dieser Effekt konvergiert. Während sich im ersten Schritt der Abstand um 57,3% und die Injektionszeit um 28,9% verringert (Quotient aus beiden: 0,5), sinkt im zweiten Schritt die Injektionszeit nur um 9% bei einer Reduktion des Abstands um 26,1% (Quotient aus beiden: 0,26). Durch eine dichtere Anordnung der Fließkanäle ist zwar ein größerer Volumenstrom möglich, aber für die Injektionszeit bleibt der längste Fließweg durch die Preform ausschlaggebend. Zusammenfassend muss bei der Anordnung

mehrerer Fließkanäle die Versorgungsstruktur geeignet dimensioniert werden. Hierbei kann über die Fließkanalquerschnittsgröße das Füllbild beeinflusst werden.

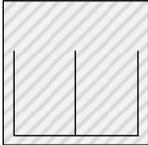
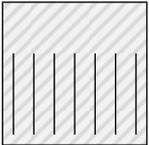
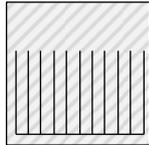
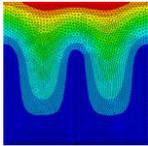
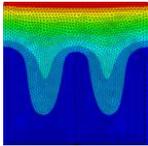
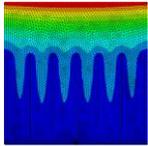
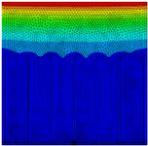
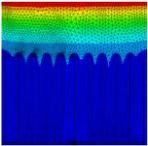
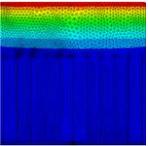
Schematische Fließkanalanordnung						
Fließfrontverlauf (Simulation)						
Relative Ausrichtung von den beiden mittleren 0° Lagen						
Abstand zw. den Fließkanäle [mm]	150	150	64	64	41	41
Injektionszeit [s] (Simulation)	180	132	128	82	116	69

Abbildung 3.25: Einfluss von Abstand zwischen zwei Verteilerkanälen auf die Injektionszeit und den Fließfrontverlauf.

3.9 Auswirkung auf die Prozessstabilität

Ausgehend von dem im Stand der Technik diskutierten Zusammenhang zwischen eingehender Variabilität der Verstärkungsstruktur (beispielsweise Flächengewicht, Falten oder Gassenbreite) und der geforderten Prozessstabilität des RTM Verfahrens wird im Folgenden die Auswirkung vom Verteilersystem auf die Robustheit des Füllverhaltens untersucht. Die Modellierung der Variabilität, als Eingangsgröße in die Füllsimulation, setzt das Wissen über die Beschaffenheit dieser voraus. Um den Einfluss der Variabilität auf das Füllverhalten quantifizieren zu können, ist eine zerstörungsfreie Messung der Variation von der Verstärkungsstruktur notwendig [85–87]. Die Variation des Flächengewichts und die damit einhergehende Variation der Fasermenge führen zu einem lokal unterschiedlichen Faservolumengehalt [13]. Basierend auf dem Zusammenhang zwischen Faservolumengehalt und Permeabilität wird dementsprechend ein Einfluss auf den Fließfrontfortschritt erwartet. Neben der herstellungsbedingten Variation der Materialeigenschaften entstehen während der Drapierung der Verstärkungsstruktur weitere Faserverdichtungen. Diese können zu ein- oder mehrlagigen Falten in der Verstärkungsstruktur führen [57,88].

In die Verstärkungsstruktur werden zwei bis drei Gelegestreifen, als Näherung an Falten, eingebracht. Die experimentelle Charakterisierung des Füllverhaltens mit Hilfe

der Fließfrontvisualisierung erlaubt den direkten Vergleich der Versuchskonfigurationen untereinander mit Bezug auf die gemessene Eingangsvariation und die Bestimmung des Einflussbereichs der textilen Merkmale. Darüber hinaus kann eine quantitative Aussage über die Interaktion zwischen den eingebrachten Merkmalen und dem verwendeten Verteilersystem hinsichtlich eines reproduzierbaren Füllverhaltens getroffen werden.

3.9.1 Versuchsplan und Probenvorbereitung

Als Versuchsplan wird ein vollfaktorieller Versuchsplan mit jeweils drei Wiederholungen gewählt. In Abbildung 3.26 ist eine schematische Übersicht über die durchgeführten Versuche dargestellt.

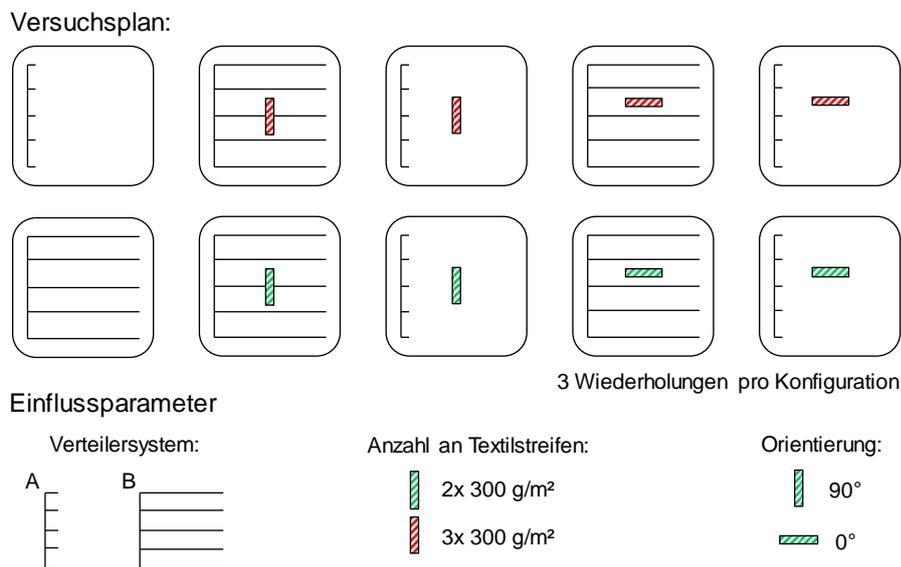


Abbildung 3.26: Schematische Übersicht über die einzelnen Versuchskombinationen.

Es werden zwei verschiedene Fließkanalverteilersysteme verwendet. Neben der herstellungsbedingten Variation der Verstärkungsstruktur werden 24 verschiedene Preforms mit Textilstreifen präpariert, um einen lokal erhöhten Faservolumengehalt darzustellen. Als Referenz werden jeweils drei Versuche ohne Textilstreifen durchgeführt.

Die Textilstreifen werden aus dem verwendeten 300g/m² Gelege entnommen und in zwei verschiedenen Ausrichtungen (0° und 90°) zum Verteilersystem platziert. Jeder Preform wird vermessen. Hierzu wird eine spezielle Prü fzelle verwendet, welche die relative Dickenverteilung der Preform unter flächigem Vakuum mit Hilfe von

Lasertriangulation misst. Anschließend wird die Injektion mit dem im vorangegangenen Kapitel erklärten Prüfstands Aufbau charakterisiert.

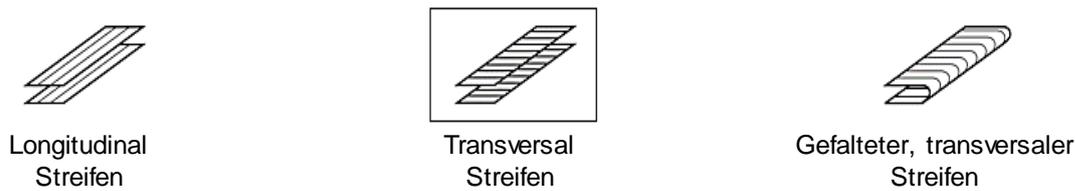


Abbildung 3.27: Modellierungsmöglichkeiten für eine künstliche Falte mit Hilfe von Textilstreifen.

Zur Modellierung der künstlichen Falte werden verschiedene Möglichkeiten geprüft, diese sind in Abbildung 3.27 dargestellt. Die in Vorversuchen evaluierte Auswirkung der unterschiedlichen Anordnungen der Streifen zeigt, dass die Auswirkung bei transversalen Streifen am größten ist. Diese Modellierung wird für die folgenden Versuche ausgewählt.

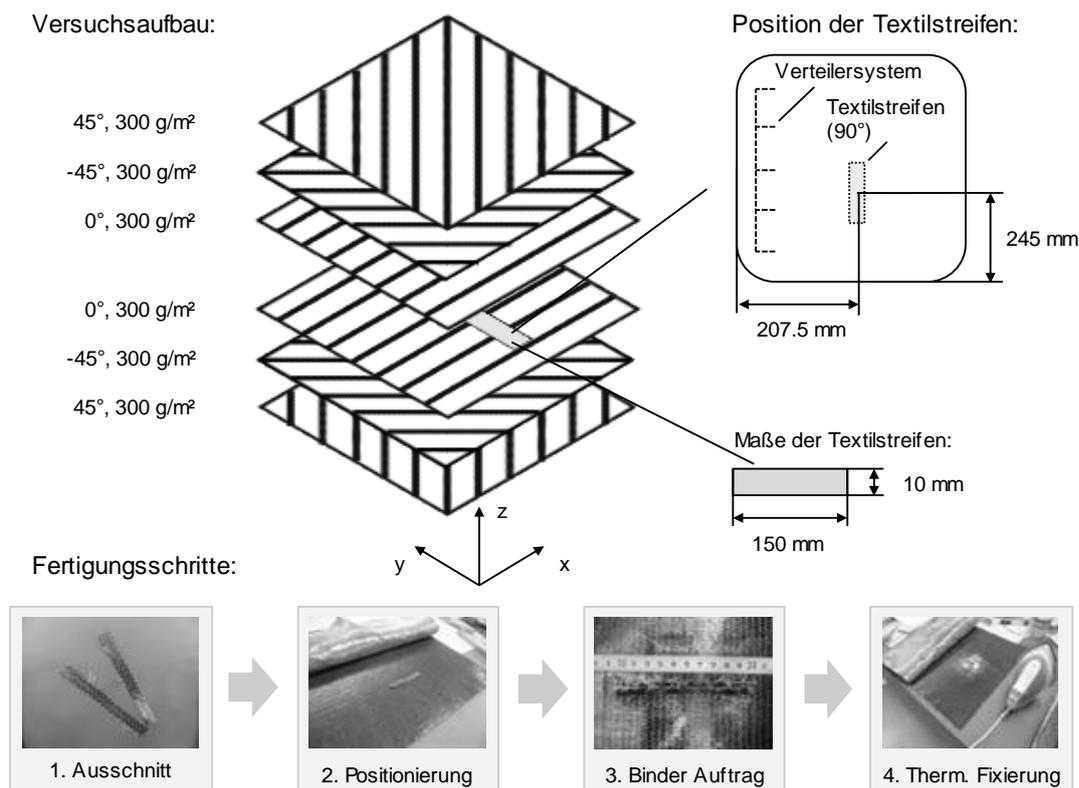


Abbildung 3.28: Einbringung der Textilstreifen in den Lagenaufbau.

Die Textilstreifen werden in der Mitte der Preform platziert und haben eine Größe von 150 mm x 10 mm. Die einzelnen Fertigungsschritte sind in Abbildung 3.28 dargestellt. Der Lagenaufbau inklusive der Textilstreifen wird in diesem Bereich auf einen

rechnerischen Faservolumengehalt von 65 % für zwei Streifen und 73 % für drei Streifen ausgelegt. Um die Vergleichbarkeit der Versuche zueinander zu gewährleisten, werden die Streifen nach der Positionierung mit Hilfe von zusätzlichem Binder thermisch fixiert. Die Positionsgenauigkeit der eingebrachten Streifen wird mit Hilfe der Lasertriangulation vermessen.

Zur Beurteilung des Fließfrontfortschritts werden zwei verschiedene Werkzeugeinsätze verwendet. Die Maße der Werkzeugeinsätze sind in Abbildung 3.29 gezeigt. Beide Einsätze haben zunächst einen Versorgungskanal mit einer Ersatzpermeabilität von $K_{VS} = 3,77 \text{ E-}07 \text{ m}^2$. Von diesem zweigen 5 Fließkanäle mit einem kleineren Querschnitt ab. Diese Fließkanäle haben eine Ersatzpermeabilität von $K_{VT} = 4,19 \text{ E-}08 \text{ m}^2$. Für den ersten Einsatz sind diese Kanäle 100 mm lang und für den zweiten 430 mm. Der Abstand zwischen den Kanälen beträgt jeweils 70 mm.

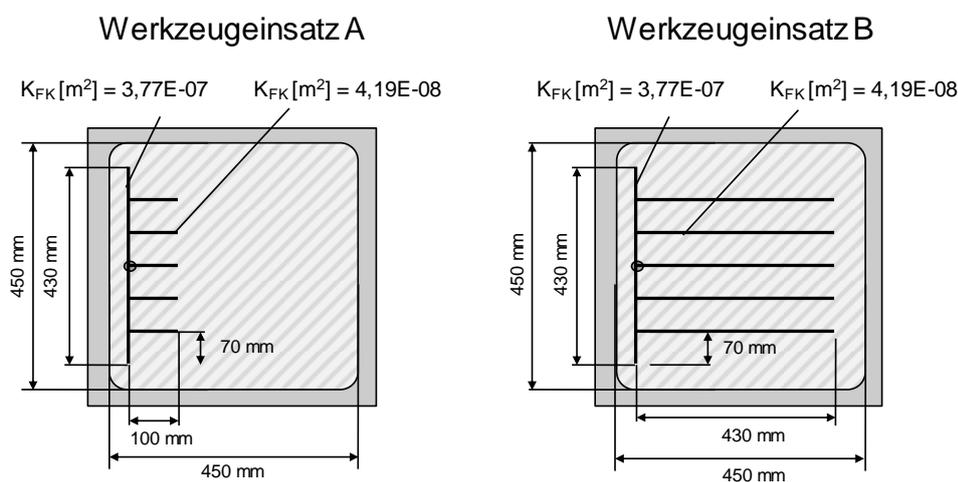


Abbildung 3.29: Übersicht zu den beiden verwendeten Werkzeugeinsätzen A und B.

3.9.2 Versuchsergebnisse zur Prozessstabilität

Die mit Hilfe der Lasertriangulation gemessene Dickenverteilung zeigt eine relative Erhöhung im Bereich der zwei Textilstreifen von 8 %-15 %. Bei drei Textilstreifen beträgt die Abweichung 13 % bis 21 %. Dies entspricht einer gemessenen Höhendifferenz von bis zu 0,5 mm. Neben der Detektion der Textilstreifen können linienförmige Regionen mit erhöhter Dicke beobachtet werden. Diese Bereiche liegen in einem Bereich von 1 %-14 % und entstehen bei der Herstellung des Geleges. Sie zeigen sich in allen Proben.

In Abbildung 3.30 und Abbildung 3.31 ist jeweils die relative Dickenverteilung der Referenzversuche ohne Textilstreifen und der sich ergebende Fließfrontverlauf

dargestellt. Die erste der beiden Abbildungen zeigt die Ergebnisse für den Werkzeugeinsatz A mit den kürzeren Fließkanälen. Der Fließfrontfortschritt visualisiert die prozentuale Zeitdifferenz zwischen den gemittelten Füllzeitpunkten aller drei Experimente und den spezifischen Füllzeitpunkten eines einzelnen Experiments.

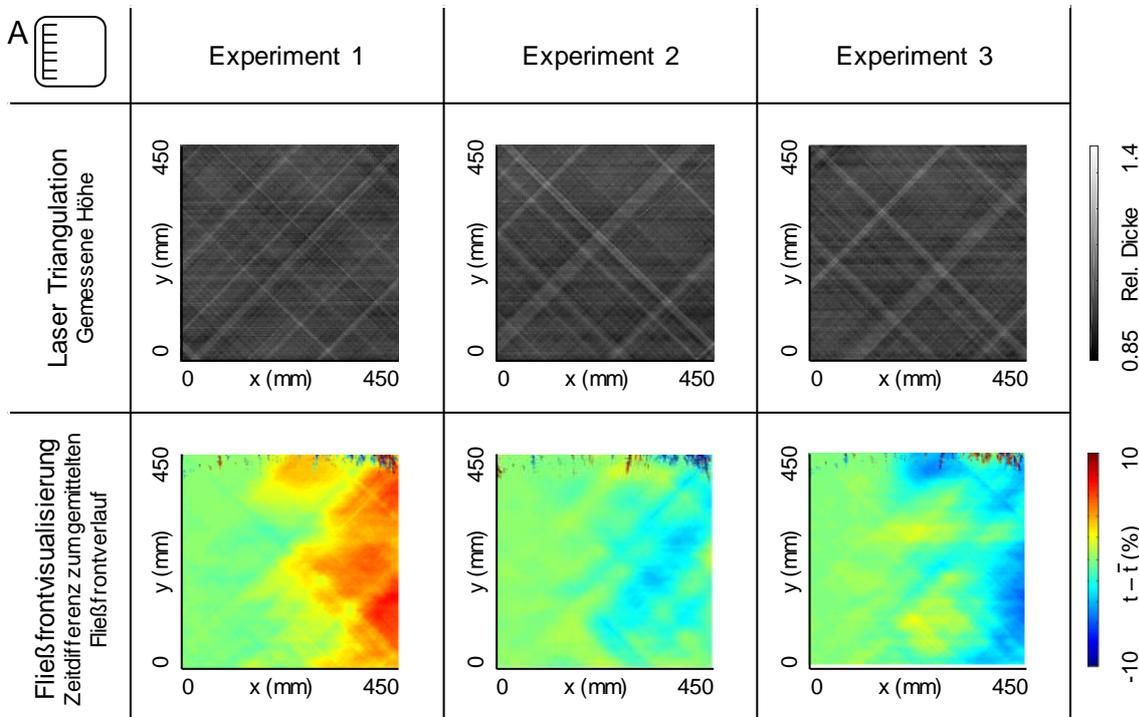


Abbildung 3.30: Ergebnisübersicht zu der mit Lasertriangulation bestimmten relativen Dickenverteilung der Preform ohne Falte und dem resultierenden Füllverhalten während der Injektion.

Abbildung 3.31 zeigt die Ergebnisse für den anderen Werkzeugeinsatz B. Die mittlere Injektionszeit reduziert sich von 236,0 s auf 90,5 s. Aus diesem Grund wird eine prozentuale Skalierung der Zeitdifferenz gewählt. Auffällig ist die unterschiedliche Verteilung der Zeitdifferenzen. Während beim ersten Einsatz A tendenziell Zeitverzögerungen zusammenhängend auftreten, sind diese beim zweiten Werkzeugeinsatz sporadischer verteilt. Dies kann auf den geänderten Fließfrontverlauf zurückgeführt werden. Die beim ersten Werkzeugeinsatz flächig auftretenden Zeitdifferenzen werden durch die Fließkanäle unterbrochen, wodurch kleinere Flächen entstehen. In der Fließfrontvisualisierung sind die linienförmigen Bereiche größerer Dicke anhand der größeren Zeitdifferenz erkennbar.

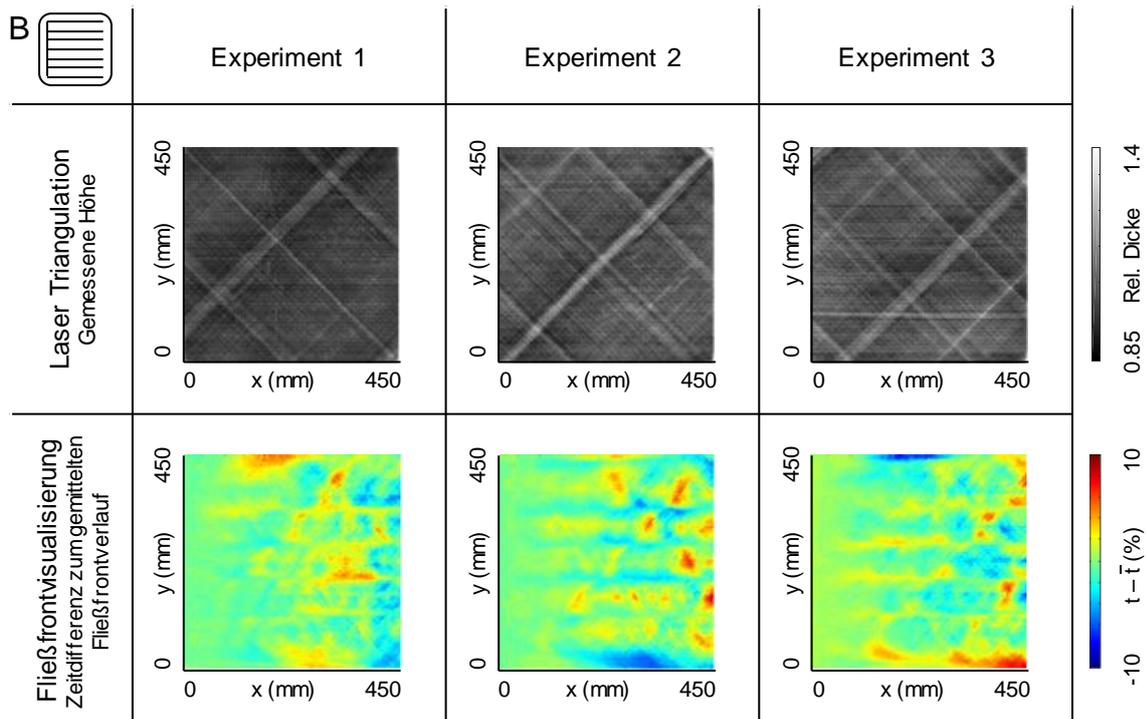


Abbildung 3.31: Ergebnisübersicht zu der mit Lasertriangulation bestimmten relativen Dickenverteilung der Preform ohne Textilstreifen und dem resultierenden Füllverhalten während der Injektion.

Die Ergebnisübersicht zu der gesamthaften Injektionszeit ist in Tabelle 3.3 und Tabelle 3.4 zu finden. Die einfache Standardabweichung entspricht $\pm 8\%$. Unter Berücksichtigung der an sich verringerten Injektionszeit ist in Bezug auf die Variabilität kein wesentlicher Unterschied zwischen den Werkzeugeinsätzen zu erkennen.

Tabelle 3.3: Übersicht zu den Injektionszeiten der Versuchsreihe mit kurzen Verteilerkanälen (Werkzeugeinsatz A).

Experiment	Referenz (ohne Falte)	A  0° 65% FVG	A  0° 73% FVG	A  90° 65% FVG	A  90° 73% FVG
Injektionszeit 1 [s]	250.06	315.47	269.52	279.14	291.03
Injektionszeit 2 [s]	239.86	277.48	280	327.08	345
Injektionszeit 3 [s]	235.06	344.87	320.08	282.13	377.9
Mittelwert [s]	235.97	322.61	273.53	296.12	339.33
Std. Abw. [s]	12.98	34.07	39.28	26.86	35.91
Zeitdifferenz [s] (zur Referenz)		86.64 (36.72%)	37.56 (15.92%)	60.15 (25.49%)	103.36 (43.80%)

Auf Grund der geringen Abweichung des Füllverlaufs wird angenommen, dass die herstellungsbedingten linearen Verdichtungen nicht zu kritischen Auswirkungen auf den Prozess führen.

Tabelle 3.4: Übersicht zu den Injektionszeiten der Versuchsreihe mit langen Verteilerkanälen (Werkzeugeinsatz B).

Experiment	Referenz (ohne Falte)	B  0° 65% FVG	B  0° 73% FVG	B  90° 65% FVG	B  90° 73% FVG
Injektionszeit 1 [s]	93.03	95.53	92.5	103.99	93.58
Injektionszeit 2 [s]	91.06	97.52	102.04	101.39	98.55
Injektionszeit 3 [s]	87.48	97.98	98.14	94.64	92.5
Mittelwert [s]	90.52	97.01	97.56	100.01	94.88
Std. Abw. [s]	2.30	1.06	3.92	3.94	2.63
Zeitdifferenz [s] (zur Referenz)		6.49 (7.17%)	7.04 (7.78%)	9.49 (10.48%)	4.36 (4.82%)

Für die beiden Fließkanalanordnungen ist die sich durch die Einbringung der Faserverdichtung ergebende Zeitdifferenzverteilung in Abbildung 3.32 dargestellt.

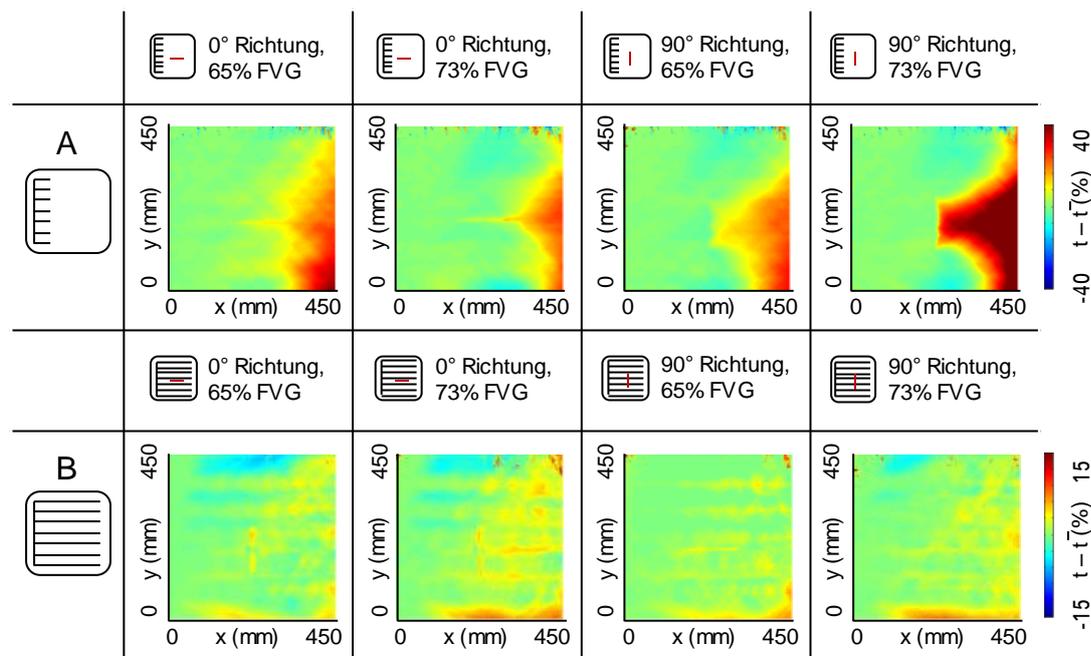


Abbildung 3.32: Einfluss einer lokalen Faserverdichtung auf den Fließfrontverlauf während der Injektion.

Referenz sind die im Vorfeld gemessenen Fließfrontverläufe ohne Faserverdichtungen. Bei diesen zeigt sich eine wesentlich größere Auswirkung auf den Fließfrontfortschritt für den Werkzeugeinsatz A. Am deutlichsten zeigt sich die Auswirkung der Textilstreifen für die 90° Orientierung. Die Füllzeit weicht um bis zu 40 % (100 s) zur Referenzinjektionszeit ab. Der Auswirkungsbereich wächst mit länger werdendem Fließweg an. Beim Werkzeugeinsatz B ist selbst mit einer kleineren Zeitskalierung von $\pm 15\%$ kein vergleichbarer Einfluss zu beobachten. Eine

Unterscheidung zwischen zwei und drei Textilstreifen ist bei einer 0° Ausrichtung der Textilstreifen nicht möglich. Für die 90° Ausrichtung der Textilstreifen ist eine leichte Verzögerung der Fließfront zu erkennen. Diese ist geringer als beim Werkzeugeinsatz A.

Über die Zentrierung der Bildbereiche zueinander lassen sich die gemessenen Dickenverteilungen direkt mit dem Fließfrontverlauf abgleichen. Für die Textilstreifen parallel zum Fließfrontverlauf und drei Textilstreifen wird der Fließfrontfortschritt wesentlich verlangsamt. Der Einfluss von den Textilstreifen auf den Fließfrontverlauf lässt sich aus der zeitlichen Differenz ableiten:

- Die Fläche des verlangsamteten Bereichs wird hinter den Textilstreifen größer.
- Der Fließfrontfortschritt wird hinter den Textilstreifen wesentlich verlangsamt.

Auf Basis der Versuchsergebnisse lassen sich drei Parameter der Textilstreifen als ausschlaggebend für den Einfluss auf die Fließfront zusammenfassen:

- Resultierender Faservolumengehalt
- Winkel zwischen Fließfront und Textilstreifenausrichtung
- Fließweg zwischen Fließkanal und Falte, sowie von dieser bis zum Bauteilende

Die nicht zerstörende Textilprüfung muss diejenigen Bereiche identifizieren, die zu kritischen Auswirkungen auf die Injektion führen. Neben den Eigenschaften der Textilstreifen an sich, hängt die Auswirkung auch vom Fließfrontverlauf innerhalb der Form ab. Dieser wiederum lässt sich durch die Fließkanalpositionierung beeinflussen. Während die Reduktion der Standardabweichung der Injektionszeit ohne Faserverdichtung von 12,98 s (5,50 %) auf 2,41 s (2,64 %) zwar gering ist, verändert sich dies in Bezug auf die Faserverdichtungen (s. Referenz ohne Textilstreifen Tabelle 3.3 und Tabelle 3.4). Für die kürzeren Fließkanäle erhöht sich aber die Standardabweichung von 5,50 % auf 16 - 44 %, bei Werkzeugeinsatz B hingegen erhöht sich die Standardabweichung von 2,64 % nur auf 6 - 10 %. Dies ist auf den verkürzten und umgelenkten Fließweg zurückzuführen. Die Faserverdichtung kann sich nur noch lokal auswirken. Übertragen auf die Untersuchungen aus [89,90], in denen fluidundurchlässige Blockaden in den Preform eingebracht werden, könnten Fließkanäle die Fließfront geeignet um diese Hindernisse herumzuführen. Insgesamt

wirken sich Fließkanäle über die Reduktion und gezielte Beeinflussung des Fließweges positiv auf die Prozessrobustheit aus.

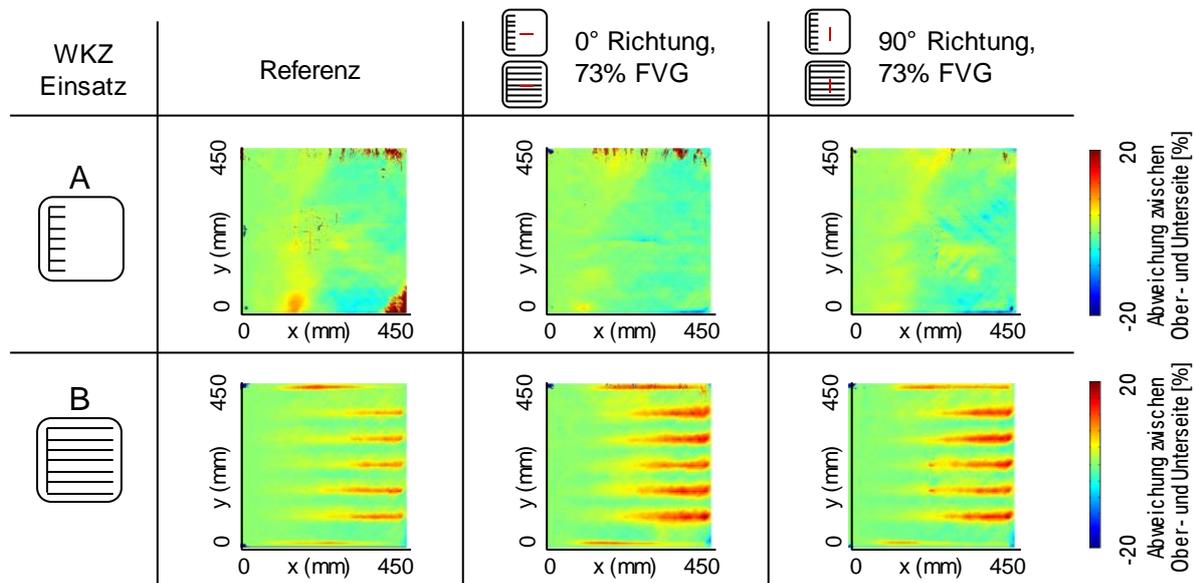


Abbildung 3.33: Zeitliche Abweichung der Füllung zwischen Ober- und Unterseite.

Die anschließende Auswertung des Unterschieds des Fließfrontfortschritts an Ober- und Unterseite der Form ist in Abbildung 3.33 dargestellt. Der Vergleich zwischen Ober- und Unterseite zeigt, dass die Textilstreifen zu keinem Unterschied führen. Bei den Versuchen mit Werkzeugeinsatz A tritt kein auffälliger Unterschied zwischen beiden Seiten auf. Dagegen eilt das Fluid bei Werkzeugeinsatz B an der Oberseite in den Fließkanälen voraus. Die zeitliche Differenz nimmt über die Fließkanallänge zu. Ausgehend von dem hohen Unterschied der Permeabilität der Verstärkungsstruktur und der Ersatzpermeabilität des Fließkanals ist dies nachvollziehbar.

4 Einfluss von Fließkanälen auf Bauteilgewicht und -festigkeit

Sofern die Fließkanäle auf dem Bauteil verbleiben, ist auch deren Auswirkung auf das Bauteilgewicht und dessen mechanische Eigenschaften von Bedeutung. Im Folgenden wird anhand eines simulierten Fallbeispiels der Einfluss des Verteilersystems auf das Bauteilgewicht diskutiert. Ausgangsbasis hierzu ist der im Stand der Technik aufgezeigte, veränderte Faserverlauf in Höhenrichtung im Fließkanalbereich von bestehenden Bauteilen. Aufbauend darauf wird die Entstehung und Auswirkung von Fasereinschwemmung in den Fließkanal untersucht.

4.1 Auswirkung von Fließkanalverteilersystemen auf das Bauteilgewicht

Nach dem RTM Prozess verbleiben die Fließkanäle auf dem Bauteil. Die ausgehärteten Fließkanäle auf dem Bauteil stellen dadurch ein zusätzliches Gewicht dar. Dieses wird anhand repräsentativer Verteilungen simulativ evaluiert. Als Verstärkungsstruktur wird der auf der rechten Seite in Abbildung 3.11 beschriebene Lagenaufbau in 0° Ausrichtung verwendet. Der Vergleich zwischen den einzelnen Anordnungen hinsichtlich Gewichtssteigerung und Injektionszeitreduktion ist in Abbildung 4.1 dargestellt.

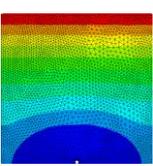
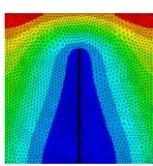
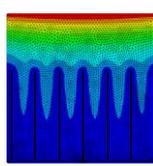
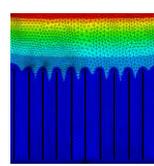
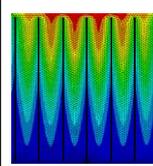
Fließkanal Anordnung • Plattenbreite & -länge: 490mm • Plattendicke 2 mm • K1 (51% FVG) = $1,3 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2$ • K2 (51% FVG) = $5,5 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$					
Anzahl Verteilerkanäle (*exkl. Versorgungskanal)	0	1	7*	11*	7*
Länge der FK [m]	0	0,275	0,275	0,275	0,43
Injektionszeit [s] (Simulation)	1268	279	82	69	29,3
Gewichtssteigerung [%]	0	0,1	1,2	1,5	1,5
Reduktion Injektionszeit [%]	0	78	93,5	94,6	97,7

Abbildung 4.1: Fallbeispiele für den Einfluss unterschiedlicher Fließkanalverteilersysteme auf das resultierende Bauteilgewicht und die Reduktion der Injektionszeit gegenüber einer Konfiguration ohne Fließkanäle.

Für die Reduktion der Injektionszeit um 97,7 % gegenüber der Referenz ohne Fließkanäle reichen sieben Fließkanäle mit einem Fließkanalquerschnitt mit einer Ersatzpermeabilität von $4,19 \text{ E-}08 \text{ m}^2$ aus. Die zusätzlichen Fließkanäle führen zu einer Gewichtssteigerung um 1,5 % im Vergleich zum Bauteil ohne Fließkanäle. Dies ist allerdings auf den sehr kleinen Querschnitt zurückzuführen. Bei größeren Fließkanalquerschnitten steigt der Einfluss auf das Bauteilgewicht schnell an. Diese wären für Verstärkungsstrukturen mit hoher Permeabilität (beispielsweise größer als $\text{E-}09 \text{ m}^2$) notwendig, um den gleichen Effekt zu erzielen. In diesem Fall ist auch die auf den Beobachtungen an bestehenden Bauteilen und Experteneinschätzungen getroffene Annahme, dass die Fließkanäle keinen Einfluss auf den Verzug des Bauteils haben, erneut zu prüfen.

4.2 Material, Methodik und Versuchsplan

Schliffbilder von Fließkanälen zeigen, dass diese zum Teil mit Fasern gefüllt sein können. Die damit verbundene Ondulation der Fasern kann zu einer Reduktion der Festigkeit führen. Gleichzeitig bildet sich die Einschwemmung von Fasern in den Fließkanal nicht immer konstant aus. Um dies näher zu untersuchen, wird in einem teil- und einem vollfaktoriellen Versuch zunächst die Entstehung anhand verschiedener, in Vorversuchen identifizierter Parameter untersucht. Im Anschluss wird die Auswirkung von Fließkanälen auf die mechanischen Bauteileigenschaften anhand von statischen Zug- und Druckprüfungen analysiert.

Im ersten Schritt wird die Fasereinschwemmung definiert. Hierzu ist ein exemplarischer Querschnitt einer Probe in Abbildung 4.2 dargestellt. Für diese Arbeit wird die Fasereinschwemmung als Vergrößerung des Faserbündelquerschnitts im Fließkanalbereich definiert. Die Fasern werden durch eben diese Vergrößerung ausgelenkt. Die Auslenkung der Fasern wird in die Einschwemmung der Fasern insgesamt und die Ondulation einzelner Lagen unterschieden. Die durch die Vergrößerung des Querschnitts von Faserbündeln bedingte Ondulation ist lagen- und orientierungsspezifisch und bei der mechanischen Prüfung vor allem für die lasttragenden Lagen entscheidend.

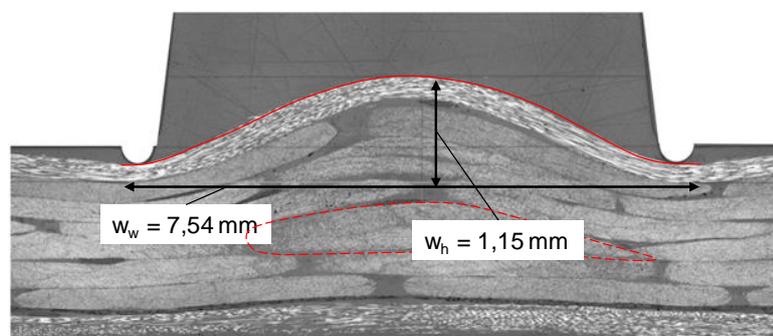


Abbildung 4.2: Definition der Fasereinschwemmung in den Fließkanal und der dadurch resultierenden Ondulation.

Diese Ondulation wird als Quotient aus Wellenhöhe w_h und Wellenweite w_w definiert. Formell zeigt Formel 4-1 den Quotienten:

$$Ondulation = \frac{w_h}{w_w} \quad (4-1)$$

Für die durchgeführten mechanischen Prüfungen sind die lasttragenden Lagen 90° zum Fließkanal orientiert. In der Abbildung 4.2 betrifft die Ondulation primär die Lagen, die dem Fließkanal zugewandt sind.

In Vorversuchen sind verschiedene Einflussparameter auf die Fasereinschwemmung identifiziert worden. Hierzu werden folgende Hypothesen untersucht:

1. Das Strömungsprofil und der Injektionsdruck im Zusammenspiel führen zu hydrodynamischen Kräften. In deren Folge führt der unterschiedliche Strömungswiderstand von Fasern und Fließkanal zu einem Spreizen des Faserbündels.
2. Durch eine geeignete Fixierung bzw. Klemmung des Faserhalbzeugs kann eine Auslenkung der Fasern im Fließkanalbereich minimiert oder sogar ganz vermieden werden. Eine nicht hinreichende Faserfixierung begünstigt entsprechend die Fasereinschwemmung.
3. Die lagenspezifisch unterschiedliche Orientierung von Fasern und Fließkanal führt zu unterschiedlich großen Überlappungslängen in denen sich einzelne Fasern im Fließkanalbereich befinden. Liegen die Fasern quer zum Fließkanal ist die Fasereinschwemmung minimal.
4. Der vorkompaktierte Lagenaufbau (Preform) kann im Fließkanalbereich relaxieren.
5. Durch den Schrumpf der Matrix werden die Fasern in den Fließkanalquerschnitt gezogen.
6. Lokale textile Defekte, wie beispielsweise mangelnde Lagenhaftung, führen zu einem Einschwemmen der Fasern in den Fließkanal.

Die Hypothesen 1 bis 3 sind für weitere Untersuchungen relevant, die Hypothesen 4 bis 6 können hingegen ausgeschlossen werden. Für die Hypothesen 4 und 5 müsste die Fasereinschwemmung konstant und vergleichbar auftreten. Allerdings zeigen die im Stand der Technik dargestellten Schliiffbilder (Abbildung 2.9), dass sich die Fasereinschwemmung unterschiedlich ausbildet. Hypothese 6 kann zwar nicht ausgeschlossen werden, allerdings sind im Fließkanalbereich, trotz expliziter Prüfung der Preform an diesen Stellen, keine Auffälligkeiten zu beobachten.

Die verbleibenden Hypothesen 1 bis 3 werden in einem Prinzipversuch näher untersucht. Hierzu werden die Einflussparameter in einem RTM Werkzeug auf einer

Presse zur Plattenherstellung im Hochdruck RTM-Verfahren nachgestellt. Es werden drei Fließkanalquerschnitte mit Hilfe von verschiedenen Werkzeugeinsätzen getestet. Die Werkzeugeinsätze sind in Abbildung 4.3 dargestellt. Zunächst wird angenommen, dass ein großer Versorgungskanal nur vereinzelt auftritt, während kleine Verteilerkanäle meist mehrfach parallel über das Bauteil verlaufen.

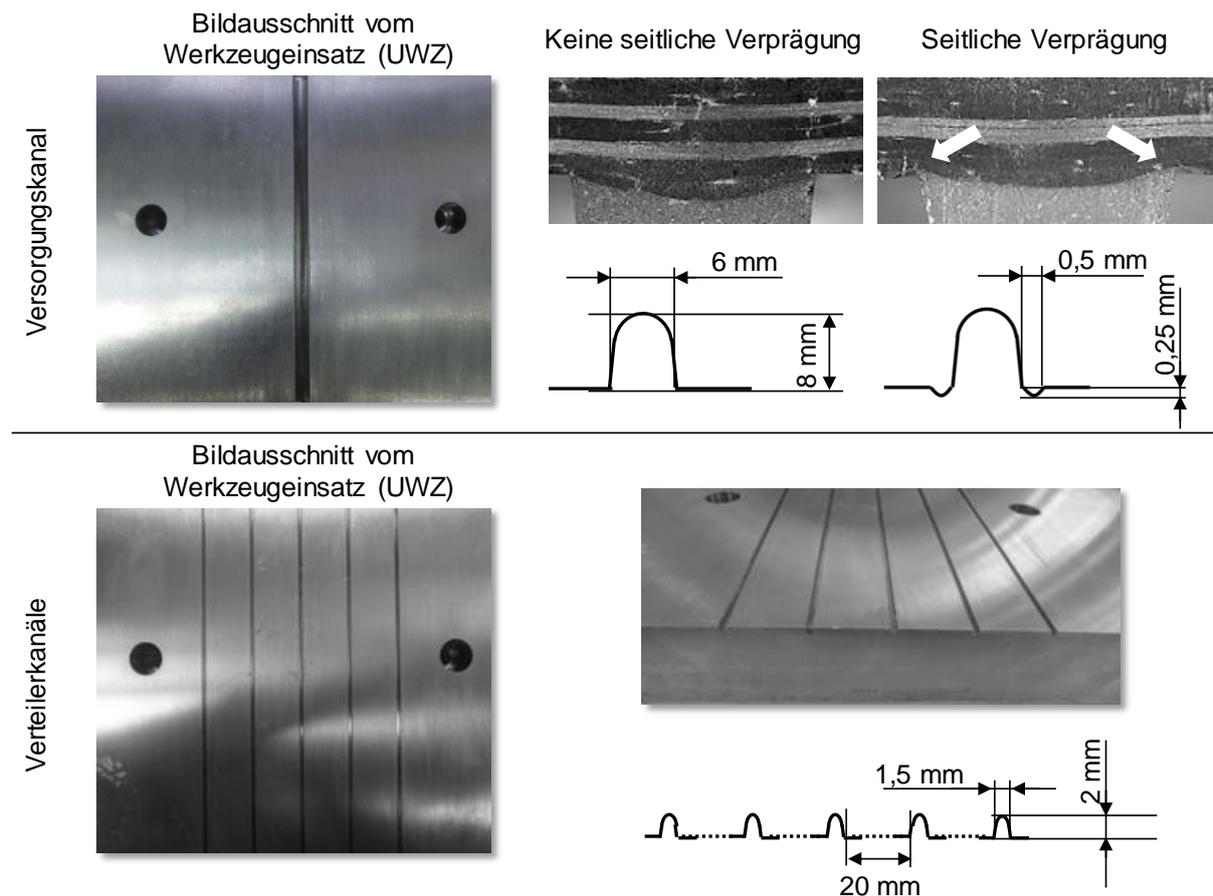


Abbildung 4.3: Darstellung der für die Untersuchung der Fasereinschwemmung verwendeten Werkzeugeinsätze und Fließkanalquerschnitte.

Die Fixierung der Fasern in der Form wird einerseits über eine lokale Fixierung der Fasern entlang des Fließkanals variiert (Fließkanal mit seitlicher Verprägung). Diese Fixierung weist nur eine geringfügige Höhe auf, damit der Fluidfluss vom Fließkanal aus möglichst wenig beeinträchtigt wird. Andererseits wird über einen Einschnitt außerhalb des Prüfkörperbereichs die Preformfixierung durch die umlaufende Klemmung am Werkzeugrand aufgelöst. Die weiteren Einflussparameter, sowie deren Anordnung, sind in Abbildung 4.4 dargestellt.

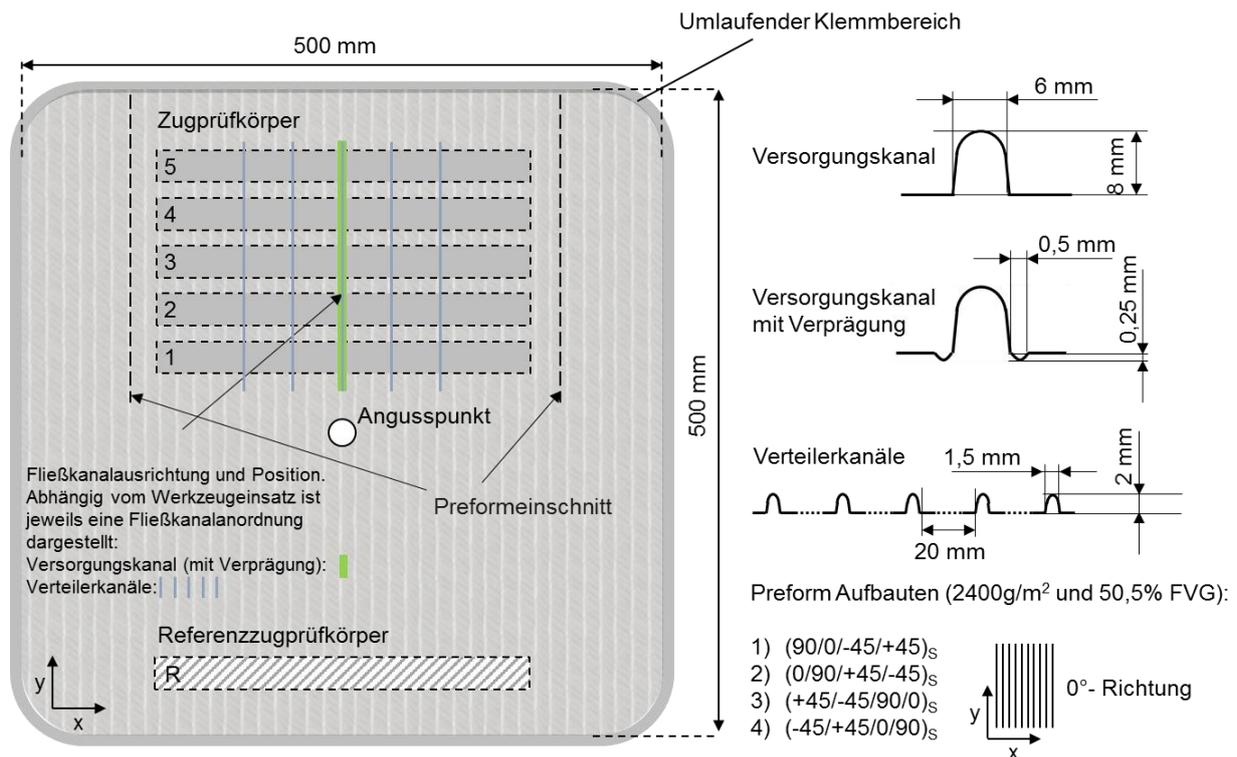


Abbildung 4.4: Übersicht und Anordnung der untersuchten Einflussparameter für die ein Zusammenhang zur Fasereinschwemmung erwartet wird.

Um bei verschiedenen Ausrichtungen der Fasern konstante mechanische Kennwerte zu erreichen, wird ein quasiisotroper Lagenaufbau gewählt (s. Preform Aufbauten in Abbildung 4.4). Für die Lagen wird jeweils ein 300 g/m² Kohlenstofffasergelege verwendet:

- 307 g/m² Flächengewicht Kohlenstofffasern
- 6,5 g/m² Flächengewicht Glasfaden

Der Lagenaufbau wird jeweils in 45° Schritten relativ zum Fließkanal gedreht. Ausschlaggebend für die Zugkräfte ist die Lage in 90° Orientierung zum Fließkanal. Diese Lage variiert ihre relative Position zum Fließkanal von außen nach innen. Die Orientierung der Lagen relativ zum Fließkanal wechselt in 45° Schritten. Die Lagenaufbauten werden vorher in einem Heizfeld auf die Nennwandstärke von 2,7 mm (50,5% FVG) gepresst. Die Austragsleistung wird im teilfaktoriellen Versuch zwischen 25 g/s und 50 g/s variiert. Im vollfaktoriellen Versuch wird konstant mit 50 g/s injiziert. Als Matrix wird ein Epoxidharz der Firma Hexion verwendet (s. Harzsystemcharakterisierung von Matrixsystem B aus [17]).

Zu jeder Versuchsparameterkonfiguration werden drei Platten hergestellt, aus denen jeweils 5 Zugprüfkörper entnommen werden. Dadurch ergeben sich 15 Prüfkörper (Wiederholungen) pro Parameteranordnung. Vollfaktoriell werden die Lagenorientierung und Fließkanalgeometrie (inkl. Versorgungs kanal mit seitlicher Verprägung) untersucht. Bei diesen Parametern wird im Vergleich zu den anderen Parametern ein höherer Einfluss auf die Fasereinschwemmung erwartet. Im teilfaktoriellen Versuchsplan werden auf Basis eines Plackett-Burmann Versuchsplans die Parameter Austragsleistung, FK Konfiguration, Verprägung, Lagenaufbau und Preformeinschnitt untersucht. Die Anordnung der Einflussparameter im orthogonalen Versuchsplan ist in Tabelle 4.1 dargestellt.

Tabelle 4.1: Teilfaktorieller Versuchsplan zur Untersuchung der Fasereinschwemmungsentstehung (bei grau hinterlegten Versuchskombinationen sind keine Versuche durchgeführt worden).

Nr.	Austragsleistung [gr/s]	FK Konfiguration	Verprägung	Lagenaufbau	Preform Einschnitt
1	50			1 - (90/0/-45/+45) _s	1
2	50		/	2 - (0/90/+45/-45) _s	-1
3	50			1 - (90/0/-45/+45) _s	1
4	25			1 - (90/0/-45/+45) _s	1
5	25			2 - (0/90/+45/-45) _s	-1
6	50			2 - (0/90/+45/-45) _s	1
7	50			2 - (0/90/+45/-45) _s	-1
8	25			2 - (0/90/+45/-45) _s	1
9	50		/	1 - (90/0/-45/+45) _s	-1
10	25			1 - (90/0/-45/+45) _s	-1
11	25			1 - (90/0/-45/+45) _s	-1
12	25		/	2 - (0/90/+45/-45) _s	1

Dieser Versuchsplan stellt einen Kompromiss aus den beiden möglichen teilfaktoriellen Reduktionsstufen 2^{V-I} und 2^{V-III} dar [91]. Der Einschnitt in den Preform (Position s. Abbildung 4.4) wird in der Tabelle mit 1 für Einschnitt vorhanden und -1 für Einschnitt nicht vorhanden aufgeführt. Basierend auf der orthogonalen Anordnung sind die Einstellungsmuster unabhängig voneinander. Allerdings fehlt die Kombination aus Verteilerkanälen und seitlicher Verprägung. Diese ist für die Beurteilung der Einflussparameter nicht relevant, da die seitliche Verprägung per se zu einer Ondulation der Fasern führt.

Ausgehend von den sich ergebenden Versuchsergebnissen werden die Einflussparameter gruppiert. Ein zusätzlicher Einfluss der Probenposition relativ zum Angusspunkt führt zu einem weiteren, nicht geplanten, Einflussparameter. Die Anzahl der Wiederholungen pro Parameteranordnung reduziert sich dadurch von fünfzehn auf drei Wiederholungen. Durch die Gruppierung der Einflussparameter hinsichtlich ihrer Effektstärke auf die Fasereinschwemmung und mechanischen Eigenschaften, wird eine aussagekräftige Datenbasis zur Beurteilung der Hypothesen erzeugt. Die Gruppierung ist in Abbildung 4.5 dargestellt.

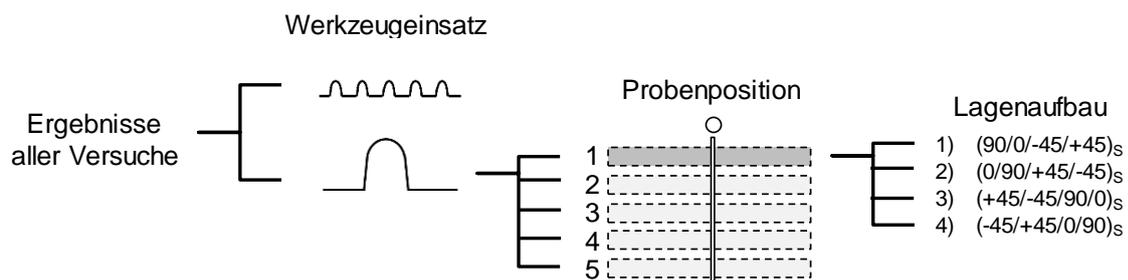


Abbildung 4.5: Gruppierung der Einflussparameter auf die Fasereinschwemmung.

Zunächst werden die beiden Fließkanalquerschnitte aufgeteilt. Als nächstes wird der Verlauf der Fasereinschwemmung herausgelöst, indem in darauf folgenden Auswertungen nur noch die Ergebnisse der Proben von Position 1 verwendet werden. Im Schluss wird die Datenbasis noch nach dem Lagenaufbau aufgeteilt.

4.3 Versuchsergebnisse zur Fasereinschwemmung in den Fließkanal

Kleine Fließkanäle zeigen keine Fasereinschwemmung. Über die 90 Prüfkörper mit Verteilerkanälen konnte keine Ondulation der lasttragenden 90° Lage festgestellt werden. Zwar ist punktuell eine Fasereinschwemmung zu beobachten, diese betrifft aber nur die Decklage. Die Decklage ist ausschließlich dann betroffen, wenn die Fasern parallel zum Fließkanal verlaufen und sich genau im Fließkanalbereich der Zwischenraum zwischen zwei Faserbündeln befindet. Dagegen ist bei allen Proben mit Versorgungskanal sowohl Fasereinschwemmung als auch eine Ondulation zu beobachten. Exemplarisch ist der Unterschied in Abbildung 4.6 anhand von zwei Schliffbildern gezeigt.

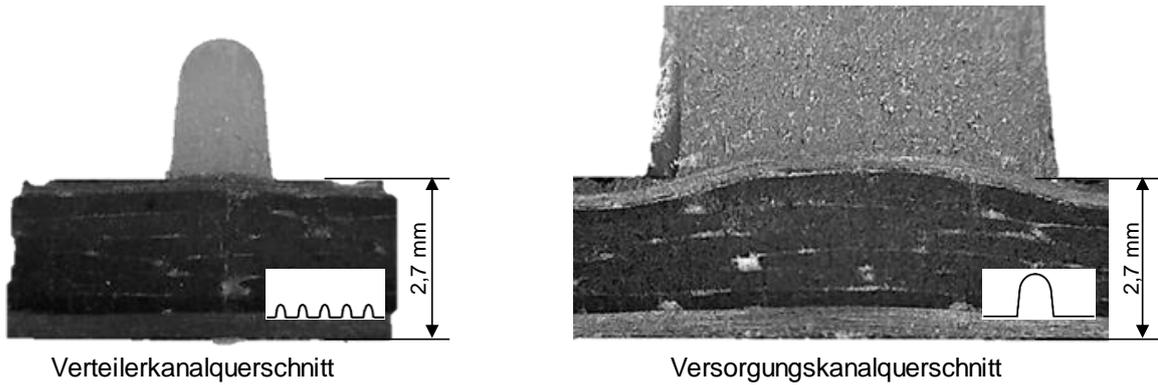


Abbildung 4.6: Vergleich der Fasereinschwemmung zwischen Versorgungskanal und Verteilerkanal.

In Abbildung 4.7 ist der Einfluss der Probenposition und der Lagenorientierung visualisiert. Im oberen Abschnitt der Abbildung ist ein Schliffbild entlang des Fließkanals zu sehen. Dies zeigt, wie sich die Fasereinschwemmung über die Probenposition verändert. Unterhalb dieses Schliffbilds sind exemplarisch Schliffbilder für die einzelnen Kombinationen aus Probenposition und Aufbauorientierung aufgeführt. In diesem Fall zeigt sich der Unterschied zwischen Fasereinschwemmung und Ondulation.

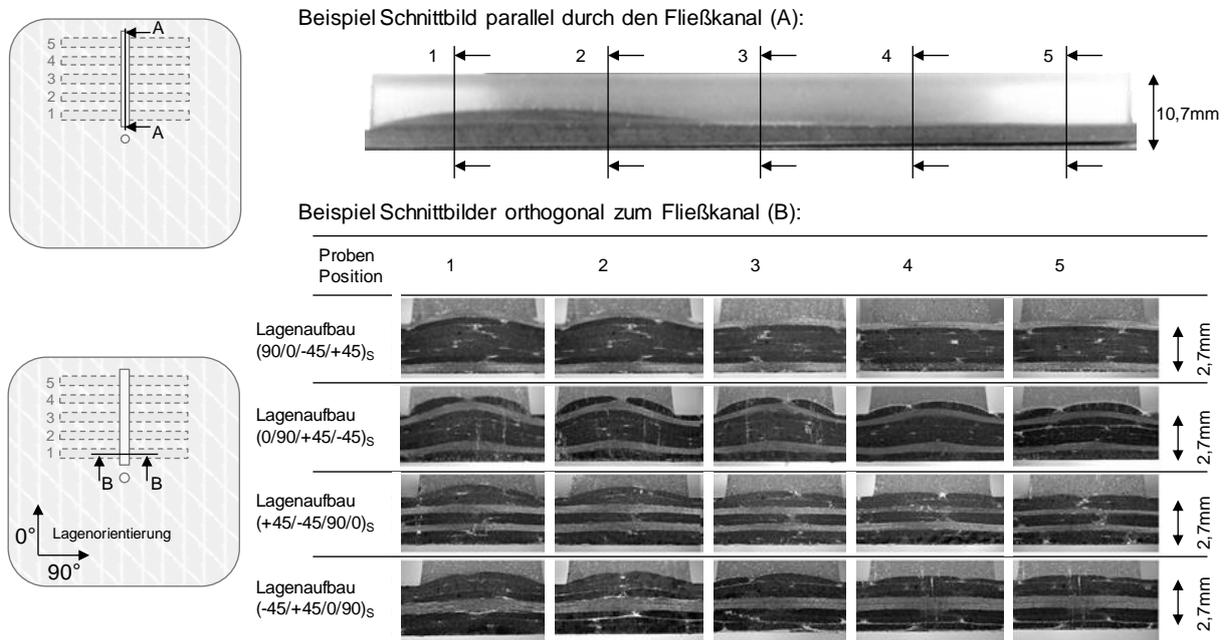


Abbildung 4.7: Schliffprobenübersicht zur Ausrichtung des Lagenaufbaus und dem Einfluss der Probenposition.

Während in Bezug auf Probenposition 1 bei allen Orientierungen Fasereinschwemmung auftritt, unterscheidet sich die Ondulation der Lagen wesentlich.

Darüber hinaus interagieren beide Effekte auch miteinander. Hinsichtlich Fasereinschwemmung ist die 90° Orientierung der an den Fließkanal grenzenden Lage optimal, jedoch ist diese Lage in diesem Fall auch die lasttragende Lage. Die auftretende Ondulation resultiert aus der Fasereinschwemmung. Gleichzeitig ist bei Aufbauorientierung 3 und 4 die Fasereinschwemmung zwar nicht minimal, allerdings befindet sich die 90° Lage in der Mitte des Lagenaufbaus und wird dadurch weniger beeinflusst. Zusammenfassend hat die Lagenorientierung einen Einfluss auf die Fasereinschwemmung. Die Position der Lage im Lagenaufbau relativ zum Fließkanal ist neben der Orientierung ein wesentlicher Faktor. Im durchgeführten Versuch ist die Probenposition (relativ zum Angusspunkt) sogar wichtiger als die Orientierung zwischen Fasern und Fließkanal.

Ausgehend von der am Anfang aufgestellten Hypothese 1 ergeben sich die folgenden Beobachtungen. Ausschlaggebend für die Fasereinschwemmung ist ein Aufspreizen der Faserbündel im Bereich des Fließkanals. Zusätzlich nimmt der Volumenstrom, der durch den Fließkanal fließt, über dessen Länge ab. Beide Effekte sind schematisch in Abbildung 4.8 dargestellt.

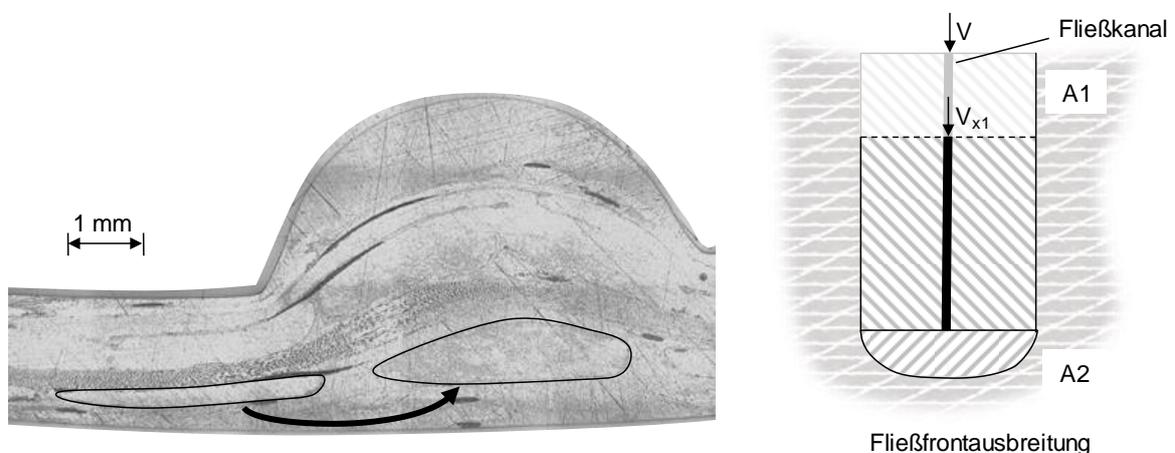


Abbildung 4.8: Schematische Darstellung der Aufweitung des Faserbündels im Fließkanalbereich (linke Seite) und des abnehmenden Volumenstroms über die Fließkanallänge (rechte Seite).

Auf der rechten Seite sind die Wirkungsbereiche eines Fließkanals aufgezeigt. Am Anfang des Fließkanals muss der gesamte Volumenstrom zur Versorgung der Bereiche A1 und A2 strömen, wohingegen am Ende des Fließkanals nur noch der Volumenstrom zur Ausbreitung des Fluids im Bereich A2 notwendig ist. A2 ist bei der vorliegenden Positionierung des Fließkanals in Bezug auf die Bauteilgeometrie nur

geringfügig ausgeprägt, da der Fließkanal am Rand des Bauteils endet. Bei einer anderen Anordnung von Bauteil und Verteilersystem könnte hingegen dieser Bereich auch größer sein. Dies ist beispielsweise bei dem Fließkanal in der C-Säule des Seitenrahmens aus der Abbildung 2.9 der Fall. Im Vergleich zu den anderen Fließkanälen die zur Injektion beim Seitenrahmen genutzt werden, ist in diesem Fließkanal die Fasereinschwemmung am größten.

Diese Beobachtungen sind vergleichbar mit dem reduzierten Faservolumengehalt, der bei der transversalen Permeabilitätsmessung aus [92] beobachtet wird. In dieser Untersuchung dehnt sich die Preform zu beiden Seiten in die in die Form eingearbeiteten Löcher des Werkzeugs aus. Durch diese Löcher strömt das Fluid für die Vermessung der eingelegten Verstärkungsstruktur. Die in der Quelle dargestellten Schliffbilder zeigen ebenfalls eine Vergrößerung der Faserbündel der einzelnen Lagen. Die dargelegten Rahmenbedingungen deuten auf den Bernoulli Effekt hin. Durch die unterschiedlichen Strömungswiderstände entsteht ein Sog im Fließkanal, der die Fasern in den freien Querschnitt zieht um die Permeabilität im Bereich der Preform zu erhöhen. Für die kleinen Fließkanäle ist die Fläche, in der sich die Fasern im Fließkanalbereich befinden, bedingt durch ihre geringere Breite wesentlich kleiner. Außerdem teilt sich der Volumenstrom auf die fünf Fließkanäle auf. Bei dem gegebenen Textil sind die Faserbündel ca. 3-4 mm breit. Die Verteiler-Fließkanäle sind nur 1,5 mm breit. Der Fließkanalquerschnitt ist schmaler als die Breite der vernähten und dadurch zusätzlich fixierten Faserbündel.

Die im Versuch beobachtete Fasereinschwemmung ist allerdings im Vergleich zu der beim Seitenrahmen in Abbildung 2.9 auftretenden Fasereinschwemmung wesentlich geringer. Bei einigen der Schliffbilder ist der Fließkanal vollständig mit Fasern gefüllt. Eine mögliche Erklärung ist der unterschiedliche Wirkungsbereich des Fließkanals. Durch die über den Seitenrahmen verlaufenden Fließkanäle fließt ein größerer Volumenstrom als bei der im Versuch betrachteten, kleinen Plattengeometrie. Der Zusammenhang zwischen Fasereinschwemmung und Fließkanalbreite kann auch im Vergleich zum realen Anwendungsfall bestätigt werden.

4.4 Einfluss auf die Bauteilfestigkeit

Neben der Charakterisierung der Wirkzusammenhänge zwischen den Versuchsparametern und der resultierenden Fasereinschwemmung in den Fließkanal

ist vor allem die dadurch entstehende Auswirkung auf die Festigkeit relevant. Sofern sich die Fasereinschwemmung nicht auf die mechanische Festigkeit auswirkt, lassen sich Fließkanäle unabhängig von den mechanischen Bauteilanforderungen positionieren. Sofern die Festigkeit durch Fließkanäle beeinflusst wird, muss dies bei der Auslegung berücksichtigt werden.

Die Analyse der Fasereinschwemmung zeigt, dass bei den kleinen Fließkanalquerschnitten keine Ondulation der lasttragenden Lagen auftritt. Im Vergleich dazu ist bei jedem großen Fließkanalquerschnitt eine Ondulation der lasttragenden Lagen zu beobachten. Abbildung 4.9 zeigt den Vergleich zwischen den drei Fließkanalquerschnittskonfigurationen.

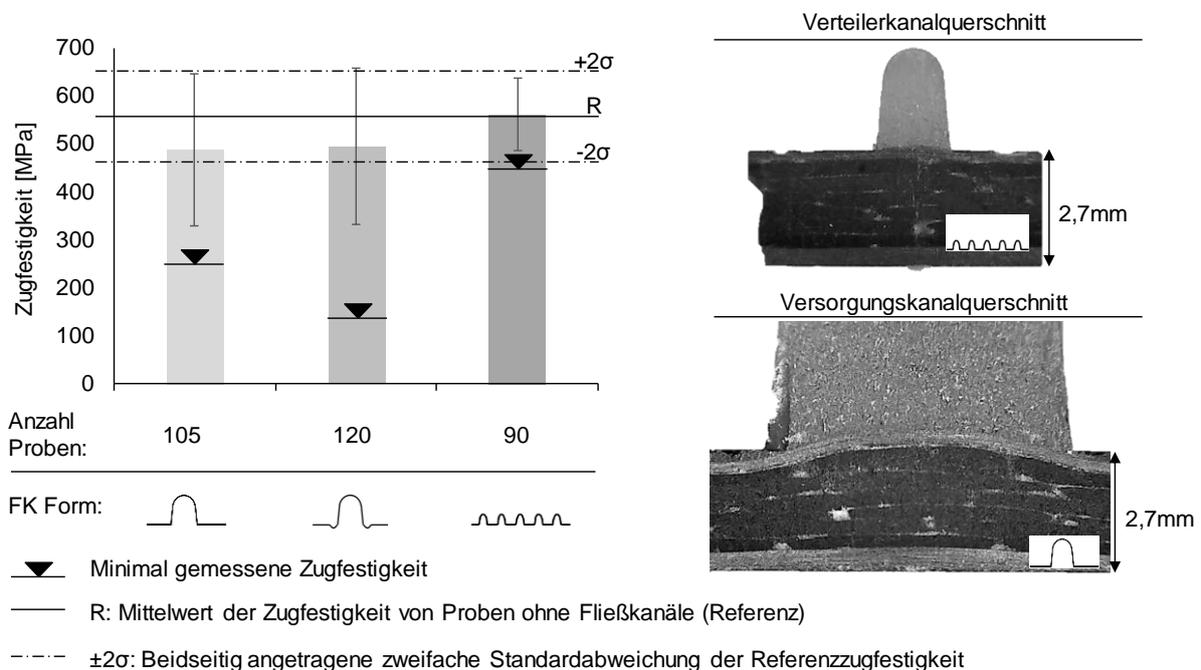


Abbildung 4.9: Vergleich zwischen Versorgungskanal (mit seitlicher Verprägung) und Verteilerkanal hinsichtlich Zugfestigkeit mit den Referenzproben ohne Fließkanal (mit R ($\pm 2\sigma$) gekennzeichnete Linie).

Auf der rechten Seite ist jeweils ein Schlichtbild zum jeweiligen Fließkanal dargestellt. Im Balkendiagramm auf der linken Seite ist die gemessene Zugfestigkeit nach der Norm [93] für die drei verschiedenen Fließkanäle aufgetragen. Unterhalb des Diagramms ist die jeweilige Menge an Prüfkörpern aufgeführt. Die unterschiedliche Anzahl an Prüfkörpern ergibt sich aus der Gruppierung der Einflussparameter des ursprünglichen Versuchsplans. Während für die insgesamt 90 Prüfkörper mit fünf kleinen Fließkanälen kein Einfluss auf die statische Zugfestigkeit zu beobachten ist,

stellt sich dies für die anderen beiden Geometrien anders dar. Die Probenposition, die Lagenaufbauorientierung, der seitliche Preformeinschnitt und der Abstand zum Angusspunkt haben in Kombination mit den kleinen Fließkanälen keine Auswirkung gezeigt. Die große Standardabweichung bei den beiden großen Fließkanalquerschnitten deutet darauf hin, dass eine genaue Differenzierung der Einflussparameter notwendig ist. Der auftretende Minimalwert der Zugfestigkeit wird als Pfeil dargestellt. Obwohl der Mittelwert der Zugfestigkeit sich nur um ca. 13 % im Vergleich zu den Referenzproben ohne Fließkanal verschlechtert, zeigen die Minimalwerte in Kombination mit der großen Standardabweichung, wie gravierend der Festigkeitsverlust sein kann. Zur weiteren Analyse der Einflussparameter hinsichtlich der Festigkeit werden die Kombinationen mit den kleinen Fließkanälen nicht weiter betrachtet.

Abbildung 4.10 stellt den Vergleich zwischen der Ondulation und der resultierenden Zugfestigkeit dar. Um den Effekt der Probenposition von der Lagenaufbauorientierung zu trennen, zeigen die dargestellten Balken nur die Lagenaufbauten 1 und 2. Die Zugfestigkeit ist umgekehrt proportional zum Verlauf der Ondulation.

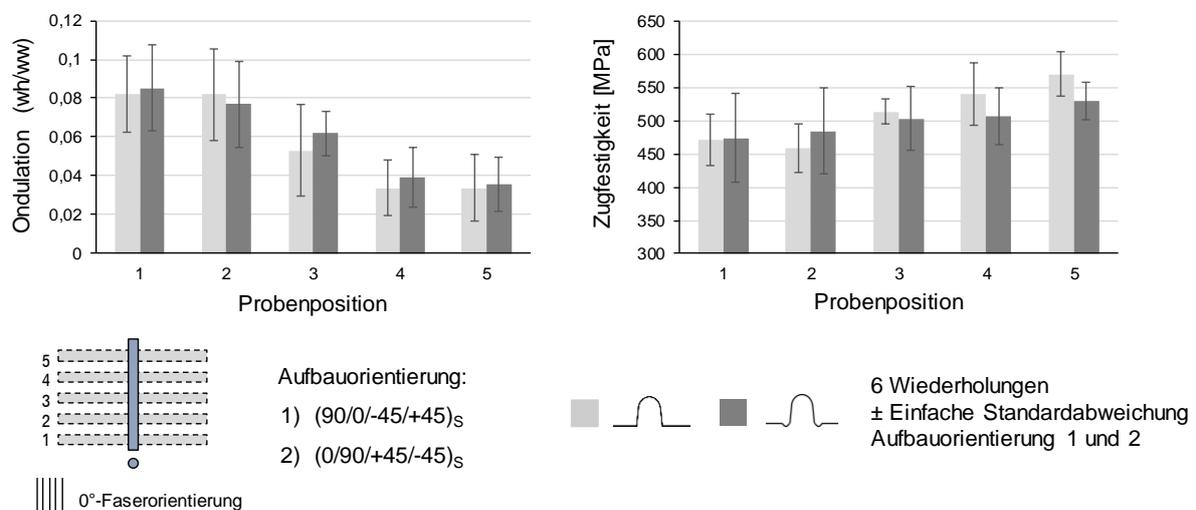


Abbildung 4.10: Zusammenhang zwischen Probenposition, Ondulation und Zugfestigkeit.

Analog den in [83] aufgezeigten Wirkzusammenhängen zwischen Festigkeit und Welligkeit, kann als primäre Ursache für den Festigkeitsverlust die Ondulation der lasttragenden Lage identifiziert werden.

Neben der Zugfestigkeit ist vor allem die Druckbelastung der Ondulation wichtig. Nach [83] wird die Induktion von interlaminaren Zugspannungen in Folge von transversalen

Dehnungen der ausgelenkten Fasern bei einer Druckbelastung verstärkt. Deswegen wird in einer nachgelagerten Versuchsreihe die Auswirkung von Fließkanälen auf die Druckfestigkeit nach der Prüfnorm [94] untersucht. Die variablen Einflussparameter reduzieren sich auf die Fließkanalgeometrie (Verteilerkanal / Versorgungskanal ohne Verprägung) und die Probenposition. Die ermittelten Druckfestigkeiten sind in Abbildung 4.11 dargestellt. Bedingt durch die Spezifikation der freien Prüflänge in der Prüfnorm [94] ist auf der Probe nur Platz für einen Fließkanal. Die restlichen vier Fließkanäle werden für die Proben mit fünf Verteilerkanälen vor der Prüfung abgefräst. Die Ergebnisse zeigen den gleichen Zusammenhang wie die Zugprüfungsergebnisse. Für die kleinen Fließkanäle ist keine Auswirkung zu erkennen, obwohl für die gemittelte Druckfestigkeit nicht hinsichtlich der Probenposition differenziert wird. Bei den großen Fließkanälen reduziert sich die Druckfestigkeit je näher sich die Proben am Angusspunkt befinden.

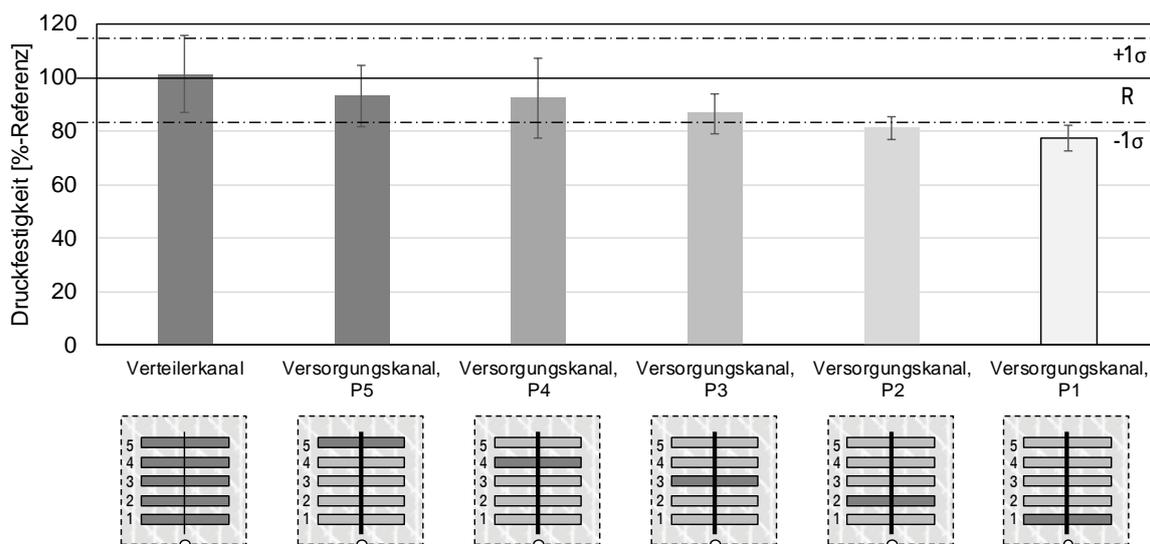


Abbildung 4.11: Einfluss von Fließkanalquerschnittsgröße und Probenposition auf die Druckfestigkeit.

Zusammenfassend wirken sich Fließkanäle nur dann auf die statische Festigkeit aus, wenn im Fließkanalbereich lasttragende Fasern onduliert werden. Tritt keine Ondulation auf, wird die statische Festigkeit nicht verringert. Die Untersuchung zeigt, dass die Fasereinschwemmung und die Ondulation von Einzellagen durch Verwendung von schmalen Fließkanälen vermeidbar sind. Somit sind für das Gewicht und die Festigkeit von Bauteilen kleine, schmale Fließkanäle von Vorteil. Auf Basis der Versuchsergebnisse bedeutet das, dass Verteilerkanäle schmäler als 1,5 mm sein sollten. Neben Bauteilgewicht und statischer Festigkeit sind aber auch noch weitere

Eigenschaften zu berücksichtigen. Insbesondere der zur Verfügung stehende Bauraum kann die mögliche Höhe von Fließkanälen limitieren. Darüber hinaus ergeben sich hinsichtlich der Positionierung Restriktionen durch Fügeflächen, für die die Auswirkung der Fließkanäle in diesem Bereich erst noch untersucht werden muss. Außerdem müssen je nach Bauteilanforderungen auch weitere mechanische Eigenschaften, wie beispielsweise die dynamische Festigkeit und das Ermüdungsverhalten, abgesichert werden.

5 Auslegungsrichtlinien und Anwendungsbeispiele

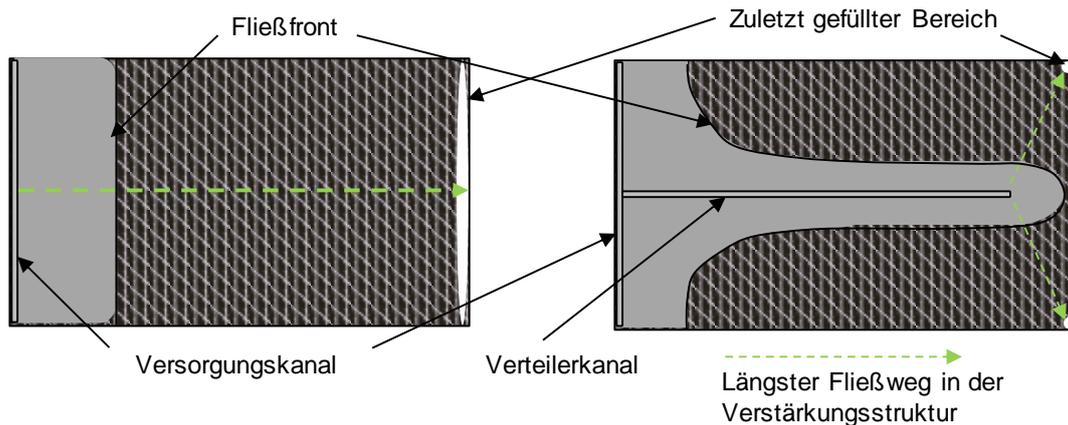
Das Ziel dieses Kapitels ist die Formulierung von Richtlinien zur Auslegung des werkzeugseitigen Verteilersystems. Ausgehend von den Wirkzusammenhängen zwischen Verteilersystem und Verstärkungsstruktur hinsichtlich Prozess- und Bauteileigenschaften wird die optimale Dimensionierung der Fließkanäle aufgezeigt. Diese hängt zum einen von den verschiedenen Einflussparametern und zum anderen vom jeweiligen Optimierungsziel ab. Die Richtlinien werden anhand eines Anwendungsbeispiels validiert. Im Ausblick wird ausgehend von den im Stand der Technik aufgezeigten Ansätzen zur Topologieoptimierung und den Ergebnissen des Anwendungsbeispiels die mögliche numerische Auslegung des Verteilersystems diskutiert und die dafür notwendigen Schritte entlang der Werkzeugauslegung aufgezeigt.

5.1 Richtlinien zur Verteilersystemgestaltung

Die Kombination aus den prozess- und bauteilspezifischen Anforderungen an das Verteilersystem zeigt die Rahmenbedingungen für die Anwendungsmöglichkeiten von Fließkanälen auf. Auf der einen Seite können Fließkanäle den Fließweg, den das Fluid durch die Verstärkungsstruktur fließen muss, wesentlich reduzieren. Dadurch kann der Injektionsdruck und / oder auch die Injektionszeit wesentlich reduziert werden. Auf der anderen Seite müssen auch die Auswirkungen auf das Bauteilgewicht und die mechanischen Eigenschaften des Bauteils berücksichtigt werden. Durch die Kombination der Rahmenbedingungen lässt sich eine Aussage hinsichtlich des Anwendungsbereichs von Fließkanälen formulieren.

Zunächst sollte bei der Einbringung von Fließkanälen deren Auswirkung auf den Fließweg und den Fließfrontverlauf berücksichtigt werden. Dazu ist in Abbildung 5.1

schematisch die Einbringung eines Fließkanals dargestellt. Auf der linken Seite zeigt das Bild beispielhaft wie sich die Fließfront ohne Fließkanal kurz nach Start der Injektion ausbildet. Die rechte Seite zeigt den Fließfrontverlauf mit einem mittigen Fließkanal. Der größte Stellhebel hinsichtlich des Injektionsdrucks bzw. der Injektionszeit ist der Fließweg in der Verstärkungsstruktur (grün, gestrichelter Pfeil). Dieser wird durch möglichst zentrale, gleichmäßig verteilte Anordnungen von Fließkanälen minimiert.



Versorgungskanal	Verteilerkanal
- Transportiert das Fluid über weite Distanzen über die Bauteiloberfläche	- Verteilt das Fluid über die Bauteiloberfläche
- Einzelne, große Fließkanäle	- Mehrere, kleine Fließkanäle
- Verläuft am Rand eines Bauteils	- Verläuft über die Bauteiloberfläche
- Direkt verbunden mit dem Angusspunkt	- Zweigt von einem Versorgungskanal ab

Abbildung 5.1: Auswirkung der Einbringung von Fließkanälen auf Fließweg und Fließfrontverlauf.

Hierbei sollte zwischen Versorgungs- und Verteilerkanälen unterschieden werden. Versorgungskanäle transportieren, analog dem Beispiel einer Autobahn aus der Einleitung, das Fluid vom Angusspunkt aus über weite Strecken in der Kavität zu den Verteilerkanälen. In dem schematischen Beispiel aus Abbildung 5.1 wäre dies der Fließkanal am linken Rand der Form. Zwar fließt das Fluid auch vom Versorgungskanal aus in die Verstärkungsstruktur, allerdings ist das nicht ausschlaggebend für den längsten Fließweg durch die Form. Die Verteilerkanäle leiten das Fluid aus der Versorgungsstruktur über die Kavitätsfläche (Abbildung 5.1, rechtes

Bild). Dadurch verlaufen die Fließkanäle auch direkt auf der Bauteiloberfläche und nicht vorwiegend am Bauteilrand wie Versorgungskanäle.

Neben der Auswirkung auf den Fließweg verändern Fließkanäle auch den Fließfrontverlauf. Durch das Voraneilen des Fluids im Fließkanal verteilt sich dieses von dessen Seiten aus in die Verstärkungsstruktur (Wirkungsfläche A_1 , s. auch Abbildung 3.3). Dadurch wird die Fließfrontlänge temporär wesentlich vergrößert. Zusätzlich lässt sich hierüber der Bereich, der als letztes gefüllt wird, beeinflussen.

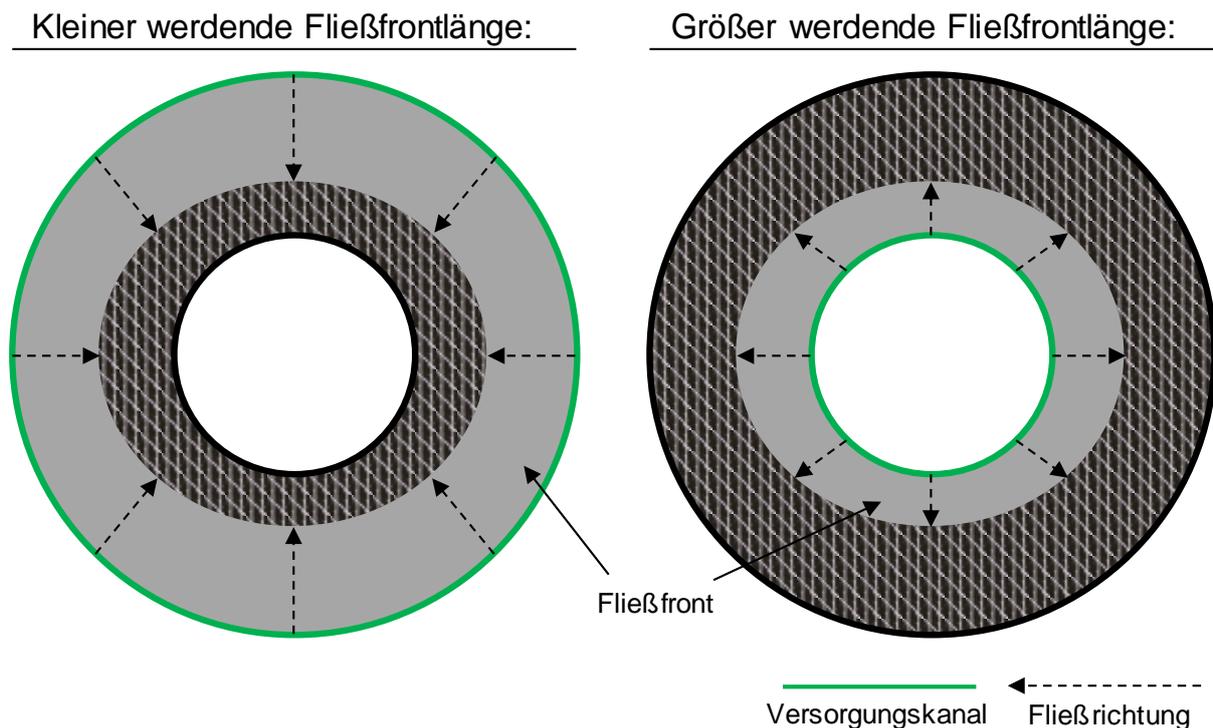


Abbildung 5.2: Schematisches Beispiel hinsichtlich Positionierung des Versorgungskanals in Bezug auf eine größer und kleiner werdende Fließfrontlänge.

Für den Druckanstieg während der Injektion ist darüber hinaus auch der Verlauf der Fließfrontlänge von Bedeutung. Dargestellt ist dieser Zusammenhang schematisch in Abbildung 5.2. Im rechten Beispiel vergrößert sich die Fließfront von innen nach außen. Unter Annahme einer konstanten Austragsleistung wird die relative Fließgeschwindigkeit langsamer, da sich der Volumenstrom über eine größer werdende Fließfrontlänge verteilen kann. Beim linken Beispiel führt die kleiner werdende Fließfrontlänge zu einer schneller werdenden Fließgeschwindigkeit. Dies sollte vor allem bei der Füllung von großen, komplexen Bauteilen berücksichtigt werden, in denen die Fließfrontlänge während der Injektion variieren kann. Durch

Fließkanäle kann dieser Verlauf beeinflusst und ein Zusammenlaufen der Fließfront in einzelnen Punkten gegebenenfalls vermieden werden.

Neben der Anordnung der Fließkanäle ist auch deren Querschnittsdimensionierung von Bedeutung. Die optimale Querschnittsform des Fließkanals hängt im Wesentlichen von den gewünschten Prozesseigenschaften, dem verfügbaren Bauraum und der Vermeidung von Fasereinschwemmung ab. Der Vergleich der Querschnittsformen ist in Abbildung 3.2 abgebildet. Sofern der Bauraum nicht während der Konstruktion vorgehalten wird, steht im Nachhinein oft nur eine begrenzte Höhe für den Fließkanal zur Verfügung. Prinzipiell bietet sich dadurch ein flacher Querschnitt an. Im Kontrast dazu ist der abgesetzte parabolische Querschnitt, der schmal und hoch dimensioniert ist, für die Prozesseigenschaften (Ersatzpermeabilität / Querschnittsfläche) vorteilhaft. Durch den schmalen Querschnitt kann die Fasereinschwemmung minimiert werden. Aus diesem Grund wird unter Voraussetzung von ausreichend Bauraum der abgesetzte, parabolische Querschnitt für Fließkanäle empfohlen. Die Vor- und Nachteile der in dieser Arbeit untersuchten Fließkanalquerschnittsformen sind als Übersicht in der Tabelle 5.1 aufgeführt.

Tabelle 5.1: Vergleich der verschiedenen Fließkanalquerschnittsformen.

Querschnittsform	 Halbkreis Querschnitt	 Parabolischer Querschnitt	 Abgesetzter Parabolischer Querschnitt
Prozesseigenschaften	-	0	+
Bauraum	+	0	-
Fasereinschwemmung	-	0	+

Die hinsichtlich der Prozesseigenschaften optimierte Querschnittsgröße des Fließkanals hängt von der Permeabilität der Verstärkungsstruktur und der Fließkanallänge ab. In der Fließkanallänge findet sich auch die Abhängigkeit von der Bauteilgeometrie wieder. Über die Relation zwischen der Permeabilität der Verstärkungsstruktur und der Querschnittsgröße des Fließkanals (auch über die Ersatzpermeabilität beschreibbar) kann der Verlauf der Fließfrontausbreitung beeinflusst werden. Je kleiner der Fließkanal ist, desto größer ist der Druckabfall über die Fließkanallänge. Dieser Druckabfall kann für ein angewinkeltes Ausbreitungsprofil

genutzt werden, verringert aber gleichzeitig auch den Volumenstrom durch den Fließkanal (s. auch Abbildung 3.17). Um die Größenordnung für einen Fließkanal mit abgesetztem, parabolischen Querschnitt zu bestimmen, kann die Gleichung 3-1 verwendet werden. Bei der Verwendung der Gleichung sollte Folgendes berücksichtigt werden:

- Bei einer Fließkanallänge wesentlich kleiner (größer) als 275 mm sollte auch der Fließkanalradius (Querschnitt), je nach gewünschtem Füllbild kleiner (größer) gewählt werden. (s. Abbildung 3.19)
- Das Verhältnis von K_1 zu K_2 hat einen Einfluss auf den resultierenden Wirkungsbereich des Fließkanals und muss bei der Positionierung und Auslegung berücksichtigt werden (s. Abbildung 3.11). Die Gleichung basiert auf einem isotropen, ebenen Permeabilitätstensor.
- Abweichend vom simulierten Permeabilitätsbereich auf dem die Gleichung basiert ($5,5 \text{ E-}12 \text{ m}^2$ bis $1 \text{ E-}09 \text{ m}^2$) kann die Gleichung zu nicht plausiblen Ergebnissen führen (s. Abbildung 3.22)
- Das gewünschte Füllbild und somit die optimale Fließkanalquerschnittsgröße hängt auch von der Fließkanalanordnung ab. Die Gleichung beschreibt einen alleinstehenden Fließkanal.

Betrachtet man die Abbildung 3.22 fällt auf, dass bei einer Permeabilität von kleiner als $\text{E-}12 \text{ m}^2$ der resultierende Fließkanalradius negativ wird. Unter Berücksichtigung der Faserarchitektur aus [95] zeigt sich, dass bei Verstärkungsstrukturen mit einer Permeabilität in dieser Größenordnung meist die inneren sogenannten Mesofließkanäle fehlen. Diese Fließkanäle innerhalb der Verstärkungsstruktur entstehen durch die Vernähung. In diesem Kontext könnten die betrachteten Verteilerkanäle als Makrokanäle bezeichnet werden. Ähnlich zu natürlichen Verteilerstrukturen (s. Vergleich aus Abbildung 1.3) ist die geeignete Aufteilung hinsichtlich Menge und Größe der einzelnen Kanäle von Bedeutung. Neben der gezielten Beeinflussung von Fließfrontverlauf und Injektionszeit muss bei der Einbringung von Fließkanälen auch deren Einfluss auf die Bauteileigenschaften berücksichtigt werden, insbesondere bei Verteilerstrukturen mit mehreren Verteilerkanälen. Dies gilt insbesondere wenn eine Verstärkungsstruktur mit einer sehr hohen Permeabilität (bspw. $\text{E-}08 \text{ m}^2$) verwendet wird. Für Verstärkungsstrukturen mit einer hohen Permeabilität können Fließkanäle zunehmend problematisch werden, da

diese auch größer dimensioniert werden müssen. In diesem Fall muss auch ein Einfluss auf den Verzug des Bauteils geprüft werden.

Außerdem zeigt sich bei der Untersuchung der Fasereinschwemmung, dass diese bei größeren Fließkanalquerschnitten zu finden ist. In dem durchgeführten Versuch trat bei den parabolischen, abgesetzten Querschnitten mit einem Radius von 0,75 mm keine Ondulation von lasttragenden Lagen und somit keine Beeinträchtigung der statischen Festigkeit auf.

Zusammenfassend wird empfohlen, bei Verstärkungsstrukturen mit einer sehr niedrigen Permeabilität (bspw. kleiner als $E-13 \text{ m}^2$) die Integration von Fließkanälen über eine geeignete Vernäherung der Verstärkungsstruktur zu prüfen. Bei Verstärkungsstrukturen mit einer sehr hohen Permeabilität (bspw. größer als $E-08 \text{ m}^2$) hingegen nimmt der negative Einfluss auf die Bauteileigenschaften (Gewicht und Festigkeit) zu. Für alle anderen Anwendungsfälle kann über eine geeignete Dimensionierung der Fließkanäle eine wesentliche Effizienzsteigerung erreicht werden. Durch kleine Fließkanalquerschnitte kann sowohl die Gewichtszunahme minimiert als auch eine Auswirkung auf die statische Festigkeit vermieden werden.

5.2 Anwendungsbeispiele

Zur Validierung der gewonnenen Erkenntnisse hinsichtlich der Wirkzusammenhänge zwischen Verstärkungsstruktur und werkzeugseitigem Verteilersystem wird ein geeignetes RTM-Werkzeug ausgewählt. Für diese Geometrie wird ein Verteilersystem konzipiert und simuliert. Im Anschluss werden die Auslegung des Verteilersystems und die Dimensionierung der Fließkanalquerschnittsgröße anhand von Füllstudien exemplarisch qualitativ validiert.

Ein repräsentatives Beispiel für mögliche Zielbauteile dieser Arbeit ist der von der BMW AG für das Fahrzeug „i3“ entwickelte äußere Seitenrahmen (s. Abbildung 2.2). Er besteht aus einzelnen Preforms, die in einem separaten Schritt vor dem RTM Prozess konfektioniert werden. Es wird angenommen, dass die faserfreien Zwischenräume in Überlappungsbereichen einzelner Preforms als Fließkanäle dienen. Dieser Vorhalt wird für die Beschnitttoleranz der Preforms benötigt. Für eine möglichst zentrale Positionierung des Versorgungskanals wird dieser zentral und umlaufend positioniert. Eine weitere Rahmenbedingung für die Positionierung der Fließkanäle ist der Entfall des Versorgungskanals nach dem Endkonturbeschnitt des Bauteils.

Dadurch wirkt sich dieser weder auf das Gewicht des Bauteils noch auf dessen Festigkeit aus. Die Zusammenhänge sind in Abbildung 5.3 dargestellt. Im oberen Teil der Abbildung ist der Seitenrahmen des BMW i3 gezeigt. Die umlaufende grüne Linie stellt den zentralen Versorgungskanal dar. Von diesem zweigen die, ebenfalls in grün eingezeichneten, Fließkanäle in den Überlappungsbereichen ab. Die sich daraus ergebende Fließfront ist gestrichelt abgebildet. Der Schnitt A-A unten links in der Abbildung zeigt die durch den Beschnittvorhalt entstehenden Fließkanäle (grüne Dreiecke). Der Schwellerbereich unten rechts in der Abbildung zeigt den für das folgende Prinzipbauteil relevanten Bereich, der vom Versorgungskanal und den beiden seitlichen Fließkanälen in den Überlappungsbereichen eingeschlossen wird.

Konfektioniertes Schalenbauteil (Seitenrahmen) als Zielbauteil für Verteilersysteme

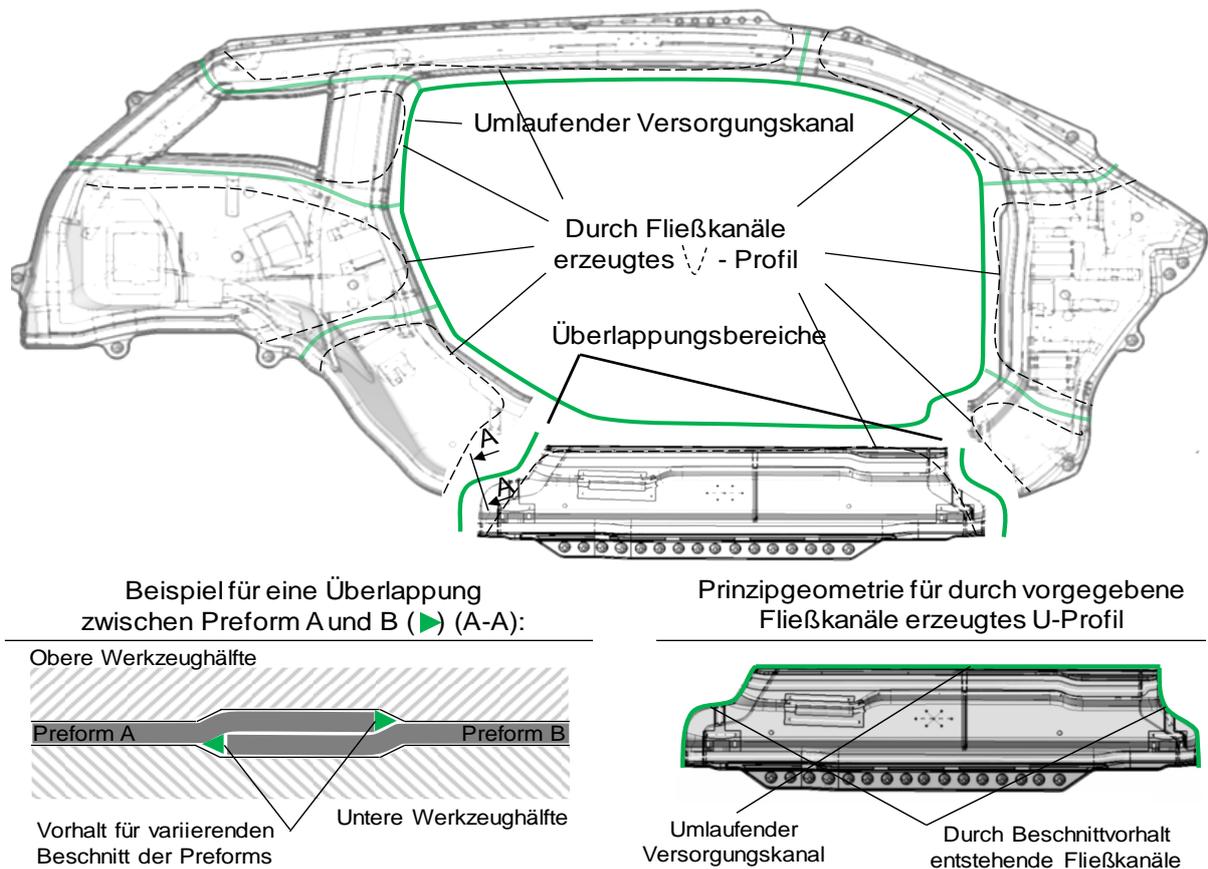


Abbildung 5.3: Zusammenhang zwischen repräsentativem konfektioniertem Schalenbauteil (Seitenrahmen vom BMW i3) und der Prinzipgeometrie.

Der Fließkanal im Überlappungsbereich und Versorgungskanal erzeugen eine Art U-Profil (s. Verlauf der gestrichelten Linie in der Abbildung 5.3). Dieses U-Profil ist repräsentativ und wird ebenfalls bei den anderen Abschnitten des Seitenrahmens durch die Kombination aus Überlappungen und Versorgungskanal erzeugt. Darüber

hinaus ähnelt dieses Muster dem Resultat der Verteilersystemtopologieoptimierung aus [64]. Zwischen den nebeneinander, oft parallel verlaufenden, Verteilerkanälen bilden sich ebenfalls jeweils kleinere U-Profile aus, die durch kleinere Fließkanalquerschnitte zu dem in Abbildung 3.18 beschriebenen V-Profil gewandelt werden können.

Für die Validierung des Füllverhaltens der Fließkanäle wird ein RTM-Werkzeug zur Herstellung einer sogenannten Stirnwand für die Fahrzeugkarosserie verwendet. Die Auslegung des Verteilersystems erfolgt auf Basis der in dieser Arbeit hergeleiteten Richtlinien, da kein numerisches Optimierungsprogramm zur Verfügung steht. In Abbildung 5.4 ist das verwendete Werkzeug mit der schematischen Anordnung der Fließkanäle dargestellt. Die Position des Versorgungskanals ergibt sich aus dem in Abbildung 5.3 hergeleiteten U-Profil.

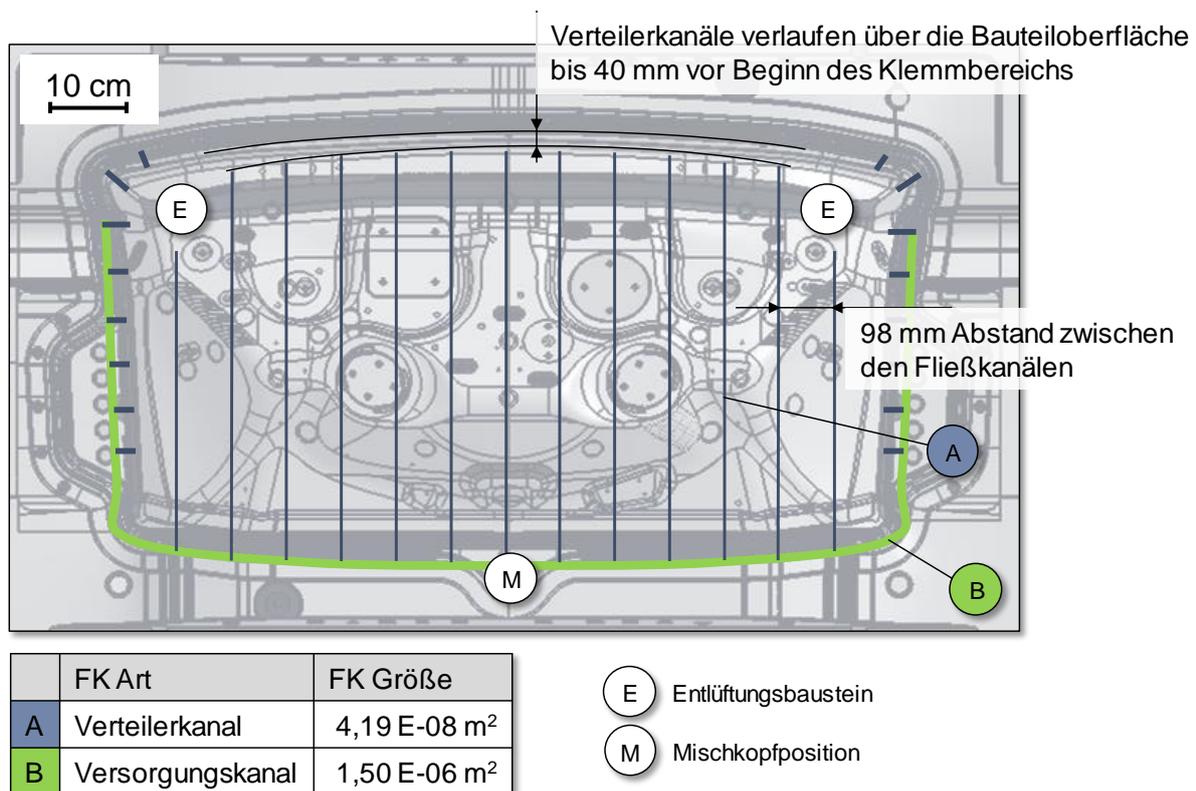


Abbildung 5.4: Schematische Darstellung des Versuchswerkzeugs Stirnwand.

Die Anordnung der Verteilerkanäle erfolgt möglichst parallel zueinander, um das V-Profil der Fließfront zu realisieren und evaluieren. Hierzu wird in Anlehnung an die in Abbildung 3.25 dargestellten Simulationsergebnisse hinsichtlich der Anordnungs-dichte ein Abstand von 98 mm gewählt. Daraus resultieren 13 gleichmäßig verteilte Fließkanäle. Die Ergebnisse aus Abbildung 3.24 zur Länge von Verteilerkanälen

zeigen, dass diese möglichst maximal gewählt werden muss. Die Fließkanäle reichen deswegen bis auf einen möglichst geringen Abstand an die gegenüberliegende Klemmung (40 mm) heran. Ein Verteilerkanal ist dadurch ca. 800 mm lang. Weiterhin wird für das Ende der Fließfront auch die Position der bereits bestehenden und damit lokal vorgegebenen Entlüftungsbausteine (in der Abbildung mit „E“ gekennzeichnet) berücksichtigt, wodurch die beiden äußeren Verteilerkanäle kürzer sind als die anderen. Für die angenommene K1 Permeabilität der Preform ($3 \text{ E-}11 \text{ m}^2$) ergibt sich aus der Gleichung 5-1 ein Fließkanalradius von 0,55 mm. Auf Grund von fertigungstechnischen Rahmenbedingungen hinsichtlich der Fräskopfgröße wird ein Radius von 0,5 mm gewählt. Daraus ergibt sich für die Verteilerkanäle eine Ersatzpermeabilität von $4,19 \text{ E-}08 \text{ m}^2$. Unter Berücksichtigung der Fließkanallänge sollte sich somit das gewünschte lang gezogene V-Profil ergeben.

Aus der Werkzeugoberfläche wird das FEM Netz für die Füllsimulation generiert. Die Fließkanäle sind hierbei als zur Werkzeugoberfläche senkrechte Flächen modelliert. Für die Preformflächen wird auf Basis von bestehenden Messergebnissen eine K1 Permeabilität von $3 \text{ E-}11 \text{ m}^2$ und K2 Permeabilität von $1,5 \text{ E-}11 \text{ m}^2$ angenommen.

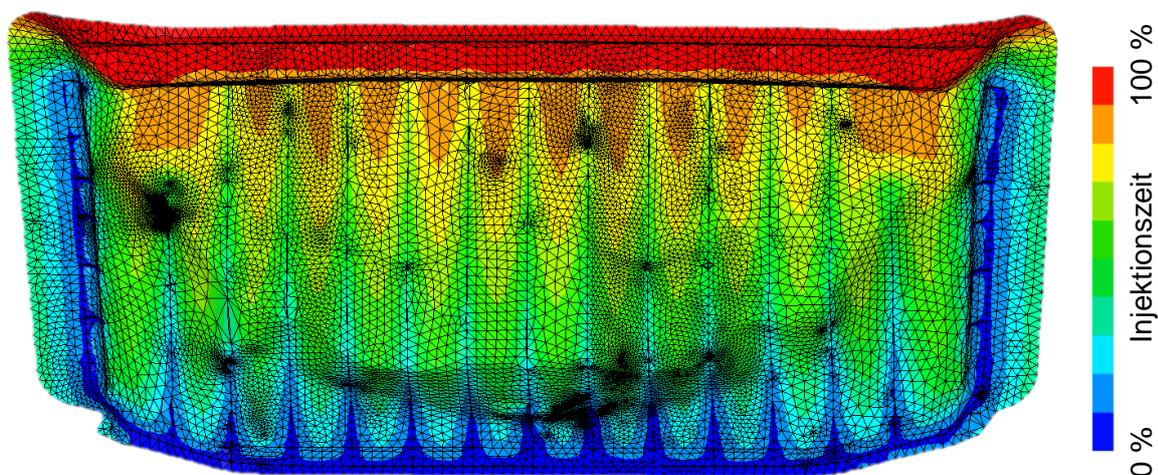


Abbildung 5.5: Ergebnis der Füllsimulation für den Fließfrontverlauf.

Der resultierende Fließfrontverlauf ist in Abbildung 5.5 qualitativ dargestellt. Insgesamt entspricht der simulierte Fließfrontverlauf dem gewünschten Füllverhalten. Die Fließfront verläuft zwischen den einzelnen Fließkanälen v-förmig gerichtet zum Bauteilende hin. Es ergeben sich keine lokalen Luftpinschlüsse. Der resultierende Forminnendruck hängt von der gewählten Austragsleistung ab. Bei einem konstanten Injektionsdruck von 3 bar ergibt sich eine Injektionszeit von 260 s. Eine Füllsimulation

ohne Verteilerkanäle erreicht nach 1800 s nur 25% Formfüllung. Das Verteilersystem wird im Anschluss konstruktiv in die Werkzeugdaten übertragen. Für funktionsbildende Geometrien müssen weitere lokale Anpassungen des Fließkanalverlaufs gemacht werden, sodass die Fließkanäle leider nicht ideal, möglichst parallel zueinander, verlaufen.

Die mit dem Werkzeug hergestellten Füllstudien sind exemplarisch in Abbildung 5.6 dargestellt. Die linke Füllstudie zeigt den Fließfrontverlauf bei 300 g (15%) die rechte Füllstudie bei 900 g (45%) injizierter Matrix. Die Füllstudien verdeutlichen im Vergleich mit der virtuellen Auslegung des Verteilersystems, dass das V-Profil zwischen den Fließkanälen erreicht wird.

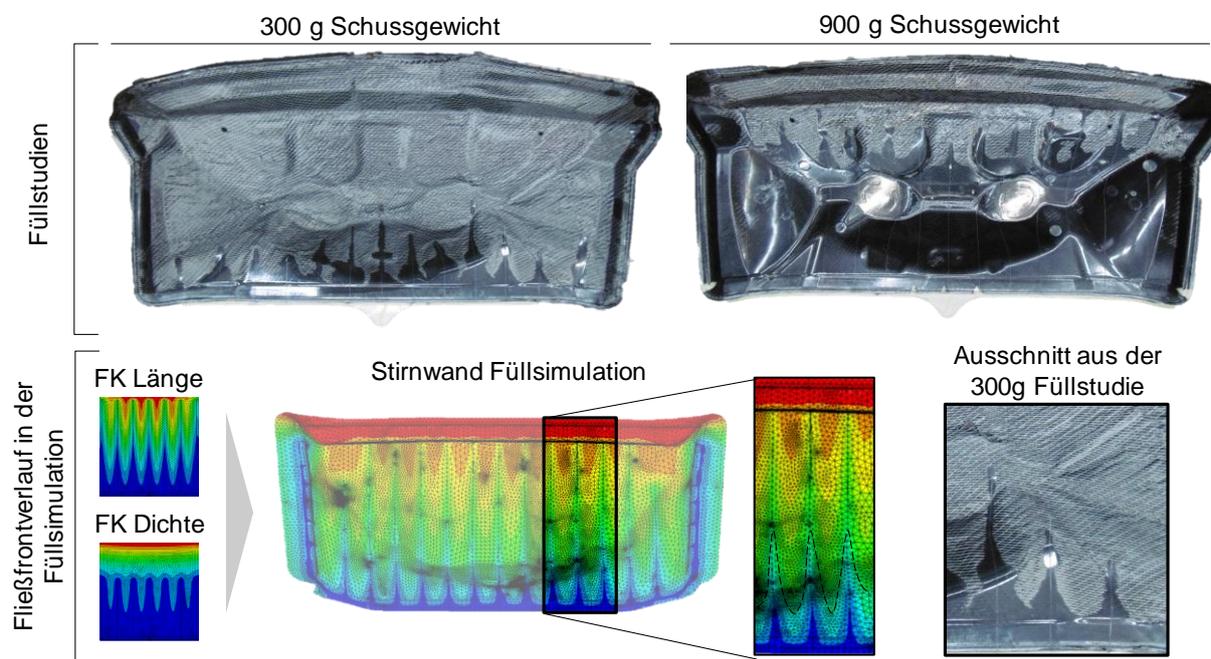


Abbildung 5.6: Füllstudien bei 300 g und 900 g Schussgewicht.

Allerdings zeigen die Füllstudien auch ein Voraneilen der Matrix in gekrümmten Bereichen. Dies führt dazu, dass die Fließfront ungewollt Flächen einschließt und eine erhöhte Porosität im Endbauteil zu beobachten ist. Das vollständig gefüllte Bauteil ist aber nach 17,8 s Injektionszeit (konstante Austragsleistung von 118 g/s) vollständig gefüllt. Die Radien können hinsichtlich dem gewünschten Füllverhalten entsprechend angepasst werden (siehe auch Vorgehen in [33]), aber dies hätte bei dem bereits existierenden Werkzeug zu einer wesentlichen Kostenmehrung geführt und wird deswegen in dieser Arbeit nicht betrachtet.

5.3 Einbindung der Fließkanaldimensionierung in die Topologieoptimierung

Bei der Positionierung des Verteilersystems sollte auch die lokale Permeabilitätsverteilung berücksichtigt werden. Diese kann in Folge von Scherung und gekrümmten Bereichen sehr unterschiedlich innerhalb der Preform verteilt sein [96,97]. Ausgehend von der im Stand der Technik erklärten sequentiellen Füllsimulation, ist die verwendete Netzmodellierung für die Füllsimulation der Stirnwand im Vergleich zu einer aufeinander aufbauenden Simulation von textilen Vorprozessen und Füllung der Form vereinfacht. Die ideale, sequentielle Simulation bedeutet auch, dass Preform- und RTM-Werkzeuge nacheinander ausgelöst werden müssen. Für eine realitätsnahe Füllsimulation ist die Kenntnis der lokalen Permeabilitäts- und Dickenverteilung notwendig. Diese geht zwar aus der Drapiersimulation hervor, sollte allerdings auch mit Hilfe des realen Preforms validiert werden.

Aus diesem Grund verläuft die virtuelle Werkzeugauslegung sowohl sequentiell als auch simultan zueinander. Die von [61], [65] und [67] untersuchten Optimierungsansätze für das Verteilersystem basieren zunächst auf den geometrischen Längenverhältnissen, kombiniert mit einer homogenen Permeabilitätsverteilung. Aus der Charakterisierung der Interaktion zwischen Fließkanal und Verstärkungsstruktur resultiert, dass die Verteilung der Permeabilität einen wesentlichen Einfluss auf die Positionierung der Fließkanäle haben kann. Die Kombination aus einer aufeinander aufbauenden Netzerstellung für die Füllsimulation und der numerischen Optimierung der Fließkanalpositionierung ergibt eine genauere, auf die lokalen Eigenschaften der Verstärkungsstruktur abgestimmte, Verteilung. Ein Beispiel für die Abfolge zur virtuellen Auslegung des Verteilersystems ist in Abbildung 5.7 dargestellt und kann den in [33] hergeleiteten Ablauf für die sequentielle Füllsimulation ergänzen.

Zunächst wird für die Füllsimulation ein Materialmodell benötigt, welches sowohl die Matrix als auch die Verstärkungsstruktur beschreibt. Dieses wird sowohl für eine Topologieoptimierung als auch für die Füllsimulation benötigt. Allerdings zeigt das Anwendungsbeispiel, dass für Bauteile in denen die Verstärkungsstruktur keine homogene Permeabilitätsverteilung aufweist, die Modellierung der Permeabilität über eine vorhergehende Drapiersimulation notwendig ist.

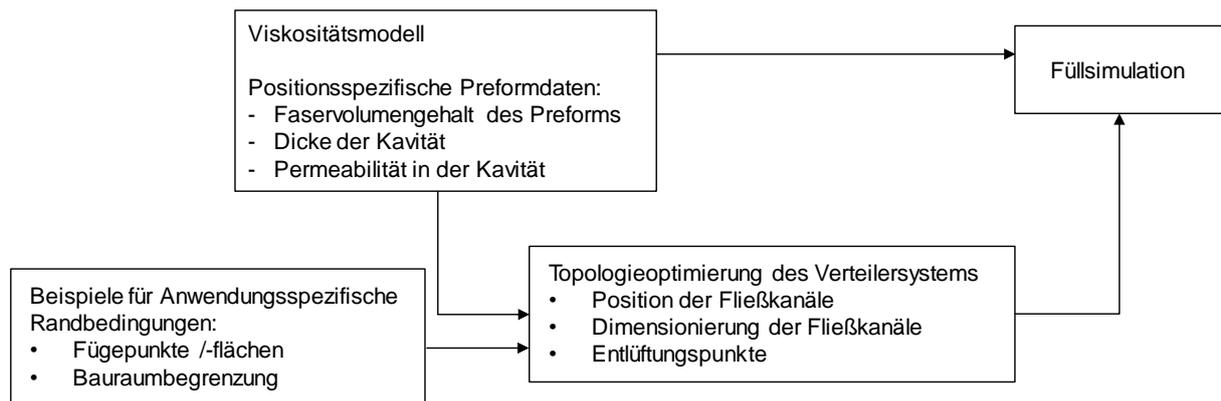


Abbildung 5.7: Beispielhafte Abfolge zur virtuellen Auslegung des Verteilersystems.

Ohne diese werden die lokalen Unterschiede in der Permeabilität, insbesondere auch mögliche ungewollte Hohlräume in der Kavität in Folge von Radien, nicht ausreichend berücksichtigt. Das Voraneilen des Fluids kann dann zu Lufteinschlüssen führen. Neben den lokalen Verstärkungsstruktureigenschaften müssen anwendungsfall-spezifisch auch weitere Anforderungen bei der Positionierung berücksichtigt werden. In Bezug auf automobile Anwendungen sind dies beispielweise Fügepunkte /-flächen oder eine begrenzte zur Verfügung stehende Bauraumhöhe. Unter Berücksichtigung dieser beiden Komponenten kann über die Topologieoptimierung die optimale Positionierung der Fließkanäle bestimmt werden. Auf Basis des resultierenden Füllbilds können dann die Positionen der Entlüftungspunkte festgelegt werden. Mit Hilfe der mit der Position korrespondierenden Permeabilitätswerte der Verstärkungsstruktur ermöglicht diese Arbeit die geeignete Dimensionierung der Fließkanalquerschnitte.

6 Zusammenfassung

Fließkanäle ermöglichen durch einen kürzeren Fließweg in der textilen Verstärkungsstruktur die Reduktion der Injektionszeit und des Injektionsdrucks im RTM Verfahren. Ziel der Arbeit ist die optimale Dimensionierung des Fließkanalquerschnitts hinsichtlich der Prozess- und Bauteileigenschaften. Die Auswirkung auf die Injektionszeit und den Fließfrontverlauf wird sowohl experimentell als auch simulativ untersucht. Ein weiterer Aspekt ist die Robustheit der Injektion gegenüber Faserverdichtungen. Die Beeinflussung der Bauteileigenschaften wird hinsichtlich Gewicht und statischer Festigkeit untersucht.

Zur Charakterisierung des Fließfrontverlaufs wird ein bestehender Prüfstand weiterentwickelt. Das weiterentwickelte Messsystem erfasst den Fließfrontverlauf mit einer Auflösung von einer Füllzeit pro $0,14 \text{ mm}^2$ ($1,4 \text{ E}07$ einzelne Zeitwerte pro Experiment). Durch Zentrierung und Referenzierung der Versuche zueinander sind die Bestimmung von Mittelwerten und der quantitative Vergleich von Fließfrontverläufen möglich.

Der Fließkanalwirkungsbereich interagiert mit der Ausrichtung des Permeabilitätstensors. Basierend auf den Versuchsergebnissen wird der Wirkungsbereich des Fließkanals in zwei Abschnitte unterteilt. Die Fließfront breitet sich einerseits parallel zu den Seiten und andererseits radial vom Ende des Fließkanals aus. Neben der Permeabilitätsausrichtung der Verstärkungsstruktur ist der Verlauf der Querschnittsgröße über die Fließkanallänge von Bedeutung. Restriktionen in Fügeflächen können eine Unterbrechung des Fließkanalverlaufs erfordern. Die Versuche in dieser Arbeit zeigen, dass eine Unterbrechung des Fließkanals wie eine Drossel wirkt. Ein sich über die Fließkanallänge verkleinernder Fließkanalquerschnitt wirkt sich hingegen positiv auf den Fließfrontverlauf aus. Durch die kontinuierliche Reduktion des Querschnitts über die Fließkanallänge wird in der betrachteten Versuchsanordnung ein Lufteinschluss vermieden.

Der Einfluss der Fließkanalquerschnittsgröße auf die Injektion wird experimentell anhand von drei verschiedenen Querschnittsgrößen mit der folgenden Ersatzpermeabilität $4,2 \text{ E}-08 \text{ m}^2$, $5,1 \text{ E}-07 \text{ m}^2$ und $1,5 \text{ E}-06 \text{ m}^2$ untersucht. Der Einfluss der Fließkanal-querschnittsgröße auf die Injektionszeit verläuft asymptotisch. Die korrespondierende Füllsimulation bestätigt dieses Ergebnis. Die experimentellen Beobachtungen werden anschließend inter- und extrapoliert (Fließkanalersatzpermeabilität im Bereich von $\text{E}-10 \text{ m}^2$ bis $\text{E}-07 \text{ m}^2$). Die Ergebnisse zeigen, dass für Kohlenstofffasergelege bereits sehr kleine Fließkanäle (Ersatzpermeabilität des Fließkanals K_{FK} in einer Größenordnung $\text{E}-08 \text{ m}^2$) zu einer wesentlichen Reduktion der Injektionszeit (bei konstantem Injektionsdruck) führen. Auf Basis der Simulationsergebnisse wird eine Formel für den Zusammenhang zwischen optimaler Fließkanalquerschnittsgröße und Permeabilität der Verstärkungsstruktur hergeleitet. Bei kleinen Fließkanal-querschnitten führt ein Druckabfall über die Fließkanallänge zu einer angewinkelten Ausbreitung der Fließfront. Bei parallel

zueinander verlaufenden Fließkanälen erzeugt dies ein V-Profil zwischen den Kanälen.

Mit größerer Fließkanallänge kann ebenfalls eine angewinkelte Fließfrontausbreitung entstehen. Die Untersuchungen zu Verteilersystemen, die aus mehreren Fließkanälen bestehen, zeigen, dass der Fließfrontverlauf durch die Dimensionierung des Versorgungskanals beeinflusst wird.

Die Optimierung hinsichtlich eines reproduzierbaren Füllverhaltens wird über die Auswertung des Fließfrontverlaufs auf Bildpunktebene untersucht. Hierzu werden in eine Verstärkungsstruktur Textilstreifen eingebracht zur repräsentativen Darstellung einer Falte. In der anschließenden Injektion wird der Einfluss der Textilstreifen auf das Füllverhalten in Wechselwirkung mit dem Fließkanalverteilersystem analysiert. Die Ergebnisse zeigen, dass der Fließweg zur Faserbündelverdichtung und über diese hinaus bis zum Fließwegende von Bedeutung ist. Dieser Fließweg kann über Fließkanäle beeinflusst werden. Während bei den Versuchen mit kurzen Fließkanälen die eingebrachten Textilstreifen zu einer Steigerung der Injektionszeit um bis zu 44% führen, verlängerte sich die Injektionszeit beim Verteilersystem mit längeren Fließkanälen nur um 5%.

Neben der Auswirkung auf den Fließfrontverlauf und die Injektionszeit wird auch die Auswirkung auf das Bauteilgewicht und die statische Festigkeit untersucht. Anhand eines Fallbeispiels wird der geringe Einfluss der kleinen Verteilerkanäle auf das Bauteilgewicht veranschaulicht. Über eine gleichmäßige Verteilung der Fließkanäle wird ein repräsentatives Volumenelement gebildet. Daraus lässt sich zeigen, dass der Einfluss auf das Bauteilgewicht solange gering ist (wesentlich kleiner als 1%), wie die Fließkanalquerschnitte sehr klein sind (Ersatzpermeabilität des Fließkanals K_{FK} in einer Größenordnung $E-08 \text{ m}^2 - E-07 \text{ m}^2$).

Die Schliffbilder von Fließkanälen auf bestehenden Bauteilen, die im RTM Verfahren gefertigt werden, zeigen eine Auslenkung der Fasern im Fließkanalbereich. Charakteristisch für die Auslenkung ist die Vergrößerung des Faserbündelquerschnitts. Dies wird als Fasereinschwemmung definiert. Die Einflussparameter auf die Entstehung von Fasereinschwemmung im Fließkanalbereich werden experimentell untersucht. Die Versuche zeigen, dass bei den gewählten Konfigurationen bei kleinen Fließkanälen keine Fasereinschwemmung auftritt. Neben dem Einfluss des

Fließkanalquerschnitts beeinflusste auch die Probenposition das Auftreten von Fasereinschwemmung. Je näher der Fließkanalquerschnitt am Angusspunkt ist, desto höher ist das Risiko für Fasereinschwemmung. Über den Lagenaufbau kann die Fasereinschwemmung ebenfalls beeinflusst werden. Allerdings ist dieser Einfluss geringer als der des Fließkanalquerschnitts und der Position. Bei den Zug- und Druckprüfungen hängt die Auslenkung lasttragender Fasern mit der Reduktion der statischen Festigkeit zusammen. Solange keine Ondulation der lasttragenden Fasern auftritt, beeinflussen Fließkanäle die statische Festigkeit nicht.

Die Erkenntnisse aus den Untersuchungen werden in Richtlinien zur Auslegung des Fließkanalquerschnitts überführt. Anschließend werden die Erkenntnisse und Richtlinien mit einem Anwendungsbeispiel validiert. Hierzu wird ein exemplarisches Verteilersystem auf ein bestehendes Bauteil (Stirnwand) übertragen. Die im Vorfeld durchgeführte Füllsimulation zeigt, dass mit der Auslegung die gewünschte V-förmige Fließfrontausbreitung erreicht wird. Die Füllstudien stimmen hinsichtlich der V-förmigen Fließfrontausbreitung gut mit der Simulation überein. Allerdings sind auf Grund von einem Voraneilen der Fließfront in Radialbereichen vermehrt Lufteinschlüsse zu beobachten. Aus diesem Grund wird empfohlen, bei der numerischen Optimierung der Fließkanalverteilung die lokale Permeabilitäts- und Spaltverteilung aus der Drapiersimulation zu berücksichtigen. Zukünftig können die Ergebnisse dieser Arbeit zur Dimensionierung von Fließkanälen in der virtuellen Optimierung der Verteilung von Fließkanälen in der Form genutzt werden. Neben der numerischen Optimierung der Positionierung von Fließkanälen ergeben sich noch weitere Forschungsfragen. Vorgelagert zur Injektion findet die Formevakuierung im RTM Prozess statt. Es ist denkbar, dass Fließkanäle vor der Injektion zur Evakuierung genutzt werden können. Hinsichtlich den Bauteileigenschaften müssen noch weitere Randbedingungen, wie beispielsweise der Einfluss auf den Bauteilverzug und die Verbindungstechnik, untersucht werden.

Literaturverzeichnis

- [1] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. Klimaschutzplan 2050: Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung. Regierungsveröffentlichung; 2016.
- [2] United Nations. Data Booklet Urbanization Policies. Policies on Spatial Distribution and Urbanization 2016;2016.
- [3] Hüttl RF (ed.). Elektromobilität - Potenziale und wissenschaftlich-technische Herausforderungen. Berlin, Heidelberg: Springer; 2010.
- [4] Henning F, Moeller E. Handbuch Leichtbau: Methoden, Werkstoffe, Fertigung. München: Hanser; 2011.
- [5] Kampker A, Vallée D, Schnettler A. Elektromobilität: Grundlagen einer Zukunftstechnologie. Berlin: Springer Vieweg; 2013.
- [6] Klein B. Leichtbau-konstruktion: Berechnungsgrundlagen Und Gestaltung: Vieweg + Teubner Verlag; 2014.
- [7] Neitzel M, Mitschang P, Breuer U (eds.). Handbuch Verbundwerkstoffe: Werkstoffe, Verarbeitung, Anwendung. 2nd ed. München: Hanser; 2014.
- [8] Kraus, T., Kühnel, M. Composites-Marktbericht 2014: Marktentwicklungen, Trends, Ausblicke und Herausforderungen; 2014.
- [9] Kraus, T., Kühnel, M. Composites-Marktbericht 2015: Marktentwicklungen, Trends, Ausblicke und Herausforderungen; 2015.
- [10] Kraus, T., Kühnel, M. Composites-Marktbericht 2016: Marktentwicklungen, Trends, Ausblicke und Herausforderungen; 2016.
- [11] Handbuch Faserverbundkunststoffe: Grundlagen, Verarbeitung, Anwendungen. 4th ed. Wiesbaden: Imprint: Springer Vieweg; 2013.
- [12] Bader MG. Selection of composite materials and manufacturing routes for cost-effective performance. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 2002;33(7):913–34.

- [13] Nonn A, Koch C, Maurer T, Bickerton S, Greb C, Gries T. Investigation into the variability of carbon fibre non-crimp fabrics and its influence on the RTM-process. Munich; 2016.
- [14] Menges G, Michaeli W, Mohren P. Spritzgiesswerkzeuge: Auslegung, Bau, Anwendung. 6th ed. München: Hanser; 2007.
- [15] Rieber G. Einfluss von textilen Parametern auf die Permeabilität von Multifilamentgeweben für Faserverbundkunststoffe. Kaiserslautern: IVW; 2011.
- [16] Becker D, Mitschang P. Darcy-based viscosity measurement for fast curing resin systems. Flow Processes for Composite Materials 2016;13.
- [17] Böhm M. Reaction Kinetics and Cure Monitoring of Highly Reactive Epoxy Resins for Carbon Fiber Reinforced Plastics: Ludwig-Maximilians-Universität München; 2015.
- [18] Mohan RV, Shires DR, Tamma KK, Ngo ND. Flow channels/fiber impregnation studies for the process modeling/analysis of complex engineering structures manufactured by resin transfer molding. Polymer Composites 1998;19(5):527–42.
- [19] Klucking EP. Leaf venation patterns. Berlin u.a.: Cramer; 2003.
- [20] Korf H, Schiebler TH. Anatomie: Histologie, Entwicklungsgeschichte, makroskopische und mikroskopische Anatomie, Topographie ; unter Berücksichtigung des Gegenstandskatalogs ; mit 111 Tabellen. 10th ed. [Heidelberg]: Steinkopff; 2007.
- [21] West JB. Respiratory physiology: The essentials. 9th ed. Philadelphia, Pennsylvania: Wolters Kluwer/Lippincott Williams & Wilkins; 2014.
- [22] Koch C, Nonn A., Maidl F, Maurer T, Töpker J, Bickerton S. et al. Influence of textile architecture by processing carbon fibre based non-crimp fabrics in automotive serial application using high-pressure-RTM. Munich; 2016.
- [23] Ehrenstein GW. Faserverbund-Kunststoffe: Werkstoffe, Verarbeitung, Eigenschaften. 2nd ed. München [u.a.]: Hanser; 2006.
- [24] Lässig R., Eisenhut M., Arne, M., Schulte, R. T. Peters, F. Kühmann, T., Waldmann, T. Begemann, W. Serienproduktion von hochfesten Faserverbundbauteilen: Perspektiven für den deutschen Maschinen- und Anlagenbau; 2012.

- [25] Schillinger M, Reisböck M, Gruber W, Weiss T. Verfahren zur Herstellung eines Faserverbund-Bauteils(DE102011003626A1).
- [26] Walbran WA, Verleye B, Bickerton S, Kelly PA. Prediction and experimental verification of normal stress distributions on mould tools during Liquid Composite Moulding. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 2012;43(1):138–49.
- [27] Saunders RA, Lekakou C, Bader MG. Compression and microstructure of fibre plain woven cloths in the processing of polymer composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 1998;29(4):443–54.
- [28] Bickerton S, Buntain MJ, Somashekar AA. The viscoelastic compression behavior of liquid composite molding preforms. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 2003;34(5):431–44.
- [29] Gutowski TGP. *Advanced composites manufacturing*. New York: Wiley; 1997.
- [30] Shojaei A. An Experimental Study of Saturated and Unsaturated Permeabilities in Resin Transfer Molding Based on Unidirectional Flow Measurements. *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 2004;23(14):1515–36.
- [31] Michaeli W, Hammes V, Kirberg K, Kotte R, Osswald TA, Specker O. Process Simulation in the RTM Technique. *Kunststoffe - German Plastics* 1989(79):739–42.
- [32] Gascons M, Blanco N, Simacek P, Peiro J, Advani SG, Matthys K. Impact of the Fibre Bed on Resin Viscosity in Liquid Composite Moulding Simulations. *Appl Compos Mater* 2012;19(3-4):669–88.
- [33] Dix M. Eine durchgängig virtuelle Faserverbundprozesskette am Beispiel des RTM Prozesses. München: Verlag Dr. Hut; 2016.
- [34] Dino Magagnato. Charakterisierung und Simulation der Formfüllung beim Resin Transfer Molding unter Berücksichtigung der lokalen Faserstruktur: Karlsruher Institut für Technologie; 2016.
- [35] Meier R, Walbran A., Hahn C, Zaremba S, Drechsler K. Methoden zur Bestimmung der Permeabilität von Verstärkungstextilen. *Zeitschrift Kunststofftechnik* 2014;2014.
- [36] Trochu F, Gauvin R, Gao D-M. Numerical analysis of the resin transfer molding process by the finite element method. *Adv. Polym. Technol.* 1993;12(4):329–42.

- [37] Vernet N, Ruiz E, Advani S, Alms JB, Aubert M, Barburski M et al. Experimental determination of the permeability of engineering textiles: Benchmark II. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 2014;61:172–84.
- [38] Arbter R, Beraud JM, Binetruy C, Bizet L, Bréard J, Comas-Cardona S et al. Experimental determination of the permeability of textiles: A benchmark exercise. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 2011;42(9):1157–68.
- [39] Sharma S, Signier D. A. Permeability Measurement Methods in Porous Media of Fiber Reinforced Composites. *Applied Mechanics Reviews* 2010;63.
- [40] Stadtfeld HC, Erninger M, Bickerton S, Advani S. An Experimental Method to Continuously Measure Permeability of Fiber Preforms as a Function of Fiber Volume Fraction. *J Reinforced Plastics and Composites* 2002;21(10):879–99.
- [41] Hahn C. A Simulation Approach of Permeability Prediction of RTM Process Simulation: Technische Universität München; 2014.
- [42] Luce TL, Advani SG, Howard JG, Parnas RS. Permeability characterization. Part 2: Flow behavior in multiple-layer preforms. *Polym. Compos.* 1995;16(6):446–58.
- [43] Brusckie MV, Advani SG. A finite element/control volume approach to mold filling in anisotropic porous media. *Polym. Compos.* 1990;11(6):398–405.
- [44] Long AC, Blanchard PJ, Rudd CD, Smith P. The development of an integrated process model for liquid composite moulding. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 1998;29(7):847–54.
- [45] Michaud V, Grajzgrund HJ, Manson JAE. Influence of preform compressive behaviour in liquid composite molding. *International Conference on Composite Materials* 1999;5.
- [46] Becker D. Transversales Imprägnierverhalten textiler Verstärkungsstrukturen für Faser-Kunststoff-Verbunde. Kaiserslautern: Inst. für Verbundwerkstoffe; 2015, 2015.
- [47] Becker D, Broser J, Mitschang P. An experimental study of the influence of process parameters on the textile reaction to transverse impregnation. *Polymer Composites*;2015.

- [48] Becker D, Broser J, Mitschang P. An experimental study of the influence of process parameters on the textile reaction to transverse impregnation. *Polymer Composites* 2015:n/a.
- [49] Hintermann M. Erforschung eines neuen Injektionsprozesses für offene und geschlossene Faserverbund-Strukturen; 1998.
- [50] Potter KD. Understanding the origins of defects and variability in composites manufacture. ICCM. Edinburgh, UK; 2009.
- [51] Ruiz E, ACHIM V, SOUKANE S, Trochu F, BREARD J. Optimization of injection flow rate to minimize micro/macro-voids formation in resin transfer molded composites. *Composites Science and Technology* 2006;66(3-4):475–86.
- [52] Endruweit A. Investigation of the influence of local inhomogeneities in the textile permeability on the resin flow in liquid composites moulding processes. Doktorarbeit.
- [53] Bickerton S, Šimáček P, Guglielmi SE, Advani SG. Investigation of draping and its effects on the mold filling process during manufacturing of a compound curved composite part. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 1997;28(9-10):801–16.
- [54] Bickerton S, Sozer EM, Šimáček P, Advani SG. Fabric structure and mold curvature effects on preform permeability and mold filling in the RTM process. Part II. Predictions and comparisons with experiments. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 2000;31(5):439–58.
- [55] Bickerton S, Sozer EM, Graham PJ, Advani SG. Fabric structure and mold curvature effects on preform permeability and mold filling in the RTM process. Part I. Experiments. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 2000;31(5):423–38.
- [56] Bickerton S, Advani SG. Experimental investigation and flow visualization of the resin-transfer mold-filling process in a non-planar geometry. *Composites Science and Technology* 1997;57(1):23–33.
- [57] Davé RS, Loos AC. Processing of composites. Munich, Hanser/Gardner Publications: Cincinnati; Hanser Publishers; 2000.
- [58] Advani SG. Process Modelling in Composites Manufacturing (2nd Edition): Taylor and Francis; 2010.

- [59] Bickerton S, Advani SG. Characterization and modeling of race-tracking in liquid composite molding processes 1999(59):2215–29.
- [60] Bickerton S, Advani SG, Mohan RV, Shires DR. Experimental analysis and numerical modeling of flow channel effects in resin transfer molding. *Polymer Composites* 2000;21(1):134–53.
- [61] Kessels JFA, Jonker AS, Akkerman R. Optimising the flow pipe arrangement for resin infusion under flexible tooling. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 2007(38):2076–85.
- [62] Stanglmaier SJ. Empirische Charakterisierung und Modellierung des Imprägnierprozesses lokal verstärkter Kohlenstofffaserhalbzeuge im RTM- und Nasspress-Verfahren für die Großserie; 2017.
- [63] Arnold M. Einfluss verschiedener Angusszenarien auf den Harzinjektionsprozess und dessen simulative Abbildung. Kaiserslautern: Inst. für Verbundwerkstoffe; 2014, 2014.
- [64] Montés N, Sánchez F, Correia NC. A simplified computational treatment for non-isotropic permeability flow models based on flow pattern configuration spaces. *International Conference on Flow Processes in Composite Materials* 2010.
- [65] Sanchez F, Domenech L, Garcia V, Montes N, Cueto E, Chinesta F et al. Advanced computational strategies for fast and reliable gate arrangement pre-design of resin infusion processes. Twente, Niederlande; 2014.
- [66] Sánchez F, Domenech L, García V, Montés N, Falcó A, Cueto E, Chinesta F, Fideu P. Fast and reliable gate arrangement pre-design of resin infusion processes. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 2015;Volume 77(77):285–92.
- [67] Wang J, Simacek P, Advani SG. Use of medial axis to find optimal channel designs to reduce mold filling time in resin transfer molding. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 2017;2017(95):161–72.
- [68] Markicevic B, Nalla A, Navaz HK, Heider D, Walsh S, Advani SG. Closed form solution of resin flow from multiple line gates in liquid composite molding. *Polymer Composites* 2009:n/a.
- [69] Simacek P, Advani SG. Desirable features in mold filling simulations for Liquid Composite Molding processes. *Polymer Composites* 2004;25(4):355–67.

- [70] Lin MY, Murphy MJ, Hahn HT. Resin transfer molding process optimization. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 2000;31(4):361–71.
- [71] Jiang S, Zhang C, Wang B. Optimum arrangement of gate and vent locations for RTM process design using a mesh distance-based approach. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 2002;33(4):471–81.
- [72] Gokce A, Advani SG. Simultaneous gate and vent location optimization in liquid composite molding processes. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 2004;35(12):1419–32.
- [73] Minaie B, Chen YF. Adaptive Control of Filling Pattern in Resin Transfer Molding Process. *Journal of Composite Materials* 2005;39(16):1497–513.
- [74] Ye Y, Zhang C, Liang Z, Wang B. Heuristic algorithm for determining optimal gate and vent locations for RTM process design. *Journal of Manufacturing Systems* 2004;23(4):267–77.
- [75] Ratle F, ACHIM V, Trochu F. Evolutionary operators for optimal gate location in liquid composite moulding. *Applied Soft Computing* 2009;9(2):817–23.
- [76] Devillard M, Hsiao K, Advani SG. Flow sensing and control strategies to address race-tracking disturbances in resin transfer molding - part II: automation and validation. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 2003(36):1581–9.
- [77] Kuang-Ting H., Advani SG. Flow sensing and control strategies to address race-tracking disturbances in resin transfer molding - part I: design and algorithm development. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 2004(35):1149–59.
- [78] Kerang H, Shunliang C Z, Wang B. Flow modeling and simulation of SCRIMP for composites manufacturing. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 2000(31):79–86.
- [79] Krahn H, Vogel H. 1000 Konstruktionsbeispiele für den Werkzeug- und Formenbau beim Spritzgießen. München, Wien: Hanser; 2008.
- [80] Johannaber F, Michaeli W. Handbuch Spritzgießen. 2nd ed. [S.l.]: Carl Hanser Fachbuchverlag; 2014.
- [81] Jaroschek C. Spritzgießen für Praktiker. 3rd ed. München: Hanser; 2013.

- [82] Beaumont JP. Auslegung von Anguss und Angusskanal: Spritzgießwerkzeuge erfolgreich einsetzen. München: Hanser Verlag; 2012.
- [83] Altmann A. Matrix dominated effects of defects on the mechanical properties of wind turbine blades. 2014;2014.
- [84] Stanglmaier SJ, Bickerton S, Vukoje D, Hodde J, Repper A, Thoma B et al. Analyse der Fließfrontprogression während des Injektionsprozesses lokal verstärkter Kohlenstofffaserhalbzeuge im RTM-Verfahren. In: Zeitschrift Kunststofftechnik.
- [85] Nonn, A., Schmidt E., Ulrich, M., Gries, T. Non-destructive testing of flat carbon fibre semi-finished proucts. Aachen, Germany; 2016.
- [86] Comas-Cardona S, Cosson B, Bickerton S, Binetruy C. An optically-based inverse method to measure in-plane permeability fields of fibrous reinforcements. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 2014;57:41–8.
- [87] Gan JM, Bickerton S, Battley M. Quantifying variability within glass fibre reinforcements using an automated optical method. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 2012;43(8):1169–76.
- [88] Walbran W, Bickerton S, Kelly P. Evaluating the shear component of reinforcement compaction stress during liquid composite moulding processes. Journal of Composite Materials 2013;47(5):513–28.
- [89] Grössing H, Stadlmajer N, Fauster E, Fleischmann M, Schledjewski R. Flow front advancement during composite processing: Predictions from numerical filling simulation tools in comparison with real-world experiments. Polym. Compos. 2016;37(9):2782–93.
- [90] Grössing H, Schledjewski R, Kaufmann S. Continous on-line Analysis of the Matrix flow through manipulated RTM preforms compared to numerical filling simulations. SAMPE Tech;2014.
- [91] Siebertz K. Statistische versuchsplanung: Design of experiments (doe). [Place of publication not identified]: Springer; 2010.
- [92] Graupner R, Drechsler K. One step to comparable off-plane permeability results - an improved measuring method for transverse permeability and compaction behaviour of textile fiber materials // Proceedings of the 17th European Conference on

Composite Materials: ECCM17 - 17th European Conference on Composite Materials, 26-30th June 2016, München, Deutschland; 2016.

[93] International Organization for Standardization. Plastics - Determination of tensile properties - Part 4: Test conditions for isotropic and orthotropic fibre reinforced plastic composites.(ISO 527-4:1997(E)). Genf, Schweiz: International Organization for Standardization; 2007.

[94] EUROPÄISCHES KOMITEE FÜR NORMUNG. Bestimmung der Druckeigenschaften in der Laminebene;83.120(ISO 14126:1999). Berlin: Beuth Verlag GmbH; 2000.

[95] Rimmel O, Becker D, Mitschang P. Maximizing the out-of-plane-permeability of preforms manufactured by dry fiber placement. *Advanced Manufacturing: Polymer & Composites Science* 2016;2(3-4):93–102.

[96] Pierce RS, Falzon BG, Thompson MC. Permeability characterization of sheared carbon fiber textile preform. *Polym. Compos.* 2016;40:8.

[97] Endruweit A, Ermanni P. The in-plane permeability of sheared textiles. Experimental observations and a predictive conversion model. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 2004;35(4):439–51.

Betreute studentische Arbeiten

- Gum, Thomas; Untersuchung des Klemmverhaltens textiler Halbzeuge im RTM Prozess. Fakultät für Ingenieurwissenschaften, Hochschule Rosenheim, 2015.
- Huber, Andreas; Untersuchung von Reinharzstrukturen in Klebeflächen zwischen Endlofaser verstärkten Kunststoffen. Fakultät Elektrotechnik und Wirtschaftsingenieurwesen, Hochschule Landshut 2016.
- Mahl, Klemens; Grundlagen zur Auslegung und Berechnung von Verteilersystemen im RTM Prozess. Institut für Flugzeugbau und Leichtbau, Technische Universität Braunschweig, 2016.
- Ruf, Michael; Charakterisierung der Wechselwirkung zwischen werkzeugseitigem Verteilersystem und Faserhalbzeug in Bezug auf die Formevakuierung im RTM Prozess. Lehrstuhl für Carbon Composites, Technische Universität München, 2016.
- Drissen, Felix; Charakterisierung der Wechselwirkung von textilen Halbzeugeigenschaften mit dem werkzeugseitigen Matrixverteilersystem im RTM Prozess. Institut für Textiltechnik, RWTH Aachen, 2016.
- Nebe, Martin; Charakterisierung der Auswirkung von Faserverdichtungen auf den Formfüllvorgang beim RTM Prozess. Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik, Technische Universität Dresden, 2017.
- Bader, Julia; Potential werkzeugseitiger Funktionsintegration im RTM Prozess. Institut für Fahrzeugtechnik, Technische Hochschule Köln, 2017.
- Huber, Andreas; Integration von Fließkanälen in CFK-Sandwichstrukturen. Fakultät Elektrotechnik und Wirtschaftsingenieurwesen, Hochschule Landshut 2017.

Publikationen

Journals

Kracke, C.; Nonn, A., Koch, C., Nebe, M., Schmidt, E., Bickerton, S., Gries, T., Mitschang, P.: Interaction of textile variability and flow channel distribution systems on flow front progression in the RTM Process. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Volume 106, März 2018.

Symposien und Konferenzbeiträge

Kracke, C., Staudt, B., Bickerton, S., Mitschang, P.; An experimental study on the influence of flow channel induced fibre undulation. 17th European Conference on Composite Materials, München, Deutschland, 26.06. - 30.06.2016

Kracke, C., Staudt, B., Bickerton, S., Mitschang, P.; An experimental study on the influence of flow channel geometry on the flow front progression in resin transfer moulding. 13th International Conference on Flow Processing in Composite Materials, Kyoto, Japan, 06.07. - 08.07.2016

Kracke, C., Drissen, F., Mahl, K., Staudt, B., Bickerton, S., Mitschang, P.; Verfahrensoptimierung des Resin Transfer Moulding Prozess mit werkzeugseitigen Matrixverteilersystemen. 8. Landshuter Leichtbau Colloquium, Landshut, Deutschland, 08.03-09.03.2017