

Fakultät für Maschinenwesen

# **Bypassströmungen im Füllprozess textiler Strukturen: Charakterisierung, Abbildung und Optimierung**

**Swen Zaremba**

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

**Doktor-Ingenieurs**

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender:

Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart

Prüfer der Dissertation:

1. Prof. Dr.-Ing. Klaus Drechsler
2. Prof. Dr.-Ing. Michael Kupke

Die Dissertation wurde am 22.05.2018 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 04.10.2018 angenommen.

Technische Universität München  
Fakultät für Maschinenwesen  
Lehrstuhl für Carbon Composites  
Boltzmannstraße 15  
D-85748 Garching bei München

Tel.: +49 (0) 89 / 289 – 15092

Fax.: +49 (0) 89 / 289 – 15097

Email: [info@lcc.mw.tum.de](mailto:info@lcc.mw.tum.de)

Web: [www.lcc.mw.tum.de](http://www.lcc.mw.tum.de)

# DANKSAGUNG

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Gruppenleiter und wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Carbon Composite der Technischen Universität München.

Herr Prof. Dr. –Ing. Drechsler hat an seinem Lehrstuhl eine Umgebung geschaffen in der man eigene Ideen frei entwickeln und zur Umsetzung bringen kann. Auch ich durfte dieses Umfeld mitentwickeln und für die Gestaltung dieser Arbeit nutzen. Dafür gilt ihm mein ganz besonderer Dank.

Mein Dank gilt ebenfalls Herrn Prof. Dr. –Ing. Michael Kupke vom Institut für Materials Resource Management der Universität Augsburg für die Übernahme der Zweitbetreuung dieser Arbeit.

In vielen Stunden Diskussion, ob beim gemeinsamen Cappuccino, in Besprechungen oder beim abendlichen Wein bzw. Hopfentee, hat mich meine Mentorin Elisabeth Ladstätter begleitet. Sie fand immer den richtigen Weg um mich in Tiefzeiten zu motivieren bzw. auch mich auf den Boden der Tatsachen zurück zu holen. Dabei hat sie mir nicht nur bei dieser Arbeit, sondern auch bei meinen sonstigen Tätigkeiten am Lehrstuhl immer den Rücken freigehalten. Ohne dich wäre diese Arbeit bis heute nicht fertig. Danke dir Elisabeth!

Viele Inhalte dieser Arbeit sind in der Diskussion mit Kollegen aus der Gruppe Prozesstechnik für Matrixsysteme und anderen entstanden. Auch wenn ich den Kollegen ab und zu lästig in den Diskussionen gewesen bin danke ich ihnen für ihre Geduld. Mir haben diese immer Spaß gemacht. Ganz Besonderes für diese Arbeit möchte ich Reinhold Meier, Philipp Schäfer, David Schultheiß, Max Schäfer, Philipp Kammerhofer und Kalle Kind Danken.

Die entstandenen Ideen dieser Diskussionen habe ich dann oft gemeinsam mit Studenten in ihren studentischen Arbeiten weitergetrieben. Mein Dank gilt Patrick Steib, Bastian Behrens, Alexander Bley, Alexander Carrels, Barbara Lang, Felix Nusser, Georg Kienzle, Alexander Moretti, Nina Roider, Simon Renkl, Franz Hillreiner, Tagscherer Nevine, Urdangarin Kepa und Christian Stengl. Leider war er nicht möglich alle Themen mit in diese Arbeit aufzunehmen.

Ein großer Teil der Inhalte dieser Arbeit ist im Labor entstanden. Dabei haben mich und meine Studenten unsere gesamten Werkstatt- bzw. Laborcrew immer Tatkräftig unterstützt. Danke euch.

Das Verfassen einer solchen Arbeit unterliegt vielerlei Herausforderungen. Ohne meine Lektoren, meine Schwester Anke, Elisabeth, Sina, Max und Reinhold wäre der ein oder andere Fehler bzw. Hirnknoten garantiert nicht aufgedeckt worden. Danke euch für die Korrektur der Erstversion dieser Arbeit.

Sehr viel moralische Unterstützung für das Fertigstellen dieser Arbeit kam von meiner Partnerin Andrea Hohmann. Ohne den Rückhalt zu Hause ist eine solche Arbeit nicht möglich. Sie hat an mich geglaubt und mir das auch gesagt, wenn es nötig gewesen ist. Danke dir Andi!

Abschließend möchte ich mich bei meiner restlichen Familie und allen Freunden bedanken. Letzten Ende ist man die Summe des Weges den man gegangen ist. Danke euch dafür, dass ihr dafür gesorgt habt, dass ich jetzt hier gelandet bin.

# KURZFASSUNG

Bypassströmungen, im Englischen unter dem Namen Race Tracking bekannt, bezeichnen die Beeinflussung des Tränkungs Vorgangs einer textilen Preform durch Bereiche unterschiedlicher Permeabilität in der Kavität im „Resin Transfer Molding“ (RTM) Prozess. Die Kontrolle von Race Tracking führt zur Vereinheitlichung des Tränkvorgangs. Das Aufsummieren von Fertigungstoleranzen der vorhergehenden Preformprozesskette führt dazu, dass jede Injektion individuelle Eigenschaften besitzt. Neben der Kontrolle der Prozesskette kann über die Gestaltung des Werkzeugs Einfluss auf die Ausprägung von Race Tracking und damit auf die Tränkung genommen werden, was die Vereinheitlichung der Bauteilqualität zum Ziel hat.

Über das Hilfsmittel der finiten Elemente- Simulation werden allgemeine Regeln zur Gestaltung von Werkzeugelementen wie der Harzein- bzw. auslass in Kombination mit lokalen Überpressungsbereichen getroffen.

Die Grundlage für diese Untersuchung, die Abbildung von Race Tracking in der Simulation, wird über 1D Versuche gelegt. Es werden verschiedene Berechnungsansätze zur Abbildung über die Methode der Ersatzpermeabilität verglichen. Ausgehend von analytischen Ansätzen aus der Literatur werden die Permeabilitäten  $K_1$  und  $K_2$  des Kanals genutzt um die Übereinstimmung der simulativen Abbildung mit den Versuchen zu optimieren. 2D Umströmprozesse und deren simulative Betrachtung validieren das durchgeführte Vorgehen.

Die simulative Abbildung von Positionsabweichungen der Preform in der Kavität der durchgeführten 2D Versuche zeigt deren Bedeutung auf und erklärt das Auftreten von Streuungen. Das Nachstellen der Positionsabweichung von ausgewählten Werkzeugkonzepten ermöglicht die Bewertung bezüglich robuster Tränkung, wodurch die individuelle Ausprägung jeder Injektion reduziert werden kann.

Abgeleitet von den sich ergebenden Regeln zur Gestaltung des Harzein- und auslasses bietet die Hybridmatrixprozessierung die Möglichkeit, Prozessschwankungen zu reduzieren. Dabei werden Race Tracking Kanäle im Werkzeug durch die vorgeschaltete Injektion eines Sekundärmaterials verschlossen. Die Kontrolle der Penetration der Preform mit diesem Material ist der Schlüssel zur Umsetzung. Dazu werden der Filtereffekt und das rheologische Materialverhalten untersucht.



# ABSTRACT

Within the Resin Transfer Molding (RTM) process bypass flow, in specific Race Tracking, designates the interaction of the impregnation process of a textile Preform by areas with different permeability in a cavity. The control of Race Tracking leads to a unification of the impregnation process. The sum of fabrication tolerances of the previous preforming process chain lead to individual properties for every injection. Beside the control of the process chain there is the possibility to influence the effects of Race Tracking and therefore the impregnation of the textile by the design of the tool with the aim of unifying the part quality.

With the tool of finite element simulation, general rules for tool design elements like the configuration of the resin inlet and outlet in combination with local pinch off areas are derived.

The baseline for this investigation, the modeling of Race Tracking, is given by 1D trials. The “Equivalent Permeability Method” allows to use different approaches for modeling. Coming from different analytical approaches out of literature, the permeability  $K_1$  and  $K_2$  of the Race Tracking channel are used to optimize the conformity of simulation and reality. 2D flow experiments and there simulation validates the used procedure.

Modelling deviations of the preform position in the mold of the 2D trials proves their relevance and explains variations in the experiments. Modeling the influence of the position of the preform in the mold of selected tooling concepts offers the evaluation concerning robust filling to reduce the individual characteristics of each injection.

Derived of the guidelines for resin inlet and outlet hybrid matrix processing offers the opportunity to reduce process deviations. By pre injecting a secondary material, the Race Tracking channels are closed. The control of the penetration depth of this material is the key for application. The rheological behavior and the filter effect are therefore investigated.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>ix</b>
<b>Nomenklatur</b> .....	<b>xiii</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>xvii</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>xix</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>xxvii</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Motivation für die Arbeit .....	2
1.2 Aufbau der Arbeit .....	4
<b>2 Füllprozesse</b> .....	<b>7</b>
2.1 Physikalische Beschreibung von Füllvorgängen .....	7
2.1.1 Das Gesetz von Darcy .....	8
2.1.2 Mischregel zur Bestimmung des repräsentativen Tensors für das Laminat.....	11
2.1.3 Analytische Beschreibung des eindimensionalen Flusses in einem porösen Medium .....	11
2.2 Numerische Simulation des RTM Prozesses .....	13
2.2.1 Kontrollvolumen/ Finite Elemente Methode zur numerischen Simulation von Füllprozessen .....	14
2.2.2 Simulationssoftware PAM-RTM.....	19
2.3 Race Tracking (RT) .....	20
2.3.1 Ersatzpermeabilität: Methode zum Umgang mit Race Tracking in der Simulation .....	22
2.3.2 Analytische Betrachtung von Race Tracking .....	29
2.3.3 Umgang mit Race Tracking.....	30
<b>3 Abbilden von Race Tracking in der Simulation</b> .....	<b>33</b>
3.1 Analyse der Netzsensitivität .....	33
3.2 Untersuchungen zum Abbilden von Race Tracking in der Simulation .....	38
3.2.1 Experimenteller Aufbau .....	38
3.2.2 Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen.....	45

3.3	Untersuchung zur numerischen Abbildung von Race Tracking eines Kanals.....	53
3.3.1	Ansatz 1 ( $KK, q = Ky, Preform$ ) und Ansatz 2 ( $KK, q = KK, l$ ) aus der Literatur .....	55
3.3.2	Ansatz 3: Freies Anpassen von $KK, q$ (nicht isotroper Ansatz).....	57
3.3.3	Ansatz 4: Anpassen von $K_{K,l}$ auf $K_{K,q}$ (isotroper Ansatz) .....	62
3.3.4	Ansatz 5: Unabhängiges anpassen $KK.l$ auf $KK.q$ .....	65
3.4	Untersuchung zur numerischen Abbildung von Race Tracking .....	66
3.4.1	Experimenteller Aufbau der dritten Versuchsserie E3 .....	66
3.4.2	Simulative Randbedingungen für die numerische Untersuchung des Experiments E3.....	68
3.4.3	Vergleich von Experiment und Simulation der Versuchsserie E3 .....	69
3.5	Diskussion .....	81
<b>4</b>	<b>Numerische Studie zum Einfluss von Race Tracking im RTM Prozess.....</b>	<b>85</b>
4.1	Vorgehen und Evaluierungsmethodik .....	86
4.2	Beschreibung der verwendeten Modelle .....	87
4.3	Softwarebedingte Kriterien die zum Simulationsabbruch führen .....	89
4.4	Einfluss von Race Tracking (S1) .....	89
4.5	Einfluss der Prozessparameter (S2).....	91
4.5.1	Einfluss des Drucks am Einlass $pE$ .....	91
4.5.2	Einfluss der Drucks am Auslass $pA$ .....	93
4.5.3	Einfluss der Viskosität auf die Porenbildung.....	94
4.6	Einfluss von Position und Länge des Einlass bzw. Auslasses (S3) .....	97
4.6.1	Einlass- und Auslasssystem außerhalb des Bauteils.....	97
4.6.2	Einlasskanal auf der Preform/ Auslasskanal neben der Preform ....	100
4.6.3	Einlasskanal neben der Preform/ Auslasskanal auf der Preform ....	104
4.7	Variation des Ein- bzw. Auslasses mit umlaufendem, lokalem Überpressungsbereich (S4) .....	106
4.7.1	Einlass auf der Preform/ Linienauslass neben der Preform .....	106
4.7.2	Einlass/ Auslass auf der Preform .....	110

4.8	Diskussion der Studien .....	111
4.8.1	Studie 1: Einfluss von Race Tracking .....	112
4.8.2	Studie 2: Einfluss der Prozessparameter/ Fluideigenschaft.....	112
4.8.3	Studie 3/ 4: Einfluss der Position von Einlass/ Auslass/ Überpressungsbereich.....	112
<b>5</b>	<b>Numerische Studie zur Untersuchung der Positionierung der Preform in der Kavität.....</b>	<b>117</b>
5.1	Studie zu Positionstoleranzen bei den durchgeführten Experimenten S <sub>Pos 1</sub> .....	118
5.1.1	Betrachtung im Hinblick auf Kanalfüllzeit .....	119
5.1.2	Betrachtung im Hinblick auf den Füllfaktor.....	121
5.2	Studie zu Positionstoleranzen für verschieden Einlasskonzepte .....	122
5.3	Diskussion.....	126
5.3.1	Studie zu Positionstoleranzen bei den durchgeführten Experimenten.....	127
5.3.2	Studie zu Positionstoleranzen für verschiedene Einlasskonzepte ..	127
<b>6</b>	<b>Hybridmatrixantritt.....</b>	<b>131</b>
6.1	Grundprinzip .....	131
6.2	Scherratenabhängiges Materialverhalten .....	134
6.2.1	Rheologische Grundlagen.....	134
6.2.2	Analytische Betrachtung.....	137
6.3	Grundlagen der Filtration.....	139
6.3.1	Zusammenhänge bei der Oberflächenfiltration .....	141
6.3.2	Zusammenhänge bei der Tiefenfiltration .....	144
6.3.3	Zusammenfassung der Filtereigenschaften: .....	144
6.4	Die Preform als Filtermedium .....	145
6.5	Umströmen der Preform .....	150
6.5.1	Zeitschritt I: .....	152
6.5.2	Zeitschritt II: .....	152
6.5.3	Zeitschritt III:.....	152
6.5.4	Diskussion .....	153
6.6	Verwendete Partikel.....	154

6.7	Umströmung mit reaktiver Matrix .....	157
6.7.1	Rheologische Charakterisierung der Suspensionen .....	158
6.7.2	Experimentelle Untersuchung.....	162
6.7.3	Bewertung des nicht newtonschen Materialverhaltens.....	164
6.7.4	Dimensionierung der Partikelanzahl.....	166
6.7.5	Versuchsplan.....	169
6.8	Versuchsauswertung.....	171
6.8.1	Monosuspensionen.....	173
6.8.2	Hybridsuspensionen.....	177
6.9	Diskussion und Verifikation.....	179
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>185</b>
<b>8</b>	<b>Ausblick .....</b>	<b>189</b>
8.1	Füllsimulation.....	189
8.2	Richtlinien zur Gestaltung des Ein- bzw. Auslasses .....	190
8.3	Hybridmatrixantritt.....	190
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>195</b>
<b>A</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>211</b>
a	Studie zur Positionstoleranz .....	211
<b>B</b>	<b>Veröffentlichungen.....</b>	<b>217</b>
<b>C</b>	<b>Betreute studentische Arbeiten .....</b>	<b>221</b>
<b>D</b>	<b>Lebenslauf .....</b>	<b>225</b>
	Persönliche Daten.....	225
	Beruflicher Werdegang .....	225
	Ausbildung und Wehrdienst.....	225

# Nomenklatur

Formelzeichen	Einheit	Beschreibung
Lateinisch		
$d_{32}$	$m$	Sauterdurchmesser
$d_p$	$m$	Partikeldurchmesser
$\vec{n}$	–	Nach außen zeigender Normalenvektor
$p$	Pa	Druck
$p_A$	Pa	Druck am Auslass
$p_E$	Pa	Druck am Einlass
$\Delta p_K$	Pa	Druckabfall am Filterkuchen
$\Delta p_{FM}$	Pa	Druckabfall am Filtermedium
$r$	$m$	Laufparameter Radius
$t$	$s$	Zeit
$t_{Preform}$	$s$	Zeit zum Füllen der Preform
$t_A$	$s$	Zeit zum Füllen des Race Tracking Kanals
$t_{Ab}$	$s$	Zeit bei der die Simulation abbricht
$u$	$m/s$	Leerrohrgeschwindigkeit/ Darcygeschwindigkeit
$v$	$m/s$	Fluidgeschwindigkeit im porösen Medium
$x$	$m$	Position
$x_f$	$m$	Position der Fließfront
$K$	$m^2$	Permeabilität

<b>Formelzeichen</b>	<b>Einheit</b>	<b>Beschreibung</b>
$B$	$m$	Breite
$A$	$m^2$	Fläche
$A_i$	$m^2$	Fläche des Harzeinlasses
$A$	$m^2$	Fläche
$B$	$m$	Kanalbreite
$FF$	–	Füllfaktor
$H$	$m$	Kanalhöhe
$K_1$	$m^2$	Hauptpermeabilität entlang der Hauptellipsenachse 1
$K_2$	$m^2$	Hauptpermeabilität entlang der Hauptellipsenachse 2
$K_{K,l}$	$m^2$	Kanalpermeabilität in Richtung des Kanals
$K_{K,q}$	$m^2$	Kanalpermeabilität quer zur Richtung des Kanals
$K_x$	$m^2$	Permeabilität in Richtung der x-Achse
$K_y$	$m^2$	Permeabilität in Richtung der y-Achse
$L$	$m$	Länge
$L_{EK}$	$m$	Länge des Einlasskanals
$P$	<i>Stück</i>	Partikelanzahl
$Q$	$\frac{m^3}{s}$	Volumenstrom
$Q$	$m^3/s$	Volumenstrom
$QV$	–	Volumenstromverhältnis

<b>Formelzeichen</b>	<b>Einheit</b>	<b>Beschreibung</b>
$R$	$m$	Radius bei einer Rohrströmung
$V$	$m^3$	Volumen
$V_{i,fluid}$	$m^3$	Volumen des Fluids innerhalb des Kontrollvolumens $i$
$V_f$	$m^3$	Filtratvolumen
$V_s$	$m^3$	Suspensionsvolumen
$V_{HS}$	$m^3$	Harzsystemvolumen
$V_{Preform}$	$m^3$	Volumen welches die Preform im Bauteil einnimmt
$V_E$	$m^3$	Volumen in dem Filtrat die Preform eingedrungen ist
$V_{FK}$	$m^3$	Volumen des gebildeten Filterkuchens
$V_I$	$m^3$	Nichtgetränktes Innenvolumen einer Preform
$V_P$	$m^3$	Partikelvolumen
<b>griechisch</b>		
$\alpha$	–	Empirischer Faktor zur Scherratenabhängigkeit
$\alpha_v$	$1/m^2$	Filterkuchenwiderstand
$\beta$	$1/m^2$	Filtermediumwiderstand
$\varepsilon$	–	Porosität
$\gamma$	–	Deformation
$\dot{\gamma}$	$1/s$	Scherrate
$\kappa$	–	Querstromfaktor

<b>Formelzeichen</b>	<b>Einheit</b>	<b>Beschreibung</b>
$\eta$	$Pa\ s$	Dynamische Viskosität
$\varphi_V$	–	Konzentration einer Suspension
$\rho$	$kg/m^3$	Dichte
$\rho_S$	–	Dichte einer Suspension
$\tau$	$N/m^2$	Schubspannung
$\theta$	°	Hauptachsenwinkel der Permeabilität
$v_f$	–	Faservolumengehalt
$\Phi$	$1/m^3$	Einlassfaktor

# Abkürzungsverzeichnis

---

<b>Abkürzung</b>	<b>Beschreibung</b>
Abb.	Abbildung
CFD	Computational Fluid Dynamics
CFK	Carbonfaserverstärkter Kunststoff
CV/FEM	Control Volume/ Finite Element Methode
CRTM	Compression Resin Transfer Molding
E	Experiment
ES	Einlasssystem
FEM	Finite Elemente Methode
FF	Füllfaktor
FVK	Faserverstärkter Kunststoff
L.o.b.f.	Line of best fit
M	Modell
RTM	Resin Transfer Molding
RT	Race Tracking
S	Studie
Tab.	Tabelle
VRTM	Vacuum Assisted Resin Transfer Molding
VARI	Vacuum Assited Infusion

---



# Abbildungsverzeichnis

Abb. 1-1:	Vergleich des ausgelegten Flusses (oben) und des Flusses unter Anwesenheit von RT (unten) [35] .....	3
Abb. 1-2:	Strukturierung von RT in der Kavität (in Anlehnung an [35]) .....	4
Abb. 2-1:	Diskretisierung einer Berechnungsdomäne in Schalenelementen und poligonale Kontrollvolumina in CV/FEM [90] .....	15
Abb. 2-2:	Darstellung der Fließfront errechnet über die CV/ FEM Methode, angepasst nach [94, 96]. .....	16
Abb. 2-3:	Reinharzkante an einem ausgehärtetem Bauteil .....	21
Abb. 2-4:	Geschwindigkeitsprofile einer 1D- Strömung zwischen zwei nichtpermeablen Wänden [96] .....	22
Abb. 2-5:	Geschwindigkeitsprofile einer 1D- Strömung zwischen einer nichtpermeablen und einer permeablen Wand [96] .....	22
Abb. 2-6:	Vergleich der verschiedenen Modelle zur Berechnung der Ersatzpermeabilität $K_{K,I}$ für verschiedene Breiten $B_K$ bei einer Höhe $H_K$ von 3mm [96] .....	26
Abb. 2-7:	Unterschiedliche Ausprägung von RT Situationen in Anlehnung an [120] .....	27
Abb. 2-8:	Beispiel zur analytischen Betrachtung .....	29
Abb. 3-1:	Schematische Darstellung des Modells für die Netzstudie in der Draufsicht .....	34
Abb. 3-2:	Verwendete Netztopologien in der Studie für Kanal und Preform .....	36
Abb. 3-3:	Unterschiedliche Füllzeiten resultierend aus verschiedenen Netztopologien .....	37
Abb. 3-4:	Schematischer Abbildung des generellen Versuchsaufbaus .....	39
Abb. 3-5:	Schematischer Aufbau des Versuchsaufbaus zur Bestimmung der Kanalpermeabilität .....	41
Abb. 3-6:	Darstellung des Experiments als Reihenschaltung verschiedener Strömungsquerschnitte .....	42
Abb. 3-7:	Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus zur Charakterisierung der Querströmung .....	44
Abb. 3-8:	Schematische Darstellung zur Berechnung des Füllfaktors FF .....	44
Abb. 3-9:	Ergebnisse der Strömungsversuche durch die verwendeten Einlasssysteme .....	46

Abb. 3-10: Ergebnisse der Strömungsversuche durch einen geraden Kanal mit Experimentaufbau E1 .....	47
Abb. 3-11: Vergleich der Ersatzpermeabilität unter bzw. ohne Berücksichtigung des Einlasssystems .....	48
Abb. 3-12: Darstellung der analytisch berechneten und auf Versuchen basierend ermittelten Ersatzpermeabilitäten der Versuchsserie E1 .....	49
Abb. 3-13: Einlassdruck versus Kanalfüllzeiten im Experiment E2 .....	51
Abb. 3-14: Einlassdruck versus Füllfaktor im Experiment E2 .....	52
Abb. 3-15: Einlassdruck versus Volumenstromverhältnis im Experiment E2 .....	53
Abb. 3-16: Schematische Darstellung des Modells zur Verifizierung der durchgeführten Versuche E2 .....	54
Abb. 3-17: Ergebnisse des Modellierungsansatzes eins (links) und zwei (rechts) .....	56
Abb. 3-18: Vergleich von Experiment E2 mit Simulation für Ansatz 1 und 2 .....	57
Abb. 3-19: Vergleich von Experiment E2 mit den Simulationen für den Ansatz 3 .....	58
Abb. 3-20: Vergleich Experiment E2 mit den Ergebnissen der Simulation für den Ansatz 3 für einen FVG von 48% .....	60
Abb. 3-21: Vergleich Experiment E2 mit den Ergebnissen der Simulation für den Ansatz 3 für einen FVG von 62% .....	61
Abb. 3-22: Vergleich von Experiment E2 mit der Simulation für den Ansatz 4 .....	62
Abb. 3-23: Vergleich Experiment E2 mit Simulation für den Ansatz 4 für einen FVG von 48% .....	63
Abb. 3-24: Vergleich Experiment E2 mit Simulation für den Ansatz 4 für einen FVG von 62% .....	64
Abb. 3-25: Vergleich Experiment E2 mit Simulation für den Ansatz 5 .....	65
Abb. 3-26: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus zur Charakterisierung der Querströmung im RTM Prozess mit umlaufenden RT- Kanal .....	67
Abb. 3-27: Vergleich Simulation/ Experiment: Faservolumengehalt über Kanalfüllzeit mit unterschiedlichen Einlassdrücken .....	70
Abb. 3-28: Vergleich Simulation/ Experiment: Kanalfüllzeit über Einlassdruck bei unterschiedlichen Kanalbreiten (grob skaliert) .....	71
Abb. 3-29: Vergleich Simulation/ Experiment: Kanalfüllzeit über Einlassdruck bei unterschiedlichen Kanalbreiten (fein skaliert) .....	72

Abb. 3-30: Vergleich Simulation/ Experiment: Kanalfüllzeit über Kanalbreite bei unterschiedlichem Faservolumengehalt .....	74
Abb. 3-31: Vergleich Simulation/ Experiment: Kanalfüllzeit über Einlassdruck bei unterschiedlichem Faservolumengehalt .....	75
Abb. 3-32: Vergleich Simulation/ Experiment: Füllfaktor über Faservolumengehalt bei unterschiedlichen Einlassdrücken.....	77
Abb. 3-33: Vergleich Simulation/ Experiment: Füllfaktor über Einlassdruck bei unterschiedlichen Kanalbreiten.....	78
Abb. 3-34: Vergleich Simulation/ Experiment: Kanalbreite über Füllfaktor mit unterschiedlichem Faservolumengehalt.....	79
Abb. 3-35: Vergleich Simulation/ Experiment: Füllfaktor über Einlassdruck bei unterschiedlichem Faservolumengehalt.....	81
Abb. 4-1: Beispiel der Vernetzung in der Studie zur Makroporenentwicklung.....	88
Abb. 4-2: Schematische Darstellung von Modell 1 (links) und 2 (rechts).....	90
Abb. 4-3: Ergebnisse aus Modell 1 und 2 .....	90
Abb. 4-4: Ergebnisse zur Variation des Einlassdrucks .....	92
Abb. 4-5: Ergebnisse zur Variation des Drucks am Auslass.....	94
Abb. 4-6: Ergebnisse zur Variation der Viskosität.....	96
Abb. 4-7: Schematische Darstellung zur Untersuchung der Position des Einlasssystems .....	97
Abb. 4-8: Position und Dimension des Einlasssystems neben der Preform mit Einlass auf der kurzen Seite .....	98
Abb. 4-9: Position und Dimension des Einlasssystems neben der Preform mit Einlass auf der langen Seite .....	99
Abb. 4-10: Schematische Darstellung zur Untersuchung der Position des Einlasssystems auf der Preform .....	100
Abb. 4-11: Position und Dimension des Punkteinlasses auf der Preform und des Auslasssystems neben der Preform.....	101
Abb. 4-12: Position und Dimension des Linieneinlasses auf der Preform Auslass neben der Preform.....	103
Abb. 4-13: Schematische Darstellung zur Untersuchung des Einflusses der Position des Auslasskanals auf der Preform .....	104
Abb. 4-14: Position und Dimension des Linienauslasses auf der Preform/ Einlass neben der Preform.....	105

Abb. 4-15: Schematische Darstellung zur Untersuchung der Position und der Länge des Einlasses auf der Preform mit umlaufendem Überpressungsbereich und seitlichem Auslass.....	106
Abb. 4-16: Position des Punkteinlasses auf der Preform und Auslass neben der Preform mit Überpressungsbereich .....	108
Abb. 4-17: Position des Linieneinlasses auf der Preform/ Auslass neben der Preform mit Überpressungsbereich .....	109
Abb. 4-18: Schematische Darstellung zur Untersuchung der Position des Einlasses und des Auslasses auf der Preform mit Überpressungsbereich .....	110
Abb. 4-19: Position des Linieneinlasses Einlass und Auslasses auf der Preform mit Überpressungsbereich .....	111
Abb. 4-20: Vergleich Position und Dimension des Einlasses bzw. Auslasses und Überpressungsbereich .....	114
Abb. 5-1: Schematische Darstellung zur Unterscheidung der Positionen bei der Toleranzuntersuchung .....	117
Abb. 5-2: Vergleich Experiment mit Simulation mit simulierter translatorisch verursachter Streuung. Kanalfüllzeit über Kanalbreite .....	120
Abb. 5-3: Vergleich Experiment mit Simulation mit simulierter translatorisch verursachter Streuung. Kanalfüllzeit über Kanalbreite (niedrige Skalierung) .....	120
Abb. 5-4: Vergleich Experiment mit Simulation mit simulierter, translatorisch verursachter Streuung. Füllfaktor FF über Kanalbreite für einen FVG von 48% (links) und 62% (rechts).....	121
Abb. 5-5: Vergleich der versch. Studien bezüglich Positionstoleranz der Preform in der Kavität bei $t_A$ .....	124
Abb. 5-6: Vergleich der versch. Studien bezüglich Positionstoleranz der Preform in der Kavität bei $t_{Ab}$ .....	124
Abb. 5-7: Vergleich des FF bei $t_A$ der versch. Studien bezüglich der Positionstoleranz der Preform in der Kavität .....	125
Abb. 5-8: Vergleich des FF bei $t_{Ab}$ der versch. Studien bezüglich der Positionstoleranz der Preform in der Kavität .....	125
Abb. 5-9: Vergleich der versch. Studien bezüglich entstehender Porenfläche bei $t_{Ab}$ .....	126
Abb. 6-1: Hybridmatrixkonzept zur Vermeidung von RT .....	132

Abb. 6-2: Veranschaulichung der rheologischen Parameter anhand der Analogie einer bewegten Platte gegenüber festem Boden.....	135
Abb. 6-3: Viskosität über Scherrate .....	135
Abb. 6-4: Schubspannung über Scherrate .....	135
Abb. 6-5: Schematische Darstellung einer Filtration .....	140
Abb. 6-6: Schematische Darstellung der Filterkuchendicke bzw. des Filtratflusses mit der Filtrationszeit [168].....	140
Abb. 6-7: Schematische Darstellung einer Querstromfiltration.....	141
Abb. 6-8: Schematische Darstellung der Filterkuchendicke bzw. des Filtratflusses mit der Filtrationszeit für die Querstromfiltration.....	141
Abb. 6-9: Definition der Nomenklatur zur Filtergleichung .....	142
Abb. 6-10: Mikro/ Makroflussbereiche in einer Preform.....	146
Abb. 6-11: Auswertung des Makroflussbereichs .....	147
Abb. 6-12: Auswertung des Mikroflussbereichs .....	147
Abb. 6-13: Markierter Makroflussbereich plus Querrovinge.....	148
Abb. 6-14: Anzahl der Poren pro Fläche.....	148
Abb. 6-15: Anzahl der Poren einer rechteckigen Preform (L=389mm; B=184mm; H=4mm).....	149
Abb. 6-16: Anteil des jeweiligen Porendurchmessers an der Gesamtporenfläche $A_{Pges}$ .....	150
Abb. 6-17: Durchmesservertelung der gewählten Partikeln .....	155
Abb. 6-18: Schliffprobe von SiO <sub>2</sub> 380 Partikel in Gießharz eingebettet (links 50x/ rechts 100x).....	156
Abb. 6-19: Suspension aus dem Gießharz U1404 und 3,5Vol.% TiO <sub>2</sub> P25 Partikel .....	156
Abb. 6-20: Suspension (U1404) mit 15 Vol.% iM30K-Glas Kugeln (20x).....	157
Abb. 6-21: Suspension (U1404) mit 15 Vol.% S60-Glas Kugeln (20x).....	157
Abb. 6-22: Suspension (U1404) mit 15 Vol.% K1-Glas Kugeln (5x) .....	157
Abb. 6-23: Viskosität der Monosuspensionen über die Scherrate .....	160
Abb. 6-24: Viskosität der Hybridsuspensionen über die Scherrate.....	161
Abb. 6-25: Versuchsaufbau zur Charakterisierung des Hybridmatrixansatzes.....	163
Abb. 6-26: Vergleich der mittleren Scherrate im RT- Kanal und in der Preform.....	165

Abb. 6-27: Reduktion der Penetration durch scherratenabhängigen Materialverhalten.....	166
Abb. 6-28: Definitionen zur Suspensionsdimensionierung.....	167
Abb. 6-29: Penetration der Preform beim Umströmversuch mit Sekundärmaterial ohne Partikelmodifizierung [148] .....	171
Abb. 6-30: Position der Schliffproben an einer Versuchsprobe .....	172
Abb. 6-31: Schliffbild des Versuchs Nr. 14 an der Position 1 .....	173
Abb. 6-32: Schliffbilder der Versuche mit Monosuspension an der einlassnahen Position Nr. 1.....	174
Abb. 6-33: Maximale Eindringtiefe der Monosuspensionen an verschiedenen Positionen .....	175
Abb. 6-34: Differenz der minimalen und der maximalen Penetration der Versuche mit Monosuspensionen.....	175
Abb. 6-35: Maximale Eindringtiefe der Versuche mit Monosuspensionen zur Ermittlung des Einflusses der Partikelgröße .....	176
Abb. 6-36: Differenz der minimalen und der maximalen Penetration der Versuche mit Monosuspensionen zur Ermittlung des Einflusses der Partikelgröße .....	176
Abb. 6-37: Maximale Eindringtiefe der Versuche mit Monosuspensionen zur Ermittlung des Einflusses der Partikelanzahl.....	177
Abb. 6-38: Differenz der minimalen und der maximalen Penetration der Versuche mit Monosuspensionen zur Ermittlung des Einflusses der Partikelanzahl.....	177
Abb. 6-39: Maximale Eindringtiefe der Hybridsuspensionen an verschiedenen Positionen .....	178
Abb. 6-40: Differenz der minimalen und der maximalen Penetration der Versuche mit Hybridsuspensionen.....	178
Abb. 6-41: Korrelation der Partikelgrößenverteilung von Mono- und Hybridsuspensionen .....	179
Abb. 6-42: Amplitudendurchlauf von Suspensionen aus U1404 mit verschiedenen SiO <sub>2</sub> Anteilen mit einer oszillierenden Messung.....	181
Abb. 6-43: Entwicklung der relativen Eindringtiefe bei Umströmung mit verschiedenen Suspensionen mit SiO <sub>2</sub> Modifizierung .....	182
Abb. 8-1: Biegefestigkeiten einer elastomeren Kante aus U1404 mit SiO <sub>2</sub> Modifizierung nach Impact [185].....	191

Abb. 8-2: Biegemodul einer elastomeren Kante aus U1404 mit SiO <sub>2</sub> Modifizierung nach Impact [185] .....	191
Abb. 8-3: Funktionalisierung mit Sekundärmatrixkanälen auf der Preform mit einer Hybridsuspension .....	192
Abb. 8-4: Möglichkeiten zur Funktionalisierung über den Ansatz der Hybridmatrix .....	193
Abb. A- 1: Studie zu Positionstoleranz S2: Einlass und Auslass neben der Preform für FVG 48% und eine RT- Kanalbreite von 2mm (01) .....	211
Abb. A-2: Studie zu Positionstoleranz S2: Einlass Auslass neben der Preform für FVG 62% und eine RT- Kanalbreite von 2mm (01) .....	212
Abb. A- 3: Studie zu Positionstoleranz S3: Einlass und Auslass auf der Preform für FVG 48% mit Überpressungsbereich (FVG 62%) und eine RT- Kanalbreite von 2mm (01) .....	213
Abb. A- 4: Studie zu Positionstoleranz S3: Einlass Auslass auf der Preform für FVG 48% mit Überpressungsbereich (FVG 62%) und eine RT- Kanalbreite von 2mm (02) .....	214
Abb. A-5: Studie zu Positionstoleranz S4: Einlass seitlich Auslass auf der Preform für FVG 62% und eine RT- Kanalbreite von 2mm (01) .....	215
Abb. A- 6: Studie zu Positionstoleranz S4: Einlass seitlich Auslass auf der Preform für FVG 48% und eine RT- Kanalbreite von 2mm (02) .....	216



## Tabellenverzeichnis

Tab. 2-1: Annahmen zur Herleitung des Gesetzes von Darcy aus der Navier-Stokes- Gleichung .....	10
Tab. 2-2: Skalierungsebenen in der Simulation.....	14
Tab. 2-3: Übliche Toleranzen beim Herstellen einer trockenen Preform [114] .....	21
Tab. 2-4: Übersicht über die Modelle zur Berechnung der Ersatzpermeabilität [16, 16, 31, 34, 119–121] .....	24
Tab. 2-5: Gleichungen zur Berechnung der Ersatzpermeabilität [16, 16, 31, 34, 119–121] .....	25
Tab. 3-1: Verwendete Materialdaten für die Netzstudie.....	34
Tab. 3-2: Allgemeine Materialdaten Hexcel G0926 D 1304 TCT [143] .....	39
Tab. 3-3: Gesättigte und ungesättigte Permeabilitätswerte des Materials G0926 D 1304 TCT .....	40
Tab. 3-4: Testmatrix zur Ermittlung der Ersatzpermeabilität eines rechteckigen Kanals.....	41
Tab. 3-5: Testmatrix zur Charakterisierung der Querströmung im RT- Kanal .....	45
Tab. 3-6: Ersatzpermeabilität $KK, l$ für einen rechteckigen Kanal der Höhe 3mm für verschiedene Kanalbreiten .....	47
Tab. 3-7: Füllbilder aus der Versuchsserie E2 zur Charakterisierung des Volumenstroms in die Preform .....	50
Tab. 3-8: Testmatrix zur Charakterisierung der Querströmung im RTM .....	67
Tab. 3-9: Wert der Kanalersatzpermeabilität in $m^2$ .....	68
Tab. 3-10: Materialdaten zur Abbildung des RT- Kanals [96].....	82
Tab. 3-11: Vergleich der unterschiedlichen Modellierung bezüglich der Kanalfüllzeit bzw. Füllfaktor .....	83
Tab. 3-12: Einfluss der Parameter auf die Kanalfüllzeit bzw. dem Füllfaktor. Vergleich Simulation versus Versuch .....	83
Tab. 4-1: Strukturierung der Untersuchung von Porenbildung aufgrund von RT.....	85
Tab. 4-2: Übersicht der Materialdaten für die Studie zur Makroporenbildung.....	88
Tab. 5-1: Kanalbreiten für die Positionstoleranzuntersuchung .....	118
Tab. 5-2: Inter- bzw. extrapolierte Werte für die Ersatzpermeabilität.....	118
Tab. 5-3: Konzepte für die Studie zur Positionstoleranz der Preform.....	123

Tab. 6-1:	Einteilung der Filtration nach Partikelgröße .....	139
Tab. 6-2:	Vergleich verschiedener Filtrationsprinzipien [149].....	145
Tab. 6-3:	Filtrationsvorgänge bei der Umströmung.....	151
Tab. 6-4:	Verwendete Partikel .....	155
Tab. 6-5:	Ziel und Vorgehen zum Untersuchen des Filtereffekts.....	158
Tab. 6-6:	Messprogramm zur rheologischen Charakterisierung.....	159
Tab. 6-7:	Maximale Viskositätsunterschiede im untersuchten Scherratenbereich (0,5 bis $10^3$ 1/s) der Monosuspensionen .....	160
Tab. 6-8:	Maximale Viskositätsunterschiede im untersuchten Scherratenbereich (0,5 bis $10^3$ 1/s) der Hybridsuspensionen .....	161
Tab. 6-9:	Parameter zur Modellierung der Suspensionen und der Referenz nach Ostwald/ de Waele.....	162
Tab. 6-10:	Größen zur Berechnung der Mindestpartikelanzahl der Monosuspensionen .....	169
Tab. 6-11:	Dimensionierung der Monosuspensionen auf Basis von Partikelkonzentrationen.....	170
Tab. 6-12:	Versuchsplan zur Charakterisierung der Penetration .....	170
Tab. 6-13:	Vorgehen zum Auswerten der Versuche.....	171

# 1 Einleitung

Der Einsatz von Leichtbaumaterialien wird in verschiedenen Industrien zur Umsetzung der Leichtbaustrategien verfolgt und ausgebaut.

Im Umfeld der Luftfahrt stellt Leichtbau ein zentrales Element zur Effizienzsteigerung dar. In der Windenergie, speziell bei großen rotierenden Massen, sind die Faserverbundwerkstoffe bereits in den Produktentwicklungsprozess integriert. Im automobilen Umfeld sorgen sie zunehmend für eine Steigerung der fahrdynamischen Leistung. [1]

Der globale Trend zu mehr Effizienz und Nachhaltigkeit hat den Bedarf an solchen Materialien gesteigert [2–5]. Dabei führt oft die Kombination von verschiedenen Werkstoffen zur optimalen Kosten-Nutzen-Lösung. [6–10]

Aktuelle Beispiele für den vermehrten Einsatz von faserverstärkten Kunststoffen sind im Bereich Luftfahrt die von Boeing hergestellten „787 Dreamlinerkomponenten“ bzw. die von Airbus gefertigten „A350 Bauteile“. Im automobilen Umfeld wird im „Project i“ der BMW ein signifikanter Anteil von faserverstärkten Kunststoffen eingesetzt.

Um die angestrebten Stückzahlen zu erreichen, wurden die eingesetzten Fertigungstechnologien weiter in die Großserie entwickelt. Dabei wird im automobilen Umfeld für diesen Werkstoff ein nicht gekanntes Stückzahlniveau erreicht [11]. Die dafür aktuell eingesetzten Verfahren sind nach Dirschmid [8] bzw. Wüllner [12] das „Resin Transfer Molding (RTM)“ bzw. das Nasspressverfahren. Der wachsende industrielle Bedarf führt zu einer Vielzahl innovativer Prozesse [6, 7, 13, 14].

Ein wesentliches Verfahren ist das RTM Verfahren. Dabei werden trockene Fasern in eine geschlossene Kavität gebracht. Sind diese über einen Binder oder einen textilen Prozess in Bauteilform gebracht, spricht man von einer Preform. Über eine Druckdifferenz wird die flüssige Matrix in die Kavität transferiert und härtet gemeinsam mit der Faser in der Form zu einem Bauteil aus.

Die Verwendung von Kohlenstofffasern bietet ein vielversprechendes Leichtbaupotential. Im Vergleich zu klassischen Materialien wie Stahl oder Aluminium sind die Kosten sowohl für das Fasermaterial als auch die Prozesskosten hoch. Die Konsequenz daraus ist, dass eine funktionale Gestaltung und Auslegung der Karosseriestruktur zur Maximierung des Leichtbaus erforderlich ist. Dazu müssen großserientaugliche Fertigungsverfahren für die Produktion von Karosseriestrukturbauteilen aus Faserverbundkunststoff (FVK) unter Beachtung der Zielkosten entwickelt werden. [6, 15]

Dafür ist es u.a. erforderlich, Ausschussraten im Prozess zu minimieren. Für das RTM Verfahren bedeutet dies, dass für den Tränkungsprozess des trockenen Fasergerüsts,

der Preform, mit flüssigem Matrixmaterial in der Kavität ein grundlegendes Verständnis notwendig ist. Dazu gehören die Zuführung des Matrixmaterials zum Fasergerüst sowie das vollständige Tränken des Fasergerüsts.

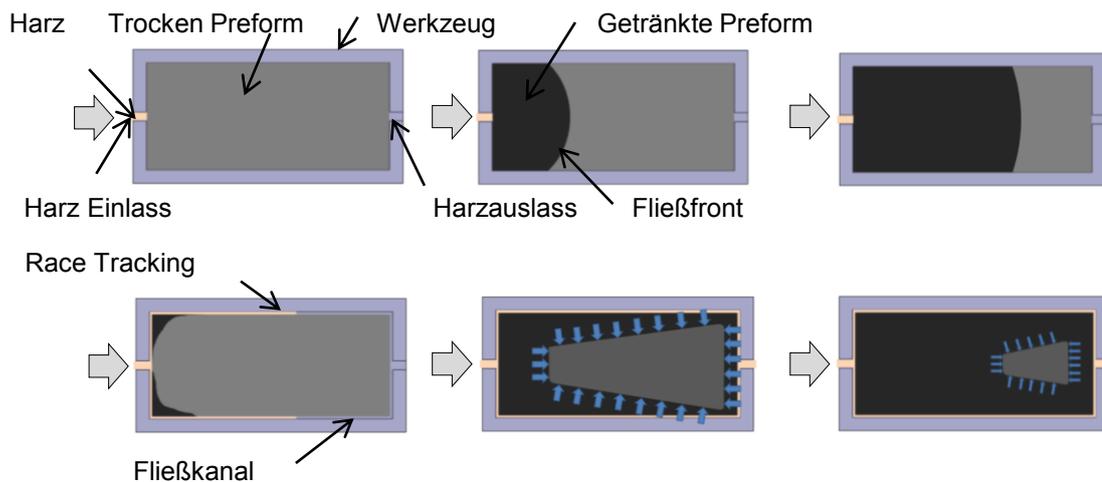
## 1.1 Motivation für die Arbeit

Die Tränkung des Fasermaterials ist seit langem Inhalt von verschiedensten Untersuchungen [16–26]. Aktuelle Veröffentlichungen beurteilen z.B. das rheologische Materialverhalten der Matrix um die aktuelle Prozesstechnik zu optimieren [27–29]. Das Thema der Zuführung des Matrixmaterials, in der Literatur unter dem Schlagwort Race Tracking (RT) zu finden, hat für die Füllgeschwindigkeit sowie für die Wiederholbarkeit eine zentrale Bedeutung [25, 30, 30]. Man spricht u.a. von einer „two regional flow“ Situation [31].

Für den Begriff Race Tracking existiert in der Literatur keine klare, einheitliche Definition z.B. ist er in [16, 32] als Unterschied von Flussgeschwindigkeiten in verschiedenen Bereichen der Kavität, in [33] als Effekt zwischen Preformbeschnittkante und Werkzeug, einer klassischen Bypassituation, beschrieben. In [34] wird er als „Luftkanal“ definiert, welcher den Fluss bewusst oder unbewusst beeinflusst.

Als Gemeinsamkeit bei allen dargestellten Definitionen von RT steht der Effekt, welcher entsteht, wenn Bereiche unterschiedlicher Porosität bzw. Permeabilität, als Maß für die Durchlässigkeit eines Bereiches oder Textils, in einer zu füllenden Kavität vorhanden sind. Anders formuliert, aufgrund von unterschiedlich porösen Bereichen entstehen bei deren gemeinsamen Füllen abweichende Fließgeschwindigkeiten, die sich in Form der räumlichen und zeitlichen Ausbreitung der Fließfront, dem sogenannten Füllbild, gegenseitig beeinflussen. Diese Definition wird für diese Arbeit verwendet.

In Abb. 1-1 ist der über RT induzierte Effekt am Beispiel einer einfachen Geometrie dargestellt. Im oberen Teil der Abbildung ist der ideale Fluss, darunter, wie ein Spalt zwischen Preform und Werkzeug den Fluss beeinflussen kann, dargestellt. Durch den dargestellten Spalt zwischen Kavität und Preform wird das trockene Textil zunächst umspült. Die Tränkung des trockenen Textils findet im dargestellten Fall von allen Seiten statt, was zu Lufteinschluss bzw. der Bildung einer Makropore führt. Der Kanal zwischen Preform und Werkzeug beeinflusst die Füllung des Textils deutlich.



**Abb. 1-1: Vergleich des ausgelegten Flusses (oben) und des Flusses unter Anwesenheit von RT (unten) [35]**

Aus Sicht der Fertigung ist es Ziel, dass der Füllprozess möglichst immer gleich abläuft. Unter Berücksichtigung dieses Aspektes wird eine Unterteilung zum einen in Bereiche eingeführt, welche einer Streuung über eine Tolerierung durch vorgeschaltete Prozessschritte unterliegt und zum anderen in Bereiche, welche definiert vorliegen.

Üblicherweise werden bei der Konstruktion eines Werkzeugs verschiedene Merkmale vorgesehen. Dazu gehören der Harzeinlass, Verteilerkanäle, Harzauslass etc. [25, 35, 36]. Da diese Bereiche definiert vorgesehen sind, wird über sie keine Abweichung im Füllbild induziert.

Um ein Bauteil zu tränken, wird eine trockene Preform in das Werkzeug eingelegt. Dadurch ergeben sich weitere Bereiche, über die eine Einteilung vorgenommen werden kann; die Preform, das Werkzeug und der Bereich zwischen Werkzeug und Preform. Die Preform selbst unterliegt einer langen toleranzbehafteten Prozesskette. Abweichungen im Textil, geometrische Abweichungen bei Stoßsituationen, geometrische Tolerierung bei Lagenauslauf, etc. Ein Werkzeug unterliegt stets Verschleiß bzw. der üblichen Belastung einer Serienfertigung. Unsachgemäße Handhabung in der Fertigung oder Faserzwickler führen zu lokalen Beschädigungen am Werkzeug, wodurch eine genaue Positionierung nicht mehr gewährleistet ist. Damit die Preform in das Werkzeug gelegt werden kann, muss diese mit einer Negativtoleranz versehen sein. Aus diesem Grund muss ein Bereich in einem Werkzeug vorgesehen sein welcher der Tolerierung der Preform entspricht. Abb. 1-2 zeigt die beschriebene Strukturierung für toleranzbehaftete Bereiche, die mit als Ursache für Abweichungen im Füllbild gelten.

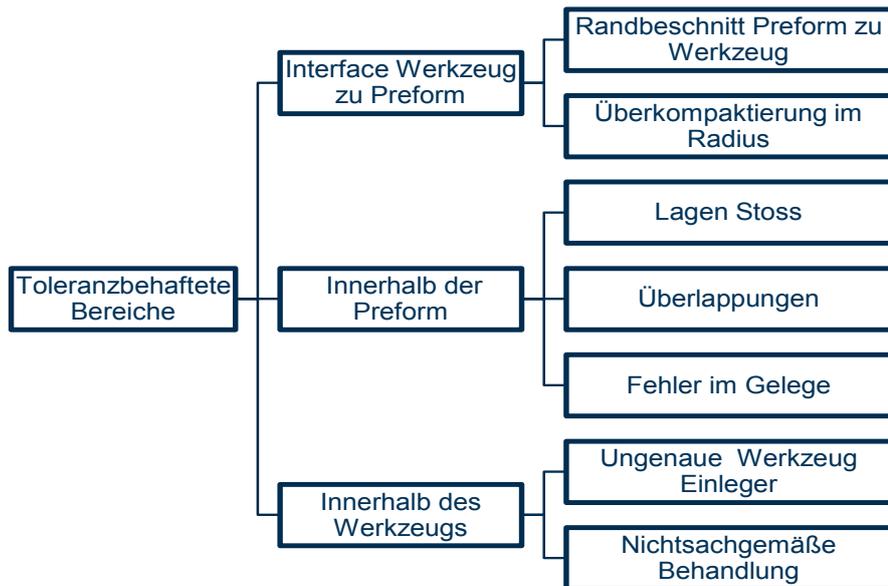


Abb. 1-2: Strukturierung von RT in der Kavität (in Anlehnung an [35])

Diese Art der Strukturierung kann bei der Ursachensuche bei Abweichungen am ausgehärteten Bauteil unterstützen. Auf der anderen Seite zeigt sie, dass der Füllvorgang in einer Kavität ein komplexer Prozess ist. RT muss dem zu Folge einen deutlichen Effekt auf die Ausprägung der Fließfront in der Kavität haben. Die Prozesskette zur Herstellung eines Bauteils aus Faserverbundmaterialien unterliegt einer Tolerierung, die sich über RT auf das Füllbild auswirkt. Zur Entwicklung des Füllprozesses bzw. des dazu notwendigen Werkzeugsystems ist es notwendig zu wissen, in welcher Form sich solche Abweichungen auf die Füllung eines Bauteils auswirken bzw. wie damit umgegangen wird.

## 1.2 Aufbau der Arbeit

Ziel dieser Arbeit ist es, zum Grundlagenverständnis des Themas RT beizutragen und Möglichkeiten aufzuzeigen wie mit den resultierenden Effekten im RTM Prozess umgegangen werden kann, um vollständige Füllung zu erreichen.

In Kapitel 2 werden theoretische Grundlagen vorgestellt. Dazu wird auf das aktuell am häufigsten verwendete Modell, dem Gesetz von Darcy, eingegangen. Es werden die notwendigen Grundlagen für die numerische Simulation, sowie die analytische Beschreibung von RT über den Ansatz der Ersatzpermeabilität dargestellt. Über die analytische Beschreibung werden grundlegende Zusammenhänge aufgezeigt.

Kapitel 3 beinhaltet die notwendigen Untersuchungen, um den Tränkungsprozess in der Simulation abzubilden. Dazu werden 1D Versuche beschrieben, welche zur Validierung der Modellierung des Kanals über die Abbildung mit dem Ansatz der Ersatzpermeabilität genutzt werden. Dazu wird der Einfluss der Permeabilitätskomponente  $K_{K,q}$ , dem Wert senkrecht zur Kanalrichtung, in der Simulation untersucht. Es wird ein Vorgehen vorgestellt, welches über das Anpassen von  $K_{K,q}$  und der Permeabilität in Kanalrichtung

$K_{K,l}$  bestmögliche Übereinstimmung mit den Versuchen generiert. Als Ergebnis ergibt sich ein Datensatz an Kanalpermeabilitäten für verschiedene Kanalgeometrien und Werte unterschiedlichen Faservolumengehalts zur bestmöglichen Abbildung von RT in der Simulation für die gewählte Materialkombination. Um dies zu validieren, werden 2D Versuche, eine vollständige Umströmung einer Preform, vorgestellt und ein Abgleich des entwickelten Vorgehens mit Modellen aus der Literatur durchgeführt.

Mit der Kenntnis der Abbildung von RT in der Simulation werden Studien anhand des Füllprozesses einer generischen Geometrie unter Berücksichtigung von RT in Kapitel 4 durchgeführt. Es wird untersucht, in welcher Form die gewählten Prozessparameter Auswirkungen auf den Füllprozess bzw. auf den finalen Füllzustand haben. Über die Variation der Position und der Geometrie von Einlass und Auslass unter Berücksichtigung von lokalen Überpressungsbereichen werden die Grundlagen für eine Richtlinie zur Gestaltung von RTM Werkzeugen gelegt.

Die in Kapitel 3 beschriebenen Versuche sind mit teilweise deutlichen Streuungen versehen. Dies zeigt, dass für bestimmte Konfigurationen Fertigungsabweichungen über die Anwesenheit von RT induziert werden. Eine mögliche Ursache für solche Abweichungen kann die Positionierung der Preform in der Kavität sein. In Kapitel 5 werden die Versuche der vollständigen Umströmung der Preform mit Positionsabweichungen simulativ nachgestellt, um die dadurch induzierte Streuung beurteilen zu können. Ergänzend dazu werden ausgewählte Konzepte für Einlass und Auslass aus Kapitel 4 mit hohem, finalen Füllfaktor mit einer Positionsabweichung nachgestellt. Über die durchgeführten Berechnungen werden die Regeln zur Gestaltung von Werkzeugen für den RTM Prozess erweitert.

In Kapitel 6 wird eine innovative Methode, der Hybridmatrixantritt, zum Umgang mit RT im RTM Prozess vorgestellt. Dabei wird in einem ersten Schuss eine Sekundärmatrix in den RT- Kanal injiziert, wodurch dieser über das Aushärten verschlossen wird. Über einen zweiten Injektionsschritt erfolgt die Tränkung der Preform. Zur Anwendung dieses Ansatzes besteht die Anforderung, dass beim ersten Injektionsschritt eine definierte, geringe und einheitliche Penetration der Preform erfolgt. Zur Kontrolle der Penetration werden der Filtereffekt, die Modifizierung des Sekundärmaterials mit Partikeln und das rheologische Verhalten untersucht bzw. diskutiert.



## 2 Füllprozesse

Die Geschichte des RTM Prozesses, in dem eine textile Struktur in einer geschlossenen Kavität über eine Druckdifferenz mit einem reaktiven Harz getränkt wird, findet ihren Anfang in den 50er Jahren in den USA durch die Beschreibung der Fertigung eines Bootsrumpfes [37]. Erste Anmeldungen zum Patent werden in den 60er Jahren in Bezug auf die Anwendung in der Luftfahrt eingereicht [38]. Dabei wird nicht nur der Prozess sondern auch die Anlagentechnik beschrieben [39]. Zur physikalischen Beschreibung des Füllvorgangs bediente man sich bei Modellen, welche aus der Geologie stammten und auch zur Betrachtung von Filtrationsvorgängen verwendet werden [40, 41]. Die ersten Betrachtungen dazu fanden in den 70er Jahren statt [42]. Über die physikalische Betrachtung entwickelte sich die numerische Abbildung der Füllprozesse, was aufgrund der notwendigen Rechnerleistung in den 90er Jahren stattfand [43, 44]. Über die Etablierung von Faserverbundwerkstoffen entwickelte sich mehr und mehr Prozessverständnis, was in Untersuchungen hinsichtlich RT bzw. der Kontrolle des Flusses in einer textilen Struktur mündete [45–47].

In diesem Kapitel werden die notwendigen Grundlagen zum Verständnis der durchgeführten Untersuchungen beschrieben. Es wird auf die physikalische (Kapitel 2.1) sowie die numerische (Kapitel 2.2) Beschreibung von Füllvorgängen eingegangen. Die Thematik RT und deren Abbildung mit dem Ansatz der Ersatzpermeabilität wird vorgestellt (Kapitel 2.3).

### 2.1 Physikalische Beschreibung von Füllvorgängen

Das Tränken einer textilen Struktur kann abstrahiert als der Strömungsvorgang in einem porösen Medium gesehen werden. Zur Beschreibung eines solchen Vorgangs existieren vier wesentliche Modelle [48].

Der erste Ansatz stellt einen vereinfachten makroskopischen Ansatz dar, welcher das Textil bzw. das poröse Medium über ein Kontinuum darstellt. Die komplexe, mikroskopische Struktur wird in einem Term bzw. Wert wie die Permeabilität zusammengefasst. Die Modelle von Darcy [16, 41, 49], Blake-Kozeny-Carman und Ergun [50, 51] basieren auf diesem Ansatz.

Im Kapillar Bündel Modell werden in seiner einfachsten Form gerade, zylinderförmige Bündel als parallele Kapillare abgebildet. Untersuchungen haben gezeigt, dass diese Betrachtung die komplexen Vorgänge bei der Tränkung einer textilen Struktur nicht abbilden kann. [52]

Die numerische Abbildung der Strömung in einem porösen Medium auf Porenlevel bietet die Möglichkeit alle relevanten physikalischen Eigenschaften mit darzustellen. Dabei sind z.B. detaillierte Informationen über das poröse Medium bzw. eine detaillierte Modellierung notwendig, welchen den rechnerischen Aufwand erhöhen. Dadurch reduziert sich die Anwendung auf Grundlagenuntersuchungen. [53]

Der Ansatz der Abbildung über ein Poren-Netzwerkmodell stellt einen Kompromiss zwischen Kontinuumsansatz und einer numerischen Modellierung dar. Es bildet die physikalischen Zusammenhänge ab, wobei die Geometrie der Poren über Strömungskanäle abgebildet wird, welche einen reduzierten Rechenaufwand zulassen. [48, 54]

Am weitesten verbreitet ist das Gesetz von Darcy, welches aufgrund seiner Einfachheit in vielen Softwarelösungen (PAM-RTM<sup>1</sup>, RTM Worx<sup>2</sup>, Lims<sup>3</sup>, Slip<sup>4</sup>, SimLCM<sup>5</sup>) implementiert ist. Im folgenden Unterkapitel wird beschrieben, wie sich das Gesetz von Darcy herleitet bzw. wie es für analytische Betrachtungen verwendet werden kann.

## 2.1.1 Das Gesetz von Darcy

Henry Darcy hat als Wasserbauingenieur Sickerströmungen in Gestein experimentell untersucht. Er stellte einen proportionalen Zusammenhang zwischen der Fließgeschwindigkeit und dem Quotienten aus anliegendem Druckgradienten  $\Delta p$  und dem Weg  $\Delta x$  fest [41]. Um den Einfluss des durchströmenden Fluides mit zu berücksichtigen, definierte er die Proportionalitätskonstante aus dem Quotienten der Permeabilität  $K$  und der dynamischen Viskosität  $\eta$ . Damit hat er definiert, was heute als Gesetz von Darcy in der eindimensionalen Form bekannt ist:

$$\frac{Q}{A} = u = -\frac{K_x}{\eta} \frac{\Delta p}{\Delta x} \quad (2-1)$$

---

<sup>1</sup> ESI Group, Paris, Frankreich

<sup>2</sup> Polyworx, Nijverdal, Niederlande

<sup>3</sup> University of Delaware, USA, Center for Composite Materials

<sup>4</sup> Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Schweiz, Laboratory of Composite Materials and Advanced Structures

<sup>5</sup> University of Auckland, Neuseeland, Centre for Advanced Composite Materials

Die Leerrohrgeschwindigkeit  $u$  ist der Quotient des volumetrischen Durchflusses  $Q$  und der durchströmten absoluten Fläche  $A$  und wird auch als „Darcygeschwindigkeit“ bezeichnet. Die Fließgeschwindigkeit  $v$  im porösen Medium ergibt sich über die Massenerhaltung zu:

$$v = \frac{u}{\varepsilon} = \frac{u}{1 - v_f} \quad (2-2)$$

$\varepsilon$ : Porosität

$v_f$ : Faservolumengehalt

Sie ist vom Betrag her immer größer als die Leerrohrgeschwindigkeit. Gleichung (2-1) kann differentiell dargestellt werden.

$$\frac{Q}{A} = u = -\frac{K_x}{\eta} \frac{dp}{dx} \quad (2-3)$$

Damit führt Darcy als erster den Begriff der Permeabilität als Maß für die Durchlässigkeit eines porösen Mediums ein. In ihr wird der geometrische Charakter des porösen Mediums zusammengefasst. Dies bedeutet, für ein Textil ist sie von der Art des Textils bzw. des verwendeten Rovings, dem Kompaktierungs- bzw. dem Drapierzustand abhängig [55]. Beim Zusammenfassen von einer Vielfalt an Eigenschaften in einem einzigen Kennwert muss die gemachte Betrachtung Limitierungen unterliegen. Um diese zu verstehen hilft die Herleitung des Gesetzes von Darcy aus der allgemein gültigen Navier-Stokes-Gleichung. Dabei wird die „Volume Averaging Methode“ angewendet, welche ein repräsentatives Volumenelement verwendet. Über dieses Element werden die Eigenschaften in der Form vereinheitlicht, dass es groß genug ist um einerseits komplexe Geometrien richtig abzubilden und andererseits klein genug, um die physikalische Abbildung ausreichend genau darzustellen. [56, 57]

Mit der Vernachlässigung der Trägheitskräfte erhält man das Gesetz von Darcy in seiner allgemeinen Form.

$$\langle \vec{u} \rangle = -\frac{K}{\eta} \nabla \langle p \rangle \quad (2-4)$$

Die eckigen Klammern zeigen auf, dass zur Lösung der Navier- Stokes- Gleichung die „Volume Averaging Methode“ angewendet wird. [58]

Mit der Vernachlässigung der Trägheitskräfte ergeben sich Annahmen für die Gültigkeit des Gesetzes von Darcy. In Tab. 2-1 sind diese mit dem Bezug zur Anwendung für das Tränken einer textilen Struktur mit reaktivem Fluid dargestellt.

**Tab. 2-1: Annahmen zur Herleitung des Gesetzes von Darcy aus der Navier- Stokes- Gleichung**

Annahme	Bezug zur Anwendung
Newtonsches Fluid	Abhängig vom Materialsystem bzw. der Temperierung trifft diese Annahme zu [28, 59].
Chemisch inertes Fluid	Mit der Vermischung der Komponenten Harz und Härter beginnt die Vernetzung [60, 61].
Homogenes, inelastisches Material	Die Struktur des Textils besitzt einen inhomogenen Charakter [49, 62, 63, 63].
Makrofluss	Der Roving wird nur als Festkörper dargestellt. Der Einfluss von Mikrofluss hat wesentlichen Einfluss auf das Flussverhalten zwischen den Rovings [64, 65].
Keine Oberflächenkräfte	In Abhängigkeit der verwendeten Materialien bzw. Prozessrandbedingungen treten Kapillardrücke bis zu 500mbar auf [66–69].
Gesättigter Fluss	Der Hintergrund zur Modellierung ist das Tränken zu verstehen. Beim Tränken tritt gesättigter Fluss hinter der Fließfront auf, während Porenbildung an der Fließfront stattfindet [33, 69, 70].
Langsame Strömung	Es wird eine Reynoldszahl $Re < 1$ angenommen, wodurch nur langsame Fluidströme betrachtet werden können. Reale Injektionsdrücke gehen bis zu 100bar und induzieren eine stark turbulente Strömung [58].
Stationärer Fluss	Je nach gewählten Prozessvariante ändert sich der angesetzte Druckgradient kontinuierlich [58].

Alle Annahmen wurden hinreichend in der Literatur untersucht und in Bezug auf ihre Anwendbarkeit beurteilt. Dabei helfen moderne Berechnungsmethoden spezifische Effekte wie Viskositätsänderungen [71], den Kapillardruck [68] bzw. Mikro- und Makrofluss mit zu berücksichtigen [69].

Gleichung (2-4) zeigt, dass die Permeabilität eine tensorielle Größe zweiter Ordnung darstellt [72]. Ausgeschrieben wird daraus:

$$\begin{bmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{yx} & K_{yy} & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & K_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dp/dx \\ dp/dy \\ dp/dz \end{bmatrix} \quad (2-5)$$

Berücksichtigt man die geforderte Symmetrie des Tensors, müssen sechs skalare Werte ermittelt werden, um ein textiles Medium bzw. ein Textil zu beschreiben. Orientiert sich das gewählte Achsensystem entlang der Hauptachsen reduziert sich Gleichung (2-4) zu:

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_1 & 0 & 0 \\ 0 & K_2 & 0 \\ 0 & 0 & K_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dp/dx_1 \\ dp/dx_2 \\ dp/dx_3 \end{bmatrix} \quad (2-6)$$

Die Koordinatensysteme können durch Hauptachsentransformation ineinander überführt werden. [16]

Für die Bestimmung des Tensors stehen unterschiedliche Messmethoden zur Verfügung. Diese sind in der Literatur hinreichend ausführlich beschrieben [60, 62, 73–82].

## 2.1.2 Mischregel zur Bestimmung des repräsentativen Tensors für das Laminat

Im Vergleich zu einer Sickerströmung durch Gestein besteht ein Bauteil aus Faserverbundwerkstoff üblicherweise aus mehreren Lagen. Dazu ist die Dimension in Dickenrichtung üblicherweise um Größenordnungen kleiner als in der Ebene. Zur Ermittlung des Tensors in Bauteilebene, welcher die gesamte Preform beschreibt, werden die einzelnen Tensoren vektoriell addiert. [63]

$$K_{ges} = \frac{1}{H} \sum_{i=1}^n (H_i K_i) \quad (2-7)$$

$H_i$  bzw.  $K_i$  sind die Höhe bzw. der „In-Plane“ Tensor der Permeabilität der Lage  $i$ .  $H$  stellt die Bauteildicke dar.

Diese Variante der Ermittlung des „In-Plane“ Tensors wird bei 2D-Simulationen angewendet. Bei der Anwendung muss beachtet werden, dass Querstromeinflüsse über die Höhe des Bauteils nicht berücksichtigt werden. Daher leitet sich von dieser Regel ab, dass eine vereinfachte 2D Simulation für dünne Lamine angesetzt werden kann, in der diese eine untergeordnete Rolle spielt. Es lässt sich zeigen, dass wenn die Permeabilität in Dickenrichtung der Einzellagen sehr klein im Verhältnis zu dem in der Ebene ist, findet ein signifikanter Fluss in Dickenrichtung statt [63]. Als Richtlinie, ob eine vereinfachte 2D Simulation möglich ist, kann folgender Term herangezogen werden [83].

$$\frac{LK_{xx}}{HK_{zz}} \ll 1 \quad (2-8)$$

Dabei ist  $L$  die Strecke, welche in der Bauteilebene getränkt werden muss.

## 2.1.3 Analytische Beschreibung des eindimensionalen Flusses in einem porösen Medium

Das Gesetz von Darcy in seiner eindimensionalen Form gemäß Gleichung (2-3) bietet die Möglichkeit analytische Zusammenhänge abzuleiten, mit denen z.B. einfache simulativ abgebildete Tränkungs Vorgänge verifiziert werden können. Druckverteilungen bzw. der zeitliche Fortschritt einer Fließfront helfen grundlegendes Prozessverständnis zu generieren.

Zur Vorgehen im RTM Prozess existieren zwei Möglichkeiten. Je nach vorhandener Prozesstechnik wird die Injektion mit einem konstanten Massenstrom oder mit einem konstanten Injektionsdruck durchgeführt. Aufgrund der einfachen, kostenoptimierten Umsetzung mit einem Harzreservoir in einem Drucktopf ist die Variante mit einem konstanten Injektionsdruck sehr verbreitet. Alle in dieser Arbeit beschriebenen Experimente und Untersuchungen basieren darauf.

Im Folgenden werden die für diese Arbeit notwendigen analytischen Formeln hergeleitet.

Dazu wird im ersten Schritt die Laplace Gleichung für den 1- D Fluss [84] für einen spezifischen Zeitpunkt mit der dazugehörigen Fließfrontposition  $x_f$  gelöst [84].

$$\frac{d^2p}{dx^2} = 0 \quad (2-9)$$

$$p(x) = C_1x + C_2 \quad (2-10)$$

Über die Randbedingung  $p(x = 0) = p_E$  wird  $C_2 = p_E$ . Aus der zweiten Randbedingung  $p(x = x_f) = 0$  folgt  $C_1 = -\frac{p_{inj}}{x_f}$

Es resultiert folgender Druckverlauf:

$$p(x, x_f) = p_{inj} \left( 1 - \frac{x}{x_f(t)} \right) \quad (2-11)$$

Zur Ermittlung der Fließfrontposition  $x_f$  zu einem bestimmten Zeitpunkt wird Gleichung (2-3) herangezogen.

$$u = -\frac{K_x}{\eta} \frac{dp}{dx} = \frac{dx}{dt} \quad (2-12)$$

Die Druckdifferenz ist aufgrund der Randbedingung des konstanten Injektionsdrucks immer konstant, während die Fließfrontposition sich konstant ändert.

$$x_f dx_f = \frac{p_E K_x}{\eta(1 - v_f)} dt \quad (2-13)$$

$$\frac{x_f(t)^2}{2} = \frac{p_{inj} K_x}{\eta(1 - v_f)} t + C \quad (2-14)$$

Mit der Randbedingung  $x_f(t = 0) = 0$  erhält man die allgemeine Form:

$$x_f(t) = \sqrt{\frac{2p_{inj}K_x}{\eta(1-v_f)}t} \quad (2-15)$$

Kombiniert man Gleichung (2-11) mit Gleichung (2-15) erhält man den Druckverlauf im Fluid in Abhängigkeit von Ort und Zeit.

$$p(x, t) = p_{inj} \left( 1 - x \sqrt{\frac{\eta(1-v_f)}{2p_{inj}K_x} \frac{1}{t}} \right) \quad (2-16)$$

## 2.2 Numerische Simulation des RTM Prozesses

Bei der Entwicklung von Füllprozessen stehen sowohl die vollständige als auch die Optimierung für eine „schnelle“ Füllung im Vordergrund. Das vollständige Füllen dient dabei dem Vermeiden der Entstehung von Poren, die die mechanischen Eigenschaften des Bauteils verringern. Das Füllen als Prozessschritt hat einen wesentlichen Anteil an der Prozesszeit und somit einen direkten Einfluss auf die Bauteilkosten. Dabei gilt als Richtlinie, je schneller die Füllung stattfindet desto höher kann die Werkzeugtemperatur gewählt werden und desto schneller erreicht das Harz einen Aushärtegrad, welcher ein Entformen ermöglicht. Seit den achtziger Jahren wird an der Finite Elemente basierten Abbildung von Füllprozessen gearbeitet. Daraus entstanden die heute zur Verfügung stehenden Softwarelösungen. Diese Programme bieten die Möglichkeit den Aufwand für zeitintensive „Try and Error“ Methoden für die Gestaltung von Werkzeugen bzw. zum Auslegen von Prozessparametern zu reduzieren. [85]

Der Blick in die Kavität ist üblicherweise unter realen Bedingungen schwierig. Aktuell werden Methoden dazu entwickelt, welche dies teilweise gestatten [86]. Die simulative Betrachtung von Füllvorgängen ermöglicht es, während des Entwicklungsprozesses Vorgänge in der Kavität zu betrachten. Fließfront bzw. Druckverläufe, Geschwindigkeitsverteilungen und Temperaturverteilungen werden detailliert dargestellt und helfen ein tiefgreifendes Verständnis des Prozesses zu generieren. Jedes Simulationsergebnis stellt eine Abbildung dar, welche auf Inputdaten beruht. Damit die Simulation die physische Welt genügend beschreibt, müssen diese validiert werden. [16]

Für einfache Geometrien existieren analytische bzw. semianalytische Methoden zur Vorhersage des Füllvorgangs. Für komplexe Geometrien bietet sich die numerische Simulation an. [87]

Um verschiedene Skalierungsebenen in der Füllsimulation abzubilden, werden verschiedene Herangehensweisen verwendet. Sie sind in Tab. 2-2 zusammengefasst. Die Füllsimulation von ganzen Bauteilen auf Micro- bzw. Mesolevel erfordert eine sehr feine Ver-

netzung, was zu langen Rechenzeiten führt. Aufgrund dessen basieren die meisten simulativen Betrachtungen auf einer Makrolevelmodellierung. Die textile Faserverstärkung wird dabei als homogenes, poröses Material modelliert. Die innere Struktur des Rovings wird nicht abgebildet. Aktuelle Softwarepakete basieren auf einer Modellierung auf makroskopischer Ebene und verwenden das Gesetz von Darcy [85, 88].

Das wichtigste Ziel der makroskopischen Füllsimulation ist die Vorhersage der zeitlichen und räumlichen Fließfrontentwicklung. Über diese Aussage ist eine Optimierung der Einlass- und Auslasssituation möglich.

Tab. 2-2: Skalierungsebenen in der Simulation

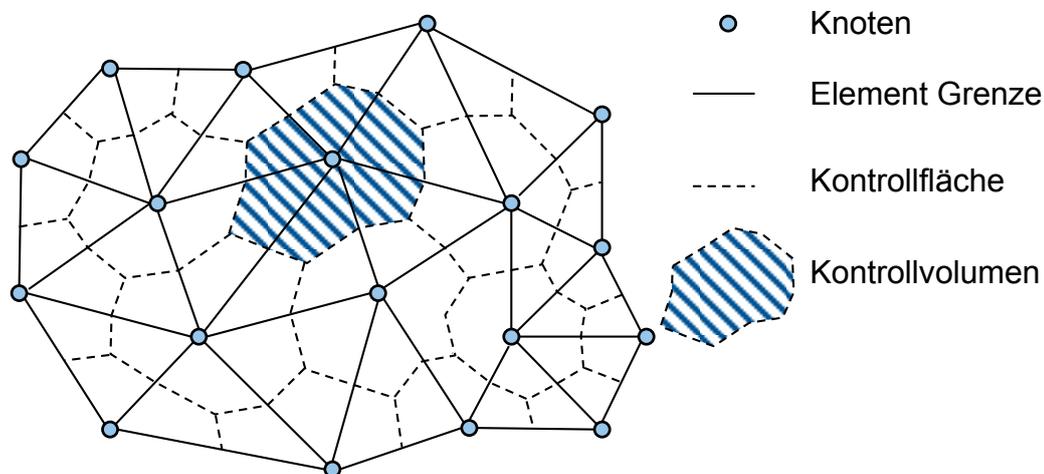
Skalierung	Größen	Strömungscharakteristik	Zweck
Makroskopisch	<0,1m	Strömung nach dem Gesetz von Darcy (einheitliches, poröses Medium)	Werkzeugauslegung, Prozessparameteroptimierung.
Mesoskopisch	1-10mm	Stokesströmung (zwischen den Rovings. Strömung nach Darcys unter Berücksichtigung von Kapillareffekten (im Roving).	Permeabilitätsevaluierung, Generierung von Verständnis der Rovingimprägung.
Mikroskopisch	10 $\mu$ m-1mm	Stokesströmung unter Berücksichtigung von Oberflächenspannungen am Phasenübergang Luft – Flüssigkeit.	Verständnis von Porenentstehung und Entwicklung. Evaluierung von Rovingimprägung.

## 2.2.1 Kontrollvolumen/ Finite Elemente Methode zur numerischen Simulation von Füllprozessen

Die Finite Elemente Methode (FEM) bietet die Möglichkeit partiellen Differentialgleichungen approximiert zu lösen. Das zu Grunde liegende Vorgehen dieser Methode ist es, ein Gebiet in viele kleine Regionen, sogenannte „Finite Elemente“, aufzuteilen. Die Punkte, an denen sich diese Elemente berühren sind Knoten. Das Verhalten jedes einzelnen Elements wird über eine „shape function“, eine einfache Gleichung, abgebildet. Die Gleichungen aller Elemente werden in einem Gleichungssystem zusammengesetzt. Dadurch wird die Betrachtung des gesamten Systems möglich. Das lineare Gleichungs-

system wird üblicherweise über numerische Methoden gelöst. Die Genauigkeit der Abbildung wird einerseits über die Größe der Elemente bzw. über die „shape function“ bestimmt.

Die „Control Volume/ Finite Element Methode“ (CV/FEM) ist eine Variante der FEM, die häufig bei der Modellierung von Strömungsvorgängen auf der Makroebene verwendet wird [55, 69, 85, 89–94, 94]. Mit dieser Methode kann die Kavität über Schalenelemente (2D- Simulation) bzw. Volumenelemente (3D- Simulation) abgebildet werden [95]. Kleinere Untervolumen werden kreiert, indem man den Schwerpunkt des Elements mit den Mittelpunkten der Elementkanten verbindet. Dadurch können Kontrollvolumina um jeden Knoten herum definiert werden (Abb. 2-1). Die Grenze jedes Kontrollvolumens wird als Kontrolloberfläche bezeichnet [90].



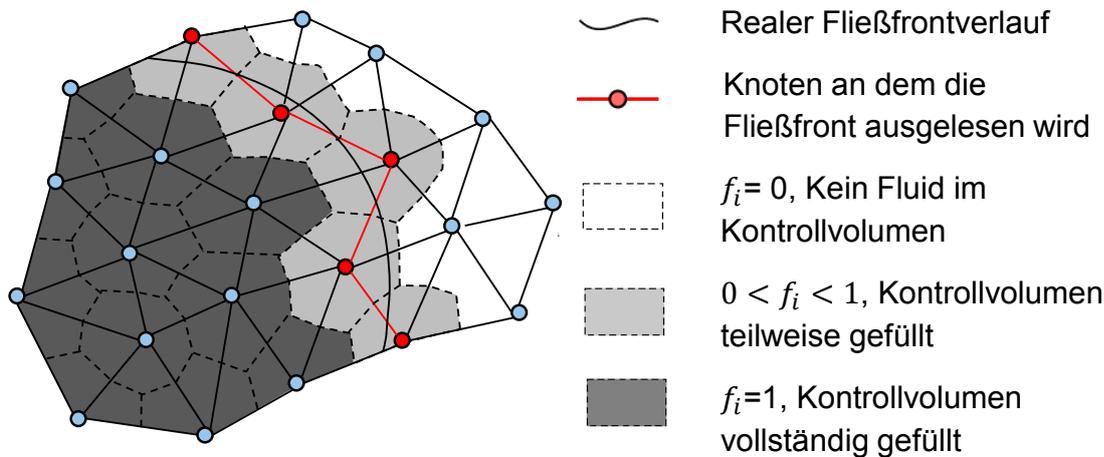
**Abb. 2-1: Diskretisierung einer Berechnungsdomäne in Schalenelementen und poligonale Kontrollvolumina in CV/FEM [90]**

Um das Fluidvolumen im Kontrollvolumen als Information über die Zeit bereit zu stellen wird ein Füllfaktor mit jedem Knoten verbunden. Er definiert sich über das Verhältnis des Fluidvolumens zum gesamten Volumen, welches die Poren ausfüllt [94].

$$f_i = \frac{V_{i,fluid}}{\varepsilon_i V_i} \quad (2-17)$$

Dabei stellt  $f_i$  den Füllfaktor,  $\varepsilon_i$  die Porosität,  $V_i$  das Volumen des Kontrollvolumens und  $V_{i,fluid}$  das Volumen des Fluids innerhalb des Kontrollvolumens dar. Das Kontrollvolumen kann drei verschiedene Zustände einnehmen (Abb. 2-2) [90, 94].

1.  $f_i = 0$ , kein Fluid im Kontrollvolumen.
2.  $0 < f_i < 1$ , Kontrollvolumen teilweise gefüllt (Bereich der Fließfront).
3.  $f_i = 1$ , Kontrollvolumen vollständig gefüllt (gesättigter Fluss).



**Abb. 2-2:** Darstellung der Fließfront errechnet über die CV/ FEM Methode, angepasst nach [94, 96].

In Abb. 2-2 ist dargestellt wie der Zusammenhang der dargestellten Fließfront mit dem numerisch errechneten Füllgrad über die Kontrollvolumina zusammenhängt. Da das Kontrollvolumen eine geometrische Größe besitzt und über den Füllgrad einheitlich gefüllt wird, weicht die reale Fließfront von der errechnet ab. In den in dieser Arbeit dargestellten Studien wurde die Software PAM-RTM der Firma ESI Group, Paris, Frankreich verwendet. Diese Software verwendet eine modifizierte Variante des beschriebenen Ansatzes. Teilweise gefüllte Kontrollvolumina geben Fluid an anliegende Kontrollvolumina ab, so dass die geometrische Ausbreitung der Fließfront über mehrere Elementreihen/ Knoten gehen kann. Eine öffentlich zugängliche Quelle wird von ESI aktuell nicht bereitgestellt. Die hier getätigten Aussagen wurden vom ESI Support bestätigt.

In den meisten numerischen Simulationen werden Effekte wie z.B. die Faserbewegung während der Injektion bzw. Widerstand der in der Kavität vorhandenen Luft nicht berücksichtigt [85]. Faserbewegungen während der Injektion beeinflussen maßgeblich die Qualität des Bauteils. Aussagen zu diesem Effekt sind aktuell über die Simulation nicht möglich. Die Viskosität von Luft ist im relevanten Druckbereich drei Zehnerpotenzen niedriger verglichen mit der des Injektionsharzes. Der Effekt, der über das Verdrängen von Luft in der Kavität auftritt kann aus diesem Grund vernachlässigt werden [20]. Mit diesen beiden Vereinfachungen kann das Gesetz von Darcy in die Massenerhaltungsgleichung für inkompressible Fluide eingesetzt werden:

$$\nabla \vec{u} = \nabla \left( -\frac{1}{\eta} \mathbf{K} \nabla p \right) = 0 \quad (2-18)$$

Ausgehend von dieser Gleichung wird die Druckverteilungen unter der Beachtung der Randbedingungen errechnet [16, 16, 85]:

$$p = p_i \text{ oder } A_i \left( \frac{K}{\eta} \nabla p \right) \vec{n}_i = Q_i \text{ am Einlass} \quad (2-19)$$

$$p = p_0 \text{ an der Fließfrontposition} \quad (2-20)$$

$$\frac{dp}{dn} = 0 \text{ an der Wand des Werkzeugs} \quad (2-21)$$

$A_i$  ist die Fläche des Harzeinlasses;  $\vec{n}_i$  bezeichnet den nach außen gehenden Normalenvektor. Der Druck  $p_0$  liegt an der Fließfront an. Dadurch vernachlässigt man jeglichen Druckausgleich im trockenen Bereich. Die Flussrate  $Q_{ij}$  zwischen benachbarten Kontrollvolumen  $i$  und  $j$  wird über das berechnete Druckfeld berechnet:

$$Q_{ij} = \int_{A_{ij}} \vec{n}_{ij} \frac{K}{\eta} \nabla p \quad (2-22)$$

$A_{ij}$  bezeichnet die Flächen zwischen den Kontrollvolumina und  $\vec{n}_{ij}$  stellt den zum Element gehörenden Normalenvektor dar.

Der Füllfaktor  $f_i^{n+1}$  errechnet sich in Abhängig vom Zeitschritt  $\Delta t$ , dem Volumenstrom  $Q_i$  und dem vorangegangenen Füllfaktor  $f_i^n$  [94].

$$f_i^{n+1} = f_i^n + \frac{\Delta t Q_i}{\varepsilon_i V_i} \quad (2-23)$$

Das Füllen eines Werkzeugs ist kein stationärer Prozess. Über die Aufteilung in diskrete Zeitschritte wird eine quasi stationäre Betrachtung möglich. Dies bedeutet, dass die Lösung des Gesamtsystems über eine ausreichend kleine Wahl von Zeitschritten angenähert wird. Die Kontrolle dieses inkrementellen Zeitschritts stellt die Stabilität der Simulation sicher [20]. Der Zeitschritt muss für jeden Rechendurchgang neu berechnet werden. Im idealen Fall wird ein Kontrollvolumen in einem Zeitschritt vollständig gefüllt ( $f_i = 1$ ). Größere Zeitinkremente führen zu einer Überfüllung des Kontrollvolumens. Dadurch wird Massenverlust im System generiert [97]. Die Zeit zum Füllen eines Kontrollvolumens wird folgendermaßen berechnet [94].

$$\Delta t_i = \frac{(1 - f_i) \varepsilon_i V_i}{Q_i} \quad (2-24)$$

Pro Zeitschritt wird jedes  $\Delta t_i$  für jedes Kontrollvolumen mit Füllfaktor  $f_i < 1$  berechnet. Der kleinste Wert wird als nächster inkrementeller Schritt für die nächste Iteration gewählt.

$$\Delta t = \min(\Delta t_i) \quad (2-25)$$

Die folgenden Schritte fassen die CV/FEM Methode zusammen:

- Definieren des Kontrollvolumens basierend auf dem finiten Elementnetz.
- Die Kontrollvolumina für die Fluidzuführung werden als gefüllt angenommen ( $f_i = 1$ , alle anderen als nicht gefüllt ( $f_i = 0$ )).
- Numerisches Lösen von Gleichung (2-19) zur Berechnung des Druckfelds an Knoten im Bereich des gesättigten Flusses mit angepassten Randbedingungen (2-19) - (2-21).
- Berechnung der Druckgradienten im Bereich der Fließfront durch Lösen der „shape“ Funktion.
- Berechnen des Volumenstroms zwischen den Kontrollvolumina mittels Gleichung (2-22)
- Berechnen der neuen Füllfaktoren der Kontrollvolumen mit Gleichung (2-23).
- Berechnung der Größe des nächsten Zeitschritts, dass mindestens ein Kontrollvolumen den Füllfaktor 1 erreicht Gleichung (2-24) & (2-25).
- Wiederholen der beschriebenen Schritte bis zur vollständigen Füllung der Kavität oder bis Porenbildung also Lufteinschluss erkannt wird.

Die CV/FEM Methode wurde von Wang et al. 1986 entwickelt und für dünne Strukturen angepasst [93].

### **Eigenschaften der Kontrollvolumina/ Finite Elemente Methode**

Simulationen, die auf der CV/ FEM aufbauen, sind in der Umsetzung verhältnismäßig schnell [90]. Andere numerische Ansätze, wie die Finite Differenz bzw. die Grenzelementmethode verwenden eine sich verändernde Randbedingung. Dies verlangt ein Überarbeiten des Netzes in jedem diskreten Zeitschritt, was zeitintensiv ist und nicht zu rechtfertigende Kosten induziert. [85, 98]

Die CV/ FEM Methode besitzt einen entscheidenden Nachteil. Durch die Verwendung des fixen FEM Netzes wird die exakte Bestimmung der Fließfrontposition anspruchsvoll. Die Genauigkeit der Aussage dieser numerischen Methode wird darüber reduziert [90]. Fließfrontverfeinerungstechniken, welcher auf der CV/ FEM basieren, bieten die Möglichkeit bei akzeptablem Rechenaufwand eine erheblich genauere Aussage zu erreichen [90]. Ein weiterer Nachteil des CV/ FEM Ansatzes stellt das Problem bei der Massenerhaltung dar. Diese werden bei verzerrten Elementen induziert: Eine große Streckung des Elements führt zu einem großen Massenverlust [99]. Für dieses Problem wurde von Phe-lan die „Flow Analysis Network“ Technik entwickelt [100].

Der CV/ FEM Ansatz ist in vielen kommerziell erhältlichen Softwarelösungen, wie LIMS<sup>6</sup>, RTM-Works<sup>7</sup> und PAM-RTM aufgrund der numerischen Effizienz implementiert [85, 93].

## 2.2.2 Simulationssoftware PAM-RTM

Eine kommerzielle Software zur Abbildung von Füllvorgängen im Bereich Faserverbundwerkstoffe ist PAM-RTM [101]. Sie bietet die Möglichkeit ein breites Spektrum von Prozessen wie Resin Transfer Molding (RTM), Vacuum Assisted RTM (VRTM), Vacuum Assisted Infusion (VARI) und Compression RTM (CRTM) simulativ abzubilden [102, 103]. Die Software basiert auf der Software RTMFLOT, welche an der École Polytechnique de Montréal von Tochu et. al. entwickelt wird [101, 104]. PAM-RTM wird im Rahmen einer Franchisevereinbarung von ESI vertrieben [101]. Die Software findet Einsatz in der Industrie [102, 103, 105] und im wissenschaftlichen Umfeld [88, 101, 106, 107].

Die Software verwendet den CV/ FEM Ansatz in Kombination mit einer „non-conforming“ finiten Element Annäherung. Diese Ansätze werden aufgrund ihrer guten numerischen Stabilität und ihrer Eigenschaft Rechnungen zu parallelisieren häufig verwendet [108]. Das berechnete Feld ist aufgrund dieses Ansatzes entlang der Elementgrenze diskontinuierlich [109] und nur Elemente erster Ordnung mit einer linearen „shape function“ können um die Druckverteilung zu berechnen verwendet werden. Im Gegensatz zu „conforming“ finiten Elementen ist die Massenerhaltung über die Elementgrenze hinweg lokal ausreichend.

### Einsatz von PAM-RTM in der Literatur

Isoldi et.al. [110] validiert seine Methodik für Ansys Fluent mit PAM-RTM und analytischer Auslegung über generische Strukturen. Es wird Übereinstimmung der drei Ergebnisse berichtet. Lediglich eine leichte Abhängigkeit in Bezug auf die Netzfeinheit wird festgestellt.

Grössing vergleicht in [88] Open Foam<sup>8</sup> mit PAM-RTM. Beide Softwarepakete werden vom selben Hersteller, der Firma ESI, bereitgestellt. Das Vorgehen im Programm unterscheidet sich grundlegend. Zwei Experimente mit manipulierten Preforms werden beschrieben. Im ersten wird eine Strömung in einem unidirektionalen Halbzeug aufgebracht. Im zweiten wird ein zweites Textil mit in die Preform implementiert, wodurch

---

<sup>6</sup> LIMS ist ein RTM Füllsimulationsprogramm inklusive einer GUI, welches an der Universität Daleware entwickelt wurde.

<sup>7</sup> RTM-Works ist ein RTM Füllsimulationsprogramm inklusive einer GUI, welches von Polyworks B.V. vertrieben wird.

<sup>8</sup> Open Foam ist ein freies „Open Source“ CFD Softwarepaket. Es wird entwickelt von ESI-Open CFD und vertrieben durch die „OpenFoam foundation“.

RT auftritt. Über eine transparente Werkzeugoberseite sind die Fließfrontenverläufe in den Experimenten sichtbar und können dokumentiert werden. Für die simulative Abbildung werden ähnliche Netze verwendet. Der notwendige Aufwand zur Berechnung unterscheidet sich signifikant. Beide Softwarelösungen zeigen ähnliche Lösungen im Experiment 1 mit einem Textil als porösem Medium. Bei Experiment 2 tritt RT auf und die über Simulation ermittelten Lösungen unterscheiden sich erheblich. Die von Open Foam erbrachte Lösung stimmt mit dem Experiment überein. Der Unterschied ist in der Abbildung der jeweiligen Software von RT zu finden. Open Foam benötigt keine zusätzlichen Informationen für Bereiche ohne Fasern. Sie müssen lediglich geometrisch definiert werden. PAM-RTM verwendet den Ansatz über Ersatzpermeabilität (Kapitel 2.3.1). In Grössings Studie wird der Ansatz „Permeabilität des Kanals in Längsrichtung entspricht der Permeabilität des Kanals in Querrichtung ( $K_{K,l} = K_{K,t}$ )“ verwendet. Dabei wird keine Begründung für dieses Vorgehen bzw. den gewählten Wert gegeben.

Silva Porto verweist in [111], einer Studie zur Optimierung des Füllvorgangs bei der Herstellung einer Schiffsschraube, auf Oliverra [112], der einen Vergleich des Softwaredmoduls Fluent von Ansys mit PAM-RTM. Die Ergebnisse zeigen gute Übereinstimmung.

Arnold et al. vergleicht in [113] die über Simulation generierten Fließfrontenverläufe mit denen in Experimenten auftretenden. Dazu wurde ein 2D Permeabilitätsprüfstand verwendet. Dieser ist mit kapazitiven Sensoren zur Fließfronterkennung ausgestattet. Die berechneten und experimentell ermittelten Fließfrontenverläufe zeigen eine gute Übereinstimmung. Des Weiteren wurde der Einfluss der Streuung, der bei der Permeabilitätsmessung auftritt, mit betrachtet. Der Bedarf einer einheitlichen und ausführlich definierten Messmethode wird aufgezeigt.

## 2.3 Race Tracking (RT)

Der Begriff Race Tracking (RT) bedeutet direkt übersetzt die Rille bzw. Führung. In Kapitel 1 wird eine Definition für den Begriff eingeführt: Aufgrund von unterschiedlich porösen Bereichen entstehen bei deren gemeinsamen Füllen abweichende Fließgeschwindigkeiten, die sich in Form des räumlichen und zeitlichen Ausbreitens der Fließfront, dem sogenannten Füllbild, gegenseitig beeinflussen.

Die Tatsache der gegenseitigen Beeinflussung unterschiedlich permeabler Bereiche besitzt Analogien zur Diskussion über den Einfluss von Mikro- bzw. Makrotränkung. Dabei wird die Tränkung des Rovings ins Verhältnis mit dem Fluss zwischen dem Roving gebracht. Der Unterschied der beiden Betrachtungen ist in der geometrischen Ausprägung und in den betrachteten Effekten zu sehen.

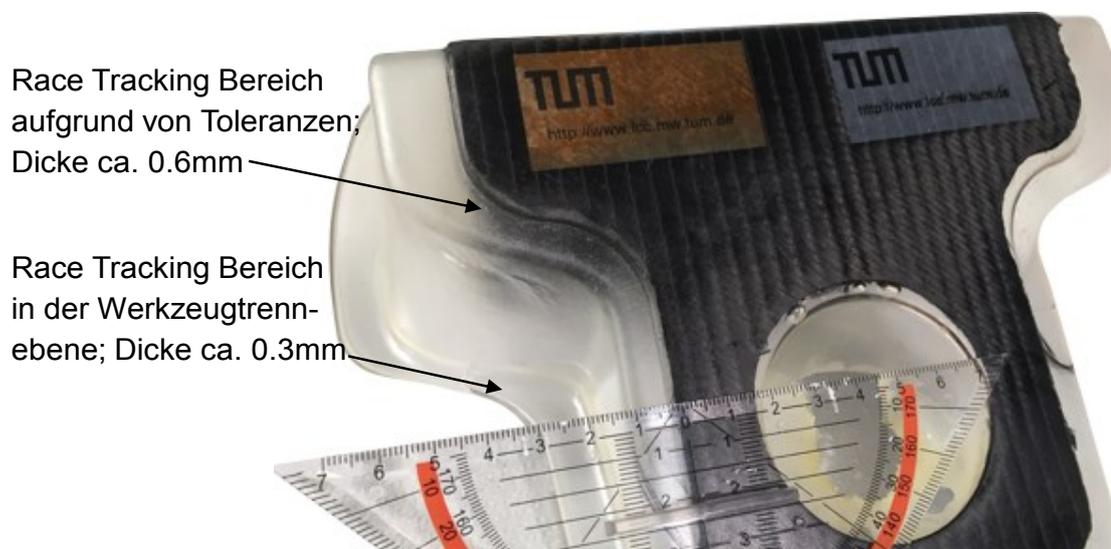
Eine Preform muss beim Einlegen in eine Kavität negativ toleriert sein, um das Einklemmen von Fasern in der Trennebene zu vermeiden. Daher ist diese, durch den indu-

zierten Kanal zwischen Beschnittkante der Preform und Werkzeug, eine sehr häufig auftretende Variante des RT. Die notwendige Toleranz ergibt sich über die Prozesskette zum Herstellen der Preform bis hin zum Einlegen dieser in das Werkzeug. Friedrich et al. geben die entstehenden Toleranzen wie in Tab. 2-3 dargestellt an. Demnach ergibt sich eine minimale Toleranz für eine Preformkante im Werkzeug von  $-1,8\text{mm}$  [114]. Berücksichtigt man, dass eine zweite Kante gegenüberliegend vorhanden ist, führt dies zu einer maximal auftretenden Breite eines RT- Kanals von  $3,6\text{mm}$ .

**Tab. 2-3: Übliche Toleranzen beim Herstellen einer trockenen Preform [114]**

Prozessschritt	Manueller Prozess [mm]	Automatisierter Prozess [mm]
Halbzeug schneiden	$\pm 1$	$\pm 0,2$
Handling	$\pm 1$	$\pm 0,3$
Preforming	$\pm 2$	$\pm 1$
Positionieren	$\pm 0,5$	$\pm 0,3$

Damit kann der zu berücksichtigende Spalt im Werkzeug zwischen  $0$  und  $3,6\text{mm}$  liegen. Dabei variiert er umlaufend. Üblicherweise kann keine Nulltolerierung zugelassen werden, da dies zu Faserklemmungen in der Werkzeuggtrennebene führt. Ein definierter Spalt von mindestens  $1\text{mm}$  wird vorgesehen. Der Spalt prägt sich am entformten Bauteil als Reinharzbereich aus (Abb. 2-3).



**Abb. 2-3: Reinharzkante an einem ausgehärtetem Bauteil**

Man erkennt, dass mit den genannten Toleranzen die Endkonturfertigung mit dem RTM Prozess nicht mit der klassischen Prozesskette zu erreichen ist. Ein mechanisches Besäumen des Bauteils ist immer notwendig. Dies begründet die Eigenschaft des RTM

Prozesses zur „near net-shape“ Fähigkeit. Die automatisierte Textiltechnik bietet Ansätze, die geometrische Toleranz der Preform zu verringern [115, 116].

### 2.3.1 Ersatzpermeabilität: Methode zum Umgang mit Race Tracking in der Simulation

RT, ob bewusst als Verteilerkanal oder über das Aufsummieren von Toleranzen der vorgeschalteten Prozesskette als z.B. Kanal zwischen zwei Subpreforms, hat einen wesentlichen Einfluss auf das Füllen der textilen Struktur [16].

Eine Methode zur Abbildung von Hohlräumen in der Kavität basiert auf Darcys Gesetz, dem „equivalent permeability approach“ bzw. dem Ansatz der Ersatzpermeabilität. Dabei wird der auftretende Kanal mit einem finiten Elementnetz abgebildet, welches mit einem Materialwert Permeabilität, angepasst an die geometrischen Eigenschaften des Kanals bzw. denen der Preform, definiert wird.

Die Kanalpermeabilität  $K_{K,l}$  entlang des Kanals ergibt sich über die analytische Lösung der Stokes Gleichung für den stationären Fluss und dem Vergleich mit dem eindimensionalen Gesetz von Darcy gemäß Gleichung (2-1).

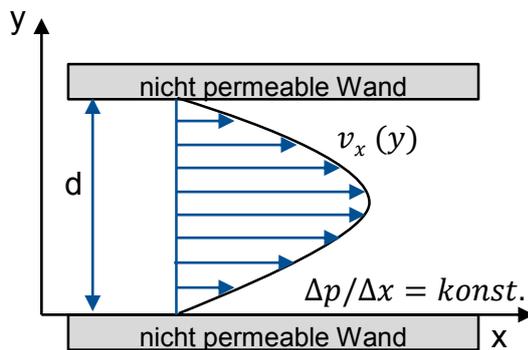


Abb. 2-4: Geschwindigkeitsprofile einer 1D-Strömung zwischen zwei nichtpermeablen Wänden [96]

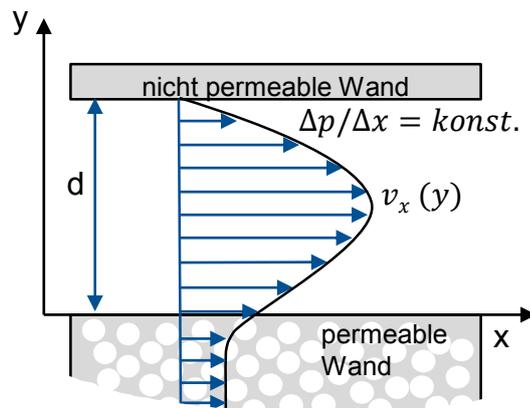


Abb. 2-5: Geschwindigkeitsprofile einer 1D-Strömung zwischen einer nichtpermeablen und einer permeablen Wand [96]

Verschiedene Modelle ermöglichen die Berechnung der Kanalpermeabilität in Richtung des Kanals. Das Einfachste basiert auf einer Poiseuille-Strömung [31], also einer vollständig entwickelten, druckunterschiedsgetriebenen Strömung zwischen zwei Platten mit dem Abstand  $d$  (Abb. 2-4). Die Geschwindigkeitsverteilung ergibt sich mit der Randbedingung „no slip“, dass die Geschwindigkeit am Rand gleich null ist:

$$v_x(y) = -\frac{d^2 \Delta p}{2\eta \Delta x} \left(1 - \frac{y}{d}\right) \quad (2-26)$$

Über die Integration des Geschwindigkeitsprofils kann eine mittlere Geschwindigkeit bestimmt werden.

$$u_x = \frac{1}{d} \int_{y=0}^{y=d} v_x(y) dy = -\frac{d^2 \Delta p}{12\eta \Delta x} \quad (2-27)$$

Über Substitution ergibt sich das eindimensionale Gesetz von Darcy. Die Ersatzpermeabilität stellt sich wie folgt dar:

$$K_{K,l} = \frac{d^2}{12} \quad (2-28)$$

Da dieses Modell auf einer Poiseuille-Strömung basiert, sind beide beteiligten Wände nicht permeabel. Beavers stellt in [117] in Experimenten fest, dass bei einem Poiseuille Strom entlang eines porösen Materials ein deutlicher Massenstrom in das Textil stattfindet. Er schlägt eine Grenzschicht vor, den sie mit einem „slip“ Wert abbilden (Abb. 2-5). Basierend darauf beschreibt Ni et al. einen Ansatz zur Berechnung der Ersatzpermeabilität für eine permeable und eine nichtpermeable Wand [31]:

$$K_{K,l} = \frac{\alpha d^3 + 4d^2 \sqrt{K} + 6\alpha d K}{12(\sqrt{K} + \alpha d)} \quad \text{mit } \alpha = \sqrt{\frac{\eta_{eff}}{\eta}} \quad (2-29)$$

$K$  entspricht der Permeabilität des porösen Mediums, während  $\alpha$  ein empirischer Faktor ist der scherratenabhängiges Materialverhalten beschreibt [45].  $\eta_{eff}$  beschreibt die scheinbare Viskosität im porösen Medium, welche von der gemessenen Viskosität  $\eta$  abweichen kann. Studien zeigen, dass scherratenabhängiges Materialverhalten keinen wesentlichen Einfluss auf den Wert von  $K_{K,l}$  hat [118].

Den Gleichungen (2-25) bzw. (2-24) liegt die Annahme eines ebenen Flusses zu Grunde. Dies bedeutet, dass die Ausprägung in  $z$ -Richtung sehr viel größer als in  $y$ -Richtung sein muss, um das Modell sinnvoll anwenden zu können. Für einen Kanal der Breite  $B_K$  und der Höhe  $H_K$  müssen folgende Zusammenhänge gelten.

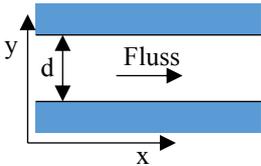
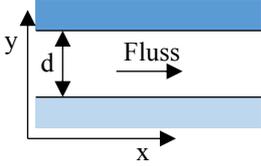
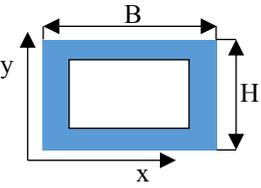
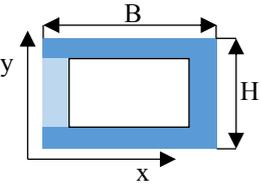
$$d = B_K \quad \text{if } B_K \ll H_K \quad (2-30)$$

$$d = H_K \quad \text{if } H_K \ll B_K \quad (2-31)$$

In der Literatur findet man verschiedene andere Modelle (M) zur Berechnung der Ersatzpermeabilität eines rechteckigen Kanals [16, 16, 31, 34, 119–121]. Tab. 2-4 bzw.

Tab. 2-5 fassen alle Modelle und deren Annahmen zusammen. Die dargestellten Modelle dienen der Berechnung der Kanallängspermeabilität  $K_{K,l}$ . Es wurde keine Veröffentlichung gefunden, die das Thema der Kanalquerpermeabilität  $K_{K,q}$  aufgreift, um den Fluss in die Preform abzubilden.

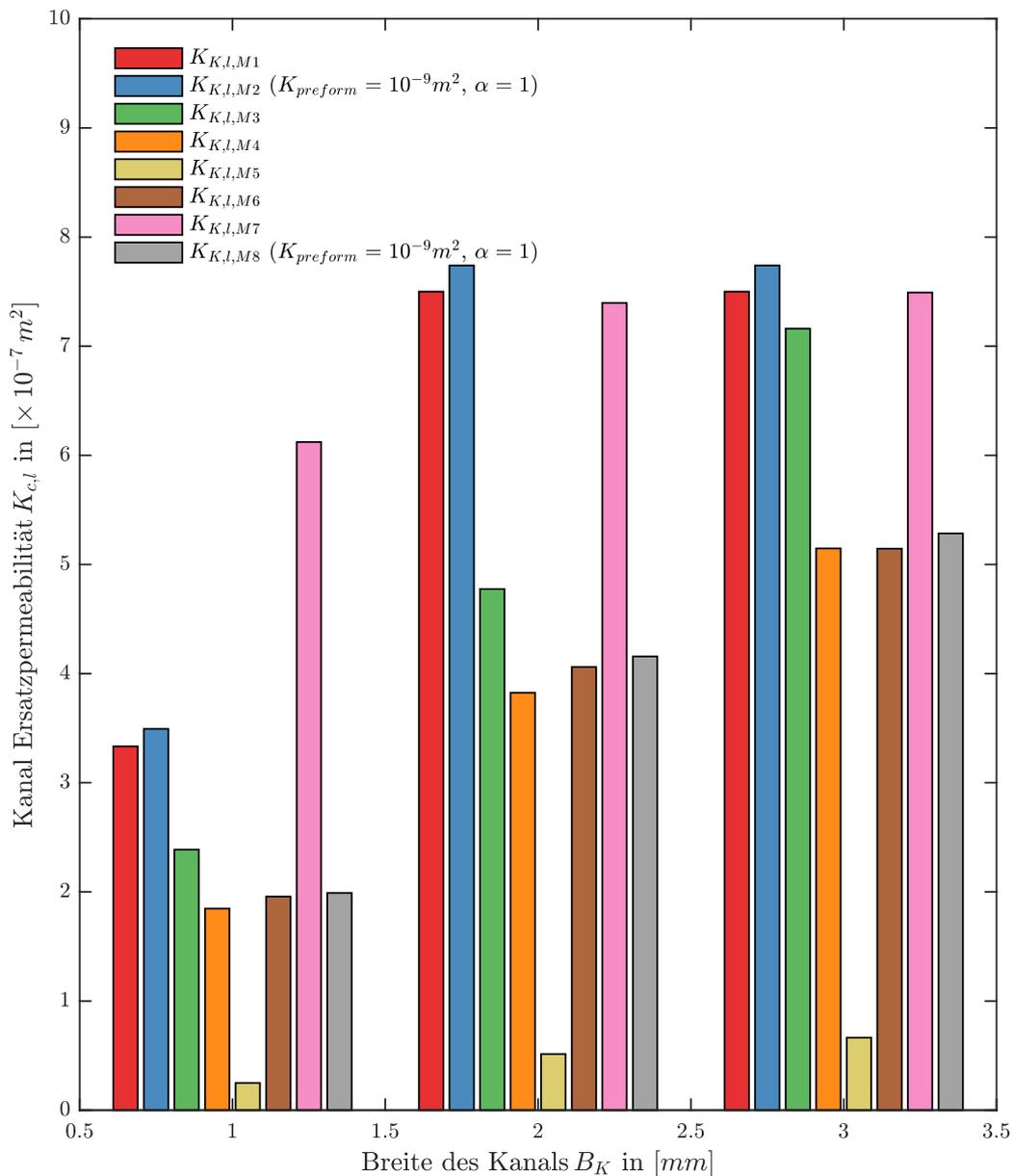
**Tab. 2-4: Übersicht über die Modelle zur Berechnung der Ersatzpermeabilität [16, 16, 31, 34, 119–121]**

Modell Aufbau	Annahmen	Bezeichnung/ Quelle
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• beide Wände nicht permeabel</li> <li>• ebene Strömung</li> </ul>	Modell 1 [16, 31, 117]
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• obere Wand impermeabel</li> <li>• untere Wand permeabel</li> <li>• ebene Strömung</li> </ul>	Modell 2 [31]
		Modell 3 [120]
		Modell 4 [119]
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• alle Wände impermeabel</li> </ul>	Modell 5 [121]
		Modell 6 [16, 34]
		Modell 7 [31]
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• eine Wand permeabel</li> <li>• alle anderen Wände impermeabel</li> </ul>	Modell 8 [31]

Tab. 2-5: Gleichungen zur Berechnung der Ersatzpermeabilität [16, 16, 31, 34, 119–121]

Bezeichnung	Gleichung für die Ersatzpermeabilität
<b>Modell 1</b>	$K_{K,l} = \frac{d^2}{12}$
<b>Modell 2</b>	$K_{K,l} = \frac{\alpha d^3 + 4d^2 \sqrt{K_{Preform}} + 6\alpha d K_{Preform}}{12(\sqrt{K_{Preform}} + \alpha d)}$ <p style="text-align: center;">mit <math>\alpha = \sqrt{\frac{\eta_{eff}}{\eta}}</math></p>
<b>Modell 3</b>	$K_{K,l} = \frac{HB}{8\pi}$
<b>Modell 4</b>	$K_{K,l} = \frac{H^2}{64} f(B, H)$
<b>Modell 5</b>	$K_{K,l} = \frac{H^2}{96} \left[ 1 - \frac{192H}{\pi^5 B} \tanh\left(\frac{\pi B}{2H}\right) \right]$ <p style="text-align: center;">if <math>B \leq H</math></p> $K_{K,l} = \frac{B^2}{96} \left[ 1 - \frac{192B}{\pi^5 H} \tanh\left(\frac{\pi H}{2B}\right) \right]$ <p style="text-align: center;">if <math>B &gt; H</math></p>
<b>Modell 6</b>	$K_{K,l} = \frac{H^2}{96} \left[ 1 - \frac{192H}{\pi^5 B} \sum_{1,3,5\dots} \frac{\tanh\left(\frac{n\pi B}{2H}\right)}{n^5} \right]$
<b>Modell 7</b>	$K_{K,l} = \frac{1}{HB} \sum_{1,3,5\dots} \frac{8}{n\pi\beta_n^3} \left[ W + \frac{(\cosh(\beta_n B) - 1)^2 - \sinh^2(\beta_n B)}{\beta_n \sinh^2(\beta_n B)} \right]$ <p>Mit <math>\beta_n = \frac{n\pi}{H}</math></p>
<b>Modell 8</b>	$K_{K,l} = \frac{1}{HB} \sum_{1,3,5\dots} \frac{8}{n\pi\beta_n^3} \left[ W - \frac{\sinh(\beta_n B)}{\beta_n} - \frac{1 - K\beta_n^2 - \frac{\sqrt{K}}{\alpha} \beta_n \sinh(\beta_n B) - \cosh(\beta_n B)}{\sinh(\beta_n B) + \frac{\sqrt{K}}{\alpha} \beta_n \cosh(\beta_n B)} \right] \frac{\cosh(\beta_n B) - 1}{\beta_n}$ <p>Mit <math>\alpha = \sqrt{\frac{\eta_{eff}}{\eta}}; \beta_n = \frac{n\pi}{H}</math></p>

In Abb. 2-6 werden die verschiedenen Modelle für verschiedene Breiten für einen Kanal der Höhe 3mm dargestellt. Bei Modell 2 bzw. 8 wird eine Permeabilität  $K_{Preform} = 10^{-9}m^2$  und  $\alpha = 1$ , also kein scherverdünnendes Materialverhalten angenommen.



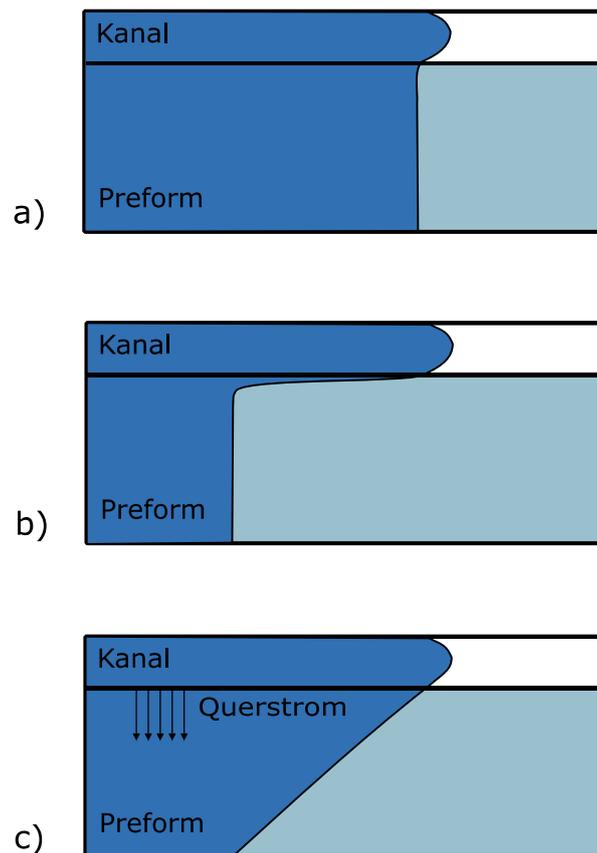
**Abb. 2-6: Vergleich der verschiedenen Modelle zur Berechnung der Ersatzpermeabilität  $K_{K,l}$  für verschiedene Breiten  $B_K$  bei einer Höhe  $H_K$  von 3mm [96]**

Bei allen Modellen steigt der Wert der Ersatzpermeabilität  $K_{K,l}$  mit steigender Kanalbreite an. Abb. 2-6 zeigt sehr deutlich, dass abhängig vom gewählten Modell das Ergebnis für dieselbe Kanalgeometrie deutlich variieren kann. Modelle 3 bis 7 basieren auf denselben Annahmen. Die errechneten Ersatzpermeabilitäten streuen deutlich bis zu einem Faktor von 25. Dieser Vergleich zeigt, dass abhängig von den Rahmenbedingungen, ein angepasstes Modell herangezogen werden muss. Um dies herauszufinden, sind Versuche notwendig (vgl. Kapitel 3.2).

In [120] Hammami et al. wird die Untersuchung eines biaxialen Textils mit einem Faservolumengehalt von bis zu 37% beschrieben. Im Experiment wird ein Kanal untersucht und mit dem einer 2D Simulation verglichen. Dabei wird zur Abbildung des RT-Kanals Modell 1 und 3 herangezogen. Die Ergebnisse berechnet über Modell 1 ergaben die Beste Übereinstimmungen mit den Versuchen, wobei die Ergebnisse berechnet über Modell 3 im Bereich  $\frac{2}{3}H_K < B_K < \frac{3}{2}H_K$  Übereinstimmung zeigen. Es wird nachgewiesen, dass die simplen Modelle 1 und 3 in vielen Bereichen gute Ergebnisse liefern. In manchen Fällen treten Abweichungen auf, die nicht vernachlässigt werden können. Es wird ein Querstromfaktor  $\kappa$  vorgeschlagen:

$$\kappa = \frac{12K_y}{B_K^2} \sqrt{\frac{K_y}{K_x}} \tag{2-32}$$

$K_x$  Permeabilität des Textils in Richtung des RT- Kanals  
 $K_y$  Permeabilität des Textils senkrecht zur Richtung des RT- Kanals



**Abb. 2-7: Unterschiedliche Ausprägung von RT Situationen in Anlehnung an [120]**  
 a) Wenig Beeinflussung der Tränkung durch RT; b) starkes RT mit wenig Querströmung;  
 c) starkes RT mit starker Querströmung

Dabei muss für  $\kappa > 0,5$  Querströmung vom Kanal in die Preform bei der Bestimmung von  $K_{K,l}$  mit beachtet werden. Es werden drei verschiedenen Strömungssituationen bei der Betrachtung von RT unterschieden (Abb. 2-7):

In a) ist die Flussgeschwindigkeit im Kanal der im Textil annähernd gleich. Es besteht nahezu keine Querströmung und die Fließfront wird nur gering beeinflusst. Diese Variante tritt üblicherweise auf, wenn der Kanalquerschnitt sehr klein wird ( $B_K < 1\text{mm}$ ) bzw. wenn der Faservolumengehalt sehr gering ist, was mit einer hohen Permeabilität der Preform einhergeht. In b) besteht ein deutlicher Unterschied der Flussgeschwindigkeiten. In diesem Fall tritt nahezu keine Querströmung auf. Dieser Fall tritt auf, wenn ein sehr hoher Faservolumengehalt, also eine sehr niedrige Permeabilität vorliegt. Im Fall c) ist eine deutliche Querströmung vorhanden ( $\kappa > 0,5$ ). Modelle zur Berechnung der Ersatzpermeabilität, die den Querstrom vernachlässigen, können nicht herangezogen werden. Sie tendieren dazu die Längspermeabilität des Kanals deutlich über zu dimensionieren [120, 122].

In [34] beschreibt Bickerton et. al. einen ähnlichen Versuchsaufbau. Dabei wurden Materialien mit einem isotropen Lagenaufbau verwendet. Es wurden Kanalbreite, Kavitätshöhe und Faservolumengehalt (16-50%) in Versuchen variiert. Jeder Versuch wurde simulativ nachgebildet, wobei für die Berechnung der Ersatzpermeabilität in Längsrichtung des Kanals Modell 6 herangezogen wurde. Die Angabe, welcher Wert für die Querpermeabilität verwendet wurde, fehlt. Die Ergebnisse der numerischen Simulation stimmen mit den Versuchen gut überein. Des Weiteren wird die Variante zur numerischen Abbildung von RT über die Stokes Gleichung vorgestellt. Zur Abbildung des Querstroms wird ein variabler Quellterm herangezogen. Der Vergleich dieser Variante zwischen Experiment und Abbildung zeigen gute Übereinstimmung.

Sheard et al. präsentieren in [123] einen Ansatz, um empirisch und analytisch sich iterativ die Kanallängspermeabilität zu entwickeln. Breite, Injektionsdruck und Faservolumengehalt wurden variiert. Die Position der Fließfront aus Versuchen wird mit numerischen Simulationen verglichen, um den Wert für die Kanallängspermeabilität zu bestimmen. Für die Simulation wird der Ansatz „Ersatzpermeabilität des Kanals quer zur Strömungsrichtung  $K_{K,q}$  gleich der Permeabilität der Preform senkrecht zur Strömungsrichtung im RT- Kanal“ verwendet. Ein Ergebnis dieser Untersuchung ist der starke Einfluss der Kanalbreite insbesondere bei großen Faservolumengehaltswerten (>50%). Ein 2mm Kanal induziert einen starken Kanalfluss, was zu einer Ersatzpermeabilität 900-mal größer als der Preformpermeabilität führt.

Koutsonas veröffentlicht in [98] ein Modell zur Vorhersage von harzreichen Stellen entlang einer Bauteilecke. Dabei wurde der „Edge Effect“, der Effekt der Überkompaktierung in Radien, im Hinblick auf RT untersucht. Das Modell zur Vorhersage wurde an einer generischen 90° Ecke evaluiert und validiert. 2D und 3D Simulationen wurden mit PAM-RTM mit einem Faservolumengehalt von 42,6% bis 50,3% durchgeführt. Die Ergebnisse der 3D Simulationen ergaben bessere Übereinstimmung mit den Versuchen als

die 2D Simulationen. Diese Grundlagenuntersuchungen wurden genutzt, um den Füllvorgang eines komplexen Bauteils zu optimieren. Dabei wurden stochastische Methoden genutzt um die Bildung von Poren zu unterbinden.

### 2.3.2 Analytische Betrachtung von Race Tracking

Analytische Betrachtungen helfen ein Grundlagenverständnis zu entwickeln. Dieser Aussage folgend, wird in diesem Kapitel eine analytische Betrachtung durchgeführt. Dazu wird eine einfache rechteckige Kavität herangezogen. Umlaufend um die Preform wird ein RT- Kanal vorgesehen, wobei Einlass und Auslass im Bereich des Kanals an gegenüberliegenden Seiten platziert sind (Abb. 2-8). Diese einfache Konfiguration

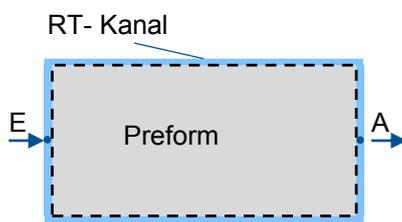


Abb. 2-8: Beispiel zur analytischen Betrachtung

von Einlass und Auslass zur Preform dient als Referenz für die folgenden Betrachtungen. Gemäß des in Kapitel 2.3.1 beschriebenen Ansatzes kann der Kanal über eine Ersatzpermeabilität  $K_{K,l}$  beschrieben werden. Im ersten Schritt ergibt sich die Zeit bis das Fluid den Auslass erreicht aus Gleichung

(2-15), wobei als Fließfrontposition die Länge des Wegs über den RT- Kanal zum Auslass ( $x_f = l_K$ ) angesetzt wird.

$$t_A = \frac{1}{2} l_K^2 \frac{\eta (1 - V_f)}{K_{K,l} p_{inj}} \tag{2-33}$$

Die maximale Eindringtiefe von Fluid in die Preform wird direkt am Einlass stattfinden und errechnet sich ebenfalls aus der Verwendung von Gleichung (2-15). Setzt man für die Zeit den Zeitpunkt ein, wenn Fluid den Auslass erreicht, erhält man:

$$x_f(t) = l_K \sqrt{\frac{K_x}{K_{K,l} (1 - V_f)}} \tag{2-34}$$

Gleichung (2-34) zeigt, dass die Eindringtiefe vom Quotienten der Permeabilität in Flussrichtung und der Ersatzpermeabilität des Kanals bzw. dessen Länge abhängt. Eine Abhängigkeit bezüglich Viskosität bzw. Injektionsdruck ist nicht vorhanden. Man erkennt, dass der geringste Einfluss entsteht, wenn der Quotient der beiden Permeabilitäten gegen eins, also dem Fall, wenn die Ersatzpermeabilität des Kanals dem des Textils entspricht, geht. Dieser Zustand ist dann erreicht, wenn kein Kanal mehr vorhanden ist und das Textil vollständig die Kavität ausfüllt. Über Gleichung (2-32) zeigt sich der proportionale Zusammenhang zwischen der Füllzeit des Kanals und der Viskosität.

Diese Betrachtung unterliegt Annahmen. Z.B. wird eine Quertränkung aus dem Kanal in Preform nur am Einlass betrachtet. Während des Fortschritts des Fluides im Kanal findet ebenfalls eine Tränkung zur Preform statt, die in diesem Fall vernachlässigt wird. Diese Vernachlässigung kann getroffen werden, wenn die Ersatzpermeabilität in Richtung des Kanals viel größer ist als die Permeabilität des Textils quer dazu ( $K_y \gg K_{K,l}$ ) [124].

### 2.3.3 Umgang mit Race Tracking

Wie oben beschrieben, ist der über RT induzierte Effekt, die gegenseitige Beeinflussung, vielfältig untersucht worden.

Die offensichtlichste Variante zum Umgang mit RT leitet sich von der oben hergeleiteten Gleichung (2-34) her. Wird der Kanal so klein wie möglich gestaltet, werden die Effekte von RT reduziert. Da durch das Vermeiden des Kanals sich die Gefahr erhöht, dass einzelne Filamente beim Schließen des Werkzeugs eingequetscht werden und das Werkzeug geschädigt wird, ist dieses Vorgehen für die Praxis von reduzierter Bedeutung [125].

Gemäß der in Kapitel 2.3.2 durchgeführten Betrachtung hat die Viskosität keinen Einfluss auf die Ausprägung von RT. Dies ist unter der Randbedingung einer konstanten Temperatur gültig. Über eine lokale Kühlung kann im Bereich des RT- Kanals die Viskosität erhöht werden [126]. Umgekehrt, wird die Viskosität im Bauteilbereich durch Übertemperierung verringert, kann ebenfalls der über RT induzierte Effekt reduziert werden [127].

In [46] wird die Kontrolle des Flusses über lokale Überpressungsbereiche, der lokalen Überkompaktierung im Randbereich der Preform, beschrieben. Experimente mit einem umlaufenden Überpressungsbereich zeigen die Wirksamkeit des Konzepts. Die Funktionsweise wird als Reduzierung des Flusses des tränkenden Fluides durch Überkompaktierung bei annähernd gleichbleibender Möglichkeit des Lufttransports beschrieben. Die Variante wird ebenfalls in [125, 128, 129] vorgeschlagen.

Das Patent [130] generiert den Zustand der Überkompaktierung durch Anbringung einer Dichtung, die über die Preformkante gesteckt wird. Dies entspricht dem in [14] beschriebenen Ansatz einer Sperrschicht, welche in [131] durch eine Wirrfaserschicht realisiert wird. [132] beschreibt eine ähnliche Sperrschicht, wobei weitere Materialien wie z.B. Schaum mit berücksichtigt werden.

[133] nutzt den Spalt zwischen Preform und Kavität als Harzverteiler. Damit die Fließfront sich einheitlich im Bauteil ausbreitet, wird ein Netz aus Verteilerkanälen zusätzlich auf der Preform eingeführt. Dazu wird die benötigte Zeit zum Tränken durch die verkürzte Fließstrecke im Textil verkürzt. Dieser Effekt wird ebenfalls in [46] beschrieben.

Um das seitliche Fließen im Kanal zwischen Preform und Werkzeug zu verhindern wird in [134] auf jede Lage entlang der Kante eine Dichtmasse aufgebracht. Beim Schließen

des Injektionswerkzeugs werden alle Hohlräume, welche einen Fluss aus der Prefom heraus ermöglichen verschlossen. Eine ähnliche Variante wird in [135] vorgeschlagen. Dabei wird vor dem Einlegen der Preform in die Kavität Dichtmasse entlang der Preformkante aufgebracht. Beide Varianten bieten die Option des dichtungslosen Werkzeugs.

In [136] wird Matrixmaterial in den Zwischenraum von Preform und Werkzeug injiziert. Über eine Modifizierung dieses Materials z.B. über Nanopartikel wird das seitliche Eindringen in die Preform verhindert. Eine ähnliche Variante wird in [137] beschrieben. Dabei wird die verschließende Masse vor dem Schließen der Kavität in RT- Kanal platziert. Über die Wahl einer quellfähigen Masse erfolgt der vollständige Verschluss des Kanals.

Der steuerungsseitig aufwändigste Ansatz wird in [138, 139] mit einem Sensornetz beschrieben, über welches der Fließfrontverlauf flächig über dem Bauteil erfasst wird. Es wird vorgeschlagen über mehrere gesteuerte Einlässe den Fluss gezielt zu beeinflussen. Dieser Ansatz wird in der in [140] beschriebenen Untersuchung mit reduziertem Sensoraufwand umgesetzt und dessen Funktionsweise verifiziert.

Betrachtet man alle aufgeführten Varianten zeigt es sich, dass es bei allen darum geht den Querstrom aus der Prefom hinaus bzw. hinein zu unterdrücken bzw. vollständig zu unterbinden. Die Beschreibung der jeweiligen Variante bleibt auf der Konzeptebene. Dies bedeutet, der generell technologische Antritt wird beschrieben. Die genaue Umsetzung bzw. ein allgemeines Vorgehen werden nicht beschrieben. Die Tatsache, dass ein Großteil der vorgeschlagenen Varianten auf Patenten beruht zeigt, dass das Thema als deutlicher Abgrenzungspunkt in der Prozesstechnik gesehen wird. Wissenschaftliche Untersuchungen zum Umgang bzw. zur Gestaltung des Prozesses sind nicht bzw. in reduzierten Maße vorhanden.



## 3 Abbilden von Race Tracking in der Simulation

Die Abbildung von RT in der Simulation ist Voraussetzung, um Füllprozesse unter Beachtung von RT zu betrachten. In diesem Kapitel sind die notwendigen Versuche beschrieben bzw. werden die Ergebnisse diskutiert, welche den Abgleich mit der Simulation ermöglichen.

Die Software PAM-RTM bietet verschiedene Varianten an, ein finites Elementnetz zu generieren. Da dieses Netz die Grundlage zur Abbildung ist, hat es einen Einfluss auf das Ergebnis der durchgeführten Rechnungen. Im ersten Teil (Kapitel 3.1) wird untersucht, in welcher Form die Vernetzung von Preform bzw. Kanal einen Einfluss auf das Ergebnis hat.

Zur Abbildung des Kanals in der Simulation muss die Ersatzpermeabilität des Kanals bekannt sein (vgl. Kapitel 2.3.1). In der Literatur sind Modelle zur Berechnung der Kanallängspermeabilität vorhanden. Um diese zu verifizieren, werden im Kapitel 3.2 Versuche durchgeführt wodurch validiert wird ob diese Modelle für die gewählte Materialkombination anwendbar sind. In Kapitel 3.3 werden die Ansätze aus der Literatur mit den Experimenten verglichen. Zur weiteren Verbesserung der Übereinstimmung von Experiment und Versuch werden weitere Ansätze entwickelt.

Das Ergebnis dieses Kapitels ist ein Datensatz zur Abbildung von unterschiedlichen RT-Kanalbreiten für die gewählte Materialkombination über den Ansatz der Ersatzpermeabilität.

Die hier dargestellten Ergebnisse wurden mit Unterstützung der studentischen Arbeiten von Bastian Behrens, Alexander Bley und Alexander Carrels generiert [96, 118, 141, 142].

### 3.1 Analyse der Netzsensitivität

Im ersten Schritt zur Abbildung von RT in der Simulation wird untersucht, ob die Art der Netzgestaltung Einfluss auf die Ausbreitung der Fließfront bzw. die Füllzeiten hat. Dazu wird ein generisches Modell aufgebaut (Abb. 3-1). Es besteht aus einem rechteckigen Textil mit einem seitlichen Kanal. Der Einlass befindet sich auf der linken Seite und wird konstant mit einem Einlassdruck beaufschlagt. Der Auslass auf der rechten Seite wird ebenfalls mit einem konstanten Druck beaufschlagt. Die verwendeten Materialdaten sind in Tab. 3-1 zusammengefasst.

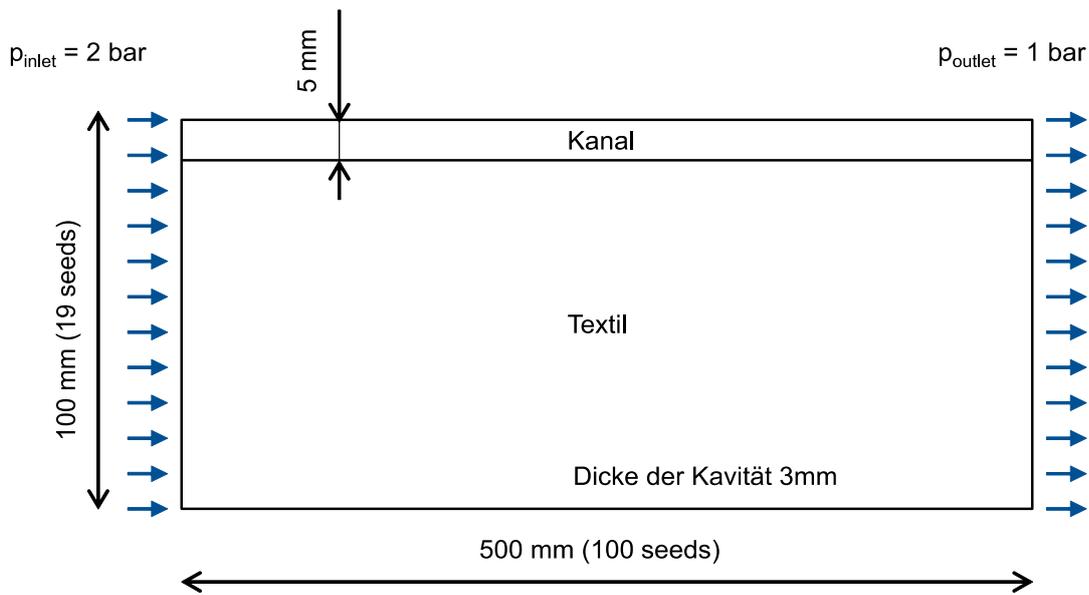


Abb. 3-1: Schematische Darstellung des Modells für die Netzstudie in der Draufsicht

Für den Winkel zwischen den Hauptachsen und den Koordinatenachsen wird ein Wert von  $0^\circ$  verwendet. Da diese Studie nicht zum Ziel hat, eine konkrete Füllsimulation abzubilden, wurden die Werte frei gewählt. Dabei wurde darauf geachtet, dass die Werte in realistischen Bereichen liegen. Der Wert  $K_{K,l}$  wurde über Modell 8 (Breite Kanal  $B = 5\text{mm}$ , Höhe  $H = 3\text{mm}$ ) und dem Ansatz  $K_{K,t} = K_{y,Preform}$  (Tab. 2-5) ermittelt. Unterschiedliche Diskretisierungsmethoden wurden auf das physische Modell aus Abb. 3-1, mit dem Ziel den Einfluss des Netzes auf die numerischen Ergebnisse zu ermitteln, angewendet. Sechs verschiedene Methoden der Vernetzung wurden auf den Kanal angewendet, vier auf das Textil. Die analysierten Netztopologien sind in Abb. 3-2 dargestellt. Entlang der Preformlängskante werden hundert, an der kurzen Seite 19 Seeds angesetzt. Die Anzahl der Seeds für den Kanal wird mit 1 bis 2 variiert.

Tab. 3-1: Verwendete Materialdaten für die Netzstudie

Textil			Kanal			Harz
$K_{x,Textil}[\text{m}^2]$	$K_{y,Textil}[\text{m}^2]$	$v_f[-]$	$K_{K,l}[\text{m}^2]$	$K_{K,t}[\text{m}^2]$	$v_f[-]$	$\eta [\text{Pa s}]$
$3.0 \cdot 10^{-9}$	$3.0 \cdot 10^{-9}$	0.5	$4.9 \cdot 10^{-7}$	$3 \cdot 10^{-12}$	0	0.425

Abb. 3-3 fasst die Ergebnisse der Netzstudie bezüglich Füllzeiten zusammen. Dabei werden Füllzeit des Kanals, der Preform bzw. das Füllbild als Vergleichswerte herangezogen.

Die analytische errechnete Zeit  $t_K$  bis das Fluid den Auslass bzw. das Ende des Kanals erreicht, ergibt sich aus Gleichung (2-15). Es ergibt sich die Füllzeit:

$$\begin{aligned}
 t_K &= \frac{\varepsilon_K \eta L_K^2}{(p_i - p_0) 2K_{K,l}} \\
 &= \frac{1 \cdot 0,4235 \text{Pas} \cdot (0,5\text{m})^2}{(2 \cdot 10^5 \text{Pa} - 1 \cdot 10^5 \text{Pa}) \cdot 2 \cdot 4,9 \cdot 10^{-7} \text{m}^2} \\
 &= 1,084\text{s}
 \end{aligned} \tag{3-1}$$

Das analytische Modell vernachlässigt jegliche Querströmung in die Preform. Aus diesem Grund muss erwartet werden, dass die analytisch errechneten Zeiten gegenüber den numerische ermittelten kleiner sind. Der Mittelwert aller numerischen Füllzeiten ist 1,25s. Der kleinste Wert liegt bei 1.01s, der größte bei 1,48s. Die Sensitivität bei der Kanalvernetzung ist deutlich größer als die der Preform. Die Varianten, bei denen der Kanal mit der Methode Map (Default) mit  $100 \times 2$  seeds vernetzt ist, erreichen kleinere Füllzeiten, als diejenigen mit  $100 \times 1$  seed. Dabei wird der analytische Wert unterschritten.

Die Füllzeiten des gesamten Modells haben über alle Varianten einen Mittelwert von 78,93s. Die Werte streuen von 74,72s bis zu 81,74s.

Die Vernetzung der Preform mit Map (Default) führt zur Ausprägung einer Ecke zwischen Kanal und Preform. Die beiden anderen Varianten führen zu gleichmäßigen Verläufen. Sie bilden eine stärkere Querströmung aus dem Kanal in die Preform aus. Die Füllzeit der gesamten Preform unterliegt geringer Streuung. Obwohl das Füllbild teilweise abweicht, lässt sich dies nicht mit der Füllzeit korrelieren.

**Kanal:**

100 \* 1 seeds – *Auto / Pave(Default) / Pave(Graded)* → #Nodes: 202 / #Elements: 200

100 \* 1 seeds – *Gradual* → #Nodes: 302 / #Elements: 400

100 \* 1 seeds – *Map(Default)* → #Nodes: 202 / #Elements: 200

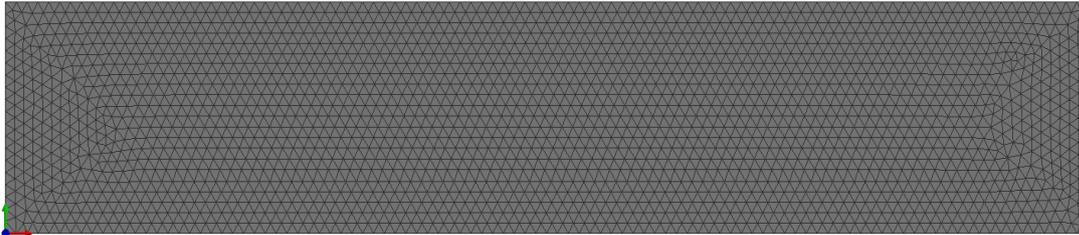
100 \* 2 seeds – *Auto* → #Nodes: 403 / #Elements: 402

100 \* 2 seeds – *Gradual* → #Nodes: 330 / #Elements: 454

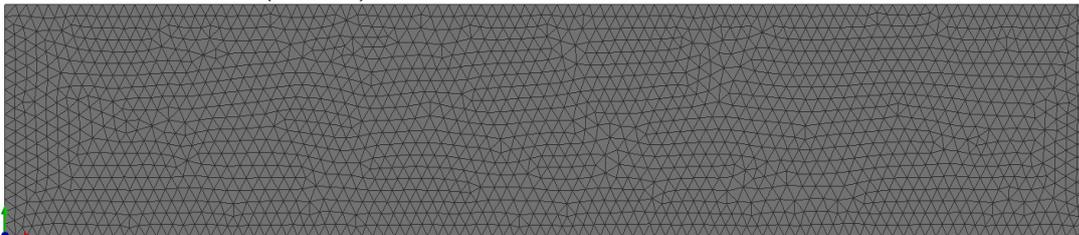
100 \* 2 seeds – *Map(Default)* → #Nodes: 303 / #Elements: 400

**Preform:**

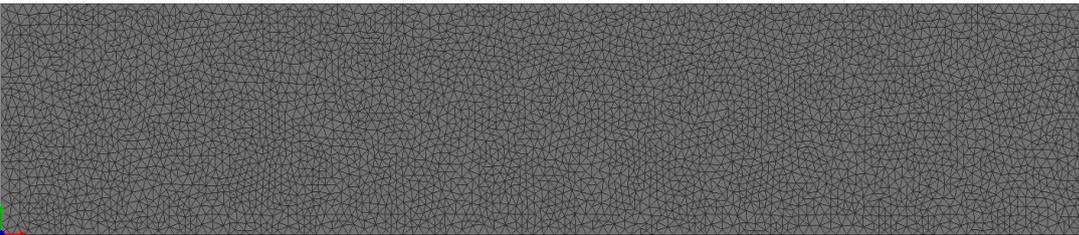
100 \* 19 seeds – *Auto* → #Nodes: 2319 / #Elements: 4398



100 \* 19 seeds – *Pave(Graded)* → #Nodes: 1862 / #Elements: 3484



100 \* 19 seeds – *Gradual* → #Nodes: 4032 / #Elements: 7824



100 \* 19 seeds – *Map(Default)* → #Nodes: 2020 / #Elements: 3800

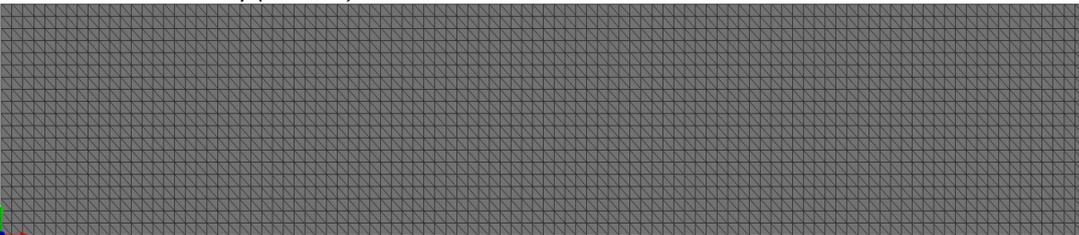


Abb. 3-2: Verwendete Netztopologien in der Studie für Kanal und Preform

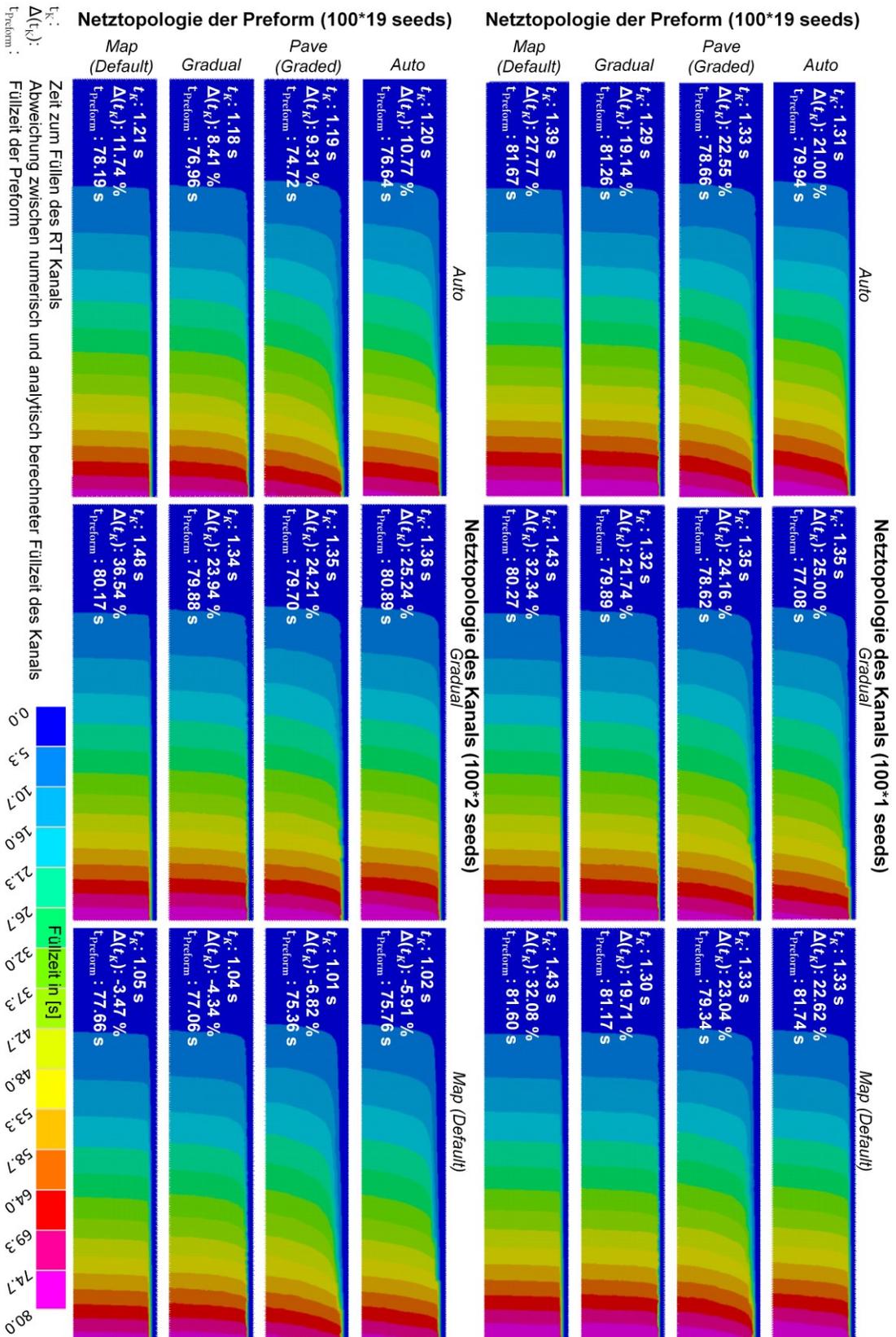


Abb. 3-3: Unterschiedliche Füllzeiten resultierend aus verschiedenen Netztopologien

ESI's technischer Support schlägt aufgrund der hohen Netzgüte (gleichmäßig verteilte Dreieckselemente) für die Vernetzung der Preform den „Paver“-Algorithmus vor. Die hier dargestellten Ergebnisse zeigen, dass der „Map(Default)“-Algorithmus für die Simulation von Füllprozessen unter Berücksichtigung von RT nicht geeignet ist.

Auf Basis dieser Studie wird der „Pave (Default)“-Algorithmus zum Aufbau der Modelle verwendet.

## 3.2 Untersuchungen zum Abbilden von Race Tracking in der Simulation

Zur Abbildung von RT wird häufig der Ansatz der Ersatzpermeabilität verwendet (Kapitel 2.3.1). Dabei gibt es aus der Literatur verschiedene Ansätze, die die Kanallängspermeabilität eines rechteckigen Kanals abbilden (Tab. 2-5 bzw. Tab. 2-4). Für einen definierten Kanal liefern die Modelle stark abweichende Ergebnisse (Abb. 2-6).

Es stellt sich die Frage, welches Modell die passende Kanallängspermeabilität  $K_{K,l}$  für einen rechteckigen Querschnitt in Kombination mit einer gegebenen Materialkombination abbildet.

Beim Einlegen einer Preform in ein Werkzeug muss eine Negativtoleranz verwendet werden. Dies führt dazu, dass ein Kanal umlaufend um das ganze Bauteil entsteht. In der Literatur wird der Ansatz der Ersatzpermeabilität sehr häufig verwendet (Kapitel 2.3.1). Dabei sind die Modelle zur Berechnung der Ersatzpermeabilität in Richtung des Kanals angegeben. Aussagen, welcher Wert für die Ersatzpermeabilität senkrecht zum Kanal herangezogen wird, werden von Grössing et. al. in [88] und Sheard et al. in [123] getroffen. Spezifische Untersuchungen, welche das Thema der Kanalpermeabilität in Richtung der Preform aufgreifen, wurden bis zum Zeitpunkt der Entstehung dieser Arbeit nicht gefunden. Der Isotrope Ansatz mit  $K_{K,q} = K_{K,l}$  wird von Grössing verwendet, der Ansatz  $K_{K,q} = K_{y,Preform}$  wird von Sheard verwendet. Die Größenordnung dieser beiden Werte kann sich signifikant um bis zu 4-5 Größenordnungen unterscheiden. Es leitet sich die Frage ab, welchen Einfluss  $K_{K,q}$  auf das Füllbild hat bzw. welcher Wert zur richtigen Abbildung herangezogen werden muss.

### 3.2.1 Experimenteller Aufbau

Um die gestellten Fragen beantworten zu können, wurden Experimente durchgeführt, die in diesem Kapitel beschrieben sind.

Der allgemeine Aufbau des Experiments ist in Abb. 3-4 dargestellt. Das Werkzeug besteht aus einem Aluminiumunterwerkzeug, einem Rahmen, um die Dicke der Kavität einzustellen und einem transparenten Deckel, um den Füllvorgang beobachten zu können. Das Harzreservoir befindet sich in einem Drucktopf, welcher über Druckluft die

notwendige Druckdifferenz zum Transport des Harzes zur Kavität aufbringt. Der angelegte Druck wird über einen Drucksensor erfasst. Über einen Membranregler wird der Druck eingestellt. Zum definierten Starten ist ein Ventil zwischen Kavität und Drucktopf angebracht. Der Auffangbehälter am Ende der Kavität steht auf einem Kraftsensor, worüber der Massenstrom erfasst wird. Alle Versuche wurden mit konstantem Injektionsdruck durchgeführt.

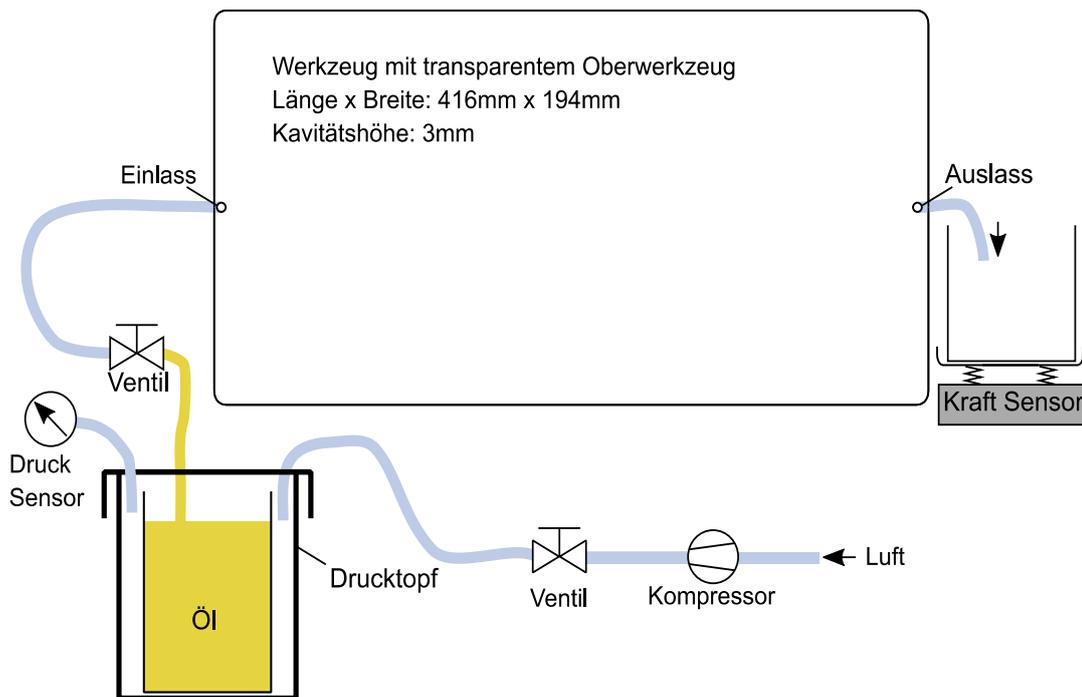


Abb. 3-4: Schematische Abbildung des generellen Versuchsaufbaus

Als Messfluid wurde für alle Versuche Sonnenblumenöl der Marke Vita d'Or verwendet. Es zeigt newtonsches Materialverhalten mit einer Viskosität von 78mPas bei 20°C und einer Dichte von 0,98g/cm<sup>3</sup> [118].

Das verwendete Textil G0926 D 1304 TCT der Hexcel Corporation, Stamford, USA ist ein Standard-Luftfahrtmaterial [143]. Die wichtigsten technischen Daten des Materials sind in Tab. 3-2 zusammengefasst.

Tab. 3-2: Allgemeine Materialdaten Hexcel G0926 D 1304 TCT [143]

Flächengewicht	Roving Typ	Webart	Lagendicke ( $v_f=55\%$ )
375 g/m <sup>3</sup>	6K	Satin	0,38 mm

Die Qualität der Messung wird von der geometrischen Toleranz der Preform bzw. der Position der Preform in der Kavität bestimmt. Das Handhaben des reinen Textils, insbesondere eines Satingewebes, führt sehr oft zu Fehlstellen im Randbereiche. Dieser stellt

die Schnittstelle zwischen RT- Kanal und Textil dar. Fehlstellen in diesem Bereich müssen soweit wie möglich vermieden werden. Aus diesem Grund werden die Lagen über ein Bindermaterial zueinander fixiert. Für die Versuche wird das Material TecWeb® ABE der Firma AB-Tec GmbH & Co. KG mit einem Flächengewicht von 18.8g/m<sup>2</sup> verwendet.

Bindermaterialien können über die thermale Historie die Tränkungseigenschaften der Preform verändern [144, 145]. In dieser Arbeit wird, um sicherzustellen, dass diese immer einheitlich sind, ein definierter Binderprozess verwendet.

Die Binderaktivierung erfolgt zwischen zwei Heizplatten in einer Presse und wird mit einem Druck von 1MPa durchgeführt. Zur Aktivierung des Bindermaterials wird die Soll- Temperatur am Regler auf 120°C eingestellt. Dadurch wird mit der maximalen Aufheizrate von ca. 5°K/min aufgeheizt. Nach zwei Stunden wird die Soll- Temperatur auf 30°C eingestellt. Dadurch wird mit der maximalen Rate gekühlt. Nach der Binderaktivierung werden die benötigten Preforms in der geforderten Geometrie über Zugschnittschablonen herausgeschnitten. [118]

Die in dieser Form hergestellte Preform hat die in Tab. 3-3 dargestellten Tränkungseigenschaften [118].

**Tab. 3-3: Gesättigte und ungesättigte Permeabilitätswerte des Materials G0926 D 1304 TCT**

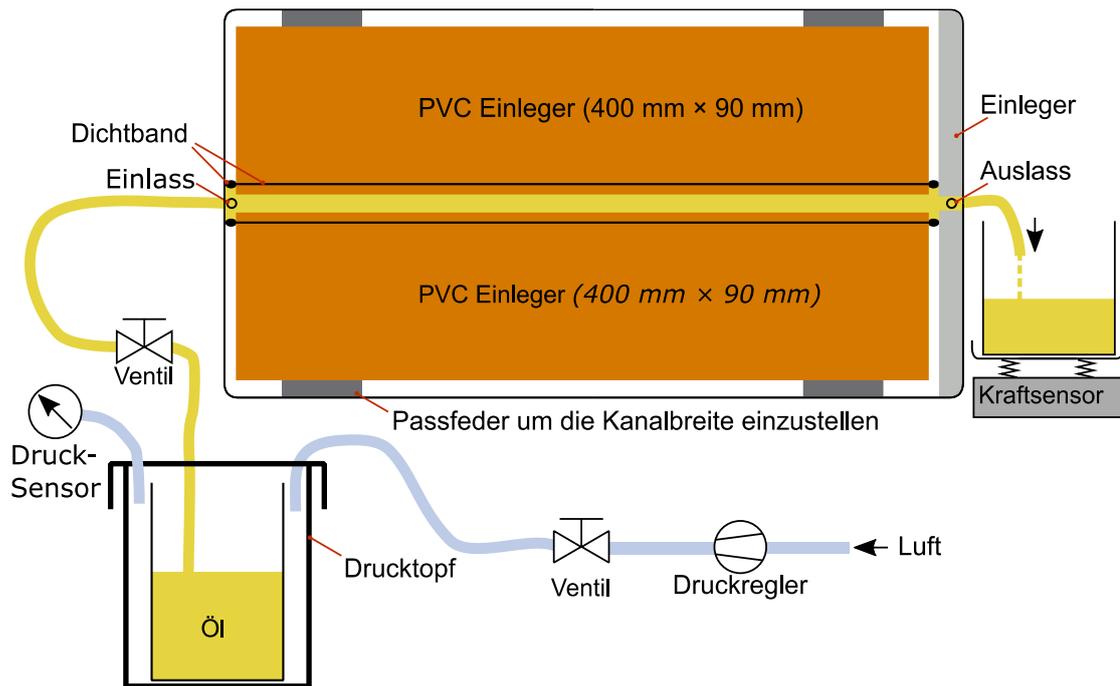
$v_f$ [%]	Ungesättigte Messung			Gesättigte Messung		
	$K_1$ [m <sup>2</sup> ]	$K_2$ [m <sup>2</sup> ]	$\theta$ [°]	$K_1$ [m <sup>2</sup> ]	$K_2$ [m <sup>2</sup> ]	$\theta$ [°]
48	1.62 · 10 <sup>-11</sup>	1.43 · 10 <sup>-11</sup>	-22,8	1.28 · 10 <sup>-11</sup>	1.07 · 10 <sup>-11</sup>	48,13
62	7.79 · 10 <sup>-13</sup>	3.96 · 10 <sup>-13</sup>	-11.08	4.05 · 10 <sup>-13</sup>	2.84 · 10 <sup>-13</sup>	-21.35

### 3.2.1.1 Fluss durch einen geraden Kanal ohne Textil

Das erste Experiment, im Folgenden durch E1 abgekürzt, dient dazu die Ersatzpermeabilität eines rechteckigen Kanals  $K_{K,l}$  zu berechnen, um die Ergebnisse später mit den Ergebnissen der analytischen Modelle zu vergleichen. Um einen definierten Kanal in der in Abb. 3-4 dargestellten Kavität zu generieren, werden zwei Polyvinylchlorid (PVC)- Kunststoffplatten zugeschnitten und in die Kavität gelegt (Abb. 3-5). Zur Sicherstellung der Kanalbreite werden beim Einlegen der Kunststoffeinleger Passfedern zur Positionierung der Preform verwendet. Es muss gewährleistet werden, dass die Einleger sich nicht verschieben bzw. sich an den Kanten keine Sekundärströmung entwickelt. Aus diesem Grund wird Dichtband an entsprechenden Stellen eingelegt. Durch

das Dichtband entsteht ein kleiner Spalt zwischen Einleger und Werkzeugdeckel bzw. Boden. Dieser Spalt ist geometrisch deutlich kleiner als der Kanal. Es wird angenommen, dass der Einfluss dieses Spaltes vernachlässigt werden kann. Dieses Vorgehen wird bei allen Versuchen angewendet.

Alle Messungen werden mit einer definierten Kavitätshöhe von 3mm durchgeführt. Es werden Versuche zu drei Kanalbreiten durchgeführt (2mm, 4mm, 6mm). Der Injektionsdruck wird mit 150mbar, 300mbar und 450mbar angesetzt. Zur statistischen Absicherung werden für jede Versuchskonfiguration drei Versuche angesetzt.



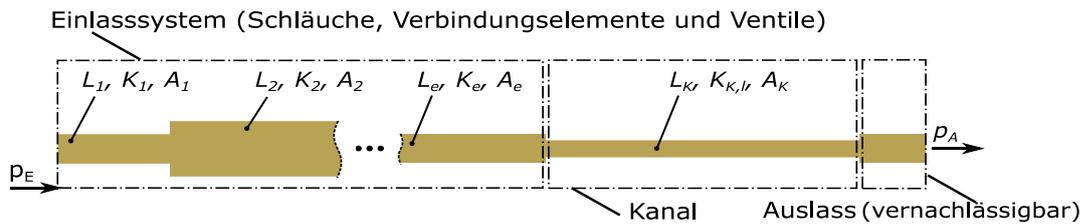
**Abb. 3-5:** Schematischer Aufbau des Versuchsaufbaus zur Bestimmung der Kanalpermeabilität

Für die Versuche wird eine einheitliche Nomenklatur, bestehend aus „Nummer des Versuchsaufbaus-Kanalbreite – Injektionsdruck – Versuchswiederholung“ eingeführt (Bsp.: E1-4-300-V2 ist der Versuchsaufbau Nr. 1 mit einer Kanalbreite von 4mm, einem Injektionsdruck von 300mbar, Versuchswiederholung Nr.2). Die verschiedenen Kombinationen an Versuchen sind in Tab. 3-4 zusammengefasst:

**Tab. 3-4:** Testmatrix zur Ermittlung der Ersatzpermeabilität eines rechteckigen Kanals

Kanalbreite	Injektionsdruck		
	150mbar	300mbar	450mbar
2mm	3x	3x	3x
4mm	3x	3x	3x
6mm	3x	3x	3x

Die zu untersuchenden Kanalquerschnitte liegen in ihrer geometrischen Ausprägung in der Größenordnung der Zuleitungen. Damit diese das Ergebnis nicht verfälschen, müssen sie mitberücksichtigt werden. Das Experiment kann als eine Hintereinanderschaltung von verschiedenen Strömungsquerschnitten gesehen werden. (vgl. Abb. 3-6). Das Einlasssystem selbst besteht aus Schläuchen, Verbindungsstücken, etc. und kann selbst als eine Hintereinanderschaltung von verschiedenen Querschnitten gesehen werden. Bei den durchgeführten Experimenten betrug die Länge des Systems zwei Meter. Im Vergleich dazu wurde die Länge des Auslasssystems sehr kurz gewählt. Dadurch kann man dieses vernachlässigen.



**Abb. 3-6: Darstellung des Experiments als Hintereinanderschaltung verschiedener Strömungsquerschnitte**

Eine Hintereinanderschaltung von  $n$  verschiedenen Querschnitten der Länge  $L_n$ , der Querschnittsfläche  $A_n$ , der Ersatzpermeabilität  $K_n$  und der Porosität  $\epsilon_n = 1$  hat einen Volumenstrom  $Q$  von:

$$Q = p_E \left( \eta \cdot \sum_n \frac{L_n}{A_n K_n} \right)^{-1} \quad (3-2)$$

Dabei ist  $p_E$  der am Einlass anliegende Druck und  $\eta$  die Viskosität des Fluides. Der Versuch kann in Einlasssystem und zu untersuchenden Strömungsbereich unterteilt werden. Damit wird Gleichung (3-2) zu (Index „K“ steht für Kanal und Index „E“ für Einlass):

$$Q = p_E \left( \eta \cdot \left( \sum_e \frac{L_E}{A_E K_E} + \frac{L_K}{A_K K_{K,l}} \right) \right)^{-1} \quad (3-3)$$

Wenn alle Eigenschaften bekannt sind, kann  $K_{K,l}$  bestimmt werden. Zur Bestimmung der Eigenschaften des Einlasssystems wird ein Versuch ohne das Kanalsystem durchgeführt. Es wird ein Einlassfaktor als Aufsummierung der Eigenschaften des Einlasssystems eingeführt.

$$\Phi = \sum_e \frac{L_E}{A_E K_E} \quad (3-4)$$

Aus Gleichung (3-2) ist beim Versuch mit dem Einlasssystem (ohne Kanal) ein linearer Zusammenhang mit der Steigung  $m = (\eta\Phi)^{-1}$  zwischen dem Volumenstrom  $Q$  und dem Injektionsdruck  $p_e$  zu erkennen. Die entstehende Gerade muss durch den Ursprung gehen.

Zur Auswertung wird der lineare Zusammenhang Volumenstrom über Einlassdruck dargestellt. Eine Ausgleichsgerade wird durch den Ursprung und die ermittelten Werte gelegt. Über die Steigung der Ausgleichsgerade wird der Wert  $\Phi$  berechnet.

Der Einlassfaktor ist spezifisch für ein Einlasssystem. Wird dieses geändert, muss er neu bestimmt werden. Dies gilt für alle durchgeführten Versuche.

Mit bekanntem Einlassfaktor kann aus folgender Gleichung die Ersatzpermeabilität des Kanals ermittelt werden.

$$Q = p_e \left( \eta \cdot \left( \Phi + \frac{L_K}{A_K K_{K,l}} \right) \right)^{-1} \quad (3-5)$$

Auch in Gleichung (3-5) ist der lineare Zusammenhang zwischen dem Volumenstrom und dem angelegten Injektionsdruck mit der Steigung  $m = \left( \eta \cdot \left( \Phi + \frac{L_K}{A_K K_{K,l}} \right) \right)^{-1}$  zu erkennen. Es ergibt sich  $K_{K,l}$ :

$$K_{K,l} = \frac{L_K}{A_K} \left( \frac{1}{m\eta} - \Phi \right)^{-1} \quad (3-6)$$

### 3.2.1.2 Fluss durch einen geraden Kanal mit Textil

In zweiten Versuch, im Folgenden mit E2 abgekürzt, wird eine Kanalströmung unter Anwesenheit eines porösen Mediums, einer Preform, abgebildet. Angelehnt an die zuvor beschriebenen Versuche wird ein Kunststoffeinleger in die Kavität auf die obere Seite gelegt, eine Preform auf die untere (Abb. 3-7). Dadurch entsteht die klassische Abbildung eines RT- Kanals. Mit dem Versuchsaufbau wird die induzierte Querströmung in der Preform mit fortschreitender Fließfront sichtbar.

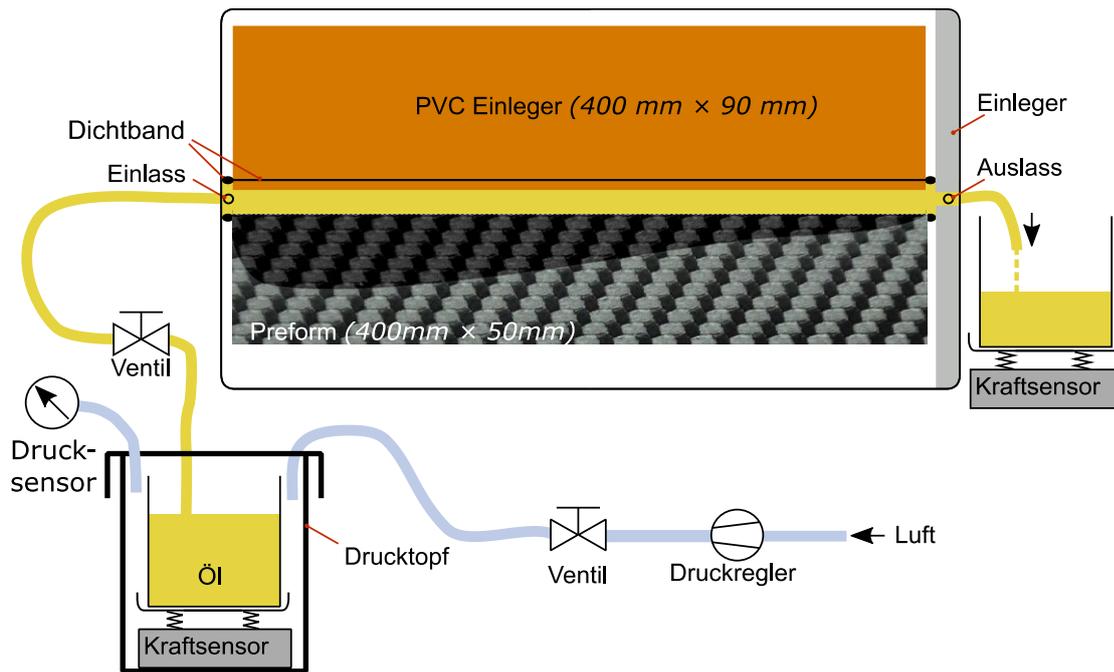


Abb. 3-7: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus zur Charakterisierung der Querströmung

Der Querstrom entwickelt sich entlang der Preformkante unterschiedlich. Um eine Messgröße zur systematischen Auswertung zu bekommen, wird der Füllfaktor, das Verhältnis von gefüllter Preformfläche  $A_{Preform,gefüllt}$  zur Gesamtpreformfläche  $A_{Preform,gesamt}$  eingeführt.

$$FF = \frac{A_{Preform,gefüllt}}{A_{Preform,gesamt}} \leq 1 \quad (3-7)$$

In Abb. 3-8 ist schematisch dargestellt, wie die Flächen zur Berechnung des FFs definiert sind. Zur einheitlichen Bestimmung des FFs wird ein Skript für das Programm MATLAB verwendet, welches das Bild, welches über eine Kamera während des Versuchs aufgenommen wird, automatisiert auswertet [142]. Zur Auswertung wird der Zeitpunkt der vollständigen Füllung der RT- Kanals herangezogen.

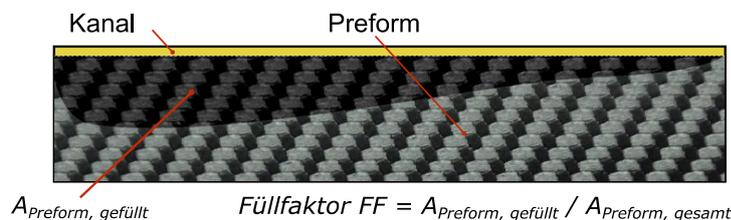


Abb. 3-8: Schematische Darstellung zur Berechnung des Füllfaktors FF

Zur weiteren Charakterisierung der Querströmung in die Preform wird das Volumenstromverhältnis  $QV$  von Einlassvolumenstrom  $Q_E$  zu Auslassvolumenstrom  $Q_A$  nachdem die Fließfront den Auslass erreicht hat eingeführt.

$$QV = \frac{Q_E}{Q_A} \geq 1 \text{ mit } Q_q + Q_A = Q_E \quad (3-8)$$

$Q_q$  ist Volumenstrom, der über den RT- Kanal in die Preform führt. Nimmt  $QV$  Werte nahe eins an, liegt ein sehr geringer Volumenstrom in die Preform an. Zur Messung der beschriebenen Volumenströme wird im Drucktopf unter dem Harzreservoir bzw. unter dem Auffangbehälter ein Kraftsensor installiert, über den in Kombination mit der Änderung des Betrags der Kraft über die Zeit und der Dichte der Messflüssigkeit der Volumenstrom berechnet werden kann.

Es wurden Messungen mit zwei Druckstufen (150mbar, 300mbar), variierenden Kanalbreiten (2mm, 4mm, 6mm) und verschiedenen Faservolumengehaltswerten (48% und 62%) durchgeführt. In diesem Versuch wird eine ungesättigte Messung durchgeführt, um das Füllbild zu untersuchen. Aufgrund der geringen Bildrate der Kamera war eine Auswertung der Versuche der Druckstufe mit 450mbar nicht möglich. Das Versuchsprogramm ist in Tab. 3-5 zusammengefasst.

**Tab. 3-5: Testmatrix zur Charakterisierung der Querströmung im RT- Kanal**

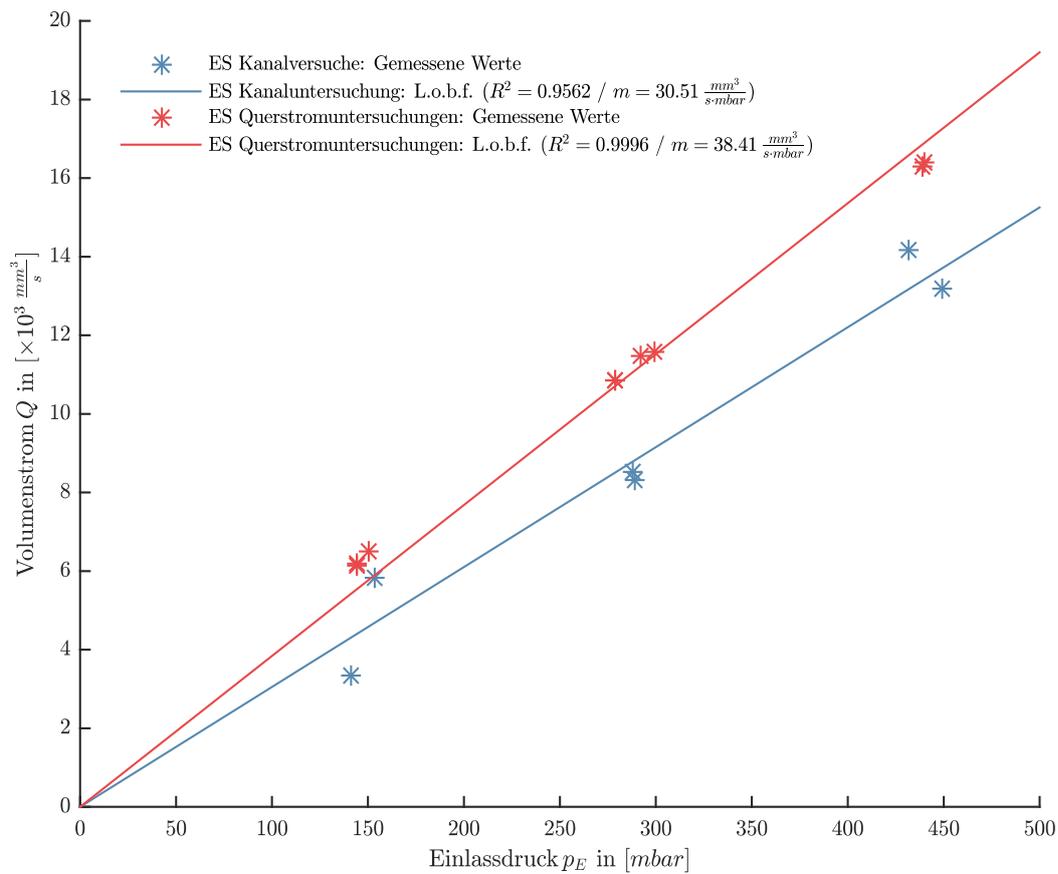
Injektionsdruck		150mbar		300mbar	
Faservolumengehalt		48%	62%	48%	62%
Kanal- breite	2mm	2x	2x	2x	2x
	4mm	2x	2x	2x	2x
	6mm	2x	2x	2x	2x

Die eingeführte Nomenklatur wird um den Faservolumengehalt ergänzt.

## 3.2.2 Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen

### 3.2.2.1 Ermittlung der Eigenschaften des Einlasssystems

Für die Versuche zur Bestimmung der Kanaleigenschaften, beschrieben in Kapitel 3.2.1.1, wurde das selbe Einlasssystem (ES) verwendet. Für die Untersuchungen der Querströmung in die Preform, beschrieben in Kapitel 3.2.1.2, wurde ein abweichendes System verwendet. Die Ergebnisse (Volumenstrom  $Q$  versus Einlassdruck  $p_E$ ) sind in Abb. 3-9 dargestellt.

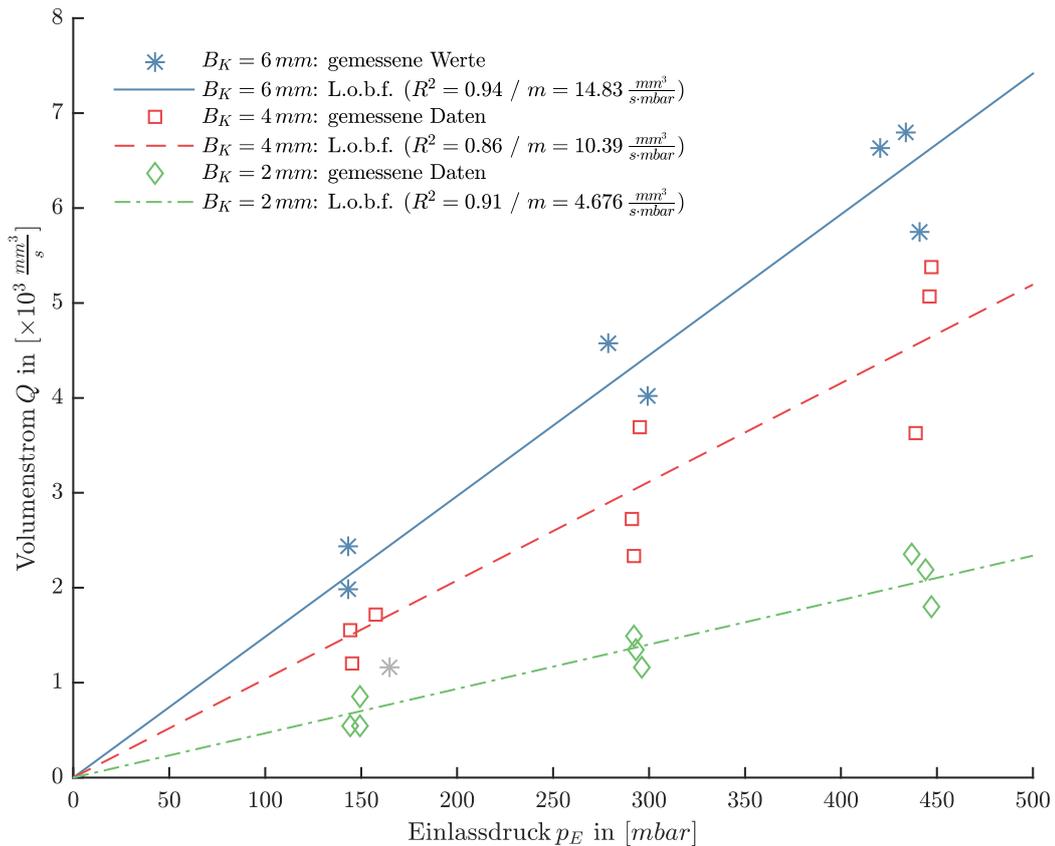


**Abb. 3-9: Ergebnisse der Strömungsversuche durch die verwendeten Einlasssysteme**

Der lineare Zusammenhang ist deutlich in den Messergebnissen zu erkennen. Die Fehlerausgleichsgerade bildet mit guter Näherung (E1:  $R^2 = 0.9562$  und E2:  $R^2 = 0.9996$  für die Versuche mit Textil) den linearen Zusammenhang von Volumenstrom und Injektionsdruck ab. Es ergibt sich  $\Phi_{E1,E2} = 42.02 mm^{-3}$  bzw.  $\Phi_{E1,E2} = 33.38 mm^{-3}$ .

### 3.2.2.2 Fluss durch einen geraden Kanal ohne Textil

Die Versuche zur Bestimmung der Kanalpermeabilität sind in Abb. 3-10 zusammengefasst.



**Abb. 3-10:** Ergebnisse der Strömungsversuche durch einen geraden Kanal mit Experimentaufbau E1

Der lineare Zusammenhang zwischen Volumenstrom und Einlassdruck wird anhand von Fehlerausgleichsgeraden dargestellt. Die Streuungen der Versuche spiegeln sich in Bestimmtheitsmaß wieder. Mit steigender Kanalbreite bzw. Injektionsdruck steigt der Volumenstrom und damit die Ersatzpermeabilität des Kanals an.

Die über Formel (3-7) errechneten Ersatzpermeabilitäten  $K_{K,l}$  sind in Tab. 3-6 zusammengefasst.

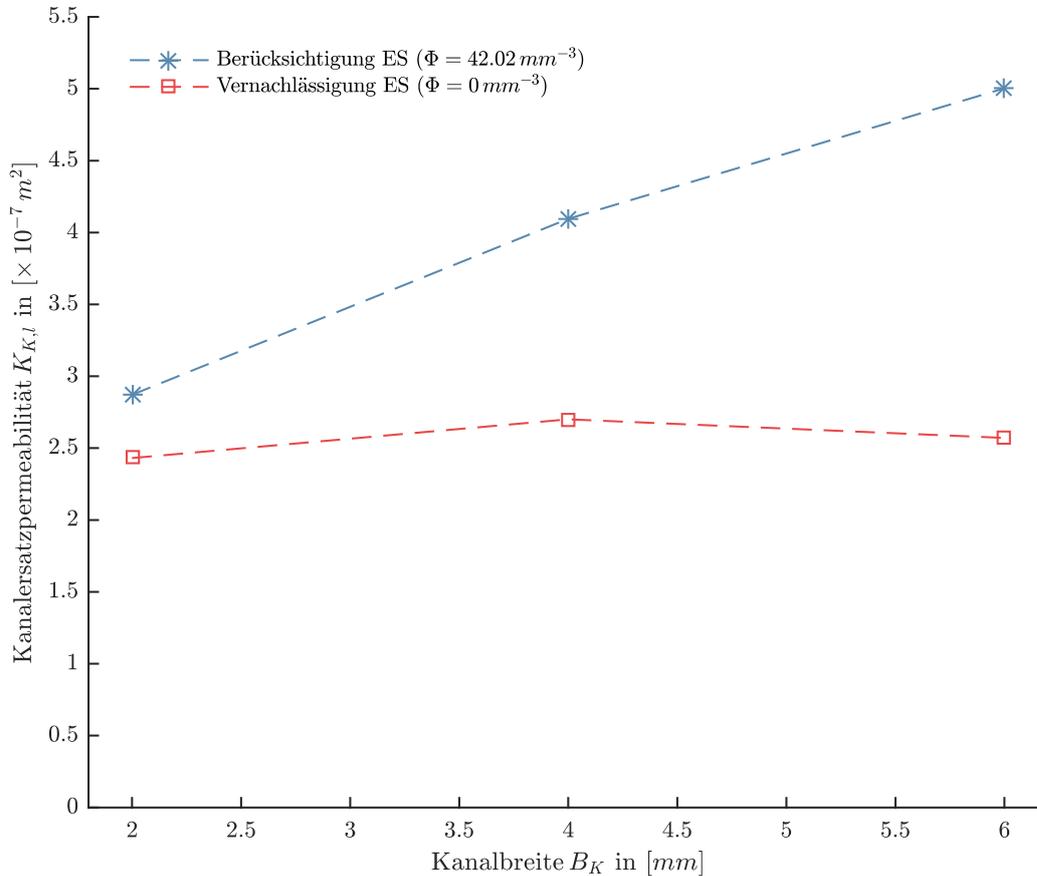
**Tab. 3-6:** Ersatzpermeabilität  $K_{K,l}$  für einen rechteckigen Kanal der Höhe 3mm für verschiedene Kanalbreiten

$B_{K,l} [\text{mm}]$	2	4	6
$K_{K,l} [\text{m}^2]$	$2.87 \cdot 10^{-7}$	$4.10 \cdot 10^{-7}$	$5.00 \cdot 10^{-7}$

Zur Beurteilung, ob die Berücksichtigung des Einlasssystems einen Einfluss auf die Ersatzpermeabilität  $K_{K,l}$  hat, wird in Abb. 3-11 der Unterschied für  $K_{K,l}(\Phi_{E1} = 42.02 \text{ mm}^{-3})$  und  $K_{K,l}(\Phi_{E1} = 0 \text{ mm}^{-3})$  über verschiedene Kanalbreiten grafisch dargestellt.

Es zeigt sich, dass ohne Berücksichtigung des Einlasssystems annähernd kein Unterschied über die gemessenen Kanalbreiten zu erkennen ist. Dies widerspricht dem hergeleiteten analytischen Ergebnis. Bei einer Vernachlässigung des Einlasssystems werden

niedrigere Werte für die Ersatzpermeabilität berechnet. Dies liegt daran, dass der durch das Einlasssystem verursachte Druckverlust vernachlässigt wird bzw. am Einlass der Messstrecke ein geringerer Einlassdruck anliegt.



**Abb. 3-11: Vergleich der Ersatzpermeabilität unter bzw. ohne Berücksichtigung des Einlasssystems**

Mit Zunahme des Kanalquerschnitts steigt die Abweichung bzw. die Dominanz des Einlasssystems nimmt zu. Dies führt zum Schluss, dass eine Berücksichtigung des Einlasssystems zur Berechnung von  $K_{K,l}$  zwingend erforderlich ist.

Um zu verstehen, welche der in Tab. 2-5 aufgeführten Modelle zu den durchgeführten Versuchen passen, werden die aus Versuchen errechneten Werte der Ersatzpermeabilität mit den Modellwerten (vgl. Abb. 2-6) verglichen. In Abb. 3-12 sind die berechneten und auf Versuchen basierenden Werte der Ersatzpermeabilität für die Modelle, die keine permeable Wand haben, dargestellt. Die über Versuche ermittelten Werte folgen dem generellen Trend, dass mit steigender Kanalbreite eine höhere Ersatzpermeabilität ermittelt wird. In Abb. 3-12 ist die jeweilige Abweichung des Modells zum Experiment dargestellt. Das Modell mit der geringsten Abweichung über alle Kanalbreiten ist Modell 6.

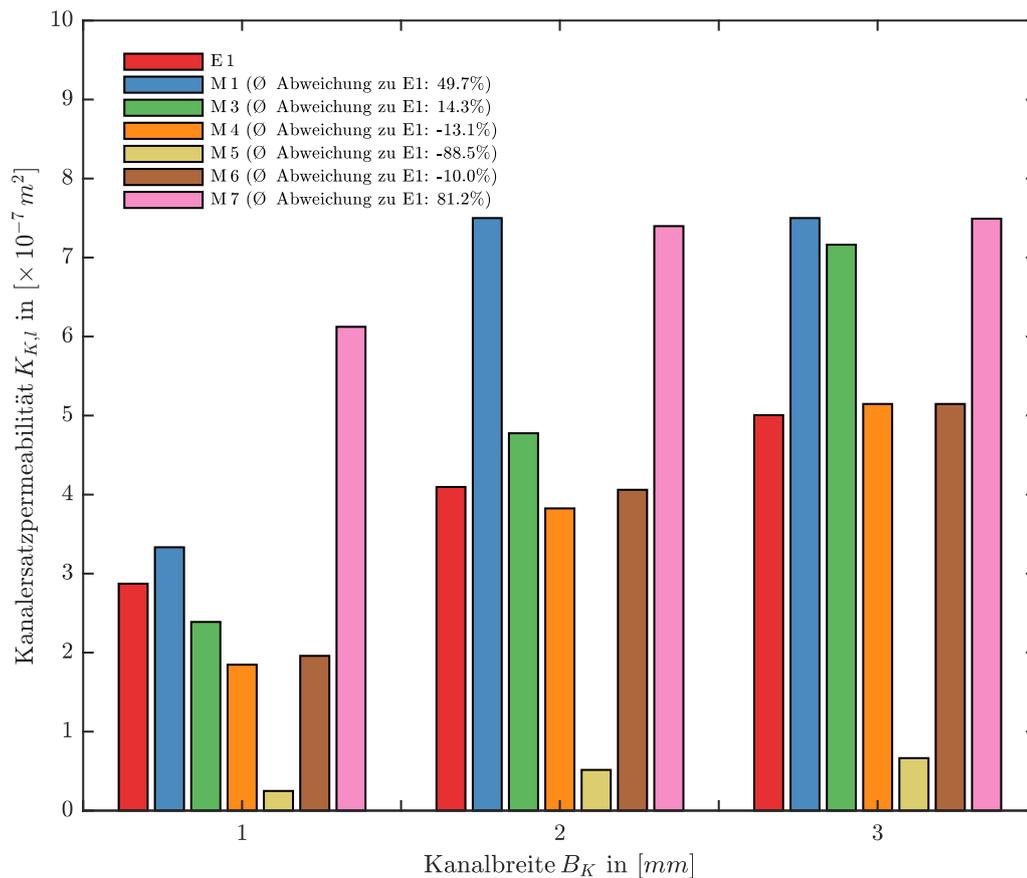
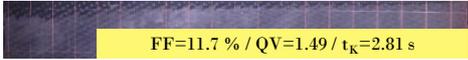
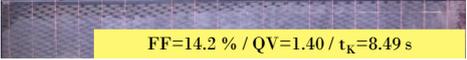
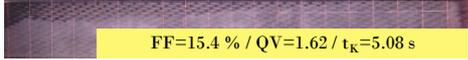
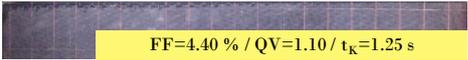
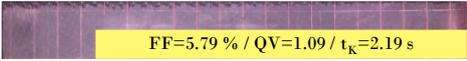
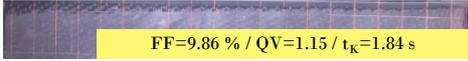
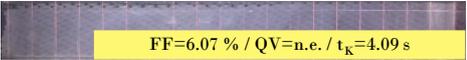
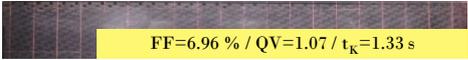
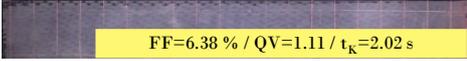
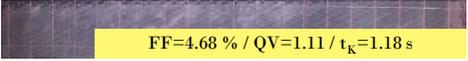
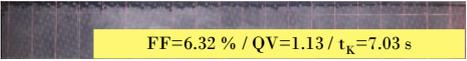
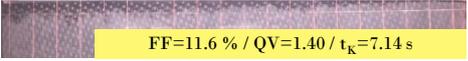
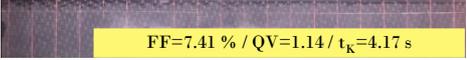
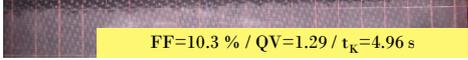
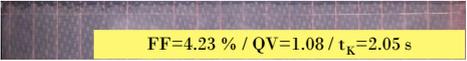
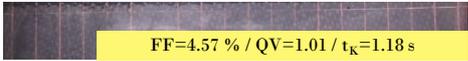
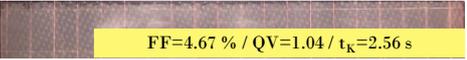
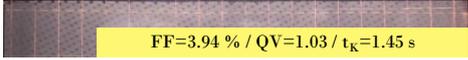
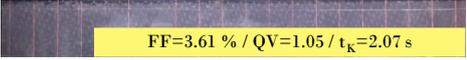
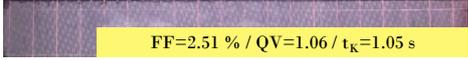
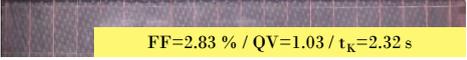
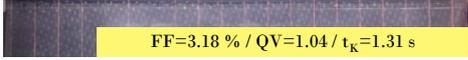


Abb. 3-12: Darstellung der analytisch berechneten und auf Versuchen basierend ermittelten Ersatzpermeabilitäten der Versuchsserie E1

### 3.2.2.3 Fluss durch einen geraden Kanal mit Textil

Zum Auswerten der Versuche mit einem Textil, also einem einseitig porösen Medium im RT- Kanal, wird der Füllfaktor zum Zeitpunkt, wenn das Messfluid den Auslass erreicht, herangezogen. Des Weiteren werden das Volumenstromverhältnis und die Zeit zum Füllen des RT- Kanals zur Charakterisierung verwendet. Die Ergebnisse sind in Tab. 3-7 zusammengefasst.

**Tab. 3-7: Füllbilder aus der Versuchsserie E2 zur Charakterisierung des Volumenstroms in die Preform**

		Einlassdruck $p_E$ [mbar]			
		150	300		
Kanalbreite $B_K$ [mm]	$v_f=0.48$	2	 FF=17.5 % / QV=1.53 / $t_K=11.3$ s	 FF=11.7 % / QV=1.49 / $t_K=2.81$ s	
			 FF=14.2 % / QV=1.40 / $t_K=8.49$ s	 FF=15.4 % / QV=1.62 / $t_K=5.08$ s	
		4	 FF=7.50 % / QV=1.13 / $t_K=2.37$ s	 FF=4.40 % / QV=1.10 / $t_K=1.25$ s	
			 FF=5.79 % / QV=1.09 / $t_K=2.19$ s	 FF=9.86 % / QV=1.15 / $t_K=1.84$ s	
		6	 FF=6.07 % / QV=n.e. / $t_K=4.09$ s	 FF=6.96 % / QV=1.07 / $t_K=1.33$ s	
			 FF=6.38 % / QV=1.11 / $t_K=2.02$ s	 FF=4.68 % / QV=1.11 / $t_K=1.18$ s	
	Kanalbreite $B_K$ [mm]	$v_f=0.62$	2	 FF=6.32 % / QV=1.13 / $t_K=7.03$ s	 FF=11.6 % / QV=1.40 / $t_K=7.14$ s
				 FF=7.41 % / QV=1.14 / $t_K=4.17$ s	 FF=10.3 % / QV=1.29 / $t_K=4.96$ s
			4	 FF=4.23 % / QV=1.08 / $t_K=2.05$ s	 FF=4.57 % / QV=1.01 / $t_K=1.18$ s
				 FF=4.67 % / QV=1.04 / $t_K=2.56$ s	 FF=3.94 % / QV=1.03 / $t_K=1.45$ s
			6	 FF=3.61 % / QV=1.05 / $t_K=2.07$ s	 FF=2.51 % / QV=1.06 / $t_K=1.05$ s
				 FF=2.83 % / QV=1.03 / $t_K=2.32$ s	 FF=3.18 % / QV=1.04 / $t_K=1.31$ s

Zur Auswertung wird die Füllzeit des Kanals  $t_K$  (Abb. 3-13), der Füllfaktor FF (Abb. 3-14) und das Volumenstromverhältnis  $QV$  (Abb. 3-15) im Bezug zum Einlassdruck  $p_E$  separat dargestellt.

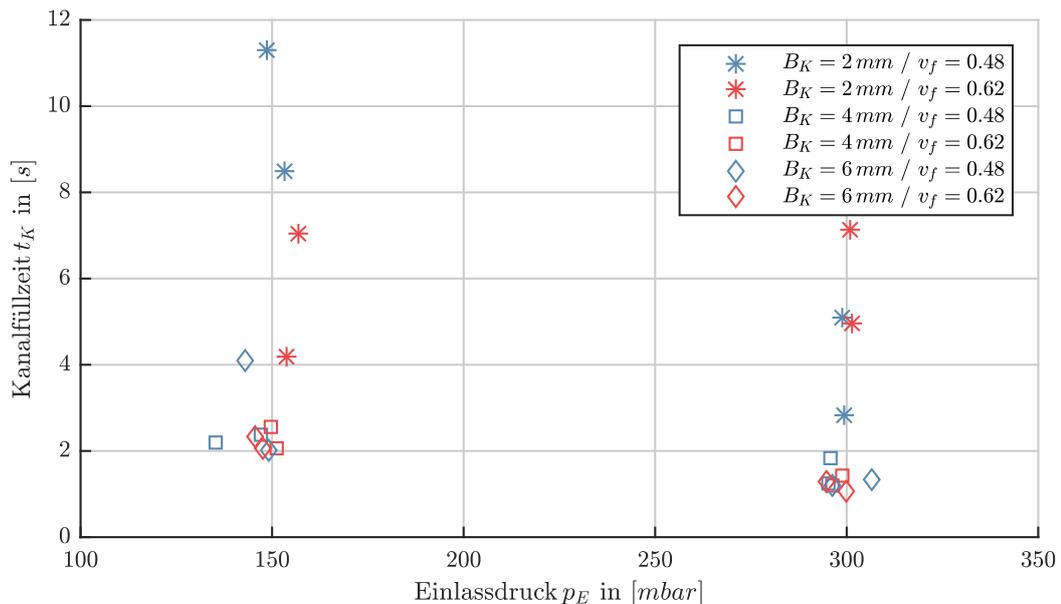
Bei der in Abb. 3-13 dargestellten Füllzeit ist zu sehen, dass für kleine Kanalbreiten eine sehr große Streuung auftritt. In Tab. 2-3 sind übliche Toleranzen, die in der Prozesskette auftreten, erklärt. Eine Toleranz von 1mm an der Beschnittkante der Preform ist nur durch Automatisierung zu erreichen. Bei einem definierten Kanal mit einer Breite von 2mm liegt der Wert nahe an dem, was an Toleranz möglich ist. Die Positionierung der Preform wurde bei den Versuchen über Passfedern soweit wie möglich sichergestellt. Leichte Abweichungen der Positionierung haben bei niedrigen Kanalbreiten einen prozentual größeren Einfluss verglichen mit größeren Kanalbreiten. Diese Abweichungen

erklären die hier auftretenden Streuungen. Die Streuungen nehmen mit steigender Kanalbreite ab.

Mit ansteigender Kanalbreite  $B_K$  sinkt die Füllzeit  $t_K$ . Unter Berücksichtigung der analytischen Formeln für die Ersatzpermeabilität steigt diese mit steigender Querschnittsfläche; der Betrag des Volumenstroms im Kanal muss demzufolge ansteigen. Es verringert sich das Verhältnis der Permeabilität der Preform und der der Ersatzpermeabilität des Kanals.

Mit steigendem Faservolumengehalt  $v_f$  sinkt die Füllzeit  $t_K$  des Kanals. Durch das Ansteigen des Faservolumengehalts sinkt die Permeabilität des Textils und die Querströmung in das Textil wird verhindert. Über die reduzierte Querströmung verbleibt mehr Flüssigkeit im Kanal und die Füllzeit sinkt. Das Verhältnis der Permeabilität der Preform zur Ersatzpermeabilität des Kanals sinkt.

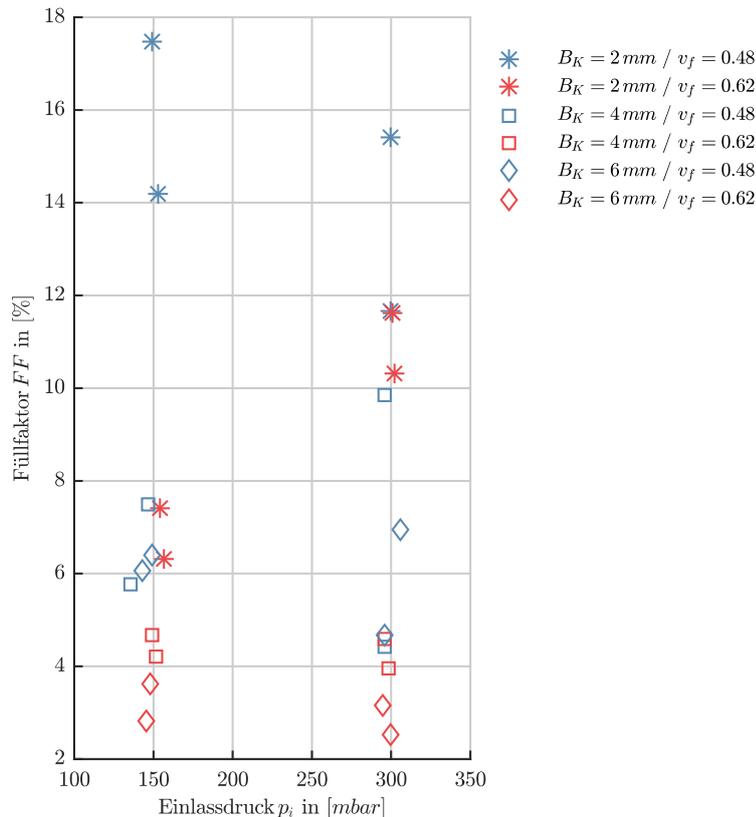
Mit steigendem Injektionsdruck  $p_e$  sinkt die Füllzeit  $t_K$ , wie durch die analytische Formel von Darcy hergeleitet, um ca. 50%.



**Abb. 3-13: Einlassdruck versus Kanalfüllzeiten im Experiment E2**

Versuche mit: Einlassdruck  $p_E$  150mbar und 300mbar; Kanalbreite  $B_K$  2mm/ 4mm/ 6mm; Faservolumengehalt  $v_f$  0.48 und 0.62

Das Volumenstromverhältnis für  $t > t_K$  ist in Abb. 3-15 bzw. der Füllfaktor  $FF$  zum Zeitpunkt  $t = t_K$  in Abb. 3-14 dargestellt. Für beide Werte gilt, je größer der Faktor, desto größer der Querstrom. Für alle Messungen werden Streuungen beobachtet. Diese haben dieselben Ursachen wie oben beschrieben.

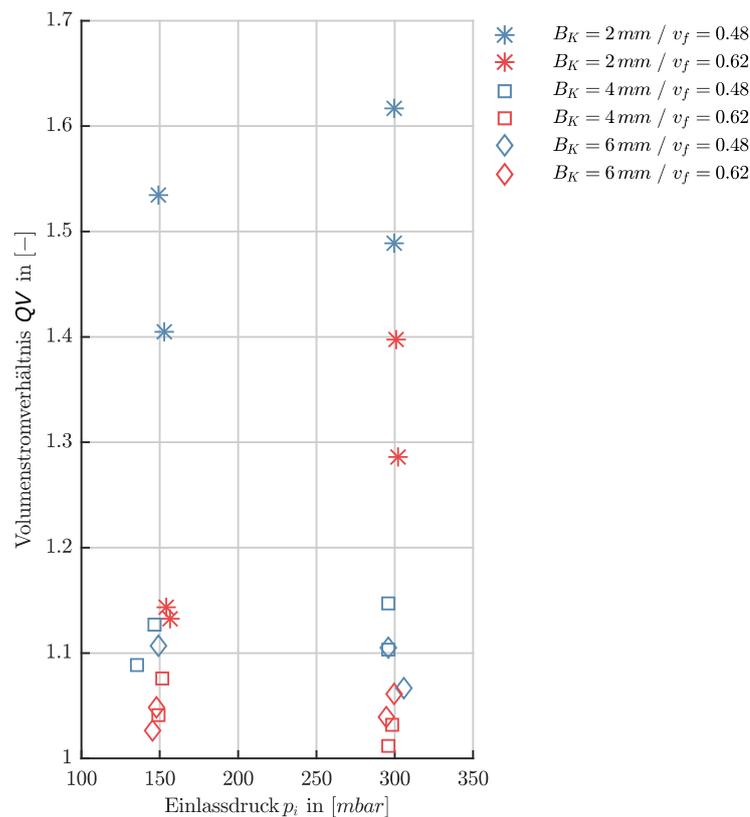


**Abb. 3-14: Einlassdruck versus Füllfaktor im Experiment E2**

Versuche mit Einlassdruck 150mbar und 300mbar; Kanalbreite  $B_K$  2mm/ 4mm/ 6mm; Faservolumengehalt  $v_f$  0.48 und 0.62

Folgende Aussagen werden auf Basis der dargestellten Untersuchungen getroffen.

- FF und QF sind unabhängig in Bezug auf den Injektionsdruck  $p_E$  mit Ausnahme für den Fall  $B_K = 2\text{ mm}$ . Diese Ausnahme kann durch Messunsicherheiten und der erhöhten Bedeutung von Positionsabweichungen bei kleinen Kanalbreiten erklärt werden.
- Mit fallendem Faservolumengehalt  $v_f$  der Preform steigen  $FF$  und  $VF$  an. Das Verhältnis der Permeabilität der Preform  $K_{y,Preform}$  zur Ersatzpermeabilität des Kanals  $K_{K,l}$  wird kleiner. Die beiden Werte nähern sich an. Dadurch rückt die Variante RT gemäß Abb. 2-7 von b in Richtung c.
- Mit sinkender Kanalbreite steigen FF und VF an. Dabei sind FF und VF bei einer Kanalbreite von 4mm und 6mm nahezu identisch. Bei einer Kanalbreite von 2mm treten große Streuungen auf. Diese Abweichung kann durch Messunsicherheiten und der erhöhten Bedeutung von Positionsabweichungen bei kleinen Kanalbreiten erklärt werden.



**Abb. 3-15: Einlassdruck versus Volumenstromverhältnis im Experiment E2**

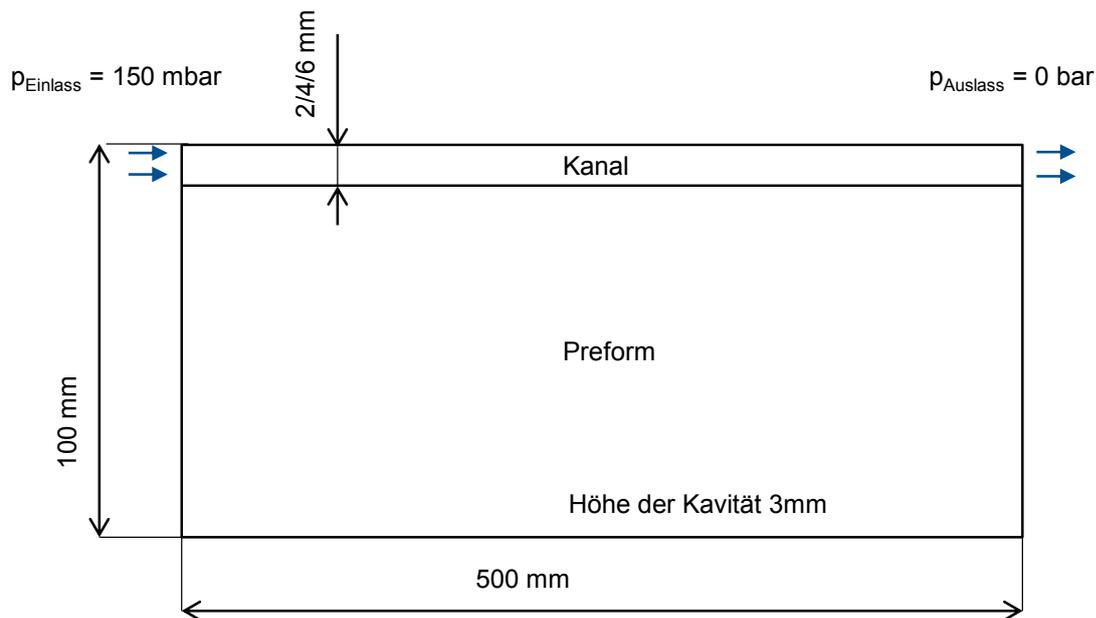
Versuche mit: Einlassdruck 150mbar und 300mbar; Kanalbreite  $B_K$  2mm/ 4mm/ 6mm; Faservolumengehalt  $v_f$  0.48 und 0.62

### 3.3 Untersuchung zur numerischen Abbildung von Race Tracking eines Kanals

Die in Kapitel 3.2 beschriebenen Versuche mit Textil zeigen das Zusammenspiel von RT und einer textilen Preform auf. Diese Ergebnisse werden genutzt, um zu verifizieren, welche Möglichkeit zur realitätsnahen Abbildung herangezogen werden muss. Dabei werden die beiden in der Literatur beschriebenen Ansätze zur Kanalmodellierung  $K_{K,q} = K_{K,l}$  bzw.  $K_{K,q} = K_{y,Preform}$  verwendet.

Als Kriterium zum Vergleich der Ergebnisse aus dem Versuch mit dem der Simulation werden die Messgröße Zeit  $t_K$  bis der Kanal vollständig gefüllt ist bzw. das Fluid den Auslass erreicht und Füllbild zum Zeitpunkt  $t_K$  (FF und VF) herangezogen.

Das verwendete Modell ist in Abb. 3-16 dargestellt.



**Abb. 3-16:** Schematische Darstellung des Modells zur Verifizierung der durchgeführten Versuche E2

Alle Modelle werden mit dem „Pave(Default)“ Algorithmus vernetzt. Zur Auswahl der Elementgrößen wird ein Kompromiss zwischen Aussagegenauigkeit versus Elementanzahl gewählt. Die Elementlänge wird mit ca. 1mm gewählt.

Als Materialdaten für die textile Preform werden die in Tab. 3-3 dargestellten Werte herangezogen. Als Viskosität des Fluids Sonnenblumenöl werden 78mPas verwendet. (Kapitel 3.2.1)

In Kapitel 3.2.2.2 wurde festgestellt, dass Modell 6 die Kanalströmung mit der geringsten Abweichung abbildet. Es wird als Basis zur Bestimmung von  $K_{K,l}$  herangezogen.

Analytische Betrachtungen in Kapitel 2.3.2 und eine vorab durchgeführte numerische Studie zeigen, dass der Injektionsdruck keinen Einfluss auf das Füllbild bzw. nur auf die Füllzeit des RT- Kanals hat. Die im nachfolgenden Kapitel dargestellten simulativen Ergebnisse beruhen auf einem Einlassdruck von 150mbar.

Das Einlasssystem kann in PAM-RTM über die Tube Funktion nachgestellt werden. Über die Länge und den Radius des Kanals wird das modellierte System so eingestellt, dass der Einlassfaktor mit  $\Phi_{E3 \text{ gemessen}} = \frac{L_S}{A_S K_S} = 33,38 \text{ mm}^3 = \Phi_S$  erreicht wird (Länge  $L_{\text{Schlauch}}=2\text{m}$ ,  $r_{\text{Einlass}}=3.5\text{mm}$   $K_S = \frac{r^2}{8}$  [119]).

Der Füllfaktor wird über ein Skript für das Programm MATLAB automatisiert berechnet. Es wird die Fläche jedes Elements  $i$  mit Füllfaktor  $f_i = 1$  zur Berechnung der vollständig gefüllten Fläche  $A_{f_i=1}$  herangezogen. Dazu werden Elemente mit  $f_i > 0$ , also

Elemente, die teilweise gefüllt sind, mit berücksichtigt. Da diese Elemente die „numerische Unschärfe“ darstellen, wird diese Fläche halbiert.

$$FF = \frac{A_{f_i=1} + A_{f_i>0}}{A_{Preform}} \quad (3-9)$$

Angelehnt an die Versuche wird als definierter Punkt zum Auswerten das vollständige Füllen des Kanals gewählt ( $t = t_{K,voll}$ ).

Aus der Literatur sind zwei Ansätze zum Modellieren der Ersatzpermeabilität senkrecht zum Kanal  $K_{K,q}$  bekannt.

- Ansatz 1: Die Ersatzpermeabilität des Kanals senkrecht zum Kanal wird der in selber Richtung der Preform gleich gesetzt  $K_{K,q} = K_{y,Preform}$ . [101]
- Ansatz 2: Die Ersatzpermeabilität des Kanals senkrecht zum Kanal wird der in Richtung des Kanals gleich gesetzt  $K_{K,q} = K_{K,l}$ . [123]

Diese beiden Ansätze werden in Kapitel 3.3.1 mit den Ergebnissen der Experimente verglichen. Um die Genauigkeit der Ergebnisse zu verbessern, werden weitere Ansätze untersucht.

- Ansatz 3: Freies Anpassen von der  $K_{K,q}$  bei konstanten  $K_{K,l}$  bis Füllbild und Füllzeit des Kanals mit den experimentell ermittelten Daten übereinstimmen. (Kapitel 3.3.2)
- Ansatz 4: Gleichzeitiges Skalieren von  $K_{K,q}$  und  $K_{K,l}$  bis Füllbild und Füllzeit des Kanals mit den experimentell ermittelten Daten übereinstimmen. (Kapitel 3.3.3)
- Ansatz 5: freies Anpassen von  $K_{K,q}$  und  $K_{K,l}$  bis Füllbild und Füllzeit des Kanals mit den experimentell ermittelten Daten übereinstimmen. (Kapitel 3.3.4)

Diese Ansätze wurden bei der Modellierung der Experimente E2 angewendet.

### 3.3.1 Ansatz 1 ( $K_{K,q} = K_{y,Preform}$ ) und Ansatz 2 ( $K_{K,q} = K_{K,l}$ ) aus der Literatur

In Abb. 3-17 sind alle berechneten Ergebnisse für die Ansätze 1 und 2 dargestellt. Für jede Rechnung wird die Zeit, die das Messfluid zum Erreichen des Auslasses  $t_{K,voll}$  benötigt und der dazugehörige Füllfaktor  $FF$  zu diesem Zeitpunkt dargestellt.

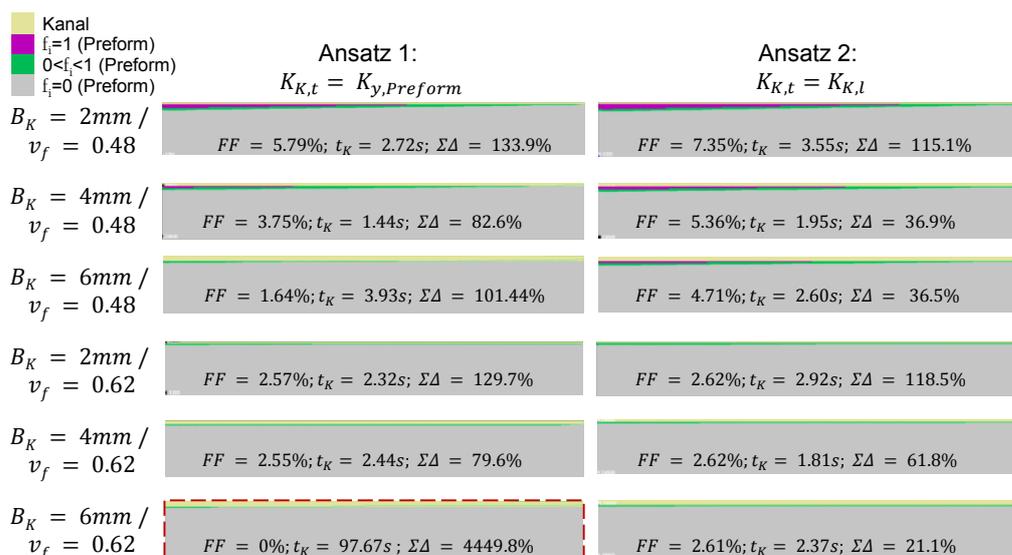


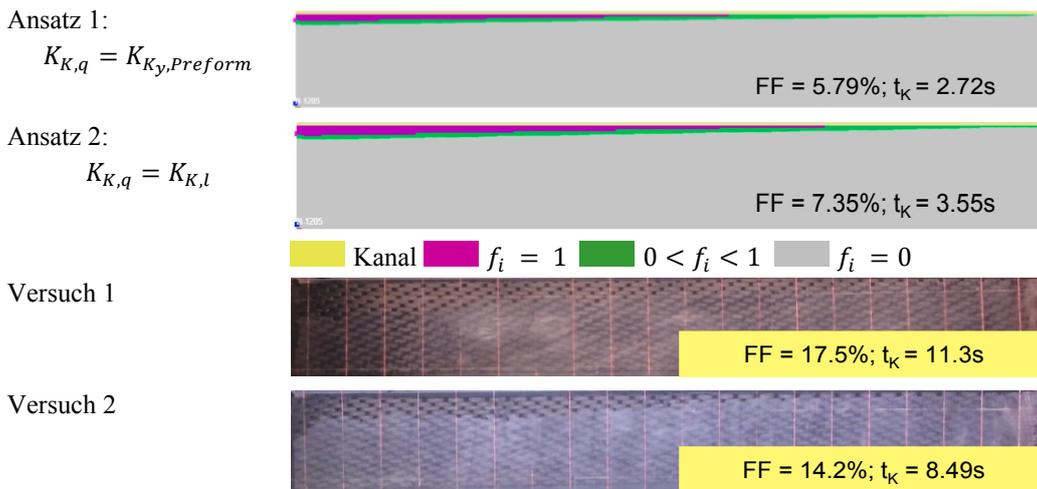
Abb. 3-17: Ergebnisse des Modellierungsansatzes eins (links) und zwei (rechts)

Da  $K_{y,Preform}$  im Betrag kleiner als  $K_{K,l}$  ist, wird erwartet, dass der Fluidstrom in die Preform bei Ansatz 2 größer ist. Dies ist gleichbedeutend mit einem höheren FF für Ansatz 2. Die dargestellten Ergebnisse bestätigen diese Aussage. Mit zunehmender Kanalbreite steigt die Ersatzpermeabilität der Kanals und damit das Verhältnis der Ersatzpermeabilität des Kanals  $K_{K,l}$  zur Permeabilität der Preform  $K_{y,Preform}$ . Der Fluidstrom durch den Kanal wird größer und senkrecht zum Kanal kleiner. Dies wird von den numerischen Ergebnissen bestätigt. Die Füllzeit  $t_{K,voll}$  verhält sich konträr. Es gilt

$$t_{K,voll,B_K=2} > t_{K,voll,B_K=4} < t_{K,voll,B_K=6}$$

Eine Ausnahme stellt der Fall im Ansatz 1 für  $v_f = 0.62$  dar. Hier wird eine kontinuierliche Steigerung von  $t_{K,voll}$  mit der Kanalbreite erreicht. Mit steigender Kanalbreite  $B_K$  steigt das Verhältnis der Kanalbreite zum Durchmesser des Einlasssystems. Dies bedeutet, der Volumenstrom wird durch das Einlasssystem begrenzt. Dieser Effekt verstärkt sich, je mehr Volumen getränkt wird, bis vollständiges Füllen des Kanals erreicht ist. Bei Ansatz 1 findet bei hohem Faservolumengehalt und größter Kanalbreite die geringste Querströmung statt. In dieser Form kann die Ausnahme erklärt werden.

Vergleicht man die Ergebnisse mit Tab. 3-7 stellt man fest, dass weder bei Füllzeit noch bei FF eine Übereinstimmung vorhanden ist. Die größten Unterschiede sind für die Kombination aus  $B_K = 2mm$  und  $v_f = 0.48$  zu beobachten (Abb. 3-18). Der FF liegt in den Versuchen bei  $>14\%$  bzw.  $5,79\%$  und  $7,35\%$  in der Simulation. Die Zeit zum Füllen des RT- Kanals beträgt im Versuch  $t_{K,voll} > 8s$  bzw. in der Simulation  $t_{K,voll} < 5s$ .



**Abb. 3-18: Vergleich von Experiment E2 mit Simulation für Ansatz 1 und 2**

Kombination aus  $B_K = 2mm$  und  $v_f = 0.48$

Damit eignen sich die Ansätze 1 und 2 nicht zur Abbildung von RT in der Simulation für diese Materialkombination.

### 3.3.2 Ansatz 3: Freies Anpassen von $K_{K,q}$ (nicht isotroper Ansatz)

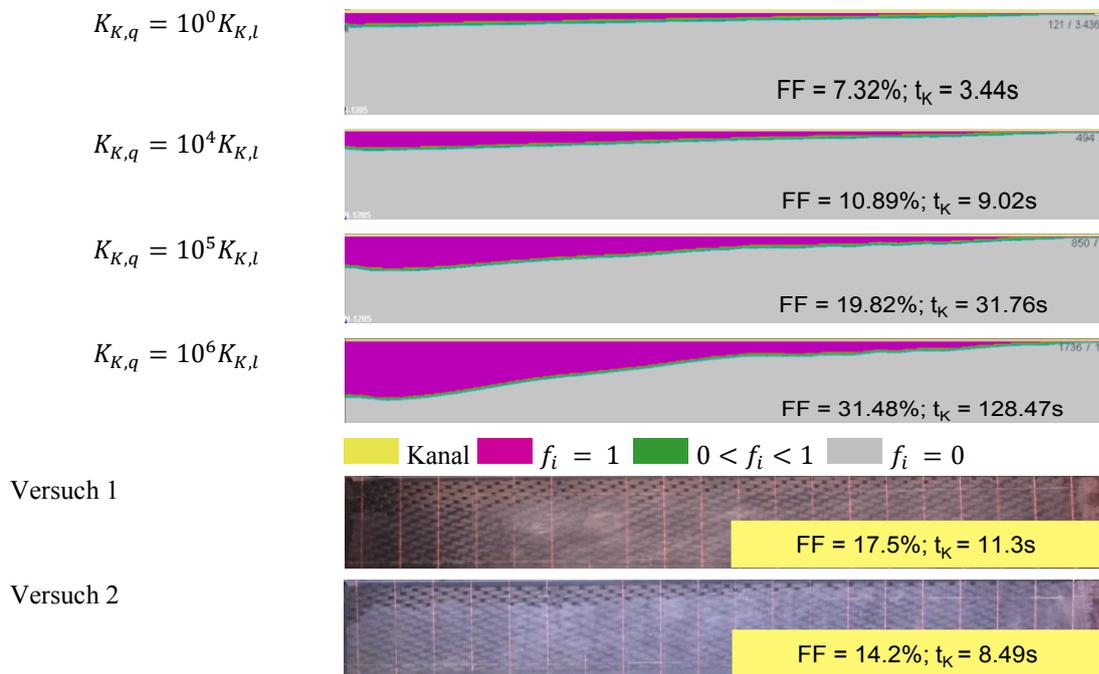
In Abb. 3-18 ist zu erkennen, dass beide Ansätze den Fluidstrom in die Preform zu niedrig ansetzen. Um diesen zu erhöhen, kann  $K_{K,q}$  erhöht werden. Dabei bleibt im hier beschriebenen Ansatz 3 die Ersatzpermeabilität des Kanals  $K_{K,l}$  konstant. Als Ausgangswert zur Skalierung wird  $K_{K,q} = K_{K,l,M6}$  gewählt.  $K_{K,q}$  wird solange skaliert bis der erzielt FF mit dem im Experiment ermittelten übereinstimmt. Abb. 3-19 zeigt die Ergebnisse aus Simulation und Experiment für den Fall  $B_K = 2mm$  und  $v_f = 0.48$ . Mit steigendem Wert der Ersatzpermeabilität des Kanals senkrecht zur Orientierung des Kanals  $K_{K,q}$  steigt der FF an. Um ein vergleichbares Füllbild mit den Experimenten zu bekommen, muss der Wert um mehrere Zehnerpotenzen skaliert werden.

In Abb. 3-20 werden alle Kombinationen, in denen Versuche durchgeführt wurden, dargestellt.

Da die Simulation für Ansatz 3 mit aktivierter „Tube“ Funktion aufgrund von numerischen Konvergenzproblemen abbricht, wurde diese deaktiviert.

Im Idealfall kann über die Skalierung von  $K_{K,q}$  eine Übereinstimmung der Ergebnisse von Simulation und Versuch erreicht werden. Dies ist annähernd der Fall für eine Kanalbreite von  $B_K = 6mm$  für beide dargestellten Faservolumenhaltswerte ( $v_f = 0.48$  und  $v_f = 0.62$ ) mit einem Skalierungsfaktor von  $1e4$  und für den Fall  $B_K = 4mm$  mit  $v_f = 0.48$ . Für alle anderen Varianten ist keine Übereinstimmung in FF und Füllzeit

gleichzeitig gefunden worden. Eine Adaption bezüglich eines Wertes ist möglich. Dabei treten deutliche Abweichungen im anderen Kriterium auf.



**Abb. 3-19: Vergleich von Experiment E2 mit den Simulationen für den Ansatz 3**  
Kombination aus  $B_K = 2mm$ ,  $v_f = 0.48$  und verschiedenen Skalierungsfaktoren

Wird im Fall  $v_f = 0.48$   $B_K = 2mm$  zum Beispiel auf die Messgröße Füllzeit des Kanals skaliert, besteht immer noch eine ca. 27%ige Abweichung zwischen Simulation und Versuch. Der Einfluss der Skalierung ist für  $v_f = 0.62$  erheblich größer als für  $v_f = 0.48$  über alle Kanalbreiten.

In Abb. 3-20 und Abb. 3-22 werden die Simulationen mit verschiedenen Skalierungsfaktoren mit den aus den Experimenten ermittelten Werten verglichen. Über Simulation generierte Ergebnisse sind als Balken abgebildet. Die dargestellten Linien stellen die Ergebnisse des korrespondierenden Experiments dar; die Strichlinien markieren den Skalierungsfaktor mit der geringsten Abweichung von Simulation zu Experiment, bezogen auf die jeweilige Messgröße FF bzw. Füllzeit. Um ein Kriterium zur Bewertung zu generieren, welches FF und die Kanalfüllzeit berücksichtigt, wird die prozentuale Abweichung von FF und Kanalfüllzeit addiert.

$$\begin{aligned}
 & |\Delta t_{K,voll}| + |\Delta FF| \\
 &= \left| \frac{t_{K,voll,sim} - t_{K,voll,Exp}}{t_{K,voll,Exp}} \right| + \left| \frac{FF_{K,voll,sim} - FF_{K,voll,Exp}}{FF_{K,voll,Exp}} \right| \quad (3-10)
 \end{aligned}$$

Diese steht in Abb. 3-20 bzw. Abb. 3-22 in schwarz bei dem angegebenen Skalierungsfaktor. Die notwendigen Zeitschritte, die zur Berechnung bis zur vollständigen Füllung des Kanals notwendig sind, werden pro Skalierungsfaktor grün dargestellt angegeben.

Es ist ein deutlicher Anstieg der notwendigen Berechnungsschritte mit Anstieg des Skalierungsfaktors zu beobachten. Für den Fall  $v_f = 0.48$  und einer Kanalbreite  $B_K = 4mm$  steigt die Anzahl der Berechnungsschritte von 1.184 auf 3.645 im Vergleich zur Referenz ohne Skalierung.

Nach Information des ESI Supports treten bei großen Permeabilitätssprüngen Konvergenzprobleme bei der numerischen Lösung der Differenzialgleichung auf. Bei einem konstanten Druckgradienten treten deutliche Unterschiede in der Darcygeschwindigkeit auf, was den Ausgleich des Volumenstroms über das Kontrollvolumen behindern kann. Der Anstieg der Berechnungszeit und die erzielten Abweichungen führen dazu, dass Ansatz 3 nicht für die Modellierung dieser Materialkombination geeignet ist.



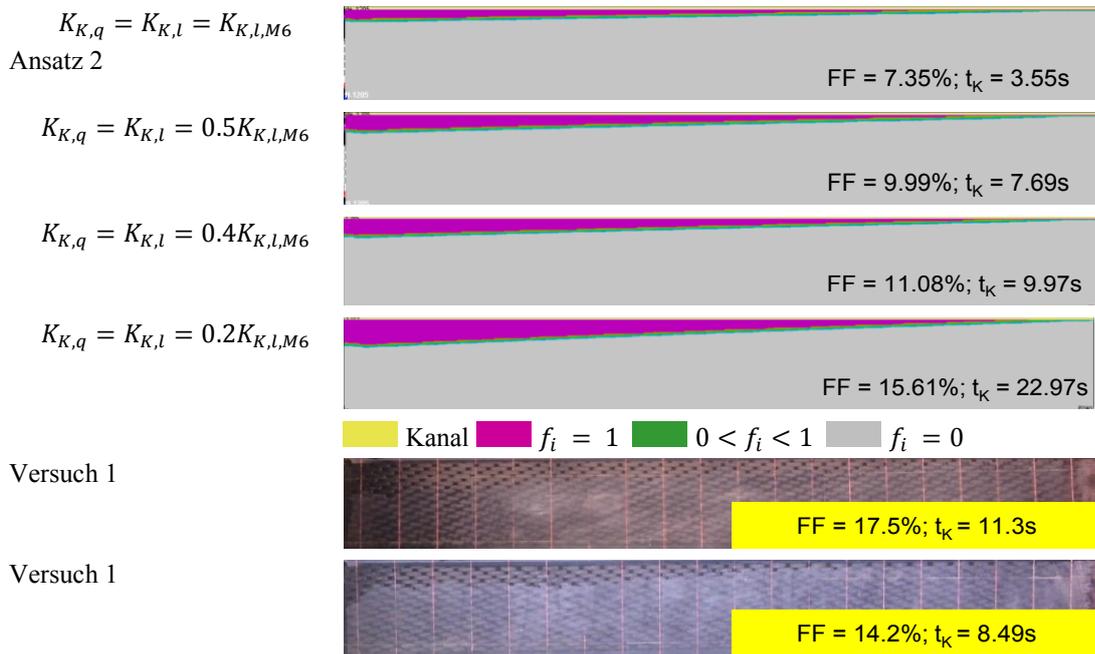
**Abb. 3-20: Vergleich Experiment E2 mit den Ergebnissen der Simulation für den Ansatz 3 für einen FVG von 48%**



Abb. 3-21: Vergleich Experiment E2 mit den Ergebnissen der Simulation für den Ansatz 3 für einen FVG von 62%

### 3.3.3 Ansatz 4: Anpassen von $K_{K,l}$ auf $K_{K,q}$ (isotroper Ansatz)

Ansatz 4 optimiert über den Ansatz des gleichzeitigen Skalierens von  $K_{K,q}$  und  $K_{K,l}$  das Füllbild und die Füllzeit des Kanals der Simulation mit den experimentell ermittelten Daten. Als Ausgangspunkt dieser Studie wird wie in Kapitel 3.3.2  $K_{K,q} = K_{K,l,M6}$  gewählt.  $K_{K,q}$  wird so lange skaliert, bis der erzielte FF mit dem im Experiment ermittelten übereinstimmt. Abb. 3-22 zeigt die Ergebnisse aus Simulation und Experiment für den Fall  $B_K = 2mm$  und  $v_f = 0.48$  gerechnet mit Ansatz 4.



**Abb. 3-22: Vergleich von Experiment E2 mit der Simulation für den Ansatz 4**  
 Kombination aus  $B_K = 2mm$ ,  $v_f = 0.48$  und verschiedenen Skalierungsfaktoren mit  $K_{K,l} = K_{K,q}$

Es ist zu beobachten, dass mit sinkendem Skalierungsfaktor der FF ansteigt. Die Messgrößen, FF und Füllzeit des RT- Kanals, der Untersuchung zum Abgleich von Experiment und Simulation sind für Ansatz 4 in Abb. 3-23 und Abb. 3-24 zusammengefasst. Der Darstellung der Abbildung entspricht Abb. 3-20.

Für die Kanalbreite von  $B_K = 6mm$  kann für beide Faservolumenhaltswerte über Skalierung eine akzeptable Übereinstimmung von 6% bzw. 21,2% erreicht werden. Je schmaler der Kanal in der Betrachtung wird, desto größer wird die Abweichung.

Über alle Berechnungen bleibt die Anzahl der notwendigen Berechnungsschritte annähernd konstant. Es liegt keine Abhängigkeit zum Skalierungsfaktor vor.

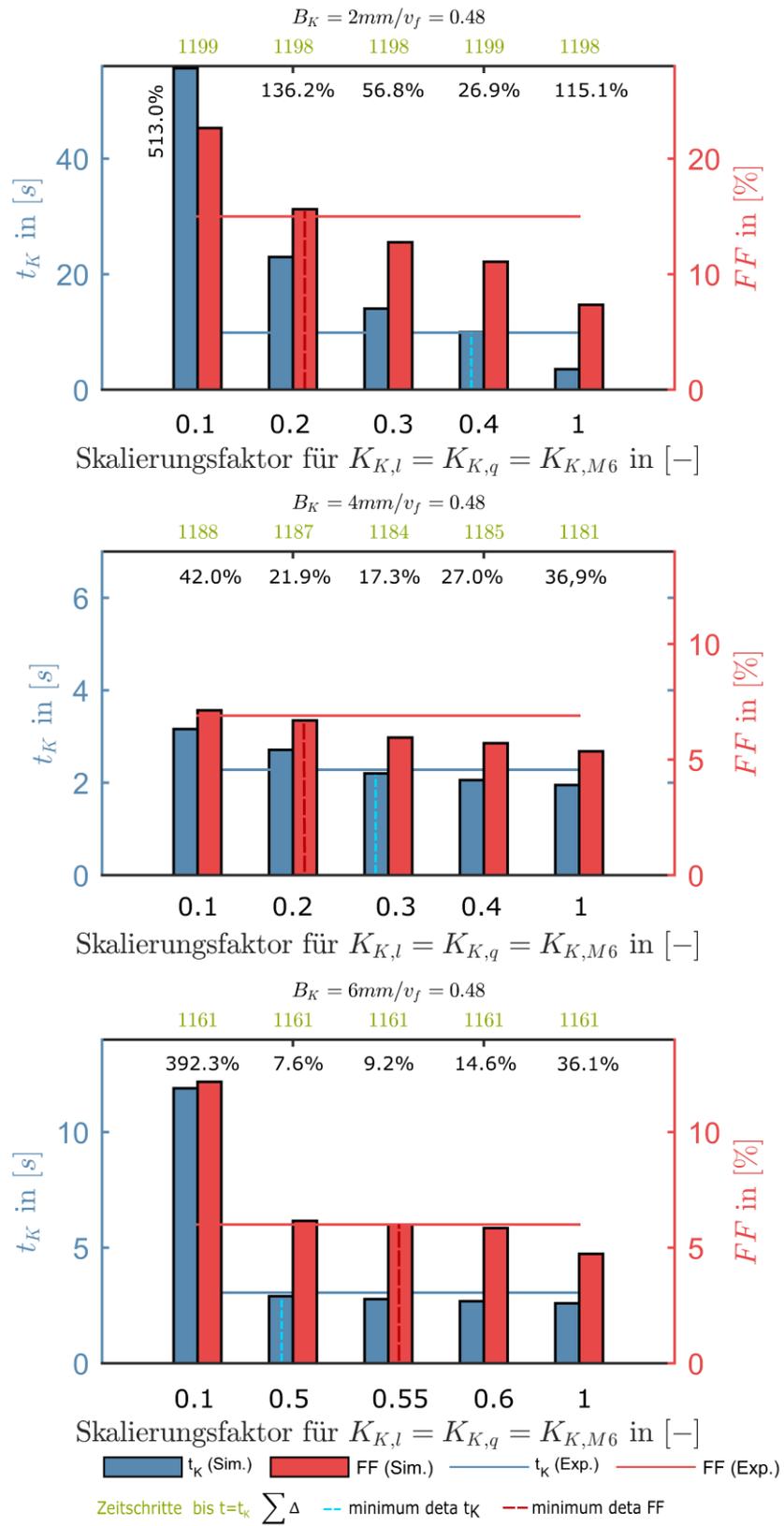
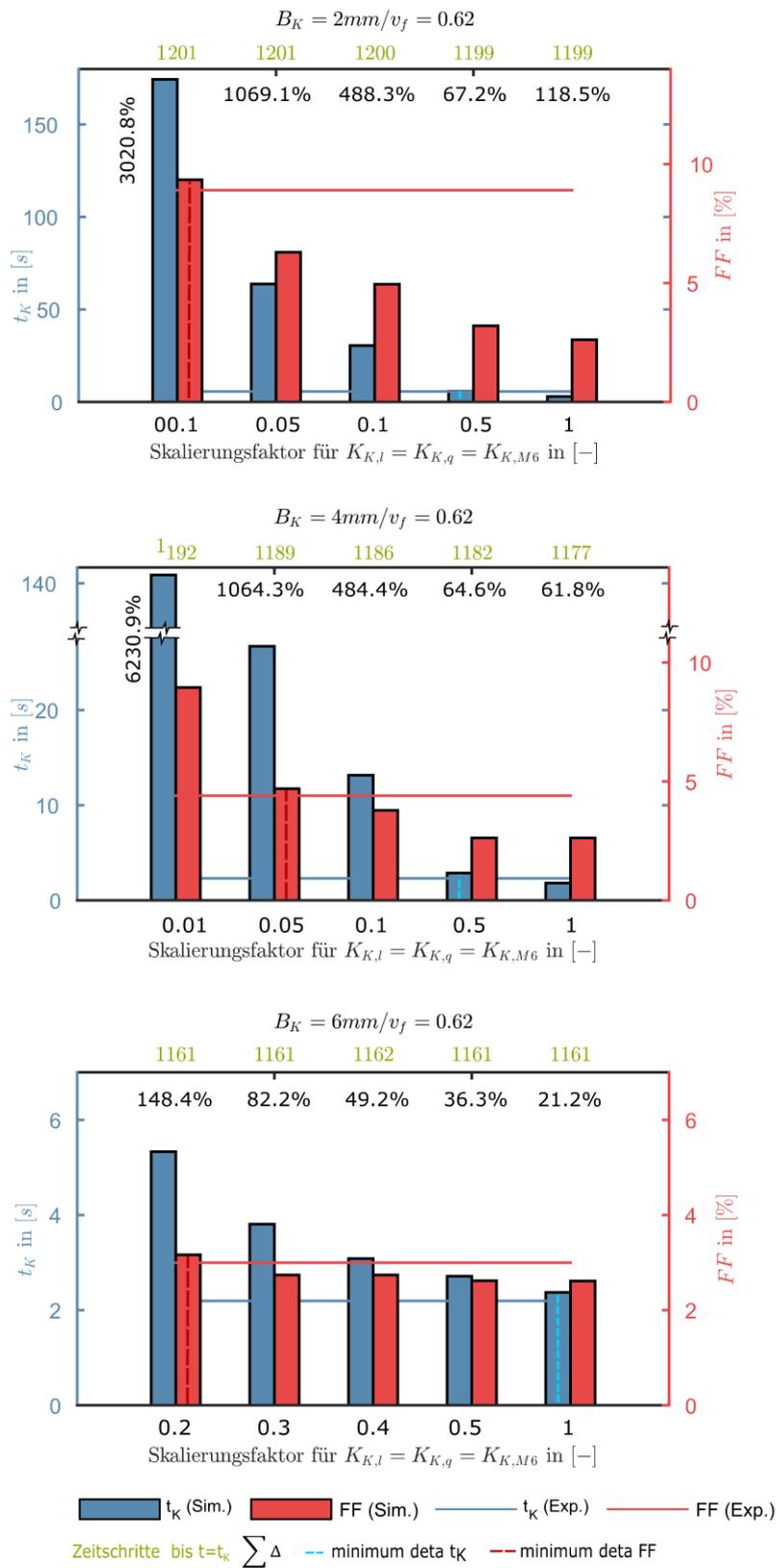


Abb. 3-23: Vergleich Experiment E2 mit Simulation für den Ansatz 4 für einen FVG von 48%



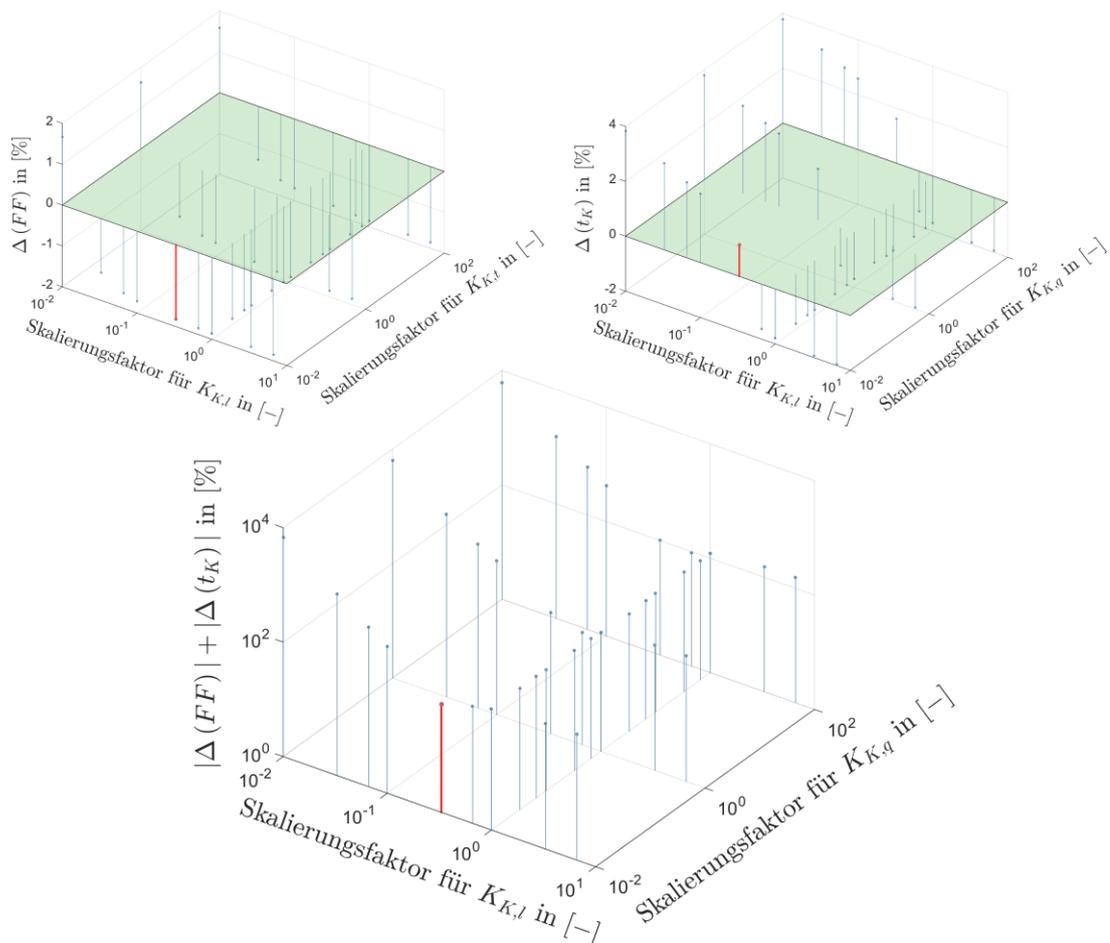
**Abb. 3-24: Vergleich Experiment E2 mit Simulation für den Ansatz 4 für einen FVG von 62%**

### 3.3.4 Ansatz 5: Unabhängiges anpassen $K_{K,l}$ auf $K_{K,q}$

Als weitere Möglichkeit, Übereinstimmung von Experiment und Simulation zu erhalten, werden die Werte der Ersatzpermeabilität in Richtung des Kanal  $K_{K,l}$  und senkrecht dazu  $K_{K,q}$  frei angepasst. Da hier keine Gesetzmäßigkeit für die Skalierung zugrunde liegt, ist dies der Ansatz, der am meisten Simulationen benötigt, um eine passende Aussage zu bekommen.

In diesem Abschnitt wird das Vorgehen zur Optimierung am Beispiel  $B_K = 2mm$  und  $v_f = 0,62$  dargestellt. Bei dieser Wertekombination haben die Ansätze eins bis vier zu keinem Ergebnis geführt.  $K_{K,l}$  wird im Bereich von  $10^{-1}$  bis  $10^0$   $K_{K,q}$  von  $10^{-1}$  bis  $10^2$  variiert.

Die Abweichung des FF und der Füllzeit des RT- Kanals  $t_{K,voll}$  von Simulation und Experiment wird als Kriterium zur Bewertung herangezogen.



**Abb. 3-25: Vergleich Experiment E2 mit Simulation für den Ansatz 5**  
Für die Parameter  $B_K = 2mm$  und  $v_f = 0,62$

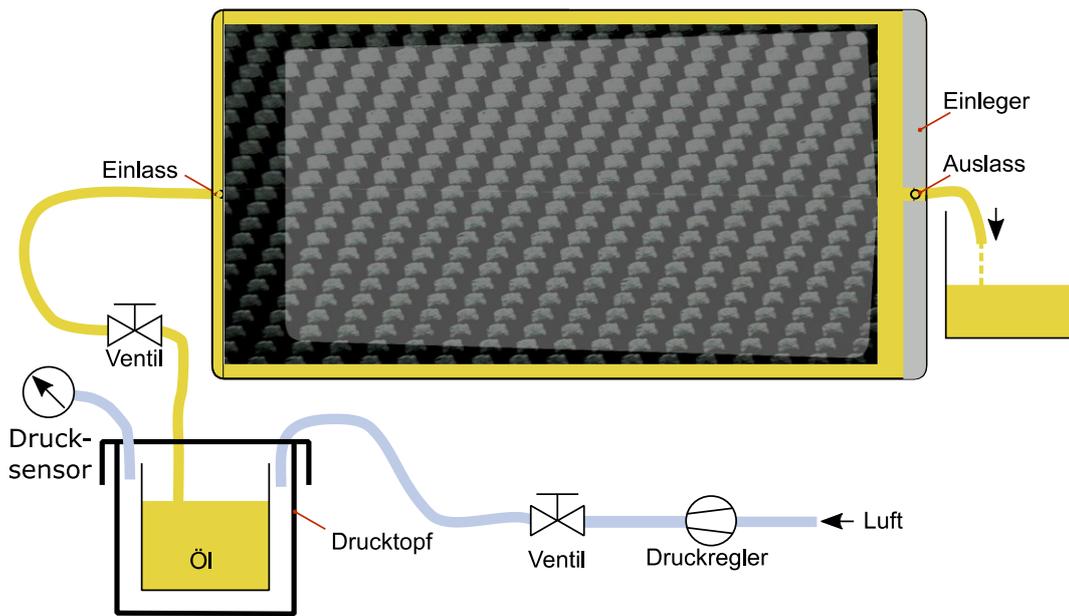
In Abb. 3-25 sind die Ergebnisse für  $\Delta FF$ ,  $\Delta t_{K,voll}$  und  $|\Delta t_{K,voll}| + |\Delta FF|$  dargestellt. Den größten Effekt zur Anpassung von Simulation und Experiment wird über die Skalierung von  $K_{K,l}$  erreicht. Die kleinste Abweichung dieser Kombination wird mit einem Skalierungsfaktor von 0.33 für  $K_{K,l}$  und von 0.01 für  $K_{K,q}$  erreicht. Es ist ebenfalls keine vollständige Übereinstimmung in beiden Faktoren möglich. Eine Abweichung von 13% verbleibt für den Füllzeit des Kanals bzw. -64% für den FF.

## 3.4 Untersuchung zur numerischen Abbildung von Race Tracking

Im Kapitel 3.2 wird die Untersuchung der Strömung durch einen Kanal mit und ohne Beteiligung eines porösen Mediums beschrieben. Dabei wird über Versuche bzw. deren Simulation ein Vorgehen vorgestellt, um das Modellieren eines RT Kanals mit dem Modell der Ersatzpermeabilität für  $K_{K,l}$  und  $K_{K,q}$  soweit wie möglich an die Realität anzupassen. In diesem Unterkapitel wird das erarbeitete Modell mit den Ansätzen aus der Literatur verglichen. Dazu werden Versuche durchgeführt, die dem Szenario einer RTM Injektion mit vollständiger Umströmung der Preform entsprechen. Über die Simulation der Versuche wird die Möglichkeit einer Bewertung der verschiedenen Ansätze im Hinblick auf Kanalfüllzeiten (der Zeitpunkt  $t_K$  wenn das Messfluid den Auslass erreicht) und dem korrelierenden Füllfaktor FF geschaffen. Zusätzlich dazu können allgemeine Aussagen über das Strömungsverhalten bei RT gemacht werden bzw. erste Regeln zum Umgang RT abgeleitet werden.

### 3.4.1 Experimenteller Aufbau der dritten Versuchsserie E3

Im Versuch wird eine Kanalströmung unter Anwesenheit einer Preform abgebildet. Die Preform wird in das Werkzeug eingelegt, so dass ein umlaufender RT- Kanal entsteht. Dadurch wird ein klassischer RT- Kanal zwischen Werkzeug und Beschnittkante der Preform abgebildet. Es wird die induzierte Querströmung aus dem Umlaufenden Kanal in der Preform mit fortschreitender Fließfront sichtbar.(Abb. 3-26)



**Abb. 3-26:** Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus zur Charakterisierung der Querströmung im RTM Prozess mit umlaufenden RT- Kanal

Zur Auswertung wird der zuvor eingeführte Füllfaktor  $FF$  bzw. die Zeit, bis das Messfluid den Auslass  $t_K$  erreicht, herangezogen. Da hier zwei Kanäle vom Einlass bis zum Auslass führen, werden pro Versuch zwei Messwerte aufgenommen.

Der Umfang der Untersuchung wird in Tab. 3-8 fasst dargestellt. Jeder Versuch wird zweimal durchgeführt, was zu insgesamt vier Werten pro Parameterset führt.

Es wurden Messungen mit drei verschiedenen Druckstufen durchgeführt. Dabei wird der Druck über den Regler am Drucktopf eingestellt. Der Auslass des Werkzeugs ist offen. Der Druck in der Kavität definiert sich über den Umgebungsdruck. Die Druckstufen wurden in der Form gewählt, dass über die Spanne der Parameter eine optische Auswertung möglich ist. Der Faservolumengehalt variiert in den zwei Stufen 0.48 und 0.62. Die Kanalbreiten entsprechen mit 2, 4 und 6mm denen aus den vorherigem Kapiteln. Die Versuchswiederholung liegt bei 2. Bei der Auswertung werden pro Versuch die obere bzw. untere Kanalströmung separat ausgewertet, weswegen für jede Parameterkonfiguration 4 Messwerte zum Auswerten erfasst werden.

**Tab. 3-8:** Testmatrix zur Charakterisierung der Querströmung im RTM

		Injektionsdruck		150mbar		300mbar		450mbar	
		Faservolumengehalt		0.48	0.62	0.48	0.62	0.48	0.62
$\eta = 78mPa$	Kanalbreite	2mm		2x	2x	2x	2x	2x	2x
		4mm		2x	2x	2x	2x	2x	2x
		6mm		2x	2x	2x	2x	2x	2x

Die Versuche bzw. die dazugehörigen Simulationen sind im Rahmen von studentischen Arbeiten von Bley [118, 141] durchgeführt worden.

Die Ergebnisse aus Vorversuchen zeigen, dass die Viskosität keinen Einfluss auf das Füllbild hat bzw. der Betrag von  $t_K$  sich proportional mit der Viskosität  $\eta$  entwickelt. Damit bestätigen sie die analytisch durchgeführte Betrachtung in Kapitel 2.3.2. Aus diesem Grund wird auf die simulative Betrachtung verzichtet.

Für die Untersuchungen wird die oben genannte Materialkombination (Permeabilitätsdaten gemäß Tab. 3-2/ Messfluid Öl mit  $\eta = 78\text{mPas}$ ) bzw. das selbe Vorgehen zur Herstellung der Preform, wie in Kapitel 3.2.1 beschrieben, verwenden.

### 3.4.2 Simulative Randbedingungen für die numerische Untersuchung des Experiments E3

Alle in Tab. 3-8 dargestellten Versuche sind nach den in Kapitel 3.1 definierten Methoden nachmodelliert und berechnet worden. In Tab. 3-9 sind die Werte von M1, M2, M4, M8 und dem entwickelten, modifizierten Ansatz aus Kapitel 3.3 zusammengefasst. Für Modell 2 bzw. 8 wird kein scherratenabhängiges Materialverhalten angenommen.

Wie die Anpassungen aus Kapitel 3.3 zeigen, liefert der Ansatz mit  $K_{K,l} = K_{K,q}$  für viele Konfiguration Übereinstimmung von Simulation und Experiment. Aus diesem Grund wird dieser Ansatz standardmäßig für diesen Vergleich verwendet. Für M6 wird die herausgearbeitete Konfiguration angewendet. Diese wird im Folgenden als M6a bezeichnet.

Tab. 3-9: Wert der Kanalersatzpermeabilität in  $\text{m}^2$

$B_k$	2		4		6		
<i>FVG</i>	48	62	48	62	48	62	
<i>M1</i>	$3,33E - 7$		$7,50E - 07$		$7,50E - 07$		$K_{K,l} = K_{K,q}$
<i>M2</i>	$3,35E - 07$	$3,34E - 07$	$7,53E - 07$	$7,51E - 07$	$7,53E - 07$	$7,51E - 07$	
<i>M4</i>	$1,85E - 07$		$3,83E - 07$		$5,15E - 07$		
<i>M8</i>	$1,97E - 07$	$1,96E - 07$	$4,10E - 07$	$4,06E - 07$	$5,14E - 07$	$5,14E - 07$	
<i>M6</i>	$3,92E - 08$	$6,48E - 08$	$2,44E - 07$	$4,06E - 07$	$2,84E - 07$	$1,03E - 07$	$K_{K,l}$
	$3,92E - 08$	$1,96E - 09$	$2,44E - 07$	$4,06E - 07$	$2,84E - 07$	$1,03E - 07$	$K_{K,q}$

Die Auswertung der Simulationen erfolgt, wie in Kapitel 3.3 beschrieben, über ein Skript für das Programm MATLAB.

### 3.4.3 Vergleich von Experiment und Simulation der Versuchsserie E3

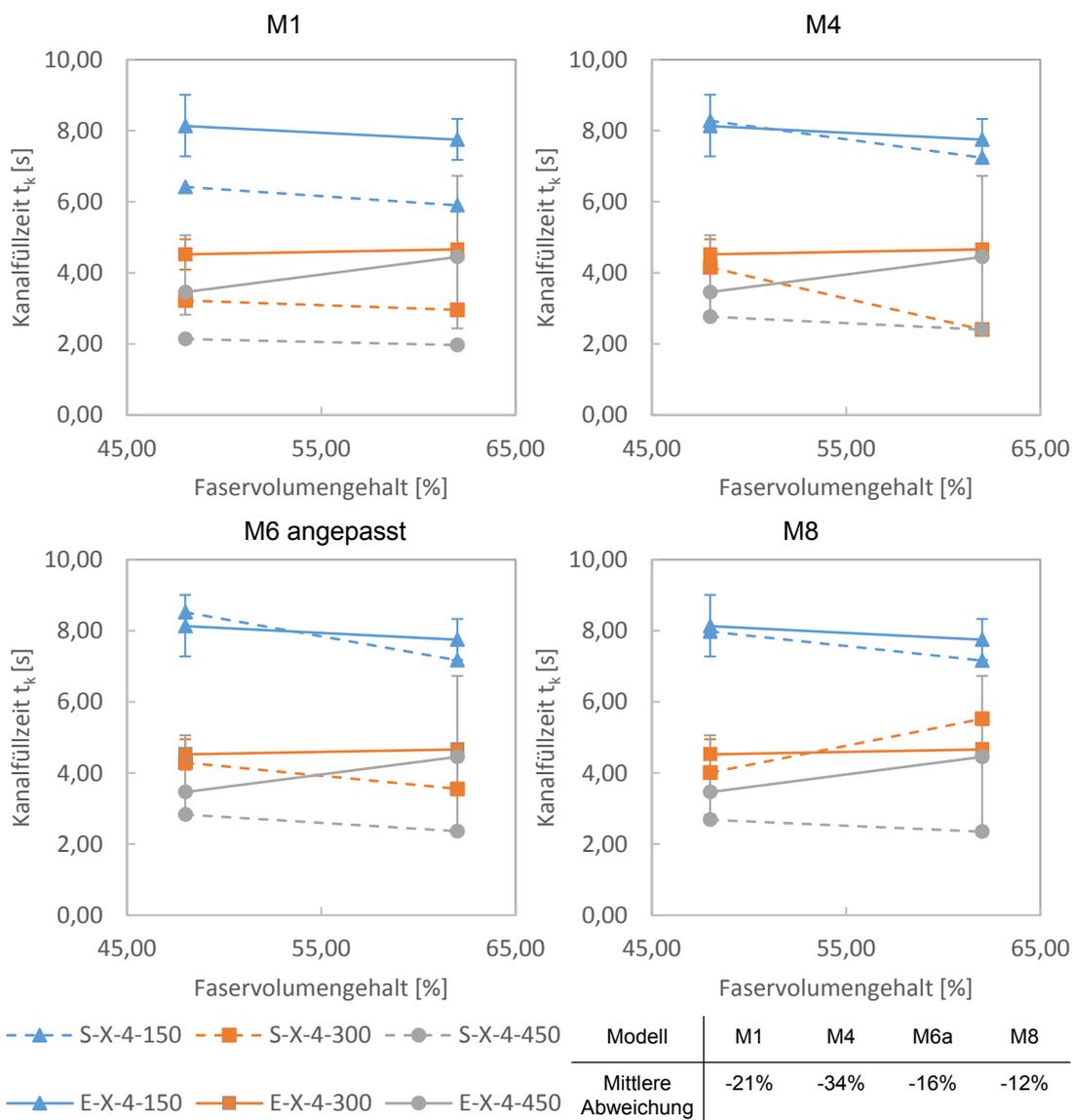
Zur Bewertung der Ergebnisse wird die Zeit bis das Messfluid den Auslass erreicht (Abb. 3-27 - Abb. 3-31) und der korrespondierende Füllfaktor (Abb. 3-32 - Abb. 3-35) herangezogen. Es wird die jeweilige Messgröße über die Stellgrößen Faservolumengehalt, Einlassdruck und Kanalbreite aufgetragen. Dies stellt eine Auswahl der Daten dar, welche die wesentlichen Erkenntnisse ermöglichen. Messpunkte einer Reihe wurden auf Grund der besseren Sichtbarkeit verbunden. Die Ergebnisse aus der Simulation sind mit gestrichelten Linien dargestellt. Die experimentellen Ergebnisse sind mit durchgezogenem Strich abgebildet. Der Fehlerbalken stellt die jeweiligen Maximal- bzw. Minimalwerte der Versuche dar. Es werden jeweils Modell M1, M4, M6a (adaptiert) und M8 verglichen. Um die generellen Unterschiede zwischen den Modellen darzustellen, wird die über den dargestellten Versuchsraum gemittelte Abweichung bezogen auf Modell M1 im Text angegeben. Die Abweichung vom Experiment zu Simulation ist in jeder Grafik aufsummiert über die variierten Parameter mit angegeben.

Die Bezeichnung der Datenreihen setzt sich aus den Parametern Faservolumengehalt (Die Zahl 7 bedeutet sieben Lagen, was einem Faservolumengehalt von 48% bzw. 9 Lagen 62% entspricht), Kanalbreite, Einlassdruck zusammen. Der Wert, welcher über der x-Achse aufgetragen wird, ist mit einem X markiert. Der Buchstabe S steht für simulierte, E für experimentell ermittelte Werte.

#### 3.4.3.1 Auswertung bezüglich der Zeit zum Füllen des Kanals $t_K$

In Abb. 3-27 ist die Kanalfüllzeit über den Faservolumengehalt aufgetragen. Es werden die Ergebnisse für verschiedene Injektionsdrücke dargestellt.

Die Modelle M1, M4, M6a zeigen, dass mit steigendem Faservolumengehalt die benötigte Zeit, bis das Messfluid den Auslass erreicht, leicht sinkt. Lediglich M8 führt bei einem Druck von  $p_E = 300\text{mbar}$  zu einem Anstieg von 52% bei steigendem Faservolumengehalt. Mit steigendem Injektionsdruck sinkt die Kanalfüllzeit.



**Abb. 3-27: Vergleich Simulation/ Experiment: Faservolumengehalt über Kanalfüllzeit mit unterschiedlichen Einlassdrücken**

Die gemittelte Abweichung über den Versuchsraum zwischen den einzelnen Modellen bezogen auf M1 beträgt 27%.

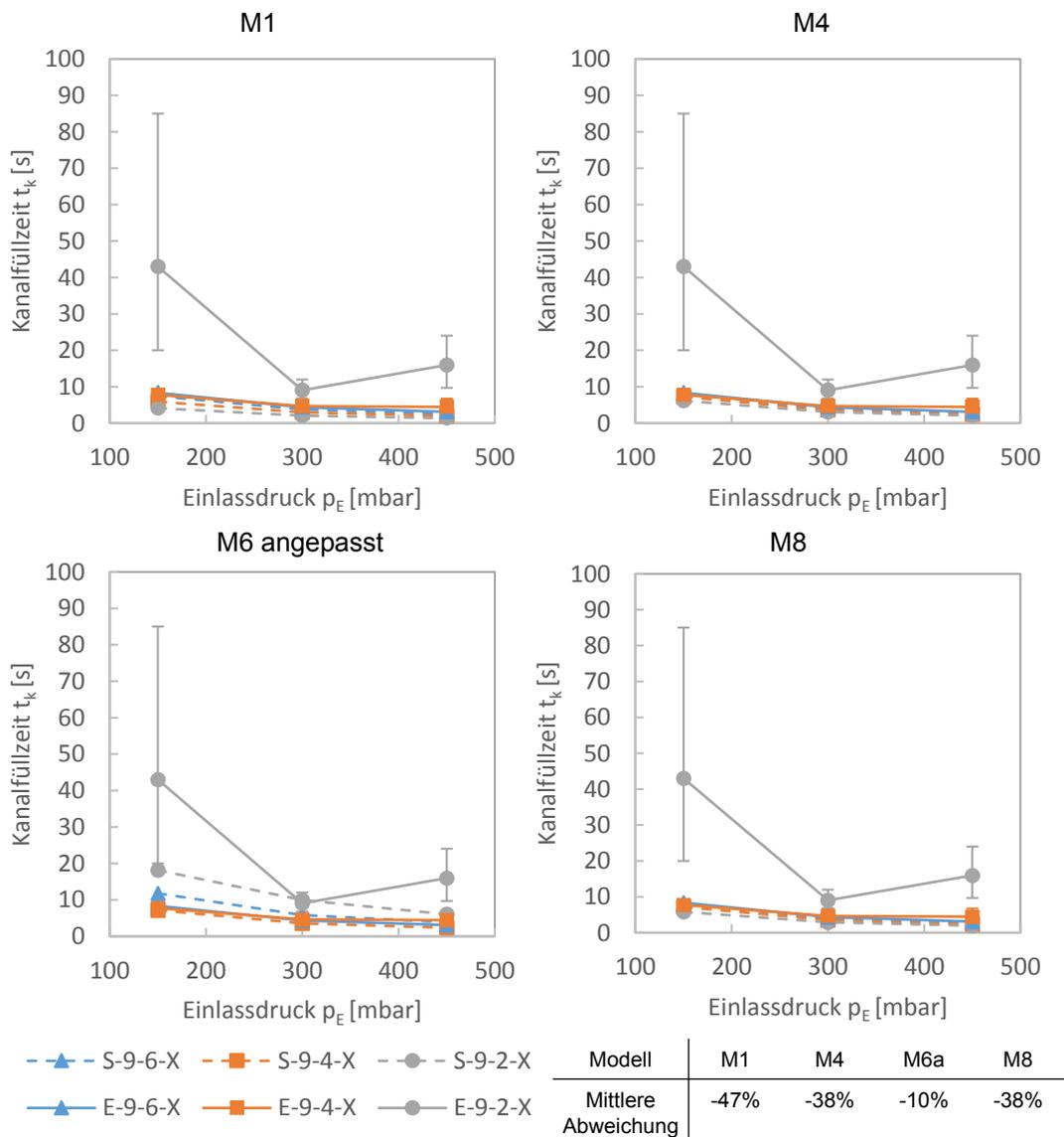
Der Entwicklung der Kanalfüllzeit mit steigendem Faservolumengehalt folgt, im Rahmen der gegebenen Streuungen, dem simulativen Ergebnissen mit Ausnahme der Kombination  $p_E = 450\text{mbar}$ . Die geringste mittlere Abweichung von Simulation zu Experiment ist mit -12% bei Modell 8 zu beobachten.

In Abb. 3-28 bzw. Abb. 3-29 ist die Kanalfüllzeit über dem Einlassdruck aufgetragen. Es werden die Ergebnisse für verschiedene Kanalbreiten abgebildet. Im Experiment mit einer Kanalbreite von 2mm traten deutliche Streuungen auf, wobei die Aufteilung in

zwei Diagramme mit unterschiedlicher Skalierung der y- Achse den Verständnigewinn unterstützt.

Die Entwicklung der Kanalfüllzeit mit steigendem Einlassdruck zeigt für die simulierten Ergebnisse, dass mit steigendem Einlassdruck die Kanalfüllzeit sinkt. Die Modelle M1, M4 und M8 sagen mit sinkendem Kanaldurchmesser eine sinkende Kanalfüllzeit voraus. M6a bildet den umgekehrten Trend ab. Die Unterschiede zwischen den Modellen liegen mit einer gemittelten Abweichung bezogen auf Modell 1 bei 65%.

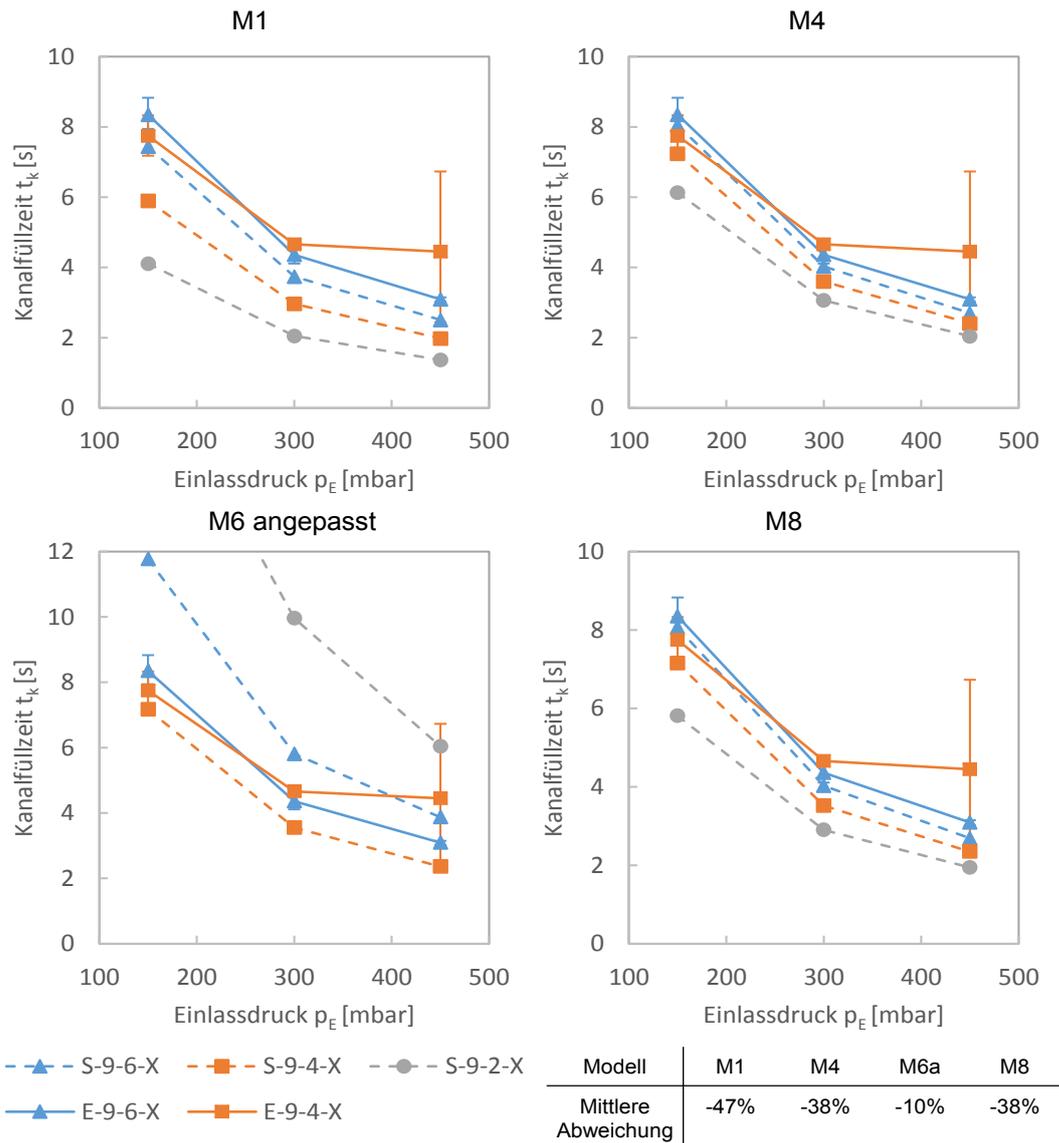
Die Experimente zeigen den Trend, dass die Kanalfüllzeit mit zunehmenden Einlassdruck sinkt. Mit sinkender Kanalbreite steigt die Füllzeit des Kanals an.



**Abb. 3-28: Vergleich Simulation/ Experiment: Kanalfüllzeit über Einlassdruck bei unterschiedlichen Kanalbreiten (grob skaliert)**

Dabei liegen die Zeiten für die Kanalbreite von 4 und 6mm eng beieinander. Die Werte für eine Breite von 2mm liegen deutlich darüber und zeigen zudem eine ausgeprägte Streuung.

Der Unterschied zwischen Experiment und Simulation ist mit -10% bei M6a am geringsten. Modell M6a bildet als einziges den experimentell beobachteten Effekt der steigenden Kanalfüllzeit mit sinkender Kanalbreite ab. Bei Kanalbreiten größer 4mm bilden alle Modelle den Versuch mit geringer Abweichung ab.



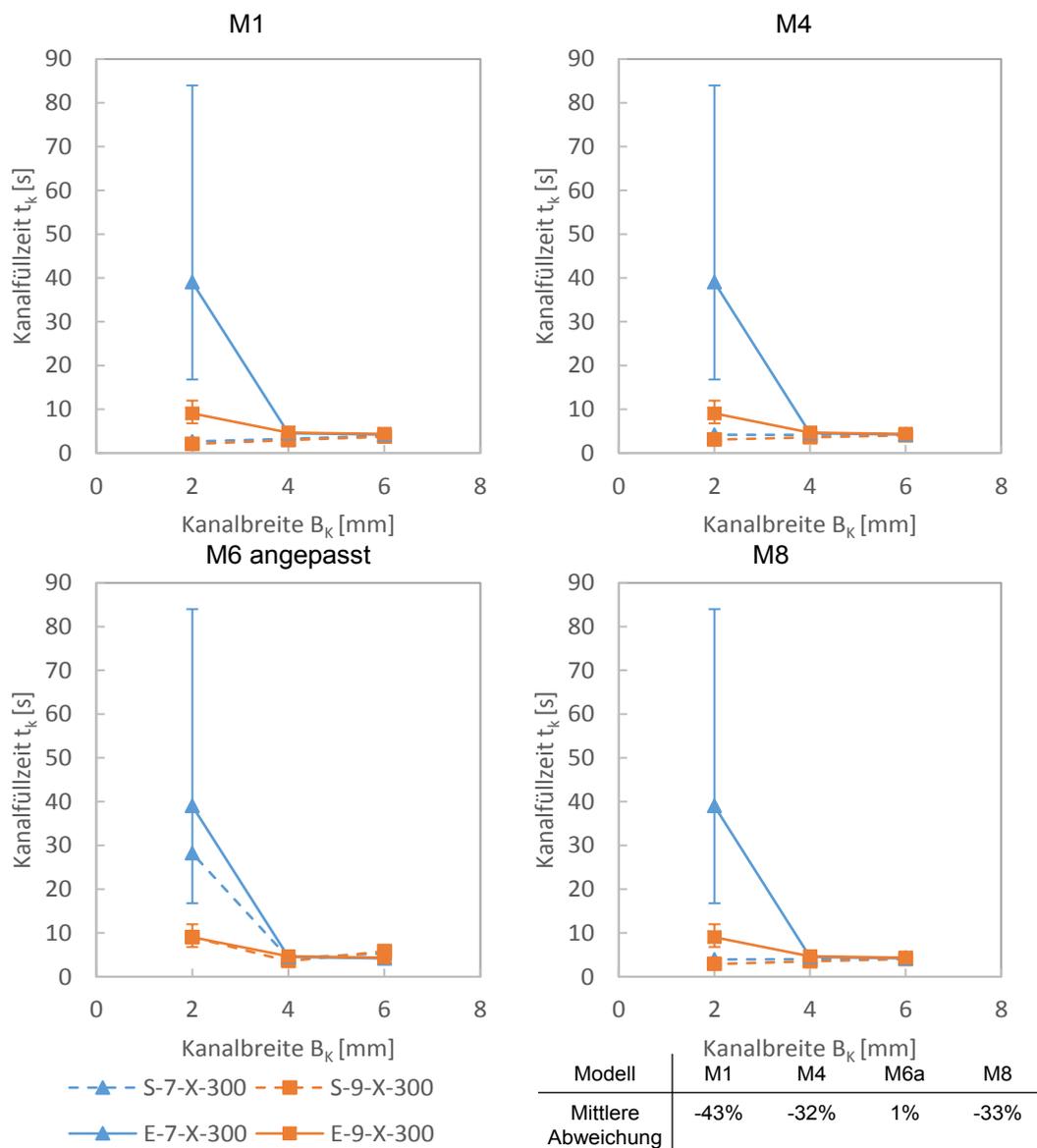
**Abb. 3-29: Vergleich Simulation/ Experiment: Kanalfüllzeit über Einlassdruck bei unterschiedlichen Kanalbreiten (fein skaliert)**

In Abb. 3-30 ist die Kanalfüllzeit über die Kanalbreite abgebildet. Es werden die Ergebnisse für verschiedene Faservolumengehaltswerte dargestellt.

Die Modell M1, M4 und M8 zeigen einen leichten Anstieg der Füllzeit mit der Kanalbreite. Bei dem Modell M6a sinkt die Kanalfüllzeit von zwei auf 4mm um dann bei 6mm leicht anzusteigen. Die Werte für den Kanal mit einer Breite von 2mm sind bei M1, M4 und M8 in einem ähnlichen Wertebereich. Modell 6 ergibt einen deutlich größeren Wert. Mit einer mittleren Abweichung bezogen auf Modell 1 von 98% liegen deutliche Unterschiede zwischen den Ergebnissen für die Füllzeit innerhalb der Modelle vor.

Die Experimente zeigen einen deutlichen Abfall der Kanalfüllzeit von 2mm auf 4mm Kanalbreite, gefolgt von einem leichten Anstieg von 4 auf 6mm. Damit unterstützen die Experimente den durch Modell 6 aufgezeigten Trend. Die Streuung der Experimente ist bei einer Kanalbreite von >4mm gering. Bei den Messungen mit einer Kanalbreite von 2mm treten deutliche Streuungen auf.

Die mittlere Abweichung von Experiment und Simulation ist bei Modell M6a mit 1% am geringsten. Die hohe Abweichung bei den anderen Modellen liegt an der fehlenden Übereinstimmung bei einer geringen Kanalbreite. Damit bieten für große Kanalbreiten alle Modelle gute Übereinstimmung von Realität und Simulation. Für eine Kanalbreite von 2mm ergibt das angepasste Modell M6 die beste Übereinstimmung bezüglich Kanalfüllzeit.



**Abb. 3-30: Vergleich Simulation/ Experiment: Kanalfüllzeit über Kanalbreite bei unterschiedlichem Faservolumengehalt**

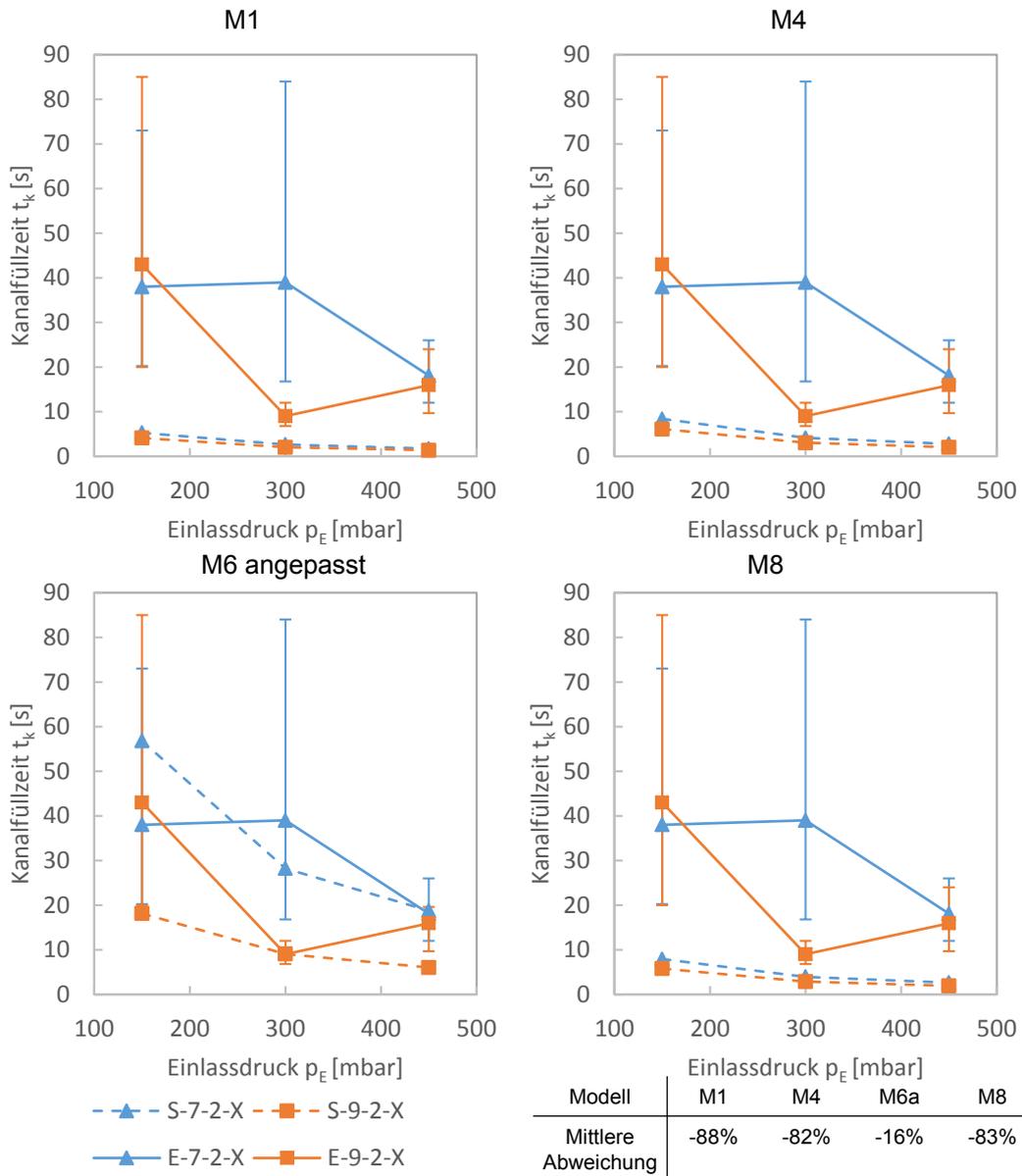
In Abb. 3-31 ist die Kanalfüllzeit über dem Einlassdruck dargestellt. Es werden die Ergebnisse für verschiedene Faservolumengehaltswerte abgebildet.

Alle Modelle zeigen eine Verringerung der Kanalfüllzeit mit steigendem Einlassdruck. Mit steigendem Faservolumengehalt sinkt die Kanalfüllzeit. Der Wertebereich für M1, M4 und M8 liegt unter 10s. Bei M6 werden größere Füllzeiten vorhergesagt. Der Unterschied zwischen den Modellen liegt bezogen auf M1 im Mittel bei 250%.

Die experimentelle Untersuchung ergibt bei einem Faservolumengehalt von 62% zunächst eine sinkende Kanalfüllzeit bei einer Änderung des Einlassdrucks von 150mbar auf 300mbar. Bei weiterer Änderung des Drucks auf 450mbar steigt die benötigte Zeit wieder an. Die Streuung der Ergebnisse ist bei den oberen beiden Druckstufen gering,

bei der unteren Druckstufe (150mbar) hingegen sehr groß. Bei niedrigem Faservolumen-gehalt sinkt die Kanalfüllzeit mit steigendem Injektionsdruck. Die Streuungen der Er-gebnisse lassen keine absolute Aussage, nur das Ablesen eines Trends zu.

Der Unterschied zwischen den Ergebnissen, basierend auf Experiment und Simulation, ist, gemittelt über den untersuchten Wertebereich, bei dem angepassten Modell M6 mit -16% am geringsten. Die Modell M1, M4 und M8 ergeben eine deutlich zu geringe Füll-zeit.



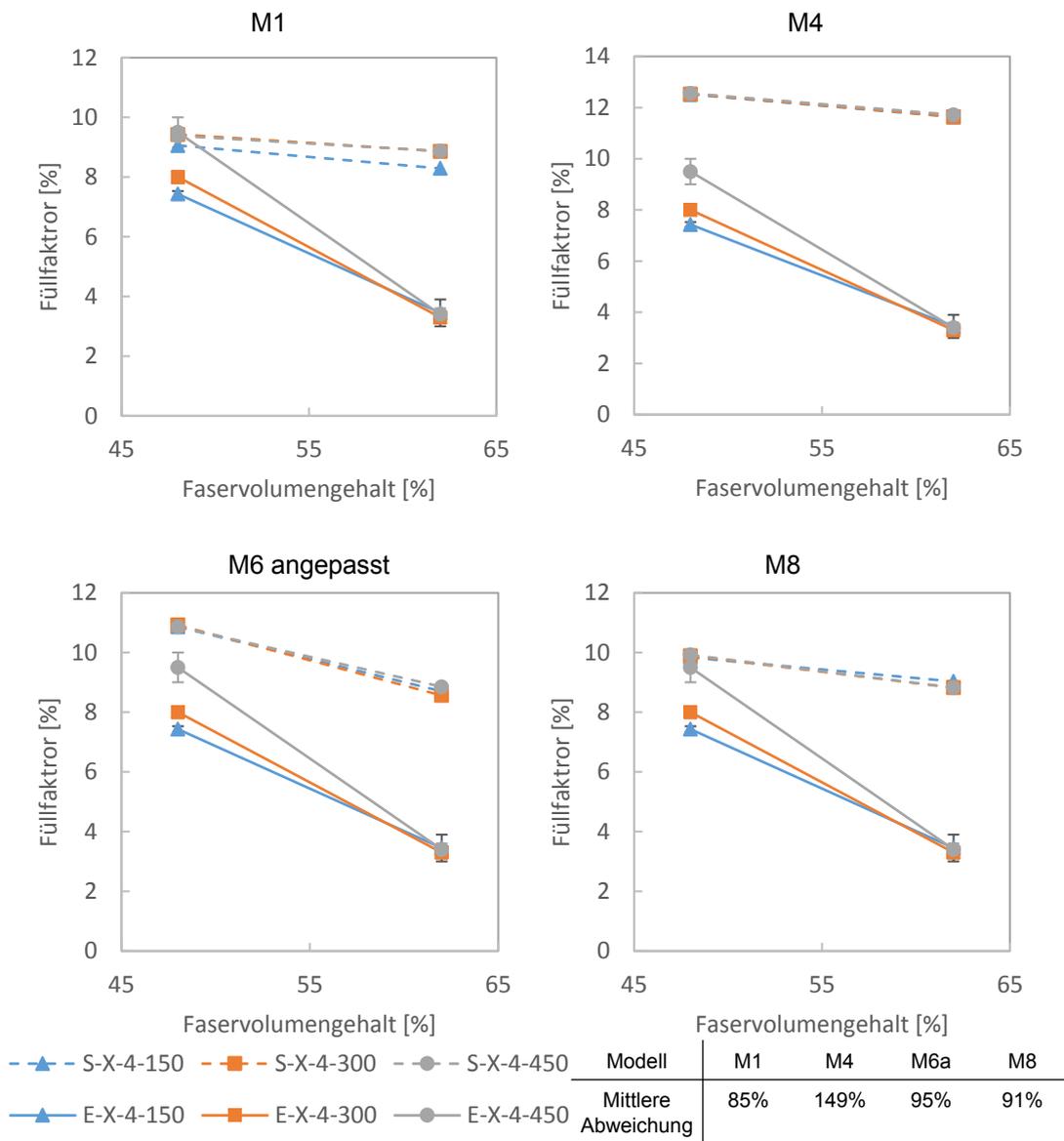
**Abb. 3-31: Vergleich Simulation/ Experiment: Kanalfüllzeit über Einlassdruck bei unterschiedlichem Faservolumengehalt**

### 3.4.3.2 Auswertung bezüglich des Füllfaktors FF zum Zeitpunkt $t_K$

In Abb. 3-32 ist der Füllfaktor über den Faservolumengehalt zu dem Zeitpunkt, wenn das Messfluid den Auslass erreicht, abgebildet. Es werden die Ergebnisse für verschiedene Einlassdrücke dargestellt.

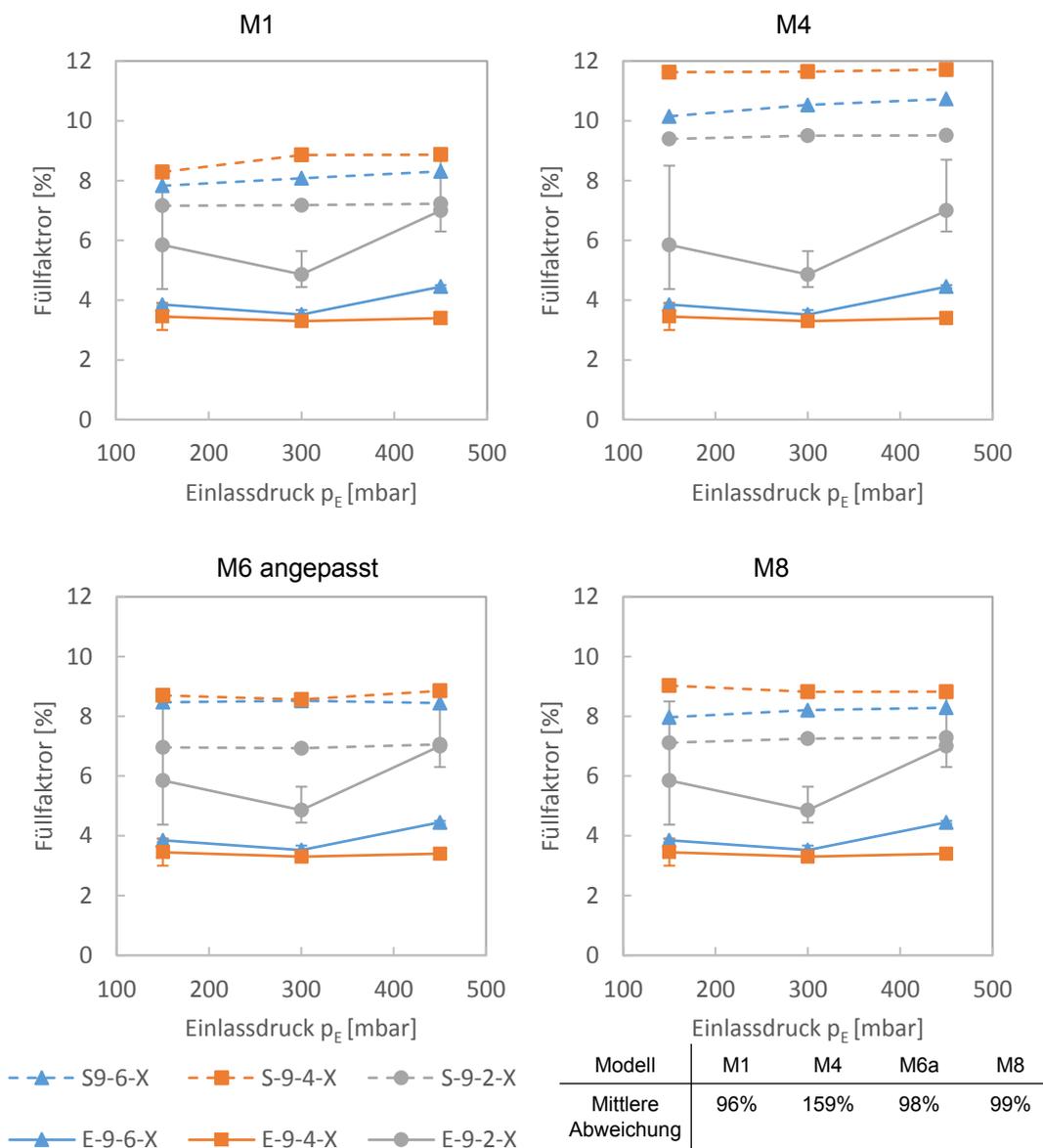
Bei allen dargestellten Modellen verringert sich der Füllfaktor zum Zeitpunkt  $t_K$  mit steigendem Faservolumengehalt. Die erzielten Werte des FF liegen bei allen Modellen in einer ähnlichen Größenordnung von 8-13%. Die mittlere Abweichung, bezogen auf Modell M1, liegt bei 16%.

Die experimentelle Untersuchung zeigt eine Verringerung des FF mit steigendem Faservolumengehalt was durch den simulativen Trend bestätigt wird. Die geringe Streuung in Bezug auf den FF zeigen, dass der Trend als repräsentativ gesehen werden kann. Die Unterschiede zwischen Simulation und Experiment sind bei Modell M1 mit 85% am geringsten. Dabei ist die Abweichung bei niedrigem Faservolumengehalt geringer als bei hohem Faservolumengehalt. Die Simulation ergibt bei allen Modellen einen zu hohen FF.



**Abb. 3-32: Vergleich Simulation/ Experiment: Füllfaktor über Faservolumengehalt bei unterschiedlichen Einlassdrücken**

In Abb. 3-33 ist der Füllfaktor über den Einlassdruck dargestellt. Es werden die Ergebnisse für verschiedene Kanalbreiten abgebildet.

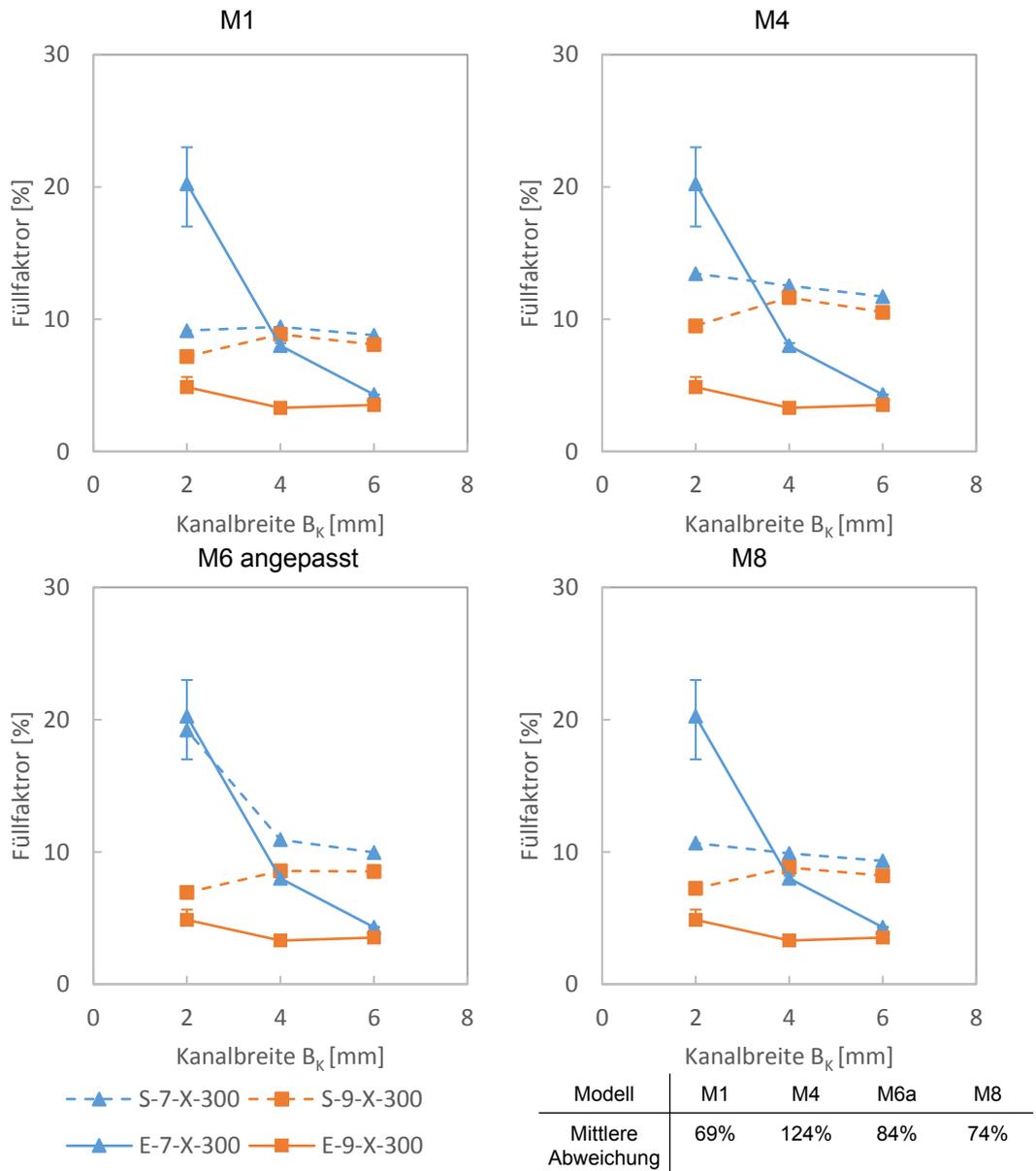


**Abb. 3-33: Vergleich Simulation/ Experiment: Füllfaktor über Einlassdruck bei unterschiedlichen Kanalbreiten**

Bei alle Modellen ergibt sich, dass der Füllfaktor annähernd unabhängig vom Einlassdruck ist. Die Modelle M1, M4 und M8 zeigen, dass mit geringerer Kanalbreite der geringste Füllfaktor erzielt wird. Bei Modell 6 ergibt sich, dass beim kleinsten Kanals mit einer Breite von 2mm der geringste FF erreicht wird. Die Werte für die Kanalbreite von 4 bzw. 6mm liegen sehr eng beieinander. Der Wertebereich für den FF von Modell M1, M6 und M8 liegt im Bereich von 7-9%, Modell 4 im Bereich 9-12%. Die gemittelte Abweichung der Modelle bezogen auf Modell M1 beträgt 11%.

Die Experimente zeigen für eine Kanalbreite von 4mm und 6mm keinen Einfluss des Einlassdrucks auf den Füllfaktor. Für eine Kanalbreite von 2mm sinkt der FF zunächst

mit steigendem Druck, um dann mit weiter steigendem Druck anzusteigen. Die auftretenden Streuungen sind für die Kanalbreiten von 4mm bzw. 6mm sehr gering, während für eine Kanalbreite von 2mm deutliche Abweichungen zwischen den Messungen zu erkennen sind.



**Abb. 3-34: Vergleich Simulation/ Experiment: Kanalbreite über Füllfaktor mit unterschiedlichem Faservolumengehalt**

Die berechneten Werte des FF liegen bei allen Modellen über denen der Experimente. Die mittlere Abweichung zwischen Experiment und Simulation ist bei M1, M6 und M8 mit Werten von 96% bis 99% in einem ähnlichen Bereich. Modell M4 zeigt die größte Abweichung von 159% auf.

In Abb. 3-34 ist der Füllfaktor über die Kanalbreite bei einem Injektionsdruck von 300mbar dargestellt. Es werden die Ergebnisse für unterschiedliche Faservolumengehaltswerte abgebildet.

Für einen niedrigen Faservolumengehalt ergibt sich für die Modell M1, M4 und M8 ein konstanter FF mit steigender Kanalbreite, im Gegensatz zu Modell M6, welches eine deutliche Reduktion des FF zeigt. Für hohe Faservolumengehaltswerte zeigen alle Modelle einen leichten Anstieg des FF mit der Kanalbreite. Die mittlere Abweichung der Modelle bezogen auf Modell M1 beträgt 20%.

Die Ergebnisse aus den Experimenten zeigen, dass für einen hohen Faservolumengehalt von 62% nahezu kein Einfluss der Kanalbreite auf den Füllfaktor besteht. Bei niedrigem Faservolumengehalt sinkt der FF deutlich mit zunehmender Kanalbreite. Die Streuungen der Messungen sind sehr gering. Lediglich für die Messung bei einer Kanalbreite von 2mm bei hohem Faservolumengehalt ist sie erkennbar.

Der Vergleich von Simulation und Experiment zeigt, dass bei hohem Faservolumengehalt der Trend der Experimente nicht mit den Simulationen übereinstimmt. Für niedere Faservolumengehaltswerte bildet ausschließlich Modell 6a den Trend richtigen ab. Die geringste, gemittelte Abweichung der Simulation zu den Versuchen tritt bei Modell M1 mit 69% auf.

In Abb. 3-35 wird der Füllfaktor über den Einlassdruck abgebildet. Es werden die Ergebnisse für verschiedene Faservolumengehaltswerte mit einer Kanalbreite von 2mm dargestellt.

Alle Modelle zeigen, dass mit steigendem Einlassdruck keine Änderung des Füllfaktors einhergeht. Der Unterschied zwischen den dargestellten Faservolumengehaltswerten ist bei Modell 6 am größten. Die mittlere Abweichung bezogen auf Modell 1 beträgt 33%

Die Experimente zeigen einen leichten Anstieg des FF mit steigendem Einlassdruck. Im Rahmen der aufgetretenen Streuung stimmen die simulativen mit den Experimentellen Ergebnissen überein.

Die Ergebnisse der Experimente zeigen eine geringe Abweichung bezüglich des simulierten Füllfaktors. Bei niederem Faservolumengehalt liefern die Modell M1, M4 und M8 deutlich zu geringe Füllfaktoren. Die Abweichung des angepassten Modells 6 ist über den dargestellten Bereich mit 6% am geringsten.

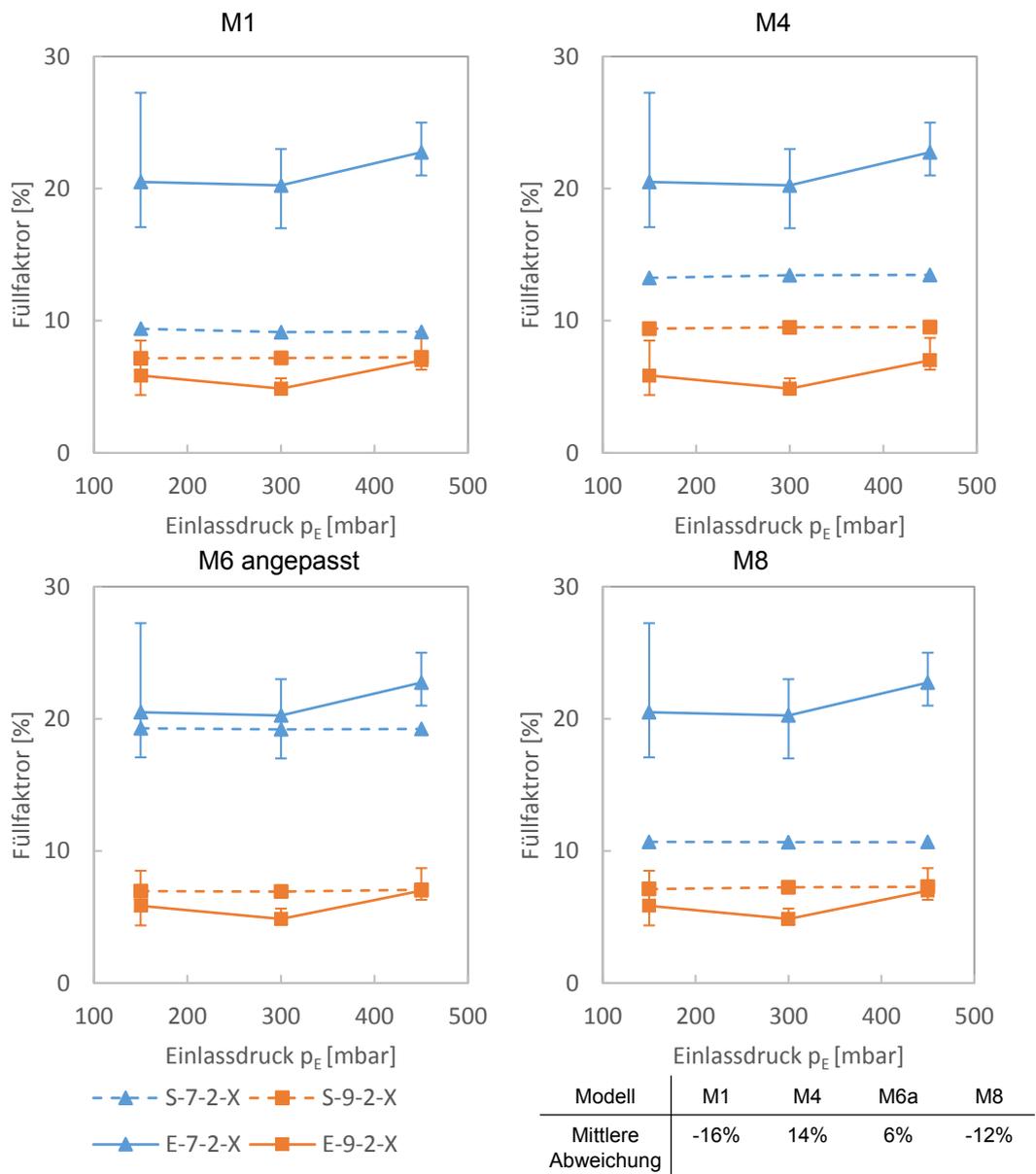


Abb. 3-35: Vergleich Simulation/ Experiment: Füllfaktor über Einlassdruck bei unterschiedlichem Faservolumengehalt

### 3.5 Diskussion

Das in der Literatur beschriebene Modell 6 [16, 34] liefert gute Übereinstimmungen zwischen Simulation und Versuch für eine Kanalströmung. Die Simulation des RT-Kanals über den Ansatz der Ersatzpermeabilität benötigt einen Wert der Permeabilität in Richtung des Kanals  $K_{K,l}$  und einen Wert  $K_{K,q}$  senkrecht dazu. In der Literatur wird der Ansatz  $K_{K,l} = K_{K,q}$  (Ansatz 2) bzw.  $K_{y,Preform} = K_{K,q}$  (Ansatz 1) beschrieben. Beide Ansätze führen zu keiner Übereinstimmung von Simulation und Experiment bei der ge-

wählten Materialkombination. Über das gezielte Skalieren der Komponenten der Kanalpermeabilität werden die Ansätze modifiziert. Es zeigt sich, dass ein reines Skalieren von  $K_{K,q}$  (Ansatz 3) zu einer Erhöhung der Rechenzeit führt, weshalb dieser Ansatz ausgeschlossen wird. Das gemeinsame Skalieren von  $K_{K,q}$  und  $K_{K,l}$  (Ansatz 4) vermeidet dieses Problem. Eine vollständige Übereinstimmung von Experiment und Simulation kann mit diesem Ansatz nicht erreicht werden. Ansatz 5, die freie Skalierung von  $K_{K,l}$  und  $K_{K,q}$  verringert die Abweichung weiter, insbesondere für einen hohen Faservolumengehalt und einer kleiner Kanalbreite.

Die Wahl, welcher Ansatz verwendet wird, erfolgt über das Ausschlussprinzip. Dies bedeutet, zunächst wird Ansatz 1 verwendet; wird keine ausreichende Übereinstimmung erreicht, wird Ansatz 2 verwendet usw. Ansatz 3 wird als Option, aufgrund des notwendigen Rechenaufwands, ausgeschlossen. Zur Umsetzung ist für Ansatz 5 der höchste Aufwand notwendig, da am meisten Simulationen pro Parameterset benötigt werden, gefolgt von Ansatz 4.

Für die nachfolgenden Studien werde die in Tab. 3-10 dargestellten Materialwerte für die Abbildung des Kanals in der Simulation herangezogen.

**Tab. 3-10: Materialdaten zur Abbildung des RT- Kanals [96]**

	$B_K = 2mm$	$B_K = 4mm$	$B_K = 6mm$
$v_f = 0,48$	$K_{K,l} = 3,92 \cdot 10^{-8} mm^2$ $K_{K,q} = 3,92 \cdot 10^{-8} mm^2$	$K_{K,l} = 2,44 \cdot 10^{-7} mm^2$ $K_{K,q} = 2,44 \cdot 10^{-7} mm^2$	$K_{K,l} = 2,83 \cdot 10^{-7} mm^2$ $K_{K,q} = 2,83 \cdot 10^{-7} mm^2$
$v_f = 0,62$	$K_{K,l} = 6,46 \cdot 10^{-8} mm^2$ $K_{K,q} = 1,96 \cdot 10^{-8} mm^2$	$K_{K,l} = 4,06 \cdot 10^{-7} mm^2$ $K_{K,q} = 4,06 \cdot 10^{-7} mm^2$	$K_{K,l} = 1,03 \cdot 10^{-7} mm^2$ $K_{K,q} = 1,03 \cdot 10^{-7} mm^2$

Dabei wird für alle Kombinationen Ansatz 4, gleichzeitiges Skalieren von  $K_{K,l}$  und  $K_{K,q}$ , herangezogen. Ausnahme stellt der Fall  $v_f = 0,62$   $B_K = 2mm$  dar, dem Ansatz 5 zugrunde liegt.

Die durchgeführten 1D Untersuchungen zeigen, dass eine vollständige Übereinstimmung von Simulation und Experiment für die gewählte Materialkombination nicht zu erreichen ist. Die Experimente zeigen deutliche Streuungen insbesondere bei der kleinsten gewählten Kanalbreite von 2mm. Aufgrund dessen wurde eine weitere Studie mit längerem Kanal bzw., angelehnt an eine reale Injektion mit vollständiger Umströmung, durchgeführt.

Um zu entscheiden, ob der entwickelte Ansatz über das Anpassen der Kanalpermeabilität in Längsrichtung  $K_{Kl}$  bzw. in Querrichtung  $K_{Kq}$  im Vergleich zu den üblichen Ansätzen aus der Literatur eine Verbesserung darstellt, wurden die durchgeführten Experimente mit dem Ansatz  $K_{Kl} = K_{Kq}$  mit dem Modell M1, M4 und M8 bzw. mit dem entwickelten Ansatz, basierend auf dem Modell M6, simulativ nachgebildet und mit den Ergebnissen der Experimente verglichen. Dabei wird die mittlere Abweichung von Experiment zu Simulation zum jeweiligen Modell über die jeweilige Kanalbreite über alle

Untersuchungen (vgl. Tab. 3-8) als Kriterium herangezogen. Diese Betrachtung wird für die beiden Bewertungskriterien Kanalfüllzeit und Füllfaktor (Tab. 3-11) durchgeführt. Als einfachstes Kriterium werden die prozentualen Abweichungen für das jeweilige Modell aufsummiert.

**Tab. 3-11: Vergleich der unterschiedlichen Modellierung bezüglich der Kanalfüllzeit bzw. Füllfaktor**

	Kanalbreite FVG	2 mm		4mm		6mm		$\sum \Delta$
		48%	62%	48%	62%	48%	62%	
Kanalfüllzeit	M1	89,91%	86,39%	29,13%	36,62%	12,52%	14,69%	269,26%
	M4	83,94%	79,69%	9,95%	35,08%	3,19%	7,95%	219,80%
	M6a	27,92%	40,03%	9,29%	26,15%	21,42%	33,21%	158,02%
	M8	84,81%	80,74%	11,87%	26,46%	3,37%	8,01%	215,26%
Füllfaktor	M1	11,94%	1,28%	1,06%	5,30%	4,74%	4,30%	28,62%
	M4	13,17%	9,41%	12,45%	11,63%	11,66%	10,43%	68,75%
	M6a	1,92%	1,08%	2,57%	5,30%	5,48%	4,30%	20,65%
	M8	10,49%	1,315%	1,57%	5,51%	4,82%	4,21%	27,92%

Dieser Vergleich zeigt, dass, je nach Kanalbreite, unterschiedliche Ansätze zur Modellierung der Ersatzpermeabilität unterschiedlich gute Übereinstimmungen mit den durchgeführten Experimenten liefern. Gemittelt über den aufgespannten Versuchsraum erweist sich der erarbeitete Ansatz zur Modifizierung des Modells M6 als Variante mit den geringsten Abweichungen der Füllzeit bzw. des Füllfaktors. Durch diesen Vergleich wird gezeigt, dass für die gewählte Materialkombination keine exakte Abbildung von RT möglich ist. Es kann lediglich ein allgemeiner Trend abgeleitet werden.

Die Ergebnisse bezüglich des generellen Trends dieser Studie sind in Tab. 3-12 mit dem ausgewählten Modell M6a zusammengefasst. Da die simulativ erarbeiteten Ergebnisse nicht vollständig mit den experimentellen übereinstimmen, werden die Ergebnisse als Tendenzen angegeben.

**Tab. 3-12: Einfluss der Parameter auf die Kanalfüllzeit bzw. dem Füllfaktor. Vergleich Simulation versus Versuch**

Parameter	Einfluss bezüglich Kanalfüllzeit		Einfluss bezüglich Füllfaktor	
	experimentell	simulativ	experimentell	simulativ
Faservolumengehalt	Gering	Gering	mit steigendem FVG nimmt der FF ab	mit steigendem FVG nimmt der FF ab
Einlassdruck	Je höher $p_E$ desto kleiner $t_K$	Je höher $p_E$ desto kleiner $t_K$	Kein Einfluss	Kein Einfluss
Viskosität	Je größer $\eta$ desto größer $t_K$	Je größer $\eta$ desto größer $t_K$	Kein Einfluss	Kein Einfluss
Kanalbreite	Je kleiner $B_K$ desto größer $t_K$	Je größer $B_K$ desto größer $t_K$	Je größer $B_K$ desto kleiner der FF	Je größer $B_K$ desto kleiner der FF



## 4 Numerische Studie zum Einfluss von Race Tracking im RTM Prozess

Das Thema RT wird in der Literatur beschrieben, wobei unstrittig ist, dass der Einfluss auf das Füllbild erheblich ist. In Kapitel 3 wurde erarbeitet, wie RT in der Simulation abgebildet werden kann. In diesem Kapitel wird der Einfluss von RT auf den Füllvorgang numerisch untersucht. Erreicht das Harz den Auslass, kann es zum Einschluss von Luft bzw. Porenbildung kommen. Anhand des Füllvorgangs einer generischen Struktur (einer ebenen Platte), werden gezielt Eigenschaften geändert, um deren Einfluss auf das Bilden von Makroporen unter Berücksichtigung eines RT- Kanals zu untersuchen.

Dazu werden vier numerische Untersuchungsreihen mit verschiedenen Schwerpunkten, im Folgenden Studien 1 bis 4 (S1 bis S4) genannt, durchgeführt. Im ersten Teil dieser simulativen Untersuchungen wird verglichen, wie sich Simulationsergebnisse mit Berücksichtigung von RT verändern. Im zweiten Teil werden klassische Parameter des RTM Prozesses variiert. Der dritte Teil variiert die Konfiguration von Fluideinlass bzw. -auslass. Im vierten Teil wird der Einfluss eines umlaufenden, lokalen Überpressungsbereichs an der Preformkante auf das Füllbild untersucht. Tab. 4-1 ordnet die durchgeführten Studien.

**Tab. 4-1: Strukturierung der Untersuchung von Porenbildung aufgrund von RT**

S1: Einfluss von RT auf das Füllbild						
S2: Variation der Prozessparameter						
Parameter		Einlassdruck $p_E$ Auslassdruck $p_A$ Viskosität $\eta$ (Temperatur)				
S3: Variation des Ein- bzw. Auslasses						
		Einlass				
Auslass			Außerhalb		Innerhalb	
	Außerhalb		Breite	Position	Breite	Position
	Innerhalb		Breite	Position	Breite	Position
S4: Variation des Ein- bzw. Auslasses mit umlaufenden, lokalem Überpressungsbereich						
		Einlass				
Auslass			Außerhalb		Innerhalb	
	Außerhalb		Breite	Position	Breite	Position
	Innerhalb		Breite	Position	Breite	Position

Es ergibt sich eine umfangreiche Versuchsmatrix. Basierend auf Ergebnissen, wurden gezielt einzelne Varianten gestrichen. In Studie 4 z.B. wird ein umlaufender RT- Kanal mit lokalem Überpressungsbereich untersucht. Bei dieser Konfiguration sorgt ein Einlass außerhalb der Preform für eine Verlängerung der Tränkzeit. Diese Variante wird nicht simulativ untersucht.

Anhand der durchgeführten Untersuchungen werden Regeln zur Gestaltung von Werkzeugen abgeleitet.

Die hier dargestellten Ergebnisse wurden mit Unterstützung der studentischen Arbeiten von Bley und Carrels erarbeitet [96, 118, 141].

## 4.1 Vorgehen und Evaluierungsmethodik

Die Untersuchungen werden am Beispiel des Füllvorgangs einer generischen Struktur, eine ebenen Platte der Dimension Breite 200mm, Länge 400mm und einer Höhe von 2mm, durchgeführt.

Folgende Annahmen bzw. Randbedingungen liegen den Betrachtungen zu Grunde.

- Die Preform ist mit einem RT- Kanal von mindestens  $B_K = 2mm$  umlaufend modelliert.
- Zusätzliche Charakteristika, wie z.B. Überpressungsbereiche, werden der Bauteilfläche hinzugefügt.
- Harzeinlass und Harzauslass werden seitlich und im Bauteilbereich zugelassen.
- Jedes Werkzeug ist nur mit einem Einlass bzw. Einlasskanal und einem Auslass bzw. Auslasskanal versehen.

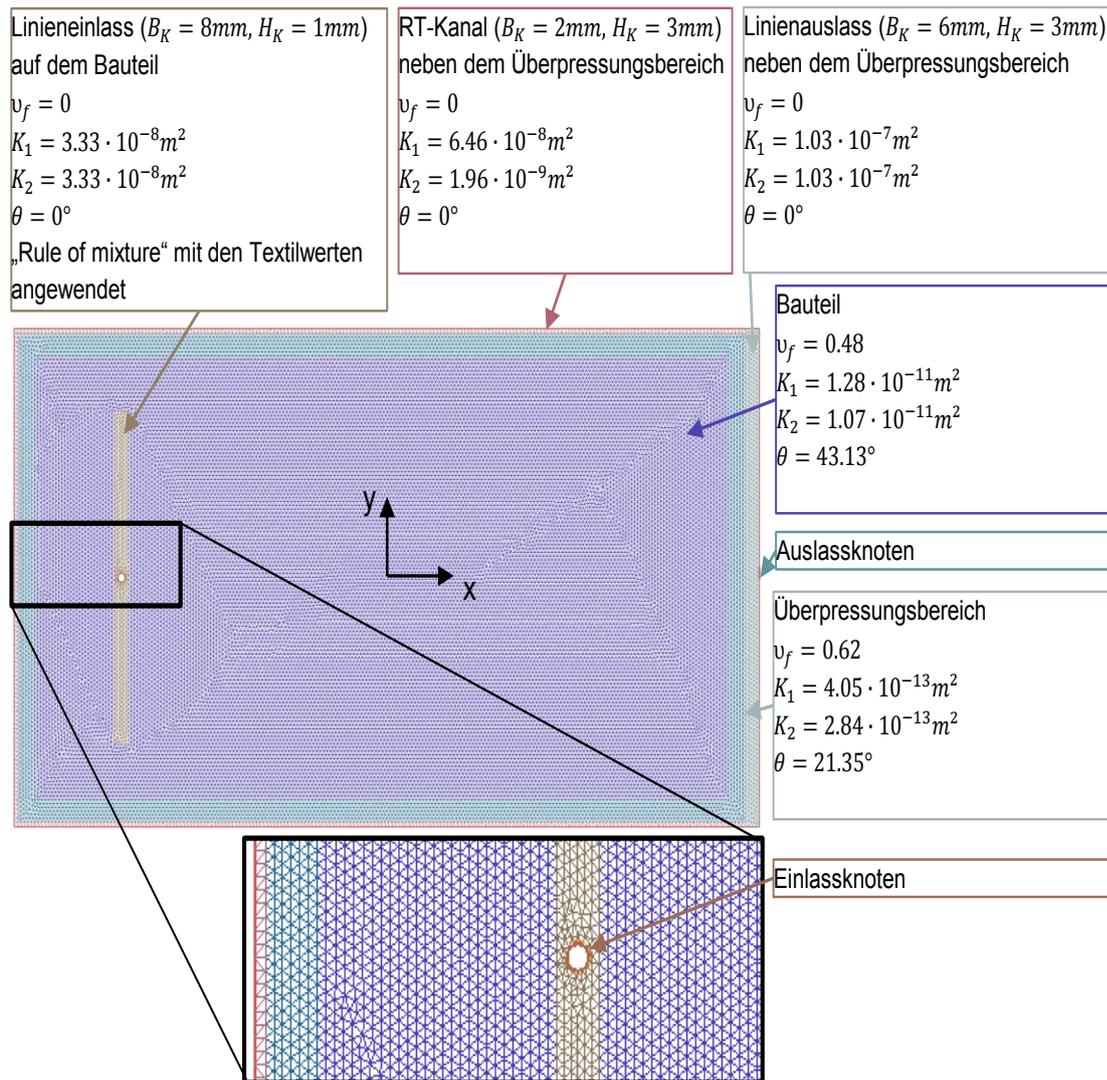
Beim Fertigen eines Bauteils wird der Harzauslass sobald Harz dort austritt geschlossen. Im Anschluss daran füllt sich die Preform weiter, bis Druckausgleich im Harz bzw. zwischen Harzdruck und Druck der eingeschlossenen Luft anliegt. Als charakteristische Punkte bieten sich die Zeitpunkte  $t_A$ , wenn Fluid den Auslass erreicht und  $t_{Ab}$ , wenn der Einlassdruck gleich Kavitätsdruck ist, zur systematischen Auswertung an. In der verwendeten Simulationssoftware sind fixe Abbruchkriterien (vgl. Kapitel 4.3) implementiert, die nicht verändert werden können. Aus diesem Grund wird als zweiter Zeitpunkt zur Charakterisierung der der Zeitpunkt des Simulationsabbruches gewählt. Im Idealfall entspricht der Zeitpunkt des Simulationsabbruches dem des Druckausgleichs. Als Messgröße zum Auswerten dienen der mit Gleichung (3-7) eingeführte Füllfaktor FF, die Fläche  $A_P$  und die Position (Flächenschwerpunkt) der jeweiligen Pore ( $x_P/y_P$ ) zum jeweiligen Zeitpunkt.

## 4.2 Beschreibung der verwendeten Modelle

Als Software der hier dargestellten Untersuchung kam PAM-RTM 2016 zum Einsatz. Folgende Randbedingungen wurden verwendet:

- Für alle Variationen wird eine 2D Rechnung durchgeführt. Dadurch werden Phänomene, die durch das Tränken in Dickenrichtung auftreten, vernachlässigt.
- Die „Detect Air Traps“ Funktion wurde aktiviert. Dadurch wird die Rechnung nach Lufteinschluss nicht abgebrochen. Eine weitere Kompression der Luft wird ermöglicht.
- Der AMG Solver wurde nicht verwendet, da bei einigen Modellen die Rechnung vom Solver abgebrochen wurde.
- Zum Vernetzen des Bauteils wurde die „Pave(Default)“ Methode verwendet.
- Die Elementkantenlänge wird auf ca. 2mm gesetzt

Abb. 4-1 zeigt das Netz zur Simulation des Füllprozesses mit einem Überpressungsbe-  
reich. Im Bild sind alle notwendigen Parameter zusammengefasst.



**Abb. 4-1: Beispiel der Vernetzung in der Studie zur Makroporenentwicklung**  
Dargestelltes Beispiel ist das Modell mit umlaufenden Überpressungsbereich mit Einlass auf der Preform, Auslass seitlich außen und seitlich, umlaufenden RT- Kanal.

Als Ausgangspunkt wird für alle Simulationen derselbe Parametersatz verwendet. Dadurch Vergleichbarkeit der Ergebnisse untereinander sichergestellt. Für die jeweilige Studie wird der zu variierende Parameter hervorgehoben. In Tab. 4-2 sind die Werte zusammengefasst.

**Tab. 4-2: Übersicht der Materialdaten für die Studie zur Makroporenbildung**

Druck		Viskosität	Permeabilität $v_f = 0,48$			Permeabilität $v_f = 0,62$		
$p_E$ [bar]	$p_K$ [bar]	$\eta$ [mPas]	$K_1$ [m <sup>2</sup> ]	$K_2$ [m <sup>2</sup> ]	$\theta$ [°]	$K_1$ [m <sup>2</sup> ]	$K_2$ [m <sup>2</sup> ]	$\theta$ [°]
1,2	0,2	78	$1,28 \cdot 10^{-11}$	$1,07 \cdot 10^{-11}$	48,13	$4,05 \cdot 10^{-13}$	$2,84 \cdot 10^{-13}$	-21,35

Für den umlaufenden RT- Kanal wird eine Breite  $B_K = 2\text{mm}$  und eine Höhe  $H_K = 3\text{mm}$  vorgesehen. Dem entsprechend wurden die Werte für die Ersatzpermeabilität gemäß Tab. 3-10 gewählt. Ein Einlass bzw. Auslass außerhalb der Preform wird mit einem Kanalbreite von  $B_K = 6\text{mm}$  und einer Höhe von  $H_K = 3\text{mm}$  angesetzt. Zur Berechnung der notwendigen Permeabilität in Kanalrichtung  $K_{K,l}$  wird Modell 1 (vgl. Tab. 2-5) herangezogen. Für die Kanalquerpermeabilität wird aufgrund der Position des Kanals auf der Preform die Permeabilität der Preform senkrecht zum Kanal verwendet. Aufgrund der Position des Einlasses wurden die Werte für Einlass bzw. Auslass auf der Preform nicht von Tab. 3-10 gewählt. Die dort entwickelten Werte basieren auf Basis von Versuchen mit einer Penetration in der Ebene, nicht wie der hier notwendigen „out of plane“ Richtung. Zur Bestimmung der verschmierten Permeabilität wird die Mischungsregel, Gleichung (2-7), verwendet.

### 4.3 Softwarebedingte Kriterien die zum Simulationsabbruch führen

Die rechnergestützte Simulation benötigt immer Kriterien, anhand derer eine Simulation definiert beendet wird. Für die Software PAM-RTM gibt es keine offizielle Dokumentation in der solche Kriterien genannt werden. In der hier beschriebenen Studie wurden drei Abbruchkriterien festgestellt.

- Alle Elemente sind vollständig gefüllt ( $f_i = 1$  für alle Knoten).
- Langsamer Fließfrontfortschritt.
- Niedriger Druckgradient.

Das Ziel dieser Studie ist, die Makroporenentwicklung zu untersuchen, weshalb die „Detect Air Trap“ Funktion aktiviert ist. Aus diesem Grund kommen nur die Kriterien „niedriger Fließfrontfortschritt“ bzw. „niedriger Druckgradient“ in Frage. Als häufigstes Kriterium wurde das Kriterium „niedriger Druckgradient“ beobachtet. Wenn sich mehrere Poren in einer Simulation bilden, kann es passieren, dass der kritische Wert zum Abbruch der Simulation für den Druckgradienten bzw. den Fließfrontfortschritt in einer der Poren erreicht wird, während er in anderen Einschlüssen noch nicht erreicht wird. Dies bedeutet, es hat kein vollständiger Druckausgleich stattgefunden. Für die Auswertung muss jeweils beachtet werden, in welcher Pore der relevante Druckausgleich stattfindet bzw. ob der Zeitpunkt für eine Auswertung herangezogen werden kann.

### 4.4 Einfluss von Race Tracking (S1)

In der ersten Studie wird der generelle Unterschied zwischen einer Simulation mit und ohne Beachtung von RT dargelegt. Mit Modell 1 wird der Fall „vernachlässigen von RT“, in Modell 2 der Fall unter Berücksichtigung von RT dargestellt. Dazu wird ein umlaufender Kanal von 2mm implementiert (Abb. 4-2).

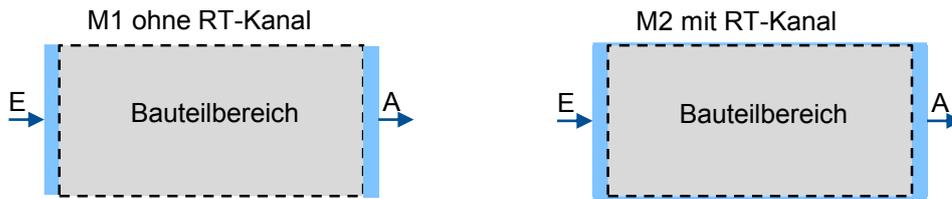


Abb. 4-2: Schematische Darstellung von Modell 1 (links) und 2 (rechts)

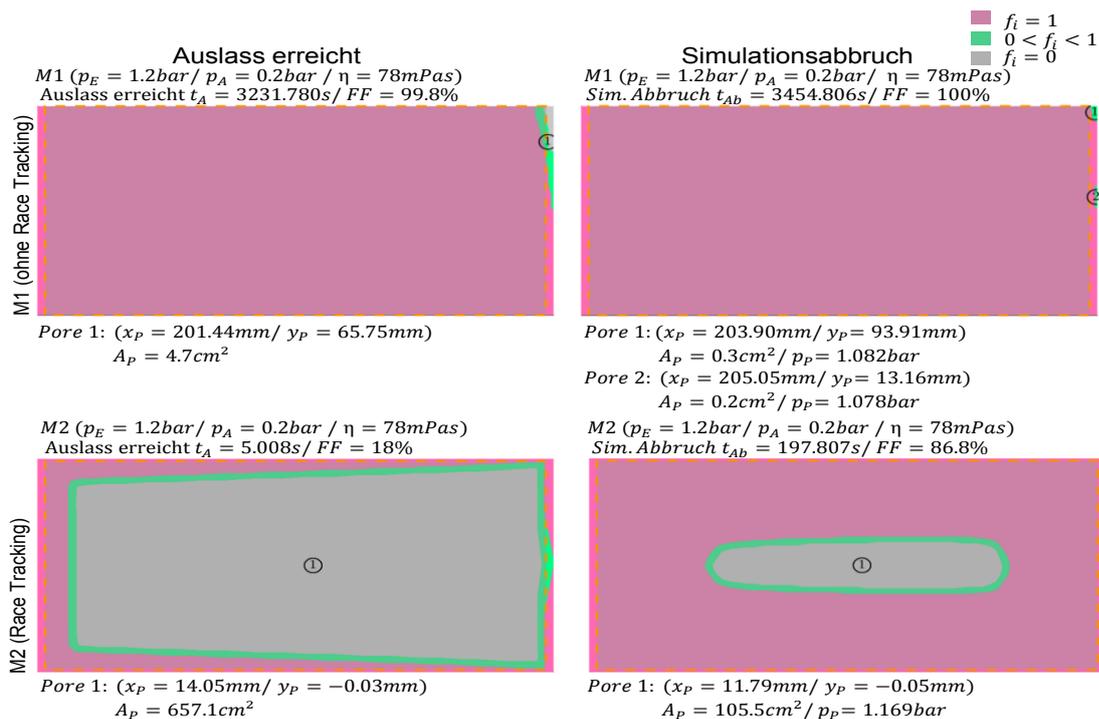
Modell 1 entspricht dem Aufbau einer 1D Permeabilitätsmessung. Durch das ideale Füllbild können die Ergebnisse mit einer analytischen Rechnung verglichen werden.

$$t_{füll} = \frac{\varepsilon \eta L^2}{(p_E - p_A) 2K_x} = \frac{(1 - 0,48) 78 \text{mPas} (400 \text{mm})^2}{(1,2 \text{bar} - 0,2 \text{bar}) 2 \cdot 1,18 \cdot 10^{-11} \text{m}^2} \quad (4-1)$$

$$= 2749,8 \text{s}$$

$K_x$  wird über eine Koordinatentransformation über den Winkel  $\theta$  berechnet [16].

Die Ergebnisse der Simulation sind in Abb. 4-3 zusammengefasst.



Im Modell 1 wird eine erheblich größere Füllzeit, verglichen mit der analytischen Lösung, ermittelt. Diese Abweichung kann mit dem Füllen von Einlass und Auslass erklärt werden. Die analytische Lösung geht von einer seitlichen Zuführung aus, während in der Simulation ein Kanal abgebildet ist, der über eine zentrale Zufuhr (4mm x 3mm) verfügt (Abb. 4-2). Dadurch wird der Volumenstrom reduziert und die Füllzeit erhöht sich. Dies zeigt, dass über analytische Methoden eine erste Auslegung gemacht werden

kann. Für eine realitätsnahe Aussage müssen weitere Details des Prozesses mit berücksichtigt werden, was eine numerische Simulation notwendig macht.

Erreicht in M1 das Fluid den Auslass, hat sich eine Pore im Auslasskanal gebildet, die sich bis zum Zeitpunkt des Simulationsabbruches  $t_{Ab}$  in zwei Poren aufteilt. Der Druck in den Poren bei  $t_{Ab}$  liegt bei den Poren in der Nähe des maximalen Drucks, dem Einlassdruck. Der Füllfaktor erreicht mit 99,8% beinahe vollständiges Füllen, welcher zum Zeitpunkt  $t_{Ab}$  auf 100% steigt. Die Zeit zwischen  $t_A$  und  $t_{Ab}$  ist sehr gering. Bezogen auf die Zeit zum Erreichen des Auslasses werden 7% benötigt.

Model 2 zeigt ein deutlich verändertes Bild. Beim Erreichen des Auslasses hat sich eine zentrale Pore gebildet, die sich in ihrer Fläche bis zum Simulationsabbruch deutlich verkleinert. Das Fluid erreicht mit 5s, verglichen mit M1, sehr schnell über den implementierten Kanal den Auslass. Der Simulationsabbruch tritt aufgrund des geringen Druckunterschieds ein.

Die in Modell 2 verbleibende Pore ist mit einem FF von 86.8% und mit einer Fläche von 105.5cm<sup>2</sup> die Referenz für die weiteren Untersuchungen.

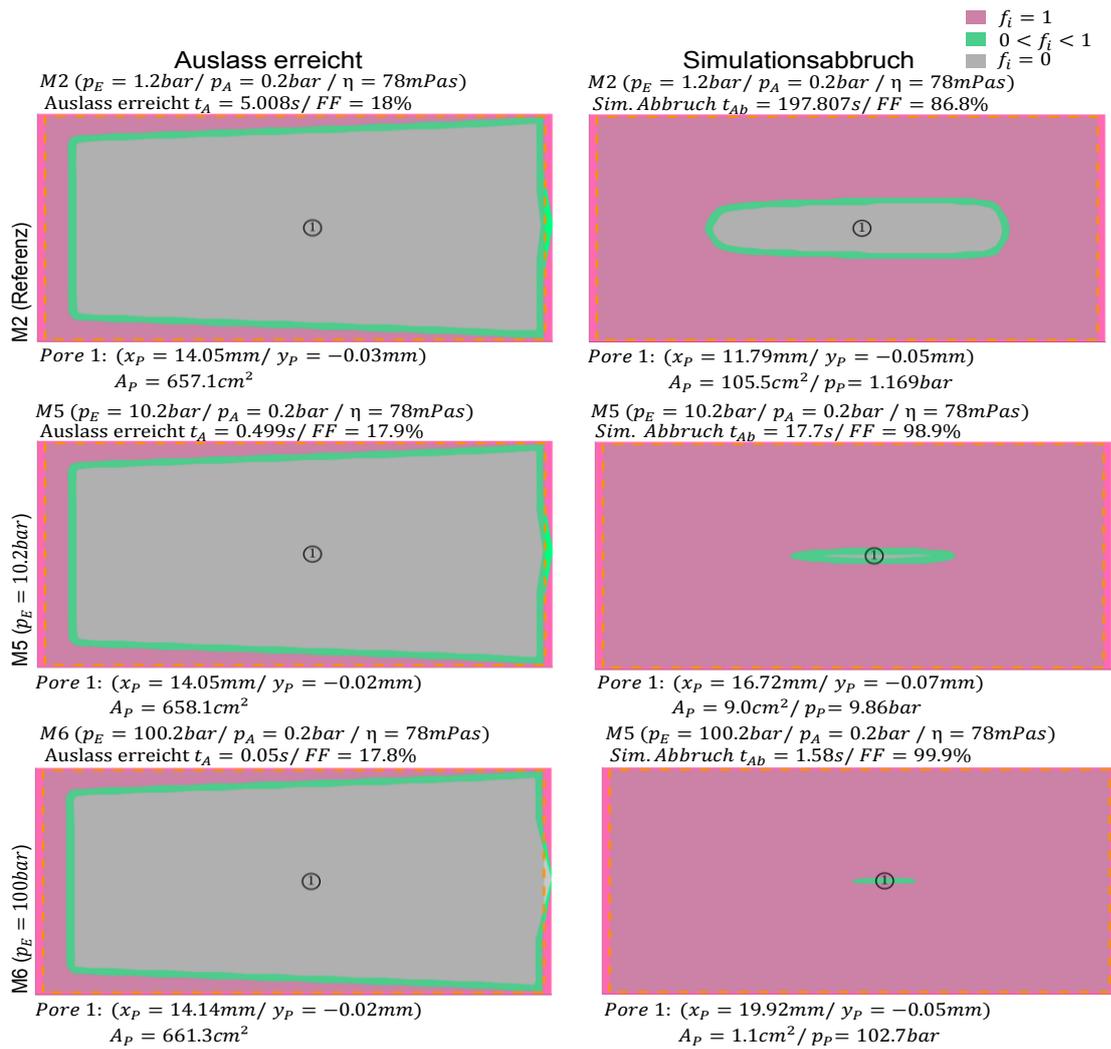
## 4.5 Einfluss der Prozessparameter (S2)

Dieses Unterkapitel untersucht den Einfluss von Prozessparametern auf die Bildung von Makroporen bei der Tränkung von porösen Medien unter Einfluss von RT. Als Prozessparameter werden der Einlassdruck  $p_E$ , der Auslassdruck  $p_A$  und die Viskosität  $\eta$  variiert. Die Viskosität ist kein Prozessparameter im klassischen Sinn. Über den Einfluss der Temperatur kann sie ebenfalls variiert werden.

### 4.5.1 Einfluss des Drucks am Einlass $p_E$

Der Einlassdruck bestimmt maßgeblich die Zeit zum Füllen eines Bauteils. Je nach industriellem Umfeld sind verschiedene Druckstufen üblich. Für freistehende Werkzeuge wird der Aufwand, um Formtreue zu gewährleisten, mit steigendem Druck größer, weshalb versucht wird, in einem niedrigen Druckbereich zu bleiben. Ist eine Presse verfügbar, wird dieser Aufwand in die Konstruktion der Presse verlagert. Für simple Injektionsanlagen wie einem Drucktopf, welcher an ein Hausdruck- bzw. Vakuumsystem angeschlossen wird, ergeben sich darüber Grenzen von maximal 10bar. Wird die benötigte Stückzahl der Bauteile erhöht, wie z.B. im Automobilbau, sind Drücke bis zu 150bar möglich. [35, 146]

Für die durchgeführten Studien werden drei Druckstufen für  $p_E$  definiert ( $p_E=1.2\text{bar}$ ,  $10.2\text{bar}$ ,  $100\text{bar}$ ). Der Druck am Auslass wird konstant gehalten. Die Ergebnisse sind in Abb. 4-4 dargestellt.



**Abb. 4-4:** Ergebnisse zur Variation des Einlassdrucks

Mit den gewählten Druckstufen für  $p_E = 1.2bar / p_E = 10.2bar / p_E = 100bar$

Der FF bzw. die Fläche der Pore zum Zeitpunkt  $t_A$  unterscheidet sich bei allen drei Druckstufen nicht. Die Füllzeit bis zum Erreichen sinkt mit Anstieg des Injektionsrucks. Bei Simulationsabbruch verkleinert sich die Fläche der entstehenden Pore mit Anstieg des Injektionsdrucks reziprok proportional.

Die verbleibende Luft beim Lufteinschluss kann über die ideale Gasgleichung beschrieben werden. Die Luftmasse der eingeschlossenen Luft bleibt konstant. Es ändert sich lediglich das Volumen und der Druck. Damit ergibt sich [84]:

$$p_{GG}V_{GG} = p_A V_A \quad (4-2)$$

Geht man davon aus, dass im Gleichgewicht der Druck in der Pore dem angelegten Druck am Einlass entspricht und berücksichtigt man, dass die Kavitätshöhe für beide Volumina dieselbe ist, kommt man zu folgendem Ausdruck:

$$p_E A_{GG} = p_A A_A \quad (4-3)$$

Damit ergibt sich der lineare Zusammenhang:

$$A_{GG} = \frac{p_A}{p_E} A_A \quad (4-4)$$

Dies bedeutet, je größer der Druck am Einlass, desto kleiner wird die Pore am Bauteil bzw. bei Druckausgleich sein. Ein höherer Einlassdruck verringert nicht die Masse an Luft im Bauteil, es wird lediglich die Porengröße bei Druckausgleich beeinflusst.

## 4.5.2 Einfluss der Drucks am Auslass $p_A$

Gleichung (4-4) weist einerseits darauf hin, dass die Erhöhung des Drucks am Einlass das Volumen an eingeschlossener Luft reduzieren kann. Sie zeigt ebenfalls, dass bei reduziertem Druck am Auslass  $p_A$  das Porenvolumen sinken muss.

Übliche Drücke in der Kavität variieren je nach Anwendungsfall. In der Luftfahrtindustrie wird ein Druck in der Kavität von  $< 10\text{mbar}$  angestrebt. Da hier die Zykluszeiten über 3-5h Stunden gehen können ist der Einfluss der Zeit zum Erreichen des Druckniveaus weniger relevant. In Umfeld größerer Stückzahlen, wie in der Automobilindustrie, ist dies relevant. Aufgrund dessen werden Drück von  $100 - 200\text{mbar}$  als ausreichend definiert. Für die Untersuchungen werden drei Druckstufen definiert ( $p_E = 0.01\text{bar}$ ,  $p_E = 0.2\text{bar}$ ,  $p_E = 1.00\text{bar}$ ). Die Ergebnisse sind in Abb. 4-5 zusammengefasst.

Vergleicht man den Zeitpunkt  $t_A$ , wenn Fluid den Auslass erreicht, ist über die verschiedenen Druckstufen von  $p_E$  der FF, die sich entwickelnde Porenfläche und die Position der Pore im Rahmen der numerischen Unsicherheit gleich. Der Betrag von  $t_A$  reduziert sich mit dem Forminnendruck.

Betrachtet man den Zeitpunkt des Simulationsabbruchs, steigt der FF mit Reduzierung des Forminnendrucks, was mit einer Reduzierung der Porenfläche einhergeht. Dies entspricht dem erwarteten in Gleichung (4-4) dargestellten reziproken Verhältnis der Porenfläche. Die Position der Pore verschiebt sich mit sinkendem Forminnendruck in Richtung des Auslasses.

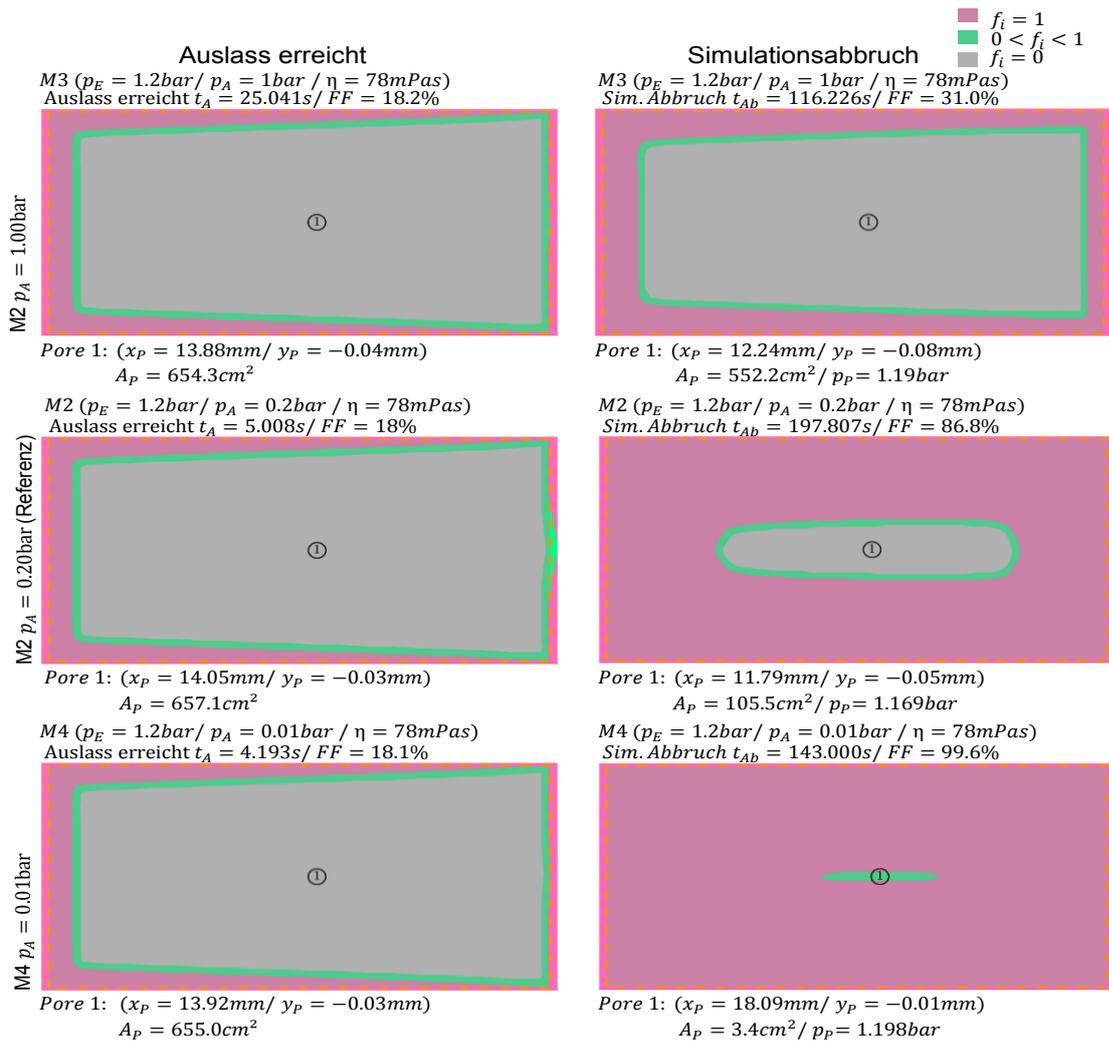


Abb. 4-5: Ergebnisse zur Variation des Drucks am Auslass

### 4.5.3 Einfluss der Viskosität auf die Porenbildung

Die Viskosität ist eine wesentliche Größe, die den Füllprozess beeinflussen. Je nach Anwendung stehen eine Vielzahl an Harzen zur Verfügung. Ihre Prozesseigenschaften unterscheiden sich der Anwendung entsprechend in der Viskositätsentwicklung über die Zeit bzw. im Materialverhalten [28]. Um realitätsbezogenen Werte für diese Studie zu verwenden wird sich am Materialsystem EPIKOTE 05475 der Firma Hexion orientiert. Eine ausführliche Beschreibung dieses Systems ist in [146] enthalten. Das System hat, mit einer Hochdruckanlage vermischt, eine Anfangsviskosität von ca.  $\eta = 15 \text{ mPas}$ . Nach 60s wird ein Wert von  $\eta = 50 \text{ mPas}$  bei 110s ein Wert von ca.  $\eta = 1000 \text{ mPas}$  erreicht. Um den generellen Einfluss der Viskosität zu beurteilen, werden drei Viskositätsstufen definiert ( $\eta = 7.8 / 78 / 780 \text{ mPas}$ ).

Um den Einfluss der Reaktivität des Matrixmaterials mit zu berücksichtigen, bietet PAM-RTM an Viskositätsdaten über die Zeit zu hinterlegen. Dabei wird keine mathematische Funktion hinterlegt, was bedeutet, dass nach Überschreiten des angegebenen Zeitraums die Viskosität konstant bleibt. Bei Erreichen des letzten, üblicherweise höchsten Viskositätswert ist zu erwarten, dass kein relevanter weiterer Füllvorgang stattfinden kann, so dass die implementierten Abbruchkriterien zum Tragen kommen.

Je nach Prozessgestaltung gibt es zwei Möglichkeiten. Einerseits die Variante, dass vorab gemischtes Harz z.B. über einen Drucktopf in die Kavität gefördert wird. Dabei altert das Harz einheitlich. Andererseits besteht die Möglichkeit über einen Onlinemischkopf reaktives Harz der Kavität zuzuführen. Dadurch stellt sich ein Viskositätsgradient von der Fließfront bis zum Einlass ein, da immer „frisches“ Material gefördert wird.

Die Ergebnisse der Untersuchungen für die verschiedenen Druckstufen der Viskosität bzw. mit variabler Viskosität sind in Abb. 4-6 zusammengefasst.

Vergleicht man den Zeitpunkt  $t_A$ , wenn Fluid den Auslass erreicht, ist über die verschiedenen Viskositätsstufen bzw. ebenfalls bei variabler Viskosität der FF, die sich entwickelnde Porenfläche und die Position der Pore, im Rahmen der numerischen Unsicherheit gleich. Der Betrag von  $t_A$  steigt mit zunehmender Viskosität. Der RT- Kanal wird zu Beginn gefüllt. In dieser ersten Phase der Injektion ist der Einfluss der Alterung des Harzes gering, wodurch bei der Studie mit Viskositätsentwicklung über die Zeit der Betrag der Füllzeit nur unwesentlich über dem des Wertes von  $7.8MPas$  liegt.

Betrachtet man den Zeitpunkt des Simulationsabbruchs  $t_{Ab}$  sind FF, Porenfläche bzw. Position gleich. Lediglich die Zeit bis zum Abbruch steigt mit zunehmender Viskosität. Die Implementierung eines Viskositätsverlaufs hat keinen Einfluss auf die Porenbildung, lediglich auf die Füllzeit.

An dieser Stelle wird darauf hingewiesen, dass den durchgeführten Simulationen eine makroskopische Betrachtung mit dem Gesetz von Darcy zu Grunde liegt. Effekte, welche aus Mikro bzw. Makrobereichen entstehen, werden nicht abgebildet. Studien zeigen deren Bedeutung auf. [65, 70, 147]

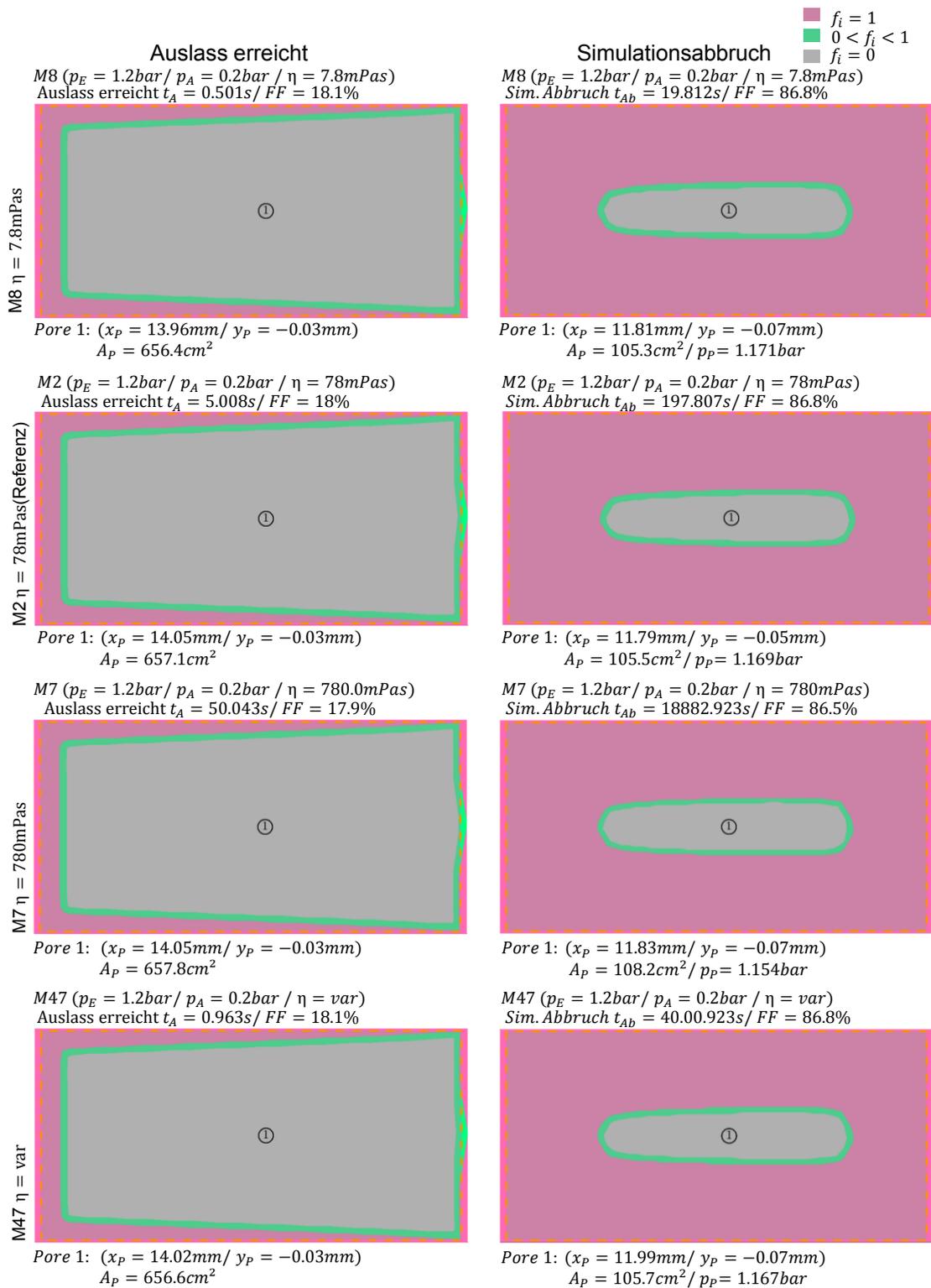


Abb. 4-6: Ergebnisse zur Variation der Viskosität

## 4.6 Einfluss von Position und Länge des Einlass bzw. Auslasses (S3)

Einlass- und Auslasssystem haben maßgeblichen Einfluss auf den Tränkungsprozess. In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der durchgeführten Studien dargestellt und diskutiert.

### 4.6.1 Einlass- und Auslasssystem außerhalb des Bauteils

Als erstes Konzept dieser Reihe wird untersucht welchen Einfluss die Gestaltung des Einlass- bzw. des Auslasskanals auf das Füllbild hat. Dazu wird die Position des Kanals (lange Seite versus kurze Seite der Preform) und die Breite des Kanals variiert (vgl. Abb. 4-7).

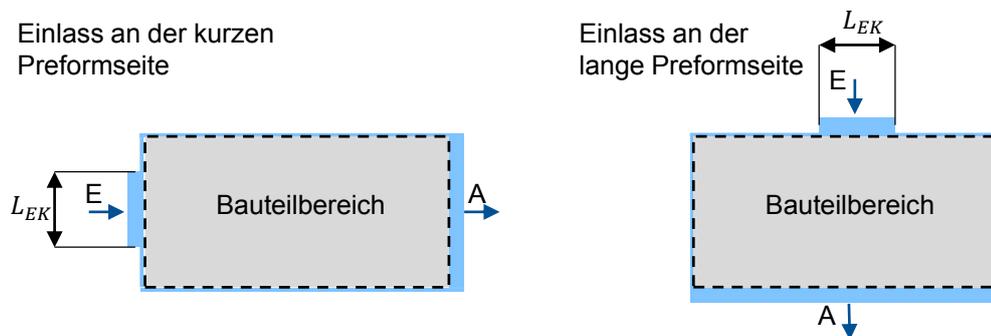
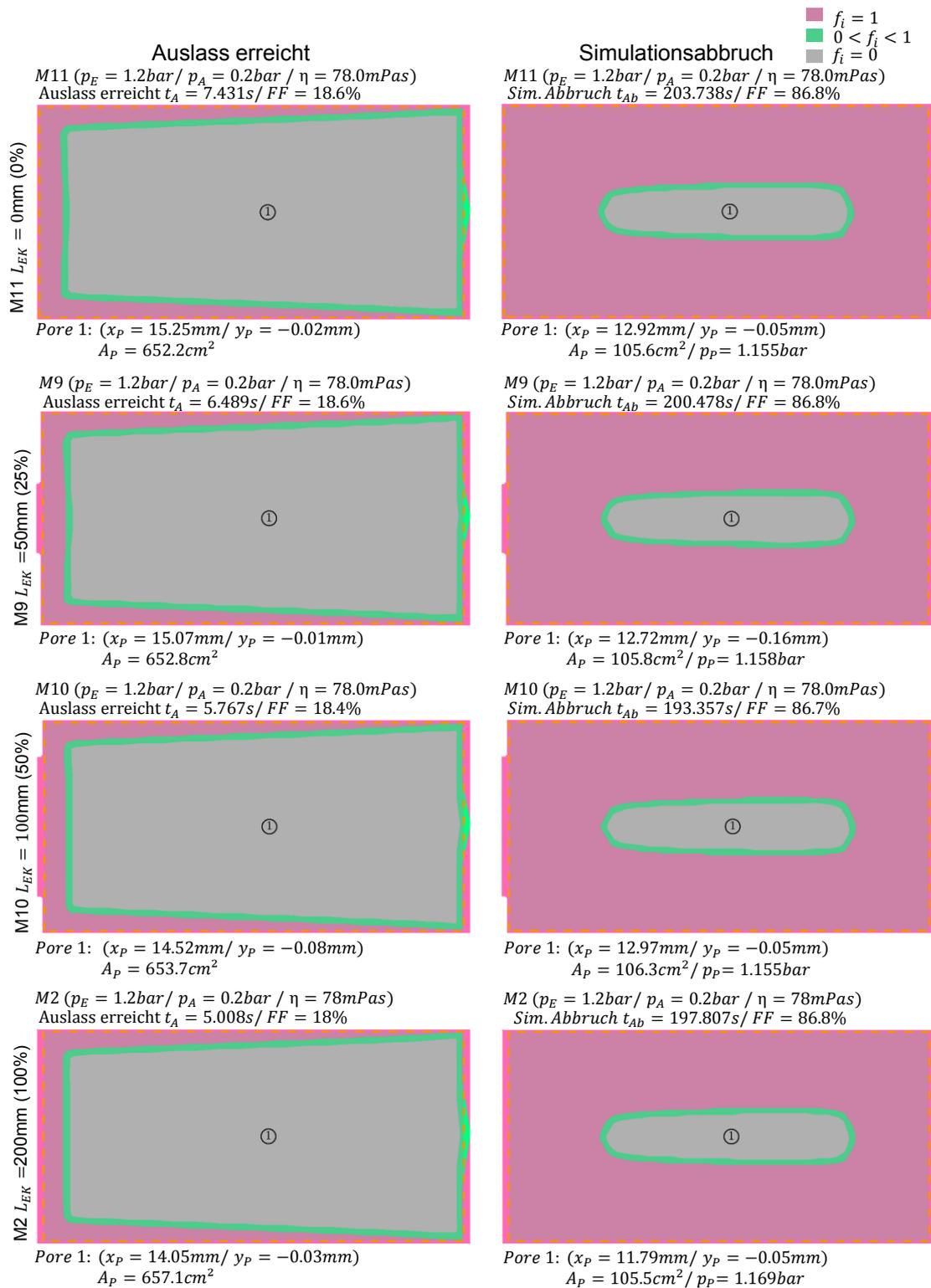


Abb. 4-7: Schematische Darstellung zur Untersuchung der Position des Einlasssystems

Die Breite des Einlasskanals wird variiert mit 0%/ 25%/ 50%/ 100% der Gesamtkantenlänge. Die Ergebnisse sind in Abb. 4-8 bzw. Abb. 4-9 dargestellt.

Zum Zeitpunkt, wenn Fluid den Auslass im Falle des Einlasses auf der kurzen Seite der Preform erreicht, bleibt der FF über die Variation von  $L_{EK}$  nahezu konstant. Ist der Einlasskanal auf der langen Seite, ist ein leichter Anstieg des FF (15.1% bis 17.1%) mit abnehmender Länge des Einlasskanals zu beobachten. Die Zeit bis zum Erreichen des Auslasses  $t_A$  verringert sich von 7.4s auf 5.0s; im Falle des Einlasses auf der kurzen Seite, von 7,6s auf 3,2s im Fall des Einlasses auf der langen Seite. Diese Unterschiede können über die Fließlängen im RT- Kanal erklärt werden. Im Falle des Punkteinlasses sind diese in beiden Fällen gleich. Im Falle der maximalen Ausdehnung des Einlasskanals ist der Weg bis zum Auslass im Falle des Einlasses auf der langen Seite erheblich kürzer. Dadurch wird die Zeit bis zum Erreichen des Auslasses erheblich kürzer.



**Abb. 4-8: Position und Dimension des Einlasssystems neben der Preform mit Einfluss auf der kurzen Seite**



**Abb. 4-9: Position und Dimension des Einlasssystems neben der Preform mit Einlass auf der langen Seite**

Zum Zeitpunkt des Simulationsabbruchs stellt sich bei beiden Positionen und über die Variation der verschiedenen Kanallängen ein innerhalb der numerischen Schwankung gleicher FF von ca. 86.6% ein. Die Zeiten bis zum Abbruch der Simulation  $t_{Ab}$  liegen im Bereich von 180s bis 200s. Im Falle des Einlasses auf der kurzen Seite verschiebt sich die Position der Pore nach Bildung leicht in Richtung des Einlasses. Im Falle des Einlasses auf der langen Seite bleibt sie an ihrer Position.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass der über einen RT- Kanal induzierte Fluss bei seitlichem Einlasskanal die Bedeutung der Position und der Länge des Kanals in den Hintergrund treten lässt. Dieses Ergebnis wird auch für eine Variation des Auslasskanals erwartet, weshalb auf diese Untersuchung verzichtet wird.

## 4.6.2 Einlasskanal auf der Preform/ Auslasskanal neben der Preform

In diesem Unterkapitel wird der Einlasskanal auf die Preform gesetzt. Zu variierende Parameter sind die Länge des Einlasskanals  $L_{EK}$  und die Position  $x_i$  des Kanals variiert (Abb. 4-10).

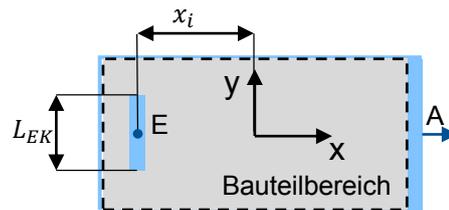
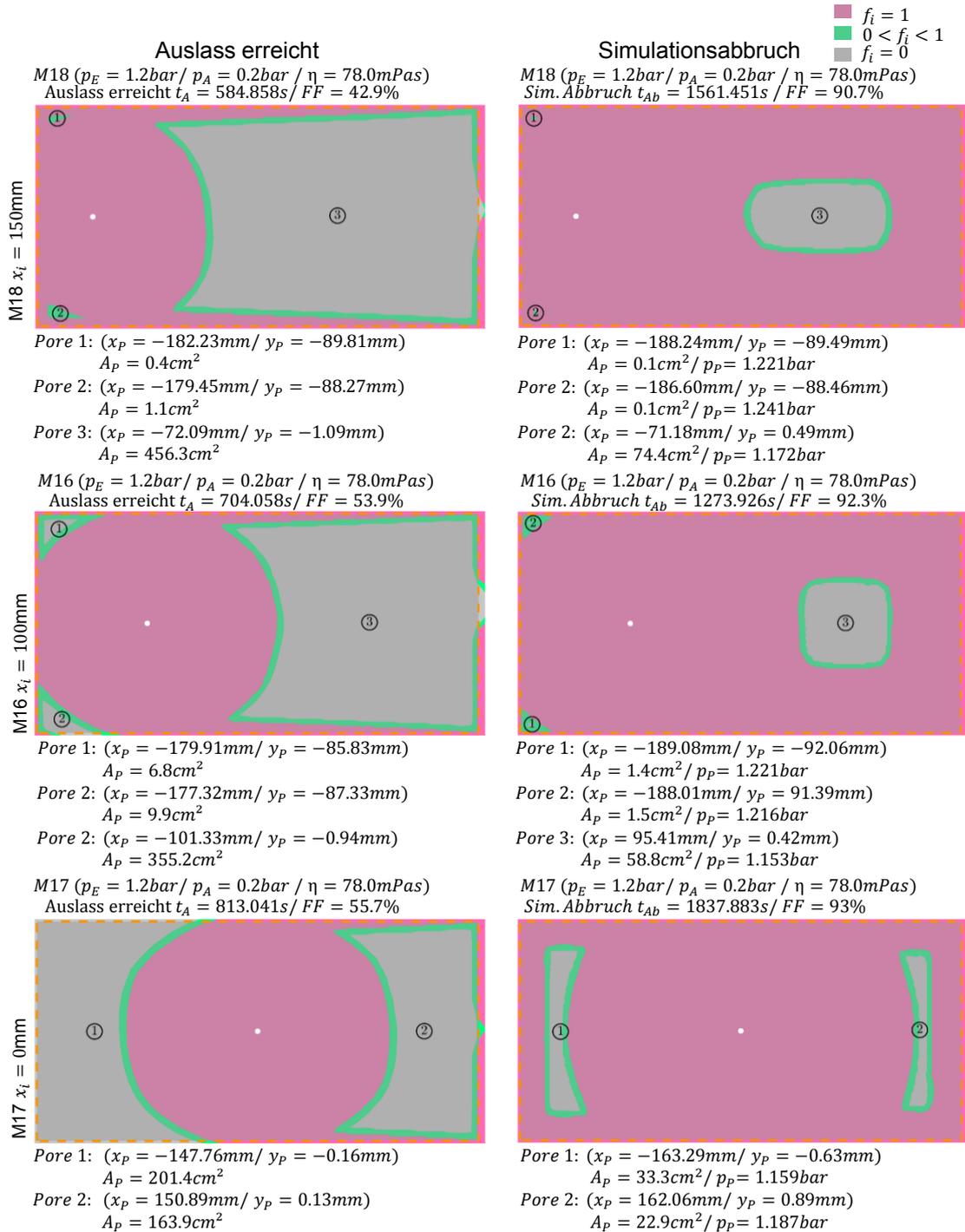


Abb. 4-10: Schematische Darstellung zur Untersuchung der Position des Einlasssystems auf der Preform

Der Fall des Punkteinlasses ist ein Spezialfall des Linieneinlasses. Dieser wird als erster in Abb. 4-11 dargestellt. Der Einlass des Harzes in den Kanal wird mit einem Durchmesser von 5mm modelliert.

Betrachtet man den Zeitpunkt, an dem das Fluid den Auslass erreicht, zeigt sich ein deutlicher Einfluss der Position des Einlasses auf den FF. Je weiter er in Richtung Mitte wandert, desto höher fällt der FF aus ( $FF(x_i = 150mm) = 43\%$  bzw.  $FF(x_i = 0mm) = 56\%$ ). Verglichen mit den vorher beschriebenen Studien, ist der FF mit bis zu 56% sehr hoch. Über die Positionierung auf der Preform entstehen mehrere Poren. Ist die Position nahe der Preformkante bilden sich zwei kleine Poren im Randbereich und eine große Pore in Richtung des Harzauslasses. Die zwei kleineren Poren entstehen, da die Entfernungen in x- bzw. y-Richtung vom Einlass bis zum RT- Kanal ähnlich groß sind. Wird der Einlass in die Mitte verschoben ist Fluid in y-Richtung im RT- Kanal und fließt in Richtung Auslass, wodurch sich dann die Anzahl der Poren auf zwei Stück, eine große auf der auslassentfernten Seite und eine etwas kleinere in Richtung des Auslasses, reduziert.



**Abb. 4-11: Position und Dimension des Punkteinlasses auf der Preform und des Auslasssystems neben der Preform**

Zum Zeitpunkt des Simulationsabbruches liegt in allen Poren ein Druck nahe des Einlassdruckes an, weshalb alle Ergebnisse zur Auswertung herangezogen werden können. Der finale FF steigt von 91% auf 93% an, je weiter der Einlass in das Zentrum des Bauteils verschoben wird. Die gebildeten Poren verkleinern sich im Verhältnis nach dem

idealen Gasgesetz. Im Fall von  $x_i = 100\text{mm}$  und  $x_i = 150\text{mm}$  schieben sich die beiden kleineren Poren in die Ecken des Bauteils. Die jeweils größte Pore verschiebt sich mit Position des Einlasses in Richtung Zentrum weiter in Richtung Bauteilkante. Im Falle des Einlasses in der Mitte ( $x_i = 0\text{mm}$ ) verschieben sich beiden Poren in Richtung der jeweilige Bauteilkante.

Für die weitere Betrachtung des Einlasses auf der Preform wird die Position und die Länge des Einlasskanals variiert. Für eine übersichtliche Ergebnisdarstellung wird die Betrachtung auf den Zeitpunkt des Simulationsabbruchs reduziert.

Die Ergebnisse sind in Abb. 4-12 zusammengefasst. Die rot markierten Berechnungen weisen einen niedrigen Porendruck zum Zeitpunkt des Simulationsabbruchs auf. Diese Simulationen sind aufgrund von langsamen Fließfrontenfortschritt abgebrochen, weshalb die Ergebnisse zum Zeitpunkt Simulationsabbruch nicht mit in die Auswertung einbezogen werden. Allgemeine Aussagen lassen sich trotzdem ableiten.

Die Zeit bis das Fluid den Auslass erreicht verlängert sich je kürzer der Einlasskanal ist bzw. je weiter der Einlass in der Mitte der Preform platziert wird. Dieser Trend zeigt sich ebenfalls beim Betrag der Zeit bis zum Simulationsabbruch. Der FF liegt zu diesem Zeitpunkt für alle Konfigurationen bei ca. 90%. Bezieht man die in Abb. 4-11 dargestellte Auswertung mit Punkteinlass in diese Auswertung mit ein, ist die Zeit bis zum Simulationsabbruch für einen mittigen Punkteinlass am größten, was mit dem in dieser Studie höchsten Füllfaktor von 93% einhergeht. Die Position der Poren verhält sich in Abhängigkeit der Position des Einlasses vergleichbar mit dem Konzept des Punkteinlasses auf der Preform. Es ist ein deutlicher Einfluss der Position des Einlasses auf der Preform auf die Poren im finalen Bauteil zu erkennen.

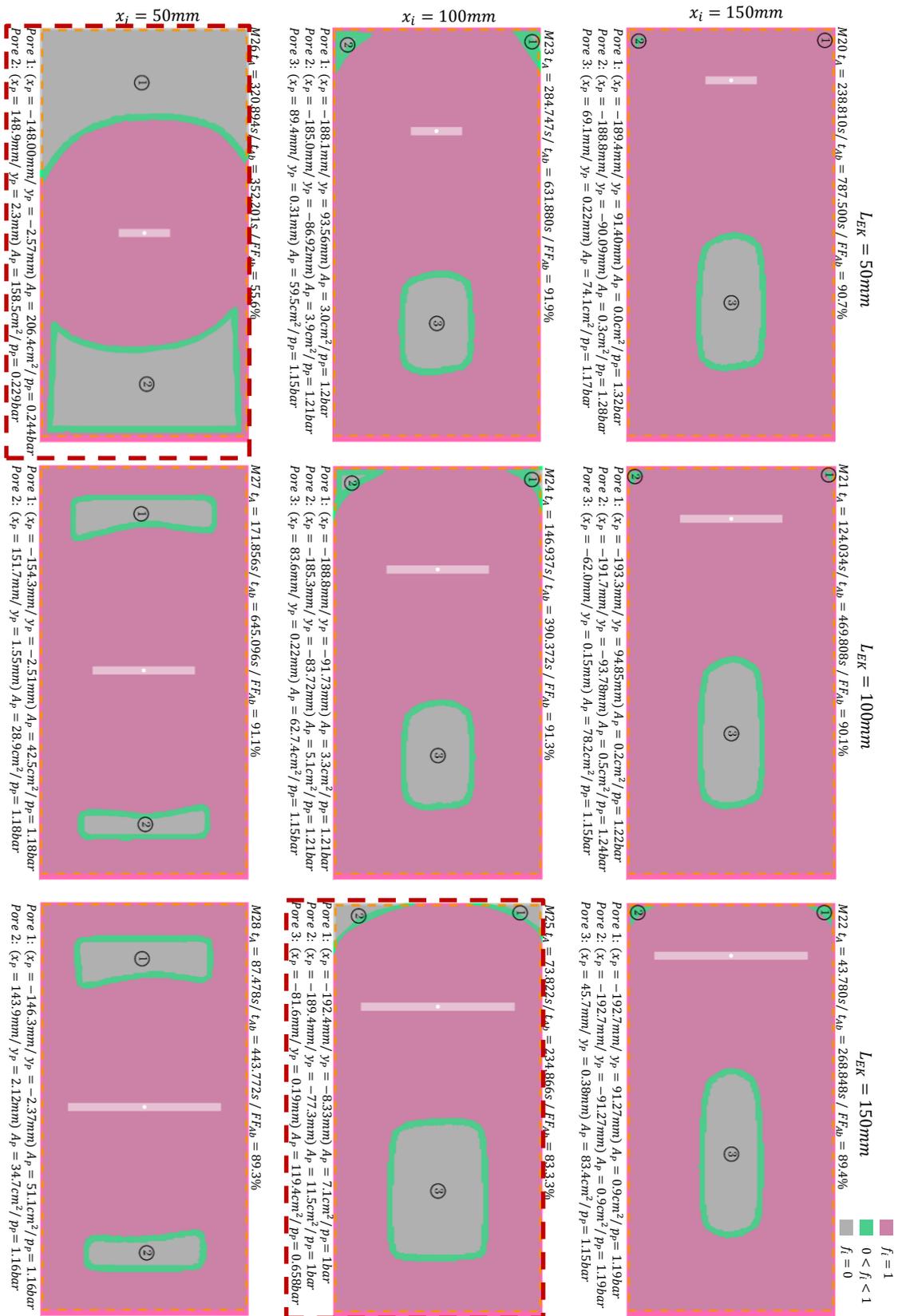
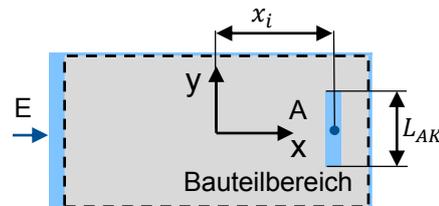


Abb. 4-12: Position und Dimension des Linieneinlasses auf der Preform Auslass neben der Preform

### 4.6.3 Einlasskanal neben der Preform/ Auslasskanal auf der Preform

In diesem Unterkapitel wird der Auslasskanal auf die Preform gesetzt. Als zu variierende Parameter werden die Länge des Auslasskanals  $L_{AK}$  und die Position  $x_i$  des Kanals variiert Abb. 4-13.



**Abb. 4-13:** Schematische Darstellung zur Untersuchung des Einflusses der Position des Auslasskanals auf der Preform

Die Ergebnisse sind in Abb. 4-14 dargestellt. Die Aussage über einen Punkteinlass kann über die Variation der Kanallänge getroffen werden, weshalb diese Untersuchung nicht dargestellt ist. Je näher sich der Kanal an der Preformkante befindet, desto kürzer ist die Zeit bis das Fluid den Auslass erreicht. Eine größere Kanallänge reduziert ebenfalls diesen Abstand und hat demzufolge den gleichen Effekt. Befindet sich der Auslasskanal nahe genug an der Preformkante, bildet sich eine Pore. Wird er in Richtung Mitte platziert, bilden sich zwei Poren. Je weiter der Auslass in die Mitte platziert wird, je symmetrischer wird die Ausprägung der finalen zwei Poren. Je kürzer der Auslasskanal gestaltet wird, desto höher wird der erreichte Füllfaktor.

Der Einfluss der Position des Auslasses hat einen deutlichen Einfluss auf die Größe der verbleibenden Makroporen im Bauteil.

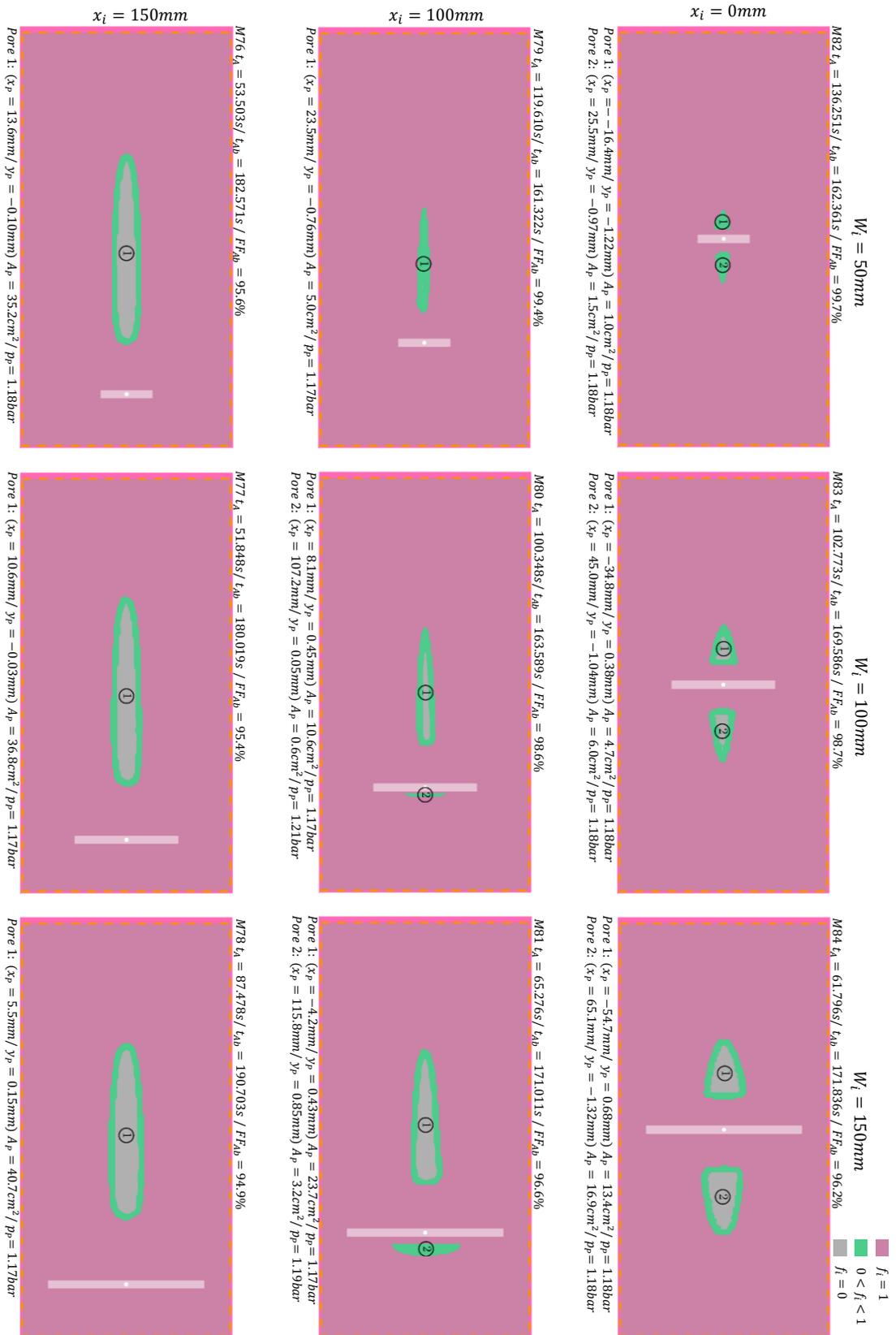


Abb. 4-14: Position und Dimension des Linienauslasses auf der Preform/ Einlass neben der Preform

## 4.7 Variation des Ein- bzw. Auslasses mit umlaufendem, lokalem Überpressungsbereich (S4)

Der Umgang mit RT, bzw. die Gestaltung von Werkzeugen unter Berücksichtigung des Effekts, der über RT, wie in Kapitel 2.3.3 beschrieben, induziert wird, ist wenig untersucht. In diesem Kapitel wird die Maßnahme „umlaufender Überpressungsbereich“ bzw. „Quetschkante“ auf ihre Wirkmechanismen hin untersucht [46].

Ein Überpressungsbereich ist ein lokaler Bereich, in dem die sich im Werkzeug befindende Preform eine deutlich höhere Kompaktierung erreicht als im Bauteilbereich. Durch diese besitzt die Preform in diesem Bereich eine geringere Permeabilität, wodurch der Fluss reduziert wird. Eine Überkompaktierung kann durch eine Verjüngung im Werkzeug realisiert werden, oder über das lokale Positionieren von Textil.

Die Reduzierung des Flusses durch den Überpressungsbereich führt bei einem seitlich platzierten Einlass zur Verlängerung der Zeit, bis Harz den Auslass erreicht. Es wird keine Veränderung des Füllbildes erwartet, weshalb diese Untersuchung nicht durchgeführt wird. Als zusätzlicher Parameter für die Untersuchung wird die Breite des Überpressungsbereiches eingeführt.

### 4.7.1 Einlass auf der Preform/ Linienauslass neben der Preform

Das Konzept des Überpressungsbereichs mit einem Einlass auf der Preform in Kombination mit einem Linienauslass neben der Preform ist in Abb. 4-15 dargestellt. Als Parameter werden die Breite des Überpressungsbereiches  $B_{\text{ÜB}}$ , die Position und die Länge  $L_{\text{EK}}$  des Einlasses variiert. In [46] wird eine Breite  $B_{\text{ÜB}}=10\text{mm}$  vorgeschlagen. Dieser Wert wird als Anhaltspunkt für die zu untersuchenden Breiten gewählt.

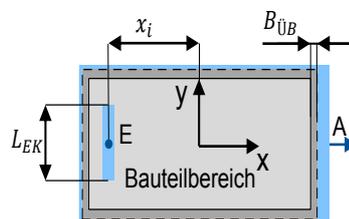
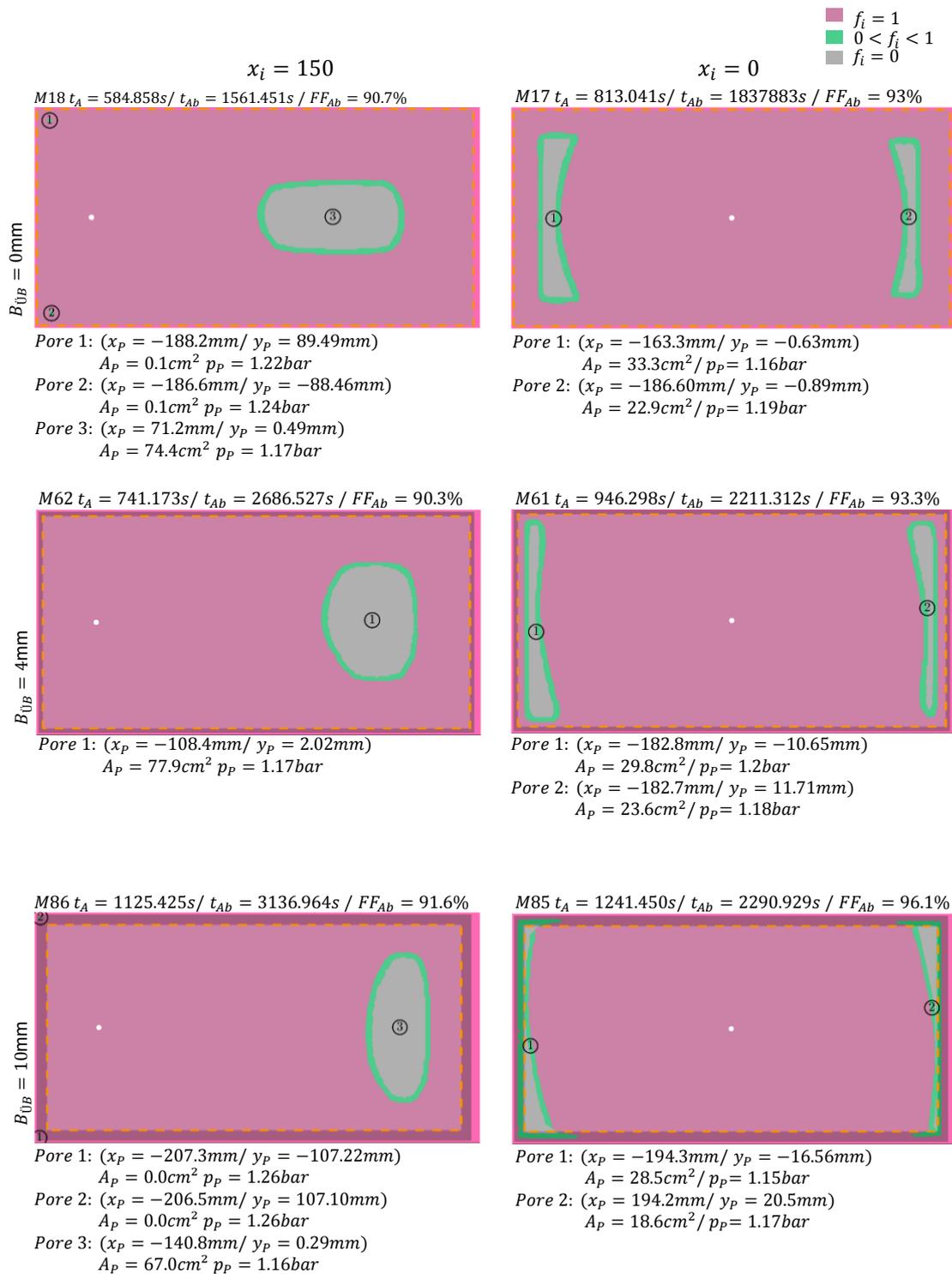


Abb. 4-15: Schematische Darstellung zur Untersuchung der Position und der Länge des Einlasses auf der Preform mit umlaufendem Überpressungsbereich und seitlichem Auslass

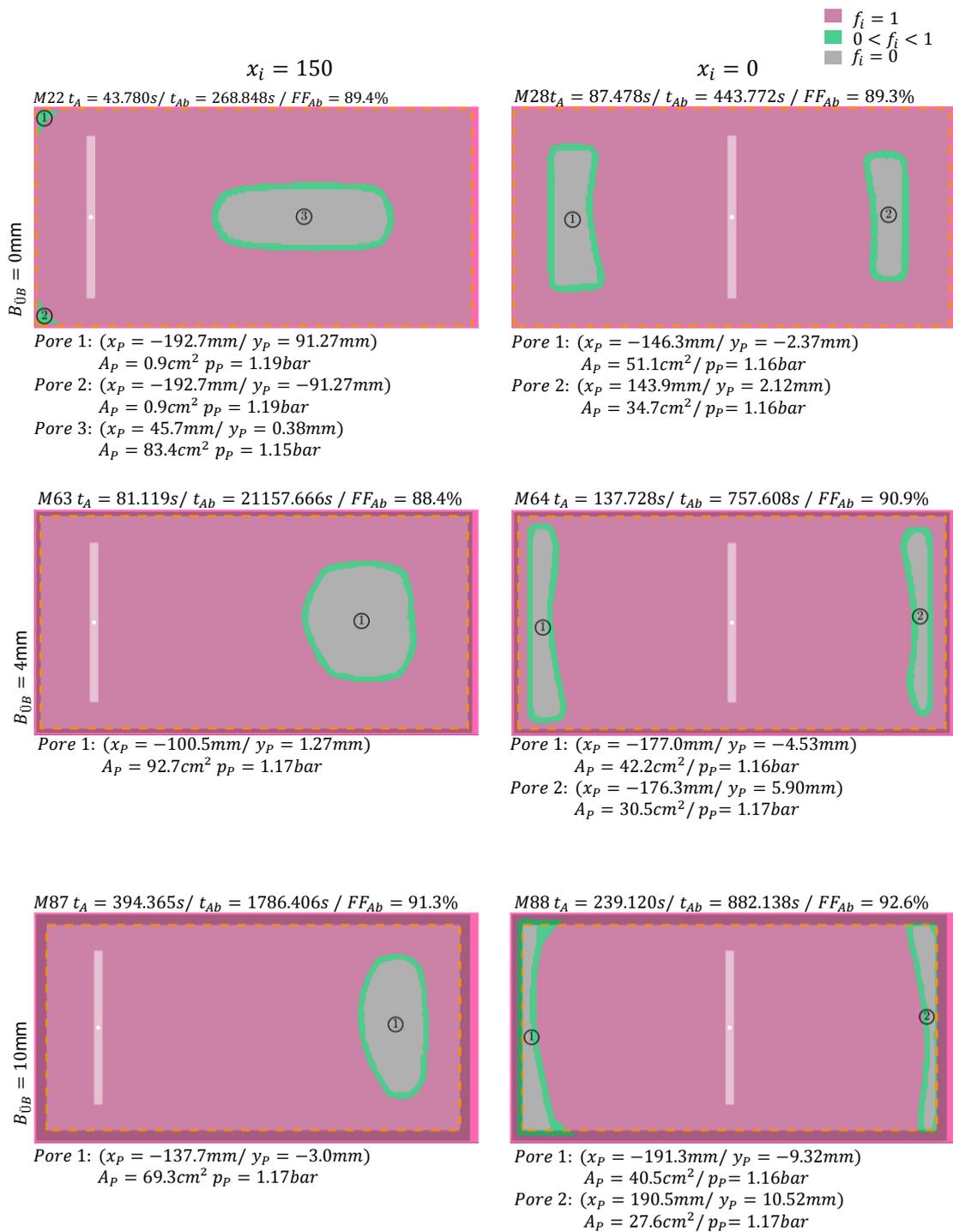
In Abb. 4-16 sind die Ergebnisse für unterschiedliche Breiten des Überpressungsbereiches und zwei Positionen des Einlasses dargestellt. Die Breite des Überpressungsbereiches hat einen deutlichen Einfluss auf den Zeitpunkt, wann Fluid den Auslass erreicht. Über einer mittigen Platzierung des Einlasses steigt diese weiter an. Bei diesem Konzept

bilden sich zwei große Poren, welche sich symmetrisch zum Überpressungsbereich hin positionieren. Bei einem außermittigen Einlass ergeben sich kleine Poren im Überpressungsbereich bzw. eine große mit Position in Richtung Auslass. Der FF bei Simulationsabbruch steigt mit der Breite des Überpressungsbereiches. Die Zeit bis zum Simulationsabbruch ist ab einer Breite von  $B_{\text{ÜB}} = 4\text{mm}$  bei außermittiger Platzierung größer als bei mittiger Platzierung des Einlasses. Dies deutet auf eine Dominanz des Flusses in der Preform hin. Der FF ist bei mittigem Einlass und größter Breite  $B_{\text{ÜB}} = 10\text{mm}$  am höchsten.



**Abb. 4-16: Position des Punkteinlasses auf der Preform und Auslass neben der Preform mit Überpressungsbereich**

Als weitere Studie wird die Länge des Einlasskanals auf  $L_{EK} = 150mm$  festgesetzt und Position des Einlasses und Breite des Überpressungsbereiches variiert. Die Ergebnisse sind in Abb. 4-17 dargestellt.



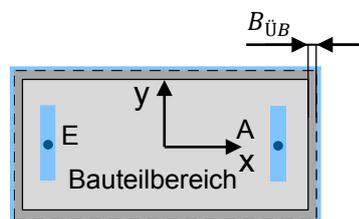
**Abb. 4-17: Position des Linieneinlasses auf der Preform/ Auslass neben der Preform mit Über-  
 pressungsbereich**

Der Zeitpunkt, wenn Fluid den Auslass erreicht, steigt mit zunehmender Breite des Über-  
 pressungsbereiches. Die Anwesenheit eines solchen Bereiches führt dazu, dass bei  
 außermittigem Einlass das Fluid länger bis zum Auslass benötigt als bei mittig platzier-

tem. Ein mittig platzierter Einlass führt dazu, dass sich zwei Poren im Randbereich bilden, während bei außermittiger Platzierung sich eine Pore im Bauteilbereich bildet. Der höchste Betrag beim FF wird beim Konzept mit mittigem Punkteinlass mit größtem Überpressungsbereich erreicht.

## 4.7.2 Einlass/ Auslass auf der Preform

In diesem Unterkapitel wird der Fall „Einlass und Auslass auf der Preform“ vorgestellt. Es wird eine fixe Position und Länge des Einlasses ( $x_e = -150\text{mm}$ ;  $L_{EK} = 150$ ) bzw. des Auslasses ( $x_e = 150\text{mm}$ ;  $L_{EK} = 150$ ) angenommen. Variiert wird die Breite des Überpressungsbereiches  $B_{\text{ÜB}}$ .



**Abb. 4-18:** Schematische Darstellung zur Untersuchung der Position des Einlasses und des Auslasses auf der Preform mit Überpressungsbereich

Die Ergebnisse sind in Abb. 4-19 zusammengefasst. Der FF zum Zeitpunkt, wenn Fluid den Auslass erreicht steigt deutlich mit der Breite des Überpressungsbereiches. Bei einer Breite  $B_{\text{ÜB}} = 10\text{mm}$  wird mit 99,3% nahezu vollständiges Füllen erreicht. Der Zeitpunkt, wenn Fluid den Auslass erreicht, wird mit zunehmender Breite verzögert. Der Zeitpunkt des Simulationsabbruchs wird ebenfalls mit größerem Überpressungsbereich verzögert. Der finale FF ist mit 99,8% nahe dem vollständig gefüllten Bauteil. Je breiter der Überpressungsbereich gewählt wird, desto näher verschiebt sich die Pore in Richtung Auslass.



**Abb. 4-19: Position des Linieneinlasses Einlass und Auslasses auf der Preform mit Überpresungsbereich**

## 4.8 Diskussion der Studien

In diesem Unterkapitel werden die Ergebnisse der numerischen Studien zur Makroporenentwicklung diskutiert. Die erste Studie zeigt auf, welchen Einfluss RT auf das Füllbild bei einem seitlichen Einlass und Auslass hat. Die zweite Studie variiert die klassischen Prozessparameter Einlass- und Kavitätsdruck und die Fluideigenschaft Viskosität. In der dritten Studie werden Einlass und Auslass in Position und Dimension variiert und

deren Einfluss auf die sich bildenden Poren untersucht. Eine Maßnahme zum Umgang mit RT, Überpressungsbereiche, wird hinsichtlich Porenbildung und Einfluss der Position des Einlasses bzw. Auslasses in der vierten Studie vorgestellt.

### 4.8.1 Studie 1: Einfluss von Race Tracking

In der ersten Studie wird der ideale Fall, das Vernachlässigen von RT mit dem der Realität nahem Fall, dargestellt durch einen umlaufenden RT-Kanal, verglichen. Die Ergebnisse von Studie 1 können wie folgt zusammengefasst werden:

- RT beeinflusst maßgeblich das Füllbild und die Füllzeit.
- Anhand der auftretenden Zeiten bzw. Massenströmen bzw. Drücke und Zeiten kann erkannt werden, ob RT auftritt.
- Unter Anwesenheit von RT ist eine Porenbildung wahrscheinlich.
- RT muss in der Simulation und im Prozess berücksichtigt werden.

### 4.8.2 Studie 2: Einfluss der Prozessparameter/ Fluideigenschaft

Die wesentlichen Prozessparameter im RTM Prozess sind die anliegenden Drücke. In dieser Studie wird konstanter Injektionsdruck angelegt und untersucht, welchen Einfluss das Druckniveau am Einlass bzw. am Auslass auf den finalen FF hat. Dabei wird der Auslass geschlossen, sobald Fluid austritt. Es zeigt sich, dass das angelegte Druckniveau einen deutlichen Einfluss hat. Mit steigendem Einlassdruck  $p_E$  bzw. sinkendem Auslassdruck  $p_A$  (Vakuumniveau in der Kavität) steigt der finale FF an. In der Betrachtung werden Effekte wie Faserspülen bzw. Einfluss von induzierten Eigenspannungen durch zu hohen Harzdruck nicht berücksichtigt.

Das Niveau der Viskosität hat keinen Einfluss auf die Porenentwicklung, lediglich auf die Zeit bis zum Simulationsabbruch. Eine Viskositätsentwicklung, wie bei einem aushärtenden Fluid bzw. Harz zeigt ebenfalls keinen Einfluss auf die Porenentwicklung, lediglich auf die Füllzeit. Hierbei muss mit in Betracht gezogen werden, dass über die Modellierung mit dem Gesetz von Darcy keine Effekte, welche über Mikro/ Makrofluss induziert werden, mitberücksichtigt werden können.

Die aus der analytischen Betrachtung in Kapitel 2.3.2 generierte Erkenntnis, dass Viskosität bzw. Druckdifferenz einen reduzierten Einfluss auf den FF haben, wird durch die hier beschriebene simulative Untersuchung bestätigt.

### 4.8.3 Studie 3/ 4: Einfluss der Position von Einlass/ Auslass/ Überpressungsbereich

Für eine übersichtliche Auswertung der Ergebnisse der Studie zur Untersuchung der Position bzw. der Dimension des Einlasses/ Auslasses bzw. des Überpressungsbereiches

werden diese in einem Diagramm zusammengefasst (Abb. 4-20). Im Diagramm wird der Zeitpunkt, wann Fluid den Auslass erreicht versus dem erreichten FF aufgetragen. Da für alle Studien die Prozessparameter gleich gewählt wurden, besteht zwischen den Konzepten Vergleichbarkeit.

Im Diagramm sind die einzelnen Simulationen mit den entsprechenden Modellnummern dargestellt. Der Idealfall stellt Modell 1 dar, bei dem kein RT berücksichtigt wurde. Mit dem maximal erreichbaren Wert von eins und der längsten Füllzeit, befindet sich dieses Modell oben rechts im Diagramm. Im Vergleich dazu befindet sich das selbe Konzept mit Berücksichtigung von RT mit der geringsten Zeit bis zum Erreichen des Auslasses und dem geringsten FF unten links.

Setzt man als Ziel einen möglichst hohen FF an, schneiden die Konzepte mit Überpresungsbereich und einem, auf der Preform platzierten Einlass und Auslass mit dem höchsten Wert des FF ab. Das Konzept „Einlass außerhalb der Preform mit Auslass auf der Preform“ stellt einen guten Kompromiss in Bezug auf Zeit versus Füllfaktor dar. Der implementierte RT- Kanal fungiert als Verlängerung des Einlasskanals.

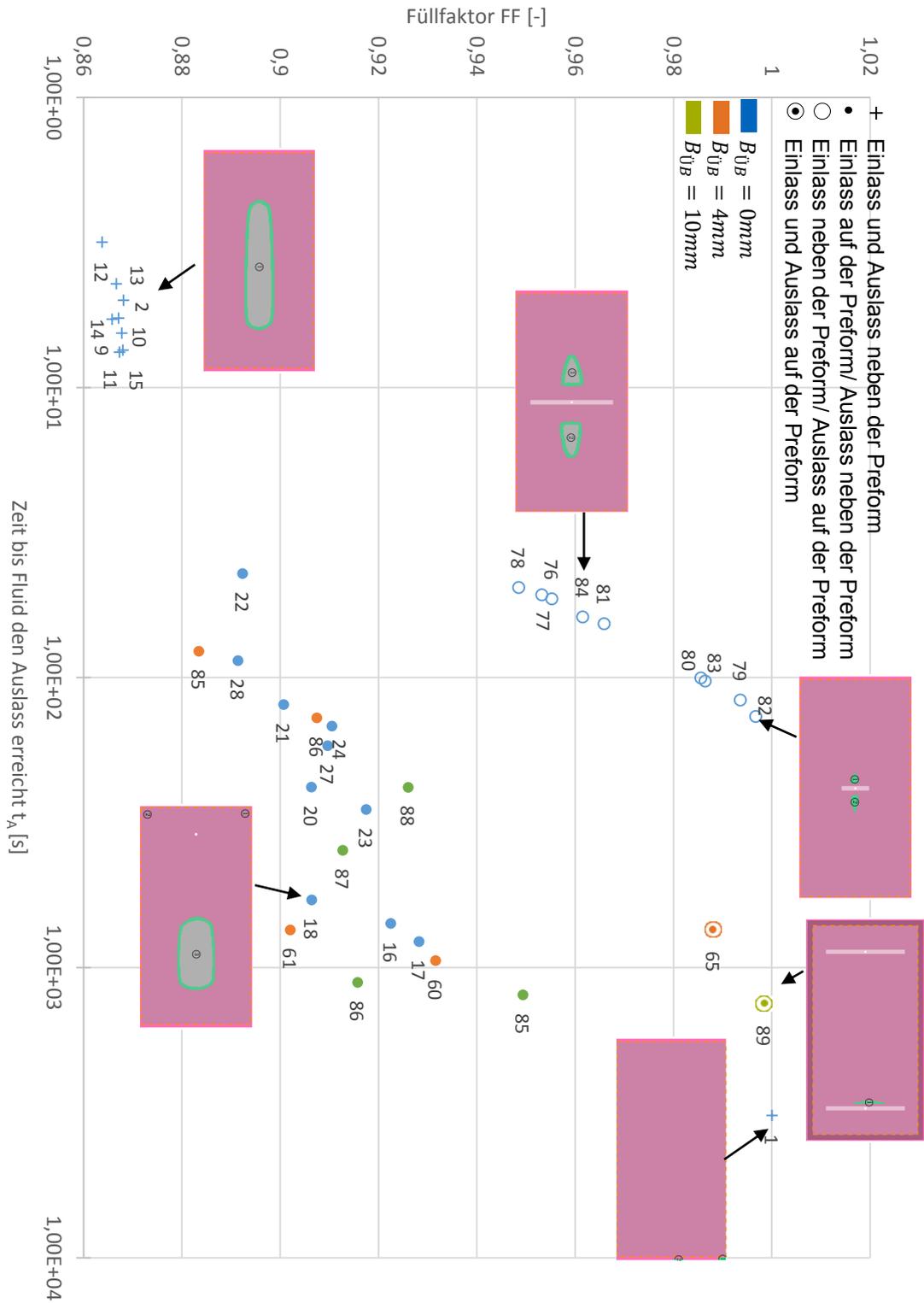


Abb. 4-20: Vergleich Position und Dimension des Einlasses bzw. Auslasses und Überpressungsbereich

Aus dem Diagramm lassen sich folgende Regeln ableiten:

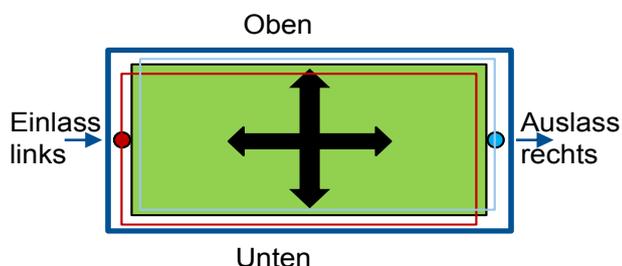
- Je mehr Zeit das Fluid bis zum Erreichen des Auslasses benötigt, desto höher wird der finale FF des Bauteils.
- Über verschiedene Maßnahmen kann Einfluss auf den Betrag von  $t_A$  genommen werden:
  - Implementieren von Überpressungsbereichen umlaufend um die gesamte Preform.
  - Positionieren des Einlasses auf der Preform mit möglichst großem, einheitlichem Abstand zur Preformkante. Ist der Auslass außerhalb der Preform, führt dies zu einem möglichst mittig platzierten Einlass.
  - Positionieren von Ein- und Auslass auf der Preform führt dazu, dass das Fluid den längsten Weg über den RT- Kanal bis zum Auslass fließen muss, solange die Distanz zwischen Ein- und Auslass in Bereich der Preform entsprechend gewählt wird.
- Wird der Auslass auf die Preform und der Einlass neben die Preform gesetzt agiert der umlaufende RT- Kanal als zusätzlicher Verteilerkanal. Je genauer der Auslass in der sich bildenden Trockenstelle liegt, desto höher der erreichbare FF.
- Es kann Einfluss auf die Position der entstehenden Poren genommen werden:
  - Über das Implementieren von Überpressungsbereichen.
  - Über eine zentrale Positionierung des Einlasses.

In dieser Studie wird eine allgemeine Betrachtung durchgeführt. Dabei werden Anforderungen z.B. an Oberflächengüte oder Bauteilverschnitt ausgeblendet.



## 5 Numerische Studie zur Untersuchung der Positionierung der Preform in der Kavität

Die in Kapitel 3 beschriebenen Untersuchungen haben gezeigt, dass die durchgeführten Messungen zur Abbildung von RT teilweise deutlichen Streuungen unterliegen. Gleichzeitig haben die Untersuchungen nachgewiesen, dass die Zeit zum Füllen des RT-Kanals mit der Breite des Kanals variiert. Die Positionierung der Preform in der Kavität ist ein toleranzbehafteter Schritt. Treten hier Abweichungen auf, führt dies zu Abweichungen im Füllbild der Preform. In diesem Kapitel wird die simulative Untersuchung beschrieben, in welcher Form sich Positionsabweichungen auf das Füllbild auswirken. Die Untersuchung ist anhand der verwendeten Prozessparameter in zwei Teile geteilt. In Studie 1, im Folgenden  $S_{Pos1}$  genannt, werden zunächst ausgewählte Versuche aus Kapitel 3.4 mit einer Positionsabweichung beaufschlagt. Der Vergleich mit den experimentellen Messwerten ermöglicht eine erste Beurteilung über die Relevanz der Positionierung. Im zweiten Schritt werden ausgewählte Konzepte von Einlass und Auslass aus Kapitel 4.6 bzw. 4.7 hinsichtlich ihrer Stabilität bezüglich Positionierungsgenauigkeit der Preform in der Kavität bewertet ( $S_{Pos}$  2 bis 4).



**Abb. 5-1:** Schematische Darstellung zur Unterscheidung der Positionen bei der Toleranzuntersuchung

Die in Kapitel 3.4 dargestellten simulativen Untersuchungen gehen von der Randbedingung aus, dass ein idealer Kanal vorhanden ist. Beim realen Platzieren einer Preform in der Kavität kann es zu rotatorischen, translatorischen Verschiebungen und einer Kombination aus beiden kommen. Um einen Start zu

definieren, werden zunächst translatorische Abweichungen in diesem Kapitel betrachtet. In Abb. 5-1 wird dargestellt wie eine Preform translatorisch ihre Position in der Kavität verändern kann. Für alle Untersuchungen wird eine reine Positionsabweichung angenommen. Die geometrischen Maße der Preform werden weiterhin als ideal gesetzt. In Tab. 2-3 sind die Preformtoleranzen mit  $\pm 1\text{mm}$  angegeben. In dieser Studie wird die Preform in die jeweilige Richtung um 1mm verschoben. Es werden die einfachen Translationen der Preform in Richtung des Einlasses, in Richtung des Auslasses und nach unten

abgebildet. Zusätzlich werden die kombinierten Verschiebungen in Richtung des Einlasses und nach unten bzw. in Richtung des Auslasses und zu Seit simulativ nachgebildet. Dabei wird davon ausgegangen, dass Verschiebungen in die entgegengesetzte Richtung aufgrund der Symmetrie denselben Effekt abbilden. Es ergibt sich die in Tab. 5-1 dargestellte Verteilung an Kanalbreiten.

**Tab. 5-1: Kanalbreiten für die Positionstoleranzuntersuchung**

Kanalbreite [mm] Abstand	2 4 6			2 4 6			2 4 6			2 4 6		
	Einlass			Auslass			Oben			Unten		
Mitte (Ref.)	2	4	6	2	4	6	2	4	6	2	4	6
Auslass	3	5	7	1	3	5	2	4	6	2	4	6
Einlass	1	3	5	3	5	7	2	4	6	2	4	6
Unten	2	4	6	2	4	6	1	3	5	3	5	7
Unten- Einlass	3	5	7	1	3	5	1	3	5	3	5	7
Unten- Auslass	1	3	5	3	5	7	1	3	5	3	5	7

Das in Kapitel 3 entwickelte Materialmodell M6a wurde für die Kanalbreiten von 2, 4 und 6mm validiert. Für die hier auftretenden Kanäle werden die Werte inter- bzw. extrapoliert (Tab. 5-2).

**Tab. 5-2: Inter- bzw. extrapolierte Werte für die Ersatzpermeabilität**

$B_K$ [mm]	Ersatzpermeabilität [m <sup>2</sup> ]			
	$v_f = 0,48$		$v_f = 0,62$	
	$K_{Kl}$	$K_{Kq}$	$K_{Kl}$	$K_{Kq}$
1	1,96E-08	1,96E-08	3,34E-08	9,80E-10
2	3,92E-08	3,92E-08	6,48E-08	1,96E-09
3	1,42E-07	1,42E-07	2,35E-07	2,04E-07
4	2,44E-07	2,44E-07	4,06E-07	4,06E-07
5	2,64E-07	2,64E-07	2,55E-07	2,55E-07
6	2,84E-07	2,84E-07	1,03E-07	1,03E-07
7	3,31E-07	3,31E-07	5,51E-08	5,51E-08

Die in diesem Kapitel beschriebenen Ergebnisse beruhen mit auf den Ergebnissen von Bley [141]

## 5.1 Studie zu Positionstoleranzen bei den durchgeführten Experimenten S<sub>Pos</sub> 1

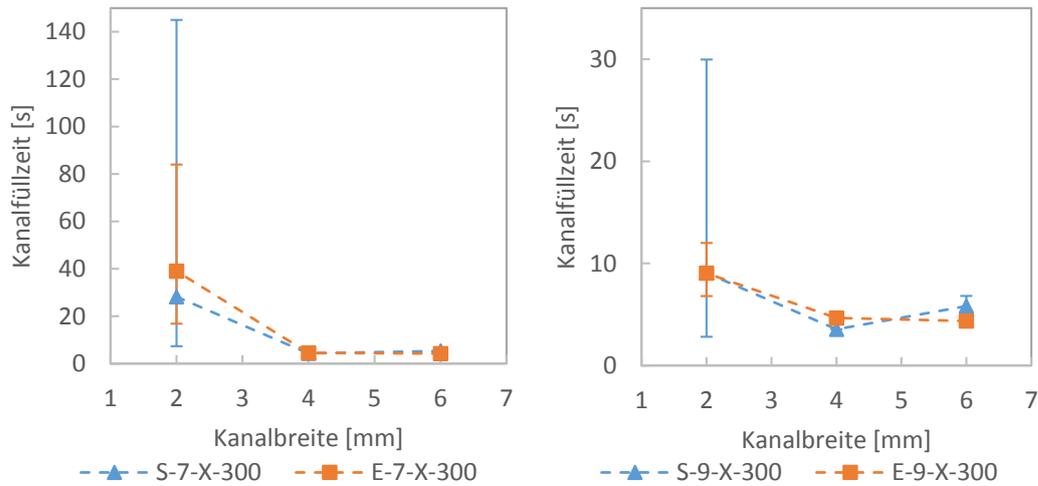
Die in Kapitel 3.4 beschriebenen Versuche unterliegen teilweise großen Streuungen. Eine mögliche Ursache dafür stellt die Position der Preform dar. Um die auftretenden

Streuungen zu begründen, werden die Versuche unter Berücksichtigung der Verschiebung nachsimuliert. Die Ergebnisse werden in diesem Kapitel dargestellt und diskutiert.

In Kapitel 4.5 bzw. in [118] sind Untersuchungen dargestellt, welche zeigen, dass eine Variation des Einlassdrucks zu einer Änderung der Kanalfüllzeit bei nahezu gleichem FF führen. Das selbe Verhalten wird für eine Variation der Viskosität beobachtet. Für die hier durchgeführte simulative Untersuchung sind für jeden Versuchspunkt fünf Simulationen notwendig, um alle translatorischen Verschiebungen zu berücksichtigen. Zur Verkleinerung des simulativen Aufwands wird die Variation der Viskosität und des Einlassdruckes nicht nachgestellt. Es wird ein Einlassdruck von 1300mbar bei einem Auslassdruck von 1000mbar und eine Viskosität von 78mPas, entsprechend der durchgeführten praktischen Versuche, angesetzt. Die zu variierenden Parameter sind die Kanalbreite (2mm/ 4mm/ 6mm) und der Faservolumengehalt (48%/ 62%). Zur Auswertung wird, angelehnt an die in Kapitel 3.4 beschriebenen Experimente, der Zeitpunkt wenn das Messfluid den Auslass erreicht und der entsprechende FF, herangezogen. Für die Auswertung der Experimente wurden Bilder des Füllzustandes zu den definierten Zeitpunkten entnommen und der dazugehörige FF über Bildanalyse berechnet. Angelehnt an die Versuchsauswertung wurde der simulative Versuch in zwei Bildern mit jeweils einem Kanal unterteilt. Damit wird die Vergleichbarkeit mit den Versuchen gewährleistet. Die dargestellten Abweichungen stellen die jeweiligen maximal bzw. minimal mögliche Abweichung zur Idealposition Mitte über die oben beschriebenen translatorischen Verschiebungen dar.

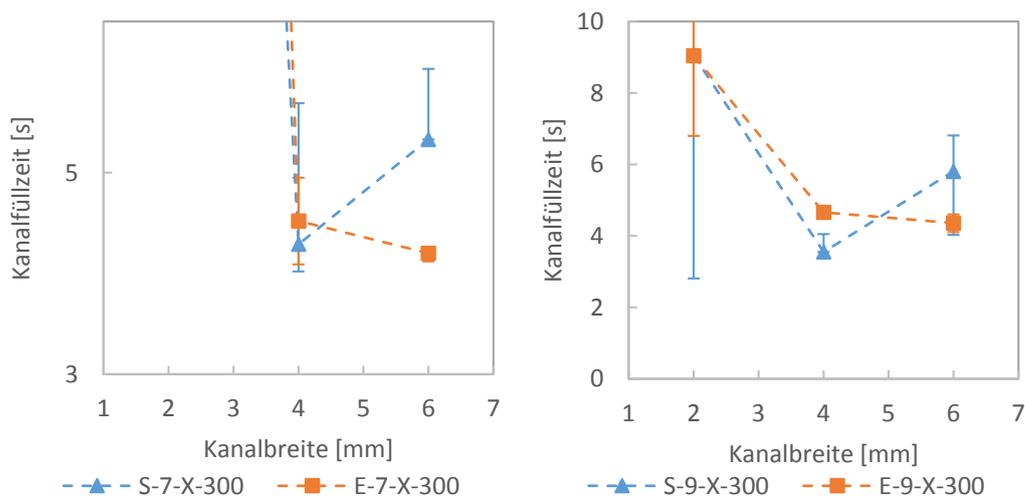
### **5.1.1 Betrachtung im Hinblick auf Kanalfüllzeit**

In Abb. 5-2 sind die Kanalfüllzeiten für verschiedene Kanalbreiten dargestellt. Aufgrund der Übersichtlichkeit werden die Ergebnisse für 48% bzw. 62% Faservolumengehalt separat dargestellt. Die Betrachtung für 48% Faservolumengehalt ist links, die für 62% rechts dargestellt



**Abb. 5-2: Vergleich Experiment mit Simulation mit simulierter translatorisch verursachter Streuung. Kanalfüllzeit über Kanalbreite**

Die Streuungen auf der experimentellen Seite sind am größten bei einer Kanalbreite von 2mm. Diese simulativ abgebildeten, möglichen Abweichungen über eine Verschiebung von 1mm überschreiten die der experimentellen deutlich. Mit steigendem Faservolumengehalt reduzieren sich mögliche Streuungen für einen Kanal von 2mm. Der Wertebereich der experimentell ermittelten Zeiten liegt für beide Faservolumengehaltswerte vollständig im Bereich des simulierten. Der Trend, dass mit abnehmender Kanalbreite größere Streuungen in Bezug auf die Kanalfüllzeit über eine Fehlpositionierung auftreten können, wird über die simulative Betrachtung bestätigt. Für die Kanalbreiten 4 bzw. 6mm lassen sich in dieser Darstellung keine Aussagen machen. Aus diesem Grund ist in Abb. 5-3 die Skalierung der y-Achse angepasst.

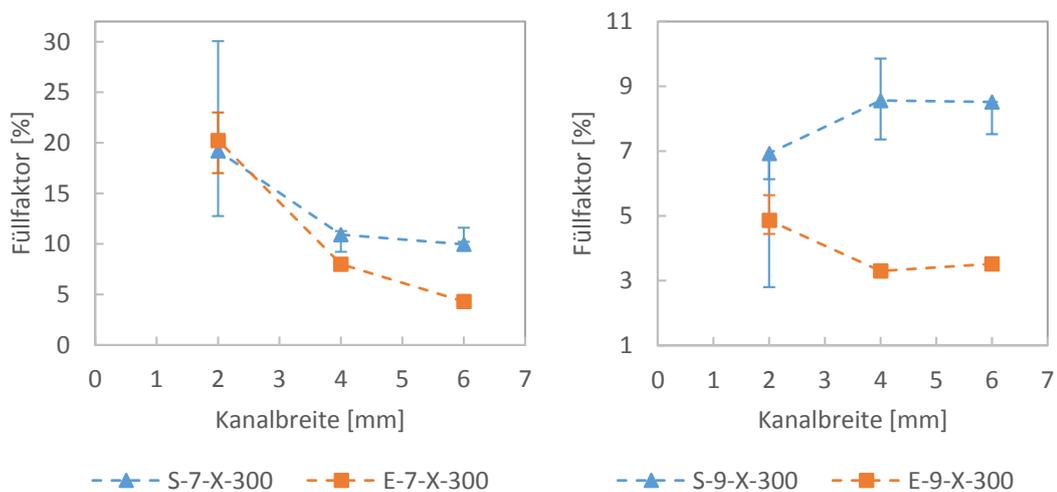


**Abb. 5-3: Vergleich Experiment mit Simulation mit simulierter translatorisch verursachter Streuung. Kanalfüllzeit über Kanalbreite (niedrige Skalierung)**

Bei einem Faservolumengehalt von 48% und einer Kanalbreite von 4mm liegen die experimentellen Streuungen vollständig im Bereich der simulierten möglichen Abweichungen. Für eine Breite von 6mm ist dies nicht der Fall. Bei einem Faservolumengehalt von 62% zeigt sich, dass bei 4mm die Positionierung einen deutlich geringeren Einfluss verglichen mit einem 6mm Kanal hat. Bei einer Kanalbreite von 6mm liegen die experimentellen Werte im Wertebereich der simulierten, möglichen Abweichungen.

### 5.1.2 Betrachtung im Hinblick auf den Füllfaktor

Die Betrachtung in Hinblick auf den FF ist in Abb. 5-4 dargestellt. Die Betrachtung für 48% Faservolumengehalt ist links, die für 62% rechts dargestellt.



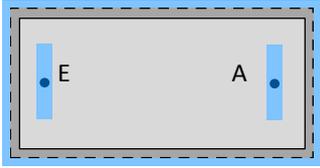
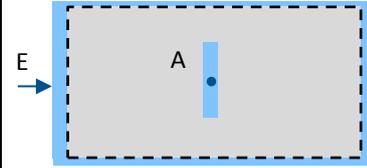
**Abb. 5-4:** Vergleich Experiment mit Simulation mit simulierter, translatorisch verursachter Streuung. Füllfaktor FF über Kanalbreite für einen FVG von 48% (links) und 62% (rechts)

Für eine Kanalbreite von 2mm zeigt die simulative Betrachtung einer abweichenden Positionierung um 1mm eine Streuung, welche im Betrag mehr als doppelt so groß ist als die in den Versuchen aufgetretene. Der Wertebereich der experimentell aufgetretenen Streuungen liegt vollständig im Bereich der simulierten Abweichung. Für die Kanalbreiten 4 und 6mm ist der Betrag der Streuung in der Simulation größer als die in den Versuchen aufgetretene Streuung. Der Wertebereich der Experimente liegt außerhalb des simulierten.

## 5.2 Studie zu Positionstoleranzen für verschieden Einlasskonzepte

In Kapitel 4 sind die Untersuchungen von verschiedenen Einlass- und Auslasspositionen beschrieben. Die experimentellen Untersuchungen in Kombination mit der im vorangehenden Kapitel beschriebenen simulativen Untersuchung zeigen die Bedeutung zur Positionstoleranz der Preform in der Kavität. Die in Kapitel 4 dargestellten simulativen Untersuchungen wurde mit der Idealposition durchgeführt. In diesem Kapitel werden drei Konfigurationen an Einlass-/ Auslasspositionen im Hinblick auf ihre Sensitivität bezüglich der Positionierung simulativ untersucht. Die Wahl der Konzepte beinhaltet als Referenz das Konzept der Versuche aus Kapitel 3.4 bzw. 5.1 mit einem seitlichen Einlass bzw. Auslass und jeweils ein Konzept aus Kapitel 4.6 und 4.7, welche einen finalen FF nahe 100% ergeben; das Konzept „umlaufenden Überpressungsbereich mit Einlass und Auslass auf der Preform“ und das Konzept „seitlichen Einlass und einem zentralen Auslass auf der Preform“. Dabei wird bei allen Modellen ein umlaufender RT- Kanal mit modelliert. Die Untersuchungen in Kapitel 3.4 haben gezeigt, dass mit steigender Breite des RT- Kanals sich die möglichen Streuungen verringern. In der hier vorgestellten Untersuchung liegt der Fokus auf den möglichen Streuungen. Um den potentiell größten Effekt heraus zu lesen wird ein Kanal mit der Breite 2mm gewählt. Alle Konzepte werden jeweils mit den oben beschriebenen translatorischen Verschiebungen um jeweils 1mm belegt. Die jeweiligen Zustände des Füllbilds zum Zeitpunkt, wenn Messfluid den Auslass erreicht bzw. bei Simulationsabbruch sind im Anhang dargestellt. Tab. 5-3 enthält die Konzepte bzw. die Zuordnung zu den Ergebnissen im Anhang. Als Studie  $S_{Pos 1}$  ist in der Nummerierung die simulative Abbildung der Versuche aus Kapitel 3.4 bezeichnet. Um Vergleichbarkeit innerhalb dieser Studie herzustellen, wurden die Prozessparameter für alle Varianten einheitlich gestaltet ( $p_E = 1.2 \text{ bar}$ ,  $p_E = 0.2 \text{ bar}$ ). Die Ergebnisse, welche mit dem Konzept der Versuche und angepassten Parametern generiert wurden, werden als Studie  $S_{Pos 2}$  bezeichnet. Für die hier mit  $S_{Pos 3}$  und  $S_{Pos 4}$  dargestellten Studien entsprechen die Modelle den in Kapitel 4 beschriebenen.

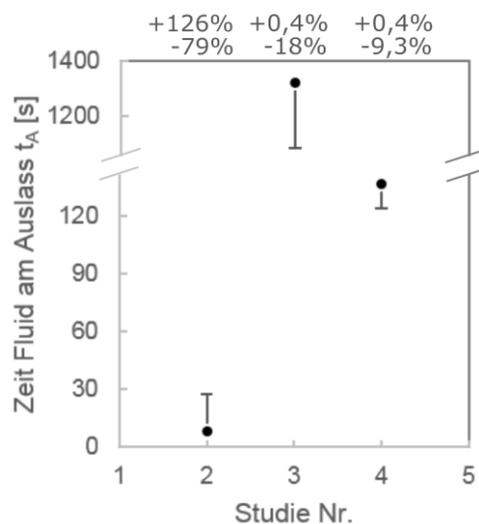
**Tab. 5-3: Konzepte für die Studie zur Positionstoleranz der Preform**

Nr.	Abbildung des Konzepts	Beschreibung	Abbildungen
S <sub>Pos2</sub>		Seitlicher Punkteinlass und Auslass	Abb. A-1 Abb. A-2
S <sub>Pos3</sub>		Einlass und Auslass auf der Preform/ umlaufendem Überpressungsbe- reich	Abb. A-3 Abb. A-4
S <sub>Pos4</sub>		Seitlicher Einlass/ Auslass auf der Preform	Abb. A-5 Abb. A-6

Für S<sub>Pos2</sub> wird als Basis das in Kapitel 4.5 verwendete Modell herangezogen.

Als Messgröße zur Bewertung werden die beiden Zeitpunkte, wenn Fluid den Auslass erreicht  $t_A$  (Abb. 5-5) und der Simulationsabbruch  $t_{Ab}$  (Abb. 5-6) mit den korrespondierenden FF (Abb. 5-7/ Abb. 5-8) herangezogen. In jeder Abbildung sind die Werte der jeweiligen Studie bei einer mittigen Position mit den maximal bzw. minimal möglichen Abweichung aufgetragen. In jedem Diagramm wird zu jedem Idealwert die mögliche Abweichung in Prozent mit angegeben.

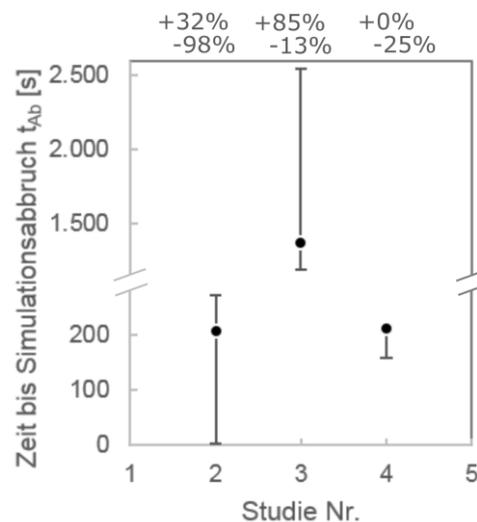
Bei Studie S<sub>Pos2</sub> erreicht das Fluid den Auslass (Abb. 5-5) am schnellsten. Der Betrag der möglichen Abweichung liegt mit +126% deutlich darüber. Bei Studie S<sub>Pos3</sub> braucht das Messfluid am längsten bis zum Erreichen des Auslasses.



**Abb. 5-5:** Vergleich der versch. Studien bezüglich Positionstoleranz der Preform in der Kavität bei  $t_A$

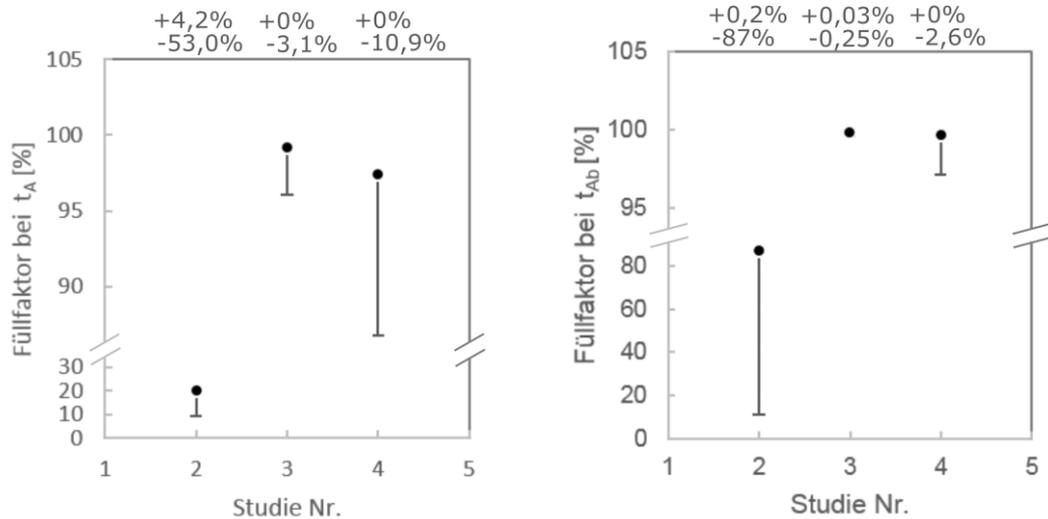
Der Zeitpunkt bis zum Simulationsabbruch (Abb. 5-6), welcher bei den hier beschriebenen Studien immer Druckausgleich bedeutet, ist für Studie  $S_{Pos}$  2 und 4 annähernd gleich. Bei Studie  $S_{Pos}$  3 erhöht sich der Betrag um das Siebenfache. Die prozentuale Abweichung bei Studie  $S_{Pos}$  2 ist im Betrag mit -98% am größten. Es treten Abweichungen in Richtung größerer und kleinerer Füllzeit auf. Studie  $S_{Pos}$  3 zeigt hohe Abweichungen in Richtung eines größeren Betrags der Füllzeit auf. Die Abweichungen für Studie  $S_{Pos}$  4 sind mit -25% am geringsten. Die maximal mögliche Zeit bis das Fluid den Auslass erreicht, entspricht dem der idealen mittigen Position. Die Werte des FF zum

Dies ist in der Funktionsweise der Überpressungsbereiche als „Bremse“ bzw. in der notwendigen Strecke durch die Preform begründet. Mit einer möglichen Abweichung von -18% ist eine signifikante Streuung möglich. Bei Studie  $S_{Pos}$  4 benötigt das Messfluid 136s bis zum Erreichen des Auslasses, obwohl das Fluid einen Weg durch die Preform fließen muss. Die mögliche Abweichung mit -9,3% stellt den geringsten Wert dieser Untersuchung dar. Es zeigt sich, dass eine Positionsabweichung der Preform in Studie  $S_{Pos}$  2 relevante Streuungen in Richtung eines größeren und eines kleineren Wertes besitzen. Studie  $S_{Pos}$  3 und 4 zeigen, dass diese Konzepte Streuungen in Richtung eines kleineren Betrages aufweisen.



**Abb. 5-6:** Vergleich der versch. Studien bezüglich Positionstoleranz der Preform in der Kavität bei  $t_{Ab}$

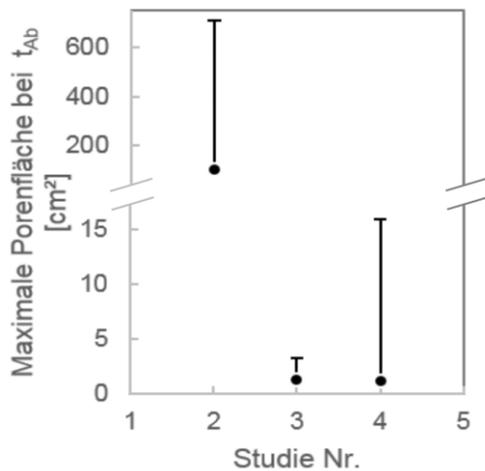
Zeitpunkt  $t_A$  bzw.  $t_{Ab}$  ist in Abb. 5-7 bzw. Abb. 5-8 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass das Konzept hinter Studie  $S_{Pos}$  2 als Referenz immer einen Wert deutlich unter 100% erreicht. Der Idealwert des FF bei mittiger Positionierung steigt von 20% auf 87%. Es findet eine deutliche Füllung nach Schließen des Auslasses statt. Die Streuung zeigt zu beiden betrachteten Zeitpunkten maßgeblich in Richtung eines geringeren FF. Sie nimmt von -53% bei  $t_A$  auf -87% bei  $t_{Ab}$  zu.



**Abb. 5-7:** Vergleich des FF bei  $t_A$  der versch. Studien bezüglich der Positionstoleranz der Preform in der Kavität

**Abb. 5-8:** Vergleich des FF bei  $t_{AB}$  der versch. Studien bezüglich der Positionstoleranz der Preform in der Kavität

Die beiden Studien  $S_{Pos}$  3 und 4 zeigen zum Zeitpunkt  $t_A$  einen Wert des FF ( $S_{Pos}$  3 mit 99% und  $S_{Pos}$  4 mit 97%) nahe der vollständigen Füllung. Zum Zeitpunkt  $t_{AB}$  sind Werte möglich, welche in der Idealposition mit Werten des FF von 99,8% bzw. 99,7% als vollständige Füllung bezeichnet werden können. Die Streuungen bei Studie  $S_{Pos}$  3 liegen mit -3,1% zum Zeitpunkt  $t_A$  in einem Bereich, der hinreichend klein ist und entwickelt sich zu einem Betrag der nahe 0% liegt. Für das Konzept hinter Studie  $S_{Pos}$  4 ist zum Zeitpunkt  $t_A$  noch eine Streuung von bis zu -10% möglich. Diese verringert sich zu einem Wert von -2,6% bei  $t_{AB}$ .



**Abb. 5-9:** Vergleich der versch. Studien bezüglich entstehender Porenfläche bei  $t_{Ab}$

Die Werte des FF nehmen bei Studie  $S_{Pos}$  3 und 4 Werte an, die eine vollständige Füllung annähernd möglichen machen. Aus diesem Grund wird die Betrachtung von einem prozentualen Wert auf einen absoluten Wert, der Porenfläche, durchgeführt. In Abb. A-3 und Abb. A-4 ist ersichtlich, dass sich beim Konzept hinter Studie  $S_{Pos}$  3 immer eine Pore nahe des Auslasses bildet. Für das Konzept hinter Studie  $S_{Pos}$  4 bilden sich zwei Poren, welche sich mit Positionsabweichung deutlich in den Bauteilbereich und lediglich für den Idealfall (mittige Position) nahe dem Auslass ausbilden. In Abb. 5-9 sind die Porenflächen, der jeweils größten Pore dargestellt. Diese Form der

Darstellung zeigt, dass die sich ausbildenden Poren der Konzepte 3 bzw. 4 in der Idealposition (Mittig) sehr geringe absolute Werte annehmen. Werden die induzierten Streuungen mitberücksichtigt, bleibt dies bei Konzept 3 im Wesentlichen erhalten. Bei Konzept 4 wird eine Porenfläche von maximal  $15\text{cm}^2$  erreicht. Dies stellt eine üblicherweise nicht mehr akzeptable Porenfläche dar, was die Sensibilität gegenüber Positionierung dieses Konzeptes aufzeigt.

### 5.3 Diskussion

Die Zusammenfassung der simulativen Untersuchung hinsichtlich der Positionstoleranz ist in zwei Teile untergliedert. Im ersten Teil wird Studie  $S_{Pos}$  1, die Untersuchung der Positionstoleranz bei den durchgeführten Experimenten, diskutiert. Im zweiten Teil werden die Ergebnisse auf ausgewählte Konzepte bezüglich Position des Einlasses und Auslasses diskutiert. Dabei wird das Konzept mit seitlichem Einlass und Auslass als Referenz herangezogen und mit dem Konzept „Einlass und Auslass auf der Preform mit umlaufenden Überpressungsbereich ( $S_{Pos}$  3)“ bzw. „seitlicher Einlass, Auslass auf der Preform ( $S_{Pos}$  4)“ verglichen.

### 5.3.1 Studie zu Positionstoleranzen bei den durchgeführten Experimenten

Um ein Verständnis für die auftretenden Streuungen bei den in Kapitel 3.4 beschriebenen Experimenten aufzubauen, wurden diese simulativ mit Positionsabweichung versehen. Die zu variierenden Parameter sind die Kanalbreite (2mm/ 4mm/ 6mm) und der Faservolumengehalt (48%/ 62%).

Für kleine Kanalbreiten (2mm) ist ein deutlicher Einfluss der Positionierung zu erkennen. Bei einer Kanalbreite von 2mm bedeutet eine Verschiebung um 1mm eine Kanalverkleinerung bzw. -vergrößerung um 50%. Die induzierten Abweichungen in Füllzeit und FF zeigen einen überdurchschnittlichen Einfluss der Positionierung. Bei größeren Kanalbreiten (4 bzw. 6mm) zeigen die Experimente eine geringere Streuung. Diese wird durch die durchgeführten Simulationen in der Zeit bis das Fluid den Auslass erreicht und dem einhergehenden FF bestätigt.

Die aufgetretenen Streuungen in den Versuchen können für kleine Kanalbreiten vollständig durch Positionierungsabweichungen erklärt werden. Für größere Kanalbreiten liegt der Betrag der Streuung der Experimente unter dem der simulierten. Eine Übereinstimmung des Wertebereichs ist teilweise bei den Kanalfüllzeiten vorhanden. Die Unterschiede im Füllbild sind deutlich. Für diese simulierte Betrachtung wurde der in Kapitel 3 für das verwendete Materialsystem optimierte Ansatz basierend auf Modell 6 verwendet. Die induzierten Abweichungen über Positionierung können den Unterschied zwischen Modell und Experiment nicht erklären. Die Abbildung von RT über den Ansatz der Ersatzpermeabilität beschreibt die Realität nicht in hinreichender Aussagegenauigkeit. Exakte Aussagen über das Füllverhalten können nicht getätigt werden. Lediglich der generelle Trend kann abgebildet werden.

Die simulative Nachstellung der in Kapitel 3.4 beschriebenen Experimente im Hinblick auf translatorische Positionsabweichungen von 1mm zeigt, dass die Positionierung einen deutlichen Einfluss auf die Kanalfüllzeit bzw. den einhergehenden Füllfaktor hat. Die Positionierung der Kavität stellt eine wesentliche Ursache für Abweichungen im Prozess dar.

### 5.3.2 Studie zu Positionstoleranzen für verschiedene Einlasskonzepte

In Kapitel 4 wurden Konzepte zu verschiedenen Einlass- und Auslasspositionen untersucht. Das Konzept mit einem Einlass und Auslass kombiniert mit einem Überpresungsbereich (Studie  $S_{Pos\ 3}$ ) und das Konzept „seitlicher Einlass mit zentraler Position des Auslasses (Studie  $S_{Pos\ 4}$ )“, wurden hinsichtlich ihrer Positionstoleranz untersucht. Die beiden Konzepte werden mit der Referenz, dem Konzept der durchgeführten Versuche, mit seitlichem Einlass und Auslass (Studie  $S_{Pos\ 2}$ ) verglichen.

Der wesentliche Unterschied der Konzepte hinter Studie  $S_{Pos}$  3 und 4 zu Studie  $S_{Pos}$  2 ist, dass Fluid vor Erreichen des Auslasses einen Weg durch die Preform nehmen muss und keine direkte Möglichkeit besteht über einen RT- Kanal den Auslass zu erreichen. Der Weg nach dem vollständigen Füllen des RT- Kanals bis zum Auslass ist bei dem Konzept hinter Studie  $S_{Pos}$  3 am längsten bzw. es wird der Fließwiderstand durch einen Überpressungsbereich vergrößert.

Beruhend auf den Betrachtungen hinsichtlich des Zeitpunkts wann Fluid den Auslass erreicht (Abb. 5-5), kann folgende Regel abgeleitet werden, um einheitliche Zeiten zu erhalten:

- Positionierung des Auslasses, wenn möglich, auf die Preform
- Der Abstand zwischen Preformkante und Auslass ist einheitlich und so groß wie möglich zu wählen.
- Eine direkte Verbindung in Form eines Kanals zwischen Einlass und Auslass ist zu vermeiden.
- Ein Überpressungsbereich reduziert mögliche Abweichungen.
- Je länger der Einlasskanal im Verhältnis zur zu tränkenden Strecke bis zum Auslass ist, desto kürzer ist die Zeit bis Fluid den Auslass erreicht.

Die Betrachtung des Zeitpunktes für Druckausgleich  $t_{Ab}$  (Abb. 5-6) zeigt, dass Studie  $S_{Pos}$  2 und 4 annähernd gleiche Zeiten aufweisen während bei Studie  $S_{Pos}$  3 deutlich mehr Zeit benötigt wird. Bei den Konzepten 2 und 4 fungiert der implementierte RT- Kanal als Verteilerkanal, wodurch die geringen Zeiten erklärt werden können. Diese Funktion des RT- Kanals wird bei Konzept 3 durch den Überpressungsbereich reduziert, wodurch die längere Fülldauer erklärt werden kann.

Die mittige Positionierung des Einlasses auf der Preform bei Konzept 4 bewirkt geringere Streuung in Bezug auf die finale Füllzeit. Die Funktion des umlaufenden RT- Kanals als Verteiler wird durch die Positionsabweichung unwesentlich gestört. Bei Konzept 3 ist die Funktion des RT- Kanals als Verteiler reduziert. Die Fläche, von der die Preform aus getränkt wird, ist reduziert. Positionsabweichungen führen dadurch zu relevanten Abweichungen.

Folgende Regeln lassen sich für die Gestaltung von Einlass und Auslass bzw. zur Reduzierung der Streuung hinsichtlich der Zeit bis zum Druckausgleich ableiten:

- Die Nutzung des RT- Kanals als Verteilerkanal reduziert die Zeit bis zum Druckausgleich.
- Um Streuung beim Zeitpunkt des Druckausgleichs zu vermeiden, muss bei der Nutzung des RT- Kanals als Verteiler Tränkung durch die Preform bis zum Auslass stattfinden.
- Die Positionierung des Auslasses auf der Preform stellt nicht sicher, dass die Zeiten bis zum Druckausgleich einer geringen Streuung unterliegen.

- Das gezielte Positionieren des Auslasses auf der Preform mit einem möglichst großen Abstand zur Preformkante bzw. seitlichem Einlass, kann sowohl die Füllzeit also auch die Streuung deutlich reduzieren.

Die Betrachtung des finalen FF bei  $t_{Ab}$  zeigt, dass das Referenzkonzept „seitlicher Einlass bzw. Auslass“ keine relevanten Werte erreicht. Dazu unterliegt es einer deutlichen Streuung. Der finale FF bei  $t_{Ab}$  für die Konzepte 3 und 4 erreicht Werte nahe der 100%. Es zeigt sich, dass je höher der FF bei Erreichen des Auslasses ist, desto größer der finale FF bzw. desto geringer die möglichen Streuungen. Das Konzept 3 erreicht den höchsten FF bzw. die geringsten Streuungen hinsichtlich dessen. Die Betrachtung der sich ergebenden maximalen Porenfläche zeigt, dass das Konzept 3 die geringsten Werte bzw. Streuungen aufweist.

Gemäß Airbus Prozessspezifikation 80-T-31-2910 die maximale Porenfläche mit  $3\text{mm}^2$  bei einer Tiefe von maximal  $0,1\text{mm}$  definiert. Mit den gewählten Prozessparametern kann keines der betrachteten Konzepte dies erreichen. Über Maßnahmen wie Druckniveau in der Kavität während der Injektion (Vakuumlevel) bzw. beim Aushärten kann Konzept 3 bzw. 4 diese Werte erreichen (vgl. Kapitel 4.5).

Folgende Regeln lassen sich aus den Betrachtungen bezüglich FF ableiten.

- Ein Konzept, bestehend aus seitlichem Einlass und Auslass, zeigt bei der hier gemachten Betrachtung eine unzureichende Füllung.
- Umlaufende Überpressungsbereiche mit Einlass und Auslass auf der Preform positioniert, führen zum höchsten finalen FF bei einer deutlichen Reduzierung der möglichen Abweichungen beim Füllbild.
- Ein seitlicher Einlass in Kombination mit einem Auslass auf der Preform funktionalisiert den RT- Kanal als Verteiler und kann zu einem ausreichend hohen FF führen. Dabei können Verschiebungen der Preform im Werkzeug bei zu klein gewähltem RT- Kanal zu Poren mit nicht akzeptablem Volumen führen.



## 6 Hybridmatrixantritt

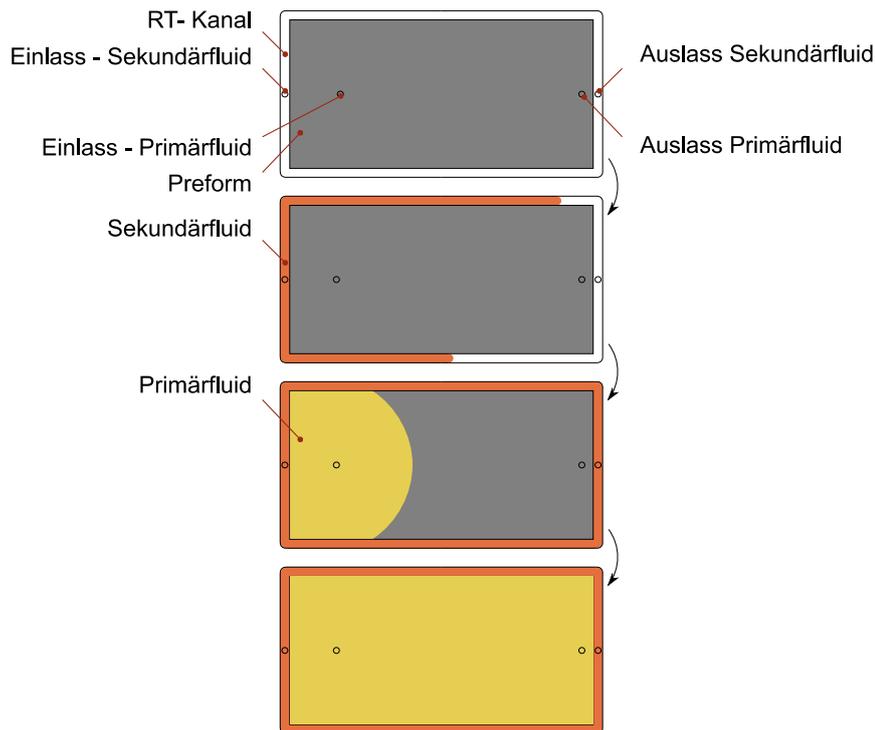
Die in Kapitel 3 bis 5 beschriebenen Untersuchungen haben gezeigt, dass einerseits RT ein Effekt ist, welcher bei den Betrachtungen von Füllprozessen mit berücksichtigt werden muss, andererseits dieser Effekt als Ursache von Abweichungen im Füllbild gilt, da bei leichter Positionsabweichung der Preform in der Kavität deutliche Änderungen im Füllbild beobachtet werden können. Als Konsequenz daraus wird ein Verfahren gesucht, welches eine reduzierte Anfälligkeit auf Fehler zeigt. In Kapitel 2.3.3 werden verschiedene Möglichkeiten beschrieben, in welcher Form mit RT umgegangen werden kann. In diesem Kapitel wird der Hybridmatrixansatz vorgestellt, um die Auswirkungen von RT soweit wie möglich zu verringern.

Die hier dargestellten Ergebnisse sind mit Unterstützung der studentischen Arbeiten von Patrick Steib, Bastian Behrens, Barbara Lang und Felix Nusser entstanden [96, 118, 141, 142, 148, 149].

### 6.1 Grundprinzip

Die experimentellen Untersuchungen bzw. die simulative Untersuchung auf die Positionierungsgenauigkeit zeigen, dass ein breiter RT- Kanal eine deutliche Reduzierung der Streuung bei den Zeiten zum Füllen des Kanals erbringt. Diese Aussage steht im Konflikt mit der Möglichkeit, den über RT induzierten Effekt möglichst gering zu halten, indem der Kanal möglichst vermieden wird. Dies stellt einen technischen Widerspruch dar.

Die in [14] und [136] beschriebenen Varianten lösen diesen Widerspruch, indem der Kanal bewusst generiert wird. In einem ersten Injektionsschritt wird der RT- Kanal gefüllt. In einem zweiten Injektionsschritt wird die Preform getränkt. Ziel dabei ist, ein Füllverhalten wie in Abb. 6-1 dargestellt, zu erreichen. Dadurch bleibt der Vorteil eines einheitlichen Füllvorgangs des Kanals erhalten. Nach der vollständigen bzw. teilweisen Aushärtung des Sekundärmaterials der ersten Injektion ist er verschlossen, wodurch die Bedeutung des Kanals für das Füllen der textilen Struktur entfällt.



**Abb. 6-1: Hybridmatrixkonzept zur Vermeidung von RT**

Beim Füllen des Kanals findet über den Querstrom eine Tränkung der Preform statt (vgl. Kapitel 3). Um die Idee der Zweistufeninjektion realisieren zu können, muss dieser Effekt möglichst klein und einheitlich gestaltet werden. Die genaue Definition, in welcher Form das Sekundärmaterial in die Preform eindringen darf, hängt vom Anwendungsfall ab und muss über eine Kostenrechnung nachgewiesen werden [150]. Im ersten Antritt wird die Anforderung gestellt, dass nicht mehr Material, als bei einer klassischen Nachbearbeitung entfernt wird, mit Sekundärmatrix getränkt wird. Damit ergibt sich eine Forderung, dass die Penetration der Preform mit Sekundärmatrix unabhängig von der Länge oder der benötigten Zeit zum Füllen des Kanals  $<5\text{mm}$  liegen muss. In der praktischen Anwendung bedeutet das, dass eine konstante Penetrationstiefe über die Kanallänge diese Anforderung abbildet.

Es bieten sich verschiedene Möglichkeiten die Eindringtiefe zu kontrollieren:

1. Werkzeug/ Performgestaltung
2. Materialverhalten
3. Filtereffekt

Die Reaktivität des Materials kann als weiterer Punkt zur Steuerung der Penetration genannt werden. Für eine zeitliche Optimierung der Injektion des Sekundärmaterials ist das Erreichen des Gelzustands bei Erreichen des Auslasses eine Möglichkeit zur Dimensionierung der Reaktivität. Dieser Fall stellt die untere Grenze dar. Die Untersuchungen zur Positionsabweichung in Kapitel 5.3 haben gezeigt, dass die Zeiten bis der Auslass erreicht wird deutlich schwanken. Die unterschiedlichen Füllzeiten der Kanäle haben

unterschiedliche Penetrationstiefen zur Folge und legen nahe, dass die Zeit auf die die Reaktivität eingestellt wird, auf die Maximale zu verlängern ist. Diese Verlängerung der Zeit bis die Viskosität ansteigt führt zur Reduzierung der Möglichkeiten zur Kontrolle der Penetration. Die Reaktivität ist dem zu Folge eine Größe, die bei den angewendeten Prozessparametern und Rahmenbedingungen (Länge und Breite des Kanals) vollständige Füllung des Kanals gewährleisten muss und damit keine Größe ist, über welche die Penetration gesteuert werden kann.

Wie in Kapitel 4.5 beschrieben, besteht über die Prozessparameter Kavitätsdruck oder Injektionsdruck eingeschränkt die Möglichkeit die Eindringtiefe zu kontrollieren. Dasselbe gilt für die Viskosität unter der Voraussetzung von newtonschem Materialverhalten. Der analytische Antritt aus Kapitel 2.3.2 zeigt, dass das Verhältnis der Permeabilitäten die Eindringtiefe in die Preform definiert. Dies bedeutet, je größer der RT- Kanal, desto geringer die Penetration. Dieser Ansatz besitzt seine Grenze in der Dimension des Werkzeugs bzw. im dafür notwendigen Equipment. Je größer der Kanal, umso größer wird das Werkzeug und damit der Injektionsdruck auf den das Werkzeug bzw. die Presse ausgelegt werden muss. Diese Vergrößerung des Werkzeugs lässt die Investitionskosten steigen.

Im Umgang mit RT wurden in Kapitel 4 lokale Überpressungsbereiche eingeführt, die den Fluss im RT- Kanal mit kontrollieren. Für den Hybridmatrixantritt ist diese Option sehr erfolgsversprechend. Wahlweise kann die Permeabilität im Randbereich über eine Verjüngung der Kavität oder extra eingelegte Lagen reduziert werden. Diese Variante ist über die oben beschriebenen Simulationsmethoden auslegbar. Es bleiben die Eigenschaften des höheren Verschleißes erhalten. Die Abweichungen im Füllbild über eine Abweichung in der Positionierung bzw. im Beschnitt der Preform induziert, bleiben erhalten.

Meier [28] hat gezeigt, dass bei der richtigen Auswahl des Materials bzw. richtiger Temperierung bei vielen reaktiven Kunststoffen scherratenabhängiges Materialverhalten vorliegt. Dies bedeutet, je nach Strömungszustand liegt eine andere scheinbare Viskosität an. Beim Umströmen füllt sich der RT- Kanal, welcher einen deutlich größeren Strömungsquerschnitt besitzt verglichen mit dem Querschnitt beim Füllen eines Textils. Es stellt sich die Frage, in welcher Form ein solches Verhalten zur Kontrolle der Penetration der Preform im ersten Injektionsschritt verwendet werden kann. Bei einer erfolgreichen Umsetzung bietet diese Variante der Penetrationskontrolle die Option die geometrischen Toleranzen der Preform in Beschnitt und Position aufzuweiten.

Bei der Entwicklung von Harzsystemen zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften wird unter anderem Partikelmodifizierung verwendet. [151–156]. Bei der Verarbeitung mit Faserverbundwerkstoffen wird der Effekt beschrieben, dass die Partikel über das Verstärkungstextil ausgefiltert werden [153, 157–159]. Partikel dringen einerseits in das Textil ein, andererseits stauen sich die Partikel vor der Preform am Harzfluss. Das führt dazu, dass die Zufuhr an Matrix zum Textil unterbunden wird. Bei der

klassischen Tränkung von Bauteilen ist dies negativ. Für die Anwendung im Hybridmatrixantritt kann dieser Effekt zur Kontrolle der Penetration der Preform bei der Injektion mit Sekundärmaterial verwendet werden.

Über die Modifizierung des Sekundärmaterials mit Partikeln werden ebenfalls die rheologischen Eigenschaften verändert. In der Rheologie sind kolloide Suspensionen Bestandteile vieler Untersuchungen, da diese Form der Modifizierung scherratenabhängiges Materialverhalten zur Folge haben kann [160–165]. Dies bedeutet, dass in vielen Fällen die beiden Themenstellungen „scherratenabhängiges Materialverhalten“ und der „Filtereffekt“ nicht getrennt betrachtet werden können.

Im Folgenden werden die Grundlagen für beiden Themen, scherratenabhängiges Materialverhalten und Filtration, gelegt und im Hinblick auf den Hybridmatrixantritt zur Penetrationskontrolle vorgestellt. Zur Untersuchung des Filtereffekts werden verschiedene Partikel herangezogen. Über die rheologische Charakterisierung wird fest gestellt in welcher Form scherratenabhängiges Materialverhalten mitberücksichtigt werden muss.

Ziel aller folgenden Betrachtungen für die Anwendung ist den Querstrom des Sekundärmaterials in die Preform soweit zu reduzieren, dass Sperrfiltration auftritt.

## 6.2 Scherratenabhängiges Materialverhalten

Für die Anwendung von Materialien mit scherratenabhängigem Verhalten im Hinblick auf den Hybridmatrixantritt stellen sich verschiedene Fragen. Was für ein Materialverhalten wird für einen positiven Effekt benötigt bzw. welches Material besitzt das entsprechende Verhalten? Dazu wird in diesem Kapitel, nach Einführung in die rheologischen Grundlagen, der Effekt im der Anwendung des Hybridmatrixantritts anhand einer Rohrströmung diskutiert.

### 6.2.1 Rheologische Grundlagen

Für die Simulation von Füllprozessen wird, wie in Kapitel 2.1.1 beschrieben, der Ansatz nach Darcy verwendet. Dabei wird davon ausgegangen, dass das tränkende Fluid newtonschen Verhalten aufweist. Abb. 6-2 dient der Veranschaulichung der rheologischen Parameter. Die untere Platte ist fest, während die obere im Abstand  $h$  mit einer konstanten Kraft  $F$  nach rechts gezogen wird. Zwischen den Platten befindet sich ein homogenes Medium. Durch die Bewegung der oberen Platte bildet sich eine Strömung aus. Unter Berücksichtigung der Randhaftbedingung ist die Geschwindigkeit  $v$  an der unteren Platte null, während sie an der oberen Platte den Betrag der Geschwindigkeit  $v$  der Platte annimmt.

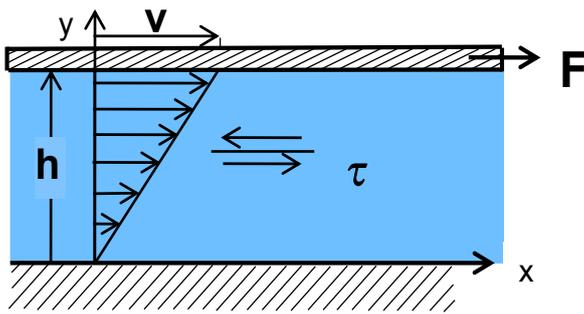


Abb. 6-2: Veranschaulichung der rheologischen Parameter anhand der Analogie einer bewegten Platte gegenüber festem Boden

Ist das Fluid inkompressibel, weist es newtonsches Materialverhalten auf und liegt im Spalt eine laminare Strömung vor, dann zeigt sich die Schubspannung  $\tau$  proportional zum Geschwindigkeitsgradienten über die Höhe des Spalts. Der Proportionalitätsfaktor wird Viskosität genannt und ist ein Maß für die innere Reibung im Fluid [166, 167].

$$\tau_{xy} = \frac{F}{A} = \eta \left( -\frac{dv}{dy} \right) = \eta \dot{\gamma} \quad (6-1)$$

Der Geschwindigkeitsgradient stellt die Scherrate  $\dot{\gamma}$  dar.

Idealviskose, newtonsche Fluide zeichnen sich dadurch aus, dass die gesamte Deformation dissipativ abgebaut wird. Weicht das Verhalten eines Fluides davon ab, bedeutet dies, dass zwischen Schubspannung und Scherrate kein linearer Zusammenhang besteht und ein nicht-newtonsches Fluid vorliegt. Anhand des Verhaltens bezogen auf ein newtonsches Fluid werden die nicht-newtonschen Fluide eingeteilt. Nimmt die Schubspannung gegenüber einem linearen Verhalten zu, spricht man von dilatantem bzw. scherverdickendem Materialverhalten. Nimmt die Schubspannung ab, spricht man von strukturviskosem bzw. scherverdünnendem Verhalten. Wird zum Beginn des Fließens eine Schubspannung benötigt, liegt ein Bingham-Fluid vor. Abb. 6-3 und Abb. 6-4 verdeutlichen die Unterteilung.

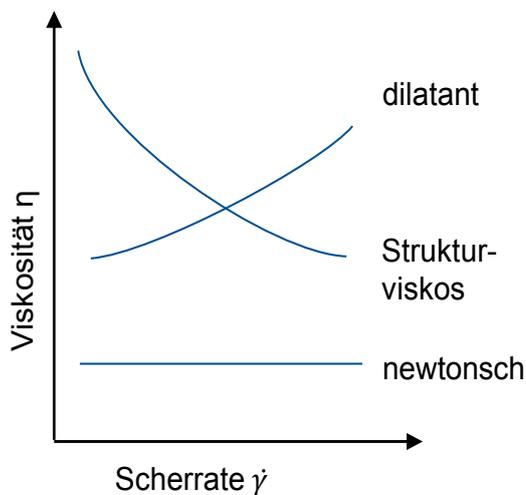


Abb. 6-3: Viskosität über Scherrate

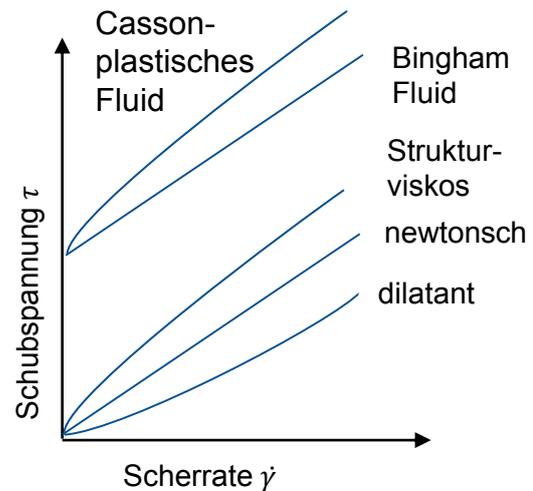


Abb. 6-4: Schubspannung über Scherrate

Langkettige Polymere zeigen oft aufgrund von Entschlaufungsvorgängen bei steigender Schubbelastung bzw. Scherrate nicht newtonsches Verhalten. Bei niederen Scherraten sind Ent- und Verschlaufungsvorgänge im Gleichgewicht. Es gilt, je länger die Molekülketten, desto breiter das Plateau der Viskosität bei Anstieg der Scherrate bevor die Entschlaufungsvorgänge dominieren und die Viskosität sinkt. Nach vollständiger Ausrichtung der Ketten stellt sich wieder eine konstante Viskosität ein. [166–168]

Dispersionen, also heterogene Gemische aus mindestens zwei Stoffen, die sich nicht bzw. nur schwer ineinander lösen, sind eine weitere Materialgruppe, die oft scherverdünnendes Materialverhalten zeigt. Je nach Partikelgröße wird die molekulare, die kolloidale und die grob disperse Lösung unterschieden. Mit steigender Scherrate lösen sich Agglomerate auf bzw. Plättchen, Fasern und Partikel richten sich entlang der Scherrichtung aus. Damit reduzieren sich die Wechselwirkungen zwischen Partikel und kontinuierlicher Phase und damit der Fließwiderstand. Wichtige Einflussgrößen sind Partikelverteilung, Oberflächenbeschaffenheit, Form und Größe des Füllstoffs. [166, 169]

Das scherverdünnende Materialverhalten für klassische Matrixsysteme ist von Meier [28] untersucht worden. Es zeigt sich, dass klassische Materialsysteme bei Überschreitung einer Grenztemperatur newtonsches Verhalten aufweisen. Schlagzähmodifizierte Systeme, wie sie aktuell für die Luftfahrt entwickelt werden, verwenden oft eine Partikelmodifizierung und es liegt, über die vorgeschlagenen Prozesstemperaturen hinaus, scherratenabhängiges Materialverhalten vor. Viele der untersuchten Materialsysteme zeigen bei niederen Scherraten Scherverdünnung. Davon leitet sich ab, dass für langsame Tränkungsprozesse scherratenabhängiges Materialverhalten relevant sein kann.

Für simulative Untersuchungen muss ein Modell zur Abbildung des scherratenabhängigen Materialverhaltens verwendet werden. Aus der Literatur stehen mehrere Modelle, wie das Potenzgesetz nach Ostwald und de Waele, das Modell nach Bird-Carreau-Yasuda bzw. Herschel-Bulkley, zur Verfügung [166, 167].

Ziel der hier durchgeführten Betrachtungen ist das generelle Materialverhalten bewerten zu können um auf diese Weise entschieden zu können ob dieses Verhalten berücksichtigt werden muss. Für die folgenden analytischen Überlegungen wird das einfachste Modell nach Ostwald und de Waele herangezogen.

$$\eta = m(\dot{\gamma}_{xy})^{n-1} \quad (6-2)$$

Über den Konsistenzkoeffizienten  $m$  wird das Niveau der Viskosität adaptiert. Der Fließ- oder „Power- Law“ Index  $n$  definiert, welches Materialverhalten vorliegt. Für  $n=1$  liegt newtonsches, für  $n < 1$  scherverdünnendes und für  $n > 1$  scherverdickendes Verhalten vor. Über dieses Modell ist es nicht möglich, das Newtonsche Plateau nachzubilden.

## 6.2.2 Analytische Betrachtung

Eine textile Preform besitzt eine komplexe geometrische Gestalt. Eine realistische Abschätzung der Tränkungsvorgänge ist auf analytische Weise nicht möglich. Um trotzdem das Ziel zu erreichen, die Scherraten im RT- Kanal bzw. Textil abzuschätzen, wird die Geometrie auf ein einfaches Rohr reduziert. Dadurch wird eine analytische Betrachtung möglich, wobei eine Abweichung zur Realität vorhanden ist. Die Strömung im Kanal kann analytisch betrachtet werden. Der größte Teil der Abweichung zur Realität wird über die Vereinfachung auf der Seite der Preform eingebracht. In einer textilen Struktur liegen eine Vielzahl an Strömungsquerschnitten vor. Dazu geht die Strömung nicht einen geraden, sondern einen komplexen dreidimensionalen Weg. Dadurch wird erwartet, dass die Strömungsgeschwindigkeiten in der Preform über eine Abbildung einer Rohrströmung einen zu großen Wert ergeben.

Das Geschwindigkeitsprofil  $v_r$  über den Radius  $r$  in einer Rohrströmung in einem Rohr mit dem Radius  $R$  unter Beachtung des Gesetzes von Ostwald de Waele ergibt sich zu [167]:

$$v_r = \left( \frac{n}{n+1} \right) \left( -\frac{\Delta p R}{mL 2} \right)^{\frac{1}{n}} R \left\{ 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^{n+1/n} \right\} \quad (6-3)$$

$L$  stellt hier die Länge des Rohres dar. Über die in Gleichung (6-1) errechnet sich die Scherratenverteilung damit zu:

$$\dot{\gamma}_{rz} = \left( -\frac{\Delta p 1}{mL 2} r \right)^{\frac{1}{n}} \quad (6-4)$$

In Gleichung (6-4) entfällt über das Differenzieren der Radius  $R$  des Rohres. Dies bedeutet, dass keine Korrelation der Scherrate mit dem Rohrdurchmesser vorliegt. Die maximale Scherrate liegt immer an der Rohrwand an. Je größer der Durchmesser des Rohres, desto größer die maximale Scherrate bei gleicher Druckdifferenz. Je länger die Fließlänge  $L$ , desto geringer wird die maximale Scherrate.

Für die analytische Betrachtung wird eine gemittelte Scherrate über den Rohrquerschnitt über die Gleichsetzung der Volumina berechnet.

$$\dot{\gamma}_m = \frac{1}{2n+1} \left( -\frac{R\Delta p 1}{mL 2} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (6-5)$$

Liegt für die Injektion immer eine konstante Druckdifferenz an, kann die mittlere Scherrate für jede Position der Fließfront im Rohr berechnet werden. Je länger der Fließweg ist, desto geringer ist die sich entwickelnde Scherrate. Für eine Fließindex  $n < 1$  wird der Exponent größer eins, was bedeutet, dass scherverdünnendes Materialverhalten gegenüber scherverdickendem größere Scherraten generiert.

Um den Zusammenhang zur Betrachtung für RT darzustellen wird der in Kapitel 2.3.2 beschriebene Ansatz angepasst. Dabei wird für die Bereiche Kanal und Textil jeweils eine eigene Viskosität angenommen. Es ergibt sich eine Penetration des Sekundärmaterials am Einlass zum Zeitpunkt, wenn Material den Auslass über den RT- Kanal erreicht.

$$x_f(t) = l_k \sqrt{\frac{K_{Px}}{K_{Kl}(1 - V_f)}} \sqrt{\frac{\eta_{Km}}{\eta_{Pm}}} \quad (6-6)$$

$\eta_{Km}$  ist die gemittelte Viskosität über die Kanallänge  $l_k$ ,  $\eta_{Pm}$  die gemittelte Viskosität über die Fließlänge in der Preform.

Die Formel zeigt, dass die Scherratenabhängigkeit von der Wurzel aus dem Quotienten der beiden Viskositäten abhängt. Für newtonsches Materialverhalten wird der Quotient zu eins und man erhält die Formel aus Kapitel 2.3.2. Um die Penetration am Einlass zu verringern, muss die gemittelte Viskosität über die Fließlänge im Kanal geringer sein als die, welche sich in der Preform einstellt. Zieht man Gleichung (6-5) in die Betrachtung mit ein, ergibt sich die Tatsache, dass mit steigendem Rohrradius größere mittlere Scherraten erreicht werden. Der Radius, welcher den RT- Kanal repräsentiert, ist größer als der Radius, welcher das Textil repräsentiert. Da an beiden Bereichen dieselbe Druckdifferenz anliegt und damit im Rt- Kanal eine höhere Scherrate auftritt, folgt daraus, dass scherverdünnendes Materialverhalten angestrebt wird um Penetration zu verringern.

## 6.3 Grundlagen der Filtration

In diesem Unterkapitel werden die notwendigen Grundlagen zum Verständnis des Filtereffekts, der durch eine textile Preform entsteht, vorgestellt. Es wird die verwendete Definition von Filtration vorgestellt und diskutiert.

Nach Kraume [168] versteht man unter Filtration das nassmechanische Abtrennen von dispergierten Feststoffen aus Suspensionen bzw. das Abtrennen von Stäuben und Aerosolen aus Gasen. Für diese Arbeit ist das Filtern von Suspensionen relevant weshalb auf die Beschreibung von Gasen im Folgenden verzichtet wird.

Als Filtermedium werden poröse Medien bezeichnet. Poren entsprechen Hohlräumen bzw. Lücken, die eine spezifische Geometrie bzw. spezifisches Volumen besitzen. Über Poren bilden sich Strömungskanäle durch den Feststoff. Als Lückengrad bzw. Porosität  $\varepsilon$  bezeichnet man den Quotienten aus Porenvolumen  $V_{Poren}$  und Filtervolumen  $V_{gesamt}$ .

$$\varepsilon = \frac{V_{Poren}}{V_{gesamt}} \quad (6-7)$$

Es kommen Medien mit einer Porengröße von einigen  $\mu\text{m}$  bis zu mm zum Einsatz. Feststoffschüttungen aus Sand bzw. Kies als auch faserige Vliesstoffe sind typische Filtermaterialien. Die Wahl des Mediums hängt davon ab, welche Partikelgröße gefiltert wird (Tab. 6-1). [168, 170, 171]

**Tab. 6-1: Einteilung der Filtration nach Partikelgröße**

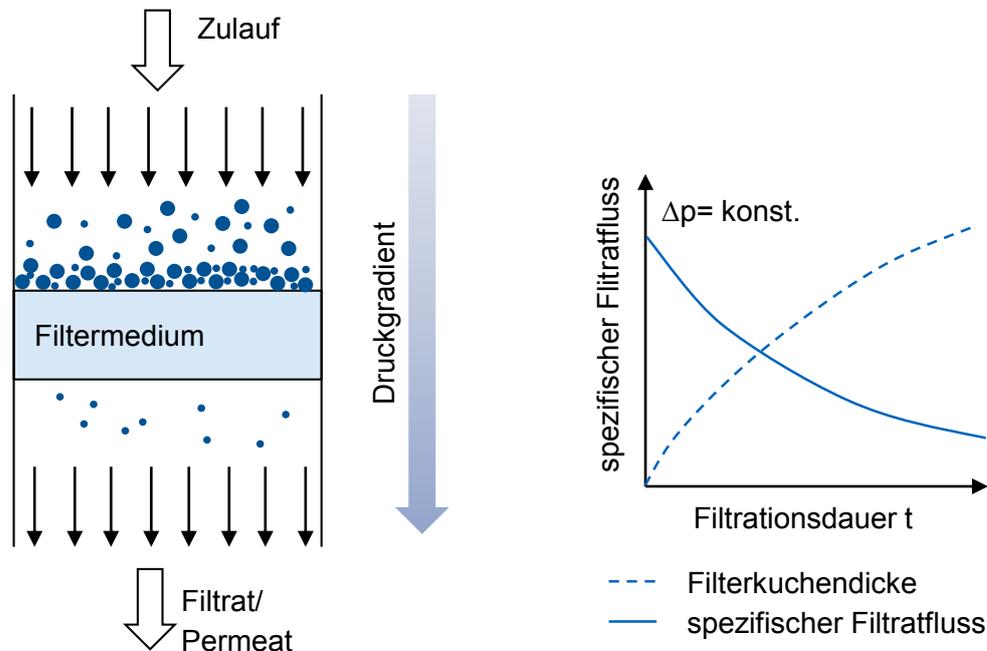
Partikelgröße	Bezeichnung
<2nm	Umkehrosmose
0,75-9nm	Nanofiltration
5-180nm	Ultrafiltration
72nm-14 $\mu\text{m}$	Mikrofiltration
>5,5 $\mu\text{m}$	Filtration

Ziel der klassischen Filtration ist eine vollständige Trennung von flüssiger Phase und Partikel. Bei einem technischen Filterprozess sind immer drei Partner beteiligt. Die Suspension, das Filtrat und ein Feststoff in Partikelform. Die Suspension, als heterogenes Stoffgemisch, besteht aus Fluid und Feststoffpartikel [172]. Die Suspension stellt das

Ausgangsprodukt dar. Unter Filtrat versteht man die Flüssigkeit, von der die Partikel entfernt wurden. Im Idealfall sind keine Partikel mehr in der Flüssigkeit. Je nach Anwendung werden die Feststoffpartikel (Rückstandsfiltration), das Filtrat (Klärfiltration) oder beide Komponenten (Scheidefiltration) benötigt.

Um filtrieren zu können, muss die Suspension durch das Filtermedium „gepresst“ werden. Zur Erzeugen des Druckgefälles stehen vier Optionen zur Verfügung: die Schwerkraft, ein Überdruck beim Zufluss, ein Unterdruck nach dem Filter und die Zentrifugalkraft.

Abb. 6-5 zeigt schematisch den Ablauf der Filtration einer Suspension. In der Suspension befinden sich Partikel unterschiedlicher Größe. Über das Druckgefälle wird das Filtermedium senkrecht angeströmt. Aufgrund des Porendurchmessers verbleiben die größeren Partikel auf dem Filtermedium, während kleinere passieren und im Filtrat verbleiben.



**Abb. 6-5:** Schematische Darstellung einer Filtration

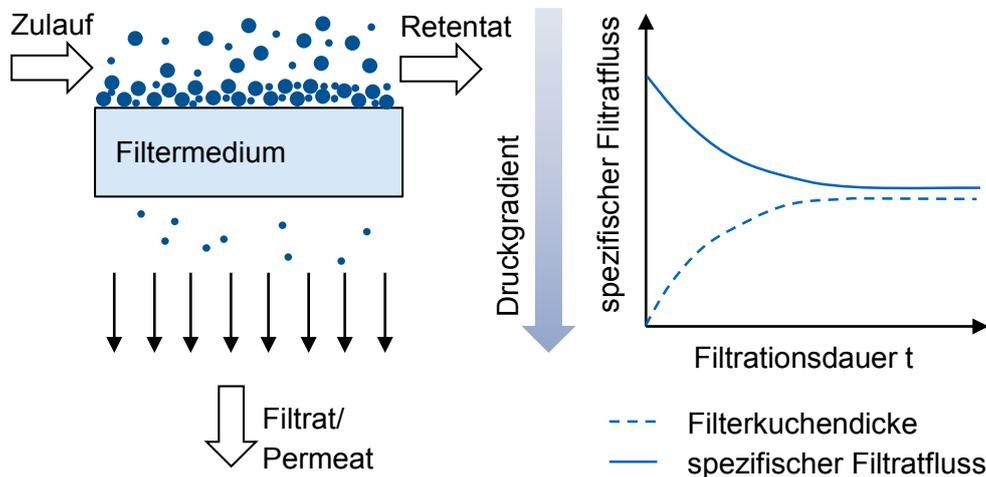
**Abb. 6-6:** Schematische Darstellung der Filterkuchendicke bzw. des Filtratflusses mit der Filtrationszeit [168]

Verbleiben alle Partikel an der Oberfläche des Filters spricht man von einer Oberflächenfiltration. Den Filter verlässt reines Filtrat. Es baut sich eine Partikelschicht auf dem Filter auf, welche mit der Zeit an Höhe zunimmt. Diese Schicht an Partikeln wird Filterkuchen genannt, weshalb die Oberflächenfiltration auch als Kuchenfiltration bezeichnet wird [168]. Über den wachsenden Filterkuchen erhöht sich der Fließwiderstand, wodurch sich der Filtratfluss bei gleichbleibend anliegender Druckdifferenz reduziert (Abb. 6-6). Kommt es zu vollständigem Stillstand, spricht man von einer Sperrfiltration [171].

Ist die Anströmrichtung wie in Abb. 6-5 dargestellt senkrecht zum Filtermedium wird dies als „Dead-End“ Filtration bezeichnet. Bei einer Anströmung parallel zum Filtermedium, wird der Filter „überströmt“, wird dies als Querstromfiltration bezeichnet. Der Suspensionsstrom ist senkrecht zum Filtratstrom (Abb. 6-7).

Bei der Querstromfiltration treten Scher- und Auftriebskräfte an der Filteroberfläche auf. Die sich als Filterkuchen abgelagerten Partikel werden durch den Suspensionsstrom wieder mitgerissen weshalb sich nur eine dünne Schicht an Partikeln ausbildet, die im

Idealfall eine konstante Dicke annimmt. Es stellt sich eine konstante Strömungsgeschwindigkeit ein (Abb. 6-8). Nach Tien [170] ist ein Einsatz bei hochgefüllten Suspensionen möglich.



**Abb. 6-7:** Schematische Darstellung einer Querstromfiltration

**Abb. 6-8:** Schematische Darstellung der Filterkuchendicke bzw. des Filtratflusses mit der Filtrationszeit für die Querstromfiltration

Im Abb. 6-5 und Abb. 6-7 dargestellten Fall werden die größeren Partikel vor dem Filter separiert. Kleinere Partikel durchströmen den Filter. Dies legt nahe, dass Partikel auch im Filter aufgehalten werden. In diesem Fall spricht man von Tiefenfiltration.

Bildet sich bei einer Oberflächenfiltration ein Filterkuchen, stellt dieser selbst ein Filtermedium dar, welches kontinuierlich wächst. In Abhängigkeit der abgesetzten Partikel kann dieser Filterkuchen auch kleinere Partikel mit separieren.

### 6.3.1 Zusammenhänge bei der Oberflächenfiltration

Die analytische Beschreibung gibt einen Zusammenhang zwischen Filtratvolumenstrom, Filterkuchendicke, Filterfläche, der angelegten Druckdifferenz und der spezifischen Eigenschaften des Filters. In der Literatur findet man diesen Zusammenhang oft unter dem Namen Filtergleichung [168, 173]. Um diese herzuleiten sind verschiedene Annahmen notwendig:

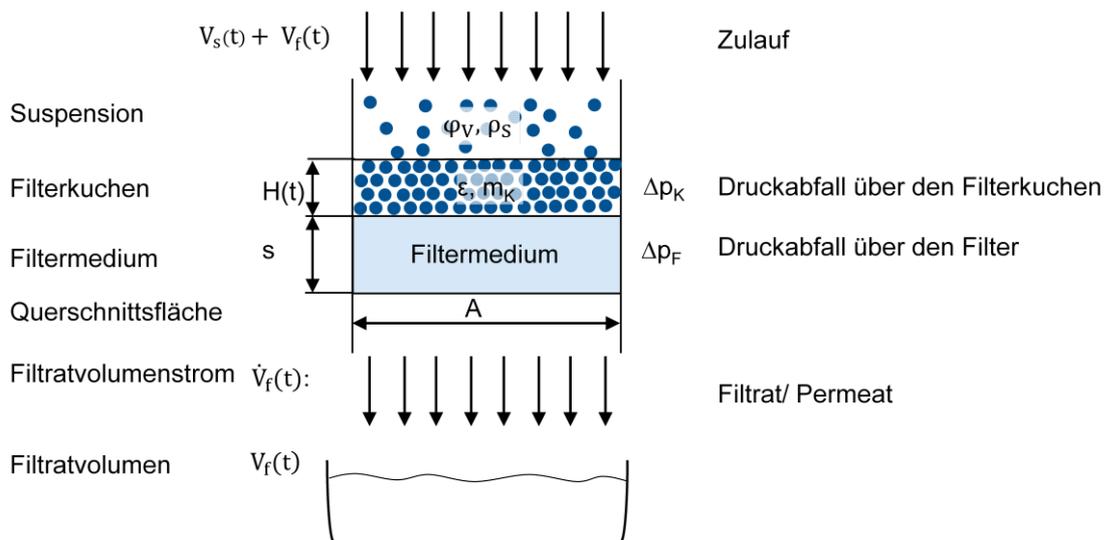
- Die Zusammensetzung der Suspension (Konzentrationen  $\varphi_V$ , Dichte  $\rho_S$ ) bleibt zeitlich und örtlich konstant.

$$\varphi_V = \frac{V_S(t)}{V_S(t) + V_f(t)} = \text{konst.} \quad \rho_S = \frac{m_S(t)}{V_S(t) + V_f(t)} = \text{konst.} \quad (6-8)$$

	$V_S(t)$	Suspensionsvolumen
Mit:	$V_f(t)$	Filtratvolumen
	$m_S(t)$	Suspensionsmasse

- Es findet reine Oberflächenfiltration statt. Im Filtrat sind keine Partikel vorhanden. Partikel lagern sich am Filter bzw. der angelagerten Schicht ab.
- Die sich aufbauende Schicht, der Filterkuchen, hat eine homogen, isotrope Struktur und ist inkompressibel ( $\varepsilon = \text{konstant}$ ). Es findet keine Sedimentation statt.
- Die Durchströmung des Filters bzw. des Filterkuchens ist laminar.

Zur Herleitung der Filtergleichung wird die in Abb. 6-9 beschriebene Nomenklatur verwendet.



**Abb. 6-9: Definition der Nomenklatur zur Filtergleichung**

Über das Gesamtsystem entsteht ein Druckabfall der sich aus dem Druckabfall am Filterkuchen  $\Delta p_K(t)$  und am Filtermedium  $\Delta p_{FM}(t)$  zusammensetzt.

$$\Delta p = \Delta p_K(t) + \Delta p_{FM}(t) \quad (6-9)$$

Der Druckabfall am Filter ergibt sich aus folgender Gleichung:

$$\Delta p_F(t) = \eta \beta \frac{1}{A} \frac{dV_f}{dt} \quad (6-10)$$

Dabei ist  $\beta$  der Filtermediumwiderstand, welcher dem Kehrwert der Permeabilität darstellt. Damit ist Gleichung (6-10) eine abgewandelte Darstellung des Gesetzes von Darcy in der eindimensionalen Version. Die Permeabilität wird im Fachgebiet Filtration auch als Durchlässigkeit bezeichnet.

Für den Filterkuchen ergibt sich:

$$\Delta p_K(t) = \eta \alpha_v \chi_v \frac{V_f(t)}{A^2} \frac{dV_f}{dt} \quad (6-11)$$

$\alpha_v$  ist der Filterkuchenwiderstand.  $\chi_v$  ist der Quotient aus Filterkuchenvolumen  $V_k$  und Filtratvolumen  $V_f$  ( $\chi_v = \frac{V_k(t)}{V_f(t)} = \text{konst.}$ ). Er wird als konstant angenommen, was mit der Annahme, dass kein Partikel in den Filter hineinströmt, begründet ist.

Die Durchlässigkeit bzw. die Permeabilität  $K$  des Filterkuchens sind von der Porosität der entstehenden Schicht abhängig.

$$K(\varepsilon) = \frac{1}{2k(\varepsilon)} * \frac{\varepsilon^3}{(1-\varepsilon)^2} * \frac{1}{a_p^2} \quad (6-12)$$

$a_p$  ist die spezifische Oberfläche der Partikel, bestehend aus dem Quotienten aus Oberfläche des Partikels zum Volumen.

$$a_p = \frac{A_p}{V_p} = \frac{3}{r_p} = \frac{6}{d_p} \quad (6-13)$$

Zur Auslegung wird für Suspensionen für  $d_p$  oft der Sauterdurchmesser  $d_{32}$  herangezogen. Dabei wird davon ausgegangen, dass in jeder Suspension die Partikel einer Streuung unterliegen. Wenn Partikel mit gleichem Durchmesser das gleiche Volumen einnehmen und in Summe die gleiche Oberfläche aufweisen wie die Suspension, haben die Partikel den Sauterdurchmesser.

Der gesamte Druckabfall bei der Kuchenfiltration ergibt sich aus den Gleichungen (6-9) bis (6-11). Es ergibt sich die Filtergleichung.

$$\Delta p(t) = \frac{\eta}{A} \left\{ \frac{\alpha_v \chi_v}{A} V_f(t) + \beta \right\} \frac{dV_f}{dt} \quad (6-14)$$

Für eine konstant angelegte Druckdifferenz zwischen Filtrat und Suspension und der Randbedingung  $V_f(t=0) = 0$  erhält man:

$$V_f(t) = \sqrt{\left( \frac{\beta A}{\alpha_v \chi_v} \right)^2 + \frac{2 A^2 \Delta p}{\eta \alpha_v \chi_v} t} - \frac{\beta A}{\alpha_v \chi_v} \quad (6-15)$$

Durch Differenzieren erhält man den Volumenstrom  $\dot{V}_f$

$$\frac{dV_f(t)}{dt} = \dot{V}_f(t) = \left( \left( \frac{A\beta}{\alpha_v \chi_v} \right)^2 + t \frac{2\Delta p A^2}{\eta \alpha_v \chi_v} \right)^{-\frac{1}{2}} \frac{\Delta p A^2}{\eta \alpha_v \chi_v} \quad (6-16)$$

### 6.3.2 Zusammenhänge bei der Tiefenfiltration

Bei der Tiefenfiltration dringen Partikel in das Filtermedium ein und verbleiben im Filtermedium. Damit ein Eindringen möglich ist müssen die Partikel kleiner sein als die Poren des Filtermediums. Die Partikel im Filter werden durch unterschiedliche Transportvorgänge an die Oberfläche des Filtermediums geführt. Es wird zwischen drei verschiedenen Mechanismen unterschieden.

- Der Sperreffekt: Durch den Verlauf der Stromlinien werden Partikel direkt an die Oberfläche geführt.
- Sedimentation: Partikel sedimentieren an die Filteroberfläche.
- Über die Brownsche Molekularbewegung bewegen sich Partikel an die Filteroberfläche.

Verantwortlich für die Haftung der Partikel sind Van der Waals bzw. elektrostatische Aufladungskräfte. Durch die Haftung wird der Partikel von der Suspension getrennt. Da die Partikel geometrisch kleiner sind als die Poren des Filtermediums, verringert sich lediglich die Konzentration an Partikel. Eingesetzt wird die Tiefenfiltration bei sehr geringem Partikelanteil, da sich die Filtereigenschaften durch die verbleibenden Partikel mit der Zeit ändern.

### 6.3.3 Zusammenfassung der Filtereigenschaften:

In Tab. 6-2 werden die Eigenschaften der verschiedenen Filtrationsprinzipien gegenübergestellt.

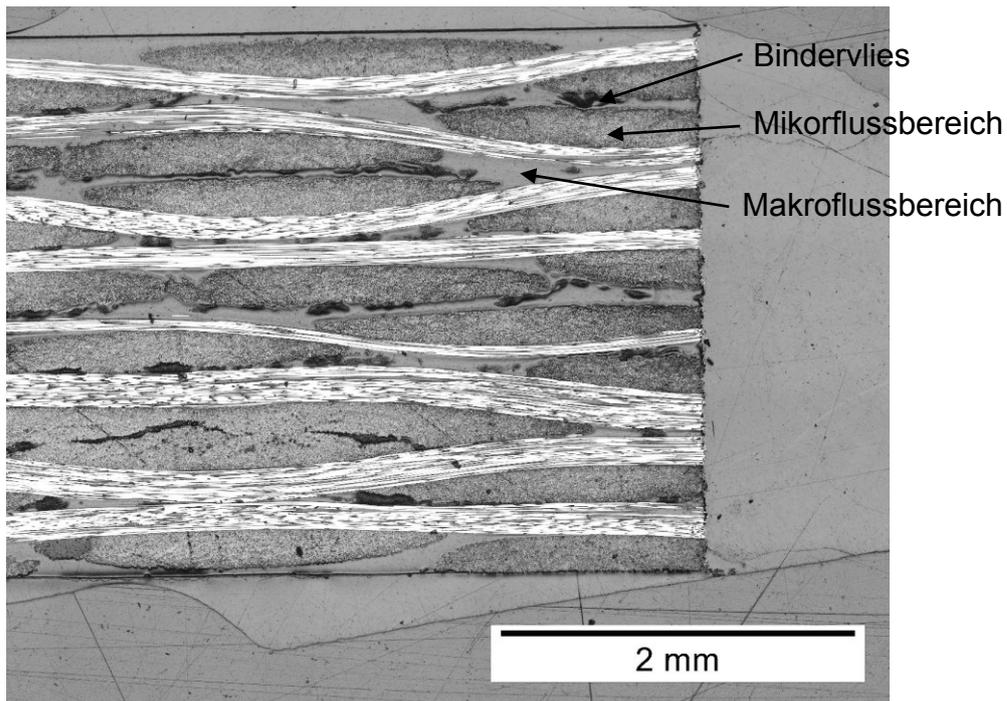
**Tab. 6-2: Vergleich verschiedener Filtrationsprinzipien [149]**

<b>Filtrationsprinzip</b>	<b>Oberflächenfiltration</b>		<b>Tiefenfiltration</b>
Synonyme	Kuchenfiltration		-
Bezeichnung			
Englische Bezeichnungen	Surface Filtration		Deep Bed Filtration
Ort der Partikelabscheidung	Cake Filtration		Depth Filtration
Betriebsmodus	An der Oberfläche des Filtermediums und auf dem Filterkuchen	Im Filtermedium	
	Dead End Filtration	Querstromfiltration	Suspension fließt durch das Filtermedium
	Suspension fließt durch das Filtermedium	Suspension fließt entlang der Oberfläche des Filtermediums	
Effekt	Aufbau eines Filterkuchens aus den gefilterten Partikeln	Kein/geringer Aufbau eines Filterkuchens	Ablagerung der Partikel im Filtermedium
Anwendungsbereich	Geringe Partikelkonzentration in der Suspension	Hohe Partikelkonzentration in der Suspension	Geringe Partikelkonzentration in der Suspension

## 6.4 Die Preform als Filtermedium

In Kapitel 6.1 wird das Prinzip der Hybridmatrixprozessierung zur Vermeidung von RT beschrieben. Als zielführende Variante wird der Filtereffekt verwendet, um die Penetration der Preform zu kontrollieren bzw. so gering und einheitlich wie möglich zu gestalten. In diesem Kapitel werden die Eigenschaften der Preform in Bezug zu den Filtereigenschaften herausgestellt. Das Ziel dabei ist ein „Verständnis des Filtermediums“ um eine sinnvolle Dimensionierung der Partikel in der Suspension durchführen zu können.

Die Herstellung der verwendeten Preforms entspricht den in Kapitel 2 bis 5 verwendeten. Als Textil wird von Hexcel G0926 D 1304 TCT in Kombination mit dem Bindervlies TecWeb® ABE verwendet. Als Zielfaservolumengehalt werden 56,4% angestrebt. Dazu werden acht Lagen Textil mit sieben Lagen Bindervlies zu einer Preform konsolidiert. Ein Beispiel der textilen Struktur ist im Schliff in Abb. 6-10 dargestellt. In [69, 70, 174] wird bei der Tränkung eines Textils in Mikro und Makrobereiche (Intratow- und Intertowflow) unterteilt. Diese Bereiche lassen sich als Tränkung im Roving bzw. zwischen dem Roving beschreiben, was deutlich in Abb. 6-10 zu erkennen ist. Sie sind beispielhaft markiert. Das Bindervlies bleibt bei der gewählten Materialkombination erhalten und löst sich nicht wie in anderen Matrixsystemen auf [175, 176].



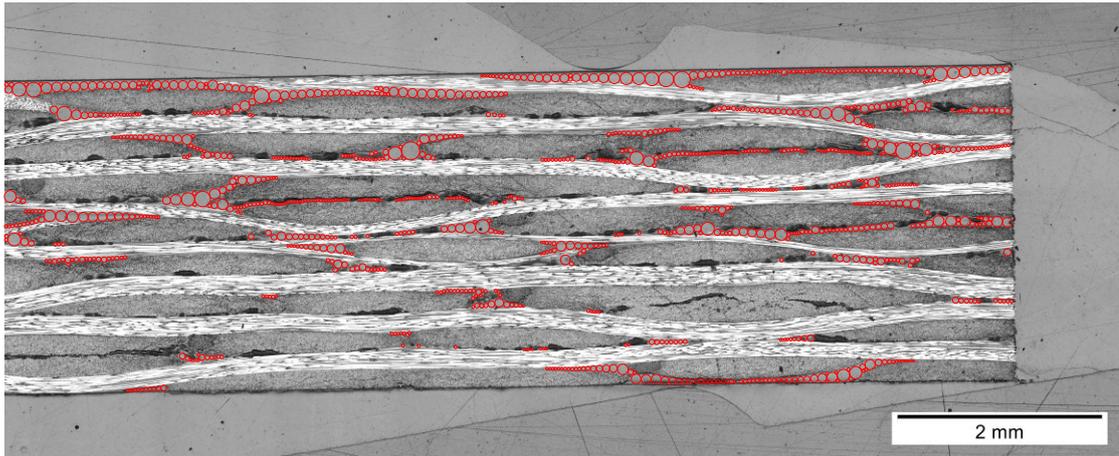
**Abb. 6-10: Mikro/ Makroflussbereiche in einer Preform**

Im Roving selbst liegen die Filamente eng beieinander. Zwischen den Rovings ist deutlich Raum zu erkennen. Wird der Faservolumengehalt weiter erhöht, werden sich zunächst die Räume zwischen den Rovings deutlich verkleinern.

Bei der Umströmung wird die Preform seitlich angeströmt. Die Beschnittkante der Preform stellt die Oberfläche des Filtermediums dar. Die Struktur der Oberfläche entspricht der in Abb. 6-10 dargestellten. Zur Charakterisierung der Preform als Filter kann die Mikro- Makroaufteilung wieder herangezogen werden. In einem ausgewählten Bereich werden die Zwischenräume als Porengröße charakterisiert. Über diese Betrachtung erhält man folgende bereichsspezifische Aussagen:

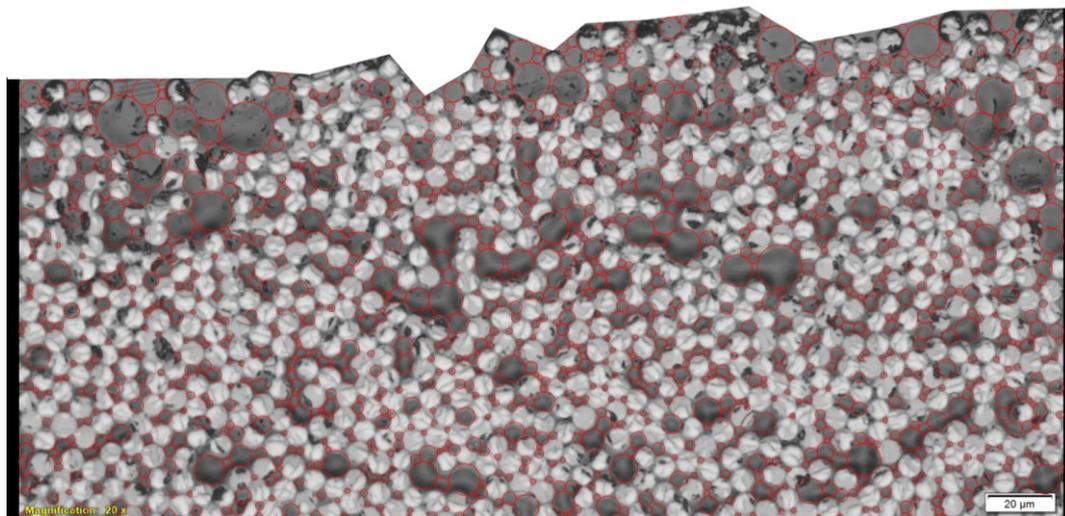
- Anzahl der Poren pro Fläche
- Flächenverteilung der Poren pro betrachteter Fläche

Zur Analyse wird ein Schlibfbild herangezogen. Angelehnt an die Form eines idealen Partikels, werden Kreise in dem entsprechenden Bereich angepasst, so dass sie die Hohlräume ausfüllen. Der jeweilige Kreis wird mit maximaler Größe eingepasst. Dabei tritt keine Überschreitung des Kreises mit den Rovings auf. Längliche Poren werden mit mehreren Kreisen nebeneinander und möglichst kleinem Abstand abgebildet. In Abb. 6-11 ist das ausgewertete Schlibfbild für den Makrofluss dargestellt. Die Geometrie der Poren reicht von lokalen bis hin zu zusammenhängenden, schlauchförmigen Poren.



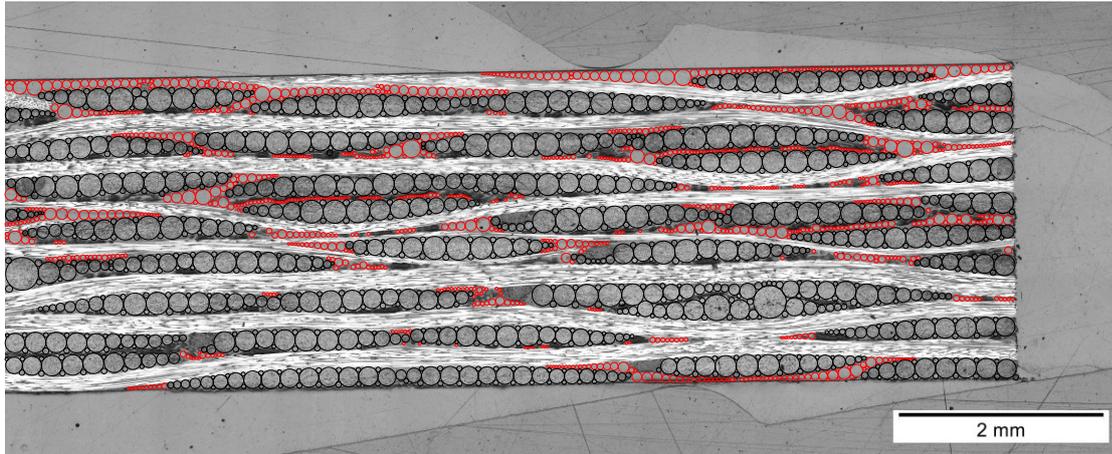
**Abb. 6-11: Auswertung des Makroflussbereichs**

In Abb. 6-12 ist die Auswertung für den Mikroflussbereich dargestellt.



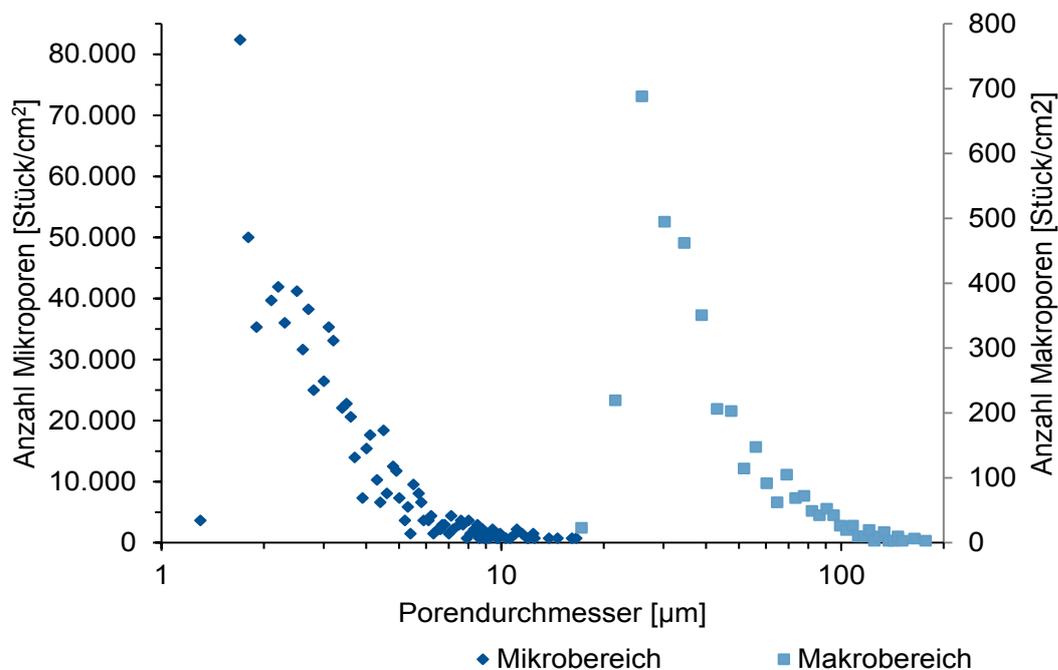
**Abb. 6-12: Auswertung des Mikroflussbereichs**

Zur Bestimmung der gesamten Porenfläche über einen Bildquerschnitt, werden der Makroflussbereich und der Mikroflussbereich markiert (Abb. 6-13). Die Rovinge in Längsrichtung sind eine durchgezogene Fläche. Es wird angenommen, dass sie nicht in Querrichtung durchströmt wird.



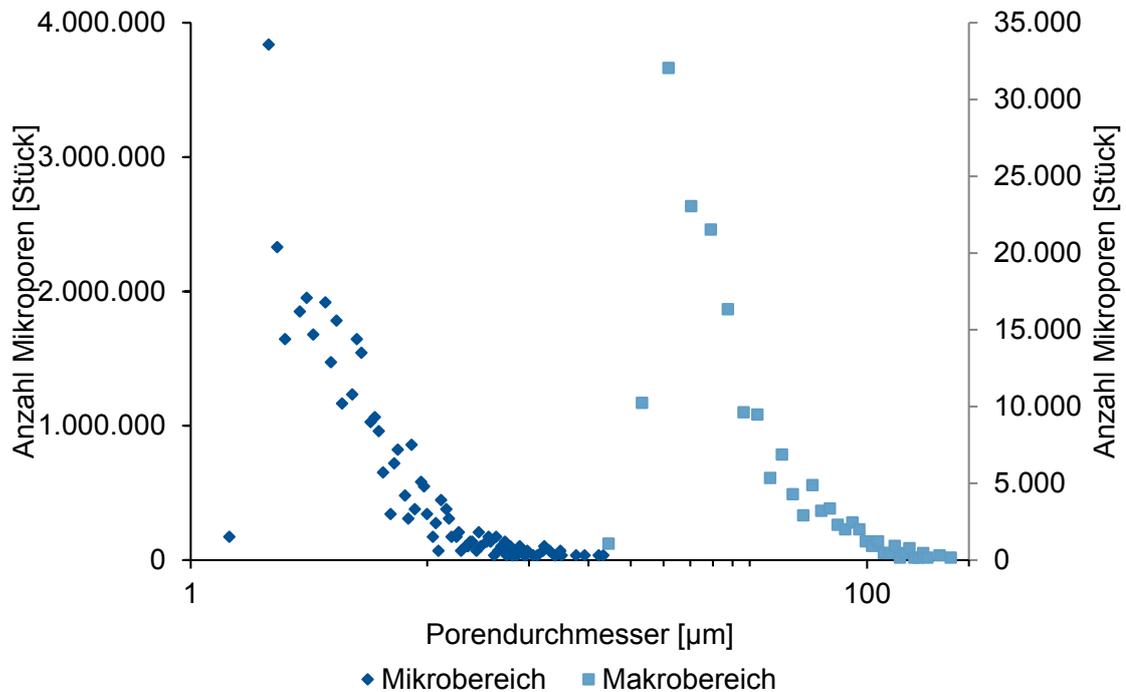
**Abb. 6-13: Markierter Makroflussbereich plus Querrovinge**

In Abb. 6-14 ist die Anzahl des jeweiligen Porendurchmessers pro Querschnittsfläche dargestellt. Es stellt die Auswertung über die gesamte repräsentative Querschnittsfläche dar. Dabei wurde der ermittelte Wert für den Mikroflussbereich als repräsentativ angenommen und über die Auswertung in Abb. 6-13 für die gesamte Fläche hochgerechnet. Zur besseren Unterscheidung ist der Makro- und Mikrobereich auf verschiedenen Achsen dargestellt. Aufgrund der Auswertemethode treten Porendurchmesser in diskreten Schritten auf. Die textile Struktur aus einem Roving, bestehend aus Filamenten, bedingt, dass die Anzahl an Mikroporen größer der Makroporen ist. Der Mikroflussbereich weist Porengrößen von  $1,3\mu\text{m}$  bis ca.  $16,6\mu\text{m}$  auf, der Makroflussbereich  $17,2\mu\text{m}$  bis ca.  $176,7\mu\text{m}$ .



**Abb. 6-14: Anzahl der Poren pro Fläche**

Zur Auslegung wird dieser flächenspezifische Wert auf die Filteroberfläche, im diesem Fall also der Beschnittfläche der Preform, bezogen. Dadurch erhält man die Anzahl der Poren über den Porendurchmesser der realen Preform. In Abb. 6-15 ist die für eine rechteckige Preform (L=389mm; B=184mm; H=4mm) dargestellt.



**Abb. 6-15:** Anzahl der Poren einer rechteckigen Preform (L=389mm; B=184mm; H=4mm)

Zur Auslegung ist es wichtig zu wissen, ob bestimmte Durchmesserbereiche eine höhere Bedeutung bei der Penetration des Filters besitzen. Dazu wird der jeweilige Porendurchmesser auf seinen Anteil an der Gesamtporenfläche hin ausgewertet. In Abb. 6-16 ist diese grafisch dargestellt. Der Makrobereich erreicht leicht höhere Flächenanteile. Summiert man die jeweiligen Flächenbereiche auf, erhält man ein Verhältnis von 42% Mikrobereich zu 58% Makrobereich, was die leichte Dominanz des Makrobereichs unterstützt. Die Anzahl an Makroporen ist deutlich geringer. Bezogen auf den relevanten Porenquerschnitt ist eine Bedeutung des Makrobereichs vorhanden.

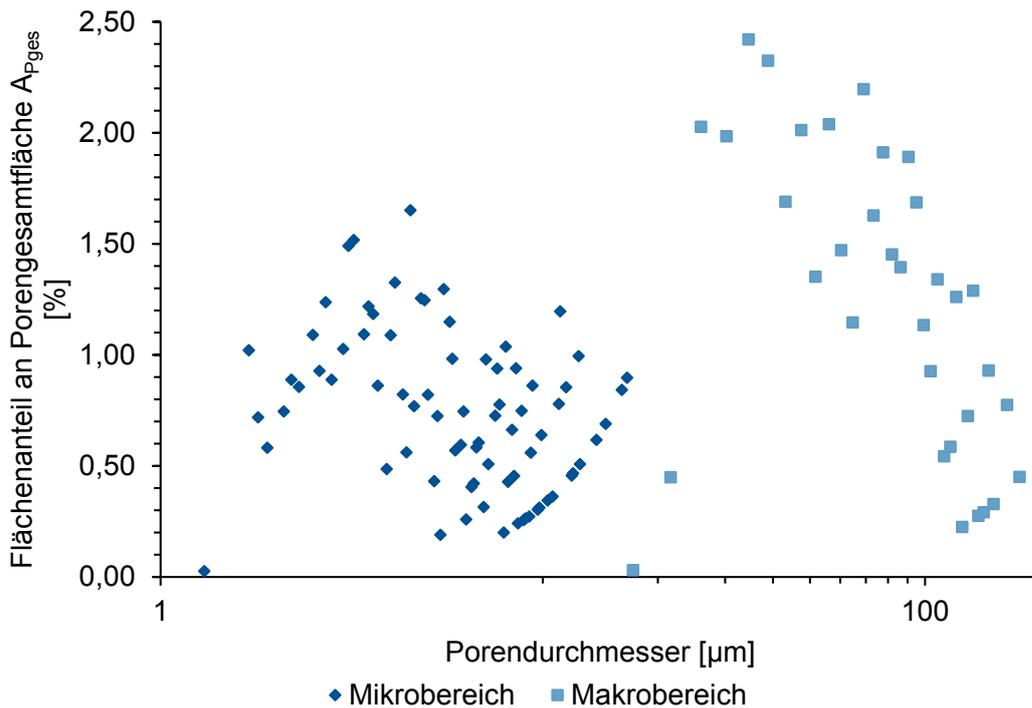


Abb. 6-16: Anteil des jeweiligen Porendurchmessers an der Gesamtporenfläche  $A_{Pges}$

## 6.5 Umströmen der Preform

Wird die Preform, wie in Kapitel 6.1 beschrieben, mit einer Suspension umströmt treten je nach Partikelgröße verschieden Effekte auf. Im Folgenden werden die Wechselwirkungen zwischen dem Filtermedium Preform, den Partikeln und der Suspension beschrieben.

Zur Diskussion der verschiedenen Filtrationsvorgänge wird die Filteroberfläche, die Beschnittfläche, in drei Teile unterteilt.

- I: Die geschlossene Fläche bestehend aus den Längsrovingen und der Fläche der Querrovinge.
- II: Die Summe der Flächen der Poren, welche kleiner sind als die Partikel.
- III: Die Summe der Flächen der Poren, welche größer oder gleich der Partikel sind.

In jedem Bereich treten unterschiedliche Filtermechanismen auf. Für das bessere Verständnis werden drei zeitlich aufeinanderfolgende Zeitschritte betrachtet.

Es handelt sich um eine theoretische Betrachtung, weshalb von kreisförmigen Poren bzw. Partikeln ausgegangen wird.

Tab. 6-3 stellt die unterschiedlichen Filtrationsvorgänge der Bereiche über drei Zeitschritte dar. Es wird davon ausgegangen, dass Partikel, die über den Makrobereich in die Preform eindringen, einen Roving nicht von der Seite penetrieren können.

**Tab. 6-3: Filtrationsvorgänge bei der Umströmung**

	<b>Flächenanteil I</b> Geschlossene Oberfläche	<b>Flächenanteil II</b> Poren < Partikel	<b>Flächenanteil III</b> Poren > Partikel
<b>Schritt 1:</b>	Suspension überströmt die Beschnittfläche		
Ergebnis:	Partikel haften an der Oberfläche	Partikel lagern sich an der Oberfläche an	Suspension fließt in die Preform
Filtrationsvorgang	Keine Filtration	Querstromfiltration	Tiefenfiltration
Ergebnis		Filtrat fließt in die Preform	Partikel lagern sich in den Porengängen ab und können diese teilweise oder vollständig verschließen
	Es baut sich eine Partikelschicht auf	Es baut sich ein Filterkuchen auf	Nach vollständigem Verschluss der Poren baut sich ein Filterkuchen auf
<b>Schritt 2:</b>	Suspension überströmt die Partikelschicht	Suspension überströmt den Filterkuchen	Suspension überströmt die Oberfläche
Ergebnis:	Partikel haften an der Oberfläche/ Partikeln	Partikel lagern sich auf dem Filterkuchen ab	Partikel lagern sich an der Oberfläche ab
Filtrationsvorgang	Keine Filtration	Kuchenfiltration und Tiefenfiltration im Kuchen	Kuchenfiltration
Ergebnis		Filtrat fließt in die Preform	Filtrat fließt in die Preform
	Partikelschicht baut sich weiter auf	Filterkuchen baut sich weiter auf. Kleinere Partikel lagern sich im Filterkuchen ab	Filterkuchen baut sich weiter auf
<b>Schritt 3:</b>	Suspension überströmt Partikelschicht	Suspension überströmt Filterkuchen	
Ergebnis:		Partikel lagern sich auf dem Filterkuchen ab Kleinere Partikel lagern sich im Filterkuchen ab	
Filtrationsvorgang	Kein Filtration	Kuchenfiltration und Tiefenfiltration im Filterkuchen	
Ergebnis		Kleinere Partikel im Filterkuchen erhöhen den Filterkuchenwiderstand (Verringerung von $\epsilon$ )	
	Partikelschicht baut sich zu einer konstanten Schicht auf	Filterkuchen aus Partikeln mit spezifischem Filterkuchenwiderstand baut sich bis zu einer konstanten Dicke auf (gleich der Dicke der Partikelschicht). Filtratstrom lässt nach bzw. stoppt	

Tab. 6-3 zeigt, dass eine textile Preform kein einfaches Filtermedium ist. Im Folgenden werden die einzelnen Zeitschritte nochmals ausführlich vorgestellt.

### 6.5.1 Zeitschritt I:

#### Bereich 1 (Geschlossene Oberfläche):

Beim Überströmen können Partikel auf die Oberfläche sedimentieren oder an ihr abgleiten. Es baut sich eine Partikelschicht auf. Es wird davon ausgegangen, dass kein Filtrat in die Preform dringt.

#### Bereich 2 (Poren < Partikel):

Da die Partikel größer sind als die vorhandenen Poren dringen keine Partikel in die Preform ein. Es kommt zur Querstromfiltration und ein Filterkuchen beginnt sich zu bilden. Da es unwahrscheinlich ist, dass die Partikel die Poren vollständig verschließen dringt Filtrat in die textile Preform über diesen Bereich ein.

#### Bereich 3 (Poren > Partikel):

Die Partikel, welche kleiner als ein Porendurchmesser sind, dringen in die Preform ein. Es tritt Tiefenfiltration auf. In der Preform lagern sie sich an, wodurch der Porendurchmesser im Filter weiter verkleinert wird. Durch vermehrtes Ablagern wird der Filter vollständig verschlossen. Da zwischen zwei Partikeln immer Raum bleibt, tritt bei ideal steifen Partikeln Filtrat weiter in die Preform. Die Tiefenfiltration schreitet fort, bis die Porengänge vollständig gefüllt sind.

### 6.5.2 Zeitschritt II:

#### Bereich 1 (Geschlossene Oberfläche):

Suspension überströmt weiterhin die Preform. Es lagern sich weiter Partikel an der Oberfläche ab. Es findet keine Filtration statt.

#### Bereich 2 (Poren < Partikel):

Suspension überströmt den gebildeten Filterkuchen. Über den Querstrom des Filtrats in die Preform lagern sich weiter Partikel auf dem Filterkuchen ab. Eventuell kleinere Partikel können in den Filterkuchen eindringen. Sie werden über Tiefenfiltration im Filterkuchen oder in der Preform abgeschieden.

#### Bereich 3 (Poren > Partikel):

Durch den vorhandenen Querstrom an Filtrat in die Preform, lagern sich auf den durch Partikel verschlossenen Porengängen weitere Partikel ab. Es bildet sich ein Filterkuchen. Die gesamte Beschnittfläche wird jetzt durch einen Filterkuchen aus Partikeln bedeckt. Über die verschiedenen Schritte ist die Schichtdicke des Filterkuchens uneinheitlich.

### 6.5.3 Zeitschritt III:

#### Bereich 1 (Geschlossene Oberfläche):

Suspension überströmt weiterhin die Preform. Es lagern sich weiter Partikel an der Oberfläche ab. Teilweise gelangen sie über Stoßprozesse zurück in die Suspension, dass sich eine konstante Schichtdicke ausbildet. Es findet keine Filtration statt.

### **Bereiche 2 und 3**

Durch vorhandenen Querstrom dringt Filtrat in die Preform und der Filterkuchen wächst weiter an, wobei er sich in der Schichtdicke vereinheitlicht. Kleinere Partikel lagern sich über Tiefenfiltration im Filterkuchen oder in der Preform ab. Bei ideal steifen Kugeln dringt Filtrat in die Preform ein bis die Preform gefüllt ist. Stellt sich ein Gleichgewicht zwischen Partikeln, die mit der Suspension mitgerissen werden, und abgelagerten Partikeln ein, bildet sich ein konstanter Filterkuchen aus.

## **6.5.4 Diskussion**

Bei der klassischen Querstromfiltration besteht das Ziel, dass sich ein möglichst geringer Filterkuchen bildet, da dieser den Strömungsquerschnitt verringert. Aus diesem Grund werden Strömungsgeschwindigkeiten in der Form gewählt, dass genügend Stoßprozesse auftreten und der Filterkuchen sich weitestgehend nicht aufbaut. Dadurch wird eine konstante Prozessierung gewährleistet und einem Verschluss der Suspensionszufuhr entgegengewirkt. Beim Umströmen einer Preform wird die Umströmgeschwindigkeit dahingehend dimensioniert, dass beim Erreichen des Auslasses die Gelzeit erreicht wird, wodurch eine zeitnahe Injektion des Textils mit Strukturmatrix gewährleistet wird und gleichzeitig Sedimentationsvorgänge in der Suspension verringert werden und eine einheitliche Materialeigenschaft gewährleistet werden kann.

In der Prozesstechnik wird als Filtermedium eine Membran oder ein Medium mit einheitlichem Porendurchmesser verwendet. Eine Preform kombiniert die Filtermechanismen Tiefen- bzw. Oberflächenfiltration, was die Komplexität der Betrachtung erhöht.

Im Folgenden werden die Möglichkeiten diskutiert, welche die Funktion des Hybridmatrixantritts, eine definierte, geringe Penetration der Preform beim Umströmen der Preform beinhaltet.

Beim Beginn der Umströmung tritt Suspension auf das Filtermedium Preform und es tritt Filtrat mit dem Initialvolumenstrom in die Preform ein. Über die Zeit baut sich der Filterkuchen auf und das Filtratvolumen vergrößert sich. Dies bedeutet, der Initialvolumenstrom ist der Ausgangspunkt zur Entwicklung des Filterkuchens und damit zur gesamten Penetration bei einer Umströmung.

### **Steuerung des Initialvolumenstroms**

Über Gleichung (6-16) ist die Entwicklung des Volumenstroms für den Bereich II (Poren < Partikel) über die Zeit bekannt. Der Anfangsvolumenstrom ergibt sich zu:

$$\dot{V}_f(t = 0) = \frac{\Delta p A}{\beta \eta} \quad (6-17)$$

Damit ist der Anfangsvolumenstrom vom Filtermediumwiderstand, der angeströmten Fläche, der Viskosität der Suspension und dem angelegten Druckgradienten abhängig.

Der Filtermediumwiderstand wird über die Struktur des Textils bestimmt. Der Einfluss auf diesen ist selten bekannt. Er kann während der Umströmung nicht verändert werden. Da die Viskosität der Suspension bei Gleichung (6-17) im Nenner steht, führt eine hohe Viskosität zur Verringerung des Initialvolumenstroms.

Im Flächenbereich III (Poren > Partikel) treten auf jeden Fall Partikel in die Preform ein. Um sicherzustellen, dass sich Partikel in den Porenkanälen möglichst schnell ablagern, müssen diese möglichst unwesentlich kleiner sein als der Porenquerschnitt. Die Untersuchung der Preform als Filtermedium hat ergeben, dass eine Porendurchmesser-Verteilung vorliegt (vgl. Kapitel 6.4). Daraus lässt sich ableiten, dass die Suspension ebenfalls eine entsprechende Partikelverteilung aufweisen muss.

Nachdem die Porenkanäle in der Preform geschlossen sind, tritt Kuchenfiltration auf. Die Effekte entsprechen den für Bereich II diskutierten.

### **Steuerung des Filtratvolumen bzw. der Querströmung**

Über die Zeit baut sich ein Filterkuchen an der Preformbeschnittfläche auf. Damit dominiert der zeitlich bestimmte Term  $\frac{2 A^2 \Delta p}{\eta \alpha_v \chi_v} t$  in Gleichung (6-15). In diesem Term sind der Filterkuchenwiderstand und die Viskosität als entscheidende Größen enthalten. Je größer diese gewählt werden, desto geringer fällt der Filtratvolumenstrom aus. Nach Gleichung (6-12) steigt der Filterkuchenwiderstand je kleiner der Partikeldurchmesser gewählt wird.

### **Zusammenfassung der Stellgrößen**

Die durchgeführten Betrachtungen zeigen, dass folgende Punkte zur Steuerung der Penetration der Preform herangezogen werden können.

- Anzahl der Partikel pro Volumen.
- Verteilung an Partikeldurchmesser in der Suspension.
- Viskosität der Suspension. Diese ergibt sich aus der Viskosität der Hauptphase, dem verwendeten Matrixsystem und den beigemischten Partikeln.

Der Filterkuchenwiderstand ist abhängig von der Wahl der Partikel in der Suspension und ist damit keine Stellgröße, sondern ein Ergebnis. Der Initialvolumenstrom wird über die sich ergebende Viskosität gesteuert.

## **6.6 Verwendete Partikel**

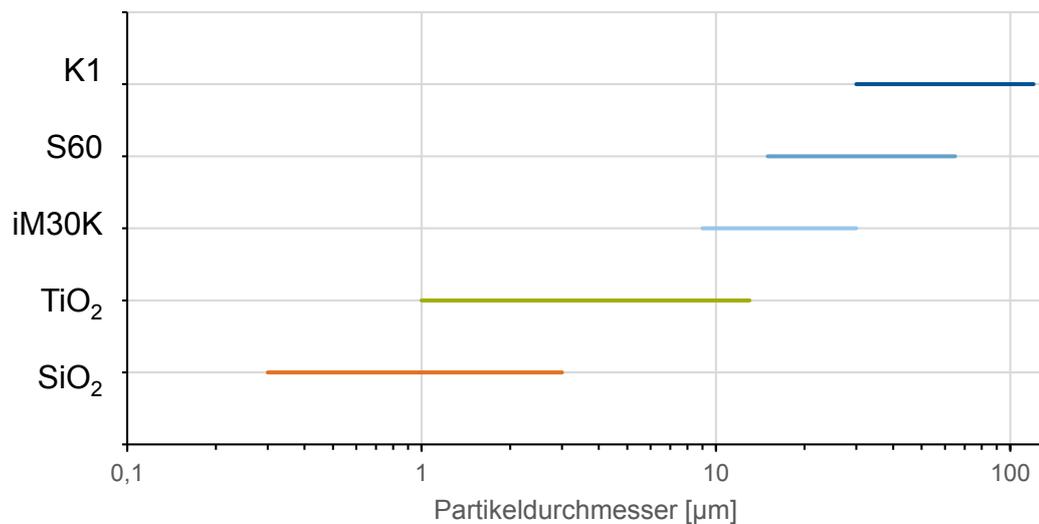
In Kapitel 6.5 wurde hergeleitet, dass die Partikel in der Suspension maßgeblich die Penetration der Preform beeinflussen. Um eine Suspension erstellen zu können die relevante Partikeldurchmesser hat wird der in Kapitel 6.4 ermittelte Wertebereich abge-

deckt. Da das Thema Filter in der Hybridmatrixanwendung ein bisher wenig untersuchter Bereich ist, wird die Untersuchung mit möglichst simpler Geometrie (kugelförmig), durchgeführt. Für die folgenden Versuche werden in Tab. 6-4 dargestellte Partikel verwendet. Jedes Material unterliegt einer Toleranz, weshalb jeweils eine Partikelverteilung angegeben ist

**Tab. 6-4: Verwendete Partikel**

Partikel	Material	Durchmesserbereich [ $\mu\text{m}$ ]	Mittlerer Durchmes- ser [ $\mu\text{m}$ ]	Nenn- dichte $\rho$ [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]	Quelle
SiO <sub>2</sub> 380	Siliziumdioxid	0,3–3 (agglomeriert)	1,65	ca. 2,2	[177]
TiO <sub>2</sub>	Titandioxid	1–13 (agglomeriert)	7	ca. 4,1	[178]
iM30K	alkaliarmes Borosilikatglas	> 9-30	17	0,6	[179]
S60	alkaliarmes Borosilikatglas	> 15–65	30	0,6	[179]
K1	alkaliarmes Borosilikatglas	> 30–120	65	0,125	[179]

Es ergibt sich die in Abb. 6-17 dargestellte Partikelverteilung für die jeweiligen Materialien. Die verschiedenen Partikeldurchmesserbereiche überlappen sich und decken einen Bereich von 0,3-120 $\mu\text{m}$  ab.

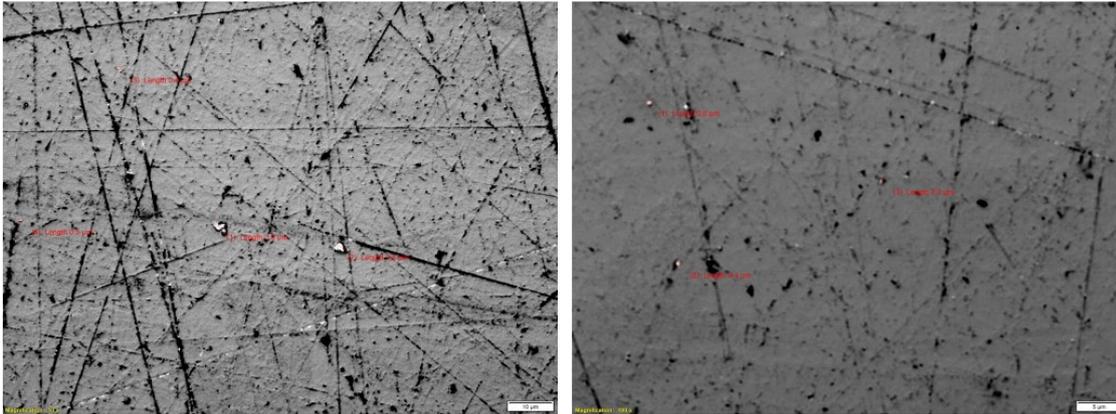


**Abb. 6-17: Durchmesserverteilung der gewählten Partikeln**

Im Folgenden wird jedes einzelne Material kurz vorgestellt.

### SiO<sub>2</sub>380-Partikel [177]

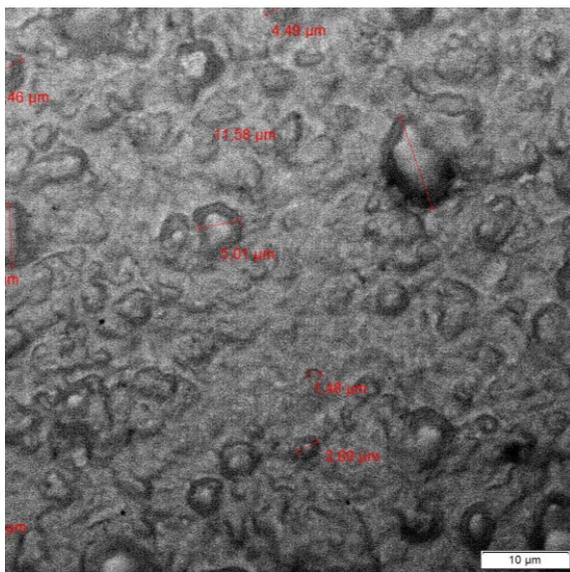
SiO<sub>2</sub>380 ist als Verstärkung bzw. Verdickungsadditiv bekannt. Anwendung findet es sowohl als Fließ- als auch als Dispergierhilfe. Es ist eine hydrophile, pyrogene Kieselsäure mit einer spezifischen Oberfläche von 380 m<sup>2</sup>/g, besitzt eine Korngröße von 40nm und als Pulver ein Dichte von 2,2g/cm<sup>3</sup>. Abb. 6-18 zeigt SiO<sub>2</sub>380 Partikel eingebettet in das Harz Sika CR 80 [180]. Der Durchmesser der Partikel ist sehr klein, weswegen keine Gefahr der Sedimentation besteht.



**Abb. 6-18:** Schliffprobe von SiO<sub>2</sub> 380 Partikel in Gießharz eingebettet (links 50x/ rechts 100x)

Die agglomerierten Partikel reflektieren das Licht, wobei sie eine annähernd kreisförmige Geometrie aufweisen. Die am Mikroskop durchgeführten Messungen bestätigen die angegebene Partikelverteilung von 0,3 bis 3µm.

### TiO<sub>2</sub> P 25 [178]



**Abb. 6-19:** Suspension aus dem Gießharz U1404 und 3,5Vol.% TiO<sub>2</sub> P25 Partikel

TiO<sub>2</sub>-Partikel haben ein breites Anwendungsfeld u.a. als Farbpartikel in Farben und Lacken. Die verwendeten Partikel besitzen hydrophile, pyrogene Eigenschaften. Aufgrund der Partikeldurchmesser besteht Gefahr der Sedimentation. Über die Wahl eines hochviskosen, schnellreaktiven Gießharzes wird dem entgegen gewirkt. Das selbe System wird für die Umströmversuche verwendet. In Abb. 6-19 ist die Suspension aus dem Umströmmaterial Sika Biresin U1404 [181] und 3,5 Vol% TiO<sub>2</sub> dargestellt. Das verwendete Gießharz ist PU basiert. Die ursprüngliche Anwendung besteht im Werkzeugbau weshalb es elastomer eingestellt ist.

Über die vorhandenen Unterschiede im E-Modul zwischen Partikel und Gießharz bzw. dessen elastomere Eigenschaft ist keine ideale glatte Fläche zu erreichen. Dies erklärt die Qualität der Schliffproben. Über das Mikroskop werden Partikeldurchmesser von 1,5-13,2µm gemessen. Über das Aushärten findet keine Sedimentation statt, die Partikelverteilung ist einheitlich.

### Glashohlkugeln

Die Anwendung von Glashohlkugeln liegt in ihren Eigenschaften begründet.

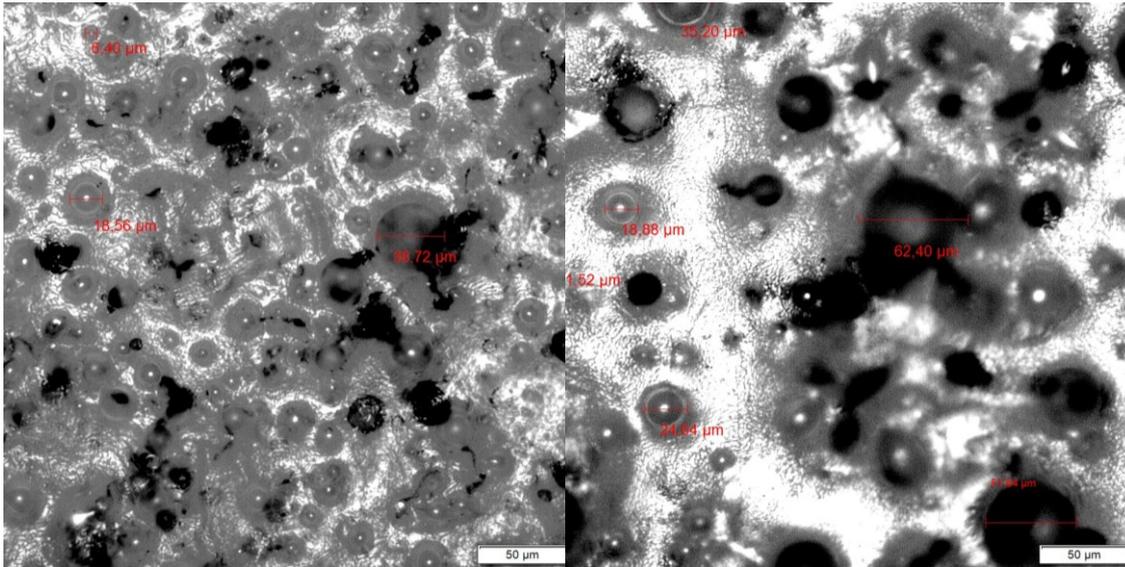


Abb. 6-20: Suspension (U1404) mit 15 Vol.% iM30K-Glas Kugeln (20x)

Abb. 6-21: Suspension (U1404) mit 15 Vol.% S60-Glas Kugeln (20x)

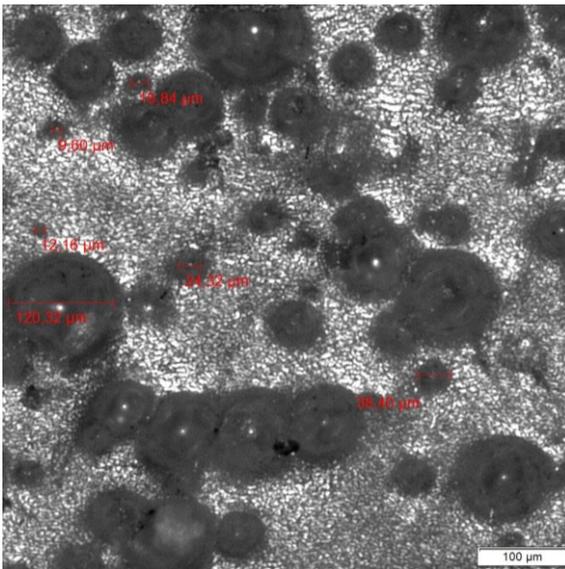


Abb. 6-22: Suspension (U1404) mit 15 Vol.% K1-Glas Kugeln (5x)

Durch ihre geringe Dichte kombiniert mit hoher Steifigkeit eignen sie sich als Füllstoff für Thermoplaste oder Duromere [182, 183]. Sie sind in unterschiedlichen Durchmessern erhältlich [179]. Die Abbildungen Abb. 6-20 bis Abb. 6-22 zeigen Schliffbilder der jeweiligen Glashohlkugeln im Gießharz U1404. Alle Glashohlkugeln zeigen eine annähernd ideale runde Geometrie. Die Partikeldurchmesser entsprechen den in Tab. 6-4 angegebenen.

## 6.7 Umströmung mit reaktiver Matrix

Der Hybridmatrixansatz hat im ersten Antritt das Ziel den Kanal zwischen Preform und Werkzeug durch eine erste Injektion eines reaktiven Sekundärmaterials zu verschließen und dabei die Preform möglichst wenig zu penetrieren. Zur Kontrolle der Penetration wird der Filtereffekt und, je nach verwendeter Suspension, scherratenabhängiges Materialverhalten verwendet. Die vorangehenden Kapitel zeigen, dass der Durchmesser des

Partikels bzw. die Durchmesser- und die Anzahl der Partikel eine entscheidende Rolle spielen. In diesem Kapitel wird untersucht, wie sich unterschiedliche Partikel in einer Suspension auf die Penetration auswirken.

Das Ziel und Vorgehen der Untersuchung ist in Tab. 6-5 zusammengefasst. Den darin dargestellten Zielen liegen folgende Fragen zu Grunde:

- In welcher Form beeinflusst der Partikeldurchmesser die Eindringtiefe in die Preform?
- In welcher Form beeinflusst die Partikelanzahl die Eindringtiefe in die Preform?
- In welcher Form beeinflusst die Partikelgrößenverteilung die Eindringtiefe in die Preform?

**Tab. 6-5: Ziel und Vorgehen zum Untersuchen des Filtereffekts**

Ziel	Vorgehen
Korrelation zwischen Partikelgröße und Eindringtiefe	Partikelgröße variieren Partikelanzahl konstant Partikelgrößenbereich konstant
Korrelation zwischen Partikelanzahl und Eindringtiefe	Partikelanzahl variieren Partikelgröße konstant Partikelgrößenbereich konstant
Korrelation zwischen Partikelgrößenbereich und Eindringtiefe	Partikelgrößenbereich variieren Partikelgröße konstant Partikelanzahl konstant

## 6.7.1 Rheologische Charakterisierung der Suspensionen

Über die Modifizierung des Sekundärmaterials mit Partikeln wird der Filtereffekt zur Penetrationskontrolle genutzt. Eine solche Modifizierung kann scherratenabhängiges Materialverhalten induzieren. Als gängige Methode dazu wird die Rheologie herangezogen. Zur Charakterisierung wird ein Anton Paar Rheometer Modular Compact MCR 302 mit einer P-PTD200 Messzelle verwendet. Der Durchmesser der Platte-Platte Messgeometrie wird mit 50mm gewählt. Die Messgeometrie Kegel-Platte kam nicht in Frage, da die Suspensionspartikel im Durchmesser im Bereich des minimalen Messspalts sind und dadurch ein exaktes Einstellen des minimalen Messspaltes nicht möglich ist. Für eine einheitliche Charakterisierung wird der Messspalt auf 1mm eingestellt. Als Messprogramm wird jeweils die in Tab. 6-6 dargestellte Reihenfolge definiert, welche auf den Empfehlungen aus [166] beruhen.

**Tab. 6-6: Messprogramm zur rheologischen Charakterisierung**

	Zweck	Parameter
1	Vorscherung/ Entgasung	Scherrate 50 1/s für 20s
2	Ruhephase (Entspannung der Molekülstruktur	Scherrate 0 1/s für 30s
3	Scherratendurchlauf	Scherrate 0,5-1.000 1/s (log), 34 Messpunkte, Var. Messpunktdauer 2...0,1 s log, Abschnittsdauer 22 s

Die im Kapitel 6.5.4 durchgeführten Betrachtungen haben gezeigt, dass ein wesentlicher Parameter zur Steuerung der Eindringtiefe der Anfangsvolumenstrom ist. Dieser wird maßgeblich durch die Viskosität beim Start der Injektion bestimmt. Über eine Charakterisierung der Anfangsviskosität hinsichtlich Scherratenabhängigkeit kann bewertet werden, ob dieser Effekt für die Auswertung relevant ist.

In Abb. 6-23 ist der Viskositätsverlauf über die Scherrate der Monosuspensionen dargestellt. In Tab. 6-7 sind die Unterschiede der maximalen bzw. minimalen Viskosität über den untersuchten Scherratenbereich von 0,5- 1000 1/s angegeben. Alle Untersuchungen zeigen scherratenabhängiges Materialverhalten. Den kleinsten Unterschied zeigt die Matrix ohne Partikel mit 7% auf. Die größte Scherratenabhängigkeit zeigt sich bei SiO<sub>2</sub> (63%) und TiO<sub>2</sub> (34%). Beide Suspensionen weisen bei niederen Scherraten scherverdickendes Materialverhalten welches in scherverdünnendes Verhalten übergeht. Die maximale Viskosität liegt bei TiO<sub>2</sub> bei leicht höherer Scherrate. Das Beifügen von 15Vol.% an Glaskugel führt zu einer Verdoppelung der Viskosität unabhängig vom Durchmesser der Glaskugeln. Weitere 15% führen zu einer weiteren Verdoppelung und einer Zunahme des scherverdünnenden Effekts. Die kleinsten Partikel SiO<sub>2</sub> und TiO<sub>2</sub> führen zu einem deutlichen Viskositätsanstieg bei sehr geringem Volumenanteil.

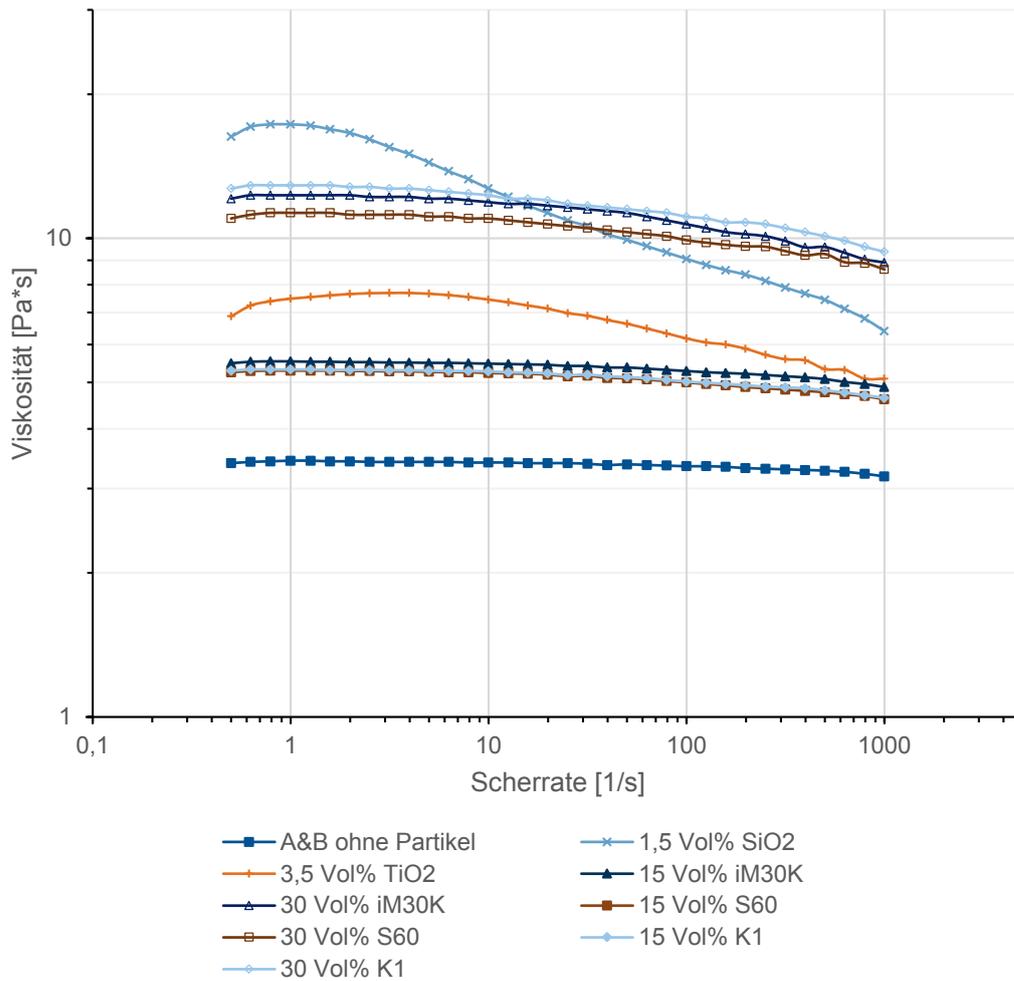


Abb. 6-23: Viskosität der Monosuspensionen über die Scherrate

Tab. 6-7: Maximale Viskositätsunterschiede im untersuchten Scherratenbereich (0,5 bis  $10^3$  1/s) der Monosuspensionen

Partikel	A&B ohne Partikel	1,5 Vol.% SiO <sub>2</sub>	3,5 Vol.% TiO <sub>2</sub>	15 Vol.% iM30K	30 Vol.% iM30K	15 Vol.% S60	30 Vol.% S60	15 Vol.% K1	30 Vol.% K1
$\Delta\eta$ [%]	7,3	63,0	33,8	11,6	27,6	12,9	23,8	12,8	27,3

Die Ergebnisse für die Hybridsuspensionen sind in Abb. 6-24 bzw. Tab. 6-8 dargestellt.

Die Suspensionen aus SiO<sub>2</sub> und TiO<sub>2</sub> zeigen das größte scherverdünnende Materialverhalten gefolgt von den Suspensionen, an denen dieselben Partikel beteiligt sind. Die Suspensionen, an denen nur Glaskugeln beteiligt sind, weisen die geringste Scherratenabhängigkeit auf. Das höchste Viskositätsniveau weist die Hybridsuspension mit drei Partikeln auf.

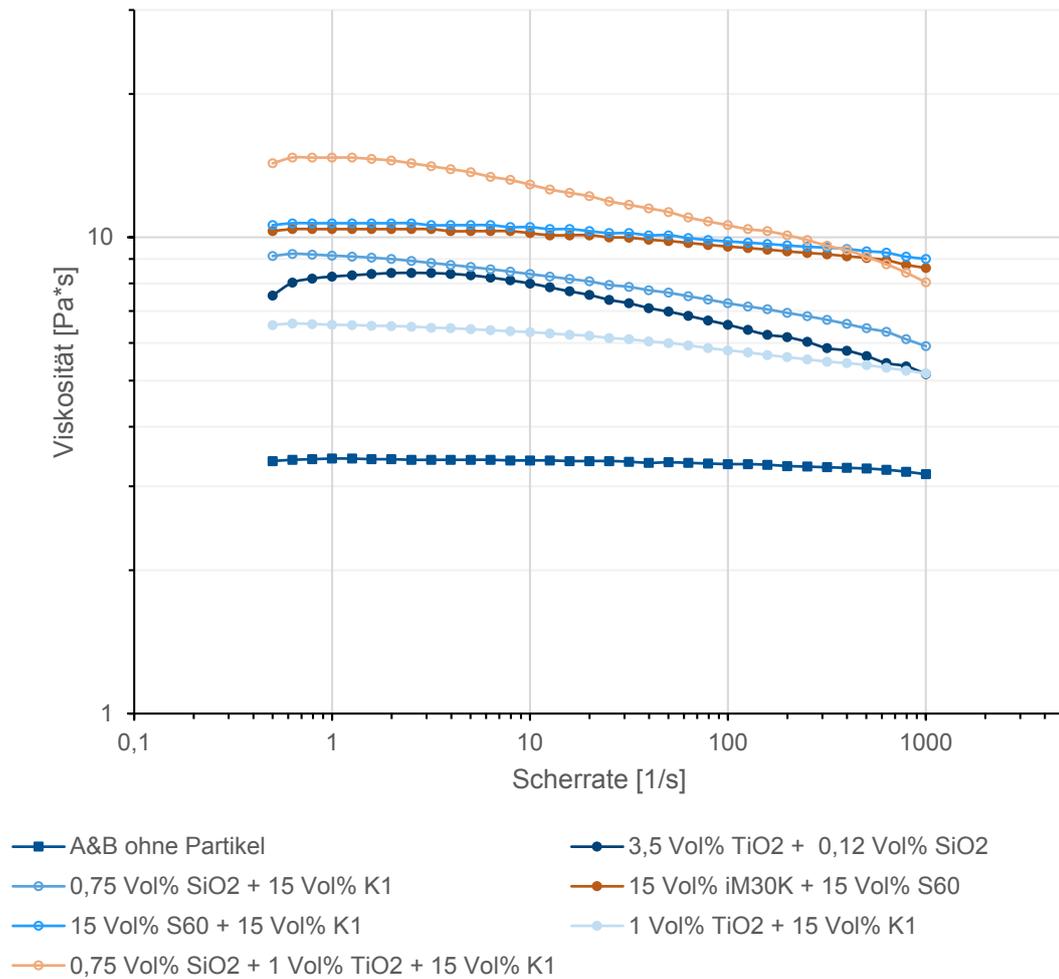


Abb. 6-24: Viskosität der Hybridsuspensionen über die Scherrate

Tab. 6-8: Maximale Viskositätsunterschiede im untersuchten Scherratenbereich (0,5 bis  $10^3$  1/s) der Hybridsuspensionen

Partikel	3,5 Vol.% TiO <sub>2</sub> + 0,12 Vol.% SiO <sub>2</sub>	0,75 Vol.% SiO <sub>2</sub> + 15 Vol.% K1	15 Vol.% iM30K + 15 Vol.% S60	15 Vol.% S60 + 15 Vol.% K1	1 Vol.% TiO <sub>2</sub> + 15 Vol.% K1
$\Delta\eta$ [%]	38,7	36,0	17,1	15,8	21,4

Um die Bewertung der verschiedenen Suspensionen bezüglich des scherratenabhängigen Materialverhaltens durchzuführen, werden alle Modelle mit dem in Kapitel 6.2.1 eingeführten Ostwald/ de Waele Modell abgebildet. Die dafür notwendigen Parameter und der jeweilige Regressionskoeffizient sind in Tab. 6-9 zusammengefasst.

**Tab. 6-9: Parameter zur Modellierung der Suspensionen und der Referenz nach Ostwald/ de Waele**

Referenz und Monosuspensionen									
	A&B ohne Partikel	1,5 Vol.% SiO <sub>2</sub>	3,5 Vol.% TiO <sub>2</sub>	15 Vol.% iM30K	30 Vol.% iM30K	15 Vol.% S60	30 Vol.% S60	15 Vol.% K1	30 Vol.% K1
N	0,995	0,88	0,96	0,98	0,97	0,98	0,97	0,98	0,98
M	3,4	17	7,6	5,6	11,5	5,5	11	5,5	12
R <sup>2</sup>	0,81	0,97	0,79	0,84	0,87	0,86	0,89	0,87	0,93

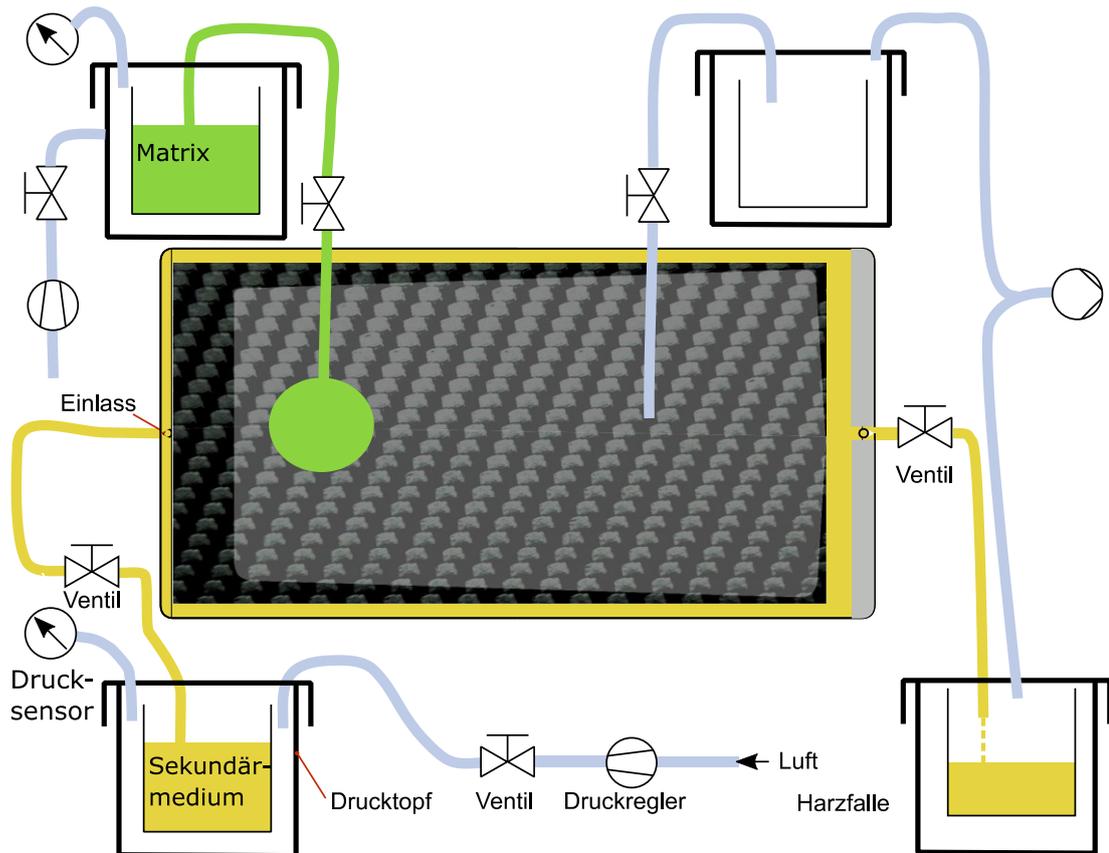
  

Hybridsuspensionen						
	3,5 Vol.% TiO <sub>2</sub> + 0,12 Vol.% SiO <sub>2</sub>	0,75 Vol.% SiO <sub>2</sub> + 15 Vol.% K1	15 Vol.% iM30K + 15 Vol.% S60	15 Vol.% S60 + 15 Vol.% K1	1 Vol.% TiO <sub>2</sub> + 15 Vol.% K1	0,75 Vol.% SiO <sub>2</sub> + 1 Vol.% TiO <sub>2</sub> + 15 Vol.% K1
N	0,950	0,950	0,975	0,978	0,980	0,910
M	8,5	9,5	10,5	10,5	6,5	15
R <sup>2</sup>	0,84	0,97	0,89	0,92	0,94	0,95

Aufgrund der Einfachheit des Modells von Ostwald/ de Waele kann keine vollständige Übereinstimmung bei allen Suspensionen erreicht werden. Für eine grundlegende Einschätzung wird die Übereinstimmung als ausreichend bewertet.

## 6.7.2 Experimentelle Untersuchung

Um die durchgeführten Betrachtungen zu validieren, werden Versuche durchgeführt. Diese beinhalten die vollständige Durchführung des in Kapitel 6.1 beschriebenen Ansatzes der Hybridmatrixinjektion. Zunächst wird in einem ersten Schritt Sekundärmaterial in den Spalt zwischen Kavität und Preform injiziert wodurch dieser verschlossen wird. Die Injektion der strukturellen Matrix erfolgt direkt in die Preform. Der Aufbau wird an die Versuche zur Validierung der Ergebnisse, welche zur Untersuchung von RT durchgeführt wurden, angelehnt (Abb. 3-26). Durch die Erweiterung mit einem punktuellen Einlass bzw. Auslass wird die Injektion des Strukturmaterials ermöglicht (Abb. 6-25).



**Abb. 6-25: Versuchsaufbau zur Charakterisierung des Hybridmatrixansatzes**

Die Preform (398 mm x 184 mm x 4 mm) wird in die Kavität gelegt (424mm x 200mm x 4mm). An den Seiten entsteht ein Kanal von jeweils 8mm bzw. 16mm.

Zum Umströmen wird der Druck in der Kavität über die Vakuumpumpe soweit wie möglich gesenkt. Bei allen Versuchen wurde ein Kavitätsdruck von <10mbar erreicht. Die Anschlüsse für die Injektion der Matrix sind geschlossen.

Zur Herstellung der Suspension werden die gewünschten Partikel mit der A-Komponente des reaktiven Materials vermischt. Zum Vermischen wird die Doppelzentrifuge DAC 300 HP der Firma Hausschild verwendet. Dadurch wird vermieden, dass durch das homogenisieren der Suspension weitere Luft eingerührt wird. Nach dem Vermischen wird diese Suspension entgast. Die Komponente B wird mit der Suspension ebenfalls in der Doppelzentrifuge vermischt. Die finale Suspension wird nochmals entgast.

Zur Durchführung der Umströmung wird die angesetzte Suspension in den Drucktopf gestellt. Nach dem Schließen des Drucktopfes wird die Leitung zur Kavität geöffnet. Sobald die Suspension in die Kavität läuft, wird der Drucktopf mit einem bar Überdruck beaufschlagt, so dass insgesamt eine Druckdifferenz von 2bar anliegt. Erreicht die Suspension den Auslass, wird die Zufuhr unterbrochen. Die Ventile am Einlass und Auslass des Sekundärmediums werden geschlossen. Gleichzeitig wird die Kavität über Einlass und Auslass der Matrix belüftet. Dadurch wird der Druckgradient abgebaut und es findet

keine weitere Penetration statt. Der Aufbau wird in diesem Zustand für mindestens zwei Stunden belassen. Dadurch wird sichergestellt, dass es bei der Injektion der Matrix über den angelegten Injektionsdruck zu keiner Verdrängung der mit Sekundärmaterial getränkten Preform kommt.

Zur Injektion der Matrix wird der Druck in der Kavität über die Vakuumpumpe gesenkt. Als Matrixsystem kommt bei allen Versuchen das System CR80 der Firma Sika [180] zum Einsatz. Nach dem Mischen und Entgasen wird es in den Drucktopf gestellt und der Deckel geschlossen. Über den angelegten Unterdruck in der Kavität wird die Matrix zur Kavität transportiert. Nach 10min wird der Injektionsdruck um zwei bar erhöht. Tritt Harz am Auslass aus, wird dieser verschlossen. Der über den Drucktopf angelegte Überdruck bleibt über das Aushärten angelegt. Zur Beschleunigung des Aushärtvorgangs wird das Werkzeug in einen Umluftofen bei 80°C gestellt.

### **6.7.3 Bewertung des nicht newtonschen Materialverhaltens**

Scherratenabhängiges Materialverhalten kann einen Einfluss auf das Tränkungsverhalten haben. Über die in Kapitel 6.2.2 durchgeführten Betrachtungen kann zur Abschätzung eine mittlere Scherrate je nach Fließfrontfortschritt durchgeführt werden. Da alle Versuche mit konstanten Druck durchgeführt werden, kann eine mittlere Scherrate vom Einlass bis zum Erreichen des Auslasses berechnet werden. Für die Berechnung der mittleren Scherrate in der Preform wird die Anforderung an eine maximale Penetration von 5mm herangezogen. Die Werte sind in Abb. 6-26 zusammengefasst. Die gemittelte Scherrate im Kanal liegt über der in der Preform. Die Scherraten im Kanal erreichen Werte von 190-510 1/s, wobei die höchste Scherrate bei der Referenz ohne Partikel vorliegt. Bei den Scherraten in der Preform werden Werte von 7-25 1/s erreicht. Dabei wird bei der Referenz ohne Modifizierung die höchste Scherrate erreicht. Für die Bewertung, ob Scherratenabhängigkeit relevant ist, wird das Verhältnis aus der mittleren Scherrate im Kanal zur Scherrate in der Preform gebildet. Dieses ist beim nicht modifizierten Sekundärmaterial am niedrigsten. Am größten ist das Verhältnis mit einer fünfzig prozentigen Steigerung gegenüber der Referenz bei der Modifizierung mit SiO<sub>2</sub>. Zieht man die rheologischen Messungen mit in die Betrachtung ein bedeutet dies, dass mit steigender Scherratenabhängigkeit der Unterschied der Scherraten zwischen Kanal und Preform steigt. Dies hat zur Folge, dass die Penetration der Preform weiter abnimmt.

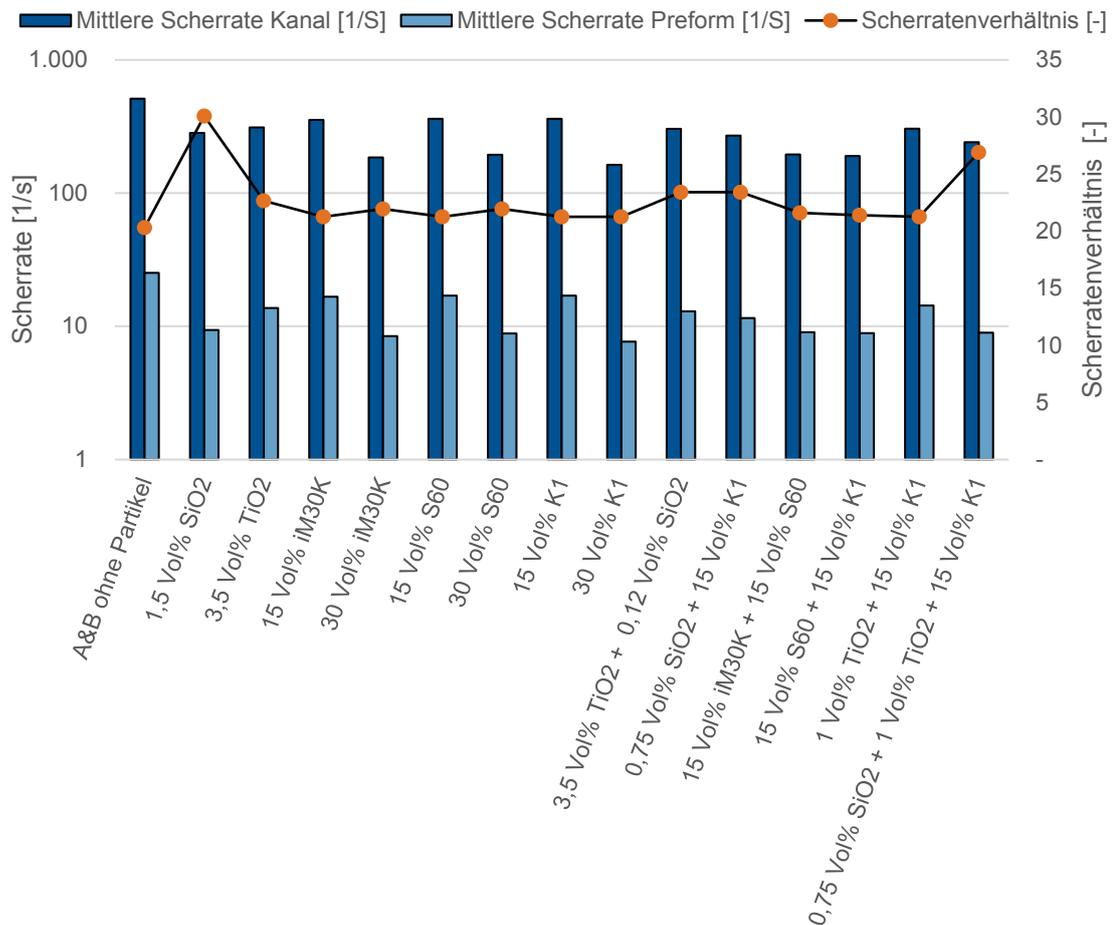


Abb. 6-26: Vergleich der mittleren Scherrate im RT-Kanal und in der Preform

Diese Beobachtung wird durch die Betrachtung des Faktor  $\sqrt{\frac{\eta_{mK}}{\eta_{PM}}}$  aus der Gleichung

(6-6) bestätigt. In Abb. 6-27 ist der Faktor  $1 - \sqrt{\frac{\eta_{mK}}{\eta_{PM}}}$  aufgetragen. Dies entspricht der

Reduktion der Penetration der jeweiligen Suspension durch scherratenabhängiges Materialverhalten. Alle Suspensionen, an denen SiO<sub>2</sub> beteiligt ist, weisen ein erhöhtes Potential auf, die Eindringtiefe zu verringern. Die Modifizierung mit 1,5 Vol.% SiO<sub>2</sub> zeigt mit 18% Reduktion der Penetration den größten Effekt auf.

Für die Bewertung dieser Ergebnisse muss in Betracht gezogen werden, dass aufgrund der deutlich vereinfachten Betrachtung über eine Rohrströmung, die Ergebnisse eine orientierende Abschätzung darstellen. Dies bedeutet, reale Werte können von den angegebenen Werten abweichen. Für die Versuche wird erwartet, dass die generelle Tendenz, eine Verringerung der Penetration durch das scherverdünnenden Materialverhalten über einen Scherratenbereich von 0 bis 1000 1/s, Übereinstimmung vorliegt.

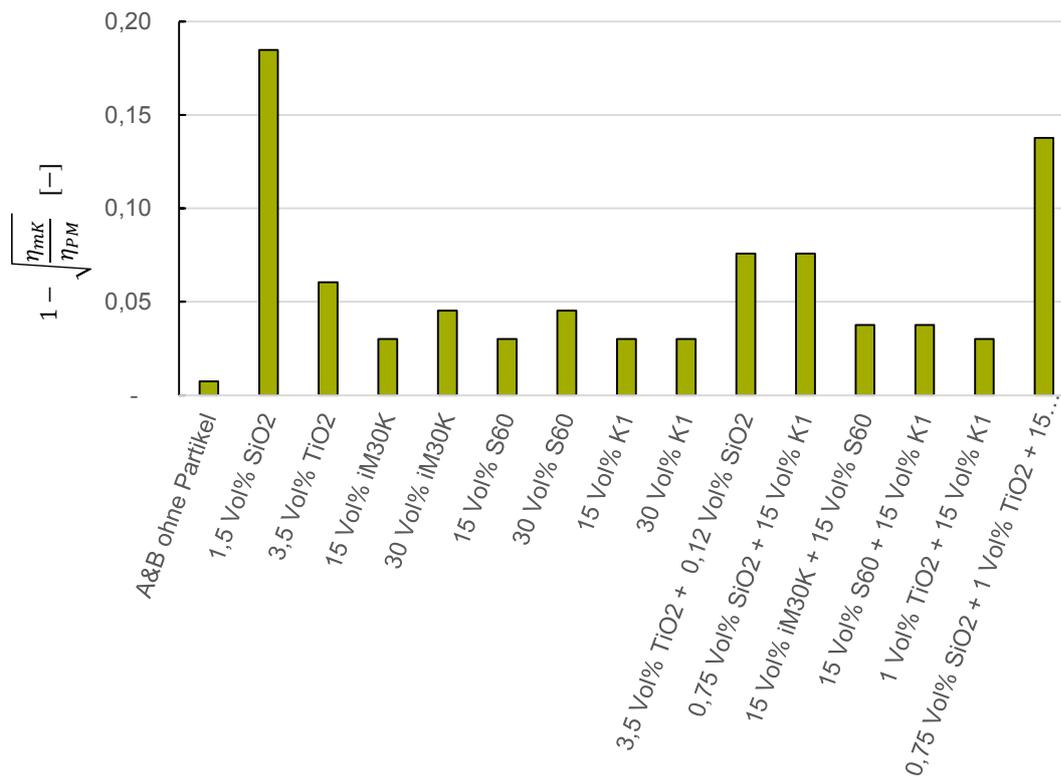


Abb. 6-27: Reduktion der Penetration durch scherratenabhängigen Materialverhalten

### 6.7.4 Dimensionierung der Partikelanzahl

Über den Typ und die Anzahl an Partikeln lässt sich Einfluss darauf nehmen, wie der Filtereffekt sich ausprägt bzw. welche Viskosität die Suspension hat. Für die Dimensionierung muss darauf geachtet werden, dass sich der Filtereffekt richtig ausprägt und eine Prozessierbarkeit weiterhin gegeben ist. Letztere wird über eine rheologische Charakterisierung sichergestellt. (6.7.1) Zur Dimensionierung der Partikelanzahl wird eine minimal notwendige Anzahl berechnet, was bedeutet, dass nach dem Umströmen der Preform keine Partikel mehr in der Suspension sind. Es wird davon ausgegangen, dass sich ein homogener Filterkuchen mit der Höhe  $H_T$  ausbildet. Filtrat dringt einheitlich mit der Eindringtiefe  $t_p$  ein. Die geometrischen Definitionen sind in Abb. 6-28 dargestellt. Es werden folgende Volumen definiert:

$V_{Preform}$  Volumen welches die Preform im Bauteil einnimmt

$V_E$  Volumen in dem Filtrat die Preform eingedrungen ist

$V_{FK}$  Volumen des gebildeten Filterkuchens

$V_I$  Nichtgetränktes Innenvolumen

- $V_L$  Volumen zwischen den Fasern  
 $V_F$  Volumen welches die Fasern einnehmen  
 $V_P$  Volumen eines Partikels  
 $V_{HS}$  Volumen des Harzsystems

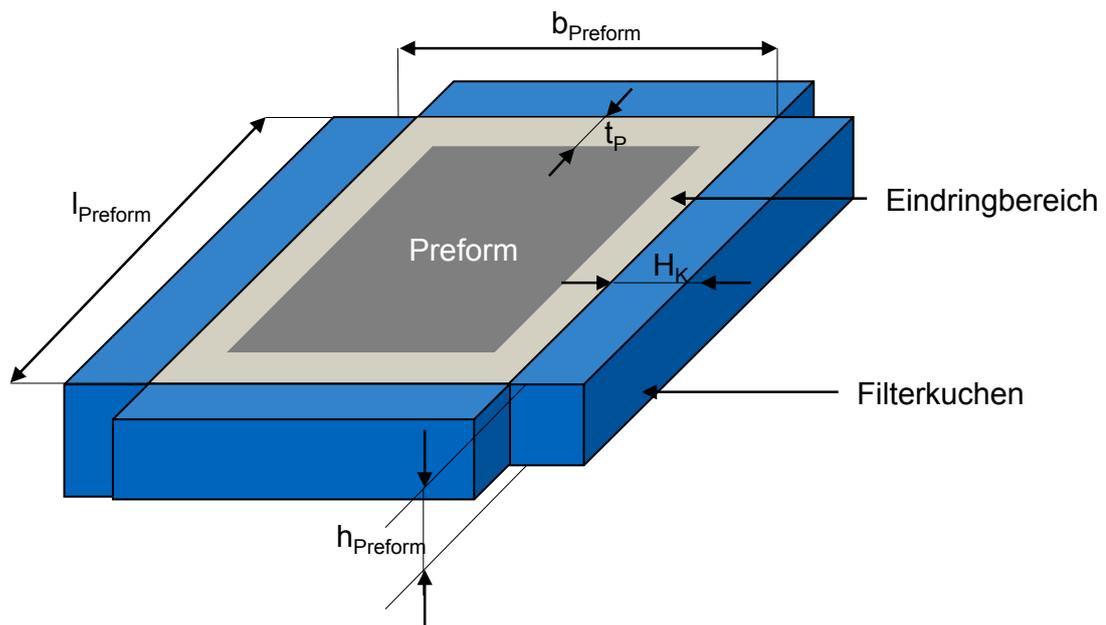


Abb. 6-28: Definitionen zur Suspensionsdimensionierung

Es gilt:

$$V_E = V_{Preform} - V_I \quad (6-18)$$

In dem Bereich, in dem die Preform getränkt wird, dringt Filtrat bzw. Suspension ein. Dies hängt vom Verhältnis des Partikeldurchmessers zur Porenverteilung in diesem Bereich ab. Damit wird:

$$V_{L_E} = (1 - v_f) * V_E = V_{L_E, Filtrat} + V_{L_E, Susp} \quad (6-19)$$

Suspension kann nur in dem Bereich in die Preform eindringen, in dem die Poren größer sind als die Partikel in der Suspension. Der entsprechende Flächenanteil  $F$  wird über die in Abb. 6-16 dargestellten Ergebnisse errechnet ( $V_{L_E, Susp} = FV_E$  bzw.  $V_{L_E, Filtrat} = (1 - F)V_E$ ). Bildet sich der Filterkuchen im Bereich in dem Suspension in die Preform eingedrungen ist  $V_{L_E, Susp}$  in der dichtesten Kugelpackung, aus ergibt sich die Anzahl der

notwendigen Partikel. Die Anzahl an Partikeln, die in die Suspension in die Preform eingedrungen sind, ist:

$$P_{E,min} = \frac{0,74V_{L_{E,Susp}}}{V_P} \quad (6-20)$$

Die Anzahl der Partikel im Filterkuchen errechnet sich aus:

$$P_{FK,min} = \frac{0,74 * V_{FK}}{V_P} \quad (6-21)$$

Die minimale Anzahl an Partikeln in einer Suspension bildet die Summe aus Partikeln im Filterkuchen und in der Preform.

$$P_{min} = P_{E,min} + P_{FK,min} \quad (6-22)$$

Zur Dimensionierung der Suspension wird das Volumen aller Partikel errechnet.

$$V_{P,min} = V_P * P_{min} \quad (6-23)$$

Das Suspensionsvolumen setzt sich aus dem Partikelvolumen und dem Trägermaterial Harzsystem  $V_{Susp} = V_{HS} + V_{P,min}$  zusammen. Es lässt sich der Volumenanteil an Partikeln errechnen

$$Vol. \% = \frac{V_{P,min}}{V_{Susp}} * 100\% \quad (6-24)$$

Tab. 6-10 fasst die Berechnung für die verwendeten Monosuspensionen zusammen. Das Ergebnis eines Volumenanteils dient als Grundlage für die durchgeführten Versuche. Die Angaben für die Filterkuchenhöhe sind Annahmen, die auf Basis von Vorversuchen getroffen wurden. Dabei gilt, je größer der Partikeldurchmesser, desto höher der Filterkuchen. Die Angabe der Eindringtiefe ist eine Vorgabe, die den geforderten Randbedingungen entspricht.

**Tab. 6-10: Größen zur Berechnung der Mindestpartikelanzahl der Monosuspensionen**

Partikel	$t_p$ [cm]	$H_k$ [cm]	$V_l$ [cm <sup>3</sup> ]	$V_E$ [cm <sup>3</sup> ]	F [%]	$V_{L,E,Susp}$ [cm <sup>3</sup> ]	$P_{E,min}$ [109 Stk]	$P_{FK,min}$ [109 Stk]	VP [μm <sup>3</sup> ]	$P_{min}$ [109 Stk]	Vol% [%]
SiO <sub>2</sub> 380	0,3	0,02	279,1	13,8	98,9	13,6	4283	293	2,35	4576	3
TiO <sub>2</sub> P25	0,5	0,05	270	22,9	63,6	14,6	60	9,6	179,6	69,6	3,48
iM30K	0,5	0,1	270	22,9	42,2	9,6	2,8	1,3	2572	4,1	2,95
S60	0,5	0,15	270	22,9	37,7	8,6	0,45	0,4	14137	0,85	3,35
K1	0,5	0,2	270	22,9	23,2	5,3	0,027	0,05	143793	0,077	3,1

## 6.7.5 Versuchsplan

Die in den vorangehenden Kapiteln durchgeführten Betrachtungen basieren alle auf nichtreaktivem Matrixmaterial. Die Anwendung wird in der hier beschriebenen Weise immer mit reaktivem Material sein. Um die theoretischen Grundlagen vollständig zu verifizieren, sind Grundlagenversuche mit nichtreaktivem Material notwendig. Dabei ist erst sicherzustellen, dass die Eigenschaften des nichtreaktiven Materials dem des später verwendeten reaktiven Materials entsprechen. Der zeitliche Aufwand für diese Nachweisführung ist nicht angemessen, weshalb direkt Versuche mit reaktivem Material durchgeführt werden.

Die Anforderungen an das reaktive Material leiten sich aus den in Kapitel 6.3 und 6.5 dargestellten Grundlagen bzw. theoretischen Betrachtungen ab. Über das Aushärten hinweg soll Sedimentation bzw. Aufschwimmen der Partikel soweit wie möglich vermieden werden. Darüber leitet sich die Anforderung einer möglichst hohen Viskosität ab. Das Umströmen der Preform ist im Verhältnis zum Tränken der Preform ein schneller Prozess, weshalb die chemische Reaktion „schnell“ ablaufen kann. Alle Versuche werden bei Raumtemperatur durchgeführt. Der Vorbereitungsprozess des Materials muss bei der Auswahl mit in Betracht gezogen werden. Für alle Versuche wird das Material U1404 der Firma Sika [181] verwendet.

Zur Ermittlung der in Tab. 6-5 dargestellten Korrelationen zwischen Partikeleigenschaften und Eindringtiefe, werden Versuche durchgeführt. Die Versuchsparameter aus Partikeldurchmesser, Partikeldurchmesserverteilung und Anzahl der Partikel definieren den Versuchsraum. Ziel der Versuche ist es, die theoretischen Grundlagen zu verifizieren, um eine Orientierung für eine Entwicklung zu geben. Die Limitierung für die jeweiligen Volumenanteile leitet sich aus der Wirksamkeit bzw. Prozessfähigkeit der Suspension ab.

Die Dimensionierung der Monosuspensionen beruht auf den in Tab. 6-10 berechneten Werte für eine Minimalanzahl an Partikeln und der Partikelkonzentration, also dem Verhältnis von Anzahl der Partikel pro Volumen des Definitionsbereichs. Dieses wird zum

Zeitpunkt nach dem Umströmen im Bereich der Suspension ins Verhältnis zu dem im Filterkuchen plus den penetrierten Preformbereich gesetzt. Dabei wird im ersten Schritt versucht, diesen Wert für alle Suspensionen auf einen Wert von 0,56 zu setzen. Über die unterschiedlichen Partikeldurchmesser wird dieser Wert nicht genau getroffen. Bei den kleinen Partikeldurchmessern von SiO<sub>2</sub> und TiO<sub>2</sub> ist keine Fließfähigkeit des Materials mehr gegeben, weshalb der Wert entsprechend reduziert wird (Tab. 6-11).

**Tab. 6-11: Dimensionierung der Monosuspensionen auf Basis von Partikelkonzentrationen**

Monosuspension	Vol. % [%] vor der Injektion	Partikelkonz. Suspension/ Partikelkonz. Filterkuchen+ Partikelkonz. Eindringen [-]
SiO <sub>2</sub> 380	1,5	0,0436
TiO <sub>2</sub> P25	3,5	0,000836
iM30K	15	0,61
S60	15	0,52
K1	15	0,58

Für die Dimensionierung der Hybridsuspensionen wird immer eine Monosuspension als Grundlage verwendet. Dadurch wird die Mindestanzahl an Partikeln immer überschritten.

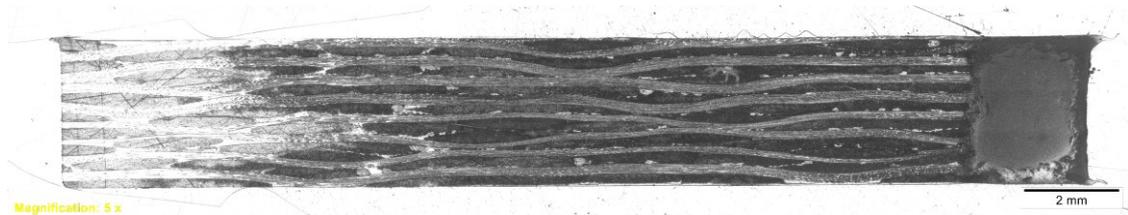
Der Versuchsplan mit allen Anteilen ist in Tab. 6-12 dargestellt.

**Tab. 6-12: Versuchsplan zur Charakterisierung der Penetration**

Versuch-Nr.	Partikel für die Suspensionen				
	SiO <sub>2</sub> 380 d = 0,3...3 µm	TiO <sub>2</sub> P25 d = 1,5... 13,2 µm	iM30K d = 4...30 µm	S60 d = 8...65 µm	K1 d = 12...120 µm
1	1,5 Vol.%	-	-	-	-
2	-	3,5 Vol.%	-	-	-
3	-	-	15 Vol.%	-	-
4	-	-	-	15 Vol.%	-
5	-	-	-	-	15 Vol.%
6	-	-	30 Vol.%	-	-
7	-	-	-	30 Vol.%	-
8	-	-	-	-	30 Vol.%
9	0,12 Vol.%	3,5 Vol.%	-	-	-
10	0,75 Vol.%	-	-	-	15 Vol.%
11	-	-	15 Vol.%	15 Vol.%	-
12	-	-	-	15 Vol.%	15 Vol.%
13	-	1 Vol.%	-	-	15 Vol.%
14	0,75 Vol.%	1 Vol.%	-	-	15 Vol.%

Jede Hybridsuspension baut auf der Maximalanzahl an Partikeln eine Monosuspension auf. Dadurch kann durch die Erweiterung um einen zusätzlichen Partikelgrößenbereich Rückschluss auf die Relevanz dessen gezogen werden. Als Partner wird zunächst ein benachbarter Partikelgrößenbereich ergänzt.

Für die Wahl der Referenz bieten sich Versuche ohne Partikelmodifizierung an. In Abb. 6-29 ist ein Schliffbild aus den Umströmversuchen aus [148] dargestellt. Es zeigt sich eine Penetration der Preform auf der Seite des Einlasses von bis zu 19mm. Eine einheitliche Penetration entlang der Preformbeschnittkante ist Voraussetzung für eine zielführende Anwendung. Das Ziel „Sperrfiltration entlang der Preformkante“ wird bei der Referenz nicht erreicht. Aus diesem Grund werden keine weiteren Versuche mit reinem Sekundärmaterial durchgeführt.



**Abb. 6-29: Penetration der Preform beim Umströmversuch mit Sekundärmaterial ohne Partikelmodifizierung [148]**

Die Korrelation zwischen den Versuchen und den zu erwartenden Antworten ist in Tab. 6-13 zusammengefasst. Sie definiert den Weg für die spätere Auswertung.

Von jeder Konfiguration wird nur ein Versuch durchgeführt. Alle generierten Ergebnisse sind als orientierend zu verstehen.

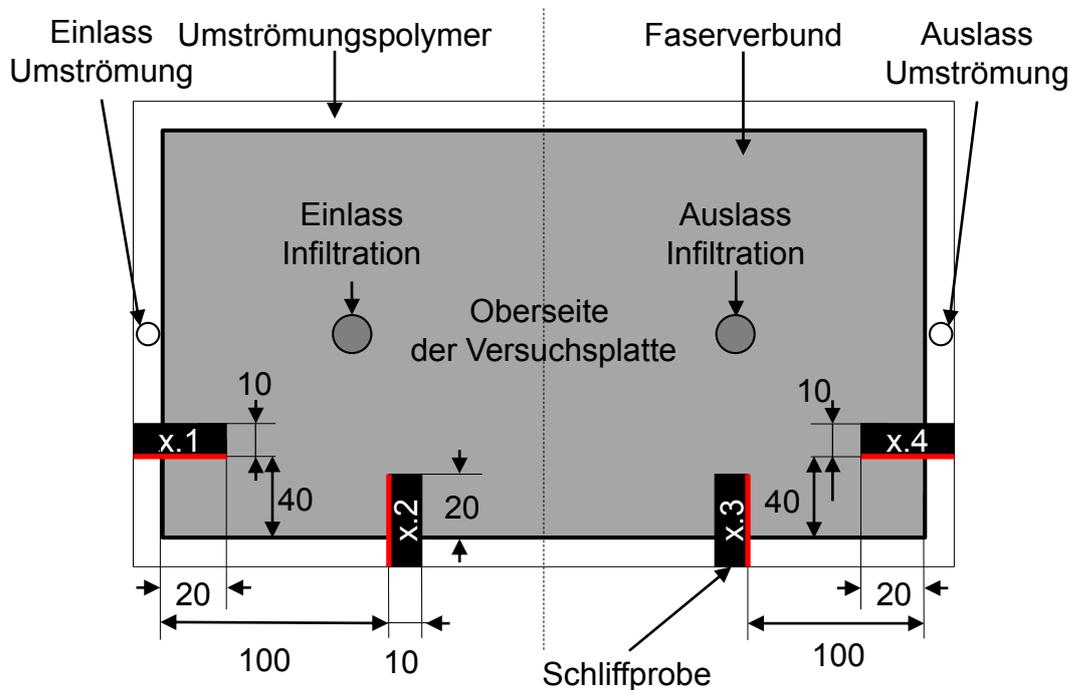
**Tab. 6-13: Vorgehen zum Auswerten der Versuche**

Ziel/ Erkenntnisgewinn	Versuchsstrategie	Nr. der Versuche
Korrelation zwischen Partikelgröße und Eindringtiefe	Partikelgröße variieren	Mono:
	Partikelanzahl konstant	1→ 2→ 3→ 4→ 5
	Partikelgrößenbereich konstant	
Korrelation zwischen Partikelanzahl und Eindringtiefe	Partikelanzahl variieren	Mono
	Partikelgröße konstant	3→ 6
	Partikelgrößenbereich konstant	4→ 7
		5→ 8
Korrelation zwischen Partikelgrößenbereich und Eindringtiefe	Partikelgrößenbereich variieren	Mono auf 2er Hybrid:
	Partikelgröße konstant	2→ 9/ 3→ 11/ 4→ 11/ 4→ 12
	Partikelanzahl konstant*	5→ 10/ 12/ 13/ 14

## 6.8 Versuchsauswertung

Für alle in Kapitel 6.7.1 aufgeführten Varianten wird ein Fertigungsversuch durchgeführt. Zur Charakterisierung werden an definierten Stellen Proben entnommen, die in Kunstharz eingebettet werden, um sie auswerten zu können. In Abb. 6-30 sind alle Positionen dargestellt. Rot dargestellt ist die geschliffene Seite der Probe. Insgesamt werden pro Versuch vier Proben entnommen, jeweils eine auf der „Einlass- bzw. Auslassseite und zwei Stück über die lange Seite der Preform. Die Nummerierung erfolgt vom

Einlass in Auslassrichtung des Sekundärmediums. Zu Beginn der Nummerierung steht die Nummer der Probeplatte, an zweiter Stelle die Entnahmeposition.



**Abb. 6-30: Position der Schlißproben an einer Versuchsprobe**

Zur Auswertung der Schlißproben wird ein Auflichtmikroskop BX41M-LED der Firma Olympus verwendet. In Abb. 6-31 ist beispielhaft die Schlißprobe an der Position 1 des Versuchs Nr. 14 abgebildet. Die reine Suspension ist links im RT- Kanal zu erkennen. Eindringene Suspension zeichnet sich dunkel ab.

Zur Auswertung werden unterschiedliche Maße herangezogen. Es werden jeweils die minimale (gelb) und die maximale (rot) Eindringtiefe gemessen. Der Mittelwert über alle Schlißbilder einer Versuchsplatte von der Differenz zwischen minimaler und maximaler Eindringtiefe einer Probe wird als Maß für die Gleichmäßigkeit herangezogen.

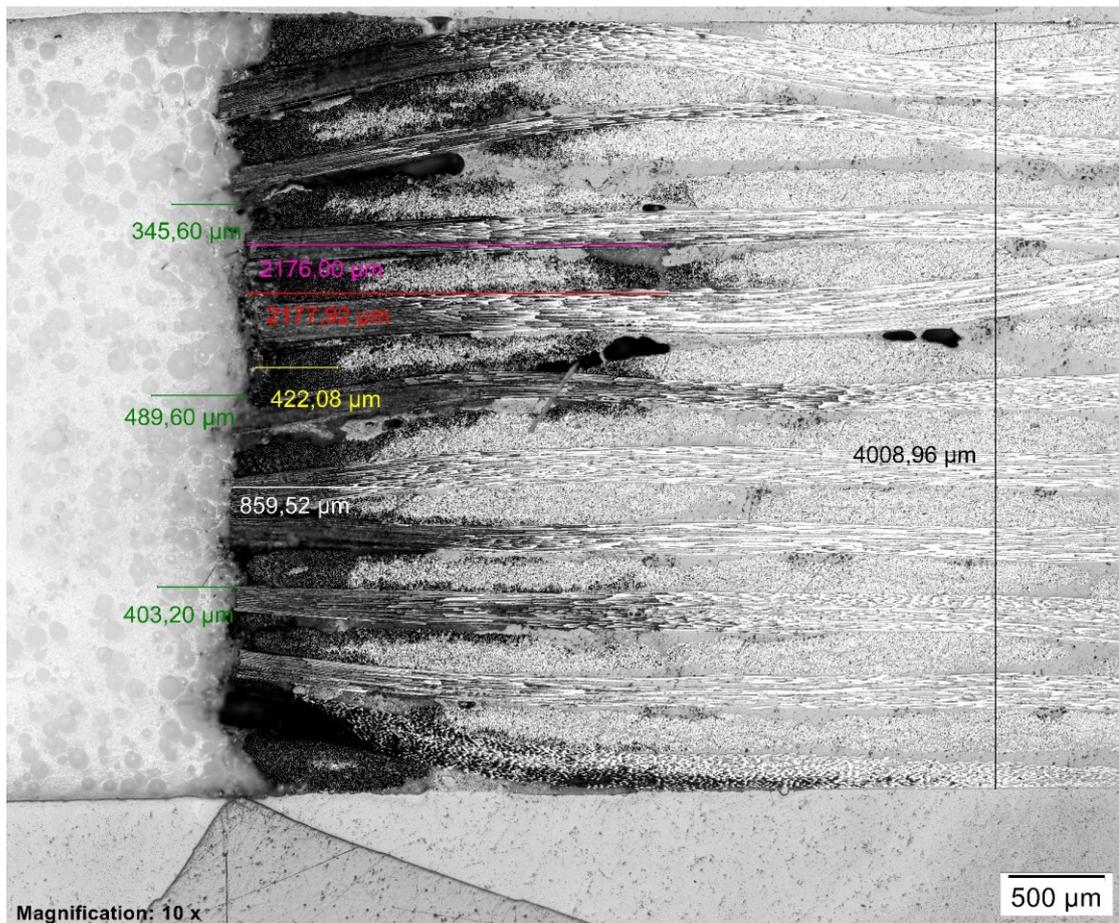


Abb. 6-31: Schlibbild des Versuchs Nr. 14 an der Position 1

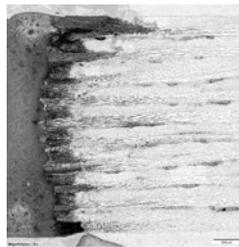
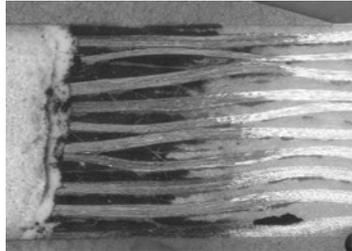
Der Versuch der Auswertung bezüglich Mikro- (weiß) und Makrofluss (lila) wurde als nicht zielführend verworfen.

### 6.8.1 Monosuspensionen

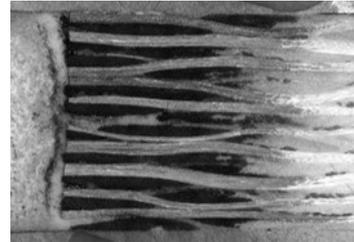
In Abb. 6-32 sind die Schlibbilder der Monosuspensionen an der Position eins, nahe des Einlasses der Sekundärmatrix, dargestellt. Die einlassnahe Seite der Preform hat als erstes Kontakt mit der Sekundärmatrix. Es wird erwartet, dass dort die größte Penetration mit Sekundärmatrix erfolgt.

Im Versuch V01 wurden  $\text{SiO}_2$  Partikel beigemischt. Der Verlauf der Fließfront ist einheitlich. Lediglich im oberen Bereich findet eine tiefere Penetration aufgrund eines lokalen Defekts der Preform statt, wodurch sich die maximale Eindringtiefe von 1.3mm ergibt.

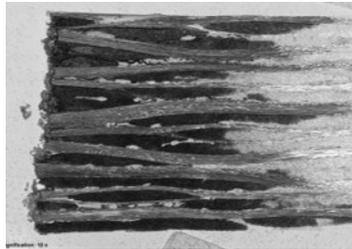
Alle weiteren Versuche weisen nicht den einheitlichen Verlauf der Fließfront auf. Aufgrund dessen wird bei der Auswertung die minimale bzw. maximale Penetration der Preform herangezogen. Die Ergebnisse für die maximale Penetration ist in Abb. 6-33 für die vier verschiedenen Schlibbildpositionen eines Versuchs dargestellt.

V01: 1,5 Vol.% SiO<sub>2</sub>380V02: 3,5 Vol.% TiO<sub>2</sub> P25

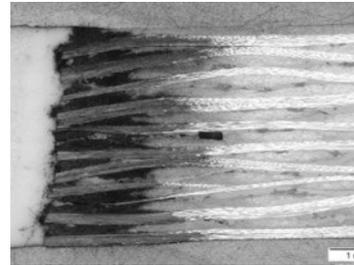
V03: 15 Vol.% iM30K



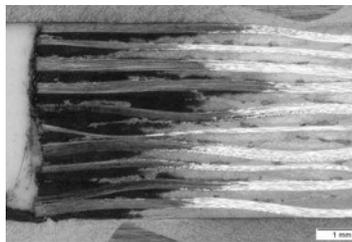
V04: 15 Vol.% S60



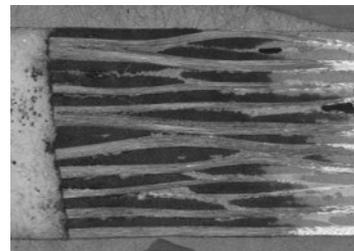
V05: 15 Vol.% K1



V06: 30 Vol.% iM30K



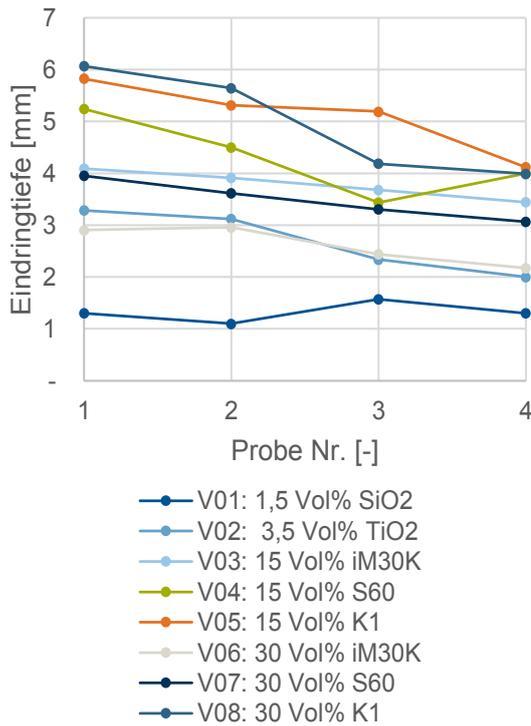
V07: 30 Vol.% S60



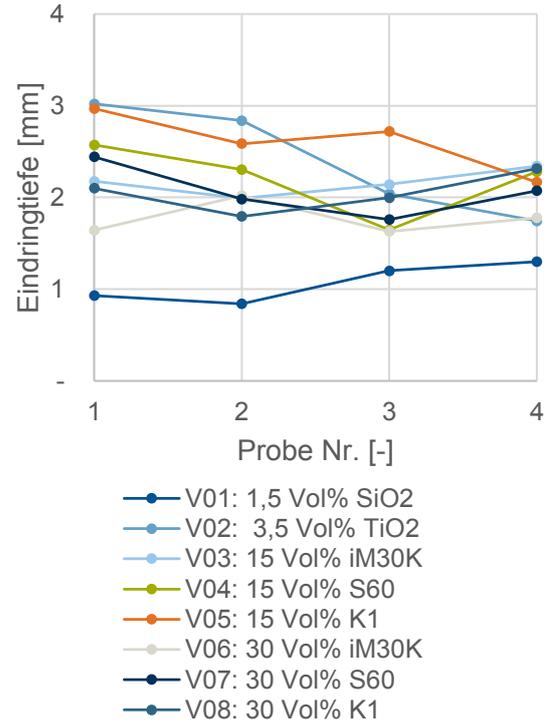
V08: 30 Vol.% K1

**Abb. 6-32: Schliffbilder der Versuche mit Monosuspension an der einlassnahen Position Nr. 1**

Die maximale Penetration wird, außer bei Versuch V01, an Position 01 nahe des Einlasses erreicht. Bei allen Versuchen, außer V01, zeigt sich entlang der Fließrichtung eine Reduktion der Penetration. In Versuch V01 mit SiO<sub>2</sub> sind alle Werte im Bereich von 1,1 bis 1,6mm, was die minimale Penetration der Versuchsreihe ist. Die maximale Penetration liegt bei Versuch V08 mit den Glaskügelchen K1 15Vol.% vor. Der Versuch V08 zeigt neben dem maximalen Betrag der Penetration in Position eins mit 2mm ebenfalls den größten Unterschied zwischen Position eins und vier auf. In Abb. 6-34 ist der Unterschied zwischen der maximalen und der minimalen Penetration über die vier definierten Positionen dargestellt. An der einlassnahen Seite an Position eins ergibt sich jeweils die größte Differenz. Die kleinste Differenz zeigt die Modifizierung mit SiO<sub>2</sub>, die größte bei TiO<sub>2</sub>. Bei den Modifizierungen mit IM30K und SiO<sub>2</sub> steigt die Differenz in Richtung des Auslasses leicht an, während sie bei den übrigen Suspensionen abfällt.



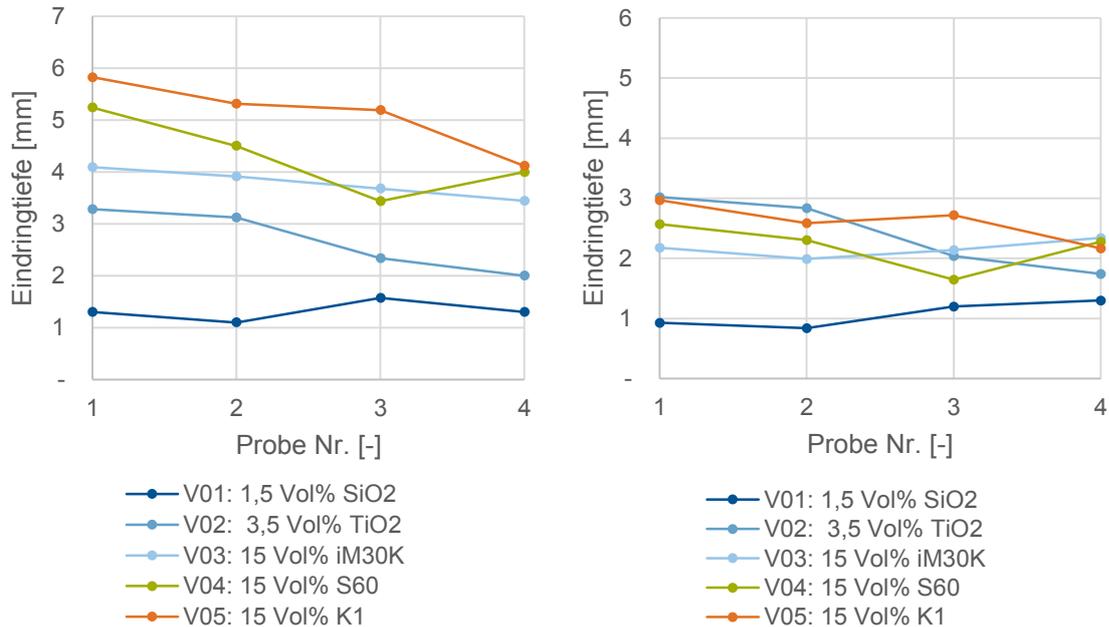
**Abb. 6-33: Maximale Eindringtiefe der Monosuspensionen an verschiedenen Positionen**



**Abb. 6-34: Differenz der minimalen und der maximalen Penetration der Versuche mit Monosuspensionen**

Um die in Tab. 6-13 beschriebenen Korrelationen aufzuzeigen, werden die jeweiligen Ergebnisse gesondert betrachtet.

### Korrelation zwischen Partikelgröße und Eindringtiefe



**Abb. 6-35:** Maximale Eindringtiefe der Versuche mit Monosuspensionen zur Ermittlung des Einflusses der Partikelgröße

**Abb. 6-36:** Differenz der minimalen und der maximalen Penetration der Versuche mit Monosuspensionen zur Ermittlung des Einflusses der Partikelgröße

In Abb. 6-35 ist die maximale Eindringtiefe für Versuch V01 bis V05 dargestellt. Mit steigendem Partikeldurchmesser steigt die Penetration der Preform an. Dieser Trend ist über alle Schlißbildpositionen zu beobachten. Die Unterschiede zwischen minimaler und maximaler Penetration an der jeweiligen Position ist keine Korrelation zu erkennen (Abb. 6-36).

### Korrelation zwischen Partikelanzahl und Eindringtiefe

In Abb. 6-37 sind die Ergebnisse zur Korrelation mit der Partikelanzahl dargestellt. Beim größten Partikel K1 hat die erhöhte Anzahl praktisch keine Auswirkung. Beim Partikel S60 wird an der Position eins eine Reduktion um 1,3mm erreicht, beim Partikel um IM30K 1,2mm erreicht.

Die Unterschiede zwischen minimaler und maximaler Penetration über Position 1 bis 4 liegen in einem sehr engen Wertebereich. Beim größten Partikel lässt sich eine Reduktion um ca. 1mm erkennen, wobei dies im Rahmen der textilen Ungenauigkeit liegt (Abb. 6-38).

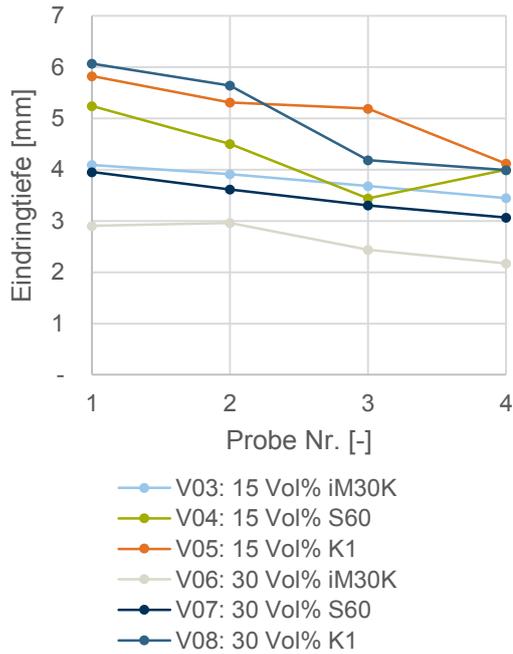


Abb. 6-37: Maximale Eindringtiefe der Versuche mit Monosuspensionen zur Ermittlung des Einflusses der Partikelanzahl

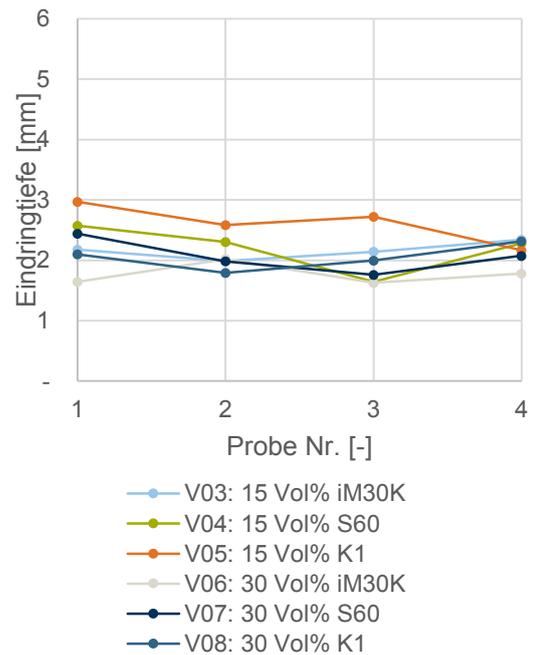
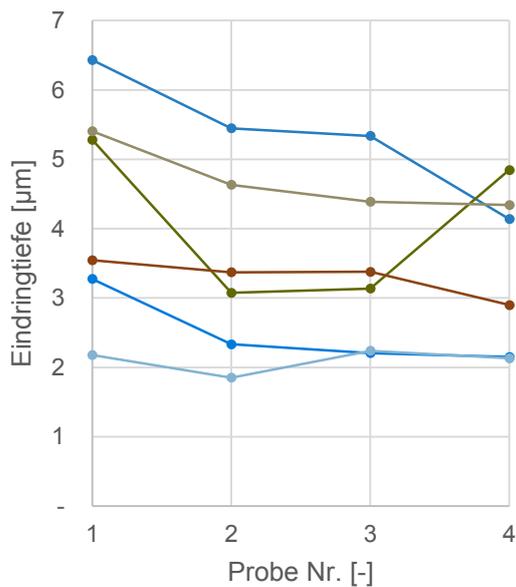


Abb. 6-38: Differenz der minimalen und der maximalen Penetration der Versuche mit Monosuspensionen zur Ermittlung des Einflusses der Partikelanzahl

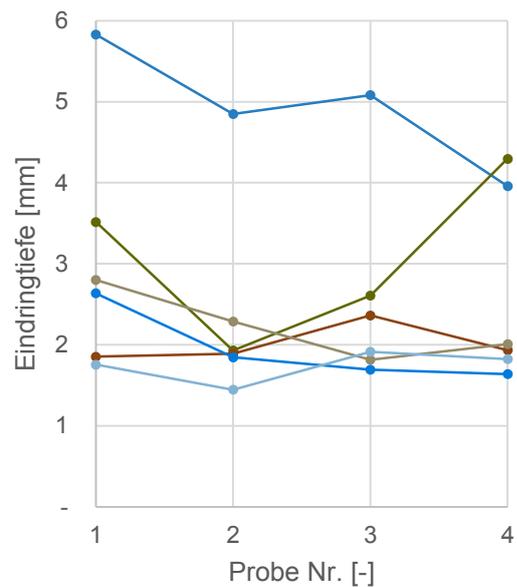
## 6.8.2 Hybridsuspensionen

In Abb. 6-39 und Abb. 6-40 sind die Ergebnisse für die Hybridsuspensionen dargestellt.



● V09: 3,5 Vol% TiO<sub>2</sub>/ 0,12 Vol% SiO<sub>2</sub>  
 ● V10: 15 Vol% K1/ 0,75 Vol% SiO<sub>2</sub>  
 ● V11: 15 Vol% iM30K/ 15 Vol% S60  
 ● V12: 15 Vol% S60/ 15 Vol% K1  
 ● V13: 1 Vol% TiO<sub>2</sub>/ 15 Vol% K1  
 ● V14: 0,75 Vol% SiO<sub>2</sub>/ 1 Vol% TiO<sub>2</sub>/ 15 Vol% K1

**Abb. 6-39: Maximale Eindringtiefe der Hybridsuspensionen an verschiedenen Positionen**



● V09: 3,5 Vol% TiO<sub>2</sub>/ 0,12 Vol% SiO<sub>2</sub>  
 ● V10: 15 Vol% K1/ 0,75 Vol% SiO<sub>2</sub>  
 ● V11: 15 Vol% iM30K/ 15 Vol% S60  
 ● V12: 15 Vol% S60/ 15 Vol% K1  
 ● V13: 1 Vol% TiO<sub>2</sub>/ 15 Vol% K1  
 ● V14: 0,75 Vol% SiO<sub>2</sub>/ 1 Vol% TiO<sub>2</sub>/ 15 Vol% K1

**Abb. 6-40: Differenz der minimalen und der maximalen Penetration der Versuche mit Hybridsuspensionen**

Die maximale Penetration ist bei Versuch V14, bestehend aus drei verschiedenen Partikeln, am geringsten, welche über alle vier Positionen einheitlich gehalten wird. Die maximale Penetration liegt mit 6,5mm bei V09 vor, welche mit dem größten Delta von 2mm bis zur Position vier einhergeht. V10 zeigt als einziger Versuch einen Anstieg bei der auslassnahen Position 4. Es liegt ein Delta von 2mm zwischen den Positionen vor. Der Unterschied innerhalb der Positionen liegt bei allen Suspensionen bei 2-3mm. Lediglich bei V09 und V10 ist ein Gradient entlang der Positionen zu erkennen.

Zur Auswertung des Einflusses der Partikelgrößenverteilung sind die maximale Penetration sowie die maximale Differenz zwischen minimaler und maximaler Penetration in Abb. 6-41 dargestellt. Dabei werden die in Tab. 6-13 beschriebenen korrelierenden Versuche in Blöcken dargestellt.

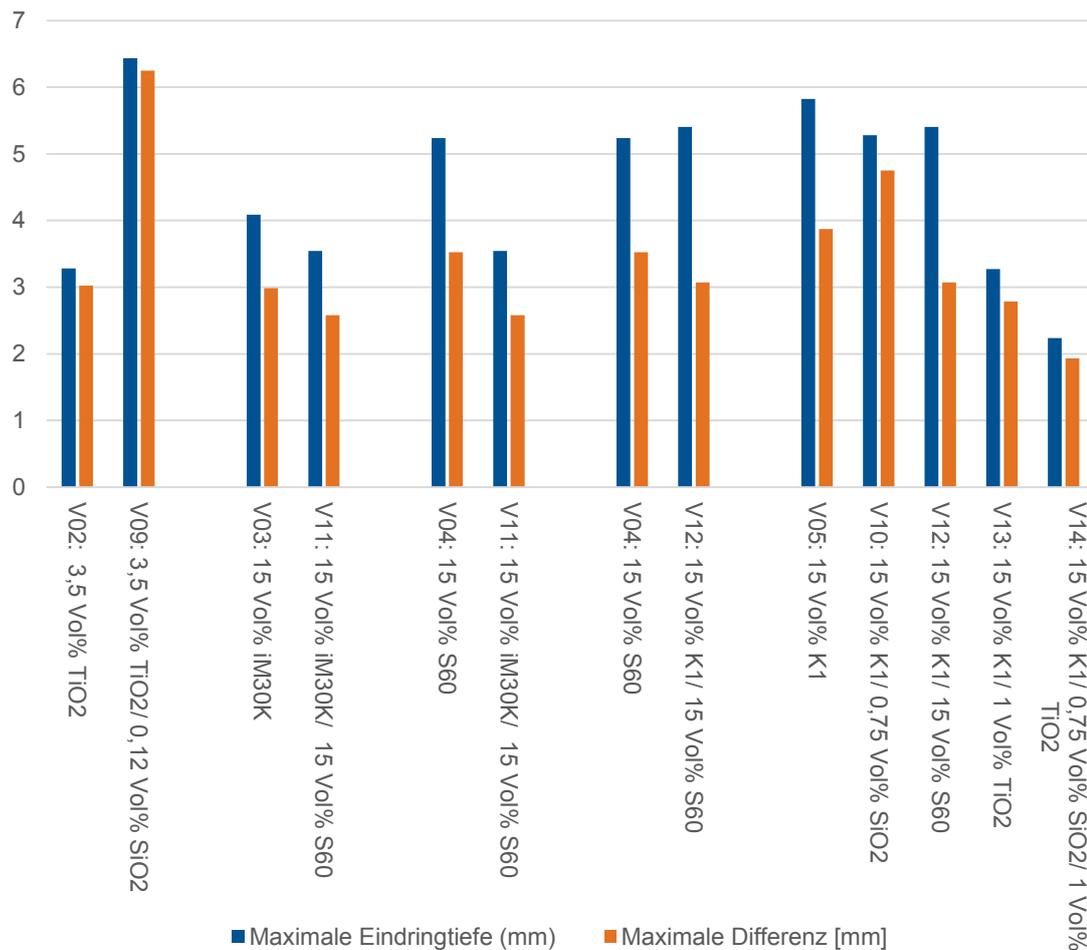


Abb. 6-41: Korrelation der Partikelgrößenverteilung von Mono- und Hybridsuspensionen

Die Verbreiterung der Partikelgrößenanteile von TiO<sub>2</sub> um 0,12 Vol.% SiO<sub>2</sub> führt zu einem deutlichen Anstieg der maximalen Penetration und dem Unterschied zwischen minimaler und maximaler Penetration. Alle weiteren Vergrößerungen des Partikelgrößenbereichs führen zu einer Reduzierung der maximalen Penetration und des Unterschieds zwischen minimaler und maximaler Penetration. Die kleinste Penetration liegt bei der Suspension mit dem größten Partikelgrößenbereich aus Glaskugeln K1, SiO<sub>2</sub> und TiO<sub>2</sub> vor.

## 6.9 Diskussion und Verifikation

In Tab. 6-13 sind die drei Korrelationen für die zu untersuchende Partikelmodifizierung des Sekundärmaterials, Partikelgröße, Partikelanzahl und Partikelgrößenverteilung, auf die Penetration beim Umströmen dargestellt.

Es zeigt sich, dass mit Zunahme der Partikelgröße die Penetration und der Gradient zwischen Einlass und Auslass ansteigen. Der kleinste untersuchte Partikel SiO<sub>2</sub> liefert den

geringsten Betrag an Penetration, wobei eine einheitliche Penetration über den Weg von Einlass zu Auslass erreicht wird.

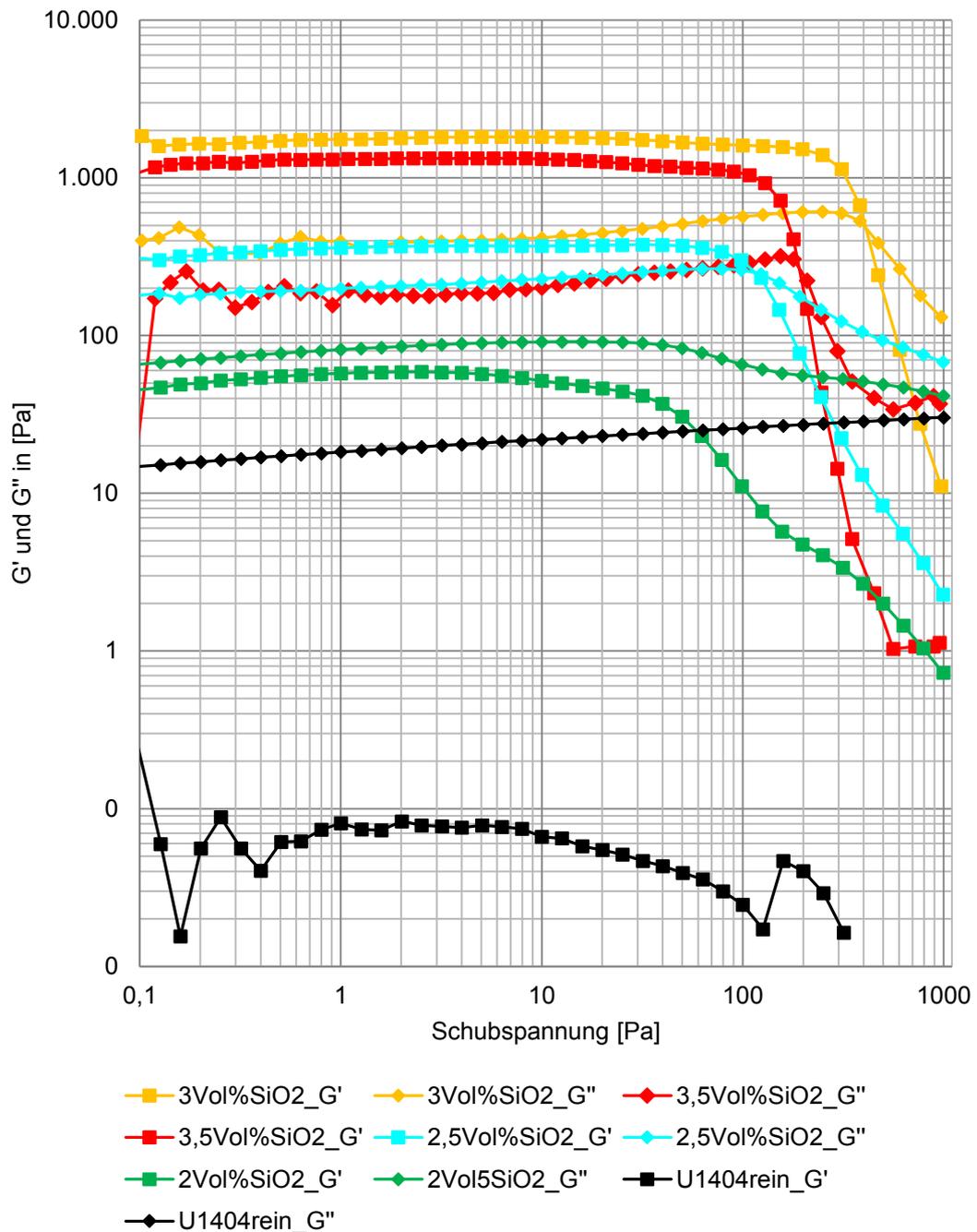
Die Erhöhung der Partikelanzahl führt zu einer Verringerung der Penetration. Dabei bleibt der Gradient zwischen Auslass und Einlass immer erhalten.

Bei einer Vergrößerung des Partikelgrößenbereichs verringert sich die Penetration der Preform. Eine Modifizierung mit 0,75 Vol.% SiO<sub>2</sub> bei einer Hybridsuspension bringt die geforderte einheitliche Penetrationstiefe von Einlass zu Auslass, was die Bedeutung der Partikel mit kleinem Durchmesser unterstreicht.

Die Monosuspension mit 1,5Vol. % liefert mit 1mm die geringste einheitliche Penetration, gefolgt mit 2mm Penetrationstiefe von der Hybridsuspension aus 0,75Vol. % SiO<sub>2</sub>, 1Vol. %TiO<sub>2</sub> und 15Vol. % K1 Glaskugeln.

In der rheologischen Charakterisierung in Kapitel 6.7.1 wird der Zusammenhang der Partikelgröße und der Abhängigkeit von den Strömungsrandbedingungen aufgezeigt. Ein Filter mit nicht deformierbarer Struktur kann keinen vollständigen Verschluss aufbauen, solange die Reaktivität des Filtratstroms vernachlässigt werden muss. Eine reine Partikelmodifizierung muss immer einen Gradienten vom Einlass hin zum Auslass aufweisen. Dies bedeutet, die angestrebte, einheitliche Penetrationstiefe kann nur über darüber hinaus gehende Effekte generiert werden. Die Reaktivität, der zeitliche Fortschritt der Viskosität, ist über die Dauer der durchgeführten Versuche zu gering, als dass diese eine Rolle spielen kann. In Kombination mit der in Kapitel 6.7.3 durchgeführten Betrachtung bleibt als Ursache für die einheitliche Penetration das rheologische Materialverhalten, in diesem Fall die Scherratenabhängigkeit der Viskosität, über die Modifizierung mit SiO<sub>2</sub>.

Zur Verifizierung dieser Überlegung werden weitere Untersuchungen dieser Suspension durchgeführt. In Abb. 6-42 ist die oszillatorische Charakterisierung über einen Amplitudendurchlauf von Suspensionen mit unterschiedlichen Anteilen an SiO<sub>2</sub> dargestellt. Die Speicher- bzw. Verlustmodulentwicklung bietet die Möglichkeit zu identifizieren ob das viskose oder das linearelastische Materialverhalten dominiert. Bei nichtmodifiziertem Basismaterial U1404 ist eine Dominanz des viskosen Anteils über den Verlustmodul  $G''$  zu erkennen. Mit zunehmendem Partikelanteil verschiebt sich die Dominanz hin zum elastischen Materialverhalten, was im Speichermodulverlauf  $G'$  zu erkennen ist. Ab einem Anteil von 2,5 Vol.% ist eine Fließgrenze über den Schnittpunkt von  $G'$  und  $G''$  zu erkennen, was Binghammaterialverhalten entspricht [166]. Diese Betrachtung legt nahe, dass eine Pfropfenströmung das Eindringen von Fluid in die Preform vollständig unterbindet. Die Wandreibung, als dabei bedeutender Parameter, ist für eine aus Fasern bestehende Preform aktuell nicht untersucht. Dabei muss der linear elastische Anteil in Korrelation zu auftretenden Effekten wie das Faserspülen und der Penetrationstiefe gesetzt werden.

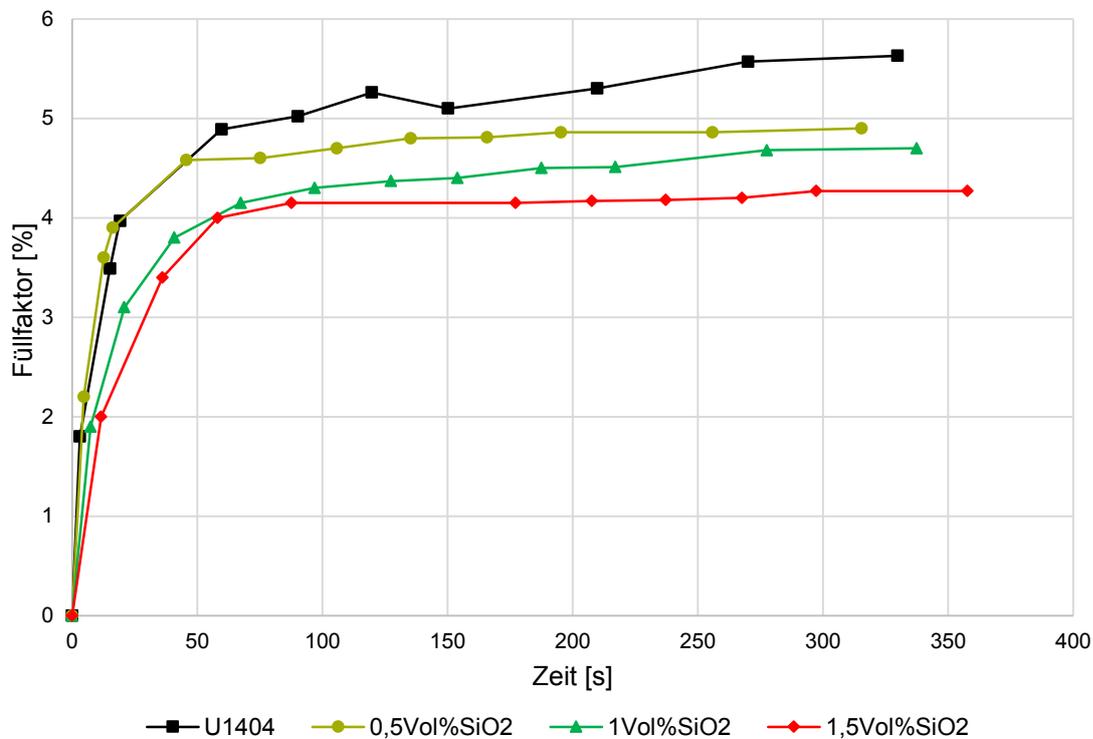


**Abb. 6-42: Amplitudendurchlauf von Suspensionen aus U1404 mit verschiedenen SiO<sub>2</sub> Anteilen mit einer oszillierenden Messung**  
 Angelegte Frequenz 1Hz; Variation der Schubspannung von 0,1 – 1.000Pa; Raumtemperatur

Um diese Überlegung zu verifizieren und konstante Penetration der Preform von Einlass zu Auslass nachzuweisen, werden Umströmversuche gemäß dem in Kapitel 6.7.2 beschriebenen Aufbau durchgeführt. Dabei wird eine durchsichtige Werkzeugoberseite verwendet, über die eine optische Auswertung der Fließfront über eine Bildauswerterroutine für das Programm MATLAB möglich ist (vgl. Kapitel 3.2.1). Der Messwert, der

herangezogen wird, ist der FF. Gemäß den Untersuchungen in Kapitel 4 nimmt der FF bei einem nicht modifizierten Fluid bis der Kanal vollständig gefüllt ist, zu. Aufgrund des weiter anliegenden Druckgradienten steigt der FF bis zum vollständigen Druckausgleich weiter an.

Die Versuche werden mit einem umlaufenden 3mm-Kanal, einer binderstabilisierten Preform, bestehend aus der Materialkombination aus Kapitel 3.2, einem Faservolumenanteil von 56% und einem konstanten Injektionsdruck von absoluten 200mbar durchgeführt. Zur Auswertung werden drei Bilder während des Füllvorgangs aufgenommen und ausgewertet. Um die Penetration darüber hinaus zu untersuchen, werden nach Erreichen des Auslasses weitere Bilder aufgenommen und ausgewertet. Die Ergebnisse sind in Abb. 6-43 dargestellt.



**Abb. 6-43: Entwicklung der relativen Eindringtiefe bei Umströmung mit verschiedenen Suspensionen mit SiO<sub>2</sub> Modifizierung**

Der FF entwickelt sich bei der Referenz, dem nicht modifiziertem U1404 Material, wie erwartet mit einer konstanten Steigerung nach Erreichen des Auslasses. Mit Additivierung des Sekundärmaterials mit SiO<sub>2</sub> reduziert sich der Anstieg des Füllfaktor nach Erreichen des Auslasses bis bei einem Anteil von 1,5 Vol.% ein konstanter Wert erreicht wird.

Mit einer Partikelgröße von 40nm liegt SiO<sub>2</sub> in der Größenordnung eines Filaments. Damit dringt dieser Partikel in die Preform mit ein. Das Ausfiltern erfolgt daher im Mik-

roflussbereich. Im Allgemeinen bestimmen beide Effekte, das rheologische Materialverhalten und der Filtereffekt, das Penetrationsverhalten von Suspensionen. Mit abnehmender Partikelgröße verschiebt sich die Wertigkeit in Richtung des rheologischen Materialverhaltens. Über den Partikelanteil kann die geforderte Penetrationstiefe angepasst werden und stellt dadurch eine geeignete Methode dar, das Sekundärmaterial im Hybridmatrixansatz zu modifizieren, um RT gezielt zu kontrollieren. Der Filtereffekt kann in Kombination mit der Reaktivität des Harzes eine Methode zur Penetrationstiefe darstellen. Für eine Untersuchung dieses Zusammenhangs ist automatisiertes Prozessequipment notwendig, welches aktuell am Lehrstuhl nicht verfügbar ist.



## 7 Zusammenfassung

Race Tracking (RT) ist ein wesentlicher Effekt, der die Tränkung von textilen Strukturen beeinflusst. Ziel dieser Arbeit ist es zum Grundlagenverständnis von RT beizutragen und Möglichkeiten zum Umgang mit RT abzuleiten.

Zur simulativen Beschreibung über den Ansatz der Ersatzpermeabilität sind Versuche zur Validierung notwendig, weshalb 1D Versuche durchgeführt wurden. Um die Simulation an die Ergebnisse der Versuche anzupassen, ist es notwendig, die Transversalströmung über das Verhältnis von  $K_{Kl}$  zu  $K_{Kq}$  einzustellen. Dazu wird ein Vorgehen, ausgehend vom Ansatz  $K_{Kl} = K_{Kq}$  bis hin zum Ansatz des freien Einstellens dieser Parameter, vorgestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass vollständige Übereinstimmung bezüglich Kanalfüllzeit bzw. dem Füllfaktor (FF) für die gewählte Materialkombination nicht möglich ist. Mit dem gleichzeitigen Skalieren wird in den meisten Fällen die bestmögliche Übereinstimmung generiert. Lediglich für einen hohen Faservolumengehalt von 62% und Kanalbreiten  $< 2\text{mm}$  werden mit freiem Skalieren bessere Werte erreicht. Die Validierung der Ergebnisse anhand einer vollständigen Umströmung einer Preform zeigt, dass das gewählte Vorgehen, verglichen mit verschiedenen Berechnungsansätzen aus der Literatur, die kleinste Abweichung liefert. Die durchgeführte Untersuchung bestätigt die Aussage, dass die Simulation von Füllprozessen Tendenzen aufzeigen kann, absolute Aussagen müssen relativiert werden.

Der generelle Einfluss von RT wird anhand von simulativen Studien aufgezeigt. Die Betrachtung erfolgt anhand des Füllvorgangs einer ebenen Plattengeometrie mit umlaufendem RT- Kanal. Die Untersuchung mit seitlichem Ein- und Auslass zeigt, dass der Einlass- bzw. Kavitätsdruck auf die finale Porenbildung maßgeblichen Einfluss, bzw. keinen Einfluss auf den FF beim Erreichen des Auslasses hat. Die Temperatur, welche sich bei einer Injektion in der Viskosität widerspiegelt, hat in der simulativen Betrachtung keinen Einfluss auf den FF, lediglich auf die Zeit bis Druckausgleich erreicht ist. Dabei muss berücksichtigt werden, dass die Modellierung weder Mikro-/ Makrofluss berücksichtigt noch Kapillarkräfte berücksichtigt.

Einen wesentlichen Einfluss auf die Porenbildung bei einer Injektion hat der Einlass bzw. der Auslass in der Kavität. Diese werden in einer simulativen Studie anhand einer ebenen Platte mit umlaufendem RT- Kanal systematisch in Größe und Position variiert und diskutiert. Die Studie wird über die Implementierung eines umlaufenden, lokalen Überpressungsbereiches ergänzt. Die Ergebnisse zeigen, dass das Konzept mit umlaufendem Überpressungsbereich mit Einlass und Auslass auf der Preform den höchsten FF erreicht. Es kann die allgemeine Regel abgeleitet werden, je länger die Zeit bis Matrix-

material den Auslass erreicht, desto höher der finale FF bei Druckausgleich. Dabei erreicht das Konzept mit einem seitlichen Einlass und einem Auslass auf der Preform eine schnelle Füllzeit mit einem finalen FF bei Druckausgleich von 99%. Über die Gestaltung von Überpressungsbereichen kann die Position der Pore beeinflusst werden.

Die Ursachen für Abweichungen des Füllbilds vom Idealfall sind vielfältig. Eine davon ist die Position der Preform in der Kavität. Um dies zu bestätigen, werden die Versuche zum Umströmen einer Preform simulativ nachgestellt und dabei jeweils mit der Positionsabweichung von 1mm versehen. Darüber wird eine mögliche Streuung für die Messgrößen „Zeit bis Fluid den Auslass erreicht“, „Zeit bis Druckausgleich erreicht“ und die jeweiligen FF ermittelt. Die Ergebnisse zeigen, dass bei geringer Kanalbreite (2mm) die Streuungen durch Positionsabweichung erklärt werden kann. Für große Kanalbreiten (>4mm) sind die Streuungen der Versuche geringer als die simulativ nachgestellten.

Die Studie der Positionstoleranz wird auf drei Konzepte aus der Studie für die Position von Auslass und Einlass erweitert. Die Ergebnisse zeigen, dass das Konzept mit seitlichem Überpressungsbereich und einem Ein- und Auslass auf der Preform die geringsten Streuungen aufweist. Das Konzept mit seitlichem Einlass und Auslass auf der Preform erreicht einen FF >99% wobei die Porenfläche über die induzierte Abweichung 10mal größer ist.

Über die durchgeführten Untersuchungen leiten sich Regeln zur Gestaltung von RTM Werkzeugen unter Berücksichtigung von RT ab.

Als innovative Möglichkeit, mit RT umzugehen, wird der Hybridmatrixansatz vorgestellt. Dabei wird der RT- Kanal in einem ersten Injektionsschritt mit einer Sekundärmatrix gefüllt und die strukturelle Matrix im zweiten Injektionsschritt nach dem Aushärten der Sekundärmatrix in die Preform injiziert. Für eine praxisnahe Anwendung muss die Penetration der Preform mit Sekundärmatrix kontrolliert bzw. so gering wie möglich gehalten werden. Dazu werden der Filtereffekt und das rheologische Materialverhalten untersucht.

Die Modifizierung der Sekundärmatrix mit Partikeln zeigt, dass Partikel <10µm deutlich scherverflüssigendes Materialverhalten im Bereich bis 1000 1/s generiert. Die analytische Betrachtung über eine Reduktion der Strömungsverhältnisse auf zwei Rohrquerschnitte zeigt auf, dass bei SiO<sub>2</sub> eine theoretische Reduktion der Penetration um 18% erreicht werden kann.

Die Versuche mit Mono- und Hybridsuspensionen zeigen, dass gegenüber der Referenz, einer nicht modifizierten Sekundärmatrix, einheitlichere und geringere Penetration erreicht wird. Die geringste Penetration wird mit der Monosuspension mit SiO<sub>2</sub> (ca. 1mm) und der Hybridsuspension aus 0,75 Vol.% SiO<sub>2</sub> + 1 Vol.% TiO<sub>2</sub> + 15 Vol.% K1 (ca. 2mm) erreicht. Für beide Varianten ist die Penetration über die Kanallänge konstant. Über die Validierung mit Umströmversuchen wird der konstante Wert der Penetrationstiefe über die benötigte Zeit zum Füllen des Kanals hinaus nachgewiesen. Das rheolo-

gische Materialverhalten und der Filtereffekt bestimmen beide das Penetrationsverhalten von Suspensionen. Mit Abnahme der Partikelgröße verschiebt sich die Wertigkeit hin zum rheologischem Materialverhalten.



## 8 Ausblick

Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, dass RT einen entscheidenden Einfluss auf das Füllverhalten im RTM Prozess darstellt. Dazu wurden in dieser Arbeit eine Grundlage zur Simulation, Optionen in der Gestaltung von Ein- und Auslass im Werkzeug und der Hybridmatrixantritt untersucht. In all diesen Bereichen bestehen Themenstellungen, die ein weiteres Grundlagenverständnis ermöglichen bzw. den Weg hin zur Anwendung in einer Serienfertigung aufzeigen.

### 8.1 Füllsimulation

Die Füllsimulation kann bei der Entwicklung des Füllverhaltens innerhalb von Werkzeugen unterstützen. Aufgrund des Verständnissgewinns wurden in dieser Arbeit alle Versuche anhand eines „Cross- ply“ Aufbaus mit einem Material durchgeführt. In realen Aufbauten werden Faserorientierungen den mechanischen Anforderungen entsprechend gestaltet. Das Tränkungsverhalten von unidirektionalen Textilien weist häufig einen deutlichen Unterschied zwischen dem  $K_1$  und dem  $K_2$  Wert auf, was zu einer Beeinflussung des Tränkungsverhaltens der Lagen zueinander führt. Dadurch ist die einfache Mischregel für die Berechnung des 2D Tensors aus Gleichung (2-7) als Grundlage für die vereinfachte 2D Simulation nicht mehr gültig. Dazu ist eine Bewertung des  $K_3$  Wertes mit in die Betrachtung aufzunehmen. Untersuchungen sind in dieser Hinsicht nur ansatzweise vorhanden. Die Abweichungen werden größer, wenn der Lagenaufbau nicht aus einem Material besteht, sondern aus einer Vielfalt an unterschiedlichen Materialien. Aus diesem Grund stellt die zielführendste Art der Charakterisierung für eine 2D Füllsimulation aktuell die Ermittlung der Eigenschaften des direkten Lagenaufbaus dar. Über eine gezielte Untersuchung der Verhältnisse der Permeabilitäten  $K_1/K_2$  zu  $K_3$  kombiniert mit entsprechenden 3D Füllsimulationen besteht die Möglichkeit, aus allgemeinen Materialdaten wieder realistische Tensorvorgaben für die 2D Simulation zu entwickeln.

Die Abbildung von RT ist für eine realitätsnahe Simulation entscheidend. Der aktuell übliche Ansatz der Ersatzpermeabilitäten hat seine Grenzen bei hohen Faservolumengehaltswerten bzw. geringen Kanalbreiten. Das Lösen der Navier- Stokes- Gleichung in diesem Bereich führt zu besserer Übereinstimmung bei einer gleichzeitigen Erhöhung des Rechenbedarfs. Diese Lösungen sind aktuell nur im wissenschaftlichen Umfeld üblich. Eine Implementierung in kommerzielle Softwarepakete ist erforderlich. Das in dieser Arbeit vorgeschlagene Vorgehen zur Reduktion der Abweichung über das Anpassen

von  $K_{Kl}$  und  $K_{Kq}$  wurde für eine Materialkombination aus bebindertem Gewebe getestet. Um Allgemeingültigkeit zu erhalten, ist eine Verifikation für weitere Materialien bzw. Lagenaufbauten notwendig.

In dieser Arbeit wird der einfachste Fall von RT, der Spalt zwischen Preform und Werkzeug, beschrieben. Reale Lagenaufbauten besitzen Stoßstellen, Lagenauslaufbereiche, Zwickelbereiche in T-Stößen etc. Aufgrund der notwendigen Fertigungstoleranzen ist an diesen Stellen ein Hohlraum unumgänglich, der den Füllvorgang beeinflusst. Untersuchungen solcher Preformdetails im Hinblick auf RT sind nicht bekannt.

## 8.2 Richtlinien zur Gestaltung des Ein- bzw. Auslasses

In dieser Arbeit wird erstmals eine Empfehlung für die Gestaltung des Ein- bzw. Auslasses gegeben. Zur Validierung der erarbeiteten Richtlinie sind weitere 2D bzw. 3D Versuche notwendig, wobei über eine Untersuchung mit verschiedenen Materialien Allgemeingültigkeit erreicht werden kann.

In der Studie zeigt sich, dass das Platzieren von Ein- bzw. Auslass auf der Preform für die Steuerung des Fließverhaltens hilfreich ist. Dabei werden Reinharzschichten (Ein- und Auslass) am Bauteil erzeugt. Deren Einfluss auf die Bauteileigenschaften wurde bei hier durchgeführten Betrachtungen vernachlässigt. Durch die Reduktion des Kompaktierungsdruckes in diesem Bereich entstehen Wellen bzw. eine Reduktion des Faservolumengehalts. Die Ausprägung dieser Eigenschaftsänderungen hängen von den gewählten Materialien bzw. geometrische Größen z.B. vom Abstand des Kanals vom Rand des Bauteils ab.

Die Erarbeitung dieser Richtlinien erfolgte unter anderem unter der Annahme, dass eine einheitliche Preform vorliegt. Über das gezielte Einbringen von Stoßstellen in verschiedener geometrischer Form bzw. an definierten Stellen kann deren Einfluss untersucht und für die Ergebnisse für die Richtlinie ausgearbeitet werden.

Reale Bauteile besitzen häufig unterschiedliche Wandstärken in unterschiedlichen Bereichen. Durchläuft die Fließfront einen dickeren Bereich, verlangsamt sie sich im Verhältnis zu einem dünneren Bereich. Die Variation an unterschiedlichen Dicken bzw. unterschiedlicher Ausbreitung der Dickenänderung kann anhand von Simulationen/ Versuchen einer generischen Geometrie nachgewiesen werden.

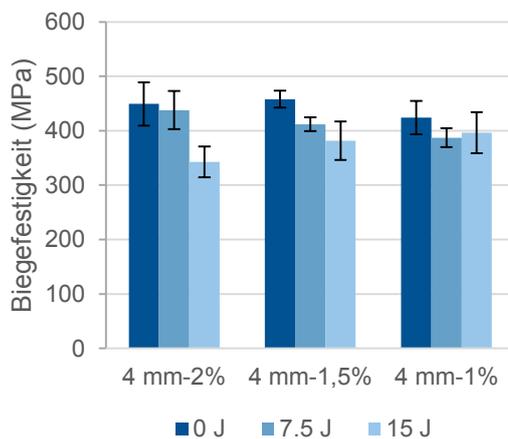
## 8.3 Hybridmatrixantritt

Das Verschließen des Kanals durch eine angepasste Sekundärmatrix ermöglicht das definierte Tränken einer Preform ohne RT. Aus Sicht der Prozesstechnik kann darüber ein einheitlicher Tränkungsprozess in einer Kavität gewährleistet werden. Als Sekundärmatrix kann dabei das Strukturharz oder ein weiter angepasstes Material verwendet

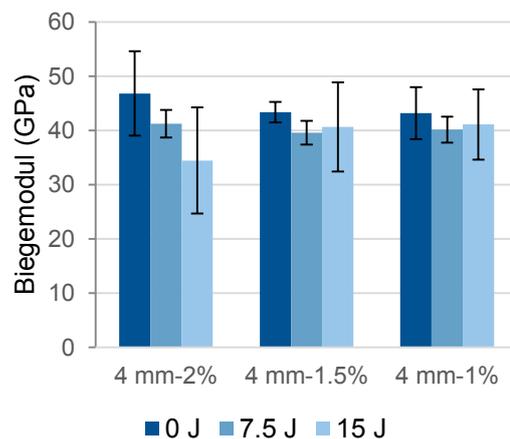
werde. Durch diese Auswahl besteht die Möglichkeit weitere Funktionalität mit zu generieren. Wird ein elastomeres Material mit hoher Reißdehnung gewählt, werden alle Reinhartzkanten entsprechend weich. Dies führt zu dem Effekt, dass beim Entformen des Bauteils keine Reinhartzkanten wegbrechen und im Werkzeug verbleiben. Die Reinhartzbereiche dehnen sich und erhöhen darüber die Schälkräfte, was zur vollständigen Entformung führt.

Der übliche Einsatz von Elastomeren im RTM Prozess stellt die Dichtung dar. Die Dichtigkeit gegenüber Vakuum und Druck muss für gute, einheitliche Füllung des Bauteils gewährleistet sein. Über chemische und mechanische Degradation verschleißt die Dichtung über die Zyklen hinweg. In einer vollautomatisierten Prozessierung im automobilen Bereich kann dies zu Stillstandszeiten aufgrund von Temperierungsvorgängen bis zu zwei Stunden führen. Über das hochviskose Gestalten einer elastomeren Sekundärmatrix kann die Belastung der Dichtung reduziert werden bzw. die Dichtung vollständig obsolet werden. Über eine gezielte Modifizierung mit einem Treibmittel in der Form, dass eine elastomere Schaumkante an der Preform entsteht, besteht die Möglichkeit „Compression RTM“, die Injektion bei niederem Faservolumengehalt mit finaler Kompaktierung bei vollständiger Füllung, zu ermöglichen. Der kostentechnische Nutzen dieser Funktionalisierung ist in [150] nachgewiesen.

Die elastomere Kante am Bauteil verbleibt am Bauteil. Die letzte Möglichkeit der Funktionalisierung leitet sich über den Verbleib der Kante am Bauteil als Kantenschutz ab. Orientierende Versuche wurden durchgeführt, welche anhand eines „Bending after Impact“ Tests, angelehnt an [115], das Prinzip mit einer Modifizierung anhand einer Monosuspension nachweisen. [184, 185]



**Abb. 8-1:** Biegefestigkeiten einer elastomeren Kante aus U1404 mit SiO<sub>2</sub> Modifizierung nach Impact [185]

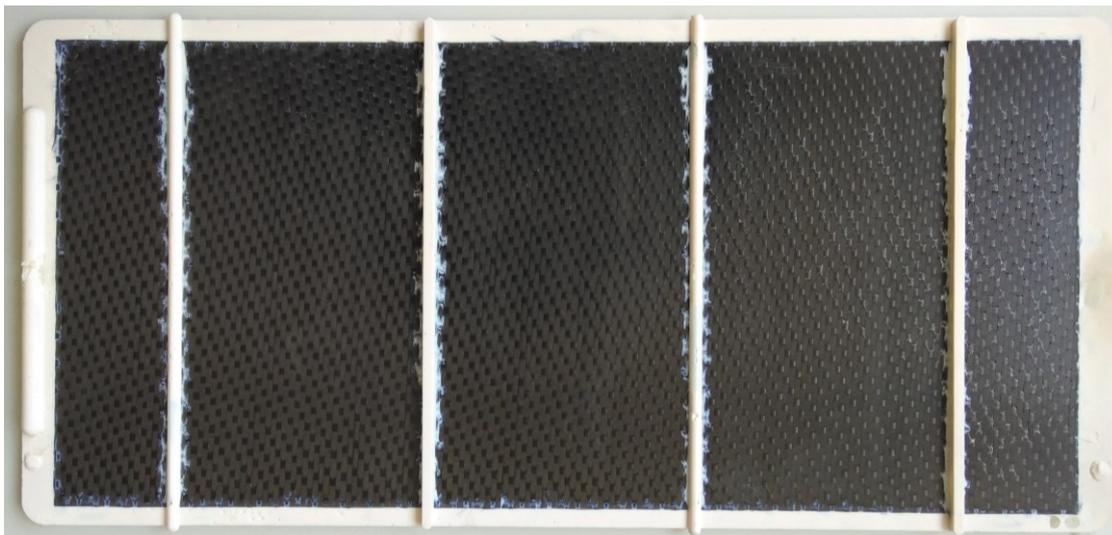


**Abb. 8-2:** Biegemodul einer elastomeren Kante aus U1404 mit SiO<sub>2</sub> Modifizierung nach Impact [185]

Eine elastomere Kante an einem steifen Bauteil sorgt für eine breitere Lasteinleitung in das steife Material, worüber bei gleicher Impactenergie höhere Biegeeigenschaften generiert werden können. Über die Modifikation mit Partikeln wird das Penetrationsverhalten und die mechanischen Eigenschaften der Sekundärmatix verändert. In Abb. 8-1 und Abb. 8-2 sind die Ergebnisse des Vierpunktbiegetests einer 4mm Elastormerkante mit unterschiedlichen  $\text{SiO}_2$ - Anteilen nach dem Impact dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass mit zunehmendem Anteil an  $\text{SiO}_2$  die höchste Biegesteifigkeit und Festigkeit erreicht wird, wo bei hoher Impactenergie ebenfalls die größte Reduktion der beiden Kennwerte vorliegt. Beim mechanischen Charakterisieren treten erhöhte Streuungen auf, welche in der Prozessierung der Prüfkörper begründet liegen. Die Positionierung der Preformbeschnittkante ist ein manueller Prozess und den üblichen Toleranzen unterworfen. Übliche Probekörper können mechanisch nachbearbeitet werden, wobei die elastomere Kante dies im Bereich der Preform unmöglich macht.

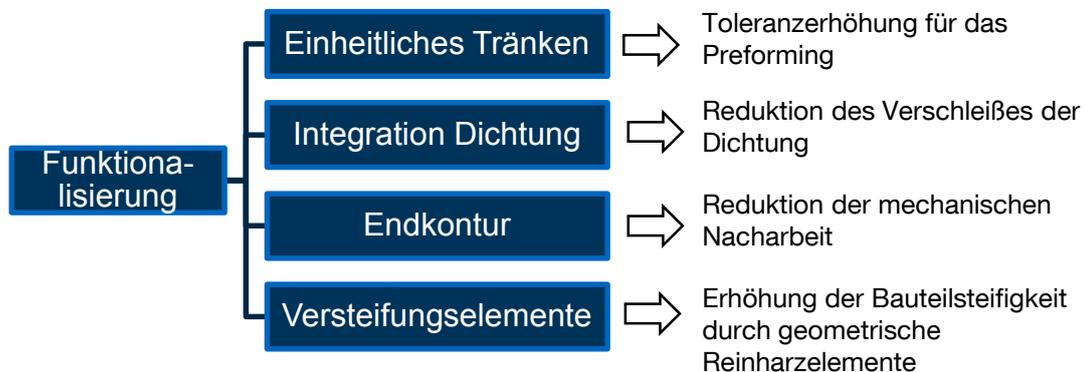
Für eine Anwendung des Hybridmatrixansatzes für eine Endkonturfertigung im RTM ist ein genaues Abstimmen von Penetrationsverhalten über die Modifizierung mit Partikeln und Additiven und der sich ergebenden mechanischen Eigenschaften notwendig.

In der beschriebenen Variante liegt eine Kombination des Hybridmatrixansatzes mit der Funktionalisierung im Hinblick auf einheitliches Prozessieren und Endkonturprozessieren, vor. Durch die Anforderungen an ein Bauteil kann es ebenfalls notwendig werden, in spezifischen Bereichen, außer im Bereich der Preformkante, einen Kantenschutz zu implementieren. Die Option kann durch den Hybridmatrixantritt über einen lokalen Kanal über der Preform realisiert werden. Dabei ist über die Schutzkanten z.B. die Integration von Versteifungsrippen möglich. Der generelle Machbarkeit ist in Abb. 8-3 dargestellt [186].



**Abb. 8-3: Funktionalisierung mit Sekundärmatrixkanälen auf der Preform mit einer Hybridsuspension**

Abb. 8-4 fasst die derzeit angedachten Möglichkeiten zur Funktionalisierung zusammen.



**Abb. 8-4:** Möglichkeiten zur Funktionalisierung über den Ansatz der Hybridmatrix

Für alle Arten der Funktionalisierung ist das Verständnis der Penetration der Preform mit Sekundärmatrix essentiell. Filtereffekt und scherratenabhängiges Materialverhalten zeigen erste Ansätze für die Kontrolle der Penetration. Die durchgeführten Betrachtungen zeigen, dass scherverdünnendes Verhalten zielführend ist bzw. dass im Textil geringere Scherraten vorliegen als im Kanal. Stellt man sich ein rheologisches Wunschmaterial zusammen, kann über ein Material, welches eine Fließgrenze besitzt, die Penetration theoretisch vollständig unterbunden werden. Die durchgeführten Modifikationsversuche der in dieser Arbeit verwendeten Sekundärmatrix U1404 der Firma Sika zeigen, dass über das Modifizieren mit  $\text{SiO}_2$  dieses Verhalten generiert werden kann. Abb. 6-42 zeigt, dass ab einem Volumenanteil von 3% von  $\text{SiO}_2$ , eine Fließgrenze als Schnittpunkt zwischen Speicher und Verlustmodul erkennbar ist. Prozessversuche haben gezeigt, dass die gewählte Prozessierung für die Injektion über einen einfachen Drucktopf nicht möglich ist. Das passende Equipment dafür ist ein Injektionskolben. Diese Form der Anlage hat den Vorteil, dass sie partikelmodifizierte Flüssigkeiten prozessieren kann, ohne dass Beschädigungen an Pumpen oder Messzellen auftreten. Zum Zeitpunkt der Durchführung dieser Arbeit war keine passende Kolbeninjektionsanlage am Lehrstuhl verfügbar.

In der Literatur wird Ketchup oder Zahnpasta als klassisches Beispiel für Binghamfluide herangezogen. Ein weiterer Weg, um dieses Materialverhalten zu induzieren, sind magnetrheologische Fluide. Dabei wird eine Trägerflüssigkeit mit magnetisierbaren Partikeln vermischt. Für einen Partikeldurchmesser bis 10nm werden solche Fluide als Ferrofluide bezeichnet, für einen Partikeldurchmesser von 1-20 $\mu\text{m}$  als magnetrheologische Fluide. [187, 188]

Die Partikelgröße solcher Fluide liegt im Größenbereich von  $\text{SiO}_2$ . Daraus lässt sich ableiten, dass der Effekt der Scherverdünnung mit der Eigenschaft eines Binghamfluids

kombiniert werden kann und über die Möglichkeit des gezielten Einstellens die Penetration definiert werden kann. Erste Prinzipuntersuchungen zeigen die generelle Machbarkeit auf [189, 190].

## Literaturverzeichnis

- [1] K. Drechsler *et al.*, “Carbon fiber reinforced composites,” in *Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry*, F. Ullmann, Ed., 7th ed., Weinheim: Wiley-VCH, 2009.
- [2] H. Ruth, N. Müller, W. Sintern, A. Starke, and A. Tschiesner, *Lightweight heavy impact: How carbon fiber and other lightweight materials will develop across industries and specifically in automotive*, 2012.
- [3] European Road Transport Research Advisory Council, *ERTRAC Strategic Research Agenda 2010: Towards a 50% more efficient road transport system by 2030*. [Online] Available: [http://www.ertrac.org/uploads/documentsearch/id21/ERTRAC\\_SRA\\_2010.pdf](http://www.ertrac.org/uploads/documentsearch/id21/ERTRAC_SRA_2010.pdf). Accessed on: Feb. 09 2015.
- [4] Advisory Council for Aviation Research and Innovation in Europe, *Strategic Research & Innovation Agenda*. [Online] Available: [http://www.ertrac.org/uploads/documentsearch/id21/ERTRAC\\_SRA\\_2010.pdf](http://www.ertrac.org/uploads/documentsearch/id21/ERTRAC_SRA_2010.pdf). Accessed on: Feb. 09 2015.
- [5] T. Renault, “Developments in thermoplastic composites for automotive applications,” in *Franco-British Symposium on Composite Materials*, London, 2015.
- [6] H. Eickenbusch and O. Krauss, “Studie Werkstoffinnovationen für nachhaltige Mobilität und Energieversorgung,” VDI-Gesellschaft Materials Engineering, Düsseldorf, Mar. 2014. Accessed on: Feb. 09 2015.
- [7] R. Lässig, M. Eisenhut, A. Mathias, and R. Schulte, *Serienproduktion von hochfesten Faserverbundbauteilen*. Perspektiven für den deutschen Maschinen- und Anlagenbau, 2012.
- [8] F. Dirschmid, “Die CFK-Karosserie des BMW i8 und deren Auslegung,” pp. 217–231.
- [9] D. Häffelin and S. Zaremba, “Verfahren zum Herstellen eines Bauteils aus Faserverbundwerkstoff, Vorformling dafür sowie Bauteil,” WO002012007160A2 2011003497, Jan 19, 2012.
- [10] D. Häffelin, B. Zacherle, and S. Zaremba, “Verfahren zum Herstellen eines Bauteils aus einem Faserverbundwerkstoff sowie Faserverbundwerkstoffbauteil,” WO002013007385A1 2012002932, Jan 17, 2013.
- [11] BMW Group, *BMW Group sells more than 2 million vehicles in 2014*. [Online] Available: [https://www.press.bmwgroup.com/global/pressDetail.html?title=bmw-group-sells-more-than-2-million-vehicles-in-2014&outputChannelId=6&id=T0199942EN&left\\_menu\\_item=node\\_\\_804](https://www.press.bmwgroup.com/global/pressDetail.html?title=bmw-group-sells-more-than-2-million-vehicles-in-2014&outputChannelId=6&id=T0199942EN&left_menu_item=node__804). Accessed on: Feb. 16 2015.

- [12] A. Wüllner, "Carbon Fibers in automotive series production," in *Summit 15*, Paris, 2015.
- [13] A. Altmann and S. Zaremba, "Verfahren und Vorrichtung zur Herstellung eines Bauteils aus einem Faserverbundwerkstoff," WO002014072034A1 2013003299, May 15, 2014.
- [14] S. Zaremba and P. Steib, "Verfahren zur Herstellung eines Bauteils aus einem Faserverbundwerkstoff," WO002015007353A2 2014001483, Jan 22, 2015.
- [15] C. Sorg, "Data Mining als Methode zur Industrialisierung und Qualifizierung neuer Fertigungsprozesse für CFK-Bauteile in automobiler Großserienproduktion," Dissertation, Lehrstuhl für Carbon Composite, Technischer Universität München, München, 2014.
- [16] S. G. Advani and E. M. Sozer, Eds., *Process modeling in composites manufacturing*. New York: Marcel Dekker, ©2003.
- [17] J. Summerscales, P. R. Griffin, S. M. Grove, and F. J. Guild, "Quantitative microstructural examination of RTM fabrics designed for enhanced flow," *Composite Structures*, vol. 32, no. 1-4, pp. 519–529, 1995.
- [18] T. M. Kruckenberg and R. Paton, *Resin transfer moulding for aerospace structures*. Dordrecht, Boston: Kluwer Academic, 1998.
- [19] A. Endruweit, P. McGregor, A. Long, and M. Johnson, "Influence of the fabric architecture on the variations in experimentally determined in-plane permeability values," *Composites Science and Technology*, vol. 66, no. 11-12, pp. 1778–1792, 2006.
- [20] S. C. Amico, "Permeability and capillary pressure in the infiltration of fibrous porous media in resin transfer moulding," University of Surrey, Surrey, Februar / 2000.
- [21] S. Bickerton, P. Šimáček, S. E. Guglielmi, and S. G. Advani, "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*, vol. 28, no. 9-10, pp. 801–816, 1997.
- [22] S. Bickerton, E. M. Sozer, P. Šimáček, and S. G. Advani, "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*, vol. 31, no. 5, pp. 439–458, 2000.
- [23] S. Bickerton, E.M. Sozer, P.J. Graham, and S.G. Advani, "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*, vol. 31, no. 5, pp. 423–438, 2000.

- [24] P. M. Schäfer, "Materialcharakterisierung für Harzinfusionsprozesse," Diplomarbeit, Lehrstuhl für Carbon Composite, Technischer Universität München, München, 2011.
- [25] M. Arnold, *Einfluss verschiedener Angusszenarien auf den Harzinjektionsprozess und dessen simulative Abbildung*. Dissertation. Kaiserslautern: Inst. für Verbundwerkstoffe, 2014, 2014.
- [26] R. Meier, "Methoden der Permeabilitätsbestimmung für LCM-Prozesse," Diplomarbeit, Lehrstuhl für Carbon Composites, Technischer Universität München, München, 2010.
- [27] R. Meier, J. Heim, A. Nieratschker, and S. Zaremba, "Investigation of influencing parameters with respect to filling time in vibration assisted RTM processes," in *International conference on composite materials*, S. Hoa, Ed., Montreal, 2014.
- [28] R. Meier, "Scherverdünnende Epoxidharzsysteme und vibrationsunterstützte Harzinfusionsprozesse," Dissertation, Lehrstuhl für Carbon Composites, Technischer Universität München, München, 2017.
- [29] R. Meier, I. Kahraman, A. T. Seyhan, S. Zaremba, and K. Drechsler, "Evaluating vibration assisted vacuum infusion processing of hexagonal boron nitride sheet modified carbon fabric /epoxy composites in terms of interlaminar shear strength and void content," *Composites Science and Technology*, 2016.
- [30] J. Li, C. Zhang, R. Liang, and B. Wang, "Statistical characterization and robust design of RTM processes," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 36, no. 5, pp. 564–580, 2005.
- [31] J. Ni, Y. Zhao, L. James Lee, and S. Nakamura, "Analysis of two-regional flow in liquid composite molding," *Polym. Compos.*, vol. 18, no. 2, pp. 254–269, 1997.
- [32] A. Reinhardt, S. G. Advani, M. H. Santare, and F. Miller, "Preliminary Study on Composite Hip Prostheses Made by Resin Transfer Molding," *Journal of Composite Materials*, vol. 33, no. 9, pp. 852–870, 1999.
- [33] D. H. Lee, W. I. Lee, and M. K. Kang, "Analysis and minimization of void formation during resin transfer molding process," *Composites Science and Technology*, vol. 66, no. 16, pp. 3281–3289, 2006.
- [34] S. Bickerton, "Characterization and modeling of race-tracking in liquid composite molding processes," *Composites Science and Technology*, vol. 59, no. 15, pp. 2215–2229, 1999.
- [35] K. Drechsler, C. Ebel, and S. Zaremba, "Production technologies for composite parts," Lehrstuhl für Carbon Composite, 2015.

- [36] C. Kracke, "Einfluss der Permeabilitätssteigerung durch Integration von Fließkanälen auf die Oberflächeneigenschaften folienintegrierter RTM-Bauteile," Semesterarbeit, Lehrstuhl für Carbon Composites, Technischer Universität München, München, 2012.
- [37] K. B. Spaulding, "Fiberglass boats in naval service," *Naval Engineers Journal*, vol. 78, no. 2, pp. 333–340, 1966.
- [38] H. J. Pollard and J. Rees, "Improvements in or relating to the moulding of articles from thermosetting resins and fibrous material," GB 2832052, Jul 10, 1957.
- [39] H. J. Pollard and J. Rees, "Improvements in or relating to injection moulding," GB 3216556, Sep 28, 1960.
- [40] K. D. Potter, "The early history of the resin transfer moulding process for aerospace applications," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 30, no. 5, pp. 619–621, 1999.
- [41] H. Darcy, *Les fontaines publiques de dijon ed 1856*: Hachette Livre-Bnf, 2012.
- [42] J. F. Perry, "A study of the flow resistance of composite porous structures," Institute of Paper Chemistry, University of Wisconsin, Wisconsin, Juni /1968.
- [43] D. Poulikakos and K. Renken, "Forced convection in a channel filled with porous medium, including the effects of flow inertia, Variable Porosity, and Brinkman Friction," p. 880.
- [44] C. E. Morrison and M. G. Bader, "Computer modelling of resin flow during laminate cure," pp. 9–13.
- [45] G. Neale and W. Nader, "Practical significance of brinkman's extension of darcy's law: Coupled parallel flows within a channel and a bounding porous medium," *Can. J. Chem. Eng.*, vol. 52, no. 4, pp. 475–478, 1974.
- [46] C. D. Rudd and K. N. Kendall, "Towards a manufacturing technology for high-volume production of composite components," *Proceedings of the IMechE*, vol. 206, no. 2, pp. 77–91, 1992.
- [47] S. K. Gupte and S. G. Advani, "Flow near the permeable boundary of an aligned fiber preform: An experimental investigation using laser doppler anemometry," *Polym. Compos.*, vol. 18, no. 1, pp. 114–124, 1997.
- [48] T. Sochi, "Flow of non-newtonian fluids in porous media," *J. Polym. Sci. B Polym. Phys.*, vol. 48, no. 23, pp. 2437–2767, 2010.
- [49] J. Summerscales, *Flow and rheology in polymer composites manufacturing*, 1994.
- [50] R. K. Niven, "Physical insight into the Ergun and Wen & Yu equations for fluid flow in packed and fluidised beds," *Chemical Engineering Science*, vol. 57, no. 3, pp. 527–534, 2002.

- [51] Z. Cai, "Analysis of the non-viscous flow effect in liquid molding process," *Journal of Composite Materials*, no. 29, pp. 257–278, 1995.
- [52] J.R.A. Pearson and P.M.J. Tardy, "Models for flow of non-Newtonian and complex fluids through porous media," *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, vol. 102, no. 2, pp. 447–473, 2002.
- [53] B. Verleye *et al.*, "Permeability of textile reinforcements: Simulation, influence of shear and validation," *Composites Science and Technology*, vol. 68, no. 13, pp. 2804–2810, 2008.
- [54] P. H. Valvatne, "Predictive Pore- Scale Modelling of Multiphase Flow," Dissertation, Imperial College London, London, 2004.
- [55] K. M. Pillai and S. G. Advani, "Numerical simulation of unsaturated flow in woven fiber preforms during the resin transfer molding process," *Polym. Compos.*, vol. 19, no. 1, pp. 71–80, 1998.
- [56] J. Aboudi, S. M. Arnold, and B. A. Bednarczyk, *Micromechanics of composite materials: A generalized multiscale analysis approach*. Amsterdam: Butterworth-Heinemann, 2016.
- [57] V. Kambiz, *Hdbk of Porous Media*, 2nd ed. Abingdon, Florence: Taylor & Francis Group; Taylor & Francis Group [distributor], 2005.
- [58] M. Neitzel and P. Mitschang, *Handbuch Verbundwerkstoffe: Werkstoffe, Verarbeitung, Anwendung*. München: Hanser, 2004.
- [59] R. Meier, C. Kirdar, N. Rudolph, S. Zaremba, and K. Drechsler, "Investigation of the shear thinning behavior of epoxy resins for utilization in vibration assisted liquid composite molding processes," in *Proceedings of the Polymer Processing Society 29th Annual Meeting*, Polymer Processing Society, Ed., 2013.
- [60] S. Sharma and D. A. Siginer, "Permeability measurement methods in porous media of fiber reinforced composites," *Appl. Mech. Rev.*, vol. 63, no. 2, p. 20802, 2010.
- [61] T. A. Osswald and N. Rudolph, *Understanding plastics rheology: From molecular structure to polymer process*. München: Hanser, 2013.
- [62] T. L. Luce, S. G. Advani, J. G. Howard, and R. S. Parnas, "Permeability characterization. Part 2: Flow behavior in multiple-layer preforms," *Polym. Compos.*, vol. 16, no. 6, pp. 446–458, 1995.
- [63] V. M.A. Calado and S. G. Advani, "Effective average permeability of multi-layer preforms in resin transfer molding," *Composites Science and Technology*, vol. 56, no. 5, pp. 519–531, 1996.

- [64] C. Binétruy, B. Hilaire, and J. Pabiot, "The interactions between flows occurring inside and outside fabric tows during rtm," *Composites Science and Technology*, vol. 57, no. 5, pp. 587–596, 1997.
- [65] T. Roy, "Experimental investigations of the unsaturated flow in liquid composite molding," in *5th Canadian international composites conference: CACSMA*, 2005.
- [66] J. Weiss, "Bestimmung des Kapillardrucks in Harzinfiltrationsprozessen und dessen Auswirkung auf die Permeabilitätsbestimmung trockener Faservorformlinge," Semesterarbeit, Lehrstuhl für Carbon Composite, Technischer Universität München, München.
- [67] S. Amico and C. Lekakou, "An experimental study of the permeability and capillary pressure in resin-transfer moulding," *Composites Science and Technology*, vol. 61, no. 13, pp. 1945–1959, 2001.
- [68] J. Verrey, V. Michaud, and J.-A.E. Månson, "Dynamic capillary effects in liquid composite moulding with non-crimp fabrics," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 37, no. 1, pp. 92–102, 2006.
- [69] E. Ruiz, V. Achim, S. Soukane, F. Trochu, and J. Breard, "Optimization of injection flow rate to minimize micro/macro-voids formation in resin transfer molded composites," *Composites Science and Technology*, vol. 66, no. 3-4, pp. 475–486, 2006.
- [70] M. Kang, *Formation of microvoids during resin-transfer molding process: The complete box set*. Los Gatos California: Smashwords Edition, 2000.
- [71] M. Deléglise, P. Le Grogneq, C. Binetruy, P. Krawczak, and B. Claude, "Modeling of high speed RTM injection with highly reactive resin with on-line mixing," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 42, no. 10, pp. 1390–1397, 2011.
- [72] A. C. Liakopoulos, "Darcy's coefficient of permeability as symmetric tensor of second rank," *International Association of Scientific Hydrology. Bulletin*, vol. 10, no. 3, pp. 41–48, 1965.
- [73] J. R. Weitzenböck, R. A. Sheno, and P. A. Wilson, "Measurement of principal permeability with the channel flow experiment," *Polym Compos*, vol. 20, no. 2, pp. 321–335, 1999.
- [74] J. R. Weitzenböck, R. A. Sheno, and P. A. Wilson, "A unified approach to determine principal permeability of fibrous porous media," *Polym Compos*, vol. 23, no. 6, pp. 1132–1150, 2002.
- [75] R. Meier, A. Walbrand, C. Hahn, S. Zaremba, and K. Drechsler, "Methods to determine the permeability of textile reinforcements," *Journal of Plastics Technology*, no. 10, pp. 91–116, 2014.

- [76] N. Vernet *et al.*, “Experimental determination of the permeability of engineering textiles: Benchmark II,” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 61, pp. 172–184, 2014.
- [77] R. Arbter *et al.*, “Experimental determination of the permeability of textiles: A benchmark exercise,” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 42, no. 9, pp. 1157–1168, 2011.
- [78] E. E. Swery, R. Meier, S. V. Lomov, K. Drechsler, and P. Kelly, “Predicting permeability based on flow simulations and textile modelling techniques: Comparison with experimental values and verification of FlowTex solver using Ansys CFX,” *Journal of Composite Materials*, 2015.
- [79] C. Di Fratta, F. Klunker, F. Trochu, and P. Ermanni, “Characterization of textile permeability as a function of fiber volume content with a single unidirectional injection experiment,” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 77, pp. 238–247, 2015.
- [80] A. Walbrand and H. Körber, “Fast and Efficient Permeability and Compaction Characterisation of Dry Textiles: Considerations for a proposed Technique,” in *16th European Conference on Composite Materials*.
- [81] F. Hillreiner, “Entwicklung Prüfstand Permeabilitätsmessung,” Semesterarbeit, Lehrstuhl für Carbon Composite, Technischer Universität München, München, 2012.
- [82] A. R. George, K. Drechsler, and A. Holmberg, “The permeability of tackified, stitched, and braided carbon fiber textiles: experimental characterization and design modeling,” in *53th Sampe Symposium: Changing Times. New Opportunities. Are You Prepared?*, Society for the Advancement of Material and Process Engineering, Ed., Baltimore, 2009.
- [83] C. Hahn, “A simulation approach of permeability prediction for RTM process simulation,” Dissertation, Lehrstuhl für Carbon Composite, Technischer Universität München, München, 2014.
- [84] D. Surek and S. Stempin, *Angewandte Strömungsmechanik: Für Praxis und Studium*, 1st ed. Wiesbaden: B.G. Teubner Verlag / GWV Fachverlage, Wiesbaden, 2007.
- [85] P. Boisse, Ed., *Advances in composites manufacturing and process design*. Cambridge, UK: Woodhead Publishing, 2015.
- [86] R. Meier *et al.*, “Online process monitoring systems - benchmark and test study,” *11th International Conference on Flow Processes in Composite Materials*, 11 Jul., 2012.

- [87] A. Boccard, W. I. Lee, and G. S. Springer, "Model for determining the vent locations and the fill time of resin transfer molds," *Journal of Composite Materials*, vol. 29, no. 3, pp. 306–333, 1995.
- [88] H. Grössing, N. Stadlmajer, E. Fauster, M. Fleischmann, and R. Schledjewski, "Flow front advancement during composite processing: Predictions from numerical filling simulation tools in comparison with real-world experiments," *Polym. Compos.*, vol. 37, no. 9, pp. 2782–2793, 2016.
- [89] F. Dai, B. Zhang, and S. Du, "Analysis of upper-and lower-limits of fill time in resin transfer mold filling simulation," *Journal of Composite Materials*, vol. 38, no. 13, pp. 1115–1136, 2004.
- [90] M. K. Kang and W. Lee, "A flow-front refinement technique for the numerical simulation of the resin-transfer molding process," *Composites Science and Technology*, vol. 59, no. 11, pp. 1663–1674, 1999.
- [91] S. T. Lim and W. I. Lee, "An analysis of the three-dimensional resin-transfer mold filling process," *Composites Science and Technology*, vol. 60, no. 7, pp. 961–975, 2000.
- [92] A. Saad, A. Echhelh, M. Hattabi, and M. El Ganaoui, "Numerical simulation of thickness variation effect on resin transfer molding process," *Polym Compos*, vol. 33, no. 1, pp. 10–21, 2012.
- [93] J. Samir, J. Echaabi, and M. Hattabi, "Control volume finite element methods for flow in porous media: resin transfer molding,"
- [94] H. Tan and K. M. Pillai, "Numerical simulation of reactive flow in liquid composite molding using flux-corrected transport (FCT) based finite element/control volume (FE/CV) method," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 53, no. 9-10, pp. 2256–2271, 2010.
- [95] V. R. Voller, *Basic control volume finite element methods for fluids and solids*. Singapore, Hackensack, NJ: World Scientific, op. 2009.
- [96] A. Carrels, "Modeling of racetracking in filling simulations and numerical investigation of macro void formation during RTM," Master's Thesis, Lehrstuhl für Carbon Composite, Technischer Universität München, München, 2017.
- [97] X. Song, "Vacuum Assisted Resin Transfer Molding (VARTM): model development and verification," Dissertation, Virginia Polytechnic Institute, Virginia State University, Virginia, 2003.
- [98] S. Koutsonas, "Race-track modelling and variability in RTM for advanced composites structures," PHD thesis, Division of Materials, Mechanics & Structures, University of Nottingham, Nottingham, 2015.

- [99] M. V. Brusckie and S. G. Advani, "A numerical approach to model non-isothermal viscous flow through fibrous media with free surfaces," *Int. J. Numer. Meth. Fluids*, vol. 19, no. 7, pp. 575–603, 1994.
- [100] F. R. Phelan, "Simulation of the injection process in resin transfer molding," *Polym Compos*, vol. 18, no. 4, pp. 460–476, 1997.
- [101] H. Grössing, N. Stadlmajer, E. Fauster, M. Fleischmann, and R. Schledjewski, "Flow front advancement during composite processing: Predictions from numerical filling simulation tools in comparison with real-world experiments," *Polym. Compos.*, vol. 37, no. 9, pp. 2782–2793, 2016.
- [102] ESI Group, *Infusion process simulation for large and/or complex composites with PAM-RTM*. [Online] Available: [https://www.esi-group.com/sites/default/files/resource/brochure\\_flyer/1516/gro10.20a\\_flyer\\_pam-rtm\\_lowres.pdf](https://www.esi-group.com/sites/default/files/resource/brochure_flyer/1516/gro10.20a_flyer_pam-rtm_lowres.pdf). Accessed on: Apr. 26 2017.
- [103] ESI Group, *PAM-RTM*. [Online] Available: <https://www.esi-group.com/de/software-loesungen/virtual-manufacturing/composites/pam-composites/pam-rtm>. Accessed on: Apr. 26 2017.
- [104] F. Trochu, R. Gauvin, D. M. Gao, and J.-F. Boudreault, "RTMFLOT - An integrated software environment for the computer simulation of the resin transfer molding process," *Reinforced Plastics and Composites*, vol. 1994, no. 13, pp. 262–270, <http://journals.sagepub.com.eaccess.ub.tum.de/action/doSearch?All-Field=%22Rtmflot+-+an+integrated+software+environment+for+the+computer+simulation+of+the+resin+transfer%22>, 1994.
- [105] VZLÚ, *VZLÚ optimizes the development of composites rotor blades using infusion simulation software PAM-RTM*. [Online] Available: [https://www.vzlu.cz/%2Fdownload.php%3Ffile%3D467&usg=AFQjCNFoCqG\\_KPhgwXHo-JOoCdQb9Twj\\_3Q&cad=rja](https://www.vzlu.cz/%2Fdownload.php%3Ffile%3D467&usg=AFQjCNFoCqG_KPhgwXHo-JOoCdQb9Twj_3Q&cad=rja). Accessed on: Apr. 26 2017.
- [106] V. Aitharaju *et al.*, "Modeling of Resin Transfer Molding of Carbon Fiber Composites," in *Proceedings of the American Society for Composites: Thirty-First Technical Conference*, 2016.
- [107] I. R. Oliveira, S. C. Amico, J. A. Souza, and de Lima, Antônio Gilson Barbosa, "Numerical Analysis of the Resin Transfer Molding Process via PAM-RTM Software," *DDF*, vol. 365, pp. 88–93, 2015.
- [108] Y. Lin, J. Liu, and M. Yang, "Finite Volume Element Methods: An Overview on Recent Developments," *International Journal of Numerical Analysis and Modeling*, vol. 2013, no. 4, pp. 14–34, 2013.

- [109] I. R. Oliveira, S. C. Amico, J. Á. Souza, and A. G. Barbosa de Lima, “Resin transfer molding process: a numerical and experimental investigation,” *International Journal of Multiphysics*, no. 7, pp. 125–135, 2013.
- [110] L. A. Isoldi, C. P. Oliveira, L. A. O. Rocha, J. A. Souza, and S. C. Amico, “Three-dimensional numerical modeling of RTM and LRTM processes,” *J. Braz. Soc. Mech. Sci. & Eng.*, vol. 34, no. 2, pp. 105–111, 2012.
- [111] J. Silva Porto, M. Letzow, E. Domingues dos Santos, J. A. Souza, and L. A. Isoldi, “Application of the computational modeling in the Resin Transfert Molding (RTM) Process: a case study of a marie- propeller,” *Proceedings of ENCIT 14th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering*, 2012.
- [112] C. P. Oliveira, “Modelagem Numérica do Transporte de Resinas em Meio Poroso Aplicado ao Processo de RTM,” Master Thesis, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2010.
- [113] M. Arnold, G. Rieber, M. Wahl, and P. Mitschang, “Comparison between the numerical simulation programm PAM- RTM and RTM Measurements on flat plates,” *Proceedings of the FPCM11 Conference*, pp. 145–154, 2012.
- [114] M. Friedrich, W. Exner, and M. Wietgreffe, “Sensitivity Analysis of Influencing Factors on Impregnation Process of Closed Mould RTM,” pp. 325–337.
- [115] C. Weimer, T. Preller, P. Mitschang, and K. Drechsler, “Approach to net-shape preforming using textile technologies. Part I: edges,” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 31, no. 11, pp. 1261–1268, 2000.
- [116] C. Weimer, T. Preller, P. Mitschang, and K. Drechsler, “Approach to net-shape preforming using textile technologies. Part II: holes,” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 31, no. 11, pp. 1269–1277, 2000.
- [117] G. Beavers and D. Joseph, “Boundary conditions at a naturally permeable wall,” pp. 197–208.
- [118] A. Bley, “Untersuchung von Strömungsvorgängen bei Bypassituationen für den FRT Prozess,” Bachelor's Thesis, Lehrstuhl für Carbon Composite, Technischer Universität München, München, 2016.
- [119] ESI Group, Ed., “VISUAL RTM 12.0,” 2015. Accessed on: May 02 2017.
- [120] A. Hammami, R. Gauvin, F. Trochu, O. Touret, and P. Ferland, “Analysis of the Edge Effect on Flow Patterns in Liquid Composites Molding,” *Applied Composite Materials*, vol. 5, no. 3, pp. 161–173, 1998.
- [121] W.-B. Young and C.-L. Lai, “Analysis of the edge effect in resin transfer molding,” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 28, no. 9-10, pp. 817–822, 1997.

- [122] A. Hammami, R. Gauvin, and F. Trochu, "Modeling the edge effect in liquid composites molding," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 29, no. 5-6, pp. 603–609, 1998.
- [123] "Determination of corner and edge permeability in resin transfer molding,"
- [124] D. B. Richter, "Entwicklung und Untersuchung von Maßnahmen zur Steigerung der Permeabilität fasergelegter Preforms," Master's Thesis, Lehrstuhl für Carbon Composite, Technischer Universität München, München, 2015.
- [125] M. O. Richardson and z. Y. Zhang, "Experimental investigation and flow visualization of the resin transfer mould filling process for non-woven hemp reinforced phenolic," in *5th International Conference on Flow*, 1999, pp. 199–207.
- [126] R. Kaps, "Verfahren und Vorrichtung zur Herstellung von Faserverbundbauteilen," DE102007060739B4, DE 102007060739, Nov 10, 2011.
- [127] M. Bitterlich, M. Drechsel, and T. Niederstadt, "Verfahren und Vorrichtung zum Herstellen eines Faserverbundbauteils und Fahrzeug mit einem Faserverbundbauteil," DE 102011112141, Mar 7, 2013.
- [128] M. Arnold, L. A. Medina, and P. Mitschang, "Varietherme Prozesse zur Herstellung von Hochleistungsverbundwerkstoffen," *Lightweight Des*, vol. 8, no. 5, pp. 58–61, 2015.
- [129] M. Ishii, P. Mitschang, and F. Weyrauch, "Verfahren zur Herstellung faserverstärkter Verbundwerkstoffen," EP000001685947A1, EP 05002047, Aug 2, 2006.
- [130] S. Brack, W. Dauner, and T. Zimmermann, "Verfahren zum Herstellen eines faserverstärkten Kunststoffbauteils und Preform für ein faserverstärktes Kunststoffbauteil," DE 10 2013 006 770 A1, Deutschland, Oct 23, 2014.
- [131] D. Kaiser, "RTM-Verfahren mit Zwischenfaserschicht," 15.12.2014, Deutschland 10 2014 118 670.2, Jun 16, 2016.
- [132] P. Kistner, D. Könnicke, F. Diebold, and D. Roquette, "Verfahren zur Herstellung eines Faserverbundkunststoff-Bauteils," DE 10 2014 009 408 A1, Deutschland DE 10 2014 009 408 A1, Dec 31, 2015.
- [133] K. Fraunhofer, "Verfahren zum Herstellen eines Kunststoffformteils, Werkzeug zur Durchführung des Verfahrens und hiermit hergestelltes Formteil," DE000019850462A1, DE 19850462, May 4, 2000.
- [134] M. Graf and T. Fürst, "Verfahren und Anlage zum Herstellen eines faserverstärkten Kunststoffbauteils," Deutschland DE 10 2012 110 353 A1, Apr 30, 2014.
- [135] M. Schindelbeck, "RTM-Verfahren und dichtungsloses Werkzeug zur Herstellung von faserverstärkten Kunststoffformteilen," DE 102011077468, Dec 20, 2012.

- [136] R. Kaps, "Verfahren zur Herstellung eines Faserverbundbauteils," DE102009053549A1, Deutschland 102009053549, May 19, 2011.
- [137] D. Guittard, D. Soro, and J. M. Poignonec, "Verfahren zur Herstellung eines Gegenstandes aus Verbundwerkstoff durch Transfer-Spritzgiessen von Kunstharz (R.T.M.) und dadurch hergestellter Gegenstand," DE000069607445T2, Deutschland 69607445, Nov 23, 2000.
- [138] D. A. Rempe, *Process Control for Resin Transfer Molding (RTM): DAAL 01-94-C-0066*. Accessed on: May 23 2017.
- [139] S. Bickerton, H. C. Stadtfeld, K. V. Steiner, and S. G. Advani, "Design and application of actively controlled injection schemes for resin-transfer molding," *Composites Science and Technology*, vol. 61, no. 11, pp. 1625–1637, 2001.
- [140] K.-T. Hsiao and S. G. Advani, "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*, vol. 35, no. 10, pp. 1149–1159, 2004.
- [141] A. Bley, "Simulative Untersuchung von Strömungsvorgängen bei Bypasssituationen für den RTM Prozess," Semesterarbeit, Lehrstuhl für Carbon Composite, Technischer Universität München, München, 2017.
- [142] B. Behrens, "Untersuchung von Strömungsvorgängen bei Bypasssituationen für den FRT Prozess," Semesterarbeit, Lehrstuhl für Carbon Composite, Technischer Universität München, München, 2014.
- [143] Hexcel Corporation, Ed., "HexForce® G0926 D 1304 TCT," Jan. 2017. Accessed on: Sep. 04 2017.
- [144] M. Dickert, D. Berg, and G. Ziegmann, "Influence of binder activation and fabric design on the permability of non-crimp. carbon fabrics," in *International Conference on Flow Processes in Composite Materials*.
- [145] D. Magagnato, B. Thoma, and F. Henning, "Experimental characterization to determine the influence of different binder systems on the preform permeability during RTM manufacturing," *Zeitschrift Kunststofftechnik*, vol. 1, no. 11, pp. 256–270, 2015.
- [146] W. Raffelt, "Hochdruck-RTM-Prozessentwicklung für die automobile Großserie," Dissertation, Lehrstuhl für Carbon Composite, Technischer Universität München, München, 2017.
- [147] F. LeBel, É. Ruiz, and F. Trochu, "Void content analysis and processing issues to minimize defects in liquid composite molding," *Polym. Compos.*, vol. 39, p. 1859, 2017.

- [148] B. Lang, "Modifikation des Materialverhaltens im FRT Prozess," Master's Thesis, Lehrstuhl für Carbon Composite, Technischer Universität München, München, 2015.
- [149] F. Nusser, "Untersuchung des Filtereffekts zur Vermeidung von „Race Tracking“ beim RTM Prozess," Semesterarbeit, Lehrstuhl für Carbon Composite, Technischer Universität München, München, 2017.
- [150] A. Moretti, "Wirtschaftlichkeitsbetrachtung des Funktionalen Race Tracking Prozesses," Semesterarbeit, Lehrstuhl für Carbon Composite, Technischer Universität München, München, 2014.
- [151] F. H. Gojny, M. H.G. Wichmann, B. Fiedler, W. Bauhofer, and K. Schulte, "Influence of nano-modification on the mechanical and electrical properties of conventional fibre-reinforced composites," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 36, no. 11, pp. 1525–1535, 2005.
- [152] R. Kotsilkova, D. Fragiadakis, and P. Pissis, "Reinforcement effect of carbon nanofillers in an epoxy resin system: Rheology, molecular dynamics, and mechanical studies," *J. Polym. Sci. B Polym. Phys.*, vol. 43, no. 5, pp. 522–533, 2005.
- [153] M. Nordlund, S. P. Fernberg, and T. S. Lundström, "Particle deposition mechanisms during processing of advanced composite materials," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 38, no. 10, pp. 2182–2193, 2007.
- [154] M. Naffakh, A. M. Díez-Pascual, C. Marco, G. J. Ellis, and M. A. Gómez-Fatou, "Opportunities and challenges in the use of inorganic fullerene-like nanoparticles to produce advanced polymer nanocomposites," *Progress in Polymer Science*, vol. 38, no. 8, pp. 1163–1231, 2013.
- [155] D. Haba, A. J. Brunner, and G. Pinter, "Dispersion of fullerene-like WS<sub>2</sub> nanoparticles within epoxy and the resulting fracture mechanics," *Composites Science and Technology*, vol. 119, pp. 55–61, 2015.
- [156] J. C. J. Bart, *Additives in polymers: Industrial analysis and applications*. Chichester: Wiley, 2006.
- [157] S. H. Yum, W. I. Lee, and S. M. Kim, "Particle Filtration and Distribution during the Liquid Composite Molding Process for Manufacturing Particles Containing Composite Materials," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2016.
- [158] L. Aktas, S. Dharmavaram, Y. K. Hamidi, and M. Cengiz Altan, "Filtration and Breakdown of Clay Clusters during Resin Transfer Molding of Nanoclay/Glass/Epoxy Composites," *Journal of Composite Materials*, vol. 42, no. 21, pp. 2209–2229, 2008.

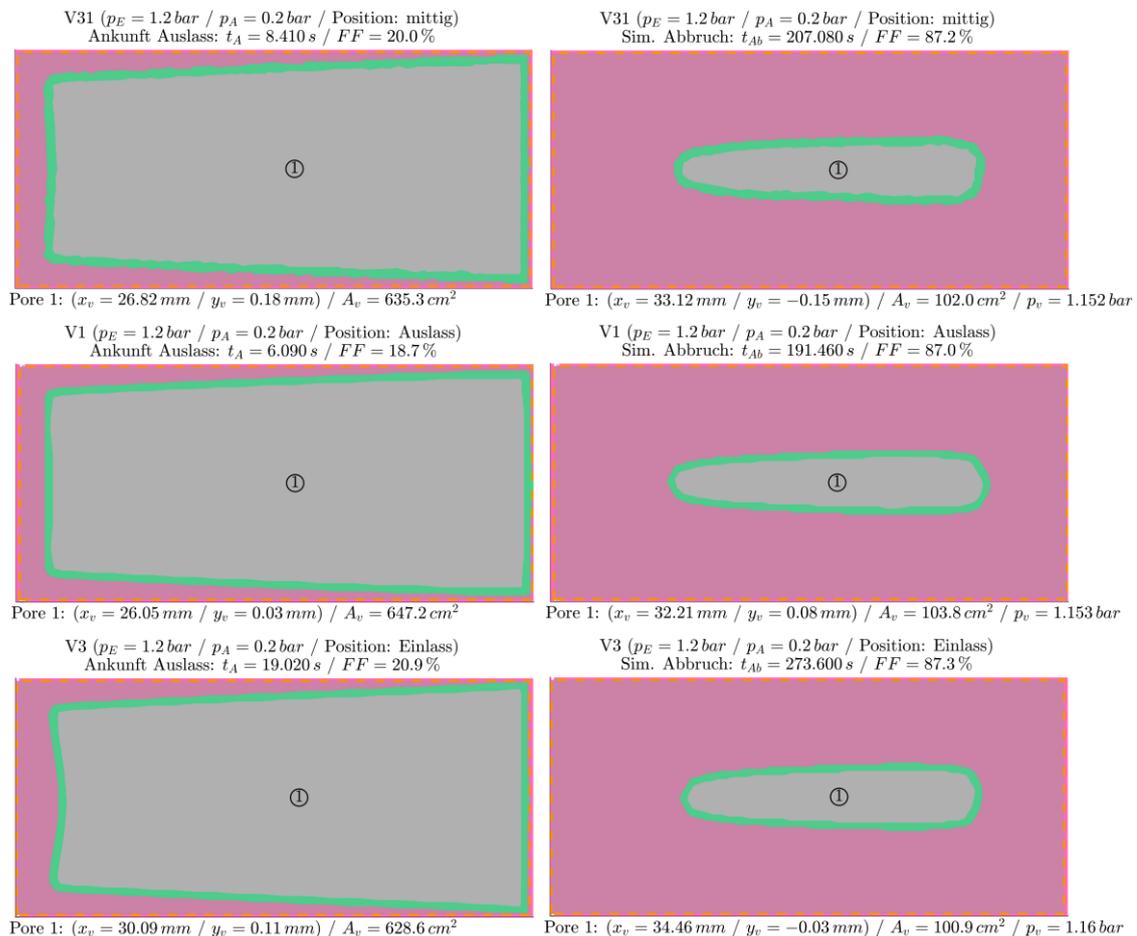
- [159] Z. Fan, K.-T. Hsiao, and S. G. Advani, "Experimental investigation of dispersion during flow of multi-walled carbon nanotube/polymer suspension in fibrous porous media," *Carbon*, vol. 42, no. 4, pp. 871–876, 2004.
- [160] N. J. Wagner and J. F. Brady, "Shear thickening in colloidal dispersions," *Phys. Today*, vol. 62, no. 10, p. 27, 2009.
- [161] R. G. Egres and N. J. Wagner, "The rheology and microstructure of acicular precipitated calcium carbonate colloidal suspensions through the shear thickening transition," *J. Rheol.*, vol. 49, no. 3, p. 719, 2005.
- [162] Y. S. Lee and N. Wagner, "Dynamic properties of shear thickening colloidal suspensions," *Rheologica Acta*, no. 42, pp. 199–208, 2003.
- [163] P. Picard, "Mechanistic Model Simulation of Suspension Rheology using an Energy Balance," Semesterarbeit, Lehr- und Forschungsgebiet Kautschuktechnologie, Rheinisch- Westfälische Technische Hochschule Aachen, Aachen, 2010.
- [164] M. Kamibayashi, H. Ogura, and Y. Otsubo, "Shear-thickening flow of nanoparticle suspensions flocculated by polymer bridging," (eng), *Journal of colloid and interface science*, vol. 321, no. 2, pp. 294–301, 18342327, 2008.
- [165] B. Hochstein, "Rheologie von Kugel- und Fasersuspensionen mit viskoelastischen Matrixflüssigkeiten," Dissertation, Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und Mechanik, Universität Fridericiana Karlsruhe, Karlsruhe, 1997.
- [166] T. Mezger, *Das Rheologie-Handbuch: Für Anwender von Rotations- und Oszillations-Rheometern*, 3rd ed. Hannover: Vincentz Network, 2010.
- [167] R. P. Chhabra and J. F. Richardson, *Non-Newtonian flow and applied rheology: Engineering applications*, 2nd ed. Amsterdam, Boston: Butterworth-Heinemann/Elsevier, 2008.
- [168] M. Kraume, *Transportvorgänge in der Verfahrenstechnik: Grundlagen und apparative Umsetzungen*, 2nd ed. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012.
- [169] S. Heckl, "Comparative Study of Aqueous Unbonded Filler Dispersions," Neuburg, Mai/ 2008. Accessed on: Aug. 22 2017.
- [170] C. Tien, *Principles of filtration*, 1st ed. Oxford: Elsevier, 2012.
- [171] M. Bohnet, *Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry*, 6th ed. Weinheim, Germany: Wiley-VCH, 2003.
- [172] P. Kurzweil, *Chemie: Grundlagen, Aufbauwissen, Anwendungen und Experimente*, 10th ed. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2015.
- [173] M. Stieß, *Mechanische Verfahrenstechnik*. Berlin: Springer, 1997.

- [174] C. Binetruy, J. Pabiot, and B. Hilaire, "The influence of fiber wetting in resin transfer molding: Scale effects," *Polym. Compos.*, vol. 21, no. 4, pp. 548–557, 2000.
- [175] D. W.Y. Wong, L. Lin, P. T. McGrail, T. Peijs, and P. J. Hogg, "Improved fracture toughness of carbon fibre/epoxy composite laminates using dissolvable thermoplastic fibres," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 41, no. 6, pp. 759–767, 2010.
- [176] Z. Wu, X.-S. Yi, and A. Wilkinson, "Interlaminar fracture toughness of carbon fibre/RTM6-2 composites toughened with thermoplastic-coated fabric reinforcement," *Composites Part B: Engineering*, vol. 130, pp. 192–199, 2017.
- [177] Evonik Resource Efficiency GmbH, Ed., "AEROSIL® 380," Feb. 2016. Accessed on: Sep. 04 2017.
- [178] Evonik Resource Efficiency GmbH, Ed., "AEROXIDE® TiO<sub>2</sub> P 25," May. 2016. Accessed on: Sep. 04 2017.
- [179] 3M Deutschland GmbH, Ed., "Mikro-Glashohlkugeln Bubbles," Feb. 2017. Accessed on: Sep. 04 2017.
- [180] Sika Deutschland GmbH, "Biresin® CR80," 2016. Accessed on: Sep. 04 2017.
- [181] Sika Deutschland GmbH, Ed., "Biresin® U1404," Feb. 2016. Accessed on: Sep. 04 2017.
- [182] S. Friedrich, "Glashohlkugeln verbessern Eigenschaften von Thermoplasten," *Lightweight Des.*, vol. 5, no. 2, pp. 26–29, 2012.
- [183] "Neuheiten für die Kleb- und Dichtstoffindustrie: ECS 2007 plus Adhesives, Sealants, Construction Chemicals (Teil 1)," in *adhäsion KLEBEN & DICHTEN*, pp. 12–17.
- [184] C. Stengele, "Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften von auf Endkontur gefertigten RTM-Bauteilen," Bachelor's Thesis, Lehrstuhl für Carbon Composite, Technischer Universität München, München, 2014.
- [185] A. Urdangarin and Kepa, "Characterization of the mechanical properties in a RTM manufactured part rim," Master's Thesis, Lehrstuhl für Carbon Composites, Technischer Universität München, München, 2016.
- [186] S. Renkl, "Entwicklung und Verifikation eines Prüfstands zur Untersuchung des Off-Plane Penetrationsverhaltens im RTM-Prozess für gekrümmte Preforms," Master's Thesis, Lehrstuhl für Carbon Composite, Technischer Universität München, München, 2017.
- [187] S. Odenbach, *Magnetoviscous effects in ferrofluids*. Berlin: Springer, ©2002.

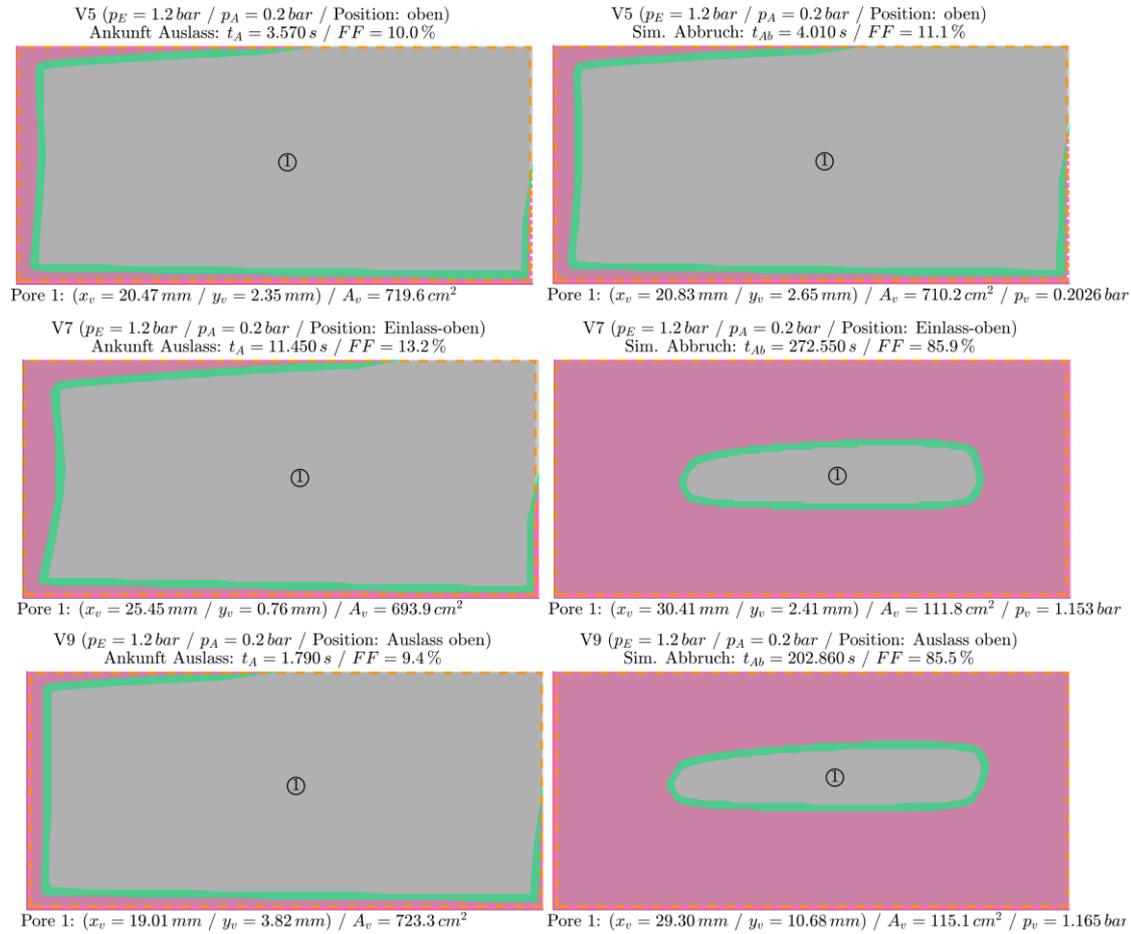
- [188] O. Ashour, C. A. Rogers, and W. Kordonsky, “Magnetorheological Fluids: Materials, Characterization, and Devices,” *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 7, no. 2, pp. 123–130, 2016.
- [189] N. Tagscherer, “Prüfstandsentwicklung zum Nachweis vom Einsatz von magnetrheologischen Flüssigkeiten im RTM Prozess,” Bachelor's Thesis, Lehrstuhl für Carbon Composite, Technischer Universität München, München, 2015.
- [190] G. Kienzle, “Robustes RTM durch ein magnetrheologisches Dichtungssystem,” Semesterarbeit, Lehrstuhl für Carbon Composite, Technischer Universität München, München, 2014.

# A Anhang

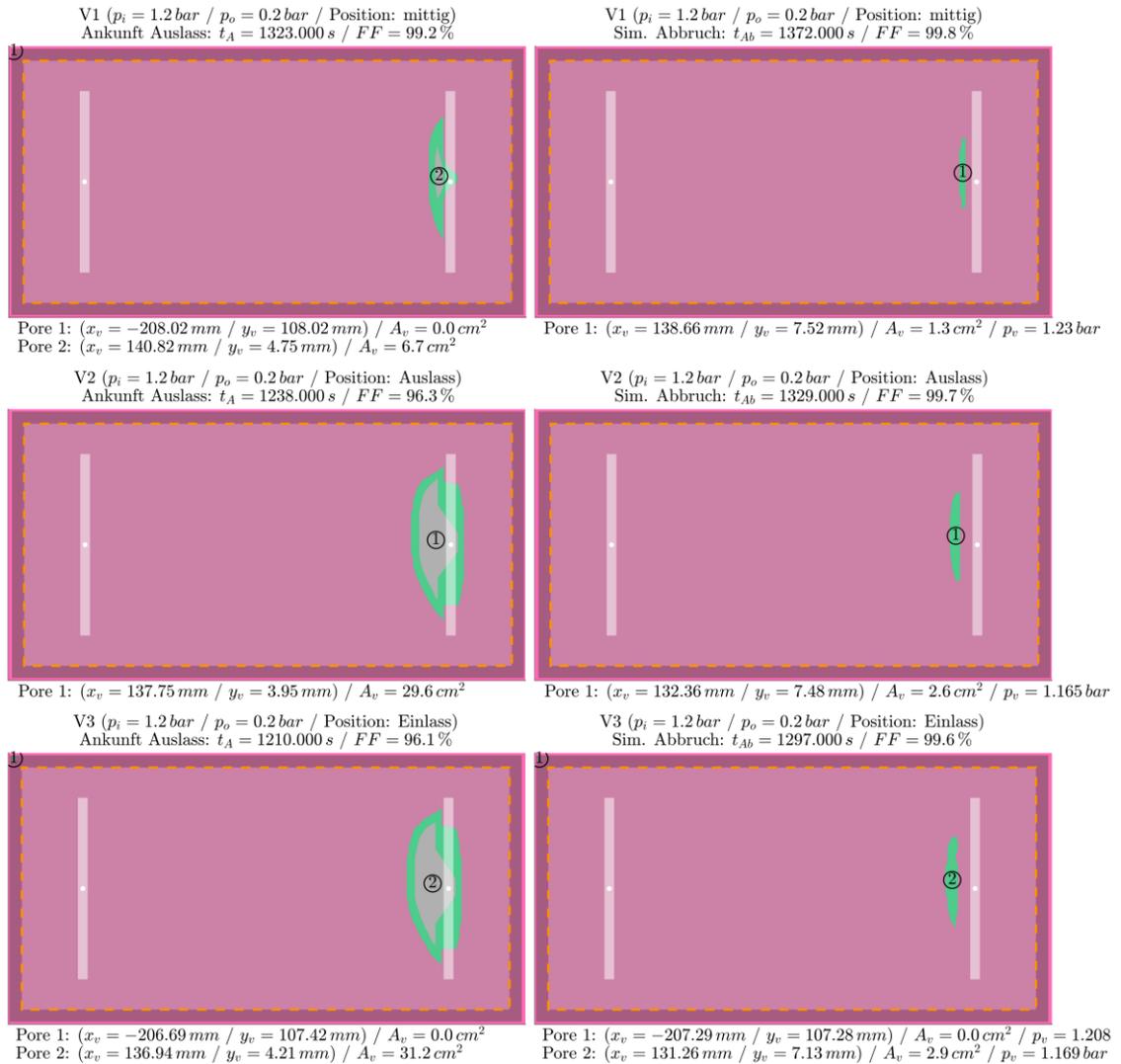
## a Studie zur Positionstoleranz



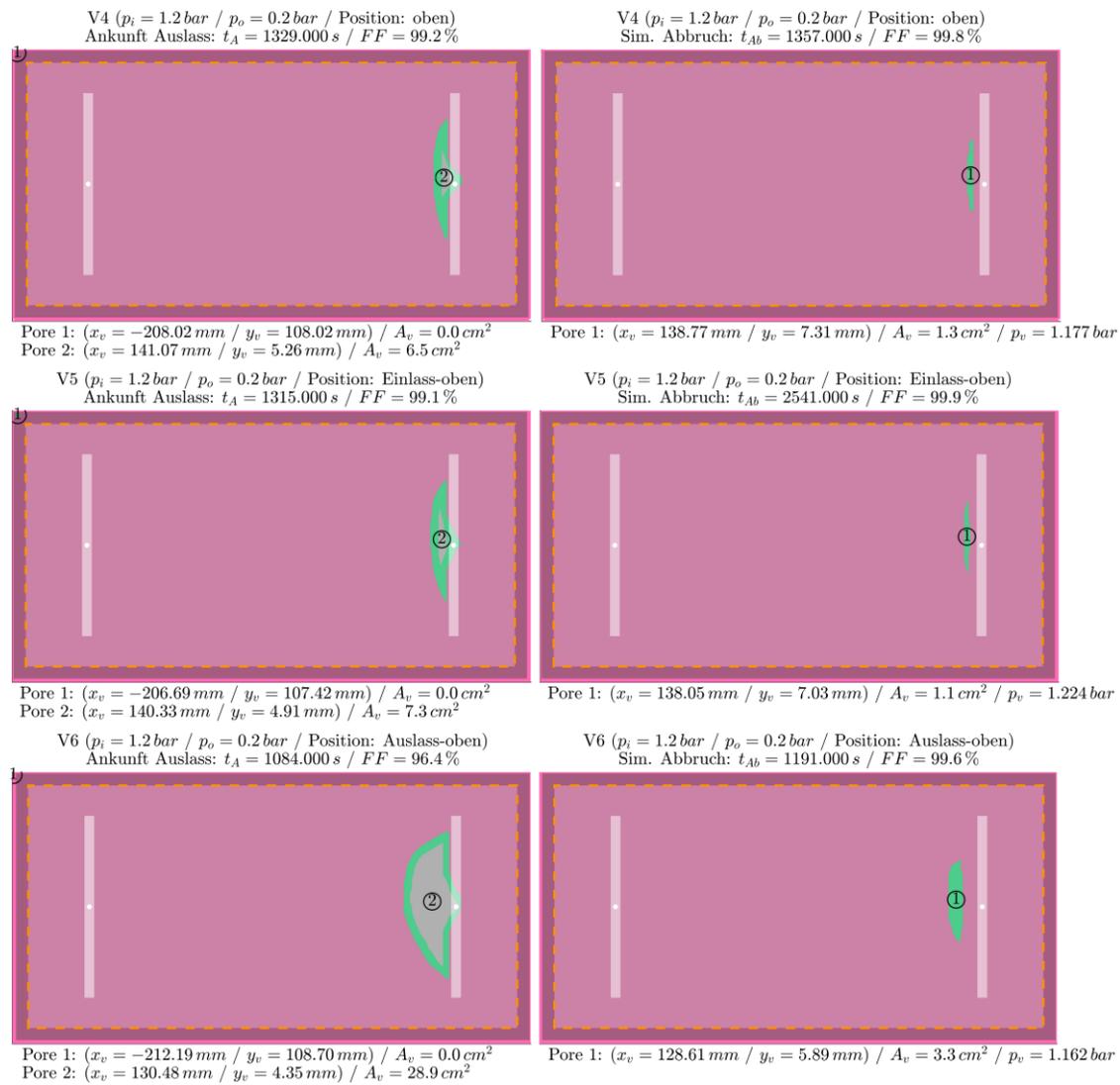
**Abb. A- 1: Studie zu Positionstoleranz S2: Einlass und Auslass neben der Preform für FVG 48% und eine RT- Kanalbreite von 2mm (01)**  
Positionen mittig, zum Auslass bzw. zum Einlass verschoben



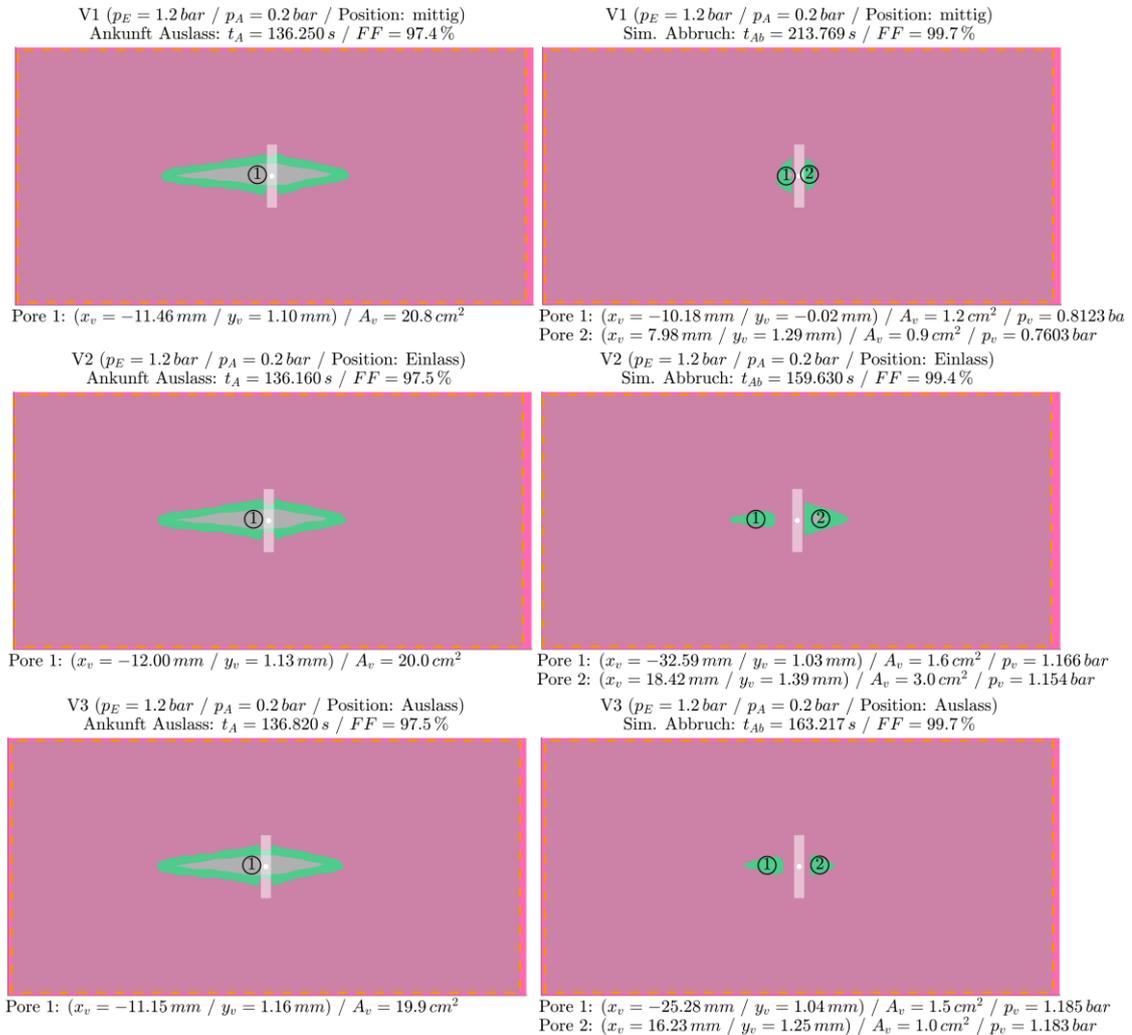
**Abb. A-2: Studie zu Positionstoleranz S2: Einlass Auslass neben der Preform für FVG 62% und eine RT- Kanalbreite von 2mm (01)**  
Positionen nach oben, zum Einlass nach oben bzw. zum Auslass nach oben verschoben



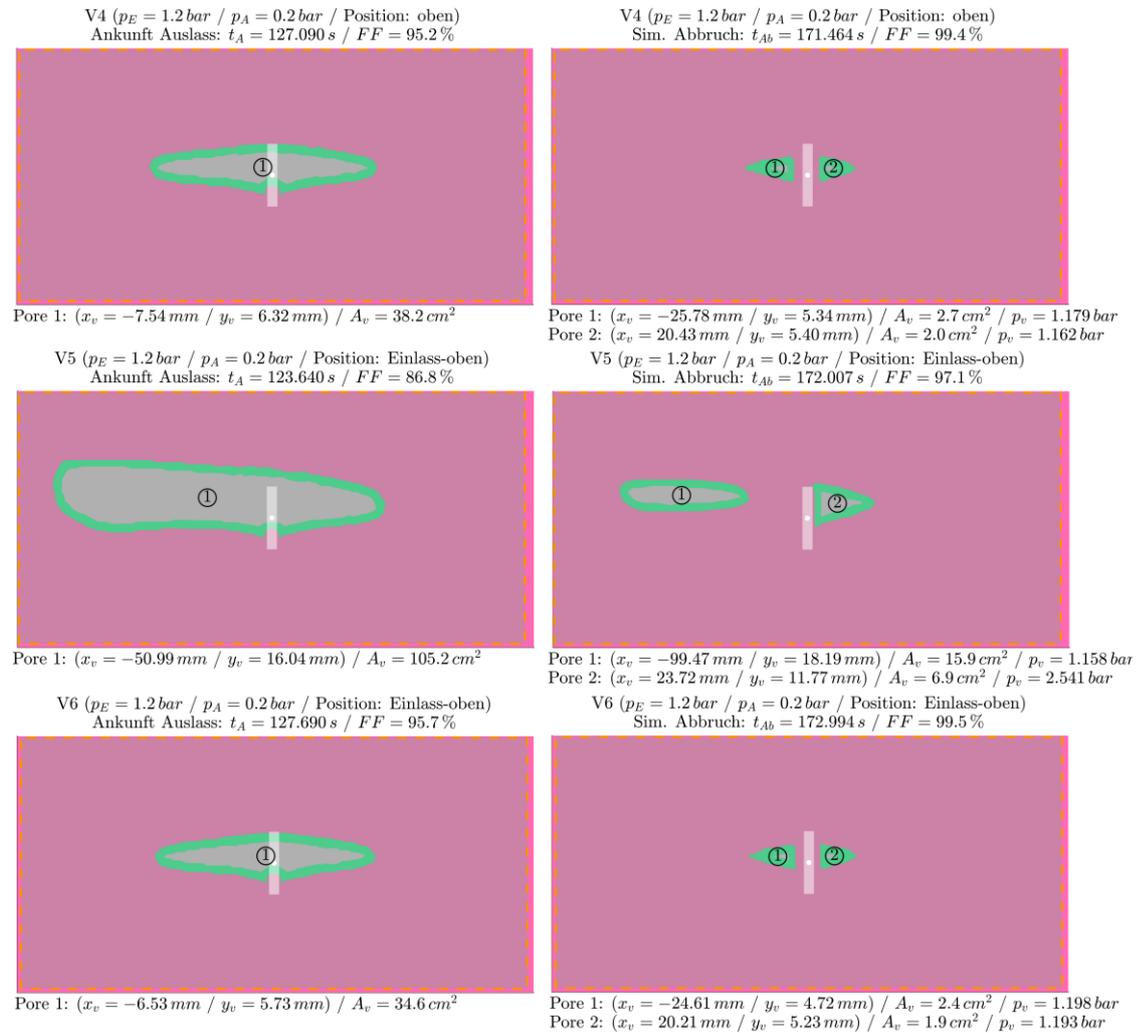
**Abb. A- 3: Studie zu Positionstoleranz S3: Einlass und Auslass auf der Preform für FVG 48% mit Überpressungsbereich (FVG 62%) und eine RT- Kanallbreite von 2mm (01) Positionen mittig, zum Auslass bzw. zum Einlass verschoben**



**Abb. A- 4: Studie zu Positionstoleranz S3: Einlass Auslass auf der Preform für FVG 48% mit Überpressungsbereich (FVG 62%) und eine RT- Kanaltiefe von 2mm (02)**  
Positionen nach oben, zum Einlass nach oben bzw. zum Auslass nach oben verschoben



**Abb. A-5: Studie zu Positionstoleranz S4: Einlass seitlich Auslass auf der Preform für FVG 62% und eine RT- Kanalbreite von 2mm (01)**  
Positionen mittig, zum Auslass bzw. zum Einlass verschoben



**Abb. A-6: Studie zu Positionstoleranz S4: Einlass seitlich Auslass auf der Preform für FVG 48% und eine RT- Kanalbreite von 2mm (02)**

Positionen nach oben, zum Einlass nach oben bzw. zum Auslass nach oben verschoben

## B Veröffentlichungen

### Zeitschriftenartikel

- [A1]S. Ucsnik, M. Scheerer, S. Zaremba, and D. H. Pahr, “Experimental investigation of a novel hybrid metal–composite joining technology,” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 41, no. 3, pp. 369–374, 2010.
- [A2]D. Heim, M. Hartmann, J. Neumayer, Ö. Ahmet-Tsaous, S. Zaremba, K. Drechsler, “Novel method for determination of critical fiber length in short fiber carbon/carbon composites by double lap joint,” *Composites Part B: Engineering*, vol. 54, pp. 365–370, 2013.
- [A2]N. Vernet, E. Ruiz, S. Advani, J. B. Alms, M. Aubert, M. Barburski, B. Barari, J. M. Beraud, D. C. Berg, N. Correia, M. Danzi, T. Delavrière, M. Dickert, C. Di Fratta, A. Endruweit, P. Ermanni, G. Francucci, J. A. Garcia, A. George, C. Hahn, F. Klunker, S. V. Lomov, A. Long, B. Louis, J. Maldonado, R. Meier, V. Michaud, H. Perrin, K. Pillai, E. Rodriguez, F. Trochu, S. Verheyden, M. Wietgreffe, W. Xiong, S. Zaremba, and G. Ziegmann, “Experimental determination of the permeability of engineering textiles: Benchmark II,” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 61, pp. 172–184, 2014.
- [A3]R. Meier, A. Walbrand, C. Hahn, S. Zaremba, and K. Drechsler, “Methods to determine the permeability of textile reinforcements,” *Journal of Plastics Technology*, no. 10, pp. 91–116, 2014.
- [A4]R. Meier, I. Kahraman, A. T. Seyhan, S. Zaremba, and K. Drechsler, “Evaluating vibration assisted vacuum infusion processing of hexagonal boron nitride sheet modified carbon fabric/epoxy composites in terms of interlaminar shear strength and void content,” *Composites Science and Technology*, vol. 128, pp. 94–103, 2016.
- [A5]L. Eberl, L. Avila Gray, S. Zaremba, and K. Drechsler, “The effect of fiber undulation on the strain field for pinned composite/titanium joints under tension,” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 103, pp. 148–160, 2017.
- [A6]P. M. Schaefer, D. Gierszewski, A. Kollmannsberger, S. Zaremba, and K. Drechsler, “Analysis and improved process response prediction of laser-assisted automated tape placement with PA-6/carbon tapes using Design of Experiments and numerical simulations,” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 96, pp. 137–146, 2017.
- [A7]M. K. Schaefer, W. Raffelt, S. Zaremba, and K. Drechsler, “Ultrasonic mixing head for liquid composite molding: Process and material characteristics,” *Polym. Compos.*, vol. 42, p. 2523, 2017.

- [A8]P. Kammerhofer, S. Zaremba, and K. Drechsler, “Untersuchungen zur Haltbarkeit von Formen aus carbonfaserverstärkten Kunststoffen (CFK): Ein Vergleich der Matrixsysteme Epoxid und BMI,” *Journal of Plastics Technology*, pp. 119–145.

### Patente

- [P1] D. Häffelin and S. Zaremba, “Verfahren zum Herstellen eines Bauteils aus Faserverbundwerkstoff, Vorformling dafür sowie Bauteil,” WO002012007160A2 2011003497, Jan 19, 2012.
- [P2] D. Häffelin, B. Zacherle, and S. Zaremba, “Verfahren zum Herstellen eines Bauteils aus einem Faserverbundwerkstoff sowie Faserverbundwerkstoffbauteil,” WO002013007385A1 2012002932, Jan 17, 2013.
- [P3] D. Schultheiss, S. Zaremba, and C. Ebel, “Collapsible mandrel for manufacturing three-dimensional structures,” US 201213718176, Aug 9, 2016.
- [P4] A. Altmann and S. Zaremba, “Verfahren und Vorrichtung zur Herstellung eines Bauteils aus einem Faserverbundwerkstoff,” WO002014072034A1 2013003299, May 15, 2014.
- [P5] S. Zaremba and P. Steib, “Verfahren zur Herstellung eines Bauteils aus einem Faserverbundwerkstoff,” WO002015007353A2 2014001483, Jan 22, 2015.

### Konferenzbeiträge

- [K1]R. Meier, S. Zaremba, F. Springl, K. Drechsler, F. Gaille, C. Weimer, “Online process monitoring systems - benchmark and test study,” *11th International Conference on Flow Processes in Composite Materials*, 11 Jul., 2015.
- [K2]S. Zaremba and P. Steib, “Robustes Prozessieren im RTM Prozess,” *Bayerischer Patentkongress*, 22 Oct., 2013.
- [K3]R. Meier, C. Kirdar, N. Rudolph, S. Zaremba, and K. Drechsler, “Investigation of the shear thinning behavior of epoxy resins for utilization in vibration assisted liquid composite molding processes,” in *Proceedings of the Polymer Processing Society 29th Annual Meeting*, Polymer Processing Society, Ed., 2013.
- [K4]R. Meier, J. Heim, A. Nieratschker, and S. Zaremba, “Investigation of influencing parameters with respect to filling time in vibration assisted RTM processes,” in *International conference on composite materials*, S. Hoa, Ed., Montreal, 2014.
- [K5]S. Zaremba, P. Steib, B. Behrens, and B. Lang, “Multi-Material Approach for More Robust RTM Processing,” *Sicomp Conference*, 01 Jun., 2015.
- [K6]J. Krollmann, R. Snajdr, M. Paz, S. Zaremba, and K. Drechsler, “Hybrid-matrix approach: How to overcome the conflict of matrix selection?,” *Conference of the Polymer Processing*, 21 Sep., 2015.

- 
- [K7] S. Zaremba, R. Meier, N. Pantelidis, M. Hauber, C. Wolf, K. Drechsler, “Process monitoring and control for an aerospace application: System, benefits and results of the Lufo 4.3 project TCG-NG,” *International Conference on Manufacturing of Advanced Composites*, 2015.
- [K8] S. Zaremba, A. Carrels, A. Bley, M. Hartmann, and K. Drechsler, “Modellierung von Race Tracking in der Füllsimulation / numerische Studie zur Makroporenentwicklung im RTM-Prozess,” *ESI Forum Deutschland*, 2017



## C Betreute studentische Arbeiten

Im Rahmen der Tätigkeit am Lehrstuhl für Carbon Composites wurde die Betreuung der nachfolgend aufgeführten studentischen Arbeiten unterstützt.

### References

- [S1] Behrens B. Untersuchung von Strömungsvorgängen bei Bypassituationen für den FRT Prozess. Semesterarbeit. München; 2014.
- [S2] Bley A. Untersuchung von Strömungsvorgängen bei Bypassituationen für den FRT Prozess. Bachelor's Thesis. München; 2016.
- [S3] Bley A. Simulative Untersuchung von Strömungsvorgängen bei Bypassituationen für den RTM Prozess. Semesterarbeit. München; 2017.
- [S4] Carrels A. Modeling of racetracking in filling simulations and numerical investigation of macro void formation during RTM. Master's Thesis. München; 2017.
- [S5] Guo, Canran. Einfluss der Temperatur auf die Permeabilität von gebinderten Preforms. Master's Thesis. München; 2016.
- [S6] Häffelin D. Aktive Funktionsintegration elektrischer Komponenten in CFK-Bauteile und deren Herstellungsprozess. Diplomarbeit. München; 2010.
- [S7] Hillreiner F. Entwicklung Prüfstand Permeabilitätsmessung. Semesterarbeit. München; 2012.
- [S8] Kienzle G. Robustes RTM durch ein magnetrheologisches Dichtungssystem. Semesterarbeit. München; 2014.
- [S9] Köhler R. Funktionsintegration von flächigen Prozesshilfsmitteln bei der Herstellung von FVK. Semesterarbeit. München; 2013.
- [S10] Lang B. Modifikation des Materialverhaltens im FRT Prozess. Master's Thesis. München; 2015.
- [S11] Moretti A. Wirtschaftlichkeitsbetrachtung des Funktionalen Race Tracking Prozesses. Semesterarbeit. München; 2014.
- [S12] Nusser F. Untersuchung des Filtereffekts zur Vermeidung von „Race Tracking“ beim RTM Prozess. Semesterarbeit. München; 2017.
- [S13] Steib P. Robustes RTM. Semesterarbeit. München; 2013.
- [S14] Stengele C. Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften von auf Endkontur gefertigten RTM-Bauteilen. Bachelor's Thesis. München; 2014.
- [S15] Tagscherer N. Prüfstandsentwicklung zum Nachweis vom Einsatz von magnetrheologischen Flüssigkeiten im RTM Prozess. Bachelor's Thesis. München; 2015.

- [S16] Urdangarin A, Kepa. Characterization of the mechanical properties in a RTM manufactured part rim. Master's Thesis. München; 2016.
- [S17] Zerbes C. Einfluss der Temperatur auf die Permeabilität von gebinderten Preforms. Semesterarbeit. München; 2016.
- [S18] Conrad M. Entwicklung, Analyse und Fertigung neuer Strukturkonzepte für Composite Rumpfschalen. Semesterarbeit. München; 2011.
- [S19] Eroğlu O. Effizientes Preformkonzept für die Herstellung von CFK-Spanten. Diplomarbeit. München; 2010.
- [S20] Faeth B. Einsatzanalyse von Formwerkzeugen für die CFK-Bauteilherstellung mit thermisch gespritzter Invar-Struktur. Diplomarbeit. München; 2011.
- [S21] Gajewski B. Untersuchung und Optimierung der Herstellung von Sandwichstrukturen in Harzinfusionstechnik. Master's Thesis. München; 2015.
- [S22] Gajewski B. Vorentwicklung und Untersuchung effizienter Fließhilfen für Vakuuminfusionsprozesse auf einseitigem Werkzeug. Semesterarbeit. München; 2013.
- [S23] Horn B. Weiterentwicklung eines Automatisierungskonzeptes für den Herstellungsprozess von Faserverbundwerkstoffen mittels Vakuuminfusion. Diplomarbeit. München; 2013.
- [S24] Kammerhofer P. Entwicklung von Komponenten neuartiger Frachtfußbodenstrukturen. Diplomarbeit. München; 2012.
- [S25] Käther S. Entwicklung eines Krafteinleitungselementes für die Verbindung von monolithischen FVK Bauteilen. Semesterarbeit. München; 2011.
- [S26] Micus S. Integration thermoplastischer Funktionsschichten in endlosfaserverstärkte Verbundbauteile auf Epoxidharzbasis. München; 2017.
- [S27] Strohas R. Prozessabsicherung einer innovativen Füge-technik im CFK-Stahl-Mischbau für den automobilen Karosseriebau. Diplomarbeit. München; 2012.
- [S28] Fenske S. Analyzing the influence of binder activation on the properties of carbon fiber textile preforms. Diplomarbeit. München; 2013.
- [S29] Stefanziola C. Reparaturverfahren für endloscarbonfaserverstärkte thermoplastische Kunststoffe. Semesterarbeit. München; 2012.
- [S30] Stezowski B. Einfluss automobilrelevanter Matrixsysteme auf technische Eigenschaften kohlenstofffaserverstärkter Kunststoffe (CFK). Diplomarbeit. München; 2013.
- [S31] Streck B. Automated, robotic, integrated machining and inspection system for small to medium sized CFRP Aerospace parts. Master's Thesis. München; 2017.

- [S32] Weinmann R. Optimierung von Blindnietmutterkonzepten für den Einsatz in kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen. Diplomarbeit. München; 2012.
- [S33] Weinmann R. Alternative Verbindungselemente zu Blindnietmuttern in kohlefaserverstärkten Kunststoffen. Semesterarbeit. München; 2011.

Teile des Inhalts folgender Arbeiten haben in die vorliegende Dissertationsschrift Eingang gefunden: [S1], [S2], [S3], [S4], [S7], [S10], [S12], [S13],



## D Lebenslauf

---

### Persönliche Daten

Swen Zaremba	Geburtsdatum	10.07.1977
	Geburtsort	Stuttgart

---

### Beruflicher Werdegang

Seit 2009	<b>Technische Universität München</b>	Garching b. München
	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Carbon Composites, Prof. Klaus Drechsler	
	Seit 2010	
	Leiter der Forschungsgruppe „Prozesstechnik für Matrixsysteme“	
2006-2009	<b>FACC AG</b>	Ried i. Innkreis, Österreich
	Forschung und Entwicklungsingenieur	
2006	<b>Universität Stuttgart</b>	Stuttgart
	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Flugzeugbau	

---

### Ausbildung und Wehrdienst

Seit 2013	<b>Technische Universität München</b>	Garching b. München
	Promotion zum Thema „Bypassströmungen im Füllprozess textiler Strukturen: Charakterisierung, Abbildung und Optimierung“	
1998-2006	<b>Universität Stuttgart</b>	Stuttgart
	<b>Diplom- Ingenieur für Luft- und Raumfahrttechnik</b>	
	Diplomarbeit bei EADS CRC: Automatisierung des VAP- Prozesses	
	Studienarbeit am IFR Universität Stuttgart: Modellierung einer Hubschrauberzelle mit Hilfe der Methode der Finiten Elemente in	

MATLAB zur Untersuchung der Schwingungskopplung System Rotor/ Zelle

1997-1998

**Wehrdienst**

Mengen

Luftwaffenausbildungsregiment 3

1988-1997

**Theodor Heuss Gymnasium**

Mühlacker