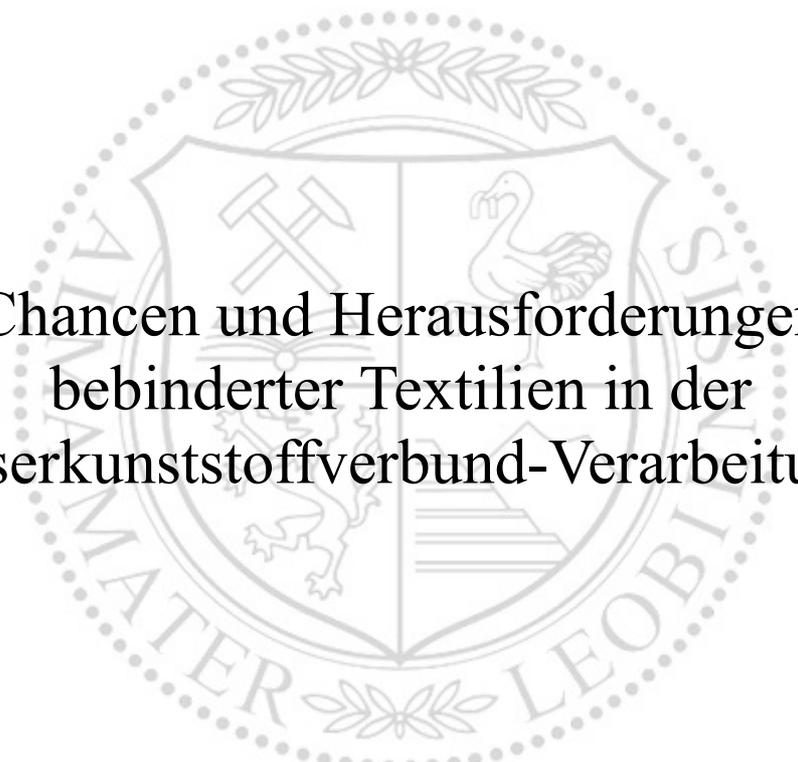




Lehrstuhl für Verarbeitung von Verbundwerkstoffen

Dissertation



Chancen und Herausforderungen  
beibinderter Textilien in der  
Faserkunststoffverbund-Verarbeitung

Dipl.-Ing. Maximilian Josef Walther Tonejc, BSc

Oktober 2019

## EIDESSTÄTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt, und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

Ich erkläre, dass ich die Richtlinien des Senats der Montanuniversität Leoben zu "Gute wissenschaftliche Praxis" gelesen, verstanden und befolgt habe.

Weiters erkläre ich, dass die elektronische und gedruckte Version der eingereichten wissenschaftlichen Abschlussarbeit formal und inhaltlich identisch sind.

Datum 29.10.2019

---

Unterschrift Verfasser/in  
Maximilian Josef Walther, Tonejc

*Je genauer wir planen, desto härter trifft uns der Zufall.*

## Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Christian Doppler Labor für Hocheffiziente Composite Verarbeitung welches integraler Bestandteil des Lehrstuhls für Verarbeitung von Verbundwerkstoffen ist, an der Montanuniversität Leoben in den Jahren 2013 bis 2019. Den erfolgreichen Abschluss verdanke ich einer Vielzahl von Personen, die mich in dieser Zeit wesentlich unterstützt und motiviert haben.

Allen voran möchte ich Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ralf Schledjewski, dem Leiter des Lehrstuhls und des Christian Doppler Labors danken. Zu jedem Zeitpunkt während meiner Anstellung im Christian Doppler Labor waren ausreichend Ressourcen, sowie Handlungsspielraum zur Bearbeitung wissenschaftlicher Themenstellungen vorhanden. Seine kritische Auseinandersetzung mit meinen Ideen und Ergebnissen haben mich präziser und kritischer werden lassen. Herrn assoz.Prof. Dipl.-Ing. Dr.mont. Ewald Fauster danke ich für die langjährige Förderung und für die ins Jahr 2011 zurückreichende Zusammenarbeit.

Des Weiteren möchte ich mich bei meinen Kollegen für die Unterstützung und das freundschaftliche Klima während der überwiegenden Zeit bedanken. Dabei möchte ich im Besonderen meinen Kollegen Patrick Hergan, Christian Hueber, Stefan Neunkirchen, Moritz Salzman, Christian Schillfahrt, Britto Satheesh, Spiridon Konstantoupoulos, Rohit Sebastian, Tasdeeq Sofi, Neha Yadav danken. Mein weiterer Dank gilt unseren nicht wissenschaftlichen Mitarbeitern Nadine Stückler, Inge Kaindl, Heike Noll, Stephanie Schindlegger und Georg Hirzberger die mich bei administrativen sowie Labor Tätigkeiten unterstützt haben.

Ferner möchte ich mich bei meinen studentischen Mitarbeitern Magdalena Habicher, Sophia Lehner, Matthias Drvoderic und Phillip Walus für die langjährige und unermüdliche Unterstützung bedanken.

Außerdem danke ich dem Bundesministerium für Wissenschaft, Forschung und Wirtschaft sowie der FACC Operations GmbH, als Partner des Christian Doppler Labors für Hocheffiziente Composite Verarbeitung, für die Finanzierung der durchgeführten Forschung. Mein Dank gilt darüber hinaus der Christian Doppler Forschungsgesellschaft für die Betreuung.

Schließlich möchte ich mich noch bei meiner gesamten Familie und meinen Freunden bedanken, die mir eine wichtige Stütze in dieser turbulenten Lebensphase waren und mir immer mit Rat und Tat zur Seite standen. Meine Eltern die mich immer unterstützt haben und an mich geglaubt haben, danke ich ganz besonders. Außerdem danke ich meiner Freundin Lea im Besonderen, die mich immer unterstützt hat und auch in Zeiten der großen Zweifel mich immer wieder motiviert hat weiter zu machen.

## Kurzfassung

Bebinderte Textilien zur Herstellung komplexer bzw. großflächiger Preforms die mittels Flüssigimprägnierverfahren verarbeitet werden, nehmen eine immer größere Rolle in der Faserverbundkunststoff-Industrie ein. Chancen aber auch Herausforderungen, die damit einhergehen werden in der vorliegenden Arbeit adressiert. Dabei wurde der Fokus auf einzelne Aspekte aus der Prozesskette eines Faserkunststoffverbund-Bauteils gelegt. Es wurden die Bereiche Binderauftrag, Preformherstellung und Preformimprägnierung an Hand von ausgewählten Beispielen untersucht.

Der methodische Ansatz umfasste, zum einen die Prozessentwicklung zur Preformherstellung, wie etwa den Aufbau und die Automatisierung einer Automated Dry Fiber Placement (ADFP) Anlage, als auch das bedrucken von Textilien, mittels Fused Deposition Modeling (FDM) 3D-Druck Technologie. Aufbauend darauf erfolgten Füll- bzw. Permeabilitätsversuche, zur Quantifizierung des Einflusses, des Binders auf die Preforms. Im Fall der ADFP Preforms wurde die Qualität der Füllung bewerten bzw. mittels nicht zerstörender Analysemethoden ausgewertet. Die bedruckten Textilien, die in Folge zu Preforms heißgepresst wurden und auf deren manipuliertes Verhalten hin untersucht wurden, dienten als Basis zur Entwicklung eines Vorhersagemodells. Dieses ist in der Lage den Einfluss des lokal eingebrachten Binders, auf das Permeabilitätsverhalten der Preform, abzuschätzen. Abgesehen von Sonderverfahren wurde der Einfluss, von Pulverbindern auf die Imprägnierung von Preforms unter prozessnahen Bedingungen untersucht. Neben dem massiv unterschiedlichen Kompaktierungsverhalten wurden flankierende Untersuchungen, zum Einfluss des Messfluides, durchgeführt. Im Fokus standen hierbei die chemorheologischen Wechselwirkungen aufgrund von Benetzungsverhalten, Binderlöslichkeit und einhergehender Veränderung der Viskosität. Aufgrund dieser signifikanten Wechselwirkungen wurde eine Methode, zur Extraktion des Harzes nach der Imprägnierung, entwickelt. so konnte der Bindergehalt in verschiedenen Segmenten der Preform bestimmt werden und eine Verteilung des Binders visualisiert werden. Dies liefert somit einen Beitrag zur Verbesserung des Verständnisses der Wirkung von Bindern in der Verarbeitung.

## Abstract

Bindered textiles for production of complex shaped or large scale preforms processed by liquid composite molding processes are playing an increasingly important role in the fiber composite industry. Opportunities but also challenges are addressed in this thesis. Individual aspects of the process chain for manufacturing composite parts were investigated in detail. The areas of binder application, preform production and preform impregnation were examined on the basis of selected examples.

The methodology included process development for preform production, such as the construction and automation of an Automated Dry Fiber Placement (ADFP) system, as well as printing onto textiles using Fused Deposition Modeling 3D- printing technology. Based on preliminary work, filling and permeability tests were carried out to quantify the influence of the binder on preforms. In case of the ADFP preforms, the quality of the filling was visually inspected as well as evaluated using non-destructive analysis methods. The printed textiles, which were subsequently hot pressed into preforms and examined for their manipulated behavior, served as the basis for the development of a prediction model. This model is able to estimate the influence of the locally applied binder on the permeability behavior of the preform. In addition to these special methods, the influence of powder binder on the impregnation of preforms under near process conditions was investigated. Besides the massively different compaction behavior of bindered preforms in comparison with unbindered preforms, additional investigations on the influence of the test fluid were carried out. The focus was on the chemo-rheological interactions due to wetting behavior, binder dissolubility and the associated change in viscosity. Based on these significant interactions, a method was developed to extract the resin after impregnation. Thus, the binder content in different segments of the preform could be determined and a distribution of the binder could be visualized. This contributes to an improved understanding of the effect of binders in processing.

---

# Inhalt

<b>Eidesstattliche Erklärung .....</b>	<b>II</b>
<b>Danksagung.....</b>	<b>IV</b>
<b>Kurzfassung.....</b>	<b>VI</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>VII</b>
<b>Inhalt.....</b>	<b>VIII</b>
<b>Verwendete Abkürzungen und Formelzeichen.....</b>	<b>XII</b>
<b>1 Einleitung und Zielsetzung.....</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation und Hintergrund .....	1
1.2 Ziele der Arbeit und methodischer Ansatz .....	3
<b>2 Grundlagen .....</b>	<b>6</b>
2.1 Binder.....	6
2.2 Preforming .....	7
2.2.1 Sequentielle Preformherstellung mittels bebindearter Textilien.....	8
2.2.2 Direkte Preformherstellung mit Automated Dry Fiber Placement .....	9
2.3 Faservolumengehalt vs. Volumengehalt .....	11
2.4 Kompaktierung.....	12
2.5 Permeabilität von Preforms .....	13
2.5.1 Gesetz von Darcy .....	13
2.5.2 Anisotrope Permeabilität .....	16
2.5.3 Optische Permeabilitätsbestimmung in der Ebene .....	18
2.5.4 Kapazitive Permeabilitätsbestimmung in der Ebene.....	19

---

2.5.5	Ultraschall Permeabilitätsbestimmung in der Dicke.....	20
2.6	Fluid- und Feststoffeigenschaften .....	21
2.6.1	Viskositätsverhalten.....	22
2.6.2	Oberflächenspannung .....	23
2.7	Flüssigimprägnierverfahren.....	25
2.7.1	VAP – Vacuum Assisted Process.....	26
2.7.2	RTM – Resin Transfer Molding.....	27
2.7.3	Nasspressen .....	28
2.8	Nicht zerstörende Analyse Methoden .....	29
2.8.1	Akustische Rastermikroskopie .....	29
2.8.2	Computer Tomographie.....	31
<b>3</b>	<b>Entwicklung eines adaptiven Multimaterial Legesystems.....</b>	<b>33</b>
3.1	Überblick zum mechanischen Aufbau und den Komponenten.....	33
3.1.1	Materialzuführung.....	35
3.1.2	Kompaktierungskraft.....	36
3.2	Prüfstandsautomatisierung .....	39
3.2.1	Elektronische Verkettung.....	39
3.2.2	Programmstruktur und Zustandsautomaten .....	40
3.2.3	Benutzeroberfläche (GUI).....	43
3.2.4	Prüfstandsüberwachung.....	47
<b>4</b>	<b>Material.....</b>	<b>50</b>
4.1	Binder.....	50
4.2	Textile Halbzeuge .....	52
4.3	Injektionsfluide .....	54
<b>5</b>	<b>Herstellung bebinderter Preforms .....</b>	<b>56</b>

---

5.1	ADFP Preforms .....	56
5.1.1	Prozessbeschreibung .....	56
5.1.2	Preformaufbau .....	59
5.2	FDM bedruckte Preforms .....	60
5.2.1	Prozessbeschreibung .....	60
5.2.2	Preformaufbau .....	62
5.3	Heißgepresste Preforms .....	63
<b>6</b>	<b>Analyse bebinderter Preforms .....</b>	<b>64</b>
6.1	ADFP Preforms .....	64
6.1.1	Kompaktierungsverhalten .....	65
6.1.2	Füllstudie an ADFP Preforms .....	66
6.1.3	Ultraschall Rastermikroskopie .....	69
6.1.4	Computer Tomographie .....	71
6.1.5	Diskussion .....	71
6.2	FDM bedruckte Preforms .....	72
6.2.1	Permeabilitätsverhalten .....	73
6.2.2	Permeabilitätsmodell .....	78
6.2.3	Diskussion .....	81
6.3	Heißgepresste Preforms .....	81
6.3.1	Kompaktierungsverhalten .....	81
6.3.2	Charakterisierung der Oberflächenspannung .....	83
6.3.3	Binderlöslichkeit .....	85
6.3.4	Viskositätsverhalten der Testfluide .....	86
6.3.5	Permeabilitätsverhalten .....	89
6.3.6	Bestimmung der Binderverteilung .....	95
6.3.7	Diskussion .....	100

<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Fazit.....</b>	<b>101</b>
<b>8</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>104</b>
<b>9</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>116</b>
<b>10</b>	<b>Publikationen.....</b>	<b>121</b>

## Verwendete Abkürzungen und Formelzeichen

Abkürzungen:

Abkürzung	Bedeutung
ADFP	Automated Dry Fiber Placement
ADS	Automation Device Specification
BMC	Bulk Moulding Compound
CF	Kohlenstofffaser
CFK	Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
CT	Computer Tomographie
FDM	Fused Deposition Modeling
FKV	Faserkunststoffverbunde
FSM	Finite State Machine
GUI	Graphical User Interface
LCM	Flüssigimprägnierverfahren (Liquid Composite Molding)
LS-I	Legesystem-I
PLA	Poly lactide
POM	Polyoxymethylen
PU	Polyurethan
PVC	Porosity Volume Content
RTM	Resin Transfer Molding
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
SMC	Sheet Moulding Compound
VARI	Vacuum Assisted Resin Infusion
VAP	Vacuum Assisted Process
VARTM	Vacuum Assisted Resin Transfer Molding

Formelzeichen:

Zeichen	Einheit	Bedeutung
$FVG$	%	Faservolumengehalt
$n$	-	Anzahl
$\varphi_f$	$\text{g/m}^2$	Faser Flächengewicht
$\varphi_b$	$\text{g/m}^2$	Binder Flächengewicht
$d$	mm	Kavitätshöhe
$\rho_f$	$\text{g/cm}^3$	Dichte Faser
$\rho_b$	$\text{g/cm}^3$	Dichte Binder
$Q$	$\text{m}^3/\text{s}$	Volumenstrom
$\kappa$	m/s	Durchlässigkeitsbeiwert
$A$	$\text{m}^2$	Fläche
$L$	m	Länge
$u_i$	J	Hydraulisches Potential
$p_i$	Pa	Druck
$g$	$\text{m/s}^2$	Erdbeschleunigung
$h_i$	m	Höhe
$K, k_i$	$\text{m}^2$	Permeabilität
$\eta$	Pas	Viskosität
$\tau$	$\text{N/m}^2$	Schubspannung
$\dot{\gamma}$	1/s	Schergeschwindigkeit
$\gamma^p$	$\text{mN/m}$	Polare Oberflächenspannung
$\gamma^d$	$\text{mN/m}$	Disperse Oberflächenspannung
$\gamma$	$\text{mN/m}$	Kumulative Oberflächenspannung
$\lambda$	m	Wellenlänge
$c$	m/s	Schallgeschwindigkeit

$f$	1/s	Frequenz
$F$	N	Kraft
$\beta$	°	Winkel
$\alpha$	-	Anisotropie
$k^*$	-	Permeabilitätsabschwächung
$k_{\parallel}$	m <sup>2</sup>	Parallelpermeabilität
$k_{\perp}$	m <sup>2</sup>	Serienpermeabilität

---

# 1 Einleitung und Zielsetzung

## 1.1 Motivation und Hintergrund

Angesichts dramatischer Vorhersagen bezüglich der Entwicklung unseres Weltklimas ist es notwendiger denn je, die Energie- und Ressourceneffizienz zu steigern. Eine zentrale Rolle spielen hierbei Innovationen, welche den Transport- und Individualverkehr betreffen. Sowohl der Energieeinsatz bei der Produktion dieser Güter als auch im Betrieb müssen daher drastisch reduziert werden [1].

Einen Beitrag um dieses Ziel zu erreichen, liefern dabei, die ständig unter Weiterentwicklung stehenden, Faserkunststoffverbunde (FKV) und im speziellen die kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffe (CFK), welche das höchste Potenzial in Bezug auf Leichtbau bieten. Besonders ansehnliche Beispiele finden sich etwa in den aktuellen Flugzeugen von Airbus, mit dem A380 und dem A400M, welche einen CFK Gewichtsanteil von ca. 28% und 30% aufweisen, sowie in der Boeing 787 welche einen von ca. 50% aufweist. Welche Rolle der Gewichtsersparnis in der Passagierflugzeugindustrie zukommt soll folgendes Zahlenspiel verdeutlichen; so sinkt etwa der Kraftstoffverbrauch über die Lebensdauer eines Flugzeuges um ca. *3 Mio. Liter je 1000 kg* eingespartem Gewicht [2].

Die FKV-Verarbeitung in der Flugzeugindustrie kann grob in zwei Hauptkategorien unterteilt werden:

1. Pre-preg Verfahren, welche auf der Verarbeitung von bereits mit einem duromeren Harzsystem imprägnierten textilen Strukturen, basieren. Diese werden dabei auf ein meist offenes Werkzeug aufgebracht und nach etwaigen Umformprozessen, mittels eines Vakuumsacks versiegelt, ehe sie in einem Autoklav, unter der Einwirkung von Druck und Temperatur chemisch vernetzen.
2. Flüssigimprägnierverfahren welche sich dadurch auszeichnen, dass trockene Faserverstärkungsstrukturen mit einem duromeren Harzsystem, nach der Formgebung imprägniert werden. Dazu werden sie in den meisten Fällen in ein geschlossenes Werkzeug eingelegt, oder auf ein offenes Werkzeug aufgelegt, welches anschließend mit einem Vakuumaufbau

versiegelt wird. Die Imprägnierung erfolgt im Anschluss, mittels Aufbringung von Druck oder Anlegen eines Vakuums, wodurch ein niedrigviskoses Harzsystem die trockene Struktur füllt.

Pre-preg Verfahren bieten einige Vorteile, welche meist auf die zu erreichende Bauteilqualität zurückzuführen sind. Diese rühren daher, da die verarbeiteten Verstärkungsstrukturen bereits mit einer Matrix, zumeist duromeren Einkomponentenharz getränkt sind. Zum einen führt das dazu, dass die Fasern wesentlich stabiler liegen und es zu geringeren Winkelabweichungen dieser im fertigen Bauteil kommt. Zum anderen werden hochviskose Harzsysteme verwendet, welche speziell in Bezug auf Schlagzähigkeit von Vorteil sind. Diese Kombination aus Winkeltreue und Matrixeigenschaften schaffen die Basis zur Herstellung von Hochleistungs-FKV. Abschließend wird ein Zyklus in einem Autoklav gefahren, welcher unter der Einwirkung von Druck sowie Vakuum, Temperatur und Zeit zur Vernetzung der Matrix im Bauteil führen. Diese Art der Bauteilherstellung bietet nur geringes Potenzial zur kostengünstigen Automatisierung, da viele Arbeitsschritte von manuellen Arbeiten abhängen. Des Weiteren bestehen enge Grenzen, in Bezug auf die Materialkosten sowie die Skalierbarkeit, wodurch die Herstellkosten insgesamt sehr hoch sind [3–6].

Flüssigimprägnierverfahren (LCM) auf der anderen Seite bieten hohes Potenzial zur Automatisierung von Verarbeitungsprozessen, wodurch die eingesetzten Mannstunden je produzierter Einheit gesenkt werden können und Kosten reduziert werden. Um diese Vorteile nutzen zu können müssen jedoch wesentlich komplexere Prozesse verstanden und kontrolliert werden. Eine Zusammenstellung der wichtigsten Einflussparameter auf einen LCM-Prozess ist Abb. 1 zu entnehmen. Die vorhandenen Wechselwirkungen sind Inhalt vieler fortlaufender wissenschaftlicher Projekte und werden auch in dieser Arbeit behandelt. Handling-Aufgaben mit trockenen textilen Strukturen gestalten sich wesentlich schwieriger und führen zu höheren Abweichungen der Faserwinkel. Harzsysteme müssen niederviskos sein, um die Tränkung der porösen Struktur zu gewährleisten, während dadurch auf Eigenschaften wie Schlagzähmodifikation verzichtet werden muss [3–6].

Bindertechnologien versprechen hier Abhilfe zu leisten, indem sie die eben genannten Felder adressieren. Zum einen kann die Stabilität der trockenen

Verstärkungsstruktur und in Folge jene der Preform signifikant erhöht werden. Dadurch lässt sich die Integrität der Faserstruktur schützen und Handling-Aufgaben werden vereinfacht. Zum anderen können niederviskose Harzsysteme herangezogen werden, welche eine vollständige Formfüllung gewährleisten. Diese können durch den verwendeten Binder in der Preform, nach der Füllung und einem entsprechenden Temperaturzyklus, modifiziert werden [3].

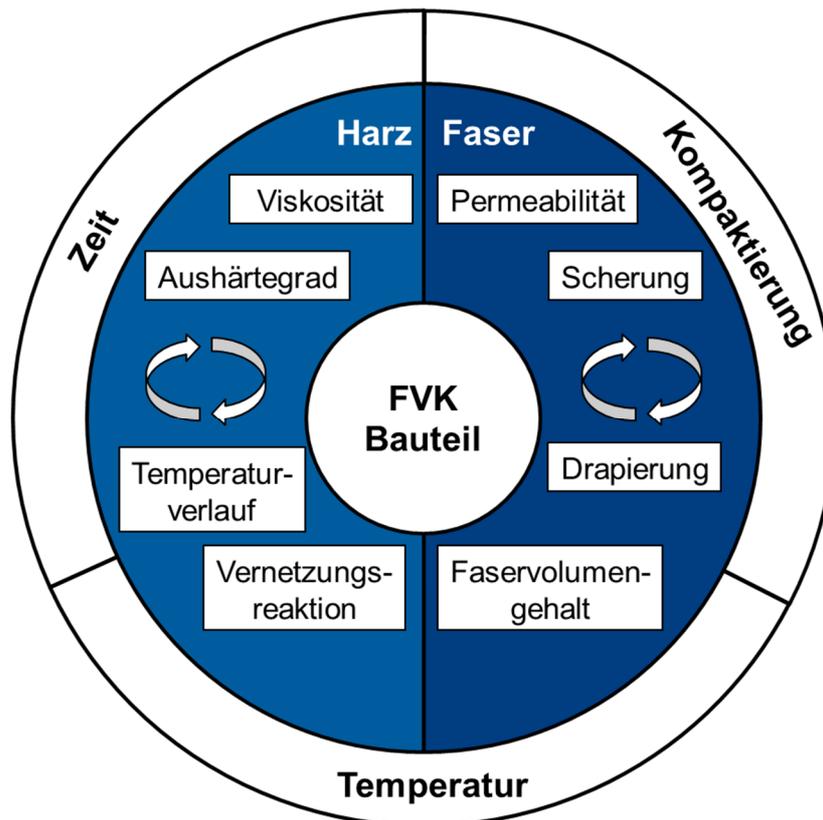


Abb. 1: Abhängigkeiten eines FVK-Prozesses basierend auf Flüssigimprägnierung.

## 1.2 Ziele der Arbeit und methodischer Ansatz

Einige der Herausforderungen und Defizite, in Bezug auf die Verarbeitung mittels LCM-Verfahren wurden bereits im vorangegangenen Abschnitt angeschnitten. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit ausgewählten Teilaspekten, dieser komplexen Zusammenhänge, welche in Verbindung mit dem Binder stehen. Diese sind Hilfsstoffe zur Fertigung von FVK-Bauteilen und wirken an mehreren Stellen entlang der Prozesskette, wie aus Abb. 2 zu entnehmen ist. Die Wirkung des Binders beruht im Wesentlichen auf zwei Prinzipien. Einerseits spielen Einflussfaktoren, basierend auf chemischen Vorgängen eine Rolle, wie z.B.

Harz/Binder-Kompatibilität, Lösungsverhalten, Beeinflussung der Netzwerkbildung während der Aushärtung bis zu den erzielbaren mechanischen Eigenschaften im Bauteil. Andererseits können auch mechanisch-physikalische Faktoren dominieren, wie die Binderpartikelgröße und deren Position. Diese Eigenschaften werden bereits sehr früh in der Prozesskette festgelegt, haben aber sehr großen Einfluss auf die Verarbeitbarkeit.

Eine besondere Rolle spielt die Auswirkung des Binders auf das Füllverhalten. Zum einen lassen sich durch die gezielte Einbringung von Binder spezielle Fülleigenschaften einstellen und zum anderen wirkt der Binder ebenso auf das Fließverhalten bei homogener Verteilung desselben.

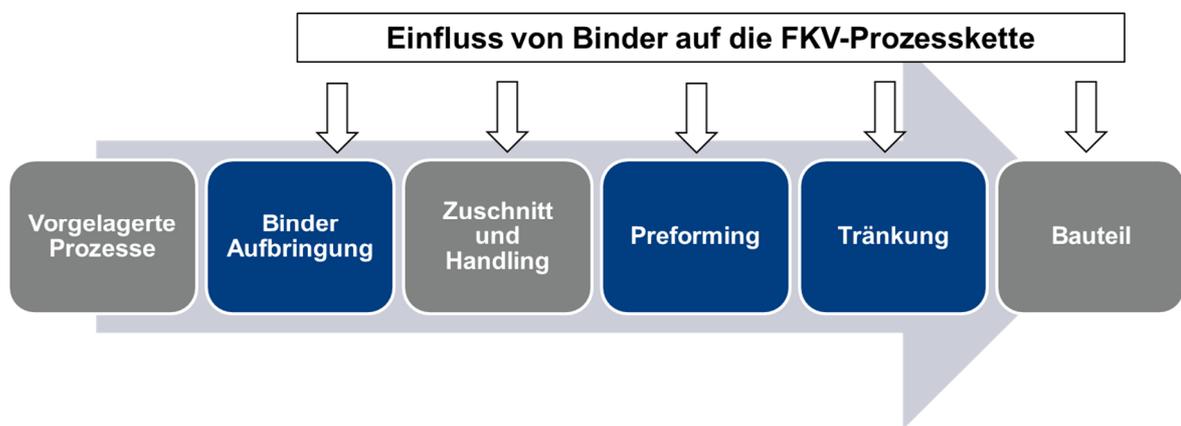


Abb. 2: Prozesskette eines LCM-Prozesses zur Herstellung eines FKV-Bauteils.

Die vorliegende Arbeit betrachtet ausgewählte Anwendungsbeispiele, für den Einsatz von Binder und dessen Wirkungsweise auf das Füllverhalten. Dazu orientiert sich der Aufbau an der LCM-Prozesskette, wobei der Fokus auf der Preformherstellung und der anschließenden Formfüllung liegen.

Es sollen exemplarisch Preforming-Verfahren aus verschiedenen Kategorien der LCM-Prozesskette vorgestellt werden, wie sie in Abb. 3 dargestellt werden. Der Fokus liegt dabei auf innovativen Methoden wie z.B. ADFP [7] und FDM-Textilmanipulation [8]. Diese Methoden zur Binder-Preform Herstellung stammen aus den Kategorien „Direkte und Sequentielle Preformherstellung“ und unterscheiden sich naturgemäß stark voneinander. Ein Ziel dieser Arbeit ist es deren Aufbau, Funktion und mögliche Einsatzgebiete zu erläutern, sowie diese in Relation zu den gängigen Methoden wie der Pulvertechnik zu setzen.

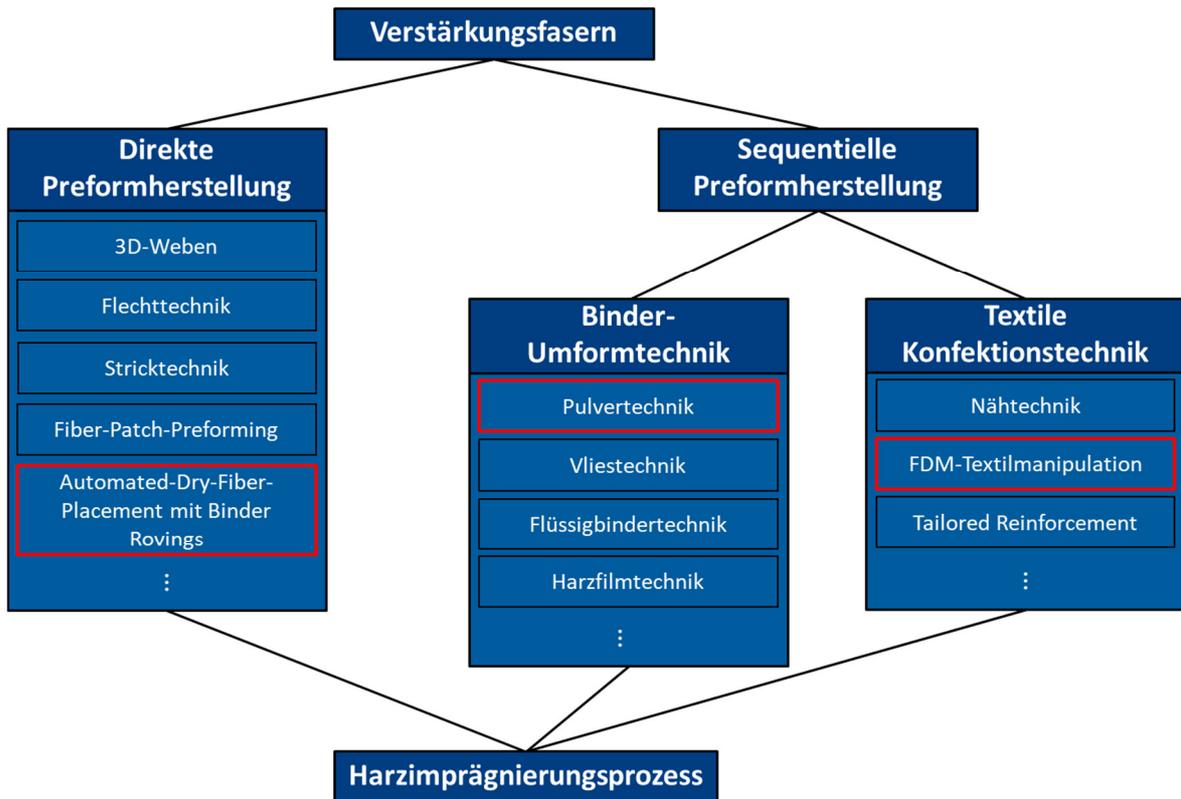


Abb. 3: Preforming-Verfahren zur Herstellung von FKV-Preforms sowie die Auswahl an vorgestellten Techniken für die vorliegende Arbeit.

Des Weiteren werden die Auswirkungen der eingesetzten Preforming-Verfahren, auf deren spätere Imprägnierung, untersucht. Dazu werden unterschiedliche Charakterisierungsmethoden herangezogen, um die Qualität der Füllung zu bestimmen und das Füllverhalten zu quantifizieren. Zur Bestimmung der Qualität der Füllung kommen nichtzerstörende Prüfmethode, wie Blitzlichtthermographie, Computertomographie und Ultraschallverfahren, zum Einsatz. Um das Füllverhalten zu quantifizieren werden verschiedenartige Permeabilitätsversuche durchgeführt. Eine wesentliche Rolle spielen dabei die eingestellten Umgebungsparameter. Während normalerweise die Permeabilität von Textilien bei Raumtemperatur mit einem Ersatzfluid bestimmt wird, werden in dieser Arbeit Prozessähnliche Bedingungen geschaffen. Ziel ist es die Einflussparameter und Wechselwirkungen, welche der Binder induziert zu identifizieren und zu quantifizieren.

## 2 Grundlagen

### 2.1 Binder

Während der Faserproduktion werden vom Hersteller chemische Substanzen, bekannt als Schlichte auf die Faser aufgebracht. Sie soll bestmögliche Anbindung, zwischen der Faser und der Matrix, gewährleisten. Des Weiteren sorgt sie für den inneren Zusammenhalt im Faserbündel, durch Vergrößerung der Reibung zwischen den einzelnen Filamenten. Sie kann daher im weitesten Sinn auch als Haftvermittler oder Binder betrachtet werden [9].

Binder sind im Allgemeinen chemische Additive, welche auf technische Textilien aufgebracht werden um diese in sich zu stabilisieren und mehrere Lagen in Relation zueinander zu fixieren. Meist werden Pulverbinder in thermoplastische oder duromerer Form verwendet. Andere Formen der Binderapplikation sind die Aufbringung von Fasermatten, Einbringung von Hybridgarn sowie exotischere Varianten wie z.B. Chemical Sticking [10, 11].

Im Bereich der Pulverbinder werden meist Binder basierend auf Epoxid eingesetzt. Sie werden dann in der Regel ohne Härter aufgebracht und sind besonders langkettig, wodurch die Viskosität selbst bei hohen Temperaturen vergleichsweise hoch ist. Sie erlangen dadurch einen thermoplastischen Charakter, bei gleichzeitig bester Löslichkeit im Matrixharzsystem. Zur Applikation des Pulverbinders werden gängige Verteilungstechnologien, basierend auf Siebtechnik bzw. elektrostatischer Aufladung angewandt [12]. Im Anschluss an die Aufbringung wird der Binder thermisch aktiviert, mittels Durchlauföfen oder Infrarotheizstrecke. Durch das Schmelzen des Binders verbindet sich dieser mit dem darunterliegenden Textil. Alternativ kann der Binder auch gelöst werden und mittels Sprühapplikation aufgebracht werden. Das Textil muss in diesem Fall trocknen, damit das Lösungsmittel verdunsten kann.

Im Fall der Fasermatten werden meist thermoplastische Wierfasermatten mit niedrigem Flächengewicht ( $6 - 24 \text{ g/m}^2$ ) als Binder verwendet. Die Wierfasermatten stellen für sich bereits ein textiles Halbzeug dar und werden üblicher Weise interlaminar, zwischen technischen Textilien, positioniert. Anschließend wird die

Preform thermisch aktiviert und meist umgeformt. Das Resultat ist eine relativ steife Preform [6].

Ähnlich den Fasermatten ist das Hotmelt-Sprühbinder Verfahren, wie in Abb. 4 dargestellt. Hierbei wird der thermoplastische Binder in Form eines Schmelzestrangs direkt auf das Textil appliziert. Dadurch, dass das technische Textil wesentlich kühler ist friert der applizierte Binder ein und haftet an diesem an. Diese Technik eignet sich allerdings nur für geringe Flächengewichte, da Probleme mit der Anhaftung des Binders auftreten können. Des Weiteren stellt die gleichmäßige Verteilung des Binders ein nicht zu vernachlässigendes Problem dar [13].

Schlussendlich ist noch die Technik des sogenannten Comingling, also der Verwendung von Hybrid-Garn zu erwähnen. Hierbei wird ein thermoplastisches Garn mit beispielsweise einem CF Garn zusammengeführt um in weiterer Folge in der Textilproduktion eingesetzt zu werden. Prinzipiell können alle gängigen Textiltypen mit diesem Hybrid Garn hergestellt werden, wobei in Abb. 4 ein Gewebe mit klassischer 2/2-Köperbindung dargestellt wird [6, 14].

## 2.2 Preforming

Als Preform wird eine trockene textile Struktur bezeichnet, welche aus mindestens einer Lage besteht und nach dem Preforming-Prozess einer Imprägnierung, mit einer Matrix, unterzogen wird. Die Geometrie der Verstärkungsstruktur weist bereits endkonturnahe Form auf. Prinzipiell wird zwischen direktem und sequentielltem Preforming unterschieden, wie in Abb. 3 dargestellt. Es wird exemplarisch je eine Technik aus einer Kategorie vorgestellt, welche im Zuge der Untersuchungen, eingesetzt wurden [6].

Direkte Verfahren sind Fertigungsprozesse welche durch einen einstufigen Prozess zu einer in der Regel dreidimensionalen Preform in Integralbauweise führen. Sowohl der Faservolumengehalt als auch die zu erreichende geometrische Komplexität der Preform hängen stark von dem verwendeten Verfahren ab [6].

Sequentielle Verfahren nach Differenzialbauweise werden in zwei Varianten unterteilt. Jene basierend auf Binder-Umformtechnik fixieren die Lagen, der endkonturnahen Preform relativ zueinander, durch den Einsatz von Binder (Abb. 4).

Des Weiteren kann der Binder ebenfalls zur Strukturfixierung eingesetzt werden, wodurch hohe Winkeltreue zu erreichen ist. Wesentlich bei diesen Verfahren ist, dass der Binder und die später eingesetzte Polymermatrix, für die Imprägnierung aufeinander abgestimmt sind. Die Binder-Applikation kann sowohl in fester sowie in flüssiger Form erfolgen. Eine weitere Möglichkeit ist den Binder bereits direkt im Textil-Herstellungsprozess, in Form von Filamenten auf- bzw. einzubringen [6].

Konventionelle Verfahren zur Textilkonfektionierung stellen die zweite Variante sequenzieller Preformherstellung dar. Sie sind bereits seit den 80er Jahren bekannt und werden kontinuierlich weiterentwickelt. Zur Herstellung von einfachen Geometrien kommt die sogenannte Cut-and-Sew-Technik zum Einsatz, während für komplexere Geometrien Weiterentwicklungen auf dem Gebiet der Strick- und Nähtechnik zum Einsatz kommen. Der Vorteil dieser Techniken liegt in den deutlich verbesserten Eigenschaften in Bezug auf Delamination und Impactverhalten [6].

In der vorliegenden Arbeit werden ausgewählte Techniken des Preforming vorgestellt und deren besondere Merkmale herausgearbeitet. Zum einen, werden die Techniken beschrieben um deren idealen Einsatzbereich abzustecken. Zum anderen, werden die Einflüsse auf den nachfolgenden Prozessschritt der Imprägnierung erläutert.



Abb. 4: Bebinderte Textilien von links nach rechts: Pulver bebindert, eigewobener Binder mittels Comingling und Hotmelt-Sprühbinder.

### 2.2.1 Sequentielle Preformherstellung mittels bebindeter Textilien

Bei der sequentiellen Preformherstellung werden meist mehrere Prozessschritte benötigt, um die endkonturnahe Geometrie der produzierten Preform zu erreichen. Üblicher Weise werden flächige Textilien eingesetzt, welche bereits mit einem Binder versehen sind [15–17]. Es kommen sowohl thermoplastische als auch

duromere Binder zum Einsatz und können in unterschiedlichen Formen vorliegen, wie bereits in Abschnitt 2.1 erläutert wurde.

Meist flächige Halbzeuge, wie z.B. Gewebe oder Gelege werden nach der textilen Konfektionierung und Komplettierung des gewünschten Lagenaufbaus mit Druck und unter Einwirkung von Hitze behandelt, so dass der eingebrachte Binder aktiviert wird. Nach der Abkühlung des Lagenaufbaus ist eine leichter handhabbare Preform entstanden [18, 19].

Durch Variation des Binders, dessen Flächengewichtsanteil, sowie Prozessparameter beim Preforming, lassen sich unterschiedliche Eigenschaften einstellen. Zum Beispiel wurde festgestellt, dass sich durch gezielte Vorvernetzung des Binders die geometrischen Ausmaße der Preform sehr gut kontrollieren lassen [16]. Wurde der Binder vor seiner Applikation auf das Textil gelöst konnten sogar noch bessere Ergebnisse in Bezug auf die Springback-Control erreicht werden. Generell kann gesagt werden, dass die Binder Position in der Preform großen Einfluss auf deren spätere Imprägniereigenschaften hat [15]. Befindet sich z.B. der Binder vorwiegend zwischen den textilen Lagen werden höhere Injektionsdrücke bei der Füllung notwendig. Gleichzeitig kann dadurch niedrigere Porosität im fertigen Bauteil erreicht werden. Weitere Untersuchungen konzentrierten sich auf den mechanischen Einfluss des Binders, auf das finale Bauteil, während aktuell neuartige Möglichkeiten des Binderauftrags untersucht werden [19, 20].

Eine derartige Entwicklung stellt beispielsweise das sogenannte Chemical Stitching dar. Hierbei werden vertikale „Harzstifte“ in einen Lagenaufbau mittels Injektionsnadel eingebracht, welche diese miteinander verbinden. Diese Stifte haben geringe Durchmesser in mesoskaliger Größenordnung und fixieren aufgrund ihrer Anzahl die textile Struktur im Bereich auf Makroebene [21, 22]. In der weiterentwickelten Variante wird 3D-Druck Technologie eingesetzt um diese Art der Fixierungspunkte einzubringen [11].

### **2.2.2 Direkte Preformherstellung mit Automated Dry Fiber Placement**

Im Gegensatz zur sequentiellen Herstellung von Preforms wird beim direkten Verfahren mittels ADFP ein Roving mit Binderanteil als Ausgangsmaterial genutzt. Es können somit lastgerechte Preforms hergestellt werden. Das Prinzip entstammt

der Technologie des Tapelegens und wird unter verschiedenen Bezeichnungen wie z.B. „Tow Placement“, „Fiber Placement“ oder „Dry Fiber Placement“ als auch „Automated Dry Fiber Placement“ (ADFP) geführt [23–29].

Für den ADFP kann prinzipiell sehr ähnliche Anlagentechnik wie beim Legen von Prepreg Tapes verwendet werden. Der Binderroving wird hierbei von einer Materialrolle abespult und dem Legesystem zugeführt. Die Abwickleinheit ist dahingehend ausgelegt, das Material möglichst schonend von der Materialrolle zu holen. Die Zuführung erfüllt den Zweck das Material mittig zu führen ohne es dabei zu deformieren. Anschließend wird der Roving durch den Kopf geführt, in welchem er nahe dem Legepfadende konfektioniert wird. Ein ADFP Legesystem kann bis zu drei verschiedene Heizungen beinhalten, nämlich für die Heizung des einlaufenden Materials, zum Durchwärmen des Substrates mittels eines beheizten Werkzeuges und zur oberflächigen Erwärmung der obersten Substratschicht. Aufgrund des niedrigen Wärmebedarfs zur Verflüssigung des Binders können günstige Infrarotstrahler für das einlaufende Material und das oberflächige Substrat verwendet werden. Der aus dem Legesystem geführte Binderroving wird nach der lokalen Wärmeeinbringung mittels einer flexiblen Andrückrolle auf das Werkzeug oder auf bereits abgelegtes Substrat aufgebracht.

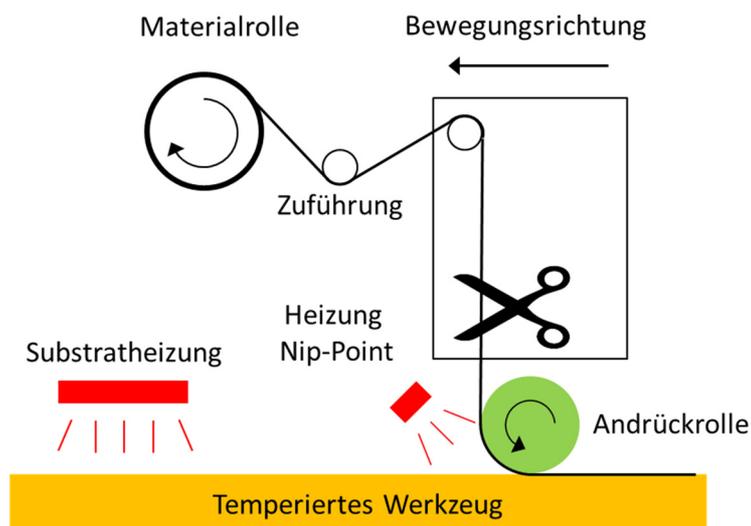


Abb. 5: Schematische Darstellung eines ADFP Kopfes.

Im Gegensatz zur sequenziellen Preformherstellung mittels flächiger textiler Halbzeuge wie z.B. Gewebe oder Gelege, produziert ADFP nur geringe Mengen an

Verschnitt, da bereits präzise und endkonturnahe abgelegt wird. Neben der Fertigung ganzer Preforms ist es ebenfalls möglich flächige Preforms mittels ADFP lokal zu verstärken [7, 30].

### 2.3 Faservolumengehalt vs. Volumengehalt

Faserkunststoffverbunde erhalten ihre maßgeblichen Eigenschaften durch die verwendete Faser, deren Orientierung im strukturellen Aufbau und nicht zuletzt durch das verwendete Matrixmaterial [3, 4, 6]. Der Faservolumengehalt, also das Verhältnis zwischen Faser zu Matrix spielt hierbei eine entscheidende Rolle. Bei der Flüssigimprägnierung von trockenen Faserstrukturen spielt er, bzw. die Porosität ebenfalls eine entscheidende Rolle da diese maßgeblich in die Berechnung der Permeabilität mit einfließt.

Im Fall von Faserkunststoffverbunden mit einem klassischen Lagenaufbau lässt sich der Faservolumengehalt  $FVG$  wie folgt definieren:

$$FVG = \frac{n * \varphi_f}{1000 * d * \rho_f} \quad (2.1)$$

wobei  $n$  die Lagenanzahl,  $\varphi_f$  das Faserflächengewicht,  $d$  die Kavitätshöhe und  $\rho_f$  die Faserdichte beschreiben. Im Fall der Verwendung von bebinderten Textilien, schematisch dargestellt in Abb. 6, muss man den gesamten Volumengehalt  $VG$  bestimmen, welcher neben dem Volumen der Faser auch das Volumen des eingesetzten Binders beinhaltet und wie folgt angeschrieben wird:

$$VG = \frac{n * (\varphi_f + \varphi_b)}{1000 * d * (\rho_f + \rho_b)} \quad (2.2)$$

wobei  $\varphi_b$  das Binderflächengewicht und  $\rho_b$  die Binderdichte als zusätzliche Größen eingeführt werden.

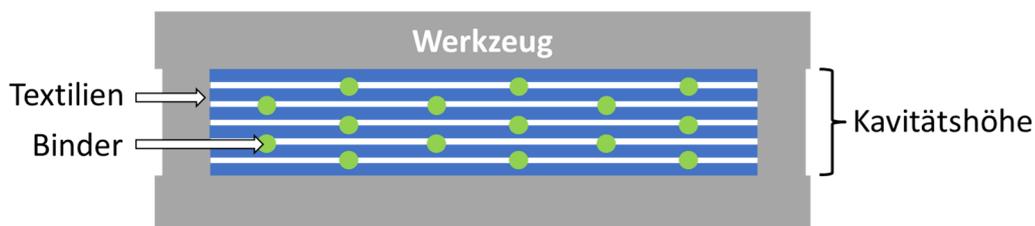


Abb. 6: Schematische Darstellung einer Preform in einem geschlossenem Werkzeug.

## 2.4 Kompaktierung

Das Kompaktierungsverhalten von Preforms liefert wertvolle Informationen für den nachfolgenden Imprägnierprozess. Das Verhalten der Preforms hängt maßgeblich von der textilen Architektur, der Kompaktierungsgeschwindigkeit, den inneren Reibwiderständen des Textils sowie von etwaig verwendeten Bindern ab [16, 31, 32]. Üblicher Weise werden Preforms auf ein gewünschtes Maß an Faservolumengehalt mit vorgegebener Geschwindigkeitsrampe kompaktiert, während die entsprechende Kraftkurve aufgezeichnet wird. Die Kompaktierung wird dann gehalten und die sich einstellende Kraftrelaxation beobachtet. Das in Abb. 7 dargestellte Setup weist eine Besonderheit auf, welche gewöhnlich nicht vorzufinden ist. Es besteht die Möglichkeit des Einsatzes eines beheizten Fluides in der topfförmigen Druckplatte, wodurch es möglich wird die Eigenschaften der Preform im imprägnierten Zustand zu untersuchen [33].

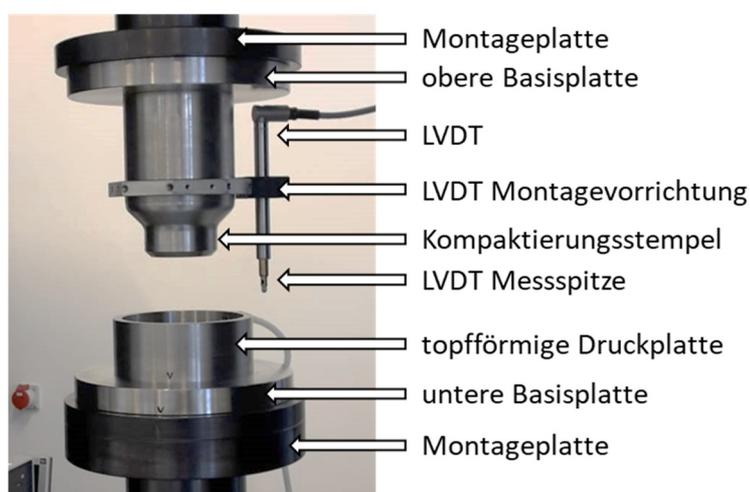


Abb. 7: Kompaktierungssetup des LVV an installiert an einer Zug- und Druckprüfmaschine [33].

## 2.5 Permeabilität von Preforms

Ein bekannter Ansatz zur Bestimmung der ebenen Permeabilität von technischen Textilien basiert auf der Beobachtung von radialen Strömungsversuchen, wie sie von Adams et al. [34–37] eingeführt wurden. Dabei wird die Strömungsfront des gesättigten Gewebes mittels spezieller Sensorik erfasst, wodurch ein Datensatz für jeden Zeitpunkt während des Experiments erstellt wird. Durch den Einsatz von Interpolations- bzw. Approximationsmethoden wird dann die Gesamtform der Strömungsfront in Form eines elliptischen geometrischen Modells rekonstruiert. Die Auswertung der Längen der Haupt- und Nebenachsen der Ellipse über die Dauer des Experiments lässt auf die Eigenschaften der Strömungsfront schließen [38].

Die Berechnung der Permeabilitätswerte in der Ebene aus diesen Eigenschaften folgt schließlich einem spezifischen mathematischen Algorithmus [39]. Adams und Rebenfeld [34] stellten einen Algorithmus vor, der auf einer iterativen numerischen Lösung für den Grad der Anisotropie basiert, d.h. dem Verhältnis der beiden wichtigsten ebenen Permeabilitätswerte. Chan und Hwang [40] beschrieben dagegen einen Ansatz, der eine Transformation des anisotropen Problems in ein äquivalentes isotropes System umformt. Dadurch vereinfacht sich die Differentialgleichung zweiter Ordnung zur Laplace-Gleichung [39, 41, 42], für die eine analytische Lösung existiert. Die resultierende isotrope Permeabilität wird schließlich wieder in die anisotrope Permeabilität umgewandelt. Alle diese Ansätze sind auf das Gesetz von Darcy zurückzuführen [38].

### 2.5.1 Gesetz von Darcy

Henry Darcy war ein französischer Ingenieur, welcher 1856 eine empirisch ermittelte Gesetzmäßigkeit hinsichtlich gesättigter Strömungen in porösen Medien veröffentlichte. Seine Erkenntnisse entstanden während des Baus einer Anlage zur Wassergewinnung für die Stadt Dijon [43]. Er beschrieb den Volumenstrom  $Q$  für den Fall der eindimensionalen Strömung durch ein poröses Medium

$$Q = \frac{\kappa A}{L} (u_1 - u_2) \quad (2.3)$$

wobei  $\kappa$  hierbei für den Durchlässigkeitsbeiwert steht, welcher als ein Maß für die hydraulische Leitfähigkeit gesehen werden kann. Er ist aber abhängig von der Dichte als auch von der Viskosität des Fluids.  $A$  beschreibt den Querschnitt des porösen Mediums,  $L$  die Länge desselben und  $u_1$  sowie  $u_2$  die vorherrschenden hydraulischen Potenziale am Anfang wie am Ende des Referenzlevels. Das hydraulische Potenzial setzt sich wiederum zusammen aus

$$u_i = \frac{p_i}{\rho g} + h_i \quad (2.4)$$

$p_i$  dem Flüssigkeitsdruck und der potenziellen Energie pro Gewichtseinheit  $\rho g h_i$ .

Wird nun Gleichung (2.4) in (2.3) eingesetzt ergibt das

$$Q = \frac{A \kappa}{L} \left( \frac{p_1 - p_2}{\rho g} + (h_1 - h_2) \right). \quad (2.5)$$

Substituiert man nun

$$\frac{h_1 - h_2}{L} = \cos \alpha \quad (2.6)$$

erhält man folgende Form

$$Q = A \kappa \left( \frac{p_1 - p_2}{L \rho g} + \cos \alpha \right), \quad (2.7)$$

welche im Spezialfall für  $\alpha = 0^\circ$  zu

$$Q = A \kappa \left( \frac{p_1 - p_2}{L \rho g} + 1 \right) \quad (2.8)$$

wird. Für den Fall, dass  $\alpha = 90^\circ$  erhält man

$$Q = A \kappa \left( \frac{p_1 - p_2}{L \rho g} \right). \quad (2.9)$$

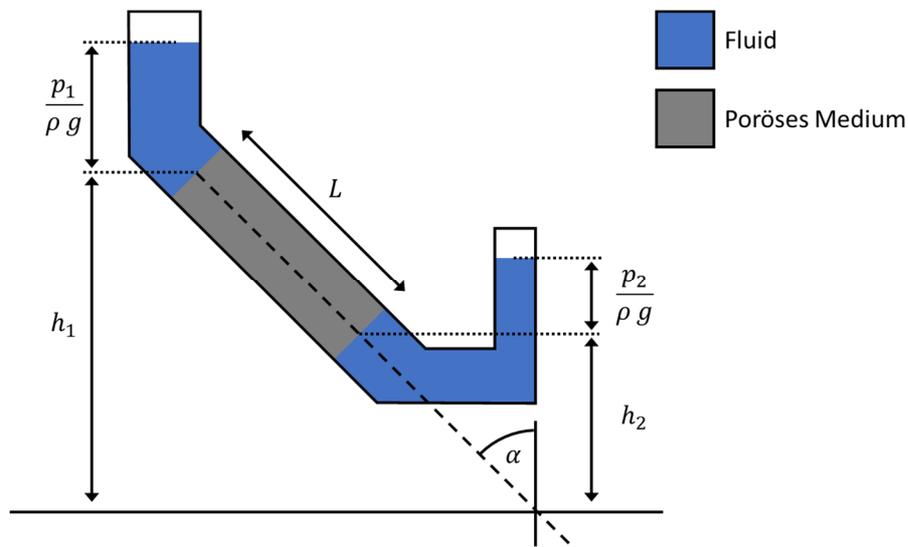


Abb. 8: Darstellung des hydraulischen Gradienten und seine wichtigsten Einflussparameter (nach [44] und [45]).

Wird nun der Durchlässigkeitsbeiwert  $\kappa$  von den bereits erwähnten Einflüssen befreit erhält man

$$\kappa = \frac{K \rho g}{\eta}. \quad (2.10)$$

Setzt man Gleichung (2.10) in (2.7) ein entsteht folgender Zusammenhang welcher bereits die Permeabilität  $K$  in 1-dimensionaler beinhaltet

$$Q = \frac{A K}{\eta} \left( \frac{p_1 - p_2}{L} + \rho g \cos \alpha \right). \quad (2.11)$$

Erweitert man diesen auf drei Dimensionen und ersetzt die Durchflussrate durch ihre vektorielle Definition

$$Q = \vec{v} A \vec{n} , \quad (2.12)$$

folgt die allgemeine Form für die Geschwindigkeit eines Fluides durch eine poröse Struktur für eine Druckströmung

$$\vec{v} = \frac{K}{\eta} (\nabla p + \rho \cdot \vec{g}) . \quad (2.13)$$

Eine Herleitung des Gesetzes von Darcy kann ebenfalls über eine spezielle Lösung der Navier-Stokes Gleichung erfolgen, welche in [44] und [45] gefunden werden kann.

In der vorliegenden Arbeit wird unter anderem die Permeabilität von Textilien bestimmt. Dies erfolgt mittels Prüfständen, auch genannt Permeameter, welche den Fließfrontfortschritt bei vorgegebenem Druck messen. Des Weiteren fällt im Fall der ebenen Permeabilität der Höhenunterschied weg wodurch sich Gleichung (2.13) zu

$$\vec{v} = \frac{K}{\eta} \nabla p \quad (2.14)$$

vereinfacht. Unter Berücksichtigung der Kontinuitätsgleichung

$$\nabla \vec{v} = 0 , \quad (2.15)$$

entsteht die allgemeine Darstellung

$$\nabla(K \nabla p) = 0 . \quad (2.16)$$

### 2.5.2 Anisotrope Permeabilität

Beinahe alle technischen Textilien weisen, aufgrund ihres Aufbaus, anisotrope Eigenschaften hinsichtlich Permeabilität auf. Manche dieser Textilien wie z.B.

Gewebe oder Multiaxialgelege führen zwar mehrere Orientierungswinkel pro Lage ein, können dadurch aber trotzdem nur quasiisotrope Eigenschaften herbeiführen. Im Allgemeinen wird die Permeabilität durch einen Tensor repräsentiert, welcher das anisotrope Fließverhalten eines orthotropen Materials beschreibt

$$K = \begin{pmatrix} k_1 & 0 & 0 \\ 0 & k_2 & 0 \\ 0 & 0 & k_3 \end{pmatrix} \quad (2.17)$$

und die Orientierung entlang der Hauptrichtungen aufweist. Im Fall, dass die Orientierungen der Hauptachsen des Materials nicht mit denen der Fließfront übereinstimmen stellt sich der Permeabilitätstensor folgendermaßen dar,

$$K' = \begin{pmatrix} k_{xx} & k_{xy} & k_{xz} \\ k_{yx} & k_{yy} & k_{yz} \\ k_{zx} & k_{zx} & k_{zz} \end{pmatrix} = T^{-1} \begin{pmatrix} k_1 & 0 & 0 \\ 0 & k_2 & 0 \\ 0 & 0 & k_3 \end{pmatrix} T \quad (2.18)$$

wobei für die Transformation der Winkel  $\alpha$  zwischen den Hauptachsen bekannt sein muss. Dieser ist notwendig um die Transformationsmatrix  $T$  und dessen Inverse  $T^{-1}$  zu bestimmen. Im Folgenden wird der zweidimensionale Fall dargestellt von  $T$  und  $T^{-1}$  dargestellt.

$$T = \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix}, T^{-1} = \begin{pmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \quad (2.19)$$

Setzt man diese in Gleichung (2.18) ein erhält man:

$$\begin{aligned} K' &= \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} k_1 & 0 \\ 0 & k_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} k_1 \cos^2 \alpha + k_2 \sin^2 \alpha & (k_2 - k_1) \sin \alpha \cos \alpha \\ (k_2 - k_1) \sin \alpha \cos \alpha & k_1 \sin^2 \alpha + k_2 \cos^2 \alpha \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_{xx} & k_{xy} \\ k_{yx} & k_{yy} \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (2.20)$$

Umgekehrt lässt sich der Vorgang natürlich auch wie folgt darstellen.

$$\begin{aligned}
 K &= TK'T^{-1} \\
 K &= \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} k_{xx} & k_{xy} \\ k_{yx} & k_{yy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} = \\
 &= \begin{pmatrix} k_{xx} \cos^2 \alpha - k_{xy} \sin \alpha \cos \alpha + k_{yy} \sin^2 \alpha & (k_{xx} - k_{yy}) \sin \alpha \cos \alpha + k_{yx} (\cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha) \\ (k_{xx} - k_{yy}) \sin \alpha \cos \alpha + k_{xy} (\cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha) & k_{xx} \cos^2 \alpha - k_{xy} \sin \alpha \cos \alpha + k_{yy} \sin^2 \alpha \end{pmatrix} \\
 &= \begin{pmatrix} k_1 & 0 \\ 0 & k_2 \end{pmatrix}. \tag{2.21}
 \end{aligned}$$

### 2.5.3 Optische Permeabilitätsbestimmung in der Ebene

Bei der optischen Permeabilitätsbestimmung in der Ebene arbeitet man im Allgemeinen mit zumindest einer transparenten Werkzeughälfte. Diese ermöglicht die Einsicht auf den Tränkungsvorgang während des Experiments. Hierbei wird eine Kamera zur Aufzeichnung des Fließfrontfortschritts verwendet. Durch den Einsatz optischer Bildverarbeitungsmethoden wird der Fließfrontfortschritt quantifizierbar. Die Permeabilitätsbestimmung nach diesem Grundprinzip ist unabhängig von der Art des durchgeführten Experiments (1D, 2D) [46, 47]. Es folgt eine Beschreibung des optischen 2D Permeameters des Lehrstuhls für Verarbeitung von Verbundwerkstoffen (siehe Abb. 9).

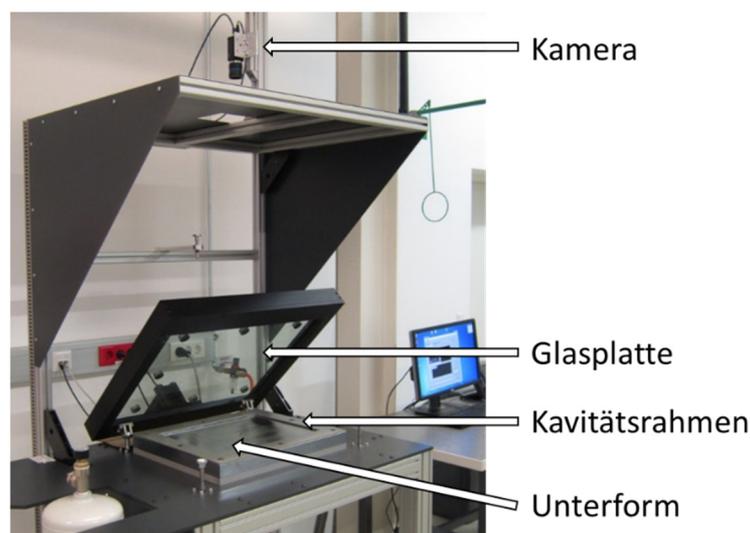


Abb. 9: Optisches Permeameter zur Bestimmung der ebenen Permeabilität am Lehrstuhl für Verarbeitung von Verbundwerkstoffen [38, 49].

Der Rahmen des Prüfstandes besteht aus Standard-Aluminiumprofilen. Auf dem Arbeitstisch ist die Edelstahlformhälfte montiert. Eine Verbundglasplatte bildet die obere Formhälfte und besteht ihrerseits aus zwei Glasplatten von je  $19\text{ mm}$  Dicke, die durch eine  $0,76\text{ mm}$  dünne Polymerfolie verbunden sind. Die Glasplatte wird mittels eines Stahlrahmens verstärkt. Der eigentliche Kavitätshohlraum wird durch den Kavitätsrahmen von  $300 \times 400\text{mm}$  und unterschiedlichen zur Verfügung stehenden Dicken eingestellt. Nach dem Einbringen der Verstärkungsstrukturen in die Kavität wird die Form geschlossen, indem die Glasplatte in eine horizontale Position gebracht wird. Anschließend wird die Glasplatte mit der unteren Formhälfte und dem Spannrahmen verschraubt. Das radiale Füllexperiment wird im Anschluss durchgeführt, indem die Testflüssigkeit durch einen zentralen Einspritzpunkt in der metallischen Unterformhälfte in Kavität eingespritzt wird. In einem Abstand von ca.  $1,5\text{ m}$  über der Form ist ein Kamerasystem bestehend aus einer industriellen Monochrom-Kamera und einem Präzisionsobjektiv mit einer Brennweite von  $16\text{ mm}$  montiert. Mit der Kamera wird eine Bildfolge während des Radialfließversuchs mit einer Erfassungsrate von bis zu  $50\text{ Bildern/s}$  bei einer Auflösung von  $1392 \times 1040\text{ Pixeln}$  aufgenommen. Um den zeitlichen Verlauf der Fließfront zu bestimmen, werden die Sequenzbilder mittels eines speziell für diese Anwendung entwickelten digitalen Bildverarbeitungsalgorithmus ausgewertet. Der Algorithmus führt zu einem elliptischen Geometriemodell. Auf diese Weise wird der Fortschritt schließlich in Bezug auf die Haupt- und Nebenachsen erreicht [38, 49].

#### **2.5.4 Kapazitive Permeabilitätsbestimmung in der Ebene**

Das von der PMB Präzisionsmaschinenbau Bobertag GmbH entwickelte und gefertigte kapazitive Messsystem besteht aus zwei  $150\text{ mm}$  dicken Formhälften, die an einer hydraulischen Presse oder einem Formträger montiert werden und die resultierende Last aus Kompaktierung sowie Injektionsdruck aufnehmen. Acht lineare kapazitive Sensoren sind in der unteren Formhälfte (Abb. 10) sternförmig um den zentralen Einspritzpunkt eingebettet, während die Testflüssigkeit durch eine zentrale Einspritzöffnung in der oberen Formhälfte eingeleitet wird. Zusätzlich ist ein Drucksensor eingebettet, um den aktuellen Injektionsdruck aufzuzeichnen. Die Sensoren sind entsprechend der Himmelsrichtungen (Norden, Nord-Ost, Osten, Süd-Ost, Süden, Süd-West, Westen und Nord-West) angeordnet. In Summe sind

zwei längere Sensoren von  $185\text{ mm}$  (Ost- und Westsensoren) und sechs kürzere Sensoren von  $105\text{ mm}$  vorhanden. Die Sensoren erfassen die Änderung des kapazitiven Äquivalents, welche die dielektrischen Eigenschaften des Materials repräsentierten. Nach der vollständigen Bedeckung der Sensoren kann so auf den örtlichen Verlauf während des Experiments rückgerechnet werden, da die Position der Fließfront linear mit dem Grad der Sensorbedeckung gekoppelt ist. Die Methodik wurde vom Institut für Verbundwerkstoffe GmbH entwickelt und patentiert [48]. Die Anwendung von Interpolations- bzw. Approximationsalgorithmen auf den Datensatz von acht Sensorwerten ermöglicht die Rekonstruktion eines elliptischen Geometriemodells, das die Form der Fließfront beschreibt.

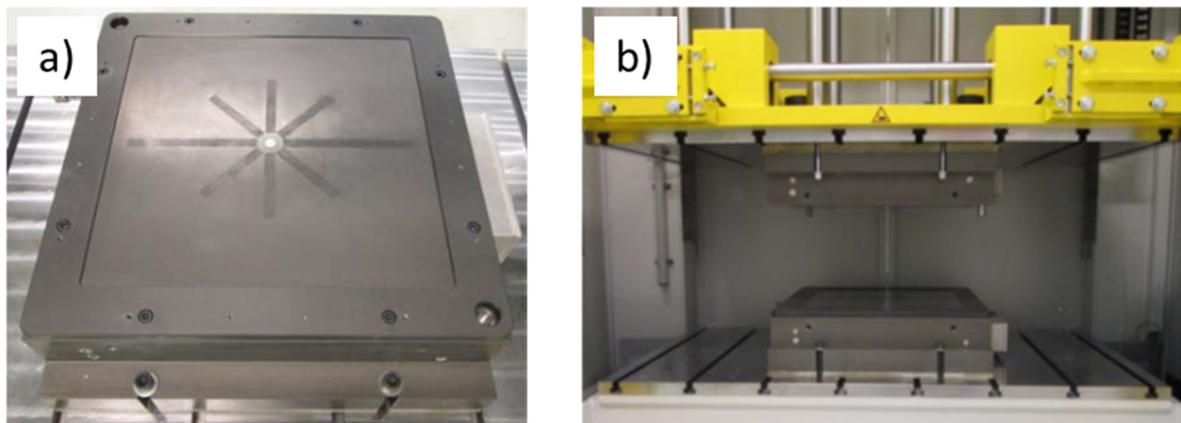


Abb. 10: Darstellung der a) unteren Formhälfte des Permeameters inkl. der eingebetteten Sensoren bzw. b) das Permeameter an der hydraulischen Presse montiert.

### 2.5.5 Ultraschall Permeabilitätsbestimmung in der Dicke

Das für Untersuchungen verwendete Ultraschall Permeameter zur Bestimmung der Permeabilität in Dickenrichtung ist, gleich wie das optische Permeameter zur Bestimmung in der Ebene, eine Eigenentwicklung des Lehrstuhls für Verarbeitung von Verbundwerkstoffen [49, 50].

Die Kavität des Permeameters (Abb. 11) ist für Preforms mit einer Grundfläche von  $180 \times 180\text{ mm}$ , einer minimalen Kavitätshöhe von  $8\text{ mm}$  und einer maximalen von  $20\text{ mm}$  optimiert. Die optimale Preformdicke muss prinzipiell für jedes Material eigens bestimmt werden. Dies ist auf den Ultraschall Sensor und dessen Verstärker zurückzuführen, da sich während eines Experiments die akustische Leitfähigkeit für

Schallwellen massiv ändert und der Verstärkungsfaktor dynamisch angepasst werden muss. Des Weiteren kommt es zu Einlaufeffekten, wodurch die Messung erst ab einer Durchdringung von  $6\text{ mm}$  der Preform valide Messergebnisse liefert.

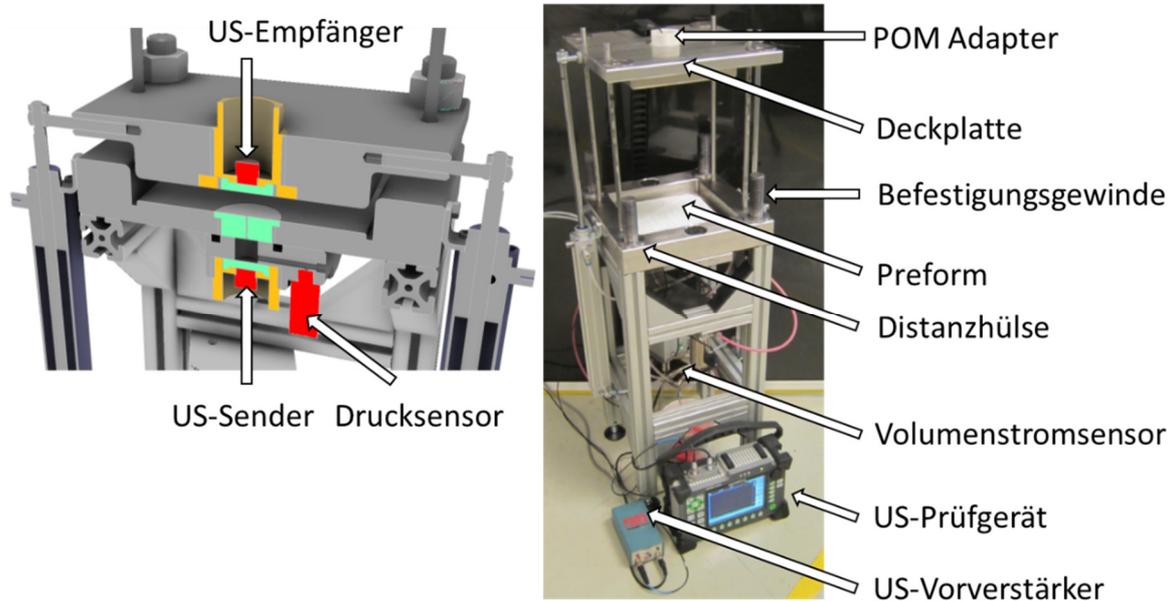


Abb. 11: Darstellung des Ultraschall Dickenpermeameters entwickelt am Lehrstuhl für Verarbeitung von Verbundwerkstoffen [50].

Durch die Punktinjektion in einer Ebene kommt es zu einer Ausbreitung der Flüssigkeitsfront in Form eines Ellipsoiden, welches durch die drei Längen der Halbachsen:  $a$ ,  $b$  und  $c$  definiert wird. Ähnlich der Bestimmung der ebenen Permeabilität wird bei der Bestimmung in Dickenrichtung eine Transformation der anisotropen realen Fließfront in ein isotropes Ersatzsystem angewandt, welches durch die isotrope Ersatzpermeabilität  $k_e$  definiert wird.

$$k_e = \sqrt[3]{k_1 * k_2 * k_3} \quad (2.22)$$

## 2.6 Fluid- und Feststoffeigenschaften

Für die Kunststofftechnik kann ganz allgemein und gleichzeitig unabhängig von der Kunststoffklasse (Thermoplaste, Duromere und Elastomere) festgehalten werden,

dass Bindungskräfte die entscheidende Rolle für deren Eigenschaften bilden. Die Haupt- und Nebervalenzkräfte definieren hierbei die Stärke und Charakteristik des molekularen Zusammenhalts und sind in hohem Maß von Temperatur abhängig. Um die kunststofftechnischen Vorgänge während der Verarbeitungsprozesse besser zu verstehen ist es daher notwendig, Kenntnis über deren Fluid- und Festkörpereigenschaften zu haben [51].

### 2.6.1 Viskositätsverhalten

In der Kunststoffverarbeitung muss das zu verarbeitende Polymer meist in flüssiger Form vorliegen. Hierbei ist die Viskosität ein Maß für den inneren Widerstand des Werkstoffes gegen die Scherung, welche durch das Fließen eingeleitet wird. Des Weiteren haftet das Polymer in der Regel an der Werkzeugoberfläche, wodurch es möglich wird einfache mathematische Zusammenhänge aufzustellen um das Verhalten des Fluides zu beschreiben [51].

$$\tau = \eta * \dot{\gamma} \quad (2.23)$$

Somit ist die resultierende Schubspannung  $\tau$  von dem Proportionalitätsfaktor  $\eta$  als dynamische Viskosität und der Schergeschwindigkeit  $\dot{\gamma}$  abhängig. Dieser Zusammenhang wird allgemein hin als Fließgesetz bezeichnet. Gleichzeitig beschreibt dieser auch die Klasse der Newtonschen Fluide, welche eine konstante Viskosität aufweisen. Da polymere Fluide überwiegend Abhängigkeit bezüglich der Schergeschwindigkeit auf die Viskosität aufweisen muss die allgemeine Formulierung wie folgt lauten [51]:

$$\tau = \eta(\dot{\gamma}) * \dot{\gamma}. \quad (2.24)$$

In Abb. 12 ist der prinzipielle Verlauf verschiedener Fluide aufgezeichnet, wobei hier ausschließlich der Einfluss der Schergeschwindigkeit und nicht jener der Temperatur betrachtet wird.

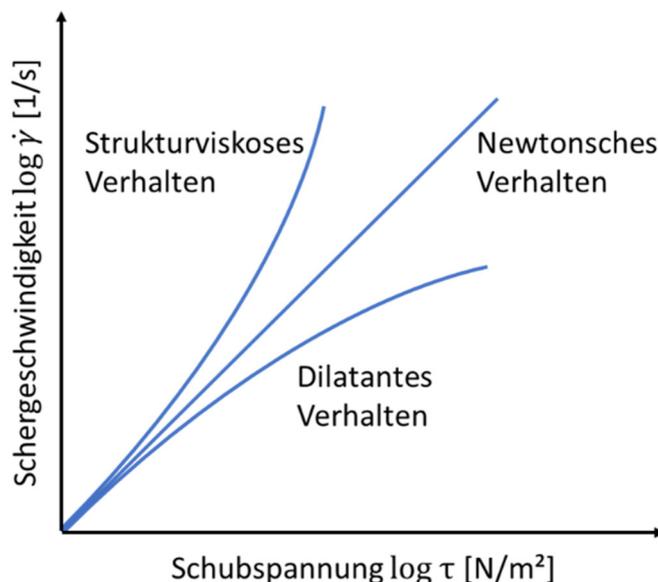


Abb. 12: Prinzipieller Verlauf der Schergeschwindigkeit über der Schubspannung.

Neben dem linearen Verhalten des Newtonschen Fluides in Abb. 12 sind ebenfalls strukturviskoses bzw. dilatantes Verhalten von Fluiden eingezeichnet. Diese charakteristischen Kurven sind typisch für thermoplastische Polymerschmelzen (strukturviskos) bzw. für duromere Harzsysteme (dilatant). Zur Bestimmung der Eigenschaften werden verschiedenste Viskosimeter mit unterschiedlichen Funktionsprinzipien eingesetzt. Das gängigste basiert auf dem kontinuierlichen bzw. oszillierenden Rotationsprinzip. Es wird dabei durch Rotation eines Körpers eine Schlepplösung induziert, welche idealer Weise über den Querschnitt eine konstante Schergeschwindigkeit erzeugt. Aus dem erforderlichen Drehmoment lässt sich dann die Schubspannung und aus der Winkelgeschwindigkeit die Schergeschwindigkeit berechnen [51].

### 2.6.2 Oberflächenspannung

Die Oberflächenspannung quantifiziert die Störung von intermolekularen Bindungen, die auftritt, wenn eine Oberfläche erzeugt wird. In der Physik von Feststoffen sind Oberflächen energetisch weniger günstig als die einzelnen Moleküle auf der Oberfläche. Die Oberflächenspannung kann definiert werden als die überschüssige Energie an der Oberfläche eines Materials, im Vergleich zur Energie der Summe der Einzelmoleküle an der Oberfläche [52].

Viele Anwendungen mit Polymeren erfordern eine gute Haftung an anderen Stoffen. Adhäsion ist eine Form der Anziehungskraft, die zwischen allen Atomen vorhanden ist und in drei große Kategorien eingeteilt werden: kovalente chemische Bindungen, quasi-chemische Wasserstoffbrückenbindungen und Bindungen basierend auf van der Waals Kräften. Es ist in der Theorie allgemein anerkannt, dass Anziehungskraft basierend auf Wasserstoffbrückenbindung und van der Waals Kräften ausreichend sind, um Klebeverbindungen zwischen Polymeren herzustellen, welche eine Festigkeit gleichwertig jener der Polymere selbst ohne den Bedarf an chemischen Verbindungen, zu erzeugen. Da diese Kräfte mit steigendem Abstand sehr stark abnehmen ist die Benetzung von höchster Bedeutung. Daher wurden über die Jahre Analysemethoden entwickelt, zur Bestimmung der Oberflächenspannung. Die gängigste Methode basiert auf der Beobachtung und Analyse der Tropfenform mehrerer Fluide mit bekannter Oberflächenspannung, auf der Oberfläche des zu untersuchenden Materials. Aus den gemessenen Kontaktwinkeln (siehe Abb. 13) kann dann auf das Verhältnis der Energien geschlossen werden. Die Oberflächenspannung ist aus zwei Teilen zusammengesetzt, einem polaren und einem dispersen Anteil. Betrachtet man folgende Gleichung wird ersichtlich, dass sie die Form einer Geradengleichung aufweist [53–57].

$$\frac{(1 + \cos(\theta)) \cdot \gamma_l}{2 \cdot \sqrt{\gamma_l^d}} = \sqrt{\gamma_s^p} \cdot \frac{\sqrt{\gamma_l^p}}{\sqrt{\gamma_l^d}} + \sqrt{\gamma_s^d} \quad (2.25)$$

Dabei steht  $\gamma_s^d$  für den dispersen Anteil und  $\gamma_s^p$  für den polaren Anteil der Oberflächenspannung, während die gesamte Oberflächenspannung aus der Summe dieser besteht. Wenn der polare Anteil der Oberflächenenergie größer als  $1 \text{ mN/m}$  ist, dann spricht man von polaren Kunststoffen, ist er kleiner, von unpolaren Kunststoffen [58].

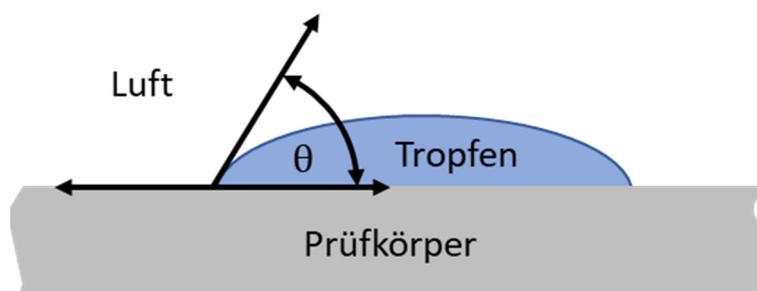


Abb. 13: Schematische Darstellung der Messung des Kontaktwinkels zur Bestimmung der Oberflächenspannung.

## 2.7 Flüssigimprägnierverfahren

Flüssigimprägnierverfahren oder auch bekannt unter Liquid Composite Molding (LCM) Processes bezeichnen Verfahren zur vollständigen Imprägnierung von Preforms, mit zumeist duromeren Harzsystemen. Es handelt sich dabei um Infiltrierungsprozesse, überblicksmäßig in Tabelle 1 dargestellt, welche überwiegend auf dem Prinzip der Infusion bzw. Injektion basieren. Manche der Verfahren setzten eine Kombination dieser ein, wie z.B. VARTM – Vacuum Assisted Resin Transfer Molding. Dabei wird vor dem Injektionsprozess Vakuum am Werkzeug appliziert, wodurch die Preform nahezu frei von Luft wird. Im Nachfolgenden werden sowohl das Vacuum Assisted Process (VAP), Resin Transfer Molding (RTM) als auch Nasspressen, welches strenggenommen der Kategorie der Pressverfahren angehört, beschrieben.

Tabelle 1: Übersicht relevanter Infiltrierungsprozesse.

Infusionsprozesse	Injektionsprozesse
<ul style="list-style-type: none"> <li>• VARI – Vacuum Assisted Resin Infusion</li> <li>• SCRIMP – Seemann Composites Resin Infusion Molding Process</li> <li>• VAP – Vacuum Assisted Process</li> <li>• MTRI – Membrane Tube Infusion</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• RTM – Resin Transfer Molding</li> <li>• VARTM – Vacuum Assisted Resin Transfer Molding</li> <li>• ARTM – Advanced Resin Transfer Molding</li> <li>• BARTM – Bladder Assisted Resin Transfer Molding</li> </ul>

### 2.7.1 VAP – Vacuum Assisted Process

Der VAP ist einer der einfachsten und billigsten Verfahren für Harzinfusion von Preforms (Abb. 14). Diese wird in einer offenen Werkzeugform platziert um anschließend mit einem definierten Lagenaufbau, bestehend aus Abreißgewebe, Fließhilfe, semipermeabler Membran, Vlies und Vakuumsack versiegelt zu werden. Das Vakuum liegt hierbei oberhalb der semipermeablen Membran (Luftdurchlässig aber nicht Harzdurchlässig) und unterhalb der Vakuumsack an. Aufgrund der anliegenden Druckdifferenz wird ein Harzfluss durch die Preform eingeleitet, welcher die Füllung der Preform gewährleistet.

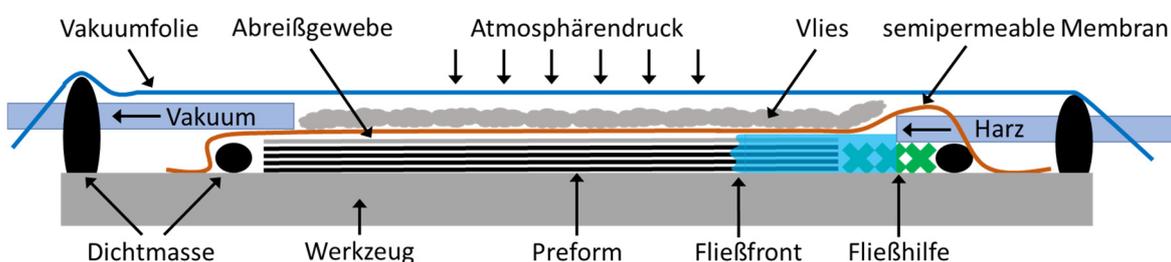


Abb. 14: Aufbau eines Vacuum Assisted Process [59].

Die Imprägnierung der Preform erfolgt „in-plane“, d.h. das Harz fließt entlang der horizontalen Ebene durch die Preform. Ein Vorteil von VAP ist, dass kaum Druckgefälle besteht. Die Membran bewirkt, dass über die gesamte Fläche an der sie anliegt Vakuum gezogen wird, wodurch annähernd gleiche Kompaktierung und in Folge gleiche Dicke sowie gleicher Faservolumengehalt gewährleistet wird. Des Weiteren bleibt die Fließgeschwindigkeit über die Fülldauer annähernd konstant. Ein weiterer Vorteil liegt in der niedrigeren zu erreichenden Porosität, da die Membran auch nach der Imprägnierung aufsteigende Luft einschließen kann. Nichtsdestotrotz, steigt der Aufwand stark mit der Größe der zu fertigenden Bauteile, da durch die maximale Druckdifferenz von  $P_{VAP} < 1 \text{ bar}$  nur geringe Füllgeschwindigkeiten realisiert werden können. Folglich werden ausgeklügelte Verteilerstrukturen mit mehreren Angüssen notwendig, welche eine gleichzeitige Imprägnierung unterschiedlicher Bauteilpositionen erlauben. Aufgrund der Topfzeiten von Infusionsharzen ergeben sich aber auch hier automatische Grenzen des Einsatzbereiches. Der Aufwand für Werkzeuge und deren Herstellung sind aufgrund des Prozesses vergleichsweise kostengünstig. Die maximal erreichbaren

Faservolumengehalte liegen um die 50 %, wobei die maximal erreichbare Wandstärke ebenfalls geringer ausfällt im Vergleich zu komplexeren Prozessen. Die erzielbaren Stückzahlen fallen ebenso gering aus [3].

### 2.7.2 RTM – Resin Transfer Molding

Im Gegensatz zu Vakuuminfusionsverfahren wird der Imprägniervorgang beim RTM Prozess mittels Überdruck eingeleitet. Die Matrix wird dabei über einen oder mehrere Angüsse in das Werkzeug injiziert.

Zu Beginn des Prozesses steht die Beschickung, d.h. Trennmittel zur späteren leichteren Entformung wird aufgebracht, als auch die trockenen Verstärkungsfasern in die Kavität des Werkzeugs eingelegt. Im Anschluss wird das Werkzeug geschlossen und die Injektion des reaktiven Harz-Härter-Gemischs gestartet. Das nun vollständig imprägnierte Bauteil wird meist unter dem Einfluss von erhöhter Temperatur und Zeit ausgehärtet. Im Anschluss an die Entformung des Bauteils müssen Harzreste am Anguss bzw. sonstige kritische Werkzeugstellen gereinigt werden.

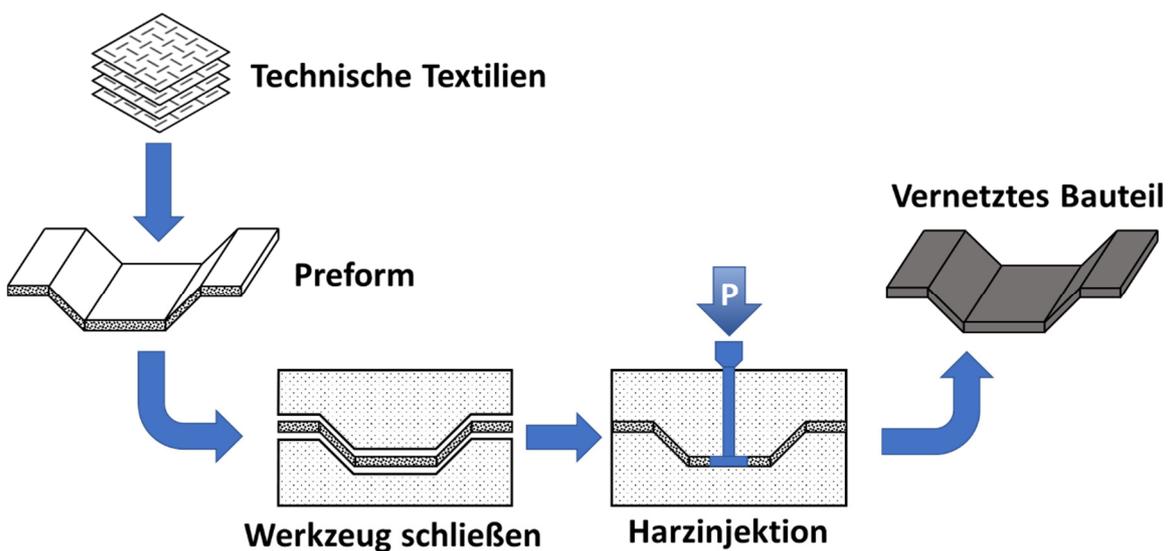


Abb. 15: Resin Transfer Molding Prozess [64].

Generell können mit diesem Verfahren, abhängig von der Größe und Komplexität, Bauteile in unter 30 min hergestellt werden. Die maßgeblich begrenzenden Faktoren sind hierbei die Zeit welche der Injektionsprozess und die Vernetzung in Anspruch nehmen. Da diese Restriktionen weitestgehend von der

Materialentwicklung im Bereich der Matrixwerkstoffe abhängen, fokussieren sich aktuelle Entwicklungen auf die Verbesserung von Preforms. Durch stabilere Preforms lassen sich kürzere Beschickungszeiten realisieren wodurch die Wirtschaftlichkeit des Prozesses verbessert werden kann [60–63].

Es sind Seriengrößen von bis zu *50 000 Stück* realisierbar, wobei hier Mehrkavitätswerkzeuge zu weiteren Steigerungen führen können. Die Initialkosten sind im Vergleich zu VAP oder VARI erheblich höher, da zur Herstellung für Bauteile mit diesem Prozess eine Presse, eine Matrixinjektionsanlage sowie ein zweiteiliges Werkzeug aus Aluminium oder Werkzeugstahl benötigt werden. Es können Bauteile mit komplexen Geometrien bei mittlerem Investitionsaufwand hergestellt werden. Der Prozess ist ebenfalls in der Lage Formteile zu produzieren welche keine oder kaum Nachbearbeitung verlangen. Hierfür sind allerdings meist aufwendige Near-Net-Shape Preforms erforderlich, was den Einsatz von komplexen Preformstrategien und Techniken bedingt [60–63].

### 2.7.3 Nasspressen

Prinzipiell werden beim Nasspressen die technischen Textilien oder Preforms in das Werkzeug eingelegt, Matrixwerkstoff aufgelegt oder aufgegossen und anschließend das Werkzeug geschlossen (siehe Abb. 16).

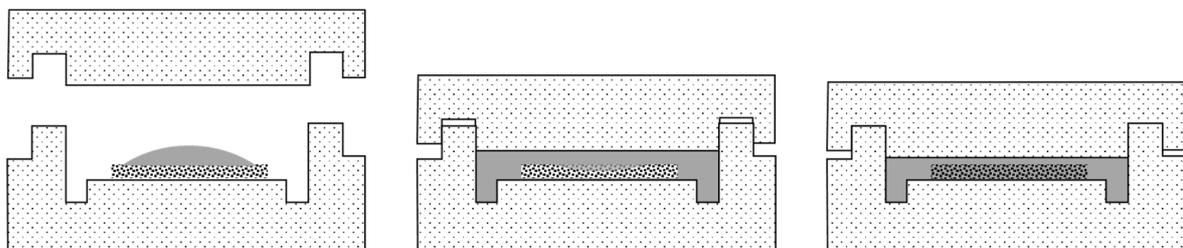


Abb. 16: Füllverhalten duromerer Harze beim Fließpressprozess [64].

Eine Möglichkeit der Unterscheidung ist die Einteilung in Kaltpressen (bis  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) bzw. Warmpressen (bis  $160\text{ }^{\circ}\text{C}$  bei PU-Harzen und bis  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$  bei EP-Harzen). Die erreichten Werkzeuginnendrucke variieren hier ebenfalls von wenigen *bar* bis zu *140 bar*. Ähnlich verhält es sich mit der Art der eingesetzten Pressen (meist hydraulisch) und Werkzeugtypen. Beim Kaltpressprozess werden oft nur geringe Stückzahlen realisiert was zur Folge hat, dass ebenfalls die Werkzeuge kostengünstiger sein müssen. Sie werden in der Regel aus gefüllten Gießharzen

oder Schäumen hergestellt, welche im Vergleich zu Werkzeugstählen leicht bearbeitbar sind. Im Heißpressprozess hingegen kommen ausschließlich Stahlwerkzeuge zum Einsatz, welche meist dem Aufbau aus Abb. 17 ähneln. Ziel ist es eine möglichst schnelle Wärmeübertragung zu gewährleisten, um so zum einen die Viskosität des Harz-Härter-Gemisches herabzusetzen, als auch den meist exothermen Vernetzungsprozess zu starten.

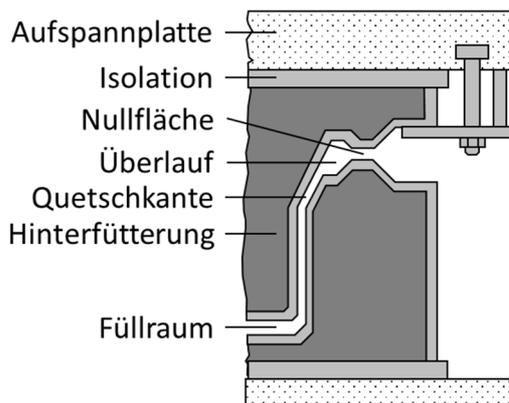


Abb. 17: Typische Werkzeuggeometrie bei Nasspressprozessen [4].

Auch in dieser Prozesskategorie lassen sich unterschiedliche Varianten benennen, wie z.B. das sogenannte Sheet-Molding-Compound (SMC) bzw. Bulk-Molding-Compound (BMC) Verfahren. Beim SMC Verfahren werden vorimprägnierte Fasermatten verarbeitet, während beim BMC Verfahren Pressmassen bestehend aus Kurzfasern mit Harz-Härter-Gemisch verarbeitet werden.

## 2.8 Nicht zerstörende Analyse Methoden

Nicht zerstörende Analyse Methoden, weitestgehend bekannt unter dem englischen Begriff des Non-Destructive Testing (NDT) bezeichnet physikalische, chemische, biologische und mathematische Prüfmethode, welche das Prüfobjekt gänzlich unbeschadet lassen. Folglich kann das geprüfte Objekt anschließend seinem ursprünglichen Zweck dienen [65, 66]. Im Folgenden werden selektierte Methoden welche in der vorliegenden Arbeit angewandt wurden vorgestellt.

### 2.8.1 Akustische Rastermikroskopie

Nach dem Zweiten Weltkrieg wurde das von Sokolov [67] beschriebene und von Firestone [68] weiterentwickelte Ultraschallverfahren so weit gebracht, dass sehr

bald Geräte für die Ultraschallprüfung von Materialien zur Verfügung standen. Das Ultraschallprinzip basiert auf der Tatsache, dass feste Materialien gute Leiter von Schallwellen sind. Dabei werden die Wellen nicht nur an den Grenzflächen, sondern auch durch interne Fehler reflektiert (Delaminationen, Porosität, Einschlüsse etc.). Die Interaktion von Schallwellen mit dem Material ist umso stärker, je kleiner die Wellenlänge. Betrachtet man den Zusammenhang zwischen der Frequenz  $f$  und der Wellenlänge  $\lambda$ :

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2.26)$$

wobei  $c$  die Schallgeschwindigkeit des Materials beschreibt, wird klar, dass eingesetzte Ultraschallfrequenz den zu erwarteten Fehlergrößen angepasst werden muss [69]. Die Technik der Ultraschallprüfung wurde kontinuierlich weiterentwickelt und findet derzeit seinen Höhepunkt in der akustischen Rastermikroskopie.

Das Prinzip des akustischen Rastermikroskops ist denkbar einfach. Sein Herzstück ist eine akustische Linse, die aus einem Saphirstab mit einem kugelförmigen Hohlraum besteht, der in eine Flüssigkeit welche die Probe benetzt eingetaucht ist. Ein piezoelektrischer Signalwandler erzeugt gepulste Ultraschallwellen im Frequenzbereich von  $10 \text{ MHz}$  bis  $2 \text{ GHz}$ , die sich als ebene Wellen ausbreiten. Die kugelförmige Schnittstelle zwischen dem Saphir und der Koppelflüssigkeit am gegenüberliegenden Ende des Signalwandlers dient als Linse (siehe Abb. 18).

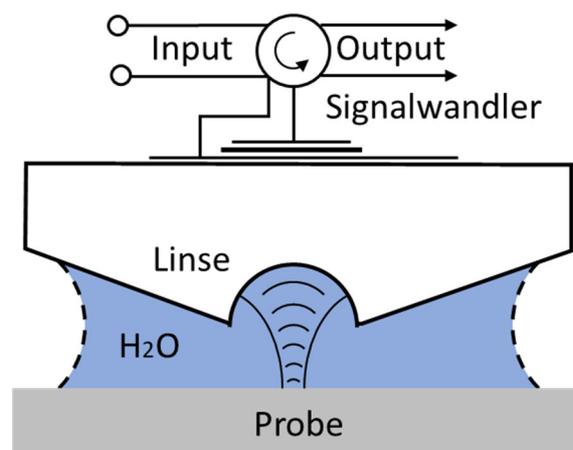


Abb. 18: Prinzipskizze des Ultraschallkopfes zur Signaleinleitung [70].

Fokussierte sphärische Ultraschallwellen werden durch das Fluid (meist destilliertes Wasser) geleitet und treffen auf die Oberfläche der Probe. Ein Teil der akustischen Welle wird von der Probe reflektiert, während ein anderer Teil innerhalb der Probe übertragen wird. Ein Großteil dieser akustischen Rastermikroskope arbeitet mit der Pulsechotechnik, mit akustischen ebenen Wellen. Dabei wird ein Impuls der akustischen ebenen Welle durch die Linse übertragen und in Gegenwart von Wasser auf der Oberfläche der Probe fokussiert. Das von der Probe reflektierte Signal wird vom gleichen Wandler erfasst und elektronisch verstärkt, um die reflektierte Amplitude aufzuzeichnen. Ein akustisches Amplitudenbild wird erzeugt, indem die reflektierte Amplitude als Funktion der örtlichen Position auf der Probe abgebildet wird [69, 71, 72]. Um solch ein Rastermikroskop zu einem quantitativen Instrument zu machen, wird die Änderung der Amplitude des vom Wandler empfangenen Signals gemessen, während der Abstand zwischen der Linse und der Probe geändert wird, wodurch der Fokuspunkt verschoben wird. Eine Darstellung der Amplitude über der Entfernung wird als  $V(z)$ -Kurve bezeichnet. Die Amplitude dieser Kurve kann eine Reihe von Schwingungen in mehreren Materialien erfahren. Die Periode dieser Schwingungen bezieht sich auf die Rayleigh-Wellengeschwindigkeit [73, 74] der jeweiligen Probe. Die Fläche auf der Probe, die dabei vermessen wird, kann bis zu  $20 \mu\text{m}^2$  betragen und ist abhängig von der Frequenz sowie den Linsenparametern.

### 2.8.2 Computer Tomographie

Die Röntgenmikrotomographie (auch häufig als Mikro-CT bezeichnet) ist eine radiographische Bildgebungstechnik, die 3D-Bilder der inneren Struktur eines Materials mit einer räumlichen Auflösung von bis zu  $1 \mu\text{m}$  erzeugen kann. Der Aufwand der Probenvorbereitung ist in der Regel minimal. Viele Materialien nehmen keinen Schaden durch die Messung, so dass viele Scans von derselben Probe unter verschiedenen Bedingungen durchgeführt werden können. Die Wurzeln der Röntgenmikrotomographie sind in der Computertomographie, die seit 40 Jahren für die medizinische Bildgebung eingesetzt wird zu finden [75, 76].

CT-Scans waren eine Erweiterung der konventionellen Projektionsradiographie, eine Technik, die ein zweidimensionales Bild der inneren Struktur eines Objekts erzeugen kann. In diesen Bildern können Knochenbrüche oder Karies aufgrund der

Unterschiede in der Röntgenabsorption zwischen Knochen und umgebendem Gewebe leicht erkannt werden. Das Problem mit der Technik ist, dass Merkmale nur innerhalb der zweidimensionalen Ebene des Bildes lokalisiert werden können. Die Position eines Tumors oder anderer interessanter Merkmale kann nicht außerhalb der Bildebene lokalisiert werden. Ein Merkmal kann völlig übersehen werden, da es sich durch die Tiefe mit anderen konkurrierenden Merkmalen überschneidet. CT-Scans (siehe Abb. 19) lösen diese Probleme, indem sie Informationen aus einer Reihe von Röntgenaufnahmen kombinieren, während das Objekt um seine eigene Achse gedreht wird. Die Drehung ist relativ, wodurch tatsächlich das Objekt stationär bleibt, während die Röntgenquelle und der Detektor um das Objekt herumgedreht werden [77, 78].

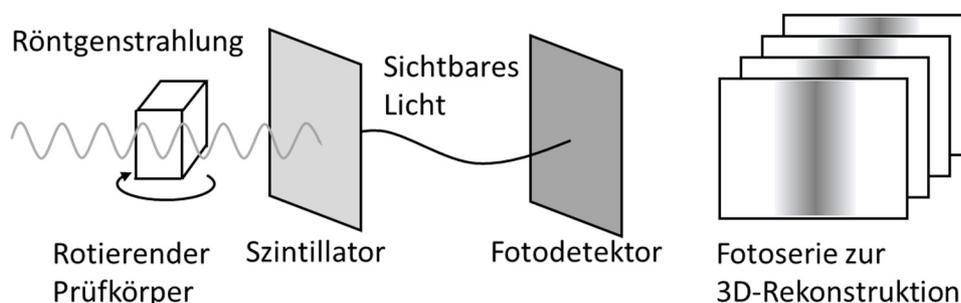


Abb. 19: Schematische Skizze einer Röntgenuntersuchung nach dem tomographischen Prinzip [77].

Unter Verwendung mathematischer Prinzipien der Tomographie wird diese Bilderserie zu einem dreidimensionalen digitalen Bild rekonstruiert, wobei jeder *Voxel* (Volumenelement oder 3D-Pixel) die Röntgenabsorption an diesem Punkt darstellt [79]. Aufgrund des Zusammenhangs zwischen Röntgenabsorption und Materialdichte kann die innere Struktur aus den Bildern abgeleitet und Merkmale eindeutig zugeordnet werden. Die resultierenden 3D-Bilder werden typischerweise als eine Reihe von 2D-Schnitten dargestellt. Während die meisten frühen Anwendungen der Computertomographie für die medizinische Bildgebung erfolgten, führten die Vorteile echter dreidimensionaler Modelle der inneren Struktur zu einer schnellen Anpassung der Technik für andere Bereiche, einschließlich der Materialwissenschaften. Es wurden spezialisierte industrielle CT-Scanner hergestellt, die in der Lage waren, Materialien mit einer höheren Dichte als menschliches Gewebe abzubilden [80].

### 3 Entwicklung eines adaptiven Multimaterial Legesystems

Ziel war es ein adaptives Legesystem für die Verarbeitung unterschiedlicher unidirektionaler Materialien (thermoplastische Tapes und Binderrovings) zu entwickeln, aufzubauen und die Verarbeitungsprozesse automatisiert abzubilden. Die Konstruktion des Legesystems (LS-I), sowie ein Teil der Komponentenauswahl wurden bereits in zwei Diplomarbeiten hinreichend behandelt [81, 82]. Aus diesem Grund wird im Folgenden lediglich ein Überblick, zum mechanischen Aufbau, gegeben, mit einer Fokussierung auf einzelne entscheidende Aspekte. Im Vordergrund soll die automatisierungstechnische Umsetzung stehen, mit den Verkettungen und verteilten Prozessen.

#### 3.1 Überblick zum mechanischen Aufbau und den Komponenten

Das LS-I wurde an einem Überbau bestehend aus Aluminium I-beam-Profilen montiert, wie in Abb. 20 zu erkennen ist. Ein speziell gefertigtes Goniometer, in der Lage Axialkräfte von bis zu  $10\text{ kN}$  aufzunehmen, wurde mit dem Montageflansch des, LS-I verschraubt und sorgt für die Winkelfeinjustierung des LS-I in Bezug auf die Heizplatte. Diese Maßnahme ergibt sich aus den hohen Toleranzen bei Verwendung dieser Profile. Der Kreuztisch, mit seinen Linearantrieben, zur Bewegung der Heizplatte ist an einer Aluminium Grundplatte montiert. Die Heizplatte sitzt wiederum auf einer Montageplatte am Kreuztisch. Diese wirkt als Substratheizung und stellt eine Ergänzung zu einer von drei Hauptheizungen dar, die da wären:

1. Infrarotstrahler,
2. Propangas-Flammenheizung und
3. Vollspektrum Blitzlicht Xenon Lampe.

Alle drei Hauptheizungen verfolgen unterschiedliche physikalische Effekte zur Heizung des Materials. Die Infrarotstrahler (golden 8 von Heraeus Noblelight GmbH) leuchten kontinuierlich und regen den Binder und die Kohlenstoffaser durch Wärmestrahlung, mittels elektromagnetischer Wellen an. Aufgrund der verhältnismäßig langen Wellen dringt die Strahlung tief in den Roving ein und es kommt zum Durchwärmen des Materials. Die Leistung lässt sich über die Spannung

steuern, wobei eine Regelung aufgrund der Trägheit der Strahler kaum zu implementieren ist.

Das Prinzip der Propangas-Flammenheizung (Hill GmbH) basiert auf Wärmeleitung von heißem Abgas das bei der Verbrennung von Propangas entsteht, in Kombination mit erzwungener Konvektion. Das Gas-Luft-Gemisch verbrennt mit ca.  $1700\text{ }^{\circ}\text{C}$ , wobei die Leistung über den Volumenstrom steuerbar ist. Dieser wird über den Luftdruck gesteuert, welcher über den entstehenden Staudruck eine mechanische Membran zur Gaszufuhr regelt. Das System ist ebenfalls recht träge und lässt sich nur schwer regeln, da das Volumen in der Leitung mit Gemisch immer erst abgefackelt werden muss.

Die Blitzlicht Xenon Lampe (humm3 von Heraeus Noblelight GmbH) emittiert Licht mit einem nahezu vollen Spektrum, im infrarotem bis ultravioletten Bereich. Dadurch lässt sich beinahe jedes Material heizen, da selbst Bandenstrahler mit nur einem geringen Resonanzspektrum angeregt werden können. Die Lichtquelle ist prinzipiell gepulst und es können sowohl die Amplitude über die Spannung, die Pulslänge als auch die Frequenz der Pulse gesteuert werden. Da es sich um Pulse von bis zu  $120\text{ Hz}$  handelt ist das humm3 sehr gut regelbar. Es ist von Werk aus auch bereits dazu in der Lage und erlaubt mittels eines Analogsignals Skalierung.

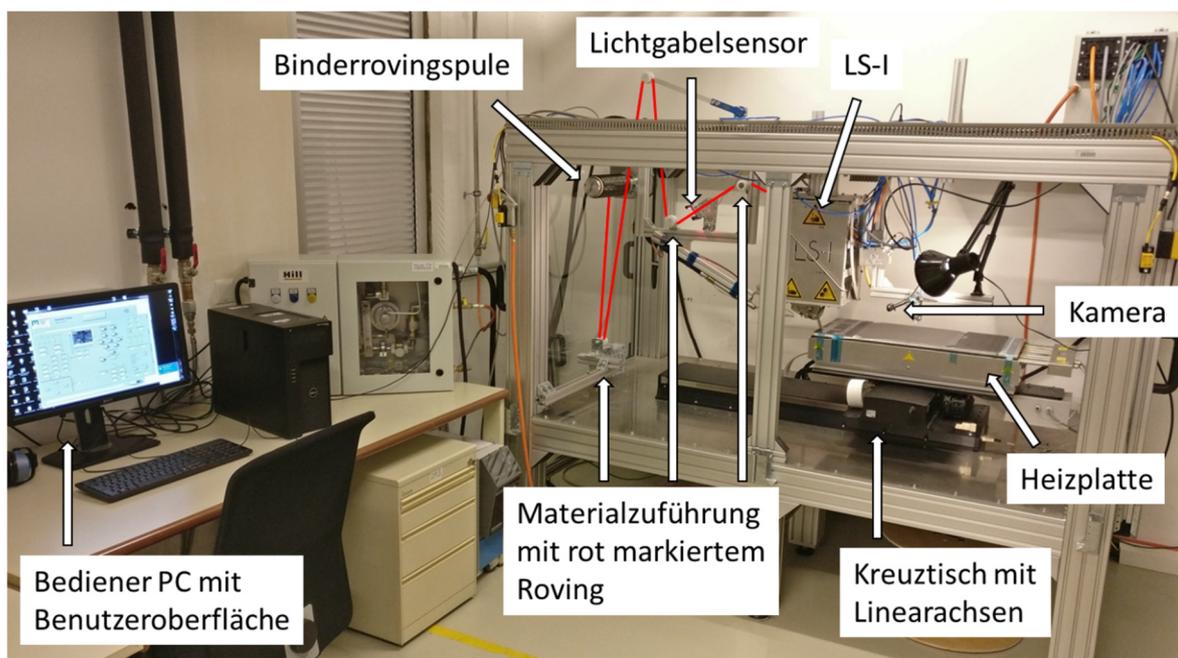


Abb. 20: Aktueller mechanischer Aufbau des LS-I montiert an einem Überbau mit Bewegungssystem und Materialheizung.

Der Binderroving wird von einer Rolle abgewickelt und ist auf einer pneumatischen Spannachse befestigt. Der Roving wird dem LS-I mittels einer Materialzuführung, welche noch genauer beschrieben wird, zugeführt. Die Materialfördereinheit besteht aus zwei gummierten Rollen, eine durch einen Zahnriemen angetrieben, die andere mit einem pneumatischen Zylinder zur Klemmung. Der Zahnriemen wird durch einen Servomotor an einem Winkelgetriebe betrieben. Dieser ermöglicht eine positions- als auch eine drehmomentgeregelte Fahrt, wodurch das Material im Legeprozess gebremst werden kann. Zuvor war der Riemen mit einem Schrittmotor angetrieben und daher zum Bremsen nicht geeignet. Dieser Umstand ist auf den unterschiedlichen inneren Aufbau der elektrischen Antriebe zurückzuführen, kann aber darauf zurückgeführt werden, dass die Schritte strenggenommen keine kontinuierliche Bewegung erlauben [83]. Vor dem Ablegepunkt ist eine pneumatische Schere montiert um den Roving zum Pfadende zu konfektionieren. Zur Materialapplikation wird eine flexible Silikonrolle verwendet. Die Härte und Geometrie sind natürlich frei wählbar. Des Weiteren existiert eine Konfiguration mit einer starren Stahlrolle welche mittels eines Fluides temperiert werden kann.

### **3.1.1 Materialzuführung**

Die Materialzuführung wurde im Zuge einer Bachelorarbeit entwickelt und umgesetzt [84]. Sie erfüllt im Wesentlichen drei Zwecke:

1. schonender Materialabzug von der Rolle,
2. Einbringung von Spannung in den Roving zur Materialstabilisierung und
3. zentrierte Zuführung in das LS-I.

Dadurch sollte erreicht werden, dass die Ablegegenauigkeit und somit die Linearität im Laufe einer Bahn zunehmen. Des Weiteren wurden im Zuge der Arbeit ein Lichtgabelsensor zur Materialbreiteneingangsmessung implementiert, sowie eine Routine zur Vermessung abgelegter Rovings mit einem Lichtschnittsensor entwickelt.

Bei der Entwicklung der Materialzuführung wurden einfache Prinzipien, welche in einer vorangegangenen Studie beobachtet wurden umgesetzt [85]. Zusätzlich dienten andere bekannte Legesystemdesigns als Vorlage für die Einheit [86–91]. In Abb. 21 ist die fertige Einheit zu sehen. Unterhalb der Materialrolle, welche durch

eine Riemenbremse gebremst ist, befindet sich in einem Abstand von ca.  $1\text{ m}$  eine stark konkave Rolle. Sie ist in der Lage den Roving, mit diesem Abstand, unabhängig vom Winkel der Abwicklung einzufangen und umzulenken. Danach folgt ein größerer Abstand von ca.  $1,5\text{ m}$  zu einer ebenfalls konkaven Rolle mit größerem Radius. Diese ist an einem Federelement befestigt, das als dynamischer Puffer bei Anfahr- und Abbremsprozessen dient. Die relativ hohe Distanz von der ersten zur zweiten Rolle hat vor allem den Grund etwaige Verdrillungen einzufangen und innerhalb der Rollen zu halten, nachdem die Wicklung des Rovings nicht perfekt ist. Eine relativ große Distanz hilft dabei dadurch, da sich die Verdrillung in Bezug auf  $^\circ/m$  besser verteilen. Die dritte Rolle ist eine starre konkave Umlenkrolle die die Zentrierung des Rovings vollendet, bevor er über eine flache Rolle final in das LS-I umgelenkt wird. Zwischen diesen beiden Rollen ist ein Lichtgabelsensor befestigt der zwei Funktionen erfüllt, ersten eine Breitenmessung und zweitens Detektieren von Verdrillungen.

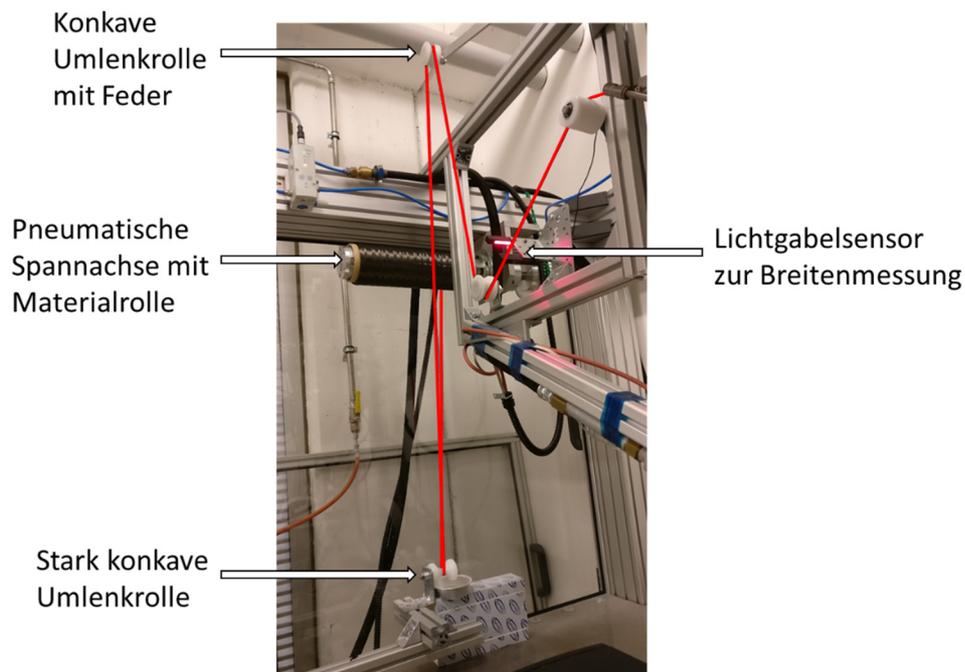


Abb. 21: Aufbau der Materialzuführung mit rot markiertem Roving.

### 3.1.2 Kompaktierungskraft

Die Kompaktierung des Materials beim Ablegen wird maßgeblich von dem Aufbau der Rolle und ihrer resultierenden Flexibilität beeinflusst. Im Extremfall arbeitet man mit einer starren Rolle, die eine annähernd linienförmige Pressung erzeugt. Im

Normalfall werden allerdings flexible Rollen von unterschiedlicher Härte eingesetzt. Das LS-I besteht im Wesentlichen aus zwei Teilen, einem fixen Rahmen mit Montageflansch und einem inneren Rahmen welcher mittels eines pneumatischen Zylinders im inneren des Flansches bewegt werden kann. Der bewegliche Teil weist dabei einen Hub von  $1,5\text{ cm}$  auf. Um Kraft auf die Heizplatte und das Material aufbringen zu können müssen sich diese innerhalb des Hubs befinden, inkl. der zu erwartenden Verformung der Rolle. Im Fall des LS-I musste mittels des Pneumatik Doppelhubzylinders die resultierende Kraft auf die Heizplatte reduziert werden. Da das LS-I in Abhängigkeit seiner Bestückung zwischen  $30\text{ kg}$  und  $50\text{ kg}$  wiegt, würden ohne eine Kraftreduktion bis zu  $500\text{ N}$  auf das Material zur Kompaktierung wirken. Ein elektrisches Proportionaldruckregelventil wurde dem Zylinder vorgeschaltet um den Luftdruck aus der Hausleitung adjustieren zu können. Da Doppelhubzylinder immer mit Druck und Gegendruck zur gedämpften Fahrt verwenden musste ein zweites elektrisches Proportionaldruckregelventil für die zweite Kammer eingesetzt werden.

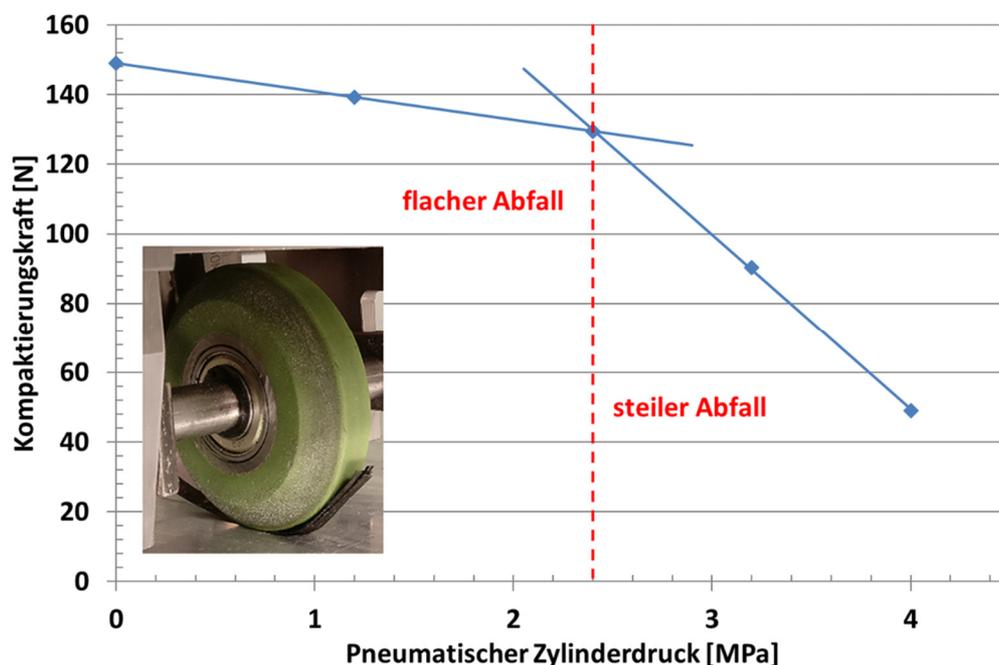


Abb. 22: Empirisch ermittelter Zusammenhang zwischen dem Zylinderinnendruck und wirkenden Kompaktierungskraft auf die Kompaktierungsrolle.

Abb. 22 zeigt den Zusammenhang zwischen dem Proportionaldruckregelventil bzw. dem Zylinderinnendruck und der resultierenden Kraft auf die Heizplatte. Zur

Ermittlung wurde eine Waage unterhalb der Rolle positioniert und verschiedene Maschineneinstellungen angefahren. Was deutlich zu erkennen ist, ist eine Änderung der Steigung bei ca.  $2,4 \text{ MPa}$ . Dies ist auf das Prinzip des Drucks und Gegendrucks zurückzuführen, da ein konstanter Minimaldruck in jeder der beiden Kammern wirkt. Versuche ohne diesen Minimaldruck hatten in der Vergangenheit zur Folge, dass der Zylinder ungedämpft und dadurch mit hoher Geschwindigkeit in die Anschläge fuhr. Allein die resultierende Kraft zu kennen ist allerdings noch nicht ausreichend um die Kompaktierung beurteilen zu können. Dazu braucht es noch die Bestimmung der aktiven Fläche unterhalb der Rolle, wie es in Abb. 23 dargestellt wird. Dazu wurde eine Drucksensitive Folie verwendet die sich unter Last einfärbt. Um etwaige Regelungsprozesse beim Absetzen der Rolle zu vermeiden wurde die Rolle bereits Außerhalb der Folie abgesetzt, dann auf die Folie bewegt, für eine Dauer von *5 Sekunden* gehalten und wieder heruntergefahren.

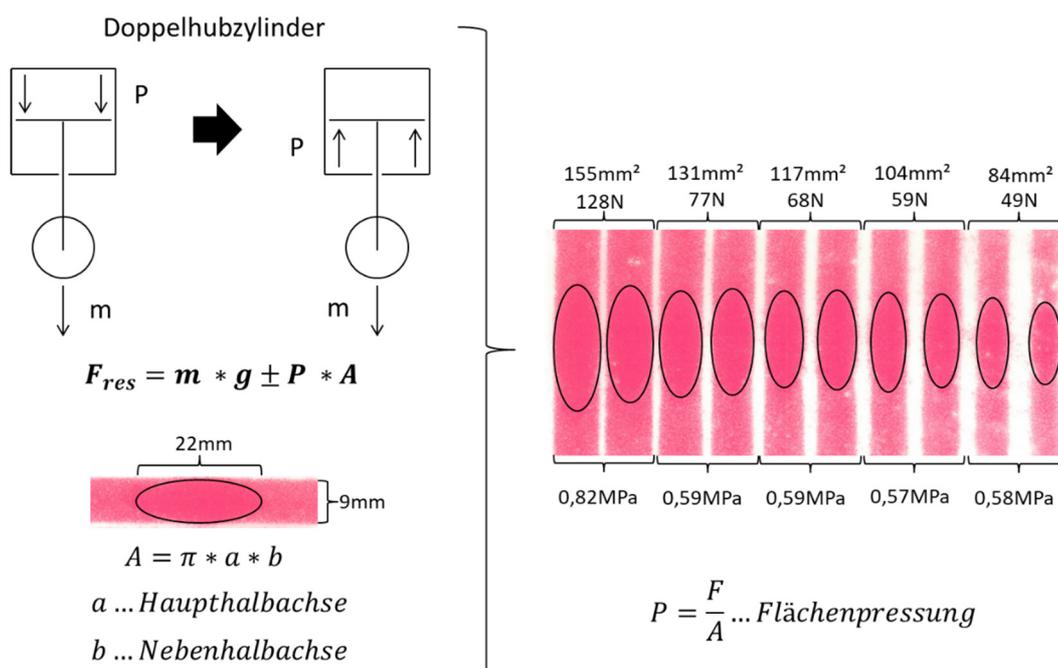


Abb. 23: Ermittlung der Fläche und der Flächenpressung einer flexiblen Rolle bei unterschiedlichen Kraftniveaus.

Die Flächen wurden anschließend vermessen und die Fläche entsprechend bestimmt. Daraus ließen sich die Flächenpressungen berechnen. Abgesehen von der höchsten Kraft scheinen die wirkenden Kräfte und Verformungen der Rolle, sich insofern die Waage zu halten, dass die Drücke in etwa gleichbleiben.

## 3.2 Prüfstandsautomatisierung

### 3.2.1 Elektronische Verkettung

Zur Automatisierung des LS-I und seiner Peripherie wurden zwei SPS und EtherCAT Busse von Beckhoff verwendet. Die beiden Steuerungen sind durch eine sogenannte Bridge-Klemme (EL6695) miteinander verbunden. Diese erlaubt es vordefinierte Daten-Arrays von beliebigem Typ (Boolean, Integer, Float, Struct) zwischen den Steuerungen auszutauschen. Der Austausch geschieht in Echtzeit und synchronisiert, wodurch zu jedem Zeitpunkt die gesendeten und empfangenen Daten einem Zeitpunkt, bzw. Prozesszyklus zugewiesen werden können. Diese Aussage klingt vielleicht trivial, ermöglicht es aber schnelle Kommunikation und Fehlerfreie Datenzugriffe zu gewährleisten. In Abb. 24 ist die Verkettung der Steuerungselemente dargestellt. Die Benutzeroberfläche welche in LabVIEW programmiert wurde kommuniziert über den ADS (Automation Device Specification) Kanal, welcher standardisiert und herstellerunabhängig ist.

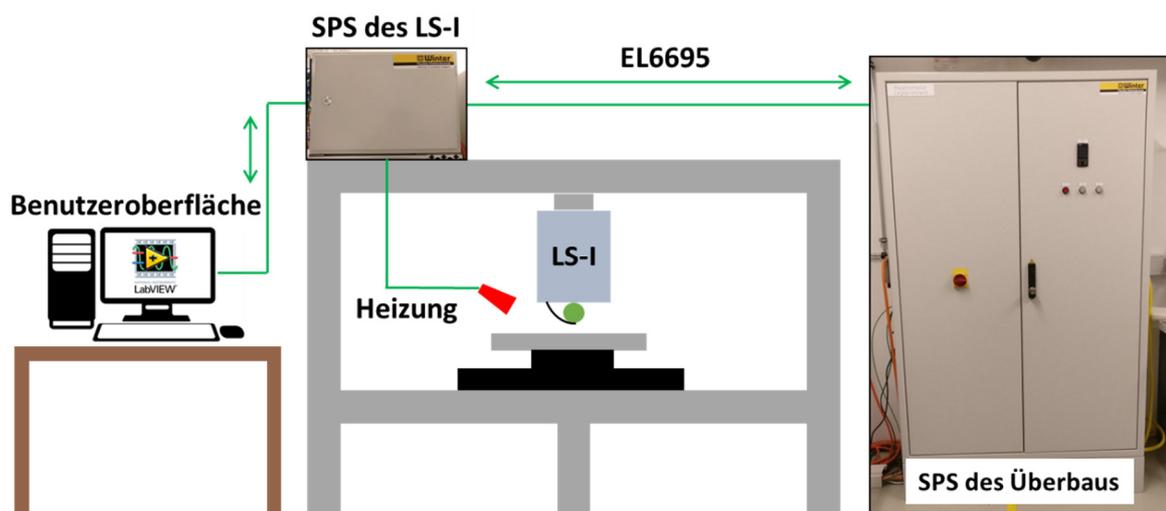


Abb. 24: Schematische Darstellung der Verkettung des LS-I mit dem Überbau und dem Bediener PC mit der Benutzeroberfläche.

Über ihn werden Variablen ausgetauscht die sowohl das LS-I als auch den Überbau steuern können. Nun ist es allerdings so, dass die grafische Benutzeroberfläche (GUI) keine Berechtigung hat direkt den Überbau anzusprechen. Es wurde nämlich eine klare Master-Slave Situation geschaffen, in der das LS-I den Takt vorgibt. Dies ist eine einfache Maßnahme um Hierarchie im System zu wahren. Somit muss die

GUI wann immer sie an den Überbau einen Befehl senden möchte, wie z.B. x-Achse fahre auf Position xy, zuerst eine Freigabe vom Master bekommen. Es gibt zwar Ausnahmen wo diese Regel umgangen wird, nur handelt es sich dabei um ganz spezifische Situationen. Ein weiterer Grund für diese Hierarchie war, dass der Überbau im Wesentlichen das Bewegungssystem repräsentiert. Möchte man nun dieses durch einen Roboter ersetzen, sollte diese klare Trennung beim einfacheren Migrieren helfen. Wie bereits in Abschnitt 3.1 erläutert stehen dem LS-I drei Hauptheizungen zur Verfügung. Diese werden vom Master aus gesteuert und mit konstanten Parametern gefahren. Einzig die Blitzlichtheizung kann bereits geregelt werden. Dazu wird die Frequenz mit der die Blitze ausgestrahlt werden mit einem analogen 0-10 V Signal skaliert. Es werden die minimale und maximale Frequenz vorab definiert und dazwischen linear interpoliert. Dadurch ist es z.B. möglich die Wärmeleistung von der Geschwindigkeit oder der applizierten Kompaktierungskraft abhängig zu machen.

### 3.2.2 Programmstruktur und Zustandsautomaten

Zustandsautomaten (FSM) bilden die Basis von SPS Anwendungen und im Allgemeinen von Programmen auf Maschinen. Sie sind die Darstellung der Abbildung aller möglichen Zustände einer Maschine. Um von einem Zustand in einen anderen zu wechseln müssen vordefinierte Übergangsbedingungen erfüllt werden. Verhalten außerhalb des vorgegeben Rahmens hat in der Regel zur Folge, dass die Maschine in einen Fehlerzustand übergeht.

In Abb. 25 ist der generelle Aufbau des SPS Programmes dargestellt. Die Bezeichnung „Main“ steht für das Hauptablaufprogramm, welches automatisch und in einer voreingestellten Zykluszeit von der SPS ausgeführt wird. Jedes Unterprogramm muss mindestens einmal in „Main“ aufgerufen werden. Eine Ebene unterhalb befinden sich die Programme „Variable Transfer“, „Control Functions“ und „Config Actions“. „Variable Transfer“ ist ein Unterprogramm das sich ausschließlich um den Austausch der Daten zwischen der GUI dem Master und Slave kümmert. Dabei werden Arrays von jeweils *192 Einträgen* von den Typen *Boolean*, *16-bit Integer* und *32-bit Integer* jeweils als Ein- bzw. Ausgang übertragen. Die ersten *96 Einträge* sind für das LS-I reserviert und die zweiten *96* für den Überbau bzw. allgemein für das Bewegungssystem. Jeder der Blöcke ist wiederum in *48 Einträge*

für externe LabVIEW Interaktionen, bzw. für interne SPS Interaktionen reserviert. In Abhängigkeit vom gewählten Modus in der GUI (Configuration Mode, Automatic Mode, Full Automatic Mode) können sich Variablenverknüpfungen ändern. Das Unterprogramm „Control Functions“ sorgt für die Einhaltung von Grenzparametern, welche für Mensch und Maschine eine Gefahr darstellen könnten. Ein Beispiel ist hierfür der Infrarotstrahler, dessen maximale Betriebsspannung bei 30 V liegt, während das Netzteil bis zu 60 V ausgeben kann. Daher wird in den „Control Functions“ eine Regel festgelegt, dass wenn der Benutzer mehr als die erlaubten 30 V anfordert keine Aktion durchgeführt wird. Das gleiche Schema wird für Systemdrücke, Geschwindigkeiten, Positionen etc. angewandt. Das Unterprogramm „Config Actions“ besteht im Wesentlichen aus Variablenverknüpfungen, die im „Config Mode“ aktiviert werden, wodurch die GUI Berechtigungen erhält welche sie im automatischen Betrieb nicht hat.

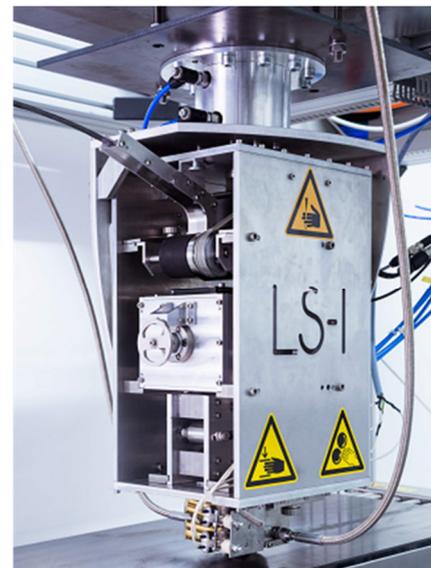
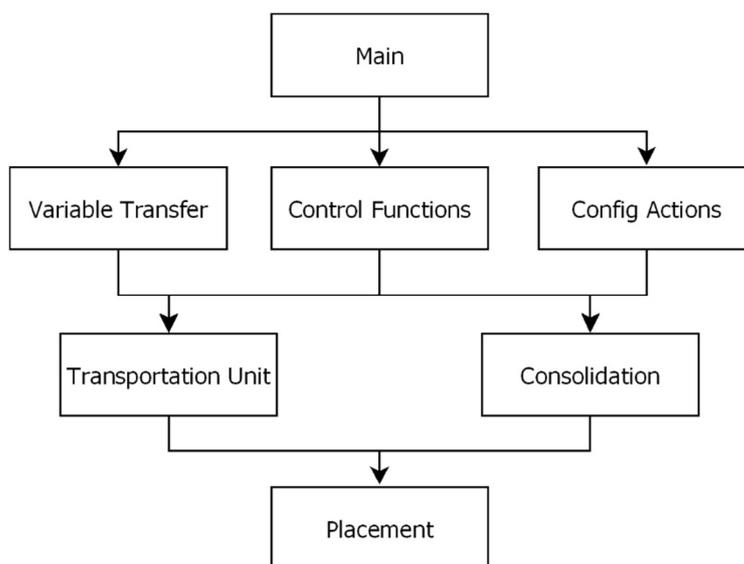


Abb. 25: Hauptstruktur des SPS Programmes am LS-I.

In der nächsten Ebene findet man die Unterprogramme „Transportation Unit“ und „Consolidation“. Letztere ist eine Skalierungsfunktion die zu jeder Zeit in beiden Zylinderkammern Luftdruck hält. Das Unterprogramm „Transportation Unit“ beheimatet den Zustandsautomaten der Materialfördereinheit, dargestellt in Abb. 26. Die Zustände in der Abbildung entsprechen den Funktionsblöcken zur Steuerung des Servomotors. Zu Beginn wird der Servomotor eingeschaltet und die Positionsregelung sowie die prinzipielle Freigabe zur Fahrt in beide Richtungen

erteilt. Mit dem Funktionsblock „Homing“ wird die Achse referenziert, also auf eine beliebige Position gesetzt, meist  $0\text{ mm}$ . Aus diesem Zustand heraus lässt sich nun einer von drei Modi wählen: „MoveAbsolute“, „MoveRelative“ oder „TorqueMode“. Die ersten beiden sind recht ähnlich wobei erster eine absolute Position anfährt, wodurch der Wert der referenzierten Achse eine Rolle spielt. Beim zweiten Funktionsblock wird schlicht ein Wert zum aktuellen addiert und angefahren. Ganz anders verhält es sich beim „TorqueMode“. Hier wird zuerst die Positionsregelung deaktiviert, dann der „Reset“ Funktionsblock ausgeführt, welcher die Achse zurücksetzt und im Anschluss das gewünschte Drehmoment sowie die Richtung angegeben. Aus allen Funktionsblöcken ist ein Übergang in den Fehlerzustand „Error“ möglich.

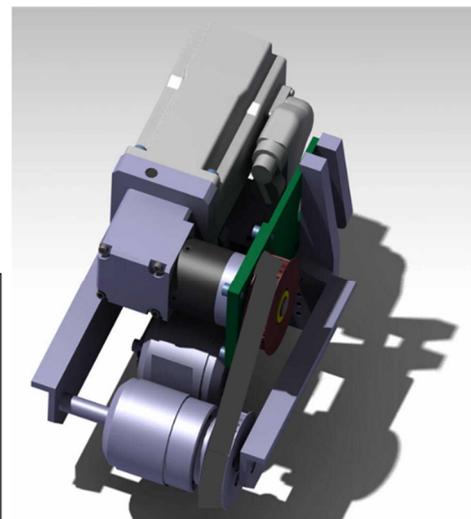
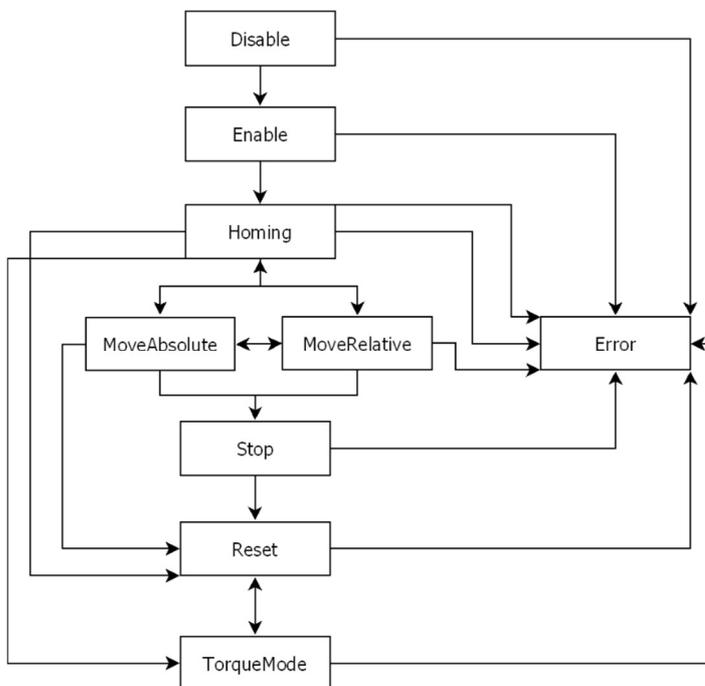


Abb. 26: Zustandsautomat der Materialfördereinheit und eine CAD Ansicht der Einheit.

Das letzte Unterprogramm „Placement“ ist ein Ablaufprogramm, das sich bei jeder abgelegten Bahn wiederholt, siehe Abb. 27. In der Phase „Init“ werden alle Variablen und Timer auf ihren Ausgangszustand zurückgesetzt. Anschließend wird der Startpunkt, wo begonnen wird das Material zu applizieren, mit „Go to Start Point“ angefahren. Während der Bewegung dorthin wird Material bis unterhalb der Kompaktierungsrolle gefördert. Am Startpunkt angekommen werden alle Achsen

zurückgesetzt und auf das Signal zum Legen einer Bahn gewartet („Waiting for Process Start“). Trifft das Signal ein, wird die Kompaktierungsrolle abgesetzt („Move Consolidation down“) und die gewünschte Konsolidierungskraft eingestellt („Apply Pressure“). Anschließend wird die Klemmung des Materials in der Materialfördereinheit gelöst („Open Material Clamping“) und die konfigurierte Hauptheizung angeschaltet („Apply Heating“). Ist diese angelaufen wird der Legeprozess gestartet („Start placing“) und das Material auf der Heizplatte abgelegt. Am Ende der Bahn wird als erstes die Hauptheizung abgeschaltet, dann die Klemmung in der Materialfördereinheit wieder aufgebracht, dann das Material geschnitten („Cut“) und zum Schluss die Konsolidierungsrolle angehoben. Von diesem Zustand aus wird zurück in den „Init“ zurückgewechselt und der Prozess wiederholt.

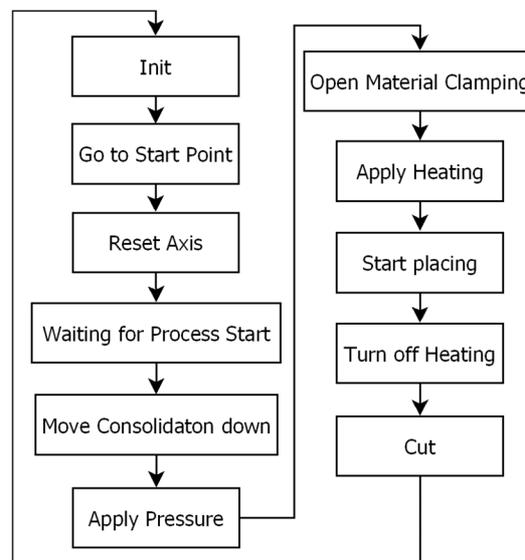


Abb. 27: Ablaufprogramm „Placement“ zur Applizierung des Materials.

### 3.2.3 Benutzeroberfläche (GUI)

Die GUI stellt die Schnittstelle zwischen dem Benutzer und der Maschine dar. Das Ziel einer jeden GUI ist es intuitiv verwendbar zu sein und dadurch in hohem Maß selbsterklärend ist. Eine Möglichkeit die Bedienung zu vereinfachen ist es, die Auswahlmöglichkeiten in der GUI auf das Notwendigste zu beschränken. Eine andere Variante wäre einen Assistenten, z.B. in Form eines Informationsfeldes welches Text oder Piktogramme darstellt, zu integrieren, der dem Benutzer die nächsten verfügbaren Möglichkeiten aufzeigt. Nichtsdestotrotz können

Benutzeroberflächen recht schnell unübersichtlich werden, da normaler Weise ständig neue Funktionen integriert werden. Ordnung in der GUI zu bewahren kann daher mitunter eine enorme Herausforderung darstellen und ist immer ein Kompromiss zwischen Funktionsvielfalt und Praktikabilität.

Für das LS-I und den Überbau wurde, wie bereits erwähnt LabVIEW zur Gestaltung der GUI verwendet, wodurch gewisse Herausforderungen aber auch Chancen entstanden. Die Größte Herausforderung war es reibungslosen Austausch von Steuersignalen zu gewährleisten. Die Implementierung des Datenaustausches auf Basis von ADS über die .NET Schnittstelle erfordert einen zyklischen Datenaustausch. Folglich wird jeder Eintrag jedes Arrays in jedem Zyklus überschrieben oder gelesen. Wenn man also ein Ausgangssignal (Boolean) geben möchte, dass nur bis zum Start eines Vorganges aktiv sein soll muss eine weitere Eingangsvariable (Boolean) herangezogen werden, welche von LabVIEW ausgelesen werden muss und programmiertechnisch eine Rücksetzung des Ausgangssignals hervorruft. Es entstehen dadurch riesige Strukturen und die Komplexität des Programms nimmt unnötig und überbordend zu. Außerdem bringt LabVIEW als graphische Programmiersprache eine andere Systematik zur Erstellung von Programmen mit sich. Text basierte Sprachen werden Zeile für Zeile abgearbeitet wodurch immer klar ist an welcher Stelle sich das Programm gerade befindet. LabVIEW hingegen simuliert eine Art Gleichzeitigkeit von Vorgängen, wodurch für den Programmierer nicht immer eindeutig ist welcher Teil des Codes zuerst ausgeführt wird. Wenn der Programmierer also eine Aktion vor einer anderen Aktion ausgeführt haben möchte, muss er speziell mit den sogenannten Sequenz Elementen dafür Sorge tragen. Des Weiteren bietet LabVIEW keine standardmäßige Echtzeitumgebung, wodurch es notwendig wird sich um das Timing von Lese- bzw. Schreibprozessen zu kümmern. Im Bereich des Lesens bzw. der Datenverarbeitung zeigt LabVIEW hingegen seine großen Stärken. Es ist optimiert auf die Verarbeitung großer Datenarrays und erlaubt einfache Zusammenführung von Daten aufgrund des datenstrombasierten Designs. Eine besondere Stärke von LabVIEW ist die Bildverarbeitung welche auch am LS-I zur Prüfstandsüberwachung eingesetzt wurde.

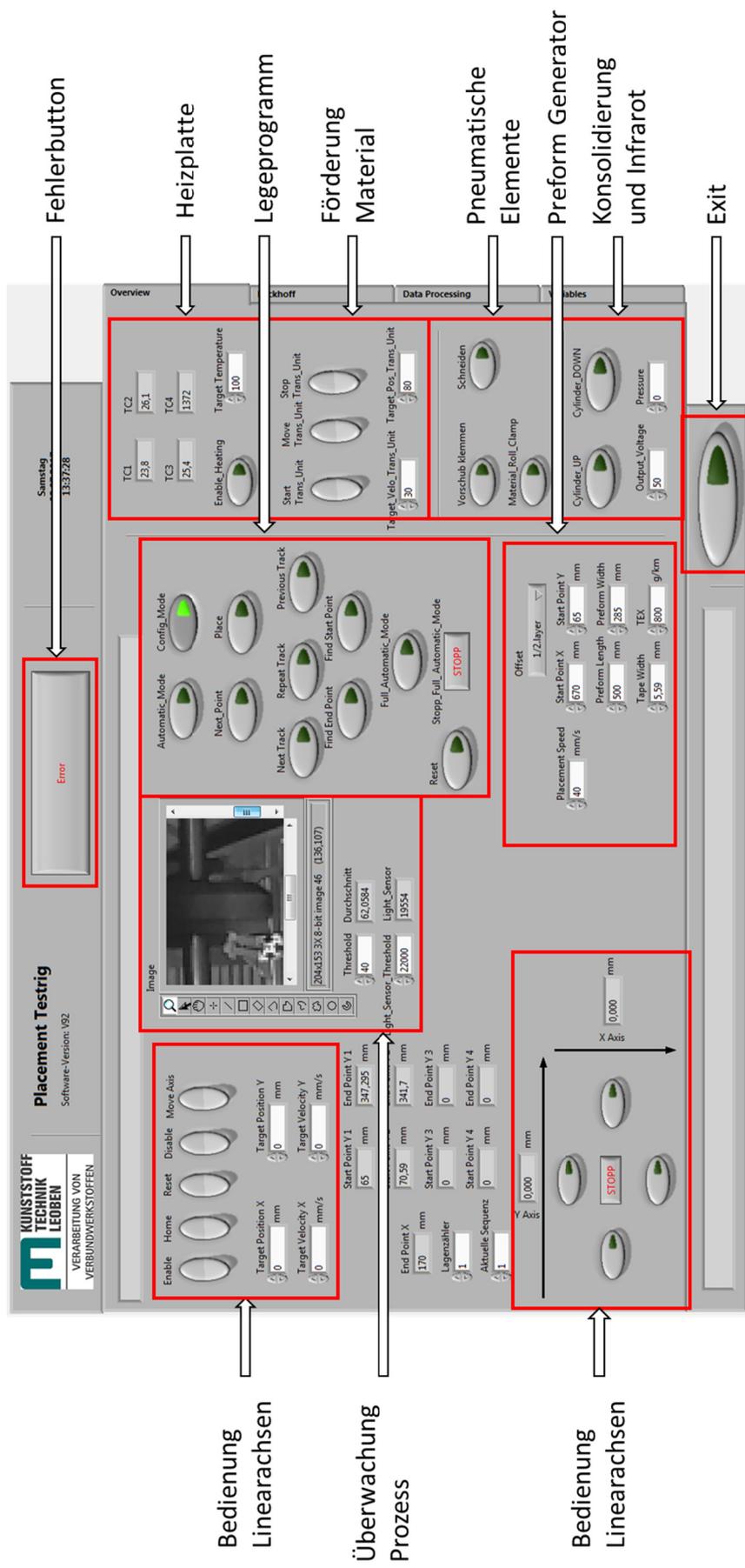


Abb. 28: GUI im „Config Modus“ nach dem Starten der Maschine.

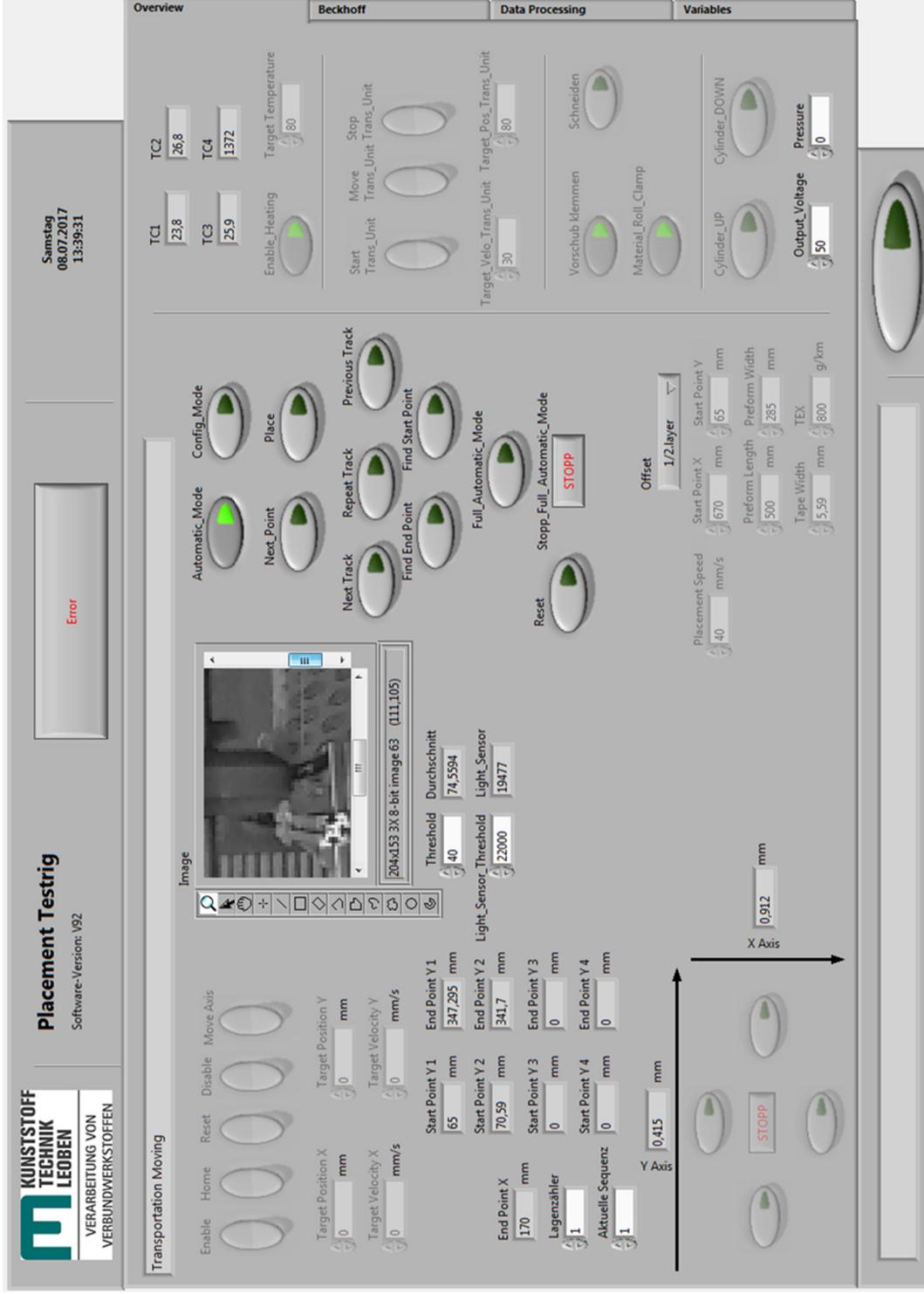


Abb. 29: GUI im „Automatic Mode“ mit ausgegrauten Elementen.

In Abb. 28 und Abb. 29 ist die GUI in zwei unterschiedlichen Modi dargestellt. Wie bereits erwähnt erlaubt der „Config Mode“ aus Abb. 28 eine Vielzahl an Aktionen, zur Konfiguration des LS-I vor dem Legeprozess. Der klassische Prozess den LS-I hochzufahren ist, alle Achsen einzuschalten und zu referenzieren, sowie die Hauptheizung zu testen. Dann die Heizplatte aufzuwärmen und die im Falle der Herstellung einer Preform die gewünschten geometrischen Parameter in den Preform Generator einzugeben. Nachdem die Heizplatte die gewünschte Temperatur konstant hält, kann auf den „Automatic Mode“ geschaltet werden. In diesem Modus, wie in Abb. 29 zu erkennen werden einige Funktionen ausgegraut und deaktiviert wodurch der Bediener in seinen Aktionen eingeschränkt wird. In diesem Modus kann der Benutzer lediglich Anfragen an die SPS stellen, welche Aktion er gerne durchführen würde und diese entscheidet dann, ob die gewünschte Aktion erlaubt ist oder nicht. Der Bediener kann immer noch großen Einfluss auf den Legeprozess nehmen. Stellen sich die gewählten Parameter als günstig heraus kann der Bediener in den „Full Automatic Mode“ wechseln. Dieser ist so ausgelegt, dass eine gesamte Lage einer Preform mit den gewählten Maschinenparametern gelegt wird. Am Ende der Lage wird der Modus automatisch beendet, bzw. wenn ein Fehler währenddessen auftritt. Dazu wurden zwei Programme welche den Prozess überwachen entwickelt und implementiert.

### **3.2.4 Prüfstandsüberwachung**

Es wurden zwei LabVIEW Programme zur automatischen Erkennung von Fehlern im Legeprozess einer Preform entwickelt. Zum einen wurde bereits erwähnt, dass der Roving von einer Rolle abgewickelt fehlerbehaftet sein kann, z.B. durch Verdrillungen. Diese haben solange keine Auswirkung auf den Legeprozess bis sie sich in den Legekopf vorgearbeitet haben. Natürlich können Maßnahmen getroffen werden um ein Fortpflanzen der Verdrillungen zu erschweren, nur können sie nicht vollständig verhindert werden. Deshalb wurde der Lichtgabelsensor, welcher ursprünglich zur Materialeingangsmessung verwendet wurde mit einem zusätzlichen Programm verknüpft welches überprüft ob der Roving nicht unter eine gewisse minimale Breite fällt. Tut er dies, hat sich die Verdrillung bis kurz vor das LS-I fortgepflanzt und es herrscht Handlungsbedarf. Der „Full Automatic Mode“ wird

abgebrochen und der Bediener aufgefordert die Verdrillung zu beseitigen. Anschließend kann der Legeprozess an derselben Stelle fortgesetzt werden.

Ein zweiter sehr häufig auftretender Fehler war anhaften des Binderrovings an der Kompaktierungsrolle. Es wickelte sich der Binderroving um die Rolle herum, anstatt auf dem Substrat zu haften, siehe Abb. 30. Dadurch, dass mit dem Infrarotstrahler das Substrat aufgeheizt und in Folge mit erweichendem Binder instabiler wurde, waren die Voraussetzungen gegeben, mit der umwickelten Rolle Teile des Substrats mitabzuziehen.

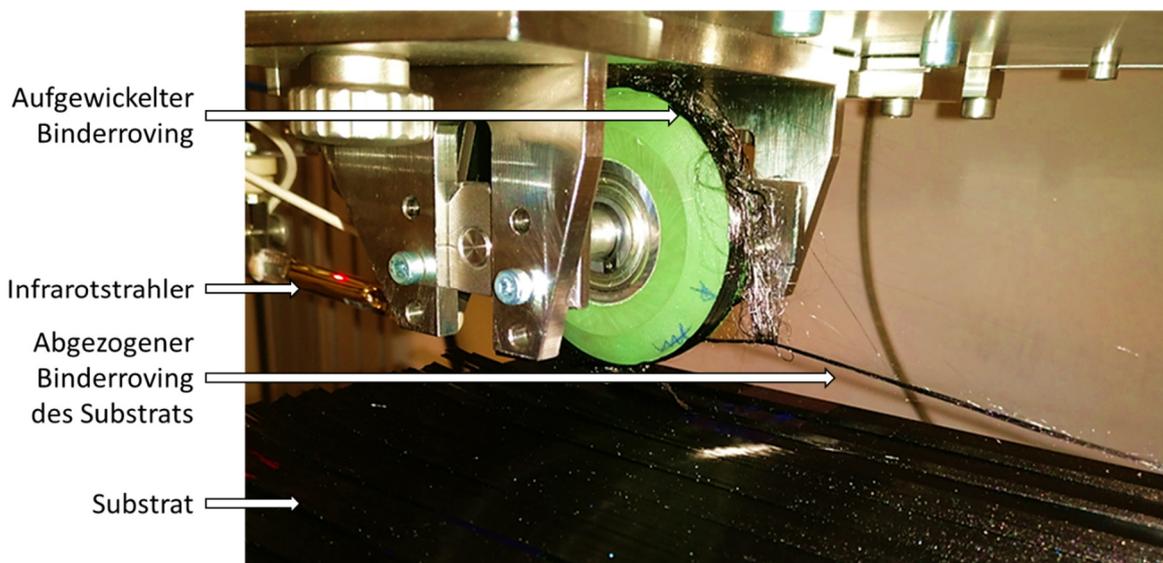


Abb. 30: Kompaktierungsrolle mit Binderroving umwickelt und teilweise abgezogenem Substrat.

Das LabVIEW aus Abb. 31 verhindert diese Situation indem es das anhaften rechtzeitig erkennt und geordnete Notmaßnahmen einleitet. Die Kamera aus Abb. 20 stellte einen Videofeed zur Verfügung der mit LabVIEW verarbeitet wurde. In einem ersten Schritt musste auf die Kamera mit einer speziellen Bibliothek zugegriffen werden, das aktuelle Bild ausgelesen und in einen Bildcontainer transferiert werden. Aus dem Bild wurde anschließend ein Kontrollbereich identifiziert und herausgeschnitten. Dieser wurde dann auf seinen Grauwert untersucht und mit einem Erwartungswert verglichen. Waren die Werte zu weit voneinander entfernt hatte sich ein Roving begonnen um die Rolle zu wickeln. In Folge wurde ein Fehlerzustand ausgelöst der die Rolle abhob und den Roving mit der pneumatischen Schere durchtrennte.

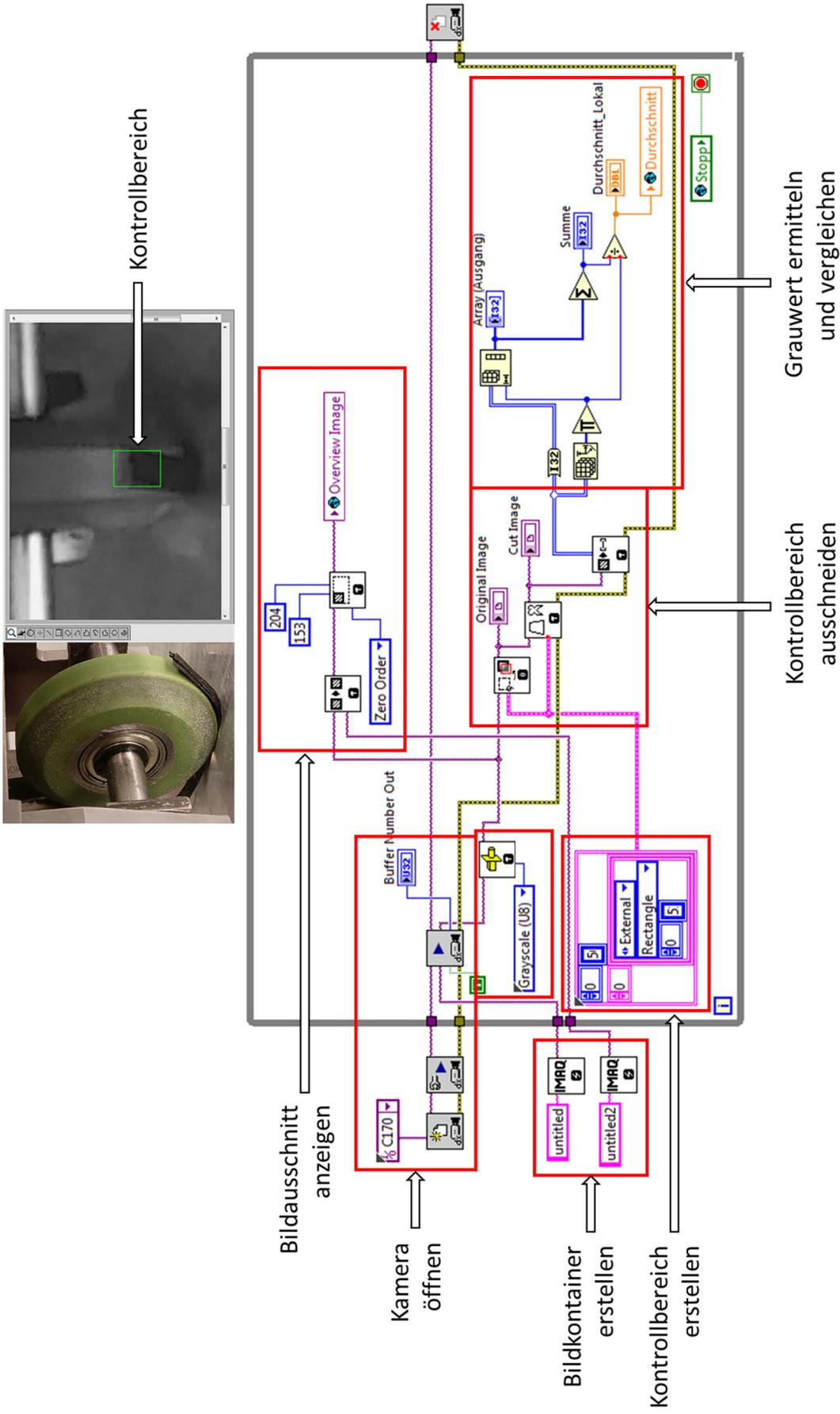


Abb. 31: LabVIEW Code der Anwendung zum Detektieren von haftenden Rovings an der Konsolidierungsrolle.

## 4 Material

Im nachfolgenden Kapitel werden die verwendeten Materialien, welche zur Herstellung unterschiedlicher Preforms notwendig waren vorgestellt. Es wurden unterschiedliche Bindersysteme als auch verschiedene Faserhalbzeuge eingesetzt, die mit verschiedenen Methoden zu Preforms verarbeitet wurden. Des Weiteren werden die Matrixmaterialien vorgestellt, welche beim Imprägnierprozess zum Einsatz kamen. Dabei liegt der Fokus auf deren fluidmechanischen Eigenschaften und nicht auf etwaigem Vernetzungsverhalten.

### 4.1 Binder

Sowohl Thermoplasten als auch Duomere in unterschiedlicher Form (Pulver, Hotmelt) wurden bei der Herstellung verschiedener Preforms eingesetzt, wie in Tabelle 2 dargestellt. Der EPR5390 Binder von Hexion [92] wurde hierbei als Referenz gewählt, da dieser weit verbreitet ist und dem 1002F ähnlich ist. Es handelt sich um einen Epoxid-Binder auf Basis von Bisphenol-A mit einer Erweichungstemperatur zwischen 80 °C und 90 °C. Es ist kein Härter beigefügt, wodurch sich der Binder auch mehrmals thermisch aktivieren lässt was z.B. bei mehrstufigen Umformprozessen notwendig ist [92]. Der Binder wurde im speziellen untersucht um dessen Einfluss auf das Imprägnierverhalten von Preforms zu verstehen. Dazu wurde er hinreichend bezüglich seiner Löslichkeit, Benetzungsverhaltens und Viskosität in reiner und gemischter Form untersucht.

Tabelle 2: Auflistung der eingesetzten Binder zur Preformherstellung.

<b>Produkt- bezeichnung</b>	<b>Kurz- bezeichnung</b>	<b>Hersteller</b>	<b>Lieferform</b>	<b>Chemische Zusammensetzung</b>
Epikote Resin 05390	EPR5390	Hexion	Pulver	Epoxidharz
EPON Resin 1002F	1002F	Hexion	Pulver	Epoxidharz
NatureWorks PLA Polymer 4042D	PLA 4042D	NatureWorks	Filament	Polylactide

Der Binder 1002F von Hexion [93] war auf dem Binderoving, welcher für die Herstellung von ADFP Preforms verwendet wurde aufgebracht. Er weist einen ähnlichen Erweichungspunkt wie der EPR5390 auf, welcher bei 80 °C bis 88 °C liegt. Ursprünglich wurde er als Additiv für die Produktion von Flüssiglacken als auch Pulverlacken verwendet. Aufgrund seiner Eigenschaften lässt er sich aber auch als Pulverbinder einsetzen da er kaum Tendenzen zum Klumpen unter erhöhter Raumtemperatur aufweist. Im Zuge von Untersuchungen wurde die Viskosität der reinen Binder untersucht, siehe Abb. 32. Es wurde ein Anton Paar Physica MCR501 Rheometer mit einem Platte-Platte Setup verwendet. Die eingestellte Spalthöhe lag bei 0,5 mm bei einem Plattendurchmesser von 50 mm. Wie in Abb. 32 zu erkennen weisen die Binder eklatante Unterschiede in Bezug auf deren Viskosität auf.

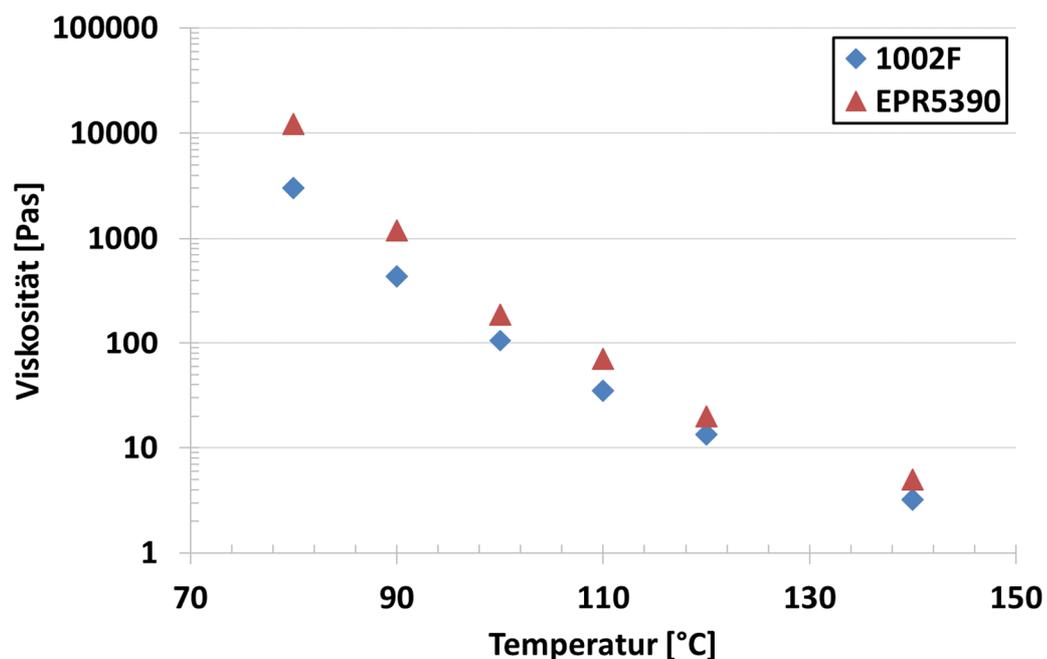


Abb. 32: Viskositätsverhalten der Epoxidbinder bei einer Schergeschwindigkeit von 1 rad/s.

Der dritte eingesetzte Binder war PLA 4042D von NatureWorks [94], welcher mit einem FDM 3D-Druck Prozess auf Textile Halbzeuge aufgebracht wurde. Es handelt sich hierbei um ein Standard 3D-Druck Werkstoff, welcher nicht weiter auf rheologisches Verhalten untersucht wurde.

## 4.2 Textile Halbzeuge

Für die Herstellung der Preforms wurden verschiedene Textilien und textile Halbzeuge herangezogen, welche in Tabelle 3 aufgelistet sind. Das eingesetzte Gewebe (Sigratex KDL 8049 [95]), im Gegensatz zu den Gelegen wurde ausgewählt, da es aufgrund seiner Ondulierungen gut auf einem 3D-Druckbett aufspannbar ist. Des Weiteren weißt es keine zusätzlichen Hilfsstoffe zur inneren Fixierung der Textilstruktur auf, wodurch der Einfluss des Binders besser untersucht werden kann.

Tabelle 3: Auflistung der eingesetzten textilen Halbzeuge.

Produkt- bezeichnung	Hersteller	Textil Typ	Spezifisches Gewicht	Anmerkung
Sigratex KDL 8049	SGL	CF Gewebe Leinwandbindung	240 g/m <sup>2</sup>	
Saertex 7003784	Saertex	0°/90° CF NCF Gelege mit EPR5390	572 g/m <sup>2</sup>	15 g/m <sup>2</sup> EPR5390
Saertex 7001332	Saertex	0°/90° CF NCF Gelege	557 g/m <sup>2</sup>	
Ohne Angabe	Ohne Angabe	Binderroving 12K HTS40	800 tex	60tex 1002F

Die Gewebe von Saertex (Saertex 7003784, Saertex 7001332) wurden gewählt da es sich hierbei um das gleiche Gelege handelt einmal mit Binder ausgestattet und einmal ohne Binder. Das Gelege besteht aus zwei Einzelschichten in *0°-Richtung* (283 g/m<sup>2</sup>) und *90°-Richtung* (268 g/m<sup>2</sup>) orientiert, welche mit einem Polyester Faden (74 tex, 6 g/m<sup>2</sup>) vernäht wurden.

Der Binderroving welcher zur Verfügung stand war einer der wenigen verfügbaren Rovings (Abb. 33) und zeichnet sich durch eine vergleichsweise hohe Knickfestigkeit aus, wodurch er relativ leicht geführt werden kann. Der Binder ist beidseitig auf dem Roving aufgebracht und hat einen Gewichtsanteil von 7 % am Roving, was einem Volumenanteil von 12 % unter Berücksichtigung der Dichte

entspricht. Die Partikelgrößen reichen von  $0,02\text{ mm}$  bis  $0,3\text{ mm}$  und sind relativ gleich verteilt.

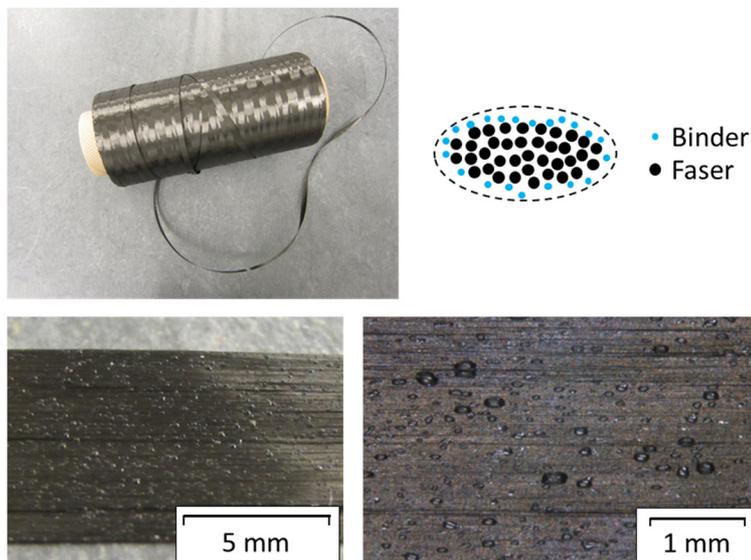


Abb. 33: Darstellung des verwendeten Binderrovings in Rollenform sowie in Nahaufnahmen.

Die mittlere Breite des Rovings liegt bei  $6,2\text{ mm}$  wobei die Breite des Rovings starken Schwankungen unterliegt, wie in Abb. 34 zu erkennen ist. Des Weiteren traten Verdrillungen auf, welche durch die Datenpunkte außerhalb der eingezeichneten Streuungsbreite zu erkennen sind.

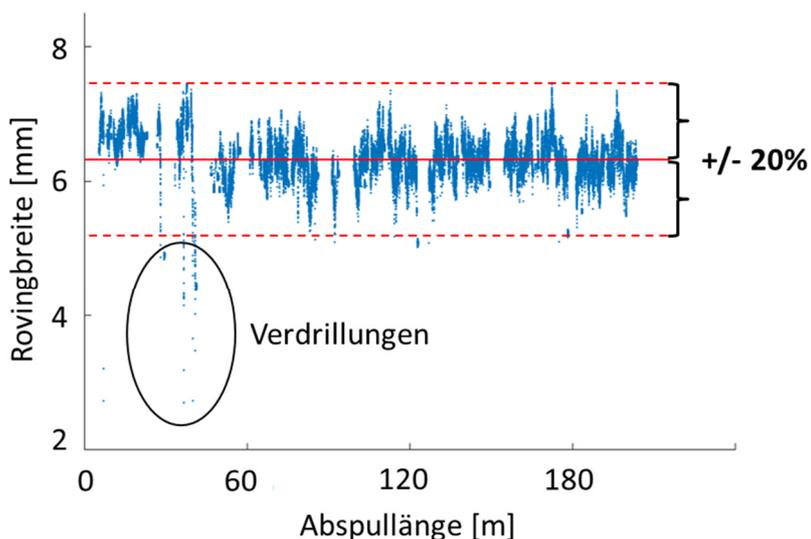


Abb. 34: Breiteneingangsmessung eines Binderrovings während eines ADFP Preform Herstellungsprozesses zur Bestimmung der mittleren Breite.

### 4.3 Injektionsfluide

Zur Charakterisierung von Preforms bezüglich ihrer Tränkungseigenschaften werden üblicher Weise Permeabilitätsversuche durchgeführt. Dabei kommen Injektionsfluide zum Einsatz. Diese Fluide müssen über die Versuchsdauer, welche im Bereich weniger Minuten anzusiedeln ist konstante Viskositätseigenschaften aufweisen. Reaktive Harzsysteme können daher kaum eingesetzt werden, außer die Versuchsdauer kann sehr kurz gehalten werden, so dass kaum eine Änderung der Viskosität durch Vernetzung des Systems stattfindet. Diese Herangehensweise wiederum lässt sich nur in speziellen Fällen realisieren und kann daher nicht allgemein angewandt werden. Zur einfachen Handhabung sollte das Messfluid außerdem nicht angemischt werden müssen und keine besonderen Anforderungen an den Arbeitsschutz stellen. Darüber hinaus sind die Viskosität sowie das Benetzungsverhalten des Messfluids maßgeblich an dem Imprägnierverhalten im Mikrobereich beteiligt. Daher sollte das entsprechende Ersatzfluid ähnliche Eigenschaften aufweisen. Den Kompromiss stellen im Allgemeinen Pflanzenöle dar, welche bei Raumtemperatur um die  $100 \text{ mPas}$  an Viskosität aufweisen. Für die vorliegende Arbeit wurde, wie in Abb. 35 dargestellt Osana Pflanzenöl für den Hauptteil der Permeabilitätsversuche verwendet.

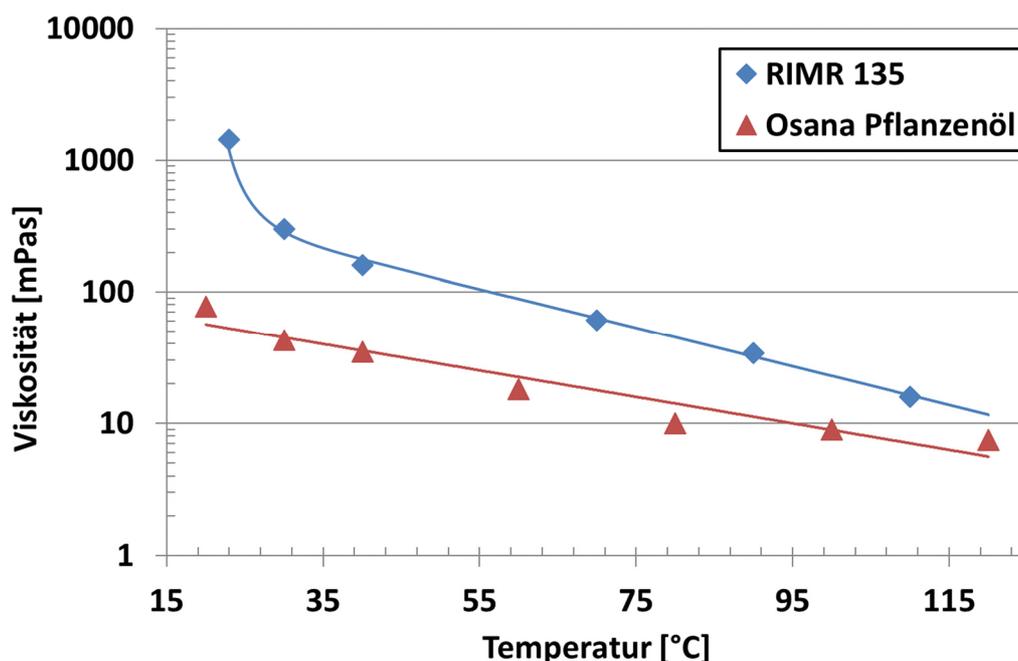


Abb. 35: Viskosität der Messfluide zur Preform-Imprägnierung.

Für die Füllstudien und eine Permeabilitätsmessreihe unter prozessnahen Bedingungen wurde RIMR135 verwendet. Wie in Abb. 35 zu erkennen ist unterscheiden sich die Fluide sowohl in deren Charakteristik als auch in absoluten Werten. Besonders auffällig ist das Doppelsexponentielle Verhalten von RIMR135 im Vergleich zum Osana Pflanzenöl. Des Weiteren handelt es sich beim Osana Pflanzenöl um ein newtonsches Fluid, welches keine Abhängigkeit der Viskosität über die Scherrate aufweist [96–98]. Im Gegensatz dazu wies das RIMR135 dilatantes, oder scherverdickendes Verhalten auf, wie aus Abb. 36 zu entnehmen ist. Wie aber eindeutig zu erkennen ist, fällt der Einfluss zwischen  $1$  und  $100 \text{ rad/s}$  eher gering aus. Daher kann unter der Voraussetzung von niedrigen Fließgeschwindigkeiten während des Permeabilitätsversuch auch solch ein dilatantes Fluid eingesetzt werden. Es wurde eine hohe Korrelation zwischen Scherfrequenz und Viskosität beobachtet, daher ist dies nach Mustafa [99] auf das Dehnungsverhalten von Epoxidharzen zurückzuführen.

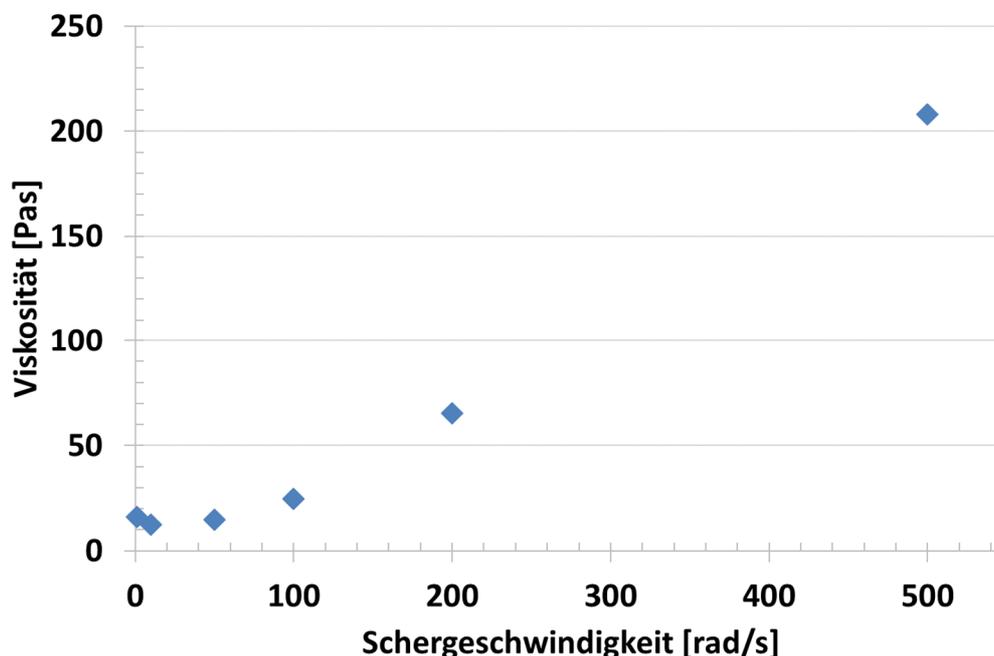


Abb. 36: Scherratenabhängigkeit der Viskosität von RIMR 135 bei  $110 \text{ }^\circ\text{C}$ .

## 5 Herstellung bebinderter Preforms

Für die vorliegende Arbeit wurden verschiedene Preforms mit unterschiedlichen Verfahren hergestellt. Es wurde darauf Wert gelegt, einen Querschnitt verfügbarer Preforming Verfahren abzubilden. Neben Pulver bebinderen Textilien, welche gemeinhin am häufigsten verwendet werden [100], kam ADFP zur Preformherstellung zum Einsatz [7, 27]. Die Herstellung von Preforms mittels ADFP kann immer noch als experimentelle Sonderform der Legeprozesse gesehen werden, mit zahlreichen offenen Fragestellungen. Der dritte untersuchte Preformtyp umfasste FDM bedruckte Preforms, welche zur gezielten Manipulation von Permeabilitätseigenschaften eingesetzt wurden [8, 101].

### 5.1 ADFP Preforms

Im Folgenden wird der Prozess, so wie er an der ADFP Anlage des Lehrstuhls für Verarbeitung von Verbundwerkstoffen im Rahmen des Christian Doppler Labors für Hocheffiziente Composite Verarbeitung umgesetzt wurde beschrieben.

#### 5.1.1 Prozessbeschreibung

Wie bei den meisten Verarbeitungsprozessen entscheiden auch beim ADFP die Prozessparameter Druck, Zeit und Temperatur über die Qualität des Endprodukts. Im Fall von ADFP werden diese Prozessparameter über stellvertretende Maschineneinstellungen adjustiert. Der Druck wird mittels der applizierten Kompaktierungskraft welche auf die flexible Kompaktierungsrolle wirkt eingebracht. Die Ablegegeschwindigkeit entscheidet über die einwirkende Dauer der Kompaktierungskraft auf den Binderoving. Die Temperatur bzw. der Wärmeeintrag können an mehreren Stellen und über verschiedene Methoden eingebracht werden. Hierbei unterscheidet man zwischen der Beheizung des Substrats, also des bereits abgelegten Materials und dem Wärmeeintrag unmittelbar vor dem Ablegen des Materials.

Zu Beginn des Prozesses müssen vorbereitende Maßnahmen getroffen werden. Das Werkzeug, in diesem Fall eine eloxierte Aluminiumplatte wird mit einem Trennmittel versehen und anschließend aufgeheizt. Die Oberflächentemperatur am

Werkzeug lag bei  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , also ca.  $12\text{ }^{\circ}\text{C}$  oberhalb der Erweichungstemperatur des Binders, welcher am Binderoving eingesetzt wird.

Den eigentlichen Legeprozess kann man in zwei Phasen unterteilen, die Aufbringung der Erstlage und alle weiteren Lagen. Die Problematik der Erstlagenaufbringung ist ein hinreichend bekanntes Problem, welches man auf unterschiedliche Weisen lösen kann [102–104]. Im Fall der vorliegenden Arbeit wurde das Problem mit adaptierten Prozessparametern in der Erstlage gelöst, sowie einer vorgelagerten Werkzeugplatte, welche nicht eingetreten wurde (Abb. 37). Die Ablegegeschwindigkeit wurde auf  $40\text{ mm/s}$  reduziert und die Kompaktierungskraft auf  $130\text{ N}$  erhöht. Außerdem wurde das Infrarot-Heizelement zur Erwärmung der Substrat Oberseite deaktiviert. Die Kombination dieser Maßnahmen bewirkte hinreichende Haftung für den restlichen Prozess.

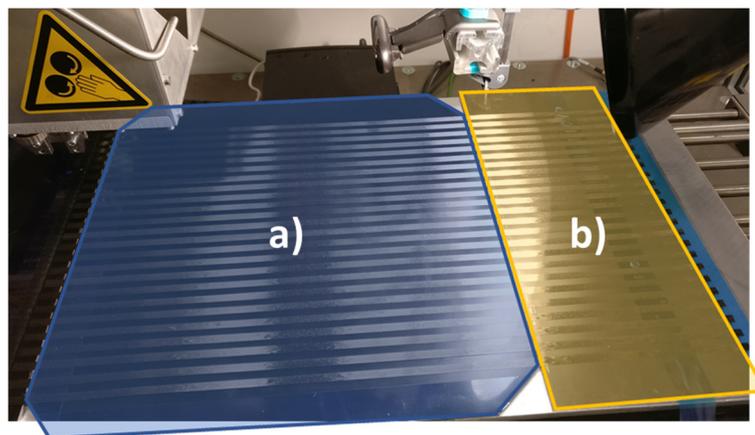


Abb. 37: a) Plattenwerkzeug mit Trennmittel versehen in der Dimension von  $350 \times 350\text{ mm}$  und b) nicht eingetrennte Platte.

Ab der zweiten Lage wurde eine Ablegegeschwindigkeit von  $100\text{ mm/s}$  und eine Kompaktierungskraft von  $50\text{ N}$  bzw.  $130\text{ N}$ , bei aktiviertem Infrarot-Heizelement eingestellt. Die Herstellung einer Preform besteht letztendlich aus der Wiederholung eines diskreten Ablegeprozesses einer Bahn. Im Folgenden werden die Prozessschritte aufgelistet, sowie in Abb. 38 dargestellt:

1. Anfahren des Startpunkts und vorschieben des Materials bis unter die Kompaktierungsrolle,
2. absetzen der Kompaktierungsrolle inklusive anfahren der voreingestellten Kompaktierungskraft,

3. lösen der Klemmung der Materialvorschubeinheit und anfahren der voreingestellten Infrarot-Heizelement Leistung,
4. starten des Ablegeprozesses mit voreingestellter Ablegegeschwindigkeit,
5. stoppen des Ablegeprozesses, abschalten des Infrarot-Heizelementes, klemmen der Materialvorschubeinheit und schneiden des Binderrovings,
6. abheben der Kompaktierungsrolle und anfahren des nächsten Startpunktes.

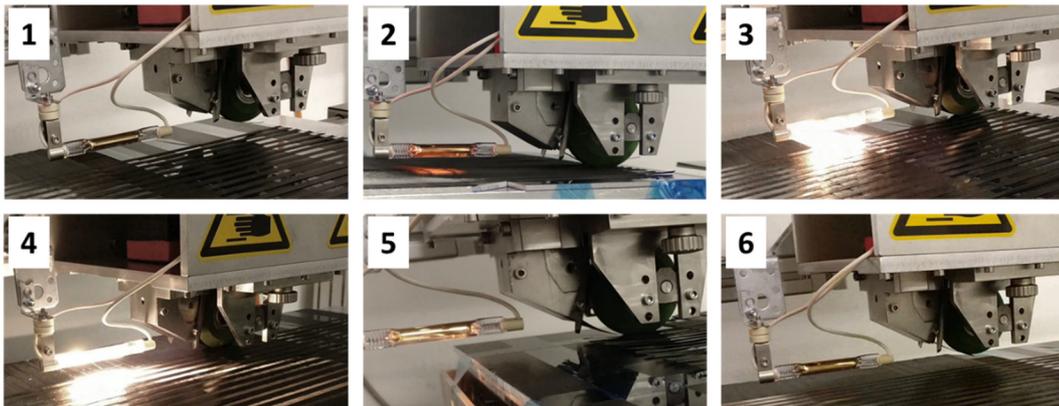


Abb. 38: Prozessablauf zur Preformherstellung mittels ADFP gemäß vorrangigener Liste.

Der Legeprozess einer Lage war so aufgebaut, dass jeweils sogenannte Halblagen erzeugt wurden. Diese bestehen aus Rovings mit einem Abstand von  $6\text{ mm}$  zueinander. Die zweite Halblage wurde wiederum um eine Rovingbreite versetzt, wodurch aus zwei Halblagen eine volle Lage entstand. Nach jeweils zwei vollen Lagen wurde entlang der rechten Kante des Preformwerkzeugs geschnitten (siehe Abb. 37 zwischen den markierten Feldern). Anschließend wurde die Preform um  $90^\circ$  gedreht wie in Abb. 39 zu erkennen ist.

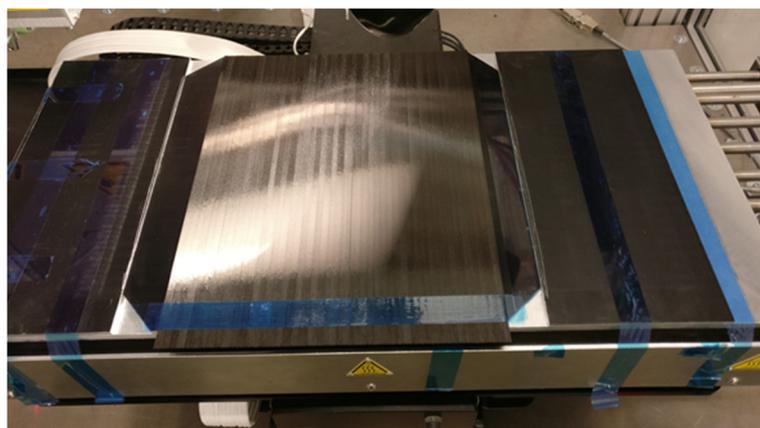


Abb. 39: 2-Lagen Preform gedreht um  $90^\circ$  bereit zur Applikation der Lagen 3 und 4.

Nach der Fertigstellung der Preform wurde das Preformwerkzeug entfernt und die Preform nach einer kurzen Abkühlphase abgelöst. Anschließend wurden die überstehenden Teile in den Bereichen der  $45^\circ$  Kanten mittels eines Textilcutters entfernt. Zusätzlich wurden Preforms von selber textiler Struktur per Hand aufgelegt und an den Rändern miteinander verklebt. Sie dienen als Referenz.

### 5.1.2 Preformaufbau

Es wurden Preforms mit  $290 \times 290 \text{ mm}$  Grundfläche in einem  $0^\circ/90^\circ$ -Aufbau, zur weiteren Analyse hergestellt. Die Preform Dimensionen ergaben sich aus geometrischen und anlagenbezogenen Randbedingungen des Legesystems (LS-I). Ausschlaggebend war hierbei die anlagentechnische Limitierung in nur eine Richtung Material ablegen zu können. Dadurch entstand die Notwendigkeit insgesamt fünf Mal während der Preformherstellung den aktuell vorliegenden Lagenaufbau um  $90^\circ$  zu verdrehen. Folglich war die zweite anlagentechnische Limitierung die kürzere der Seitenlängen des aufgespannten Plattenwerkzeugs, welche die maximale Preformseitenlänge begrenzt. Die fertige *12-Lagen* Preform wies ein Flächengewicht von  $286 \text{ g/m}^2$  auf wobei der Anteil des Binders  $20 \text{ g/m}^2$  ausmacht. Die Porosität der Preform bei einer Dicke von ca.  $1,7 \text{ mm}$  lag bei etwa  $45 \%$ , was gemeinhin als bereits ziemlich dicht gepackt gewertet werden kann.

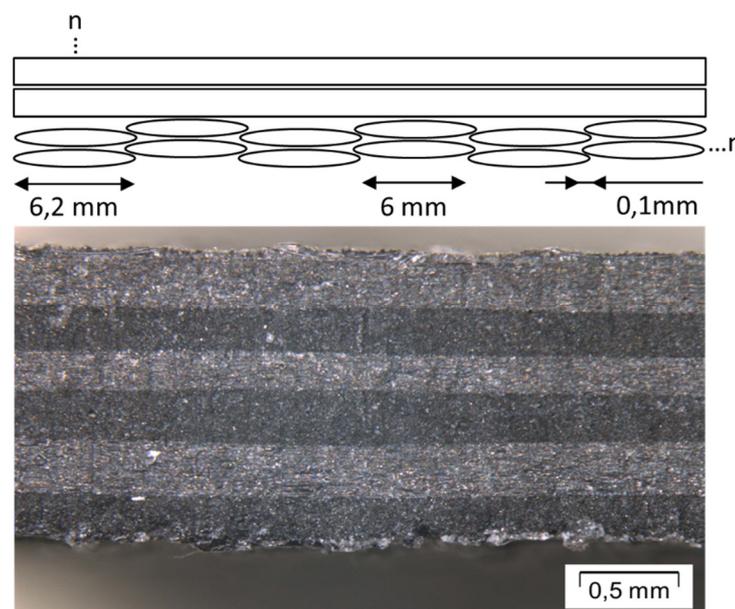


Abb. 40: Aufbau einer ADFP Preform bestehend aus 12 Lagen mit einer Dicke von  $1,7 \text{ mm}$ .

## 5.2 FDM bedruckte Preforms

In diesem Abschnitt werden der die Methodik wie auch der Preformaufbau der FDM bedruckten Preforms erläutert. Die angewandte Methode wurde im Zuge zweier Studien entwickelt und optimiert [105].

### 5.2.1 Prozessbeschreibung

Zur Herstellung FDM bedruckter Preforms mussten mehrere Prozessschritte, zu sehen in Abb. 41, durchgeführt werden. Am Beginn der Prozesskette stand der Zuschnitt der verwendeten Gewebe für die Studie (siehe Tabelle 3) in der Dimension  $400 \times 500 \text{ mm}$ . Diese Dimension wurde gewählt da anschließend an das bedrucken des Textils ein Teilbereich herausgeschnitten wurde, welcher frei von Inkonsistenzen durch Einlaufeffekte war [8, 105].

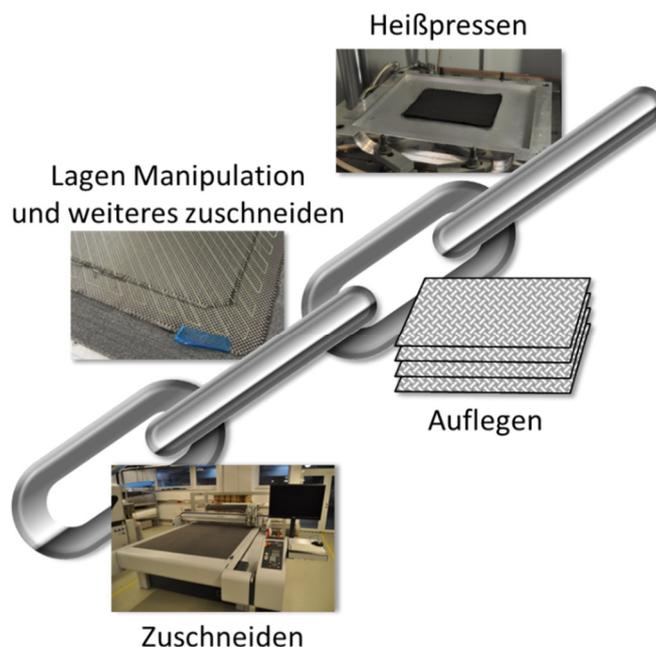


Abb. 41: Prozesskette zur Herstellung FDM bedruckter Preforms [8].

Die Manipulation der Textilien durch FDM bedrucken erfolgte in einem Drucker der Firma Hage, welcher sich durch ein besonders großes Druckbett auszeichnet ( $420 \times 594 \text{ mm}$ ). In der vorangegangenen Studie [105] wurde festgestellt, dass zum kontinuierlichen Bedrucken eines Carbon Gewebes sowohl kontinuierliche Bewegung der Extrusionsdüse als auch kontinuierliche Extrusion notwendig sind, um annähernd gleichbleibende Adhäsion zwischen dem thermoplastischen

Extrudat und dem Gewebe zu gewährleisten. Eine mögliche Erklärung dieses Effekts könnte durch die auf den Kohlenstofffasern aufgebrachte Schlichte gefunden werden. Diese ist normalerweise dahingehend optimiert, gut mit Epoxidharzen zu harmonisieren. Die Prozessparameter des FDM Druckers sowie Druckmuster werden in Abb. 42 und Abb. 43 dargestellt. Die Pfade, welche das Druckmuster bilden wurden in für den 3D-Drucker verständlichen G-Code übersetzt für entsprechende Bewegungen und Extrusion. Die Herstellung einer Lage benötigte ca. 10 Minuten [8, 105].

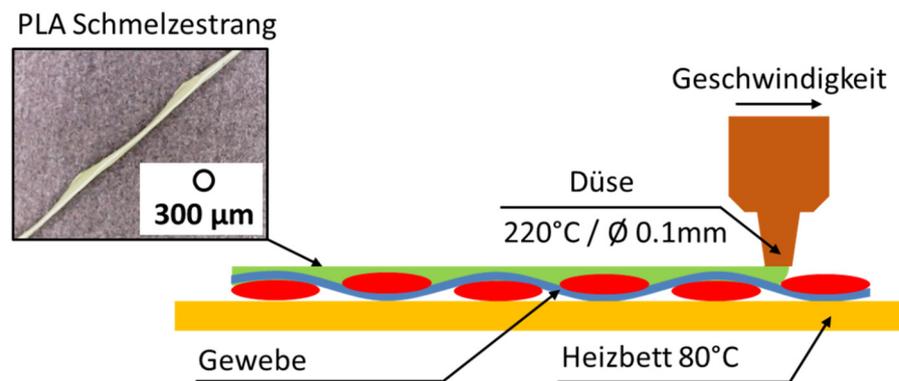


Abb. 42: Schematische Darstellung des FDM 3D-Druck Prozesses auf ein technisches Textil [8].

Es wurden zwei spezifische Muster auf die Textilien gedruckt. Die Preforms, welche aus 90° bedruckten Textilien bestehen, werden in Folge als *P90* und jene, die aus 45° bedruckten Textilien bestehen, als *P45* bezeichnet. Die unbedruckten Preforms, welche als Referenz dienen, werden schlicht als *P* bezeichnet. Jede der Varianten wurde mit zwei zueinander versetzten Startpunkten realisiert, wodurch sich ein Versatz im Druckmuster ergab. Der Bindergewichtsgehalt wurde auf 5 % pro Lage eingestellt. Daraus wurde der zu extrudierende Massestrom an PLA (Dichte  $1,25 \text{ g/cm}^3$ ) pro *mm* Achsbewegung berechnet und in G-Code übersetzt [8, 105].

Im Anschluss an das Bedrucken wurden die Lagen ein zweites Mal auf eine geringere Größe von  $290 \times 390 \text{ mm}$  zugeschnitten. Hierbei wurde mit einer Kunststoffschablone gearbeitet. Der verbleibende Teil beinhaltet keine Verbindungsstränge mehr [8, 105].

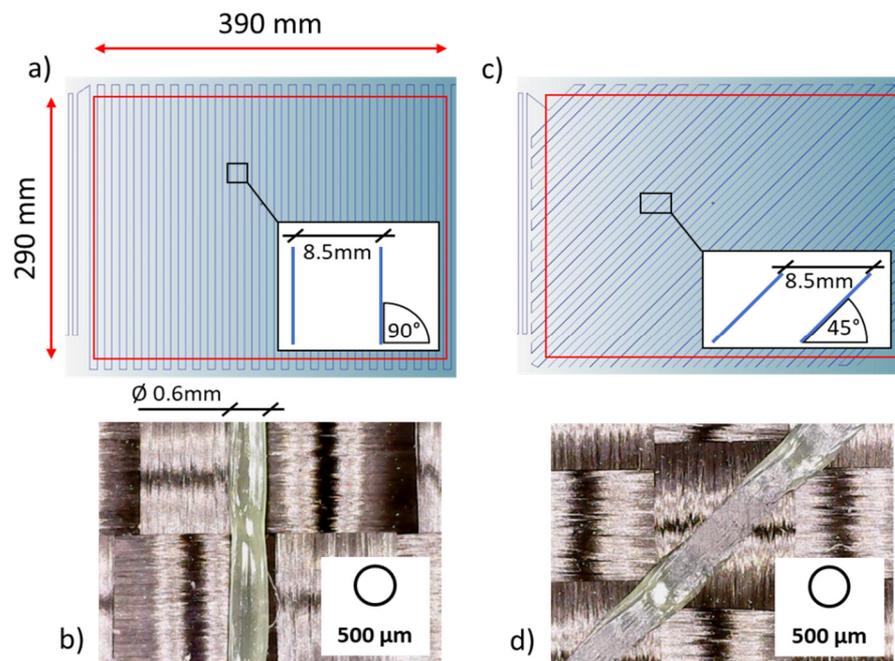


Abb. 43: Generierter G-Code der Pfade einer a) 90° Modifikation c) 45° Modifikation sowie Auflichtmikroskopansichten von Segmenten des PLA Binders mit b) 90° Orientierung bzw. d) 45° Orientierung [8].

### 5.2.2 Preformaufbau

Zur Finalisierung des Preforming Prozesses wurden die Lagenaufbauten in einem beheizten Plattenwerkzeug bei 200 °C unter der Einwirkung von 0,8 MPa für eine Dauer von 60 Sekunden verpresst. Nach Ablauf der Zeit wurden die Preforms heiß aus dem Werkzeug entnommen und unter Raumtemperatur abgekühlt [8, 105].

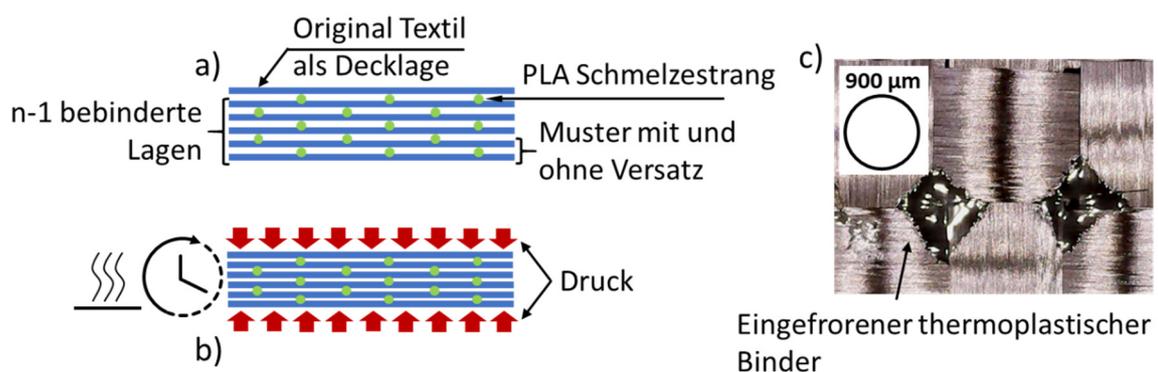


Abb. 44: Darstellung eines Lagenaufbaus a) vor dem Heißpressen, b) nach dem Heißpressen und c) einer Auflichtmikroskopansicht welche die Verlinkung des Binders mit der Decklage zeigt [8].

### 5.3 Heißgepresste Preforms

Es wurden Preforms bestehend aus NCF Gelegen aus CF mit  $0^\circ/90^\circ$  biaxialer Orientierung hergestellt. Die eingesetzten NCF Gelege standen in bebindeter und unbebindeter Form zur Verfügung, wie in Tabelle 3 bereits aufgelistet. Aus den zur Verfügung stehenden Gelegen wurden Preforms mit und ohne bebinderten Gelegen hergestellt. Die Preforms mit Binder bestanden aus drei Lagen mit Binder und einer Decklage ohne Binder, wie in Abb. 45 zu erkennen ist.

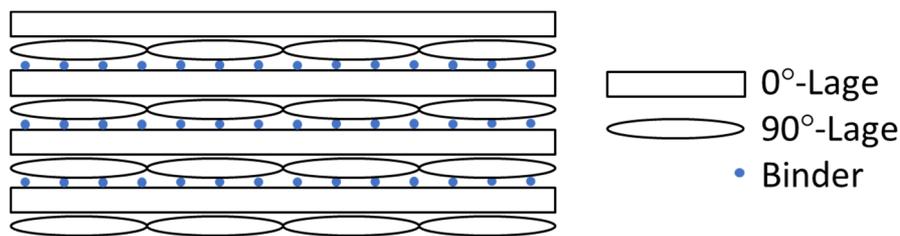


Abb. 45: Schematische Darstellung eines Lagenaufbaus einer bebinderten Preform.

Alle Lagenaufbauten wurden anschließend in einer hydraulischen Presse unter Einwirkung von Temperatur und einem Druck von  $0,8 \text{ MPa}$  für eine Dauer von drei Minuten mit einem Plattenwerkzeug aus Aluminium kompaktiert. Die Temperaturen in der Presse können Tabelle 4 entnommen werden. Die Preforms wurden anschließend gewogen zur Bestimmung des realen Faservolumengehalts, Volumengehalts sowie respektive der resultierenden Porosität.

Tabelle 4: Preforming Temperaturen in der hydraulischen Presse.

Preform Arten	23°C	100°C	120°C
Unbebinderte Preform	✓		
Bebinderete Preform	✓	✓	✓

## 6 Analyse bebindeter Preforms

Alle Preforms wurden Imprägniervorgängen unterzogen um den Einfluss des eingesetzten Binders auf die jeweilige Preform zu untersuchen. Zum einen wurden Permeabilitätsversuche mit den FDM bedruckten Preforms als auch mit den heißgepressten Preforms durchgeführt, welche den Einfluss des Binders auf das Fließverhalten quantifizieren sollten. Zum anderen wurde eine Füllstudie mit den ADFP Preforms durchgeführt, welche die prinzipielle Imprägnierbarkeit unter Beweis stellen sollte.

Die ADFP Preforms aus der Füllstudie wurden anschließend in Bezug auf die Qualität der Imprägnierung begutachtet und einem Ranking unterzogen. Die beste Preform wurde in weiteren Untersuchungen mittels Computertomographie als auch Ultraschall Rastermikroskopie charakterisiert.

Die Ergebnisse der FDM bedruckten Preforms wurden nach ihrer Charakterisierung hinsichtlich Permeabilität als Basis zur Entwicklung eines Vorhersagemodells verwendet.

Im Vorfeld sowie im Nachgang der Permeabilitätsuntersuchungen unter prozessnahen Bedingungen, der heißgepressten Preforms wurden Messungen hinsichtlich des Bindereinflusses auf die Imprägnierung durchgeführt. Es wurde das Kompaktierungsverhalten der Preforms mit und ohne Binder untersucht, das Benetzungsverhalten aufgrund der Oberflächenspannung zwischen einem Pflanzenöl und dem Injektionsharz verglichen, die Löslichkeit des Binders im Injektionsharz gemessen und der Einfluss des gelösten Binders im Injektionsharz auf die Viskosität über der Temperatur charakterisiert. Im Nachgang wurden ausgewählte Versuche hinsichtlich ihrer Binderverteilung nach der Imprägnierung untersucht. Dazu wurde eine Methode entwickelt und implementiert.

### 6.1 ADFP Preforms

Ziel der Untersuchungen an den ADFP Preforms war es, deren Potential hinsichtlich vollständiger Imprägnierung zu ermitteln. Dazu wurden im Vorfeld Kompaktierungsversuche durchgeführt um eine Vergleichbarkeit mit konventionellen Kohlenstofffasertextilien herzustellen. Des Weiteren wurden

unterschiedliche Füllstrategien verfolgt, um die bestmögliche Imprägnierung der Preforms zu erreichen. Jede der Methoden wurde mit Preforms, welche mit  $50\text{ N}$  bzw.  $130\text{ N}$  Kompaktierungskraft hergestellt wurden durchgeführt. Ausgewählte Platten, welche aus diesen Imprägnierungen entstanden wurden weiterführend nichtzerstörenden Untersuchungen unterzogen, um eine Abschätzung bezüglich der Füllqualität bzw. den Fehlstellen abzugeben.

### 6.1.1 Kompaktierungsverhalten

Wie bereits in Abschnitt 5.1.2 erwähnt wurde, betrug die natürliche Porosität der Preforms aufgrund ihrer durchschnittlichen Dicke von  $1,7\text{ mm}$  ca.  $45\%$ . Um bei der Imprägnierung ausreichende Kompaktierung der Decklagen zu gewährleisten, wodurch ein Überfließen der Preform verhindert werden sollte, musste die Porosität deutlich herabgesetzt werden. Dazu wurden die ADFP Preforms auf  $1,5\text{ mm}$  kompaktiert was einer Porosität von  $36\%$  entspricht. In Abb. 46 sind die Ergebnisse dieser Versuche dargestellt.

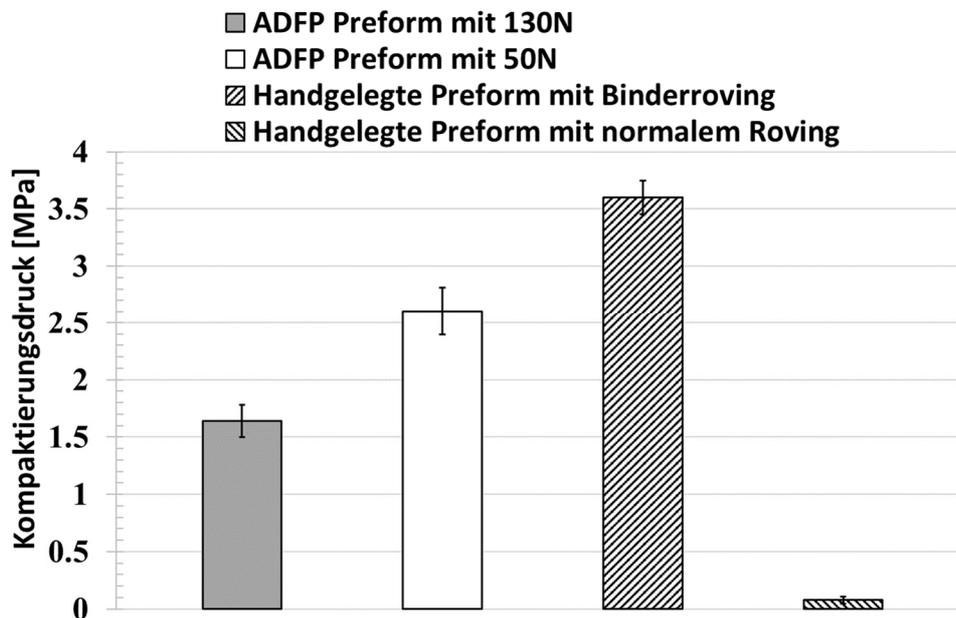


Abb. 46: Benötigter Kompaktierungsdruck um einen Faservolumengehalt von  $64\%$  zu erreichen.

Auffällig ist der Einfluss der Vorkompaktierung durch den Legeprozess. Die Preforms welche mit einer Konsolidierungskraft von  $130\text{ N}$  gelegt wurden, benötigten bei weitem den geringsten Kompaktierungsdruck um die geforderte

Porosität zu erreichen. Sie benötigten sogar nur die Hälfte des Drucks im Vergleich zu den Preforms welche per Hand aufgebaut wurden und keiner Wärmeeinwirkung ausgesetzt waren. Im Gegensatz dazu erforderten die Preforms aus dem normalen unbedinderten Roving nur einen Bruchteil des Druckes.

### 6.1.2 Füllstudie an ADFP Preforms

Um die ADFP Preforms zu Imprägnieren wurden drei Flüssigimprägnierverfahren in Betracht gezogen:

1. RTM,
2. VAP und
3. Nasspressen.

Für die Imprägnierungen mit RTM wurde auf ein Plattenwerkzeug zurückgegriffen, welches auf die entsprechende Höhe von  $1,5\text{ mm}$  eingestellt werden konnte und die Möglichkeit eines Linienangusses bot. Das verwendete Harz-Härter System waren das Epoxidharz RIMR135 und der Härter RIMH136, welche mit einer Injektionsanlage von der Tartler GmbH gemischt und injiziert wurden. Es wurden zwei verschiedene Preformvarianten für die Füllversuche herangezogenen, wobei die Injektionsanlage mit maximalem Förderdruck von  $30\text{ bar}$  bei einer Injektionsfluidtemperatur von  $60\text{ °C}$  gefahren wurde, während das Werkzeug auf  $120\text{ °C}$  temperiert war. Nichtsdestotrotz, war es nicht möglich eine vollständige Imprägnierung der Preform zu gewährleisten, wie aus Abb. 47 eindeutig hervor geht. Mehrere Faktoren sind hier ausschlaggebend für die unzufriedenstellenden Ergebnisse. Zum einen, ist der Binderanteil auf den Binderrovings sehr hoch mit einem Masseanteil von  $7\%$ . Dieser hohe Bindergehalt bewirkt zwar, dass sich der Roving sehr gut mittels ADFP verarbeiten lässt, begünstigt aber gleichzeitig einen Verschluss der interlamminaren Schichten bei thermischer Aktivierung des Binders. Außerdem haben die Kompaktierungsversuche gezeigt, dass ein hoher Bindergehalt massive Vorkompaktierung begünstigt. Dies ist auf die Menge des vorhandenen Binders zurückzuführen welcher zur Faserfixierung zur Verfügung steht. Einzig möglicher Parameter zur Verbesserung des Ergebnisses ist die Reduzierung der Kompaktierungskraft, wobei das Ausmaß des Einflusses fraglich ist. Folglich ist eine Imprägnierung in der Ebene mit diesem Binderroving nicht oder nur schwer realisierbar.

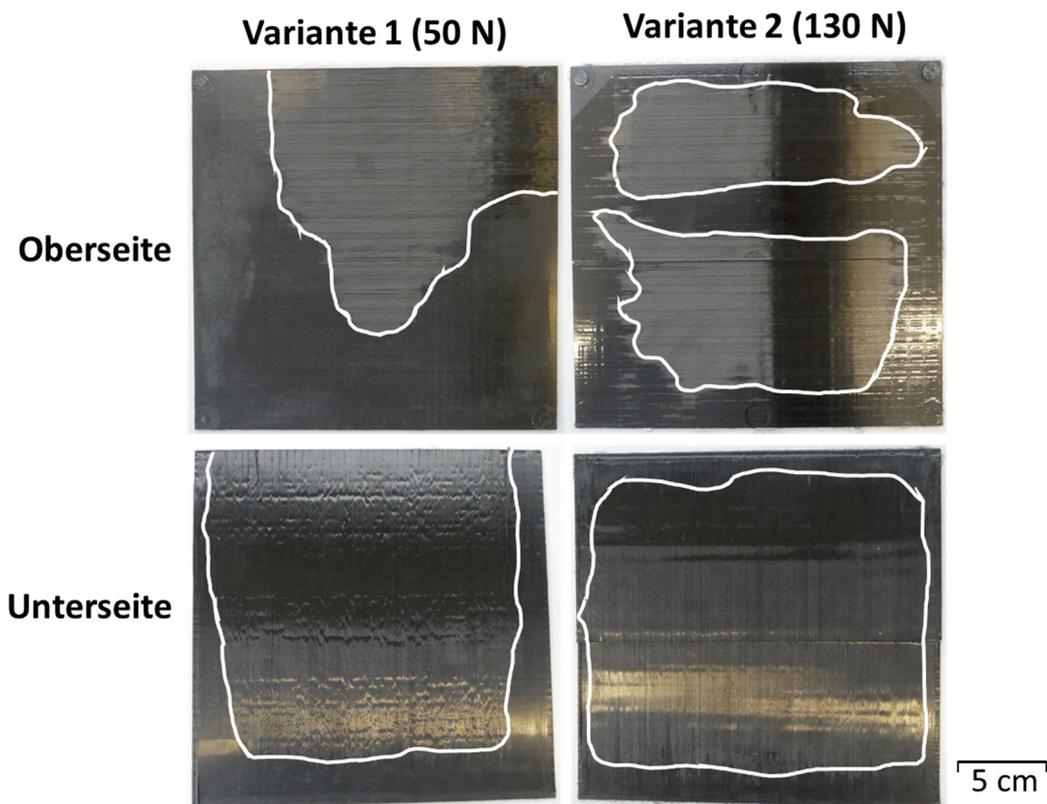


Abb. 47: RTM Imprägnierungen zweier ADFP Preforms hergestellt mit  $50\text{ N}$  (Versuch 1) und mit  $130\text{ N}$  (Versuch 2) Kompaktierungskraft.

Bei den VAP Füllversuchen wurde der Aufbau aus Abschnitt 2.7.1 realisiert. Der VAP Prozess wurde gewählt, da er im Vergleich zum VARI eine annähernd konstante Kompaktierung gewährleisten kann, wodurch die Dickenverteilung in der Platte wesentlich homogener ausfällt. Des Weiteren können über die Membran etwaige Luftporen besser abgesaugt werden. Die Versuche wurden auf einer Heizplatte, welche auf eine Temperatur von  $100\text{ °C}$  temperiert war durchgeführt. Variante 1 ließ sich vollständig imprägnieren, während Variante 2 trockene Stellen an der Oberfläche aufwies, wie in Abb. 48 zu sehen ist. Im Anschluss an die Versuche wurden die Platten gewogen. Es wurde das theoretische Gewicht, einer zu  $100\%$  imprägnierten Platte mit den realen Gewichten der Platten verglichen und deren Abweichungen bestimmt. Variante 1 wies eine Abweichung von ca.  $1,7\%$  auf, während Variante 2 eine von  $3,3\%$  hatte. Die Messungen und Berechnungen können aufgrund der Fehlereinflüsse nur als Abschätzungen betrachtet werden und bilden lediglich die Tendenz, dass niedrigere Kompaktierungskraft zu besseren Ergebnissen führt ab. Zur genaueren Analyse der Imprägnierung und etwaiger

Fehlstellen im Laminat wurde eine Platte aus Variante 1 für zusätzliche nicht zerstörende Prüfungen ausgewählt.

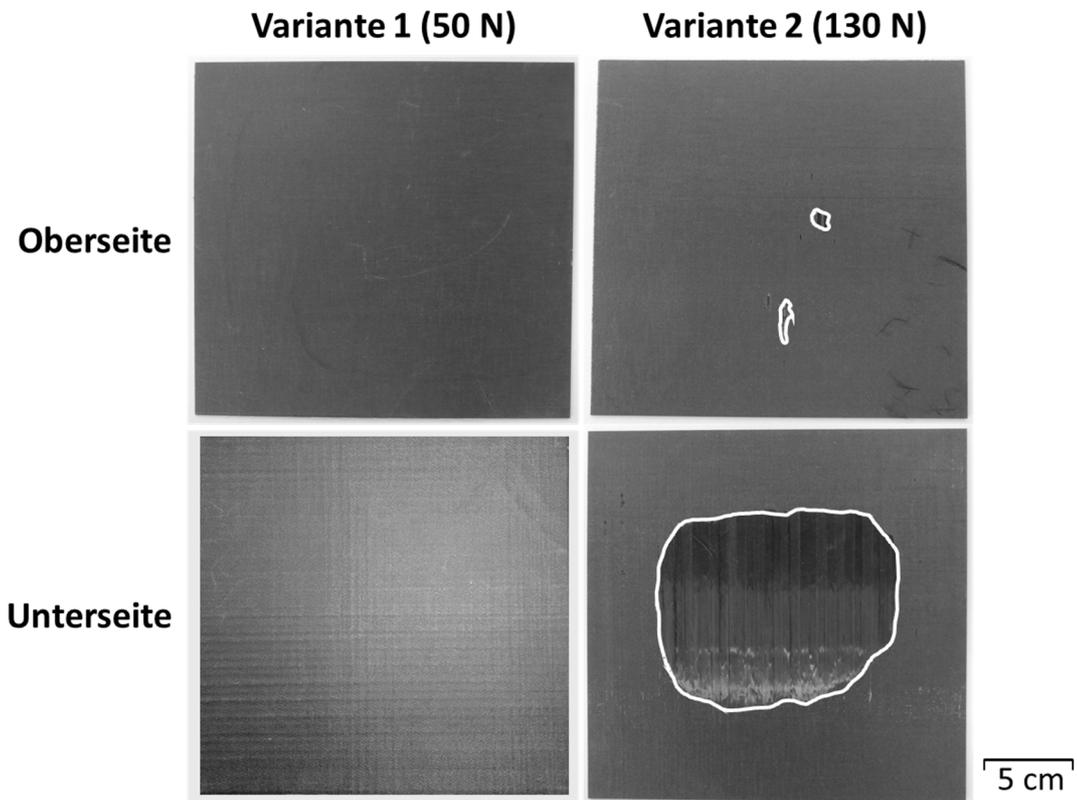


Abb. 48: VAP Imprägnierungen zweier ADFP Preforms hergestellt mit  $50\text{ N}$  (Versuch 1) und mit  $130\text{ N}$  (Versuch 2) Kompaktierungskraft.

Im Zuge der Nasspressversuche wurden verschiedene Temperaturen sowie Pressenparameter (Spalthöhe, Presskraft, Schließgeschwindigkeit) getestet. Die vielversprechendsten Parameter waren:  $120\text{ °C}$  bei  $1\text{ mm/min}$ . Für die Versuche stand kein klassisches Werkzeug mit Tauchkante zur Verfügung, wodurch es notwendig wurde ein Sonderwerkzeug, welches aus einer Aluminiumplatte mit Silikon Lippen höher als die Preforms bestand. Die Vakuumkammer der Formpresse erlaubte es den Pressraum vor dem Pressvorgang zu evakuieren. Die Harzmenge wurde leicht überdosiert um durchgehend Fluiddruck auf die Preform auszuüben. Um die Verformung der Silikonlippen zu begrenzen wurden Aluminium Distanzhalter mit eingelegt. In Abb. 49 sind zwei ausgewählte Varianten dargestellt. Wie zu erkennen ist, weisen beide Varianten deutliche trockene Stellen an der Rückseite auf. Die Oberseite von Variante 2 zeigt zusätzlich ein gewisses Maß an

Faserversatz im Mittelbereich der Platte. Dies deutet darauf hin, dass der angelegte Pressdruck zu hoch gewählt war. Obwohl die Nasspressversuche keine vollständige Imprägnierung erbringen konnten ist es anzunehmen, dass dieses Verfahren neben VAP die höchste Wahrscheinlichkeit auf Erfolg aufweist, da eine Imprägnierung in Dickenrichtung wesentlich weniger Druckbedarf im Vergleich zu planaren Imprägnierungen aufweist. Wahrscheinlich wäre mit einem entsprechenden Plattenwerkzeug mit Tauchkante eine erfolgreiche Imprägnierung gelungen.

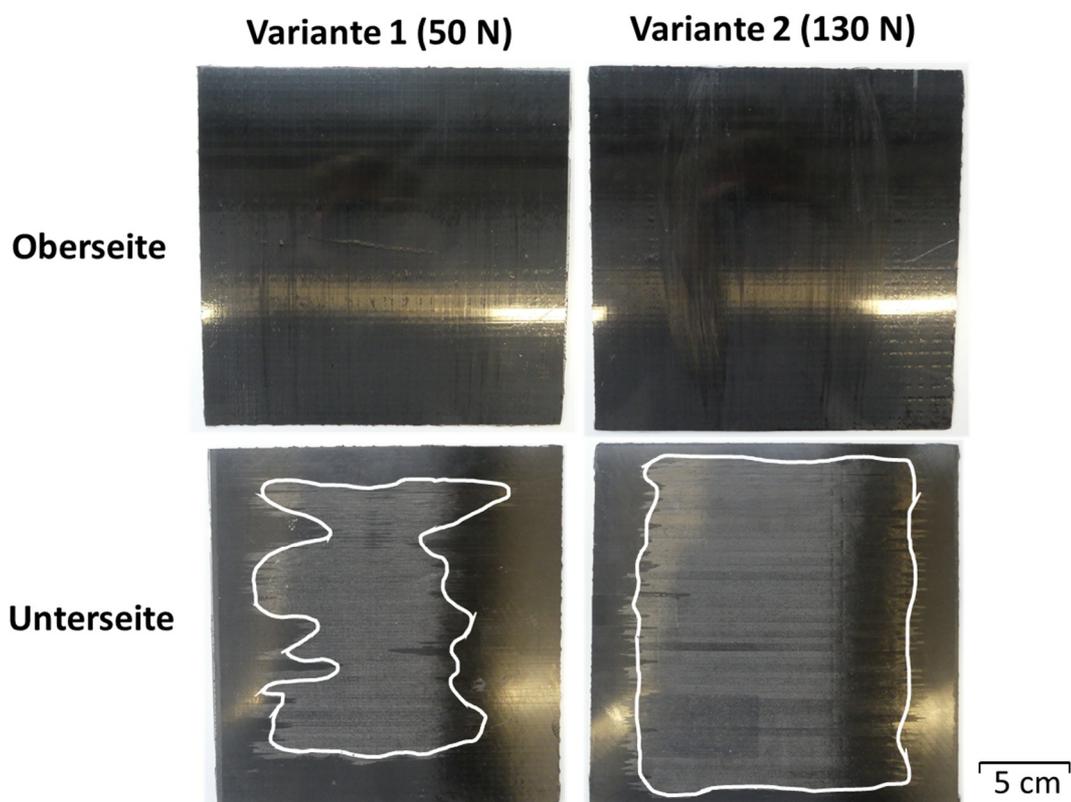


Abb. 49: Nasspressimprägnierungen zweier ADFP Preforms hergestellt mit 50 N (Versuch 1) und mit 130 N (Versuch 2) Kompaktierungskraft.

### 6.1.3 Ultraschall Rastermikroskopie

Die Ultraschall Rastermikroskopie Untersuchung wurde mit einer Prüffrequenz von 35 MHz an einem Gerät der Firma PVA TePla durchgeführt. Die Schallwellen werden teilweise an der Probenoberfläche sowie Poren oder Materialgrenzen in der Probe reflektiert und wiederum detektiert. Die Probe wird mit dem Schallkopf abgerastert, wodurch das Bild (C-Scan) erzeugt wird, siehe Abb. 50. Da die Poren

den Schall stark reflektieren, werden sie in den C-Scan Bildern als helle Strukturen dargestellt, bzw. Bereiche unter den Delaminationen dunkel. Die Schallwellen werden durch die Fasern in den Proben gestreut. Dies bedeutet eine starke Abschwächung des Signals, die die Detektion von Fehlstellen erschwert. An den Probenrändern scheint die Häufigkeit der Fehlstellen im Vergleich zum Zentrum der Probe etwas geringer zu sein, siehe Abb. 50 b).

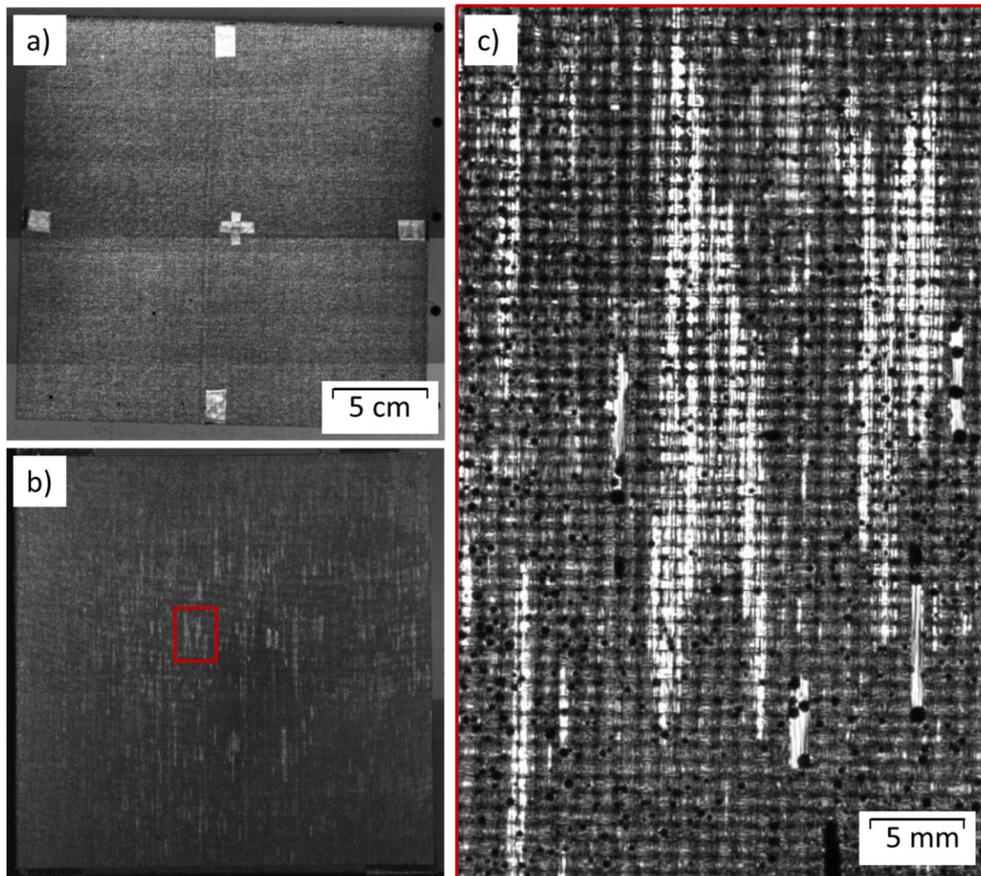


Abb. 50: In a) die Oberseite, in b) die Unterseite und in c) ein Ausschnitt der Probe dargestellt im C-Scan aufgenommen mit dem Ultraschall Rastermikroskop.

Aufgrund der leichten Schiefe der Probe können nur Ausschnitte der Probe hinsichtlich der Tiefenlage von Fehlstellen untersucht werden. Der Ausschnitt aus Abb. 50 c) befindet sich in der Mitte der Probe und stellt eine großflächige trockene Stelle dar. Die Darstellung liefert in unterschiedlichen Laufzeitabschnitten Information über die Ausprägung von Fehlstellen in unterschiedlichen Lagen der Probe. Für eine exakte Tiefenbestimmung müsste die Schallgeschwindigkeit im gegebenen Material bestimmt werden. Dies ist in einem Verbundwerkstoff nicht

trivial, weshalb darauf im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen verzichtet wurde.

#### 6.1.4 Computer Tomographie

Die Messungen wurden an einem nanotom m der Firma GE Sensing & Inspection Technologies GmbH durchgeführt. Die Probe wurde zwischen einer Röntgenröhre und einem Flachdetektor positioniert. Es wurde ein radioskopisches Bild mittels Durchstrahlung und Projektion erzeugt. Im Röntgenbild werden Bereiche mit höherer Dichte dunkler dargestellt. Ebenso Bereiche mit größerer Probendicke, da sich mehr Material im Strahlengang befindet, welches die Strahlung schwächt. Somit werden Poren, bzw. Hohlräume in einer Probe heller dargestellt als das umliegende Material. Die Probe wurde aufgrund ihrer Dimension von etwa  $240 \times 240 \text{ mm}$  in je vier Prüfbereiche eingeteilt. Die Radioskopiebilder wurden leicht überlappend aufgenommen. Das CT Bild aus Abb. 51 b) ist bereits wieder zusammengesetzt. Neben der Struktur des Plattenaufbaus mittels der Binderrovings sind ebenfalls viele hellere Stellen zu erkennen. Diese repräsentieren die trockenen Stellen im inneren der Platte, welche durch das VAP nicht getränkt werden konnten. Fraglich ist, ob es sich wirklich nur um Porosität von 3,3 % handelt wie initial berechnet.

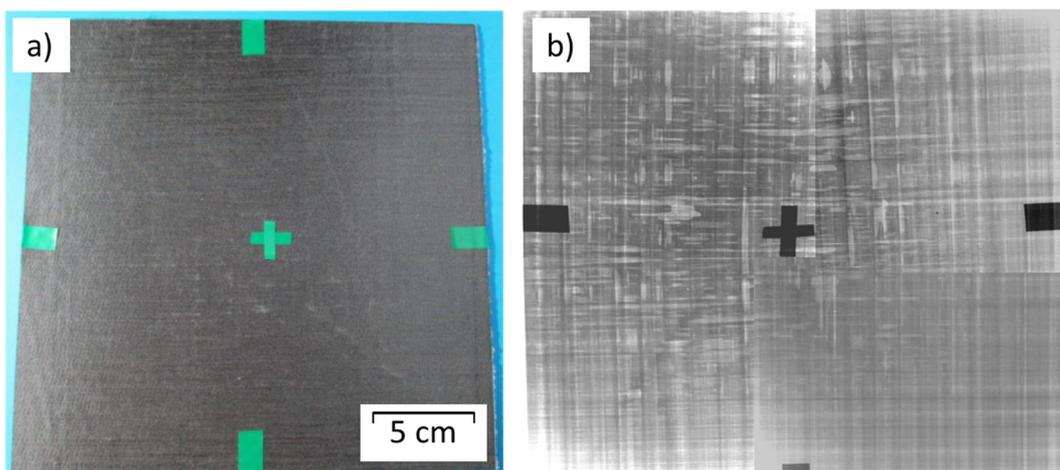


Abb. 51: Ansicht der Probe in a) präpariert für b) die CT Messung.

#### 6.1.5 Diskussion

Der Binderroving hat sehr gute Verarbeitbarkeit zum Preforming gezeigt. Der hohe Bindergehalt wirkte sich sehr positiv auf den Zusammenhalt der Preform aus und

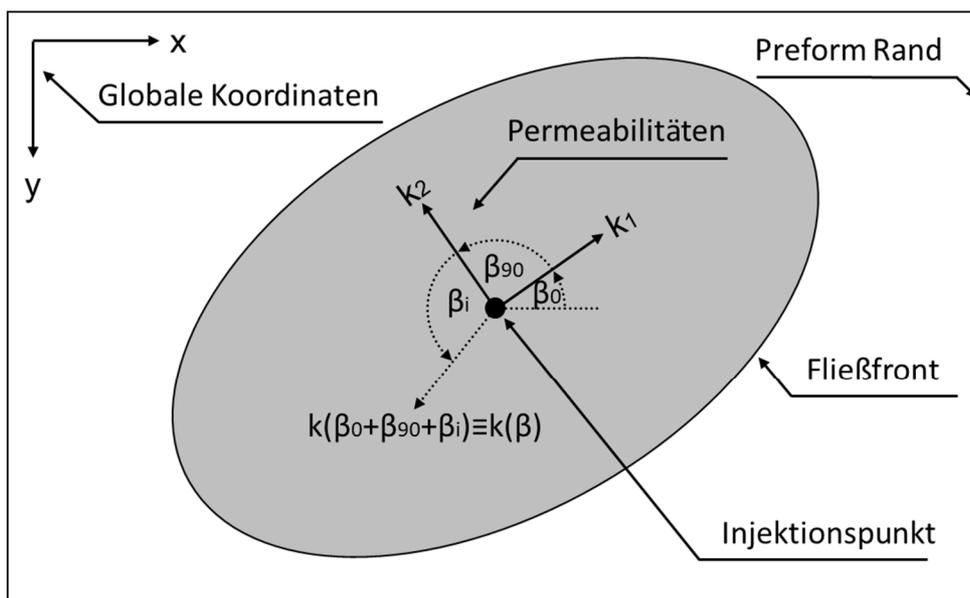
ermöglichte ein breites Verarbeitungsfenster in Bezug auf Legegeschwindigkeit, Kompaktierungskraft und Wärmeeintrag, mittels Heizplatte und Infrarotstrahler. Abgesehen von der guten Verarbeitbarkeit, hat der Binderoving allerdings große Schwächen gezeigt. Wie die Kompaktierungsversuche gezeigt haben, führt der hohe Bindergehalt zu einer massiven Vorkompaktierung während des Legeprozesses. Dadurch lassen sich keine Preforms mit hoher Porosität herstellen, wodurch sich wiederum in Folge die Imprägnierung als sehr schwierig gestaltet hat. Einzig die VAP Füllversuche waren in der Lage nahezu vollständige Imprägnierung zu erzeugen. Die Nasspressversuche hatten das Potenzial dazu konnten allerdings aufgrund eines Fehlenden Plattenwerkzeugs mit Tauchkante nicht restlos überzeugen. Die RTM Füllversuche sind eindeutig als letzte zu reihen. Die Druckverluste waren derart hoch, dass keine annähernd vollständige Imprägnierung möglich war. Selbst die Variante 1 Preform imprägniert mit VAP, zeigte Schwächen in der Analyse mit dem Ultraschall Rastermikroskop sowie mit der Computer Tomographie. Es waren eindeutig großflächige trockene Stellen im inneren der Platte erkennbar. Auf weitere eine Analyse wurde aufgrund des bescheidenen Ergebnisses verzichtet. Ein Binderoving mit geringerem Bindergehalt, sowie eine modifizierte Anlagentechnik, welche geringere Kompaktierungskraft erlauben würde könnten die ausschlaggebenden Faktoren zur entscheidenden Verbesserung der Preforms sein.

## 6.2 FDM bedruckte Preforms

Im Zuge der Untersuchungen an den bedruckten FDM Preforms, wurden zum einen optische Permeabilitätsversuche zur Bestimmung der ebenen Permeabilität durchgeführt, welche dazu genutzt wurden um den Einfluss des Binders auf die Preforms zu quantifizieren. Zum anderen dienten die Versuche als Basis zur Entwicklung eines Modells zur Vorhersage des Bindereinflusses auf die Permeabilität. Dieses Modell soll die Basis bilden, um in Zukunft Binderauftrag zur gezielten Modifikation von Fließeigenschaften zu ermöglichen. Als vorstellbare Applikation nehme man ein RTM Bauteil, welches trockene Stellen nach der Füllung aufweist. Eine gezielte Einbringung von Binder zur Manipulation der Fließfront könnte als probates Mittel zur Verbesserung der Füllqualität eingesetzt werden.

### 6.2.1 Permeabilitätsverhalten

Die Standardmethode zur Auswertung von Permeabilitätsversuchen basiert auf Beobachtungen der Fließfront. Diese Beobachtungen ermöglichen eine inkrementelle Berechnung abhängig vom Winkel  $\beta$  ( $-90^\circ < \beta < 90^\circ$ ) von  $k_1$  (Hauptachse) und  $k_2$  (Nebenachse), wie in Abb. 52 dargestellt [8].



$\beta_0$  Offset Winkel

$\beta_{90}$  Winkel zwischen Haupt- und Nebenachse

$\beta_i$  Inkrementell zunehmender Winkel für Transformation

Abb. 52: Schematische Darstellung welche die prinzipiellen Haupt- und Nebenachsen der Permeabilität darstellt [8].

Abhängig von der angewandten Methode wird in der Regel ein Mittelwert aus den inkrementellen Werten  $k_1$ ,  $k_2$  und  $\beta$  berechnet. Anschließend werden die entsprechenden Werte in einem Diagramm, bestehend aus Permeabilität (logarithmische Skalierung auf Basis von 10) über Faservolumengehalt verglichen. In den meisten Fällen ist diese Methode ausreichend wenn Preforms von gleichem Faservolumengehalt miteinander verglichen werden, da die Hauptachsen der Permeabilität in die gleichen Richtungen zeigen. Für die vorliegende Studie scheitert diese Methodik per Definition an dem Ziel, Permeabilität und deren vorherrschende Orientierungen zu manipulieren. Daher wurde ein spezieller Ansatz zum Vergleich der verschiedenen Versuchsreihen gewählt. Anstatt  $k_1$  und  $k_2$  zu vergleichen, wurden Polardiagramme für volle  $360^\circ$  erstellt, die die winkelabhängige

Permeabilität  $k_\beta$  darstellen [8]. Es mussten die Regeln für Koordinatentransformation, wie sie schon in Abschnitt 2.5.2 in den Gleichungen 2.19 – 2.21 vorgestellt, angewendet werden [106, 107].

Die Idee der Permeabilitätsrotation geht auf Weitzenböck [108] und Adams [35, 109] zurück, die als erste eine Permeabilitätsbestimmung aus einer zweidimensionalen Strömung erzeugt durch eine radiale Injektion durchführten. So konnten sie die Permeabilitätsmatrix in der Ebene mit einem einzigen Experiment bestimmen. An dieser Stelle wird diese Methodik verwendet, um auf die winkelabhängige Permeabilität in der Ebene  $k_\beta$  rückzurechnen. In die folgenden Gleichungen wurden die experimentellen Daten  $k_1$ ,  $k_2$  und  $\beta_0$  eingesetzt, wobei  $\beta_0$  den Offsetwinkel bezeichnet [8].

$$\bar{K} = \begin{bmatrix} k_1 & 0 \\ 0 & k_2 \end{bmatrix} \quad (6.1)$$

$$\bar{C} = \begin{bmatrix} \cos \beta_0 & \sin \beta_0 \\ -\sin \beta_0 & \cos \beta_0 \end{bmatrix} \quad (6.2)$$

Um die Permeabilitätsmatrix zu transformieren und Werte für eine volle Umdrehung zu erhalten, muss man die folgende Regel anwenden, die beim Offsetwinkel beginnt und ihn schrittweise erhöht:

$$k(\beta) = \bar{C}^{-T} \bar{K} \bar{C}^{-1} \quad (6.3)$$

In Abb. 53 ist das typische Füllverhalten der getesteten Preforms dargestellt. Preforms vom Typ *P* zeigen ein signifikantes anisotropes Verhalten, so dass eine vorherrschende Strömungsrichtung entlang der horizontalen Achse vorliegt. Preforms vom Typ *P90* zeigten jedoch ein weniger anisotropes Verhalten bei unspezifischem Orientierungswinkeln zwischen  $0^\circ$  und  $90^\circ$ . Preforms vom Typ *P45* zeigten eine Neigung in der vorherrschenden Strömungsrichtung von bis zu  $47^\circ$  bei durchschnittlich etwa  $30^\circ$  [8].

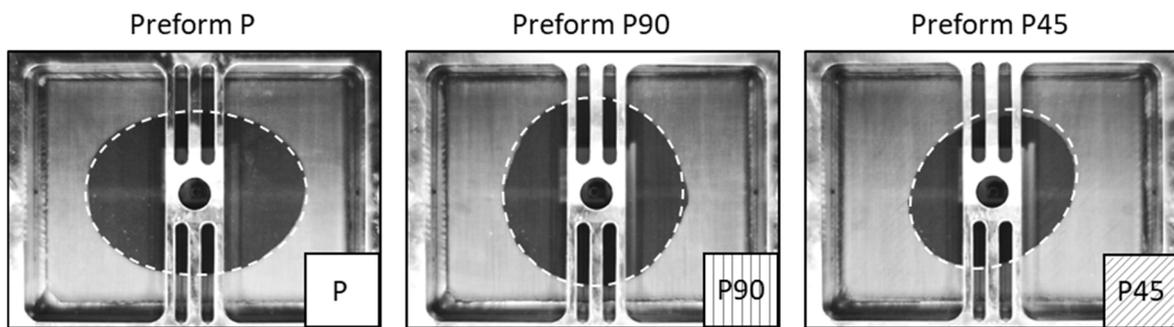


Abb. 53: Eine Zusammenstellung der Fließfrontfortschritte der sechslagigen FDM bedruckten Preforms nach 60 Sekunden [8].

Um einen ersten Eindruck vom Einfluss des Binders auf das Gewebe zu bekommen, wird eine mittlere Permeabilität  $k_m$  eingeführt. Bei Textilien mit quasi-isotropen Imprägniereigenschaften oder geringem anisotropen Verhalten wird  $k_m$  wie folgt berechnet:

$$k_m = \sqrt{k_1 * k_2} \quad (6.4)$$

und wird als äquivalente Permeabilität [108, 110, 111] bezeichnet. Aufgrund der hohen Anisotropie der Preforms  $P$  und  $P45$  wurde eine integrale Lösung gewählt, dargestellt in folgender Gleichung:

$$k_m = \frac{1}{2\pi} \int_{\beta=0}^{2\pi} k(\beta) d\beta \quad (6.5)$$

Auf diese Weise war eine Charakterisierung des Einflusses des Binders auf  $k_m$  möglich, wie Abb. 54 zeigt. Natürlich resultiert daraus eine gewisse Eindimensionalität der Daten, aber dennoch ermöglicht dieser Ansatz eine Bewertung des Einflusses auf die Permeabilitätsreduktion, die durch den Binder bei gleichem Faservolumengehalt hervorgerufen wird. Abb. 54 a) zeigt  $k_m$  für die Preforms  $P$ ,  $P90$  und  $P45$  über dem nominellen FVG. Auf der einen Seite zeigt diese Abbildung, dass der zusätzliche Binder Einfluss auf das Flächengewicht hat und die Permeabilität durch das aufgedruckte Muster reduziert wird. Andererseits

veranschaulicht Abb. 54 b), dass das charakteristische Verhalten des Textils durch die Manipulation der einzelnen Gewebe nicht verloren geht. Mit anderen Worten, wenn eine manipulierte Preform den gleichen nominellen Porositätsvolumengehalt (PVC) wie die ursprüngliche Preform hätte, dann wäre eine ähnliche Permeabilität in Bezug auf  $k_m$  gegeben [8].

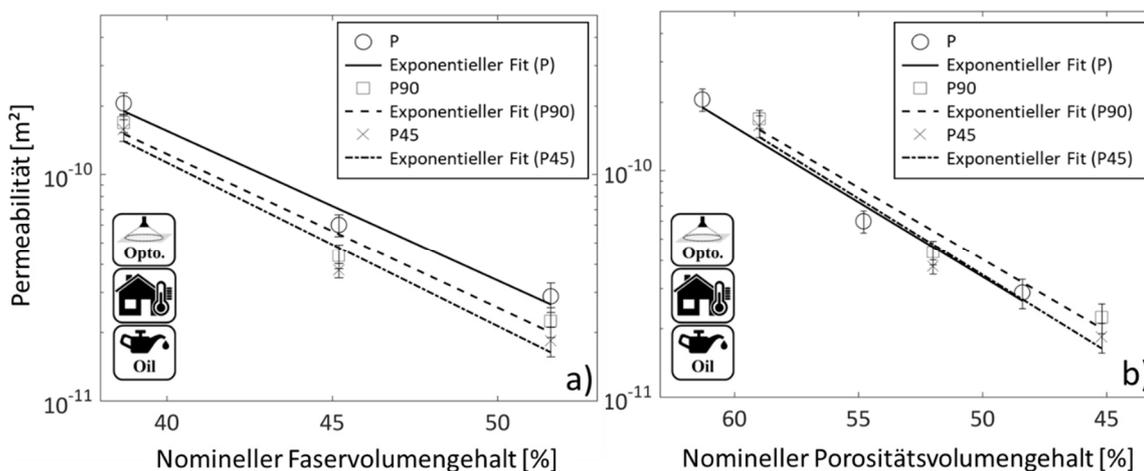


Abb. 54: Permeabilität über nominellem FVG in a) und Permeabilität über nominellem PVC in b) [8].

Die polaren Plots aus Abb. 55 stellen die winkelabhängige Permeabilität dar, die aus  $k_1$ ,  $k_2$  und  $\beta_0$  für verschiedene Preforms bei drei verschiedenen nominellen Faservolumengehalten berechnet wurden. Sie alle stellen Mittelwerte dar, die aus den getesteten Proben berechnet wurden. Die vollständigen experimentellen Daten finden Sie im Anhang in Tabelle 9. Das Ausgangsmaterial weist eine hohe Anisotropie mit einer vorherrschenden Permeabilität entlang der horizontalen Achse auf. Dieses anisotrope Verhalten nahm bei höheren Faservolumengehalten leicht zu. Die Anisotropie  $\alpha$  ist definiert als das Verhältnis der Permeabilität der Hauptachsen und bewegt sich zwischen den theoretischen Werten von 0 bis 1, wobei niedrige Anisotropie zu einem hohen Wert nahe 1 führt [8].

$$\alpha = \frac{k_2}{k_1} \tag{6.6}$$

Die *P45* Preforms zeigten einen mittleren Orientierungswinkel von durchschnittlich  $30^\circ$  und nicht  $45^\circ$ , wie die Ausrichtung der Schmelzstränge zeigt. Eine mögliche Erklärung ist die vorherrschende horizontale Strömungsrichtung, die offensichtlich einen höheren Einfluss auf das beobachtete Ergebnis hat [8].

Im Gegensatz dazu scheinen die *P90* Preforms im Vergleich zum Original kaum Anisotropie, aber eine etwas höhere Permeabilität in  $90^\circ$ -Richtung zu zeigen. Dieser Effekt könnte mit inkonsistenter Preformhöhe durch den Heißpressprozess zusammenhängen. Die eingefrorenen Polymerschmelzstränge könnten als Abstandshalter dienen, wodurch die Fließfront in den Zwischenräumen leichter fließen kann [8].

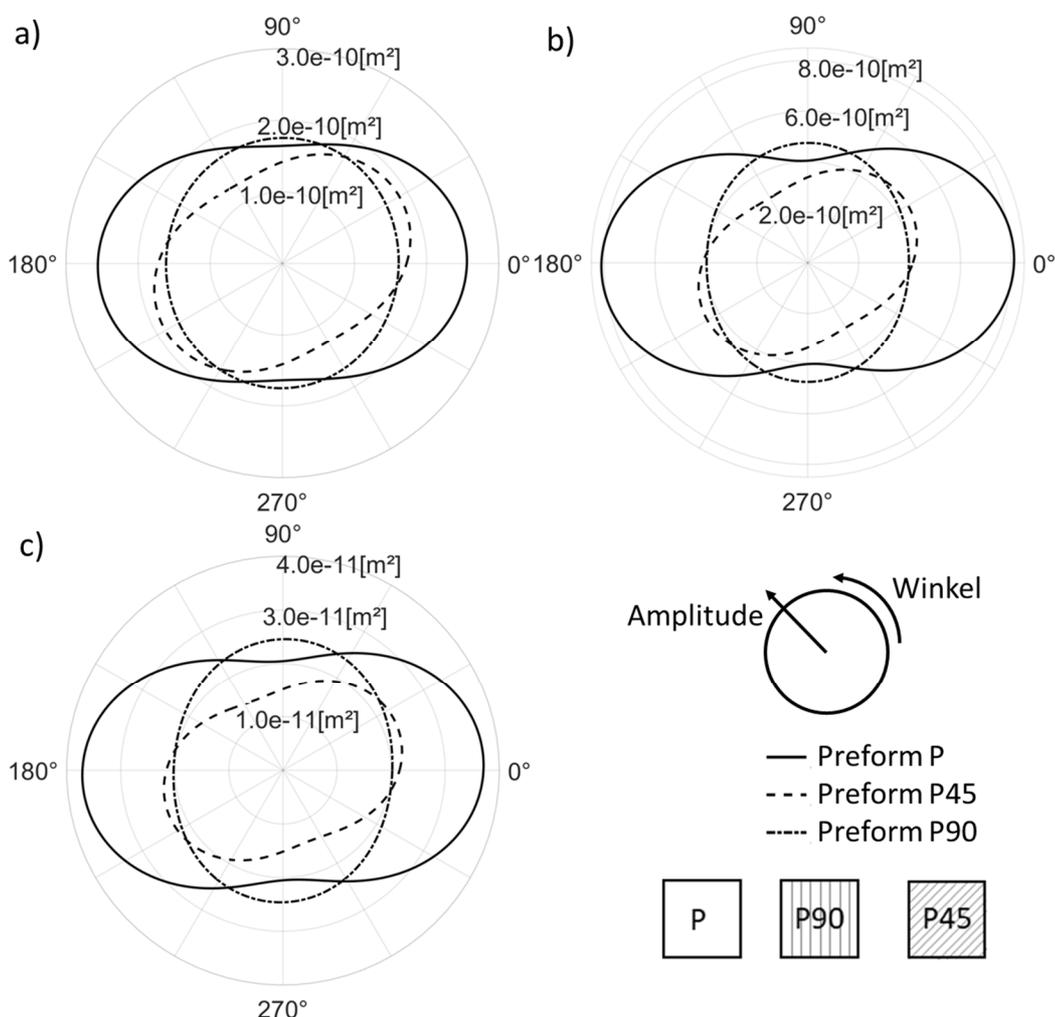


Abb. 55: Winkelabhängige Permeabilität bei drei Faservolumengehalten von a) 38,7 %, b) 45,2 % und 51,6 % [8].

### 6.2.2 Permeabilitätsmodell

Die Bereiche mit Binder in den Preforms *P90* und *P45* reduzieren lokal die Porosität und damit die Permeabilität in der Preform. Die erste Annahme die getroffen werden kann ist, dass die Permeabilität  $k_0$  in den Bereichen ohne Binder gegenüber der Preform *P* (kein Binder) unverändert ist und dass die Permeabilität in den bebinderten Bereichen  $k_b$  um den Faktor  $k^*$  niedriger ist [8].

Da die bebinderten Bereiche Linien bilden, kann die richtungsabhängige Permeabilität durch eine Parallel- und eine Serienschaltung horizontal bzw. vertikal zur Linienrichtung modelliert werden. Aus dem Volumengehalt des Binders in den Binder Bereichen (gleich dem Flächeninhalt), bezeichnet als  $\varphi_b$  kann die Parallelpermeabilität  $k_{\parallel}$  und die Serienpermeabilität  $k_{\perp}$  berechnet werden:

$$k_{\parallel} = \varphi_b \cdot k_0 \cdot k^* + (1 - \varphi_b) \cdot k_0 \quad (6.7)$$

$$k_{\perp} = \frac{1}{\frac{\varphi_b}{k_0 \cdot k^*} + \frac{(1 - \varphi_b)}{k_0}} \quad (6.8)$$

Für einen  $\varphi_b$ -Wert von einigen Prozent bedeutet dies, dass die Permeabilität in paralleler Richtung leicht reduziert wird, während die Permeabilität in senkrechter Richtung in Abhängigkeit vom  $k^*$ -Wert erheblich reduziert werden kann. Dieser  $\varphi_b$ -Wert wurde mit 4 % für die Binder Bereiche der Preforms geschätzt [8].

Für die obigen Formeln sind die  $k_0$ -Skalare in den entsprechenden Richtungen zu verwenden ( $k_0$  richtungsabhängig). Um die Änderung der Permeabilität der Preforms nicht nur horizontal und vertikal zu den Linienrichtungen zu berechnen, wird eine Skalierungsmatrix mit den relativen  $k$ -Werten in alle Richtungen als  $\bar{\bar{K}}_{ratio}$  definiert [8].

$$\bar{\bar{K}}_{ratio} = \frac{1}{k_0} \begin{pmatrix} k_{\perp} & 0 \\ 0 & k_{\parallel} \end{pmatrix} \quad (6.9)$$

Die Matrix  $\bar{\bar{K}}_{ratio}$  kann gemäß Gleichung 6.3 in ein globales Koordinatensystem gedreht werden. Abb. 56 a) zeigt solche eine Matrix für *P45* Preforms und einen geschätzten  $k^*$  von 5 %. Es zeigt sich, dass die Permeabilitätswerte in einer Richtung von  $45^\circ$  nur geringfügig reduziert werden und die Permeabilitätswerte in  $135^\circ$  um etwa 40 %. Mit der  $K_0$  Matrix kann dann die Permeabilitätsmatrix des Modells  $K_{model}$  angeschrieben werden [8].

$$\bar{\bar{K}}_{model} = \bar{\bar{K}}_{ratio} * \bar{\bar{K}}_0 \quad (6.10)$$

Abb. 56 b) zeigt den ursprünglichen  $K_0$  Plot als gestrichelte Linie und die modellierten und gemessenen  $K$  Plots für die *P45* Preforms. Die Verschiebung der maximalen  $k_1$  Werte in Richtung eines Winkels von etwa  $45^\circ$  der *P45* Preforms ist sowohl im Modell als auch im Experiment zu sehen. Für die gewählten  $k^*$  und  $\varphi_b$  Werte überschätzt das Modell die  $k_1$  und unterschätzt es die  $k_2$  Werte [8].

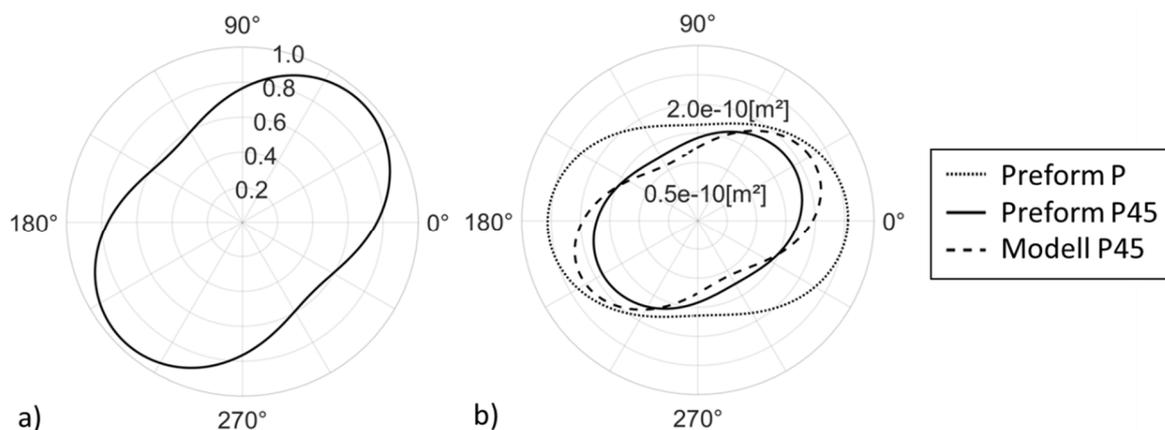


Abb. 56: Polare Plots des a)  $\bar{\bar{K}}_{ratio}$  Tensors für einen Winkel von  $45^\circ$ , bei einem  $k^*$  von 5 % und einem  $\varphi_b$  von 4 % sowie b) gemessene  $k_0$  Werte von Preform *P*, gemessene Werte von Preform *P45* und modellierte  $\bar{\bar{K}}_{model}$  Werte für Preform *P45* [8].

Nachdem der Wert von  $\varphi_b$  geometrisch, über die bedeckte Fläche ermittelt wurde, verbleibt das Permeabilitätsverhältnis  $k^*$  als einziger verbleibender Parameter, der an die Experimente angepasst werden kann. Die Minimierung der Unterschiede zwischen Modell und Messungen für alle drei nominellen Faservolumenanteile der

*P90* und *P45* Preforms führt zu einem  $k^*$  von 5 %. Abb. 57 zeigt die mittleren Werte der aller Experimente und die entsprechenden Modellwerte mit den oben genannten Parametern. Es zeigt sich, dass der Rotationstrend der maximalen  $k_1$  Werte in *P45* Preforms erfasst wird, aber die  $k_1$  Werte überschätzt werden. Diese Überschätzung der  $k_1$  Werte im Modell wird mit zunehmendem Fasernenninhalt immer deutlicher. Für die *P90* Preforms zeigen sowohl das Modell als auch das Experiment eine Verschiebung hin zu isotropen Permeabilitätswerten. Die höheren  $k_1$  Werte bei  $90^\circ$  der *P90* Experimente im Vergleich zu den *P* Experimenten deuten darauf hin, dass die Einführung von Binder die Durchlässigkeit in den Bereichen ohne Binder erhöht hat [8].

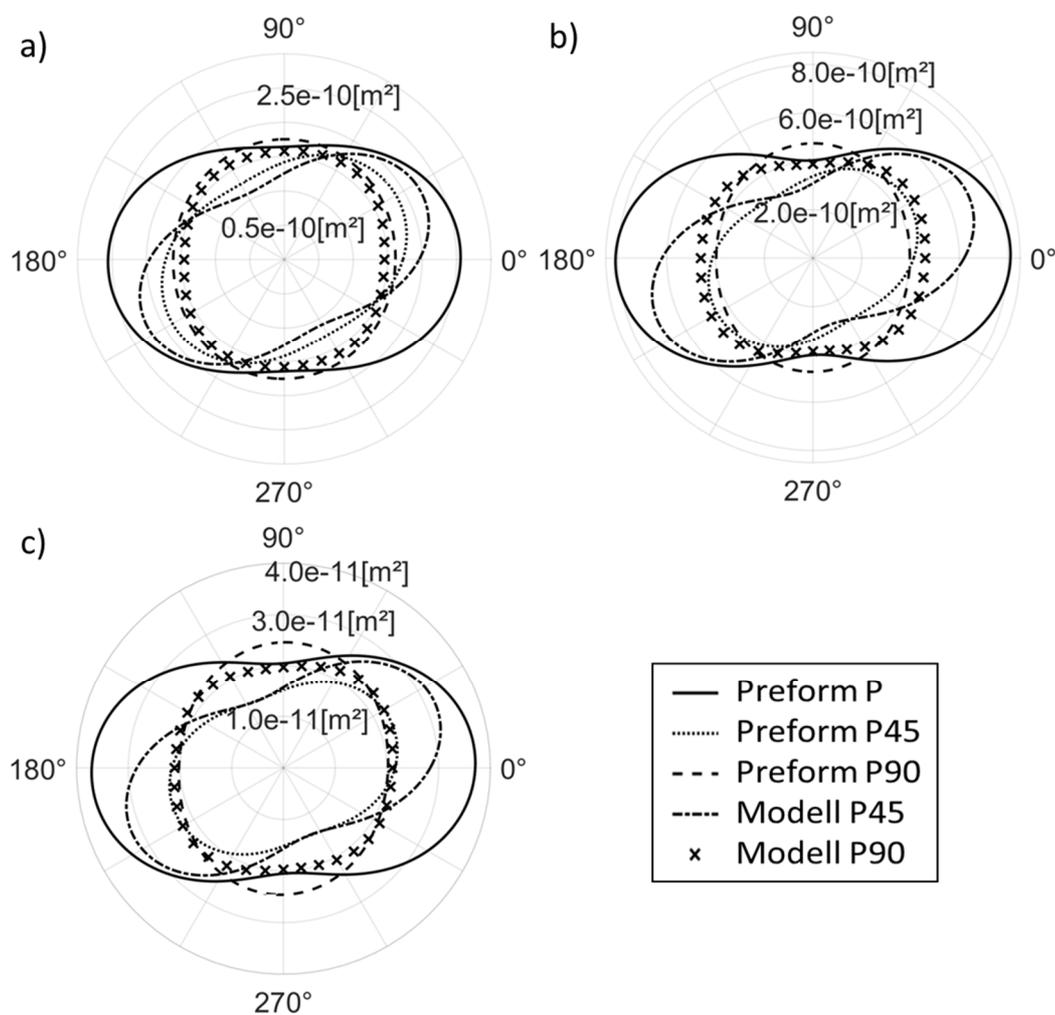


Abb. 57: Polare Plots der gemessenen Permeabilität mit den entsprechenden modellierten Permeabilitätswerten für nominelle Faservolumenanteile von a) 38,7 %, b) 45,2 % und c) 51,6 % [8].

### 6.2.3 Diskussion

Zum einen wurde eine Methodik zum Bedrucken von Geweben mit dem FDM 3D-Druck Verfahren entwickelt. Sie ist in der Lage die innere Struktur des Textils als auch die angestrebte Preformgeometrie in ihrer Gesamtheit zu fixieren. Dadurch können ähnliche Preformingeigenschaften beim Heißpressen wie mit Pulverbebinderten Textilien erreicht werden. Zum anderen wurde gezeigt, dass es möglich ist die Permeabilität eines Textils gezielt zu manipulieren. Dadurch ergeben sich neue Möglichkeiten bei Strategien zur Formfüllung, z.B. bei Bauteilen die eine hohe Fehlerquote aufweisen und das Werkzeug nicht modifiziert werden soll. Auf den Ergebnissen der Versuche wurde ein Modell, zur Vorhersage der Modifikation der Permeabilität durch den Binder aufgebaut. Dieses erlaubt es sowohl die Änderung des Winkels der Hauptachsen der Permeabilität, als auch die Abschwächung derselben abzuschätzen.

## 6.3 Heißgepresste Preforms

Die Untersuchungen an den heißgepressten Preforms wurden durchgeführt um den Einfluss eines weitverbreiteten industriellen Pulverbinders, sowie den Einfluss des Messfluides und der Versuchstemperatur auf die Permeabilität zu ermitteln. Dabei wird in Folge die Systemtemperatur eingeführt, welche als einheitliche Temperatur für das Injektionsfluid und das Werkzeug inkl. Preform zu sehen ist. Zur Komplettierung des Bildes wurden flankierende Untersuchungen an den Preforms, dem Binder und den Messfluiden durchgeführt, mit dem Ziel Erklärungsansätze der beobachteten Phänomene zu entwickeln. Des Weiteren wurde eine Methode entwickelt, welche es ermöglicht den sich verändernden Bindergehalt während eines Füllprozesses zu bestimmen. Dabei handelt es sich um eine dem Versuch nachgeschaltete Methode, die auf dem Prinzip des Viskositätseinflusses durch gelösten Binder basiert [112].

### 6.3.1 Kompaktierungsverhalten

Alle Preforms aus Tabelle 4 wurden auf ihr Kompaktierungsverhalten hin untersucht. Sie wurden mit einer Zugprüfmaschine UTS 250 der Hegewald & Peschke Meß- und Prüftechnik GmbH mit einem Kompaktierungssetup [33] getestet. Die Preforms wurden auf einen Spalt von 2,5 mm verdichtet (was einem

angestrebten Faservolumengehalt von ca. 50 % entspricht) und mit der eingestellten Kavitätshöhe der Permeabilitätsversuche in der Ebene korreliert. Der maximale Kompaktierungsdruck wurde ermittelt und ist in Abb. 58 dargestellt [112].

Wie man sieht, gibt es keinen signifikanten Unterschied zwischen den 100 °C und 120 °C heißgepressten Preforms in Bezug auf ihren durchschnittlichen maximalen Kompaktierungsdruck. Eine vernünftige Erklärung könnte sein, dass es während des Preformings ausreichend Zeit gab, um innerhalb von 3 Minuten vollständiges Verfließen des Binders im Textil zu gewährleisten. Darüber hinaus scheint es, dass durch den Binder die Faserabgleitvorgänge gehemmt werden, was zu höheren maximalen Kompaktierungskräften im Vergleich zu unbedinderten Preforms führt. Während des heißpressens dringen die geschmolzenen Binderpartikel in die Faserzwischenräume der angrenzenden textilen Lagen ein. Wenn die Preform dann entformt und auf Raumtemperatur abgekühlt wird, weisen diese durchdrungenen Bereiche einen hohen Grad an Fixierung auf. Daher beschränkt sich der größte Teil des Faserabgleitens während des Kompaktierungsvorganges auf jene Filamente, die nicht mit dem Binder in Kontakt gekommen sind (siehe Abb. 45) [112].

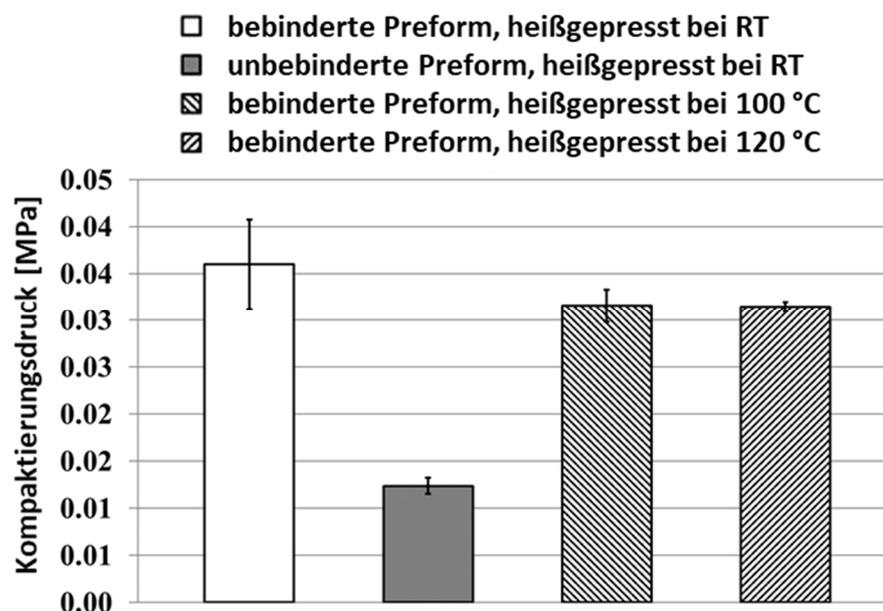


Abb. 58: Maximaler Kompaktierungsdruck zur Erreichung des Faservolumengehalt Ziels [112].

Bei der Betrachtung der bei Raumtemperatur gepressten Proben wurde eine größere maximale Kompaktierungskraft sowie eine höhere Schwankungsbreite

beobachtet. Das Fehlen einer Zwischenlagenverklebung durch pressen unterhalb des Binderschmelzpunktes erklärt dieses Phänomen. Die Bindepartikel können daher nicht in die Zwischenräume eindringen, sondern absorbieren elastische Energie, die die maximale Kraft erhöht. Des Weiteren fixieren sie die bereits benetzten Fasern, welche nicht mehr abgleiten können. Die signifikante Zunahme der Abweichung konnte durch die höhere Wahrscheinlichkeit von Nestingeffekten erklärt werden. Aufgrund der fehlenden Zwischenlagenfixierung kann jede Art von Preformhandlung zu Verschiebungen der textilen Lagen führen. Dies erhöht die Möglichkeit, die zuvor bereits erreichte Filamentordnung zwischen zweier Lagen rückgängig zu machen [112].

### 6.3.2 Charakterisierung der Oberflächenspannung

Die Charakterisierung wurde durchgeführt, um die Wechselwirkungen zwischen den Messfluiden und dem Binder zu verstehen. Zu diesem Zweck wurden Kontaktwinkelmessungen, mit einem Drop Shape Analyzer (DSA 100, Krüss GmbH), bei Raumtemperatur mit einem Tropfenvolumen von  $2 \mu\text{l}$ , durchgeführt. Die Kontaktwinkelmessungen wurden mit drei verschiedenen Flüssigkeiten mit bekannter Oberflächenspannung (siehe Tabelle 5) durchgeführt, wobei jedes Ergebnis durch Mittelung über fünf verschiedene Tropfenpositionen auf der Probe erzielt wurde. Die für die Kontaktwinkelmessungen verwendeten Fluide und ihre jeweiligen Oberflächenspannungswerte ( $\gamma_l$ ) sind in Tabelle 5 angeführt. Der Binder EPR 05390 wurde in Pulverform geliefert. Aufgrund der Pulverform war eine DSA-Charakterisierung nicht ohne weiter Verarbeitung möglich, so dass Binderplatten für die Prüfung hergestellt wurden. Zusätzlich wurden mit einem Tensiometer (K100, Krüss GmbH) Tests durchgeführt, um die Ergebnisse zwischen Binderpulver und seiner festen Form zu vergleichen. Das Tensiometer half bei der Analyse des Pulvers da es im Unterscheid zum Drop Shape Analyzer die Oberflächenspannung über die Kapillarwirkung ermittelt. Beide Methoden wiesen vergleichbare Ergebnisse aus [112].

Die Oberflächenspannungen des Binders wurde mit der Owens, Wendt, Rabel und Kaeble-Methode berechnet [53–56]. Daher wurden die Kontaktwinkel der Binderplatten mit allen drei Messflüssigkeiten bestimmt. Nachdem die Winkel und

Oberflächenenergien der Messflüssigkeiten gefunden waren, konnten sie als Eingangsparmeter für Gleichung 2.25 verwendet werden [112].

Tabelle 5: Messfluide für die Kontaktwinkelmessungen von EPR 05390 [57, 113].

Messfluide	Oberflächenspannung ( $\gamma_l$ ) [mN/m]	Polarer Anteil ( $\gamma_l^p$ ) [mN/m]	Disperser Anteil ( $\gamma_l^d$ ) [mN/m]
Wasser	72.8	51.0	21.8
Cyclohexan	35.4	25.0	25.0
Ethyleneglycol	47.7	16.8	30.9

Die Ergebnisse wurden mittels linearer Approximation als Gerade dargestellt. Aus der Steigung wurde der polare Oberflächenspannungsanteile berechnet, während der disperse Anteil durch die Konstante dargestellt wird. Die berechneten Oberflächenenergien ( $\gamma_s$ ) des Binders EPR 05390 sowie der Prüfflüssigkeiten sind in Tabelle 6 angegeben. Während die kumulative Oberflächenspannung sowie der disperse Anteil beider Testflüssigkeiten eine hinreichende Vergleichbarkeit aufweisen, gibt es eine massive Abweichung im polaren Bereich. Die fehlende Polarität im Pflanzenöl wird durch das Vorhandensein von Fettsäuren verursacht, wie bereits von Michalski et al. [114] berichtet. Dadurch weicht das Adhäsionsverhalten ab und in Folge das Füllverhalten ebenfalls [115].

Tabelle 6: Oberflächenspannung von Binder und Messfluiden.

Materialien	Oberflächenspannung ( $\gamma_s$ ) [mN/m]	Polarer Anteil ( $\gamma_s^p$ ) [mN/m]	Disperser Anteil ( $\gamma_s^d$ ) [mN/m]
Epoxid Harz	45.0	7.8	37.2
Pflanzenöl	33.6	0	33.6
EPR 05390	25.7	4.9	20.8

### 6.3.3 Binderlöslichkeit

Bei der Imprägnierung einer bebinderten Preform ist mit einer gewissen Lösung des Binders im Harz zu rechnen. Die resultierende Lösung weicht in Bezug auf die chemorheologischen Eigenschaften ab und gilt nach wie vor als ein großer unbekannter Faktor [17, 116, 117]. Der Pulverbinder und die Testflüssigkeit

RIMR135 basieren beide auf Bisphenol-A und unterscheiden sich vor allem in ihrer Moleküllänge; daher ist der Binder bei Raumtemperatur erstarrt, während das Harz noch in flüssiger Form vorliegt. Im Gegensatz dazu teilt das flüssige Pflanzenöl keine gemeinsame chemische Struktur mit dem Bindermaterial. Daher wurden qualitative Lösungsversuche durchgeführt [112].

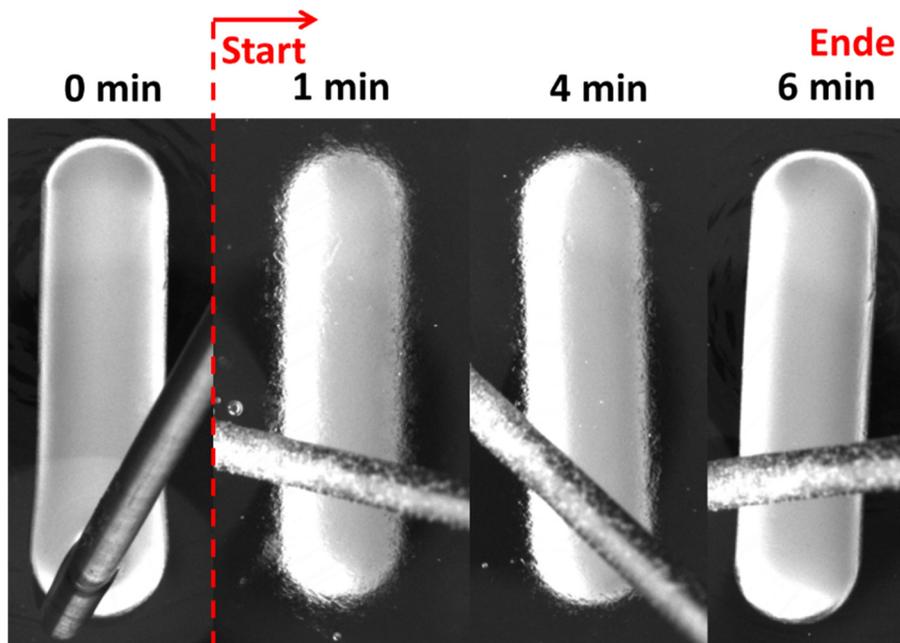


Abb. 59: Exemplarische Darstellung der Methode zur Bestimmung der Lösungsgeschwindigkeit des Binders in RIMR135 [112].

In einem ersten Schritt wurde entweder das RIMR135 oder das Pflanzenöl auf eine Solltemperatur erwärmt. Anschließend wurde eine Mischung aus Binder mit entweder RIMR135 oder Pflanzenöl hergestellt. Die Menge des Binders wurde entsprechend dem Verhältnis eingestellt, das während der Permeabilitätsversuche in der Preform zu erwarten war; daher wurden  $2,56 \text{ g}$  Bindemittel in  $50 \text{ ml}$  Testflüssigkeit gegeben. Die Mischung wurde dann mit einem Magnetrührer ständigem Rühren unterzogen. Der Magnetrührer wurde dann nach äquidistanten Zeitintervallen gestoppt, um eine qualitative optische Inspektion durchzuführen. Der Binder wurde als vollständig gelöst betrachtet, wenn keine Partikel oder Schlieren mehr im Fluid zu erkennen waren. Exemplarisch ist dieser Prozess in Abb. 59 dargestellt [112].

Der Binder zeigte keine Tendenz zur Auflösung im Pflanzenöl, weder bei Raumtemperatur noch bei höheren Temperaturen (bis  $160^{\circ}\text{C}$ ). Dieses Phänomen hängt mit den unterschiedlichen chemischen Strukturen und den unterschiedlichen polaren Oberflächenspannungen zusammen, wie bereits im vorherigen Abschnitt berichtet. Es wurden gleiche Mischungen mit dem Harz RIMR135 und dem Binder hergestellt. Sie wurden dann hinsichtlich der Zeit untersucht, die benötigt wurde, um den Binder im Harz bei verschiedenen Temperaturen vollständig aufzulösen. Eine doppelte exponentielle Beziehung wurde phänomenologisch ermittelt welche den Zeit- Temperaturzusammenhang, dargestellt [112].

$$t [s] = 2.379e24 [s] \exp(-0.1489 [K^{-1}] T [K]) + 2.175e9 [s] \exp(-0.04483 [K^{-1}] T [K]) \quad (6.11)$$

Diese phänomenologische Beziehung eröffnet die Möglichkeit, die theoretische Zeit bis zur vollständigen Auflösung des Bindemittels in Kontakt mit dem Harz abzuschätzen. Sie kann verwendet werden, um die maximale experimentelle Dauer zu schätzen und die Auflösung auf einen bestimmten Prozentsatz zu begrenzen. Es wurde auch klar, dass bereits moderate Temperaturniveaus (ca. *1 Minute* bei  $90^{\circ}\text{C}$ ) zu einer schnellen Auflösung des Bindemittels und zu einer inhomogenen Bindemittelverteilung im fertigen Verbundteil führen können. Darüber hinaus ist es notwendig, den rheologischen Einfluss des Binders auf die Viskosität der Testflüssigkeit zu untersuchen [112].

#### 6.3.4 Viskositätsverhalten der Testfluide

Es wurde mit einem Anton Paar Physica MCR501 Rheometer das Viskositätsverhalten der Messflüssigkeiten analysiert, die dann bei den Permeabilitätsmessungen eingesetzt wurden. Ein Platte-Platte Aufbau mit einem Plattendurchmesser von  $50\text{ mm}$  und einem Spalt von  $0,5\text{ mm}$  wurde gewählt, was einem Bedarf von ca.  $1\text{ ml}$  Flüssigkeit für jedes Experiment entspricht.

Die untersuchten Flüssigkeiten waren reines Epoxidharz RIMR135 (ohne Härter) und ein Pflanzenöl von Osana, das aus einer Mischung aus Rapsöl und Sonnenblumenöl besteht. Wie man in Abb. 60 sehen kann, zeigt die

Viskositätsentwicklung von RIMR135 und seiner Mischung ein doppeltexponentielles Verhalten, während das Pflanzenöl ein exponentielles Verhalten für die Viskosität über Temperatur zeigt. Neben der Verschiebung zwischen reinem Harz und Harz-Binder Gemisch gibt es auch einen Unterschied in der Steigung gegenüber dem Pflanzenöl [112].

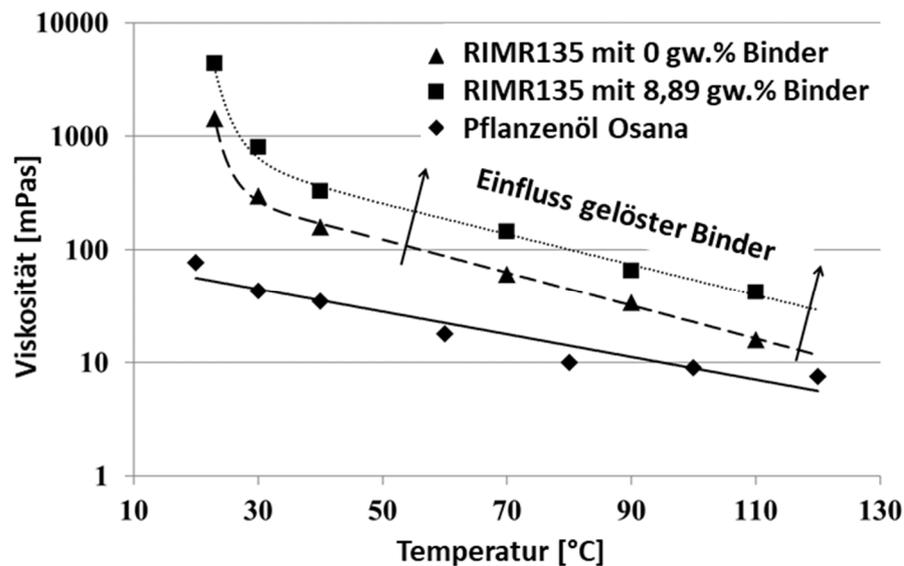


Abb. 60: Viskositätsentwicklung beider Messfluide, welche bei den Permeabilitätsmessungen eingesetzt wurden sowie der Einfluss des Binders auf die Viskosität von RIMR135 [112].

Zusätzlich wurden weitere Mischungen von RIMR135 mit unterschiedlichem Bindemittelgehalt hergestellt und hinsichtlich ihrer Viskosität getestet. Im Allgemeinen führt die Menge des Bindemittelgehalts im Harz zu einer parallelen Verschiebung in Richtung höherer Viskosität. Es ist anzunehmen, dass das höhere Molekulargewicht des Bindemittels diesen Effekt verursacht [112].

Tabelle 7: Übersicht zu den verwendeten Prüfsetups an den unterschiedlichen Permeameter [112].

Orientierung Permeabilität	Preform Typ	Permeameter Typ	Messfluid	System Temperatur		
				23°C	75°C	100°C 120°C
Ebene Permeabilität	unbebinderte Preform	optisches Permeameter	Pflanzenöl	✓		
	bebinderte Preform			✓		
	unbebinderte Preform			✓	✓	
	bebinderte Preform	kapazitives Permeameter			✓	
	unbebinderte Preform				✓	
	bebinderte Preform			Harz	✓	✓
Dicken Permeabilität	unbebinderte Preform	Ultraschall Permeameter	Pflanzenöl	✓		
	bebinderte Preform			✓		

### 6.3.5 Permeabilitätsverhalten

In diesem Abschnitt werden die wichtigsten Ergebnisse der Messungen und Interpretationen der Permeabilitätsversuche zusammengefasst (siehe Tabelle 10 bis Tabelle 12). Daher werden mehrere Zusammenstellungen von Permeabilitätsergebnissen verglichen. Darüber hinaus beinhalten die veranschaulichten Ergebnisse Piktogramme, die die speziellen Versuchsbedingungen der Zusammenstellungen darstellten und hervorheben. Alle Permeabilitätswerte werden als gemittelte Werte, entsprechend Gleichung 6.4 unter der Annahme einer niedrigen Anisotropie dargestellt [112].

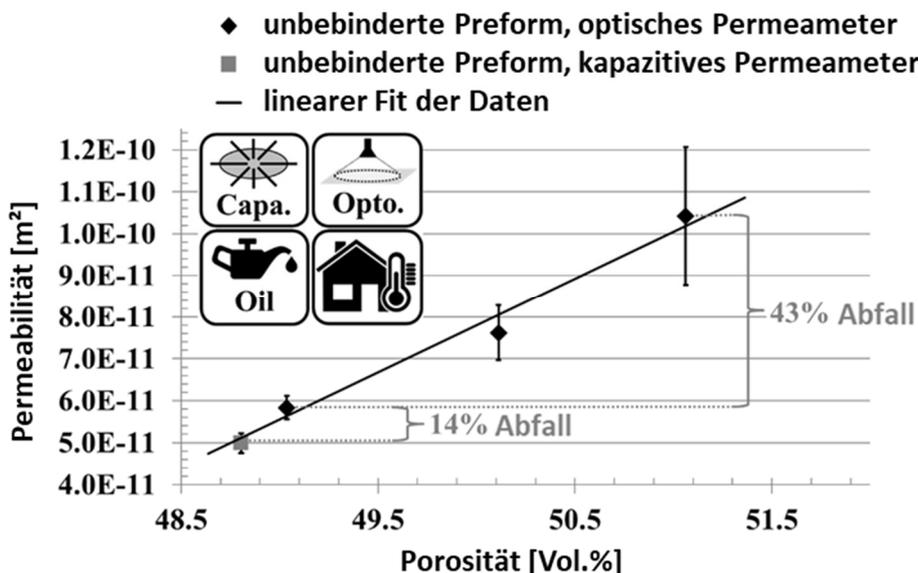


Abb. 61: Vergleich der Permeabilitätsversuche des optischen und kapazitiven Permeameters bei kleinen Porositätsunterschieden [112].

Zunächst wird in Abb. 61 eine Vorversuchsreihe mit beiden Permeametern in der Ebene dargestellt. Hauptziel der Testreihe war es, den Einfluss kleiner Änderungen der Kavitätshöhe zu untersuchen. Dazu wurden  $5 \mu m$  transparente Polymerfilme in die Kavität des optischen Permeameters eingebracht. So wurde die Kavitätshöhe von  $2,59 \text{ mm}$  auf  $2,54 \text{ mm}$  und  $2,49 \text{ mm}$  reduziert, was mit der Porosität aus Abb. 61 korreliert. Wie man sieht, führt eine Reduktion der Kavitätshöhe um  $10 \mu m$  (korrelierend mit ca. 2 % Porosität) zu einem signifikanten Rückgang der Permeabilität. Im Vergleich dazu wurde die Kavitätshöhe des kapazitiven Permeameters auf  $2,48 \text{ mm}$  eingestellt, was 48,65 % Porosität entspricht. Daher ist

die Permeabilität geringer als diejenige, die im optischen Permeameter ermittelt wurde. Dies ist besonders wichtig, wenn man die folgenden experimentellen Ergebnisse betrachtet [112].

In Abb. 62 ist eine Zusammenstellung aller unbedinderter Preforms dargestellt, die mit beiden Permeametern, verschiedenen Messfluiden und unterschiedlichen Temperaturen getestet wurden. Vergleicht man die bei Raumtemperatur getestete Preforms mit Öl in beiden Permeametern, so tritt das in Abb. 61 beschriebene Phänomen auf. Daher sind die Ergebnisse aufgrund ihrer unterschiedlichen Porosität nicht vollständig vergleichbar [112].

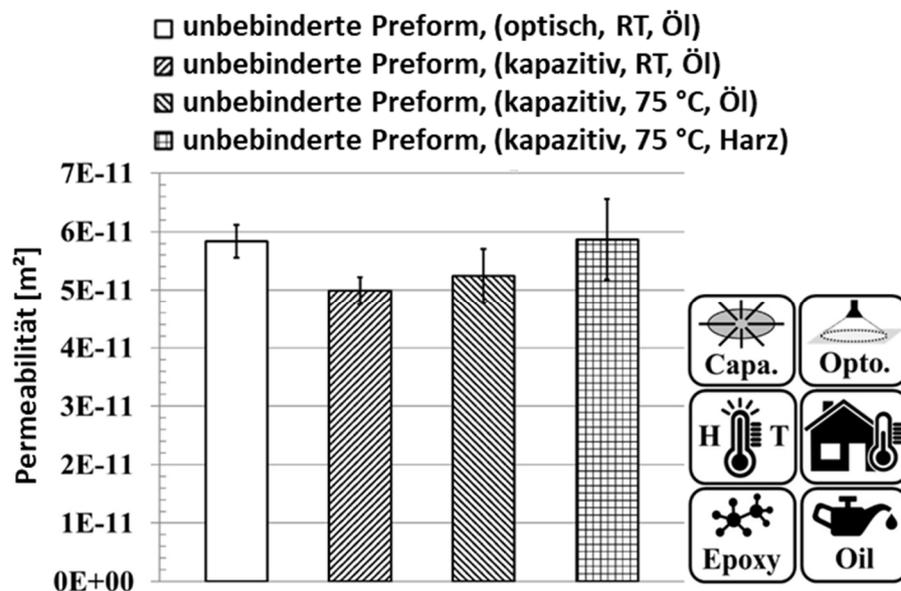


Abb. 62: Vergleich aller unbedinderter Preforms [112].

Bei der Betrachtung der im kapazitiven Permeameter getesteten Preforms beeinflussen unterschiedliche Einflüsse die Ergebnisse. Erstens scheint es eine geringfügige Erhöhung der Permeabilität bei der Erhöhung der Systemtemperatur zu geben (von Raumtemperatur auf 75°C mit Öl), aber dieser Effekt ist nicht signifikant, wenn man ihn anhand der Standardabweichung beurteilt. Zweitens tritt dieser Effekt auch beim Wechsel des Messfluides (von Öl auf Harz bei 75°C) auf und bestätigt damit den Verdacht auf Einflüsse auf die Permeabilität durch wechselnde Oberflächenspannung der Messfluide. Diese Hypothese wird durch Literatur gestützt, z.B. Korosi und Kovats [118], die den Einfluss der Temperatur auf die Oberflächenenergie organischer Flüssigkeiten untersucht haben, sowie

Dimitrovova und Advani [115] als auch Luo et al. [119], die den Einfluss der Oberflächenspannung auf den ungesättigten Fluss in LCM-Prozessen untersuchten. Sie räumten ein, dass der Kontaktwinkel der Testflüssigkeit einen Einfluss auf die Permeabilität hat [112].

Wie zu sehen ist, vergleicht Abb. 63 die unbedinderten Preforms mit den bei unterschiedlichen Temperaturen heißgepressten, bebinderten Preforms. Die unbedinderten Preforms zeigten eine um rund 50 % höhere Permeabilität als die bebinderten. Neben diesem offensichtlichen Unterschied schien die Heißpresstemperatur keinen signifikanten Einfluss auf die Permeabilität, den Orientierungswinkel und die Anisotropie zu haben. Folglich wurden alle experimentellen Daten, dieser Messreihen zusammengeführt und als eine betrachtet. Dadurch konnte die Standardabweichung signifikant verringert werden. Eine mögliche Erklärung ist die Faserarchitektur von Gelegen, die bessere Faserordnungsprozesse ermöglichen und daher im Vergleich zu Geweben mehr offene Strömungskanäle im Roving sowie in den Zwischenräumen hinterlassen. Im Gegensatz dazu weisen Gewebe eine hohe Anzahl an Ondulationen auf, wodurch geringe lokale Porosität und hohe Reaktionsdrücke während der Kompaktierung in der Kavität bei vergleichbarer Porosität hervorrufen wird [112].

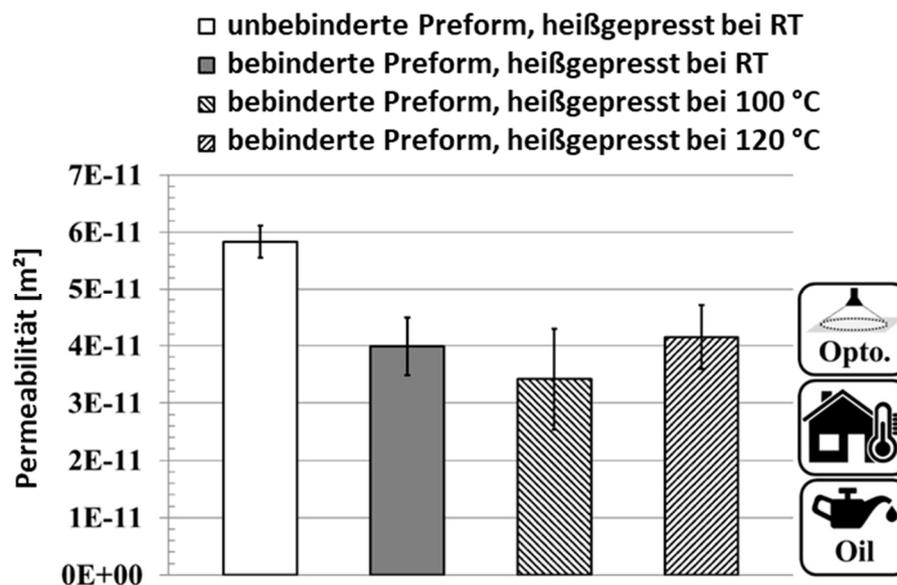


Abb. 63: Einfluss der Preformingtemperatur auf die Permeabilität [112].

Die Ergebnisse der Ultraschall Permeabilitätsversuche in der Dicke sind in Abb. 64 dargestellt. Es scheint, dass der Einfluss des Binders auf die Permeabilität deutlich höher ist als bei den Versuchen in der Ebene. Die Preforms, die bei Raumtemperatur gepresst wurden, zeigten einen Rückgang von rund 70 % im Vergleich zu den unbebinderten Preforms. Die bei 120 °C heißgepressten Preforms schienen eine höhere Permeabilität zu haben, während die Standardabweichung ebenfalls eine Zunahme zeigte. Dieser Effekt könnte sich aus dem Binderverhalten beim Heißpressen ergeben. Wenn der Binder mehr verflüssigt wird und besser verfließt, aufgrund des Viskositätsabfalls bei höherer Temperatur und den in Folge besser wirkenden Kapillarkräften, kann es zu einer insgesamt größeren Verteilung des Binders in der intralamminaren Ebene kommen, wodurch der Fluss in der Dicke verbessert wird. Die erhöhte Standardabweichung auf der anderen Seite, kann durch die vermutlich geringere Fixierung durch Heißpressen bei höherer Temperatur, verursacht werden [112].

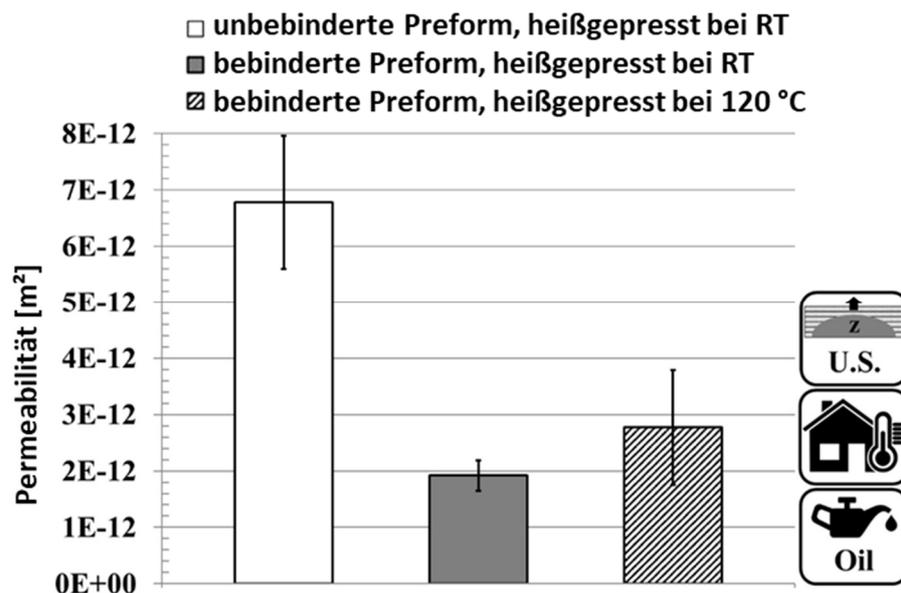


Abb. 64: Vergleich der Permeabilität in der Dicke in Abhängigkeit der Preformingparameter [112].

Bei der Analyse von Permeabilitätsdaten in der Ebene von bebinderten Preforms würde man ein bestimmtes Verhaltensmuster erwarten, wie in Abb. 65 dargestellt. Aus dieser Abbildung geht hervor, dass die unbebinderten Preforms eine Basislinie in der Beziehung Permeabilität über Temperatur bilden würden. Der Versatz

zwischen den nicht bebinderten Preforms und den bebinderten Preforms bei Raumtemperatur enthält bereits eine Mischung aus überlappenden Effekten, wie z.B. die durch den Binder verursachte Porositätsreduzierung, den Einfluss des Benetzungsverhaltens zwischen Binder und Messflüssigkeit, das unterschiedliche Kompaktierungsverhalten der Preforms und andere unbekannte Effekte. Des Weiteren kann eine Änderung der Systemtemperatur eine Viskositätsänderung des Messfluides auslösen, die zu falschen Ergebnissen führen kann, wenn sie unerkannt und nicht richtig adressiert wird [112].

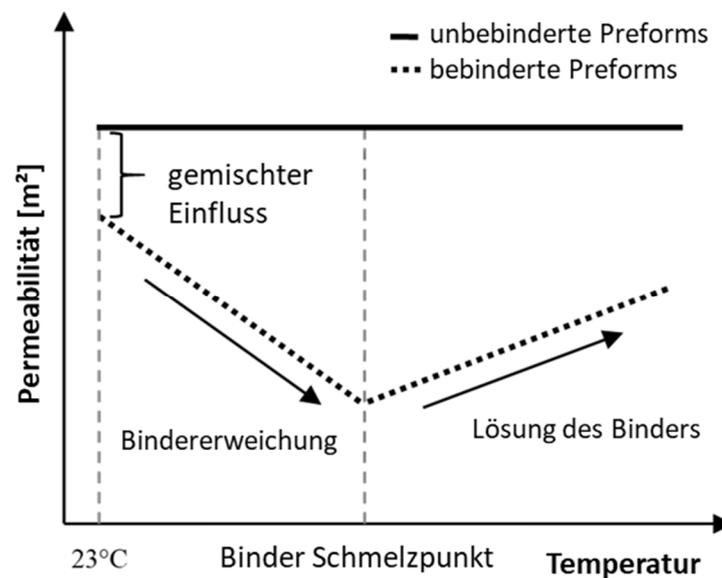


Abb. 65: Arbeitshypothese in Bezug auf den erwarteten Permeabilitätsverlauf der bebinderten Preforms bei verschiedenen Temperaturen [112].

Bei den bebinderten Preforms wurde erwartet, dass sie bei erhöhter Systemtemperatur abnehmende Permeabilitätswerte aufweisen, bis der Binder vollständig "geschmolzen" ist. Tatsächlich handelt es sich eher um eine kontinuierliche Erweichung aufgrund der fehlenden Kristallisation in ungehärteten Epoxidharzen, entsprechend ohne Schmelzpunkt. So fließt der Binder unter dem Einfluss des Kompaktierungsdrucks innerhalb der Form langsam und füllt die interlaminaeren Räume aus, während es bei hoher Viskosität an seinem Ausgangspunkt bleibt. Bei höherer Temperatur sinkt die Viskosität drastisch, so dass Kapillareffekte auftreten können, die den Binder in die intralaminaeren Räume

saugen. Darüber hinaus erhöht sich die Löslichkeit des Binders deutlich, was zu einer erhöhten Permeabilität führt [112].

In Abb. 66 werden die Permeabilitätswerte aller bebinderten Preforms zusammengefasst. Sie gliedern sich in Experimente mit Öl und Experimente mit Epoxidharz als Messfluid. Der Vergleich der mit Öl durchgeführten Experimente zeigte den zuvor beschriebenen Einfluss der Kavitätshöhe und damit der Porositätsunterschiede durch die Wahl des Permeameters. Die Differenz zwischen den Permeabilitätsmittelwerten der bebinderten Preforms mit Öl gemessen lag bei etwa 8 %, während die unbinderten Preforms eine Differenz von 14 % aufwiesen. Möglicherweise kommt es durch die erhöhten Systemtemperaturen zu einem zusätzlichen Einfluss der veränderten Oberflächenspannung, die in die Ergebnisse miteinwirken, wodurch der Effekt reduziert wird. Darüber hinaus ist der Unterschied in den Mittelwerten zwischen Öl und Harz bei gleicher Systemtemperatur signifikant. Dies deutet auf einen starken Einfluss der Prüfflüssigkeit auf die Permeabilitätsmessung hin [112].

Bei Betrachtung aller bebindeter Preforms und unter der Annahme der Vergleichbarkeit von Experimenten mit Öl und Harz steigt die Permeabilität bis zu einem gewissen Punkt mit der Systemtemperatur an. Darüber hinaus wurde ein signifikanter Rückgang der Permeabilität beobachtet. Diese Beobachtung steht in absolutem Kontrast zur ursprünglichen Arbeitshypothese. Der ausgegraute Balken bezeichnet nicht als zuverlässige zu behandelnde Daten [112].

Dennoch konnte eine vernünftige Erklärung durch die Löslichkeit und Viskositätsentwicklung der Binder gefunden werden. Die Art dieser Effekte könnte das beobachtete Phänomen antreiben und beeinflussen. Unter Berücksichtigung der doppelten Exponentialfunktion aus Gleichung 6.11 kann man die Löslichkeitszeit des nominellen Bindergehalts in einer bebinderten Preform beschreiben. Es wird auch deutlich, dass kleine Temperaturschwankungen sehr hohe Auswirkungen haben. Daher würde sich während eines Experiments mehr Binder auflösen und die Viskosität der Testflüssigkeit verändern (siehe Abb. 60). Darüber hinaus kann dies zu einer Auswaschung des Binders in der Nähe des Angusspunktes führen, was den gesamten Bindergehalt in diesem Bereich reduziert. Im Gegenteil, dies würde bedeuten, dass der Bereich in der Nähe der

Fließfront während eines Experiments Binder ansammelt. Durch die Zusammenführung dieser Gedanken wird unklar, ob die geschätzten Permeabilitätswerte stattdessen als Scheinwerte betrachtet werden müssen. Da der gelöste Binder Einfluss auf die Viskosität und die Änderungen der Porositätsverteilung in der Preform innerhalb eines Experiments haben, kann nicht mehr von einer unveränderten textilen Struktur ausgegangen werden. Um dieses Phänomen besser zu verstehen wurden Folgeuntersuchungen durchgeführt, welche den Bindergehalt nach der Imprägnierung ermitteln sollten [112].

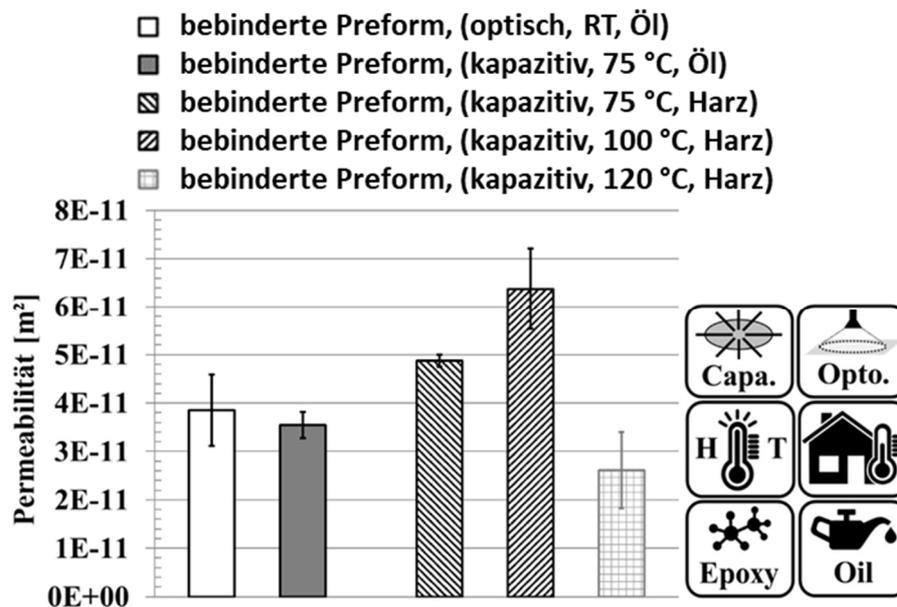


Abb. 66: Vergleich der eben Permeabilität aller bebindeter Preforms [112].

### 6.3.6 Bestimmung der Binderverteilung

Zur Bestimmung der Binderverteilung in Imprägnierten Preforms wurde eine Methode entwickelt, um das Harz aus der den Prüfkörpern zu extrahieren. Dazu wurden zu Beginn zwei Imprägnierungen im kapazitiven Permeameter durchgeführt und nach unterschiedlichen Zeiten abgebrochen. Die Versuche wurden nach einmal *20 Sekunden* und einmal nach *64 Sekunden* gestoppt. Ziel war es hierbei keine Überfüllung der Preform zuzulassen, um so die charakteristische elliptische Form der Füllung zu präservieren und zu verhindern, dass es zu einem Auswaschen des Binders aus der Preform kommt. Der Aufbau der Preform war gleich jener in den vorangegangenen Permeabilitätsversuchen und die Systemtemperatur war auf *120 °C* eingestellt da das interessante Verhalten aus Abb. 66 im Fokus war. Nach

der Beendigung der Imprägnierung wurden die teilimprägnierten Preforms aus dem Werkzeug entnommen und zwischen zwei Kaptonfolien gelegt und eingefroren. Die Ellipsen wurden vermessen und äquidistante konzentrische Ellipsen aufgezeichnet, wie in Abb. 67 zu erkennen ist. Es wurde die Annahme getroffen, dass die Verteilung des Binders in den jeweils gegenüberliegenden Bereichen, z.B. Norden und Süden die gleiche ist. Des Weiteren schließt jeder der Einzelbereiche z.B. Norden einen Winkel von  $90^\circ$  ein, mit dem Ziel ausreichend Binder-Harz Gemisch aus den Preforms zu extrahieren. Die Bereiche, welche zusammengefasste Sektoren ausweisen, haben sich bei der Extraktion als besonders unergiebig herausgestellt und wurden daher zusammengelegt. Das minimale Zielvolumen pro Sektor lag bei  $1\text{ ml}$  Gemisch um in Viskositätsversuche hineinzugehen.

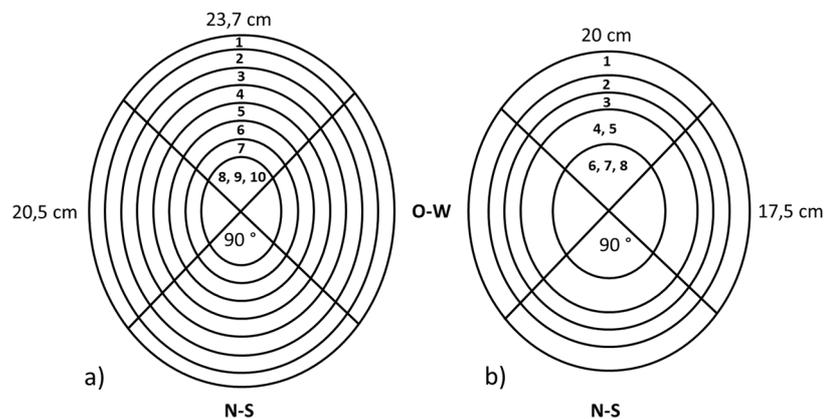


Abb. 67: Die Ellipsen und Sektoren der Füllversuche welche nach a) *64 Sekunden* und b) *20 Sekunden* beendet werden.

Nachdem die Preforms tiefgefroren waren konnten Sie besser zerteilt werden. Dies wurde mit feinen Rasierklingen, welche in einen Meißel eingespannt wurden durchgeführt. Das Ergebnis ist in Abb. 68 zu sehen.

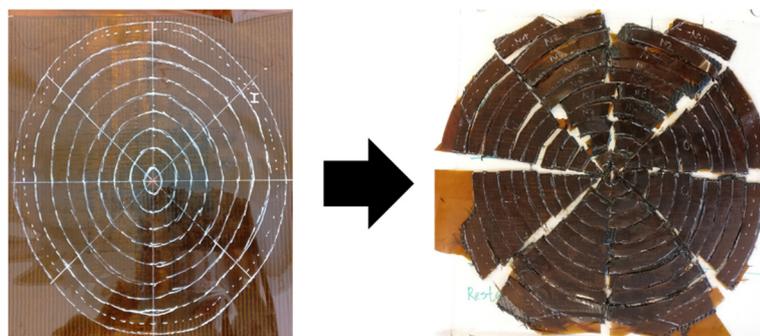


Abb. 68: Sektionierte Preform vor und nach der Teilung.

Anschließend wurde ein zweiphasiger Pressvorgang zur Gewinnung und Reinigung der Gemische durchgeführt, siehe Abb. 69. Dazu wurden die Preformsektionen in eine robuste *60 ml* Spritze eingelegt und in einem Wasserbad auf  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  aufgeheizt. Es konnte das Gemisch durch die erhöhte Temperatur und den damit einhergehenden Viskositätsabfall leichter und ergiebiger extrahiert werden. Die Spritze wurde in einen eigens angefertigten Zylinder eingespannt und in dem Kompaktierungssetup mit Druck beaufschlagt. Das Gemisch wies eine eindeutige dunkle Färbung durch Kohlenstofffaserreste auf. Daher wurde das extrahierte Gemisch, mittels eines Mikrofiltrieraufsatzes von diesen Schwebstoffen, gereinigt.

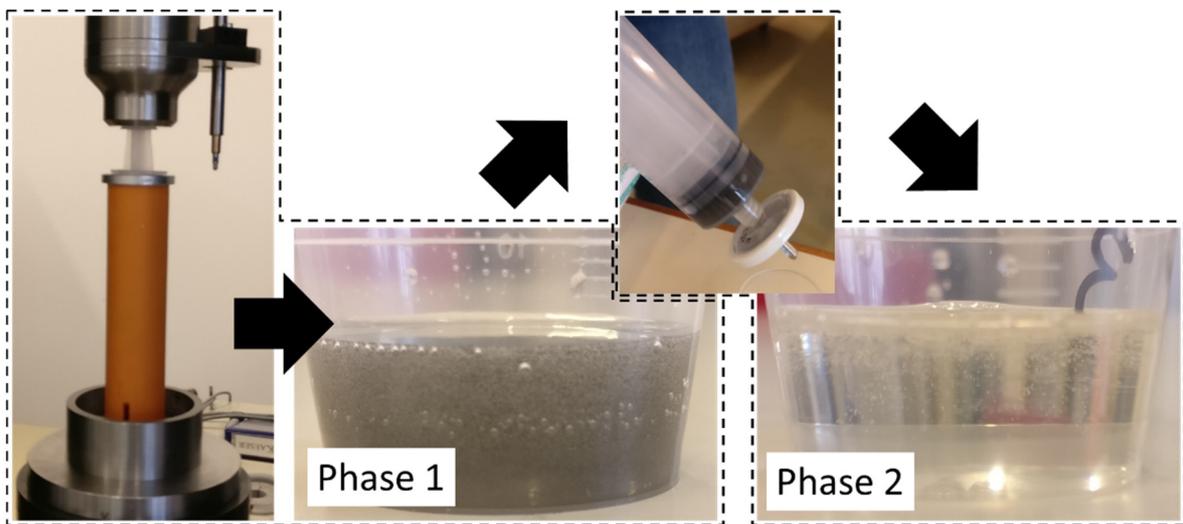


Abb. 69: Zweiphasiges Extraktionsverfahren bestehend aus Phase 1 der Gewinnung und Phase 2 der Reinigung.

Die gewonnenen Gemische wurden dann in Abhängigkeit ihrer Ergiebigkeit entsprechend Abb. 67 zusammengeführt um ein Mindestmaß von *1 ml* pro Sektion zu erhalten. Um die Bindergehalte der Proben zu ermitteln wurden Messungen von Binder-Harz Gemischen mit bekannten Mischungsverhältnissen durchgeführt, siehe Abb. 70. Die Messungen wurden mit dem bereits bekannten Platte-Platte Setup mit einem Durchmesser von *50 mm* und einer Spalthöhe von *0,5 mm* durchgeführt. Es wurde bei Raumtemperatur gemessen, da hier der Einfluss des Binders auf die Viskosität des Fluides am höchsten ist und somit die genaueste Zuordnung möglich ist. Aus den Referenzmessungen konnte ein empirischer Zusammenhang zwischen Bindergehalt und Viskosität extrahiert werden.

$$\text{Bindergehalt [\%]} = 0,081 * \ln(\text{Viskosität [mPas]}) - 0,5894 \quad (6.12)$$

Die Mischungen wurden nach den zu erwartenden Konzentrationen gewählt und im Bereich von 0 % bis ca. 9 % fein aufgelöst mit einer zusätzlichen Messung bei ca. 23 % um die Approximation zu verbessern.

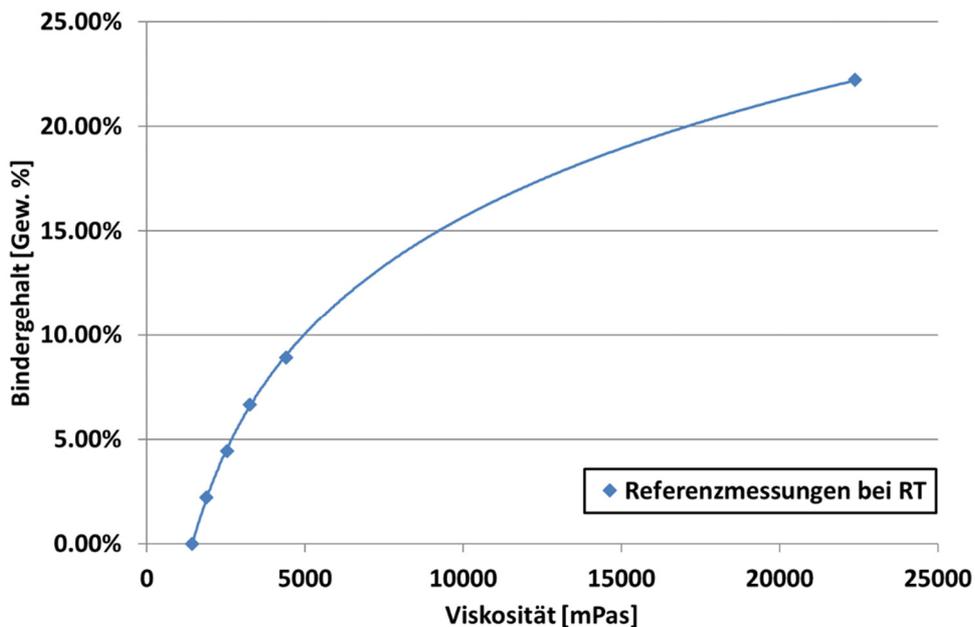


Abb. 70: Viskositätsmessungen von Binder-Harz Mischungen bei Raumtemperatur als Referenz für die Bindergehaltbestimmung.

Die Ergebnisse der Versuche zur Bestimmung der Binderverteilung sind Tabelle 8 und Abb. 71 zu entnehmen. Mehrere Dinge fallen auf, bei der Betrachtung der Ergebnisse. Zum einen überrascht es, dass in der Tabelle ein negativer Prozentwert angeführt wird. Es ist anzunehmen, dass das Harz höheren thermischen Belastungen ausgesetzt war als die Proben, welche zur Referenz gemessen wurden. Dadurch kann es zu einem Kettenabbau gekommen sein, welche die Viskosität systematisch beeinflusst. Eine weitere Erklärung könnte in der in Lösung gehenden Schlichte liegen, die in den Referenzmessungen nicht gelöst ist. Das heißt, dass alle Binderkonzentrationen tatsächlich über den ermittelten Werten liegen könnten. Des Weiteren ist auffällig, dass bei Versuch a) die Ellipsennebenachse eine höhere Binderkonzentration aufweist als die Hauptachse, obwohl die zurückgelegte Fließlänge geringer ist. Eine mögliche Erklärung könnte

sein, dass der Einfluss der Zeit zum Lösen des Binders stärker wirkt als jener des Überfließens von neuem trockenem Binder. Prinzipiell muss aber festgehalten werden, dass es sich um einzelne Versuche ohne Wiederholungen handelt, wodurch die Aussagekraft natürlich deutlich eingeschränkt ist.

Tabelle 8: Binderkonzentrationen nach den Füllversuchen.

Füllzeit	Orient.	1	2	3	4	5	6	7	8-10
64s	O-W	7,5%	4,2%	3,2%	2,3%	1,7%	1,1%	0,4%	0,1%
	N-S	6,5%	5,0%	3,7%	2,9%	1,5%	1,2%	0,6%	-0,3%
20s	O-W	6,2%	4,2%	3,2%	1,8%	0%			
	N-S	6,8%	4,2%	3,0%	1,8%	0,3%			

Nichtsdestotrotz lässt sich ein Effekt mit Sicherheit bestätigen, und zwar jener des Auswaschens, bzw. Akkumulierens von Binder. Während das nominelle Niveau an Binder in der Preform um die 2 % liegen sollte, zeigt sich, dass im Bereich um den Radialanguss kein oder kaum noch Binder in der Preform vorhanden ist, stattdessen akkumuliert sich dieser an der Fließfront. Betrachtet man nun in Abb. 66 die Serie an Experimenten welche bei 120 °C durchgeführt wurden ist es plausibel zu denken, dass der Binder sich derart akkumulieren kann, so dass der Fluss in der Preform massiv behindert wird. Die Experimente zeigen in jedem Fall, dass auf diesem Gebiet Handlungsbedarf besteht und Raum für Folgeuntersuchungen.

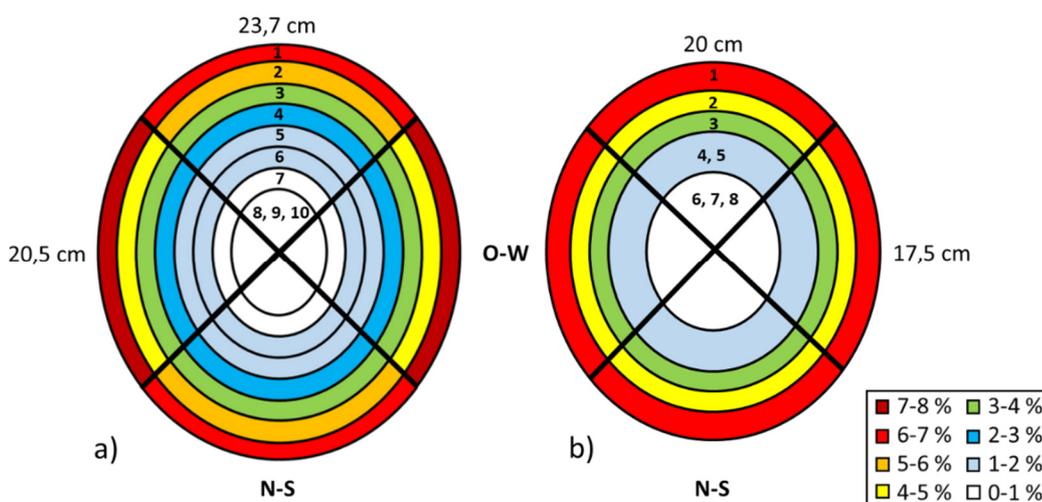


Abb. 71: Farbliche Darstellung der Binderverteilung in den Füllversuchen nach a) 64 Sekunden und b) 20 Sekunden.

### 6.3.7 Diskussion

Die Studie an Pulverbebinderten Gelegen zur Permeabilitätsbestimmung unter prozessnahen Bedingungen umfasste eine Vielzahl an flankierenden Versuchen, zum besseren Verständnis der chemorheologischen Vorgänge während der Imprägnierung. Wie zu erwarten war der Einfluss des Binders auf das Kompaktierungsverhalten signifikant und bewirkt eine Erhöhung der maximalen Kompaktierungskraft zur Erreichung des gewünschten Faservolumengehaltes. Die Messungen der Oberflächenspannung haben gezeigt, dass das Verhalten von Epoxidharz im Vergleich zu Pflanzenöl ebenfalls signifikante Unterschiede aufweist. Die chemische Ähnlichkeit zwischen Binder und Harz, bewirkt zum einen bessere Benetzbarkeit als auch Löslichkeit des Binders, im Gegensatz zum Pflanzenöl. Die Geschwindigkeit der Lösung des Binders im Harz hängt sehr stark von der Temperatur ab und hat nach empirischer Ermittlung einen doppel-exponentiellen Zusammenhang aufgezeigt. Die Auswirkung des gelösten Binders auf die Viskosität des Harzes konnte durch Messungen quantifiziert werden. Es wurden Permeabilitätsmessungen in drei unterschiedlichen Permeametern durchgeführt. Die Versuche fanden bei Raumtemperatur sowie bei erhöhter Temperatur statt und wurden mit Pflanzenöl als auch mit Harz durchgeführt. Die Messungen haben gezeigt, dass bei Temperaturen unterhalb der Erweichungstemperatur des Binders das Pflanzenöl zu niedrigerer Permeabilität führt als das Harz. Dies wird als Hinweis für den Oberflächenspannungseinfluss gesehen. Mit steigender Temperatur verbessert sich die Permeabilität mit Harz, bis zu einem gewissen Punkt, an dem sie dann dramatisch abfällt. Grund dafür dürfte die schnelle Lösung des Binders im Harz sein, welche durch nachgeschaltete Versuche bestätigt werden konnte. Mittels einer eigens entwickelten Methode konnte das Binder-Harz Gemisch aus teilimprägnierten Preforms extrahiert und gefiltert werden. Über die Viskosität dieses Gemisches ließ sich der Bindergehalt über Referenzmessungen ermitteln. Es wurde deutliches Auswaschen des Binders um den Injektionspunkt herum festgestellt und eine erhöhte Konzentration an der Fließfront gemessen. Dieser Effekt sollte bei der Herstellung von Bauteilen unbedingt berücksichtigt werden und könnte in Zukunft modelliert werden.

## 7 Zusammenfassung und Fazit

Für die Herstellung von FKV-Bauteilen nehmen die Flüssigimprägnierverfahren und dafür notwendige Preforms eine immer wichtigere Rolle ein, da sie es ermöglichen schwierige Geometrien als auch große Bauteile zu realisieren. Mittlerweile existieren viele verschiedene Verarbeitungsverfahren und Variationen dieser zur Imprägnierung von Preforms. Eine entscheidende Rolle kommt dabei den Eigenschaften der Preforms zu, wodurch auch immer mehr Verfahren zur Herstellung eben dieser entstehen. Prinzipiell ist zwischen Preforms die auf Näh- bzw. Konfektionstechnik und jenen, welche auf dem Einsatz von Bindern basieren, zu unterscheiden. In der vorliegenden Arbeit wurden die Möglichkeiten der Preformherstellung, mittels zweier experimenteller Verfahren erkundet und die Möglichkeiten sowie Herausforderungen aufgezeigt. Ergänzend wurden konventionelle Pulver bebinderte Gelege untersucht.

Es wurde Multimaterial Legesystem zur Verarbeitung von Binderrovings mittels ADFP entwickelt. Dieses ermöglichte es einen Preform Legeprozess zu implementieren und Prozessparameter nach Belieben zu variieren. Das System zeichnet sich durch hohe Flexibilität aus, die durch den hohen Grad an Eigenentwicklung realisiert werden konnte. Das Legesystem wurde dahingehend konzipiert, um unabhängig vom verwendeten Bewegungssystem eingesetzt zu werden. Die erste Implementierung am Überbau, welcher die Herstellung von 2-dimensionalen Strukturen erlaubt, hatte den Vorteil der starren Fixierung des Legesystems wodurch es wesentlich einfacher ist Peripherie zu integrieren. Die Preforms wurden vollautomatisiert, unter Zuhilfenahme von Infrarotstrahlern bzw. einer Heizplatte als Wärmequellen gefertigt. Um den einwandfreien Ablauf der Preformherstellung zu gewährleisten wurde ein System zur Prüfung des einlaufenden Binderrovings entwickelt und implementiert. Es wird zur kontinuierlichen Breitereingangsmessung als auch zum Detektieren von Verdrillungen verwendet. Des Weiteren wurde ein System zur optischen Erkennung von Legefehlern implementiert. Es verhindert, dass Binderrovings, welche an der Kompaktierungsrolle kleben bleiben und sich um diese herumwickeln die bereits gelegte Preform zerstören. Die so entstandenen Preforms wurden für eine Füllstudie herangezogen und auf deren Imprägnierbarkeit untersucht. Leider

zeigten sie gravierende Schwächen in Hinblick auf ihre Imprägnierbarkeit. Nicht zerstörende Analysemethoden, nämlich Ultraschall Rastermikroskopie sowie Computer Tomographie konnten die verbliebene Porosität in den Platten aufzeigen. Als ausschlaggebende Faktoren wurden der Bindergehalt auf dem zur Verfügung stehenden Binderoving, als auch die zu hohe minimale Kompaktierungskraft des Legesystems identifiziert.

In einem zweiten Ansatz zur Preformherstellung wurde FDM 3D-Druck Technologie zur Manipulation von Gewebestrukturen verwendet. Der Ansatz verfolgte zwei Ziele, zum einen sollten die Permeabilitätseigenschaften nachhaltig beeinflusst werden, während die textile Struktur und der interlamminare Zusammenhalt der Lagen gewährleistet war. Zum anderen wurde der Einfluss des Binders auf die Imprägnierung untersucht und ein Modell zur Quantifizierung des Einflusses entwickelt. Es basiert auf der Idee der lokalen Permeabilitätsverringern, wodurch es zu einem lokalen Abfall der Fließfrontgeschwindigkeit kommt. Dieser Effekt wurde dann über den Einsatz der Mischungsregel, sowie der Anwendung von Serienschaltungen bzw. Parallelschaltungen quantifiziert. Diese konnten dann in die Form einer Verhältnismatrix gebracht werden, die die Abschwächung der Permeabilität in den dezidierten Raumrichtungen beschreiben konnte. Das Modell soll für die Zukunft die Basis schaffen um Binder gezielt zur Manipulation von Fließfronten einzusetzen welche dann auch durch Fließsimulationen beschrieben werden können.

Die abschließende Studie beschäftigte sich mit Preforms, welche aus Gelegen mit Pulverbindern aufgebaut waren. Es wurden Permeabilitätsversuche unter prozessnahen Bedingungen (erhöhte Temperatur, neben Pflanzenöl auch Epoxidharz als Messfluid) durchgeführt und der Einfluss auf die Textilien untersucht. Da sich das Verhalten maßgeblich von jenem unter klassischen Laborbedingungen unterscheidet wurden flankierende Versuche, zur Charakterisierung der Wechselwirkungen zwischen dem Binder und dem Messfluid, durchgeführt. Dabei wurde neben der Oberflächenspannung zwischen den Messfluiden und dem Binder, welche ausschlaggebend für die Benetzung ist, auch die Löslichkeit des Binders in den Fluiden betrachtet. Darauf aufbauend wurde der Einfluss der gelösten Bindermenge auf die Viskosität des Harzes quantifiziert. Da sich die Permeabilität

mit der Messtemperatur stark veränderte und die Löslichkeitsmessungen einen schnellen Übergang von Binder in das Harz vorhersagten, war davon auszugehen, dass sich die Binderverteilung in der Preform während eines Permeabilitätsversuches verändert. Es wurde eine Methodik entwickelt die es ermöglichte nach einem ausgewählten Versuch das Harz-Binder Gemisch aus der Preform zu extrahieren und zu reinigen. Dadurch konnte im Anschluss aufgrund der Viskositätsveränderung, bedingt durch den gelösten Binder, eine Bestimmung des Bindergehaltes erfolgen.

Die erzielten Ergebnisse und entwickelten Methoden in dieser Arbeit tragen letztendlich zu einem tiefergehenden Verständnis im Umgang mit Binder bei. Es konnte mitunter das Potenzial dieser Materialien aufgezeigt werden, aber auch die damit einhergehenden Herausforderungen welche auch in der Zukunft nach neuen Lösungsansätzen verlangen.

## 8 Literaturverzeichnis

- [1] Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., und Midgley, P.M.: Climate change 2013, New York, 2013.
- [2] Herrmann, A. und Eberth, U.: Technische Textilien für Luftfahrt-und Fahrzeuganwendungen, Technische Textilien, Edition Textiltechnik. Deutscher Fachverlag Frankfurt, 2006, 337–352.
- [3] Neitzel, M., Mitschang, P., und Breuer, U.: Handbuch Verbundwerkstoffe: Werkstoffe, Verarbeitung, Anwendung, Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, 2014.
- [4] Ehrenstein, G.W.: Faserverbund-Kunststoffe, München, Wien: Carl Hanser Verlag, 2006.
- [5] Langmann, R. und others: Taschenbuch der Automatisierung, Leipzig: Hanser Verlag, 2004, 335.
- [6] Cherif, C.: Textile Werkstoffe für den Leichtbau, Springer, 2011.
- [7] Belhaj, M., Deleglise, M., Comas-Cardona, S., Demouveau, H., Binetruy, C., Duval, C., und Figueiredo, P.: Dry fiber automated placement of carbon fibrous preforms, 50, 2013, 107–111.
- [8] Tonejc, M., Pletz, M., Fauster, E., und Schledjewski, R.: Permeability Customisation Through Preform Manipulation Utilising 3D-Printing Technology, Polymers & Polymer Composites, 25, 2017.
- [9] Shih, C.-H., Liu, Q., und Lee, L.J.: VARTM Using Tackified Fiber Preforms, Polym. Compos., 22, 2001, 721–729.
- [10] Ivanov, D.S., Le Cahain, Y.M., Arafati, S., Dattin, A., Ivanov, S.G., und Aniskevich, A.: Novel method for functionalising and patterning textile composites, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 84, 2016, 175–185.

- [11] Ivanov, D.S., White, J.A.P., Hendry, W., Mahadik, Y., Minett, V., Patel, H., und Ward, C.: Stabilizing textile preforms by means of liquid resin print, *Advanced Manufacturing: Polymer & Composites Science*, 1, 2014, 26–35.
- [12] Fürst, T.: Verfahren, Anlage und Vorrichtung zum Auftragen eines Bindemittels auf zumindest eine Schicht eines mehrschichtigen Vorformlings, Google Patents, 2012.
- [13] Brune, M.: Hotmelt-Sprühbinder im rotierenden Verfahren, adhäsion KLEBEN & DICHTEN, 50, 2006, 15–19.
- [14] Alagirusamy, R. und Ogale, V.: Development and Characterization of GF/PET, GF/Nylon, and GF/PP Commingled Yarns for Thermoplastic Composites, *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 18, 2016, 269–285.
- [15] Shih, C.-H. und Lee, L.J.: Tackification of Textile Fiber Preforms in Resin Transfer Molding, *Journal of Composite Materials*, 35, 2001, 1954–1981.
- [16] Rohatgi, V. und Lee, L.J.: Moldability of Tackified Fiber Preforms in Liquid Composite Molding, *Journal of Composite Materials*, 31, 1997, 720–744.
- [17] Chen, J., Backes, D., und Jayaraman, K.: Dynamics of binder displacement in liquid molding, *Polymer composites*, 17, 1996, 23–33.
- [18] Brody, J.C. und Gillespie, J.W.: Reactive and non-reactive binders in glass/vinyl ester composites, *Polym. Compos.*, 26, 2005, 377–387.
- [19] Tanoğlu, M. und Tuğrul Seyhan, A.: Investigating the effects of a polyester preforming binder on the mechanical and ballistic performance of E-glass fiber reinforced polyester composites, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 23, 2003, 1–8.
- [20] Wu, W., Xie, L., Jiang, B., und Ziegmann, G.: Influence of textile preforming binder on the thermal and rheological properties of the catalyzed cyclic butylene terephthalate oligomers, *Composites Part B: Engineering*, 55, 2013, 453–462.

- [21] Thoma, B., Weidenmann, K., und Henning, F.: Chemical stitching as a promising approach for automated preforming of textiles, *Zeitschrift Kunststofftechnik/Journal of Plastics Technology*, 2012, 491–514.
- [22] Magagnato D., Thoma B., und Henning F.: Experimental characterization to determine the influence of different binder systems on the preform permeability during RTM manufacturing, *Zeitschrift Kunststofftechnik*, 4, 2015, 256–270.
- [23] Dierssen, T., Bloedorn, C., und Mehlenhoff, T., “Solution for dry-fiber-placement with a standard articulating robot system,” in *SAE 2010 Aerospace Manufacturing and Automated Fastening Conference & Exhibition*, 2010.
- [24] Yan, L., Chen, Z.C., Shi, Y., und Mo, R.: An accurate approach to roller path generation for robotic fibre placement of free-form surface composites, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 30, 2014, 277–286.
- [25] Klomp-de Boer, R.: Automated preform fabrication by dry tow placement, *REACT 2011*, 2011, 69.
- [26] Koncherry, V.: Multifunctional Carbon Fibre Flat Tape for Composites, *Dissertation an der The University of Manchester*, 2013.
- [27] Matveev, M.Y., Ball, F.G., Jones, I.A., Long, A.C., Schubel, P.J., und Tretyakov, M.V.: Uncertainty in geometry of fibre preforms manufactured with Automated Dry Fibre Placement and its effects on permeability, *Journal of Composite Materials*, 15, 2017, 2255-2269.
- [28] Rudd, C.D., Turner, M.R., Long, A.C., und Middleton, V.: Tow placement studies for liquid composite moulding, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 30, 1999, 1105–1121.
- [29] Shirinzadeh, B., Cassidy, G., Oetomo, D., Alici, G., und Ang Jr, M.H.: Trajectory generation for open-contoured structures in robotic fibre placement, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 23, 2007, 380–394.

- [30] Mills, A., Patel, Z., Dell'Anno, G., und Frost, M.: Resin transfer moulding: Novel fabrics and tow placement techniques in highly loaded carbon fibre composite aircraft spars, *SAMPE Journal*, 43, 2007, 67–72.
- [31] Yang, J., Xiao, J., Zeng, J., Jiang, D., und Peng, C.: Compaction behavior and part thickness variation in vacuum infusion molding process, *Appl Compos Mater*, 19, 2012, 443–458.
- [32] Chen, B., Lang, E.J., und Chou, T.-W.: Experimental and theoretical studies of fabric compaction behavior in resin transfer molding, *Materials Science and Engineering: A*, 317, 2001, 188–196.
- [33] Fauster, E., Thirunavukkarasu, J., Hergan, P., und Schledjewski, R., “Experimental process pressure analysis for model-based manufacturing of composites by resin transfer moulding,” in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018.
- [34] Adams, K.L., Russel, W.B., und Rebenfeld, L.: Radial penetration of a viscous liquid into a planar anisotropic porous medium, *International Journal of Multiphase Flow*, 14, 1988, 203–215.
- [35] Adams, K.L. und Rebenfeld, L.: In-plane flow of fluids in fabrics: structure/flow characterization, *Textile Research Journal*, 57, 1987, 647–654.
- [36] Adams, K.L. und Rebenfeld, L.: Permeability characteristics of multilayer fiber reinforcements. Part I: Experimental observations, *Polym. Compos.*, 12, 1991, 179–185.
- [37] Adams, K.L. und Rebenfeld, L.: Permeability characteristics of multilayer fiber reinforcements. Part II: Theoretical model, *Polym. Compos.*, 12, 1991, 186–190.
- [38] Fauster, E., Grössing, H., und Schledjewski, R., “A Comparison of two Measurement Techniques for Determining the 2D Permeability Characteristics of Reinforcing Textiles,” in *Proceedings of the 20th International Conference of Composite Materials*, 2015.
- [39] Bear, J.: *Dynamics of fluids in porous media* Dover Publications, INC, New York, NY, 1988.

- [40] Chan, A.W. und Hwang, S.-T.: Anisotropic in-plane permeability of fabric media, *Polymer Engineering & Science*, 31, 1991, 1233–1239.
- [41] Weitzenböck, JR, Shenoj, R.A., und Wilson, P.A.: Measurement of three-dimensional permeability, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 29, 1998, 159–169.
- [42] Weitzenböck, JR, Shenoj, R.A., und Wilson, P.A.: Radial flow permeability measurement. Part A: Theory, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 30, 1999, 781–796.
- [43] Darcy, H.: *Les fontaines publiques de la ville de Dijon: Exposition et application*, Victor Dalmont, 1856.
- [44] Scheidegger, A. und others: *The physics of flow through porous media*, University Of Toronto Press: London, 1958.
- [45] Endruweit, A.: *Investigation of the influence of local inhomogeneities in the textile permeability on the resin flow in liquid composites moulding processes*, Dissertation an der ETH Zurich, 2003.
- [46] Vernet, N., Ruiz, E., Advani, S., Alms, J.B., Aubert, M., Barburski, M., Barari, B., Beraud, J.M., Berg, D.C., Correia, N., und others: Experimental determination of the permeability of engineering textiles: Benchmark II, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 61, 2014, 172–184.
- [47] Arbter, R., Beraud, J.M., Binetruy, C., Bizet, L., Bréard, J., Comas-Cardona, S., Demaria, C., Endruweit, A., Ermanni, P., Gommer, F., und others: Experimental determination of the permeability of textiles: A benchmark exercise, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 42, 2011, 1157–1168.
- [48] Daniel P., Kissinger C., Roeder G., DE10004146C2.
- [49] Grössing, H.: *Contributing to the optimization of the preform LCM process chain: Permeability of reinforcing textiles*, Dissertation an der Montanuniversität Leoben, 2015.
- [50] Hergan, P.: *Konstruktive Auslegung und Umsetzung eines 3D Permeameters*, Masterarbeit an der Montanuniversität Leoben, 2015.

- [51] Michaeli, W.: Einführung in die Kunststoffverarbeitung, 6. Aufl., Hanser, München, 2010.
- [52] Atkins, P. W. und Paula, J. de: Physikalische chemie, John Wiley & Sons, 2013.
- [53] Fowkes, F.M.: Attractive Forces at Interfaces, *Industrial & Engineering Chemistry*, 56, 1964, 40–52.
- [54] Kaelble, D.H.: Dispersion-Polar Surface Tension Properties of Organic Solids, *The Journal of Adhesion*, 2, 2008, 66–81.
- [55] Owens, D.K. und Wendt, R.C.: Estimation of the surface free energy of polymers, *Journal of Applied Polymer Science*, 13, 1969, 1741–1747.
- [56] Rabel, W.: Flüssigkeitsgrenzflächen in Theorie und Anwendungstechnik, *Physik Journal*, 33, 1977, 151–161.
- [57] Rudawska, A. und Jacniacka, E.: Analysis for determining surface free energy uncertainty by the Owen–Wendt method, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 29, 2009, 451–457.
- [58] Erhard, G.: Konstruieren mit Kunststoffen, 4. Aufl., Hanser, München, 2008.
- [59] Li, W., Krehl, J., Gillespie, J.W., Heider, D., Endrulat, M., Hochrein, K., Dunham, M.G., und Dubois, C.J.: Process and Performance Evaluation of the Vacuum-Assisted Process, *Journal of Composite Materials*, 38, 2004, 1803–1814.
- [60] Beier U., Sandler J., Altstädt V., Hülder G., Schmachtenberg E., Spanner H., Weimer C., Roser T., und Hassler U.: Kosteneffiziente Preform Prozesskette für komplexe Hochleistungs- Faserverbund-Strukturbauteile, *Zeitschrift Kunststofftechnik/Journal of Plastics Technology*, 5, 2009.
- [61] Mitschang, P. und Weimer, C.: Komplexe multi-textile Preforms, *Kunststoffe Plast Europe*, 90, 2000, 114–116.
- [62] Ogale, V. und Alagirusamy, R.: Textile preforms for advanced composites, *Indian Journal of Fibre and Textile Research*, 29, 2004, 366–375.

- [63] Wambua, P.M. und Anandjiwala, R.: A Review of Preforms for the Composites Industry, *Journal of Industrial Textiles*, 40, 2011, 310–333.
- [64] Neitzel, M., Mitschang, P., und Breuer, U.: *Handbuch Verbundwerkstoffe: Werkstoffe, Verarbeitung, Anwendung*, Carl Hanser Fachbuchverlag, 2014.
- [65] Cartz, L.: *Nondestructive testing: Radiography, ultrasonics, liquid penetrant, magnetic particle, eddy current*, 2. Aufl., ASM International, Materials Park, Ohio, 1996.
- [66] Hellier, C. J.: *Handbook of nondestructive evaluation*, McGraw-Hill, New York, NY, 2001.
- [67] Sokolov, S.J.: Ultrasonic oscillations and their applications, *Tech Phys USSR*, 2, 1935, 522–534.
- [68] Firestone, F.A.: Flaw detecting device and measuring instrument, Floyd A. Firestone, assignee. Patent, 2280226, 1940, 27.
- [69] Michael Berke: *Nondestructive Material Testing with Ultrasonics: Introduction to the Basic Principles*.
- [70] Gremaud, G.: Scanning Acoustic Microscopy: SAM, MSF, 366-368, 2001, 676-0.
- [71] Brand, S., Czurratis, P., Hoffrogge, P., Temple, D., Malta, D., Reed, J., und Petzold, M.: Extending acoustic microscopy for comprehensive failure analysis applications, *J Mater Sci: Mater Electron*, 22, 2011, 1580–1593.
- [72] Miyasaka, C. und Yoshida, S.: Overview of Recent Advancement in Ultrasonic Imaging for Biomedical Applications, *Open Neuroimage. J.*, 12, 2018, 133–157.
- [73] Parmon, W. und Bertoni, H.L.: Ray interpretation of the material signature in the acoustic microscope, *Electronics Letters*, 15, 1979, 684–686.
- [74] Weglein, R.D.: A model for predicting acoustic material signatures, *Applied Physics Letters*, 34, 1979, 179–181.
- [75] Kak, A.C., Slaney, M., und Wang, G.: Principles of computerized tomographic imaging, *Medical Physics*, 29, 2002, 107.

- [76] Hsieh, J. und others, "Computed tomography: principles, design, artifacts, and recent advances," in 2009.
- [77] Landis, E.N. und Keane, D.T.: X-ray microtomography, *Materials Characterization*, 61, 2010, 1305–1316.
- [78] Friedland, G.W. und Thurber, B.D.: The birth of CT, *AJR. American journal of roentgenology*, 167, 1996, 1365–1370.
- [79] Herman, G.T.: Image Reconstruction from Projections, *ZAMM-Journal of Applied Mathematics and Mechanics/Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*, 63, 1983, 141–142.
- [80] Limodin, N., El Bartali, A., Wang, L., Lachambre, J., Buffiere, J.-Y., und Charkaluk, E.: Application of X-ray microtomography to study the influence of the casting microstructure upon the tensile behaviour of an Al–Si alloy, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 324, 2014, 57–62.
- [81] Tonejc, M.: Konzept zur Automatisierung eines Thermoplast-Tapelegekopfes, Masterarbeit an der Montanuniversität Leoben, 2013.
- [82] Pazour, P.: Entwurf und Konstruktion eines Thermoplast-Tapelegekopfes, Masterarbeit an der Montanuniversität Leoben, 2013.
- [83] Walus, P.: Konstruktion und Umsetzung einer Materialspanneinheit für ein Tapelegesystem, Bachelorarbeit an der Montanuniversität Leoben, 2016.
- [84] Drvoderic, M.: Implementierung und Evaluierung einer Rovingzuführung am Tapelegekopf, Bachelorarbeit an der Montanuniversität Leoben, 2017.
- [85] Tonejc, M., Steiner, H., Fauster, E., Konstantopoulos, S. und Schledjewski, R.: "A Study on Geometrical Parameters Influencing the Mechanical Spreading of Fibre Bundles," in *Proceedings of the 20th International Conference of Composite Materials*, 2015.
- [86] Carrino, L., Polini, W., und Sorrentino, L.: Modular structure of a new feed-deposition head for a robotized filament winding cell, *Composites Science and Technology*, 63, 2003, 2255–2263.

- [87] Coriolis Composites: Automated Dry Fiber Placement, URL: <http://www.coriolis-composites.com/fiber-placement-machines/> (abgerufen am 2019).
- [88] Dirk, H.-J.L., Ward, C., und Potter, K.D.: The engineering aspects of automated prepreg layup: History, present and future, *Composites Part B: Engineering*, 43, 2012, 997–1009.
- [89] Mack, J.: Entwicklung eines adaptiven Bebinderungsprozesses für die Preformherstellung, Institut für Verbundwerkstoffe GmbH, Kaiserslautern, 2015.
- [90] Sloan, J.: ATL & AFP: Defining the megatrends in composite aerostructures, *High performance composites*, 16, 2008, 68.
- [91] Werner D., Emonts M., Brecher C.: Multi-Material-Head-Automatisierte Verarbeitung verschiedener Faserverbundhalbzeuge, URL: [https://www.ipt.fraunhofer.de/content/dam/ipt/de/documents/Produktbl%C3%A4tter/602\\_Multi-Material-Head-Automatisierte-Verarbeitung-verschiedener-Faserverbundhalbzeuge\\_prs\\_16.pdf](https://www.ipt.fraunhofer.de/content/dam/ipt/de/documents/Produktbl%C3%A4tter/602_Multi-Material-Head-Automatisierte-Verarbeitung-verschiedener-Faserverbundhalbzeuge_prs_16.pdf).
- [92] Hexion: EPR 5390, URL: <http://www.hexion.com/en-us/chemistry/epoxy-resins-curing-agents-modifiers/epoxy-tds> (abgerufen am 18. März 2019).
- [93] Hexion: EPON™ Resin 1002F, URL: <https://www.hexion.com/CustomServices/PDFDownloader.aspx?type=tds&pid=a6df363c-5814-6fe3-ae8a-ff0300fcd525> (abgerufen am 18. März 2019).
- [94] NatureWorks: PLA Polymer 4042D, URL: <http://www.unicgroup.com/upfiles/file01170656437.pdf> (abgerufen am 18. März 2019).
- [95] SGL: Sigratex KDL 8049, URL: [http://rimast.com/pdf/High\\_Performance\\_Textiles\\_e.pdf](http://rimast.com/pdf/High_Performance_Textiles_e.pdf).
- [96] Diamante, L.M. und Lan, T.: Absolute Viscosities of Vegetable Oils at Different Temperatures and Shear Rate Range of 64.5 to 4835 s<sup>-1</sup>, *Journal of Food Processing*, 2014, 2014, 1–6.

- [97] Esteban, B., Riba, J.-R., Baquero, G., Rius, A., und Puig, R.: Temperature dependence of density and viscosity of vegetable oils, *Biomass and Bioenergy*, 42, 2012, 164–171.
- [98] Nouredini, H., Teoh, B.C., und Davis Clements, L.: Viscosities of vegetable oils and fatty acids, *J Am Oil Chem Soc*, 69, 1992, 1189–1191.
- [99] Mustață, F., Ioan, B., und N, C.C.: Rheological and Thermal behavior of an Epoxy Resin Modified with Reactive Diluents, *Journal of Polymer Engineering*, 17, 2011, 491–506.
- [100] Shishoo, R.L.: Technical textiles—Technological and market developments and trends, *Indian Journal of Fibre and Textile Research*, 22, 1997, 213–221.
- [101] Tonejc, M., Grössing, H., Fauster, E.: *Utilizing Fused Deposition Modeling Techniques in Composite Processing*, Polymer Processing Society, Graz, Austria, 2015.
- [102] Nguyen, C. D. und Delisle, D.: First Ply Tack of an Automated Fibre Placement Process: Influence of Heatable Mould Surface, Release Films and Process Parameters.
- [103] Nguyen, D.C. und Krombholz, C., “Influence of Process Parameters and Material Aging on the Adhesion of Prepreg in AFP Processes,” in *17th European Conference on Composite Materials (ECCM17), Munich, Germany*, 2016.
- [104] Helber, F., Amann, A., Carosella, S., und Middendorf, P.: Intrinsic fibre heating: a novel approach for automated dry fibre placement, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 406, 2018, 12–64.
- [105] Tonejc, M., Grössing, H., Habicher, M., Fauster, E. und Schledjewski, R.: “Utilizing Fused Deposition Modeling Techniques in Composite Processing,” in *Proceedings Polymer Processing Society Conference*, 2015.
- [106] Endruweit, A. und Ermanni, P.: The in-plane permeability of sheared textiles. Experimental observations and a predictive conversion model, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 35, 2004, 439–451.

- [107]Pierce, R.S., Falzon, B.G., und Thompson, M.C.: Permeability characterization of sheared carbon fiber textile preform, *Polym. Compos.*, 39, 2018, 2287–2298.
- [108]Weitzenböck, JR, Sheno, R.A., und Wilson, P.A.: Radial flow permeability measurement. Part A, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 30, 1999, 781–796.
- [109]Adams, K.L., Miller, B., und Rebenfeld, L.: Forced in-plane flow of an epoxy resin in fibrous networks, *Polymer Engineering & Science*, 26, 1986, 1434–1441.
- [110]Vernet, N., Ruiz, E., Advani, S., Alms, J.B., Aubert, M., Barburski, M., Barari, B., Beraud, J.M., Berg, D.C., Correia, N., Danzi, M., Delavière, T., Dickert, M., Di Fratta, C., Endruweit, A., Ermanni, P., Francucci, G., Garcia, J.A., George, A., Hahn, C., Klunker, F., Lomov, S.V., Long, A., Louis, B., Maldonado, J., Meier, R., Michaud, V., Perrin, H., Pillai, K., Rodriguez, E., Trochu, F., Verheyden, S., Wietgreffe, M., Xiong, W., Zaremba, S., und Ziegmann, G.: Experimental determination of the permeability of engineering textiles, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 61, 2014, 172–184.
- [111]Lawrence, J.M., Barr, J., Karmakar, R., und Advani, S.G.: Characterization of preform permeability in the presence of race tracking, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 35, 2004, 1393–1405.
- [112]Tonejc, M., Ebner, C., Fauster, E. & Schledjewski, R.: Influence of Test Fluids on the Permeability of Epoxy Powder Binded Non-Crimp Fabrics, *Advanced Manufacturing: Polymer and Composites Science*, 5, 1-12, 2019.
- [113]Ström, G., Fredriksson, M., und Stenius, P.: Contact angles, work of adhesion, and interfacial tensions at a dissolving Hydrocarbon surface, *Journal of Colloid and Interface Science*, 119, 1987, 352–361.
- [114]Michalski, M.-C., Desobry, S., Pons, M.-N., und Hardy, J.: Adhesion of edible oils to food contact surfaces, *J Amer Oil Chem Soc*, 75, 1998, 447–454.
- [115]Dimitrovova, Z. und Advani, S.G.: Analysis and characterization of relative permeability and capillary pressure for free surface flow of a viscous fluid

across an array of aligned cylindrical fibers, *Journal of Colloid and Interface Science*, 245, 2002, 325–337.

- [116] Lionetto, F., Moscatello, A., und Maffezzoli, A.: Effect of binder powders added to carbon fiber reinforcements on the chemoreology of an epoxy resin for composites, *Composites Part B: Engineering*, 112, 2017, 243–250.
- [117] Schmidt, S., Mahrholz, T., Kühn, A., und Wierach, P.: Powder binders used for the manufacturing of wind turbine rotor blades. Part 1. Characterization of resin-binder interaction and preform properties, *Polym. Compos.*, 23, 2016, n/a-n/a.
- [118] Korosi, G. und Kovats, E.S.: Density and surface tension of 83 organic liquids, *J. Chem. Eng. Data*, 26, 1981, 323–332.
- [119] Luo, Y., Verpoest, I., Hoes, K., Vanheule, M., Sol, H., und Cardon, A.: Permeability measurement of textile reinforcements with several test fluids, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 32, 2001, 1497–1504.

## 9 Anhang

Tabelle 9: Experimentell ermittelte Permeabilitätsdaten in der Ebene der FDM bedruckten Preforms [8].

Versuch	Preform Typ	VG [%]	$k_1$ [m <sup>2</sup> ]	$k_2$ [m <sup>2</sup> ]	$\beta$ [°]	$k_m$ [m <sup>2</sup> ]
1		38,7	2,07E-10	1,35E-10	1	1,71E-10
2		38,7	2,40E-10	1,66E-10	1	2,03E-10
3	P	38,7	3,01E-10	1,81E-10	0	2,41E-10
4		38,7	2,60E-10	1,69E-10	1	2,15E-10
5		38,7	2,71E-10	1,70E-10	0	2,21E-10
6		45,2	6,41E-11	3,20E-11	1	4,81E-11
7		45,2	8,52E-11	4,04E-11	3	6,29E-11
8	P	45,2	9,75E-11	3,69E-11	1	6,73E-11
9		45,2	7,31E-11	4,93E-11	1	6,12E-11
10		45,2	8,53E-11	4,31E-11	1	6,43E-11
11		51,6	2,73E-11	1,56E-11	2	2,15E-11
12		51,6	4,23E-11	2,27E-11	1	3,25E-11
13	P	51,6	4,42E-11	1,82E-11	1	3,12E-11
14		51,6	3,12E-11	2,13E-11	1	2,63E-11
15		51,6	4,06E-11	2,44E-11	4	3,25E-11
16		41,0	1,65E-10	1,02E-10	32	1,34E-10
17		41,0	1,66E-10	1,02E-10	34	1,34E-10
18	P45	41,0	1,87E-10	1,37E-10	29	1,62E-10
19		41,0	2,02E-10	1,31E-10	33	1,67E-10
20		41,0	2,07E-10	1,52E-10	23	1,80E-10
21		41,0	1,98E-10	1,35E-10	24	1,67E-10
22		48,0	5,07E-11	2,78E-11	33	3,93E-11
23		48,0	4,67E-11	3,39E-11	40	4,03E-11
24	P45	48,0	4,50E-11	2,56E-11	27	3,53E-11
25		48,0	4,17E-11	2,34E-11	26	3,26E-11
26		48,0	4,53E-11	3,33E-11	46	3,93E-11
27		48,0	4,59E-11	3,14E-11	15	3,87E-11
28		54,8	2,60E-11	1,77E-11	53	2,18E-11
29		54,8	1,87E-11	1,08E-11	15	1,48E-11
30		54,8	2,72E-11	1,37E-11	29	2,05E-11
31	P45	54,8	2,21E-11	1,37E-11	15	1,79E-11
32		54,8	2,12E-11	9,96E-12	11	1,56E-11
33		54,8	2,65E-11	1,68E-11	13	2,17E-11
34		54,8	2,05E-11	1,21E-11	10	1,63E-11

---

35		41,0	2,04E-10	1,87E-10	85	1,95E-10
36		41,0	1,83E-10	1,66E-10	6	1,75E-10
37		41,0	1,88E-10	1,69E-10	89	1,78E-10
38	P90	41,0	1,80E-10	1,42E-10	88	1,61E-10
39		41,0	1,55E-10	1,30E-10	87	1,42E-10
40		41,0	1,69E-10	1,62E-10	76	1,65E-10
41		41,0	1,66E-10	1,55E-10	85	1,60E-10
<hr/>						
42		48,0	7,00E-11	3,86E-11	90	5,43E-11
43		48,0	4,79E-11	4,62E-11	2	4,71E-11
44		48,0	3,65E-11	3,50E-11	28	3,58E-11
45	P90	48,0	5,38E-11	3,14E-11	89	4,26E-11
46		48,0	4,29E-11	4,10E-11	1	4,20E-11
47		48,0	4,05E-11	3,83E-11	73	3,94E-11
48		45,0	4,52E-11	4,25E-11	89	4,38E-11
<hr/>						
49		54,8	2,41E-11	1,89E-11	86	2,15E-11
50		54,8	2,04E-11	1,90E-11	1	1,97E-11
51		54,8	2,27E-11	2,04E-11	63	2,15E-11
52	P90	54,8	2,10E-11	1,84E-11	1	1,97E-11
53		54,8	3,39E-11	2,46E-11	87	2,92E-11
54		54,8	3,39E-11	1,68E-11	88	2,53E-11
55		54,8	2,06E-11	1,89E-11	80	1,97E-11

---

---

Tabelle 10: Experimentell ermittelte Permeabilitätsdaten in der Ebene bei Raumtemperatur am optischen Permeameter [112].

Versuch	Preform Typ	Porosität [%]	$k_1$ [m <sup>2</sup> ]	$k_2$ [m <sup>2</sup> ]	$\beta$ [°]	$k_m$
1		50,1	4,64E-11	4,56E-11	32	4,60E-11
2		50,1	4,72E-11	4,11E-11	81	4,41E-11
3	Bebindert	49,8	3,22E-11	3,16E-11	23	3,19E-11
4		48,7	4,22E-11	3,89E-11	9	4,05E-11
5		50,1	3,98E-11	3,45E-11	75	3,70E-11
6		50,8	8,60E-11	8,31E-11	66	8,46E-11
7		51,1	1,14E-10	8,56E-11	88	9,86E-11
8	Unbebindert	51,2	9,33E-11	7,97E-11	89	8,63E-11
9		51,2	1,13E-10	1,05E-10	6	1,09E-10
10		51,1	1,26E-10	1,06E-10	82	1,16E-10
11		51,1	1,49E-10	1,15E-10	84	1,31E-10
12		50,8	5,57E-11	4,75E-11	73	5,14E-11
13	Prefom bei	49,8	3,14E-11	2,33E-11	83	2,70E-11
14	100°C	49,7	3,19E-11	2,69E-11	88	2,93E-11
15	gepresst	50,4	3,47E-11	2,84E-11	84	3,14E-11
16		49,6	3,27E-11	3,08E-11	73	3,17E-11
17		50,0	4,11E-11	4,02E-11	49	4,07E-11
18	Prefom bei	49,7	3,71E-11	3,20E-11	88	3,44E-11
19	120°C	50,1	4,17E-11	3,28E-11	86	3,70E-11
20	gepresst	50,0	5,34E-11	4,60E-11	81	4,96E-11
21		51,7	4,92E-11	4,27E-11	85	4,58E-11
22		49,1	7,59E-11	6,30E-11	76	6,92E-11
23	Unbebindert	49,1	5,71E-11	5,18E-11	32	5,44E-11
24	mit 2 Folien	48,9	6,70E-11	6,53E-11	20	6,61E-11
25		48,9	6,18E-11	5,94E-11	60	6,06E-11
26		49,2	6,33E-11	5,71E-11	88	6,01E-11
27		50,1	7,15E-11	6,07E-11	9	6,59E-11
28	Unbebindert	50,1	7,90E-11	7,42E-11	47	7,66E-11
29	mit 1 Folie	50,1	7,86E-11	7,76E-11	52	7,81E-11
30		50,3	8,73E-11	8,12E-11	81	8,42E-11

Tabelle 11: Experimentell ermittelte Permeabilitätsdaten in der Ebene bei unterschiedlichen Prozessparametern im kapazitiven Permeameter [112].

Versuch	Prefrom Typ	Porosität [%]	$k_1$ [m <sup>2</sup> ]	$k_2$ [m <sup>2</sup> ]	$\beta$ [°]	$k_m$ [m <sup>2</sup> ]
1		48,88	5,50E-11	4,80E-11	-3	5,14E-11
2	Unbebindert	48,88	5,09E-11	4,49E-11	-2	4,78E-11
3	gemessen mit	49,60	6,78E-11	5,59E-11	-3	6,16E-11
4	RIMR135 bei	49,24	5,46E-11	5,18E-11	-1	5,32E-11
5	75°C	48,76	7,72E-11	6,09E-11	-2	6,86E-11
6		48,88	7,68E-11	6,69E-11	-2	7,17E-11
7	Bebindert	47,51	5,01E-11	4,77E-11	-3	4,89E-11
8	gemessen mit	47,51	5,41E-11	4,55E-11	-2	4,96E-11
9	RIMR135 bei	47,39	5,06E-11	3,83E-11	-2	4,40E-11
10	75°C	47,63	5,49E-11	4,52E-11	-2	4,98E-11
11		47,51	4,88E-11	4,47E-11	-3	4,67E-11
12	Bebindert	47,39	7,96E-11	7,08E-11	-2	7,51E-11
13	gemessen mit	47,39	7,23E-11	6,14E-11	-2	6,66E-11
14	RIMR135 bei	47,63	5,27E-11	5,17E-11	-1	5,22E-11
15	100°C	47,39	6,34E-11	5,86E-11	-3	6,10E-11
16		47,39	3,86E-11	3,47E-11	-2	3,66E-11
17		48,64	3,56E-11	2,49E-11	-3	2,98E-11
18	Unbebindert	48,88	4,82E-11	4,34E-11	-1	4,57E-11
19	gemessen mit Öl	48,88	4,59E-11	3,57E-11	-3	4,05E-11
20	bei	48,76	5,10E-11	4,49E-11	-3	4,78E-11
21	Raumtemperatur	48,76	5,65E-11	4,82E-11	1	5,21E-11
22		48,88	5,30E-11	4,66E-11	-2	4,97E-11
23		48,76	5,18E-11	4,57E-11	3	4,86E-11
24	Unbebindert	48,76	5,98E-11	5,34E-11	2	5,65E-11
25	gemessen mit Öl	48,88	4,95E-11	4,62E-11	-1	4,78E-11
26	bei 75°C	48,88	6,64E-11	5,30E-11	-2	5,93E-11
27		48,76	5,48E-11	4,54E-11	-2	4,99E-11
28	Bebindert	47,21	4,92E-11	2,94E-11	-3	3,80E-11
29	gemessen mit Öl	47,21	5,09E-11	2,63E-11	3	3,66E-11
30	bei 75°C	47,41	3,99E-11	2,52E-11	-2	3,17E-11
31		47,10	2,65E-11	1,16E-11	3	1,76E-11
32		47,39	3,29E-11	2,03E-11	-3	2,58E-11
33	Bebindert	47,51	1,45E-11	1,04E-11	-1	1,23E-11
34	gemessen mit	47,63	9,05E-12	8,63E-12	-3	8,84E-12
35	RIMR135 bei	47,27	2,66E-11	2,37E-11	-2	2,51E-11
36	120°C	47,27	2,88E-11	1,87E-11	-2	2,32E-11
37		47,27	4,08E-11	3,10E-11	-2	3,56E-11
38		47,27	3,71E-11	3,31E-11	-2	3,50E-11

Tabelle 12: Experimentell ermittelte Permeabilitätsdaten in der Dicke verschiedener Preforms [112].

Versuch	Preform Typ	FVG [%]	$k_3$ [m <sup>2</sup> ]
1		58,1	2,07E-12
2	Bebindert bei Raumtemperatur gepresst	58,1	3,77E-13
3		58,3	2,19E-12
4		58,2	1,48E-12
5		59,2	1,93E-12
6		56,5	6,54E-12
7		56,4	8,41E-12
8	Unbebindert	56,2	5,08E-12
9		56,2	6,13E-12
10		56,4	7,76E-12
11		56,4	1,64E-12
12		58,0	2,14E-12
13	Bebindert bei 120°C heißgepresst	58,9	2,04E-12
14		58,0	4,52E-12
15		58,9	4,19E-13
16		58,4	2,39E-12

## 10 Publikationen

Teile der vorliegenden Arbeit wurden in folgenden Veröffentlichungen publiziert:

### **Journalbeiträge als Erstautor:**

Tonejc, M., Ebner, C., Fauster, E. & Schledjewski, R.: Influence of Test Fluids on the Permeability of Epoxy Powder Binded Non-Crimp Fabrics, *Advanced Manufacturing: Polymer and Composites Science*, Manuskript eingereicht.

Tonejc, M., Pletz, M., Fauster, E., & Schledjewski, R.: Permeability Customisation Through Preform Manipulation Utilising 3D-Printing Technologym, *Polymers and Polymer Composites*, 25(9), 2017, 651-660.

### **Journalbeiträge als Co-Autor:**

Satheesh, B., Tonejc, M., Potakowskyj, L., Pletz, M., Fauster, E., Kaynak, B., & Schledjewski, R.: Peel strength characterisation on ply/ply interface using wedge and T-peel/pull-type tests, *Polymers and Polymer Composites*, 26(8-9), 2018, 431-445.

Konstantopoulos, S., Tonejc, M., Maier, A., & Schledjewski, R.: Exploiting temperature measurements for cure monitoring of FRP composites—Applications with thermocouples and infrared thermography, *Journal of reinforced plastics and composites*, 34(12), 2015, 1015-1026.

### **Tagungsbeiträge als Erstautor:**

Tonejc, M., Grössing, H., Habicher, M., Fauster, E., & Schledjewski, R.: Utilizing Fused Deposition Modeling Techniques in Composite Processing, in *Proceedings Polymer Processing Society Conference*, 2015, Graz, Austria.

Tonejc, M., Steiner, H., Fauster, E., Konstantopoulos, S., & Schledjewski, R.: A Study on Geometrical Parameters Influencing the Mechanical Spreading of Fibre Bundles, in *Proceedings of the 20th International Conference of Composite Materials*, 2015, Copenhagen, Denmark.

Tonejc, M., Pazour, P., Fauster, E., & Schledjewski, R.: Ganzheitliche Prozessentwicklung im Bereich der Legetechnik, in *Schriftenreihe Kunststofftechnik Leoben* (S. 17-27), 2014, Leoben, Austria.