

# **Prozessbasierte Kennwertermittlung (Permeabilität) mit anschließenden RTM-Versuchen manipulierter Preforms**

## **Masterarbeit**

verfasst von

**Stefan Kaufmann**

erstellt am

**Lehrstuhl für Verarbeitung von Verbundwerkstoffen  
Department Kunststofftechnik  
Montanuniversität Leoben**



Betreuung: DI Harald Grössing

Begutachtung: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ralf Schledjewski

Leoben, im März 2014

## Eidesstattliche Erklärung

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

---

Datum

---

Unterschrift

## Danksagung

Die vorliegende Masterarbeit entstand im Zeitraum von Oktober 2013 bis März 2014 am Lehrstuhl für Verarbeitung von Verbundwerkstoffen an der Montanuniversität Leoben.

Ich bedanke mich bei Herrn Prof. Schledjewski für die Begutachtung der Arbeit.

Herrn Dipl.-Ing. Harald Grössing danke ich für die Betreuung der Arbeit sowie für die fachliche Unterstützung und Diskussion bei der Planung und Ausführung der durchgeführten Versuche und Arbeiten.

Bei Herrn Dipl.-Ing. Dr. mont. Ewald Fauster bedanke ich mich für die Unterstützung und anregende Diskussion hinsichtlich der optischen Permeabilitätsmessung sowie der Untersuchung der Unterschiede der beiden Messsysteme.

Herrn Markus Weninger sowie Frau Stephanie Schindlegger und Herrn Georg Hirzberger danke ich für die Hilfe bei der Konfektionierung der Proben und Durchführung der Experimente.

Auch den restlichen Mitarbeitern des Lehrstuhls gilt mein Dank für die angenehme Atmosphäre und freundliche Aufnahme.

Ganz besonders möchte ich auch meinen Eltern danken, die mich immer unterstützt und gefördert haben.

## Kurzfassung

In der vorliegenden Arbeit wurden Permeabilitätsmessungen für vier Materialien – drei Carbonfaser-Gelege und ein Glasfaser-Gewebe – durchgeführt. Im Zuge der Messungen wurden die Ergebnisse zweier hierfür am Lehrstuhl für Verarbeitung von Verbundwerkstoffen verfügbarer Messgeräte- dem optischen sowie dem kapazitiven Permeameter – verglichen und eine Untersuchung zum Einfluss des Druckes auf das Messergebnis ausgeführt. Des Weiteren wurden die Ergebnisse der kapazitiven Messungen für zwei Materialien mit jenen des IVW Kaiserslautern verglichen, wobei baugleiche Messgeräte und die gleiche Software zum Einsatz kamen. Abschließend wurden RTM-Versuche im optischen Permeameter mit manipulierten Preforms durchgeführt. Hierfür wurden aus den Standard-Preforms Teile herausgeschnitten und durch Barrieren aus Modelliermasse oder andere Textilien dieser Arbeit ersetzt. Drei Versuche wurden mit Hilfe von PAM-RTM simuliert und mit den realen Prozessen verglichen.

Allgemein lieferte das optische Messverfahren Permeabilitätskennwerte, welche im Bereich einer Zehnerpotenz höher lagen als jene bei kapazitiver Messung. Als Grund werden Kompaktierungseffekte vermutet, da eine Korrelation zwischen Druck und Permeabilität beim optischen Verfahren festgestellt wurde. Die mittleren Standardabweichungen bezogen auf die Permeabilitäten und Anisotropien lagen bei drei bis 12,5 % und damit vergleichsweise niedrig. Das optische Messverfahren lieferte hier geringere Streuung. Die Vergleichsmessungen mit dem IVW Kaiserslautern lieferten für das Glasfaser-Gewebe sehr gute Übereinstimmung, während die Ergebnisse für das Kohlenstofffaser-Gelege bei höheren Faservolumengehalten abwichen.

Der Abgleich zwischen RTM-Versuchen und Simulation lieferte gute Übereinstimmung für Preforms, welche mit Barrieren manipuliert wurden. Bei jenen Versuchen mit mehrteiligen Preforms aus unterschiedlichen Textilien kam es aufgrund von Race-Tracking-Effekten zu größeren Abweichungen.

## Abstract

In the following work permeability measurements for four different materials – one glass fibre twill-fabric and three carbon fibre non crimp fabrics (NCF) – were conducted. An optical and a capacity based method for measuring permeability, both available at LVV, were used and results compared. Additionally the influence of pressure on results was analyzed. For two materials, the results of capacity based measurements were compared to those obtained at IVW Kaiserslautern, using the same measurement device and software. Finally RTM experiments were conducted with manipulated performs, using the optical measuring device. Therefore parts of the standard performs were cut out and barriers of modeling clay or parts of other fabrics, used in this work, were introduced. PAM-RTM was used to carry out a simulation of the mentioned experiments and comparison was made for three of them.

Generally permeability values obtained by the optical measuring device were about one order of magnitude higher than those of the capacity based method. It is suspected that this was due to compaction effects, for a correlation between pressure and permeability was detected for the optical method. Average standard deviation for the permeability results was found to be comparably low between three and 12,5%, while the optical method showed a more narrow distribution. Comparison with Kaiserslautern showed very good agreement for the glass fibre fabric, whereas results of the carbon fibre non crimp fabric showed considerable deviation especially at higher fibre volume fractions.

RTM experiments and simulations were found to agree well for performs manipulated using modeling clay barriers. Due to race-trackig effects, for performs consisting of more than one fabric, it was not possible to simulate the experiments accordingly.

## Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung und Zielsetzung</b> .....	<b>1</b>
1.1	Einleitung .....	1
1.2	Zielsetzung.....	2
<b>2</b>	<b>Theoretische Grundlagen &amp; Stand der Technik</b> .....	<b>3</b>
2.1	Experimentelle Bestimmung der 2D Permeabilität .....	3
2.1.1	Das Gesetz von Darcy.....	3
2.1.2	1D – 2D Permeabilität .....	5
2.1.3	Berechnung der Permeabilität .....	7
2.2	Einflüsse auf die Permeabilität.....	10
2.2.1	Injektionsdruck.....	10
2.2.2	Temperatur.....	11
2.2.3	Faservolumengehalt.....	12
2.2.4	Textileigenschaften.....	12
2.3	Statistische Schwankungen der Preform-Eigenschaften und Permeabilitätsergebnisse.....	15
2.4	Permeabilität manipulierter Preforms .....	18
2.5	Simulation des Formfüllvorganges.....	22
2.6	Zusammenfassung.....	24
<b>3</b>	<b>Experimentelles</b> .....	<b>26</b>
3.1	Permeabilitätsmessung .....	26
3.1.1	Hexcel 1102 .....	26
3.1.2	HexForce NBB00.....	28
3.1.3	BNCF 24KIMS -45°/0/+45° .....	29

3.1.4	BNCF 24KIMS unidirektional.....	32
3.1.5	Messfluid .....	33
3.2	Optische Permeabilitätsmessung.....	36
3.2.1	Probenvorbereitung .....	36
3.2.2	Versuchsdurchführung und Auswertung.....	37
3.3	Kapazitive Permeabilitätsmessung .....	39
3.3.1	Probenvorbereitung .....	39
3.3.2	Versuchsdurchführung und Auswertung.....	40
3.4	RTM-Versuche mit manipulierten Preforms .....	43
3.4.1	Versuchsplan.....	43
3.4.2	Probenvorbereitung .....	44
3.4.3	Versuchsdurchführung und Auswertung.....	46
3.5	Simulation .....	47
<b>4</b>	<b>Ergebnisse und Diskussion .....</b>	<b>50</b>
4.1	Permeabilitätsmessungen.....	50
4.1.1	Hexcel 1102 .....	50
4.1.2	HexForce NBB00.....	52
4.1.3	BNCF 24KIMS -45/0/+45.....	56
4.1.4	BNCF 24KIMS unidirektional.....	59
4.1.5	Streuung der Messwerte .....	61
4.1.6	Druckeinfluss und Unterschiede der Messsysteme .....	62
4.1.7	Vergleich von Messergebnissen mit IVW Kaiserslautern .....	72
4.2	RTM-Versuche und Simulation .....	76
4.2.1	RTM-Versuche .....	76
4.2.2	Vergleich .....	78

<b>5</b>	<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>93</b>
<b>6</b>	<b>Literatur.....</b>	<b>95</b>
<b>7</b>	<b>Verwendete Symbole und Abkürzungen.....</b>	<b>101</b>
<b>8</b>	<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>103</b>
<b>9</b>	<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>105</b>
<b>10</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>107</b>



# 1 Einleitung und Zielsetzung

## 1.1 Einleitung

Durch eine Reihe von Vorteilen wie gute mechanische Eigenschaften bei geringem Gewicht oder der Möglichkeit zur zunehmenden Funktionsintegration finden Faser-Kunststoff-Verbunde (FKV) in den unterschiedlichsten Bereichen wie Energietechnik, Automobilindustrie, Luft- und Raumfahrttechnik oder Sport- und Freizeit vermehrt Einsatz. Gegenüber metallischen Werkstoffen zeichnet sie dabei vor allem ihr geringes spezifisches Gewicht bei hoher spezifischer Festigkeit und Steifigkeit aus.

Ein wichtiger Schritt für die breite Anwendung dieses Werkstoffes, ist jedoch die weitere Senkung der Fertigungskosten und der Fertigungszeit sowie die Automatisierbarkeit möglichst vieler Arbeitsschritte im Hinblick auf eine kostengünstige Serienproduktion. Die Harzinjektionsverfahren oder Liquid-Composite-Moulding (LCM) – Prozesse sind Verfahren, die sowohl hinsichtlich Produktivität als auch Bauteilkomplexität und -Qualität ihre Vorteile zeigen und in den letzten Jahren kontinuierlich an Produktionsvolumen zugelegt haben [1, 2].

Für eine Verringerung des Fertigungsrisikos spielt die Möglichkeit der Prozesssimulation eine wichtige Rolle. Die Fließsimulation ermöglicht hier den Werkzeugfüllvorgang im Vorhinein zu antizipieren und so das Werkzeug-Design zu vereinfachen und zu vergünstigen indem teures „Trial-and-Error“-Vorgehen vermieden werden kann. Eine wichtige Eingangsgröße hierfür ist die Permeabilität.

Für möglichst realitätsnahe Werte, wird diese Größe im Vorfeld experimentell bestimmt. Im Hinblick auf das verwendete Messverfahren gibt es hier noch keinen Industrie-Standard, wodurch im Moment eine Vielzahl unterschiedlicher Verfahren existiert, welche sich in den erhaltenen Ergebnissen erheblich unterscheiden.

Auch innerhalb der einzelnen Verfahren sind die Messwerte für gewöhnlich durch eine relativ hohe statistische Schwankungsbreite charakterisiert [3, 4].

## 1.2 Zielsetzung

Im Zuge dieser Arbeit sollte zunächst eine Literaturrecherche durchgeführt werden. Diese umfasste die Themen Permeabilitätsmessung, Einflüsse auf die Permeabilität, Prozessparameter bei der Formfüllung sowie Permeabilität manipulierter, flächiger Preforms und die Reproduzierung des Formfüllvorganges.

In weiterer Folge sollte die Permeabilität für vier unterschiedliche Textilien – ein Glasfasergewebe sowie drei Carbonfasergelege ermittelt werden. Im Zuge dieser Messungen waren für drei Materialien die beiden am Lehrstuhl für Verarbeitung von Verbundwerkstoffen vorhandenen Messmethoden – optische und kapazitive Permeabilitätsmessung – zu vergleichen. Außerdem sollten die Ergebnisse der kapazitiven Permeabilitätsmessungen zweier Materialien für einen Vergleich mit jenen des Instituts für Verbundwerkstoffe Kaiserslautern genutzt werden. Hierfür standen baugleiche kapazitive Permeameter mit gleicher Software zur Messwerterfassung und Auswertung zur Verfügung.

Danach waren RTM-Versuche mit manipulierten, flächigen Preforms durchzuführen und die Ergebnisse mit einer Füllsimulation, wofür die zuvor ermittelten Permeabilitätswerte dienen sollten, zu vergleichen. Für die Simulation sollte die Software PAM-RTM der ESI Group Verwendung finden.

## 2 Theoretische Grundlagen & Stand der Technik

Im Folgenden werden die theoretischen Grundlagen sowie der Stand der Technik dargelegt. Hierzu wird zunächst die experimentelle Bestimmung der 2D-Permeabilität erläutert indem das verwendete Gesetz zur Beschreibung des Fließverhaltens, unterschiedliche Varianten der Permeabilitätsmessung und die Berechnung der Permeabilität angeführt werden. Darauffolgend wird auf die Einflüsse auf die Permeabilität im Hinblick auf Prozess- und Materialparameter, die statistische Schwankung von Permeabilitätsergebnissen und Preform-Eigenschaften, die Permeabilität manipulierter Preforms sowie die Simulation des Formfüllprozesses eingegangen.

### 2.1 Experimentelle Bestimmung der 2D Permeabilität

Die Permeabilität bezeichnet die Durchlässigkeit eines porösen Mediums für ein Fluid – im Falle der LCM-Prozesse jene des Verstärkungstextils für das flüssige Harz, im Falle der Permeabilitätsmessung meist für ein nicht-reaktives Messfluid [5]. Für die Beschreibung des Werkzeugfüllprozesses, die Einschätzung der Prozesszeit und die Charakterisierung des Füllverhaltens kommt ihr eine hohe Wichtigkeit zu. Schlussendlich ist sie eine wichtige Eingangsgröße für die Simulation von LCM-Prozessen um das Werkzeug-Design zu vereinfachen [5, 6].

#### 2.1.1 Das Gesetz von Darcy

Das Gesetz von Darcy ist im Allgemeinen anerkannt, um das makroskopische Fließverhalten in textilen Faserhalbzeugen zu beschreiben [7]. Es wurde von Henry Darcy im 19. Jahrhundert entwickelt um die Strömung von Wasser durch

poröse Bodenschichten zu beschreiben und basiert auf empirischen Beobachtungen [8]. Im Nachhinein stellte man fest, dass es sich um eine vereinfachte Form der Navier-Stokes-Gleichung handelt [7]. In der zwei- bzw. dreidimensionalen Form wird es wie folgt dargestellt [9, 10]. Die Fließgeschwindigkeit und der Druckgradient sind dabei Vektoren, die Permeabilität ein Tensor.

$$\underline{v} = \frac{K}{\eta} \nabla p \quad (1)$$

$v$  ... Fließgeschwindigkeit [m/s]

$K$  ... Permeabilität [m<sup>2</sup>]

$\eta$  ... Viskosität [Pas]

$\nabla p$ ...Druckgradient [Pa/m]

Das Gesetz von Darcy liegt gemeinsam mit der Kontinuitätsgleichung der Auswerte-Methode nach Adams [9, 10], auf welche im Abschnitt über die Berechnung der Permeabilität eingegangen wird, zu Grunde. Es stellt einen linearen Zusammenhang zwischen Fließgeschwindigkeit und Druckgradienten her, wobei die Proportionalität durch die Permeabilität des Textils und die Viskosität des Fluids bestimmt ist. Naturgemäß ist der Gültigkeit Grenzen gesetzt, welche im Allgemeinen in folgender Tabelle zusammengefasst werden [11].

*Tabelle 1: Randbedingungen und physikalische Bedeutung für das Gesetz von Darcy [11]*

<b>Randbedingungen</b>	<b>physikalische Bedeutung</b>
schleichende Strömung	Reynoldszahl $< 1$ Vernachlässigung der D'Alembert'schen Trägheitskräfte des Fluids
newtonsches Verhalten des Fluids	die Viskosität ist unabhängig von der Schergeschwindigkeit im Fluid
inkompressibles Fluid	konstante Dichte
isotherme Prozesse	konstante Viskosität
mechanisch starres Faserhalbzeug	Permeabilität ist eine Konstante
keine Kapillarwirkung in der Faserstruktur	treibende Kraft ist nur das Druckgefälle

Je nach Prozess und herrschenden Bedingungen ist das Gesetz für die Beschreibung des Fließverhaltens anwendbar, was für die Permeabilitätsmessung grundsätzlich gegeben ist. In der Praxis können aber durchaus Effekte auftreten bzw. Randbedingungen gegeben sein, welche zu Abweichungen führen, wodurch die Einsetzbarkeit für den Einzelfall abzuwägen ist [11].

### 2.1.2 1D – 2D Permeabilität

Die Permeabilität kann grundsätzlich im gesättigten und ungesättigten Zustand ermittelt werden. Im ersten Fall ist das Textil bereits getränkt, die Messflüssigkeit wird mit konstantem Volumenstrom injiziert und der Druckabfall wird gemessen. Im ungesättigten Fall wird das trockene Textil mit dem Fluid, welches unter konstantem Druck injiziert wird, getränkt, und die Fließgeschwindigkeit wird ermittelt. In der Literatur gibt es hier verschiedene Erfahrungen hinsichtlich Ergebnisdifferenzen der beiden Verfahren – theoretisch können diese nur vom Matrix-Anteil in den Garnen (25 bis 30%), wo im gesättigten Fall kein Fließen stattfindet und etwaigen Kapillardruckeinflüssen, herrühren. Im Hinblick auf die Abbildung des Fertigungsprozesses ist anerkannt, dass der ungesättigte Fall näher an der Praxis liegt [7].

Um die Permeabilität bestimmen zu können muss zunächst der Verlauf der Fließfront erfasst werden. Hier gibt es unterschiedliche Messmethoden, welche sich grob in optische und elektrisch-kapazitive Varianten einteilen lassen. Optisch besteht die Möglichkeit das Fortschreiten des Fluides durch Lichtleiter direkt im Textil zu erfassen, was durch den großen Durchmesser der Sensorfasern allerdings die Eigenschaften der Preform selbst beeinflusst und somit ungeeignet ist. Eine häufig angewandte Möglichkeit ist das Erfassen der Fließfront über eine Kamera und Bildverarbeitungssoftware durch eine transparente Werkzeughälfte.

Elektrisch-kapazitiv gibt es grundsätzlich die Möglichkeit die Fließfront durch Punkt- oder Liniensensoren zu detektieren wobei die Messgrößen der Druck oder die Kapazität im Sinne eines Plattenkondensators sein können. Liniensensoren haben hier den Vorteil ein kontinuierliches Bild der Fließellipse zeichnen zu können, während bei Punktsensoren die Aussagefähigkeit in Bezug auf die Fließfrontposition begrenzt ist [11].

Grundsätzlich haben optische Verfahren den Nachteil eine zum Teil transparente Messvorrichtung zu benötigen, was bei hohen Drücken bzw. reaktiven Harzsystemen zu Problemen hinsichtlich der Werkzeug-Verformung und – Beständigkeit führen kann. Transparente Materialien sind im Normalfall nicht gleichermaßen steif wie metallische Werkstoffe, während polymere Materialien wie PMMA auch empfindlich auf erhöhte Temperaturen und Spannungsrisse reagieren. Kapazitiv-elektrische Systeme sind dabei im Hinblick auf Werkzeuge und Sensorik relativ teuer [11].

Die Permeabilität kann eindimensional, zweidimensional oder dreidimensional bestimmt werden. Bei der eindimensionalen Permeabilitätsmessung wird meist mit Linienangüssen und optischen Messverfahren zur Detektierung der Fließfront gearbeitet. Ein Vorteil dieses Systems ist die einfache, mathematische Auswertung der Versuche. Allerdings ist hierfür ein kontinuierlicher Fließfrontverlauf von Nöten, welcher durch praktisch schwierig zu eliminierende „Race-Tracking“-Effekte gestört werden kann. Ein weiterer Nachteil ist die größere Anzahl an notwendigen Versuchen, welche falls die Orientierung der Fließellipse nicht bekannt ist dreimal so hoch ist.

Die zweidimensionale Messung ist im Hinblick auf die Auswertung und Berechnung der Permeabilität wesentlich aufwendiger. Jedoch wird „Race-Tracking“ vorgebeugt und es können innerhalb eines Versuches alle wichtigen Größen, welche das Tränkungsverhalten charakterisieren, ermittelt werden. Diese sind:

- Die Permeabilität in Hauptachsenrichtung  $K_1$
- Die Permeabilität in Nebenachsenrichtung  $K_2$
- Der Quotient von  $K_2$  durch  $K_1$ , als Anisotropie  $\alpha$  bezeichnet
- Der etwaige Orientierungswinkel  $\beta$  der Fließellipse relativ zu den Hauptachsen des Textils

Während über eine genaue Bestimmung der Permeabilitäten Aussagen über die Formfüllzeit und damit die Prozessdauer getroffen werden können, sind die beiden Werte  $\alpha$  und  $\beta$  vor allem wichtig für das grundsätzliche Füllverhalten. Letztere beiden Größen geben wichtige Informationen für die ideale Lage des oder der Injektionspunkte(s) bzw. jene der Entlüftung [4].

Die zwei häufigsten Konzepte zur zweidimensionalen, ungesättigten Bestimmung der Permeabilität sind die optische Erfassung des zeitlichen Fließfront-Verlaufes mit Hilfe einer Kamera und die kapazitiv-elektrische Messung.

Die dreidimensionale Messung betrachtet auch die Tränkung des Textils in Dickenrichtung, welche bei der 1D- und 2D-Variante durch einen Linienanguss bzw. in die Probe geschnittene Injektionslöcher ausgeschlossen wird.

### **2.1.3 Berechnung der Permeabilität**

Die Berechnung der Permeabilität im Falle der 2D-Messung ist relativ aufwendig. Adams und Rebenfeld [9] lieferten eine der in der Literatur vorhandenen Methoden, welche für diese Arbeit zum Einsatz kam. Weitere Verfahren sind jene nach Zhang et al. [12–14] und Weizenböck et al. [15, 16], welche im Zuge dieser Arbeit allerdings nicht behandelt werden.

Diese geht zunächst von dem Gesetz nach Darcy (Gleichung 1) und der Kontinuitätsgleichung für inkompressible Fluide aus.

$$\nabla \cdot v = 0 \quad (2)$$

Durch die Kombination beider Gleichungen in einem orthogonalen Koordinatensystem  $x_1$ — $x_2$ , wird die Gleichung für die Druckverteilung erhalten.

$$\frac{d^2 p}{d^2 x_1} + \alpha \frac{d^2 p}{d^2 x_2} = 0 \quad (3)$$

Der Quotient aus  $K_2/K_1$  bezeichnet hier die Anisotropie  $\alpha$ .

Die Randbedingungen hierfür sind konstante Druckverhältnisse am Injektionspunkt und der Fließfront. Eine weitere Bedingung legt fest, dass sich die Fließfront mit der lokalen Fließgeschwindigkeit fortbewegt.

$$v_f = \frac{dx_f}{dt} = \frac{v}{\epsilon} \quad (4)$$

Epsilon ist hierbei die Porosität des Textils. Gleichung 1, 3 und 4 sind ein gekoppeltes System von Gleichungen welche gelöst eine Differentialgleichung zur Beschreibung der radial bzw. elliptisch verlaufenden Fließfront ergibt.

Für den anisotropen, also elliptischen Fall ergibt sich folgende Differentialgleichung.

$$\frac{d\xi_f}{dt} = \frac{K_1 p}{\epsilon \eta R_0^2} \left[ \frac{\alpha}{1-\alpha} \right] \left[ \frac{1}{(\xi_f - \xi_0)(\cosh^2 \xi_f - \cos^2 \mu)} \right] \quad (5)$$



$\frac{d\xi_f}{dt}$  bezeichnet dabei einen Punkt auf der Ellipse,  $\mu$  das elliptische Äquivalent zum ebenen Winkel. Die elliptischen Längen  $\xi_{f1}$  und  $\xi_{f2}$  stehen folgendermaßen mit den gemessenen, radialen Längen in Zusammenhang:

$$\xi_{f1} = \sinh^{-1} \left[ \frac{R_{f1}}{R_0} \left( \frac{1}{\alpha} - 1 \right)^{-1/2} \right] \quad (6)$$

$$\xi_{f2} = \cosh^{-1} \left[ \frac{R_{f2}}{R_0} \left( \frac{1}{\alpha} - 1 \right)^{-1/2} \right] \quad (7)$$

$R_0$  ist hierbei der Radius der Injektionsöffnung, deren elliptisches Äquivalent mit folgender Gleichung beschrieben wird:

$$\xi_0 = \ln \left[ \frac{1+\alpha^{1/2}}{(1-\alpha)^{1/2}} \right] \quad (8)$$

Mit den Anfangsbedingungen  $\xi_f = \xi_0$  zum Zeitpunkt  $t = 0$  ergibt sich ein Ausdruck  $F(\xi, \mu)$ , aus dem nun iterativ die Permeabilität bestimmt werden kann. Ausgehend von einem geschätzten Wert für  $\alpha$  können mit Hilfe der Haupt- und Nebenachsenlängen zwei Graphen über der Zeit aufgetragen werden, wobei  $\alpha$  solange variiert wird, bis die Ausgleichsgeraden der Graphen ein Minimum nach der Methode der kleinsten Quadrate ergeben. Über die Steigung  $m$  der Geraden lässt sich dann die jeweilige Permeabilität berechnen [9, 11].

$$m_\xi = \frac{K_1 p}{\epsilon \eta R_0^2} \left[ \frac{\alpha}{1-\alpha} \right] \quad (9)$$

Zusammenfassend gehen in die Berechnung der Permeabilität folgende Größen ein, welche im Zuge der Messung erfasst werden müssen:

- Zeitlicher Verlauf der Haupt- und Nebenachsenlängen der Fließellipse,  $R_f$
- Orientierungswinkel der Fließellipse  $\mu$
- Viskosität der Messflüssigkeit  $\eta$
- Radius der Injektionsöffnung  $R_0$
- Injektionsdruck  $p$
- Porosität  $\epsilon$  bzw. Faservolumengehalt

## 2.2 Einflüsse auf die Permeabilität

### 2.2.1 Injektionsdruck

Der Injektionsdruck steht laut dem Gesetz von Darcy in einer linearen Beziehung zur Fließgeschwindigkeit. Die Permeabilität ist hierbei eine Konstante und sollte von diesem nicht beeinflusst werden. Lundström et al. [3], Rieber [7] und Grössing et al. [17] haben dies auch in ihren Arbeiten festgestellt.

Der Injektionsdruck kann allerdings Einfluss auf die Permeabilität haben, wenn das eindringende Fluid die Faserarchitektur bzw. den Lagenaufbau des Textils verschiebt. Dies tritt auf, wenn der Kompaktierungsdruck in der Kavität unter dem Injektionsdruck liegt.

Bei der ungesättigten Messung der Permeabilität können beim Fließen des Messfluids in die Garne Kapillareffekte auftreten, welche die Messung beeinflussen können, wenn der Injektionsdruck unter den Kapillardruck fällt und die Werkzeugfüllung damit Kapillardruck gesteuert abläuft [7]. In der Literatur finden sich unterschiedliche Werte für den maximalen Kapillardruck für Fasern von 0.13 bar für 70% bzw. 0.37 bar für 85% Faservolumengehalt [18], 0.6 bar [19], 0.6

bar [20], 0.06-0.08 [21] und 0.32 bar [7]. Die Injektionsdrücke bei Permeabilitätsmessungen sind normalerweise wesentlich höher, jedoch muss aufgrund des starken Abfalls des Drucks mit steigendem Abstand vom Anguss trotzdem darauf geachtet werden, dass dieser nur nahe der Fließfront unterhalb des Kapillardruckes fällt [7].

Ein weiterer Einfluss auf die Permeabilitätsmessung ist jener des Druckes auf die Viskosität des Messfluides, welcher aber in den Druckbereichen der Permeabilitätsmessung (bis 10 bar) vernachlässigbar ist. Außerdem kann die Messung bei optischen Verfahren, durch die notwendigen transparenten Teile der Messvorrichtung, durch die Verformung des Werkzeuges beeinflusst werden.

### **2.2.2 Temperatur**

Die festgelegte Verstärkungsstruktur bestimmt bei LCM-Prozessen das Tränkungsverhalten, charakterisiert durch die Permeabilität. Die Temperatur hat dabei auf diese Eigenschaft selber keinen Einfluss.

Das Gesetz von Darcy, welches zur Beschreibung des Fließvorganges und zur Berechnung der Permeabilität bei deren Messung verwendet wird, setzt für seine Gültigkeit isotherme Prozesse also konstante Viskosität voraus. Die Temperatur beeinflusst also die Permeabilitäts-Messung und die Vorhersagbarkeit eines LCM-Prozesses über ihren signifikanten Einfluss auf die Viskosität des Messfluides bzw. der verwendeten Harzsysteme, aber nicht die Permeabilität an sich.

Für eine korrekte Bestimmung der Permeabilität bzw. eine möglichst genaue Beschreibung des Fließverhaltens ist es daher wichtig die Temperatur und deren Einfluss auf die Viskosität zu kennen. Im Zuge der Permeabilitätsmessung wird daher die Temperatur des Messfluides im Idealfall möglichst genau bestimmt, wobei hier der Füllprozess bei Verwendung nicht reaktiver Messfluide im Normalfall weitgehend isotherm abläuft.

Der LCM-Prozess läuft in der Praxis aufgrund der gewünschten Aushärtung des Harzes nicht isotherm ab. Für eine Vorhersage des Reaktionsverlaufes bzw. des

Aushärtegrades in Abhängigkeit der Zeit ist eine Kenntnis der Werkzeugtemperatur ebenfalls wichtig [11].

### **2.2.3 Faservolumengehalt**

Bei LCM-Prozessen hängt der Faservolumengehalt eng mit den Kompaktierungsverhältnissen im Werkzeug und damit auch der Mikrostruktur im Verstärkungstextil zusammen. Zwischen Einzelfilamenten im Roving und zwischen den einzelnen Faserbündeln des Textiles liegen abhängig von dessen Eigenschaften und den Kompaktierungsverhältnissen Fließkanäle bzw. Poren vor, durch welche das Harz strömen und die Verstärkungsstruktur durchtränken kann. Abhängig von der Mikrostruktur des Textils sowie Art und Größe dieser Fließwege ergibt sich eine bestimmte Permeabilität bzw. ein bestimmtes Tränkungsverhalten.

Durch eine Steigerung des Faservolumengehaltes steigt der Kompaktierungsdruck in der Kavität. Hierdurch erhöht sich auch die Faserkompression und die Mikrostruktur des Materials wird verändert. Die Einzelfilamente eines Garnes können sich zueinander verschieben und sich so den Kompaktierungsverhältnissen anpassen. Ihre Höhe wird verringert, während die Breite zunimmt. Bei Geweben können sich auch die Garnondulationswinkel aufgrund der höheren Pressung erhöhen. Beide Effekte wurden von Saunders bzw. Rieber bei Analysen der Mikrostruktur von GFKs beobachtet [7, 22]. Insgesamt verringert sich die Porosität und die Permeabilität des Materials nimmt ab, wobei diese in Abhängigkeit des Faservolumengehaltes meist exponentiell sinkt [17, 23, 24].

### **2.2.4 Textileigenschaften**

Die Textileigenschaften bestimmen zusammen mit den äußeren Bedingungen (Kompaktierung, Verformung) die Tränkungeigenschaften. Hier gibt es viele

Eigenschaftsparameter, welche in mehr oder weniger komplexem Zusammenspiel die Verstärkungsstruktur konstituieren und diese Charakteristika festlegen. Hinzu kommt, dass es schwierig ist einzelne Größen wie lineare Dichte, Flächengewicht, Gewebe-Art oder beispielsweise ein vorhandenes Stitching, vor allem auch vom Herstellprozess isoliert zu betrachten und die betreffenden Untersuchungen mit hohem Mess- als auch Material- und damit Kostenaufwand verbunden sind. Dies führt auch dazu, dass der Einfluss einzelner Parameter laut heutigem Stand der Technik nicht restlos geklärt ist [7].

Wie bereits im Punkt über den Faservolumengehalt angeführt, kommt im Hinblick auf die Permeabilität der Verstärkungstextilien der Mikrostruktur und den vorhandenen Fließwegen für den Harzfluss eine hohe Wichtigkeit zu. Unterschiedliche textile Parameter beeinflussen diese Struktur in ihrem Zusammenwirken [7, 25].

Zunächst hat der Durchmesser der Einzelfilamente, welche die Rovings bilden, Einfluss auf diese Struktur, wobei ein geringerer Einzelfilament-Durchmesser für gewöhnlich zu einer geringeren Permeabilität führt. Die Rovingdicke beeinflusst ebenfalls die Permeabilität, wobei dickere Rovings mit mehr Einzelfasern laut Grössing et al. [24] zu einer geringeren Permeabilität führen. Bei Geweben ist außerdem die Art des Gewebes, also wie die einzelnen Garne ineinander geführt sind, wichtig für die Tränkungseigenschaften. Rieber [7], der die einzige vorliegende systematischen Untersuchungen des Einflusses einzelner textiler Parameter auf GF-Gewebe durchgeführt hat, kommt hier zu dem Schluss, dass Köper-Gewebe über höhere Anisotropie des Fließverhaltens gegenüber gleichartigen Leinwand-Geweben verfügen [7]. Er analysierte außerdem den kombinierten Einfluss von linearer Dichte und Fadendichte welcher zu dicht- oder weniger dicht-gewebten Geweben führt. Hier zeigt er, dass dichte Gewebe bei steigendem Faservolumengehalt über einen größeren Abfall der Permeabilität verfügen. Der mögliche Hersteller-Einfluss auf die Tränkungseigenschaften der Textilien wird deutlich, wenn man Riebers Analyse zum Crimp-Einfluss auf die Permeabilitätseigenschaften betrachtet. Hier zeigen isotrop aufgebaute Gewebe mit stark unterschiedlichem Crimp zwischen Kett- und Schussfäden anisotropes

Fließverhalten, während bei jenen mit ähnlichem Crimp in beiden Richtungen auch die Fließfrontausbreitung nahezu isotrop verläuft [7].

Wichtig für die Preformtechnik bzw. das Verständnis von NCFs ist der Einfluss von Stitching auf die Tränkungseigenschaften. Rieber et al. [26] und Talvensaaari et al. [27] haben hier Untersuchungen durchgeführt, kommen allerdings zu unterschiedlichen Resultaten. Ersterer hat den Einfluss von 45°-Stitchings auf die Permeabilität von GF-Geweben untersucht, wobei die Permeabilität dadurch generell sinkt und mit geringerem Abstand zwischen den Nähten weiter abnimmt, während die Anisotropie ebenfalls geringer wird und sich die Fließellipse in Richtung des Stitching-Musters orientiert. Talvensaaari hat den Effekt von +/- 45° verlaufenden Stitchings und deren Distanz zueinander an CF-Geweben überprüft. Im Gegensatz zu Rieber kommt er auf eine Erhöhung der Permeabilität durch die Nähte, welche mit geringerem Abstand zunimmt. Zum Vergleich muss man sagen, dass beide unterschiedliche Materialien untersucht haben, wobei Rieber ein Köper-Gewebe und Talvensaaari ein Leinwand-Gewebe verwendet hat. Außerdem war die Fadenspannung beim Nähen im Falle des Zweiten wesentlich höher. Hier zeigt sich, dass der Einfluss des Stitchings nicht pauschal abgeschätzt werden kann, sondern die Struktur des Textiles in Abhängigkeit der Ausführung und der Ausgangssituation determiniert wird und zu unterschiedlichen Auswirkungen auf das Tränkungsverhalten führt.

Grössing et al. [24] stellten außerdem einen Einfluss der Stitching-Art auf die Tränkungseigenschaften fest. Sowohl bei UD Glasfaser- als auch bei biaxialen CF-Gelegen zeigen Preforms mit Trikot-Stitching eine höhere Permeabilität als jene mit Franse-Stitching oder einer Kombination aus beiden.

Drapier et al. [28] haben im Gegensatz zu den zuvor angeführten Autoren, welche die 2D Permeabilität untersuchten, das Tränkungsverhalten in Dickenrichtung in Abhängigkeit des Stitchings betrachtet. Es wurden Versuche mit NCFs durchgeführt und es zeigte sich eine deutliche Zunahme der Permeabilität durch Stitching bzw. höhere Stitching-Dichte. Die Art des Stitchings hatte dabei keinen signifikanten Einfluss.

Insgesamt zeigt sich, dass die Textileigenschaften und Fertigungsparameter in ihrem Zusammenspiel die Permeabilität bestimmen. Einzelne Aspekte sind hier oft schwer zu betrachten und einzuschätzen.

### 2.3 Statistische Schwankungen der Preform-Eigenschaften und Permeabilitätsergebnisse

Die ermittelten Tränkungseigenschaften, namentlich Permeabilität, Anisotropie und Orientierungswinkel, dienen als Eingangsgrößen für die Füllsimulation. Für die Einschätzung deren Ergebnisse, sind statistische Schwankungen in den Eigenschaften der verwendeten Preforms sowie in den grundsätzlichen Messergebnissen wichtig. Da zur Bestimmung der Permeabilität bisher noch kein standardisiertes Verfahren existiert und daher eine Vielzahl an Methoden verwendet werden, sind diese Schwankungen und jene zwischen den verschiedenen Methoden auch im Hinblick auf eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse von Interesse [4].

In der Literatur finden sich Studien zum Vergleich von Messergebnissen und deren Schwankungen. Lundström et al. [3] haben Vergleichsmessungen an drei Instituten für ebenso viele Materialien durchgeführt. Hierbei kamen gesättigte wie ungesättigte 1D-Messmethoden als auch die 2D-Messung der Permeabilität über einen zentralen Anguss zum Einsatz. Die Ergebnisse zeigten insgesamt eine gute Reproduzierbarkeit und Standardabweichungen zwischen 10 und 30%. Vergleiche zwischen verschiedenen Institutionen bei gleicher Messmethode, als auch zwischen Messmethoden untereinander zeigten eine Reproduzierbarkeit der Messergebnisse im Bereich jener der einzelnen Messmethoden. Arbter et al. [4] führten Ringversuche zur Permeabilitätsbestimmung unter 11 Institutionen durch, wobei 16 verschiedene Messmethoden zum Einsatz kamen. Es wurden Messungen im 1D- als auch im radialen 2D-Verfahren, gesättigt und ungesättigt durchgeführt. Die Ergebnisse der Permeabilität zeigten dabei zwischen den Methoden Schwankungen im Bereich von bis zu einer Zehnerpotenz, wobei auch

bei gleicher Methode zwischen verschiedenen Institutionen größere Unterschiede auftraten. Die Standardabweichungen der Ergebnisse lagen in etwa bei 20 bis 30%. Auch die Anisotropie, welcher gerade in Bezug auf das Werkzeugdesign höhere Wichtigkeit zukommt, schwankte um den Faktor 2 zwischen verschiedenen Messmethoden.

Als Fehlerquellen werden zunächst die Messgenauigkeiten der gemessenen physikalischen Größen bzw. Abweichungen der in die Berechnung eingehenden Werte genannt. Darüber hinaus kommen immer Streuungen der Textileigenschaften bzw. Chargenschwankungen vor, da Abweichungen der Faserwinkel und im Abstand zwischen den Fasern sowie im Flächengewicht auftreten. Des Weiteren können auch durch das Handling der Preforms im Zuge der Versuche weitere Veränderungen eingebracht werden. Der Einfluss der Streuung der Textileigenschaften ist dabei höher als jener der experimentellen Fehler einzuschätzen [3].

Pan et al. [23] führten eine statistische Untersuchung von 1D-Permeabilitätsmessungen eines Gewebes und von Maschenware durch und untersuchten die Ergebnisse auf statistisch signifikante Einflüsse. Hierbei wurden Race-tracking am Rande des Werkzeuges, Schwankungen des Flächengewichtes sowie Verformung der Textilien durch die Verwendung eines Stufen-Werkzeuges als signifikante Einflussfaktoren auf die Permeabilität identifiziert. Die Durchführung der Experimente durch eine erfahrene und eine unerfahrene Person in dieser Hinsicht, brachte keine signifikanten Unterschiede.

Endruweit et al. [29–31] führten eine numerische als auch experimentelle Analyse der Streuung der geometrischen Parameter von Textilien und deren Einfluss auf die Permeabilität durch. Eine Betrachtung des experimentellen Fehlers mit Abschätzung der in die Messung eingehenden Parameter Injektionsdruck, Fließfrontzeiten, Porosität und Viskosität ergibt einen maximalen experimentellen Fehler von 14%. Demnach sind Schwankungen welche darüber liegen auf jene der Textileigenschaften zurückzuführen. Die Autoren entwickelten ein Einheitszellenmodell deren Aufbau jenem eines NCFs nachempfunden war. Hier wurden Garne mit elliptischem Querschnitt angenommen und die Parameter



Hauptachsendurchmesser (Garnbreite) und Garnabstand als ausschlaggebend für die Variation der geometrischen Parameter erachtet. Beide Faktoren zusammen bestimmen die Schwankung des Faserwinkels, welcher mit abnehmendem Quotienten aus Garnbreite und –abstand steigt. Bei Geweben wird die Schwankung des Faserwinkels dabei durch die verfügbaren Freiräume zwischen den Rovings bestimmt, während diese bei NCFs durch das Stitching festgelegt wird. Im numerischen Modell wurden diese Parameter nun statistisch variiert und die Ergebnisse dieses Modells mit jenen aus optischen Messungen von Textilien und Permeabilitätsmessungen verglichen. Die experimentellen Ergebnisse zeigten einen Trend zur Normalverteilung und eine Standardabweichung von 9 bis 29%. Je höher dabei das Verhältnis von Garnbreite zu –Abstand umso geringer waren die lokalen Permeabilitätsschwankungen und umso ähnlicher die Fließfront einer idealen Ellipse. Mit der Variation der lokalen Permeabilität stieg zunächst auch jene der globalen Permeabilität, wobei diese bei weiterem Anstieg wieder sank. Dies wurde damit erklärt, dass das Textil global betrachtet bei höheren lokalen Schwankungen wieder uniformer wirkt. Das numerische Modell zeigte dabei Ergebnisse im experimentell beobachteten Größenbereich der Permeabilitätsschwankungen, jedoch wurden Effekte wie „Nesting“, welche bei hohen Garnabständen wichtig erscheinen, im Modell nicht betrachtet.

Fauster et al. führten eine statische Analyse der Material- und Messparameter durch um die Messgenauigkeit eines optischen Permeameters zu beurteilen. Hierbei kamen sowohl ein analytischer Ansatz basierend auf dem Gesetz der Fehlerfortpflanzung erster Ordnung als auch eine Monte-Carlo- Simulation zum Einsatz. Die Ergebnisse beider Modelle lieferten sehr gute Übereinstimmung. Die betrachteten Parameter waren die Messgenauigkeit der Hauptachsenlängen, die Viskosität des Messfluides, der Injektionsdruck, der Injektionsradius, die Kavitätenhöhe sowie die Materialparameter Dichte und Flächengewicht. Die Messgenauigkeit der Hauptachsenlängen wurde im Bereich von Zehntelprozent, die der Dichte mit 0,25% und jene des Flächengewichtes mit 5% angenommen, während sich die Annahmen der Streuung restlichen Parameter auf 1% beliefen. Insgesamt ergab sich mit beiden Modellen eine Streuung der Messergebnisse von ca. 8% für die Permeabilität in Haupt- und Nebenachsenrichtung [32].

Zusammenfassend zeigt sich, dass die Ergebnisse der Permeabilitätsmessung, sowohl zwischen unterschiedlichen Messaufbauten, als auch innerhalb derselben Methode beträchtlich schwanken. Dies ist zum einen auf Unterschiede der Techniken, zum anderen auf experimentelle Fehler und Schwankungen in den Eigenschaften der Textilien zurückzuführen. Im Hinblick auf die Ermittlung möglichst genauer und vergleichbarer Materialkennwerte und damit eine zuverlässige Vorhersage der Prozessbedingungen, ist die Minimierung der Einbringung von weiteren Eigenschaftsschwankungen durch möglichst vorsichtige Handhabung, die Erfassung und Analyse der Eigenheiten der eingesetzten Messmethoden sowie das Verständnis der geometrischen Schwankungen auf jene der Tränkungseigenschaften notwendig bzw. erstrebenswert.

## 2.4 Permeabilität manipulierter Preforms

Für die Anwendung von Simulationsmethoden, ist die Permeabilität eine wichtige Eingangsgröße. Im Hinblick auf den gesamten LCM-Prozess gibt es in der Praxis aber neben den Eigenschaften des textilen Grundmaterials eine Vielzahl von weiteren Einflüssen, welche das Tränkungsverhalten des Verstärkungsmaterials beeinflussen. Beispielsweise das Drapieren des Verstärkungstextils um dieses in die Form des späteren Bauteils zu bringen, wobei die Scherung der Faserwinkel neben den resultierenden mechanischen Eigenschaften auch das Tränkungsverhalten beeinflusst. Auch wenn Preforms mehrteilig aufgebaut und erst während des LCM-Prozesses „verbunden“ oder wenn Gewindeeinsätze für die Herstellung von Schraubenverbindungen zur Krafteinleitung in die Preforms eingesetzt werden hat dies Auswirkungen auf den Werkzeugfüllvorgang [33]. Aus diesem Grund ist die Untersuchung von „manipulierten“ Preforms von großer Bedeutung für das Verständnis, die simulationstechnische Abbildung und damit der korrekten Vorhersage des Imprägnierungsvorganges [7, 34].

In der Literatur gibt es unterschiedliche Ansätze zur Beschreibung der Permeabilität gescherter Textilien. Hierzu finden vermehrt Simulations-Modelle

Anwendung um die Deformierung der Textilien und deren Einfluss auf die Tränkungseigenschaften zu beschreiben, wobei je nach Herangehensweise in unterschiedlichen Stufen experimentelle Erkenntnisse zum Einsatz kommen um die Modelle zu korrelieren [34–43].

Dunkers et al. [35] haben ein Modell zur Berechnung der ebenen Permeabilität für Epoxy/E-Glas-Composites auf der Basis von optischen Kohärenz Tomographie-Aufnahmen entwickelt. Nordlund et al. [36] haben ebenfalls auf der Basis von Aufnahmen der Mikrostruktur von NCFs, deren Permeabilität über ein Einheitszellen-Modell und CFD-Simulation versucht zu berechnen. Von unterschiedlichen Autoren wurde des Weiteren versucht, die Permeabilität in geschertem Zustand, ausgehend von Messwerten der ebenen Permeabilität, zu modellieren. Long et al. [37], Rudd et al. [38] und Heardman et al. [39] beschreiben diese in Abhängigkeit von zwei unabhängigen Effekten, zum einen der Zunahme des Faservolumengehaltes und zum anderen jener des Scherwinkels. Die ersten beiden Autoren nutzten dabei ein Potenzgesetz für die Modellierung in Abhängigkeit des Faservolumengehaltes. Heardman et al. verwendeten hierfür die Kozeny-Carman-Gleichung. Endruweit et al. [40] und Slade et al. [41] entwickelten jeweils Modelle zur Vorhersage der Permeabilität in Abhängigkeit des Scherwinkels, basierend auf einer deformierbaren Einheitszelle. Die Modelle wurden mit Experimenten verglichen, wobei mehrere Autoren eine Zunahme der Hauptachsen-Permeabilität bei niedrigeren Scherwinkeln mit einer darauffolgenden Abnahme bei höheren Winkeln vorhersagten, während die Nebenachsen-Permeabilität kontinuierlich sank [38–40, 44]. Einige Autoren führten auch eine Implementierung der berechneten Werte in ein Simulationsprogramm durch. Sirtautas et al [42] verwendeten ein Einheitszellen-Modell um NCFs zu beschreiben und in weiterer Folge die Verformung beim Drapieren um eine Halbkugel zu simulieren. Hierzu wurden im Vorfeld zunächst Scherversuche durchgeführt. Mit Hilfe von Permeabilitätsdaten in alle drei Hauptachsen-Richtungen einzelner Rovings wurden die Tränkungseigenschaften der Einheitszellen modelliert und eine Makro-Simulation durchgeführt, welche experimentell überprüft wurde. Während die Drapier-Simulation gute Ergebnisse zeigte, sind laut Autor bei der Fließsimulation noch Verbesserungen notwendig.

Verleye et al. [43] stellen zwei verschiedene Solver für Meso-Modelle zur Berechnung der Permeabilität vor. Sie schlagen die Verwendung von Tabellen für die Permeabilität in Abhängigkeit des Scherwinkels und der Kompaktierung vor, wobei über das Meso-Modell die lokale Permeabilität bestimmt und mit der Makro-Simulation basierend auf dem Gesetz von Darcy gekoppelt wird. Außerdem erwähnen sie die Möglichkeit, die stochastische Streuung der Materialeigenschaften in das Modell zu integrieren. Auch Wong et al. [45] untersuchten einen dieser Solver (Grid2D) und Stream Surface – Methoden zur Berechnung der Permeabilität. Sie beschreiben auch die Simulation der Scherung sowie die Einbringung statistischer Schwankungen beim Generieren des Textil-Modells über TexGen. Teilweise wurde gute Übereinstimmung mit CFD-Simulationen, welche hinsichtlich der Berechnungen wesentlich aufwendiger sind, erreicht.

Louis et al. [34] führten eine Studie mit einem praktischeren Ansatz zur Beschreibung des Imprägnierverhaltens deformierter Textilien durch. Sie bestimmten die Permeabilität in Abhängigkeit des Scherwinkels zunächst experimentell für ein CF-Köpergewebe, wobei die Zunahme des Scherwinkels direkt in jene des Faservolumengehaltes über eine Kosinus-Beziehung umgerechnet wurde. Die Ergebnisse zeigten hier eine nahezu exponentielle Abnahme der Permeabilität mit steigendem Scherwinkel. Diese experimentellen Daten konnten in weiterer Folge mit Hilfe einer vorgeschalteten Drapier-Simulation, unter Verwendung der zuvor bestimmten Drapier-Eigenschaften des Textils mit einem Scher-Rahmen, als lokale Permeabilitätswerte in einer Fließsimulation verwendet werden.

In einer Studie zu verschiedenen numerischen Textilmodellen in seiner Arbeit über den Einfluss der Textileigenschaften auf die Permeabilität meint Rieber, dass Modelle welche auf empirischen Daten aufgebaut sind, die genaueste Darstellung der Eigenschaften erreichten [7].

Bickerton et al. [46, 47] untersuchten den Effekt der Kanten-Radien und – Wandstärken beim Drapieren von unterschiedlichen Textilien in ein Werkzeug der Form eines dreiseitigen Prismas. Bei Injektion mit konstanter Fließgeschwindigkeit

ergaben geringere Kavitätenhöhen an den Kanten höhere Injektionsdrücke, teilweise um den Faktor 25. Untersuchungen an hergestellten Teilen in diesen Werkzeugen zeigte die Erhöhung des Faservolumengehaltes in den Zonen geringerer Wandstärke und einen Rückgang der erkennbaren Fließkanäle für das tränkende Harz. In einer nachfolgenden, numerischen Studie führten die Autoren den Effekt weitgehend auf die Wandstärke zurück und schätzten jenen der Radien als nicht signifikant ein [47].

Steenkamer et al. [48] untersuchten die Auswirkungen der Spalte („joints“) zwischen den Preformteilen bei mehrteiligen Preforms auf das Fließverhalten bei LCM-Prozessen. Sie verglichen hierbei durchgeführte Experimente mit Simulationen, wobei zur Beschreibung des unterschiedlichen Fließverhaltens in Spalt und Textil eine Kombination des Gesetzes von Darcy mit der Navier-Stokes-Gleichung für den Fluss zwischen zwei unendlich großen Platten verwendet wurde. Die „Joints“ führten dabei zu einem Voreilen der Fließfront („race-tracking“), wobei dieser Effekt umso größer war je anisotroper die untersuchten Textilien, und je höher der Faservolumengehalt war. Durch eine Überlappung der Preformteile konnte das „Race-tracking“ teilweise eingedämmt werden. Allgemein wurde gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Experiment erreicht.

Zusammenfassend geht bei der Erfassung der Permeabilität manipulierter Preforms in erster Linie um die Beschreibung der Tränkungseigenschaften von Textilien für praktische Anwendungen, wo diese meist nicht eben vorliegen und außerdem andere Fließeigenschaften durch Einlegeteile usw. vorkommen können. Das Ziel ist die Permeabilität und das Füllverhalten auch im deformierten bzw. manipulierten Zustand zu kennen und vorhersagen zu können. Hier gibt es zunächst verschiedene Ansätze diese in deformiertem Zustand mit Hilfe der Kombination aus numerischen Modellen und Messwerten zu ermitteln sowie einige wenige Arbeiten um in der Praxis auftretende Fließeigenschaften („joints“, Werkzeugkanten) zu untersuchen. Einige Ergebnisse sind sicherlich vielversprechend, jedoch zeigen viele Modelle Probleme die vielen komplexen Effekte, welche die Tränkungseigenschaften determinieren, zufriedenstellend abzubilden. Eine wichtige Frage ist sicherlich, in welcher Stufe der Modellierung experimentelle Werte zur Kalibrierung herangezogen werden. Kann die

Permeabilität in Abhängigkeit vom Drapier-Zustand zuverlässig und mit geringem Aufwand bestimmt werden, wäre dies wahrscheinlich die vielversprechendste Vorgehensweise.

## 2.5 Simulation des Formfüllvorganges

Durch die zunehmende Bedeutung der LCM-Verfahren in den letzten Jahren und die damit verbundenen Bestrebungen zur Senkung des Fertigungsrisikos, haben sich verschiedene Varianten der Simulation des Formfüllvorganges entwickelt (PAM-RTM, Lims, Polyworx). Die Programme sind dabei meist als Finite-Elemente-Simulationen aufgebaut und basieren auf dem Gesetz von Darcy [11].

Nachdem sich der LCM-Prozess in drei verschiedene Phasen einteilen lässt: Preforming – Imprägnieren – Aushärten, geht auch die Prozesssimulation diese Schritte. Dies bedeutet, dass am Beginn der Simulation die Verformung des Verstärkungstextils durch das Drapieren erfasst werden muss. Hier gibt es ebenfalls kommerzialisierte Simulationsprogramme (z.B. PAM-FORM), wobei die Verformungseigenschaften zuvor in Versuchen bestimmt werden müssen. Die Verformung des Textils hat Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften des späteren Bauteils, da dadurch meist die Lage der Fasern, welche die wirkenden Lasten tragen sollen, verschoben wird. Außerdem kommt es lokal zur Erhöhung des Faservolumengehaltes. Die auftretenden Effekte beim Drapieren beeinflussen die Tränkungseigenschaften des Verstärkungsmaterials. Gleichzeitig haben sie aber auch Auswirkungen auf den Aushärteprozess, da durch den geringen Matrixgehalt in den gescherten Zonen die freiwerdende Wärmemenge beim Aushärten und damit die Temperaturverteilung verändert werden [11].

Die Geometrie aus diesem ersten Schritt der Drapier-Simulation, kann in weiterer Folge in das Programm zur Fließsimulation überführt werden, wobei vor allem die Faserorientierung und die Permeabilitätseigenschaften wichtig sind. Für die möglichst genaue Beschreibung der Fließseigenschaften ist es wichtig die Permeabilität unter den erhaltenen Bedingungen bzw. entsprechenden

Scherwinkeln zu kennen. Hier gibt es in der Literatur verschiedene Ansätze und Möglichkeiten, welche bereits im Punkt über die Permeabilität manipulierter Preforms erwähnt wurden [34–43].

Nach der Füllsimulation folgt die Modellierung der Aushärtung. Hier wird der Einfluss der Aushärte-Reaktion auf das Temperaturprofil ermittelt sowie der Aushärtegrad in Abhängigkeit der Zeit [11]. Allerdings gibt es auch Möglichkeiten der nicht-isothermen Füllsimulation, im Zuge derer die Viskosität in Abhängigkeit der Temperatur und des Aushärtegrades eingeht [49–51]. Im Hinblick auf die möglichst genaue Beschreibung des Füllprozesses ist es wichtig die wirkenden Effekte möglichst genau zu modellieren bei Abwägung des Rechenaufwandes. Für die Füllsimulation von Bauteilen gibt es 2, 2.5 und 3D-Varianten, wobei letztere vor allem für dickere Bauteile wichtig ist [49].

Die Simulation des Füllverhaltens ist ein Teil bei der Prozesssimulation von LCM-Prozessen, wobei vorgeschaltet die Simulation des Preformings bzw. Drapierens und nachgeschaltet die Simulation der Aushärtung erfolgt. Letztere kann auch gekoppelt im Zuge einer nicht-isothermen Füllsimulation erfolgen. Wichtig ist die Kenntnis der Tränkungseigenschaften, wodurch die Fließsimulation eng mit Ermittlung bzw. Modellierung der Permeabilität im drapierten Zustand in Zusammenhang steht. Im Zuge der Fließsimulation liegt das Hauptaugenmerk darauf die wirkenden Effekte bei geringem Rechenaufwand ausreichend genau zu beschreiben, wobei das globale Fließverhalten meist mit Hilfe des Gesetzes von Darcy beschrieben wird und zunehmend auch nicht-isotherme Methoden Anwendung finden.

## 2.6 Zusammenfassung

Die theoretischen Grundlagen und der Stand der Technik lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

- Das allgemein anerkannte Gesetz zur Beschreibung des makroskopischen Fließverhaltens in Faserhalbzeugen ist das Gesetz von Darcy, dessen Gültigkeit allerdings bestimmte Grenzen gesetzt sind (Tabelle 1)
- Zur Ermittlung der Permeabilität muss im ungesättigten Fall der Fließfrontverlauf aufgezeichnet werden. Hier gibt es die Möglichkeit der optischen Aufzeichnung über eine Kamera oder kapazitiv-elektrische Verfahren mit Punkt- oder Liniensensoren.
- Für die Berechnung der Permeabilität aus den Messergebnissen gibt es Verfahren nach Adams und Rebenfeld, Weitzenböck und Chang. Für diese Arbeit wurde die erste Methode genutzt. Hierzu müssen Viskosität des Fluides, Injektionsöffnungsradius, Injektionsdruck und Faservolumengehalt bekannt sein, wobei der Haupt- und Nebenachsenverlauf der Fließellipse sowie deren Orientierungswinkel gegenüber den Achsen der Preform im Zuge der Messungen ermittelt werden.
- Die Permeabilität eines Faserhalbzeuges ist im Allgemeinen unabhängig von Temperatur und Injektionsdruck. Sie haben Einfluss auf die Messung, jedoch nicht auf die Permeabilität selbst.  
Der Faservolumengehalt beeinflusst die Tränkungseigenschaften über Kompaktierung und Mikrostruktur. Im Allgemeinen fällt die Permeabilität exponentiell mit dem Faservolumengehalt.  
Die Textileigenschaften wie Einzelfilamentdurchmesser, Rovingdicke, Flächengewicht, Webart und Stitching haben einen großen Einfluss auf den Widerstand gegen den Harzfluss. Der genaue Einfluss einzelner Größen ist hierbei nicht gänzlich geklärt.
- Die statistische Schwankung der Ergebnisse von Permeabilitätsmessungen ist im Allgemeinen relativ hoch. In der Literatur finden sich Standardabweichungen im Bereich von 10 bis 30%. Messergebnisse der



Permeabilität mit unterschiedlichen Verfahren ermittelt unterscheiden sich teilweise im Bereich einer Zehnerpotenz. Endruweit et al. geben eine Abschätzung des Messfehlers für ein Messsystem zur Permeabilitätsbestimmung von 14% ab, Fauster et al. errechnen diese mit 8%.

- Für die Ermittlung der Permeabilität manipulierter und nicht ebener Preforms gibt es unterschiedliche Ansätze, welche versuchen textile Halbzeuge, deren Scherverformung bzw. Permeabilität zu modellieren und in unterschiedlichen Stufen experimentelle Messwerte zur Kalibrierung nutzen. Im Allgemeinen liefern Simulationsmodelle weniger realitätsnahe Ergebnisse als Verfahren basierend auf experimentellen Daten.
- Die Füllsimulation ordnet sich ein zwischen Drapier-Simulation und jener der Aushärtung. Möglichst realitätsnahe Permeabilitätswerte sind für eine genaue Vorhersage wichtig. Zunehmend finden auch nicht-isotherme Methoden zur Beschreibung der Füllung in Kombination mit der Aushärtung Anwendung.

## 3 Experimentelles

### 3.1 Permeabilitätsmessung

Im Folgenden werden die Materialien beschrieben, welche im Zuge der Permeabilitätsmessungen untersucht wurden, sowie die Versuchspläne angegeben.

#### 3.1.1 Hexcel 1102

Bei Hexcel 1102 handelt es sich um ein Glasfaser-Gewebe mit 2/2-Köperbindung, welches das einzige Gewebe dieser Arbeit darstellte. In Tabelle 2 sind die Eigenschaften laut Herstellerdatenblatt bzw. Messungen zusammenfasst.

*Tabelle 2: Eigenschaften des GF-Gewebes Hexcel 1102*

<b>Hexcel 01102 0800-1240</b>	
<b>Flächengewicht laut Datenblatt [g/m<sup>2</sup>]</b>	290
<b>Flächengewicht laut Messung [g/m<sup>2</sup>]*</b>	283
<b>Dichte [g/cm<sup>3</sup>]</b>	2,55
<b>Webart</b>	2/2 Köper
<b>Fadendichte [/cm]</b>	7
<b>Finish</b>	TF970
<b>Gewichtsaufteilung Kett-Schuss</b>	50:50
<b>Dicke [mm]</b>	0,23

\* Messung durch IVW Kaiserslautern

Zwecks der Bestimmung der Permeabilitätseigenschaften und des Vergleiches der kapazitiven Ergebnisse mit dem Institut für Verbundwerkstoffe Kaiserslautern,

sowie dem Vergleich der beiden lehrstuhleigenen Messgeräte wurden Versuchsreihen am kapazitiven und optischen Permeameter durchgeführt. Tabelle 3 zeigt die durchgeführten Messungen mit dem kapazitiven, Tabelle 4 jene mit dem optischen Permeameter. FVG bezeichnet dabei den Faservolumengehalt.

*Tabelle 3: Versuchsplan kapazitives Permeameter für Hexcel 1102:*

Versuchsnummer	Material	FVG	Injektionsdruck [bar]	Lagenanzahl	Kavität [mm]
V-001	Hexcel 1102	0,45	3	6	1,48
V-002					
V-003					
V-004					
V-005					
V-006	Hexcel 1102	0,492	4,5	11	2,48
V-007					
V-008					
V-009					
V-010					
V-011	Hexcel 1102	0,525	6	7	1,48
V-012					
V-013					
V-014					
V-015					

*Tabelle 4: Versuchsplan optisches Permeameter für Hexcel 1102*

Versuchsnummer	Material	FVG	Injektionsdruck [bar]	Lagenanzahl	Kavität [mm]
V-016	Hexcel 1102	0,444	3	8	2
V-017					
V-020		0,499	4,5	9	
V-021					
V-024		0,555	6	10	
V-025					

### 3.1.2 HexForce NBB00

Bei HexForce NBB00 handelt es sich um ein biaxiales Non-Crimp-Fabric der Firma Hexcel Composites. In Tabelle 5 sind die Eigenschaften laut Datenblatt bzw. Messungen zusammengefasst.

*Tabelle 5: Eigenschaften des CF-NCF HexForce NBB00*

<b>HexForce NBB00 HR 1270 0160 GM C1F</b>	
<b>Flächengewicht laut Datenblatt [g/m<sup>2</sup>]</b>	166
<b>Flächengewicht laut Messung [g/m<sup>2</sup>]*</b>	172
<b>Dichte [g/cm<sup>3</sup>]</b>	1,78
<b>Orientierung</b>	45°/135°
<b>Fadenmaterial für Stitching</b>	Polyester
<b>Art des Stitchings</b>	Franse
<b>Flächengewicht Lage1-Lage2-Stitching [g/m<sup>2</sup>]</b>	80-80-6
<b>Dicke [mm]</b>	0,23

\* Messung durch IVW Kaiserslautern

Auch dieses Material wurde sowohl für den Vergleich der kapazitiven Messergebnisse verwendet, als auch für jenen zwischen den beiden Messgeräten. Tabelle 6 und 7 zeigen die jeweiligen Versuchspläne.

Tabelle 6: Versuchsplan kapazitives Permeameter HexForce NBB00

Versuchsnummer	Material	FVG	Injektionsdruck [bar]	Lagenanzahl	Kavität [mm]
V-028	HexForce NBB00	0,491	3	9	1,77
V-029					
V-030					
V-031					
V-032					
V-033		0,546	4,5	10	1,77
V-034					
V-035					
V-036		0,588	6	9	1,48
V-037					
V-038					
V-039					
V-040					
V-041					
V-042					

Tabelle 7: Versuchsplan optisches Permeameter HexForce NBB00

Versuchsnummer	Material	FVG	Injektionsdruck [bar]	Lagenanzahl	Kavität [mm]
V-043	HexForce NBB00	0,483	3	10	2
V-044					
V-045					
V-046					
V-047		0,532	4,5	11	
V-048					
V-049					
V-050		0,58	6	12	
V-051					
V-052					
V-053					
V-054					

### 3.1.3 BNCF 24KIMS -45°/0/+45°

Bei BNCF 24KIMS triaxial handelt es sich um ein triaxiales Gelege der Firma Cytec. Tabelle 8 fasst zunächst die Eigenschaften des Materials laut Datenblatt bzw. Messung zusammen.

Tabelle 8: Eigenschaften des triaxialen Geleges BNCF-24KIMS

<b>BNCF- 24KIMS - (-/0/+) - 582-1400</b>	
<b>Flächengewicht laut Datenblatt [g/m<sup>2</sup>]</b>	596
<b>Flächengewicht laut Messung [g/m<sup>2</sup>]</b>	596
<b>Dichte [g/cm<sup>3</sup>]</b>	1,79
<b>Orientierung</b>	
	-45°/0°/+45°
<b>Fasertyp</b>	Toho/Tenax 24K IMS60/65
<b>Fadenmaterial für Stitching</b>	Polyester
<b>Art des Stitchings</b>	Franse
<b>Binder</b>	Cycom 7720
<b>Flächengewicht Einzelschicht [g/m<sup>2</sup>]</b>	194
<b>Flächengewicht Binder [g/m<sup>2</sup>]</b>	10
<b>Flächengewicht Stitching [g/m<sup>2</sup>]</b>	4

Auch für dieses Material wurde die Permeabilität optisch und kapazitiv bestimmt. Bei den optischen Messungen wurde zum Unterschied zu den anderen Materialien ein Vergleich der beiden Messgeräte bei konstantem Faservolumengehalt und variiertem Druck angestellt. Tabelle 9 und 10 stellen die Versuchspläne dar.

Tabelle 9: Versuchsplan kapazitives Permeameter für BNCF 24KIMS triaxial

Versuchsnummer	Material	FVG	Injektionsdruck [bar]	Lagenanzahl	Kavität [mm]
V-055	BNCF 24KIMS triax.	0,502	2	3	1,99
V-056					
V-057					
V-058					
V-059	BNCF 24KIMS triax.	0,537	2	4	2,48
V-060					
V-061					
V-062					
V-063					
V-064					
V-065					
V-066					
V-067					
V-068					
V-069					
V-070	BNCF 24KIMS triax.	0,597	6	4	2,23
V-071					
V-072					
V-073					
V-074					

Tabelle 10: Versuchsplan optisches Permeameter für BNCF 24KIMS triaxial

Versuchsnummer	Material	FVG	Injektionsdruck [bar]	Lagenanzahl	Kavität [mm]
V-075	BNCF 24 IMS triax.	0,533	2	4	2,5
V-076					
V-077					
V-078					
V-079					
V-080					
V-081					
V-082					
V-083					
V-084					
V-085					
V-086					

Dieses triaxiale Gelege kam in weiterer Folge auch bei den RTM-Versuchen zum Einsatz.

### 3.1.4 BNCF 24KIMS unidirektional

Bei BNCF 24KIMS handelt es sich um ein unidirektionales Gelege der Firma Cytec. In folgender Tabelle finden sich die Eigenschaften des Materials laut Datenblatt bzw. Messung zusammengefasst.

*Tabelle 11: Eigenschaften von BNCF 24KIMS unidirektional*

<b>BNCF- 24KIMS - (0) - 388-1270</b>	
<b>Flächengewicht laut Datenblatt [g/m<sup>2</sup>]</b>	414
<b>Flächengewicht laut Messung [g/m<sup>2</sup>]</b>	435
<b>Dichte [g/cm<sup>3</sup>]</b>	1,79
<b>Orientierung</b>	
	0°
<b>Fasertyp</b>	Toho/Tenax 24K IMS60/65
<b>Fadenmaterial für Stitching</b>	Polyester
<b>Art des Stitchings</b>	Franse
<b>Binder</b>	Cycom 7720
<b>Flächengewicht C-Fasern [g/m<sup>2</sup>]</b>	388
<b>Flächengewicht GF-Schussfäden [g/m<sup>2</sup>]</b>	12
<b>Flächengewicht Binder [g/m<sup>2</sup>]</b>	10
<b>Flächengewicht Stitiching [g/m<sup>2</sup>]</b>	4

Dieses Material wurde nur kapazitiven Permeabilitätsmessungen unterzogen und in weiter Folge für Versuche mit manipulierten Preforms verwendet. Tabelle 12 zeigt den Versuchsplan für die Permeabilitätsmessungen.



*Tabelle 12: Versuchsplan kapazitives Permeameter für BNCF 24KIMS unidirektional*

Versuchsnummer	Material	FVG	Injektionsdruck	Lagenanzahl	Kavität
V-087	BNCF 24 IMS uni	0,493	3	3	1,48
V-088					
V-089					
V-090					
V-091	BNCF 24 IMS uni	0,549	4,5	4	1,77
V-092					
V-093					
V-094					
V-095	BNCF 24 IMS uni	0,588	6	6	2,48
V-096					
V-097					
V-098					

### 3.1.5 Messfluid

Als Messfluid für die Permeabilitätsmessungen als auch für die RTM-Versuche diente Pflanzenöl, wobei dieses für die Experimente des optischen Permeameters mit Hilfe des Farbstoffes SUDANRED IV von Sigma Aldrich rot eingefärbt wurde, um einen optischen Kontrast zwischen Textilien und Fluid zu erreichen.

Abbildung 1 zeigt eine Probe des Glasfaser-Gewebes, welche mit dem Messfluid getränkt ist.



*Abbildung 1: Getränkte GF-Gewebe-Probe, Öl gefärbt mit SUDANRED IV*

Ein wichtiger Parameter für die Messung bzw. die Berechnung der Permeabilität ist die Viskosität des Öles, welche eine charakteristische Temperaturabhängigkeit zeigt. Für die durchgeführten Versuche diente die Viskositäts-Temperatur-Kurve aus Abbildung 2 zur Bestimmung der notwendigen Größe für die Permeabilitätsermittlung. Anwendung fand dabei jene bei einer Scherrate von 10/s.

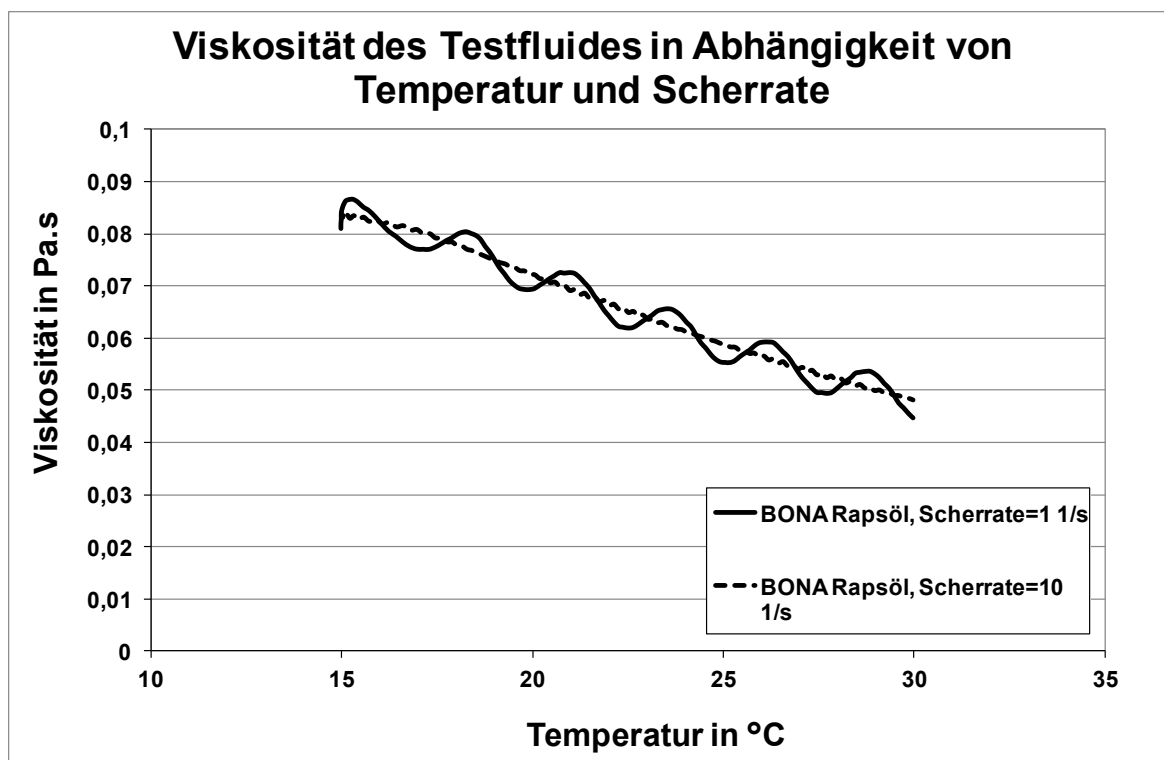


Abbildung 2: Viskositätskurve des Pflanzenöls

Die temperaturabhängige Viskosität wurde bereits vor dieser Arbeit am Lehrstuhl für Verarbeitung von Verbundwerkstoffen bestimmt.

Die Temperatur wurde im Falle der optischen Messung über einen Temperatursensor im Ölkreislauf, im Falle der kapazitiven durch die manuelle Messung mit einem Flüssigkeitsthermometer überprüft. Im Allgemeinen war die Temperatur weitgehend konstant und im Bereich der Raumtemperatur. Folgende Tabelle zeigt die Temperaturwerte, welche für die Bestimmung der Viskosität und in weiterer Folge für die Auswertung verwendet wurden.

Tabelle 13: Temperaturwerte für die Bestimmung der Viskosität und Auswertung

Versuche	Messverfahren	Material	Temperatur [°C]
V001 - V015	optisch	Hexcel 1102	22,5
V028 - V042		HexForce NBB00	
V055 - V074		BNCF 24IMS triax.	
V016 - V027	kapazitiv	Hexcel 1102	21,75
V043 - V054		HexForce NBB00	
V075 - V086		BNCF 24IMS triax.	
V087 - V098		BNCF 24IMS unid.	

## 3.2 Optische Permeabilitätsmessung

### 3.2.1 Probenvorbereitung

Alle Proben für die Permeabilitätsmessung als auch für die darauffolgenden RTM-Versuche wurden mit dem automatischen Cutter des Lehrstuhls für Verarbeitung von Verbundwerkstoffen zugeschnitten.

Die Proben wurden dabei bereits in notwendiger Lagenzahl entsprechend des Versuchsplans, inklusive Injektionsöffnung und einer dreieckigen Fase zur Kennzeichnung am linken unteren Rand zugeschnitten. Preforms für die optische Permeabilitätsmessung hatten die Maße 390 x 290 mm.

Um die Imprägnierung in der Dickenrichtung zu eliminieren wurden die Preforms mit einer zentralen Injektionsöffnungen von 13 mm Durchmesser zugeschnitten. Diese wurde dabei mit dem oszillierenden Messer (POT), die Außenkanten mit dem rotierenden Messer (PRT) aus dem Rollenmaterial getrennt. Folgende Tabelle zeigt die verwendeten Schnittgeschwindigkeiten.

*Tabelle 14: Schnittgeschwindigkeiten beim Zuschneiden der Preforms*

Messertyp	Schnittgeschwindigkeit [mm/s]
PRT	30
POT	10

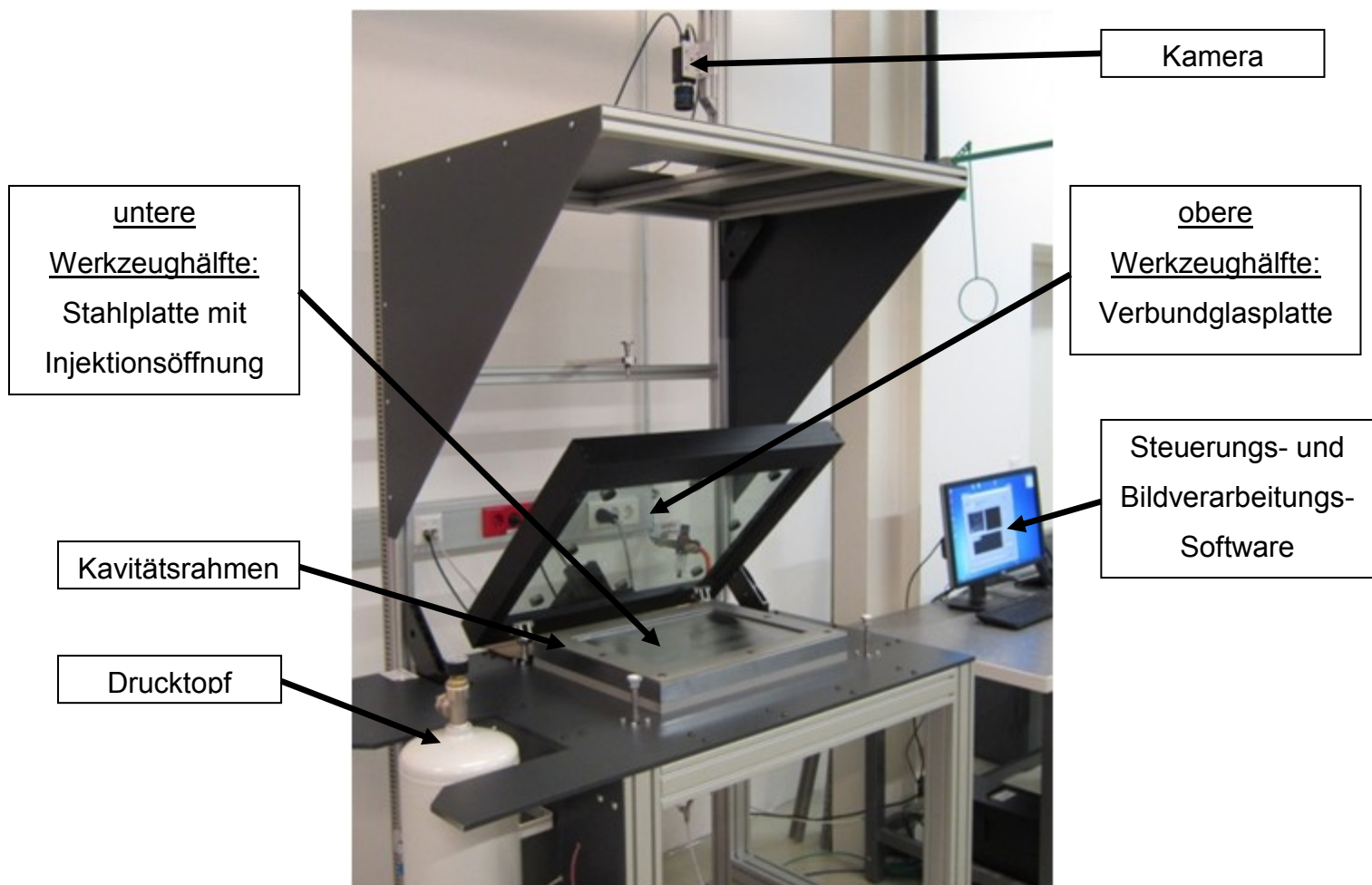
Nach dem Zuschnitt wurden die Preforms in Kartons gelagert und für die Versuche vorsichtig ins LCM-Labor transportiert, wo darauf die Experimente durchgeführt wurden. In der gesamten Handhabung der Textilien wurde mit äußerster Vorsicht gearbeitet, um die Preforms nicht zu beschädigen bzw. die Messungen nicht zu beeinflussen.

### **3.2.2 Versuchsdurchführung und Auswertung**

Die optischen Permeabilitätsmessungen wurden mit dem entsprechenden Messgerät, einer Eigenentwicklung des Lehrstuhles für Verarbeitung von Verbundwerkstoffen, durchgeführt. Abbildung 3 zeigt den Aufbau des Permeameters. Dieses besteht aus einem zweiteiligen Werkzeug, wobei die obere Werkzeughälfte für die Mess-Aufzeichnung durch die Kamera transparent ist und aus einer 38 mm dicken Verbundglasplatte besteht. In der unteren Werkzeughälfte befindet sich die Injektionsöffnung. Das Gerät wird über einen PC mit der Steuerungs- und Bildverarbeitungs-Software gesteuert. Das Messfluid wird im Drucktopf mit dem gewünschten Druck beaufschlagt und fließt bei Öffnung eines Magnetventils in die Kavität. Zum Einstellen der gewünschten Kavitätshöhe und des Faservolumengehaltes gibt es mehrere Rahmen unterschiedlicher Dicke, welche einfach zwischen die Werkzeughälften gelegt werden.

Zur Durchführung der Versuche wird die obere Kavitätshälfte über die Software pneumatisch geöffnet und aufgeklappt. Der nötige Rahmen für die gewünschte Kavitätshöhe, sowie das entsprechende Preform kann eingelegt und mit der Injektionsöffnung über der Öffnung der unteren Werkzeughälfte platziert werden. Die Preforms wurden dabei immer so zugeschnitten und eingelegt, dass die Kettrichtung in Richtung der längeren Seite der rechteckigen Kavität liegt. Die

dreieckige Ausnehmung der Preforms am linken unteren Eck verhindert dabei eine Verwechslung. Nach dem Schließen der oberen Werkzeughälfte wird ein stählerner Spannrahmen auf der Verbundglasplatte positioniert und mit Hilfe von 8 Schrauben befestigt. Letztere werden mit einem Drehmoment von 36 Nm angezogen, der Rahmen soll die Durchbiegung der Glasplatte während der Versuche minimieren. Danach kann der Versuch wiederum über die Software und ein geregeltes Magnetventil gestartet und nach Verstreichen der nötigen Messzeit beendet werden.



*Abbildung 3: Aufbau des optischen Permeameters*

Die Kamera über der Kavität zeichnet den Versuch auf, die Software erkennt über eine Analyse der vorliegenden Kontraste die voranschreitende Fließfront und approximiert an die gesamte Fließfront eine möglichst passende Ellipse. Die Haupt- und Nebenachsenlängen dieser Ellipse werden in Abhängigkeit der

Messzeit aufgezeichnet. Auch der mögliche Orientierungswinkel  $\beta$  wird hier erfasst. Abbildung 4 zeigt eine Ansicht aus der Software, in der die Fließfront, die approximierte Ellipse sowie die aufgezeichneten Achsenlängen zu sehen sind.

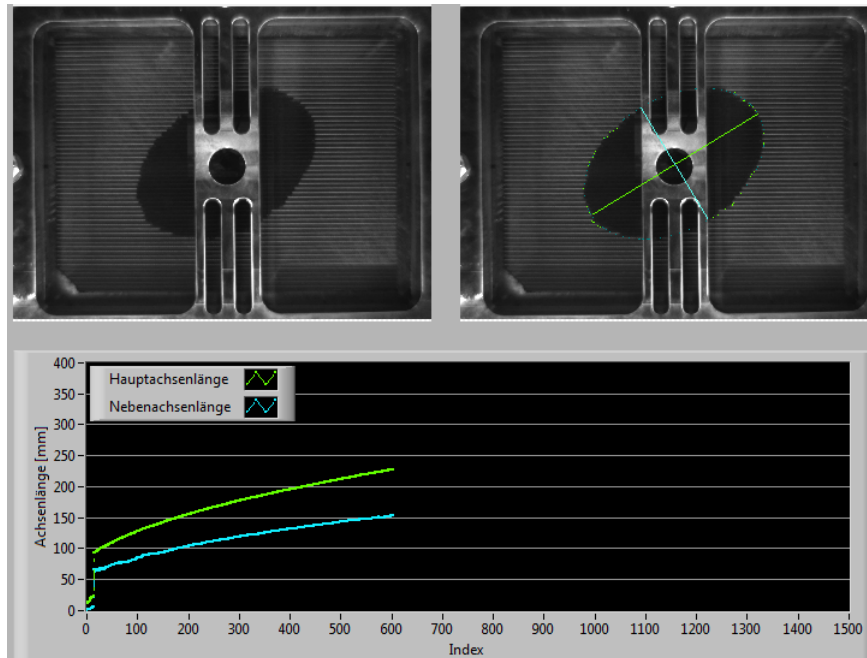


Abbildung 4: Ansicht der Software zur Datenerfassung, opt. Permeameter

Im Anschluss werden diese Daten in ein Textfile ausgelesen und können mit Hilfe eines Matlab-Programmes eingelesen und für die Berechnung der 2D-Permeabilität sowie der Anisotropie verwendet werden. Das verwendete Matlab-Programm wurde am LVV entwickelt und verwendet die beschriebene Auswertemethode nach Adams.

### 3.3 Kapazitive Permeabilitätsmessung

#### 3.3.1 Probenvorbereitung

Auch die Proben für die kapazitive Messung der Permeabilität wurde mit dem CNC Cutter in benötigter Lagenzahl zugeschnitten. Die Preforms unterscheiden

sich in ihren Maßen von hier 460 x 460 mm und verfügen ebenfalls über eine zentrale Injektionsöffnung von 13 mm Durchmesser um die Imprägnierung in Dickenrichtung auszuschließen.

Die Schnittgeschwindigkeiten sind gleich denen bei der optischen Messung und finden sich in Tabelle 14. Nach dem Zuschnitt wurden die Preforms wie jene der optischen Messung mit größter Vorsicht behandelt, in Kartons gelagert und zum Messgerät transportiert.

### **3.3.2 Versuchsdurchführung und Auswertung**

Für diese Messungen wurde ein Permeameter mit linienförmigen, kapazitiv-elektrischen Sensoren verwendet. Das Messgerät besteht hierbei aus zwei Werkzeughälften aus Aluminium. Die untere Hälfte verfügt über einen zentralen Drucksensor, sowie acht sternförmig davon weglauende kapazitive Sensoren, welche kontinuierlich die Fließfront aufzeichnen. Die Injektionsöffnung befindet sich im Zentrum der oberen Werkzeughälfte. Das Werkzeug befindet sich auf einer hydraulischen RTM-Pressen. Die Injektionsöffnung ist mit einem Drucktopf verbunden, welcher das Messfluid mit dem gewünschten Injektionsdruck in die Kavität fördert. Die Messung wird über ein PC-System mit entsprechender Software vom IVW Kaiserslautern gesteuert und aufgezeichnet. Abbildung 5 zeigt die untere Werkzeughälfte sowie die RTM-Pressen.



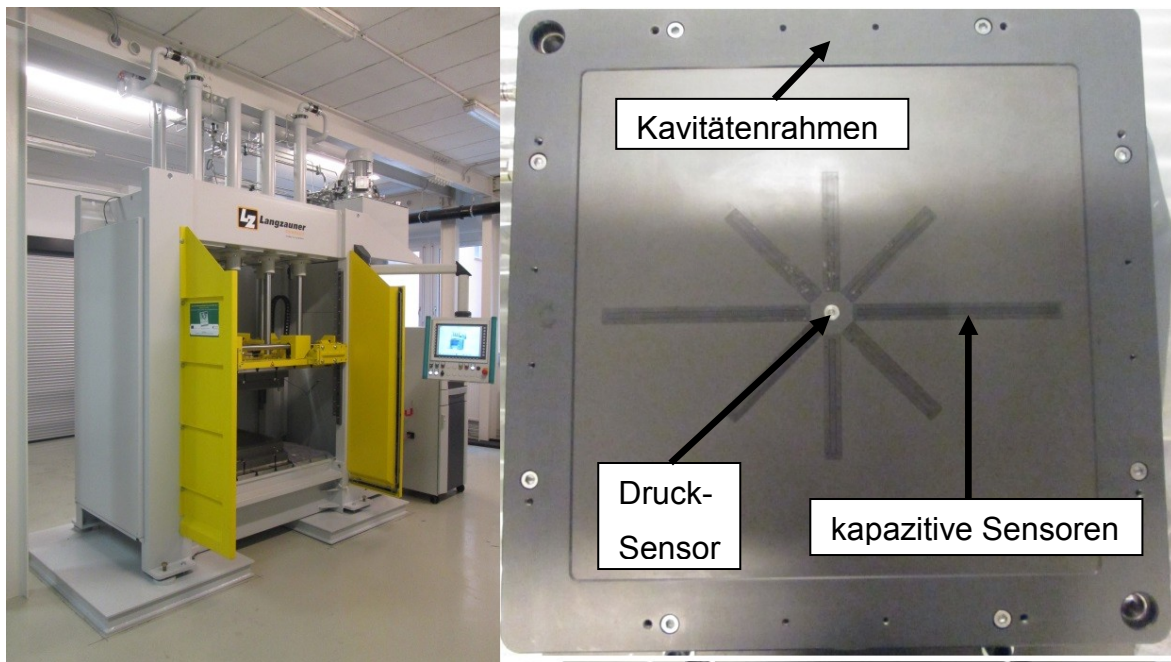
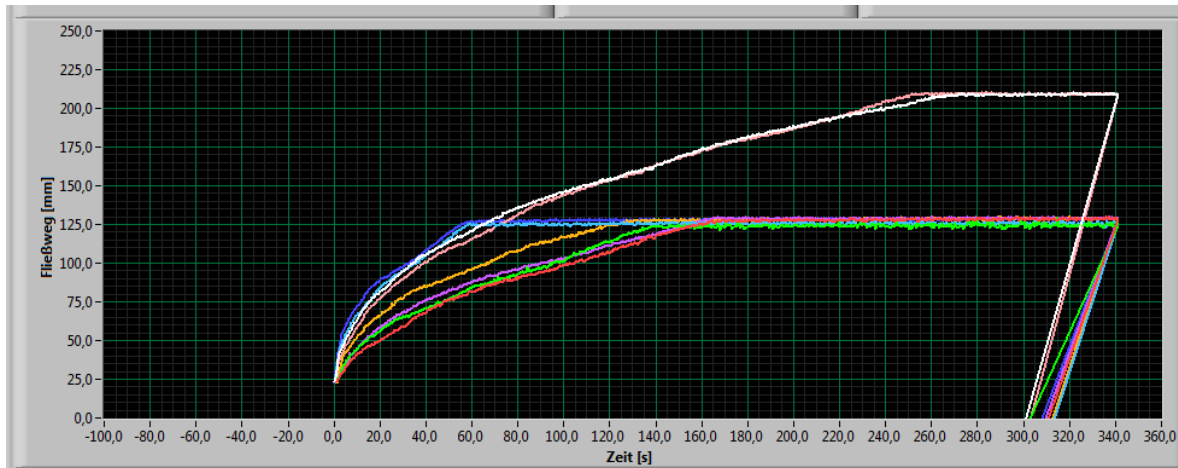


Abbildung 5: Aufbau des kapazitiven Permeameters

Nach Öffnen des Werkzeuges, Einlegen des Preforms mit der Injektionsöffnung direkt über dem Drucksensor und dem neuerlichen Schließen, kann der Versuch über die Software gestartet werden. Während des Füllprozesses zeichnen die linienförmigen Sensoren beim Überstreichen durch die Flüssigkeit die Steigung des kapazitiven Äquivalentes in Abhängigkeit der Zeit auf, da beim Füllen des Werkzeuges im Sinne eines Plattenkondensators dessen Kapazität steigt. Dieses Äquivalent wird auf die Fließlänge in Abhängigkeit der Zeit umgerechnet, womit 8 Fließfrontpunkte als Funktionen der Zeit während der Messung bekannt sind. Abbildung 6 zeigt die Aufzeichnung der Fließweglänge über der Zeit in der Software.



*Abbildung 6: Software-Ansicht Fließweglänge über Zeit*

In der Grafik ist ersichtlich, dass je nach Verlauf der Fließfront die verschiedenen Sensoren unterschiedlich schnell einen Plateau-Wert erreichen. Dies tritt ein, wenn der Sensor zur Gänze überstrichen ist. Um mit allen Sensorkombinationen Auswertungen durchzuführen kann der Versuch nach vollkommenem Überstreichen des letzten Sensors beendet werden. Für die weitere Berechnung detektiert die Software nun automatisch den für die Auswertung relevanten Bereich. Dieser beginnt im Normalfall einige Sekunden nach Versuchsstart, um die nicht-linearen Bereiche der Fließweglänge-Zeit-Kurve durch Anfangseffekte möglichst zu entfernen und endet beim Erreichen des Plateau-Wertes durch den ersten Sensor.

Die Software zur Auswertung und Berechnung der Permeabilität bietet nun 16 mögliche Kombinationen aus je drei Sensoren an, durch welche eine analytische Ellipse interpoliert wird. Zusätzlich zu diesen Kombinationen bieten Option 17 und 18 die Möglichkeit je zwei gegenüberliegende Tripel zu mitteln und so eine Ellipse zu erhalten. Die Haupt- und Nebenachsenlänge dieser Ellipse in Abhängigkeit der Zeit wird nun dazu verwendet über die Auswert-Methode nach Adams die Permeabilität zu berechnen. Im Zuge dieser Arbeit wurde für die Berechnung jeweils der Mittelwert aus den Kombinationen 17 und 18 als Messwert herangezogen. Abbildung 7 zeigt die drei Sensorkombinationen 15, 17 und 18.

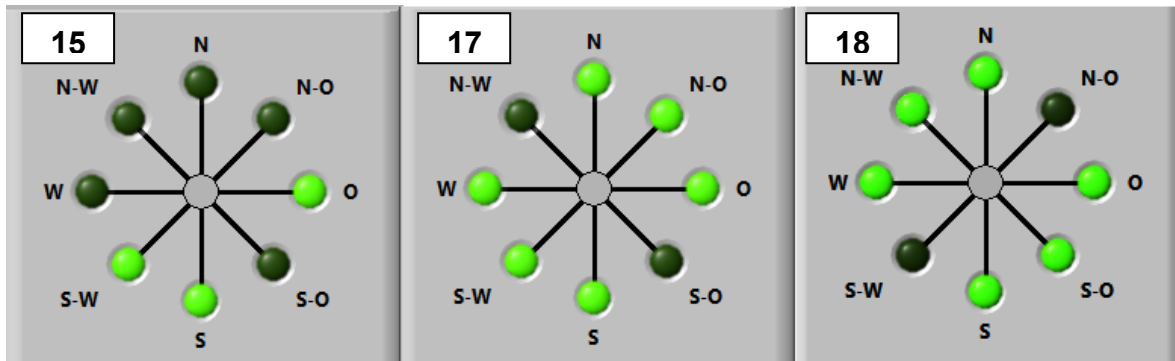


Abbildung 7: Sensortripel für die Auswertung der kapazitiven Messung

### 3.4 RTM-Versuche mit manipulierten Preforms

#### 3.4.1 Versuchsplan

Im Zuge der RTM-Versuche wurden grundsätzlich zwei Arten von manipulierten Preforms verwendet:

- a. Mehrteilige Preforms mit unterschiedlichen Textilien bekannter Tränkungseigenschaften
- b. Preforms mit eingelegten Barrieren aus Modelliermasse

Grundsätzlich wurden bei der Preform-Herstellung rechteckige, kreisförmige oder elliptische Teile aus den Grund-Preforms herausgeschnitten und diese durch gleiche Einlegeteile eines anderen Textils, oder eine Barriere ersetzt. Tabelle 15 zeigt eine Übersicht der durchgeführten Versuche.

Tabelle 15: Übersicht der RTM-Versuche mit manipulierten Textilien

Versuchs-Nr.	Preform type	Druck [bar]	Bereich 1	Bereich 2	Bereich 3
X1		1	BNCF 24KIMS unid.	BNCF 24KIMS biax.	-
X2		1	BNCF 24KIMS biax.	BNCF 24KIMS biax. 90°	BNCF 24KIMS unid.
X3		1	BNCF 24KIMS unid.	Modelliermasse	-
X4		1	BNCF 24KIMS unid.	Modelliermasse	-
X5		1	BNCF 24KIMS unid.	BNCF 24KIMS biax.	-
X6		1	BNCF 24KIMS unid.	BNCF 24KIMS unid. 90°	-
X7		1	BNCF 24KIMS biax.	BNCF 24KIMS unid.	-
X8		1	BNCF 24KIMS unid.	BNCF 24KIMS unid. 90°	BNCF 24KIMS biax.
X9		1,5	BNCF 24KIMS triax.	BNCF 24KIMS unid.	-
X10		1,5	BNCF 24KIMS unid.	BNCF 24KIMS triax.	-
X11		2	BNCF 24KIMS triax.	Modelliermasse	-
X12		2	BNCF 24KIMS triax.	Modelliermasse	-

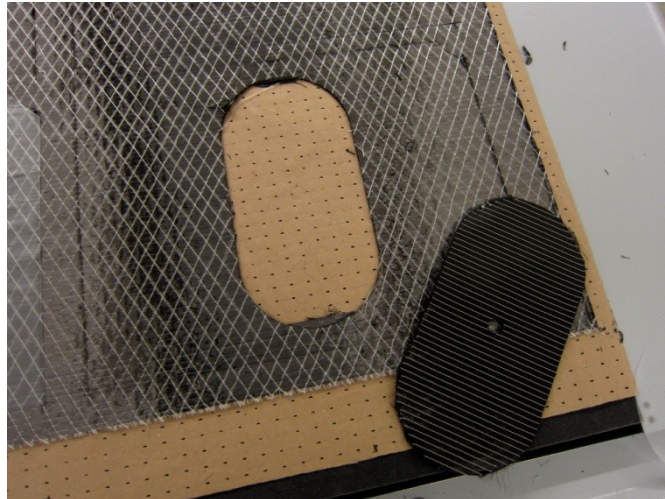
In der Spalte „Preform type“ sind die verschiedenen Preforms ersichtlich und über die farbliche Kennzeichnung die jeweilige Materialaufteilung. Der Zusatz „90°“ bedeutet eine Verdrehung um 90°.

Die grau hinterlegten Versuche X3, X4 und X9 bis X12 waren jene welche die interessantesten Ergebnisse hinsichtlich der Beeinflussung der Fließfront lieferten. Aus diesen sechs Versuchen wurden für den Vergleich mit der Simulation drei ausgewählt. Auf dies wird im Kapitel der Ergebnisse näher eingegangen.

### 3.4.2 Probenvorbereitung

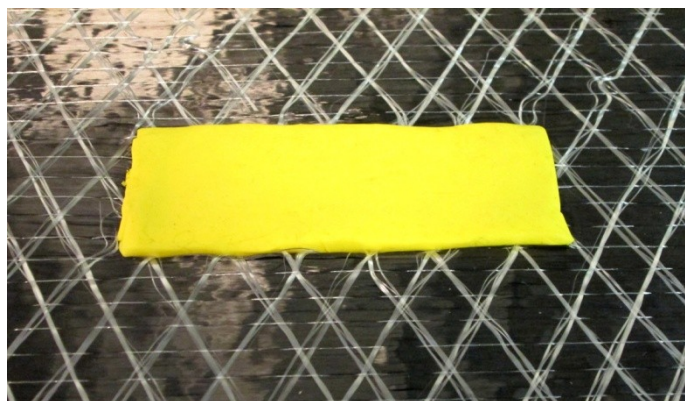
Die manipulierten Preforms für die RTM-Versuche wurden ebenfalls mit Hilfe des CNC-Cutters bereits in benötigter Lagenzahl konfektioniert. Die Außenkanten wurden dabei wiederum mit dem rotierenden Messer, die Ausnehmungen und Injektionsöffnungen mit dem oszillierenden Messer geschnitten. Die Schnittgeschwindigkeiten entsprachen jenen, welche bei den Permeabilitätsmessungen zum Einsatz kamen.

Abbildung 8 zeigt eine Preform aus unidirektionalem Gelege mit entsprechendem Einlegeteil aus triaxialem Material.



*Abbildung 8: UD-Preform mit triaxialem Einlegeteil*

Die Barrieren wurden ausschließlich mit rechteckigen Ausnehmungen eingesetzt. Als Material kam dabei handelsübliche Modelliermasse zum Einsatz. Die Barrieren wurden auf die gewünschte Dicke gewalzt und in richtiger Form zugeschnitten. Durch das viskoelastische Verhalten war es aber nicht leicht die Teile genau einzupassen. Die Barrieren sollten dabei einerseits nicht zu viel Übermaß besitzen um die Faserarchitektur nicht zu schädigen, auf der anderen Seite sollten sie aber möglichst gut mit dem Textil und der oberen Werkzeughälfte abschließen um ein Überfließen und Race-tracking an den Kanten zu vermeiden. Abbildung 9 zeigt eine Barriere, eingepasst in Preform aus BNCF 24KIMS unidirektional.



*Abbildung 9: Barriere aus Modelliermasse in UD-Preform*

### 3.4.3 Versuchsdurchführung und Auswertung

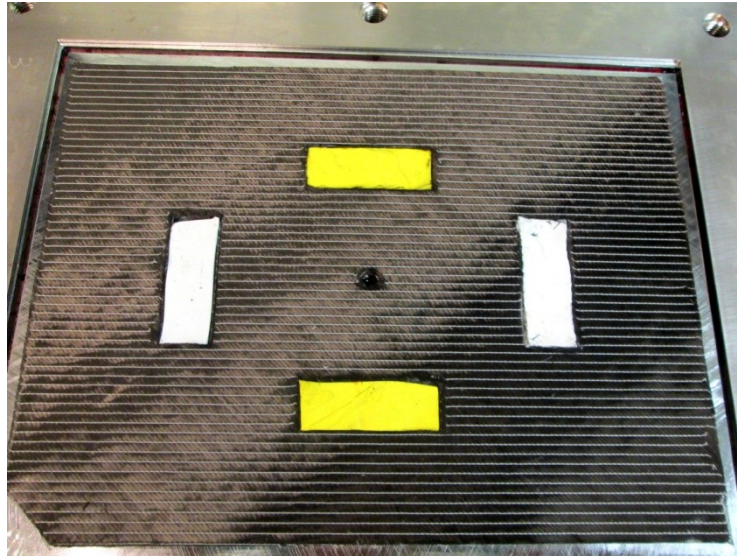
Die RTM-Versuche wurden ebenfalls mit dem optischen Permeameter durchgeführt, um die Beeinflussung der Fließfront mit der Kamera aufzuzeichnen und Bilder mit jenen der Simulation vergleichen zu können. Der Versuchsablauf war hierbei der Selbe, jedoch waren lediglich die automatisch aufgezeichneten Bilder und nicht die Auswertung von Interesse.

Nach Öffnen der Kavität, wurden die manipulierten Textilien erst im Werkzeug letztlich eingepasst. Nach dem neuerlichen Schließen konnte der Versuch mit gewünschtem Druck durchgeführt und die Bilder für den Vergleich über den PC erhalten werden. Tabelle 16 zeigt die verwendeten Kavitätenhöhen und Lagenanzahl.

*Tabelle 16: Übersicht Kavitätenhöhe und Lagenanzahl für RTM-Versuche*

	Lagen	Kavität [mm]
<b>X1-X8: BNCF 24KIMS unid.</b>	4	2
<b>BNCF 24KIMS biax.</b>	3	2
<b>X9-X12 BNCF 24KIMS unid.</b>	5	3
<b>BNCF 24KIMS triax.</b>	7	3

Abbildung 10 zeigt eine Preform von BNCF 24KIMS triaxial mit 4 Barrieren im Werkzeug des optischen Permeameters positioniert.




*Abbildung 10: triaxiale Preform mit Barrieren im Werkzeug*

### 3.5 Simulation

Für die Durchführung der Simulation auf Basis der Finiten Elemente Methode diente das Simulationsprogramm PAM-RTM der ESI Group. Von den zwölf durchgeführten Versuchen wurden letztendlich die Versuche X10, X11 und X12 in der Simulation nachgestellt. Die CAD-Files der verwendeten Preforms fanden ins Programm Eingang, worauf für die einzelnen Zonen die Tränkungseigenschaften für den jeweiligen Faservolumengehalt laut den vorherigen Permeabilitätsmessungen festgelegt wurden. Auch Injektionslöcher wurden in der Simulation berücksichtigt, um möglichst ähnliche Bedingungen zu schaffen. Für die Vernetzung wurde ein dreieckiges Mesh mit einer Mesh-Größe von 3 mm gewählt. Während der Versuche herrschte weitgehend Raumtemperatur, weswegen die Viskosität des Öles dementsprechend auf 63,5 mPas gesetzt wurde. Tabelle 17 zeigt noch einmal die Versuche, Injektionsdrücke und die Viskosität.

Tabelle 17: Übersicht der simulierten RTM-Versuche

Versuchs-Nr.	Preform type	Druck [bar]	$\eta$ [mPas]
X10		1,5	63,5
X11		2	
X12		2	

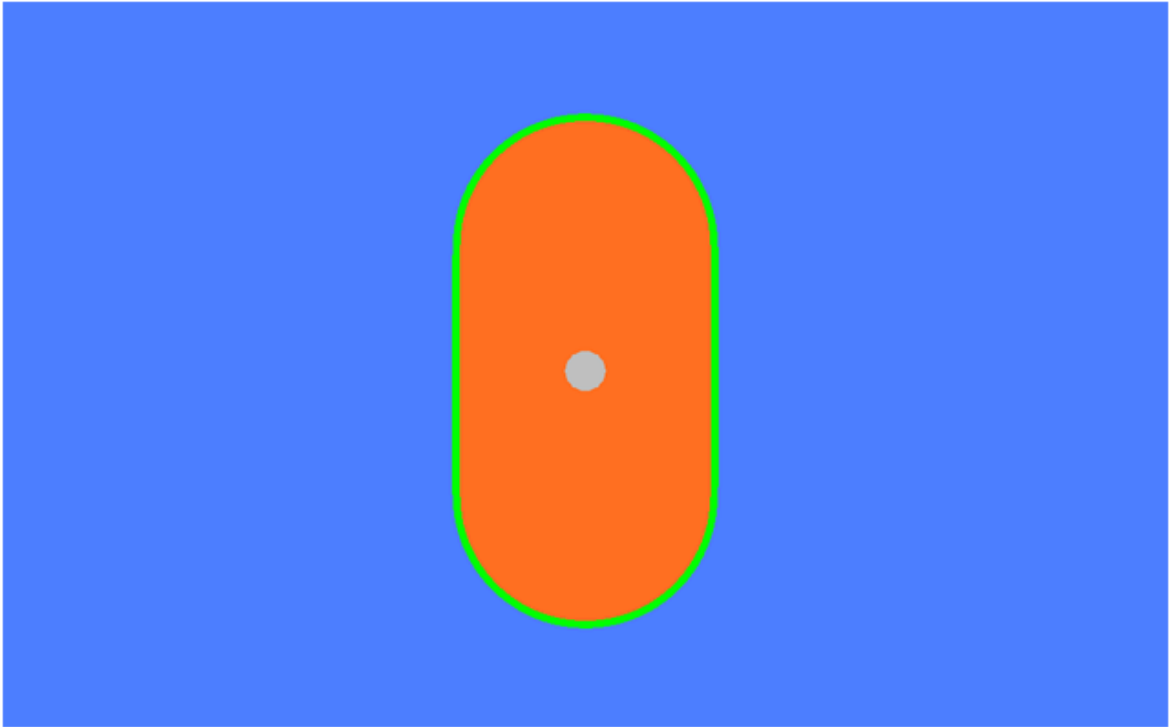
Die Permeabilität der einzelnen Zonen wurde für die entsprechenden Faservolumenanteile auf Basis der kapazitiven Permeabilitätsmessungen aus den Ausgleichsgeraden für den Verlauf der Permeabilität in Abhängigkeit des Faservolumenanteiles berechnet. Tabelle 18 zeigt eine Übersicht über die Materialeigenschaften, welche in die Simulation Eingang fanden.

Tabelle 18: Übersicht über Materialwerte für Simulation

Parameter	UD	NCF triax.	Modelliermasse
Material			
K1 [m <sup>2</sup> ]	1,35E-11	1,33E-11	-
K2 [m <sup>2</sup> ]	5,17E-12	5,16E-12	-
$\beta$ [°]	0	34,6	-
Dichte [g/cm <sup>3</sup> ]	1,79	1,79	-
Flächengewicht [g/m <sup>2</sup> ]	435	596	-
FVG [%]	56,7	55,5	100

Abbildung 11 zeigt die verwendete Geometrie für die Preform aus Versuch X10. Hier wurde zwischen der UD-Zone (blau) und der triax. NCF-Zone (orange) ein Spalt mit höherer Porosität definiert um dem Übergang zwischen den beiden Textilien gerecht zu werden. Nachdem die Preforms mit der Hand eingepasst wurden und sich dies als durchaus schwierig erwies, war hier ein resultierender Spalt zu erwarten.





*Abbildung 11: Geometrie eines manipulierten Preforms für die Simulation*

## 4 Ergebnisse und Diskussion

In diesem Kapitel werden nun die Ergebnisse dargestellt, zuerst jene der Permeabilitätsmessungen der vier verschiedenen Materialien unter Verwendung des optischen sowie des kapazitiven Messverfahrens. Hier wird auch auf den Einfluss des Druckes bei der optischen Permeabilitätsmessung und auf die Unterschiede der beiden Messsysteme eingegangen.

Danach werden die Ergebnisse der RTM-Versuche und deren Vergleich mit der Simulation gezeigt.

### 4.1 Permeabilitätsmessungen

#### 4.1.1 Hexcel 1102

Abbildung 12 zeigt die Ergebnisse der Permeabilitätsmessungen für das Hexcel 1102 Glasfaser-Gewebe in Abhängigkeit des Faservolumengehaltes für beide Messverfahren. In der logarithmischen Darstellung ergibt sich ein linearer Verlauf der Ausgleichsgeraden. Zwischen optischer und kapazitiver Messung ergibt sich ein relativ hoher Unterschied, etwa im Bereich einer Zehnerpotenz. Die permeabilitätsbezogene Anisotropie des Materials ist groß, wobei optische (0,22 – 0,31) und kapazitive (0,18 – 0,22) Messung hier ähnliche Ergebnisse liefern. Dies zeigt Abbildung 13.

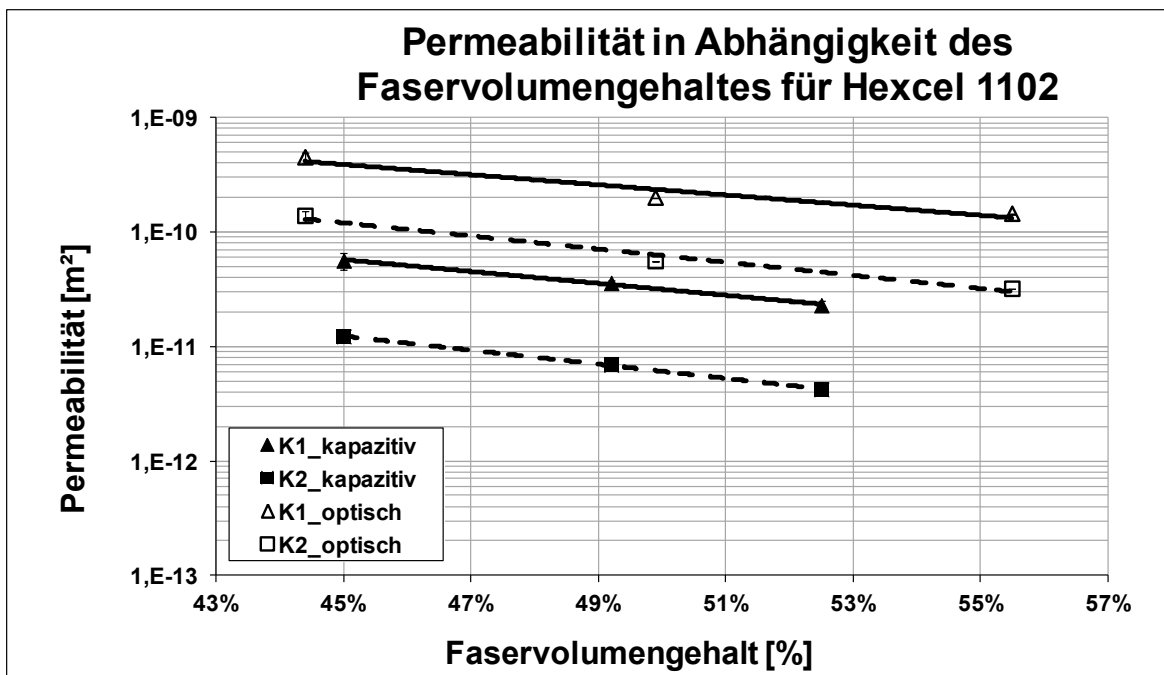


Abbildung 12: Permeabilität über Faservolumengehalt für Hexcel1102

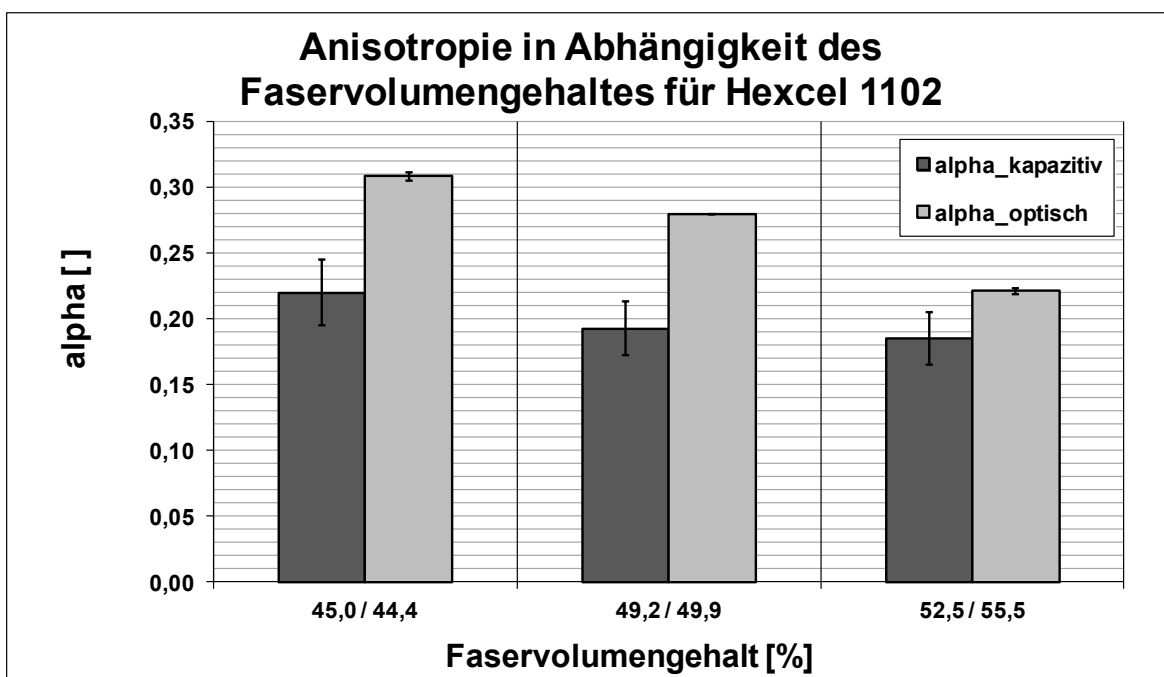


Abbildung 13: Anisotropie für Hexcel1102

Abbildung 14 zeigt den Orientierungswinkel der Fließellipse in Abhängigkeit des Faservolumengehaltes. Hier ergibt sich ein Winkel im Bereich von 1 bis 2 Grad, was mit den Eindrücken während der Messung (Orientierung in Richtung 0°)

übereinstimmt. Zur kapazitiven Messung muss gesagt werden, dass hier die Standardabweichungen durchwegs über 100% liegen.

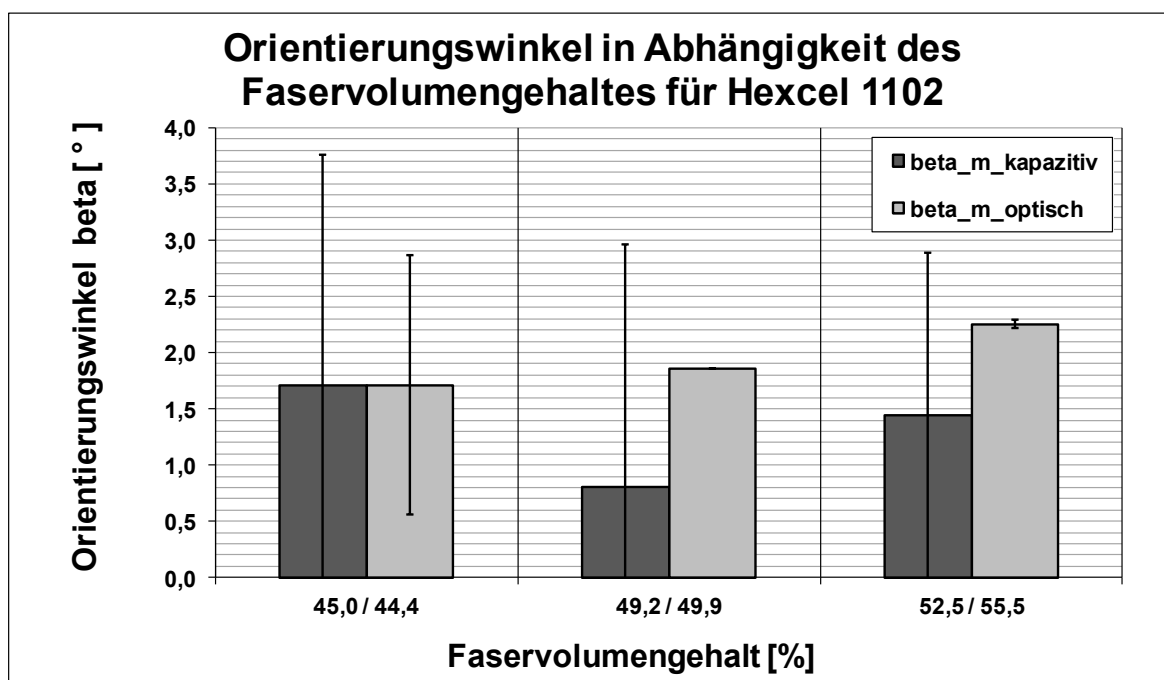


Abbildung 14: Orientierungswinkel für Hexcel 1102

Die Messserie mit dem optischen Permeameter umfasste lediglich 6 Versuche, wovon einer mittleren Faservolumengehaltes aufgrund eines Fehlers bei der Durchführung keine Ergebnisse lieferte. Die Ergebnisse sind somit grundsätzlich als wenig repräsentativ einzustufen, jedoch decken sich die beobachteten Tendenzen in Bezug auf die Messergebnisse weitgehend mit jenen der anderen untersuchten Materialien.

#### 4.1.2 HexForce NBB00

Abbildung 15 zeigt den Verlauf der Permeabilität des biaxialen NCFs HexForce NBB00 in Abhängigkeit des Faservolumengehaltes für beide Messverfahren. Auch hier ergeben sich Unterschiede in den Messergebnissen im Bereich einer Zehnerpotenz.

Die Anisotropie ist bei diesem Material geringer (Abbildung 16): Sie liegt im Mittel bei 0,51 (kapazitiv) bzw. 0,55 (optisch).

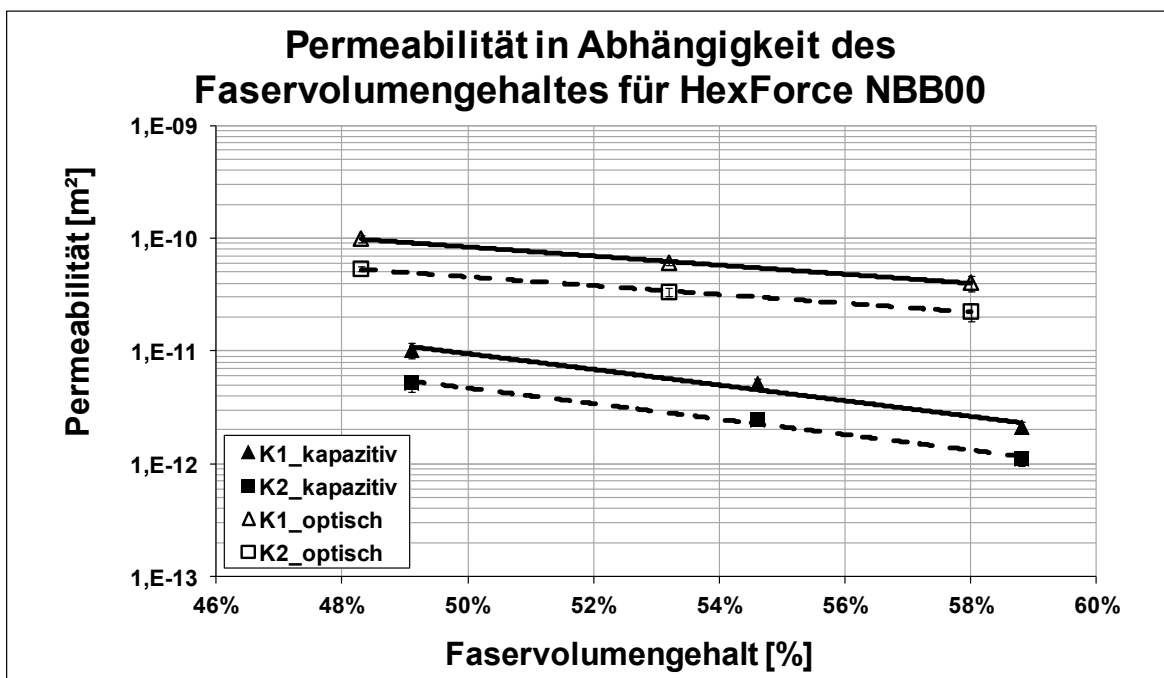


Abbildung 15: Permeabilität über Faservolumengehalt für HexForce NBB00

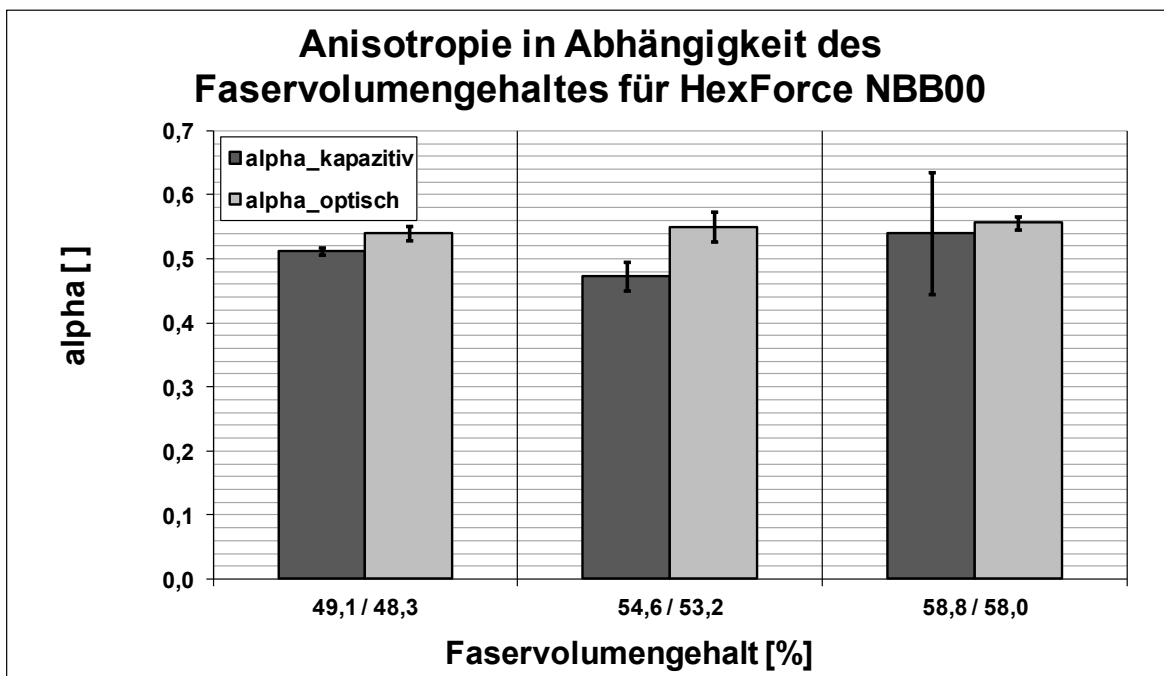


Abbildung 16: Anisotropie für HexForce NBB00

Abbildung 17 zeigt die Orientierung der Fließellipse: hier ergibt sich ein Winkel von 7,4 bis 9,6° (optisch) bzw. -0,7 bis 3,2° (kapazitiv). Auch hier zeigt die kapazitive Messung hohe Standardabweichungen von 39 bis 830%, während die optische Messung zwar hohe Schwankungen liefert (30-40% Standardabweichung), diese aber noch im Bereich jener in der Literatur dokumentierten liegen.

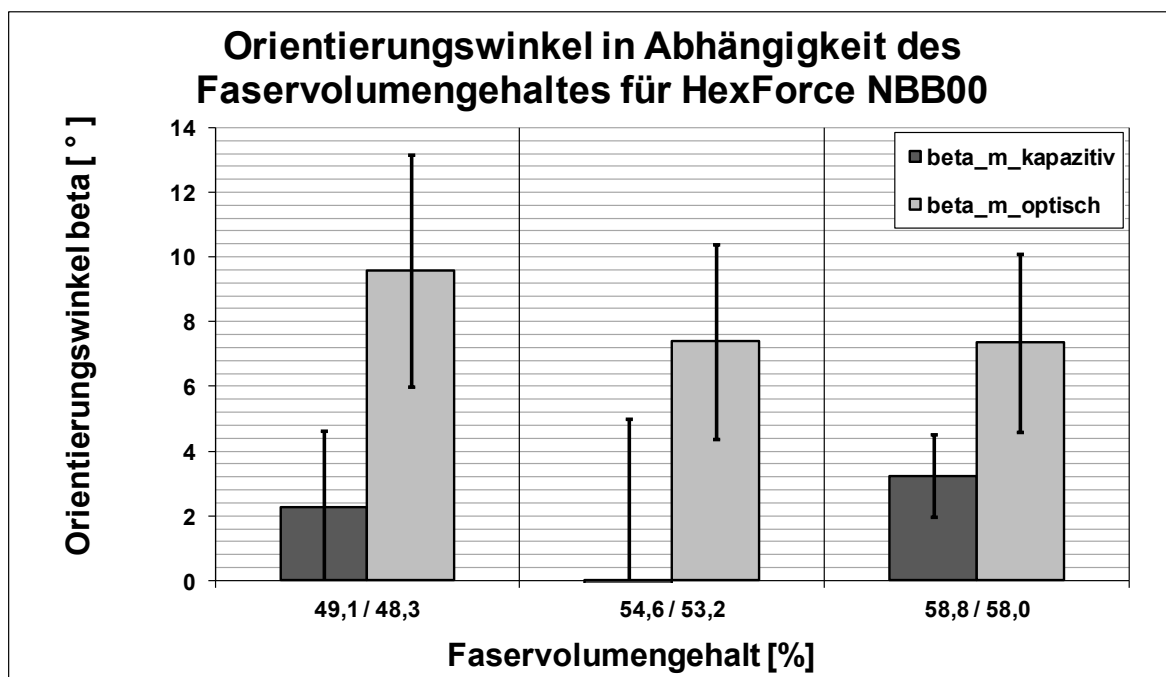


Abbildung 17: Orientierungswinkel für HexForce NBB00

Abbildung 18 zeigt Versuch V043 im optischen Permeameter mit dem eingezeichneten Orientierungswinkel.

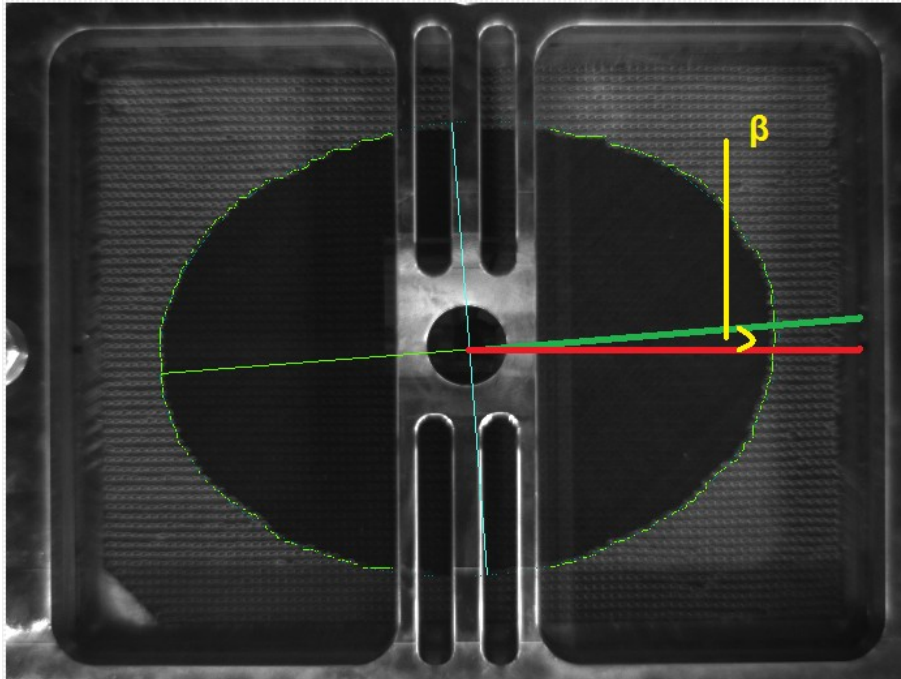


Abbildung 18: Fließellipse im optischen Permeameter für V043

Über die Vermessung in einem Grafikprogramm ergibt sich ein Orientierungswinkel von ca.  $4,5^\circ$ , während die korrespondierende Serie laut vorhergehender Abbildung 17 einen mittleren Winkel von  $9,6^\circ$  laut optischer Messung besaß. Dieser Unterschied ergibt sich aus der Änderung des gemessenen Orientierungswinkels mit verstrichener Messzeit, wobei dieser oft zu Beginn wesentlich höher liegt als am Ende der Messung. Wie beim Verlauf der Hauptachsenlängen über der Zeit, kommt es hier womöglich zu einer unterschiedlichen Messung durch Anfangseffekte in der ersten Phase nach dem Austreten des Messfluids aus der Injektionsöffnung. Der mittlere Orientierungswinkel stellt einen Mittelwert dar. Abbildung 19 zeigt den Verlauf des Orientierungswinkels für den Versuch 043.

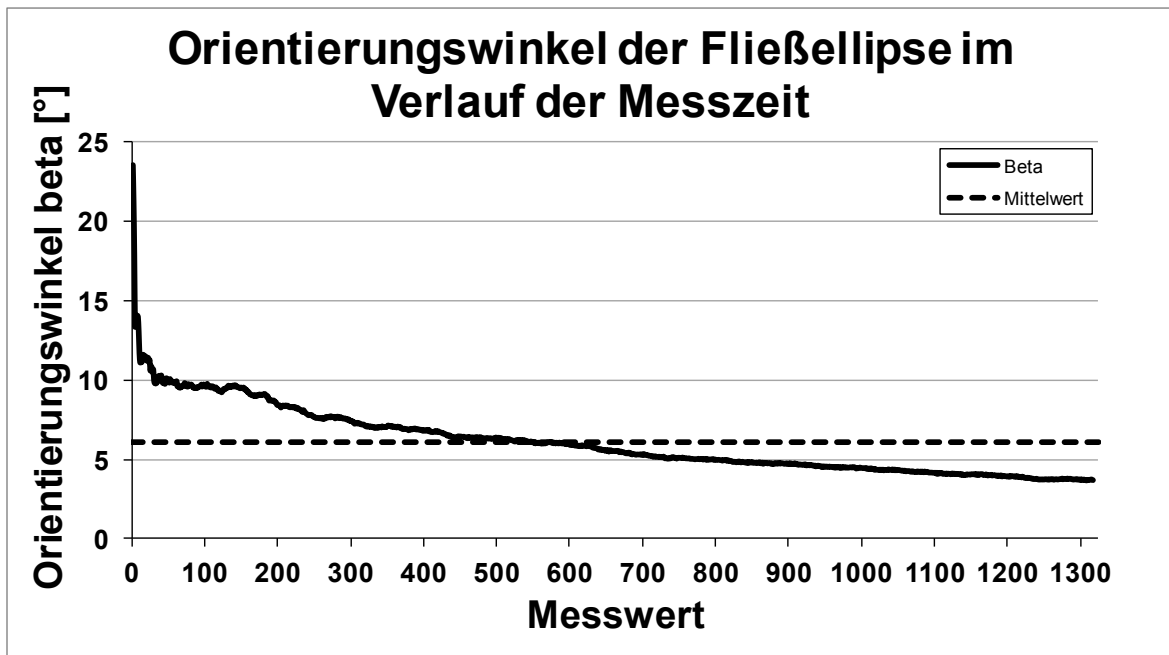


Abbildung 19: Orientierungswinkel über Messzeit für V043

#### 4.1.3 BNCF 24KIMS -45/0/+45

Abbildung 20 zeigt die Permeabilität in Abhängigkeit des Faservolumengehaltes für das triaxiale Non-Crimp Fabric BNCF 24KIMS -45/0/+45, in diesem Falle nur für das kapazitive Messverfahren, da der Vergleich bei diesem Material bei konstantem Faservolumengehalt und variiertem Druck durchgeführt wurde um den Druckeinfluss zu untersuchen.

Abbildung 21 zeigt die Anisotropie für die durchgeführte Messserie, welche hier in etwa bei 0,35 lag.



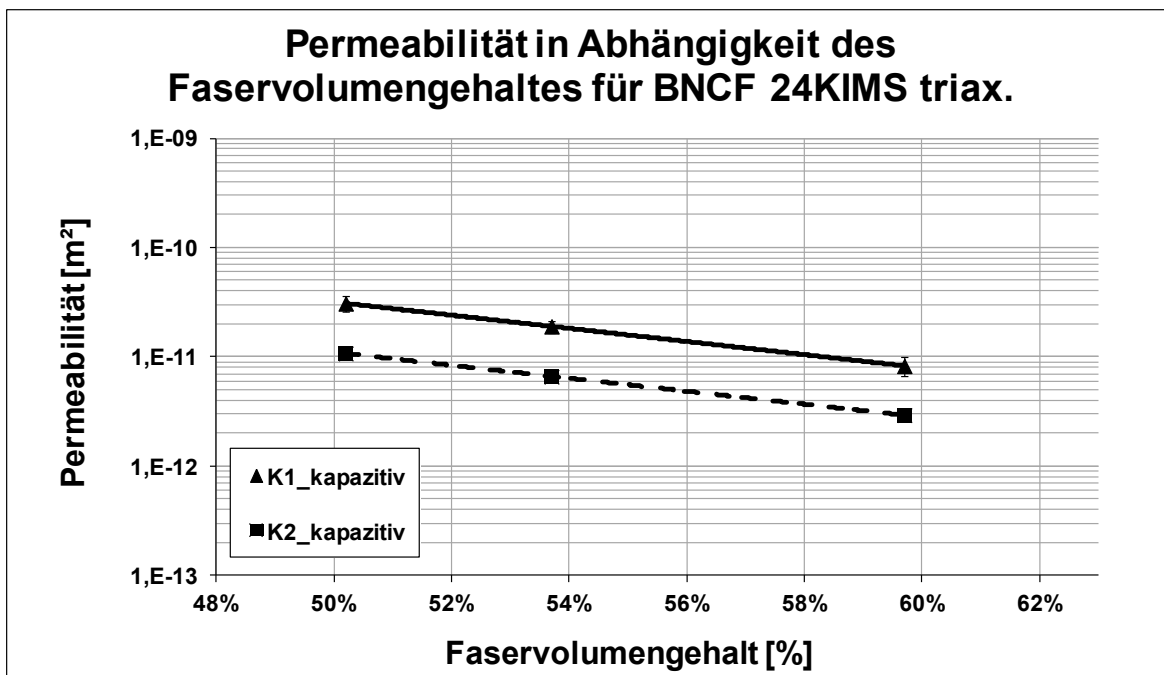


Abbildung 20: Permeabilität über Faservolumengehalt für BNCF 24KIMS triax.

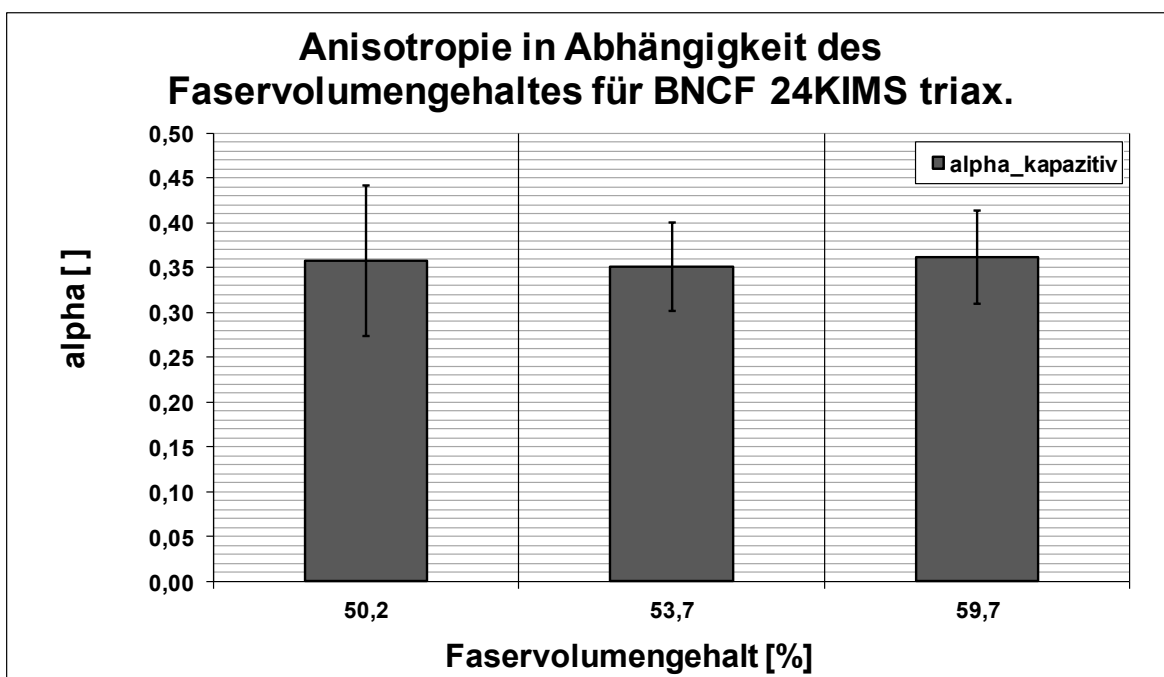


Abbildung 21: Anisotropie für BNCF 24KIMS triax.

Abbildung 22 zeigt den kapazitiv bestimmten Orientierungswinkel der Fließellipse: er beträgt in etwa 34°. Diese Verdrehung der Haupt- und Nebenachsenlage ist interessant, da es sich bei diesem Gelege wie auch beim biaxialen HexForce

NBB00 um ausgeglichene Winkelverbunde handelt und man aus Gründen der Faserlage nicht auf diesen Fließverlauf schließen würde. Bei der komplexen Ausbildung des makroskopischen Fließverhaltens in Abhängigkeit der einzelnen Schichten und ihren Eigenschaften, hat höchstwahrscheinlich das Stitching einen Einfluss auf die Öffnung bevorzugter Fließkanäle in der Faserstruktur.

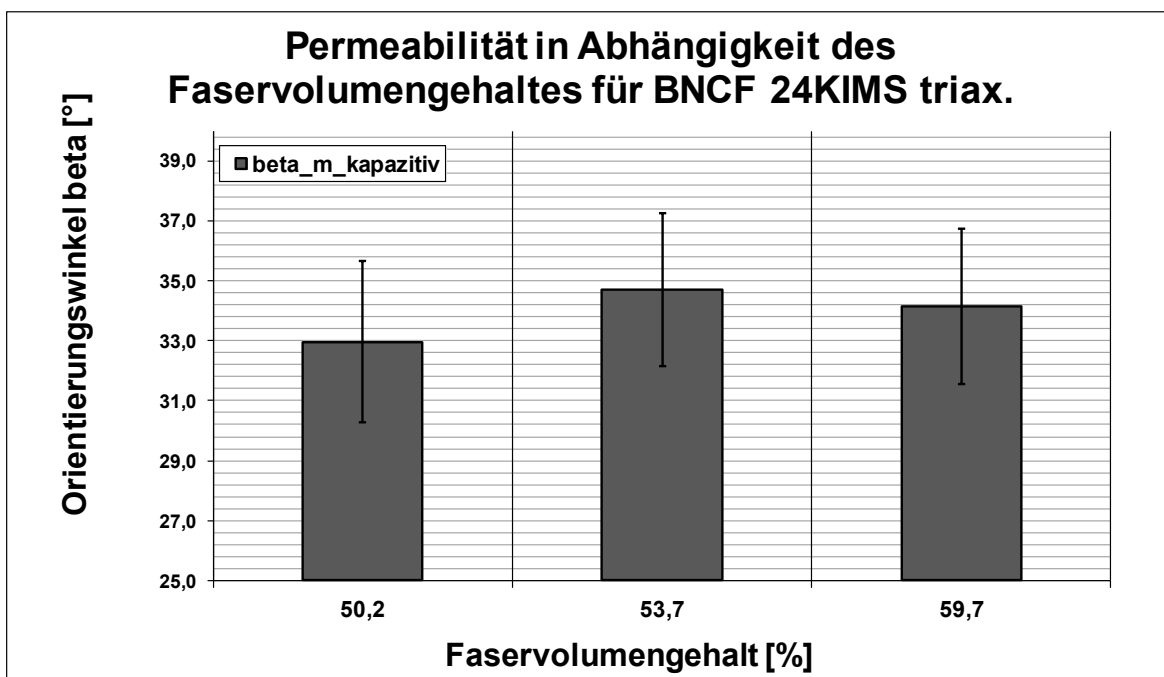
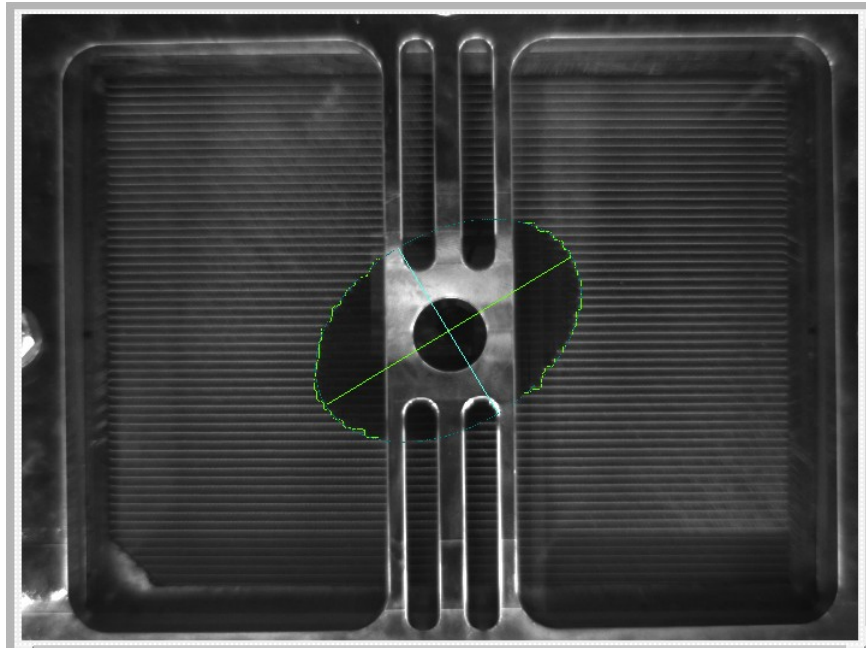


Abbildung 22: Orientierungswinkel für BNCF 24KIMS triax.

Abbildung 23 zeigt dieses NCF während der optischen Messung.



*Abbildung 23: triaxiales NCF während optischer Messung*

Die Ergebnisse weiterer Untersuchungen mit diesem Material zum Druckeinfluss werden unter Punkt 4.1.6 behandelt.

#### **4.1.4 BNCF 24KIMS unidirektional**

Abbildung 24 zeigt die Ergebnisse der kapazitiven Permeabilitätsmessungen für das unidirektionale Gelege BNCF 24KIMS unidirektional.

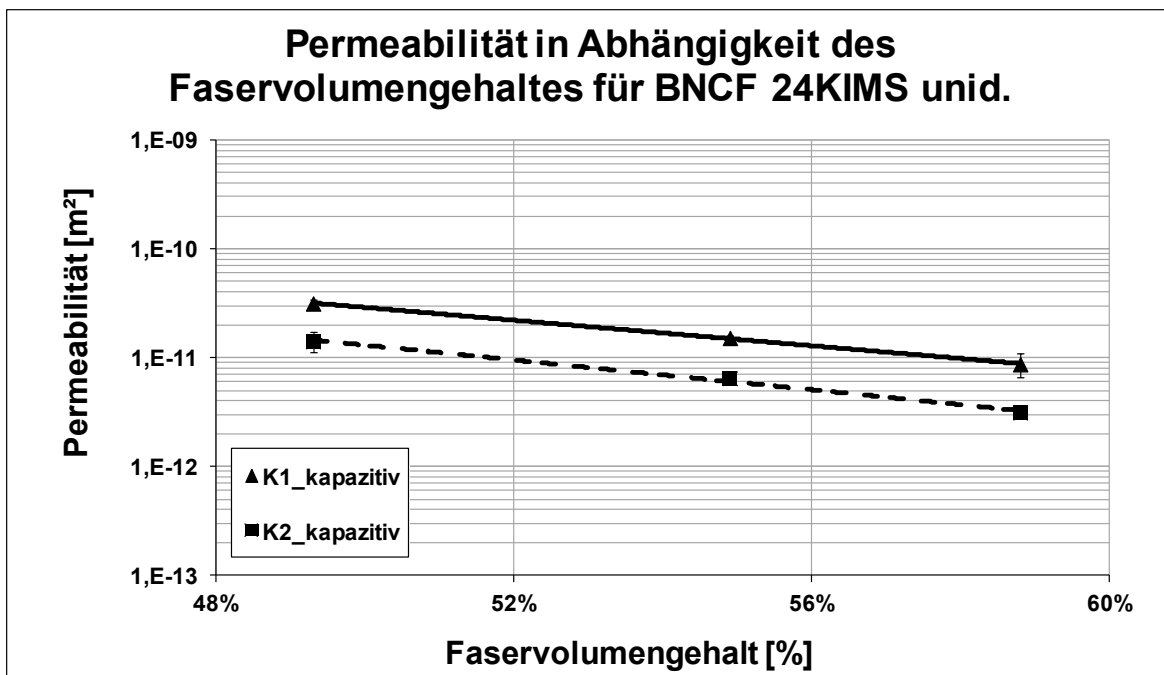


Abbildung 24: Permeabilität über Faservolumengehalt für BNCF 24KIMS unid.

Abbildung 25 zeigt die Anisotropie bezogen auf das Fließverhalten des Materials, welche in etwa bei 0,43 liegt.

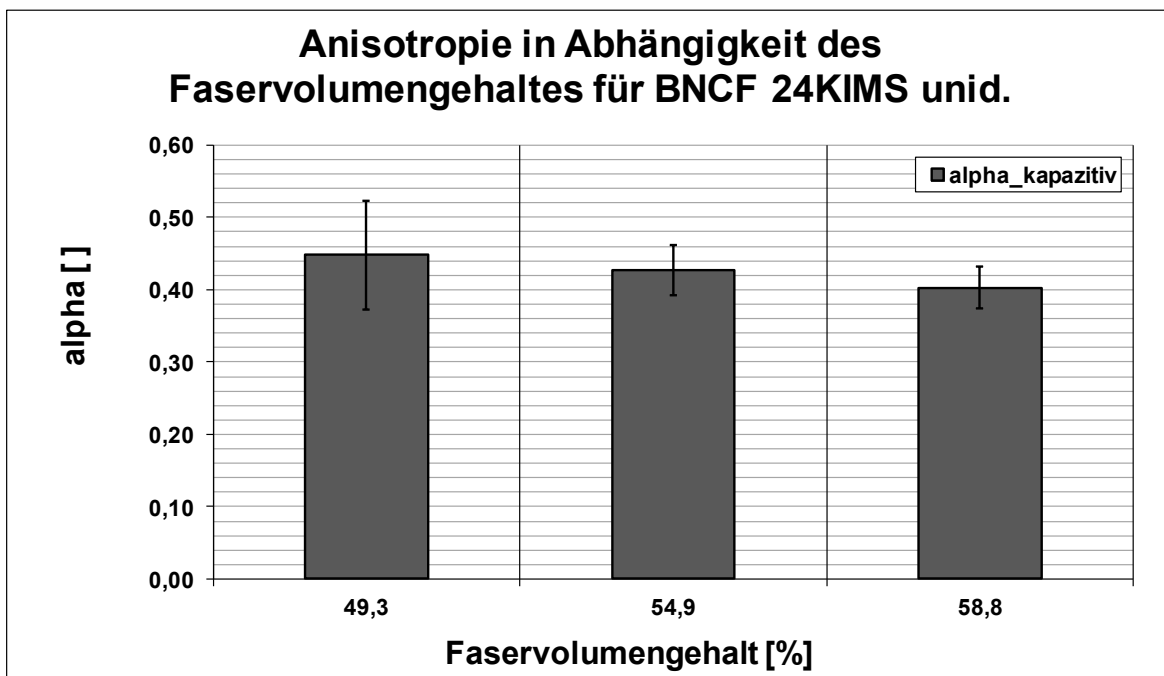


Abbildung 25: Anisotropie für BNCF 24KIMS unid.

Abbildung 26 zeigt den Orientierungswinkel der Fließellipse welcher im Bereich 0-2° liegt. Auch hier zeigen sich relativ hohe Standardabweichungen bei Bestimmung niedriger Winkel für das kapazitive Messverfahren. Der Eindruck während der Messungen legte keine bzw. eine sehr geringe Orientierung aus der Ebene des Faserverlaufes nahe. Der erhaltene Winkel könnte somit tatsächlich auftreten oder nur ein Effekt des Messverfahrens sein. Eine leichte Ausrichtung aus der Ebene des Faserverlaufes durch die Fließellipse könnte auch hier durch das Stitching verursacht werden.

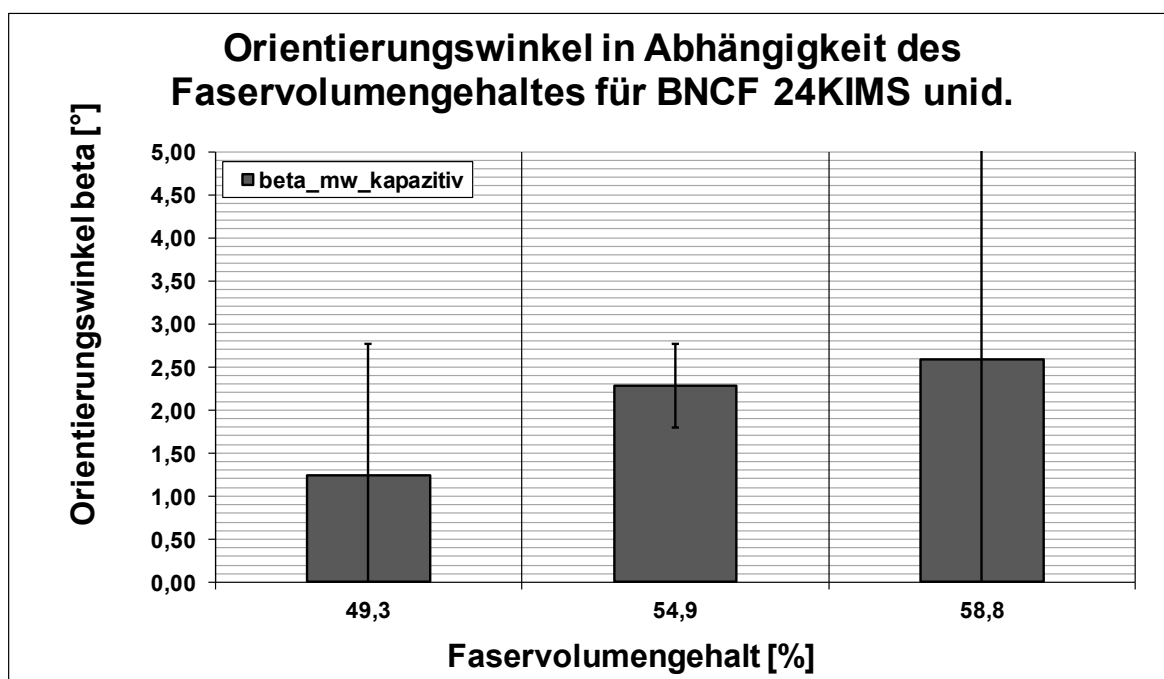


Abbildung 26: Orientierungswinkel für BNCF 24KIMS undid.

#### 4.1.5 Streuung der Messwerte

Tabelle 19 fasst die Standardabweichungen der Permeabilitätsmessungen zusammen.

Tabelle 19: Standardabweichungen der Permeabilitätsmessungen

		Material				
Messwert	Messverfahren	Hexcel 1102	HexForce NBB00	BNCF 24KIMS triax.	BNCF 24KIMS unid.	MW Verfahren
$K_1$	optisch	6,10%	9,34%	5,66%		<b>7,03%</b>
	kapazitiv	10,62%	11,86%	14,46%	13,00%	<b>12,49%</b>
$K_2$	optisch	10,29%	10,35%	7,72%		<b>9,45%</b>
	kapazitiv	10,89%	11,69%	7,34%	10,30%	<b>10,06%</b>
$\alpha$	optisch	1,02%	2,78%	5,44%		<b>3,08%</b>
	kapazitiv	10,92%	7,76%	16,25%	10,71%	<b>11,41%</b>
$\beta$	optisch	34,43%	38,47%	5,32%		<b>26,07%</b>
	kapazitiv	163,50%	323,65%	6,47%	82,12%	<b>143,94%</b>

Die Werte sind dabei geordnet nach Messgröße, Material und Messverfahren dargestellt, rechts findet sich der jeweilige Mittelwert über alle Materialien.

Im Allgemeinen lässt sich sagen, dass die Streuung der Messergebnisse im unteren Bereich der in der Literatur erwähnten Schwankungen bzw. darunter liegt. Das optische Messverfahren zeigt dabei durchgehend eine geringere mittlere Standardabweichung, was durch die bereits erwähnte und im Folgenden betrachtete, unterschiedliche Messwerterfassung auch nachvollziehbar ist. Hier zeigt sich auch, die bereits erwähnte, schwierige Erfassung geringer Orientierungswinkel der Fließellipse durch das kapazitive Verfahren (alle Materialien außer BNCF 24IMS triax.), da die Standardabweichungen hier durchwegs sehr hoch sind.

Interessant ist die, auch im Vergleich mit den NCFs, häufig niedrigere Streuung der Ergebnisse beim einzigen Gewebe Hexcel 1102. Das schwierige Handling dieses Materials durch einfache Verzugsneigung, hätte im Vorfeld eine größere Standardabweichung als bei den kompakteren, besser handhabbaren Gelegen erwarten lassen.

#### 4.1.6 Druckeinfluss und Unterschiede der Messsysteme

Um den Unterschied in den Ergebnissen und den Messsystemen zu untersuchen wurde zunächst die Auswertung des optischen Permeameters auf mögliche Gründe für Abweichungen untersucht. Hierzu wurden zuerst die aufgenommenen

Hauptachsenlängen für mehrere Versuche mit gleichen Bedingungen verglichen, um zu sehen, ob hier bereits ein Fehler bei der Messung geschah. Die Verläufe wurden in Abhängigkeit der Zeit in einem Diagramm übereinander gelegt und die Abweichungen wurden verglichen. Hierbei zeigte sich für alle Versuche eine Übereinstimmung der Hauptachsenlängen innerhalb der typischen Streuungen, welche sich auch in den Ergebnissen zeigen. Abbildung 27 zeigt eines dieser Diagramme für das Material HexForce NBB00 für die Versuche bei mittleren Faservolumengehalten und Drücken.

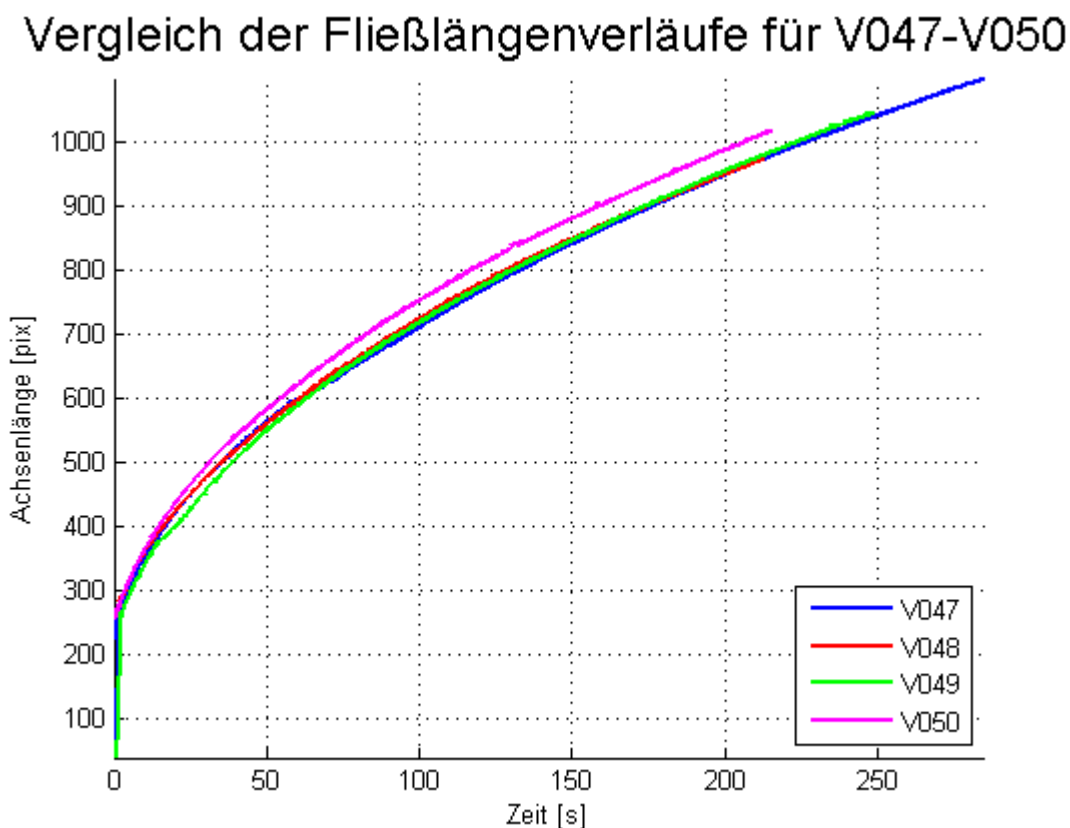


Abbildung 27: Fließweglänge über Zeit für HexForce NBB bei opt. Messung

In weiterer Folge wurde nun die Auswertung selbst überprüft. Das vorliegende Programm verwendet für die Berechnung der Permeabilität die gesamte Kurve der Fließlänge über der Zeit und entfernt die nicht-linearen Bereiche der Kurve am Anfang des Versuches nicht vor der Berechnung. Ein Verdacht war nun, dass durch einen Unterschied des Auswertebereiches und den Einfluss der nicht-linearen Zone die Ergebnisse große Abweichungen erfahren. Um dies zu überprüfen wurde nun die Berechnung der Permeabilität für denselben Datensatz,

aber unterschiedliche Bereiche durchgeführt. Abbildung 28 zeigt die Kurven für Haupt- und Nebenachse des Versuches 075 und die Grenze für den reduzierten Auswertebereich. Hier wurde darauf geachtet möglichst nur den näherungsweise linearen Teil für die Auswertung zu verwenden.

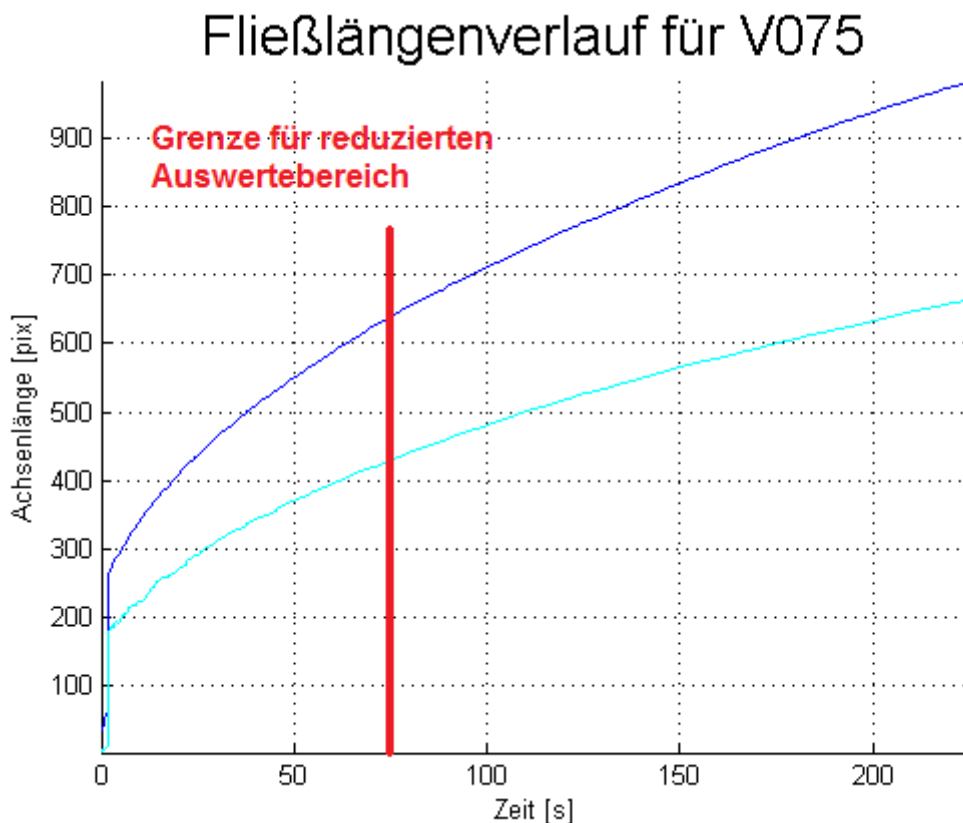


Abbildung 28: reduzierter Auswertebereich für opt. Messung

Tabelle 20 zeigt darüber hinaus die Ergebnisse des Vergleiches der Auswertebereiche.

*Tabelle 20: Ergebnisse der Auswertung für V075, reduzierte und gesamter Auswertebereich*

V075	vollständig	reduziert	Differenz [%]
<b>K1 [m<sup>2</sup>]</b>	1,26E-10	1,25E-10	1,0%
<b>K2 [m<sup>2</sup>]</b>	5,77E-11	5,67E-11	1,6%
<b>alpha [°]</b>	0,458	0,455	0,6%
<b>Steigungsdifferenz</b>	5,16E-05	1,14E-13	100,0%



Die Ergebnisse zeigen, dass der Einfluss des Auswertebereiches auf die Ergebnisse sehr gering ist. In weiterer Folge wurde nun also auf den Einfluss des Druckes auf die optischen Permeabilitätsmessungen eingegangen.

Abbildung 29 zeigt die Permeabilität in Abhängigkeit des Druckes für einen annähernd konstanten Faservolumengehalt von 53,3% (optisch) bzw. 53,7% (kapazitiv). Auch hier zeigt sich ein Unterschied der Messergebnisse in der Größenordnung von einer Zehnerpotenz. Im Falle des kapazitiven Permeameters ist dabei kein Zusammenhang zwischen Permeabilität und Druck zu erkennen, während sich beim optischen Verfahren eine Korrelation zeigt und die Permeabilität mit steigendem Druck leicht steigt.

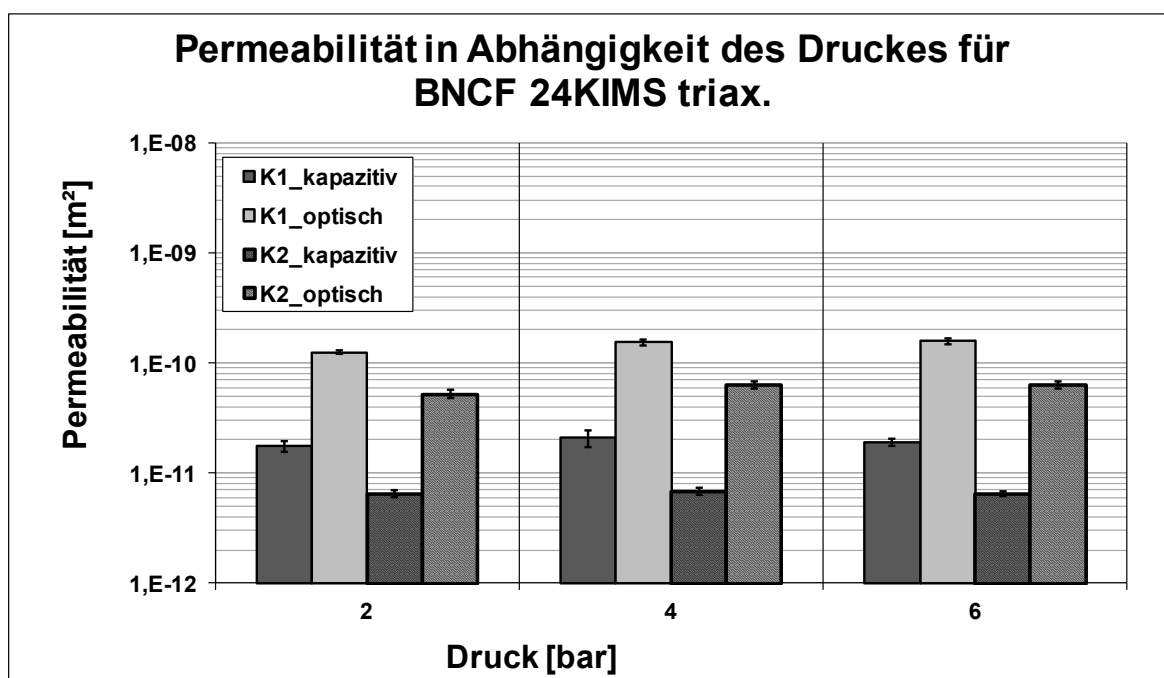


Abbildung 29: Permeabilität über Druck für kapazitive und optische Messung

In den nachfolgenden zwei Abbildungen werden die Anisotropie sowie der Orientierungswinkel der Fließellipse in Abhängigkeit des Druckes für beide Messsysteme gezeigt. Alpha ist dabei, genauso wie im Zuge der mit den anderen beiden Materialien durchgeführten Vergleiche, kapazitiv bestimmt ein wenig niedriger. In Zahlen ausgedrückt liegen die Mittelwerte bei 0,36 (kapazitiv) sowie 0,41 (optisch).

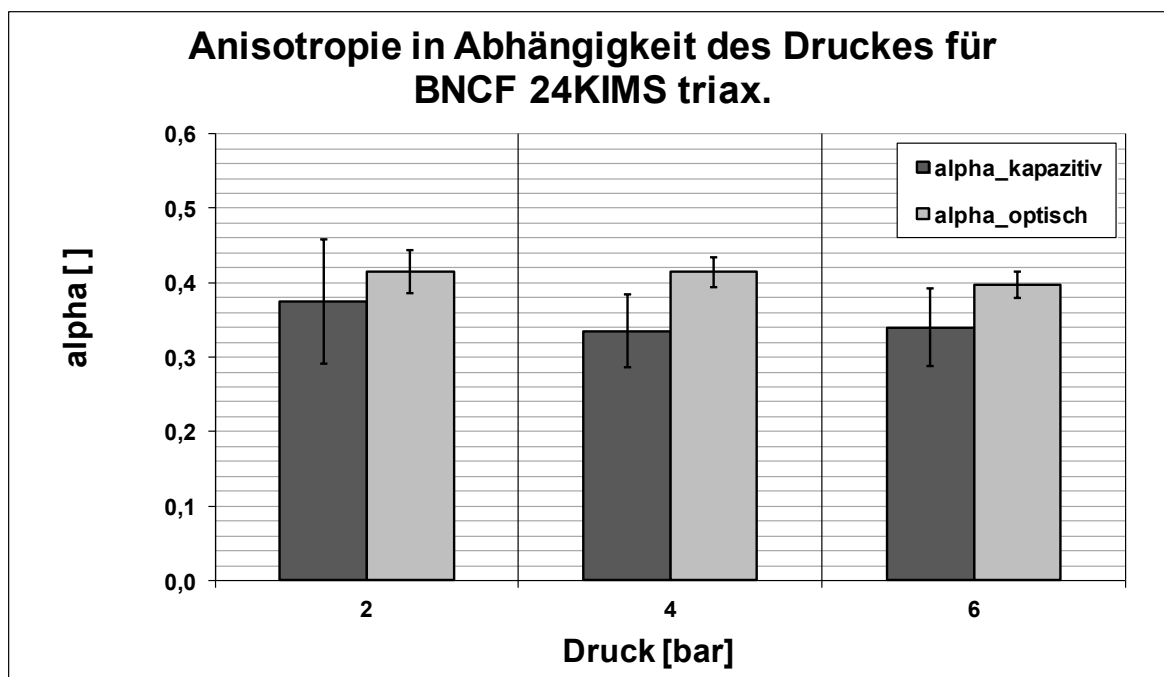


Abbildung 30: Anisotropie über Druck für kapazitive und optische Messung

Beim Orientierungswinkel ergibt sich im Mittel ein Unterschied von fünf Grad – kapazitiv ergeben sich in etwa 35, optisch ca. 30°. In Bezug auf Anisotropie und Orientierungswinkel sind allerdings keine Einflüsse des Druckes zu erkennen.

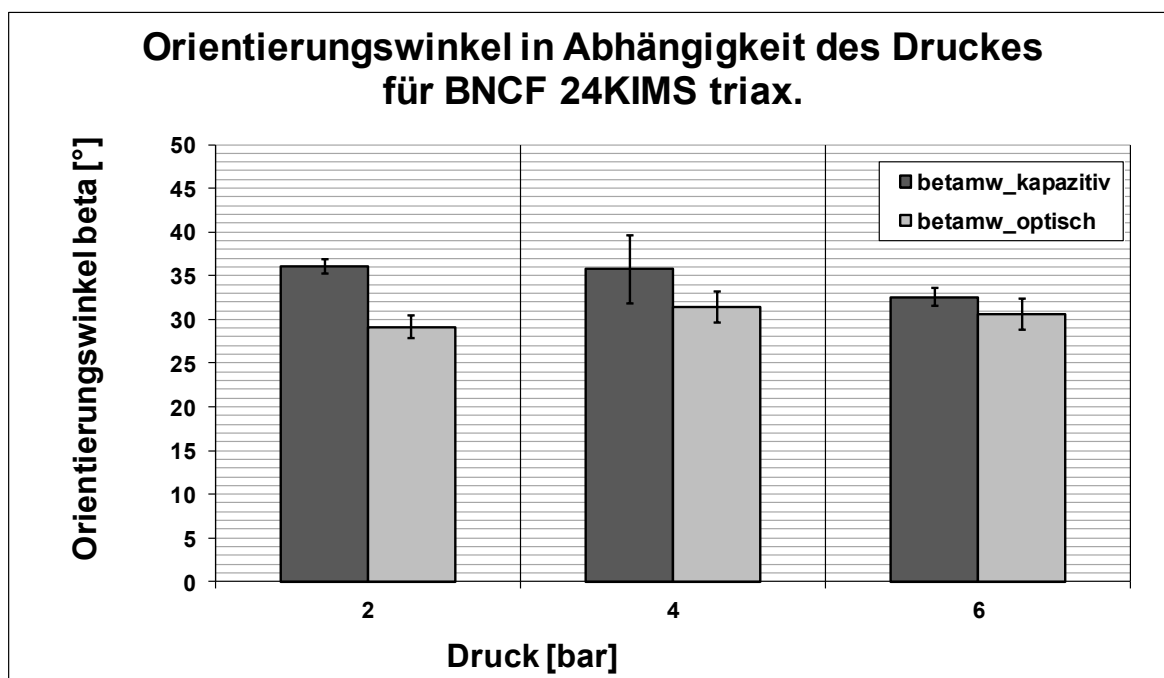


Abbildung 31: Orientierungswinkel über Druck für kapazitive und optische Messung

Nachdem die Korrelation zwischen Druck und Permeabilität darauf hinweist, dass die Unterschiede in den Messergebnissen zwischen kapazitivem und optischen Permeameter durch die höhere Durchbiegung der oberen Werkzeughälfte bei letzterem Messgerät verursacht werden, wurden im Folgenden einige Berechnung angestellt. Aus einer finiten Elemente Berechnung des Injektionsprozesses beim optischen Permeameter ist eine maximale Durchbiegung der oberen Werkzeughälfte bei 6 bar Injektions- und 10 bar Komprimierungsdrucks von 90  $\mu\text{m}$  bekannt. Für eine Abschätzung des Einflusses der Kavitätshöhenänderung durch die Verformung der Werkzeugplatte wurde nun eine gleichmäßige Erhöhung der Kavitätenhöhe von 90  $\mu\text{m}$  angenommen und mit dieser neuen Höhe der dadurch verringerte Faservolumengehalt berechnet. Auf Basis der kapazitiven Messungen wurden nun die Permeabilitätswerte bei diesen neuen Faservolumengehalten mit Hilfe der Ausgleichsfunktionen für die Permeabilität in Abhängigkeit des Faservolumengehaltes berechnet. Diese Werte wurden nun zu jenen in Relation gesetzt, welche bei Faservolumengehalten ohne den Einbezug der Durchbiegung ermittelt wurden. Abbildung 32 zeigt nun diese Verhältnisse und vergleicht diese mit dem Quotient aus optisch bestimmter K1-Permeabilität zu kapazitiv bestimmter bei gleichem Faservolumengehalt.

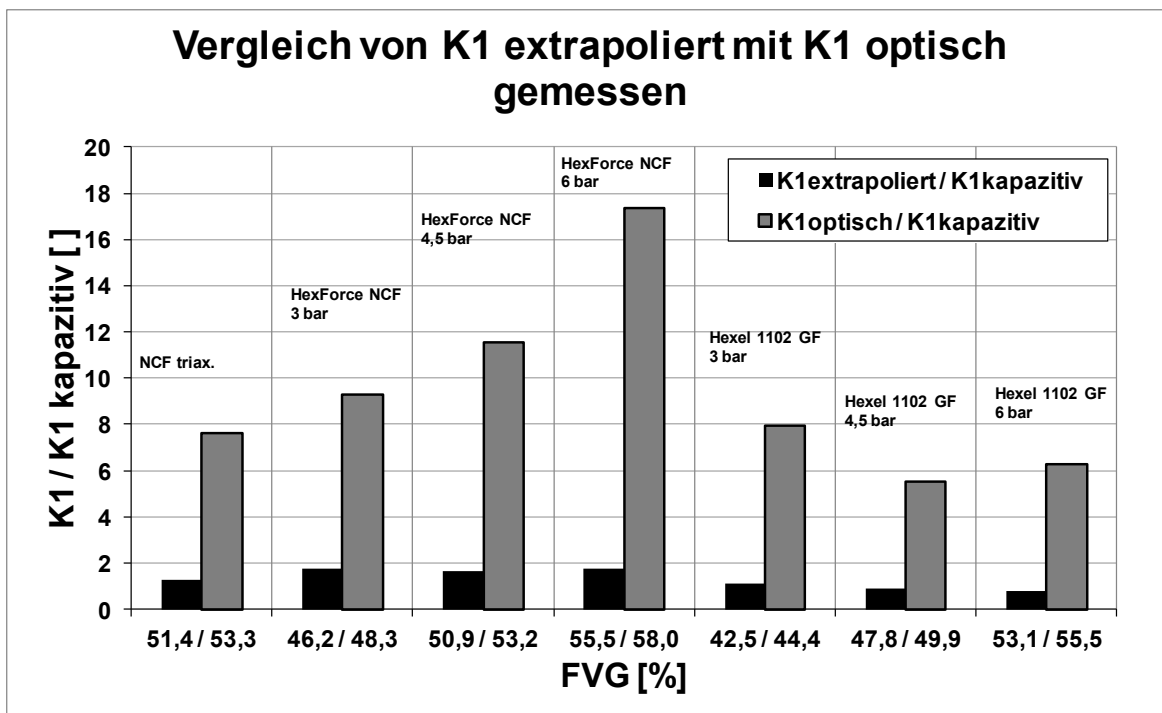


Abbildung 32:  $K_1$  zu  $K_1$  kapazitiv gemessen für Extrapolation und optische Messung

Hier zeigt sich, dass die Permeabilitätswerte durch sinken der Faservolumengehalte zwar um den Faktor 1,1 bis 1,75 steigen, jedoch nicht annähernd in die Größenordnung der optischen Messwerte gelangen, welche zwischen 5 und 17 mal größer sind. Bei zwei Werten des Glasfasergewebes Hexcel 1102 ergibt sich durch den schlechteren Fit der Ausgleichsfunktion sogar ein Sinken der Permeabilitätswerte bei den höheren Faservolumengehalten, was natürlich ein unlogisches Ergebnis darstellt. Natürlich sind die getroffenen Annahmen hinsichtlich der konstanten Aufweitung der Kavitätenhöhe nicht realistisch, da sich in der Realität wahrscheinlich ein halbkugelförmiges Durchbiegungsprofil mit maximaler Verformung in der Mitte über dem Injektionspunkt ergeben wird. Auch sind die wirkenden Mechanismen bei der Kompaktierung komplexer. Jedoch ging es hier lediglich um die Abschätzung der Größenordnung des Effektes der reinen lokalen Verringerung des Faservolumengehaltes durch die Verformung des Werkzeuges. In jedem Fall zeigt sich, dass die Unterschiede in den erhaltenen Messergebnissen über diesen Ansatz nicht erklärt werden können. Womöglich treten also andere Effekte auf wie

eine schlechtere Komprimierung und Beeinflussung der Textilarchitektur selbst, oder das Öffnen breiterer Fließspalte in denen das Fließverhalten mit Hilfe von Darcy's Gesetz nicht zufriedenstellend beschrieben wird.

Im Folgenden soll auf Unterschiede in der Messwerterfassung eingegangen werden. Wie in der Beschreibung der beiden Permeameter angeführt erhalten beide Messsysteme auf unterschiedliche Weise den zeitlichen Verlauf der Haupt- und Nebenachsenlänge während des Versuches. Während beim optischen Permeameter die Fließfront mit Hilfe eines Bildverarbeitungsprogrammes vollständig als Ellipse approximiert wird, berechnet die Software des kapazitiven Messgerätes für 16 unterschiedliche Kombinationen aus je 3 Sensoren jeweils analytisch eine Ellipse. Darüber hinaus bilden Kombination 17 und 18 jeweils die Mittelwerte zweier gegenüberliegender Sensortripel. Abbildung 33 zeigt die verwendeten Sensortripel für die beiden Varianten sowie die berechneten Ellipsen an einem Versuchszeitpunkt für das Material HexForce NBB00. Der relativ große Unterschied in der Lage der Ellipsen ist dabei interessant. Bei 16 Sensorkombinationen ergeben sich hier 16 verschiedene analytisch berechnete Ellipsen von denen in Kombination 17 und 18 jeweils 2 gemittelt werden. Für die Untersuchungen dieser Arbeit wurden, auch im Hinblick auf den Ergebnisvergleich mit dem IVW Kaiserslautern, Mittelwerte aus den Sensortripel-Kombinationen 17 und 18 gebildet. Trotzdem traten bei einzelnen Versuchen Probleme auf, wodurch diese beiden Kombinationen nicht herangezogen werden konnten und somit andere Verwendung fanden, namentlich die Kombination aus Sensortripel 5 mit 15 bzw. 6 mit 13.

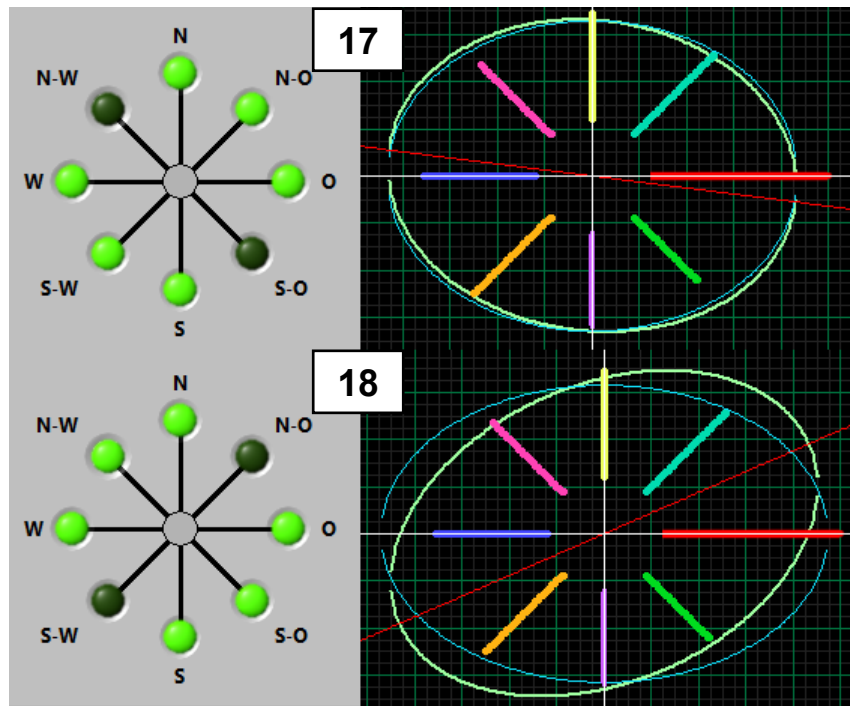


Abbildung 33: Verwendete Sensortriplets 17 und 18 mit interpolierter Ellipse

Durch Auftreten des beschriebenen Problems wurde untersucht, wie groß der Einfluss der gewählten Sensortripel-Kombination auf die Permeabilitätsergebnisse ist. Abbildung 34 zeigt die Darstellung der Permeabilität in Abhängigkeit des verwendeten Sensortripels für den Versuch 37 und das Material HexForce NBB00. Auf Position 17,5 der x-Achse befindet sich die Kombination aus Sensortripel 17 und 18, auf 19 jene aus 5 und 15 sowie auf 20 jene aus 6 und 13. Gestrichelt erkennt man den Mittelwert über die 16 unterschiedlichen Sensorkombinationen.

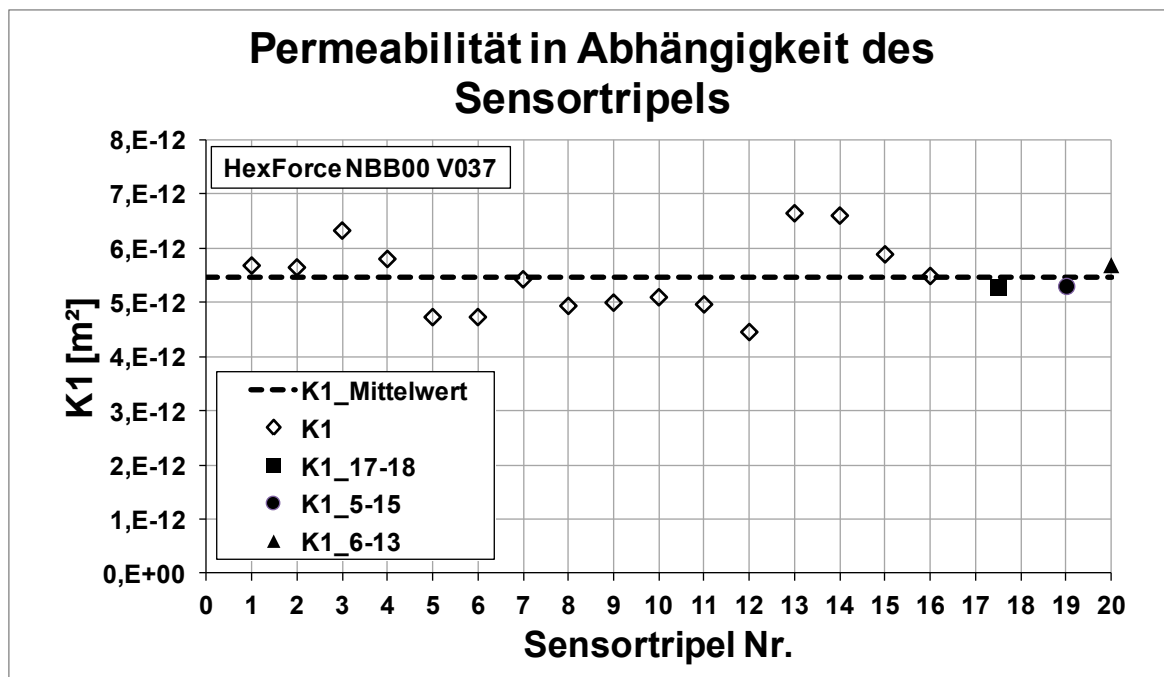


Abbildung 34: Permeabilität über verschiedenen Sensortripel und -Kombinationen

Das Diagramm zeigt, dass die drei gewählten Kombinationen relativ nahe am Mittelwert aller Sensorergebnisse liegen, es fallen allerdings relativ große Schwankungen der Messergebnisse untereinander, abhängig vom Sensortripel auf. Abbildung 35 zeigt die Standardabweichung für  $K_1$ ,  $K_2$  und  $\alpha$  für das erwähnte Material und zwei Versuche.

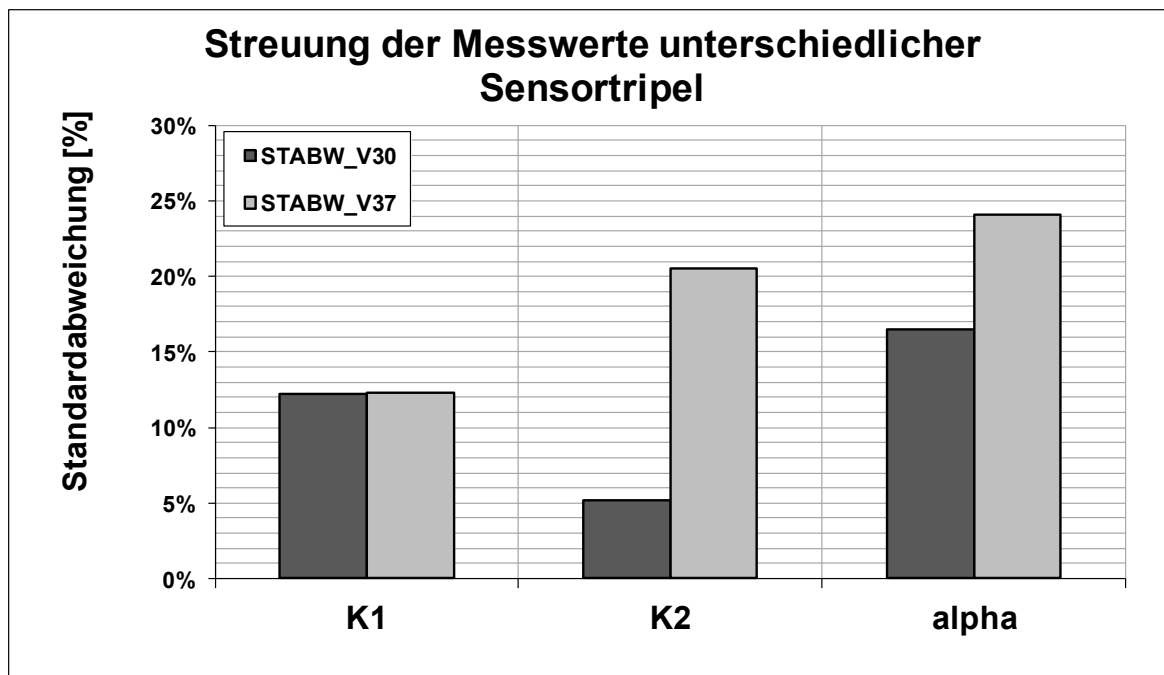


Abbildung 35: Standardabweichung der Messwerte verschiedener Sensortripel

Hier zeigen sich 5 bis 25% Abweichung der Sensoren untereinander für den gleichen Versuch, was grundsätzlich als hoch anzusehen und in Anbetracht der Datenerfassung (Berechnung von analytischen Ellipsen jeweils durch drei Fließfrontpunkte) auch nachvollziehbar scheint. In jedem Fall sind durch den beschriebenen Unterschied der Datenerfassung, welche für das optische Messgerät sicherlich als genauer einzustufen ist, auch Unterschiede in den erhaltenen Messergebnissen zu erwarten.

#### 4.1.7 Vergleich von Messergebnissen mit IVW Kaiserslautern

Im Zuge der Permeabilitätsmessungen der vier angeführten Materialien wurden Vergleiche der Messergebnisse der kapazitiven Messungen mit dem Institut für Verbundwerkstoff Kaiserslautern angestellt. Hierbei wurden die Werte für zwei Materialien (das Glasfasergewebe sowie das biaxiale NCF) unter Verwendung des baugleichen Messgerätes sowie der gleichen Software zur Datenerfassung und Auswertung durchgeführt.



Abbildung 36 und 37 zeigen die Ergebnisse für das Glasfasergewebe Hexcel 1102 an beiden Institutionen. Sowohl Permeabilitäts- als auch Anisotropie-Werte liefern für dieses Material sehr gute Übereinstimmung. Die Faservolumengehalte unterschieden sich aufgrund der leicht unterschiedlichen Kavitätenhöhen ein wenig.

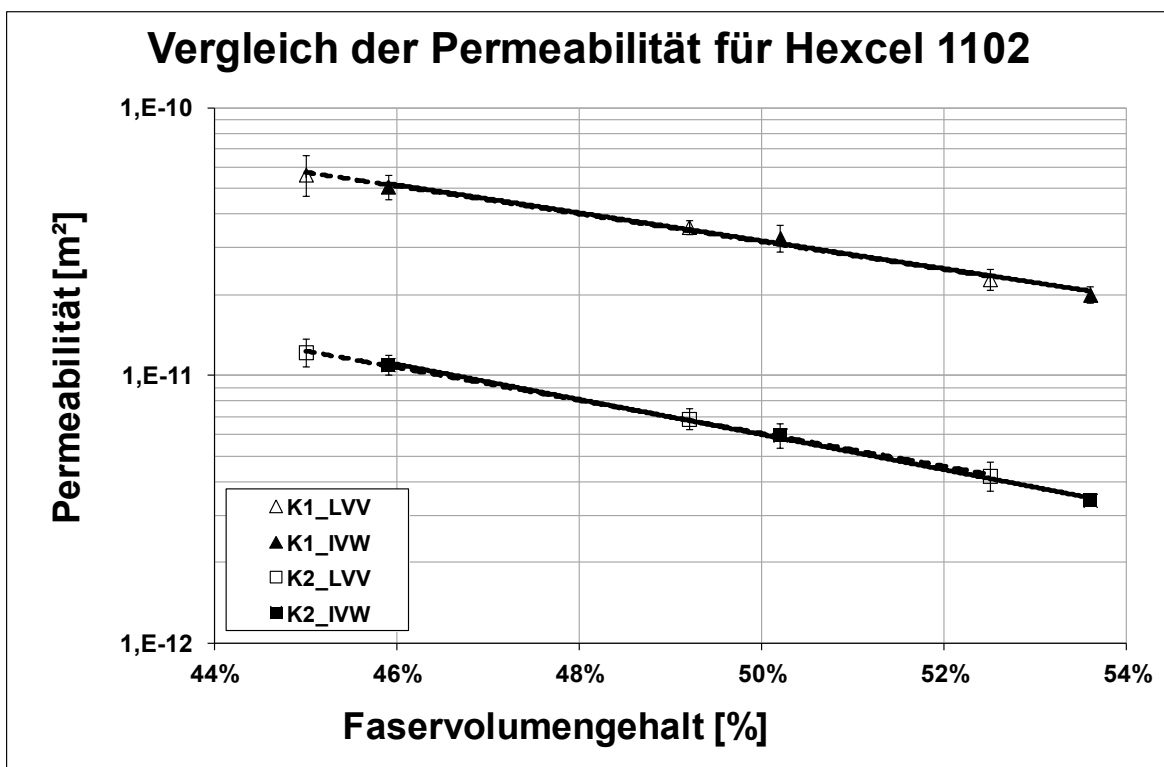


Abbildung 36: Vergleich der Permeabilitätswerte für Hexcel 1102

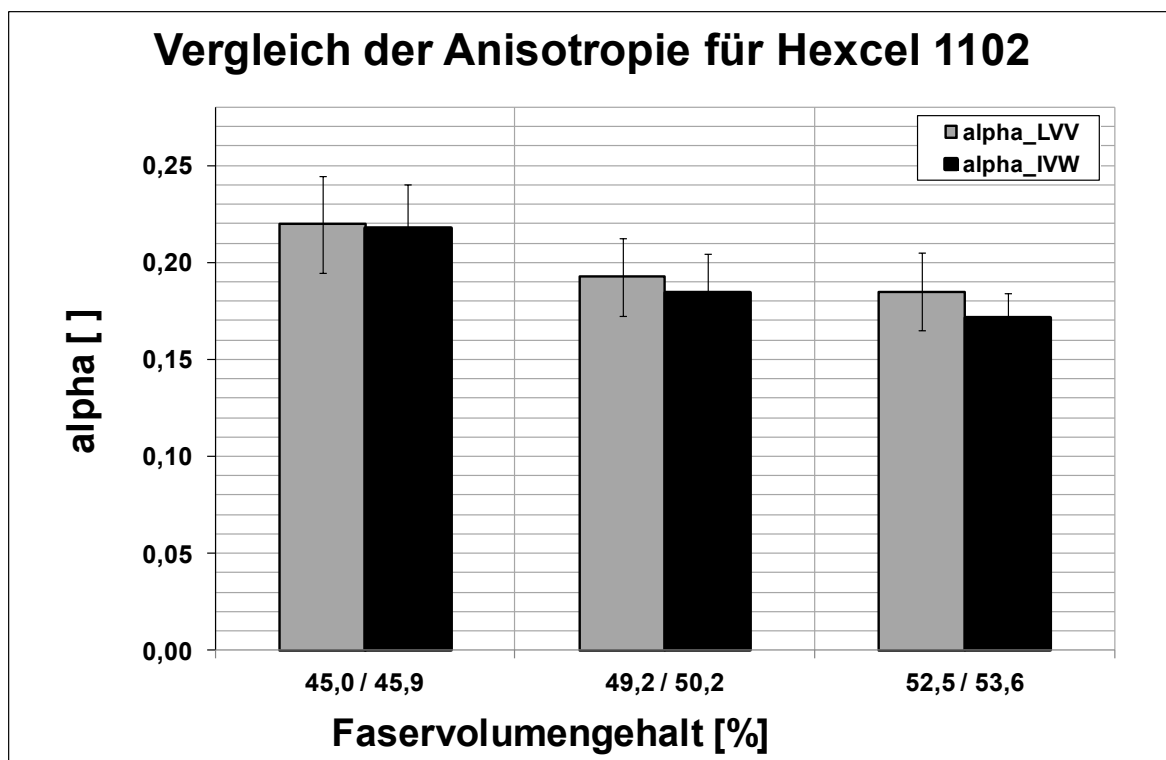


Abbildung 37: Vergleich der Anisotropie für Hexcel 1102

Abbildung 38 und 39 zeigen die gleichen Größen in Abhängigkeit des Faservolumengehaltes für das biaxiale Gelege HexForce NBB00. Hier zeigen sich bei den Anisotropie-Werten wieder relativ ähnliche Ergebnisse, während sich die Permeabilität vor allem bei höheren Faservolumengehalten doch deutlich unterscheidet. Auffallend ist, dass auch der Verlauf der Permeabilitätskurve bzw. die Steigung der Ausgleichsfunktion sehr unterschiedlich ist.

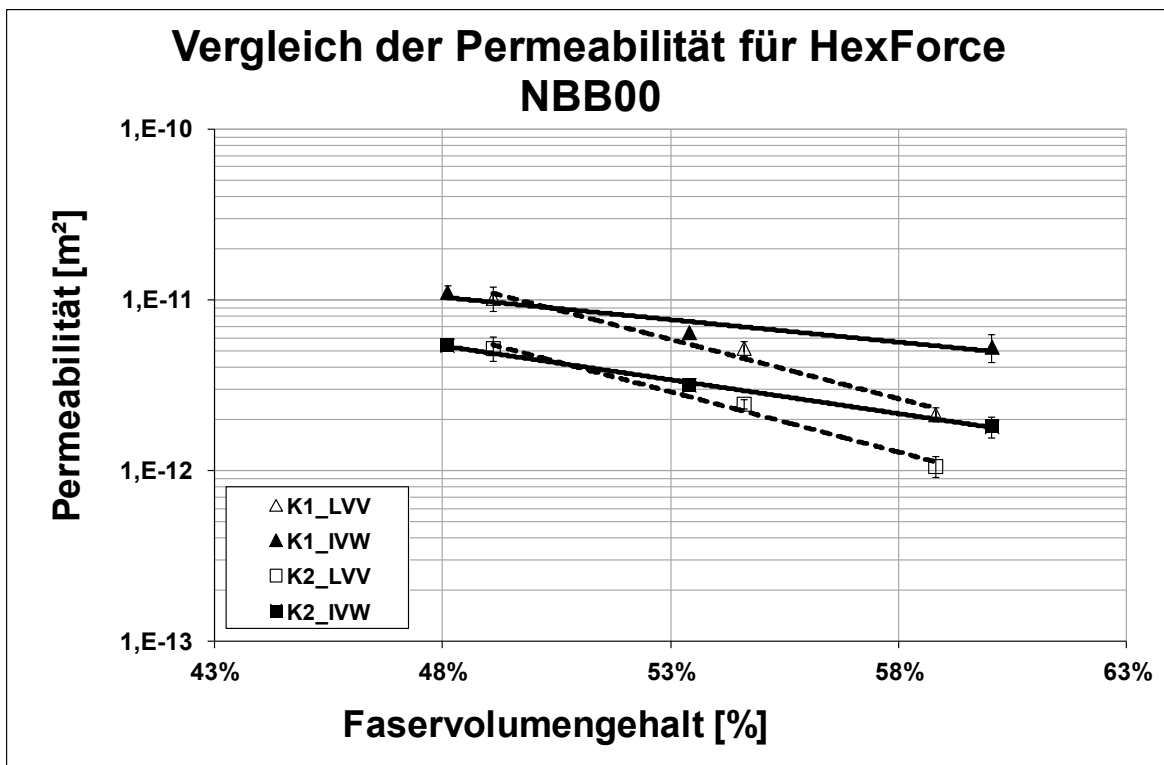


Abbildung 38: Vergleich der Permeabilität für HexForce NBB00

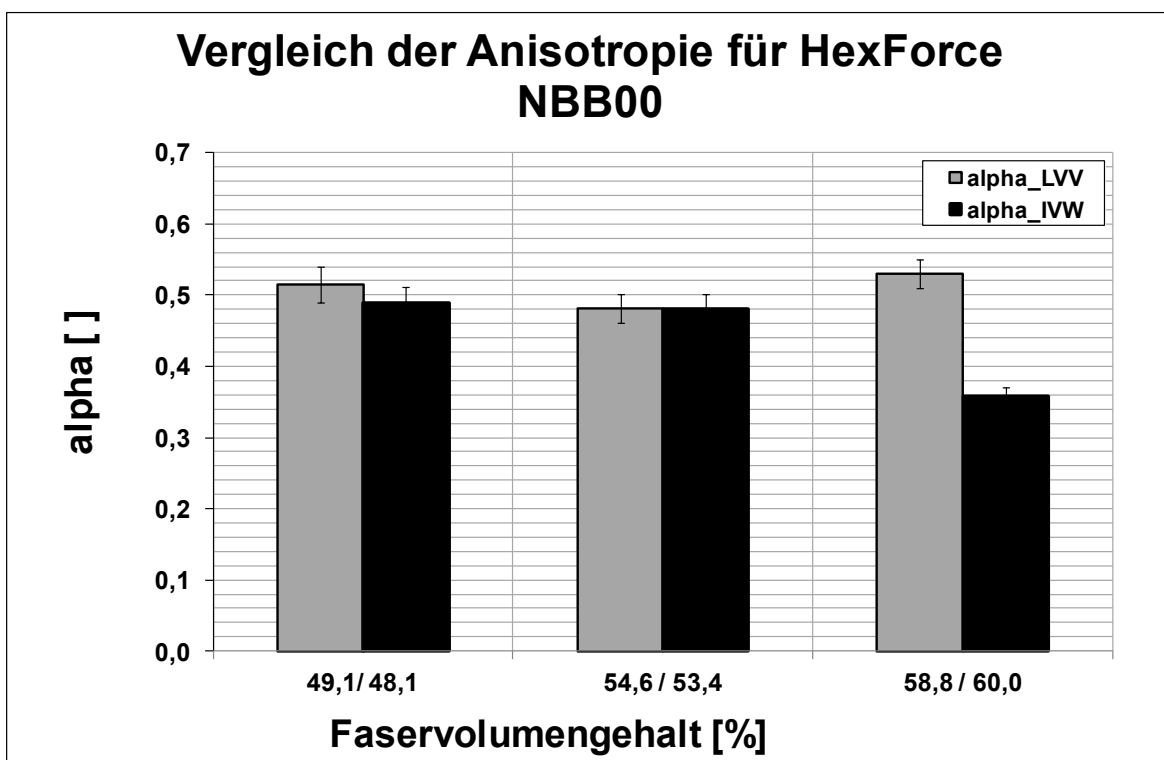


Abbildung 39: Vergleich der Anisotropie für HexForce NBB00

Ein Problem der kapazitiven Messung mit diesem Material war das korrekte Erkennen eines konstanten Plateaus im Verlauf der kapazitiven Äquivalente in Abhängigkeit der Messzeit. Das kapazitive Äquivalent steigt wenn das Messfluid die Kavität füllt und dabei die kapazitiven Sensoren beginnt zu überstreichen. Sind die Sensor zur Gänze überstrichen bildet der Verlauf des kapazitiven Äquivalents ein Plateau aus und der Versuch kann beendet werden. Für die Auswertung wird ein Datenintervall zwischen Starten des Versuchs und dem Punkt an dem sich das Plateau ausbildet gewählt. Die verwendete Software verfügt hierfür über eine Automatik um dieses Intervall zu bestimmen. Leider war bei HexForce NBB00 die Steigung des kapazitiven Äquivalents am Ende der Sensoren dermaßen gering, dass es der Software schwer fiel das Intervall richtig zu bestimmen. Dem wurden bei der Auswertung abgeholfen, indem das Intervall manuell bestimmt wurde (in der Software möglich). Die Wahl der Intervalle kann aber zwischen den Institutionen verschieden sein, somit könnte dies ein Grund für die großen Unterschiede in den Messergebnissen sein. Der Grund für den geringen Anstieg des kapazitiven Äquivalentes ist wahrscheinlich in der elektrischen Leitfähigkeit der Karbonfasern zu suchen.

Ein weiterer Grund für die Unterschiede könnten Probleme mit dem „Preset“ der Auswertesoftware und einem damit verbundenen hohen Rauschen der aufgezeichneten Messsignale sein.

## 4.2 RTM-Versuche und Simulation

### 4.2.1 RTM-Versuche

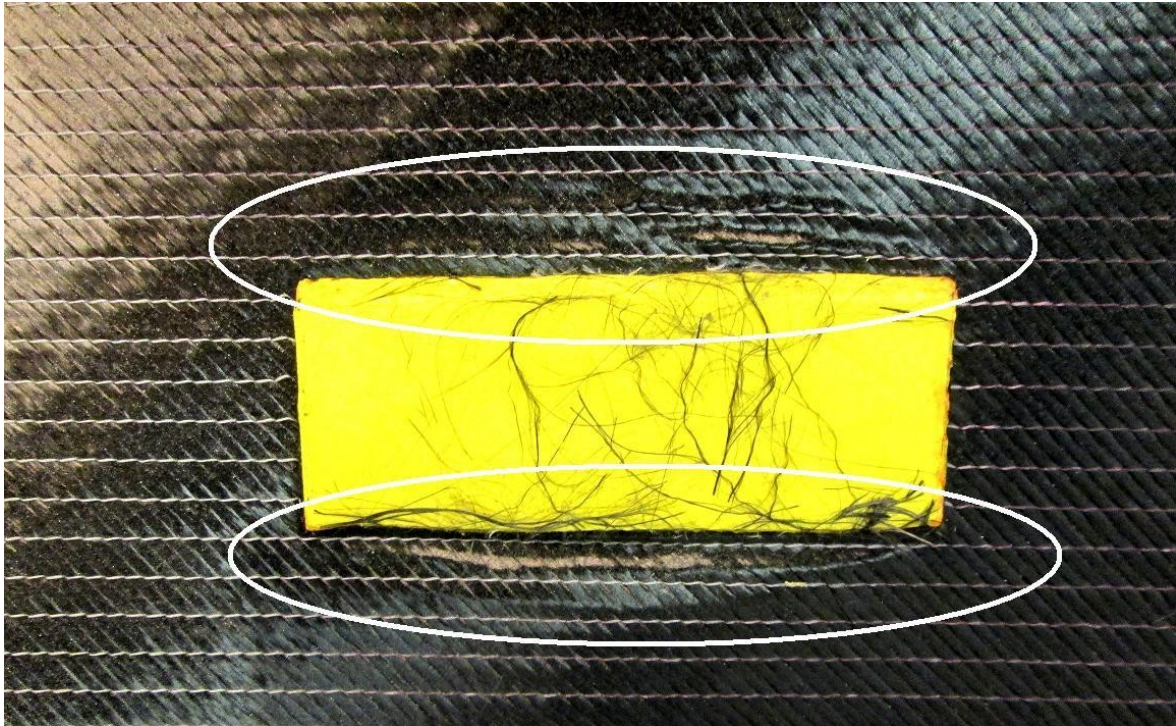
Von zwölf durchgeführten Versuchen wurden letztendlich drei für den Vergleich mit der Simulation herangezogen. Relevante und damit interessante Veränderungen des Fließvorganges konnten nur mit den eingelegten Barrieren, sowie einer zentralen Ellipse aus einem anderen Textil erzielt werden.

Als größte Probleme stellten sich das Handling der Einlegeteile und der Modelliermasse für die Barrieren heraus. Bei den Teilen aus anderen Textilien war das Problem diese dabei so abschließend wie möglich in das Preform zu integrieren um keinen signifikanten Spalt zwischen den beiden Zonen zu erzeugen und damit Race-tracking zu vermeiden. Nachdem für das Einpassen keine andere Möglichkeit bestand als dies mit der Hand zu tun, gelang dies leider nicht vollends zufriedenstellend. Betreffend der Modelliermasse war es schwierig die Barrieren in den entsprechenden Maßen zu fertigen, sodass einerseits keine Spalte zwischen Textil und Barriere blieben, auf der anderen Seite allerdings auch keine Schädigung der Faserarchitektur durch Pressung bei Übermaß entstand. Durch das viskoelastische Verhalten der Masse, stellte sich auch dies als relativ schwierig heraus. Abbildung 40 zeigt Verschiebungen und Schädigungen der Faserarchitektur aufgrund der Pressung durch das Barrierenmaterial beim Gelege BNCF 24KIMS unidirektional. Für die Vergleiche der Barrierenversuche wurde in weiterer Folge das Gelege BNCF 24KIMS triaxial verwendet, weil sich dieses als wesentlich stabiler in der Handhabung erwies.



*Abbildung 40: Schädigungen durch Barriere in UD-Preform*

Abbildung 41 zeigt die geringere Schädigung des triaxialen Geleges.



*Abbildung 41: Schädigungen durch Barriere in triaxialem Preform*

#### **4.2.2 Vergleich**

##### Versuch 1:

Der erste Versuch, der für den Vergleich mit der Simulation herangezogen wurde, wurde mit einem BNCF 24KIMS triaxial – Preform manipuliert durch zwei Barrieren durchgeführt. Die linke Barriere lag dabei mit ihrer längeren Seitenlänge parallel zur längeren Seitenlänge des Preforms, wobei die rechte Barriere mit ihrer längeren Seite normal auf diese stand. Wie bereits erwähnt konnte das triaxiale Gelege wesentlich besser gehandhabt werden und es traten weniger Schädigungen der Faserarchitektur auf. Abbildung 42, 43 und 44 zeigen den Vergleich mit fortlaufender Zeit. Grundsätzlich erkennt man eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Simulation und RTM-Versuch, wobei der Füllprozess zeitlich so verschoben ist, dass der Versuch der Simulation voreilt. Dies ist grundsätzlich in Übereinstimmung mit den Beobachtungen aus der Permeabilitätsmessung, wo die gemessene Permeabilität bei gleichen

Bedingungen im optischen Permeameter um etwa eine Zehnerpotenz höher war, denn für die Simulation wurden die Werte aus der kapazitiven Messung zu Grunde gelegt. Abweichungen ergeben sich dennoch teilweise in den Zonen direkt an der Grenze der Barriere, wo durch die Pressung der Faservolumengehalt lokal erhöht wird und daher ein verzögertes Fließen stattfindet. In Abbildung 43 und 44 sind diese Zonen gelb gekennzeichnet.

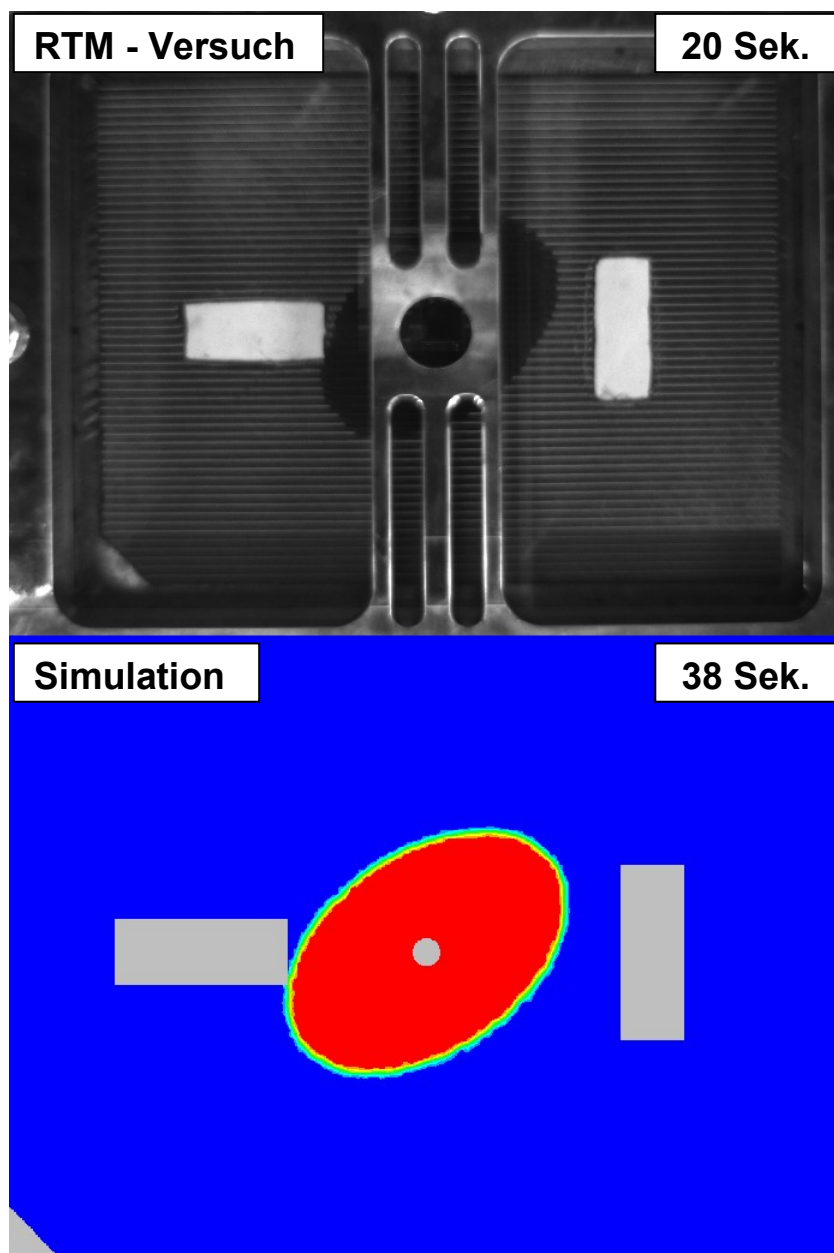


Abbildung 42: Simulations-Abgleich für triax. Preform mit zwei Barrieren 1

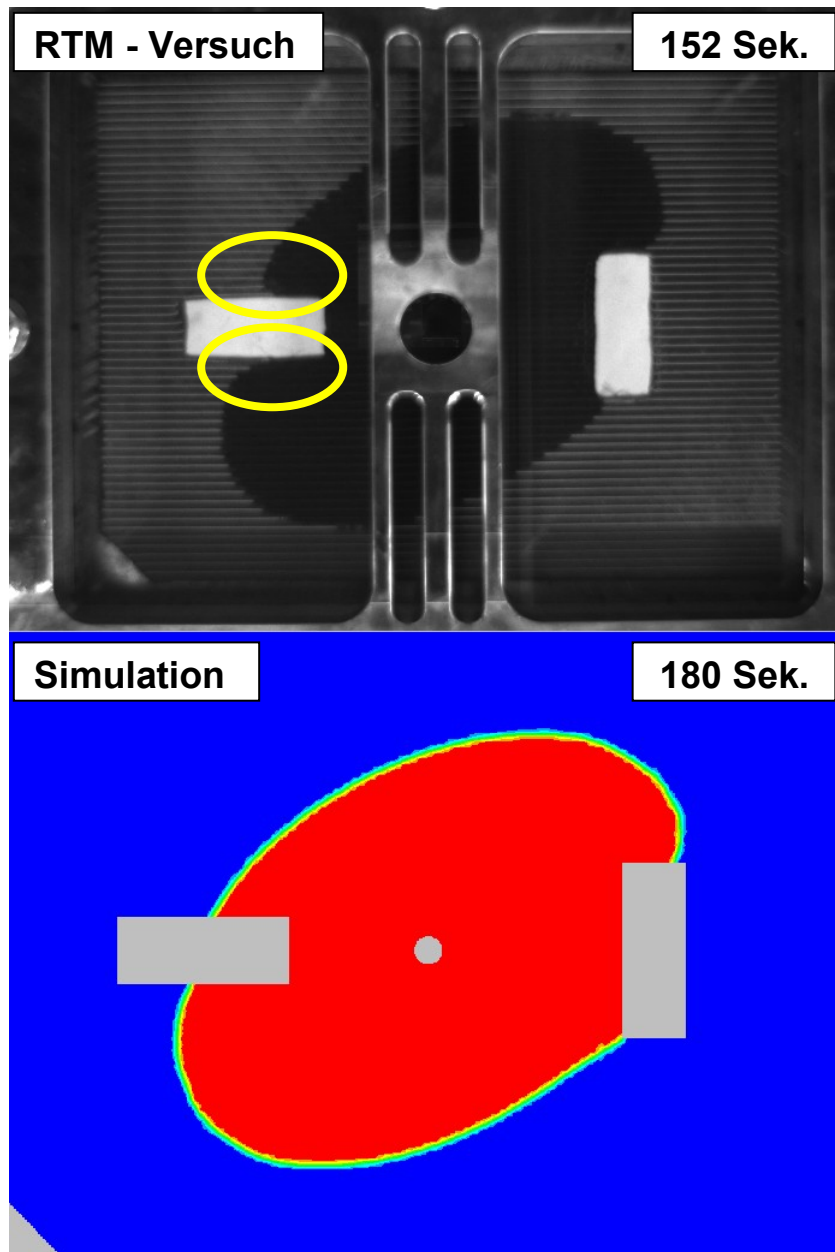


Abbildung 43: Simulations-Abgleich für triax. Preform mit zwei Barrieren 2



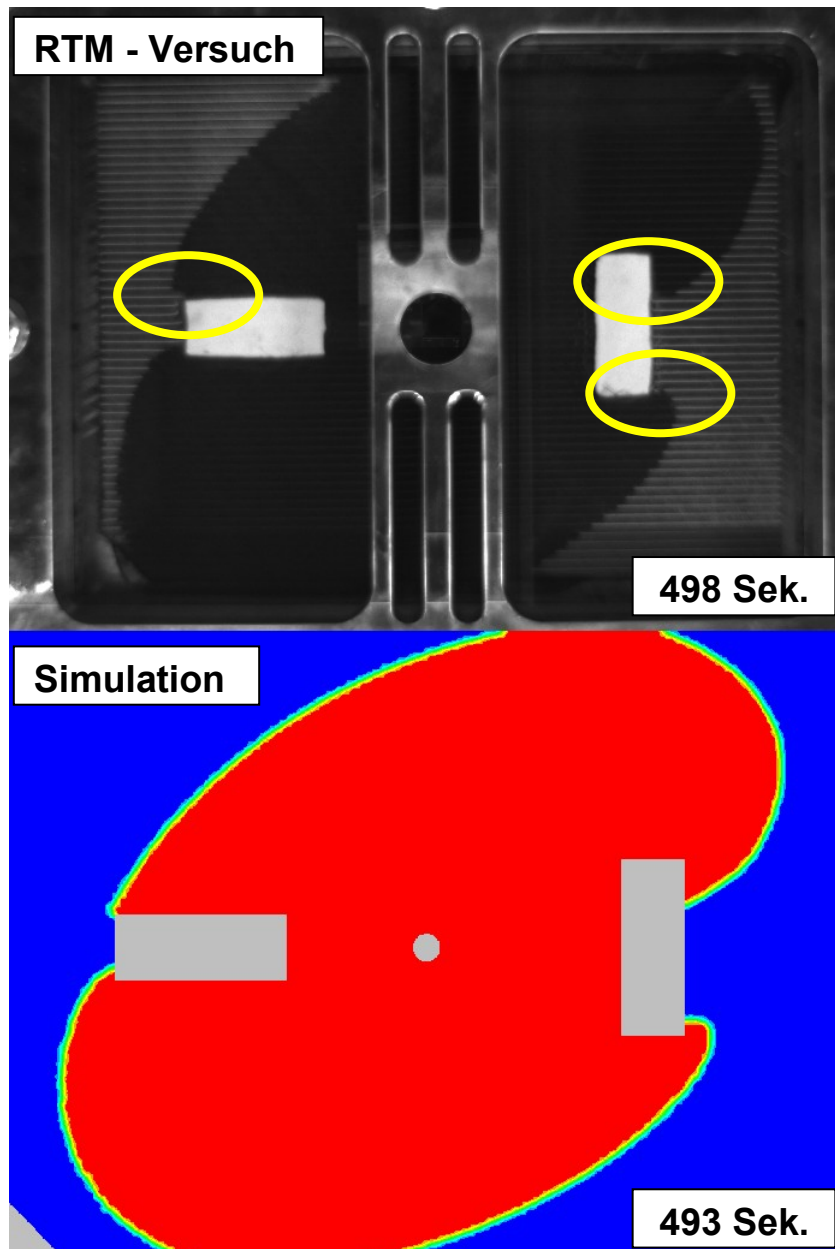


Abbildung 44: Simulations-Abgleich für triax. Preform mit zwei Barrieren 3

#### Versuch 2:

Versuch 2 wurde mit einem Preform aus BNCF 24KIMS unidirektional durchgeführt, worin im Zentrum um die Injektionsöffnung ein elliptisches Einlegeteil aus BNCF 24KIMS triaxial eingefügt wurde. Abbildung 45, 46 und 47 zeigen diesen Vergleich. Hier zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Versuch und Simulation bis zum Übertritt der Fließfront in den

Bereich des unidirektionalen Geleges (Abbildung 45). Hier tritt während des Versuches an der Grenzlinie Race-tracking auf, wodurch die Fließfront im Spalt zwischen den beiden Preformteilen voreilt (Abbildung 46). In der Simulation wurde ein Spalt zwischen den beiden Zonen definiert, dennoch kann dieser Prozess nicht zufriedenstellend nachgestellt werden – Simulation und RTM-Versuch zeigen in der Folge keine Übereinstimmung (Abbildung 47). Interessant ist auch, dass bei diesem Versuch nun auch die Zeiten weitgehend übereinstimmen, zumindest soweit dies für den Anfang bei guter Übereinstimmung gesagt werden kann. Dies steht im Gegensatz zu den anderen beiden Versuchen des Vergleichs sowie den Beobachtungen bei den Permeabilitätsmessungen. Jedoch könnte hierfür der Injektionsdruck während des Versuches verantwortlich sein: dieser lag für diesen Versuch relativ niedrig bei 1,5 bar, während die anderen beiden Manipulationsversuche bei 2 bar durchgeführt wurden. Für die Permeabilitätsmessungen variierte der Druck zwischen 2 und 6 bar. Möglicherweise gibt es eine Druckgrenze zwischen 1,5 und 2 bar unter der die Komprimierungsverhältnisse zwischen optischen und kapazitiven Permeameter vergleichbar sind, während oberhalb die beobachteten Unterschiede auftreten.

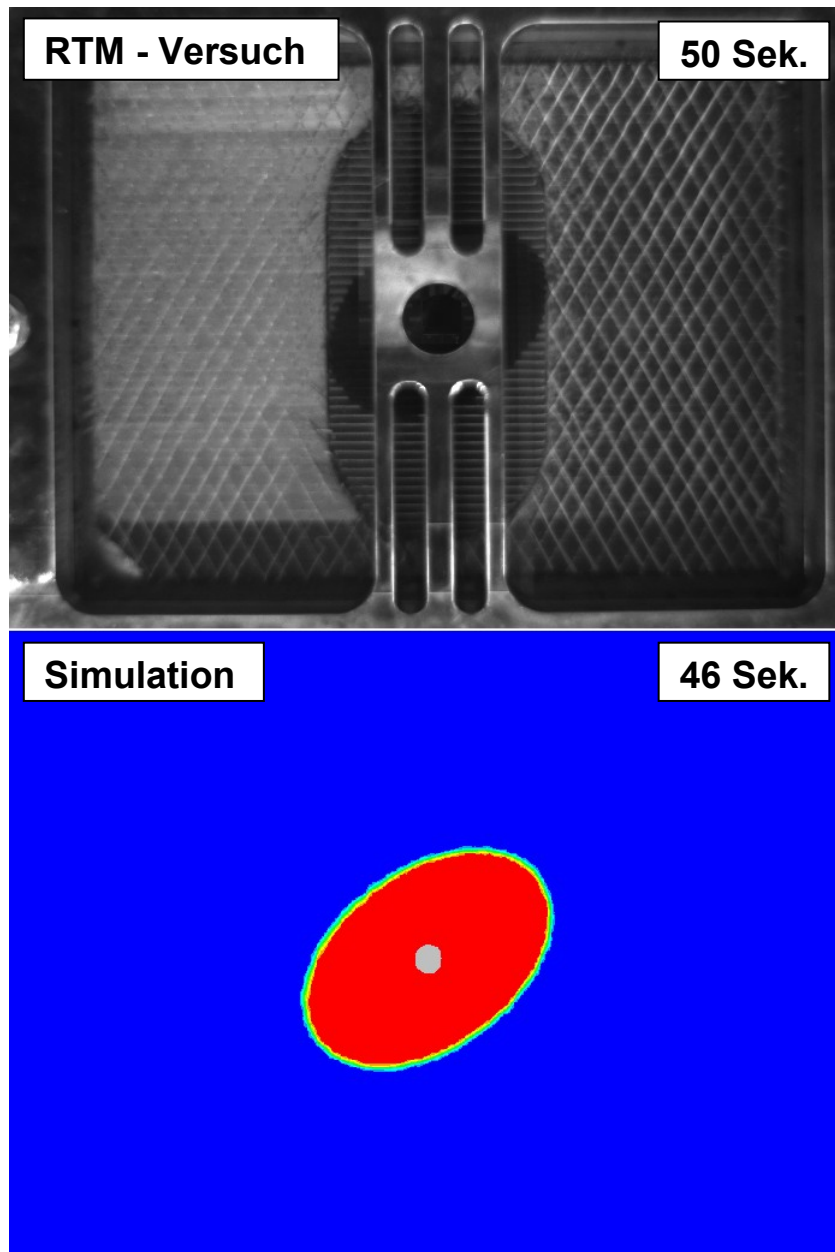


Abbildung 45: Simulations-Abgleich für UD-Preform mit triax. Einlegeteil 1

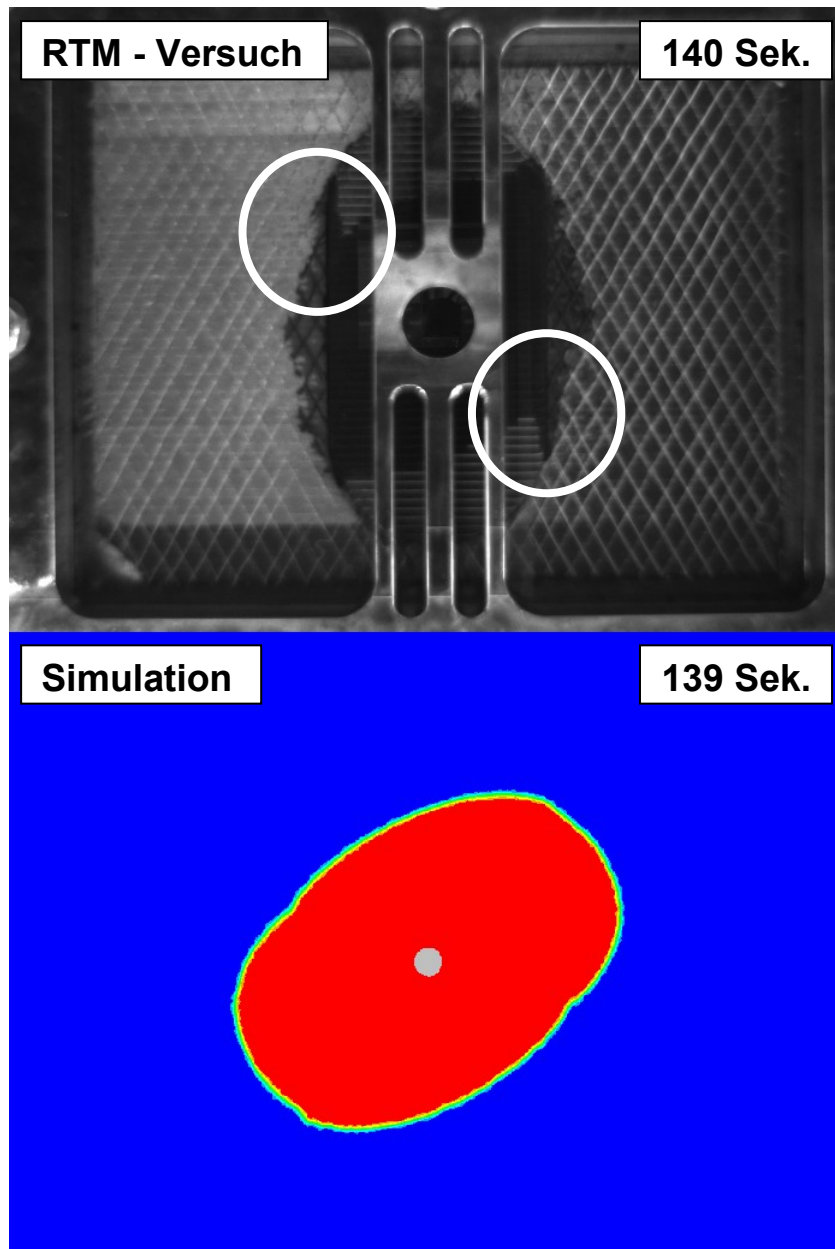


Abbildung 46: Simulations-Abgleich für UD-Preform mit triax. Einlegeteil 2

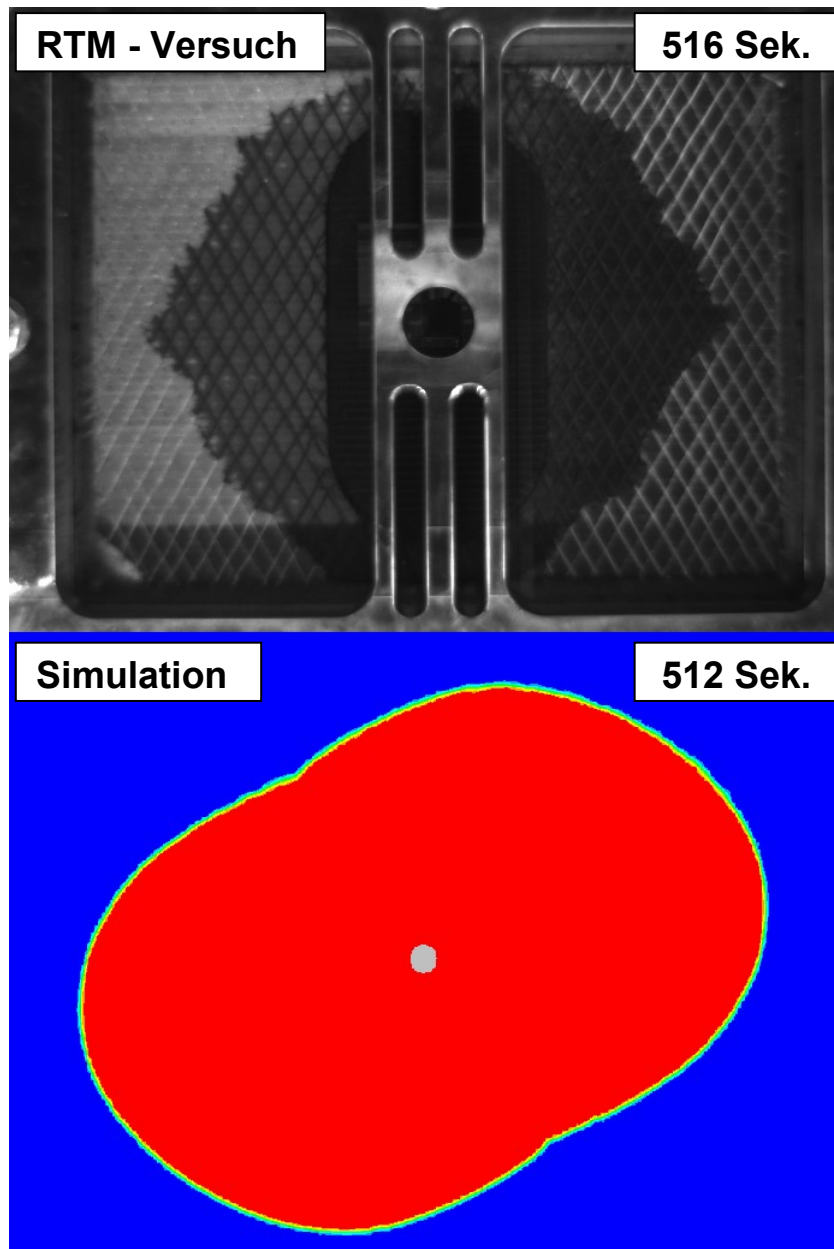


Abbildung 47: Simulations-Abgleich für UD-Preform mit triax. Einlegeteil 3

Versuch 3:

Der dritte Versuch wurde mit einem Preform aus BNCF 24KIMS triaxial durchgeführt, welcher mit 4 Barrieren manipuliert wurde. Abbildungen 48 bis 53 zeigen diesen Vergleich. Hier zeigt sich anfangs ebenfalls eine sehr gute Übereinstimmung (Abbildung 48 und 49). Nachdem ersten Auftreffen der

Fließfront auf die Barrieren tritt an der oberen Barriere Race-tracking auf, wodurch die Fließfront hier im Vergleich zur Simulation voreilt (Abbildung 50).

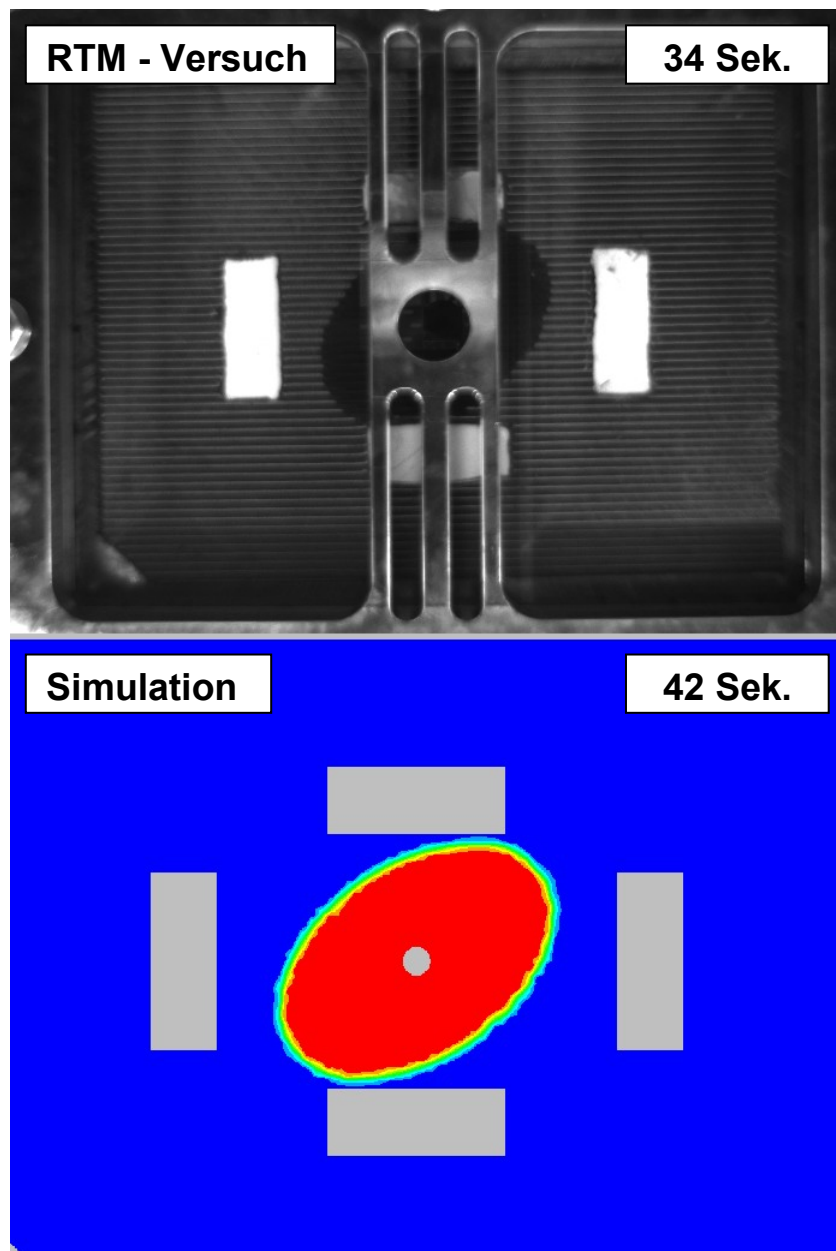


Abbildung 48: Simulations-Abgleich für triax. Preform mit 4 Barrieren 1

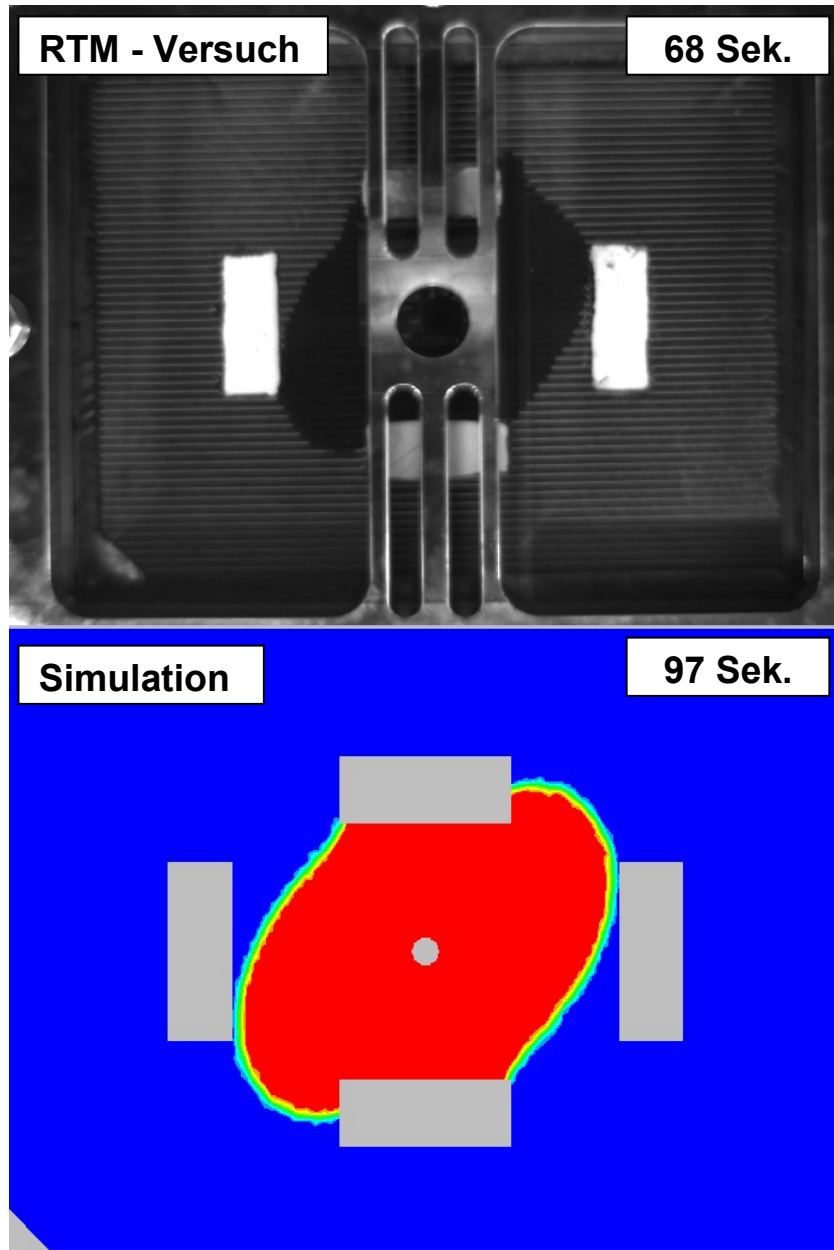


Abbildung 49: Simulations-Abgleich für triax. Preform mit vier Barrieren 2

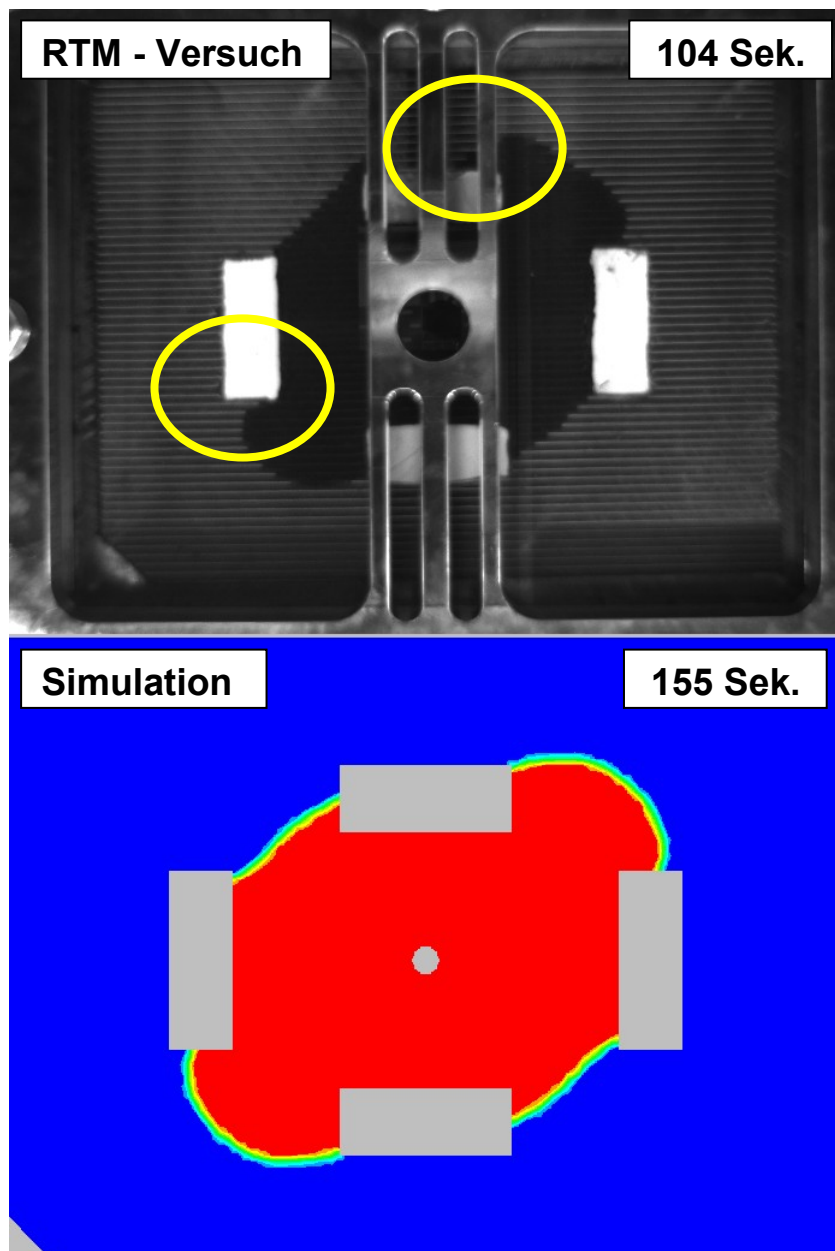


Abbildung 50: Simulations-Abgleich für triax. Preform mit vier Barrieren 3



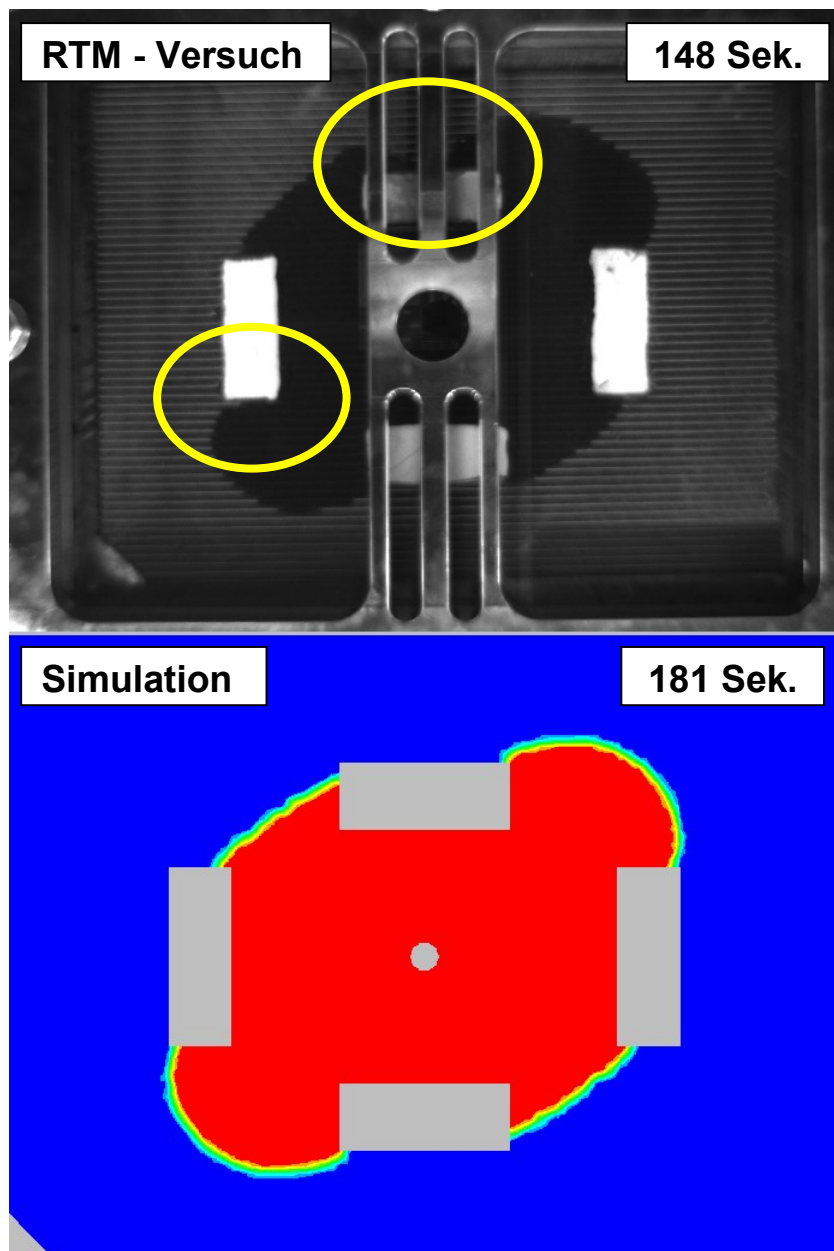


Abbildung 51: Simulations-Abgleich für triax. Preform mit vier Barrieren 4

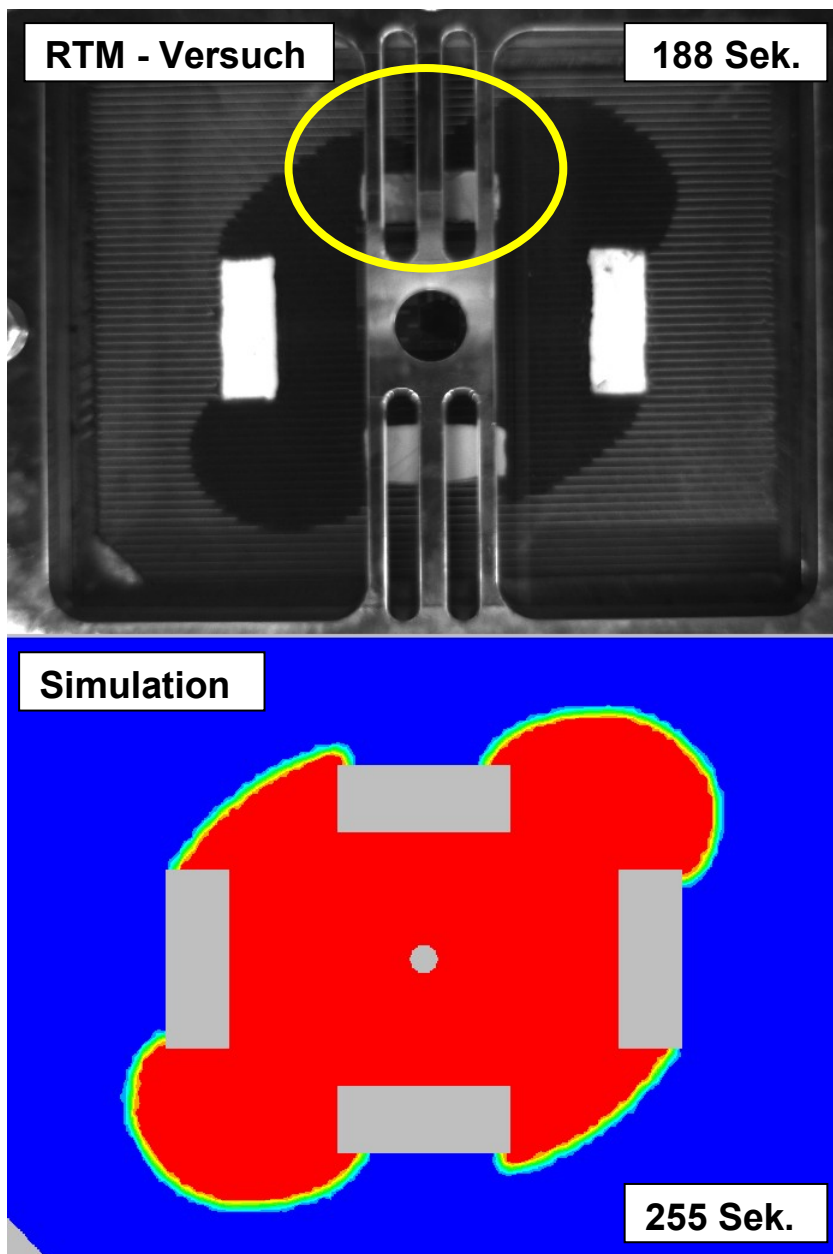


Abbildung 52: Simulations-Abgleich für triax. Preform mit vier Barrieren 5

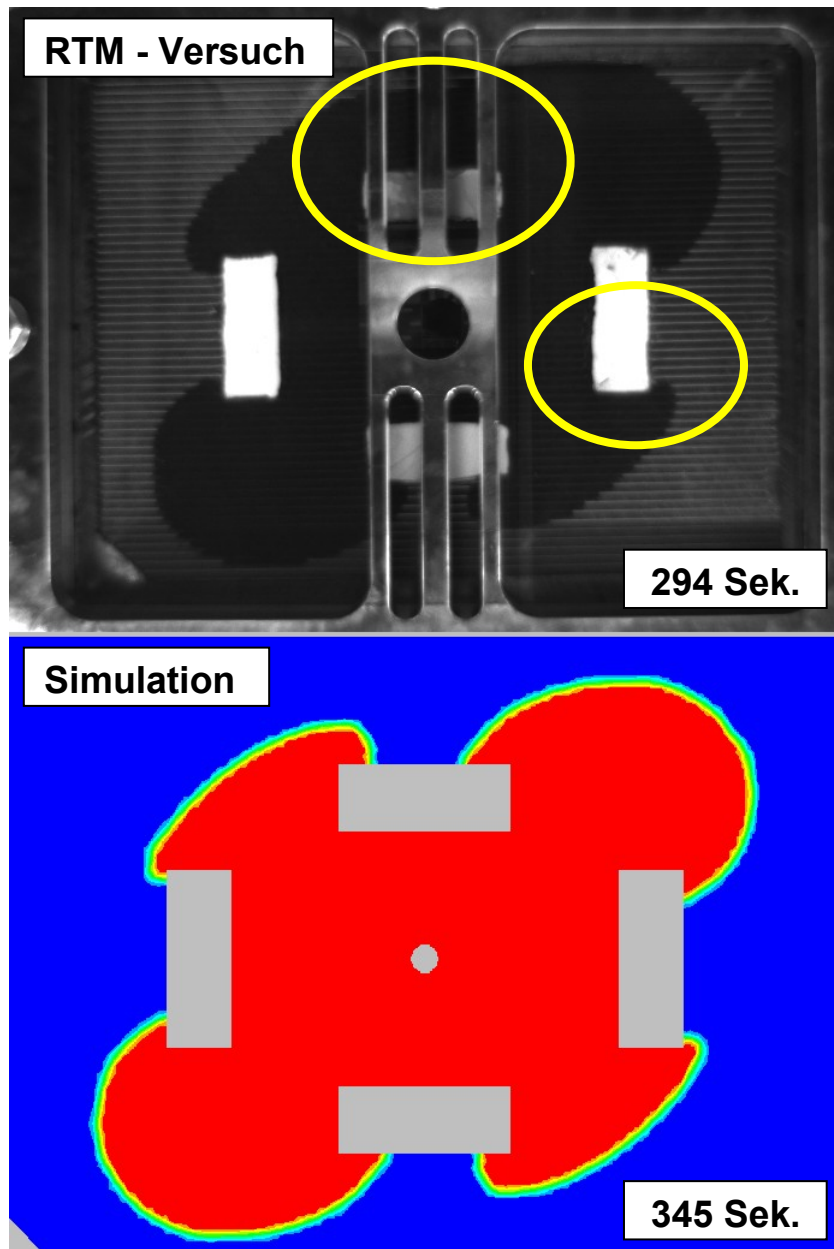


Abbildung 53: Simulations-Abgleich für triax. Preform mit vier Barrieren 6

Dies setzt sich im Laufe des Versuches fort und führt zu einer schlechteren Übereinstimmung zwischen Simulation und Versuch im oberen Bereich. An der linken und am Ende auch an der rechten Barriere lässt sich außerdem ein verzögertes Fließen am unteren bzw. rechten Rand erkennen, was wiederum durch die beschriebene lokale Faservolumenerhöhung verursacht wurde (Abbildung 50 und 51 bzw. 53). Auch bei diesem Versuch lässt sich die kürzere

Füllzeit beobachten. Insgesamt ergibt sich eine gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Versuch.

## 5 Zusammenfassung

Im Zuge dieser Arbeit wurden zunächst die 2D-Permeabilitätswerte von vier Materialien bestimmt, wobei diese bei drei sowohl kapazitiv als auch optisch und bei einem nur kapazitiv gemessen wurde. Bei allen Materialien konnte großer Unterschied in den Ergebnissen beobachtet werden, wobei die optisch gemessene Permeabilität zwischen 5- und 17-mal höher war als die kapazitive bei gleichen Bedingungen. Betreffend der Anisotropie zeigten beide Messvorrichtungen ähnliche Ergebnisse, wobei hier das optische Verfahren durchwegs leicht höhere alpha-Werte zeigte, die Fließeigenschaften also als isotroper bewertete. Bei der Bestimmung des Orientierungswinkels beta zeigte das kapazitive Verfahren bei geringen Winkeln (Hexcel 1102, HexForce NBB00) Probleme und Ergebnisse mit sehr hohen Standardabweichungen jenseits der 100%. Das optische Verfahren erwies sich hier als besser. Bei BNCF 24KIMS triaxial zeigten beide Messsysteme konsistente Ergebnisse mit einem Unterschied von ca. 17%. Die Ergebnisse zeigten durchwegs Streuungen im unteren Bereich bzw. unter jenen in der Literatur dokumentierten, wobei das optische Verfahren eine etwas geringere Standardabweichung lieferte. Bezogen auf die  $K_1$ -Permeabilität lag diese im Mittel bei 7% (optisch) und 12,5% (kapazitiv).

Im Zuge der Permeabilitätsmessungen wurden die kapazitiv ermittelten Ergebnisse für die Materialien Hexcel 1102 (GF-Gewebe) und HexForce NBB00 (biaxiales CF-Gelege) mit jenen des Instituts für Verbundwerkstoffe Kaiserslautern verglichen. Beim Glasfasergewebe zeigte sich hier sowohl betreffend der Permeabilitäts- als auch der Anisotropiewerte gute Übereinstimmung. In den Ergebnissen des Karbonfasergeleges kam es bei den Permeabilitätswerten zu größeren Abweichungen, während die Anisotropien wiederum sehr ähnlich waren.

In weiterer Folge wurden RTM-Versuche mit manipulierten Preforms der Materialien BNCF 24 IMS triaxial und unidirektional durchgeführt um diese mit einer PAM-RTM-Simulation zu vergleichen. Hier zeigten sich sehr gute Übereinstimmungen bei den Versuchen mit Barrieren-Manipulationen, während

Versuche mit mehrteiligen Preforms keine Erfolge brachten. Probleme im Zuge dieser Experimente waren durch das Handling auftretende Spalte zwischen Preformteilen, welche Race-tracking verursachten, sowie lokale Schädigung der Faserarchitektur durch Pressung mit dem Barrierenmaterial.

## 6 Literatur

- [1] Kissinger, C.: Ganzheitliche Betrachtung der Harzinjektionstechnik. Messsystem zur durchgängigen Fertigungskontrolle. IVW Schriftenreihe Bd. 28, IVW GmbH Prof. Dr.-Ing. Ulf Breuer, Kaiserslautern 2001.
- [2] Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe; Witten, E.; Jahn, B.: Composites Marktbericht 2013. Trends, Ausblicke und Herausforderungen.
- [3] Lundström, T. S.; Stenberg, R.; Bergström, R.; Partanen, H.; Birkeland, P. A.: In-plane permeability measurements: a nordic round-robin study. In: Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 31 (2000) 1, S. 29–43.
- [4] Arbter, R.; Beraud, J. M.; Binetruy, C.; Bizet, L.; Bréard, J.; Comas-Cardona, S.; Demaria, C.; Endruweit, A.; Ermanni, P.; Gommer, F.; Hasanovic, S.; Henrat, P.; Klunker, F.; Laine, B.; Lavanchy, S.; Lomov, S. V.; Long, A. C.; Michaud, V.; Morren, G.; Ruiz, E.; Sol, H.; Trochu, F.; Verleye, B.; Wietgreffe, M.; Wu, W.; Ziegmann, G.: Experimental determination of the permeability of textiles: A benchmark exercise. In: Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 42 (2011) 9, S. 1157–68.
- [5] Hoes, K.; Dinescu, D.; Sol, H.; Vanheule, M.; Parnas, R. S.; Luo, Y.; Verpoest, I.: New set-up for measurement of permeability properties of fibrous reinforcements for RTM. In: Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 33 (2002) 7, S. 959–69.
- [6] Steenkamer, D. A.; McKnight, S. H.; Wilkins, D. J.; Karbhari, V.: Experimental characterization of permeability and fibre wetting for liquid moulding. In: Journal of Materials Science 30 (1995) 12, S. 3207–15.
- [7] Rieber, G.: Einfluss von textilen Parametern auf die Permeabilität von Multifilamentgeweben für Faserverbundkunststoffe. IVW Schriftenreihe Bd. 96, IVW GmbH Prof. Dr.-Ing. Ulf Breuer, Kaiserlautern 2011.
- [8] Darcy, H.: Les fontaines publiques de la ville de dijon. Dijon, Paris 1856.
- [9] Adams, K. L.; Rebenfeld, L.: In-Plane Flow of Fluids in Fabrics: Structure/Flow Characterization. In: Textile Research Journal 57 (1987) 11, S. 647–54.

- [10] Adams, K. L.; Rebenfeld, L.: Permeability characteristics of multilayer fiber reinforcements. Part II: Theoretical model. In: *Polymer Composites* 12 (1991) 3, S. 186–90.
- [11] Mitschang, P.; Stadtfeld, H.; Stöven, T.; Weyrauch, F.; Latrille, M.; Louis, M.; Neitzel, M.; Beresheim, G.: Grundlagen der Verarbeitungsprozesse. In: Neitzel, M.; Mitschang, P.: *Handbuch Verbundwerkstoffe*. Carl Hanser Verlag, München, Wien 2004.
- [12] Zhang, C.; Garg, G.; Liang, Z.; Wang, B.; Shin, C.: Gas assisted real-time assessment of whole-field permeability profile of fiber preform for liquid composite molding processes. In: *International SAMPE Symposium and Exhibition (Proceedings)* 48 I (2003).
- [13] Liang, Z.; Zhang, C.; Wang, B.; Shih, C.: In-situ measurement and monitoring of fiber preform permeability for liquid composite molding. In: *American Society of Mechanical Engineers, Manufacturing Engineering Division, MED* 11 (2000).
- [14] Ding, L.; Shih, C.; Liang, Z.; Zhang, C.; Wang, B.: In situ measurement and monitoring of whole-field permeability profile of fiber preform for liquid composite molding processes. In: *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 34 (2003) 8, S. 779–89.
- [15] Weitzenböck, J.; Shenoj, R.; Wilson, P.: Radial flow permeability measurement. Part B: Application. In: *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 30 (1999) 6, S. 797–813.
- [16] Weitzenböck, J. R.; Shenoj, R. A.; Wilson, P. A.: Radial flow permeability measurement. Part A: Theory. In: *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 30 (1999) 6, S. 781–96.
- [17] Grössing, H.; Wolfahrt, M.; Müller, A.; Schledjewski, R.: Comparison of permeability measurements of several fibre textiles using different measurement methods. In: *Proceedings of ECCM15, Quaresimin M., Venedig* (2012).
- [18] Ahn, K. J.; Seferis, J. C.; Berg, J. C.: Simultaneous measurements of permeability and capillary pressure of thermosetting matrices in woven fabric reinforcements. In: *Polymer Composites* 12 (1991) 3, S. 146–52.



- [19] Foley, M. E.; Gillespie, J. W.: Modeling the Effect of Fiber Diameter and Fiber Bundle Count on Tow Impregnation during Liquid Molding Processes. In: *Journal of Composite Materials* 39 (2005) 12, S. 1045–65.
- [20] Han, K.: Measurements of the permeability of fiber preforms and applications. In: *Composites Science and Technology* 60 (2000) 12-13, S. 2435–41.
- [21] Amico, S.; Lekakou, C.: An experimental study of the permeability and capillary pressure in resin-transfer moulding. In: *Composites Science and Technology* 61 (2001) 13, S. 1945–59.
- [22] Saunders, R. A.; Lekakou, C.; Bader, M. G.: Compression and microstructure of fibre plain woven cloths in the processing of polymer composites. In: *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 29 (1998) 4, S. 443–54.
- [23] Rong Pan, Zhiyong Liang, Chuck Zhang, Ben Wang: Statistical characterization of fiber permeability for composite manufacturing. In: *Polymer Composites* 21 (2000) 6.
- [24] Grössing, H.; Schledjewski, R.: Optical permeability measurements of NCF: Influence of material properties on the 2D preform permeability. In: *Composite Materials: The great advance*, Suong Van Hoa, Pascal Hubert, Electronic Publishing BytePress.com, Montreal 19 (2013).
- [25] Han, K.: Measurements of the permeability of fiber preforms and applications. In: *Composites Science and Technology* 60 (2000) 12-13, S. 2435–41.
- [26] Rieber, G.; Mitschang, P.: 2D Permeability changes due to stitching seams. In: *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 41 (2010) 1, S. 2–7.
- [27] Talvensaari, H.; Ladstätter, E.; Billinger, W.: Permeability of stitched preform packages. In: *Composite Structures* 71 (2005) 3-4, S. 371–77.
- [28] Drapier, S.: Influence of the stitching density on the transverse permeability of non-crimped new concept (NC2) multiaxial reinforcements: measurements and predictions. In: *Composites Science and Technology* 62 (2002) 15, S. 1979–91.

- [29] Endruweit, A.; Long, A. C.: Influence of stochastic variations in the fibre spacing on the permeability of bi-directional textile fabrics. In: *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 37 (2006) 5, S. 679–94.
- [30] Endruweit, A.; McGregor, P.; Long, A. C.; Johnson, M.: Influence of the fabric architecture on the variations in experimentally determined in-plane permeability values. In: *Composites Science and Technology* 66 (2006) 11-12, S. 1778–92.
- [31] Endruweit, A.; Long, A. C.; Robitaille, F.; Rudd, C. D.: Influence of stochastic fibre angle variations on the permeability of bi-directional textile fabrics. In: *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 37 (2006) 1, S. 122–32.
- [32] Fauster, E.; Grössing, H.: Statistical uncertainty analysis of material and measurement parameters for optical permeability determination. In: *TexComp11, Proceedings of CompositesWeek@Leuven* (2013), S. 8.
- [33] Ferret, B.; Anduze, M.; Nardari, C.: Metal inserts in structural composite materials manufactured by RTM. In: *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 29 (1998) 5-6, S. 693–700.
- [34] Louis, M.; Huber, U.: Investigation of shearing effects on the permeability of woven fabrics and implementation into LCM simulation. In: *Composites Science and Technology* 63 (2003) 14, S. 2081–88.
- [35] Dunkers, J. P.; Phelan, F. R.; Zimba, C. G.; Flynn, K. M.; Sanders, D. P.; Peterson, R. C.; Parnas, R. S.; Li, X.; Fujimoto, J. G.: The prediction of permeability for an epoxy/E-glass composite using optical coherence tomographic images. In: *Polymer Composites* 22 (2001) 6.
- [36] Nordlund, M.; Lundström, T. S.; Frishfelds, V.; Jakovics, A.: Permeability network model for non-crimp fabrics. In: *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 37 (2006) 6, S. 826–35.
- [37] Long, A. C.; Rudd, C. D.; Blagdon, M.; Smith, P.: Characterizing the processing and performance of aligned reinforcements during preform manufacture. In: *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 27 (1996) 4, S. 247–53.

- [38] Rudd, C. D.; Long, A. C.; McGeehin, P.; Smith, P.: In-plane permeability determination for simulation of liquid composite molding of complex shapes. In: *Polymer Composites* 17 (1996) 1.
- [39] Heardman, E.; Lekakou, C.; Bader, M.: In-plane permeability of sheared fabrics. In: *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 32 (2001) 7, S. 933–40.
- [40] Endruweit, A.; Ermanni, P.: The in-plane permeability of sheared textiles. Experimental observations and a predictive conversion model. In: *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 35 (2004) 4, S. 439–51.
- [41] Slade, J.; Sozer, E. M.; Advani, S. G.: Fluid Impregnation of Deformed Preforms. In: *Journal of Reinforced Plastics and Composites* (2000) 19, S. 552–68.
- [42] Sirtautas, J.; Pickett, A. K.; Lépicier, P.: A mesoscopic model for coupled drape-infusion simulation of biaxial Non-Crimp Fabric. In: *Composites Part B: Engineering* 47 (2013), S. 48–57.
- [43] Verleye, B.; Lomov, S. V.; Long, A. C.; Verpoest, I.; Roose, D.: Permeability prediction for the meso–macro coupling in the simulation of the impregnation stage of Resin Transfer Moulding. In: *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 41 (2010) 1, S. 29–35.
- [44] Smith, P.; Rudd, C. D.; Long, A. C.: The effect of shear deformation on the processing and mechanical properties of aligned reinforcements. In: *Composites Science and Technology* 57 (1997) 3, S. 327–44.
- [45] Wong, C. C.; Long, A. C.; Sherburn, M.; Robitaille, F.; Harrison, P.; Rudd, C. D.: Comparisons of novel and efficient approaches for permeability prediction based on the fabric architecture. In: *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 37 (2006) 6, S. 847–57.
- [46] Bickerton, S.; Sozer, E. M.; Graham, P.; Advani, S.: Fabric structure and mold curvature effects on preform permeability and mold filling in the RTM process. Part I. Experiments. In: *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 31 (2000) 5, S. 423–38.

- [47] Bickerton, S.; Sozer, E. M.; Šimáček, P.; Advani, S. G.: Fabric structure and mold curvature effects on preform permeability and mold filling in the RTM process. Part II. Predictions and comparisons with experiments. In: Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 31 (2000) 5, S. 439–58.
- [48] Steenkamer, D.; Wilkins, D. J.; Karbhari, V.: The influence of preform joints on the processing of RTM composites. In: Composites Manufacturing 6 (1995) 1, S. 23–34.
- [49] Abbassi, A.; Shahnazari, M.: Numerical modeling of mold filling and curing in non-isothermal RTM process. In: Applied Thermal Engineering 24 (2004) 16, S. 2453–65.
- [50] Shi, F.; Dong, X.: 3D numerical simulation of filling and curing processes in non-isothermal RTM process cycle. In: Finite Elements in Analysis and Design 47 (2011) 7, S. 764–70.
- [51] PAM-RTM Produktbeschreibung. URL: <https://www.esi-group.com/software-services/virtual-manufacturing/composites> (abgerufen: 17.02.2014).

## 7 Verwendete Symbole und Abkürzungen

### Formelzeichen:

$v$ ...makroskopische Fließgeschwindigkeit	[m/s]
$K$ ...Permeabilität	[m <sup>2</sup> ]
$\eta$ ...Viskosität	[Pa*s]
$\nabla p$ ...Druckgradient	[Pa/m]
$x_1, x_2$ ...Längenkoordinaten in kart. Koordinatensystem	[m]
$\alpha$ ...Anisotropie	[ ]
$v_f$ ...lokale Fließgeschwindigkeit	[m/s]
$x_f$ ...lokale Längenkoordinate	[m]
$\varepsilon$ ...Porosität	[ ]
$\frac{d\xi_f}{dt}$ ...zeitliche Ableitung des ellipt. Längenäquivalents	[m/s]
$R_0$ ...Radius des Angussloches	[m]
$\xi_{f1}, \xi_{f2}$ ...elliptisches Längenäquivalent	[m]
$\xi_0$ ...elliptisches Äquivalent des Angussradius	[m]
$\mu$ ...elliptisches Äquivalent des Orientierungswinkels	[°]
$F(\xi, \mu)$ ...Lösung der Differentialgleichung für anisotrope Permeabilitätsausbildung	[ ]
$\beta$ ...Orientierungswinkel der Fließellipse	[°]

### Nomenklatur:

CF                      Karbonfaser

GF	Glasfaser
NCF	Non-Crimp-Fabric
IVW	Institut für Verbundwerkstoffe
LVV	Lehrstuhl für Verarbeitung von Verbundwerkstoffen
FVG	Faservolumengehalt
UD	unidirektional
cv	Konfidenz
MW	Mittelwert
Stdabw	Standardabweichung

## 8 Abbildungsverzeichnis

<i>Abbildung 1: Getränkte GF-Gewebe-Probe, Öl gefärbt mit SUDANRED IV.....</i>	<i>34</i>
<i>Abbildung 2: Viskositätskurve des Pflanzenöls .....</i>	<i>35</i>
<i>Abbildung 3: Aufbau des optischen Permeameters.....</i>	<i>38</i>
<i>Abbildung 4: Ansicht der Software zur Datenerfassung, opt. Permeameter.....</i>	<i>39</i>
<i>Abbildung 5: Aufbau des kapazitiven Permeameters .....</i>	<i>41</i>
<i>Abbildung 6: Software-Ansicht Fließweglänge über Zeit .....</i>	<i>42</i>
<i>Abbildung 7: Sensortripel für die Auswertung der kapazitiven Messung .....</i>	<i>43</i>
<i>Abbildung 8: UD-Preform mit triaxialem Einlegeteil.....</i>	<i>45</i>
<i>Abbildung 9: Barriere aus Modelliermasse in UD-Preform .....</i>	<i>45</i>
<i>Abbildung 10: triaxiale Preform mit Barrieren im Werkzeug .....</i>	<i>47</i>
<i>Abbildung 11: Geometrie eines manipulierten Preforns für die Simulation.....</i>	<i>49</i>
<i>Abbildung 12: Permeabilität über Faservolumengehalt für Hexcel1102 .....</i>	<i>51</i>
<i>Abbildung 13: Anisotropie für Hexcel1102 .....</i>	<i>51</i>
<i>Abbildung 14: Orientierungswinkel für Hexcel 1102 .....</i>	<i>52</i>
<i>Abbildung 15: Permeabilität über Faservolumengehalt für HexForce NBB00 .....</i>	<i>53</i>
<i>Abbildung 16: Anisotropie für HexForce NBB00.....</i>	<i>53</i>
<i>Abbildung 17: Orientierungswinkel für HexForce NBB00 .....</i>	<i>54</i>
<i>Abbildung 18: Fließellipse im optischen Permeameter für V043 .....</i>	<i>55</i>
<i>Abbildung 19: Orientierungswinkel über Messzeit für V043 .....</i>	<i>56</i>
<i>Abbildung 20: Permeabilität über Faservolumengehalt für BNCF 24KIMS triax... </i>	<i>57</i>
<i>Abbildung 21: Anisotropie für BNCF 24KIMS triax. ....</i>	<i>57</i>
<i>Abbildung 22: Orientierungswinkel für BNCF 24KIMS triax.....</i>	<i>58</i>
<i>Abbildung 23: NCF während optischer Messung .....</i>	<i>59</i>
<i>Abbildung 24: Permeabilität über Faservolumengehalt für BNCF 24KIMS unid... </i>	<i>60</i>
<i>Abbildung 25: Anisotropie für BNCF 24KIMS unid. ....</i>	<i>60</i>
<i>Abbildung 26: Orientierungswinkel für BNCF 24KIMS unid.....</i>	<i>61</i>
<i>Abbildung 27: Fließweglänge über Zeit für HexForce NBB bei opt. Messung .....</i>	<i>63</i>
<i>Abbildung 28: reduzierter Auswertebereich für opt. Messung .....</i>	<i>64</i>
<i>Abbildung 29: Permeabilität über Druck für kapazitive und optische Messung ....</i>	<i>65</i>
<i>Abbildung 30: Anisotropie über Druck für kapazitive und optische Messung .....</i>	<i>66</i>

<i>Abbildung 31: Orientierungswinkel über Druck für kapazitive und optische Messung.....</i>	<i>66</i>
<i>Abbildung 32: <math>K_1</math> zu <math>K_1</math> kapazitiv gemessen für Extrapolation und optische Messung.....</i>	<i>68</i>
<i>Abbildung 33: Verwendete Sensortriplets 17 und 18 mit interpolierter Ellipse .....</i>	<i>70</i>
<i>Abbildung 34: Permeabilität über verschiedenen Sensortripel und -Kombinationen .....</i>	<i>71</i>
<i>Abbildung 35: Standardabweichung der Messwerte verschiedener Sensortripel .</i>	<i>72</i>
<i>Abbildung 36: Vergleich der Permeabilitätswerte für Hexcel 1102 .....</i>	<i>73</i>
<i>Abbildung 37: Vergleich der Anisotropie für Hexcel 1102 .....</i>	<i>74</i>
<i>Abbildung 38: Vergleich der Permeabilität für HexForce NBB00.....</i>	<i>75</i>
<i>Abbildung 39: Vergleich der Anisotropie für HexForce NBB00 .....</i>	<i>75</i>
<i>Abbildung 40: Schädigungen durch Barriere in UD-Preform .....</i>	<i>77</i>
<i>Abbildung 41: Schädigungen durch Barriere in triaxialem Preform .....</i>	<i>78</i>
<i>Abbildung 42: Simulations-Abgleich für triax. Preform mit zwei Barrieren 1 .....</i>	<i>79</i>
<i>Abbildung 43: Simulations-Abgleich für triax. Preform mit zwei Barrieren 2.....</i>	<i>80</i>
<i>Abbildung 44: Simulations-Abgleich für triax. Preform mit zwei Barrieren 3.....</i>	<i>81</i>
<i>Abbildung 45: Simulations-Abgleich für UD-Preform mit triax. Einlegeteil 1 .....</i>	<i>83</i>
<i>Abbildung 46: Simulations-Abgleich für UD-Preform mit triax. Einlegeteil 2.....</i>	<i>84</i>
<i>Abbildung 47: Simulations-Abgleich für UD-Preform mit triax. Einlegeteil 3.....</i>	<i>85</i>
<i>Abbildung 48: Simulations-Abgleich für triax. Preform mit 4 Barrieren 1 .....</i>	<i>86</i>
<i>Abbildung 49: Simulations-Abgleich für triax. Preform mit vier Barrieren 2 .....</i>	<i>87</i>
<i>Abbildung 50: Simulations-Abgleich für triax. Preform mit vier Barrieren 3 .....</i>	<i>88</i>
<i>Abbildung 51: Simulations-Abgleich für triax. Preform mit vier Barrieren 4 .....</i>	<i>89</i>
<i>Abbildung 52: Simulations-Abgleich für triax. Preform mit vier Barrieren 5 .....</i>	<i>90</i>
<i>Abbildung 53: Simulations-Abgleich für triax. Preform mit vier Barrieren 6 .....</i>	<i>91</i>



## 9 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: <i>Randbedingungen und physikalische Bedeutung für das Gesetz von Darcy [9]</i> .....	5
Tabelle 2: <i>Eigenschaften des GF-Gewebes Hexcel 1102</i> .....	26
Tabelle 3: <i>Versuchsplan kapazitives Permeameter für Hexcel 1102:</i> .....	27
Tabelle 4: <i>Versuchsplan optisches Permeameter für Hexcel 1102</i> .....	27
Tabelle 5: <i>Eigenschaften des CF-NCF HexForce NBB00</i> .....	28
Tabelle 6: <i>Versuchsplan kapazitives Permeameter HexForce NBB00</i> .....	29
Tabelle 7: <i>Versuchsplan optisches Permeameter HexForce NBB00</i> .....	29
Tabelle 8: <i>Eigenschaften des triaxialen Geleges BNCF-24KIMS</i> .....	30
Tabelle 9: <i>Versuchsplan kapazitives Permeameter für BNCF 24KIMS triaxial</i> .....	31
Tabelle 10: <i>Versuchsplan optisches Permeameter für BNCF 24KIMS triaxial</i> .....	31
Tabelle 11: <i>Eigenschaften von BNCF 24KIMS unidirektional</i> .....	32
Tabelle 12: <i>Versuchsplan kapazitives Permeameter für BNCF 24KIMS unidirektional</i> .....	33
Tabelle 13: <i>Temperaturwerte für die Bestimmung der Viskosität und Auswertung</i> .....	36
Tabelle 14: <i>Schnittgeschwindigkeiten beim Zuschneiden der Preforms</i> .....	37
Tabelle 15: <i>Übersicht der RTM-Versuche mit manipulierten Textilien</i> .....	44
Tabelle 16: <i>Übersicht Kavitätenhöhe und Lagenzahl für RTM-Versuche</i> .....	46
Tabelle 17: <i>Übersicht der simulierten RTM-Versuche</i> .....	48
Tabelle 18: <i>Übersicht über Materialwerte für Simulation</i> .....	48
Tabelle 19: <i>Standardabweichungen der Permeabilitätsmessungen</i> .....	62
Tabelle 20: <i>Ergebnisse der Auswertung für V075, reduzierte und gesamter Auswertebereich</i> .....	64
Tabelle 21: <i>Ergebnisse kapazitive Messung für Hexcel 1102, Flächengewicht = 283 g/m<sup>2</sup>, T = 21,75 °C</i> .....	107
Tabelle 22: <i>Ergebnisse optische Messung für Hexcel 1102, Flächengewicht = 283 g/m<sup>2</sup>, T = 22,5 °C</i> .....	107
Tabelle 23: <i>Ergebnisse kapazitive Messung für HexForce NBB00, Flächengewicht = 172 g/m<sup>2</sup>, T = 21,75°C</i> .....	108

*Tabelle 24: Ergebnisse optische Messung für HexForce NBB00, Flächengewicht = 172 g/m<sup>2</sup>, T = 22,5°C..... 108*

*Tabelle 25: Ergebnisse kapazitive Messung für BNCF 24IMS triaxial, Flächengewicht = 596 g/m<sup>2</sup>, Temperatur = 21,75°C..... 109*

*Tabelle 26: Ergebnisse optische Messung für BNCF 24IMS triaxial, Flächengewicht = 596 g/m<sup>2</sup>, Temperatur = 22,5°C..... 109*

*Tabelle 27: Ergebnisse kapazitive Messung für BNCF 24IMS unidirektional, Flächengewicht = 435 g/m<sup>2</sup>, Temperatur = 21,75°C..... 109*

# 10 Anhang

Tabelle 21: Ergebnisse kapazitive Messung für Hexcel 1102, Flächengewicht = 283 g/m<sup>2</sup>, T = 21,75 °C

Hexcel 1102	FVG [%]	K1 [m <sup>2</sup> ]	K2 [m <sup>2</sup> ]	alpha	beta mw [°]	beta ende [°]	MW K1	Stdabw. K1	cv [%]	MW K2	Stdabw. K2	cv [%]	alpha	Stdabw. Alpha	cv [%]	MW beta mw	Stdabw. beta mw	cv [%]	MW beta ende	Stdabw. beta ende	cv [%]
V-001	45,0%	4,28E-11	9,95E-12	0,23	5,20	3,40	5,64E-11	9,75E-12	17,3%	1,22E-11	1,43E-12	11,7%	0,22	0,02	11,4%	1,7	2,1	119,7%	0,0	1,9	4083,2%
V-002		6,49E-11	1,33E-11	0,20	1,74	0,73															
V-003		6,64E-11	1,22E-11	0,18	1,15	0,47															
V-004		5,17E-11	1,22E-11	0,24	0,24	-0,72															
V-005		5,62E-11	1,36E-11	0,24	0,24	-3,65															
V-006	49,2%	3,30E-11	7,24E-12	0,22	-2,25	-1,43	3,59E-11	2,14E-12	6,0%	6,89E-12	6,10E-13	8,8%	0,19	0,02	10,5%	0,8	2,2	270,1%	0,7	1,9	271,0%
V-007		3,62E-11	7,31E-12	0,20	0,90	0,51															
V-008		3,88E-11	7,06E-12	0,18	-0,16	-0,68															
V-009		3,67E-11	7,04E-12	0,19	2,13	1,86															
V-010		3,50E-11	5,82E-12	0,17	3,40	3,21															
V-011	52,5%	2,57E-11	4,80E-12	0,19	1,59	1,42	2,29E-11	1,98E-12	8,6%	4,23E-12	5,13E-13	12,1%	0,18	0,02	10,9%	1,4	1,4	100,7%	1,6	1,8	113,0%
V-012		2,16E-11	4,39E-12	0,20	-0,15	0,05															
V-013		2,14E-11	4,13E-12	0,19	1,00	0,79															
V-014		2,30E-11	3,58E-12	0,16	3,33	4,27															
V-015																					

Tabelle 22: Ergebnisse optische Messung für Hexcel 1102, Flächengewicht = 283 g/m<sup>2</sup>, T = 22,5 °C

Hexcel 1102	FVG [%]	K1 [m <sup>2</sup> ]	K2 [m <sup>2</sup> ]	alpha	beta mw [°]	beta ende [°]	MW K1	Stdabw. K1	cv [%]	MW K2	Stdabw. K2	cv [%]	alpha	Stdabw. Alpha	cv [%]	MW beta mw	Stdabw. beta mw	cv [%]	MW beta ende	Stdabw. beta ende	cv [%]
V-016	44,4%	4,13E-10	1,28E-10	0,31	0,90		4,49E-10	5,09E-11	11,4%	1,38E-10	1,42E-11	10,3%	0,31	0,00	1,1%	1,7	1,2	67,2%			
V-017		4,85E-10	1,48E-10	0,31	2,53																
V-018																					
V-019																					
V-020																					
V-021	49,9%	1,99E-10	5,56E-11	0,28	1,86		1,99E-10	-	-	5,56E-11	-	-	0,28	-	-	1,9	-	-			
V-022																					
V-023																					
V-024	55,5%	1,43E-10	3,19E-11	0,22	2,22		1,44E-10	1,22E-12	0,8%	3,19E-11	4,03E-14	0,1%	0,22	0,00	1,0%	2,3	0,0	1,6%			
V-025		1,45E-10	3,18E-11	0,22	2,28																
V-026																					
V-027																					

Tabelle 23: Ergebnisse kapazitive Messung für HexForce NBB00, Flächengewicht = 172 g/m<sup>2</sup>, T = 21,75°C

Hexcel NBB00	FVG [%]	K1 [m <sup>2</sup> ]	K2 [m <sup>2</sup> ]	alpha	beta mw [°]	beta ende [°]	MW K1	Stdabw. K1	cv [%]	MW K2	Stdabw. K2	cv [%]	alpha	Stdabw. alpha	cv [%]	MW beta mw	Stdabw. beta mw	cv [%]	MW beta ende	Stdabw. beta ende	cv [%]
V-028	49,1%	8,59E-12	4,27E-12	0,52	0,65	-1,51	1,03E-11	1,63E-12	15,9%	5,21E-12	8,54E-13	16,4%	0,51	0,01	1,0%	2,3	2,4	105,5%	0,1	1,9	2075,2%
V-029		1,25E-11	6,33E-12	0,51	4,15	-0,19															
V-030		1,15E-11	5,87E-12	0,51	4,92	1,92															
V-031		9,27E-12	4,69E-12	0,51	-0,83	-1,89															
V-032		9,55E-12	4,92E-12	0,52	2,43	2,11															
V-033	4,93E-12	2,41E-12	0,49	-6,64	-5,36	5,23E-12	5,25E-13	10,0%	2,46E-12	1,40E-13	5,7%	0,47	0,02	4,7%	-0,7	5,7	826,5%	-1,8	4,8	-264,3%	
V-034	5,78E-12	2,58E-12	0,45	6,41	1,65																
V-035	4,48E-12	2,25E-12	0,50	-0,38	2,76																
V-036	5,43E-12	2,50E-12	0,46	-6,09	-8,31																
V-037	5,54E-12	2,58E-12	0,47	3,24	0,21																
V-038	2,35E-12	1,27E-12	0,59	2,74	-0,13	2,14E-12	2,07E-13	9,7%	1,11E-12	1,45E-13	13,0%	0,54	0,10	17,6%	3,2	1,3	38,9%	1,2	0,7	64,4%	
V-039																					
V-040	2,21E-12	9,36E-13	0,42	2,07	2,21																
V-041	2,12E-12	1,07E-12	0,51	4,57	1,81																
V-042	1,86E-12	1,19E-12	0,64	3,60	0,76																

Tabelle 24: Ergebnisse optische Messung für HexForce NBB00, Flächengewicht = 172 g/m<sup>2</sup>, T = 22,5°C

Hexcel NBB00	FVG [%]	K1 [m <sup>2</sup> ]	K2 [m <sup>2</sup> ]	alpha	beta mw [°]	beta ende [°]	MW K1	Stdabw. K1	cv [%]	MW K2	Stdabw. K2	cv [%]	alpha	Stdabw. alpha	cv [%]	MW beta mw	Stdabw. beta mw	cv [%]	MW beta ende	Stdabw. beta ende	cv [%]
V-043	48,3%	1,01E-10	5,42E-11	0,54	6,05	9,91E-11	7,57E-12	7,6%	5,35E-11	3,00E-12	5,6%	0,54	0,01	2,1%	9,6	3,6	37,4%				
V-044		9,07E-11	5,03E-11	0,55	12,43																
V-045		9,63E-11	5,21E-11	0,54	12,88																
V-046		1,09E-10	5,73E-11	0,53	6,92																
V-047		5,83E-11	3,03E-11	0,52	7,35																
V-048	5,87E-11	3,21E-11	0,55	11,56	6,05E-11	2,71E-12	4,5%	3,33E-11	2,60E-12	7,8%	0,55	0,02	4,4%	7,4	3,0	40,7%					
V-049	6,06E-11	3,49E-11	0,58	6,08																	
V-050	6,43E-11	3,60E-11	0,56	4,56																	
V-051	4,52E-11	2,54E-11	0,56	7,23																	
V-052	4,57E-11	2,59E-11	0,57	10,54																	
V-053	3,32E-11	1,81E-11	0,54	5,55	4,04E-11	6,41E-12	15,9%	2,24E-11	3,95E-12	17,7%	0,56	0,01	1,9%	7,4	2,7	37,3%					
V-054	4,22E-11	2,32E-11	0,55	6,09																	

Tabelle 25: Ergebnisse kapazitive Messung für BNCF 24IMS triaxial, Flächengewicht = 596 g/m<sup>2</sup>, Temperatur = 21,75°C

BNCF 24 IMS triax	FGV [%]	K1 [m <sup>2</sup> ]	K2 [m <sup>2</sup> ]	alpha	beta mw [°]	beta ende [°]	MW K1	Stdabw. K1	cv [%]	MW K2	Stdabw. K2	cv [%]	MW alpha	Stdabw. Alpha	cv [%]	MW beta mw [°]	Stdabw. beta mw [°]	cv [%]	MW beta ende [°]	Stdabw. beta ende [°]	cv [%]
V-055	50,2%	3,46E-11	1,17E-11	0,34	36,15	34,14	3,08E-11	5,09E-12	16,5%	1,07E-11	1,04E-12	9,7%	0,36	0,08	23,4%	33,0	2,7	8,2%	30,0	4,4	14,8%
V-056		2,92E-11	9,89E-12	0,34	31,23	28,98															
V-057		2,43E-11	1,16E-11	0,48	30,30	24,24															
V-058		3,51E-11	9,79E-12	0,28	34,16	32,76															
V-059		1,82E-11	7,22E-12	0,40	34,96	34,68															
V-060		1,79E-11	5,98E-12	0,33	35,79	31,49															
V-061	53,7%	1,48E-11	6,56E-12	0,44	36,81	32,51	1,76E-11	1,99E-12	11,3%	6,53E-12	5,19E-13	7,9%	0,37	0,06	14,7%	36,1	0,9	2,4%	33,4	1,7	5,1%
V-062		1,95E-11	6,37E-12	0,33	36,70	35,07															
V-063		2,29E-11	6,41E-12	0,28	37,94	38,07															
V-064		2,26E-11	7,40E-12	0,33	38,08	37,72															
V-065																					
V-066		1,69E-11	6,68E-12	0,40	31,18	30,90															
V-067	1,99E-11	6,50E-12	0,33	32,76	26,33																
V-068	1,76E-11	6,42E-12	0,36	33,12	31,47																
V-069	1,81E-11	6,79E-12	0,38	31,06	30,44																
V-070	2,08E-11	6,10E-12	0,29	33,28	30,02																
V-071	59,7%	7,50E-12	3,08E-12	0,41	34,38	33,31	8,26E-12	1,65E-12	20,0%	2,93E-12	2,12E-13	7,2%	0,36	0,05	14,4%	34,2	2,6	7,6%	31,9	1,4	4,4%
V-072		7,73E-12	2,91E-12	0,38																	
V-073		7,10E-12	2,63E-12	0,37	31,46	30,50															
V-074		1,07E-11	3,08E-12	0,29	36,63	31,84															

Tabelle 26: Ergebnisse optische Messung für BNCF 24IMS triaxial, Flächengewicht = 596 g/m<sup>2</sup>, Temperatur = 22,5°C

BNCF 24 IMS triax	FGV [%]	K1 [m <sup>2</sup> ]	K2 [m <sup>2</sup> ]	alpha	beta mw [°]	beta ende [°]	MW K1	Stdabw. K1	cv [%]	MW K2	Stdabw. K2	cv [%]	MW alpha	Stdabw. alpha	cv [%]	MW beta mw [°]	Stdabw. beta mw [°]	cv [%]	MW beta ende [°]	Stdabw. beta ende [°]	cv [%]
V-075	53,3 %	1,26E-10	5,77E-11	0,46	30,97		1,25E-10	5,46E-12	4,4%	5,19E-11	4,49E-12	8,6%	0,41	0,03	7,1%	29,1	1,3	4,5%			
V-076		1,17E-10	4,68E-11	0,40	29,02																
V-077		1,28E-10	5,24E-11	0,41	28,27																
V-078		1,29E-10	5,09E-11	0,39	28,16																
V-079		1,48E-10	5,76E-11	0,39	31,50																
V-080		1,44E-10	6,31E-11	0,44	33,85																
V-081		1,66E-10	6,81E-11	0,41	30,65																
V-082		1,58E-10	6,66E-11	0,42	29,76																
V-083		1,54E-10	6,32E-11	0,41	33,26																
V-084		1,72E-10	6,65E-11	0,39	29,50																
V-085		1,59E-10	6,60E-11	0,41	29,50																
V-086		1,49E-10	5,66E-11	0,38	30,12																

Tabelle 27: Ergebnisse kapazitive Messung für BNCF 24IMS unidirektional, Flächengewicht = 435 g/m<sup>2</sup>, Temperatur = 21,75°C

BNCF 24 IMS unid.	FGV [%]	K1 [m <sup>2</sup> ]	K2 [m <sup>2</sup> ]	alpha	beta mw [°]	beta ende [°]	MW K1	Stdabw. K1	cv [%]	MW K2	Stdabw. K2	cv [%]	MW alpha	Stdabw. alpha	cv [%]	MW beta mw [°]	Stdabw. beta mw [°]	cv [%]	MW beta ende [°]	Stdabw. beta ende [°]	cv [%]
V-087	49,3%	3,36E-11	1,81E-11	0,54	2,81	1,22	3,14E-11	3,01E-12	9,6%	1,41E-11	2,95E-12	20,9%	0,45	0,08	16,9%	1,2	1,5	123,7%	1,1	1,6	147,7%
V-088		3,42E-11	1,27E-11	0,37	-0,33	-0,45															
V-089		3,02E-11	1,44E-11	0,48	-0,42	0,32															
V-090		2,78E-11	1,12E-11	0,40	2,23	3,32															
V-091	54,9%	1,51E-11	7,16E-12	0,48	1,72	0,88	1,52E-11	7,57E-13	5,0%	6,46E-12	5,02E-13	7,8%	0,43	0,03	8,1%	2,3	0,5	21,1%	0,6	0,6	101,7%
V-092		1,61E-11	6,50E-12	0,41	2,63	0,67															
V-093		1,42E-11	6,03E-12	0,42	2,06	1,27															
V-094		1,53E-11	6,16E-12	0,40	2,73	-0,26															
V-095	58,8%	1,11E-11	4,13E-12	0,37	2,64	0,95	8,70E-12	2,13E-12	24,5%	3,13E-12	6,83E-14	2,2%	0,40	0,03	7,1%	2,6	2,6	101,6%	1,0	1,4	151,0%
V-096																					
V-097		7,70E-12	3,18E-12	0,41	-0,06	-0,06															
V-098		7,26E-12	3,08E-12	0,43	5,19	1,99															