

IVW - Schriftenreihe Band 96

Institut für Verbundwerkstoffe GmbH - Kaiserslautern

Gunnar Rieber

**Einfluss von textilen Parametern
auf die Permeabilität von
Multifilamentgeweben
für Faserverbundkunststoffe**

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek

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

Bibliographic information published by Die Deutsche Bibliothek

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

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

Verlag: Institut für Verbundwerkstoffe GmbH

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

D 386

© Institut für Verbundwerkstoffe GmbH, Kaiserslautern 2011

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

Als Manuskript gedruckt. Printed in Germany.
ISSN 1615-021X
ISBN 978-3-934930-92-6

Einfluss von textilen Parametern auf die Permeabilität von Multifilamentgeweben für Faserverbundkunststoffe

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

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von Herrn

Gunnar Marius Rieber

aus Hamburg

Tag der mündlichen Prüfung: 30. September 2011

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Ulf Breuer

Referent: Prof. Dr.-Ing. Peter Mitschang

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Klaus Drechsler

D386

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand zwischen 2007 und 2010 während meiner Tätigkeit als Wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Preform/RTM-Gruppe am IVW.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Professor Dr.-Ing. Peter Mitschang für die Erstbegutachtung dieser Arbeit und dafür, dass ich meine Arbeiten in den letzten drei Jahren in einem ausgezeichneten Umfeld durchführen konnte. Herrn Professor Dr.-Ing. Klaus Drechsler vom LCC danke ich für die Zweitbegutachtung und die bereichernden Diskussionen an seinem Lehrstuhl in München. Unserem Institutsleiter, Herrn Professor Dr.-Ing. Ulf Breuer, danke ich für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Bei den Kollegen am IVW und insbesondere der Preform-RTM Gruppe bedanke ich mich für die Diskussionen, Unterstützung und Anerkennung meiner Arbeit.

Ein Teil dieser Arbeit wurde von der Deutschen Forschungsgesellschaft (Einfluss der Preformtechnik auf die Permeabilität und den Fließfrontverlauf bei Flüssigimprägnierverfahren [MI 647/15-1]) finanziell unterstützt und ein Teil vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (CarboRoad – Entwicklung von Hilfsstoffen, Halbzeugen und Prozessen zur Herstellung struktureller Bauteile aus CNT-verstärkten duroplastischen Faser-Kunststoff-Verbunden [03X0052F]). Hierfür bedanke ich mich herzlich.

Diese Arbeit baut auf den bisher am IVW erzielten Permeabilitätsergebnissen von Kissinger, Shafi, Stadtfeld und Stöven auf. Mit der Weiterentwicklung und Betreuung einer höchsten Ansprüchen genügenden Permeabilitätsmesszelle durch Herrn Dipl.-Ing. (FH) Holger Franz wurde diese Studie in diesem Umfang erst ermöglicht. Auch bedanken möchte ich mich für die zahlreichen Inputs von Automobil-OEMs, Gewebe- und Gelegeherstellern.

Inhalt

Nomenklatur	VII
Kurzfassung	XI
Abstract	XIII
1 Einleitung	1
1.1 Das Resin Transfer Molding-Verfahren	1
1.2 Zielsetzung der Arbeit	7
1.3 Aufbau der Arbeit	7
2 Stand der Forschung	9
2.1 Experimentelle Bestimmung der Ebenenpermeabilität.....	9
2.1.1 Das Gesetz von Darcy	9
2.1.2 Gesättigte und ungesättigte Bestimmung der Ebenenpermeabilität	10
2.1.3 Ein- und zweidimensionale Bestimmung der Ebenenpermeabilität .	15
2.1.4 Berechnung der ungesättigten zweidimensionalen Permeabilität....	17
2.2 Theoretische Betrachtungen bestehender Permeabilitätsmodelle	19
2.2.1 Kapillarmodelle	19
2.2.2 Textilmodelle	22
2.3 Einfluss der Injektionsgeschwindigkeit auf die Imprägnierqualität	26
2.4 Zusammenfassung Stand der Forschung.....	28
3 Einfluss des Kompaktierungsdruckes auf die Garnarchitektur in Geweben	31
3.1 Veränderung der Garnquerschnittsgeometrie mit steigendem Kompaktierungsdruck	31
3.2 Veränderung des Garnondulationswinkels mit steigendem Kompaktierungsdruck	39

3.3 Zusammenfassung Untersuchungen zur Veränderung der Garnarchitektur unter steigendem Kompaktierungsdruck	43
4 Materialien	45
4.1 Charakterisierung des Messfluids	45
4.1.1 Bestimmung der Viskosität	45
4.1.2 Bestimmung der Oberflächenspannung	46
4.2 Beschreibung der textilen Parameter und der Gewebeauswahl	47
4.2.1 Darstellung der Webart, des Titers und der Fadendichte.....	49
4.2.2 Aufstellung der Gewebe nach dem Titer	51
4.2.3 Aufstellung der Gewebe nach der Fadendichte	52
5 Methoden	53
5.1 Bestimmung des Crimp von Kett- und Schussgarn	53
5.2 Messung der Ebenenpermeabilität	54
6 Ergebnisse.....	57
6.1 Überprüfung der Eignung von Kozeny-Garman zur Vorhersage von Permeabilitätswerten.....	58
6.2 Einfluss des Finish auf die Permeabilität	59
6.3 Einfluss des Einzelfilamentdurchmessers auf die Gewebepерmeabilität ...	61
6.4 Einfluss der Lagenanzahl auf die Permeabilität.....	63
6.5 Zum Orientierungswinkel der Fließfrontellipsen	64
6.6 Einfluss der Webart auf die Permeabilität.....	66
6.7 Einfluss der Fadendichte und des Titers auf die Permeabilität	71
6.8 Einfluss des Crimp auf die Permeabilität	75
7 Diskussion.....	81
8 Zusammenfassung	89
Literatur	93

Anhang	109
Betreute Studien- und Diplomarbeiten.....	117
Publikationen	119
Lebenslauf.....	121

Nomenklatur

Abkürzungen

μ CT	Mikro-Computertomograf
2D-COMP	Cell for the Online Measurement of (2D-) Permeability
ARTM	Advanced Resin Transfer Molding
CAD	Computer Aided Design
CFD	Computer Fluid Dynamics
CFK	Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
CNT	Carbon Nanotubes
CRTM	Compression Resin Transfer Molding
DPRTM	Differential Pressure Resin Transfer Molding
FKV	Faserkunststoffverbund
FVG	Faservolumengehalt
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
HD-RTM	Hochdruck Resin Transfer Molding
ILSS	Interlaminare Scherfestigkeit
K	Anzahl der Einzelfilamente aus dem sich ein Garn zusammensetzt, in 1000
K	Permeabilität
K_1	Permeabilität in Richtung der 1. Hauptachse der Fließfrontellipse, höchster Ebenenpermeabilitätswert eines Textils
K_2	Permeabilität in Richtung der 2. Hauptachse der Fließfrontellipse, niedrigster Ebenenpermeabilitätswert eines Textils
K_3	Permeabilität in Dickenrichtung (z-Richtung)
PMMA	Polymethylmethacrylat
PUR	Polyurethan (zwei Komponentensystem hergestellt durch Mischung von Polyol und Isocyanat)
RIM	Reaction Injection Molding
RTM	Resin Transfer Molding
SLI	Single Line Injection
SQRTM	Same Quality Resin Transfer Molding

Formelzeichen

a	[m/s ²]	Längsbeschleunigung
A	[m ²]	Fläche
A	[m ²]	Querspantfläche
Ca	[1]	Kapillarzahl
Ca _{opt}	[1]	optimale Kapillarzahl
c _w	[1]	Luftwiderstandsbeiwert
D _E	[m]	benetzter Umfang (vierfacher hydraulischer Radius)
e _i	[1]	Massenfaktor für Getriebegang i
F	[1]	Formfaktor
F	[1]	Formfaktor (F=4 für das Fließen entlang eines Garns; F=2 für das Fließen quer zum Garn)
f _R	[1]	Rollwiderstandsbeiwert
g	[m/s ²]	Erdbeschleunigung
h _{Kett}	[mm]	Höhe des Kettgarns
h _{Matrix}	[mm]	Höhe der Matrix über dem Kettgarn
ILSS	[N/mm ²]	Interlaminare Scherfestigkeit
K	[m ²]	Permeabilität
K1	[m ²]	Permeabilität in der Ebene (Haupttrichtung 1)
K2	[m ²]	Permeabilität in der Ebene (Haupttrichtung 2)
K3	[m ²]	Permeabilität in Dickenrichtung (z-Richtung)
k _{K.-C.}	[1]	Kozeny-Carman Faktor
l	[m]	Länge
l _{0,Kett}	[mm]	Kehrwert der Fadendichte in Kettrichtung
l _f	[mm]	Abstand zweier Markierungen auf einem Garn nach Entnahme des Garns aus dem Gewebe
l _w	[mm]	Abstand zweier Markierungen auf einem Garn im Gewebe
m	[mm]	Hydraulischer Radius
m _f	[kg]	Fahrzeugleergewicht
m _{Zu}	[kg]	Zuladung
p	[Pa]	Druck
p(x)	[Pa]	Druck in Abhängigkeit von der Distanz zum Anguss
p ₀	[Pa]	Druck am Angusspunkt

p^c	[Pa]	Kapillardruck
Q	[m ³ /s]	Volumenstrom
r_f	[mm]	Filamentradius
St	[°]	Steigungswinkel
U	[mm]	Umfang
v	[m/s]	Fahrgeschwindigkeit
V_f	[1]	Faservolumengehalt; maximaler
$V_{f(\text{Garn})}$	[1]	Faservolumengehalt im Garn
$V_{f(\text{Laminat})}$	[1]	Faservolumengehalt im Laminat
$V_{f,\text{max}}$	[1]	maximal möglicher Faservolumengehalt
$V_{m(\text{Garn})}$	[1]	Matrixvolumengehalt im Garn
v_{opt}	[m/s]	optimale Injektionsgeschwindigkeit
v_w	[m/s]	Windgeschwindigkeit
x	[m]	Weg
x_0	[m]	Angussposition
x_f	[m]	Distanz der Fließfront vom Anguss
α_{Kont}	[°]	Kontaktwinkel
α_{SN}	[1]	Irrtumswahrscheinlichkeit eines Signifikanzniveaus
β	[°]	Orientierungswinkel der Fließfrontellipse
ε, e	[1]	Porosität (Kehrwert vom Faservolumengehalt)
μ	[Pa*s]	Viskosität
ρ_L	[kg/m ³]	Dichte der Umgebungsluft
σ	[mN/m]	Oberflächenspannung
Ω_{Schuss}	[°]	Ondulationswinkel in Schussrichtung

Kurzfassung

Das Ziel dieser Arbeit war, den Einfluss der textilen Parameter von Multifilamentgeweben auf die Permeabilität zu bestimmen. Einer sehr umfangreichen Permeabilitätsstudie wurden grundsätzliche Untersuchungen vorangestellt, die beantworten, mit welchen Einschränkungen textile Modelle und Kapillarmodelle zur Berechnung der Permeabilität eingesetzt werden können, worin sich Permeabilitätsergebnisse ermittelt über Punkt- und Linienanguss sowie gesättigte und ungesättigte Permeabilitätsmessungen unterscheiden und ob die Lagenanzahl einen Einfluss auf die Permeabilität eines Laminataufbaus hat. In der Hauptstudie wurden die Ebenenpermeabilitäten K_1 und K_2 von 19 Geweben auf einer Messzelle bestehend aus einem 160 mm dicken Ober- und Unterwerkzeug aus Aluminium mit integrierten Sensoren ermittelt. Festgestellt wurde, dass Leinwandgewebe eine höhere K_2 -Permeabilität als Köpergewebe und ein isotropes Fließverhalten haben. Es wurde ermittelt, dass je höher das Produkt aus Fadendichte und Titer, desto größer ist der negative Gradient der Permeabilitäts-Faservolumengehaltskurve. Vier sehr dichte Gewebe dieser Studie zeigen zudem die Besonderheit, dass die Richtung der K_1 -Permeabilität nicht mit der Kettrichtung des Gewebes übereinstimmt. Der abweichende Orientierungswinkel ist faservolumengehaltsabhängig und nähert sich stets 0° bei Faservolumengehalten von über 55 %. Es wird des Weiteren erklärt, warum Gewebe, die in Kett- und Schussrichtung gleich aufgebaut sind, ein anisotropes Fließverhalten zeigen. Dieser Effekt kann mit der Kettfadenspannung bei der Gewebeherstellung erklärt werden und über die Messung des Crimps ermittelt werden. Wurde eine große Differenz im Crimp zwischen dem Kett- und Schussgarn gemessen, war auch die Anisotropie höher. Neben der Kettfadenspannung bei der Herstellung wurden über ein D-optimal Screening der Titer und die Fadendichte als signifikante Einflussfaktoren auf den Crimp ermittelt.

Die Ergebnisse dieser Studie ermöglichen die Auswahl und das spezifische Design von Verstärkungstextilien mit bestimmten Imprägnier- und Permeabilitätseigenschaften.

Abstract

For the manufacturing of continuous fiber reinforced composites the textiles have to be impregnated with polymer matrix. The resistance of the textiles to the impregnation process is determined by the permeability. Knowledge about the permeability enables the design of a fast and reliable process by allowing the prediction of the flow directions, velocities and pressures.

There is very little stringently certain and generally valid information available about the influence of textile parameters on permeability. Existing capillary and textile models are not yet capable of simulating these effects. By using high resolution μ CT pictures of GFRPC laminates with three different fiber volume fractions, a decrease of the yarn cross sectional height with increasing fiber volume fraction was determined. Furthermore, an increase in the undulation angle of the weft and warp yarn with increasing fiber volume fraction due to nesting has been measured. Both effects are not yet taken into account in existing textile models. Capillary models are only capable of describing the fluid flow inside a yarn or in the cross direction of the yarn. For these two cases, the decrease in permeability with increasing fiber volume fraction is the same. The range of the permeability versus fiber volume fraction curves of complex shaped woven textiles or non-crimp fabrics is wide and can therefore not be described by the Kozeny-Carman capillary model.

In the empirical part of this study, 19 woven glass fiber textiles covering a specific variety of weaving type, linear density, yarn density and crimp were selected in order to determine their effects on in-plane permeability. The additional influencing parameters, namely finish and filament diameter have been left constant.

The measurements have been conducted on a stiff two-sided aluminium tool with eight linear capacitive sensors. Using a point injection, the major and minor in-plane permeability values, K_1 and K_2 , were determined. Differences between the unsaturated measurement and the saturated measurement only result due to the capillary effect. The capillary effect only takes place inside the yarn. A formula to calculate the

matrix volume inside the yarn by knowing the overall fiber volume fraction and the fiber volume fraction inside the yarn is presented. The matrix volume inside the yarn is only about 20 % - 30 % of the overall matrix volume for conventional textiles. Experimentally measured capillary pressures inside the yarn presented in the literature range from 0,06 bar to 0,6 bar. Therefore, capillary pressures can be neglected in the RTM process and for in-plane permeability measurements if higher injection pressures are chosen.

Before the experimental study with 19 woven textiles was conducted, a study investigating the effect of the number of layers on the permeability was carried out. Tests using between 5 and 21 layers measured at 4 different cavity heights ranging from 1.95 mm to 6 mm showed no significant differences in the determined K1 or K2 permeability values.

It was possible to explain the anisotropic flow behaviour of isotropically built up textiles using the crimp present in the weft and warp yarns. It was observed that a higher difference between the crimp in the weft and warp yarns gave a higher difference between the K1 and K2 permeability values. Different levels of crimp in the weft and warp direction originate from high warp yarn tensions during the production of a woven textile in addition to the weave geometry. A pattern was found to divide textiles into dense and open weave textiles. A generally valid relationship was found between the denseness of a textile and the slope of the permeability-fiber volume fraction line. The higher the product of the linear density of the yarns and the yarn density (picks/cm) of the woven textile, the higher the permeability at lower fiber volume fractions and the lower the permeability at higher fiber volume fractions. Furthermore, it was determined that in very dense woven textiles the direction of the highest permeability is not in line with the warp direction. This was the case for all three 8-harness satin and for one twill weave textile. In a comparison of three identically built up twill and satin weave textiles, it was found that the K2 permeability of twill weave textiles is significantly lower, meaning that twill weave textiles are more anisotropic.

Furthermore, the influence of the injection pressure on the impregnation quality is described. High impregnation pressures lead to a faster flow front advancement between the yarns than inside the yarns. This results in air entrapment. Air entrapment can be addressed by high dwell pressures at the end of the injection.

The results of this study allow the selection and tailoring of woven textiles with specific properties, for example very low or isotropic, permeabilities.

1 Einleitung

1.1 Das Resin Transfer Molding-Verfahren

Gewichtsreduzierung ist nicht nur in der Luft- und Raumfahrt von hoher Bedeutung, auch beim Automobil kann die Reichweite durch den Einsatz leichterer Materialien gesteigert werden. Drei der vier wirkenden Widerstände, P , beim Automobil sind gewichtsabhängig. Diese sind in der Reihenfolge Beschleunigungs-, Steigungs-, Roll- und Luftwiderstand in Formel 1.1 aufgeführt [1]:

$$P = (e_i \times m_F + m_{Zu}) \times a \times v + (m_F + m_{Zu}) \times g \times \sin \alpha_{St} \times v + (m_F + m_{Zu}) \times g \times \cos \alpha_{St} \times f_R \times v + 0,5 \times \rho_L \times c_w \times A(v - v_w)^2 \times v \quad (1.1)$$

f_R : Rollwiderstandsbeiwert

ρ_L : Dichte der Umgebungsluft

c_w : Luftwiderstandsbeiwert

A : Querspanfläche

m_{Zu} : Zuladung

a : Längsbeschleunigung

g : Erdbeschleunigung

α_{St} : Steigungswinkel

v : Fahrgeschwindigkeit

v_w : Windgeschwindigkeit

e_i : Massenfaktor für Gang i

m_f : Fahrzeugleergewicht

Die Reichweite eines Automobils kann besonders im Stadtverkehr und bei Steigung durch gewichtsreduzierende Maßnahmen erhöht werden. Bei einem solchen Streckenprofil spielen die drei gewichtsabhängigen Kräfte, die auf einen PKW wirken, eine große Rolle [2].

Der nachfolgenden Abbildung kann entnommen werden, dass im Stadtverkehr beim Audi 100 der Anteil des Luftwiderstands lediglich 10 % beträgt. Die gewichtsabhängigen Kräfte Reibung und Beschleunigung addieren sich zu 90 %. Würde zusätzlich die Steigung berücksichtigt, die in einer Stadt wie San Francisco oder Kaiserslautern gegeben ist, wäre der gewichtsabhängige Anteil noch größer.

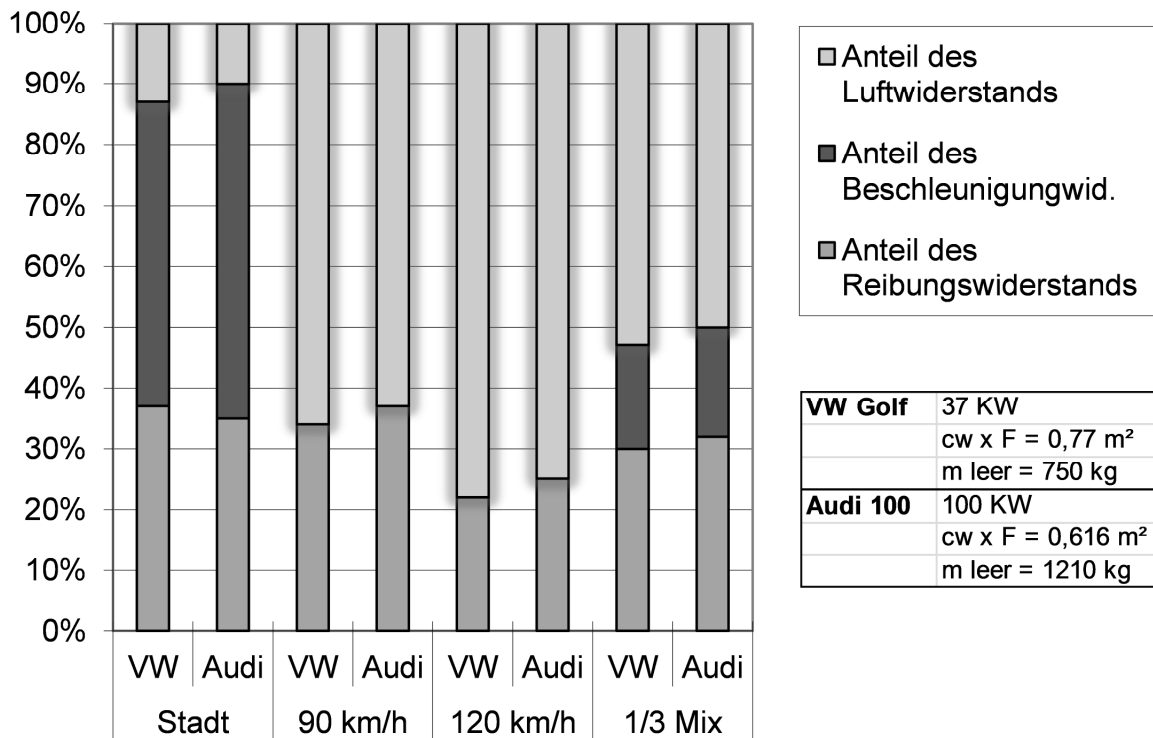


Abbildung 1.1: Anteile der Reibung, Beschleunigung und des Luftwiderstands am Gesamtenergiebedarf zweier Automobile im Vergleich aufgeteilt nach Stadt, Land, Autobahn und Mix (Quelle: [2], ähnlich auch in [3])

In einem Automobil verteilt sich das Gewicht auf die Karosserie, das Fahrwerk, das Aggregat, die Elektronik und die Ausstattung. Der Anteil von Karosserie (inklusive Exterieur) und Fahrwerk beträgt in Abhängigkeit von der Fahrzeugklasse 58 % (VW Phaeton) bis 67 % (VW Golf IV) [4]. Durch konsequenten Leichtbau ist eine Gewichtsreduktion von Karosserie und Fahrwerk von über 30 % möglich. Das entspricht einer Gesamtfahrzeuggewichtsreduktion von 20 %. Aus Abbildung 1.1 lässt sich errechnen, dass mit einer Reduzierung des Gewichts um 20 %, der Treibstoffverbrauch im Stadtverkehr um 15 % gesenkt werden kann.

Bereits in den letzten drei Jahrzehnten wurde in der Automobilindustrie durch den Einsatz von endlosfaserverstärkten Verbundwerkstoffen bei Supersportwagen Gewicht eingespart und so das Leistungsgewicht (kg/kW) gesenkt und die Fahrdynamik, z.B. durch Schwerpunktsenkung, verbessert. Für Elektrofahrzeuge bekommt der Leichtbau einen zusätzlichen Stellenwert dadurch, dass pro eingespartem Kilogramm Fahrzeugmasse Batteriesystemkosten (derzeit ca. 1000 €/kWh) eingespart werden

können. Diese werden von Eckstein, Schmitt und Hartmann mit 8 € bis 18 € je eingespartem Kilogramm angegeben [5]. Diese Werte decken sich mit dem aufgeführten Wert von 14 € je eingespartem Kilogramm von Drechsler [6]. Für die jüngsten Bestrebungen, Elektrofahrzeuge in hohen Stückzahlen herzustellen, musste ein großserientauglicher Prozess gefunden werden. Das Resin Transfer Molding (RTM)-Verfahren ist für die Automobilindustrie ein geeignetes Verfahren, um CFK-Bauteile in Stückzahlen von über 20.000 herzustellen. Außerdem erlaubt der RTM-Prozess einen hohen Grad der Faserorientierung und komplex geformte Bauteile mit lokalen Aufdickungen [7]. Wurden 1997 die Zykluszeiten beim RTM-Verfahren noch mit 5-30 min und der Injektionsdruck mit 2,5 bar angegeben [8], werden heute durch Prozessanpassung und Drücke von über 110 bar Injektionszeiten von unter 1 min für quadratmetergroße Bauteile erreicht. Das RTM-Verfahren ist verwandt mit dem Reaction Injection Molding-Verfahren (RIM), mit dem seit Jahrzehnten Bauteile in Stückzahlen von über 100.000 hergestellt werden. Ein solches RIM-Bauteil ist z.B. die Instrumententafel vom Audi A4, welches mit einer Stückzahl von 1800/Tag bei der Firma Peguform mit Krauss Maffei Werkzeugen und Injektionsanlagen auf einem sechsfach Rundtisch produziert wird [9]. Die Polyurethan-Injektionsanlagen können mit wenigen Modifikationen (u.a. Verkleinerung des Härterbehälters und der Härterpumpe) für das RTM-Verfahren eingesetzt werden [10].

Das RTM-Verfahren zeichnet sich im Vergleich zu anderen FKV-Verfahren durch folgende Eigenschaften aus:

- Geringe Halbzeugkosten - die Kosten für ein Kilogramm Kohlenstofffasertextilien liegen zwischen ca. 60 € (50 K Gelege) und ca. 100 € (6 K Gewebe). High-End-Ausgangshalbzeuge für andere Prozesse beinhalten bereits zusätzliche Imprägnierprozesskosten zur Prepregherstellung von ca. 25 €/kg oder zur Organoblechherstellung von über 35 €/kg exklusive Matrixkosten.
- Durch den geringen Schrumpf der Epoxidharze können im Vergleich zu anderen Kunststoffprozessen mit dem RTM-Verfahren beidseitig höchste Oberflächenqualitäten und Bauteilgenauigkeiten erzielt werden [11].

- Schnellere Aushärtungszyklen durch Wärmeleitung über Konduktion im Gegensatz zu Konvektion beim Autoklav-Verfahren.
- Wechselnde Wanddicken und lokale Verstärkungen erfordern keine zusätzlichen Prozessschritte, wie z.B. beim Thermformverfahren.
- Die RTM-Bauteile sind gegenüber Thermoplastbauteilen besser verklebbar.
- Durch kleinere zulässige Radien sind komplexere Bauteile möglich. Über teilbare Werkzeuge sind Hinterschneidungen lösbar.
- Die trockenen Preforms können außerhalb des Konsolidierungswerkzeugs vorbereitet werden. Die trockenen Gewebe oder Gelege müssen nicht zwischenkompaktiert werden, wie es bei Prepreg nach mindestens jeder 5. Lage der Fall ist.

Ein Nachteil des RTM-Verfahrens ist, dass aufgrund der Viskositätsbegrenzungen keine schlagzähen Harze, wie bei der Prepregherstellung, im konventionellen RTM-Verfahren verarbeitet werden können. Um auch über das RTM-Verfahren hochviskose Harze verarbeiten zu können, wurden Varianten des klassischen RTM-Verfahrens entwickelt. Das Differential Pressure RTM (DPRTM)-Verfahren und das Advanced oder auch Compression RTM (ARTM oder CRTM)-Verfahren verkürzen zudem die Injektionszeit [12, 13]. Beim DPRTM-Verfahren handelt es sich um ein RTM-Verfahren im Autoklav. Für die Injektion wird der Autoklavdruck abgesenkt, so dass der anliegende Kompaktierungsdruck im Vakuumaufbau gesenkt wird. Dadurch erhöht sich die Permeabilität. Wird sowohl die Evakuierung als auch die Injektion über eine einzige Leitung vorgenommen, wird von einem Single Line Injection (SLI) Prozess [14, 15] gesprochen. Beim ARTM-Verfahren wird die Permeabilitätserhöhung durch ein Öffnen des RTM-Werkzeugs um ein paar Zehntelmillimeter erreicht. Dieses Verfahren schränkt die Bauteilkomplexität ein. Beim Same Quality RTM (SQRTM) wird die Verarbeitung hochviskoser, schlagzäher Harze ermöglicht, indem das RTM-Werkzeug mit Prepreg bestückt wird. Mit einem Prepregharz werden noch offene Kavitäten gefüllt und ein Kompaktierungsdruck auf den Aufbau ausgeübt. Die Pro-

zesszeiten sind kürzer gegenüber dem sonst verwendeten Prepreg Autoklav-Verfahren, da das Laminat beidseitig über Konduktion erwärmt wird.

Ein weiterer Prozess, welcher es ebenfalls erlaubt hochviskose und Nanopartikel-dotierte Harze zu injizieren ohne auf Prepreg oder Autoklav angewiesen zu sein oder die Bauteilkomplexität einzugrenzen, ist der Fast Inflatable Bladder (FIB)-Prozess [16]. Die Besonderheit liegt in einem wiederverwendbaren Kern mit integrierten Fließkanälen, die über Druckbeaufschlagung oder durch thermische Ausdehnung schließbar sind (siehe Abbildung 1.2). Dieses Verfahren ermöglicht den Einsatz von Fließkanälen, ohne dass matrixreiche Stellen im Bauteil verbleiben.

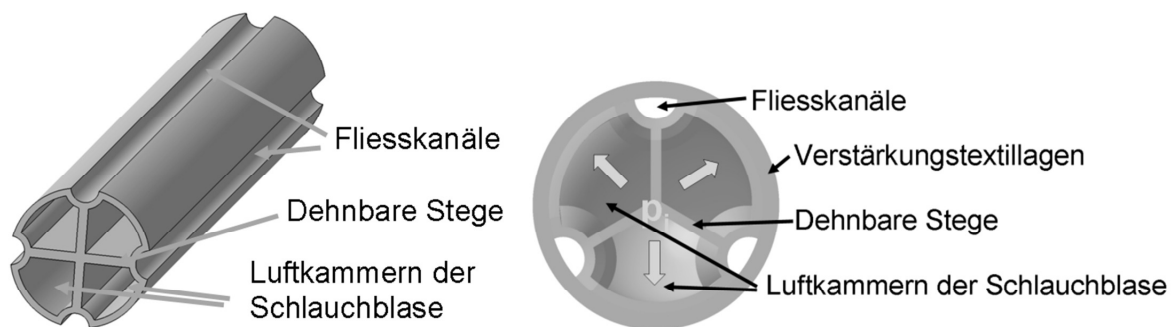


Abbildung 1.2: Schlauchblaskern mit schließbaren Fließkanälen durch dehnbare Stege (4-Steg und 3-Stegvariante)

Um lunkerfreie Lamine, kurze Injektionszeiten und hohe Prozesssicherheit im RTM-Prozess auch bei komplexeren Bauteilen zu gewährleisten, muss vor der Konstruktion eines RTM-Werkzeugs eine Fließsimulation durchgeführt werden. Anhand einer Fließsimulation kann die optimale Anguss- und Entlüftungsstrategie für einen robusten Injektionsprozess entwickelt werden.

Wichtigster Eingangsparameter für die Fließsimulation ist die Permeabilität. Die Permeabilität beschreibt, wie durchlässig das Verstärkungstextil für das unter Druck injizierte Harz ist. Sie bestimmt bei gegebenem Druckgradienten und gegebener Viskosität die Fließgeschwindigkeit durch ein poröses Medium. Bei Flüssigimprägnierverfahren ist das poröse Medium das Verstärkungstextil, z.B. das Gelege oder Gewebe. Bisher ist es notwendig in zeitaufwendigen Messungen die Permeabilitäten der Verstärkungstextilien zu messen. Der Einfluss textiler Parameter, die im technischen Datenblatt des Verstärkungstextils angegeben sind, ist nicht bekannt. Bisherige Stu-

dien zur Frage des Einflusses textiler Parameter kommen nicht zu eindeutigen oder allgemeingültigen Aussagen [17-21]. Dies ist in den meisten Studien darauf zurückzuführen, dass sich die Textilien in mehr als nur einem Parameter unterscheiden oder ein Parameter nur bei einem Einstellungswert verglichen wurde. Ziel muss es sein Gewebematerial auszuwählen, welches sich nur in definierten textilen Parametern unterscheidet und gleichzeitig einen großen Parameterbereich abdeckt.

Bei bekanntem Einfluss der textilen Parameter können Verstärkungstextilien hoher Permeabilität oder mit isotropen Permeabilitätsverhalten ausgewählt werden, um kurze Injektionszeiten oder robuste Injektionsprozesse zu gewährleisten. Eine vollends quantitative Beschreibung der Permeabilitäten von Verstärkungstextilien aufgrund der textilen Parameter würde die Entwicklungszeiten für RTM-Bauteile reduzieren, da Verstärkungstextilien mit Zieleigenschaften nicht in empirischen Studien gesucht werden müssten. Kosten- und zeitaufwendige Praxisversuche könnten umgangen werden.

Die Kenntnis des Einflusses der textilen Parameter auf die Permeabilität erlaubt zudem eine Abschätzung der Ausfilterungsstärke, wenn z.B. nanopartikelgefüllte Harze injiziert werden. In Arbeiten zur Ausfilterungsbetrachtung von Carbon Nanotubes (CNT) beim RTM-Verfahren wurde ermittelt, dass es eine Korrelation zwischen dem Grad der Ausfilterung und der Permeabilität eines Gewebes gibt [22-26]. So sind diese Erkenntnisse auch von Interesse für die Verarbeitung von CNT dotierten Harzen über Faserverbundwerkstoff-Verfahren [22, 23, 27-42]. CNTs können GFK-Bauteile leitfähig machen, um den Bauteilen antistatische Eigenschaften zu verleihen oder den kathodischen Tauchlackierungsprozess und Structural Health Monitoring [43-45] zu ermöglichen. Des Weiteren wird die Ermüdungsfestigkeit von GFK-Bauteilen durch CNTs erhöht [45-47].

1.2 Zielsetzung der Arbeit

Ziel dieser Arbeit ist es, den Einfluss textiler Parameter von Geweben auf die Permeabilität in Abhängigkeit vom Faservolumengehalt zu ermitteln. Folgende Fragen sollen mit diesen Arbeiten beantwortet werden können:

- Welchen Einfluss hat die Webart auf die Permeabilität?
- Welchen Einfluss haben der Titer und die Fadendichte auf die Permeabilität?
- Welchen Einfluss hat der Crimp von Kett- und Schussgarn auf die Permeabilität?

Weiterhin wird in experimentellen Untersuchungen geprüft, ob sich bestehende Textil- und Kapillarmodelle zur Beantwortung dieser Fragen eignen.

Um die Allgemeingültigkeit der Permeabilitätsergebnisse sicherzustellen, wird eine Studie zur Untersuchung des Einflusses der Lagenanzahl bei gleichem Faservolumengehalt auf die Permeabilität vorangestellt.

1.3 Aufbau der Arbeit

Im Kapitel ‚Stand der Forschung‘ werden die gesättigte und ungesättigte Permeabilitätsmessung beschrieben, miteinander verglichen und die aufgrund des Kapillareffekts resultierenden Unterschiede diskutiert. Des Weiteren wird in diesem Kapitel die ein- und zweidimensionale Messung der Permeabilität vor dem Hintergrund des unterschiedlichen Druckgefälles diskutiert. Abschließend werden Randbedingungen aufgeführt, die für eine valide Permeabilitätsmessung zwingend erforderlich sind und die Berechnung der Permeabilität für den ungesättigten zweidimensionalen Fall beschrieben.

Unter 2.2 wird beschrieben, welche bestehenden Kapillar- und Textilmodelle zur theoretischen Ermittlung der Permeabilität in der Literatur vorgestellt werden. Abschließend zum Stand der Forschung wird der Einfluss der Injektionsgeschwindigkeit auf die Imprägnierqualität diskutiert. Um den Gültigkeitsbereich bestehender Textilmodelle zu überprüfen und zu bestimmen, welche Vereinfachungen bei der Modellierung

von Multifilamentgarn-Geweben zur Permeabilitätsbestimmung über CFD-Simulationen valide sind, wird im 3. Kapitel die Veränderung der Garnarchitektur in Abhängigkeit vom Kompaktierungsdruck anhand einer μ -CT-Studie untersucht. Aufgezeigt wird, wie sich die Garnquerschnittsform und der Ondulationswinkel von Kett- und Schussgarn mit steigendem Faservolumengehalt verändern.

Die permeabilitätsbeeinflussenden Parameter werden in dieser Arbeit durch empirische Studien ermittelt. Im 4. Kapitel, Materialien, wird die Messflüssigkeitscharakterisierung durch Viskositäts- und Oberflächenspannungsmessungen beschrieben. Des Weiteren werden in diesem Kapitel die für diese Studie ausgewählten Gewebe vorgestellt. Im Kapitel 5 werden die Methoden zur Crimp- und Permeabilitätsmessung aufgeführt. Die Ergebnisse werden im 6. Kapitel sortiert nach den textilen Einflussparametern beschrieben.

2 Stand der Forschung

In jedem Prozess zur Herstellung endlosfaserverstärkter Faserkunststoffverbunde gibt es den Schritt der Imprägnierung der Fasern mit der Matrix. Die Qualität dieser Imprägnierung hat entscheidenden Einfluss auf die spätere Bauteilqualität. Wie leicht die Matrix bei gegebener Viskosität in das Verstärkungstextil gedrückt werden kann, wird durch die Permeabilität des Verstärkungstextilaufbaus bestimmt.

2.1 Experimentelle Bestimmung der Ebenenpermeabilität

Nachfolgend wird das Gesetz von Darcy beschrieben. Außerdem werden Unterschiede in der gesättigten und ungesättigten Permeabilitätsmessung aufgrund des Kapillareffekts aufgezeigt und die Berechnung der Permeabilität in Textilebenenrichtung (Ebenenpermeabilität) schematisch beschrieben.

2.1.1 Das Gesetz von Darcy

Mit dem Gesetz von Darcy lässt sich die Fließgeschwindigkeit der Matrix in einem Textil beschreiben. Die Formel findet bei Injektions- und Infusionsverfahren Anwendung und ist ein Haupteingangsparameter für die Simulation von Fließprozessen.

Die Eignung und Validität des Gesetzes von Darcy zur Bestimmung der Permeabilität K von Verstärkungstextilien wurde u.a. von Gebart [48] und Adams und Rebenfeld [49] beschrieben. Nach Darcy errechnet sich die Fließgeschwindigkeit durch eine poröse Struktur wie folgt:

$$v = \frac{K}{\eta} \times \frac{\partial p}{\partial l} \quad (2.1)$$

Hierbei ist v die übers Volumen gemittelte Geschwindigkeit und p der Druck; η ist die Viskosität der Messflüssigkeit, l ist die Fließlänge. Dieser Zusammenhang wurde von Darcy empirisch ermittelt. (Die Arbeiten sind im Original publiziert in der Schrift Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon [50]. Da die Viskosität von Wasser bei Raumtemperatur eine Millipascalsekunde beträgt, war der Viskositätsterm ursprünglich nicht in der Darcy-Formel enthalten.) Später konnte gezeigt werden, dass es sich

um eine vereinfachte Navier-Stokes Gleichung, gekürzt um Trägheits- und Schwerkraft, handelt [51]. Das Gesetz von Darcy wird für den Fall einer Injektion unter konstantem Volumenstrom ausführlich von Mitschang, Stadtfeld, Stöven et al. [7] dargestellt. Bear [52] nennt eine Reynoldszahl von 1 als Obergrenze, bei der die Darcy Gleichung noch Gültigkeit besitzt. Michaeli et al. [53] haben abgeschätzt, dass die Reynoldszahl beim RTM-Verfahren im Bereich von 0,1 liegt.

2.1.2 Gesättigte und ungesättigte Bestimmung der Ebenenpermeabilität

Bei der ungesättigten Messung wird der tatsächliche Imprägnierungsschritt der Fertigung gut abgebildet [54]. Im ungesättigten Fall wird die Messflüssigkeit in ein trockenes Textil mit konstantem Druck injiziert, gemessen wird die Fließfrontgeschwindigkeit. Im gesättigten Fall ist das Textil bereits vollkommen getränkt mit der Messflüssigkeit. Das in der Kavität liegende Textil wird mit konstantem Volumenstrom durchströmt und der Druckabfall gemessen. Untersuchungen zum Unterschied zwischen der gesättigten und ungesättigten Permeabilität wurden bisher nur bei der Ebenenpermeabilität betrachtet. Lundström et al. haben in einer Ringuntersuchung an drei Instituten keinen signifikanten Unterschied zwischen der gesättigten und ungesättigten Permeabilität gemessen [55]. Im Gegensatz dazu zitieren Elbouazzaoui, Drapier und Henrat [56] in Ihrer Arbeit Werte für das Verhältnis $K_{\text{ungesättigt}}/K_{\text{gesättigt}}$ von 0,4 bis 4. Unterschiede zwischen der gesättigten und ungesättigten Permeabilität können nur durch den im ungesättigten Fall vorhandenen Kapillardruck resultieren. Bei der gesättigten Methode findet kein Fließen in den Garnen mehr statt, da diese bereits vollkommen gefüllt sind. Der Anteil der Matrix, der sich im Garn befindet, beträgt zwischen 25 % und 30 % (Formel 2.14). Diese 25 % bis 30 % können zu einem Unterschied zwischen der gesättigten und ungesättigten Permeabilität führen.

Foley, Gutowski und Skartsis, Khomami und Kardos schreiben in ihren Arbeiten, dass der Kapillardruck bei der Durchführung von Ebenenpermeabilitätsmessungen zu vernachlässigen ist [57, 58]. Weitzenböck erklärt ebenfalls, dass die Druckdifferenz beim RTM-Verfahren derart groß sei, dass der Kapillardruck zu vernachlässigen ist [59].

Eine pauschale, allgemeingültige Aussage gibt es zu dieser Frage nicht, denn sie ist abhängig von:

- dem Kapillardruck im Garn (Der Kapillardruck, der sich zwischen den Garnen ergibt, kann vernachlässigt werden, da der Kapillardruck linear mit dem Abstand des Kapillarspalts abnimmt. Diesen Zusammenhang beschreibt die Young-Laplace Gleichung, z.B. [60]),
- der Art des Angusses (sie bestimmt den Druckabfall) und
- der Höhe des Injektionsdruckes.

Ahn, Seferis und Berg [61] beschreiben durch experimentelle Untersuchungen, dass der Kapillardruck mit steigendem Faservolumengehalt zunimmt. Für einen Faservolumengehalt von 70 % messen sie einen Kapillardruck von 0,13 bar im Garn. Für einen Faservolumengehalt nahe der maximalen Packungsdichte von über 85 % wird ein Kapillardruck von 0,37 bar gemessen. In einer theoretischen Studie ermitteln Foley und Gillespie einen maximalen Kapillardruck von 0,6 bar [62]. Han, Lee und Rice haben über die Zentrifugenmethode ebenfalls einen maximalen Kapillardruck von 0,6 bar bestimmt. Hierzu haben Han, Lee und Rice das Aufsteigen von Polyol in Glassfaserrovings über die Kapillarkraft betrachtet [63]. Amico und Lekakou haben Kapillardrücke bei Versuchen im RTM-Werkzeug bestimmt [64]. Sie geben ermittelte Kapillardrücke von 0,06 – 0,08 bar an. Einfluss auf den Kapillardruck haben die Oberflächenspannung der Matrix σ , der von Faser und Matrix abhängige Kontaktwinkel α , und der benetzte Umfang, D_E [60]:

$$p^c = \frac{4 \times \sigma \times \cos(\alpha_{Kont})}{D_E} \quad (2.2)$$

Dabei errechnet sich der benetzte Umfang D_E zu [65]:

$$D_E = \frac{8 \times r_f \times \varepsilon}{F \times (1 - \varepsilon)} \quad (2.3)$$

ε beschreibt die Porosität, r_f den Filamentradius und F ist ein Formfaktor. $F=4$ für das Fließen entlang des Garns und $F=2$ für das Fließen quer zum Garn. Der benetzte Umfang ist der vierfache hydraulische Radius (vgl. Formel (2.10)).

Nachfolgend wird die Berechnung des Kapillardruckes mit beispielhaften Werten aufgeführt. Wird von einem Faservolumengehalt im Garn von 70 %, einem Einzel-filamentdurchmesser von 9 μm und einem F-Wert von 4 ausgegangen, ergibt sich der äquivalente benetzte Umfang, D_E , zu:

$$D_E = \frac{8 \times 0,0045 \text{ mm} \times 0,30}{4 \times (1 - 0,30)} = 0,0038 \quad (2.4)$$

Das resultiert bei einer Oberflächenspannung von 32 mN/m (Permeabilitätsmessfluid) und einem Kontaktwinkel von $17,5^\circ$ [66] in einem Kapillardruck von 0,32 bar:

$$p^c = \frac{4 \times 32 \frac{\text{mN}}{\text{m}} \times \cos(17,5^\circ)}{0,0038} = 0,32 \text{ bar} \quad (2.5)$$

Diese Berechnung wurde für den Kapillardruck in einem Garn durchgeführt. Gemittelt über ein Gewebe liegt der zu berücksichtigende Kapillardruck in diesem Fall bei ca. 0,15 bar. Des Weiteren ist bei dem Vergleich der gesättigt und ungesättigt vorgenommenen Permeabilitätsmessung das Angusszenario der ungesättigten Permeabilitätsmessung zu berücksichtigen. Weitzenböck [67] beschreibt, wie das Angusszenario den Druckgradienten bestimmt: So sinkt der Druck, P , in Abhängigkeit von der Distanz x zur Angussposition, x_0 , beim eindimensionalen Fließen linear nach der folgenden Beziehung:

$$p(x)_{1D} = p_0 \frac{x_f - x}{x_f - x_0} \quad (2.6)$$

Der Druck an der Angussposition (x_0) ist mit P_0 beschrieben und die Distanz der Fließfront von der Angussposition mit x_f . Der Druck beim zweidimensionalen Fließen über einen Punktanguss in alle Ebenenrichtungen gehorcht der Beziehung:

$$p(x)_{2D} = p_0 \frac{\ln\left(\frac{x}{x_f}\right)}{\ln\left(\frac{x_0}{x_f}\right)} \quad (2.7)$$

Und beim dreidimensionalen Fließen über einen Punktanguss gehorcht der Druckabfall der folgenden Beziehung:

$$p(x)_{3D} = p_0 \frac{x_f x_0}{x_f - x_0} \left(\frac{1}{x} - \frac{1}{x_f} \right). \quad (2.8)$$

Abbildung 2.1 zeigt die verschiedenen Druckgefälle eines eindimensionalen Versuchs mit Linienanguss, eines zweidimensionalen Versuchs mit Punktanguss und eines dreidimensionalen Versuchs mit Punktanguss. Die Verläufe gelten für den Zeitpunkt bei dem der Fließfrontradius dem 33-fachen des Angussradius entspricht.

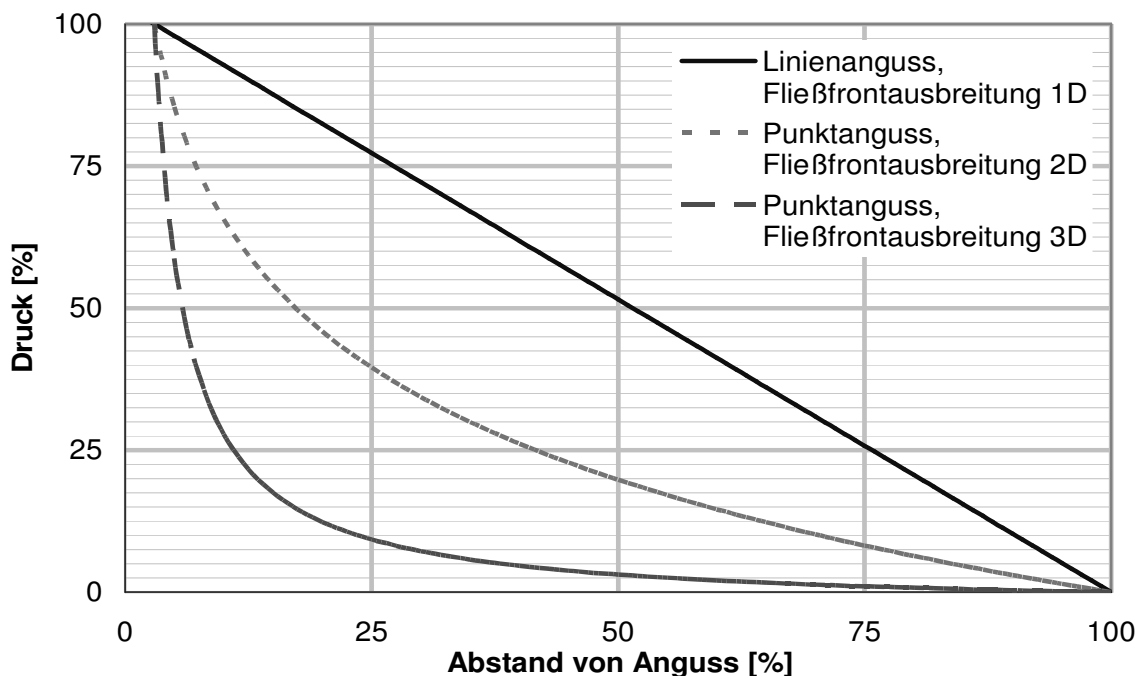


Abbildung 2.1: Abfall des Injektionsdruckes mit steigendem Abstand vom Anguss, dargestellt für die eindimensionale Permeabilitätsmessung, die Ebenenpermeabilitätsmessung über einen Punktanguss und der dreidimensionalen Permeabilitätsmessung mit halbsphärischer Fließfrontausbreitung

Besonders stark ist der Abfall des Drucks beim Punktanguss und einer halbsphärischen Fließfrontausbreitung. Wenn die Fließfrontdistanz dem 4-fachen Angussradius entspricht, ist der Druck bereits auf unter 10 % gefallen. Dieser Druckabfall wird in der Permeabilitätsberechnung berücksichtigt. Nicht berücksichtigt wird jedoch, dass das Fließen kapillardruck- und nicht mehr injektionsdruckgetrieben ist, wenn ein

Druck von unter ca. 0,15 bar anliegt. Dieser Sachverhalt ist bei 3D-Permeabilitätsmessungen zu berücksichtigen [67]. Bei der Ebenenpermeabilitätsmessung (mittlere Linie im Diagramm) ist der Abfall weniger dramatisch. Jedoch muss auch hier die Druckabfallkurve berücksichtigt werden. Um einen Einfluss des Kapillardrucks auf die Permeabilitätsmessung zu verhindern, sollte der Injektionsdruck so eingestellt werden, dass nur nahe der Fließfront der anliegende Injektionsdruck unterhalb des Kapillardruckes fällt.

Je geringer die Permeabilität, desto höher der Druckabfall in dem Gewebe. Der Einfluss des Kapillardrucks ist also gewebeabhängig. Bei offenen Geweben (Fadendichte < 5 /cm) mit dicken Garnen (Titer > 408 tex) und hohen Faservolumengehalten wird der Einfluss maximal sein. Bei konventionellen Geweben eher marginal.

In den meisten Veröffentlichungen wird die Ebenenpermeabilität ungesättigt bestimmt. Ungesättigt kann die Permeabilität über einen Linienanguss in eine Textilrichtung oder über einen Punktanguss in alle Ebenenrichtungen gleichzeitig bestimmt werden.

Wenn der Kapillardruck einen signifikanten Einfluss auf die Ebenenpermeabilitätsmessung hätte, müssten unterschiedliche Injektionsdrücke und unterschiedliche Messflüssigkeiten in unterschiedlichen Permeabilitätsergebnissen resultieren. In dieser Studie wurden mit Injektionsdrücken von 1 bis 4 bar gleiche Permeabilitäten gemessen. Die Druckunabhängigkeit wird bestätigt durch Lundström et al. [55]. Hammond und Loos haben in einer Permeabilitätsstudie mit unterschiedlichen Flüssigkeiten gleiche Permeabilitätsergebnisse erhalten [68]. Adams und Rebenfeld berichten ebenfalls, dass die Garntränkung keinen Einfluss auf die gemessenen Permeabilitätsergebnisse hat [49]. Unabhängig von der Geringfügigkeit des Einflusses des Kapillardrucks, wird im Kapitel Materialien unter 4.1.2 gezeigt, dass die für diese Studie verwendete Permeabilitätsmessflüssigkeit eine Epoxidharzen ähnliche Oberflächenspannung besitzt. Die Oberflächenspannung steht in engem Zusammenhang mit dem Kapillardruck (Formel (2.2)).

2.1.3 Ein- und zweidimensionale Bestimmung der Ebenenpermeabilität

Loendersloot [69], Shafi [18] und Flemming, Ziegman und Roth [51] beschreiben den Vergleich der ein- und zweidimensionalen Bestimmung der Ebenenpermeabilität. Bei der eindimensionalen Permeabilitätsmessung über einen Linienanguss ist die Berechnung der Permeabilität einfach durchzuführen. Ein Problem bei der eindimensionalen Messung ist die Vermeidung von Race Tracking zwischen Werkzeugkante und dem Textil. Für eine valide Messung muss eine gerade Fließfrontausbreitung erreicht werden. Das ist nur dann möglich, wenn das Textil exakt auf Stoß mit der Werkzeugwand liegt. Liegt das Textil nicht ganz am Werkzeug an, kommt es zu Race Tracking. Wird das Textil gequetscht ist der Faservolumengehalt an dieser Stelle höher, die Permeabilität niedriger und die Fließfront eilt nach. Ist die K1-Richtung bei einem Textilaufbau nicht bekannt, muss bei einer 1D-Messung in drei Richtungen gemessen werden, bevor die K1- und K2-Permeabilität eindeutig bestimmt ist [70]. Unabhängig von der Orientierung der Ellipse beschreibt K1 die höchste Permeabilität in Ebenenrichtung eines Textils und K2 die niedrigste Permeabilität, vgl. Abbildung 2.2. Das Verhältnis der K2- zur K1-Permeabilität wird als Anisotropie bezeichnet. Bei einem Anisotropiewert von 0,1 ist die Fließfront eine sehr schmale Ellipse, bei einem Anisotropiewert von 1 ist die Fließfront kreisrund.

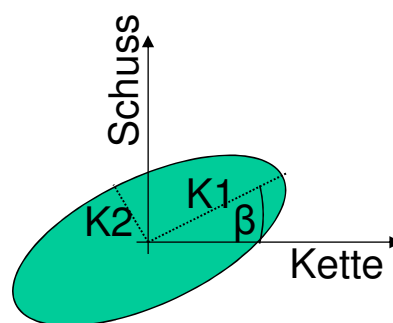


Abbildung 2.2: Fließfrontellipse, die sich bei einem Punktanguss und ebener Fließfrontausbreitung ergibt mit Definition der K1- und K2- Permeabilität und dem Orientierungswinkel

Der Orientierungswinkel, β , der Fließfrontellipse beschreibt die Orientierung der K1-Permeabilität. Aus den drei gemessenen Permeabilitäten und deren Winkeln werden über geometrische Beziehungen die Hauptpermeabilitäten, K1 und K2, und deren Orientierungswinkel berechnet [70]. In dieser Arbeit werden Ergebnisse von 200 Permeabilitätsmessungen vorgestellt. Im 1D-Versuch hätte dies für unsere Studie

600 Versuche bedeutet, um die gleiche Anzahl an Permeabilitätswerten zu erhalten. Bei der zweidimensionalen Permeabilitätsbestimmung ist eine aufwändigere Sensortechnik erforderlich und auch die Berechnung der Permeabilität ist aufgrund des logarithmischen Druckgefälles und der richtungsabhängigen Fließfrontausbreitung komplizierter. Zudem muss das mittige Angussloch exakt ins zu messende Halbzeug (im Idealfall mit einer industriellen Stanzmaschine) eingebracht werden.

Unabhängig von der ein- oder zweidimensionalen Permeabilitätsbestimmung sind folgende Anforderungen zwingend einzuhalten:

- Die zu messende Preform mit finaler Lagenanzahl sollte computergesteuert zugeschnitten werden.
- Die Werkzeugsteifigkeit sollte weniger als 30 μm Durchbiegung bei 10 bar Kompaktierungsdruck und 6 bar Injektionsdruck zulassen.
- Das Angussloch sollte exakt in den Textilaufbau eingebracht werden.
- Die Sensoren sollten im Werkzeug integriert sein und die Fließfront nicht beeinflussen.
- Die Viskosität der newtonschen Messflüssigkeit sollte temperaturabhängig auf 0,3 mPas genau bestimmbar sein. Die Messflüssigkeit muss eine konstante Viskosität während der Messung haben. Es empfiehlt sich eine Flüssigkeit mit höherem dispersen Anteil zu verwenden, wie ihn auch Harze haben. Wässrige Lösungen eignen sich demnach aufgrund unterschiedlichen Benetzungsverhaltens weniger.

Eine Ebenenpermeabilitätsmesszelle, die diese Anforderungen erfüllt, ist in der Abbildung 2.3 dargestellt. Das Messprinzip dieser 2D-COMP (Cell for the Online Measurement of 2D-Permeability) ist unter Methoden erklärt.



Abbildung 2.3: Die IVW Ebenenpermeabilitätsmesszelle '2D-COMP' mit kapazitiven Sensoren der 2. Generation von 2006

Das Unterwerkzeug hat acht kapazitive Sensoren mit einer Länge von je 180 mm. Der Rahmen des Unterwerkzeugs ist austauschbar, um verschiedene Kavitätshöhen und damit verschiedene Faservolumenanteile realisieren zu können.

2.1.4 Berechnung der ungesättigten zweidimensionalen Permeabilität

Bei einer zweidimensionalen Permeabilitätsmessung ist mathematisch die Fließfrontausbildung einer injektionspunktsymmetrischen Ellipse zu beschreiben. Die Orientierung der Ellipse und das Anisotropieverhältnis können mit der zeitlichen Kenntnis von drei Punkten der Fließfrontellipse berechnet werden. Des Weiteren ist der Durchmesser der Injektionsbohrung zu berücksichtigen [59]. Um nicht den Übergang von einer runden Injektionsbohrung zu einer Ellipse beschreiben zu müssen, wird folgende mathematische Vereinfachung vorgenommen: Das Textil wird als homogen in alle Richtungen, also isotrop, angenommen. Der Anguss wird als ellipsenförmig angenommen. Das Hauptachsenverhältnis der Angussellipse entspricht dem Anisotropieverhältnis des realen Textils. Bei der mathematischen Beschreibung wird dann lediglich die Vergrößerung der Ellipse in Abhängigkeit von der Zeit beschrieben. Da dieses Halbachsenverhältnis jedoch erst nach der Berechnung bekannt ist, muss iterativ, mit anfangs fiktiven Werten für die Anisotropie, vorgegangen werden. In prakti-

schen Versuchen liegt die Ellipse meist nicht genau orientiert auf der x-Achse. Dann ist zusätzlich eine Drehung des Koordinatensystems vorzunehmen. Diese Berechnung wird in einem elliptischen Koordinatensystem vorgenommen. Die Berechnung wird von Adams und Rebenfeld sowie Russel beschrieben [49, 71]. Außerdem beschreiben Weitzenböck, Shenoj und Wilson [72] und Endruweit [73] diese Berechnung. Weitzenböck beschreibt in seiner Dissertationsschrift [59] zudem eine Vereinfachung, die die zweidimensionale Permeabilitätsberechnung ermöglicht, ohne vorherige Kenntnis des Verhältnisses der Halbachsen (Anisotropie) der Ellipse.

Diese Berechnungsmethode ist nur dann valide, wenn es sich um eine nullpunktsymmetrische Fließfrontellipse handelt. Im Rahmen dieser Arbeiten wird ein zusätzlicher Messwert vorgestellt, der das Verhältnis gegenüberliegender Sensoren als Symmetriewert beschreibt (Abbildung 2.4). Dieser Wert gibt an, wie nullpunktsymmetrisch die Ellipse ist und damit direkt Aufschluss über die Validität der Messung und die Homogenität des Materials.

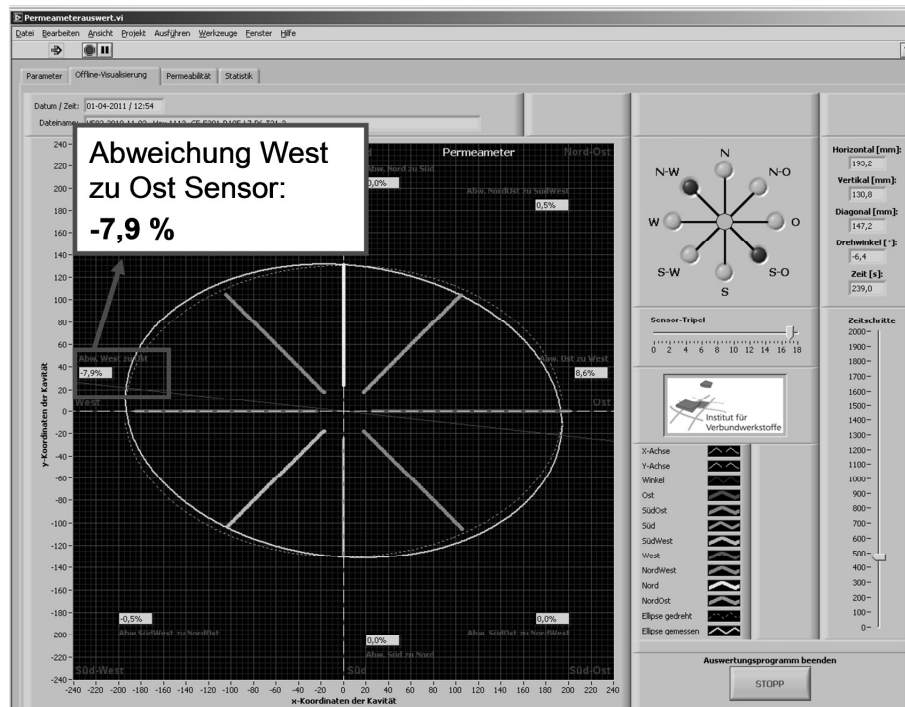


Abbildung 2.4: Offline Visualisierung der einzelnen Sensoren mit berechneter Ellipse und (hervorgehoben) die Abweichung gegenüberliegender Sensoren

Die Fließfrontdaten werden über die Zeit aufgetragen. Aus diesen Fließfront-Zeit-Daten in verschiedene Richtungen wird zunächst das Anisotropieverhältnis berechnet, dann die K1- und K2-Permeabilität [65].

2.2 Theoretische Betrachtungen bestehender Permeabilitätsmodelle

Um die Messung der Permeabilität zu umgehen, wurden in der Vergangenheit von mehreren Instituten Arbeiten zur Abbildung von Textilien in einem Modell zur Permeabilitätsbestimmung über CFD-Software begonnen. Nachfolgend werden diese Textilmodelle und das Kozeny-Carman Modell beschrieben und deren Gültigkeit diskutiert.

2.2.1 Kapillarmodelle

Kapillarmodelle beschreiben den Porenraum einer porösen Struktur. Zur modellhaften Abbildung wird das verzweigte Porensystem als Porenraum zwischen langen Zylindern beschrieben. Die bekannteste Zusammenhangsbeschreibung ist von Kozeny und Carman entwickelt:

$$Q = \frac{e \times A \times m^2}{k_{K.-C.} \times \mu} \times \frac{\Delta p}{L} \quad (2.9)$$

wobei e die Porosität, A die Strömungsquerschnittsfläche, m der mittlere hydraulische Radius nach Blake [74] (deswegen oftmals auch als Blake-Kozeny-Carman Gleichung bezeichnet), k die Kozeny Konstante und μ die Viskosität beschreibt. Kozeny hat 1927 in seiner Arbeit „Über die kapillare Leitung des Wassers im Boden“ den Zusammenhang zwischen dem Sandkornvolumengehalt, dem Sandkorndurchmesser und der Fließgeschwindigkeit in horizontaler und lotrechter Richtung durch Kapillarkräfte beschrieben [75]. Carman hat 10 Jahre später den hydraulischen Radius m , welcher das Verhältnis zwischen der Fließkanalfläche zum Fließkanalumfang beschreibt, durch den Term e/S ersetzt, wobei S für die spezifische Oberfläche ($1/m$) eines durchschnittlichen Partikels steht und e für die Porosität steht. Diese Vereinfachung hat die Beschreibung des Fließens durch poröse Strukturen vereinfacht. Erst weitere 37 Jahre später, 1974, haben Williams, Morris und Ennis [76] den Radius einer Faser in Beziehung zum hydraulischen Radius gesetzt:

$$m = \frac{r}{2} \times \frac{e}{(1 - e)} \quad (2.10)$$

und so die Anwendung der Kozeny-Carman Gleichung auf poröse Strukturen, aufgebaut aus Fasern, ermöglicht:

$$K = \frac{1 - V_f^3}{V_f^2} \times \frac{r_f^2}{4k_{K.-C.}} \quad (2.11)$$

Die Kozeny-Konstante $k_{K.-C.}$ in dieser Formel ist ein Korrekturfaktor für die Höhe der Verzweigung der Poren und deren Orientierung. Ähnlich wie die ebenfalls empirisch ermittelte Darcy Gleichung aus der Navier Stokes Gleichung hergeleitet werden kann, ist die Kozeny-Carman-Gleichung fast gänzlich aus der Hagen-Poiseuille Gleichung herzuleiten.

Gutowski et al. haben die Kozeny-Carman Formel weiterentwickelt und angepasst auf maximale Faservolumenanteile und geben die Permeabilität, K , quer zum Garn wie folgt an [77]:

$$K_z = \frac{r_f^2}{4k_{K.-C.}} \frac{\left(\sqrt{\frac{V_{max}}{V_f}} - 1 \right)^3}{\left(\sqrt{\frac{V_{max}}{V_f}} + 1 \right)} \quad (2.12)$$

$k_{K.-C.}$ steht für die Kozeny-Carman Konstante, r_f^2 für den Einzelfilamentradius und V_{max} für den maximalen Faservolumenanteil (0,78 bei kubischem Packungsdichtemodell, 0,91 bei hexagonalem Modell). Geht nun der tatsächliche Faservolumenanteil, V_f , gegen den maximalen Faservolumenanteil, geht die Permeabilität K nach der Gutowski-Formel gegen Null.

Ahn und Seferis berichten, dass die Permeabilität bis zu einem Faservolumenanteil von 50 % von einem Gewebe durch Kozeny-Carman gut beschrieben wird. Der ermittelte Kozeny-Carman Faktor für diesen Bereich betrug 6,9. Gutowski et al. [77] geben Werte von 11 und 17,9 für die Konstante in Dickenrichtung an. Verschiedene Autoren beschreiben, dass sich Kozeny-Carman zwar gut für einfachste Strukturen, wie z.B. Garne, eignet, nicht jedoch für komplexere Strukturen wie klassische Bekleidungstextilien oder Verstärkungsgewebe [78, 79]. Skartsis, Kardos und Khomami [80] kommen zu dem Schluss, dass selbst das Fließen entlang eines unidirektionalen Textils nicht mit der Kozeny-Carman Gleichung über den Faservolumenanteilsbereich von 30 – 60 % beschrieben werden kann.

Die Kozeny-Carman Gleichung wurde entwickelt, um das Fließen von Wasser in Sand- und Erdböden zu beschreiben. Sie wird u.a. auch genutzt um die Oberfläche von Pulvern und die Feinheit von textilen Fasern zu bestimmen [76]. Das faservolumenanteilsabhängige Fließen in Verstärkungstextilien genügt jedoch anderen Gesetzen.

Vandenbrekel und de Jong [78] haben die Permeabilität von Multi- und Monofilament-Polyestergeweben gemessen und mit Modellen verglichen. Sie kommen zu dem Erkenntnis, dass keines der Modelle (Kozeny-Carman, Happel, Ibbett, Blass) die Permeabilität der Gewebe korrekt beschreiben kann. Die Gründe hierfür sind:

1. Die Kozeny-Carman Gleichung beschreibt den Zusammenhang zwischen der Permeabilitätssenkung bei einer Feststoffvolumenanteilssteigerung. Sie wurde entwickelt für Partikel. Hier verändert sich die reine Größe der Poren bei steigendem Volumenanteil, die Porenstrukturen bleiben ähnlich. Bei Multifilamentgeweben verändert sich die Struktur der Fließkanäle, da sich Multifilamentgarne verformen. Dies führt dazu, dass die Permeabilität bei Geweben stärker abnimmt als die Kozeny-Carman Gleichung beschreiben würde. Dieser Sachverhalt wird ausführlich in Kapitel 3.1 anhand von μ CT Bildern beschrieben.
2. Bei niedrigen Faservolumenanteilen findet das Fließen hauptsächlich zwischen den Garnen statt. Erst bei höheren Faservolumenanteilen, findet das Fließen durch das Garn statt. [81, 82]

Es ist davon auszugehen, dass aufgrund dieser beiden Faktoren die modellhafte Abbildung der Permeabilität des Monofilamentgewebes besser gelungen ist. Allgemeingültige Aussagen sind wegen der dünnen Daten- und Literaturlage nicht möglich.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass mit der Kozeny-Carman Formel nur von sehr wenigen Geweben die Permeabilität für höhere oder niedrigere Faservolumenanteile korrekt beschrieben werden kann.

2.2.2 Textilmodelle

Blake [74] hat den mittleren hydraulischen Radius m , als den Quotient aus dem zweifachen Strömungsquerschnitt A und dem vom Fluid benetzten Umfang U eines Messquerschnitts definiert:

$$m = \frac{2A}{U} \quad (2.13)$$

Die wohl verbreitetsten Anstrengungen zur Vorhersage der Permeabilität liegen in der Modellierung von Textilien. Bei der Einheitszellenmodellierung werden die kleinsten wiederkehrenden geometrischen Einheiten möglichst realistisch abgebildet und deren Einfluss auf die Durchströmung mit CFD-Software untersucht. Meist wird in der numerischen Lösung das Fließen zwischen den Filamentgarnen über Navier-Stokes beschrieben und das Fließen im Garn mit der Darcy-Formel oder über die Brinkmann-Formel beschrieben. Die Lattice-Boltzmann-Methode erlaubt die simultane Berechnung von Navier-Stokes-Fließen zwischen den Garnen (inter-yarn flow) und dem Brinkmann-Fließen im Garn (intra-yarn flow) [83, 84].

In den veröffentlichten Arbeiten tauchen sehr unterschiedliche Einheitszellgeometrien von Garnen auf. Die nachfolgende Abbildung zeigt die unterschiedlichen Garnquerschnitte:



Abbildung 2.5: Verwendete Garnquerschnittsformen von Textilmodellen (Quelle: a) [85]; b) [86]; c) [87]; d) [88]; e) [82])

Wong, Robitaille, Long und Rudd [89] zeigen in einer numerischen Studie mit dem generischen Textilmodell TexGen [90] und der Nutzung von CFD Software, dass eine schmale Garnquerschnittsellipse mit einem Aspektverhältnis von 7:1 und eine eher runde Garnquerschnittsellipse mit einem Aspektverhältnis von 2:1, zu einem Permeabilitätsunterschied vom Faktor 2 in der Simulation führt.

Nedanov und Advani nehmen für Ihre Berechnungen in [82] ein Garnbreiten-Höhenverhältnis von 6,3:1 an (siehe Abbildung 2.5). In der gleichen Arbeit zeigen Nedanov und Advani auf, dass bei einer modellhaften Betrachtung kein Unterschied ermittelt wird bei der Permeabilitätsbestimmung mit einem als porös oder massiv (Multi- vs. Monofilament) betrachteten Garn. Vandenbrekel und de Jong [78] haben versucht den Einfluss vom Multifilamentaufbau eines Polyestergewebes mit einem Monofilamentaufbau zu vergleichen. Die Gewebe der Studie unterscheiden sich jedoch auch in der Fadendichte, zudem wurde das Mono- und Multifilamentgewebe nicht bei identischen Faservolumengehalten gemessen.

Lundström [91] hat in seiner Dissertation das Fließen in und zwischen Multifilamenten mit Stokes-Gleichungen beschrieben und kommt zu dem Schluss, dass das Fließen im Garn (intratow flow) sehr gering ist und deswegen vernachlässigt werden kann. Nabovati, Llewelin und Sousa hingegen beschreiben, dass ab höheren Faservolumengehalten (ca. >50 % - 55 %) das Fließen hauptsächlich durch das Garn erfolgt [81]. Nedanov und Summerscales schreiben in Numerical Computation [82], dass die Permeabilität eines Multifilamentgarnes ab Laminat-Faservolumengehalten von ca. 50 % zu berücksichtigen ist. Unterhalb dieses Faservolumengehaltes ist die Permeabilität zwischen den Garnen (inter tow permeability) um den Faktor zwei höher und bestimme daher die Permeabilität des Textils.

Der Anteil der Matrix, der ins Garn fließt ist deutlich geringer, als der Anteil der Matrix, der zwischen den Garnen fließt: Wird von einem Faservolumengehalt, $V_{f(Laminat)}$, im Laminat von 53 % und 68 % – 73 % im Garn, $V_{f(Garn)}$, [17, 77] ausgegangen, beträgt das Matrixvolumen, $V_{m(Garn)}$, im Garn 22,1 % - 27,4 % vom Gesamtmatrixvolumen.

$$V_{m(Garn)} = 1 - \left(\frac{V_{f(Laminat)}}{V_{f(Garn)}} \right) \quad (2.14)$$

Dieser Sachverhalt begründet auch warum das Kozeny-Carman Modell Fließvorgänge in Geweben und Gelegen nicht beschreiben kann. Das Kozeny-Carman Modell ist ein Kapillarmodell, welches entwickelt wurde, um das Fließen durch homogen verteilte Poren im Bereich von 1 – 100 μm zu beschreiben. Im Gelege und Gewebe findet das Fließen in diesem μm -Bereich nur im Garn statt. Der größte Anteil des Fließens findet jedoch, wie oben beschrieben, zwischen den Garnen statt.

Die Permeabilität entlang und quer zu einem Garn in Abhängigkeit vom Faservolumengehalt wird von Gutowski in [77] dargestellt. Er ermittelt Permeabilitäten im Bereich von 10^{-12} m^2 in Garnrichtung und Permeabilitäten im Bereich von 10^{-15} - 10^{-14} m^2 quer zum Garn.

Vor mehreren Jahrzehnten wurde noch versucht die Permeabilität in Dickenrichtung mit der sogenannten "open projected area", also der projizierten offenen Fläche, von

Gewebe unter Vernachlässigung der 3D Struktur zu bestimmen. Mit der Berücksichtigung des hydraulischen Radius der Poren können bessere Übereinstimmungen mit experimentell ermittelten Permeabilitätsergebnissen erzielt werden [92]. Festzuhalten ist, dass die Simulationsarbeiten im Bereich der 3D-Permeabilität weiter fortgeschritten sind als in der Ebenenpermeabilität. Dies ist auf das größere Interesse der Industrie für die Simulation von Filtermedien zurückzuführen (z.B. Filter im Automobilbereich von der Firma Mann+Hummel oder Filter zur Herstellung von Metallgussbauteilen der Firma Vesuvius) [93, 94]. Mit dieser Methode wurde z.B. für das Fließen in Dickenrichtung erarbeitet, dass ein Atlasgewebe eine höhere Permeabilität in Dickenrichtung hat gegenüber einem Köpergewebe und vor allem gegenüber einem Leinwandgewebe [92, 95]. Der Hydraulische Radius-Modellansatz wird häufig auch zur Modellierung der Ebenenpermeabilität herangezogen. Summerscales [96] ermittelte mit dieser Methode, dass die Permeabilität von Fasern in geclusteter Anordnung höher ist als bei gleichmäßiger Verteilung der einzelnen Fasern.

Die Modelle von Geweben werden immer feiner und bieten viele Einstellungsparameter [90, 97-99]. Lomov, Verpoest, Peeters et al. haben gezeigt, dass allein durch unterschiedliches Nesting Permeabilitätsergebnisse stark variieren können [100]. Dies bestätigt die Untersuchung von Nedanov und Summerscales, die ermitteln, dass es unzureichend ist nur eine Lage im Modell abzubilden [82].

Lomov, Huysmans, Luo et al. zeigen auf, welche 29 Eigenschaften des Einzelfilaments, des Garns und des Gewebes für eine Modellierung zu berücksichtigen sind und dass selbst diese gewissenhafte Arbeit bei höheren Faservolumengehalten keine realistischen Permeabilitätsergebnisse liefert [101].

Mit den oben beschriebenen Modellen und Experimenten können isoliert betrachtete Fließeffekte erklärt werden. Bisher können die textilen Parameter nicht mit der Permeabilität in Verbindung gesetzt werden. Die größte Herausforderung besteht in der realistischen kompaktierungsdruckabhängigen Textilbeschreibung. Wird dieser Schritt umgangen, indem mit realen Textilstrukturen aus 3D- μ CT Bilddaten gearbeitet wird, können die Permeabilitätswerte berechnet werden [102]. Derzeit kommen Sa-

diq, Advani und Parnas [103] zu dem Schluss, dass eine Vorhersage der Permeabilität für ungeordnetere Multifilamentgarne noch nicht möglich ist.

Aufgrund der Vielzahl der zu berücksichtigenden Faktoren besteht Einigkeit, dass Modelle, die auf empirisch ermittelten Daten aufgebaut sind, die genaueste Darstellung des Permeabilitätsverhaltens erreichen. Dieser Erkenntnis folgend, wird in dieser Arbeit eine empirische Studie zur Ermittlung des Einflusses der textilen Parameter auf die Permeabilität durchgeführt.

2.3 Einfluss der Injektionsgeschwindigkeit auf die Imprägnierqualität

Die Permeabilität ist abhängig von den textilen Parametern der Verstärkungstextilien und bestimmt die Fließgrößen: Geschwindigkeit, Druck und Fließfrontform. Diese textilen Parameter können auch einen Einfluss auf Lufteinschlüsse und damit die Imprägniergüte haben.

So haben Pearce, Guild und Summerscales [19] in einer Permeabilitäts-, Poren- und Interlaminarescherfestigkeitsstudie beim Vergleich eines identisch aufgebauten Leinwand- und Köpergewebes ermittelt, dass ein Leinwandgewebe die größeren Garnzwischenräume und höhere Permeabilitäten aufweist. Dies führt zu einem höheren Poreneinschlussanteil und niedrigeren ILSS Werten.

Hohe Fließgeschwindigkeiten, die mit höheren Drücken einhergehen, führen bei Geweben, die einen Mikro- und Makroporenraum aufweisen (in der englischsprachigen Literatur als ‚Dual Scale Porous Media‘ bezeichnet) dazu, dass hinter der Hauptfließfront ein Mikrofließen zur Garntränkung einsetzt. Da die Makro- und Mikroimprägnierung in der Praxis nicht gleichmäßig abläuft, kann dieser Effekt zu Lufteinschlüssen im Garn führen. Dieser Effekt wird von Patel und Lee [104] ausführlich beschrieben und schematisch dargestellt. Die Gefahr von Lufteinschlüssen im Garn ist umso größer, je dicker das Garn ist. Foley und Gillespie [62] haben in theoretischen Betrachtungen einen linearen Zusammenhang zwischen dem Titer eines Garns und der Imprägnierzeit ermittelt: zur Imprägnierung eines 60 K Garns wird die zehnfache Imprägnierzeit gegenüber der Imprägnierung eines 6 K Garns benötigt. Da der Garn-

querkapillardruck sehr niedrig ist, ist bei der Matrixauswahl sicherzustellen, dass die Matrix bis zur vollständigen Garnimprägnierung niedrigviskos bleibt.

Weniger kritisch sind Poreneinschlüsse, wenn wie beim Hochdruck-RTM-Verfahren (HD-RTM) nach der vollständigen Injektion ein hoher Druck bis zur Konsolidierung des Bauteils anliegt. Bei Nachdrücken von über 200 bar werden etwaige Poren nach dem Boyle-Mariottschen Gesetz auf ein zweihundertstel im Volumen komprimiert. Diese Nachdrücke werden in der Praxis meist über die Werkzeugpresse bei geschlossenem Ein- und Auslass aufgebracht. In der Praxis hat sich gezeigt, dass sich selbst sehr einfach, durch Handlaminierten hergestellte, Lamine mit hohem Porengehalt bei hohen Kompaktierungsdrücken zu Laminen mit geringen Porengehalten von unter 2 % herstellen lassen [105]. Endruweit und Long beschreiben ebenfalls in einer Schlifffbildstudie eine 3D-Gewebes die Abnahme der Porengröße mit steigendem Kompaktierungsdruck [54].

Zur Vermeidung von Makro- und Mikrolufteinschlüssen während des Imprägniervorganges müssen bestimmte Fließgeschwindigkeiten, die sich über textilspezifische Kapillarzahlen errechnen, eingehalten werden. Wird die Fließgeschwindigkeit zwischen den Garnen auf die Kapillarzahl (Def. siehe Formel (2.15)) des Garns in Fließrichtung abgestimmt, ist die Fließgeschwindigkeit in und zwischen den Garnen gleich [106]. Ruiz, Achim, Soukane et al. beschreiben die Bestimmung der Kapillarzahl für eine lufteinschlussfreie Injektion in einer Studie für zwei Materialkombinationen [107]. Die optimale Fließgeschwindigkeit für lufteinschlussfreie Lamine werde bestimmt durch die Kapillarzahl. Oberhalb einer kritischen Kapillarzahl dominiert das Fließen zwischen den Garnen, unterhalb einer kritischen Kapillarzahl dominiert das Fließen im Garn. Eine kleine Kapillarzahl spiegelt demnach einen starken Kapillareffekt wieder. Young [108] ermittelt diese kritische Kapillarzahl mit 1×10^{-4} . Ahn et al. [61] ermittelt sie mit 1×10^{-6} .

Die Kapillarzahl, Ca , errechnet sich nach Patel und Lee [104] zu:

$$Ca = \frac{\mu \times v}{\sigma \times \cos(\alpha)} \quad (2.15)$$

und beschreibt das Verhältnis zwischen den Viskositätskräften und Oberflächenspannungen. Der Kontaktwinkel wird mit α beschrieben, v beschreibt die Makrogeschwindigkeit, μ die dynamische Viskosität und σ die Oberflächenspannung. Die Kapillarzahl ist also von dem Verstärkungstextil und dem Injektionsfluid abhängig.

Ruiz, Achim, Soukane et al. [107] stellen die von Patel und Lee um den Kontaktwinkel erweiterte Kapillargleichung nach v um und erhalten die ideale Injektionsgeschwindigkeit:

$$v_{opt} = \frac{Ca_{opt} \times \sigma \times \cos(\alpha)}{\mu} \quad (2.16)$$

Mit der Einhaltung dieser sehr niedrigen Fließgeschwindigkeiten von meist unter 10 mm pro Minute sind kurze Zykluszeiten jedoch nicht möglich. Binetruy, Hilaire und Pabiot [109] geben in Abhängigkeit von der Viskosität und dem Faservolumengehalt gemessene Optimalgeschwindigkeiten in Glas- und Kohlenstofffasergarnen von 0,25 mm/s – 1,5 mm/s an. Die Abstimmung der Injektionsgeschwindigkeit nach der Kapillarzahl führt zu Laminaten mit hoher Imprägnierqualität ohne mit Nachdruck zu arbeiten. In der Praxis sind die Geschwindigkeiten zu niedrig. Es wird deswegen mit hohem Nachdruck gearbeitet. Zu der Frage ob Luftporen unter höheren Drücken gänzlich in die Matrix diffundieren, konnten in der Literatur keine Angaben gefunden werden.

2.4 Zusammenfassung Stand der Forschung

Die Kernaussagen zum Stand der Forschung lassen sich wie folgt zusammenfassen:

1. Bisher wurden keine umfangreichen, methodisch aufgebauten Studien zur Untersuchung des Einflusses von textilen Parametern auf die Permeabilität unternommen.
2. Unterschiede zwischen der gesättigten und ungesättigten Permeabilitätsmessung sind auf den Kapillardruck, der im ungesättigten Fall zusätzlich anliegt, zurückzuführen. Da dieser über ein Verstärkungstextil gemittelt 0,3 bar nicht übersteigt, sind die Unterschiede bei der Ebenenpermeabilitätsmessung ge-

ring. Der Anteil der Matrix, der ins Garn fließt und dessen Fließen durch den Kapillardruck unterstützt wird, beträgt lediglich 22 % - 27 %.

3. Bei einer Ebenenpermeabilitätsmessung über Punktanguss können durch das Betrachten der Differenz gegenüberliegender Sensorwerte Varianzen einer Messreihe eindeutig auf das Textil oder Messsystem zurückgeführt werden.
4. Die Garnquerschnittsformen und Garnhöhen- zu Breitenverhältnisse verschiedener Textilmodelle unterscheiden sich stark voneinander.

3 Einfluss des Kompaktierungsdruckes auf die Garnarchitektur in Geweben

Im Stand der Forschung wurden bestehende Textilmodelle vorgestellt. Durch die Verwendung eines Monofilamentgarnes in der Modellierung werden Garnquerschnittsveränderungen bei höheren Faservolumengehalten nicht berücksichtigt. Zur Untersuchung wie groß diese Garnquerschnittsveränderung ist, wird im folgenden Kapitel die Höhe der Veränderung bei Faservolumengehalten von 40 % bis 58 % untersucht. Wie stark sich der Ondulationswinkel verändert wird im darauf folgenden Kapitel vorgestellt.

3.1 Veränderung der Garnquerschnittsgeometrie mit steigendem Kompaktierungsdruck

In der Vergangenheit hat man sich bemüht, Erkenntnisse über die Garnarchitektur von Geweben durch konventionelle Lichtmikroskopaufnahmen von eingebetteten Proben und deren Schliffbildern zu erhalten. Mit dieser Methode ist es jedoch lediglich möglich eine Ebene zu untersuchen. Im Vergleich dazu erlaubt der Mikro-Computertomograf (μ CT) in 2,5 μ m-Schritten jede beliebige Tiefenebene einer Probe zu betrachten. GFK-Laminat eignen sich hierfür besonders, da der Röntgenkontrast von Silizium sehr hoch ist. In kürzerer Zeit können mehr Laminatquerschnitte betrachtet werden, da das zeitaufwendige Einbetten und Polieren zur Vorbereitung konventioneller Schliffbilder entfällt. Zudem kann von einer Laminatprobe ein repräsentativer Eindruck gewonnen werden, da nicht nur die oberste Randebene betrachtet wird. Aufgrund der hohen Auflösung werden μ CT-Aufnahmen in der Industrie benutzt, wenn Abstände oder Größen im μ m-Bereich genau zu bestimmen sind. In dieser Studie wurden μ CT-Aufnahmen von Gewebelaminaten bei verschiedenen Faservolumengehalten mit dem Tool "Caliper" aus dem Programm VGStudio der Fa. Volume Graphics vermessen. Diese Ergebnisse geben Aufschluss über die Veränderung der Garnquerschnittsform in Abhängigkeit vom Faservolumengehalt. Bisherige Textilmodelle konnten diese Veränderungen nicht berücksichtigen, da hierzu keine Daten vorlagen.

Zur Herstellung der Proben für diese μ CT-Studie wurden 5, 6 und 7 Lagen des Köpfergewebes Nr. 9 (SCC 3106) mit den Abmessungen (465 x 465 mm) in ein RTM-Werkzeug mit einer Kavitätshöhe von 1,95 mm gelegt und über einen Ringanguss mit Epoxidharz injiziert. Die konsolidierten Lamine haben Faservolumenanteile von 40 % (5 Lagen), 48 % (6 Lagen) und 56 % (7 Lagen). Aus diesen GFK Laminen wurden Proben mit der Größe (5 x 5 x 2 mm) mit einer Diamantsäge herausgesägt. Diese Probengröße repräsentiert das Gewebe mit einer Fadendichte von 6/cm bzw. 6,7/cm sehr gut und erlaubt dennoch die maximale Auflösung des μ CT von 2,5 μ m zu erreichen. Die μ CT Bilder wurden mit einer angelegten Spannung von 100kV und einem Strom von 90 μ A generiert.

In der Abbildung 3.1 bis Abbildung 3.6 wurden die Bemaßungsstriche aus dem Tool „Caliper“ dicker nachgezeichnet, um sie sichtbar zu machen. In der Abbildungsunterschrift ist zusätzlich die Lamineebene angegeben. Da von jeder der 6 betrachteten Proben 1500 mal 2,5 μ m dicke Ebenen aufgenommen wurden, kann anhand der Ebenenangabe auch die Tiefe in Millimetern berechnet werden. Eine Lamineebene von 1200 entspricht z.B. einer Tiefe von 3 mm (1200 x 2,5 μ m) im Laminat. Die Höhe des Garns wurde an der höchsten Stelle (meist in der Mitte des Garns) gemessen. Zur Erstellung der Beziehung zwischen der Abnahme der Garnhöhe und dem Faservolumenanteil wurden von 6 Proben μ CT-Aufnahmen erstellt. Die Garnhöhe wurde bei jeder der Proben in 2-3 Laminattiefen von allen messbaren Garnen (im Mittel 8) gemessen. Ein Mittelwert basiert auf mindestens 20 Messwerten. Nachfolgend sind beispielhaft 6 der 24 betrachteten Bilder zur Ermittlung der mittleren Garnhöhen bei 3 Faservolumenanteilen abgebildet. Zunächst ist die Abnahme der Höhe des Kettgarns vom Faservolumenanteil von 40 %, über 48 %, zu 56 % dargestellt. Die Garne werden immer stärker kompaktiert und die Zwischengarnräume werden immer enger.

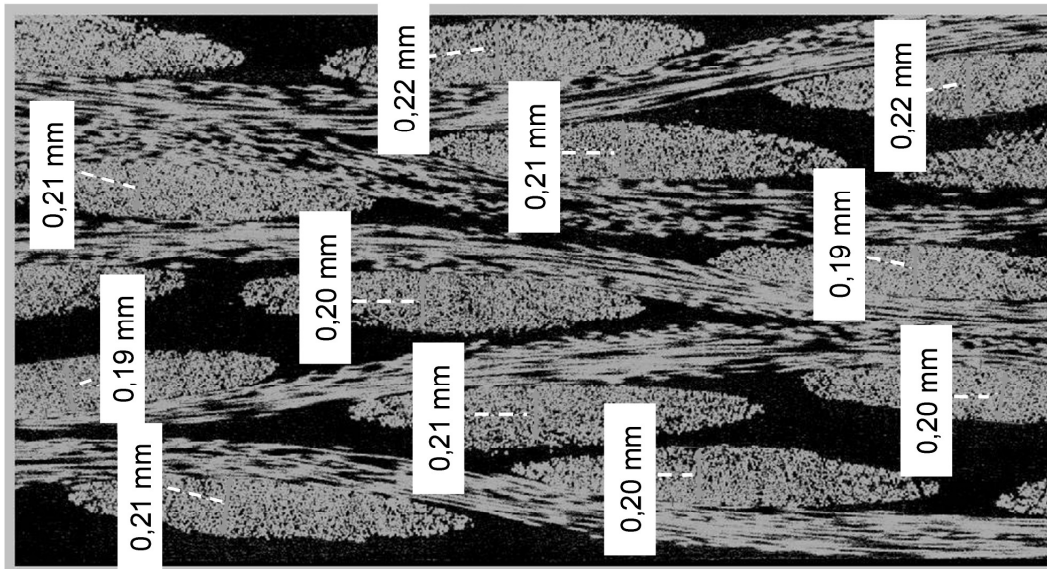


Abbildung 3.1: Kettgarnhöhen bei 40 % Vf; (Ebene: 1200; 3,00 mm)

Bei einem Faservolumengehalt von 40 % wurde eine mittlere Höhe des Kettgarns von 0,205 mm ermittelt.

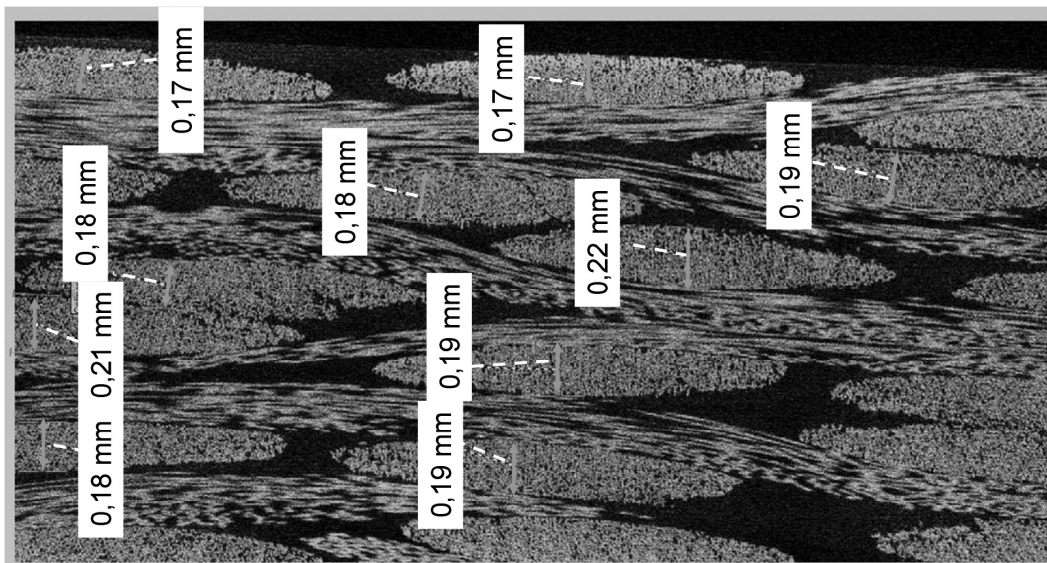


Abbildung 3.2: Kettgarnhöhen bei 48 % Vf; (Ebene: 979; 2,45 mm)

Bei einem Faservolumengehalt von 48 % sank die mittlere Höhe des Kettgarns auf 0,188 mm ermittelt.

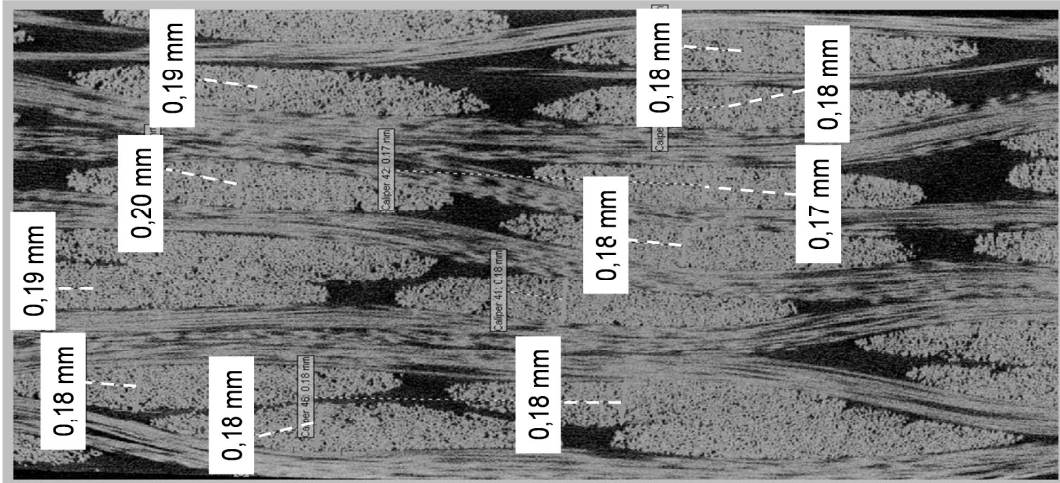


Abbildung 3.3: Kettgarnhöhen bei 56 % Vf; (Ebene: 642; 1,61 mm)

Bei einem Faservolumengehalt von 56 % sank die mittlere Höhe des Kettgarns auf 0,183 mm ermittelt.

Ähnlich gering ist die Abnahme der Schussgarnhöhe beim Faservolumengehalt von 40 % zu 48 %. Vom Faservolumengehalt von 48 % zu 56 % jedoch ist die Abnahme der Garnhöhe beim Schussgarn noch stärker als beim Kettgarn (Abbildung 3.4 bis Abbildung 3.6).

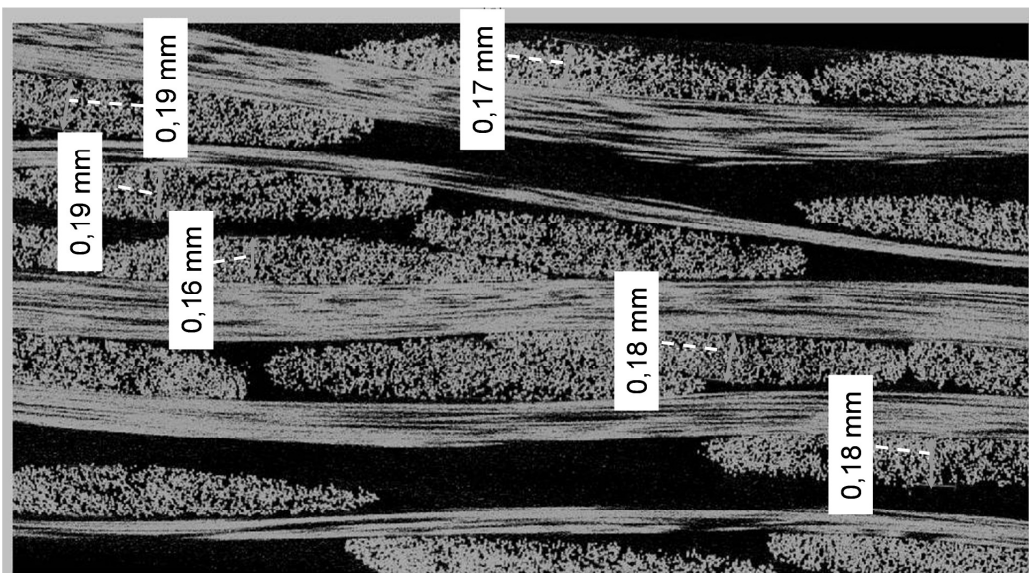


Abbildung 3.4: Schussgarnhöhe bei 40% Vf; (Ebene: 870; 2,18 mm)

Bei einem Faservolumengehalt von 40 % beträgt die mittlere Höhe des Schussgarns 0,178 mm.

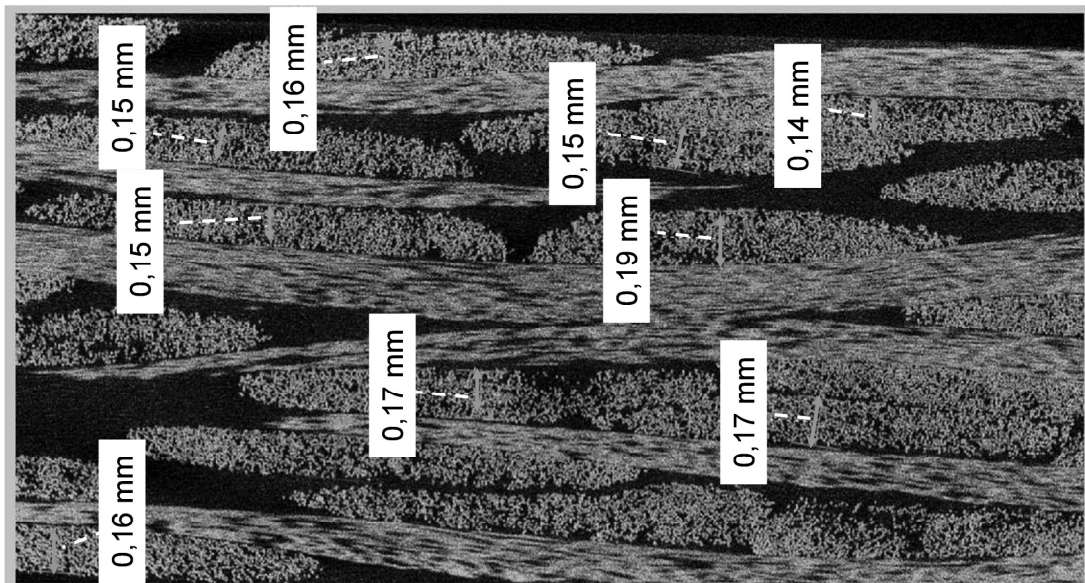


Abbildung 3.5: Schussgarnhöhe bei 48% Vf; (Ebene: 1200; 3,00 mm)

Bei einem Faservolumengehalt von 48 % beträgt die mittlere Höhe des Schussgarns 0,160 mm.

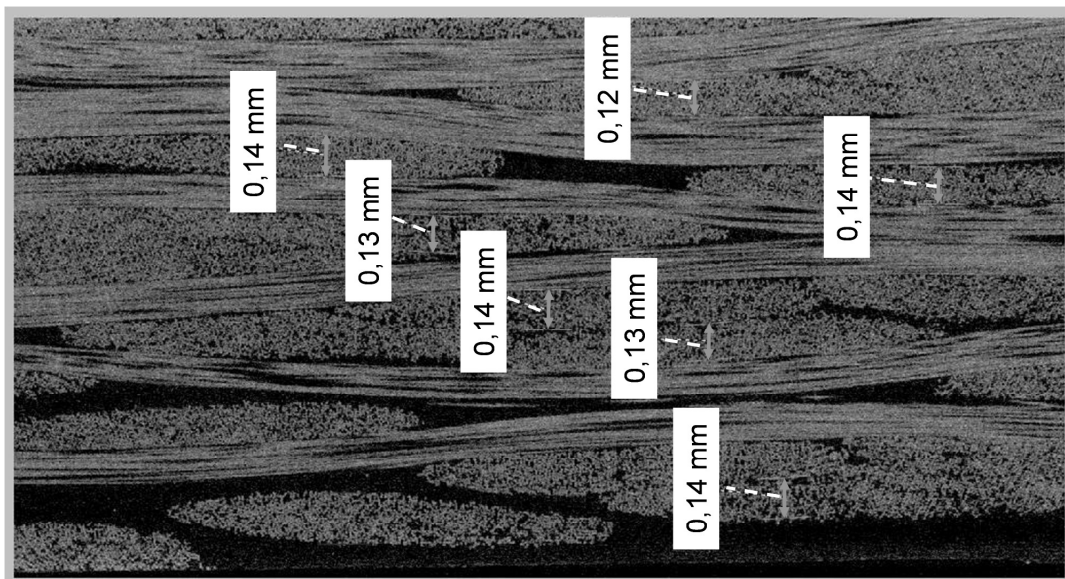


Abbildung 3.6: Schussgarnhöhe bei 56 % Vf; (Ebene: 1044; 2,61 mm)

Bei einem Faservolumengehalt von 56 % sank die mittlere Höhe des Schussgarns 0,134 mm. Die Ergebnisse der Garnhöhenmessungen sind in der folgenden Abbildung dargestellt.

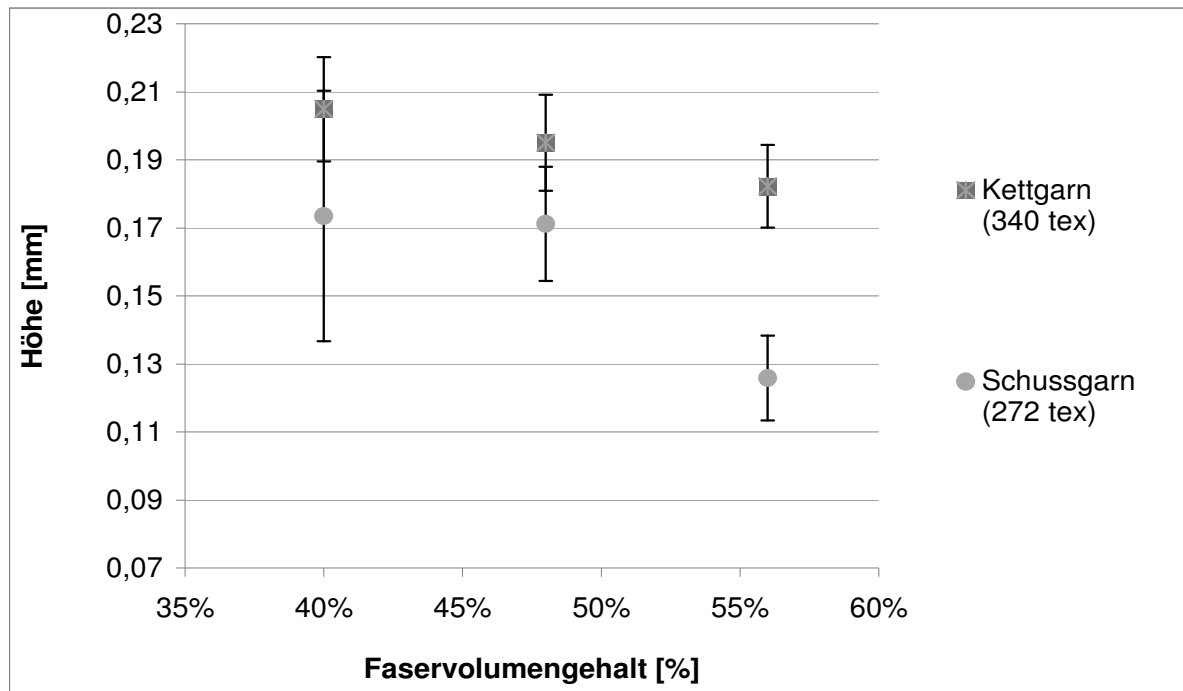


Abbildung 3.7: Gemessene Kett- und Schussgarnhöhen in Abhängigkeit vom Faservolumengehalt des Körpergewebes Nr.9

Für das Kettgarn ergibt sich eine Abnahme der Garnhöhe von 11,1 % vom Faservolumengehalt von 40 % zu 56 %. Bei Schussgarn beträgt diese Abnahme gar 27,4 %. Die Abnahme der Kettgarnhöhe von 40 % Faservolumengehalt auf 48 % ist hochsignifikant (p-Wert: 0,0004), die Abnahme von 48 % auf 56 % signifikant (p-Wert: 0,072). Die Abnahme der Schussgarnhöhe von 40 % Faservolumengehalt auf 48 % ist nicht signifikant (p-Wert: 0,398), die Abnahme von 48 % auf 56 % ist hochsignifikant (p-Wert: >0,0001). Auffallend ist, dass die Garnhöhenabnahme deutlich größer ist vom mittleren Faservolumengehalt zum höchsten als vom kleinsten zum mittleren. Dieses Phänomen ist mit dem Kompaktierungsdruck zu begründen. Er steigt von 0,2 bar bei 40 % Faservolumengehalt auf 0,6 bar bei 48 %, vgl. Abbildung 3.8. Vom Faservolumengehalt von 48 % auf 56 % steigt der Druck hingegen um 1,5 bar, also eineinhalb Mal so viel.

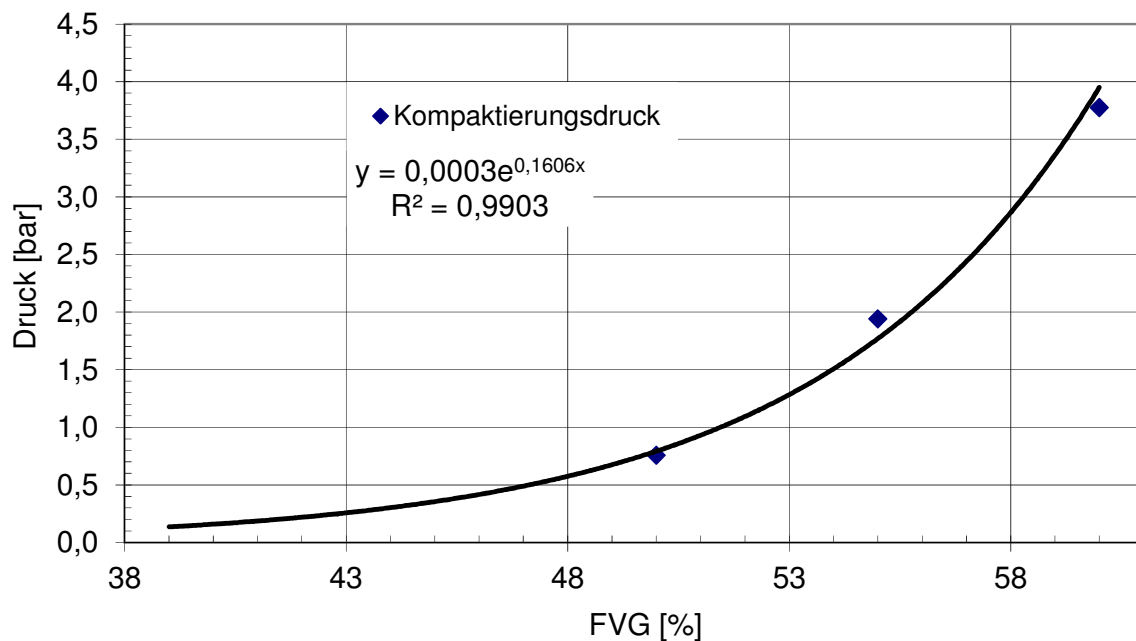


Abbildung 3.8: Kompaktierungsdruck-Faservolumengehaltskurve des Glas-Köpergewebes Nr. 9

Jeder Punkt im Diagramm stellt den Mittelwert aus 3 Messungen dar. Die Proben des zehnlagigen Köpertextilaufbaus (Nr. 9) hatten einen Durchmesser von 100 mm. Die Proben wurden zwischen planparallelen Scheiben mit einer Geschwindigkeit von 2 mm/min weggesteuert auf den Zielfaservolumengehalt komprimiert und auf dieser Höhe 10 Minuten gehalten, um Relaxation zu ermöglichen. Der Kraft-Zeit-Verlauf der 9 Einzelmessungen ist im Anhang E aufgeführt. Der sich nach 10 min einstellende Kraftwert wurde zur Auswertung herangezogen. Die Fehlerbalken der Standardabweichung verschwinden hinter den rautenförmigen Punkten. Die Variationskoeffizienten der Kompaktierungsdrücke lagen bei 8,8 %, 6,4 %; bei dem höchsten Faservolumengehalt bei 2,5 %.

Kompaktierungsdaten sind auch von Bedeutung für Permeabilitätsmessungen. Wenn der Injektionsdruck oberhalb des Kompaktierungsdruckes liegt, wird der Lagenaufbau verschoben. Noch kritischer ist dieser Effekt bei der Messung der Permeabilität in Dickenrichtung. Liegt hier der Injektionsdruck über dem Kompaktierungsdruck, werden die Lagen mit dem Injektionsfluid zusätzlich kompaktiert.

Eine große Herausforderung ist die wirklichkeitsgetreue Abbildung der Textilarchitektur. Die für Strukturbauteile eingesetzten Gelege und Gewebe bestehen aus Mul-

tifilamentgarnen, d.h. ein Garn ist aus mehreren Tausend Einzelfilamenten aufgebaut. Bei 9 μm Einzelfilamentdurchmesser ist ein 340 tex-Garn z.B. aus 2100 Einzelfilamenten aufgebaut. Diese Einzelfilamente können sich zueinander verschieben und so die Garnquerschnittsform verändern. Bisher gibt es kein Modell, welches berücksichtigt, dass sich die Breite erhöht und die Höhe eines Garnes verringert mit steigenden Faservolumengehalten, also steigendem Kompaktierungsdruck. Diesen Effekt haben Saunders, Lekakou und Bader 1998 [105] für die 408-tex Kettgarne eines Leinwandgewebes aufgezeigt [105]. In dieser Schliiffbild-Studie präsentiert Saunders Häufigkeitsverteilungsdiagramme der Garnbreiten, -höhen und -querschnittsflächen von 20-lagigen Laminataufbauten, die bei 5 verschiedenen Kompaktierungsdrücken (0,4 bar - 17 bar) konsolidiert wurden. Zwischen den Kompaktierungsdrücken von 0,8 bar - 8 bar, welche Faservolumengehalten von 49 % - 65 % entsprechen, wurde eine Abnahme der Garnhöhe von 0,31 mm auf 0,25 mm ermittelt. Die Breite der Garne nahm von 1,15 mm bei 0,8 bar auf 1,31 mm bei 17 bar zu. Somit wurde eine Änderung des Garnbreitenhöhenverhältnisses von 3,7:1 beim niedrigsten Faservolumengehalt zu 4,8:1 beim höchsten Faservolumengehalt festgestellt. Die Multifilamentgarne werden also breiter und nehmen in der Höhe mit steigender Kompaktierung ab. Weniger eindeutig sind die von Saunders, Lekakou und Bader ein Jahr später veröffentlichten Kompaktierungsergebnisse [17] für das gleiche Leinwandgewebe mit gleichem Polyesterharz konsolidiert. In dieser Saunders-Studie wurde keine Abnahme der Garnhöhe ermittelt. Bei 3 verschiedenen Kompaktierungsdrücken wurden z.B. stets Garnhöhen von 0,28 mm und 0,29 mm gemessen. Aus dem Paper geht nicht eindeutig hervor, wie die Garnhöhe auf den Schliiffbildern gemessen wurde. Auch sind die Anzahl der gemessenen Garnquerschnittsbreiten und die Standardabweichungen nicht aufgeführt.

In dieser Arbeit wurde mit μCT -Bildern gearbeitet, die eine genauere und schnellere Messung und dadurch eine bessere statistische Absicherung der Studie ermöglicht, welche sich in der Konsistenz der Daten widerspiegelt. Die Veränderung der Garnquerschnittsform in Abhängigkeit vom Kompaktierungsdruck, Titer in Schuss und Kett und Fadendichte in Schuss und Kett zu beschreiben, sind notwendig, um existierende Textilmodelle zu validieren.

Endruweit und Long haben ebenfalls die Veränderung der Garngeometrie in Abhängigkeit vom Faservolumengehalt (55 %, 58 %, 65 %) über Schliffbilder ermittelt. Bei dem Gewebe handelte es sich um ein 3D-Gewebe. Für jeden Faservolumengehalt wurde ein Schliffbild betrachtet. Die statistische Absicherung der Ergebnisse geht nicht eindeutig aus dem Paper hervor. Grundsätzlich ist der gleiche Trend zu erkennen, wie er in Abbildung 3.7 dargestellt ist, jedoch nicht konsistent für Schuss- und Kettgarn [54].

3.2 Veränderung des Garnondulationswinkels mit steigendem Kompaktierungsdruck

Stellbrink stellt in seinem Buch *Micromechanics of Composites* [110] eine Formel zur Berechnung des Radius vor, mit dem der Kettfaden um den Schussfaden läuft. Als Eingangsparameter werden die Fadendichte und die Garn- und Matrixhöhe benötigt. Mit dem Radius ist dann auch der Ondulationswinkel zu berechnen. Wir haben festgestellt, dass die Formel nur dann korrekt sein kann, wenn Kett- und Schussfadenspannung berücksichtigt wird. Lomov hat eine Formel veröffentlicht, die bei 3D-Geweben zu realitätsnaher Abbildung führt. Für einfache Gewebe kann diese Formel nicht verwendet werden.

Neben der Analyse, wie die Garnhöhe mit steigendem Faservolumengehalt abnimmt, wurde mit den gleichen μ CT-Bildern auch die Veränderung des Ondulationswinkels untersucht. Bei der Einzeichnung der Winkel in der Abbildung 3.9 bis Abbildung 3.12 ist die 0° -Flanke des Winkels stets eine Parallele zum oberen oder unteren Probenrand. Zur weiteren Sicherheit wurde versucht, gleich viele Winkel nach rechts wie nach links zu messen. Eine nicht exakte 0° -Flanke würde sich so bei der Mittelwertberechnung rauskürzen. Die Proben wurden in einem Aluminiumwerkzeug mit einer Wandstärke von 160 μ m im Ober- und Unterwerkzeug gefertigt, so dass Planparallelität gegeben war. Zum Setzen der 2. Winkelflanke wurden die beiden Kreuze, die den Verlauf der 2. Winkelflanke bestimmen, an den Beginn und das Ende des über mindestens 300 μ m stärksten Gefälle gesetzt. Nachfolgend sind beispielhaft vier Ondulationswinkelmessungen bei zwei Faservolumengehalten in Kett- und Schussrichtung aufgeführt. In der Unterschrift der Abbildungen ist jeweils auch der über mehrere Proben und Ebenen, errechnete Mittelwert aufgeführt. Dieser Wert ergibt sich also

nicht nur aus den in der Abbildung aufgeführten Werten. Die gemessenen Ondulationswinkel sind im Anhang E und F aufgeführt.

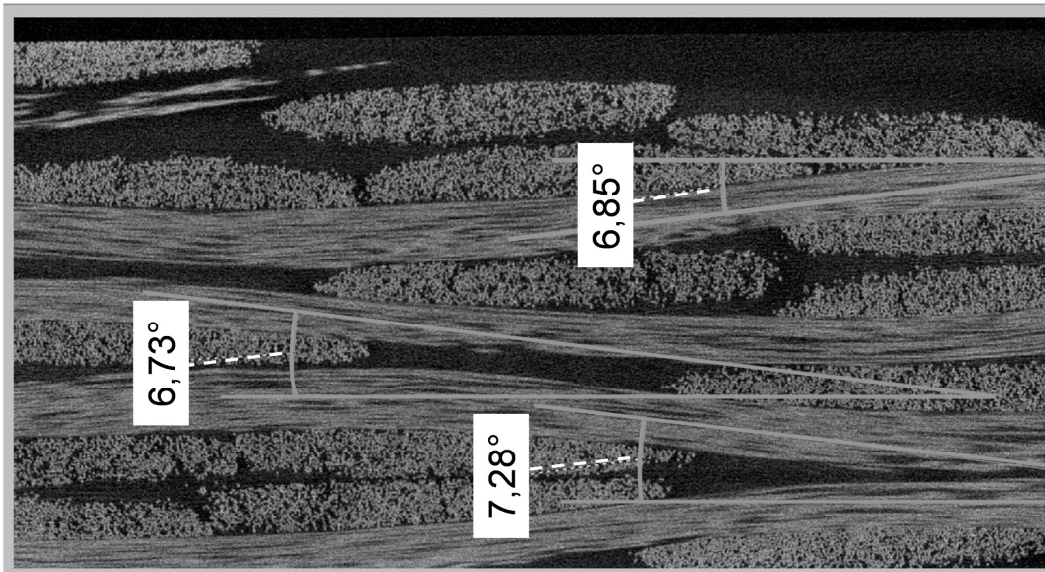


Abbildung 3.9: Ondulationswinkel eines Kettgarns bei 40 % Vf, mittlerer Ondulationswinkel: 7,0° (Ebene: 975; 2,44 mm)

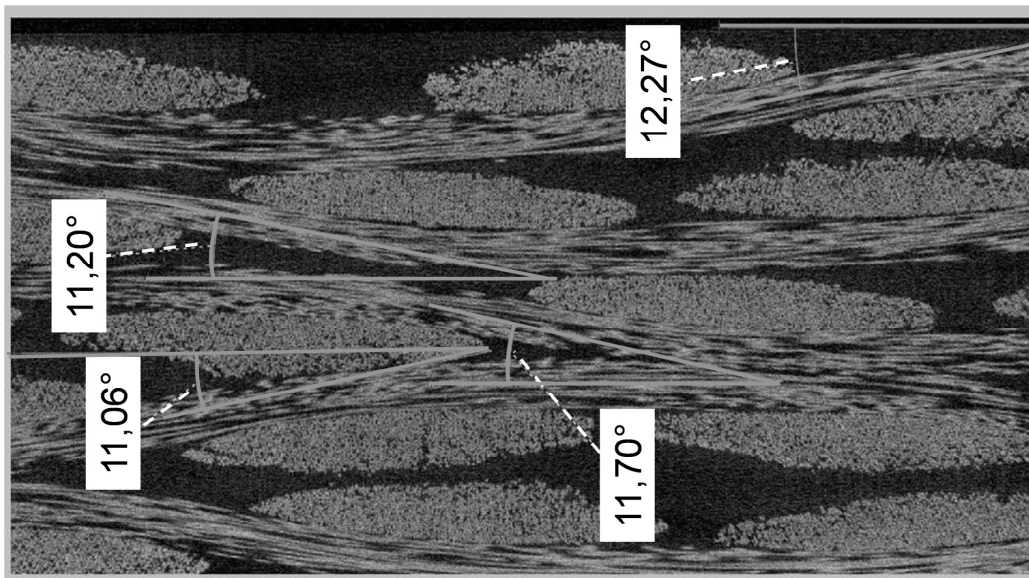


Abbildung 3.10: Ondulationswinkel eines Schussgarns bei 40 % Vf, mittlerer Ondulationswinkel: 11,2° (Ebene: 255; 0,56 mm)

Aus den oberen Abbildungen wird ersichtlich, dass das Schussgarn stärker unduliert als das Kettgarn. Die nachfolgenden beiden Abbildungen zeigen, dass der Kett- und Schussondulationswinkel steigt bei höheren Faservolumengehalten aufgrund des stärkeren Nestings.

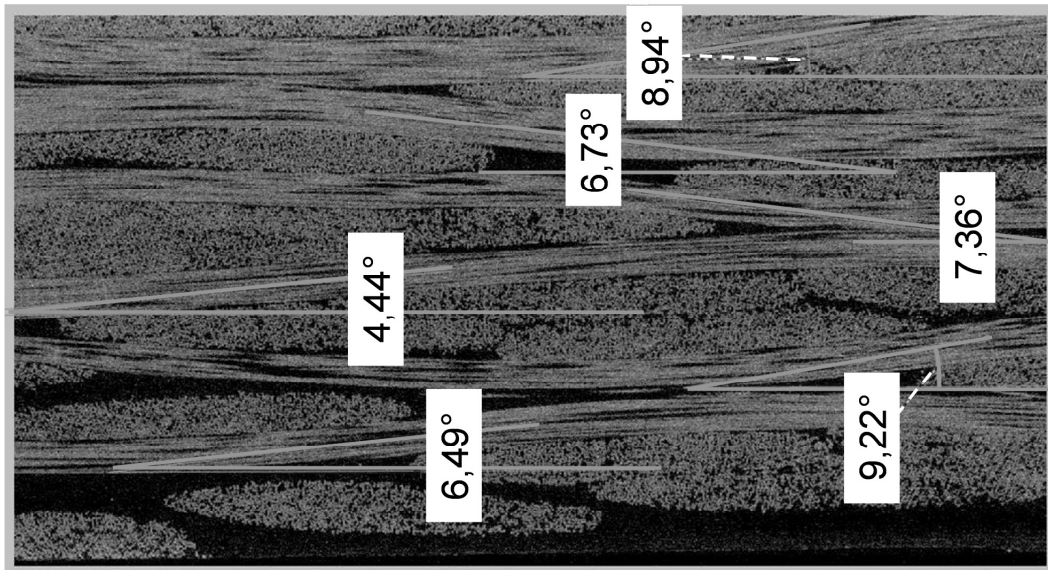


Abbildung 3.11: Ondulationswinkel eines Kettgarns bei 56 % Vf; mittlerer Ondulationswinkel: 7,6° (Ebene: 1044; 2,61 mm)

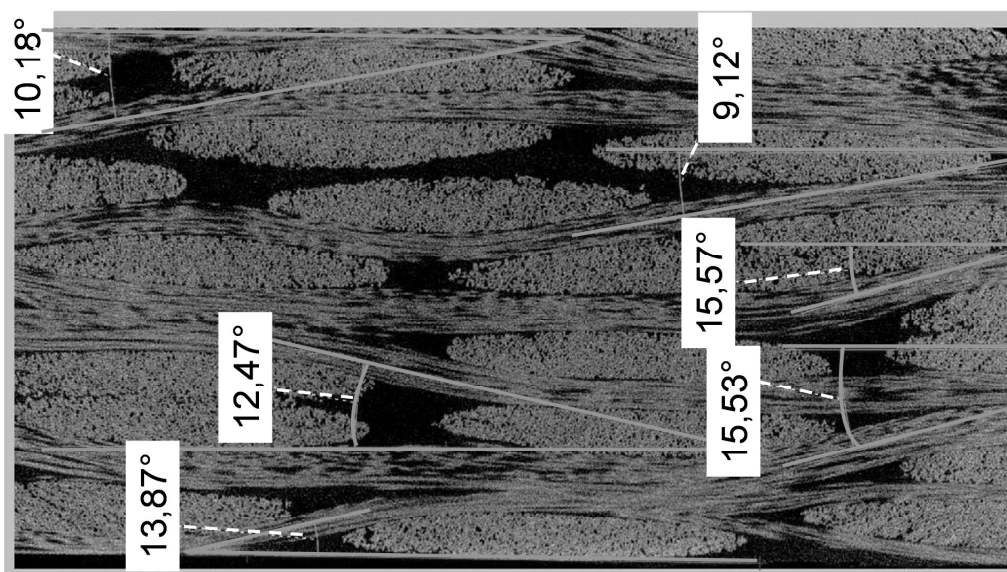


Abbildung 3.12: Ondulationswinkel eines Schussgarns bei 56 % Vf; mittlerer Ondulationswinkel: 12,8° (Ebene: 676; 1,69 mm)

Das folgende Diagramm zeigt den Anstieg des Ondulationswinkels bei steigendem Faservolumengehalt. Vom niedrigen (40 %) zum mittleren Faservolumengehalt (48 %) wird keine Ondulationswinkeländerung gemessen. Vom mittleren zum höchsten Faservolumengehalt (56 %) beträgt dieser Anstieg 1,2° bzw. 1,5° für Schuss- und Kettgarn. Statistisch signifikant ist lediglich der Anstieg des Kettgarnwinkels von 48 % auf 56 % (p-Wert: 0,0007).

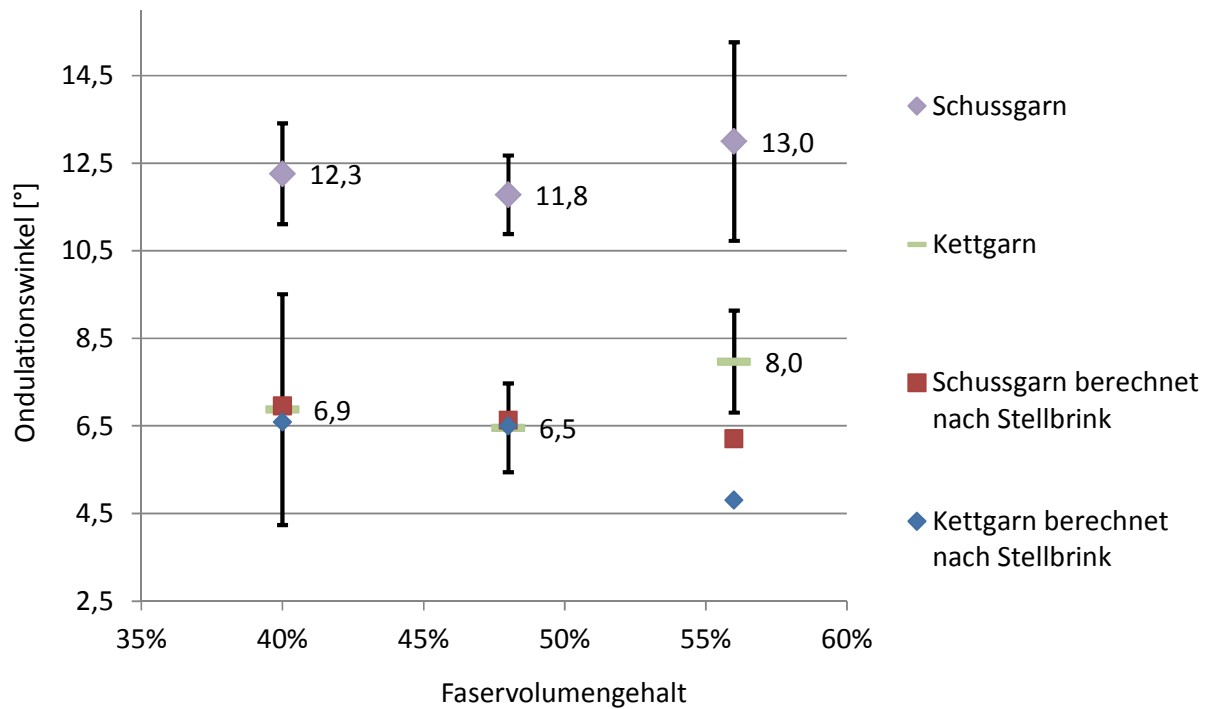


Abbildung 3.13: Gemessene Kett- und Schussondulationswinkel in Abhängigkeit vom Faservolumengehalt des Köpergewebes Nr. 9; zusätzlich eingetragen sind theoretisch berechnete Ondulationswinkel nach der Stellbrink-Formel

Obwohl zur Berechnung des Ondulationswinkels über die Stellbrink-Formel die in μ CT-Bildern gemessene Fadendichte, Garn- und Matrixhöhe eingesetzt wurde, bildet diese Formel nicht die realen Ondulationswinkel ab. Nach Stellbrink kann der Ondulationswinkel, Ω_{Schuss} , von einem Gewebegarn wie folgt berechnet werden:

$$\Omega_{\text{Schuss}} = \arcsin \frac{l_{0,\text{Kett}}}{\left(\frac{l_{0,\text{Kett}}^2}{h_{\text{Kett}} + h_{\text{Matrix}}} \right) + (h_{\text{Kett}} + h_{\text{Matrix}})} \quad (3.1)$$

Wobei h_{Kett} die Höhe des Kettgarns, h_{Matrix} die Höhe der Matrix über dem Kettgarn und $l_{0,\text{Kett}}$ der Kehrwert der Fadendichte in Kettichtung ist.

3.3 Zusammenfassung Untersuchungen zur Veränderung der Garnarchitektur unter steigendem Kompaktierungsdruck

Zur realistischen Abbildung eines Textilmodells ist eine realistische Garnquerschnittsform und die Veränderung dieser und des Ondulationswinkels bei steigendem Kompaktierungsdruck zu berücksichtigen. Garnabhängig kann sich schon die unkompaktierte Garnquerschnittsform von unterschiedlichen Geweben stark unterscheiden: In dieser μ CT-Studie wurde für ein 5 x 68 tex-Kettgarn (gefacht, ohne weitere Drehung) ein Verhältnis von Garnhöhe zur Garnbreite von 1:9 ermittelt. Saunders, Lekakou und Bader [105] haben in einer Schliffbildstudie für ein 3 x 136 tex-Kettgarn ein mittleres Garnhöhen-Breiten-Verhältnis von 1:4 ermittelt. Nedanov und Advani nehmen für Ihre Berechnungen in [82] ein Garnhöhen-Breitenverhältnis von 1:6,3 an.

Zusammenfassend können drei weitere Hauptkenntnisse für die Modellierung von Geweben für Permeabilitätsbestimmungen genannt werden:

1. Für Multifilamentgewebe muss für höhere Faservolumengehalte das Garn auch als Multifilamentgewebe modelliert werden. Nur Multifilamentgewebe verändern ihre Querschnittsform in Abhängigkeit vom Kompaktierungsdruck.
2. Die Änderung des Garnquerschnittsverhältnisses und der Ondulationswinkel mit steigendem Kompaktierungsdruck ist signifikant und muss berücksichtigt werden.
3. Um ein korrektes Nestingverhalten abzubilden, muss das sich-aneinander-Vorbeischieben von Garnen in einer Lage und zwischen zwei Lagen erlaubt sein. Dies ist mit einer Einheitszellenmodellierung nicht möglich.

4 Materialien

4.1 Charakterisierung des Messfluids

In Darcys Gesetz ist der Einfluss der Viskosität auf die Permeabilität beschrieben. Die Viskositätsbestimmung wird in diesem Kapitel dargestellt. Zur vollständigen Charakterisierung des Messfluids wird des Weiteren die Oberflächenspannung bestimmt.

4.1.1 Bestimmung der Viskosität

Die eingesetzte Flüssigkeit zur Permeabilitätsmessung ist ein pflanzliches Öl der Firma Bellasan. Pflanzliches Öl erfüllt alle Anforderungen an eine Messflüssigkeit:

- nichtreaktiv,
- newtonsches Viskositätsverhalten,
- einfach zu entsorgen,
- Viskosität und Oberflächenspannung (und disperser Anteil) liegen im Bereich von Epoxidharzen.

Messflüssigkeiten mit einem höheren polaren Anteil, wie z.B. Glukoselösungen, können ein unterschiedliches Benetzungsverhalten zeigen.

Die Viskosität wurde mit dem Spindelrheometer DV-II+ Pro mit der Spindel LV1 der Marke Brookfield im Temperaturbereich von +10 °C - +35 °C ermittelt. Der Rheometer wurde mit der Software Rheocalc über einen PC angesteuert. Die Messwerte wurden automatisch über Rheocalc aufgezeichnet. Die automatische Datenaufzeichnung in einem bestimmten Zeitintervall führt aufgrund der exponentiellen Abkühl- bzw. Aufwärmkurve dazu, dass zum Ende der Messung die Messwerte zeitlich dichter vorliegen. Deswegen wurden in Excel die Messwerte jeweils über einen Bereich von 0,1 °C gemittelt.

Die Messwerte werden sehr gut mit einer Regressionskurve 3. Ordnung angenähert, vgl. Abbildung 4.1.

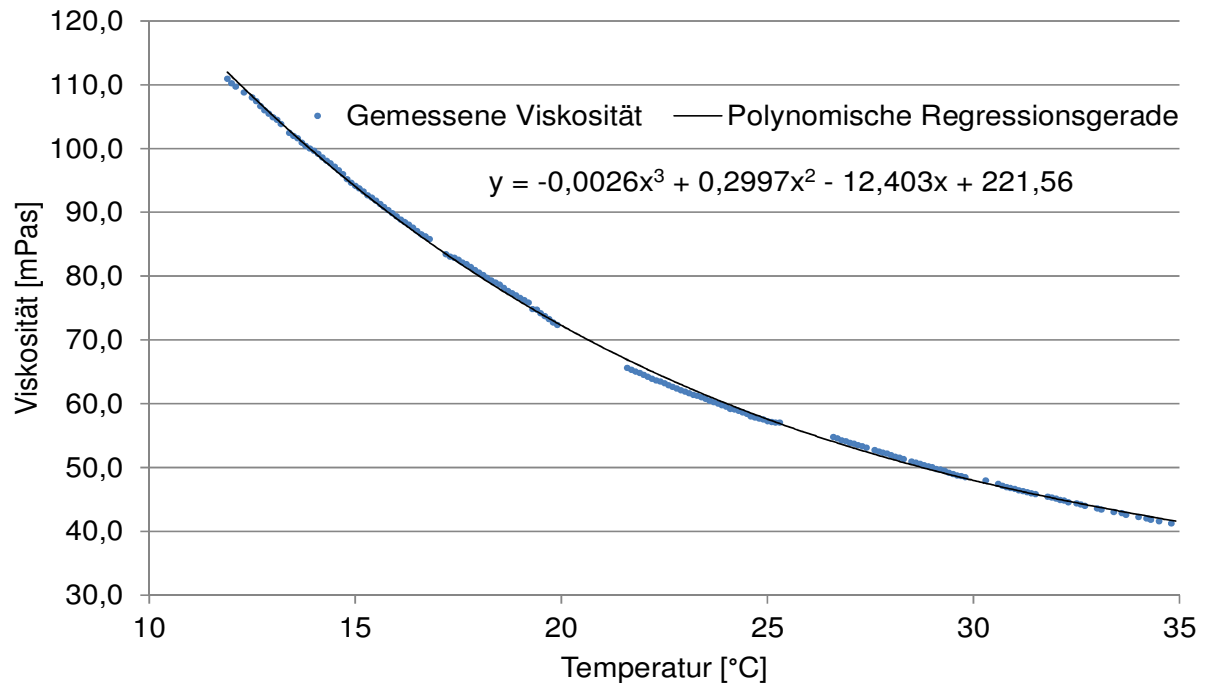


Abbildung 4.1: Ermittelte Viskosität in Abhängigkeit von der Temperatur. Eine potenzielle Regressionsgerade ist eingezeichnet und deren Funktion angegeben.

Die Messwerte liegen nicht kontinuierlich vor, da die automatische Messwernerfassung mehrmals angehalten werden musste, um die Drehzahl der Messspindel an die veränderte Viskosität anzupassen. Dies war nötig, da das Antriebsdrehmoment dem maximalen Drehmoment angepasst wurde, um die Messgenauigkeit des Rheometers zu erhöhen. Die Viskosität beträgt bei Raumtemperatur (20 °C) beträgt 73 mPas. Dieser Wert liegt im Bereich der Viskositäten von Epoxidharzsystemen bei Verarbeitungstemperatur.

4.1.2 Bestimmung der Oberflächenspannung

Die Oberflächenspannung des Permeabilitätsmessfluids wurde mit dem Gerät G 10 der Firma Krüss nach der Methode des hängenden Tropfens (Abbildung 4.2) untersucht.



Abbildung 4.2: Hängender Tropfen des Permeabilitätsmessöls kurz vor Abriss

Zur Bestimmung der Oberflächenspannung einer Flüssigkeit wird ein so großer Tropfen am Ende eines feinen Röhrchens erzeugt, dass dieser gerade eben noch hängt. Anhand des Tropfenprofils kann über numerische Integrationsverfahren unter Berücksichtigung der Dichte die Oberflächenspannung berechnet werden.

Aus 24 Messungen wurde eine mittlere Oberflächenspannung von $33,67 \text{ mN/m} \pm 0,61$ bei Raumtemperatur ermittelt. Die Oberflächenspannung vieler Aminhärter liegt leicht unterhalb von diesem Wert. Die Oberflächenspannung von den meisten Epoxidharzen liegt bei Verarbeitungstemperatur mit 40 mN/m leicht über dem Wert unserer Messflüssigkeit. Da der Einfluss des Kapillardrucks, wie in Kapitel 2.1.2 beschrieben, auf die Fließfrontgeschwindigkeit beim RTM-Verfahren, selbst bei großen Unterschieden zwischen der Oberflächenspannung des Harzes und der Permeabilitätsmessflüssigkeit, gering ist, wird das hier verwendete Öl als geeignete Messflüssigkeit betrachtet.

4.2 Beschreibung der textilen Parameter und der Gewebeselektion

In diesem Kapitel werden die textilen Parameter von Geweben beschrieben und die Gewebeselektion vorgestellt. Um allgemeingültige Aussagen erarbeiten zu können, wurden Gewebe mit drei Webarten und einem großen Parameterbereich bezüglich des Titers, der Fadendichte und des Crimps ausgewählt. 14 der 19 Gewebe sind kommerziell verfügbar, lediglich die Gewebe Nr. 1-5 wurden speziell für diese Studie von der Donghua University (Shanghai) und der Firma PGTex (Shanghai) hergestellt. Diese Gewebe haben in Kett- und Schussrichtung den gleichen Titer und unterscheiden sich in der Fadendichte um den Faktor 1,5 und 2 jeweils in Kett- und Schussrichtung. In Tabelle 4.1 sind die textilen Parameter aller untersuchten Gewebe aufge-

führt. Diese Tabelle zeigt die Nummerierung der einzelnen Gewebe. Im Ergebnissteil werden die Gewebe nur nach den Nummern benannt.

Tabelle 4.1: Übersicht der textilen Parameter der untersuchten Gewebe

Material Nr.	Herstellerbezeichnung	Herstellergruppierung	Bindungsart	Fadendichte in Ketttrichtung [Fäden/cm]	Fadendichte in Schussrichtung [Fäden/cm]	Titer in Ketttrichtung [tex]	Titer in Schussrichtung [tex]	Flächengewicht (gemessen) [g/m ²]	Garn (Kett-/Schussrichtung)	Ondulation in Ketttrichtung [%]	Ondulation in Schussrichtung [%]
1	PGTex #1	A	Köper 2/2	7,45	7,45	272	272	408,54	EC9-34x2	0,89	1,01
2	PGTex #2	A	Köper 2/2	7,45	7,45	136	136	202,83	EC9-34x2	0,85	0,89
3	PGTex #3	A	Köper 2/2	7,45	7,45	272	136	305,73	EC9-34x2	0,42	1,27
4	PGTex #4	A	Köper 2/2	7,45	7,45	136	272	303,45	EC9-34x2	1,04	0,54
5	PGTex #5	A	Köper 2/2	7,45	7,45	204	204	291,76	EC9-34x2	0,51	0,84
6	PD 92105	B	Leinwand	12	11,5	68	68	161,02	EC9-68	0,39	1,08
7	PD 92110	B	Köper 2/2	12	11,5	68	68	160,13	EC9-68	0,26	0,76
8	PD 92626	B	Atlas 1/7	22	21	68	68	286,40	EC6-68	0,50	1,04
9	SCC 3106	D	Köper 2/2	6	6,7	340	272	386,40	EC9-68x5	0,38	1,18
10	Hexcel 1102	C	Köper 2/2	7	7	204	204	284,79	EC9-68x3	0,33	0,83
11	Hexcel 7781	C	Atlas 1/7	23	21	68	68	296,13	EC6-68	0,44	0,83
12	Hexcel 7581	C	Atlas 1/7	22	21	68	68	295,70	EC9-68	0,67	0,67
13	PD 92125	B	Köper 2/2	7	6,5	204	204	280,48	EC9-68x3/EC9-204	0,44	0,94
14	Hexcel 1113	C	Köper 2/2	5,9	6,6	340	272	385,22	EC9-68x5/EC9-136x2	0,43	0,94
15	Hexcel 1265	C	Leinwand	5,9	6,6	340	272	389,46	EC9-68x5/EC9-136x2	0,57	2,37
16	Hexcel 1103	C	Leinwand	7	7	204	204	285,68	EC9-68x3	0,57	1,47
17	Hexcel 1035	C	Köper 2/2	14,7	14,7	68	68	202,81	EC9-68	0,57	1,14
18	Hexcel 1039	C	Köper 2/2	11,8	11,5	68	68	159,55	EC9-68	0,40	1,00
19	Hexcel 1038	C	Köper 2/2	7,35	7,35	408	408	612,30	EC9-136x3	0,50	1,33

Erläuterungen: PD: P-D Interglas Technologies; SCC: Schlösser & Cramer

4.2.1 Darstellung der Webart, des Titers und der Fadendichte

In dieser Studie wurde mit drei unterschiedlichen Webarten gearbeitet. Die nachfolgende Abbildung zeigt die Webarten Leinwand, Köper und Atlas im Vergleich.

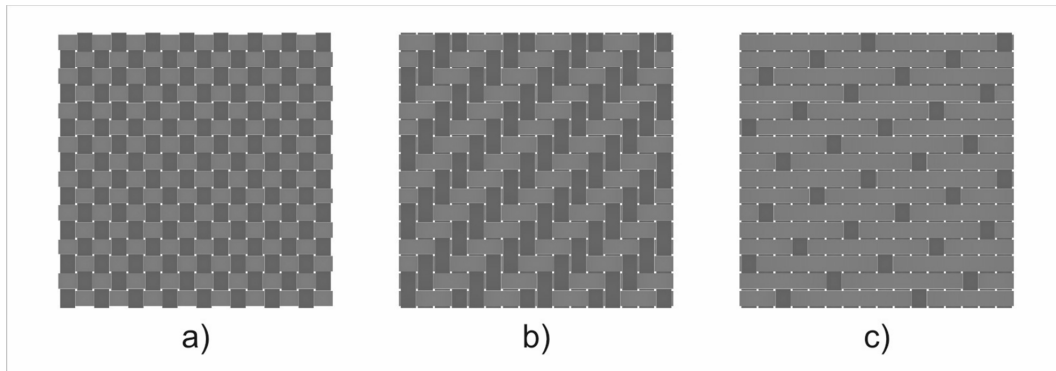


Abbildung 4.3: Darstellungen der Webart: a) Leinwandbindung; b) Köperbindung; c) Atlas 1/7-Bindung

In Abbildung 4.3 hellgrau dargestellt und von links nach rechts verlaufend ist das Kettgarn. Dieses ist die Maschinenrichtung. Von oben nach unten verläuft das Schussgarn. Zu erkennen ist, dass ein Gewebe mit Leinwandbindung doppelt so viele Kett-Schussgarn-Knotenpunkte hat wie ein Gewebe mit Köper(2/2)-Bindung. Sehr viel interessanter ist hierbei jedoch der Vergleich, der sich bei verschiedenen Webarten ergebenden Porengeometrien. Als Poren werden hier die Fließfreiräume zwischen den Garnen verstanden. Gewebe sind unabhängig von Ihrer Webart aus 2 oder 3 sich wiederholenden Porenformen aufgebaut (Abbildung 4.4). Leinwand und Köpergewebe sind ausschließlich aus Typ 1 (Leinwandporen) und Typ 2 (Köperporen) Poren aufgebaut. Atlas 1/4-Gewebe bestehen zu einem Fünftel aus Typ 3 Poren und zu vier Fünfteln aus Typ 2 Poren [94]:

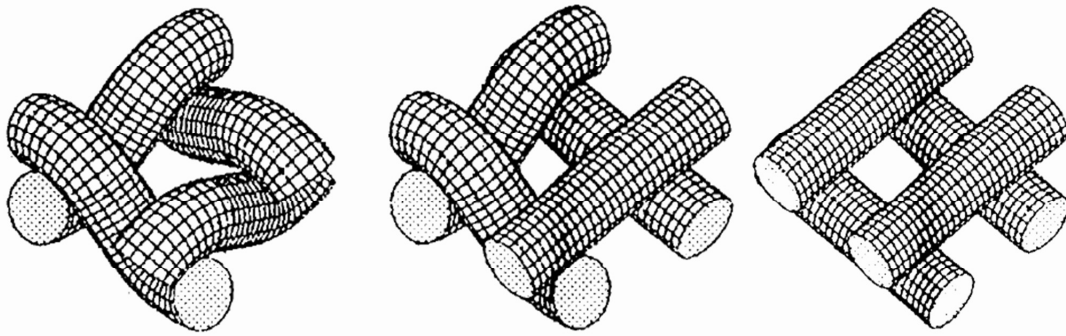


Abbildung 4.4: Durch unterschiedliche Verwebungsarten entstehende Fließfreiräume: a) Typ 1, Leinwandpore; b) Typ 2, Körperpore; Typ 3, Atlaspore. (Quelle: [94])

Die Fadendichte gibt des Weiteren an, wie viele Garne nebeneinander auf einem Zentimeter verlaufen. Der Durchmesser eines Garns wird bestimmt durch die Angabe der linearen Dichte, dem Titer. Der Versatz der Bindungspunkte wird als Grat bezeichnet (Abbildung 4.5).

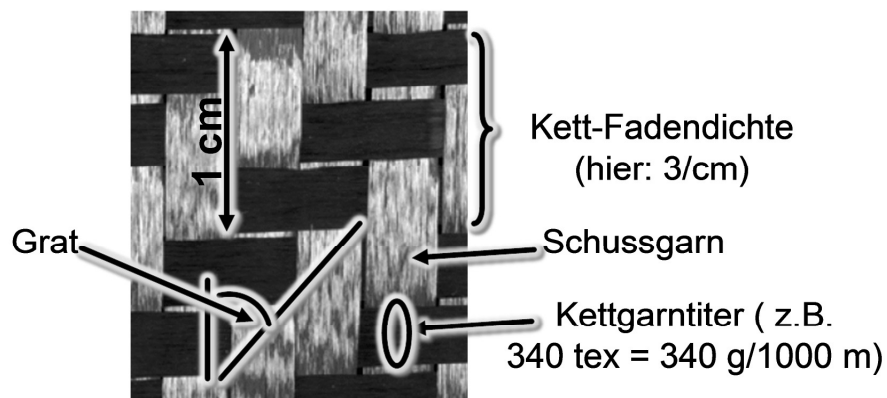


Abbildung 4.5: Erklärung der Begriffe Kett, Schuss, Fadendichte, Titer und Grat

4.2.2 Aufstellung der Gewebe nach dem Titer

Damit die erarbeiteten Aussagen einen großen Gültigkeitsbereich haben, wurde ein möglichst großer Titerbereich mit der Gewebeauswahl abgedeckt. Die Titer aller 19 Gewebe sind in Abbildung 4.6 der Größe nach sortiert dargestellt. Der Titer beschreibt den spezifischen Durchmesser eines Garns durch die Angabe der linearen Dichte.

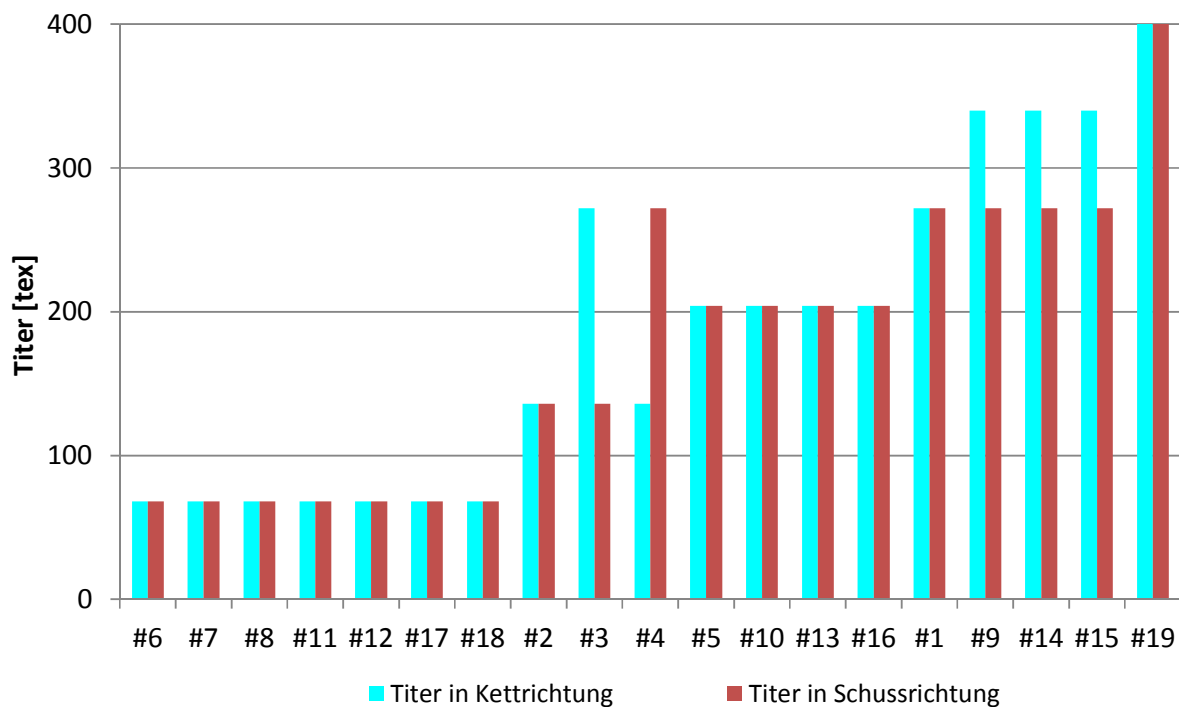


Abbildung 4.6: Titer aller Gewebe in Kett- und Schussrichtung

Alle Garne der Leinwand und Köpergewebe sind aus kontinuierlichen E-Glasfilamenten mit einem Durchmesser von 9 μm aufgebaut. Die Garne in Kett-richtung sind aufgebaut aus 34 tex- und 68 tex-Garnen. Um höhere Titer zu erreichen, wurden diese feinen Garne gefacht ohne im Anschluss noch verdreht zu werden. In Tabelle 4.1 sind diese Garne wie folgt gekennzeichnet: EC9 68 tex x 5 t0. Die Bezeichnung EC9 gibt darüber Aufschluss, dass das Garn aus kontinuierlichen Einzelfilamenten der Stärke 9 μm aufgebaut ist; 5 t0 beschreibt, dass das 340 tex Garn aus 5, miteinander unverdrehten (t0), gefachten Garnen aufgebaut ist. Bei einer Einzelfilamentstärke von 9 μm ergibt sich, dass ein 340 tex-Garn aus 2100 Einzelfilamenten besteht. In Schussrichtung kommen auch ungefachte 136 tex, 172 tex und 204 tex Garne zum Einsatz.

4.2.3 Aufstellung der Gewebe nach der Fadendichte

Wie beim Titer wurde ebenfalls für die Fadendichte ein großer Bereich abgedeckt, vgl. Abbildung 4.7. Auch diese Tabelle ist der Vergleichbarkeit wegen der Titergröße nach sortiert.

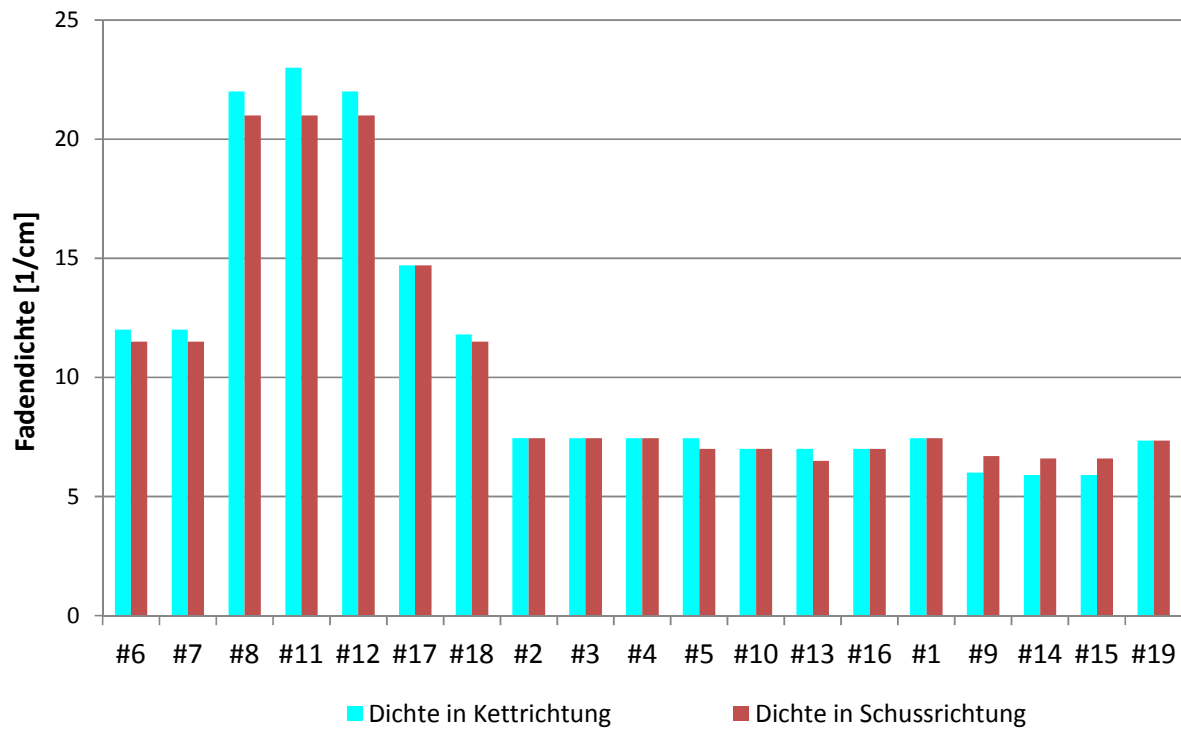


Abbildung 4.7: Fadendichte aller Gewebe in Kett- und Schussrichtung

Aus Abbildung 4.7 ist zu entnehmen, dass die Atlasgewebe (#8, #11 und #12) typischerweise viel feiner aufgebaut sind als die Leinwand- und Köpergewebe.

5 Methoden

Neben den Angaben im technischen Datenblatt eines Gewebes wie der Fadendichte, dem Titer und dem Einzelfilamentdurchmesser für Kett- und Schussgarn, wird ein weiterer wichtiger Parameter benötigt, um die Permeabilität zu beschreiben. Dieser Crimpwert kann im gefertigten Gewebe gemessen werden und gibt Aufschluss über die verwendeten Kettfadenspannungen des Gewebeherstellers.

5.1 Bestimmung des Crimp von Kett- und Schussgarn

Der Crimp eines Multifilamentgewebegarns kann auch als Grad der Ondulation oder Welligkeit bezeichnet werden. Der Crimpwert gibt das Verhältnis zwischen der im Gewebe vorliegenden Garnlänge zu der gestreckten Länge des Garnes nach Herausnahme aus dem Gewebe an. Er ermöglicht, Rückschlüsse auf die ansonsten schwer zugänglichen Kettfadenspannungen bei der Herstellung des Gewebes zu ziehen. Der Crimp hat einen hohen Einfluss auf die Permeabilität. Mit dem Crimp kann z.B. das anisotrope Fließverhalten von isotrop aufgebauten Geweben erklärt werden.

Der Crimp wurde nach der DIN 53 852 Bestimmung von Garnlängenverhältnissen in Geweben [111] ermittelt. In dieser Norm werden verschiedene Crimpwerte angegeben. Für diese Studie wurde der Ausarbeitungswert A ermittelt:

$$A = \frac{(l_f - l_w)}{l_w} \quad (5.1)$$

Hierbei ist l_w der Abstand zweier Markierungen auf einem Garn im Gewebe und l_f der Abstand der Markierungen auf dem Garn nach dessen Entnahme aus dem Gewebe und Streckung, vgl. Abbildung 5.1. Die Streckung erfolgt je nach Titer mit der in der Norm vorgeschriebenen Vorspannkraft von 33,5 g – 225,0 g. Die Kraft wurde über Massestücke befestigt am Garn aufgebracht. Die Norm sieht eine Vorspannkraft von 0,5 cN/tex vor. Es wurden 4 Garne in Schuss- und Kettrichtung zur Crimpwertbestimmung entnommen.

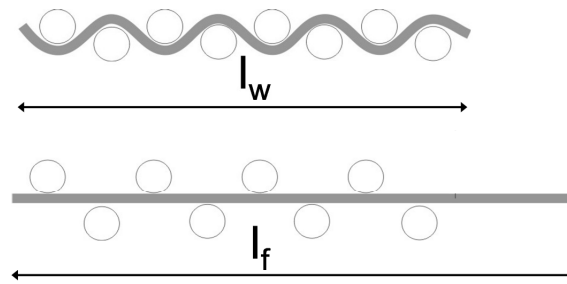


Abbildung 5.1: Schematische Darstellung der ondulierten und gestreckten Garnlänge zur Messung des Crimps

5.2 Messung der Ebenenpermeabilität

Die Permeabilitätsmessungen wurden durchgeführt mit der Permeabilitätsmesszelle 2D-COMP des IVW mit kapazitiven Liniensensoren (siehe Abbildung 2.3). Diese Messzelle erfüllt alle unter Kapitel 2.1.3 beschriebenen Anforderungen für valide, reproduzierbare und zeiteffiziente Permeabilitätsmessungen. Die Entwicklung dieses patentierten [112] Verfahrens ist ausführlich beschrieben von Kissinger [113, 114]. Sie beruht auf dem linearen Zusammenhang zwischen der benetzten Sensorfläche und dem Anstieg des Dielektrikums in der Messkavität. Die Änderung im Messsignal um 0,008 V entspricht dem Fortschreiten der Fließfront um 10 mm. Die Möglichkeiten zusammen mit der LabView Auswertoberfläche werden von Stadtfeld und Rieber in [115-117] aufgezeigt. Das Messprinzip basiert auf der Änderung der Kapazität der Verstärkungstextilkavität wenn eine Flüssigkeit injiziert wird. Die Änderung der Kapazität des Kondensators korreliert linear mit der Länge des benetzten Sensors.

Die Gewebe wurden in finaler Lagenanzahl computergesteuert auf einer Topcut-Bullmer (vormals Assyst Bullmer) - Anlage mit vertikal oszillierendem Messer auf die in Abbildung 5.2 dargestellten Maße zugeschnitten. In der Zuschnittgeometrie ist eine 30° Fase berücksichtigt, um eine Verwechslung von Kett- und Schussgarnorientierung zu vermeiden. Der Faservolumengehalt wurde durch unterschiedliche Kavitätsrahmen eingestellt. Hierbei stehen 8 Kavitätsrahmen, die von 1,5 mm - 4 mm in 0,5 mm-Schritten und von 4 mm – 7 mm in 1 mm-Schritten unterteilt sind zur Verfügung.

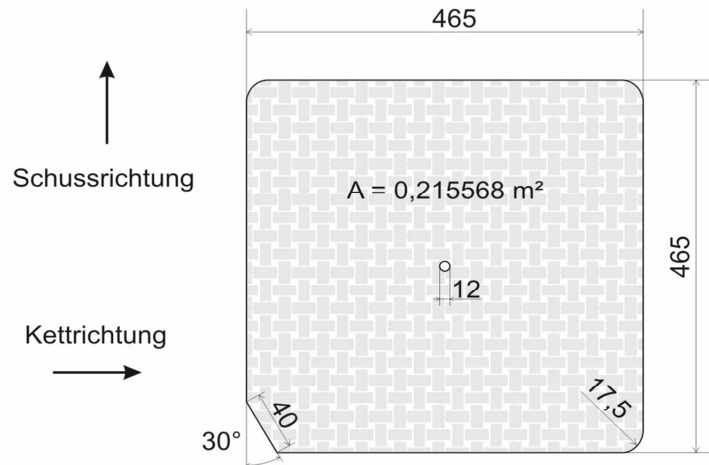


Abbildung 5.2: Zuschnittsgeometrie der Textillagen für Permeabilitätsmessungen; Zahlenangaben in mm

Generell kann bei Ebenenpermeabilitätsmessungen davon ausgegangen werden, dass der Injektionsdruck keinen Einfluss auf den gemessenen Permeabilitätswert hat [20, 55, 64]. Auch in eigenen Untersuchungen wurden bei 1 bar, 2 bar und 4 bar Injektionsdruck gleiche Permeabilitäten gemessen. Aus diesem Grund wurde der Injektionsdruck dem Faservolumengehalt angepasst, um während der Messung ähnliche Fließfrontgeschwindigkeiten zu erreichen. In K1-Richtung wurden die Injektionsdrücke so gewählt, dass sie in einem Bereich von 1 mm/s - 12 mm/s lagen. In K2-Richtung ergaben sich so Fließfrontgeschwindigkeiten in einem Bereich von 0,025 mm/s – 12 mm/s.

Um das Permeabilitätsverhalten von einem Verstärkungstextil zu ermitteln, werden die Permeabilitäten bei mindestens 3 verschiedenen Faservolumengehalten gemessen. Meist wird mit 3 Messungen eine ausreichende statistische Absicherung erreicht. Das bedeutet, dass insgesamt mindestens 9 Messungen pro Textil vorgenommen werden.

Diese drei gemittelten Permeabilitätswerte werden über den Faservolumengehalt aufgetragen. Für eine bessere Übersichtlichkeit wird in einem solchen Diagramm die Permeabilitätsachse logarithmisch skaliert [118-123]. Um ein empirisches Modell aufzustellen, welches es ermöglicht, die Permeabilitäten bei anderen als den gemessenen Faservolumengehaltswerten zu bestimmen, werden die 3 Permeabilitätswerte über eine exponentielle Regressionsgerade angenähert.

Bei guter Näherung liegen die gemessenen Permeabilitätswerte auf dieser Gerade [120-123]. Liegt der Regressionskoeffizient einer solchen Regressionsgeraden über einem Wert von 0,9, kann von einem stabilen Modell gesprochen werden. Liegt der Koeffizient unterhalb dieses Wertes können z.B. zu geringe Messwerkzeugsteifigkeiten oder Inhomogenitäten im Verstärkungstextil vorliegen. In dieser Studie lagen alle Regressionskoeffizienten oberhalb von 0,95.

Der Verlauf der Regressionsgeraden erlaubt, Aussagen über das Permeabilitätsverhalten des Textils zu machen. Je sensibler das gemessene Textil auf Faservolumenänderungen reagiert, desto höher ist der Gradient der Geraden.

Der Gültigkeitsbereich dieses auf drei Stützstellen aufgebauten Modells ist durch den maximalen Faservolumengehalt begrenzt. Im Garn liegt dieser bei maximal $\frac{\pi}{4}$ bei kubischer Anordnung der Einzelfilamente und bei $\frac{\pi}{2} \cdot \sqrt{3}$ bei hexagonaler Anordnung. In der Literatur wird bei Geweben von Faservolumengehalten von bis zu 64 % berichtet [17]. Der geringste Faservolumengehalt für den die Formel noch valide ist, ist ebenfalls textilabhängig. Für feinere Gewebe liegt dieser Wert bei ca. 30 % - 35 % Faservolumengehalt. Für Glasfasermatten liegt der geringste Faservolumengehalt für den das Modell noch Gültigkeit besitzt noch niedriger, da diese auch bei niedrigeren Faservolumengehalten Kontakt zum Oberwerkzeug haben. Der anliegende Kompaktierungsdruck sollte bei mindestens 0,2 bar liegen, um zu gewährleisten, dass es nicht zu Race Tracking zwischen der angussnahen Lage und der Werkzeuginnenfläche kommt.

6 Ergebnisse

In diesem Kapitel sind die Ergebnisse der Permeabilitäts- und Crimpmessungen der 19 Glasfasergewebe dargestellt. Die einzelnen Permeabilitätsmesswerte, Anisotropien, Orientierungswinkel und Crimpwerte sind jeweils mit Standardabweichungen im Anhang A aufgeführt. Der mittlere Variationskoeffizient aller 19 Permeabilitätsresultate beträgt für den K1-Wert 9,9 % und für den K2-Wert 8,3 %. Wobei der niedrigste Variationskoeffizient bei 3 Gewebemessreihen bei 0,4 % lag. Lundström [55] berichtet bei einer Ebenenpermeabilitätsmessung von einem Gewebe und einem Gelege von Variationskoeffizienten von 8,5 % und 15 %. Parnas, Howard, Luce et al. [124] kommen ebenfalls bei einer gesättigten eindimensionalen Permeabilitätsmessung auf einen Variationskoeffizienten von 15 %. Die Permeabilitätsresultate von Steenkammer, McKnight, Wilkins et al. resultieren in Variationskoeffizienten zwischen 10 % und 20 % [125]. Hammond und Loos Messungen resultieren in einem Variationskoeffizienten von 30 % [68]. Niedrige Variationskoeffizienten können nur mit einem hochwertigen Verstärkungstextil und einer reproduzierbar messenden Permeabilitätsmesszelle erzielt werden. Hohe Variationskoeffizienten können auf das Verstärkungstextil oder die Messzelle zurückzuführen sein.

In den nachfolgenden Diagrammen ist die Permeabilitätsachse über drei Dekaden (außer in Kapitel 6.1 und bei der Abbildung 6.10) logarithmisch eingeteilt. Diese Einteilung erhöht die Übersicht und die Regressionsgüte der exponentiellen Ausgleichsgeraden kann dadurch einfach erfasst werden. Die Regressionsgüte wird bei allen Permeabilitätswertabbildungen ersichtlich durch den Abstand der gemittelten Permeabilitätswerte von der exponentiellen Ausgleichsgeraden und beschreibt, wie gut die Gerade die tatsächliche Permeabilitäts-Faservolumengehaltsbeziehung des Materials abbildet.

6.1 Überprüfung der Eignung von Kozeny-Carman zur Vorhersage von Permeabilitätswerten

Wird der Kozeny-Carman Faktor bei niedrigen Faservolumengehalten ermittelt, überschätzt das Kozeny-Carman Model die Permeabilität bei höheren Faservolumengehalten (siehe Abbildung 6.1). Auch von Demaria, Ruiz und Trochu [70] und Gutowski [126] wird beschrieben, dass die Kozeny Konstante k mit steigendem Faservolumen-gehalt sinkt. Die folgende Abbildung verdeutlicht diesen Zusammenhang.

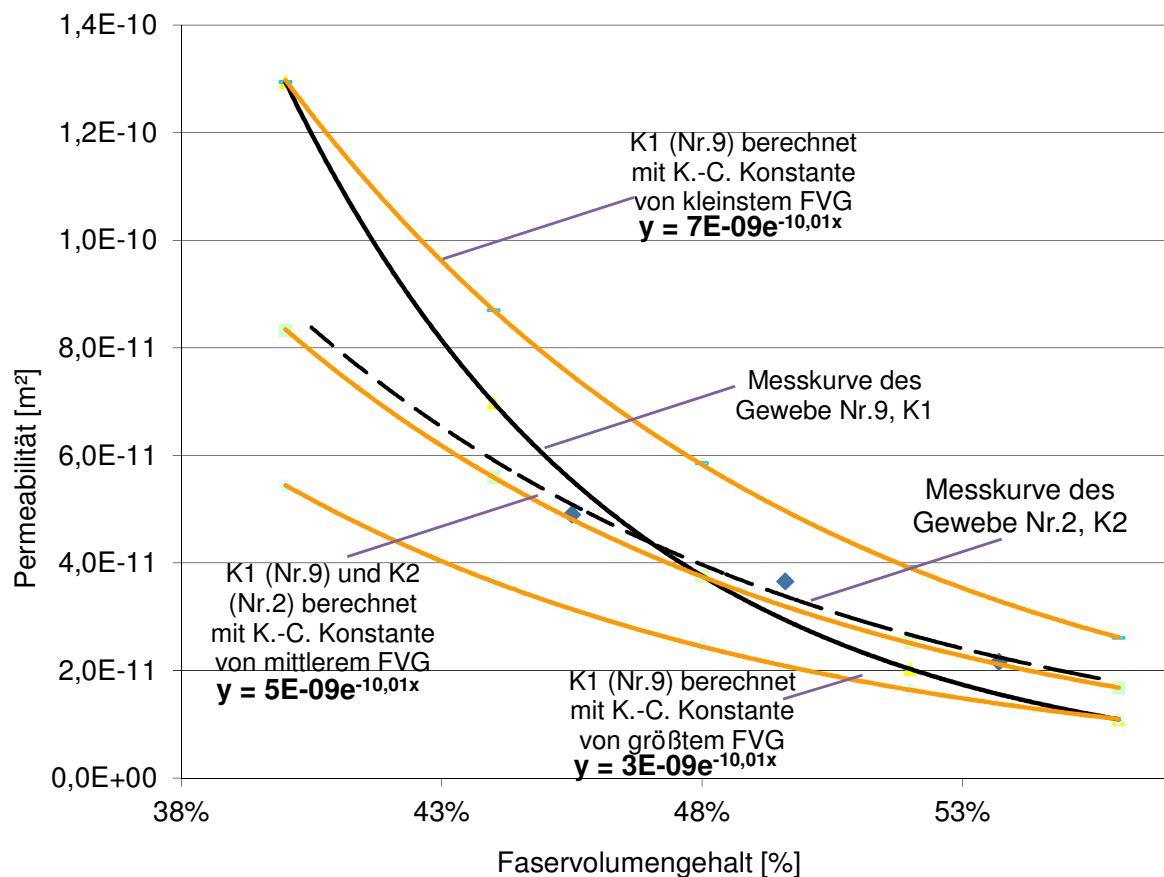


Abbildung 6.1: Permeabilitätskurven errechnet mit der Kozeny-Carman Gleichung im Vergleich zum tatsächlichen Permeabilitätsverlauf der K1 Permeabilität des Gewebes Nr.9 und der K2 Permeabilität des Gewebes Nr.2

Die unterste Kurve der Abbildung beschreibt den berechneten Verlauf, wenn in die Kozeny-Carman Formel der Kozeny-Faktor ermittelt beim höchsten Faservolumen-gehalt eingesetzt wird. Diese Kurve unterschätzt die Permeabilität bei niedrigen Fa-servolumengehalten. Von allen 38 (2 x 19) K1- und K2-Werten kann nur der K2-Wert des Gewebes Nr.2 durch Kozeny-Carman angenähert werden.

Für keines der 19 Gewebe, die in dieser Arbeit untersucht wurden, ist Kozeny-Carman anwendbar. Die Abnahme der Permeabilität mit steigendem Faservolumengehalt folgt nach Kozeny-Carman stets einer Polynomfunktion 5. Ordnung, die exponentiell mit $y = a \cdot e^{-10x}$ angenähert werden kann (siehe Abbildung 6.1). Die in Formel (2.11) eingesetzte Kozeny-Konstante bestimmt lediglich die Höhe der Permeabilitätskurve. Tatsächlich variiert der Abfall der Permeabilität über dem Faservolumengehalt jedoch stark in Abhängigkeit der textilen Parameter.

6.2 Einfluss des Finish auf die Permeabilität

Bei Geweben für Strukturbauteile wird die für den Webprozess nötige Schlichte abgewaschen und durch ein Finish ersetzt, welches die Faser-Matrix Anhaftung optimiert. Der Einfluss des Finish auf das Benetzungsverhalten eines Gewebes kann bei Injektionsdrücken von über 2 bar vernachlässigt werden, vgl. Kapitel 2.1.2. Das Finish kann jedoch auch einen Einfluss auf das Kompaktierungsverhalten und damit auf die Gewebearchitektur haben. Da die Studie mit Geweben unterschiedlicher Hersteller durchgeführt wurde, musste sichergestellt werden, dass das Finish der unterschiedlichen Hersteller vergleichbar ist. Der signifikante Einfluss des Finish auf die Permeabilität ist in [127-129] aufgeführt.

Die Hersteller verwenden keine übereinstimmenden Bezeichnungen für das Finish. Über Vergleiche von gleich aufgebauten Geweben unterschiedlicher Hersteller wurden die Finishes ausgewählt, die sich bezüglich der K1- und K2-Permeabilität gleich verhalten (siehe Abbildung 6.2).

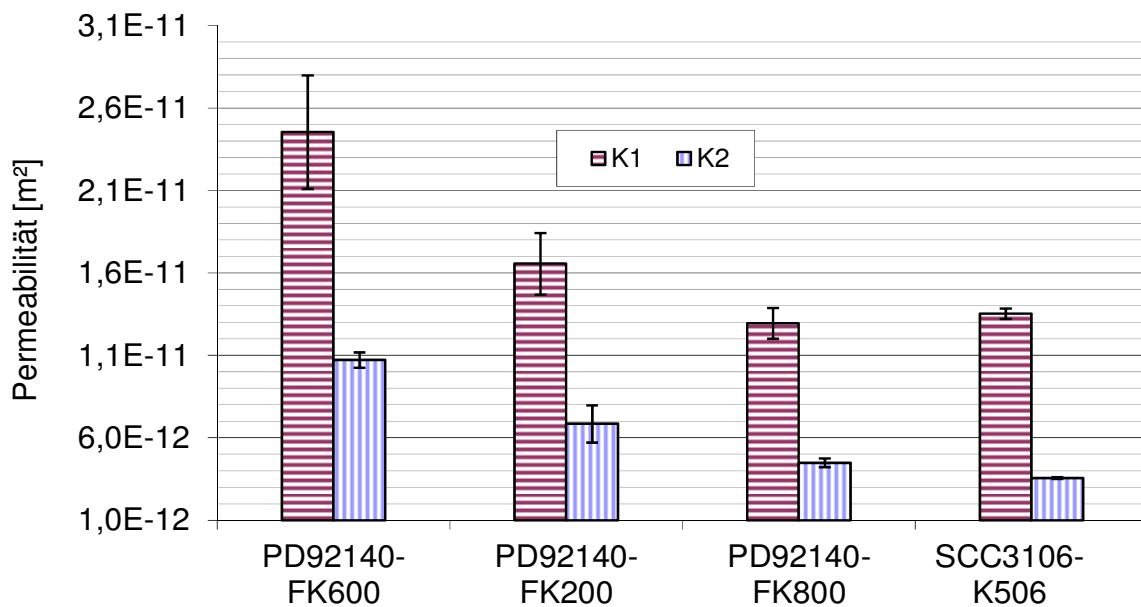


Abbildung 6.2: K1- und K2-Permeabilitätswertevergleich von vier Finishes von zwei Herstellern jeweils für den Faservolumengehalt von 55 %

Das Finish FK800 vom PD-Interglas führt zu vergleichbaren Permeabilitätswerten wie das Finish K506 von Schlösser und Cramer eines Köpergewebes. Die Köpergewebe PD92140 (kein Gewebe dieser Studie) und SCC 3106 (Gewebe Nr. 9) sind exakt gleich aufgebaut: 340 tex in den Kettgarnen und 274 tex in den Schussgarnen, Fadendichte in Kett 6,0 /cm, in Schuss 6,7 /cm.

Der Quervergleich des Finishes des Herstellers B (FK800) und C (TF970) wurde mit zwei weiteren gleich aufgebauten Geweben, Nr. 8 und 11, vorgenommen (Abbildung 6.3). (Die Herstellereingruppierung nach A, B, C und D ist in Tabelle 4.1 aufgeführt.)

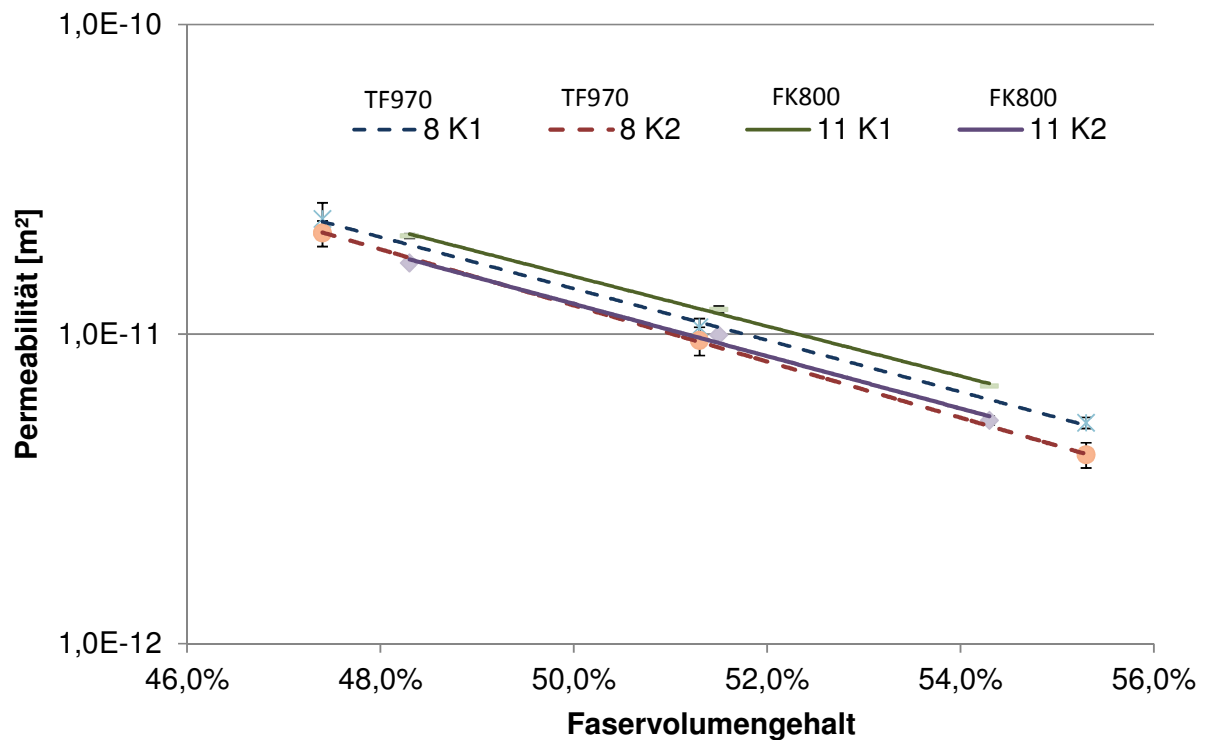


Abbildung 6.3: Vergleich der Permeabilitäten von den gleich aufgebauten Geweben Nr. 8 und Nr. 11 vom Hersteller B und C zur Beurteilung des Finishs

Es konnte kein signifikanter Unterschied zwischen den Geweben Nr. 8 und Nr. 11, die sich nur im Finish unterscheiden, ermittelt werden. Die beiden oberen Abbildungen zeigen, dass sich das Finish K506 des Herstellers D, das Finish FK800 des Herstellers B und das Finish TF970 des Herstellers C permeabilitätstechnisch gleich verhalten.

6.3 Einfluss des Einzelfilamentdurchmessers auf die Gewebepерmeabilität

Einen weiteren Einfluss auf die Permeabilität hat der Einzelfilamentdurchmesser der verwendeten Garne. Summerscales zitiert in seinem Paper ‚A model for the effect of fibre clustering on the flow rate in resin transfer moulding‘ [96] Arbeiten von Gurtan. Gurtan beschreibt, dass die Imprägnierbarkeit eines Garnes mit einem Faservolumengehalt von 50 % um den Faktor 3 höher ist, wenn der Einzelfilamentdurchmesser 15 µm beträgt, gegenüber einem Garn dessen Einzelfilamentdurchmesser 5 µm beträgt.

Zwei Gewebe der Hauptstudie dieser Arbeit weisen gleiches Finish, Webart, Fadendichte und Titer in Kett- und Schuss auf und unterscheiden sich nur im Durchmesser der Einzelfilamente, aus dem die Garne aufgebaut sind (6 μm vs. 9 μm) (Tabelle 6.1). Die K1-Permeabilität dieser beiden Gewebe unterscheidet sich um 10 % (siehe Abbildung 6.4).

Tabelle 6.1: Übersicht der textilen Parameter, der in Abbildung 6.4 dargestellten Atlasgewebe

Nr.	Garn (Kett-/Schussrichtung)	Dichte in Kettrichtung [Fäden/cm]	Dichte in Schussrichtung [Fäden/cm]	Titer in Kettrichtung [g/km]	Titer in Schussrichtung [g/km]
11	EC6-68	23	21	68	68
12	EC9-68	22	21	68	68

Da ermittelt wurde, dass der Einzelfilamentdurchmesser einen signifikanten Einfluss auf die Permeabilität hat, wurden für diese Studie neben dem Gewebe Nummer 11 nur Gewebe ausgewählt, deren Einzelfilamentdurchmesser 9 μm beträgt.

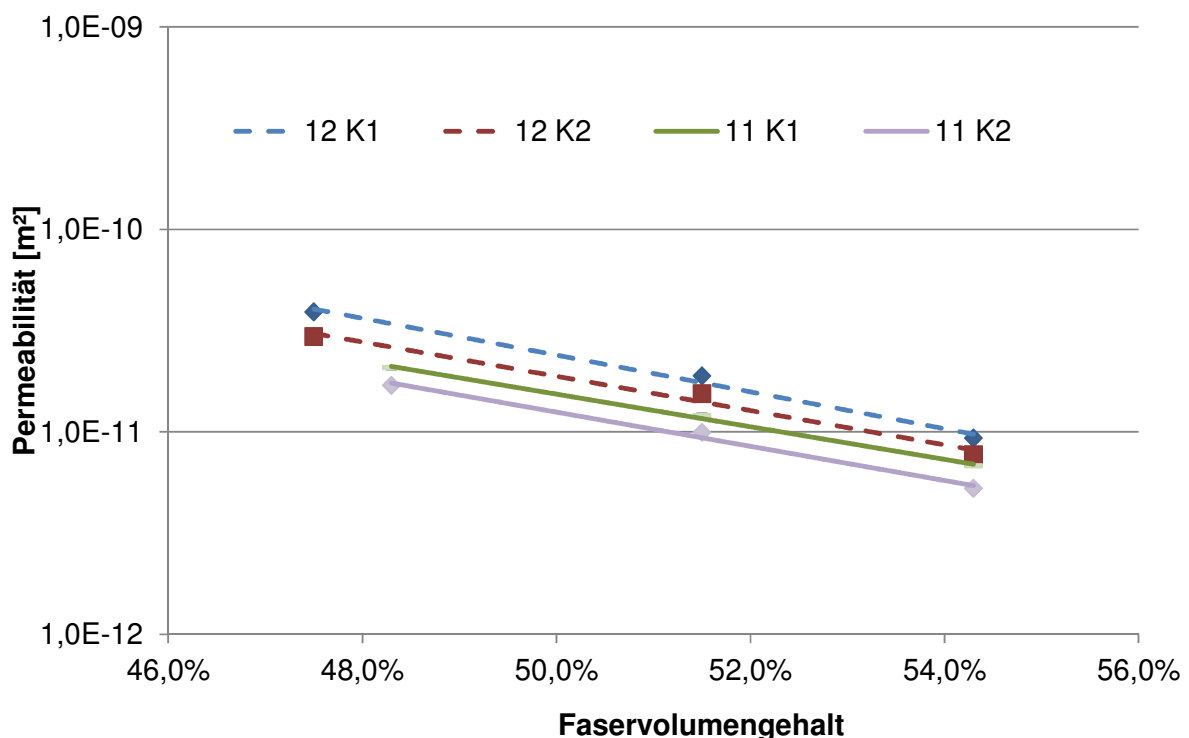


Abbildung 6.4: Vergleich der Gewebe Nr.11 und Nr.12, die sich nur in ihrem Einzelfilamentdurchmesser unterscheiden

6.4 Einfluss der Lagenanzahl auf die Permeabilität

In dem nachfolgenden Diagramm sind die K1- und K2-Werte des Körpergewebes Nr. 9 dargestellt, ermittelt bei vier verschiedenen Kavitätshöhen. Jeder Datenpunkt stellt den gemittelten Wert aus drei Versuchen dar. Der folgenden Abbildung ist der Einfluss der Lagenanzahl auf die Permeabilität zu entnehmen.

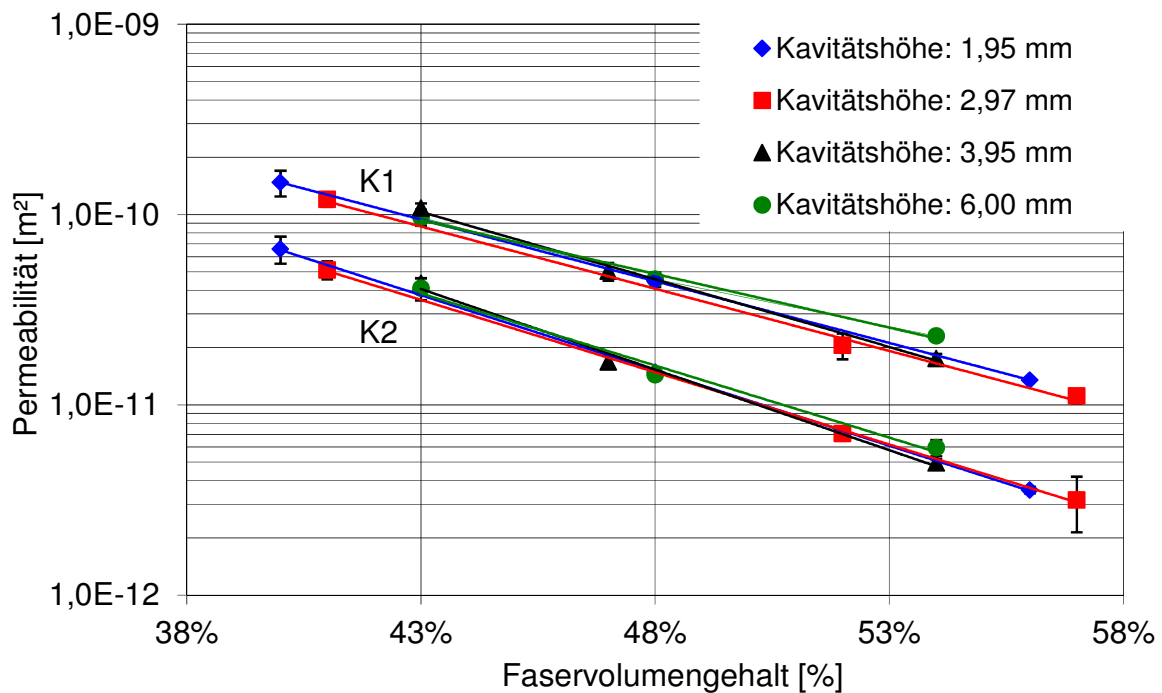


Abbildung 6.5: Permeabilitätswerte K1 (obere 4 Linien), K2 (untere 4 Linien) aufgetragen über den Faservolumengehalt von vier Kavitätshöhen (1,95 mm; 2,97 mm; 3,95 mm; 6,00 mm)

Die Anzahl der Lagen variierte hierbei von fünf Lagen, bei einem Faservolumengehalt von 40 % und einer Kavitätshöhe von 1,95 mm, bis 21 Lagen bei einem Faservolumengehalt von 57 % und 6,00 mm Kavitätshöhe. Die Permeabilitätswerte bei gleichen Faservolumengehalten unterscheiden sich nicht signifikant voneinander. Die Permeabilität ermittelt bei einer Kavitätshöhe von 6,00 mm scheint leicht höher als bei den niedrigeren Kavitätshöhen zu sein. Zu dem Ergebnis, dass eine starke Erhöhung der Lagenanzahl zu einer leichten Senkung der Permeabilität führt, kommen auch Lekakou, Jahori und Bader [130]. Insgesamt lässt sich aus den Ergebnissen ableiten, dass die Anzahl der Lagen einen sehr geringen Einfluss hat. Dennoch wurden die nachfolgenden Studien ausschließlich bei Kavitätshöhen von 1,5 mm bis 3,95 mm durchgeführt, um einen Einfluss der Lagenanzahl gänzlich auszuschließen.

6.5 Zum Orientierungswinkel der Fließfrontellipsen

Bei den Leinwand- und Köpergeweben stimmten die Richtungen der höchsten Permeabilität, K_1 , mit der Kettrichtung und die Richtung der niedrigsten Permeabilität, K_2 , mit der Schussrichtung überein. Die Atlasgewebe verhielten sich mit einer mittleren Anisotropie von 0,82 fast isotrop. Die Fließfrontform war also nahezu kreisförmig, vgl. Abbildung 6.6. Die Drehwinkel dieser Atlasgewebe lagen bei den niedrigeren Faservolumengehalten bei 70° . Mit zunehmendem Faservolumengehalt drehte sich die Fließfrontellipse auf 10° , vgl. Abbildung 6.7. Aus diesem Grund war es nicht möglich, die K_1 - und K_2 -Permeabilitäten der Atlasgewebe mit den textilen Parametern in Kett- und Schussrichtung zu korrelieren.

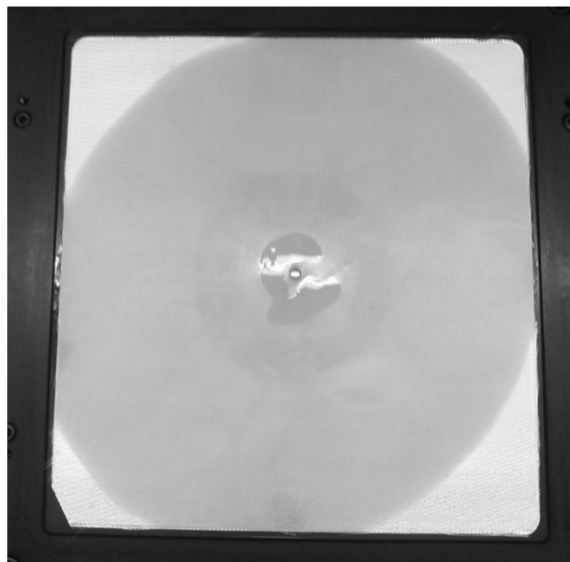


Abbildung 6.6: Fließfrontform nach Ende einer Permeabilitätsmessung (bei geöffnetem Werkzeug) von 12 Lagen des Atlasgewebes Nr. 12 (Hersteller C)

Bei den Köpergeweben gab es ein Gewebe, Nr. 19, dessen Fließfrontellipse ebenfalls erst bei einem höheren Faservolumengehalt ($> 56\%$) gegen 0° tendierte (siehe Abbildung 6.7). Bei einem Faservolumengehalt von $43,2\%$ lag die K_1 -Richtung bei 37° zur Kettrichtung. Mit zunehmenden Faservolumengehalten reduzierte sich der Drehwinkel. Bei einem Faservolumengehalt von $48,7\%$ lag der Drehwinkel bei 23° , bei $55,7\%$ bei 11° und erst bei $60,1\%$ nur noch bei 5° zur Kettrichtung. Dieses mit 600 g/m^2 schwerste und dichteste Gewebe Nr.9 wurde deswegen ebenfalls von den meisten Betrachtungen im weiteren Ergebnisteil außen vor gelassen. Da die drei At-

lasgewebe und das Leinwandgewebe alle recht dicht gewebt sind, wird vermutet, dass das Fließen zwischen den Lagen hier dominanter ist und die Fließfrontorientierung insbesondere bei den niedrigen Faservolumengehalten durch den Grat (Versatz der Knotenpunkte) bestimmt wird. In der folgenden Abbildung sind die Orientierungswinkel aller Gewebe über dem Faservolumen Gehalt aufgetragen. Die nachfolgende Abbildung zeigt auf, dass die Orientierungswinkel der Atlasgewebe (Nr. 8, 11, 12) und des Köpergewebes Nr. 19 (Hexcel 1038) deutlich von 0° abweicht.

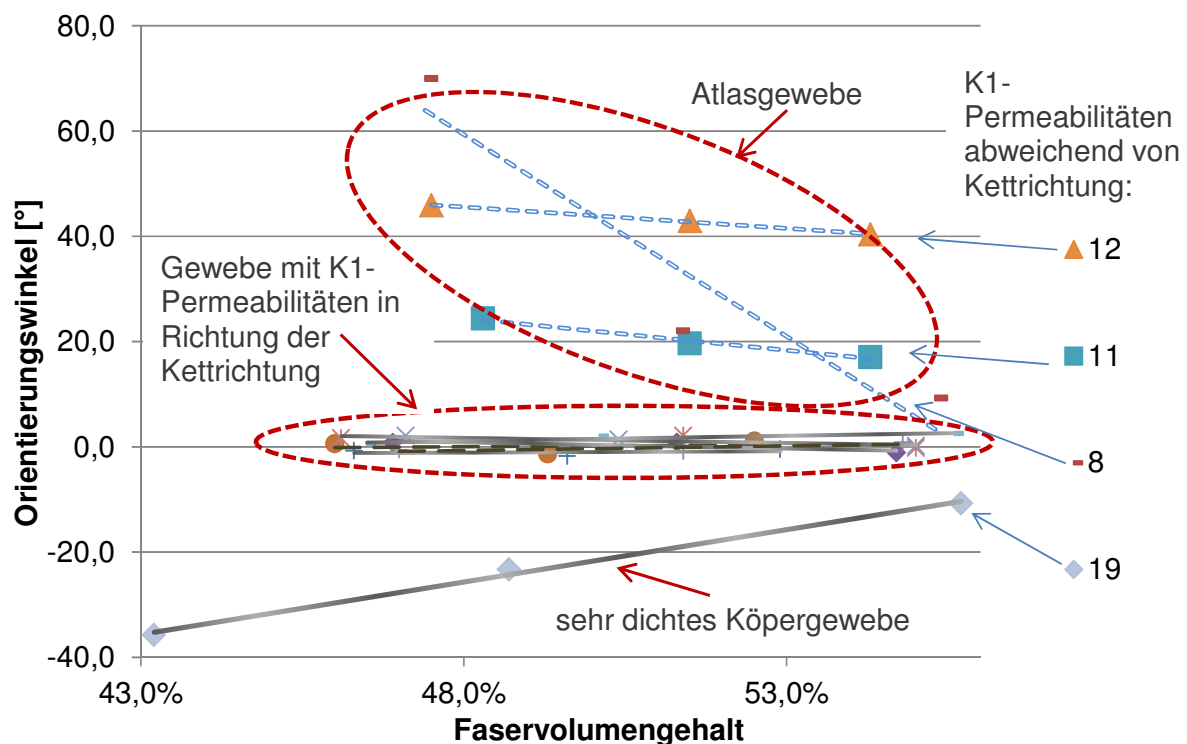


Abbildung 6.7: Orientierungswinkel der Fließfrontellipsen von Atlas-, Leinwand- und Köpergeweben in Abhängigkeit vom Faservolumen Gehalt

Zwischen dem Orientierungswinkel und dem Faservolumen Gehalt besteht ein linearer Zusammenhang. Der Koeffizient der Regressionsgerade ist bei 8 der 19 Gewebe über 0,8 und in 4 Fällen liegt er über 0,98. Der Bereich -5° bis $+5^\circ$ ist noch einmal höher aufgelöst in der nachfolgenden Abbildung dargestellt.

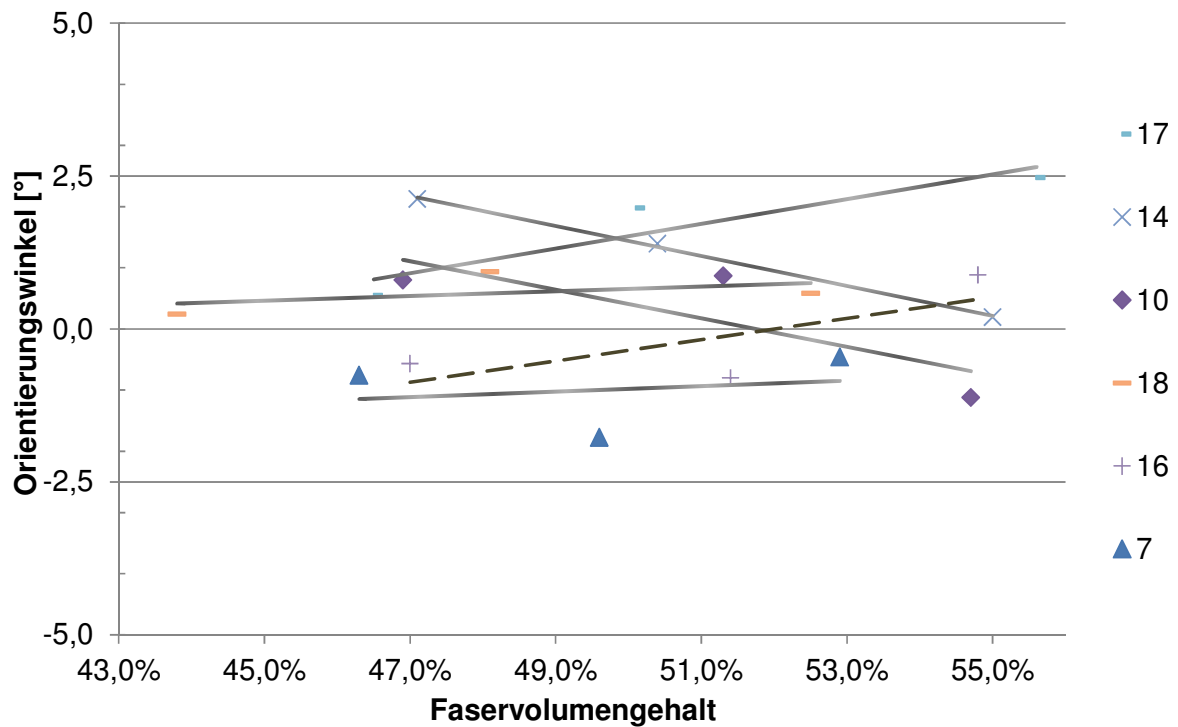


Abbildung 6.8: Orientierungswinkel der Fließfrontellipsen der Leinwand (gestrichelte Linien)- und Köpergewebe im Bereich von -5° bis $+5^\circ$

Bei einem Anisotropiewert von 1 (Kreis) gibt es keinen Orientierungswinkel. Von Geweben, deren Anisotropiewert nahe 1 ist, lässt sich der Orientierungswinkel nicht bestimmen.

6.6 Einfluss der Webart auf die Permeabilität

In der Abbildung 6.9 und der Abbildung 6.10 sind die K1- und die K2-Permeabilitäten von drei Leinwand- und drei Köpergeweben dargestellt. Jeweils ein Köper und ein Leinwandgewebe haben bezüglich Dichte und Titer (jeweils in Kett- und Schussrichtung) die gleichen Eigenschaften. D.h. die Leinwand- und Köpergewebepaare unterscheiden sich lediglich in der Webart (siehe Tabelle 6.2).

Tabelle 6.2: Übersicht der textilen Parameter, der in Abbildung 6.9 und Abbildung 6.10 dargestellten Gewebe

Nr.	Bindungsart	Dichte in Kettrichtung [Fäden/cm]	Dichte in Schussrichtung [Fäden/cm]	Titer in Kett-richtung [g/km]	Titer in Schuss-richtung [g/km]
6	Leinwand	12	11,5	68	68
7	Köper	12	11,5	68	68
10	Köper	7	7	204	204
16	Leinwand	7	7	204	204
14	Köper	5,9	6,6	340	272
15	Leinwand	5,9	6,6	340	272

Zwischen den K1-Permeabilitäten sind kaum Unterschiede aufgrund der Webart zu erkennen.

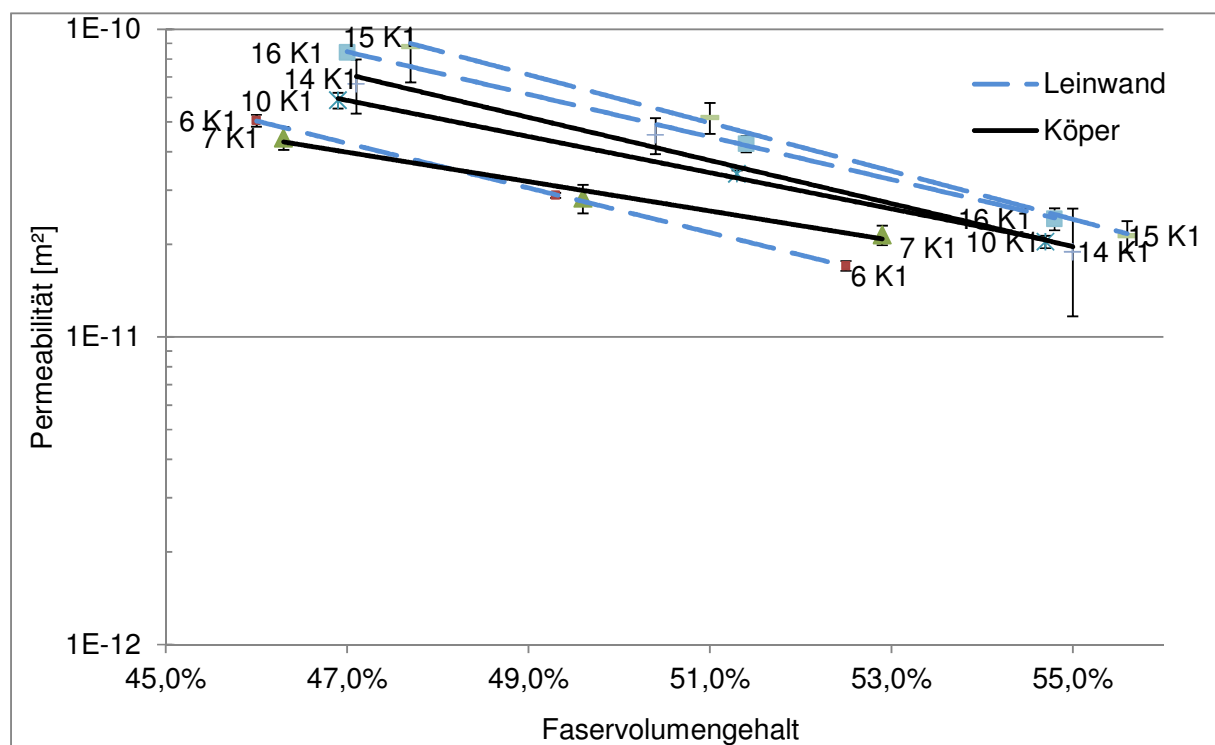


Abbildung 6.9: Vergleich der K1-Permeabilitäten von 3 Leinwand- und Köpergewebepaaren (Nr. 6 und 7, 10 und 16, 14 und 15), die sich nur in der Webart unterscheiden; Gewebepaare sind mit gleichem Symbol gekennzeichnet, Leinwandgewebekurven sind gestrichelt dargestellt

Die K2-Permeabilitäten der Leinwand- und Köpergewebepaare unterscheiden sich jedoch deutlich. Die Köpergewebe weisen niedrigere K2-Permeabilitäten als die Leinwandgewebe auf.

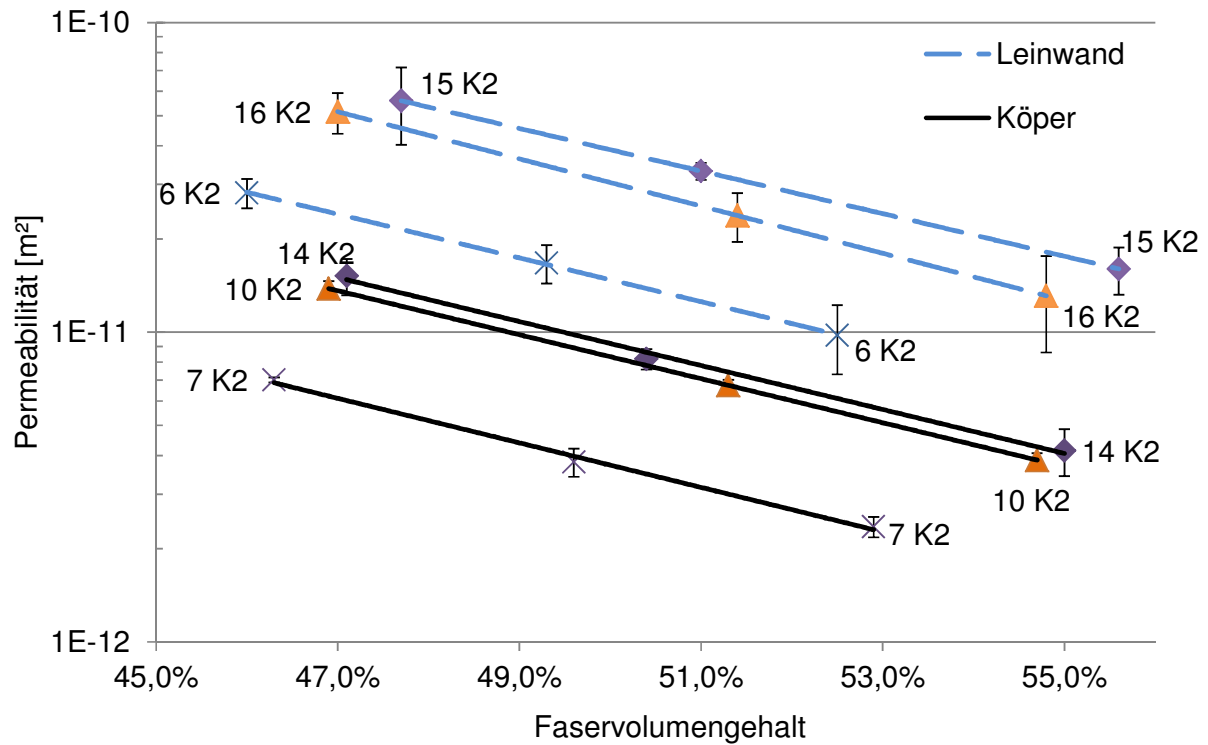


Abbildung 6.10: Vergleich der K2-Permeabilitäten von 3 Leinwand- und Köpergewebepaaren (Nr. 6 und 7, 10 und 16, 14 und 15), die sich nur in der Webart unterscheiden; Gewebepaare sind mit gleichem Symbol gekennzeichnet, Leinwandgewebekurven sind gestrichelt dargestellt

Noch deutlicher wird dieser Zusammenhang wenn die über 3 Köpergewebe gemittelte K1- und K2-Permeabilität mit der gemittelten K1- und K2-Permeabilität der 3 Leinwandgewebe verglichen wird (Abbildung 6.11). Die Stützpunkte der Vergleichsgeraden wurden jeweils berechnet mit den Faservolumengehalten von 40 %, 48 % und 56 %.

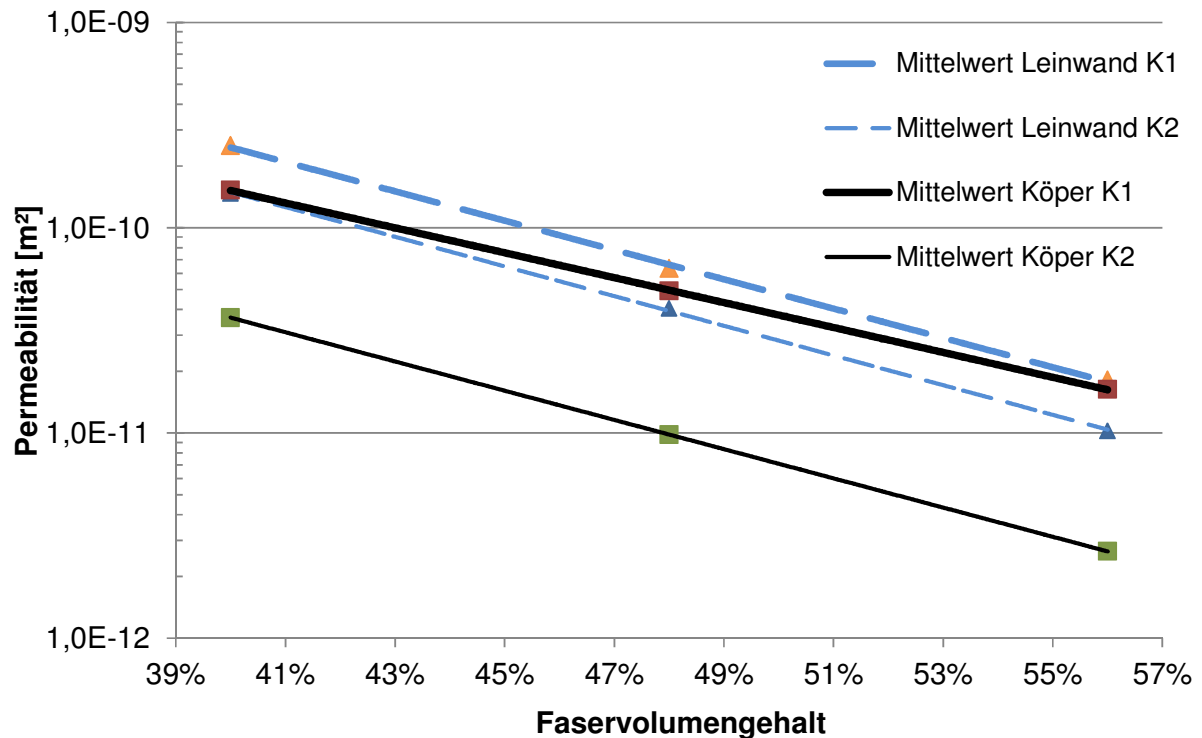


Abbildung 6.11: Jeweils über 3 Gewebe gemittelte Leinwand (Nr. 6, 15, 16)- und Körpergewebepерmeabilitäten (Nr. 7, 10, 14). Textile Parameter der Gewebe siehe Tabelle 4.1. (Da Permeabilitätswerte mehrerer Gewebe gemittelt wurden, ist keine Standardabweichung eingetragen.)

In der obigen Abbildung ist zu erkennen, dass der Abstand zwischen der K1- und K2-Permeabilität bei den Körpergeweben größer ist. Das bedeutet, dass Körpergewebe zu einer anisotroperen Fließfront, also einer schmaleren Ellipse, führen. In der folgenden Abbildung ist direkt das Verhältnis der K2- zur K1-Permeabilität, die Anisotropie, der in Tabelle 6.2 und Abbildung 6.10 aufgeführten Körper- und Leinwandgewebe, über dem Faservolumengehalt aufgetragen. Die Anisotropie ist definiert im Kapitel 2.1.3.

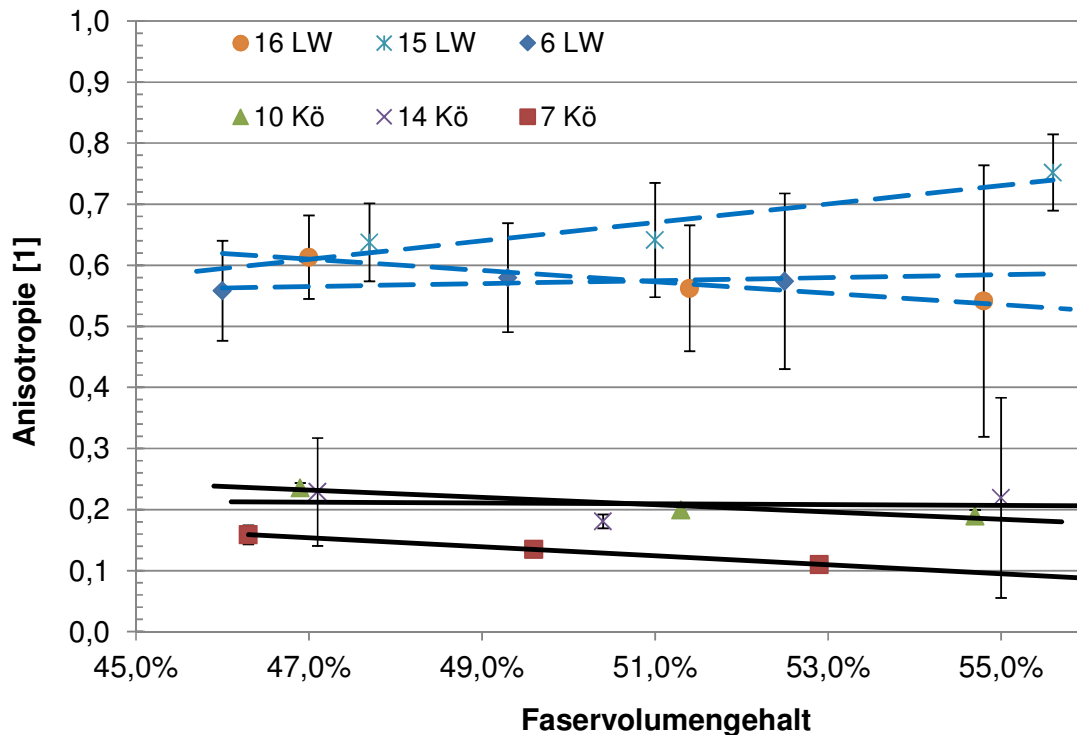


Abbildung 6.12: Vergleich der Anisotropien der in Abbildung 6.10 und Tabelle 6.2 aufgeführten Leinwand- und Köpergewebe (gestrichelt). Köpergewebe sind in der Legende mit ‚Kö‘ abgekürzt, Leinwandgewebe mit ‚LW‘

Es besteht ein linearer Zusammenhang zwischen der Anisotropie und dem Faservolumengehalt. Bei den meisten Geweben sinkt der Anisotropiewert leicht mit steigendem Faservolumengehalt. Auffällig ist nun, dass sich alle drei Leinwandgewebe isotroper verhalten, also höhere Anisotropiewerte haben (ein Anisotropiewert von 1 beschreibt den kreisrunden, isotropen Fließfall), als die Köpergewebe.

Der Trend, dass eine geringere Anzahl an Bindungspunkten zu einer höheren Anisotropie führt, setzt sich nicht fort, wenn Atlasgewebe mitberücksichtigt werden. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die Atlasgewebe sehr fein (niedriger Titer) und sehr dicht (hohes Fadendichte-Titer-Produkt) aufgebaut sind. Dieser Aufbau führt dazu, dass das Fließbild durch das Fließen zwischen den Lagen im Gegensatz zu durch die Lagen bestimmt ist. Dies führt zu einem hohen Anisotropiewert.

Festzuhalten bleibt: Köper- und Leinwandgewebe unterscheiden sich bei ansonsten gleichem Aufbau leicht in der Höhe der Permeabilität, leicht in der Abhängigkeit vom Faservolumengehalt (dem Gradienten der Permeabilitätsgerade) und stark in der Anisotropie.

6.7 Einfluss der Fadendichte und des Titers auf die Permeabilität

Der Titer und die Fadendichte bedingen sich und müssen gemeinsam betrachtet werden. Gewebe können eine ähnliche Permeabilität haben und dennoch aus sehr unterschiedlichem Titer und unterschiedlicher Fadendichte aufgebaut sein. Die Abbildung 6.13 zeigt die Permeabilitäten von zwei Köpergeweben, die sehr unterschiedlich aufgebaut sind (Tabelle 6.3) und dennoch ähnliche Permeabilitäten haben.

Tabelle 6.3: Übersicht der textilen Parameter, der in Abbildung 6.13 dargestellten Gewebe

Nr.	Bindungsart	Dichte in Kettrichtung [Fäden/cm]	Dichte in Schussrichtung [Fäden/cm]	Titer in Kettrichtung [g/km]	Titer in Schussrichtung [g/km]
13	Köper 2/2	7	6,5	204	204
7	Köper 2/2	12	11,5	68	68

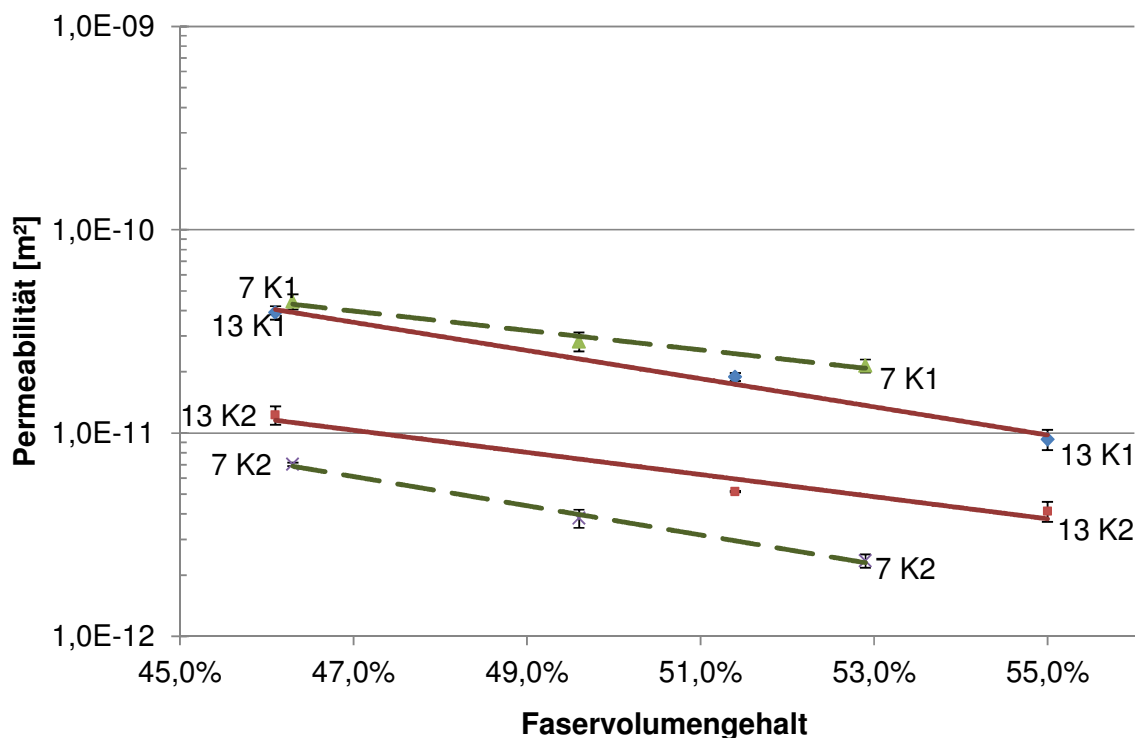


Abbildung 6.13: Vergleich zweier Geweben mit ähnlichen Permeabilitäten trotz stark unterschiedlichem Aufbau

Das Gewebe Nr. 7 hat eine ca. 1,7 fache Fadendichte gegenüber dem Gewebe Nr.13. Der Titer von Gewebe Nr. 7 beträgt jedoch nur ein Drittel des Gewebes Nr. 13

(siehe Tabelle 6.3). Noch stärker unterscheiden sich die Gewebe Nr. 10 und Nr. 17 voneinander und haben annähernd die gleiche K1- und K2-Permeabilität, vgl. Abbildung 6.18 und Tabelle 6.5.

Eine Aussage zum alleinigen Einfluss der Fadendichte oder des Titters auf die Permeabilität lässt sich also nicht treffen. Titer und Fadendichte müssen gemeinsam betrachtet werden. In der Abbildung 6.14 ist die über Kett- und Schussgarn gemittelte Fadendichte der 5 Gewebe vom Hersteller A, 6 Gewebe vom Hersteller C, 5 Gewebe vom Hersteller B und des einen Gewebes vom Hersteller D über dem Titer (über Kett- und Schuss gemittelt) aufgetragen. Die drei sehr dichten Atlasgewebe vom Hersteller C mit einer Fadendichte von 21 /cm bis. 23 /cm bei einem Titer von 68 tex sind zu Gunsten der Übersichtlichkeit in dieser Abbildung nicht eingetragen.

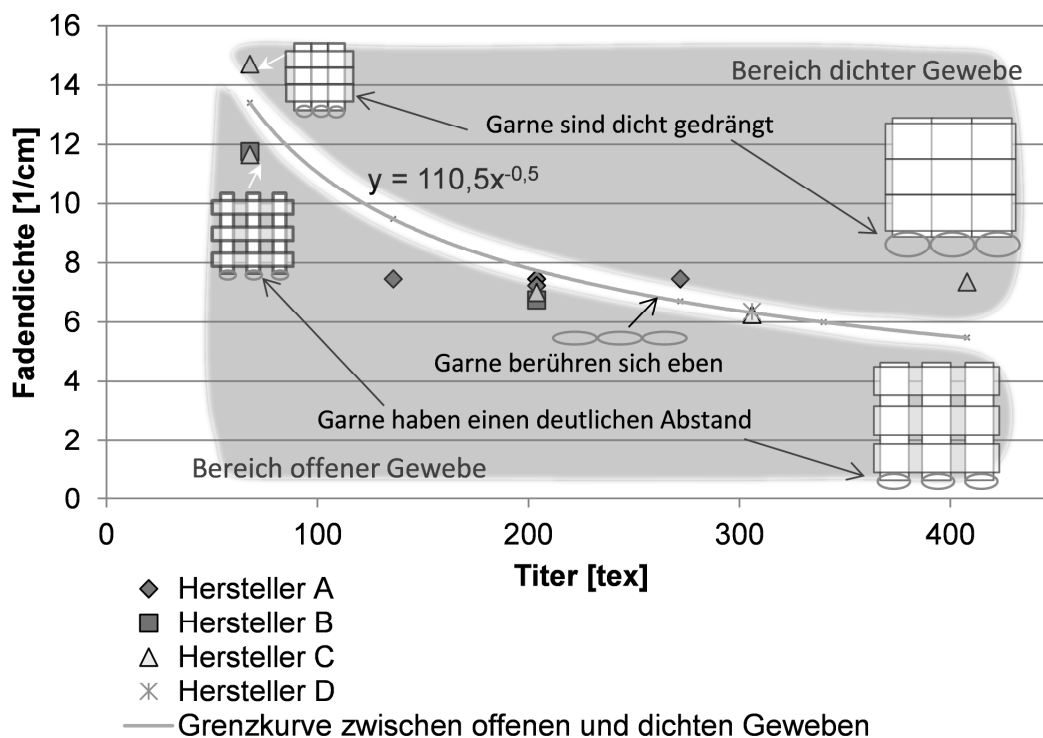


Abbildung 6.14: Über Kett- und Schussgarn gemittelte Fadendichten aufgetragen über die mittleren Titer aller 19 Gewebe. Zusätzlich eingetragen ist eine Kurve (kontinuierlich), welche die Gewebe in offen und dicht unterteilt und der Potenzfunktion: $f(x)=110,5 x^{0,5}$ gehorcht und eine Flächengewichtskurve (gestrichelt).

Die durchgezogene Linie ist keine Regressionskurve sondern unterteilt die Gewebe in dichte und offene Gewebe. Sie wurde berechnet unter der Annahme, dass ein Gewebe dann offen ist, wenn der Titer und die Fadendichte so eingestellt sind, dass

sich direkt benachbarte Garne, gerade eben berühren. Bei dieser Betrachtung wurde ein Garnhöhen- zu Breitenverhältnis von 1:9 im unkompaktierten Zustand angenommen. Das Verhältnis 1:9 basiert auf der in Kapitel 4 vorgestellten μ CT-Studie. Dieses angenommene Garnhöhen-Breitenverhältnis führt zu dem in der Funktionsgleichung angegebenen Faktor von 110,5. (Der Exponent von -0,5 ergibt sich dadurch, dass der Titer die Garnbreite im Quadrat beinhaltet.) Eine Einteilung in offene und dichte Gewebe ist deswegen von Bedeutung, weil die Permeabilität von dichten Geweben viel stärker mit steigendem Faservolumengehalt fällt, als bei offenen Geweben. Des Weiteren ist in Abbildung 6.14 das sich für die dargestellte Fadendichte-Titer-Kurve ergebende Flächengewicht eingetragen, um die Gewebe besser einordnen zu können.

Auf den folgenden Abbildungen (Abbildung 6.15 - Abbildung 6.17) wird der Gradient von jeweils einem als offen (gestrichelte Gerade) und einem als dicht (durchgehende Gerade) eingeteilten Köpergewebe miteinander verglichen.

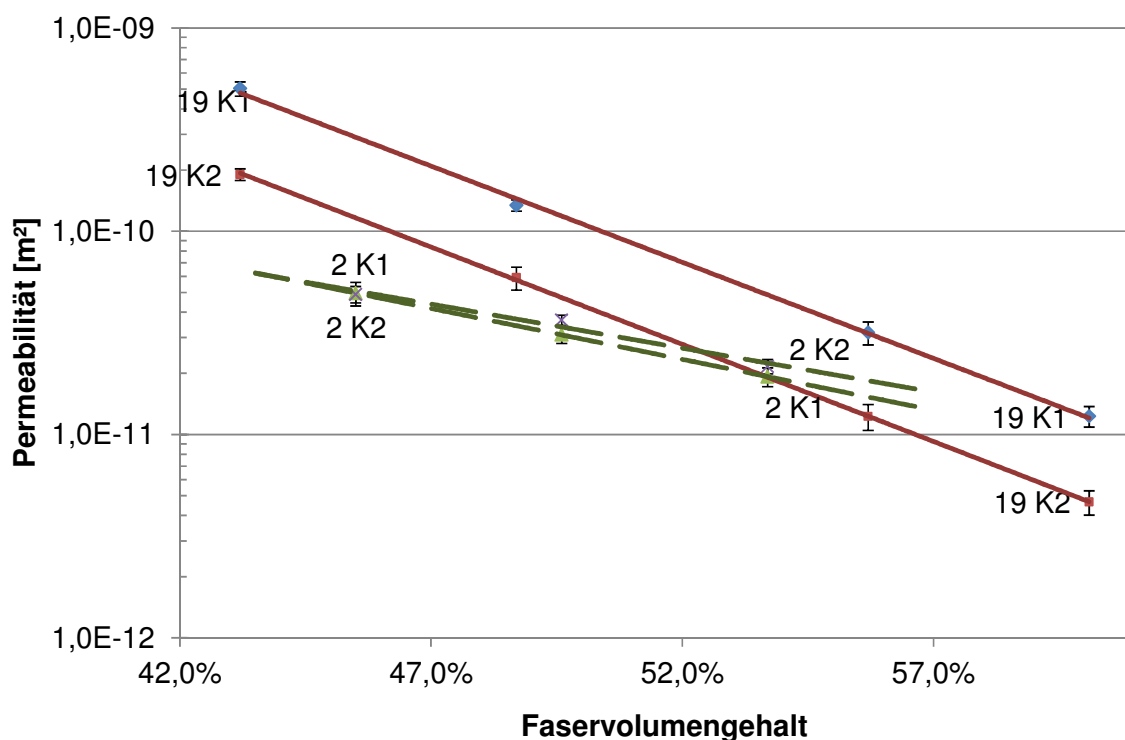


Abbildung 6.15: Vergleich der Köpergewebe Nr. 19 und Nr. 2

In der Abbildung 6.15 werden das dichteste Gewebe dieser Studie (Gewebe Nr. 19) und das offenste Gewebe (Gewebe Nr. 2) dargestellt. Deutlich zu erkennen ist der

stärkere Abfall der Permeabilität mit steigendem Faservolumengehalt des dichteren Gewebes Nr. 19. Bei dem Gewebe Nr. 2 ist die Fließfront nahe einem Kreis, d.h. K1 und K2 liegen sehr nahe beieinander und kreuzen sich. (Das führt strenggenommen zur Änderung der K1- und K2-Richtung, diese Richtungsänderung wurde in der Abbildung nicht berücksichtigt.)

Einen weiteren Vergleich zum Einfluss des Fadendichte-Titer-Produktes zeigen die Gewebe Nr. 1 und Nr. 2 von Hersteller A in der unteren Abbildung.

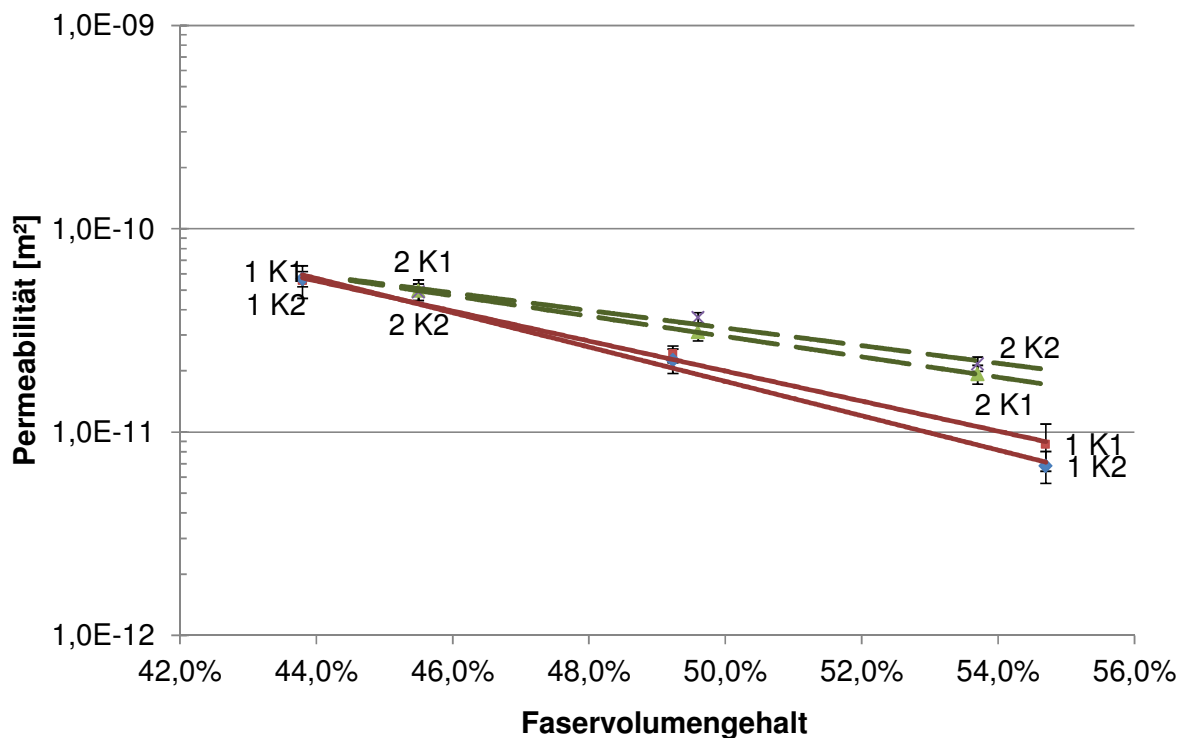


Abbildung 6.16: Vergleich der Körpergewebe Nr. 1 und Nr. 2

Das Gewebe Nr. 2 vom Hersteller A hat einen Titer von 136 tex in Kett und Schuss. Das Gewebe Nr. 1 vom gleichen Hersteller ist gleich aufgebaut, hat jedoch den doppelten Titer in Kette und Schuss (272 tex). Der höhere Titer bei ansonsten gleichen Parametern führt zu einem dichteren Gewebe und einem stärkeren Gradienten der Permeabilitäts-Faservolumengehaltsgerade, des Gewebes Nr. 1.

Ähnlich deutlich ist der Einfluss vom dichteren Aufbau eines Gewebes beim Vergleich der Gewebe Nr. 18 und Nr. 19 von Hersteller C zu sehen, dessen textile Parameter in der unteren Tabelle aufgeführt sind.

Tabelle 6.4: Übersicht der textilen Parameter, der in Abbildung 6.17 dargestellten Köpergewebe

Nr.	Garn (Kett-/Schussrichtung)	Dichte in Kettichtung [Fäden/cm]	Dichte in Schussrichtung [Fäden/cm]	Titer in Kettichtung [g/km]	Titer in Schussrichtung [g/km]	Flächengewicht (gemessen) [g/m ²]
18	11,8	11,5	68	68	162	EC9-68
19	7,35	7,35	408	408	600	EC9-136x3

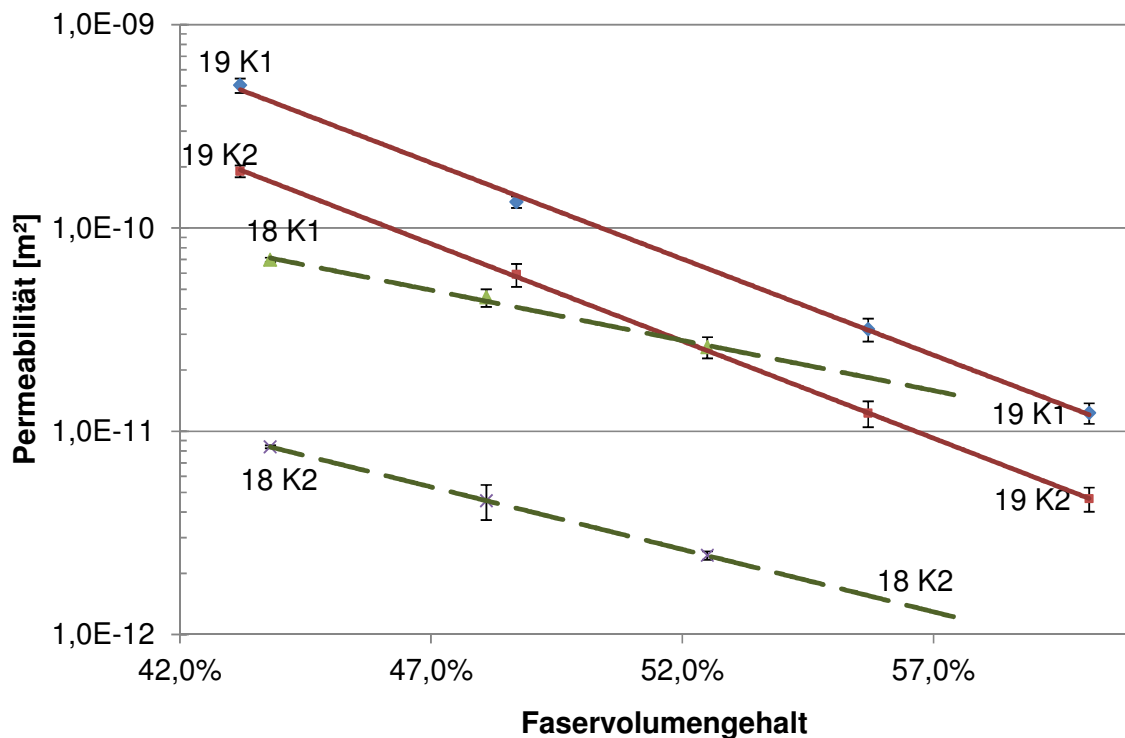


Abbildung 6.17: Vergleich der Nr. 18 und Nr.19.

Mit der Kenntnis der Fadendichte und des Titers eines Gewebes können Aussagen über den Gradienten der Permeabilitäts-Faservolumengehaltsgeraden gemacht werden. Aussagen über die Anisotropie, also wie stark sich die K2-Permeabilität von der K1-Permeabilität unterscheidet, können mit Kenntnis der Fadendichte und des Titers nicht gemacht werden.

6.8 Einfluss des Crimp auf die Permeabilität

Die Anisotropie lässt sich mit dem Crimp der Kett- und Schussgarne beschreiben. Der Crimpwert beschreibt die Welligkeit in Kett- und Schussrichtung, also wie stark unduliert die Garne im Gewebe vorliegen. Deren Bestimmung ist unter 5.1 beschrieben. Anhand dieses Wertes kann auch erklärt werden, warum isotrop aufgebaute

Gewebe ein anisotropes Fließverhalten zeigen. In der nachfolgenden Abbildung sind die Permeabilitätswerte von vier isotrop aufgebauten Geweben dargestellt.

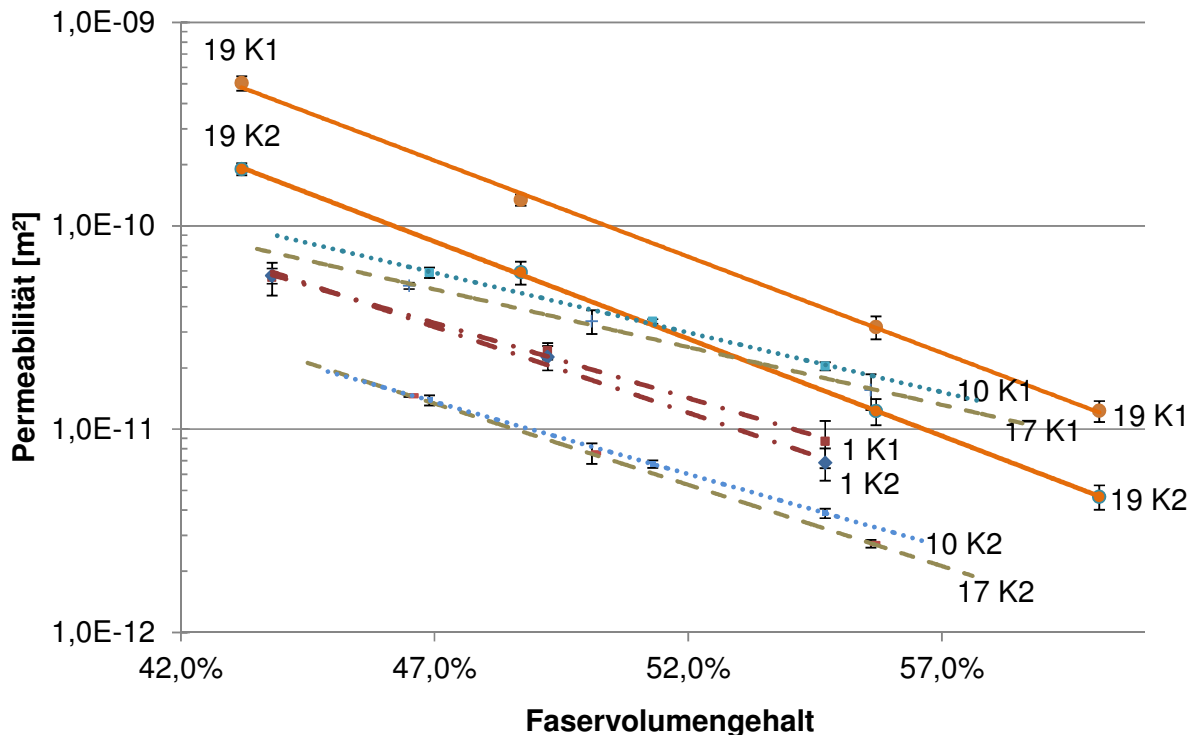


Abbildung 6.18: Permeabilitäten der isotrop aufgebauten Gewebe Nr. 1, 10, 17 und 19

Obwohl alle Gewebe in Abbildung 6.18 isotrop aufgebaut sind (vgl. Tabelle 6.5), verhält sich nur das Gewebe vom Hersteller A (Nr. 1) auch fließtechnisch isotrop.

Tabelle 6.5: Übersicht der textilen Parameter, der in Abbildung 6.18 dargestellten isotropen Gewebe

Nr.	Bindungsart	Dichte in Kettrichtung [Fäden/cm]	Dichte in Schussrichtung [Fäden/cm]	Titer in Kettrichtung [g/km]	Titer in Schussrichtung [g/km]
1	Köper 2/2	7,45	7,45	272	272
10	Köper 2/2	7	7	204	204
17	Köper 2/2	14,7	14,7	68	68
19	Köper 2/2	7,35	7,35	408	408

Die K1 und K2 Geraden der Gewebe liegen hingegen bis zu einem Faktor von 9 auseinander. Für die Köpergewebe wird der Zusammenhang zwischen der Anisotropie und dem Verhältnis zwischen dem Crimp im Kettgarn und im Schussgarn in der folgenden Abbildung 6.19 ersichtlich. Aufgeführt sind in der Abbildung alle Köperge-

webe vom Hersteller B und C. (vgl. Tabelle 4.1) Das extrem dicht aufgebaute Körpergewebe Nr. 19 von Hersteller C lässt sich in dieses Diagramm nicht einordnen und ist nicht aufgeführt.

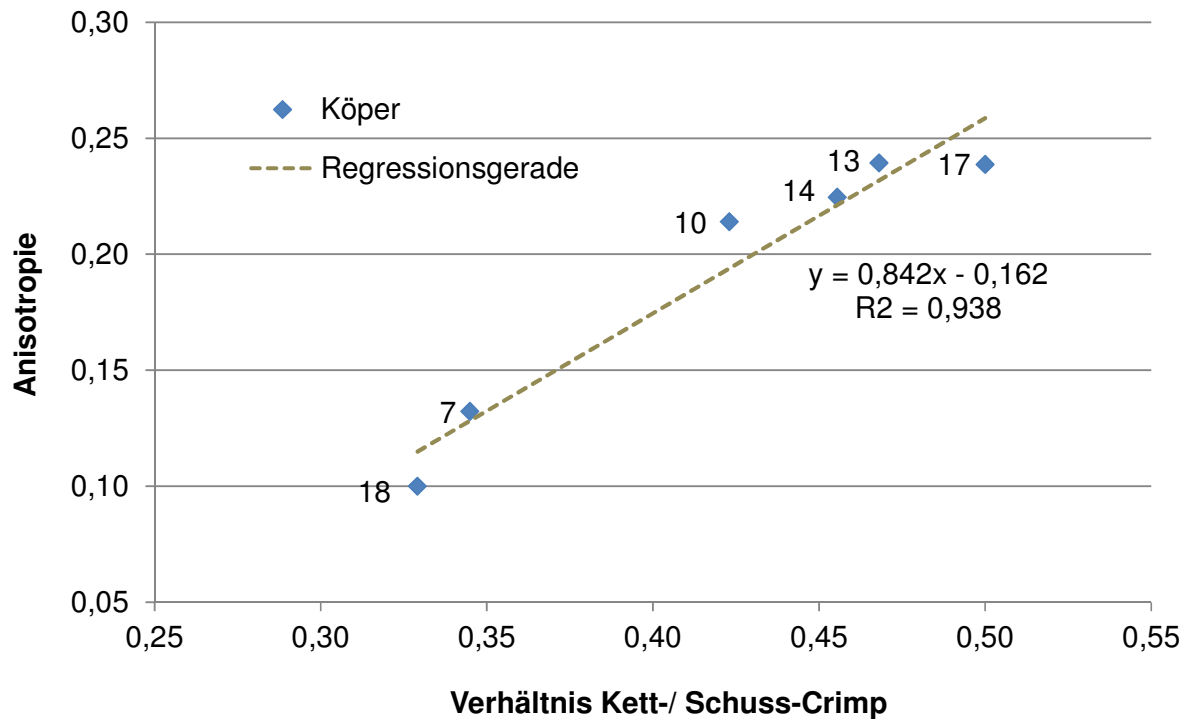


Abbildung 6.19: Anisotropiewerte (bei 50 % Vf) der Körpergewebe vom Hersteller B (Nr. 7 und 13) und C (Nr. 10, 14, 17 und 18) aufgetragen über das Kett- und Schusscrimp-Verhältnis

Der Crimpwert in Schussrichtung war für alle Gewebe dieser Studie höher als der Crimpwert der Kettrichtung. Der höhere Crimpwert ergibt sich aus den höheren Kettgarnspannungen bei der Herstellung des Gewebes. Bei keinem der untersuchten Gewebe war die Permeabilität in Schussrichtung höher als in Kettrichtung.

Abbildung 6.19 lässt den Schluss zu, dass je höher die Garnspannung in Kettrichtung ist, desto höher ist die Permeabilität in Kettrichtung relativ zur Schussrichtung. Da die physikalischen Zusammenhänge hinter dieser Beziehung nicht vollständig bekannt sind, wurde die lineare Regressionsgerade grau gepunktet eingetragen. Abbildung 6.20 zeigt, dass diese Kettgarnspannung anscheinend vom Hersteller abhängig ist. Beim Hersteller A ist der Crimp in Schuss und Kettrichtung ähnlich groß. Das resultiert in einer isotroperen Fließfront und lässt den Schluss zu, dass die verwendeten Kettgarnspannungen niedriger sind. Für die kommerziell verfügbaren Ge-

webe vom Hersteller C verhält es sich gegenteilig. Die großen Unterschiede im Kett- und Schusscrimp resultieren in stark unterschiedlichen K1- und K2-Permeabilitäten.

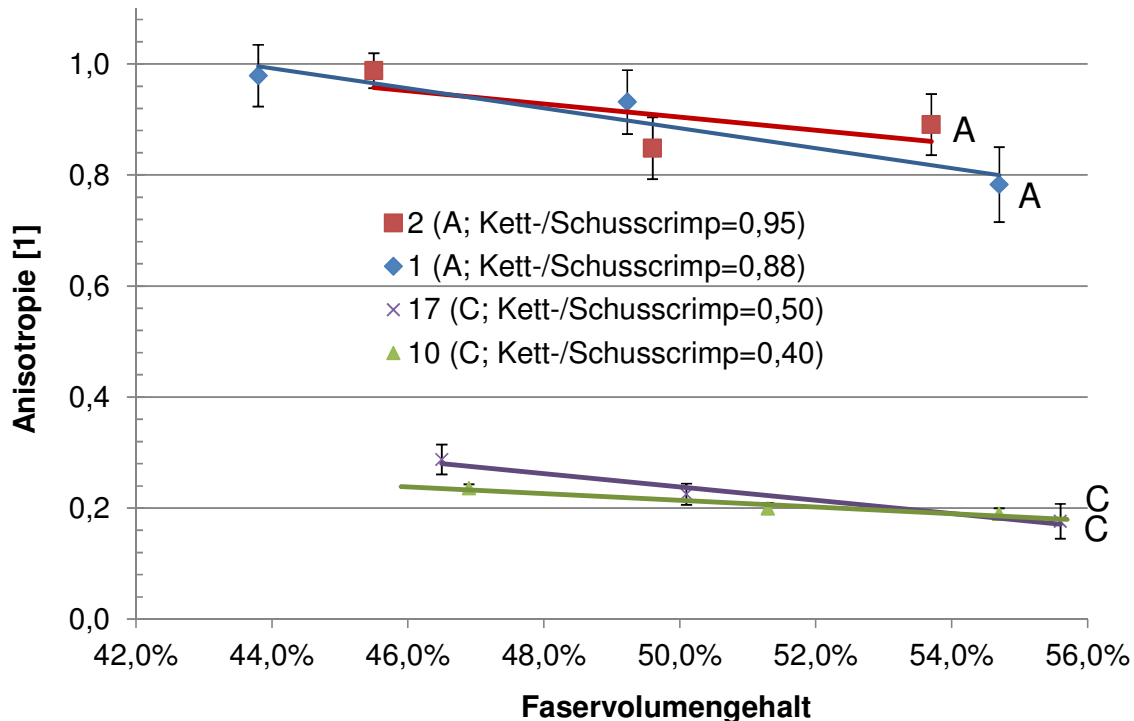


Abbildung 6.20: Vergleich des Einfluss des herstellerabhängigen Kett-/Schusscrimpverhältnisses auf die Anisotropie

Beobachtet wurde, dass auch der Titer und die Fadendichte in Schussrichtung einen Einfluss auf den Crimp in Kettrichtung haben. Um zu ermitteln, ob diese Parameter einen signifikanten Einfluss auf den Crimp haben, wurden die textilen Parameter und die Schuss- und Kettcrimpwerte aller Leinwand- und Köpergewebe in einen D-optimal Plan (statistische Versuchsplanungssoftware JMP[®]) eingelesen. Ein D-optimal Plan, ist ein Versuchsplan mit dem verschiedene Größen auf deren Einflusshöhen hin analysiert werden. Das Ergebnis dieser Analyse ist in Abbildung 6.21 dargestellt. Die aufgetragenen Werte sind t-Werte. Sie geben an, wie stark der jeweilige Faktor mit der Zielgröße Crimp korreliert. Ein negativer t-Wert beschreibt einen negativen Zusammenhang. Ab einem t-Wert von 2,0 ist der Zusammenhang signifikant ($\alpha_{SN}=0,05$).

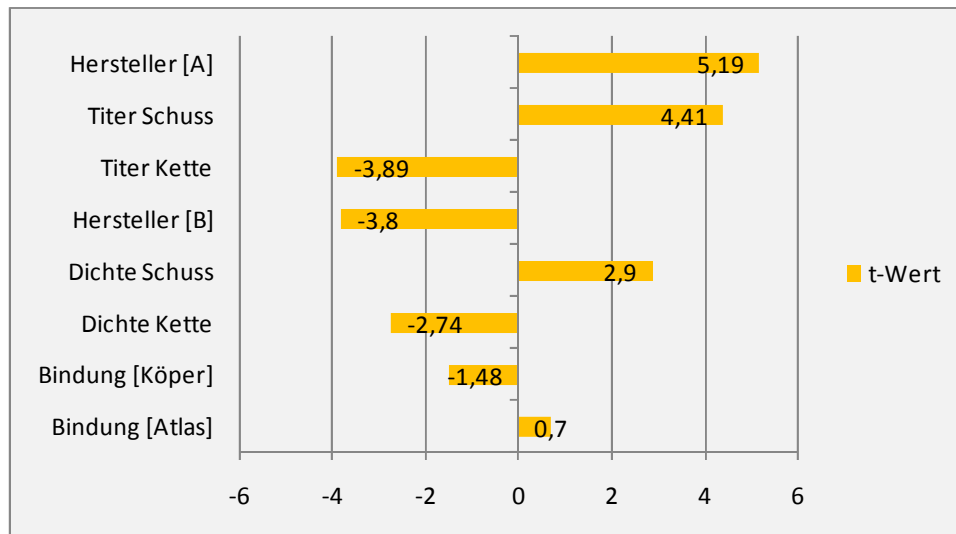


Abbildung 6.21: Einflusshöhe verschiedener Faktoren auf den Crimp in Kettrichtung

Die obige Abbildung zeigt, dass die Kettfadenspannung einen herstellerabhängigen Einfluss auf den Crimp in Kettrichtung hat. Am größten ist dieser Einfluss beim Hersteller A, da dieser Hersteller mit sehr hohen Kettgarnspannungen arbeitet. Ebenfalls hoch ist der Einfluss vom Titer des Schuss- und Kettgarns, wobei sich der Titer in Schussrichtung positiv und der Titer in Kettrichtung negativ auf die Höhe des Crimp in Kettrichtung auswirken. Ebenso wechselseitig verhält es sich mit der Fadendichte. Diese Beziehung sind unter geometrischen Vorstellungen nachvollziehbar: Je dicker das Garn, je höher die Fadendichte und je niedriger die Kettfadenspannung, desto stärker der Crimp.

Von den Tendenzen her gleich verhält es sich, wenn die Einflüsse auf den Crimp in Schussrichtung betrachtet werden. Hier hat jedoch lediglich der Titer des Kettgarns einen signifikanten Einfluss auf den Schusscrimp.

7 Diskussion

In dieser Arbeit wurde ermittelt, dass sich mit bestehenden Textilabbildungsmodellen der Kenntnis des Einflusses der textilen Parameter auf die Permeabilität nicht genähert werden kann. In einer μ CT-Studie wurde gezeigt, dass bestehende Textilmodelle die Veränderung der Garnarchitektur, also die Abnahme der Garnhöhe und das Nesting, mit steigendem Kompaktierungsdruck nicht berücksichtigen. Um Aussagen über den Einfluss von textilen Parametern auf die Permeabilität zu machen, wurde die Ebenenpermeabilität von 19 Leinwand-, Köper- und Atlasgeweben bei drei Faservolumengehalten in 180 Einzelmessungen bestimmt. Neben der Webart, dem Titer und der Fadendichte wurde der Crimp als wichtigster Einflussparameter auf die Permeabilität ermittelt. Zur Ermittlung, ob die Lagenanzahl einen Einfluss auf die Permeabilität hat, wurden Permeabilitätsmessungen bei 4 Kavitätshöhen, aber gleichem Faservolumengehalt, durchgeführt. Es hat sich gezeigt, dass es keinen signifikanten Unterschied zwischen den Ergebnissen der Permeabilitätsmessung bei den vier Kavitätshöhen von 2 mm bis 6 mm und einer entsprechenden Lagenanzahl von 5 bis 21 Lagen gibt. Dennoch wurde ein leichter Trend beobachtet: Die Permeabilität des Aufbaus mit der höchsten Lagenanzahl, also bei der höchsten Kavitätshöhe von 6 mm, tendierte zu höheren Permeabilitätshöhen [131]. Es ist anzunehmen, dass sich aus stärkerem Nesting ergebende Unterschiede in der Kompaktierung auch zu Unterschieden bei Permeabilitätsmessungen führen. Aus diesem Grund werden nachfolgend zwei Kompaktierungsstudien diskutiert. Saunders, Lekakou und Bader [17] haben in einer Kompaktierungsstudie ermittelt, dass der benötigte Druck zur Erzielung eines bestimmten Faservolumengehalts ab einer Lagenanzahl von fünf nicht mehr signifikant steigt. Sie haben ermittelt, dass eine einzelne Köpergewebelage bei einem Druck von 1 bar auf 49 % Faservolumengehalt kompaktiert wird. Zwei Lagen werden hingegen bei gleichem Druck schon auf über 55 % kompaktiert. Der Einfluss wird mit steigender Lagenanzahl immer kleiner und wird mit einem erhöhten Grad an Nesting begründet. Weiter werden diese Ergebnisse von Endruweit, Gehrig und Ermanni [132] bestätigt. Sie geben an, dass der Effekt der Lagenanzahl ab acht Lagen gegen einen Grenzwert konvergiert.

Eine Betrachtung der Orientierungswinkel der Fließfront ergab, dass bei Atlasgeweben die Richtung der höchsten Permeabilität, K_1 , nicht mit der Kettrichtung übereinstimmt. Dieses Phänomen wurde sonst nur bei dem Köpergewebe Nr.19 beobachtet. Die drei Atlasgewebe und das Köpergewebe sind sehr dichte Gewebe. Bei diesen Geweben mit höherem Laminatfaservolumengehalt ist anscheinend mehr Raum zwischen den Lagen. Es ist zu vermuten, dass dieser vergrößerte Zwischenlagenraum zu erhöhtem Fließen zwischen den Lagen führt. Das Fließen zwischen den Lagen wird bestimmt durch den Grat (Winkelversatz der Knotenpunkte) der Gewebe. Dieser Grat bestimmt insbesondere bei niedrigen Faservolumengehalten den Orientierungswinkel der Fließfrontellipsen. Bisher wurde angenommen, dass die Orientierung der Fließfrontellipsen bei Geweben stets in 0° (also Kettrichtung) gerichtet und unabhängig vom Faservolumengehalt ist [70].

Ein teilweise in der Literatur diskutierter textiler Einflussparameter auf die Permeabilität ist die Webart. Für den in dieser Arbeit betrachteten Parameterraum wurde ermittelt, dass die Webart auf:

- die Höhe der Permeabilität,
- den Gradienten der Permeabilität gegenüber dem Faservolumengehalt und
- die Anisotropie einen Einfluss hat.

Diese Erkenntnisse beruhen auf dem Vergleich von drei Köper und drei Leinwandgeweben, die sich nur in der Webart unterscheiden. Insbesondere die K_2 Permeabilität ist bei der Leinwandbindung höher. Das führt zu einer geringeren Anisotropie bei Leinwandgeweben. Zudem sind die Permeabilitäten von Leinwandgeweben leicht stärker vom Faservolumengehalt abhängig. Eine Erklärung für die höhere Permeabilität von Leinwandgeweben kann in der höheren Knotenpunktzahl gefunden werden. Bei einem Knotenpunkt ist stets durch das ondulierende Garn ein Fließspalt offen, der die Permeabilität erhöht. Shafi hat bereits 1996 zwei Leinwand- und zwei Köpergewebe auf einer optischen PMMA-Permeabilitätsmesszelle miteinander verglichen [18]. Er ermittelt ebenfalls höhere Permeabilitäten und stärkere Gradienten gegenüber dem Faservolumengehalt für Leinwandgewebe. Pearce, Guild und Summerscales ermitteln in einer empirischen Studie [19] ebenfalls eine von der Anzahl der Knotenpunkte abhängige Permeabilitätsreihenfolge (Köper>Atlas1/4). Pearce hat

nachgewiesen, dass im Köpergewebe der Anteil an großen Fließporen geringer als beim Leinwandgewebe ist. Hierzu wurden die über Lichtmikroskop und Bildverarbeitungssoftware gemessenen Porengrößen kumuliert aufgetragen. Dieses Ergebnis unterstützt die Vermutung, dass Knotenpunkte zwischen Kett- und Schussgarn zu größeren Fließporen führen. Auf die Permeabilität in Dickenrichtung lassen sich die Erkenntnisse bezüglich des Einflusses der Webart auf die Ebenenpermeabilität nicht übertragen. Lu, Tung Hwang [92] ermitteln für die Permeabilität in Dickenrichtung eine umgekehrte Gewebereihenfolge (Atlas > Köper > Leinwand).

Ein höherer Einfluss als die Webart auf die Anisotropie hat, wurde für den Crimp ermittelt. Der Zusammenhang zwischen dem Quotient der Crimpwerte in Kett- und Schussrichtung und dem Quotienten der Permeabilität in Kett- und Schussrichtung kann damit erklärt werden, dass sich der Crimp aus der Kettfadenspannung, der Fadendichte, des Titers und der Webart ergibt. Über statistische Versuchsplanung wurde ermittelt, dass der Crimp am stärksten von der Kettfadenspannung des Herstellers abhängig ist. Mit dem Crimp kann das anisotrope Fließverhalten von isotropen Geweben erklärt werden. Dieser Zusammenhang wird mit dieser Arbeit erstmalig beschrieben.

Das Produkt aus Fadendichte und Titer ermöglicht es, eine Einteilung in offen und dicht gewebte Textilien vorzunehmen. Es wurde ermittelt, dass je dichter ein Gewebe ist, desto stärker ist der Abfall der Permeabilität über dem Faservolumengehalt. Auch dieser Zusammenhang wird erstmalig beschrieben.

Die Auswirkungen der beschriebenen textilen Parameter: Webart, Crimpverhältnis zwischen Kett- und Schussgarn und das Produkt aus Titer und Fadendichte auf den Verlauf der Permeabilitäts-Faservolumengehaltskurve sind in der nachfolgenden Abbildung grafisch dargestellt. Die zwei geschwungenen Pfeile beschreiben die Abnahme des Gradienten der Permeabilitätsgeraden bei offenen Geweben (hoher Einfluss). Der kleine dunkle Pfeil beschreibt, dass die K1-Permeabilität bei Geweben mit niedrigerer Bindungspunkteanzahl niedriger ist. Der dickere dunkle Pfeil zeigt an, dass die K1-Permeabilität umso höher ist, je niedriger der Quotient aus Kett- zu Schussgarn ist. Der dicke helle Pfeil zeigt an, dass die K2-Permeabilität bei Gewe-

ben mit niedrigerer Bindungspunkteanzahl niedriger ist. Die Dicke der Pfeile beschreibt die Höhe des Einflusses.

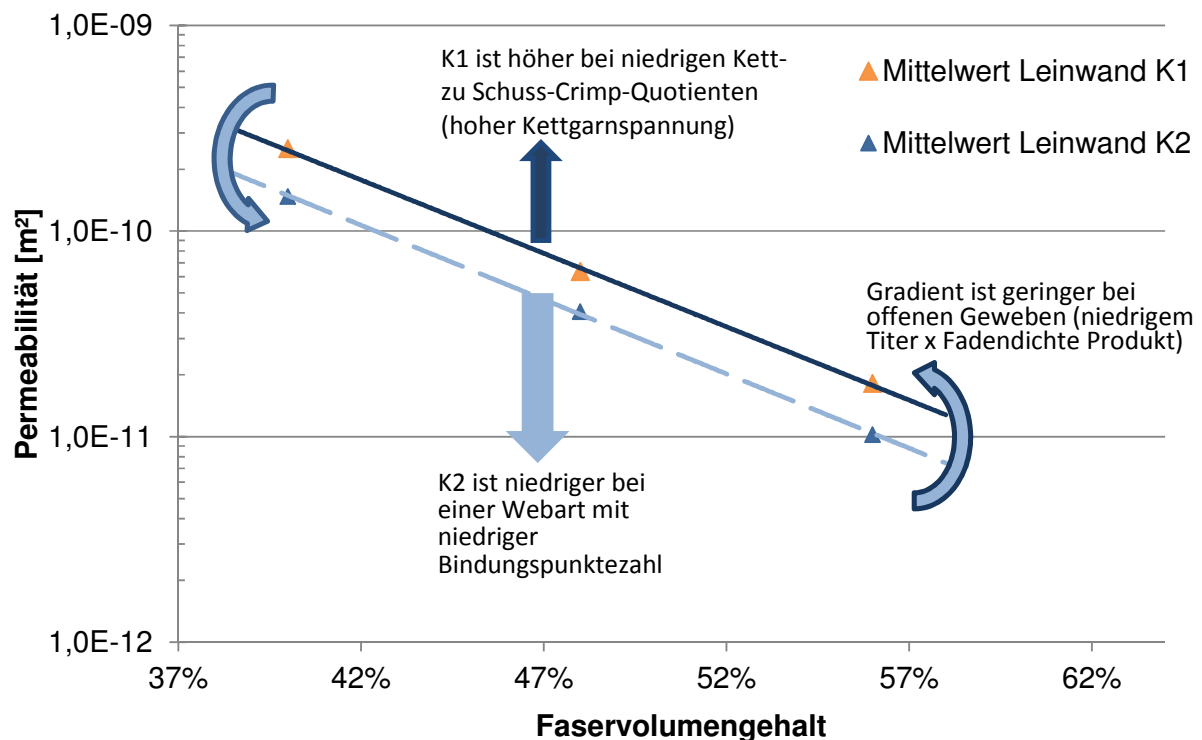


Abbildung 7.1: Übersicht der Haupteinflüsse textiler Parameter auf die Permeabilität von Geweben ausgehend von der Permeabilität eines Leinwandgewebes

Die Ergebnisse dieser Studie lassen sich wie folgt darstellen:

- Die Webart von Verstärkungsgeweben hat einen Einfluss auf (nachfolgend sind hohe Einflüsse fett hervorgehoben):
 - die Höhe der K1- und der K2-Permeabilität,
 - den Gradienten der Permeabilität über dem Faservolumengehalt und
 - **das Verhältnis der K1- zur K2 Permeabilität (Anisotropie).**
- Das Produkt aus Fadendichte und Titer ermöglicht es, eine Einteilung der Gewebe nach offen und dicht gewebt vorzunehmen. **Die Offenheit eines Gewebes bestimmt den Gradienten der Permeabilität über dem Faservolumengehalt.** Ein offenes Textil ist weniger sensibel gegenüber Faservolumengehaltssteigerungen und die Permeabilitätsgerade nimmt einen flacheren Verlauf.

- **Bei sehr dichten Geweben stimmt die Richtung der K1-Permeabilität nicht mit der Kettrichtung überein.**
- Das Verhältnis des Crimp zwischen dem Kett- und Schussgarn ermöglicht es, Rückschlüsse auf die verwendeten Kettfadenspannungen zu ziehen. **Das Crimpverhältnis hat einen großen Einfluss auf die Anisotropie, also den Unterschied zwischen der K1- und K2-Permeabilität, eines Gewebes.**

Mit der Kenntnis dieser Zusammenhänge lassen sich gezielt hochpermeable Gewebe für kurze Injektionsprozesse auswählen. Kann ein längliches Bauteil nur in Schussrichtung angegossen werden, ermöglichen die Studienergebnisse die Auswahl eines Gewebes mit einer hohen Permeabilität in Schussrichtung. Zwischen dem niedrigsten ($2,35E-12 \text{ m}^2$) und höchsten ($5,03E-10 \text{ m}^2$) gemessenen Permeabilitätswert dieser Studie liegen mehr als zwei Dekaden. Eine ungeeignete Gewebeauswahl oder Angussstrategie kann die Injektionszeiten um den Faktor 200 erhöhen, was einen starken Einfluss auf die Produktionskosten hätte.

In Tabelle 7.1 werden Fragen aus der Praxis gestellt, die anhand der in dieser Arbeit gewonnen Erkenntnisse beantwortet werden können.

Tabelle 7.1: Anwenderfragen und Antworten

Anwendungsfragen	Erarbeitete Antworten
Welchen Einfluss hat das Flächengewicht auf die Ebenenpermeabilität?	Keinen, sowohl sehr leichte als auch sehr schwere Gewebe können niedrige und hohe Ebenenpermeabilitäten haben.
Hat die Lagenanzahl einen Einfluss auf die Permeabilitätsmessung?	Nein, im Bereich von 5 bis 20 Lagen werden gleiche Permeabilitätswerte ermittelt.
Welche Webart resultiert in höchster Permeabilität?	Grundsätzlich gilt: Leinwandgewebe haben eine höhere Permeabilität als Gewebe mit niedrigerer Bindungspunkteanzahl, wie z.B. Köpergewebe.
Welches Gewebe weist hohe Kett- und Schusspermeabilitäten bei hohen Faservolumengehalten (über 50 %) auf?	Ein Gewebe mit einem niedrigen Titer und/oder einer niedrigen Fadendichte (offene Gewebe; zur Einteilung siehe Abbildung 6.14)
Wie ist ein Gewebe aufgebaut, das bei Faservolumengehalten unterhalb 45 % hohe Permeabilitäten aufweist?	Diese Gewebe haben einen hohen Titer und/oder eine hohe Fadendichte (dichte Gewebe; zur Einteilung siehe Abbildung 6.14).
Welches Gewebe weist eine hohe Permeabilität in Kettrichtung auf ?	Ein Gewebe mit Körperbindung und einer hohen Crimpdifferenz zwischen Kett- und Schussgarn (hohe Kettfadenspannung).
Bei welchem Gewebe ist das Fließverhalten isotrop (d.h. die Fließfront breitet sich in alle Richtungen gleich schnell aus)?	1. Bei einem in Kett- und Schussrichtung gleich aufgebautem Gewebe mit niedriger Kettfadenspannung 2. Bei kommerziell erhältlichen Geweben, die meist eine hohe Kettfadenspannung besitzen, nur wenn der Titer in Schussrichtung hoch ist
Welcher textile Parameter hat den größten Einfluß auf die Imprägnierqualität bei hohen Injektionsgeschwindigkeiten?	Der Titer - er sollte möglichst klein sein und das Garnhöhen- zu breitenverhältnis möglichst gering (gespreizte Garne).
Welcher Gewebeaufbau führt dazu, dass die Fließfrontellipse nicht in Kettrichtung orientiert ist?	Ein hoher Titer zusammen mit einer hohen Fadendichte.
Ist die Fließfrontausbreitung bei einem Gewebe, das in Kett- und Schussrichtung gleich aufgebaut ist, in alle Richtungen gleich schnell?	Nein, da bei kommerziell erhältlichen Geweben, die Fadenspannung in Kettrichtung sehr viel höher ist, ist das Fließen in Kettrichtung schneller.
Wie sollte ein Gewebe aufgebaut sein, das sich sehr schnell zwischen zwei Garnen und im Garn imprägnieren lässt?	Der Titer sollte gering sein, ansonsten dauert die Mikroimprägnierung sehr lange.
Kann Kozeny-Carman zur Berechnung der Permeabilität von Geweben verwendet werden?	Nein, Kozeny-Carman ist nicht gültig für Gewebe oder Gelege. Gewebe oder Gelege weisen abhängig vom Aufbau verschiedenste Permeabilitäts-Faservolumengehaltsabhängigkeiten auf. Kozeny-Carman beschreibt nur genau eine Permeabilitäts-Faservolumengehaltsabhängigkeitsfunktion.

Weiterhin ist bekannt, dass die Drapierung einen großen Einfluss auf die Permeabilität haben kann [70, 79, 133-143]. Die hier erarbeiteten Erkenntnisse gelten für undrapierte Gewebe. Es wird davon ausgegangen, dass die Abbildung 6.14 eine wertvolle Vorarbeit zur Erarbeitung einer allgemeingültigen Aussage der Drapierwinkel auf Gewebe ist. Hierzu liegen in der Literatur bisher nur Erkenntnisse aus Untersuchungen einzelner Gewebe vor.

Durch die Vernähung von Geweben hat einen erheblichen Einfluss auf die Permeabilität [144, 145]. Hohe Nähfadenspannungen bilden Fließkanäle aus und wirken permeabilitätserhöhend. Niedrige Nähfadenspannungen wirken permeabilitätssenkend.

8 Zusammenfassung

Zur Herstellung von endlosfaserverstärkten Kunststoffbauteilen müssen die Verstärkungstextilien mit einem Duomer oder Thermoplast imprägniert werden. Der Widerstand, den das Verstärkungstextil dem flüssigen Kunststoff bietet, wird durch die Permeabilität bestimmt. Erst mit der Kenntnis der Permeabilität können Fließgeschwindigkeiten, Fließrichtungen und Druckverteilungen berechnet werden und der Imprägnierprozess optimiert werden.

Das Ziel dieser Arbeit war, den Einfluss der textilen Parameter von Multifilamentgeweben auf die Permeabilität zu bestimmen. Untersucht wurde zunächst, inwieweit bestehende Modelle diesen Einfluss beschreiben können. Dazu wurden verschiedene Textil- und Kapillarmodelle verglichen. Anhand von hochauflösenden μ CT-Aufnahmen von GFK-Laminaten mit drei unterschiedlichen Faservolumengehalten wurde ermittelt, dass bereits existierende Textilmodelle die sich verändernde Garnarchitektur bei steigenden Faservolumengehalten nicht realistisch abbilden. Ermittelt wurden eine Abnahme der Garnhöhe des Kett- und Schussgarns und ein Anstieg des Ondulationswinkels durch Nesting. Diese beiden Phänomene werden von bestehenden Textilmodellen nicht berücksichtigt. Diese μ CT-Studie zur Untersuchung des Einflusses vom Kompaktierungsdruck auf die veränderte Garnarchitektur führt zur Optimierung von Textilmodellen.

Kapillarmodelle hingegen können nur das Fließen in oder quer zur Faserrichtung beschreiben, nicht jedoch die Permeabilität von komplexeren textilen Strukturen wie Geweben oder Gelegen. Der Gefällebereich von Permeabilitäts-Faservolumenhaltungskurven von Verstärkungstextilien ist groß. Kozeny-Carman kann nur einen bestimmten Gradienten beschreiben und eignet sich somit nicht um Permeabilitäten von Verstärkungstextilien bei höheren oder niedrigeren Faservolumengehalten vorherzusagen.

Als permeabilitätsbeeinflussende Parameter wurden die Webart, die Fadendichte, der Titer, das Finish, der Einzelfilamentdurchmesser und der Crimp ermittelt. Das Finish und der Einzelfilamentdurchmesser wurden in dieser Studie konstant gehalten.

ten. Um zu ermitteln, wie diese textilen Parameter die Permeabilität beeinflussen, wurde eine empirische Studie durchgeführt. Hierfür wurden 19 Gewebe, die einen breiten Parameterraum bezüglich der Webart, der Fadendichte und des Titers abdecken, ausgewählt. Die Ebenenpermeabilitäten K1 und K2 wurden auf einer Messzelle bestehend aus einem 160 mm dicken Ober- und Unterwerkzeug aus Aluminium mit integrierten Sensoren, der hochsteifen 2D-COMP, ermittelt. Die Permeabilität wird über einen Punktanguss ungesättigt gemessen. Der erhöhte Aufwand bei der Permeabilitätsbestimmung über eine eindimensionale Messung mit Linienanguss wird beschrieben. Unterschiede zwischen gesättigten und ungesättigten Permeabilitätsmessungen sind nur auf Kapillareffekte zurückzuführen. Die Parameter, die die Höhe des Kapillardrucks beeinflussen, werden ausführlich beschrieben. Der Anteil der Matrix, der sich im Garn befindet, beträgt 20 % bis 30 %. Dieses Kenntnis ist notwendig zur Bestimmung des Einflusses des Kapillardrucks. Bei hohen Injektionsdrücken wird der Einfluss des Kapillardrucks, der im Garn bei 0,06 bar bis 0,6 bar liegt und über das Gewebe gemittelt bei max. 0,4 bar, vernachlässigbar gering. Die Beschreibung der potentiellen Unterschiede zwischen der gesättigten und ungesättigten Permeabilitätsmessung ermöglicht den Vergleich von Permeabilitätsmessergebnissen von unterschiedlichen Messzellen.

Vor der experimentellen Studie mit 19 Geweben wurde eine Studie zur Untersuchung zum Einfluss der Lagenanzahl auf Permeabilitätsmessergebnisse durchgeführt. Hierzu wurde die Permeabilität eines Gewebes mit 5 bis 21 Lagen bei 4 Kavitätshöhen von 2 mm bis 6 mm gemessen. Die ermittelten K1- und K2-Permeabilitäten unterscheiden sich nicht signifikant voneinander. Der Einfluss der Lagenanzahl auf Permeabilitätsergebnisse kann verneint werden.

Aus den 171 Permeabilitätsmessungen, die mit 19 Geweben durchgeführt wurden, kann abgeleitet werden, dass die Webart hauptsächlich einen Einfluss auf die K2-Permeabilität hat. Je höher die Bindungspunkteanzahl, desto höher die K2-Permeabilität. Leinwandgewebe haben also eine höhere K2-Permeabilität als Köpergewebe und ein isotroperes Fließverhalten.

Es wurde ermittelt, dass der Titer und die Fadendichte als Produkt betrachtet werden müssen. Je höher dieses Produkt, desto dichter ist das Gewebe aufgebaut. Bei dichten Geweben ist der negative Gradient der Permeabilitäts-Faservolumengehaltskurve größer, das heißt dichte Gewebe weisen bei niedrigen Faservolumengehalten höhere Permeabilitäten auf und bei hohen Faservolumengehalten niedrigere Permeabilitäten im Vergleich zu offenen Geweben. Die Einteilung der Gewebe in offene und geschlossene Textilien ist zudem hilfreich zur Erklärung der Permeabilität in Dickenrichtung und zur Erklärung des Einflusses der Scherung von Textilien auf die Permeabilität in Ebenen- und Dickenrichtung. Vier sehr dichte Gewebe dieser Studie haben zudem die Besonderheit gezeigt, dass die Richtung der K1-Permeabilität nicht mit der Kettrichtung des Gewebes übereinstimmt. Der abweichende Orientierungswinkel ist faservolumengehaltsabhängig und nähert sich stets 0° bei Faservolumengehalten von über 55 %. Die Beziehung zwischen dem Orientierungswinkel und dem Faservolumengehalt ist linear.

Es wird erklärt warum Gewebe, die in Kett- und Schussrichtung gleich aufgebaut sind, ein anisotropes Fließverhalten zeigen. Dieser Effekt kann mit der Kettfadenspannung bei der Gewebeherstellung erklärt werden und über die Messung des Crimps ermittelt werden. Wurde eine große Differenz im Crimp zwischen dem Kett- und Schussgarn gemessen, war auch die Anisotropie höher. Neben der Kettfadenspannung bei der Herstellung wurden über ein D-optimal Screening der Titer und die Fadendichte als signifikante Einflussfaktoren auf den Crimp ermittelt.

Des Weiteren wurde der Einfluss des Garntiter und des Injektionsdrucks auf die Imprägnierqualität beschrieben. Höherer Injektionsdruck führt zu schnellerem Fließen zwischen den Garnen als im Garn. Dies führt zu Lufteinschlüssen. Lufteinschlüsse können durch hohe Nachdrücke am Ende der Injektion teilweise bis vollständig beseitigt werden.

Die Ergebnisse dieser Studie ermöglichen die Auswahl und das spezifische Design von Verstärkungstextilien mit bestimmten Imprägnier- und Permeabilitätseigenschaften.

Literatur

- [1] Ickert, L.; Henn, R.; Gies, S.; Göbbels, R.; Fischer, K.: CFK-Leichtbauteile für den Einsatz in einem Rennwagen und möglicher Einsatz in Serienfahrzeugen. In: 39. Fachtagung "Prozesskette Karosserie", Eisenach, 30. September 2008
- [2] Haldenwanger, H. G.: Hochleistungs-Faserverbundwerkstoffe im Automobilbau: Entwicklung, Berechnung, Prüfung, Einsatz von Bauteilen. VDI, 1993
- [3] Friedrich, H.: Taugt das 1-Liter-Auto als Vorbild für die Massenmotorisierung. In: Energie Dialog Schweiz: Resultate des ersten Expertenmeetings (Villingen), 2007
- [4] Goede, M.; Ferkel, H.; Stieg, J.; Dröder, K.: Mischbauweisen Karosseriekonzepte - Innovationen durch bezahlbaren Leichtbau. In: Aachener Kolloquium, Fahrzeug- und Motorentechnik, 4.-6. Oktober 2005
- [5] Eckstein, L.; Schmitt, F.; Hartmann, B.: Leichtbau bei Elektrofahrzeugen. Automobiltechnische Zeitschrift, 112, 11, 2011, S. S. 789
- [6] Drechsler, K.: CFK-Technologie im Automobilbau: Was man von anderen Märkten lernen kann. In: Automotive Forum, Neckarsulm, Juni 2010
- [7] Mitschang, P.; Stadtfeld, H.; Stöven, T.; Weyrauch, F.; Latrille, M.; Louis, M.; Neitzel, M.; Beresheim, G.: Grundlagen der Verarbeitungsprozesse. Handbuch Verbundwerkstoffe, Neitzel, M. ; Mitschang, P., Carl Hanser Verlag München, 2004
- [8] Neitzel, M.; Breuer, U.: Die Verarbeitungstechnik der Faser-Kunststoff-Verbunde. Hanser, 1997
- [9] Betsche, M.: Integrierte Komplettlösung für eine Instrumententafel. Kunststoffe, 100, 6, 2010, S. 42-45
- [10] Latz, S.; Pauling, A.: Technologien gekonnt fusionieren. Kunststoffe, 100, 12, 2010, S. 70-72

- [11] Ashby, M. F.: Materials Selection in Mechanical Design. Easy Reading Third Edition, Fleck, C. ; Wanner, A., München: Elsevier GmbH, 2007
- [12] Le Riche, R.; Saouab, A.; Bréard, J.: Coupled compression RTM and composite layup optimization. Composites Science and Technology, 63, 15, 2003, S. 2277-2287
- [13] Merotte, J.; Simacek, P.; Advani, S.: Resin flow analysis with fiber preform deformation in through thickness direction during Compression Resin Transfer Molding. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 41, 7, 2010, S. 881-887
- [14] Herrmann, P. A. S.; Pabsch, A.; Kleineberg, M.: SLI-RTM Fairings for Fairchild Dornier DO 328 Jet. In: Proceedings SAMPE EUROPE Conference, Paris, 2001
- [15] DE 198 53 709 C1. Kleineberg, M.; Nickel, J.; Pabsch, A.; Sigle, C.; Schöpinger, C.: Vorrichtung und Verfahren zur Herstellung von faserverstärkten Kunststoffen bzw. Kunststoffbauteilen nach einem modifizierten RTM-Verfahren. 2000
- [16] DE 10 2011 009 506 A1. Rieber, G.; Hummel, D.: Verfahren zur Herstellung von Faserverbund-Hohlbauteilen mit schließenden Fließkanälen. Januar 2011 zum Patent beim Deutschen Patent- und Markenamt angemeldet und Prüfungsantrag gestellt.
- [17] Saunders, R. A.; Lekakou, C.; Bader, M. G.: Compression in the processing of polymer composites 1. A mechanical and microstructural study for different glass fabrics and resins. Composites Science and Technology, 59, 7, 1999, S. 983-993
- [18] Shafi, V.: Beitrag zur Charakterisierung der Permeabilität flächiger Verstärkungsmaterialien. IVW Schriftenreihe Kaiserslautern: IVW GmbH Kaiserslautern, 1996
- [19] Pearce, N. R. L.; Guild, F. J.; Summerscales, J.: An investigation into the effects of fabric architecture on the processing and properties of fibre reinforced composites produced by resin transfer moulding. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 29, 1-2, 1998, S. 19-27

- [20] Adams, K. L.; Miller, B.; Rebenfeld, L.; Hwang, S. T.; Chan, A. W.: Forced Inplane Flow of an Epoxy-Resin in Fibrous Networks. *Polymer Engineering and Science*, 26/20, 20, 1986, S. 1434-1441
- [21] Chan, A. W.; Hwang, S. T.: Anisotropic Inplane Permeability of Fabric Media. *Polymer Engineering and Science*, 31, 16, 1991, S. 1233-1239
- [22] Fan, Z. H.; Hsiao, K. T.; Advani, S. G.: Experimental investigation of dispersion during flow of multi-walled carbon nanotube/polymer suspension in fibrous porous media. *Carbon*, 42, 4, 2004, S. 871-876
- [23] Qiu, J. J.; Zhang, C.; Wang, B.; Liang, R.: Carbon nanotube integrated multifunctional multiscale composites. *Nanotechnology*, 18, 27, 2007, S. 275708
- [24] Rieber, G.; Grad, P.; Mitschang, P.: Evaluation of RTM produced CNT doped GFRPC Laminates. In: *ECCM 14, Budapest 7-10 June 2010*
- [25] Rieber, G.; Grieser, T.; Wirjadi, O.; Mitschang, P.: Processing and Evaluating CNT doped Laminates. In: *SAMPE, Long Beach, 23.-26. Mai 2011*
- [26] Advani, S.: *Processing and properties of nanocomposites*. World Scientific Publishing, 2007
- [27] Kostopoulos, V.; Baltopoulos, A.; Karapappas, P.; Vavouliotis, A.; Paipetis, A.: Impact and after-impact properties of carbon fibre reinforced composites enhanced with multi-wall carbon nanotubes. *Composites Science and Technology*, 70, 4, 2010, S. 553-563
- [28] Krüger, P.: Innovation Alliance CNT -A novel public-private partnership to enter upcoming markets. In: *ObservatoryNANO annual symposia, Düsseldorf, Germany 2009*
- [29] Warriar, A.; Godara, A.; Rochez, O.; Mezzo, L.; Luizi, F.: The effect of adding carbon nanotubes to glass/epoxy composites in the fibre sizing and/or the matrix *Composites Part A - Applied Science and Manufacturing*, 41, 4, 2010, S. 532-538
- [30] Gojny, F. H.: Evaluation of the Potential of Carbon Nanotubes as nanostructured Modification of (Glass-Fibre Reinforced) Epoxy-based Composites. V. Schulte, K., *TuTech Innovation 2006*

- [31] Schulte, K.; Buschhorn, S.; Böger, L.; Sumfleth, J.; Wichmann, M. H. G.: Polymere Nanoverbundwerkstoffe - Chancen, Risiken, Potentiale. 2006
- [32] Fan, Z. H.; Advani, S. G.: Characterization of orientation state of carbon nanotubes in shear flow. *Polymer*, 46, 14, 2005, S. 5232-5240
- [33] Fan, Z. H.; Advani, S. G.: Rheology of multiwall carbon nanotube suspensions. *Journal of Rheology*, 51, 4, 2007, S. 585-604
- [34] Fan, Z. H.; Advani, S. G.: Capillary effect of multi-walled carbon nanotubes suspension in composite processing. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 8, 4, 2008, S. 1669-1678
- [35] Aktas, L.; Dharmavaram, S.; Hamidi, Y. K.; Altan, M. C.: Filtration and breakdown of clay clusters during resin transfer molding of nanoclay/glass/epoxy composites. *Journal of Composite Materials*, 42, 21, 2008, S. 2209-2229
- [36] Sadeghian, R.; Gangireddy, S.; Minaie, B.; Hsiao, K. T.: Manufacturing carbon nanofibers toughened polyester/glass fiber composites using vacuum assisted resin transfer molding for enhancing the mode-I delamination resistance. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 37, 10, 2006, S. 1787-1795
- [37] Fan, Z. H.; Santare, M. H.; Advani, S. G.: Interlaminar shear strength of glass fiber reinforced epoxy composites enhanced with multi-walled carbon nanotubes. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 39, 3, 2008, S. 540-554
- [38] Wichmann, M. H. G.; Sumfleth, J.; Gojny, F. H.; Quaresimin, M.; Fiedler, B.; Schulte, K.: Glass-fibre-reinforced composites with enhanced mechanical and electrical properties - Benefits and limitations of a nanoparticle modified matrix. *Engineering Fracture Mechanics*, 73, 16, 2006, S. 2346-2359
- [39] Gojny, F. H.; Wichmann, M. H. G.; Fiedler, B.; Bauhofer, W.; Schulte, K.: Influence of nano-modification on the mechanical and electrical properties of conventional fibre-reinforced composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 36, 11, 2005, S. 1525-1535

- [40] Vaugien, T.; Schierholz, K.: Nanotechnology enables high-performance composites. *JEC Composites Magazine*, 30, 2007, S. 60-63
- [41] Thostenson, E. T.; Ren, Z. F.; Chou, T. W.: Advances in the science and technology of carbon nanotubes and their composites: a review. *Composites Science and Technology*, 61, 13, 2001, S. 1899-1912
- [42] Schulte, K.; Gojny, F. H.; Wichmann, M. H. G.; Sumfleth, J.; Fiedler, B.: Polymer nanocomposites: chances, risks and potential to improve the mechanical and physical properties. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 37, 9, 2006, S. 698-703
- [43] Abot, J.; Song, Y.; Vatsavaya, M.; Medikonda, S.; Kier, Z.; Jayasinghe, C.; Rooy, N.; Shanov, V.; Schulz, M.: Delamination detection with carbon nanotube thread in self-sensing composite materials. *Composites Science and Technology*, 70, 7, 2010, S. 1113-1119
- [44] Fiedler, B.; Gojny, F. H.; Wichmann, M. H. G.; Bauhofer, W.; Schulte, K.: Can carbon nanotubes be used to sense damage in composites? *Annales De Chimie-Science Des Materiaux*, 29, 6, 2004, S. 81-94
- [45] Böger, L.; Wichmann, M.; Meyer, L.; Schulte, K.: Load and health monitoring in glass fibre reinforced composites with an electrically conductive nanocomposite epoxy matrix. *Composites Science and Technology*, 68, 7-8, 2008, S. 1886-1894
- [46] Böger, L.; Sumfleth, J.; Hedemann, H.; Schulte, K.: Improvement of Fatigue Life by Incorporation of Nanoparticles in Glass Fibre Reinforced Epoxy. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 41, 10, 2010, S. 1419-1424
- [47] Jen, Y.; Yang, Y.: A study of two-stage cumulative fatigue behavior for CNT/epoxy composites. *Procedia Engineering*, 2, 1, 2010, S. 2111-2120
- [48] Gebart, B. R.: Permeability of Unidirectional Reinforcements for RTM. *Journal of Composite Materials*, 26, 8, 1992, S. 1100-1133

- [49] Adams, K. L.; Rebenfeld, L.: In-Plane Flow of Fluids in Fabrics - Structure/Flow Characterization. *Textile Research Journal*, 57, 11, 1987, S. 647-654
- [50] Darcy, H.: *Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon*. . Paris: Victor Dalmont, 1856
- [51] Flemming, M.; Ziegmann, G.; Roth, S.: 6.4 Die Simulation des Harzflusses durch anisotrope Strukturen. *Faserverbundbauweisen - Fertigungsverfahren mit duroplastischer Matrix*, Berlin: Springer 1999
- [52] Bear, J.: *Dynamics of fluids in porous media*. Environmental science series. New York: American Elsevier, 1972
- [53] Michaeli, W.; Hammes, V.; Kirberg, K.; Kotte, R.; Osswald, T. A.; Specker, O.: Process Simulation in the RTM Technique. *Kunststoffe-German Plastics*, 79, 8, 1989, S. 739-742
- [54] Endruweit, A.; Long, A. C.: Analysis of compressibility and permeability of selected 3D woven reinforcements. *Journal of Composite Materials*, 44, 24, 2010, S. 2833
- [55] Lundström, T. S.; Stenberg, R.; Bergström, R.; Partanen, H.; Birkeland, P. A.: In-plane permeability measurements: a nordic round-robin study. *Composites Part A - Applied Science and Manufacturing*, 31, 1, 2000, S. 29-43
- [56] Elbouazzaoui, O.; Drapier, S.; Henrat, P.: An experimental assessment of the saturated transverse permeability of non-crimped new concept (NC2) multi-axial fabrics. *Journal of Composite Materials*, 39, 13, 2005, S. 1169-1193
- [57] Foley, M. F.; Gutowski, T.: The effect of process variables on permeability in the flexible resin transfer molding (FRTM) process. In: 36th International SAMPE Symposium, 1991
- [58] Skartsis, L.; Khomami, B.; Kardos, J. L.: The effect of capillary pressure on the impregnation of fibrous media. *SAMPE Journal(USA)*, 28, 5, 1992, S. 19-24
- [59] Weitzenböck: *Flow Characterization in Resin Transfer Moulding*. Dissertation, University of Southampton, 1996

- [60] Scheidegger, A.: The physics of flow through porous media. 1974
- [61] Ahn, K. J.; Seferis, J. C.; Berg, J. C.: Simultaneous Measurements of Permeability and Capillary-Pressure of Thermosetting Matrices in Woven Fabric Reinforcements. *Polymer Composites*, 12, 3, 1991, S. 146-152
- [62] Foley, M. E.; Gillespie, J. W.: Modeling the effect of fiber diameter and fiber bundle count on tow impregnation during liquid molding processes. *Journal of Composite Materials*, 39, 12, 2005, S. 1045-1065
- [63] Han, K. K.; Lee, C. W.; Rice, B. P.: Measurements of the permeability of fiber preforms and applications. *Composites Science and Technology*, 60, 12-13, 2000, S. 2435-2441
- [64] Amico, S.; Lekakou, C.: An experimental study of the permeability and capillary pressure in resin-transfer moulding. *Composites Science and Technology*, 61, 13, 2001, S. 1945-1959
- [65] Senoguz, M. T.; Dungan, F. D.; Sastry, A. M.; Klamo, J. T.: Simulations and experiments on low-pressure permeation of fabrics: Part II - The variable gap model and prediction of permeability. *Journal of Composite Materials*, 35, 14, 2001, S. 1285-1322
- [66] Miaris, A.; Schledjewski, R.: Spontaneous Impregnation and Capillary Phenomena in Carbon Fiber Rovings. In: ACCM 7, Taiwan, 2010
- [67] Weitzenböck, J. R.; Sheno, R. A.; Wilson, P. A.: Measurement of three-dimensional permeability. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 29, 1-2, 1998, S. 159-169
- [68] Hammond, V. H.; Loos, A. C.: The effects of fluid type and viscosity on the steady-state and advancing front permeability behavior of textile preforms. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 16, 1, 1997, S. 50
- [69] Loendersloot, R.: The structure-permeability relation of textile reinforcements. Dissertation, University of Twente, 2006
- [70] Demaría, C.; Edu, R.; Trochu, F.: In-plane anisotropic permeability characterization of deformed woven fabrics by unidirectional injection. Part I: Experimental results. *Polymer Composites*, 28, 6, 2007, S. 797-811

- [71] Adams, K. L.; Russel, W. B.; Rebenfeld, L.: Radial Penetration of a Viscous-Liquid into a Planar Anisotropic Porous-Medium. *International Journal of Multiphase Flow*, 14, 2, 1988, S. 203-215
- [72] Weitzenböck, J. R.; Shenoi, R. A.; Wilson, P. A.: Radial flow permeability measurement. Part A: Theory. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 30, 6, 1999, S. 781-796
- [73] Endruweit, A.: Investigation of the Influence of Local Inhomogeneities in the Textile Permeability on the Resin Flow in Liquid Composites Moulding Processes. Zürich: 2003
- [74] Blake, F. C.: The resistance of packing to fluid flow. *Transactions of the American Institute of Chemical Engineers*, 14, 1922, S. 415–421
- [75] Kozeny, J.: Über die kapillare Leitung des Wassers im Boden. *Wien, Akad. Wiss*, 136, 2a, 1927, S. 271
- [76] Williams, J. G.; Morris, C. E. M.; Ennis, B. C.: Liquid Flow through Aligned Fiber Beds. *Polymer Engineering and Science*, 14, 6, 1974, S. 413-419
- [77] Gutowski, T.; Cai, Z.; Bauer, S.; Boucher, D.; Kingery, J.; Wineman, S.: Consolidation experiments for laminate composites. *Journal of Composite Materials*, 21, 7, 1987, S. 650
- [78] Vandenberg, L. D. M.; Dejong, E. J.: Hydrodynamics in Packed Textile Beds. *Textile Research Journal*, 59, 8, 1989, S. 433-440
- [79] Simacek, P.; Advani, S.: Permeability model for a woven fabric. *Polymer Composites*, 17, 6, 1996, S. 887-899
- [80] Skartsis, L.; Khomami, B.; Kardos, J. L.: Resin Flow through Fiber Beds during Composite Manufacturing Processes. Part 2. Numerical and Experimental Studies of Newtonian Flow through Ideal and Actual Fiber Beds. *Polymer Engineering and Science*, 32, 4, 1992, S. 231-239
- [81] Nabovati, A.; Llewellyn, E.; Sousa, A.: Through-thickness permeability prediction of three-dimensional multifilament woven fabrics. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 41, 4, 2010, S. 453-463

- [82] Nedanov, P. B.; Advani, S. G.: Numerical computation of the fiber preform permeability tensor by the homogenization method. *Polymer Composites*, 23, 5, 2002, S. 758-770
- [83] Belov, E. B.; Lomov, S. V.; Verpoest, I.; Peters, T.; Roose, D.; Parnas, R. S.; Hoes, K.; Sol, H.: Modelling of permeability of textile reinforcements: lattice Boltzmann method. *Composites Science and Technology*, 64, 7-8, 2004, S. 1069-1080
- [84] Spaid, M. A. A.; Phelan, F. R.: Lattice Boltzmann methods for modeling microscale flow in fibrous porous media. *Physics of Fluids*, 9, 9, 1997, S. 2468-2474
- [85] Binetruy, C.; Hilaire, B.; Pabiot, J.: Tow impregnation model and void formation mechanisms during RTM. *Journal of Composite Materials*, 32, 3, 1998, S. 223-245
- [86] Peirce, F. T.: The geometry of cloth structure. *Textile Institute*, 28, 1937, S. 45-96
- [87] Phelan, F. R.; Wise, G.: Analysis of transverse flow in aligned fibrous porous media. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 27, 1, 1996, S. 25-34
- [88] Dungan, F. D.; Senoguz, M. T.; Sastry, A. M.; Faillaci, D. A.: Simulations and experiments on low-pressure permeation of fabrics: Part I - 3D modeling of unbalanced fabric. *Journal of Composite Materials*, 35, 14, 2001, S. 1250-1284
- [89] Wong, C. C.; Robitaille, F.; Long, A. C.; Rudd, C. D.: Prediction of the effects of fiber architecture on permeability using the stream-surface method. In: *FPCM 7, University of Delaware*, 7. - 9. Juli 2004
- [90] Robitaille, F.; Clayton, B. R.; Long, A. C.; Souter, B. J.; Rudd, C. D.: Geometric modelling of industrial preforms: woven and braided textiles. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part L-Journal of Materials-Design and Applications*, 213, L2, 1999, S. 69-83

- [91] Lundström, T. S.: Micromechanical Analysis of the Permeability of a Fibrous Preform. SICOMP Technical Report 91-001 Dissertation, Swedish Institute of Composites, Pitea, Sweden, 1991
- [92] Lu, W. M.; Tung, K. L.; Hwang, K. J.: Fluid flow through basic weaves of monofilament filter cloth. *Textile Research Journal*, 66, 5, 1996, S. 311-323
- [93] Rief, S.; Glatt, E.; Wiegmann, A.: Microstructure Simulation of Virtual Woven Filter Media. In: *Filtech*, Wiesbaden, Deutschland, 2009
- [94] Tung, K.; Shiau, J.; Chuang, C.; Li, Y.; Lu, W.: CFD analysis on fluid flow through multifilament woven filter cloths. *Separation Science and Technology*, 37, 4, 2002, S. 799-821
- [95] Rushton, A.; Griffiths, P.: Fluid flow in monofilament filter media. *Chemical Engineering Research and Design*, 49, a, 1971, S. 49-59
- [96] Summerscales, J.: A model for the effect of fibre clustering on the flow rate in resin transfer moulding. *Composites manufacturing*, 4, 1, 1993, S. 27-31
- [97] Lomov, S. V.; Chi, T. T.; Verpoest, I.; Peeters, T.; Roose, D.; Boisse, P.; Gasser, A.: Mathematical modelling of internal geometry and deformability of woven preforms. *International Journal of Forming Processes*, 6, 2003, S. 413-442
- [98] Verleye, B.; Morren, G.; Lomov, S. V.; Sol, H.; Roose, D.: Userfriendly permeability predicting software for technical textiles. *5th Industrial Simulation Conference*, 2007
- [99] Verpoest, I.; Lomov, S. V.: Virtual textile composites software WiseTex: Integration with micro-mechanical, permeability and structural analysis. *Composites Science and Technology*, 65, 15-16, 2005, S. 2563-2574
- [100] Lomov, S. V.; Verpoest, I.; Peeters, T.; Roose, D.; Zako, M.: Nesting in textile laminates: geometrical modelling of the laminate. *Composites Science and Technology*, 63, 7, 2003, S. 993-1007
- [101] Lomov, S. V.; Huysmans, G.; Luo, Y.; Parnas, R. S.; Prodromou, A.; Verpoest, I.; Phelan, F. R.: Textile composites: modelling strategies. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 32, 10, 2001, S. 1379-1394

- [102] Rieber, G.; Wirjadi, O.; Mitschang, P.: Correlation of permeability values with flow channel diameters determined by 3D-image analysis of a woven textile. *Flow Processes in Composite Materials 10*, Ascona, 11th July 2010
- [103] Sadiq, T. A. K.; Advani, S. G.; Parnas, R. S.: Experimental investigation of transverse flow through aligned cylinders. *International Journal of Multiphase Flow*, 21, 5, 1995, S. 755-774
- [104] Patel, N.; Lee, L. J.: Effects of Fiber Mat Architecture on Void Formation and Removal in Liquid Composite Molding. *Polymer Composites*, 16, 5, 1995, S. 386-399
- [105] Saunders, R. A.; Lekakou, C.; Bader, M. G.: Compression and microstructure of fibre plain woven cloths in the processing of polymer composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 29, 4, 1998, S. 443-454
- [106] Slade, J.; Pillai, K. M.; Advani, S. G.: Investigation of unsaturated flow in woven, braided and stitched fiber mats during mold-filling in resin transfer molding. *Polymer Composites*, 22, 4, 2001, S. 491-505
- [107] Ruiz, E.; Achim, V.; Soukane, S.; Trochu, F.; Breard, J.: Optimization of injection flow rate to minimize micro/macro-voids formation in resin transfer molded composites. *Composites Science and Technology*, 66, 3-4, 2006, S. 475-486
- [108] Young, W. B.: The effect of surface tension on tow impregnation of unidirectional fibrous preform in resin transfer molding. *Journal of Composite Materials*, 30, 11, 1996, S. 1191
- [109] Binetruy, C.; Pabiot, J.; Hilaire, B.: The influence of fiber wetting in resin transfer molding: scale effects. *Polymer Composites*, 21, 4, 2000, S. 548-557
- [110] Stellbrink, K. K. U.: *Micromechanics of composites: composite properties of fibre and matrix constituents*. Hanser Publishers, 1996
- [111] DIN 53 852: September 1991. Bestimmung von Garnlängenverhältnissen in Geweben und Maschenwaren.

- [112] DE 100 04 146 C 2. Daniel, P.; Kissinger, C.; Röder, G.: Anordnung zur Vermessung der Ausbreitung eines Matrixmaterials in elektrisch leitfähigen Verstärkungsmaterialien. 2000
- [113] Kissinger, C.: Ganzheitliche Betrachtung der Harzinjektionstechnik. IVW Schriftenreihe Band 28 Kaiserslautern: IVW GmbH, 2001
- [114] Kissinger, C.; Mitschang, P.; Neitzel, M.; Roder, G.; Haberland, R.: Continuous on-line permeability measurement of textile structures. Bridging the Centuries with Sampe's Materials and Processes Technology, Vol 45, Books 1 and 2, 2000
- [115] Stadtfeld, H. C.; Mitschang, P.; Weimer, C.; Weyrauch: Standardizeable 2D-Permeability Measurement Work Cell for Fibrous Materials. 6. Interantionale AVK-Tagung, Baden-Baden, 2003
- [116] Stadtfeld, H. C.; Weyrauch, F.; Mitschang, P.: Standardizeable Permeability Work Cell for Fibrous Reinforcements. FPCM 7 - The 7th International Conference on Flow Processes in Composite Materials, Delaware, 7.-9. July 2004
- [117] Rieber, G.; Mitschang, P.: 2D-COMP, a high level permeability measurement technique. JEC Composites Magazine No. 38, 2007, S. 65-66
- [118] Gauvin, R.; Kerachni, A.; Fisa, B.: Variation of Mat Surface Density and Its Effect on Permeability Evaluation for RTM Modelling. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 13, 4, 1994, S. 371
- [119] Trevino, L.; Rupel, K.; Young, W. B.; Liou, M. J.; Lee, L. J.: Analysis of resin injection molding in molds with preplaced fiber mats. I: Permeability and compressibility measurements. Polymer Composites, 12, 1, 1991, S. 20-29
- [120] Ouagne, P.; Breard, J.: Continuous transverse permeability of fibrous media. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 41, 1, 2010, S. 22-28
- [121] Ahn, S. H.; Lee, W. I.; Springer, G. S.: Measurement of the 3-Dimensional Permeability of Fiber Preforms Using Embedded Fiber Optic Sensors. Journal of Composite Materials, 29, 6, 1995, S. 714-733

- [122] Hoes, K.; Dinescu, D.; Sol, H.; Vanheule, M.; Parnas, R. S.; Luo, Y. W.; Verpoest, I.: New set-up for measurement of permeability properties of fibrous reinforcements for RTM. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 33, 7, 2002, S. 959-969
- [123] Endruweit, A.; Harper, L. T.; Turner, T. A.; Warrior, N. A.; Long, A. C.: Random discontinuous carbon fibre preforms: Permeability modelling and resin injection simulation. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 39, 10, 2008, S. 1660-1669
- [124] Parnas, R. S.; Howard, J. G.; Luce, T. L.; Advani, S. G.: Permeability characterization. 1. A proposed standard reference fabric for permeability. *Polymer Composites*, 16, 6, 1995, S. 429-445
- [125] Steenkamer, D. A.; Mcknight, S. H.; Wilkins, D. J.; Karbhari, V. M.: Experimental Characterization of Permeability and Fiber Wetting for Liquid Molding. *Journal of Materials Science*, 30, 12, 1995, S. 3207-3215
- [126] Gutowski, T. G.: *Advanced composites manufacturing*. New York: Wiley, 1997
- [127] Karbhari, V. M.; Palmese, G. R.: Sizing related kinetic and flow considerations in the resin infusion of composites. *Journal of Materials Science*, 32, 21, 1997, S. 5761-5774
- [128] Palmese, G. R.; Andersen, O. A.; Karbhari, V. M.: Effect of glass fiber sizing on the cure kinetics of vinyl-ester resins. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 30, 1, 1999, S. 11-18
- [129] Palmese, G. R.; Karbhari, V. M.: Effects of Sizings on Microscopic Flow in Resin Transfer Molding. *Polymer Composites*, 16, 4, 1995, S. 313-318
- [130] Lekakou, C.; Johari, M.; Bader, M. G.: Compressibility and flow permeability of two dimensional woven reinforcements in the processing of composites. *Polymer Composites*, 17, 5, 1996, S. 666-672
- [131] Rieber, G.; Mitschang, P.: 2D-Permeability changes due to stitching seams. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 41, 1, 2010, S. 2-7

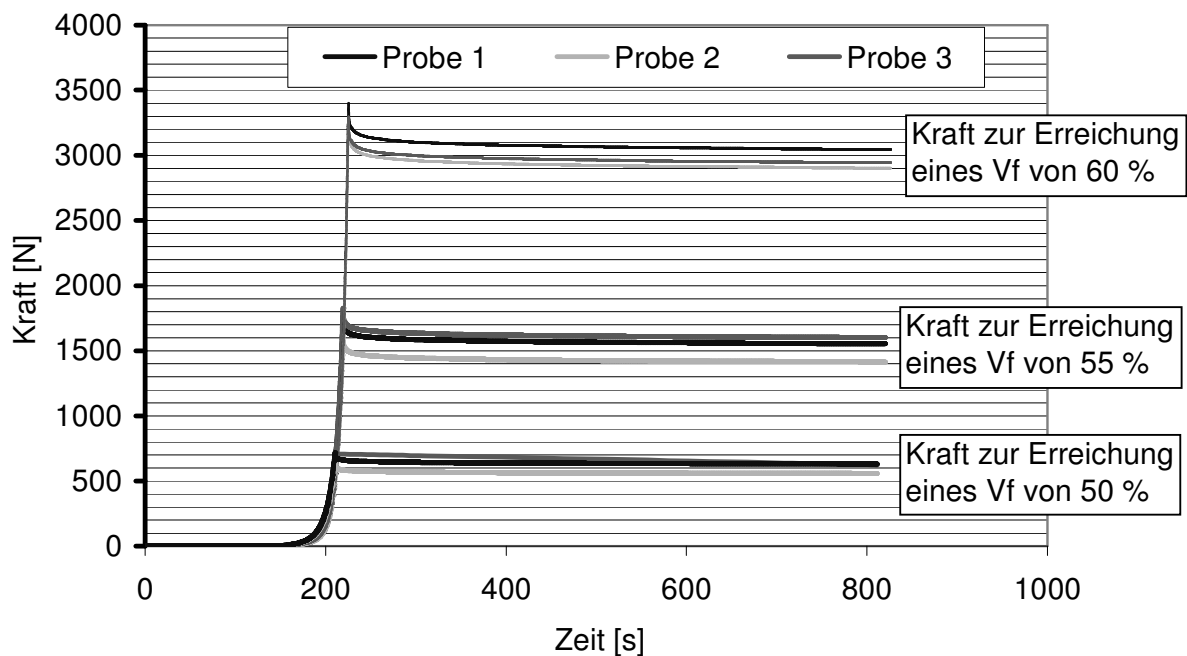
- [132] Endruweit, A.; Gehrig, S.; Ermanni, P.: Mechanisms of hydrodynamically induced in-plane deformation of reinforcement textiles in resin injection processes. *Journal of Composite Materials*, 37, 18, 2003, S. 1675-1692
- [133] Endruweit, A.; Ermanni, P.: The in-plane permeability of sheared textiles. Experimental observations and a predictive conversion model. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 35, 4, 2004, S. 439-451
- [134] Dong, L.; Lekakou, C.; Bader, M. G.: Processing of composites: Simulations of the draping of fabrics with updated material behaviour law. *Journal of Composite Materials*, 35, 2, 2001, S. 138-163
- [135] Molnar, P.; Ogale, A.; Lahr, R.; Mitschang, P.: Influence of drapability by using stitching technology to reduce fabric deformation and shear during thermoforming. *Composites Science and Technology*, 67, 15-16, 2007, S. 3386-3393
- [136] Laine, B.; Hivet, G.; Boisse, P.; Boust, F.; Lomov, S. V.; Badel, P.: Permeability of the woven fabrics. *FPCM 8 - The 8th International Conference on Flow Processes in Composite Materials*, Douai, 11.-13. July 2006
- [137] Lekakou, C.; Heardman, E. C.; Easton, M.; Bader, M. G.: Integrated In-Plane Infiltration Simulations in the Design of Liquid Composite Processing. S. 164-167
- [138] Bickerton, S.; Sozer, E. M.; Graham, P. J.; Advani, S. G.: Fabric structure and mold curvature effects on preform permeability and mold filling in the RTM process. Part I. Experiments. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 31, 5, 2000, S. 423-438
- [139] Slade, J.; Sozer, E. M.; Advani, S. G.: Fluid impregnation of deformed preforms. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 19, 7, 2000, S. 552-568
- [140] Heardman, E.; Lekakou, C.; Bader, M. G.: In-plane permeability of sheared fabrics. *Composites Part A - Applied Science and Manufacturing*, 32, 7, 2001, S. 933-940

- [141] Wulfhorst; Gries; Veit: Two-Dimensional Reinforcing Fabrics with Multiaxial Construction. *Textile Technology*, S. 205
- [142] Lundström, T. S.: The permeability of non-crimp stitched fabrics. *Composites Part A - Applied Science and Manufacturing*, 31, 12, 2000, S. 1345-1353
- [143] Demaría, C.; Edu, R.; Trochu, F.: In-plane anisotropic permeability characterization of deformed woven fabrics by unidirectional injection. Part II: Prediction model and numerical simulations. *Polymer Composites*, 28, 6, 2007, S. 812-827
- [144] Rieber, G.; Mitschang, P.: Influence of stitching seams on 2D-permeability. *FPCM 9 - The 9th International Conference on Flow Processes in Composite Materials*, Montreal, 8th-10th July 2008
- [145] Rieber, G.; Mitschang, P.: Full Characterization of a Stitched Twill Weave Textile by Unsaturated 2-D and 3-D Permeability Measurements. *International Conference on Composite Materials 17*, Edinburgh, 2009

Anhang

Anhang A

Benötigte Kräfte um ein 10-lagiges Glasfasergewebe (Nr. 9) auf einen Faservolumengehalt von 50 %, 55 % und 60 % zu kompaktieren. Nachdem der Zielfaservolumengehalt, erreicht wurde, wurde über mindestens 10 Minuten das Relaxationsverhalten beobachtet. Die Preformproben hatten einen Durchmesser von 100 mm. Im Kapitel 2.3 werden die μ CT-Ergebnisse mit Kompaktierungskräften erklärt.



Anhang B

Permeabilitäts-, Anisotropie- und Drehwinkelmesswerte der 19 Gewebe

Name	#	Faservolumen- gehalt [%]	K1 [m ²]	Variations- koeffizient	K2 [m ²]	Variations- koeffizient	Anisotropie	Variations- koeffizient	Drehwinkel der Fließfrontellipse	Standard- abweichung
PGTex #1	#1	43,8%	5,55E-11	4,7%	5,67E-11	22,4%	0,86	6,4%	4,5°	12,1°
		49,2%	2,42E-11	8,7%	2,26E-11	21,8%	0,83	7,0%	8,5°	5,2°
		54,7%	8,70E-12	5,0%	6,81E-12	2,6%	0,77	8,7%	-0,3°	3,1°
PGTex #2	#2	45,5%	4,96E-11	9,4%	4,90E-11	23,0%	0,79	4,0%	0,6°	9,3°
		49,6%	3,10E-11	8,4%	3,65E-11	12,4%	0,80	6,9%	4,6°	5,3°
		53,7%	1,93E-11	9,8%	2,16E-11	18,0%	0,80	6,9%	3,9°	3,5°
PGTex #3	#3	45,0%	6,57E-11	10,1%	4,73E-11	16,1%	0,72	6,6%	-3,4°	6,4°
		49,1%	3,78E-11	19,9%	2,63E-11	19,8%	0,70	4,9%	-9,0°	6,8°
		53,2%	2,17E-11	6,1%	1,52E-11	14,8%	0,70	9,5%	-2,1°	3,4°
PGTex #4	#4	44,7%	4,05E-11	11,9%	3,57E-11	19,0%	0,84	11,5%	3,3°	4,6°
		48,8%	2,47E-11	2,6%	2,02E-11	6,5%	0,82	3,3%	1,7°	10,2°
		52,8%	1,49E-11	4,6%	1,10E-11	16,5%	0,74	14,1%	-8,2°	9,9°
PGTex #5	#5	46,9%	3,77E-11	8,2%	2,83E-11	1,1%	0,76	31,3%	8,2°	6,1°
		50,8%	2,38E-11	6,0%	1,70E-11	5,6%	0,72	0,5%	2,2°	4,8°
		54,8%	1,62E-11	10,7%	5,88E-12	5,0%	0,36	7,0%	-1,6°	3,9°
PD92105	#6	46,0%	5,05E-11	4,5%	2,82E-11	10,8%	0,56	14,6%	0,6°	4,9°
		49,3%	2,89E-11	1,9%	1,67E-11	14,1%	0,58	15,3%	-1,4°	4,4°
		52,5%	1,70E-11	3,7%	9,77E-12	25,2%	0,58	24,9%	1,1°	7,9°
PD92110	#7	46,3%	4,43E-11	8,6%	7,02E-12	2,0%	0,16	9,9%	-0,8°	0,2°
		49,6%	2,82E-11	10,7%	3,81E-12	10,3%	0,14	9,1%	-1,8°	1,4°
		52,9%	2,14E-11	7,4%	2,35E-12	7,6%	0,11	9,6%	-0,5°	0,8°
PD92626	#8	47,4%	2,35E-11	12,9%	2,12E-11	9,5%	0,90	3,5%	70,0°	11,1°
		51,3%	1,05E-11	6,7%	9,53E-12	10,4%	0,90	4,4%	22,1°	7,3°
		55,3%	5,17E-12	4,1%	4,07E-12	9,3%	0,79	5,4%	9,3°	0,8°
SCC3106	#9	44,0%	6,98E-11	26,0%	3,71E-11	28,7%	0,53	3,4%	-2,2°	3,0°
		48,0%	3,76E-11	9,9%	1,80E-11	3,0%	0,48	5,6%	-0,8°	4,9°
		52,0%	2,03E-11	1,5%	8,68E-12	0,6%	0,43	11,6%	9,9°	6,9°

Name	#	Faservolumen-gehalt [%]	K1 [m ²]	Variations-koeffizient	K2 [m ²]	Variations-koeffizient	Anisotropie	Variations-koeffizient	Drehwinkel der Fließfrontellipse	Standard-abweichung	Mittlere Abweichung gegenüberliegender Sensoren
Hexcel 1102	#10	46,9%	5,87E-11	5,9%	1,38E-11	5,7%	0,24	3,2%	0,8°	1,0°	3,6%
		51,3%	3,38E-11	2,8%	6,74E-12	4,2%	0,20	5,0%	0,9°	0,4°	4,6%
		54,7%	2,04E-11	4,6%	3,86E-12	5,4%	0,19	5,3%	-1,1°	0,5°	5,1%
Hexcel 7781	#11	48,3%	2,07E-11	1,6%	1,69E-11	1,9%	0,82	1,0%	24,3°	2,2°	0,8%
		51,5%	1,20E-11	2,5%	9,92E-12	2,1%	0,83	0,4%	19,6°	1,8°	1,8%
		54,3%	6,80E-12	0,4%	5,26E-12	3,2%	0,77	3,6%	17,0°	1,5°	2,1%
Hexcel 7581	#12	47,5%	3,91E-11	2,5%	2,95E-11	2,0%	0,75	2,0%	45,9°	0,4°	1,4%
		51,5%	1,89E-11	3,3%	1,54E-11	2,2%	0,82	1,5%	42,9°	4,9°	2,1%
		54,3%	9,30E-12	2,7%	7,70E-12	4,6%	0,83	2,1%	40,4°	1,5°	1,9%
PD 92125	#13	46,1%	4,85E-11	6,1%	1,23E-11	10,4%	0,25	6,0%	1,7°	1,7°	2,2%
		51,4%	2,63E-11	3,4%	5,15E-12	0,8%	0,20	2,7%	2,1°	0,8°	3,7%
		55,0%	1,52E-11	7,0%	4,12E-12	11,4%	0,27	17,6%	-0,3°	1,3°	4,4%
Hexcel 1113	#14	47,1%	6,64E-11	19,9%	1,52E-11	13,4%	0,24	36,7%	2,1°	0,9°	5,1%
		50,4%	4,54E-11	13,4%	8,19E-12	7,6%	0,18	6,3%	1,4°	1,1°	4,7%
		55,0%	1,89E-11	38,3%	4,14E-12	17,3%	0,26	63,0%	0,2°	1,2°	4,1%
Hexcel 1265	#15	47,7%	8,78E-11	23,4%	5,59E-11	28,0%	0,64	10,1%	-1,1°	3,8°	8,3%
		51,0%	5,17E-11	11,5%	3,31E-11	6,4%	0,65	14,4%	-4,6°	3,1°	6,3%
		55,6%	2,13E-11	11,7%	1,60E-11	17,3%	0,75	8,3%	-1,4°	3,3°	3,6%
Hexcel 1103	#16	47,0%	8,40E-11	4,7%	5,15E-11	15,0%	0,61	11,2%	-0,6°	1,2°	6,9%
		51,4%	4,24E-11	6,2%	2,38E-11	18,0%	0,56	18,3%	-0,8°	1,5°	4,8%
		54,8%	2,42E-11	8,2%	1,31E-11	34,3%	0,55	40,3%	0,9°	1,5°	5,5%
Hexcel 1035	#17	46,5%	5,06E-11	1,5%	1,45E-11	9,7%	0,29	9,3%	0,5°	1,3°	1,9%
		50,1%	3,39E-11	4,2%	7,63E-12	4,6%	0,23	8,5%	2,0°	1,3°	2,9%
		55,6%	1,55E-11	3,8%	2,73E-12	15,4%	0,18	17,8%	2,5°	1,1°	4,5%
Hexcel 1039	#18	43,8%	6,97E-11	2,6%	8,38E-12	1,7%	0,12	1,0%	0,2°	1,6°	5,0%
		48,1%	4,55E-11	10,1%	4,55E-12	19,5%	0,10	12,3%	0,9°	1,4°	3,7%
		52,5%	2,59E-11	12,0%	2,45E-12	4,8%	0,10	15,5%	0,6°	0,2°	4,9%
Hexcel 1038	#19	43,2%	5,03E-10	8,1%	1,90E-10	6,6%	0,38	7,7%	-35,8°	2,3°	4,8%
		48,7%	1,34E-10	6,5%	5,90E-11	13,0%	0,44	8,6%	-23,3°	1,5°	3,5%
		55,7%	3,17E-11	12,9%	1,23E-11	14,7%	0,39	4,6%	-10,8°	3,5°	3,9%
		60,1%	1,23E-11	11,6%	4,65E-12	13,7%	0,38	8,0%	-5,4°	2,2°	4,5%

Anhang C

Gemessene Schussgarnhöhen der in Kapitel 2.3. vorgestellten μ CT-Studie.

Höhe des Kettgarns [mm] (340 tex)					
Proben- nummer / μ CT- Schnittebene	bei Faservolumen- gehalt 40 %	Proben- nummer / μ CT- Schnittebene	bei Faservolumen- gehalt 48 %	Proben- nummer / μ CT- Schnittebene	bei Faservolumen- gehalt 56 %
25 40 793	0,21 0,18 0,19 0,19	26 48 700	0,2 0,2 0,2 0,2 0,2	27 56 642	0,18 0,17 0,18 0,18 0,18 0,18
25 40 1355	0,21 0,21 0,21 0,22 0,22 0,19 0,20 0,20	26 48 1280	0,19 0,2 0,2 0,21 0,22 0,20	17 56 676	0,18 0,18 0,18 0,18 0,18 0,18 0,18
25 40 225	0,18 0,19 0,20 0,20 0,21 0,22 0,21	16 48 979	0,17 0,17 0,18 0,18 0,18 0,19 0,21 0,21 0,19 0,22 0,19 0,19		0,18 0,18 0,18 0,16 0,17 0,17 0,19 0,20 0,21 0,18
15 40 600	0,18 0,20 0,20 0,20 0,21 0,21 0,22 0,22 0,24 0,25 0,21	16 48 979	0,17 0,18 0,18 0,18 0,18 0,18 0,18 0,19 0,19 0,20 0,21 0,21 0,19		
15 40 1200	0,19 0,19 0,20 0,20 0,20 0,21 0,21 0,21 0,22 0,22 0,21		0,19 0,20 0,21 0,21 0,19		
Mittelwert	0,20		0,195		0,182
Standard- abweichung	0,02		0,014		0,012

Anhang D

Gemessene Kettgarnhöhen der in Kapitel 2.3. vorgestellten μ CT-Studie.

Höhe des Schussgarns [mm] (272 tex)					
Proben- nummer / μ CT- Schnittebene	bei Faservolumen- gehalt 40 %	Proben- nummer / μ CT- Schnittebene	bei Faservolumen- gehalt 48 %	Proben- nummer / μ CT- Schnittebene	bei Faservolumen- gehalt 56 %
25_40_457	0,17	26_48_175	0,14	27_56_1170	0,10
	0,16		0,16		0,11
	0,17		0,18		0,11
	0,17		0,18		0,12
25_40_975	0,16		0,17		0,12
	0,17		0,17		0,12
	0,18	26_48_1366	0,18		0,13
	0,21		0,18		0,13
	0,17		0,18		0,12
	0,18		0,18	17_56_1044	0,14
25_40_1477	0,17		0,18		0,14
	0,17	16_48_1200	0,14		0,14
	0,17		0,15		0,14
	0,20		0,15		0,13
	0,15		0,15		0,13
	0,17		0,16		0,12
15_40_870	0,16		0,16		0,13
	0,17		0,17		
	0,18		0,17		
	0,18		0,19		
	0,19		0,16		
	0,19	16_48_300	0,15		
	0,18		0,17		
15_40_170	0,15		0,17		
	0,16		0,18		
	0,16		0,18		
	0,17		0,18		
	0,17		0,19		
	0,18		0,21		
	0,21		0,18		
	0,17				
Mittelwert	0,173		0,171		0,126
Standard- abweichung	0,037		0,017		0,012

Anhang E

Gemessene Kett- und Schussgarnondulationswinkel bei einem Faservolumengehalt von 40 % der in Kapitel 4 vorgestellten μ CT-Studie.

Faservolumengehalt	Probe	μ CT-Schnittebene	Winkel des Kettgarns [°]	μ CT-Schnittebene	Winkel des Schussgarns [°]	
40%	25_40	457	7,4	793	12,9	
				7,2		11,3
		975	7,3		13,8	
				6,7		12,0
				6,9	1355	10,0
		1477	6,6		10,0	
				6,7		10,5
				7,1		13,9
					225	10,0
						10,4
					11,4	
					11,2	
					11,1	
					11,7	
					12,3	
		15_40	870	0,9	600	12,1
				11,6		12,1
				11,7		13,1
				9,1		14,4
				4,3	1200	11
		170	4,7		11	
			7,6		13,1	
			7,8		13,1	
			6,3		13,1	
			8,3			
Mittelwert			6,9		12,3	
Standardabweichung			2,64		1,15	

Anhang F

Gemessene Kett- und Schussgarnondulationswinkel bei einem Faservolumengehalt von 48 % der in Kapitel 4 vorgestellten μ CT-Studie.

Faservolumengehalt	Probe	μ CT-Schnittebene	Winkel des Kettgarns [°]	μ CT-Schnittebene	Winkel des Schussgarns [°]
Faservolumengehalt	26_48	175	6,8	963	11,0
48%			6,7		13,0
			6,8		12,5
		1366	6,0	700	10,3
			4,1		11,3
			6,5		11,3
			4,9	70	11,2
			5,9		11,4
					11,0
					11,2
					11,1
					11,7
					12,3
	16_48	1200	3,8	979	11,3
			6,7		11,4
			7,1		12,4
			7,4		
			8,1		
	16_48	300	7,1	500	9,8
			7,1		12,9
					12,9
			5,6		13,7
Mittelwert			6,5		11,8
Standardabweichung			1,01		0,89

Anhang G

Gemessene Kett- und Schussgarnondulationswinkel bei einem Faservolumengehalt von 40 % der in Kapitel 4 vorgestellten μ CT-Studie.

Faservolumengehalt	Probe	μ CT-Schnittebene	Winkel des Kettgarns [°]	μ CT-Schnittebene	Winkel des Schussgarns [°]
56%	27_56	1170	9,7	642	11,4
			9,6		11,8
			7,3		13,1
			7,5		15,3
			8,2		15,9
			8,9		
			7,0		11,7
	17_56	1044	6,5	676	9,1
			6,7		10,2
			7,4		12,5
			6,7		13,9
			8,9		15,5
			9,2		15,6
Mittelwert			8,0		13,0
Standardabweichung			1,17		2,27

Betreute Studien- und Diplomarbeiten

Backe, D.: Einfluss des Faservolumengehaltes auf die Permeabilität von Glasfasergeweben beim RTM-Prozess. IVW-Bericht 08-014, 2008

Bernd, P.: Einfluss der Kavitätshöhe auf die Permeabilität eines Glasfasergewebes beim RTM-Prozess. IVW-Bericht 08-015, 2008

Rubio, I.S.: Statistische Versuchsplanung zur Herstellung von FKV-Bauteilen. IVW-Bericht 08-042, 2008

Grad, P. Vergleich der elektrischen Eigenschaften von Ruß und CNT dotierten Faserkunststoffverbunden für automobiler Anwendungen. IVW-Bericht 09-045, 2009

Kluck, S.: Vergleich der mechanischen Eigenschaften von CNT dotierten RTM Laminaten für automobiler Anwendungen. IVW-Bericht 09-046, 2009

Hummel, D.: Entwicklung eines Schlauchblas-RTM-Verfahrens mit integrierten Fließkanälen. Hochschule Rosenheim, Fakultät Ingenieurwissenschaften (Kunststofftechnik), 2010

Walcesky, T.: Steigerung der Schlagzähigkeit und Scherfestigkeit von CNT dotierten GFK-Laminaten durch Funktionalisierung. Hochschule Kaiserslautern, Fachbereich Angewandte Logistik- und Polymerwissenschaften, 2010

Deter, C.: Statistische Versuchsplanung zur Ermittlung permeabilitätsbestimmender Faktoren von Verstärkungstextilien. IVW-Bericht 10-053, 2010

Kreutz, D.: Weiterentwicklung einer 3D-Ultraschall-Permeabilitätsmesszelle zu einem standardisierbaren Messverfahren. IVW-Bericht 11-016, 2011

Glawe, M.: Ermittlung permeabilitätsbestimmender Parameter in Dickenrichtung bei Geweben. IVW-Bericht 11-017, 2011

Publikationen

Journals

Rieber, G.; Mitschang, P.: 2D-COMP, a high level permeability measurement technique. JEC Composites Magazine No. 36, 2007, S. 65-66

Rieber, G.; Mitschang, P.: 2D-Permeability changes due to stitching seams. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 41, 1, 2010, S. 2-7

Symposien- und Konferenzbeiträge

Rieber, G., Mitschang, P., Chen, N.: Influence of Preform Technology on 2-D-Permeability. 3rd China-Europe International Symposium, Budapest, Ungarn, 11.-15. Juni 2007

Rieber, G., Mitschang, P.: 2-D-Permeability Measurement for Optimisation of the RTM Process. Materialica Forum, München, Deutschland, 16.-18. Oktober 2007

Rieber, G., Mitschang, P.: RTM-tool with integrated 2-D-Permeability Measurement Work Cell. JEC Automotive Forum, Paris, Frankreich, 3./4. April 2007

Rieber, G., Mitschang, P.: Affected 2-D-permeability of Reinforcements by Sewing. 30th International SAMPE Europe Jubilee Conference, Paris, Frankreich, 23.-25. März 2008

Rieber, G.; Mitschang, P.: Influence of stitching seams on 2D-permeability. FPCM 9 - The 9th International Conference on Flow Processes in Composite Materials, Montreal, 8th-10th July 2008

Rieber, G.; Mitschang, P.: Permeabilitätsmessung von modifizierten Preforms. In: IVW-Kolloquium, Kaiserslautern: IVW Schriftenreihe Band 80, Nov. 2008

Rieber, G.; Mitschang, P.: Full Characterization of a Stitched Twill Weave Textile by Unsaturated 2-D and 3-D Permeability Measurements. International Conference on Composite Materials 17, Edinburgh, 2009

Rieber, G.; Grad, P.; Mitschang, P.: Evaluation of RTM produced CNT doped GFRPC Laminates. In: ECCM 14, Budapest 7-10 June 2010

Rieber, G.; Mitschang, P.: Prozessentwicklung zur Herstellung von Faser- Epoxidharzverbunden mit homogener CNT Dotierung. In: IVW-Kolloquium, Kaiserslautern, Nov. 2010

Rieber, G.; Wirjadi, O.; Mitschang, P.: Correlation of permeability values with flow channel diameters determined by 3D-image analysis of a woven textile. Flow Processes in Composite Materials 10, Ascona, 11th July 2010

Rieber, G.; Grieser, T.; Grad, P. Mitschang, P.: Processing and Evaluating CNT doped Laminates. In: SAMPE, Long Beach, 23.-26. Mai 2011

Rieber, G., Hildebrandt, K., Mitschang, P.: Enhancement of Fiber Reinforced Plastics by CNTs. 2nd Innovative International Composites Summit (I.I.C.S.), Nano Materials Forum, Paris, Frankreich, 30. März 2011

Patente

Rieber, G.; Hummel, D.: DE 10 2011 009 506 A1 - Verfahren zur Herstellung von Faserverbund-Hohlbauteilen mit schließenden Fließkanälen. Im Januar 2011 zum Patent beim Deutschen Patent- und Markenamt angemeldet und Prüfungsantrag gestellt