

IVW - Schriftenreihe Band 67

Institut für Verbundwerkstoffe GmbH - Kaiserslautern

Hubert Stadtfeld

Entwicklung einer Messzelle zur
Bestimmung von Kompaktierungs-
und Permeabilitätskennwerten
bei flächigen Faserhalbzeugen

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. Alois K. Schlarb
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 2006

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 3-934930-63-8

Entwicklung einer Messzelle zur Bestimmung von Kompaktierungs- und Permeabilitätskennwerten bei flächigen Faserhalbzeugen

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

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

vorgelegt von
MSc. Hubert Christian Stadtfeld
aus Landstuhl

Tag der mündlichen Prüfung: 24. Juli 2006

Prüfungsvorsitzender:	Prof. Dr.-Ing. A. K. Schlarb
1. Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. P. Mitschang
2. Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. G. Ziegmann

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand in den Jahren 2000 bis 2005 während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter innerhalb der Preform-RTM-Gruppe der Abteilung Verarbeitungstechnik der Institut für Verbundwerkstoffe GmbH.

Mein besonderer Dank gebührt Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Mitschang, der mir als technisch-wissenschaftlicher Direktor der Abteilung Verarbeitungstechnik die Möglichkeit gab, mich insbesondere im Bereich RTM-Technologie zu entfalten und das Institut sowohl im Inland als auch im Ausland auf verschiedenen Konferenzen vertreten zu dürfen. Für das entgegengebrachte Vertrauen, die fruchtbaren Diskussionen und die mir zu Teil gewordene Betreuung sowohl während der vielfältigen Projektarbeiten als auch während der Durchführung dieser Arbeit möchte ich mich herzlich bedanken.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Alois Schlarb danke ich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes und das in mich gesetzte Vertrauen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Gerhard Ziegmann möchte ich für die Übernahme des Koreferats danken. Seine konstruktiv-kritische Art der Hinterfragung hat zur Verständlichkeit der Arbeit einen wertvollen Beitrag geleistet.

Ein besonderer Dank gilt den Kollegen der IVW GmbH. Die freundschaftliche Arbeitsatmosphäre gewährleistete viele produktive Diskussionen, die zum Erreichen der gesteckten Ziele maßgeblich beigetragen haben. In diesem Zusammenhang möchte ich insbesondere den Kollegen Florian Weyrauch, Dr. Jens Schlimbach, Dr. Marcel Sommer, Martin Flöck, Michael Meyer, Holger Franz und den Kollegen der Preform-RTM Gruppe danken.

Gewidmet sei diese Arbeit meiner Frau Tanja und meiner Familie, die mich stets in jeder Hinsicht unterstützt und motiviert haben. Nur durch einen solchen Rückhalt und das mir entgegengebrachte Verständnis ist die Zusammenfassung meiner Arbeit möglich geworden. Für die Durchführung der Korrekturen möchte ich mich bei meiner Frau herzlichst bedanken.

Inhaltsverzeichnis

Abstract	III
Verzeichnis verwendeter Formelzeichen	V
Abkürzungsverzeichnis	VIII
1 Einleitung	1
1.1 Verfahrensbeschreibung	2
1.2 Aufgabenstellung der Arbeit	5
2 Preformherstellung zur Verwendung in Flüssigimprägnierprozessen	7
3 Kompaktierungsverhalten von Faserhalbzeugen	13
3.1 Auswirkungen des Kompaktierungsverhaltens auf den Verarbeitungsprozess	14
3.1.1 Kompaktierungsversuche an unmodifizierten Faserhalbzeugen	15
3.2 Einfluss von zusätzlich in das Faserhalbzeug eingebrachten Nähten auf das Kompaktierungsverhalten von nähtechnisch hergestellten Faserhalbzeugen.....	27
4 Permeabilitätsbestimmung von flächigen Faserhalbzeugen	41
4.1 Bisherige Methoden der Permeabilitätsbestimmung	45
4.1.1 Eindimensionale Messverfahren	47
4.1.2 Zweidimensionale Messverfahren	50
4.1.3 Dreidimensionale Messverfahren	54
4.2 Permeabilitätsbestimmung mit einer standardisierbaren Permeabilitätsmesszelle	56
4.2.1 Analytische Ermittlung der Fließfrontellipsen anhand von Messwerten der dielektrischen Sensoren	62
4.2.2 Versuchsergebnisse der 2D-Permeabilitätsbestimmung	64
5 Entwicklung des kombinierten Permeabilitäts- und Kompaktierungsprüfstands	75
5.1 Aufbau und Bedienung des Prüfstands	75

5.2	Betrachtung möglicher Fehlerquellen	83
5.3	Versuchsergebnisse der Permeabilitätsmessungen mit dem kombinierten Permeabilitäts- und Kompaktierungsprüfstand	91
5.3.1	Versuchsergebnisse der Permeabilitätsmessungen an biaxialem Gelege (Material D)	94
5.3.2	Versuchsergebnisse der Permeabilitätsmessungen an triaxialem Gelege (Material E)	100
6	Vergleich der Ergebnisse der kombinierten optischen Kompaktierungs- und Permeabilitätsmesszelle mit den Ergebnissen entsprechender konventioneller Messverfahren	107
6.1	Vergleich der Ergebnisse der Kompaktierungsuntersuchungen	107
6.2	Vergleich der Ergebnisse der Permeabilitätsuntersuchungen	112
7	Zusammenfassung	117
8	Ausblick	119
9	Referenzen	121

Abstract

The popularity of composite materials is constantly growing, which can be verified by the rising number of composite parts in our everyday life. Examples of composite parts can be found in the Airbus A 380 or the constantly increasing number of wind turbines which contain composite rotor blades of over 50m length. Because of the main features of composites, which are light weight combined with high strength and the possibility of tailoring the strength and the stiffness of the composite according to the requirements, their application is highly efficient and economic.

In order to manufacture a composite part by employing a Liquid Composite Molding Process (LCM), it is first necessary to select an appropriate manufacturing process such as the Resin Transfer Molding Process (RTM) and to design a mold which corresponds to the requirements of the selected process. Then the stacking sequence of the individual fibrous reinforcements is designed to withstand the loads on the final part. To achieve an efficient composite manufacturing process, pre-shaped, hand-able, dry reinforcing structures, so called preforms, need to be applied. Such preforms can be assembled either by using conventional binder technologies or by the recently developed “cut and sew approach”. A variety of available software simulation tools support the design engineer in this task. These tools are, on the one hand, a fast way of gaining information about the expected loads the mold has to endure during the injection process. On the other hand, they provide the possibility to optimize the injection process and its process parameters and to identify critical points of incomplete saturation. With this information at hand, the design of the mold can be adjusted in order to obtain optimal processing conditions for a slim and efficient production cycle.

A prerequisite for employing these powerful simulation tools is to obtain thorough knowledge of the required input parameters concerning the fibrous reinforcement to be used. The most important input parameters are the compaction behavior and the permeability of the fibrous stacking sequence. Because of the absence of model-based tools to provide this input information experimental determination methods have to be employed.

This work introduces two semi-automated measurement cells which determine the in-plane permeability of fibrous reinforcements in an efficient manner, i.e. the dielectri-

cal permeability work cell and the optical compaction and permeability work cell. The latter of which can determine both the required compaction and the permeability information in one single experiment. The design and manner of operating of the optical compaction and permeability work cell is described and its functionality is validated by a comparison of experimental results.

Verzeichnis verwendeter Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Bedeutung
A	[m ²]	Querschnittsfläche
A _{eff}	[m ²]	Effektiv durchströmbare Fläche
a		1. Parameter eines linearen Gleichungssystems
b		2. Parameter eines linearen Gleichungssystems
C _{ges}	[F]	Gesamtkapazität
C _{Faser}	[F]	Kapazität der verwendeten Fasern
C _{Flüssigkeit}	[F]	Kapazität der verwendeten Testflüssigkeit
C _{Luft}	[F]	Kapazität der Luft
C _{par}	[F]	Parasitäre Kapazität
c		3. Parameter eines linearen Gleichungssystems
D1		Dielektrischer Sensor Diagonal 1
D2		Dielektrischer Sensor Diagonal 2
d _{Faser}	[mm]	Idealisierte Faserschichtdicke
d _{Luft}	[mm]	Idealisierte Luftschichtdicke
F	[N]	Kraft
F ₁	[N]	Berechneter Punkt für Ausgleichsgerade 1
F ₂	[N]	Berechneter Punkt für Ausgleichsgerade 2
F _{OF}	[N]	Oberfadenabzugskraft
F _{Press}	[N]	Presserfußkraft
F _{UF}	[N]	Untenfadenabzugskraft
h	[mm]	Höhe
K	[m ²]	Permeabilität eines porösen Mediums
<u>K</u>	[m ²]	Permeabilitätstensor
K1		Dielektrischer Sensor Kurz 1
K2		Dielektrischer Sensor Kurz 2
K ₁	[m ²]	Permeabilitätswert in Richtung der 1. Hauptachse
K ₂	[m ²]	Permeabilitätswert in Richtung der 2. Hauptachse
K ₃	[m ²]	Permeabilitätswert in Richtung der 3. Hauptachse
K _θ	[m ²]	Permeabilitätswert der Ebene in Richtung θ
K _{ij} (i, j=x, y, z)	[m ²]	Komponenten des Permeabilitätstensors
L1		Dielektrischer Sensor Lang 1

L2		Dielektrischer Sensor Lang 2
l	[mm]	Mit Flüssigkeit überdeckte Länge eines dielektrischen Sensors
l _{ges}	[mm]	Gesamtlänge des dielektrischen Sensors
m		Steigung
m ₁		Steigung der 1. Ausgleichsgeraden
m ₂		Steigung der 2. Ausgleichsgeraden
P _i (i=1..6)		Schnittpunkt von Fließfrontellipse und Symmetrieachse eines Sensors
\bar{P}_i (i=1..6)	[m]	Strecke zwischen Ellipsenmittelpunkt und Punkt P _i
p	[Pa]	Druck
p _{inj}	[Pa]	Injektionsdruck
p ₁	[Pa]	Flüssigkeitsdruck am Punkt 1
p ₂	[Pa]	Flüssigkeitsdruck am Punkt 2
Q	[m ³ /s]	Volumenstrom
Re		Reynoldszahl
R _{f1}	[m]	Fließfrontradius der 1. Hauptachse
R _{f2}	[m]	Fließfrontradius der 2. Hauptachse
R ₀	[m]	Radius der Injektionsöffnung
t	[s]	Zeit
u _x	[m/s]	Geschwindigkeitskomponente in x-Richtung
u _y	[m/s]	Geschwindigkeitskomponente in y-Richtung
u _z	[m/s]	Geschwindigkeitskomponente in z-Richtung
V _f	[%]	Faservolumengehalt
w	[m]	Breite der dielektrischen Sensorfläche
x, y, z		Achsen des kartesischen Koordinatensystems
x _f	[m]	Zurückgelegte Fließstrecke
Δp	[Pa]	Druckdifferenz
Δx	[m]	Wegdifferenz
α		Anisotropieverhältnis der Hauptachsenpermeabilitäten (K ₂ /K ₁)
β	[°]	Verdrehwinkel zwischen der x-Achse und der 1. Hauptachsenrichtung

δ	[°]	Verdrehwinkel zwischen der x-Achse und den Symmetrielinien der diagonalen Sensoren D1, D2
ϵ_{Fasern}	[F/m]	Dielektrizitätskonstante der Fasern
ϵ_{FL}	[F/m]	Dielektrizitätskonstante der Flüssigkeit
ϵ_0	[F/m]	Dielektrizitätskonstante der Luft
Φ		Porosität
η, ξ		Achsen des elliptischen Koordinatensystems
λ_1		1. Eigenwert der charakteristischen Gleichung
λ_2		2. Eigenwert der charakteristischen Gleichung
μ	[Pa*s]	Viskosität der Testflüssigkeit
θ	[°]	Winkel von der x-Achse aus, für den ein Permeabilitätskennwert K_θ errechnet werden soll
ϱ	[m/s]	Volumengemittelte Fließgeschwindigkeit
σ	[MPa]	Spannung
ξ_{f1}		Äquivalent des Fließfrontradius R_{f1} im elliptischen Koordinatensystem
ξ_{f2}		Äquivalent des Fließfrontradius R_{f2} im elliptischen Koordinatensystem

Abkürzungsverzeichnis

Kurzform	Bedeutung
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
CAD	Computer Aided Design
CNC	Computer Numeric Control
FKV	Faserkunststoffverbunde
IVW	Institut für Verbundwerkstoffe GmbH
KSL	Keilmann Sondermaschinenbau Lorsch
LCM	Liquid Composite Molding Process
LIMS	Liquid Injection Molding Simulation
MAG	Multi-Axial-Gelege
P4	Programmable Powdered Preforming Process
RTM	Resin Transfer Molding Process
SOLTEX	Soluble chain-extendable polymer-filaments in textile pre-forms for in-situ resin toughening using RTM-technique
TFP	Tailored Fiber Placement
VARTM	Vacuum Assisted Resin Transfer Molding

1 Einleitung

Bauteile aus Faserkunststoffverbunden (FKV) haben in letzter Zeit verstärkt das öffentliche Interesse auf sich gezogen. Der Grund für diese Aufmerksamkeit ist die Realisierung von außergewöhnlichen Bauteilen und Produkten, welche mit konventionellen metallischen Werkstoffen aufgrund ihres zu hohen Eigengewichts nicht zu realisieren wären. Ein aus der jüngsten Vergangenheit stammendes Beispiel für solche herausragenden Bauteile ist das von Airbus entwickelte größte Passagierflugzeug der Welt [1], der A380. Bei diesem Flugzeug sind eine Vielzahl der Komponenten wie z.B. die „center wing box“ [2], welche die Verbindungsstelle des Rumpfes mit den Flügeln darstellt, die Türscharniere [3] oder die hintere Druckkalotte [4] ganz oder teilweise in FKV oder zusammen mit anderen Materialien als Sandwich ausgeführt [1]. Insgesamt liegt der Einsatzanteil an Verbundwerkstoffen bei rund 25 % der Gesamtstruktur, wobei rund 60 % Aluminium eingesetzt werden [5]. Der amerikanische Konkurrent von Airbus, the BOEING Company, entwickelt und produziert derzeit ein Flugzeug, die Boeing 787 „Dreamliner“, bei dem nicht nur einzelne Elemente, sondern nahezu 100 % der gesamten Außenhaut und rund 50 % aller anderen strukturellen Elemente aus Faserverbundwerkstoffen besteht, was den Aluminiumanteil auf rund 20 % absenkt [6,7]. Beide Flugzeuge teilen das Konzept, dass das Gewichtseinsparungspotenzial von Faserverbundbauteilen konsequent zugunsten einer erheblich vergrößerten Reichweite und Zuladungskapazität wirtschaftlich nutzbar gemacht werden kann.

Ein weiterer Sektor, der ohne Bauteile aus Verbundwerkstoffen nicht denkbar wäre, ist die Windenergiegewinnung. Paradebeispiele sind bei den immer stärker verbreiteten Windenergieanlagen die bis zu 50m langen Rotorblätter [8,9], welche bis auf wenige Verbindungselemente komplett aus duromeren Faserverbundwerkstoffen hergestellt sind.

All diese Bauteile können nur in Faserverbundbauweise hergestellt werden, da konventionelle Materialien aufgrund ihrer schlechteren spezifischen mechanischen Kennwerte bzw. aufgrund ihres sehr viel höheren Eigengewichts im Vergleich zu FKV entweder viel zu schwer wären oder auch unter der eigenen Last versagen würden. Um diese Bauteile mit FKV zu fertigen, werden die unterschiedlichsten Herstellungsverfahren angewendet. Sowohl in der Luftfahrtindustrie als auch im Wind-

energiesektor verdrängen die Flüssigimprägnierverfahren die klassischen FKV-Verarbeitungsverfahren wie z.B. die Autoklaventechnik im Bereich der Luftfahrt oder das Handlaminierverfahren im der Bereich Windenergie.

1.1 Verfahrensbeschreibung

Die im Englischen als „Liquid Composite Molding (LCM) Processes“ bezeichnete Familie der Flüssigimprägnierverfahren umspannt eine ganze Reihe von sich gegenseitig leicht unterscheidenden Verfahren. Von diesen Prozessen sind die beiden bekanntesten und am weitesten verbreiteten einerseits das vakuumunterstützte Harzinfusionsverfahren (Vacuum Assisted Resin Transfer Molding (VARTM)) und andererseits das Harzinjektionsverfahren (Resin Transfer Molding (RTM)). Während das RTM-Verfahren hauptsächlich für kleinere bis mittelgroße Bauteile mit hoher Komplexität und Oberflächengüte eingesetzt wird, liegt der Haupteinsatzbereich des VARTM in der Herstellung von sehr großen Bauteilen mit geringerer Komplexität und nur auf eine Bauteiloberfläche beschränkten Anforderungen an die Oberflächengüte des Bauteils. Die schematischen Prozessabläufe für beide Verarbeitungsverfahren sind in Bild 1.1 dargestellt.

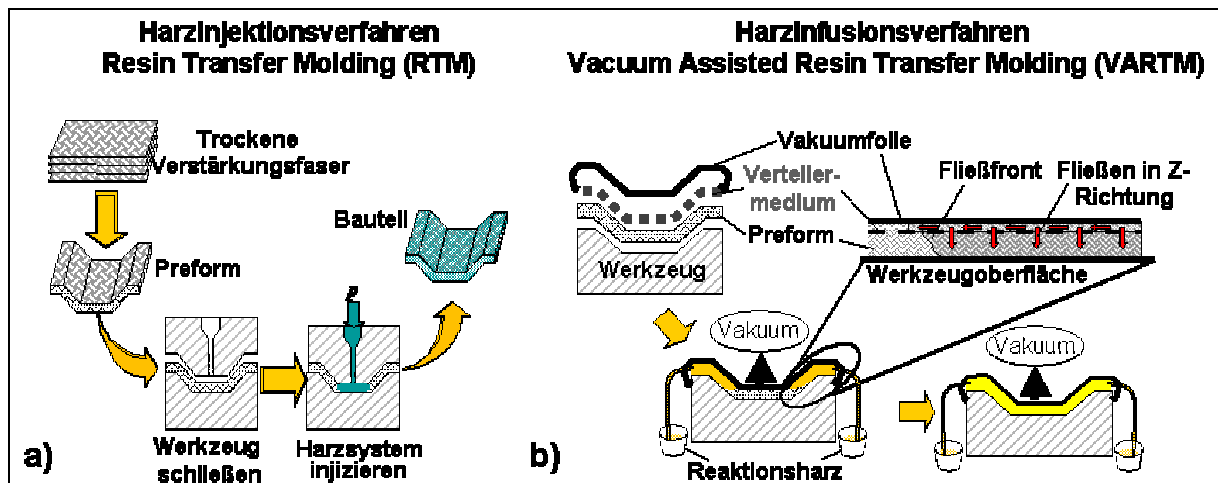


Bild 1.1: Schematische Darstellung des Prozessablaufs. a) Harzinjektionsverfahren (RTM). b) Harzinfusionsverfahren (VARTM)

Klassische Beispiele für die Verwendung des VARTM-Verfahrens sind neben den bereits erwähnten 50 m langen Rotorblättern für Windenergieanlagen hauptsächlich die Herstellung von Booten unterschiedlichster Art und Größe. Ein gelungenes Beispiel für den Einsatz dieses Herstellungsverfahrens stellt die Fregatte Visby dar, welche von der Kockums Werft in Schweden, einem Tochterunternehmen der Thyssen

Krupp Marine Systems, hergestellt wird [10,11]. Hierbei wird der die komplette Außenhülle des Schiffes darstellende Lagenaufbau zwischen einer einseitigen Form und einer Vakuumfolie durch den Atmosphärendruck kompaktiert und mit einem reaktiven Harz/Härtergemisch in einem „Schuss“ getränkt. Der Sandwichaufbau der „Tarnkappenfregatte“ besteht hauptsächlich aus einem Kohlenstofffaserlaminat in Verbund mit einem PVC Kern. Diese Konfiguration führt zu einer Verringerung des Gewichts der Schiffshülle um rund 50 %. Diese Gewichtsreduzierung steigert einerseits die bisherige Endgeschwindigkeit und andererseits auch die Sicherheit des Schiffes. Dieser Sicherheitsaspekt ergibt sich aus dem Fehlen der magnetischen Metallhülle und der damit verbundenen Reduzierung der Bedrohung durch magnetische Mienen.

Im Vergleich zum VARTM-Verfahren, wo eine Werkzeughälfte durch eine Vakuumfolie ersetzt wird, arbeitet das Harzinjektionsverfahren (RTM) meist mit zwei oder mehrteiligen Werkzeugen. Die Wahl eines geeigneten Werkstoffs für ein RTM-Werkzeug hängt von mehreren Faktoren ab. Zunächst muss die geplante Stückzahl des herzustellenden Bauteils festgelegt werden. Hier lassen sich grundsätzlich die folgenden vier Kategorien unterscheiden, wobei die angegebenen Stückzahlen sehr stark von der Größe des Bauteils abhängig sind:

- Prototypenbau (1 – 10 Bauteile)
- Kleinserie (10 - 50 Bauteile)
- Mittlere Serie (50 – 500 Bauteile)
- Großserie (> 500 Bauteile)

Weiterhin ist der Faservolumengehalt von Interesse, da dieser einerseits die mechanische Belastungsfähigkeit des Bauteils mitbestimmt und andererseits die zu erwartenden Prozesskräfte entscheidend beeinflusst.

Da sich die Bandbreite der als Formwerkstoffe einsetzbaren Materialien von Kunststoff über Aluminium bis hin zu speziellen Stahllegierungen spannt, steigern sich die Material- und Bearbeitungskosten entsprechend der vorgenannten Materialreihenfolge. Prinzipiell gilt, dass je höher der angestrebte Faservolumengehalt sein soll und je mehr Bauteile mit der Form gefertigt werden sollen, desto hochwertiger ist der Formwerkstoff und desto höher sind die Anschaffungs- und Bearbeitungskosten. Die Kosten einer ggf. noch zusätzlich erforderlichen Oberflächenbearbeitung sind je nach

Güte der angestrebten Oberfläche ein weiterer signifikanter Kostenfaktor. Aufgrund dieser hohen Werkzeugkosten ist es folglich nötig, die Auslegung des Werkzeugs im Vorfeld so präzise wie möglich zu gestalten, um das zum Teil noch übliche „trial and error“-Verfahren mit den inhärenten hohen Iterationskosten zu umgehen. Zur Vermeidung dieses ineffizienten Ansatzes und zur effektiven Gestaltung der Werkzeugauslegung können verschiedene Simulationsprogramme die Aufgabe des Konstrukteurs erleichtern. Simulationsprogramme speziell für den RTM-Prozess sind einerseits RTMFlott [12], LIMS [13] oder auch RTM-Worx [14]. Diese Simulationsprogramme ermöglichen dem Konstrukteur in kurzer Zeit eine Vielzahl von möglichen Füllszenarien durchzuführen um Injektionsstrategien, Injektionsprozessparameter und die Positionierung von Anguss- und Entlüftungsöffnungen im Vorfeld bestimmen zu können. Bild 1.2 zeigt exemplarisch das Ergebnis eines möglichen Anguß- und Entlüftungsszenarios. Ziel dieser Simulation ist es, die Füllzeit zu minimieren, wobei die beiden nach innen gerichteten Profilkanten als höchste Flächen des Bauteils als Linienentlüftungen ausgeführt sind. Da die Volumina der beiden asymmetrischen U-Profile, welche über den Quersteg miteinander verbunden sind, nicht identisch sind, wird die Injektion entsprechend Bild 1.2 a) an der unteren äußeren Profilkante eingeleitet, bis sich die Volumenbalance in Bild 1.2 d) einstellt. Dies hat zur Folge, dass die zweite Injektionslinie aktiviert wird. Auf diese Weise wird das Bauteil erfolgreich gefüllt.

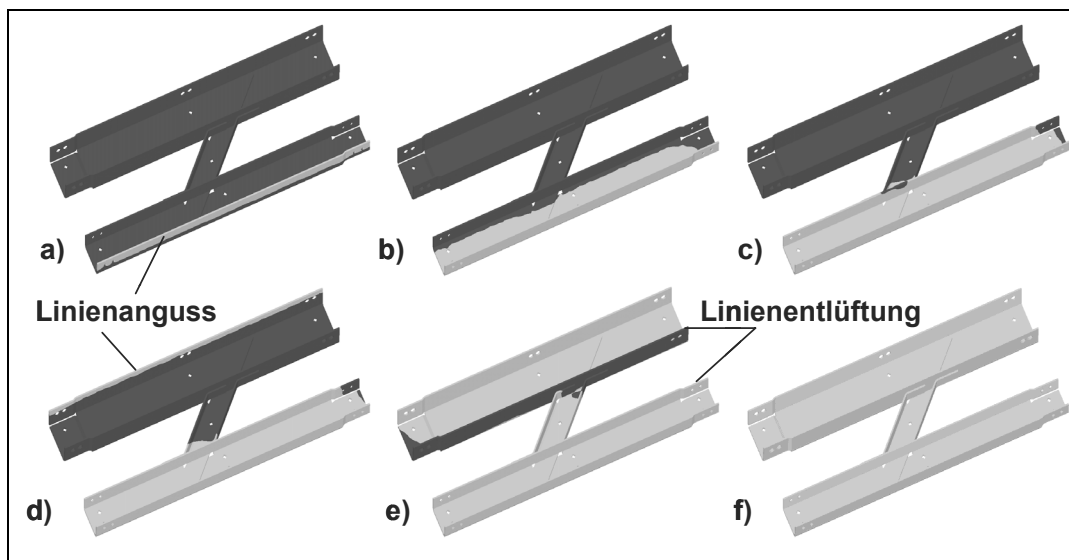


Bild 1.2: Beispiel einer Füllsimulation eines Faserverbundbauteils mit je zwei Linienangüssen und Linienentlüftungen [15]

Durch den Einsatz von Füllsimulationsprogrammen können Zonen mit erhöhter Fehlstellenwahrscheinlichkeit identifiziert und entweder über konstruktive oder prozesstechnische Mittel präventiv vermieden werden. Um jedoch diese Simulationsprogramme nutzen zu können, bedarf es verschiedener grundlegender Eingabeparameter, die in Tabelle 1.1 zum einen dem eigentlichen Injektionsprozess und zum anderen dem zu verwendenden Lagenaufbau zugeordnet sind.

Tabelle 1.1: Erforderliche Eingabeparameter für Simulationsprogramme

Injektionsbezogene Eingabeparameter	Lagenaufbaubezogene Eingabeparameter
Druck- oder Volumenstrominjektion	Kompaktierungsverhalten des Lagenaufbaus
Viskosität des Harzes	Permeabilität des Lagenaufbaus
Reaktivität des Harzansatzes	Faservolumenanteil
Bauteil- bzw. Kavitätsgeometriemodell	
Leistungsfähigkeit der vorhandenen Werkzeugschließeinheit	

Im Normalfall sind dem Entwickler nur Bruchteile dieser Parameter zugänglich und es bedarf der experimentellen Bestimmung der erforderlichen Kennwerte. Aus dieser Tatsache ergibt sich die Aufgabenstellung dieser Arbeit.

1.2 Aufgabenstellung der Arbeit

Während die in Tabelle 1.1 aufgeführten injektionsbezogenen Eingabeparameter zusammen mit dem Modell des Bauteils und den Anlagenspezifikationen dem Werkzeugauslegungsprozess sehr früh zur Verfügung stehen, ist zur Festlegung der lagenaufbaubezogenen Eingabeparameter meist eine vorgeschaltete experimentelle Kennwertbestimmung erforderlich. Dies ist insbesondere der Fall, wenn es sich nicht nur um konventionelle Lagenaufbauten aus lose aufeinander geschichteten Einzelschichten handelt, sondern um Halbzeugvorformlinge, die auch als Preforms bezeichnet werden. Solche Preforms unterscheiden sich in ihren Eigenschaften zum Teil erheblich von dem unbehandelten Basismaterial, aus dem sie hergestellt wurden. Diese Veränderung wird einerseits durch das zusätzliche Einbringen von Nähten [16,17] oder Binderpulver [18,19] zur Fixierung und der Verbesserung der Handhabbarkeit der Preform ausgelöst. Andererseits zieht jede Veränderung der Urform des einzelnen Halbzeugs, z.B. durch einen Drapier- bzw. Schervorgang, bei dem die Form-

änderung durch eine lokale Veränderung der Faserwinkel entsteht, eine Änderung der Permeabilität und damit des Imprägnierverhaltens des Halbzeugs nach sich.

Die Hauptaufgabenstellung dieser Arbeit besteht darin, die experimentelle Bestimmung der Kompaktierungs- und Permeabilitätskennwerte von ebenen Faserhalbzeugen in einem robusten Prozess zusammenzuführen. In diesem Zusammenhang steht die Forderung, die Kennwertbestimmung sowohl in ihrer Effizienz zu steigern als auch von der Hauptfehlerquelle, der bedienerabhängigen Interaktion, durch einen sehr hohen Grad an Automation zu befreien. Dementsprechend muss die Einflussnahme des Benutzers insbesondere bei der Auswertung des jeweiligen Versuchs auf ein Minimum reduziert werden. Abschließend ist die neu entwickelte Prozesstechnik durch experimentelle Validierung mit etablierten Methoden abzugleichen und zu evaluieren.

2 Preformherstellung zur Verwendung in Flüssigimprägnierprozessen

Entsprechend der geplanten Produktionsstückzahlen ist es sinnvoll, die aus dem klassischen Handlaminieren bekannte Vorgehensweise des Einzellagenzuschnitts und deren sukzessive Verarbeitung zu verlassen und für eine Produktion teilweise oder komplett vorgeformte Faserhalbzeuge, so genannte Preforms, in Verbindung mit einem entsprechenden Flüssigimprägnierprozess einzusetzen. Je nach Komplexität und Anspruch an die Faserausrichtung kann ein den jeweiligen Anforderungen gerecht werdendes Verfahren unter einer Vielzahl von Preformherstellungsprozessen ausgewählt werden [20]. Ein Klassifizierungsansatz der gebräuchlichsten Preformherstellungsverfahren ist, basierend auf den jeweils zur Preformherstellung zu Grunde gelegten Faserhalbzeugen, in Bild 2.1 dargestellt.

Wenn es sich beispielsweise um die Herstellung von Bauteilen für eine mittlere Serienanwendung oder eine Großserienanwendung handelt und das mechanische Anforderungsprofil des Bauteils mit maximal 35 % Faservolumengehalt in Form einer quasi isotropen Wirrfasermattenverstärkung erreicht werden kann, so sind sowohl das Faserspritzen [21] als auch das P4-Verfahren [22] zur Herstellung der Preforms geeignet. Bei beiden Verfahren wird einem handhabbaren Schneidwerk ein aus vielen einzelnen Verstärkungsfasern bestehender Strang des Verstärkungsmaterials, auch Roving genannt, zugeführt. Das Schneidwerk zerteilt diesen Roving und führt ihn einem Luftstrahl zu, der die Austragsbewegung des Schnittguts übernimmt. Je nach Verfahren bzw. Prozessart kann dieser Luftstrahl mit mehr (klassisches Faserspritzen) oder weniger (P4-Verfahren) Bindermaterial versehen sein. Als Bindermaterialien können reaktive duromere Harzgemische oder Thermoplaste eingesetzt werden, die sowohl flüssig als auch pulverförmig vorliegen können. Während das klassische Faserspritzen zur direkten Bauteilherstellung (z.B. Schwimmbadwannen, Wanneinsätze für Pick-up-Trucks, etc.) eingesetzt wird, kann es allerdings auch mit einem Fließpressverfahren kombiniert werden. Dabei nimmt das Faserspritzen dann die Rolle des Preformherstellungsprozesses ein.

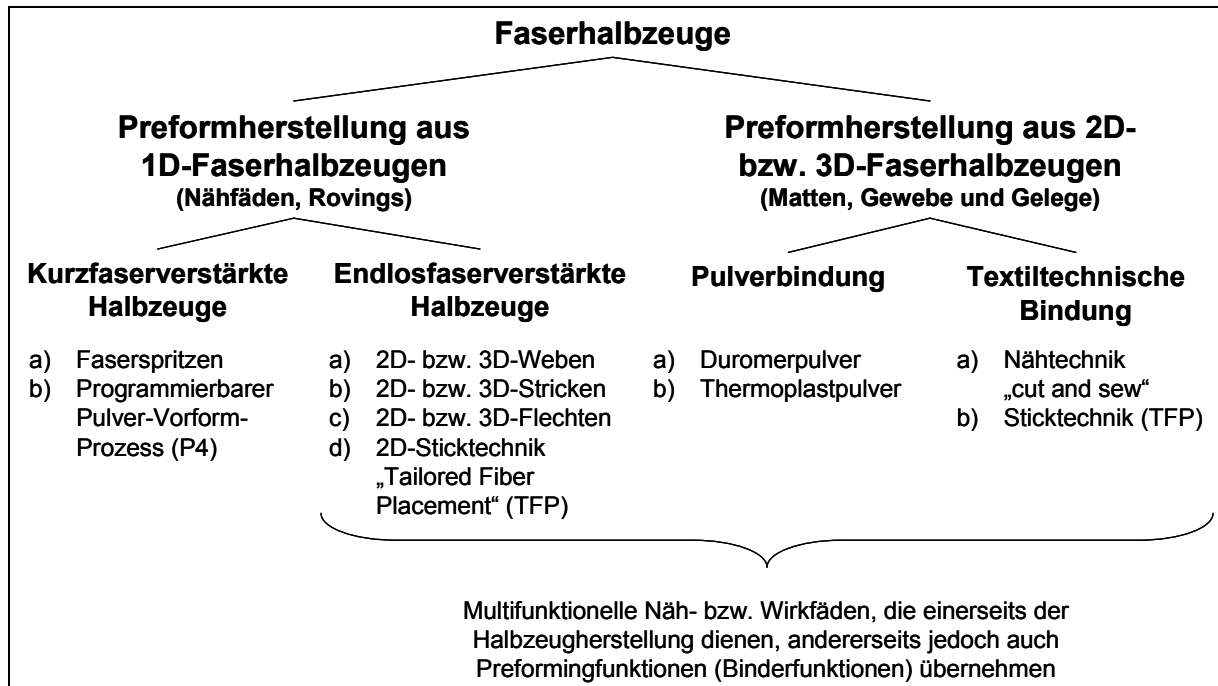


Bild 2.1: Klassifizierung der Preformherstellungsverfahren entsprechend der Ausgangsmaterialien

Das P4-Verfahren hingegen arbeitet nicht wie das Faserspritzen direkt in der Werkzeugkavität, sondern auf der Kavität nachempfundenen Sieben. Diese Siebwerkzeuge lassen es zu, dass Luft von der Kavität in Richtung des Inneren des Werkzeugs durch das Sieb gesaugt werden kann. Bei der Durchführung des P4-Verfahrens wird zunächst über das handhabbare Schneidwerk eine dünne Oberflächenvlieschicht aus Einzelfasern auf das Sieb aufgesprüht. Die Fixierung dieser Fasern auf der Oberfläche geschieht durch den beim Absaugen der Luft entstehenden Differenzdruck. Nach diesem ersten Arbeitsschritt besteht die Möglichkeit entweder Schnitffasern oder kontinuierliche Faserstränge in Verbindung mit einem pulverförmigen thermoplastischen oder duomeren Binder aufzubringen. Bei Verwendung von Schnittglas besteht nochmals die Wahl zwischen regellos oder orientiert abgelegten Faserstücken gewünschter Länge. Die Orientierung wird durch ein zusätzliches Element an der Austragsdüse erreicht, wodurch rund 90% der Rovingstücke mit einer Toleranz von $\pm 5\%$ in der gewünschten Orientierung abgelegt werden können [22]. Ist dies erforderlich, kann der Lagenaufbau mit einer weiteren Lage Oberflächenvlies abgeschlossen werden. Unter weiterem Absaugen wird nun das ebenfalls als Sieb ausgeführte Oberwerkzeug aufgedrückt. Durch Zufuhr von Heißluft wird der thermoplastische Binder aufgeschmolzen, wohingegen der duomere Binder

auszuhärten beginnt. Erst nach einem sich an das Aufheizen anschließenden Kühlvorgang ist die Preform handhabbar, da im Fall von Thermoplasten der geschmolzene, zähflüssige Binder erst wieder in einen Feststoff überführt werden muss. Nach dem Öffnen der Form und der Entnahme der Preform ist diese zur Weiterverarbeitung in einem Flüssigimprägnierverfahren wie z.B. dem RTM-Verfahren bereit. Die für diesen Prozess in Abhängigkeit von der Größe und Komplexität des Bauteils angegebenen Taktzeiten von rund 2 Minuten lassen im Dreischichtbetrieb ein Volumen von rund 720 Preforms pro Tag zu.

Wird zum Bestehen der mechanischen Anforderungen an das Bauteil ein höherer Faservolumengehalt als 35 % benötigt, so muss auf eine andere Preformtechnik zurückgegriffen werden. Beispielsweise können relativ einfache Geometrien wie T-förmige Stranglelemente direkt durch 3D-Flecht-, Strick- oder Webverfahren aus endlosfaserverstärkten Halbzeugen hergestellt werden. Nimmt die Komplexität der Bauteilgeometrie zu, so kann die Preform nur durch den Zuschnitt und das Zusammenfügen von einzelnen einfacheren Teilgeometrien zusammengestellt werden. Die aus 2D-Halbzeugen ausgeschnittenen Preformteilgeometrien werden entweder in einem separaten Montageschritt zu einer Preform zusammengefügt oder die einzelnen Teilpreforms, auch Tailored Reinforcements genannt, werden in die eigentliche Kavität eingelegt und so unmittelbar zusammengefügt.

Wird ein separater Montageschritt erwogen, so steht einerseits die Bindertechnologie und andererseits die textile Fügetechnik zur Verfügung, um die einzelnen Elemente in eine handhabbare Preform zu überführen.

Bei der Bindertechnologie kommen flächige Halbzeuge zum Einsatz, die während ihres Herstellungsprozesses mit einem thermoplastischen oder duromeren Bindermaterial versehen werden [23]. Bei dieser Technologie werden die einzelnen Halbzeugzuschnitte in einem Montagewerkzeug zusammengebaut und auf ein definiertes Maß kompaktiert. Diese Kompaktierung geschieht entweder in einem zweiteiligen Werkzeug über eine Presse oder in einem einteiligen Werkzeug unter Verwendung einer Vakuumfolie. Ein Temperierzyklus, der sich nach dem verwendeten Binderbasiematerial richtet, fügt die einzelnen Zuschnitte durch lokale, punktuelle Verklebung der benachbarten Zuschnittoberflächen zu einer Einheit zusammen. Durch das Aufbringen der Kompaktierungskraft kann die Dicke des Lagenaufbaus bzw. der Preform

der späteren Bauteildicke angenähert werden, woraus eine erhebliche Erleichterung des Einlegens der Preform in die Kavität des Werkzeugs resultiert.

Analog zu der Funktion der Binder bei der Preformherstellung können auch textile Fügeverfahren zur Durchführung des Zusammenbaus herangezogen werden. Hierbei halten in letzterer Zeit insbesondere verschiedene Nähverfahren Einzug in die Preformmontage [24]. Neben der klassischen Nähtechnik, die mit einem Nadel-system im Oberteil und einem Greifersystem im Unterteil der Nähmaschine arbeitet, haben sich auch das Einseitennähverfahren und das Tufting etabliert. Während bei der Einseitennähtechnik zwei Lösungsansätze konkurrieren, ist dies beim Tufting nicht der Fall. Die Konkurrenten in der Einseitennähtechnik arbeiten entweder mit einer gebogenen Nadel [25] oder aber mit einer Zweinadeltechnik [26,25]. Bei Verwendung einer gebogenen Nadel tritt die Nadelspitze nach dem Durchstechen des Nähguts wieder auf der Eintrittsseite aus, wo ein Greifersystem den Faden dann übernehmen kann. Im Zweinadelsystem wird die Funktion des Greifers durch die Verwendung der zweiten Nadel ersetzt. Folglich durchsticht zunächst die erste Nadel das Nähgut, worauf die zweite Nadel das Nähgut zeitlich kurz versetzt durchdringt um den Faden von der ersten Nadel zu übernehmen. Beide Nähtechniken führen als Vorteil an, dass eine robotergestützte, nähtechnische Montage im eigentlichen Produktionswerkzeug durchgeführt werden kann.

Das Tufting [25,27] stellt ebenfalls eine Variante des Einseitennähverfahrens dar. Da jedoch das Äquivalent des Greifersystems fehlt, kann durch die Vernähung im Vergleich zu anderen nähtechnischen Prozessen keine hohe Fadenspannung aufgebaut werden. Beim Tufting befindet sich das Nähgut auf einer weichen Unterlage, sodass die Nadel das Nähgut komplett durchstechen kann. Nach dem Durchstechen des Halbzeugs dringt die Nadel so weit in die Unterlage ein, dass die Reibungskräfte zwischen dem Faden und der weichen Unterlage ausreichen um zu verhindern, dass der Faden bei der Aufwärtsbewegung der Nadel wieder aus dem Nähgut herausgezogen wird.

Eine Sonderstellung nimmt eine neue Generation von flächigen Halbzeugen, Geweben und Multiaxialgelegen (MAG), ein. Diese Halbzeuge können sowohl bei ihrer Herstellung als auch durch den Einsatz der nähtechnischen Konfektion mit multifunktionalen Filamenten versehen werden. Ersteres kann im Fall eines Gewebes

durch den Webprozess selbst geschehen, wohingegen bei der Herstellung von MAG entweder anstelle eines konventionellen Wirkfadens ein multifunktionaler Wirkfaden verwendet werden kann oder, analog zum Weben, ein Mischroving zum Einsatz kommen kann. Die Multifunktionalität dieses Filamentmaterials besteht in der Erfüllung folgender Funktionen:

- Sicherung der Halbzeugintegrität
- Ersatz von zusätzlichem Bindermaterial
- Auflösen des Fadens im Harzsystem nach abgeschlossener Injektion
- Modifikation der Matrixeigenschaften als Bestandteil des Harzsystems

Als Beispiel, dass bereits Teile der Anforderungen an ein solches multifunktionales Filament umgesetzt worden sind, dient das auf dem Markt existierende System „Pri-form“ von Cytec Engineered Materials [28]. Weitere Entwicklungen in dieser Richtung sind aus dem noch andauernden EU-Projekt „Soluble chain-extendable-polymer-filaments in textile preforms for in-situ resin toughening using RTM-technique“, Förderkennzeichen G5RD-CT-2000-00335 kurz SOLTEX [29] zu erwarten. Neben der Verringerung der Gesamtherstellungskosten, insbesondere bei MAG, da hier lediglich ein Austausch der bereits verwendeten Wirkfäden erforderlich ist, wird eine solche Entwicklung auch zur verbesserten Bauteilqualität und zu gesteigerten mechanischen Kennwerten führen. In der Literatur finden sich Untersuchungen, wonach z.B. die mechanischen Kennwerte in der Ebene durch eine Vernähung mit einem technischen Nähgarn, wie z.B. einem Kohlenstofffaser-, Aramidfaser- oder Glasfasernähgarn, zum Teil abfallen [30], dafür die interlaminaeren Scherfestigkeiten jedoch erhöht werden können [31,32].

Der Nachteil der Einseitennähetechnik im Vergleich zur konventionellen Nähetechnik ist hauptsächlich die erzielbare Nähgeschwindigkeit. Sind bei der Einseitentechnik 500 Stich pro Minute als sehr hoch anzusehen, stellt dies bei der konventionellen Nähetechnik eher den unteren Frequenzbereich dar, da hier unter Umständen bis zu 3000 Stich pro Minute realisiert werden können. Da man seitens der Institut für Verbundwerkstoffe GmbH (IVW) aufgrund von vielversprechenden Vorabversuchsreihen die Potenziale [33] und die Großserientauglichkeit [34] dieser Preformtechnologie erkannt hat, konnte innerhalb eines vom BMBF geförderten Projekts [24] die in Bild 2.2 dargestellte komplette Prozesskette zur nähetechnikgestützten Herstellung von Pre-

forms in industriellem Maßstab aufgebaut werden. Diese Prozesskette ist im Demonstrations- und Anwendungszentrum des Instituts zusammen mit den sich an den Preformprozess anschließenden Flüssigimprägnierverfahren aufgebaut.

Die nähtechnische Konfektionierung von Faserhalbzeugen wird exemplarisch anhand der Herstellung von Faserhalbzeugproben, die im weiteren Verlauf der Arbeit Gegenstand von Kompaktierungs- und Permeabilitätsversuchen sind, in Kapitel 3.2 dargestellt.

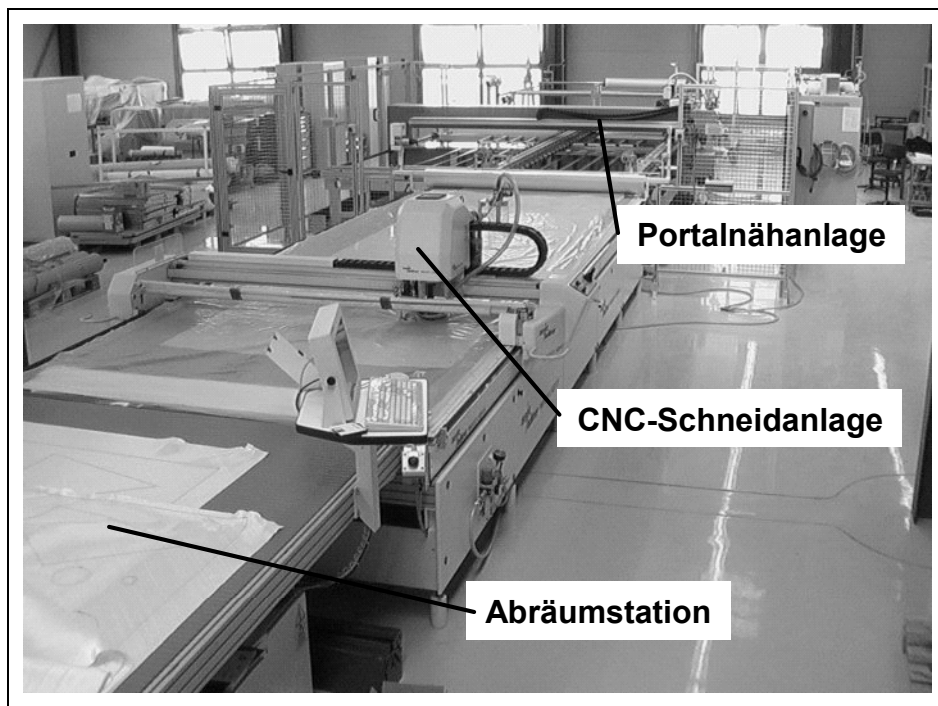


Bild 2.2: Prozesskette zur automatisierten, großserientechnischen Herstellung von Preforms mittels „cut and sew“-Technologie

3 Kompaktierungsverhalten von Faserhalbzeugen

Werden Stoffe einem Spannungszustand ausgesetzt, so reagieren sie entsprechend ihrer Beschaffenheit auf diese Belastung. Die klassische Werkstoffkunde unterscheidet von elastischem bis plastischem Materialverhalten. Je nach untersuchter Materialart und Beanspruchungshöhe kommen in vielen Werkstoffen unterschiedlich starke Ausprägungen dieser beiden Verhaltensarten vor. In den meisten Fällen von Bauteilauslegungen mit Faserverbundkunststoffen wird von einem linear elastischen Materialverhalten ausgegangen. Diese Vorgehensweise ist durch die bei der Bauteilauslegung maximal zulässigen Dehnungen gerechtfertigt.

Das Verhalten von Faserhalbzeugen unter Druckbelastung wurde von verschiedenen Forschern beobachtet. Eine für die vorliegende Arbeit relevante Auswahl der wichtigsten Beanspruchungsverhalten für Faserhalbzeuge ist in Bild 3.1 dargestellt.

Führt man quasi statische Druckversuche mit trockenen Faserhalbzeugen durch, d.h. man platziert Faserhalbzeuglagen zwischen planparallelen Platten und reduziert den lichten Plattenabstand mit einer konstanten Geschwindigkeit, so zeigt sich ein ausgeprägter nichtlinearer Anstieg der Kompaktierungskraft. Vernachlässigt man die durch die Druckbelastung ausgelöste makroskopische Ausdehnung der Faserhalbzeuge in der Ebene, so ist der Anstieg der Kompaktierungskraft proportional zur in Bild 3.1 aufgetragenen Druckspannung. Generell geht man im Fall von Faserhalbzeugen von einem nichtlinear-elastischen Materialverhalten aus. Dieses Verhalten ist in dieser Weise bis zum Erreichen der maximalen Druckspannung unbestritten in der Literatur dokumentiert [35,36,37,38,39].

Erhöht man die Kompaktierungsgeschwindigkeit bei ansonsten identischen Versuchsparametern, so steigt das Druckspannungsmaximum, wie in Bild 3.1 a) zu sehen, ebenfalls an. Dieses Verhalten wurde von der Mehrheit der gesichteten Literatur unterstützt [40,41,42], jedoch gibt es hierzu auch eine kontroverse Beobachtung von [36]. Darin bestätigt Saunders zwar das geschwindigkeitsabhängige Verhalten von getränkten Faserhalbzeugen, stellte jedoch bei seinen Versuchen mit trockenen Halbzeugen keine Geschwindigkeitsabhängigkeit fest.

Ein für Flüssigimprägnierverfahren interessantes Verhalten von trockenen Faserhalbzeugen ist in Bild 3.1 b) zu sehen. Hierbei ist der Spannungsverlauf als Funktion

der Zeit dargestellt. Da bei Erreichen der maximalen Spannung der lichte Abstand der beiden Prüfplatten beibehalten wird, sollte bei einem ideal elastischen Material keine Änderung des Spannungsniveaus mehr auftreten. Reale Faserhalbzeuge zeigen jedoch unter einer solchen Beanspruchung einen erheblichen Abfall des Spannungsniveaus über der Zeit. Dieses Verhalten ähnelt aufgrund der Charakteristik des Spannungsverlaufs einem makroskopischen Kriechverhalten. Jedoch handelt es sich bei diesem Verhalten um eine zeitabhängige Umorientierung der Fasern des Halbzeugs. Diese Umorientierung wird im Einklang mit der Literatur [43,44,45] auf den Abbau von gespeicherten Reibungskräften an den Kontaktstellen zwischen den einzelnen Fasern eines Faserhalbzeugs zurückgeführt. Einhergehend damit ist die Umorientierung der Fasern innerhalb der Faserbündel. In gleicher Art und Weise wird auch der durch kontinuierliche Belastungs- und Entlastungszyklen sichtbare quasi plastische Anteil der Kompaktierung erklärt. Dieser Effekt wird fälschlicherweise als eine Hysterese (siehe Bild 3.1 c)) im Spannungsverlauf beschrieben, was durch das Vorhandensein eines plastischen Anteils der Deformation nicht haltbar ist.

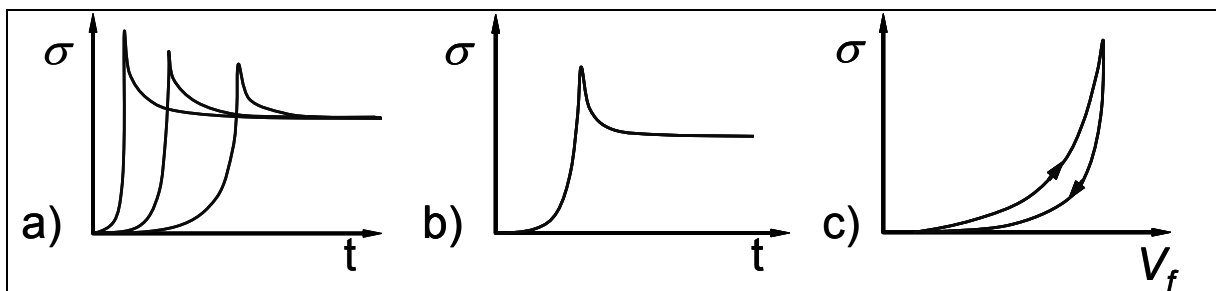


Bild 3.1: Verhalten von Faserhalbzeugen unter Druckbelastung.
 a) Von der Beanspruchungsgeschwindigkeit abhängiges Materialverhalten. b) Spannungsreduzierende Faserreorientierung („makroskopisches Kriechverhalten“). c) Belastungs- und Entlastungszyklus mit plastischen Anteilen

3.1 Auswirkungen des Kompaktierungsverhaltens auf den Verarbeitungsprozess

Betrachtet man das im vorherigen Kapitel beschriebene Materialverhalten unter dem Aspekt der Verarbeitung von Faserhalbzeugen in Flüssigimprägnierprozessen, so ist primär die Frage nach der entsprechenden mechanischen Werkzeugauslegung relevant. In einem Formwerkzeug wird durch den Schließvorgang ein Lagenpaket aus Faserhalbzeugen einer kontinuierlich zunehmenden Druckbelastung ausgesetzt. Gleichzeitig baut das in der Kavität befindliche Halbzeug die der Schließkraft ent-

gegengesetzte Reaktionskraft, die Kompaktierungskraft, auf. Diese Kompaktierungskräfte müssen in erster Linie von dem Formwerkzeug aufgenommen werden, ohne dass sich dabei eine Überschreitung der vorherbestimmten Maßhaltigkeit des Bauteils ergibt. Da Werkzeuge im Normalfall auf einer Werkzeugschließeinrichtung aufgespannt werden, meist sind dies hydraulische Pressen, ist die Auswahl der maximal realisierbaren Bauteilgröße beim RTM-Verfahren nicht nur von dem maximal aufzuwendenden Injektionsdruck abhängig. In diesem Fall ist es erforderlich neben den Injektionsdrücken auch die Kompaktierungskräfte für das zu verwendende Faserhalbzeug bei der Werkzeugauslegung zu berücksichtigen [46].

Weiterhin ist zu beachten, dass durch einen Montageschritt, der die einzelnen Halbzeugzuschnitte unter Zuhilfenahme der Bindertechnik oder der nähtechnischen Konfektion zu einer Preform verbindet, ebenfalls Auswirkungen auf das Materialverhalten entstehen können. Um zu ermitteln, inwieweit die nähtechnische Konfektion der Halbzeuge zu einer Preform Auswirkungen einerseits auf den Kompaktierungsprozess und andererseits auf den Injektionsprozess hat, werden im Nachfolgenden neben unmodifizierten Halbzeugen auch nähtechnisch behandelte Materialproben untersucht.

3.1.1 Kompaktierungsversuche an unmodifizierten Faserhalbzeugen

Um das Verhalten von verschiedenen kontinuierlich faserverstärkten Halbzeugen beurteilen zu können, werden Kompaktierungsversuche mit diesen Materialien durchgeführt. Die hierzu getroffene Auswahl an Faserhalbzeugen ist in Tabelle 3.1 dargestellt und enthält ein Kohlenstofffasergewebe, ein Glasfasergewebe und drei Glasfasergelege. Bei den untersuchten Faserhalbzeugen wurden nur Standardprodukte des jeweiligen Herstellers verwendet, um so eine möglichst praxisrelevante Aussage über das Kompaktierungsverhalten treffen zu können. Die ausgesuchten Halbzeuge wurden bei verarbeitungstypischen Zielfaservolumengehalten, welche in der Regel zwischen 45 % und 65 % liegen, untersucht.

Tabelle 3.1: Für die Durchführung von Kompaktierungsversuchen ausgesuchte unmodifizierten Faserhalbzeuge

Materialart Buchstabe	Glasgewebe A	Kohlenstoff- fasergewebe B	Biaxiales Glasgelege C	Biaxiales Glasgelege D	Triaxiales Glasge- lege E
Hersteller	P-D Interglas Technologies	SGL- Technology	SAERTEX	Textilgruppe Hof	Textilgruppe Hof
Bezeichnung	Style 92195	KDK 8045	V91032- 620-1270-0	E-B11-1200- 05	E-T51-1200-05T
Faserorien- tierung	0°/+90°	0°/+90°	+45°/-45°	+45°/-45°	+45°/+90°/-45°
Legung / Bin- dung	Leinwand	Köper 2/2	Trikot- Franse	Franse	Trikot
verwendete Rovings	EC 17-2400	400 tex	k.A.	Skloplast Typ 076, 600 tex	Skloplast Typ 076, 600 tex
Halbzeugdicke	1,30 mm	0,6 mm	k.A.	1,175 mm	k.A.
Flächen- gewicht (Einzellage)	830 g/m ² (s.o.)	404 g/m ² (s.o.)	615 g/m ² (300 g/m ²)	1.211 g/m ² (600 g/m ²)	1.231 g/m ² (300/600/300 g/m ²)
Faserdichte	2.540 kg/m ³	1.780 kg/m ³	2.540 kg/m ³	2.540 kg/m ³	2.540 kg/m ³

Um ein besseres Verständnis für die Struktur bzw. die Architektur der in Tabelle 3.1 beschriebenen Faserhalbzeuge zu ermöglichen, stellt Bild 3.2 Ausschnitte dieser Halbzeuge dar.

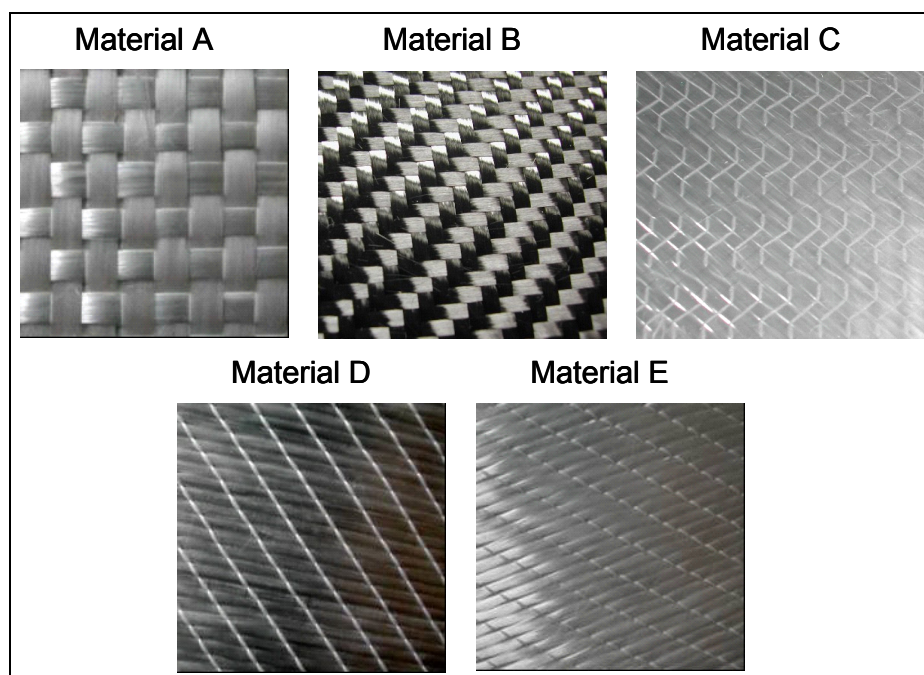


Bild 3.2: Verwendete unmodifizierte Faserhalbzeuge entsprechend Tabelle 3.1

3.1.1.1 Versuchsaufbauten zur Bestimmung der Kompaktierungskraft

Um die Aussagen zum Materialverhalten während des Kompaktierungsvorgangs in der Literatur bewerten zu können, kommen bei den durchgeführten Kompaktierungsversuchen zwei verschiedene Versuchsaufbauten zum Einsatz. Dies ist zum einen ein Aufbau bestehend aus zwei massiven planparallelen Stahlplatten (Bild 3.3), zum anderen eine massive zweiteilige Topf-Form aus Stahl (Bild 3.4). Diese Aufbauten werden in Instron Universalprüfmaschinen eingebaut, um die nachfolgenden Kraft-Weg-Diagramme bzw. Kraft-Zeit-Diagramme aufnehmen zu können. Die unterschiedlichen Aufbauten sind notwendig, um die Halbzeuge sowohl in trockenem Zustand (parallele Platten) als auch im benetzten bzw. imprägnierten Zustand (Topf-Form mit 270 mm Innendurchmesser) untersuchen zu können.

Der in Bild 3.3 zu sehende Aufbau besteht aus zwei 40 mm starken Stahlplatten. Diese Vorrichtung setzt sich aus Kraftmessdose, Adapterelement, externen Wegaufnehmern und Oberplatte zusammen und wird mit dem oberen Rahmenelement der Instron verschraubt.

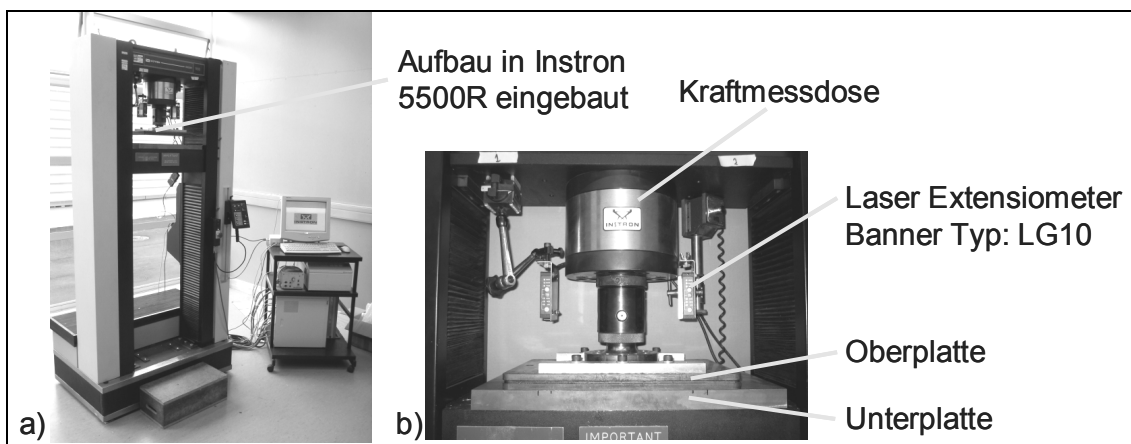


Bild 3.3: a) Plattenbau eingebaut in Instron 5500R. b) Kompressionsform bestehend aus zwei planparallelen Stahlplatten, Wegaufnehmern und einer 150 kN Kraftmessdose.

Die Unterplatte ist an der beweglichen Quertraverse der Universalprüfmaschine angeschraubt. Die für die Untersuchungen mit diesem Aufbau ausgewählten Faserhalbzeuge sind entsprechend Tabelle 3.1 das Rovinggewebe A, das biaxiale Gelege D und das triaxiale Gelege E. Alle Proben haben die Abmaße 180 mm x 220 mm. Da die Kompaktierungskraft für höhere Faservolumenanteile eine näherungsweise exponentielle Abhängigkeit vom Faservolumenanteil bzw. von der Kavitätshöhe be-

sitzt, wird sehr stark auf eine genaue Einhaltung der vordefinierten Kavitätshöhe geachtet. Hierzu sind an beiden Aufbauten externe Wegaufnehmer angebracht. Im Falle des in Bild 3.3 dargestellten Plattenaufbaus sind zwei Laserextensiometer vom Typ Banner LG10 mit einer maximalen Auflösung von 0,01 mm zum Einsatz gekommen. Diese Extensiometer haben einerseits die Funktion eine Durchbiegung bzw. Schiefstellung der Platte zu identifizieren und ggf. zu quantifizieren. Andererseits besteht durch die Verwendung der Extensiometer die Möglichkeit relative Abweichungen der Kavitätshöhe, ausgelöst durch Elastizitäten der Kraftmesszelle und des Plattenaufbaus selbst, zu kompensieren. Da die Proben einerseits durch die Verwendung eines Stanzeisens immer gleich groß sind und andererseits immer exakt mittig unter den Stahlplatten ausgerichtet wurden, zeigen sich bei den Messungen, die mit der in Bild 3.3 dargestellten Versuchsanordnung durchgeführt wurden, lediglich Kavitätshöhenabweichungen von rund 0,13 mm bei einer maximalen Last von 58 kN. Diese maximal festgestellte Kavitätshöhenabweichung bezieht sich auf das triaxiale Gelege E, welches bei einem Faservolumengehalt von 65 % eine Probendicke von 3 mm einnimmt. Alle anderen untersuchten Materialien wiesen Abweichungen kleiner als 5 % auf. Der in Bild 3.4 dargestellte Aufbau ist mit zwei Heidenhain MT60K Durchlichtextensiometern mit einer maximalen Auflösung von 0,002 mm ausgestattet. Die Extensiometer haben, wie auch die Laserextensiometer, einerseits die Funktion eine gegebenenfalls auftretende Elastizität des gesamten Aufbaus festzustellen und zu quantifizieren.

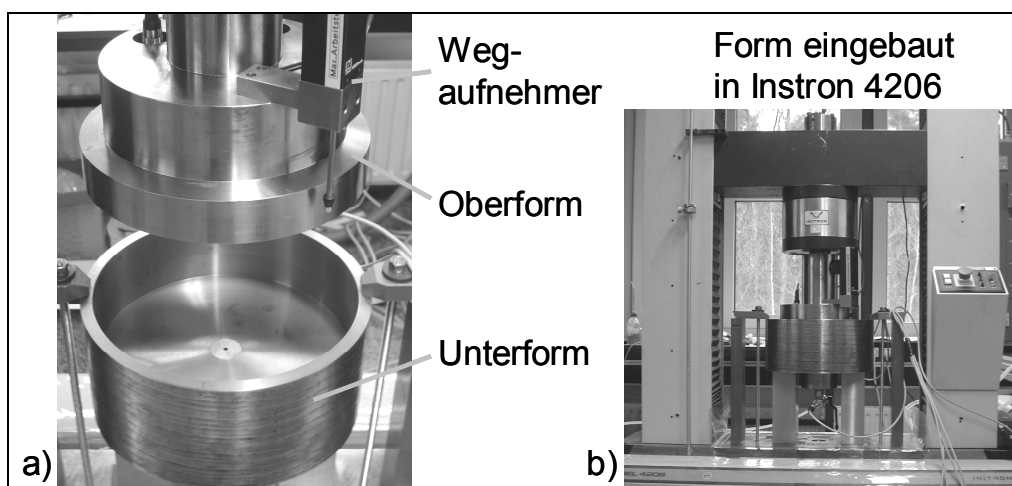


Bild 3.4: a) Kompressionsform aus Stahl (Innendurchmesser 270 mm) in Topf-Form zur Durchführung von Kompaktierungsversuchen mit getränkten Faserhalbzeugen. b) Topf-Form eingebaut in einer Instron 4206 Universalprüfmaschine mit 150 kN Kraftmessdose

Andererseits ermöglicht die Positionierung der Sensoren eine direkte Messung der absoluten Kavitätshöhe. Diese absolute Kavitätshöhe kann dadurch bestimmt werden, dass die Sensoren fest mit der Oberform verbunden sind und mit den Messspitzen auf dem oberen Rand der Unterform aufsetzen. Da die beiden verwendeten Sensoren bezogen auf den Durchmesser in einem Winkel von 90° zueinander an der Oberform fixiert sind, können auch Schiefstellungen der Oberform in Bezug auf die Unterform aufgelöst werden. Die mit den beiden Aufbauten (Bild 3.3 und Bild 3.4) durchgeführten Versuche zielen auf eine Überprüfung des in der Literatur kontrovers dargestellten Materialverhaltens. Aus diesem Grund werden die Materialien A, D und E im trockenen Zustand mit dem in Bild 3.3 dargestellten Plattenaufbau getestet, wohingegen von den Materialien B und C das Kompaktierungsverhalten im trockenen sowie im getränkten Zustand ermittelt wird. Für letztere Versuche wird der Topf-Aufbau aus Bild 3.4 eingesetzt.

Um das Kompaktierungsverhalten von Faserhalbzeugen zu ermitteln, können zwei Vorgehensweisen nach ihrem Versuchsablauf unterschieden werden:

- Einstufige Kompaktierungsversuche und
- Mehrstufige Kompaktierungsversuche.

Bei den einstufigen Versuchen wird eine Preform bzw. ein Faserhalbzeugstapel in die Kavität eingelegt. Der Prüfvorgang wird gestartet, wodurch sich der Spalt zwischen Oberplatte und Unterplatte, respektive zwischen Oberform und Unterform, mit einer definierten Geschwindigkeit auf die einem bestimmten Faservolumengehalt zugeordnete Kavitätshöhe verringert. Diese Kavitätshöhe wird dann eine bestimmte Zeit lang gehalten, bevor dann bei den einstufigen Versuchen die beiden Werkzeughälften wieder auseinandergefahren werden, um eine neue Preform für einen weiteren Versuch einlegen zu können. Bei mehrstufigen Versuchen hingegen wird nach dem Ablauf der Haltezeit direkt mit demselben Faserhalbzeugstapel die Prozedur für weitere Faservolumengehalte wiederholt. Auf diese Weise kann eine Vielzahl von Versuchsergebnissen aus einem einzigen Probensatz herausgezogen werden ohne den für die einstufigen Versuche notwendigen sehr hohen Verbrauch an Faserhalbzeugen in Kauf nehmen zu müssen.

In Bild 3.5 sind die Ergebnisse für Material A, das sehr grobe Roving-Glas-Gewebe, dargestellt. Betrachtet man die in Bild 3.5 dargestellten Ergebnisse der Kompak-

tierungsversuche für das Rovinggewebe (Material A), zeigen sich zwei Sachverhalte: Dies sind einerseits ein recht gravierender Unterschied zwischen den Kompaktierungsdruckniveaus der drei Versuchswiederholungen, andererseits jedoch eine Konstanz im Abklingverhalten des Kompaktierungsdrucks über der Zeit. Wie bereits erwähnt, ist die Struktur des Rovinggewebes sehr grob aufgebaut; sie besteht in Schussrichtung aus fünf Rovings je 25,4 mm, wohingegen die Kettrichtung vier Rovings je 25,4 mm aufweist.

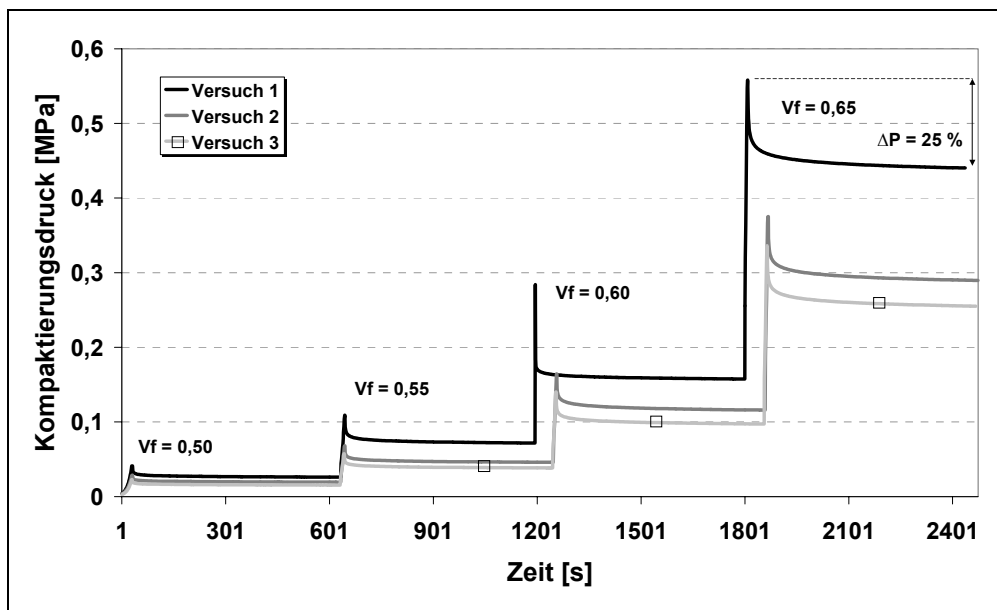


Bild 3.5: Kontinuierliche Kompaktierungsmessung des Rovinggewebes A

Es ist nachvollziehbar, dass bei solch groben Gewebestrukturen die Position der Abbinde der übereinander liegenden Einzellagen, d.h. die Position der Punkte in denen sich die Rovings der Schuss- und Kettrichtung kreuzen, sehr starken Einfluss auf die Kompaktierfähigkeit des Lagenpakets hat. Dieser in Bild 3.6 dargestellte Effekt wird als „Nesting“ bezeichnet [47]. Da im Fall der Kompaktierungsversuche eine bestimmte Kavitätshöhe angefahren wird, bestimmt das Nesting in entsprechendem Maße den resultierende Kompaktierungsdruck. Je größer diese Struktur, desto größer die zu erwartenden Schwankungen der Kompaktierungsdruckkurven.

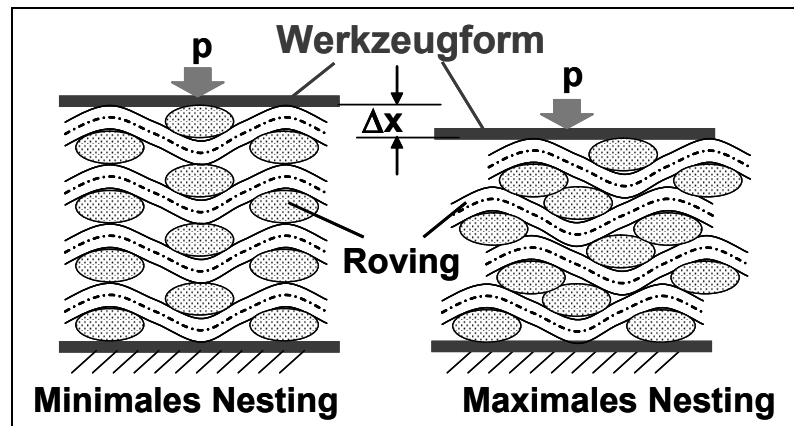


Bild 3.6: Einfluss des „Nestings“ auf die Kompaktierfähigkeit von Gewebestapel

Ein Vergleich der Ergebnisse der Kompaktierungskurven des biaxialen Geleges (vgl. Bild 3.7) und des triaxialen Geleges (vgl. Bild 3.8) mit den Ergebnissen des Rovinggewebes (Bild 3.5) zeigt zunächst, dass die Abweichungen der Kompaktierungsdruckverläufe in den einzelnen Versuchswiederholungen sehr viel weniger ausgeprägt ausfallen als dies für das Rovinggewebe A der Fall ist. Weiterhin lässt sich bei den untersuchten Gelegen feststellen, dass die Streuung der Maximaldrücke erst oberhalb der 60 % Faservolumengehaltsgrenze signifikant ansteigt, wohingegen die Versuchswiederholungen des Rovinggewebes auch bei geringen Faservolumengehalten starke Abweichungen zueinander aufweisen.

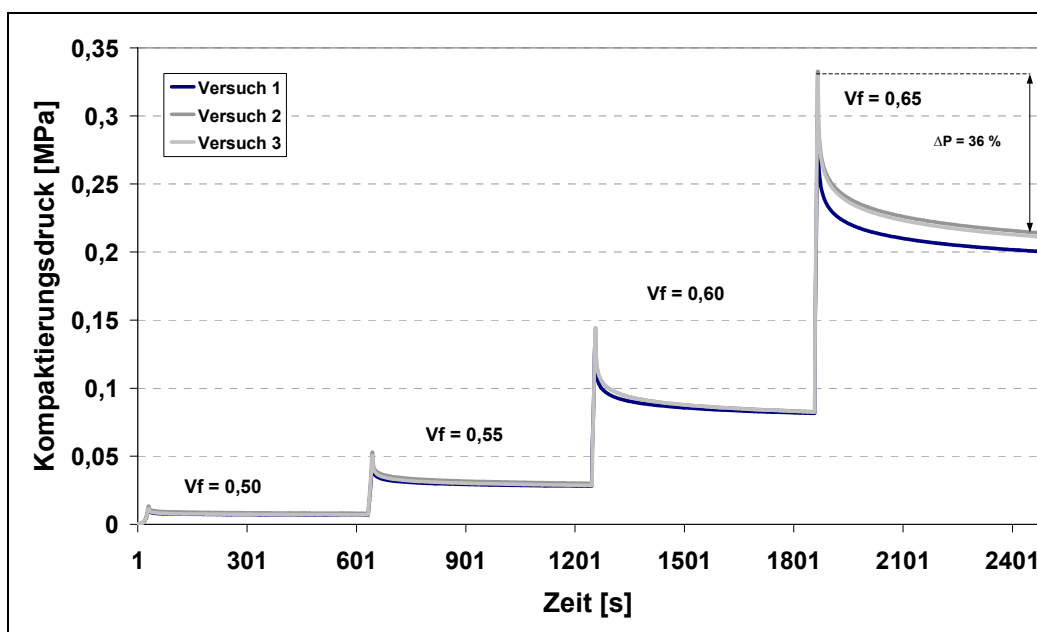


Bild 3.7: Biaxiales Gelege Material D

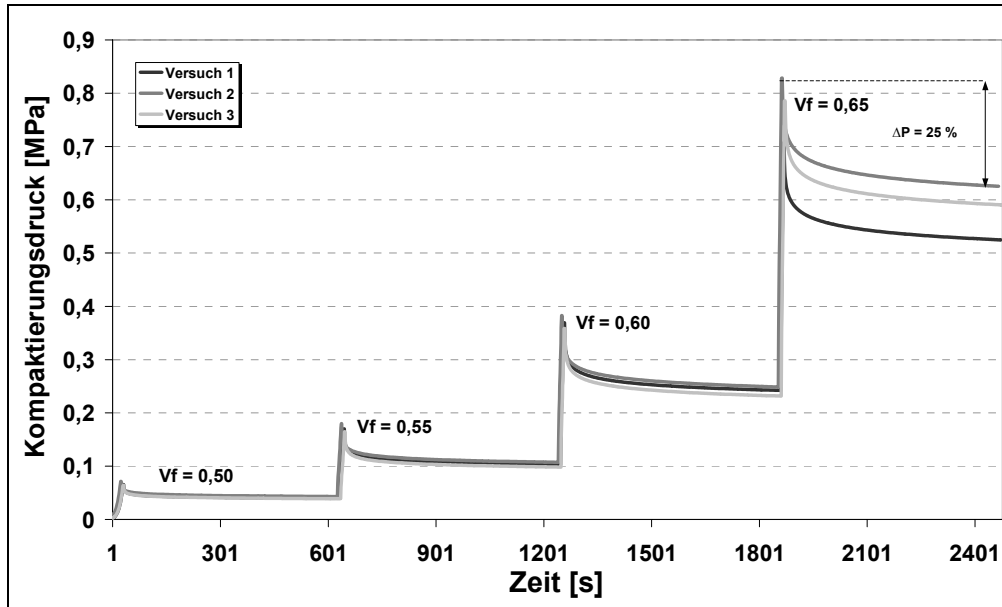


Bild 3.8: Triaxiales Gelege Material E

Ordnet man die ausgewählten Materialien entsprechend der maximal auftretenden Kompaktierungsdrücke, so ergibt sich die aufsteigende Reihenfolge biaxiales Gelege, Rovinggewebe und schließlich triaxiales Gelege (vgl. Bild 3.9).

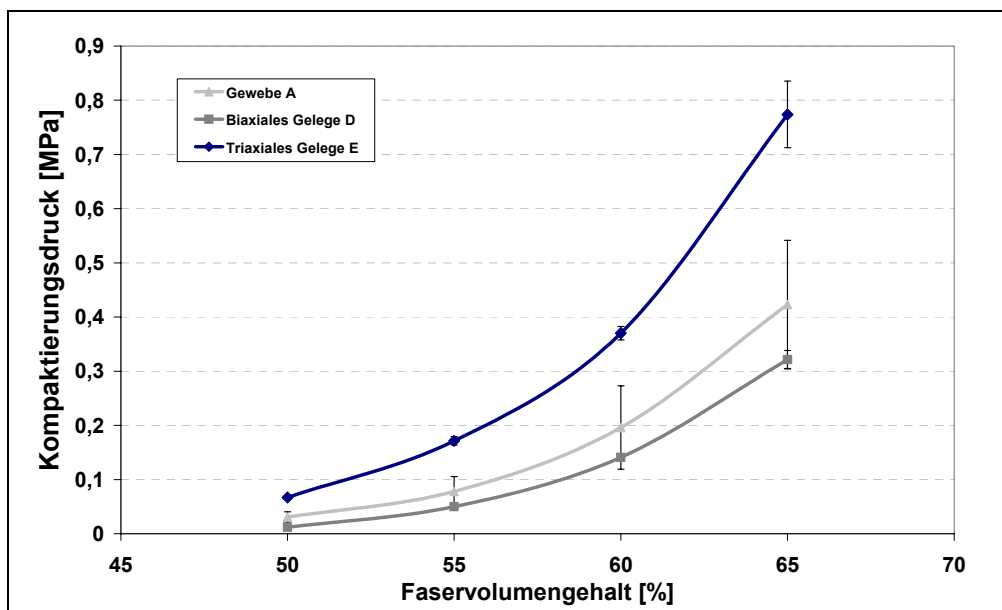


Bild 3.9: Materialspezifische Kompaktierungsdrücke als Funktion des Faservolumengehalts

Diese Reihenfolge lässt sich durch den Aufbau der Materialien erklären. Fokussiert man zunächst auf die beiden gleichartigen Materialien, die Gelege, dann zeigt ein Blick in Tabelle 3.1, dass beide Gelege identische Flächengewichte bestehend aus

identischen Rovings aufweisen. Der Unterschied zwischen den beiden Gelegen begründet sich in der Tatsache, dass das biaxiale Gelege mit einem Flächengewicht von rund 600 g/m^2 je Lagenrichtung ausgeführt wurde, wohingegen das Flächengewicht des triaxialen Geleges nur rund 400 g/m^2 je Lagenrichtung beträgt. Basierend auf den Ergebnissen der Kompaktierungsversuche drängt sich auf, dass je größer das Flächengewicht jeder einzelnen Lage –ausgeführt in entsprechend groben Rovings- ist, desto höher ist die Möglichkeit der einzelnen Fasern sich innerhalb der Rovings unter Druckbeeinflussung optimal auszurichten. Diese Struktur nähert sich einem optimalen Faserbett aus parallelen Fasern in der jeweiligen Faserorientierung an. Weiterhin kann den Ergebnissen entnommen werden, dass die Anzahl der Lagenorientierungen je Material einen entscheidenden Einfluss auf das Kompaktierungsverhalten hat. Diese Annahme lässt sich unter Einbezug der vorher genannten Fakten und unter Verwendung der Ergebnisse von biaxialem und triaxialem Gelege herstellen. Ebenfalls ein nicht zu vernachlässigender Einflussfaktor ist die dem Gelege immanente Verwirkung. Die Kombination aus Verwirkungsdichte und Anzahl der Faserlagen eines Geleges, die miteinander verwirkt werden, beeinflusst neben der Drapierbarkeit der Gelege auch deren Kompaktierbarkeit. Weiterhin von Interesse ist die Tatsache, dass bei allen untersuchten Materialien die Relaxierung des aufgebracht Maximaldrucks innerhalb eines Zeitraums von ca. 10 Minuten zwischen 20 und 40 % beträgt. Bezogen auf den Fall des RTM-Verfahrens bedeutet dies einerseits, dass ein vorkonfektioniertes Faserhalbzeug entweder in eine Form eingebracht werden muss, die diese Kompaktierungsdrücke aufnehmen kann, oder ggf. sogar ein zusätzlich eingebrachter Vorkompaktierungsschritt außerhalb der Form durchgeführt werden muss, wofür dann eine Form von geringerer Widerstandsfähigkeit ausreichen würde. Neben den festgestellten materialabhängigen Verhalten bei einer Kompaktierungsgeschwindigkeit von 2 mm/min wurden auch Versuche mit variablen Kompaktierungsgeschwindigkeiten ausgeführt. Der Hintergrund für diese Untersuchungen ist die von einigen Forschern berichtete Abhängigkeit der Kompaktierungskraft von der Kompaktierungsgeschwindigkeit [48]. Aufgrund dieser Abhängigkeit steigt die Kompaktierungskraft mit zunehmender Kompaktierungsgeschwindigkeit signifikant an.

Eine Versuchsreihe mit dem biaxialen Glasgelege (Material C) bei Geschwindigkeiten von 0,5, 1, 2, 5 und 10 mm/min auf einen Zielfaservolumengehalt von 61 % ergab die in Bild 3.10 dargestellten Ergebnisse.

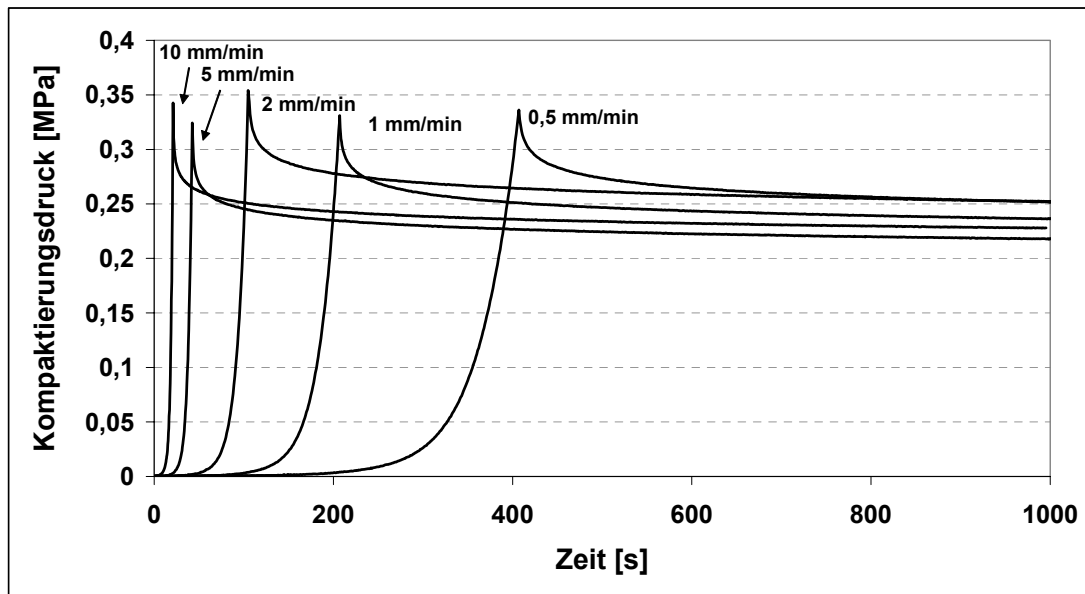


Bild 3.10: Geschwindigkeitsabhängigkeit von Kompaktierungskurven des bi-axialen Glasgeleges (Material C) bei Zielfaservolumengehalt 61 %

Bei dem hierbei untersuchten Material C kann diese in der Literatur beschriebene Abhängigkeit von Kompaktierungsdruck und Kompaktierungsgeschwindigkeit nicht nachgewiesen werden. Aus den bisherigen Ergebnissen lässt sich also kein klarer Trend bzw. keine klare Vorhersage treffen, welches Material sich in welcher Art verhalten wird. Derzeit kann nicht differenziert werden, ob die Änderung des Kompaktierungsverhaltens eines Materials hauptsächlich von der Faserart, der Faserarchitektur oder der Schlichte abhängig ist, um nur einige der möglichen Parameter zu benennen. Folglich ist es nötig, jedes einzusetzende Material einer experimentellen Untersuchung zu unterziehen.

3.1.1.2 Kompaktierungsverhalten von getränkten Faserhalbzeugen

Nachdem die in Tabelle 3.1 aufgeführten Materialien A, D, E mit dem Plattenaufbau in trockenem Zustand untersucht wurden, stellt sich die Frage, inwiefern sich das Kompaktierungsverhalten eines Faserhalbzeugs ändert, wenn es mit einer Flüssigkeit getränkt ist. In der Literatur wird hier der „lubrication effect“ benannt [49,50], welcher zur Folge hat, dass sich Spannungen an den Grenzflächen der einzelnen benachbarten Fasern auf Grund der Benetzung mit einem Fluid abbauen können bzw. dass ein leichteres Abgleiten der Fasern aneinander eine einfacher zu erreichende, dichtere Faserpackung mit sich bringen würde.

In den mit getränkten Faserhalbzeugen durchgeführten Versuchen wurde der in Bild 3.4 dargestellte „Topf-Aufbau“ verwendet. Hierbei wird in der Mitte der runden Faserhalbzeuge ein Loch ausgestanzt, welches mit der Injektionsöffnung im Boden der Topfform zentriert wird. Die Form wird auf den niedrigsten anzufahrenden Faservolumengehalt geschlossen, worauf das kompaktierte Faserhalbzeug mit Pflanzenöl der Viskosität $0,065 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ (vgl. Bild 5.17) getränkt wird. Nach der kompletten Imprägnierung des Faserhalbzeugs wird die Injektionsöffnung über ein Ventil geschlossen, die höherliegenden Faservolumengehalte können angefahren werden. Dabei steigt der Pegel des sich in der Topfform befindlichen Pflanzenöls durch die Volumenreduzierung an. Um diesen Pegelanstieg zulassen zu können, ist der Stempeldurchmesser kleiner gewählt als der innere Topfdurchmesser. Bei den durchgeführten Versuchen wurde ein Pegelanstieg von maximal 20 mm festgestellt. Nach dem Erreichen des maximalen Faservolumengehaltes von 65 % werden dieselben Zielfaservolumengehaltsstufen bei sich nun öffnender Form angefahren. Der Kompaktierungsdruck ergibt sich aus der Kompaktierungskraft bezogen auf den Durchmesser von 195 mm der verwendeten Einzellagen. Die jeweiligen lokalen Maxima des Kompaktierungsdrucks werden dann in ein Diagramm übertragen. Diese Kompaktierungsversuche sind mit beiden Materialien B und C sowohl in ungetränktem als auch in getränktem Zustand durchgeführt worden. Die Ergebnisse der Versuche sind in Bild 3.11 für das Glasfaser Gelege C und in Bild 3.12 für das Kohlenstofffasergewebe B zusammengefasst.

Die Ergebnisse der Versuche beider Materialien im getränkten und ungetränkten Zustand zeigen einen erheblichen Unterschied in den korrespondierenden Kompaktierungsdruckmaxima der jeweiligen Faservolumengehalte zwischen dem Belastungs- und Entlastungszyklus. Diese Tendenz nimmt mit steigendem Faservolumengehalt stark zu. Dieses Ergebnis zeigt deutlich, dass ein rein elastisches Modell diesem Materialverhalten nicht gerecht werden kann, da aufgrund der Abweichungen innerhalb des Be- und Entlastungszyklus eindeutig eine Kombination aus elastischem und plastischem Materialverhalten vorliegt.

Während das in Bild 3.11 dargestellte Glasfasergelege insbesondere bei der Kompaktierung erhebliche Abweichungen des Kompaktierungsdrucks von ca. 40 % zwischen dem ungetränkten und dem getränkten Zustand aufweist, erzeugt das Tränken

des Kohlenstofffasergewebes mit Pflanzenöl keine nennenswerte Änderung des Kompaktierungsdruckverlaufs (Bild 3.12).

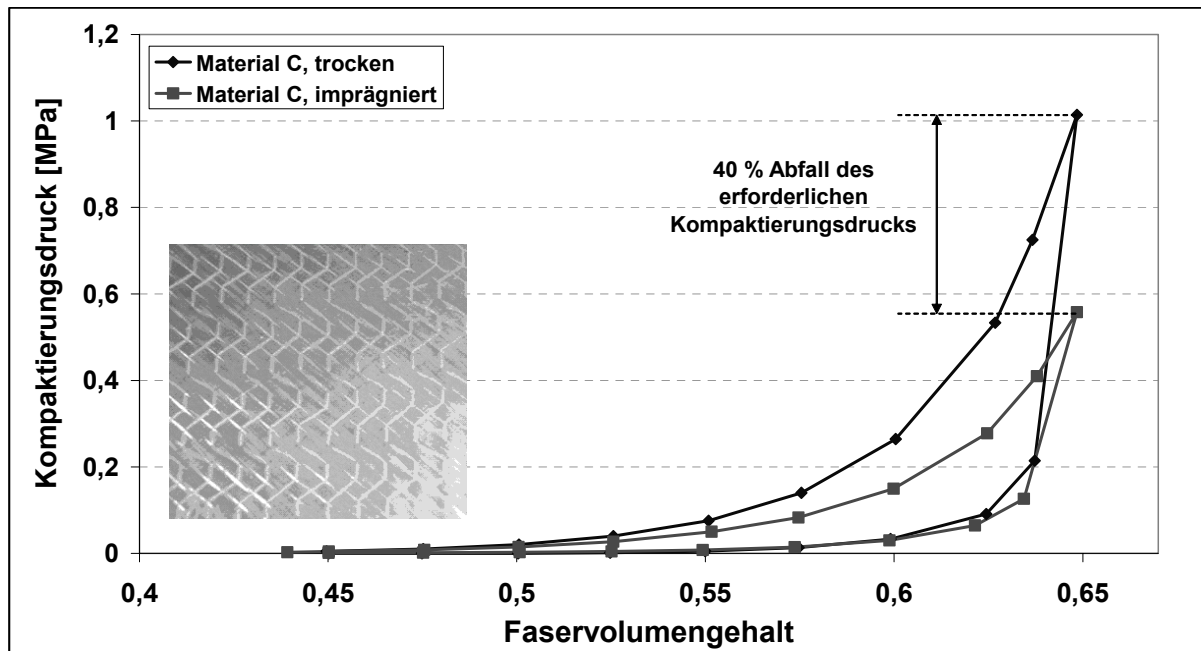


Bild 3.11: Ergebnisse der Kompaktierungsversuche mit ungetränktem und komplett getränktem biaxialen Glasgelege (Material C)

Diese Feststellung lässt unter der Annahme der Gültigkeit des „lubrication effects“ lediglich den Schluss zu, dass sich bei den angrenzenden Filamenten des Kohlenstofffasergewebes diese Spannung generell nicht aufbauen kann. Dieses Verhalten des untersuchten imprägnierten Kohlenstofffasergewebes bei der Kompaktierung ist in der Literatur bisher nicht diskutiert worden. Bemerkenswert ist neben diesem Ergebnis auch, dass der zum Verdichten des Kohlenstofffasergewebes auf 65 % Ziel-faservolumengehalt notwendige Kompaktierungsdruck weitaus geringer ausfällt als dies bei dem untersuchten Glasfasergelege der Fall ist. Alle diese Tatsachen lassen darauf schließen, dass entweder Kohlenstofffasern an sich als „Reibpartner“ nur einen sehr geringen Spannungsaufbau zulassen, oder dass die auf die Fasern aufgebraachte Schlichte für dieses Verhalten maßgeblich verantwortlich ist. Aufgrund von Rücksprachen mit dem Hersteller des Kohlenstofffasergewebes ließ sich feststellen, dass das eingesetzte Material wenige Tage vor Auslieferung hergestellt und verwebt wurde. Diese Aussage lässt sich auch durch die bei der Verarbeitung empfundene außergewöhnliche „Geschmeidigkeit“ des Gewebes im Vergleich zu ähnlichen Materialien bestätigen. Aufgrund dieser Schlussfolgerung lässt sich in Kombination mit

dem in Bild 3.12 dargestellten Ergebnis generalisieren, dass der Zustand der Schlichte auf dem Faserhalbzeug einen erheblichen Einfluss auf die Verarbeitungseigenschaften hat.

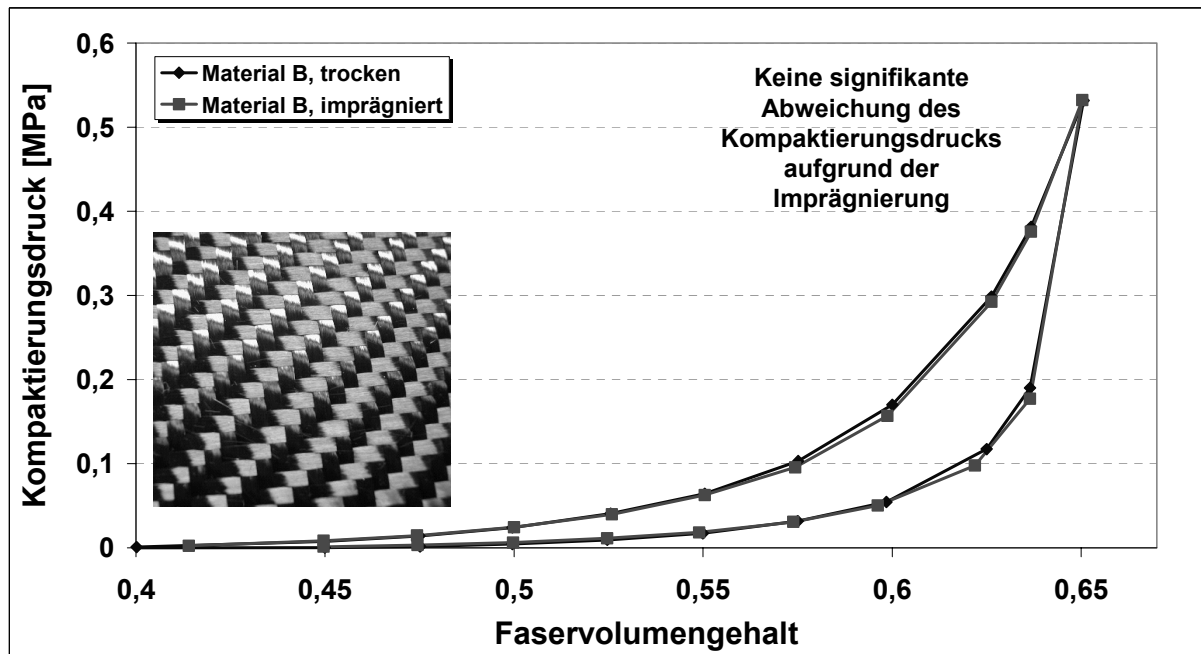


Bild 3.12: Ergebnisse der Kompaktierungsversuche mit ungetränktem und komplett getränktem Kohlenstofffasergewebe (Material B)

Letztlich lässt sich hier die in der Literatur vorhandene gespaltene Meinung über das Kompaktierungsverhalten von Faserhalbzeugen unterstützen. Aufgrund dieses unvorhersehbaren Materialverhaltens ist es deshalb unbedingt erforderlich, das Kompaktierungsverhalten der jeweiligen Materialien vor der Verarbeitung experimentell zu bestimmen.

3.2 Einfluss von zusätzlich in das Faserhalbzeug eingebrachten Nähten auf das Kompaktierungsverhalten von nähtechnisch hergestellten Faserhalbzeugen

Nachdem das Verhalten der ausgewählten Faserhalbzeuge in Bezug auf deren Kompaktierungsverhalten sowohl im trockenen als auch im imprägnierten Zustand untersucht wurde, wird im Nachfolgenden der Einfluss von nachträglich und zusätzlich eingebrachten Nähten untersucht. Dies ist insbesondere in Bezug auf die sich immer stärker im industriellen Einsatz befindliche Nähtechnik zur Herstellung komplexer Preforms [34] von äußerster Wichtigkeit.

Für die Durchführung der Kompaktierungsuntersuchung vernähter Halbzeuge werden drei aus den bereits in Tabelle 3.1 vorgestellten Materialien ausgewählt. Dies sind das Rovingglasgewebe (Material A), das biaxiale Glasfasergelege (Material D) und das triaxiale Glasfasergelege (Material E).

Da es eine Vielzahl von Parametern bei dem Einbringen von zusätzlichen Nähten in das Nähgut zu berücksichtigen gilt, werden folgende Parameter für die zu verwendende Nähanlage der Firma Keilmann Sondermaschinenbau (KSL) vom Typ *KL 110* fixiert:

- Der zu verwendende Nähfaden bleibt bei allen Proben gleich, Typ *Saba C 50* der Firma *Amann & Söhne GmbH & Co.KG*
- Als Nähnadel wird der Typ *Gebedur SAN 11* der Firma *Groz-Beckert* ausgewählt
- Die Stichzahl ist mit 1000 Stichen /min festgelegt
- Eine Stichlänge, d.h. der Abstand zwischen zwei Einstichen der Nadel in das Nähgut, wird auf 2 mm festgelegt
- Die zu vernähenden Faserhalbzeugpakete der Gelege bestehen aus 4 Lagen, die des Gewebes aus 6 Lagen.
- Die Größe des Nähfeldes der Anlage beträgt 2300 mm x 1100 mm

Da die herzustellenden Proben sowohl für eine Kompaktierungsuntersuchung als auch für eine sich anschließende Untersuchung der Imprägnierbarkeit verwendet werden sollten, wurden in Vorversuchen die Hauptfließrichtungen der unvernähten Basismaterialien ermittelt. Bild 3.13 zeigt exemplarisch die sich durch die Imprägnierung ausbreitende Fließfront eines Fluides in einem Faserhalbzeug. Der Grund für diese Vorversuche lag darin, dass das einzubringende Nahtmuster entsprechend den Hauptachsenrichtungen des jeweiligen Halbzeugs ausgerichtet werden sollte. Sind die Einbringungsrichtungen der Nähte identisch mit den Hauptfließrichtungen des Halbzeugs, so sollte der Einfluss der Vernähung direkt anhand der Veränderung der Permeabilitätskennwerte zwischen unvernähten und vernähten Proben abgelesen werden können. Tabelle 3.2 nennt die in den Vorversuchen festgestellten Verdrehwinkel relativ zu dem Produktionskoordinatensystem. Hierbei entspricht die y-Achse der Produktionsrichtung des Halbzeugs.

Tabelle 3.2: Experimentell ermittelte Verdrehwinkel der Hauptachsen der Fließfont bezogen auf das Produktionskoordinatensystem (y-Achse = Produktionsrichtung)

Material	Verdrehwinkel β
Rovinggewebe A	0°
Biaxiales Gelege D	56°
Triaxiales Gelege E	17°

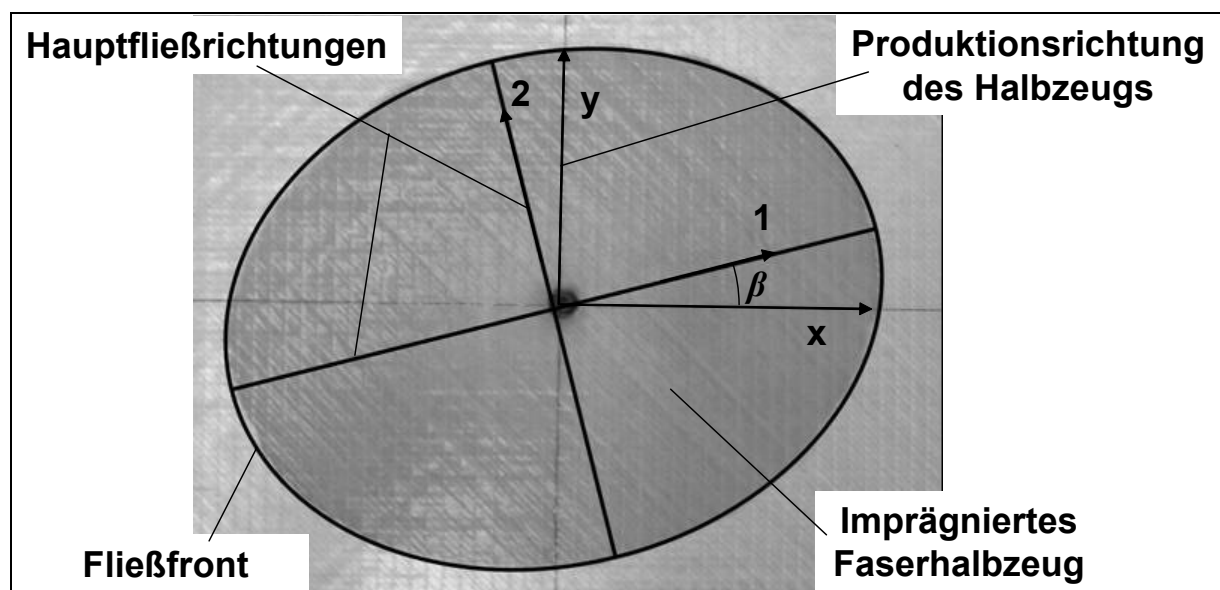


Bild 3.13: Optische Ermittlung der Hauptachsenrichtungen der elliptischen Fließfontausbreitung in einem Faserhalbzeug

Die für die durchzuführenden Kompaktierungs- und Permeabilitätsbestimmungsversuche benötigten Faserhalbzeugproben werden entsprechend der in Tabelle 3.3 dargestellten Versuchsmatrix vorbereitet.

Die Parameter Nähmuster, Fadenabzugskraft und Faservolumengehalt werden in den in Tabelle 3.3 aufgelisteten Grenzen variiert. Als Nähmuster wird ein einfaches Karo-Muster verwendet, wobei die Größe der Karos zwei Extremwerte darstellen.

Tabelle 3.3: Variationen der Versuchsparameter je Faserhalbzeug

Material	Nähmuster	Fadenabzugskraft	Faservolumengehalte
Biaxiales Gelege	5 mm x 5 mm	hoch (440 cN)	Jeweils 50 %, 55 %, 60 % und 65 %
		niedrig (68 cN)	
	20 mm x 20 mm	hoch (440 cN)	
		niedrig (68 cN)	
	unvernäht	-	
Triaxiales Gelege	5 mm x 5 mm	hoch (440 cN)	Jeweils 50 %, 55 %, 60 % und 65 %
		niedrig (68 cN)	
	20 mm x 20 mm	hoch (440 cN)	
		niedrig (68 cN)	
	unvernäht	-	
Gewebe	5 mm x 5 mm	hoch (440 cN)	Jeweils 50 %, 55 %, 60 % und 65 %
		niedrig (68 cN)	
	20 mm x 20 mm	hoch (440 cN)	
		niedrig (68 cN)	
	unvernäht	-	

Um nicht zu viele Parameter zu generieren wird die Fadenabzugskraft des Unterfadens vor Versuchsbeginn auf 250 cN eingestellt und während der gesamten Probenherstellung konstant gehalten. Die Oberfadenabzugskraft, auch Nadelfadenabzugskraft genannt, wird auf einen hohen Wert (440 cN) und einen niedrigen Wert (68 cN) eingestellt. Der Quotient dieser beiden Abzugskräfte bestimmt bei dem für die Probenherstellung verwendeten und in Bild 3.14 schematisch dargestellten Doppelsteppstich die Lage des Knotens relativ zur Faserhalbzeugoberfläche.

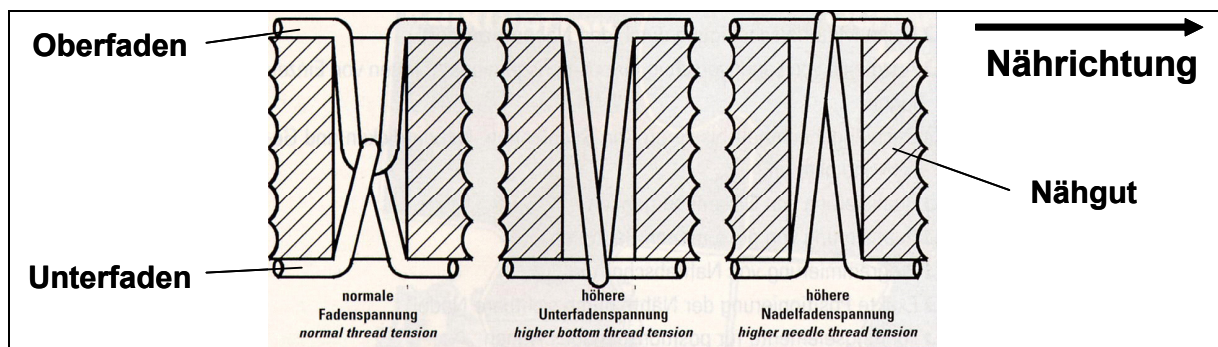


Bild 3.14: Auswirkungen der Fadenabzugskraft auf die Verknötungslage des verwendeten Doppelsteppstichs [51]

Aus diesen Parametern ergibt sich die in Bild 3.15 abgebildete Nomenklatur zur Probenbezeichnung.

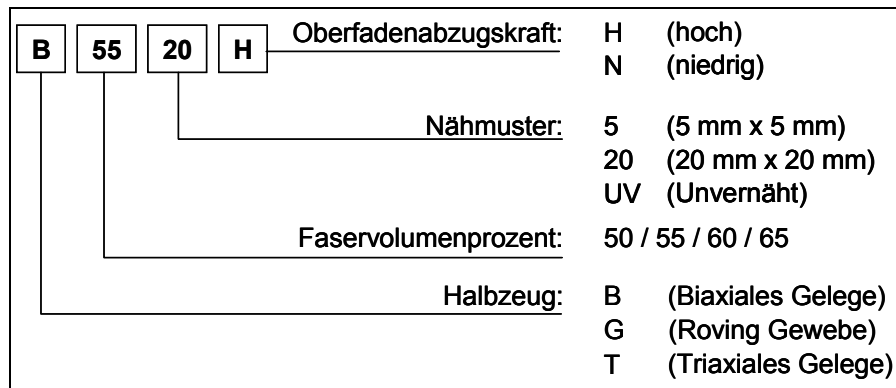


Bild 3.15: Nomenklatur für die nähtechnisch hergestellten Rechteckproben

Die Nähmuster wurden auf der in Bild 3.16 dargestellten KSL-Nähanlage mit den bereits beschriebenen Versuchskonstanten und den in Bild 3.15 dargestellten Versuchsvariablen in die Lagenaufbauten eingebracht. Der Presserfuß (vgl. Bild 3.16), der zusammen mit der im Unterteil einer Nähmaschine befindlichen Materialvorschubeinrichtung die Führung und den Transport des Nähguts übernimmt, ist bei dieser Anlage hauptsächlich für die Materialkompaktierung während der eigentlichen Stichbildung verantwortlich. Je nach Einstellung der Andruckkraft des Presserfußes kann eine zusätzliche lokale Kompaktierung eingestellt werden. Da eine Kompaktierung der Faserhalbzeuge außer durch die Nähmuster ausgeschlossen werden soll, wird der Presserfuß der Anlage so eingestellt, dass er für jedes Material gerade über die Oberfläche des Faserhalbzeugs hinweg gleitet. Um die Oberseite der Probe von der Unterseite im späteren ausgestanzten Zustand unterscheiden zu können, wurden ein gelb gefärbter Oberfaden und ein weiß gebleichter Unterfaden eingesetzt.

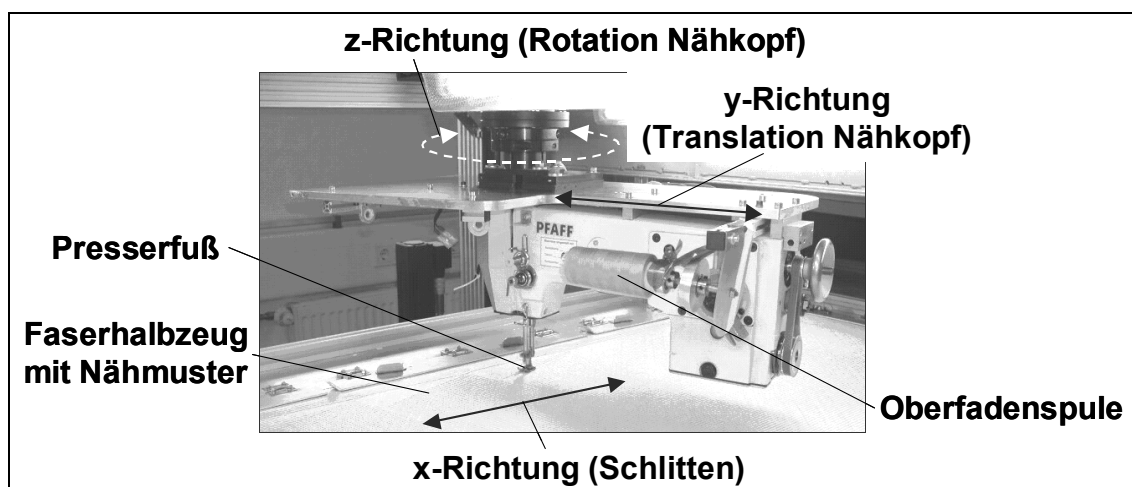


Bild 3.16: Obere Hälfte des geteilten Nähkopfs des KSL-Nähautomaten beim Nähen eines 5 mm x 5 mm-Nähmusters

Auch wurde direkt nach dem Nähen, d.h. nachdem das in Bild 3.17 dargestellte Nähmuster abgearbeitet war, jede einzelne Probe mit einer fortlaufenden Nummer versehen und in einem Lageplan vermerkt. Auf diese Weise wurden über 700 Proben für die Durchführung der Kompaktierungs- und der Imprägnierungsversuche hergestellt. Der Wechsel der Fadenkraft wurde erst dann vollzogen, als alle Proben der drei Materialien mit einigen Zusatzproben als Reserve fertig gestellt waren. Auf diese Weise kann von einer gleichen Fadenabzugskraft bei der Vernähung der jeweiligen Proben ausgegangen werden.

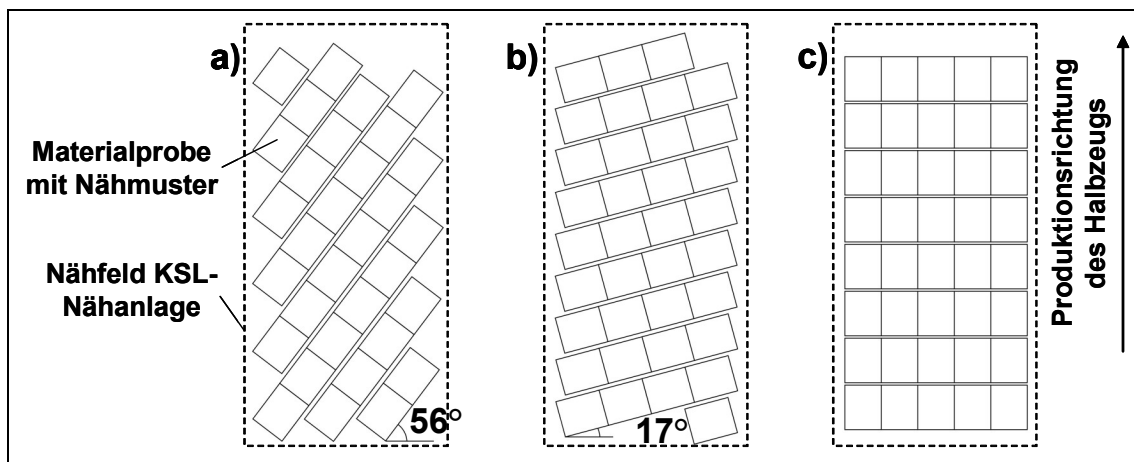


Bild 3.17: Schematische Darstellung der einzelnen Proben und deren Orientierung innerhalb des Nähfeldes der KSL-Nähanlage KL110. a) Material D, b) Material E, c) Material A

Um einen direkten Vergleich zwischen den vernähten und unvernähten Halbzeugproben jedes Materials anstellen zu können, wurden auf gleiche Weise gestapelte und ausgestanzte Proben unvernähten Halbzeugs hergestellt. Durch die Verwendung eines rechteckigen Stanzmessers mit den Innenabmessungen 180 mm x 220 mm zum Herausstanzen jeder einzelnen Probe weisen die wahllos entnommenen Stichproben Abweichungen von den geometrischen Sollwerten von kleiner ± 1 mm bezogen auf die jeweilige Sollkantenlänge auf. Bei den vernähten Proben konnte eine Abweichung von $\pm 5^\circ$ zwischen den nachträglich eingebrachten Nähten und der Faserorientierung der Decklage festgestellt werden, da durch das Vernähen zum Teil die Faserorientierung beeinflusst wird. Durch die Verwendung eines Anschlags kann die Abweichung des Ausstanzwinkels im Vergleich zu den in Bild 3.17 dargestellten Winkeln des Abnähens mit $\pm 1^\circ$ erreicht werden. Das für die 2D-Permeabilitätsmessung erforderliche Loch im theoretischen Flächenschwerpunkt der Probe wird

ebenfalls über ein Stanzeisen mit einem Durchmesser von 6 mm über eine Schablone in das Faserhalbzeug eingebracht. Von allen hergestellten Proben wurden jeder Versuchsausprägung 10 Stichproben entnommen und gewogen. Das Ergebnis dieser Gewichtsbestimmung ist in Bild 3.18 dargestellt.

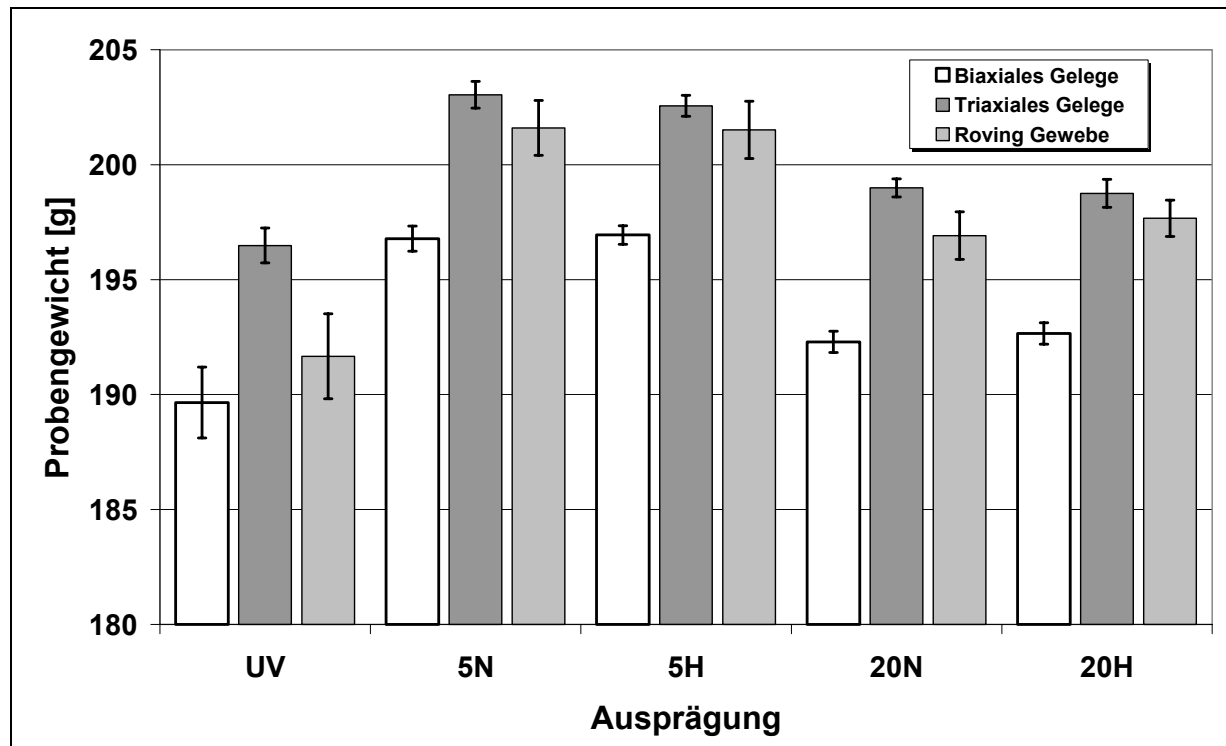


Bild 3.18: Mittelwerte der zu untersuchenden Faserhalbzeugproben von je 10 Proben

Es zeigt sich zunächst, dass das Gewicht der Probe mit der zusätzlich eingebrachten Menge an Nähgarn ansteigt. Die Unterschiede des Probengewichts bei gleicher Stichtichte, jedoch unterschiedlicher Oberfadenabzugskraft sind aufgrund der aufgetretenen Standardabweichungen als nicht signifikant einzustufen. Es lässt sich jedoch ein deutlicher Trend zur Verringerung der Standardabweichungen der Probenmassen der vernähten Proben im Vergleich zu den unvernähten Proben feststellen. Eine mögliche Erklärung für diese Verringerung kann Bild 3.19 entnommen werden. Beim Stanzen von unvernähten Faserhalbzeuglagen bewirkt die Klinge eine starke lokale Kompaktierung, bevor es zum Durchtrennen der Rovings kommt. Über die Decklage werden durch die Klinge die darunter liegenden Lagen verschoben und kompaktiert. Je nach Stapelhöhe weisen die einzelnen Halbzeuglagen folglich unterschiedliche Längen auf, woraus eine Gewichtsschwankung resultieren kann. Bei vernähten Halbzeugen tritt dieser Effekt nur sehr abgeschwächt auf. Weiterhin wird ne-

ben der Verringerung der Standardabweichung der Probenmassen durch das Vernähen auch eine Verbesserung der Handhabbarkeit der vernähten Proben im Vergleich zu den unvernähten Proben des gleichen Materials erreicht.

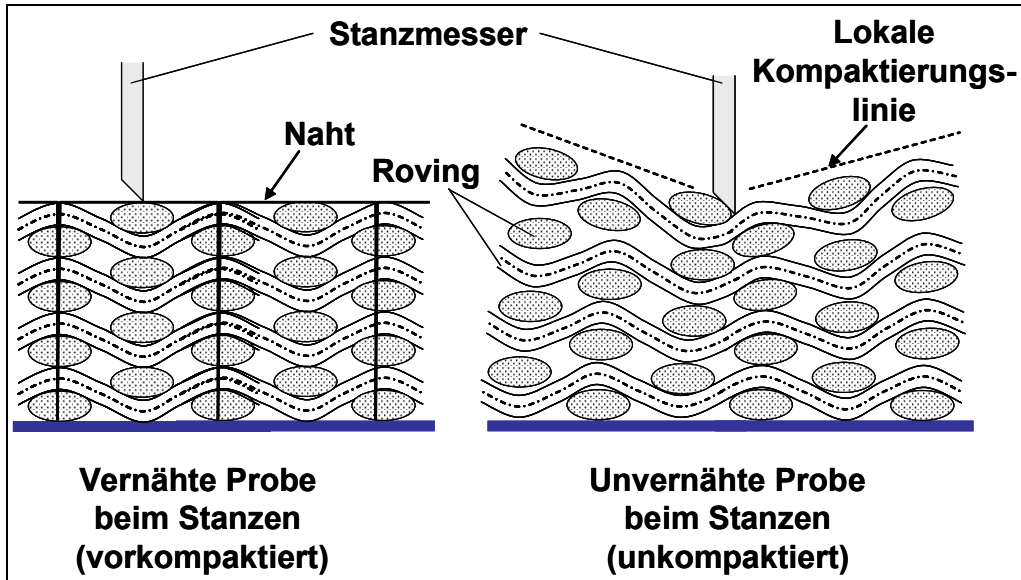


Bild 3.19 : Auswirkung einer Vorkompaktierung beim Stanzenprozess

Da die Abmessungen der Probe bekannt sind, kann die theoretische Fadenlänge des Nähmusters der zu untersuchenden Probe leicht errechnet werden.

$$\text{Fadenlänge} = \frac{4 \cdot \text{Preformlänge} \cdot \text{Preformbreite}}{\text{Nahtabstand}} \left(1 + \frac{\text{Probenhöhe}}{\text{Stichlänge}} \right) \quad (3.1)$$

Aus der Fadenlänge lässt sich mit Hilfe der in Tex (Tex = Gramm je Kilometer Fadenlänge) angegebenen Garnfeinheit die Fadenmasse berechnen. Das verwendete Nähgarn Saba C 50 der Fa. Amann besitzt eine Garnfeinheit von 67,5 Tex. Folglich sind in einer Halbzeugprobe mit einem 5x5 Nähmuster rund 4,5 g und in einem 20x20 Nähmuster rund 1,2 g Faden enthalten. Es zeigt sich also, dass die Differenz zwischen den Probengewichten des vernähten Materials und denen des unvernähten Materials nicht nur durch den zusätzlichen Fadeneintrag zu Stande kommt. Eine Erklärung für dieses Verhalten lässt sich in der Reaktion des Faserhalbzeugs auf das Einbringen von Nähten finden. Beim Vernähen der aus Einzellagen aufgestapelten Proben schnürt der Faden die Preform lokal ein und erzeugt so einen Bereich mit geringerem Faseranteil. Zur Mitte eines abgenähten Quadrates hin nimmt der Faseranteil wieder zu und kann je nach Einstellung der Nähparameter sogar dazu führen, dass es zu einer Materialanhäufung im Zentrum des abgenähten Quadrates kommt.

Da jede zusätzliche Naht ein Verschieben der Halbzeuglagen zueinander behindert, können die „Materialberge“ in der Mitte der abgenähten Quadrate nicht abgebaut werden. Durch diesen Effekt kann es durch das Abnähen der Faserhalbzeugproben zu einer zusätzlichen Erhöhung des Probengewichts kommen, welche dem Ausmaß des bloßen Fadenmaterialeintrags entsprechen kann.

Ein Ausschnitt der unterschiedlichen Materialien und der Nähmuster ist in Bild 3.20 dargestellt. Der Unterschied in der Menge des Fadeneintrags zwischen den 5x5 und 20x20 Nähmustern ist in der Probe deutlich sichtbar. Weiterhin fällt ein Unterschied zwischen den Einstichen der Wirkfäden und der nachträglich eingebrachten Nähte auf. Die Stichlöcher der nachträglichen Vernähung spreizen das Material lokal erheblich stärker auf als dies bei den Wirkfäden der Fall ist. Der Unterschied in der Einschnürung ist zum Einen durch den unterschiedlichen Einbringungsprozess selbst zu begründen. Zum Anderen kommt beim Verwirken meist ein texturiertes und dadurch sehr elastisches Garn zum Einsatz, wohingegen beim Nähen meist sehr zugfeste und wenig elastische Zwirne eingesetzt werden. Durch die Elastizität der texturierten Garne können sich die Stichlöcher teilweise wieder schließen.

Als Versuchsaufbau für die durchzuführenden Kompaktierungsversuche kommt der aus Bild 3.3 bereits bekannte Plattenaufbau zum Einsatz. Die Kompaktierung erfolgt mit einer Geschwindigkeit von 2 mm/min. Es werden jeweils drei Proben je Faservolumengehalt und Versuchsparameter untersucht um eine statistisch vertretbare Aussage treffen zu können. Bereits der erste mehrstufige Kompaktierungsversuch zeigt eine erheblich höhere Druckkraft als dies bei den vorher untersuchten unvernähten Basisproben der Fall war. Da sich bei derartig hohen Kräften eine durch die obere Platte bedingte Abweichung in der angestrebten Kavitätshöhe ergibt, werden die installierten Lasermessgeräte zur manuellen Kompensierung dieser elastischen Verformung herangezogen.

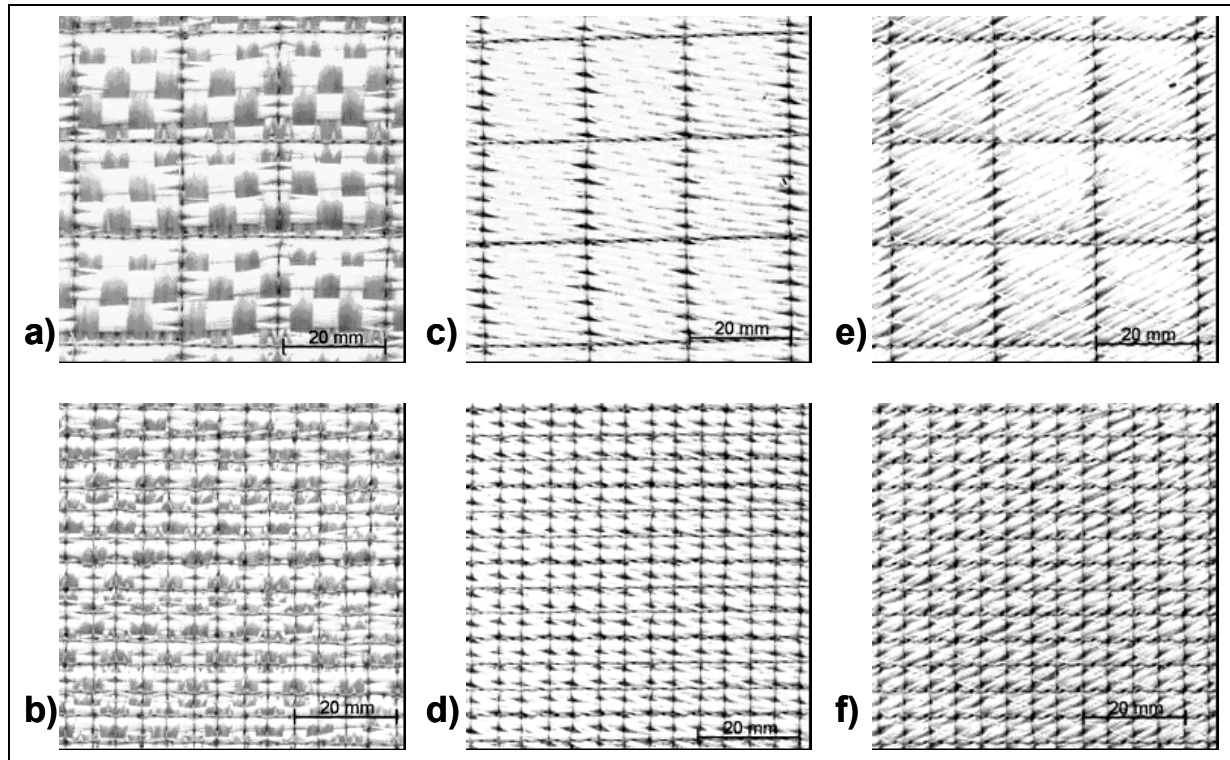


Bild 3.20: Detailansicht der mit hoher Fadenabzugskraft vernähten Proben.
 a) Material A Nähmuster 20x20 mm, b) Material A Nähmuster 5x5 mm,
 c) Material D Nähmuster 20x20 mm, d) Material D Nähmuster 5x5 mm,
 e) Material E Nähmuster 20x20 mm, f) Material F Nähmuster 5x5 mm

Diese manuelle Kompensierung beruht darauf, dass von jedem Material und jeder Parameterausprägung eine Probe in einer mehrstufigen Testprozedur von 50 %, über 55 % und 60% auf schließlich 65 % Zielfaservolumengehalt kompaktiert wird. Dabei wird notiert, welche zusätzliche Anpassung der Kavitätshöhe für einen bestimmten Faservolumengehalt erforderlich ist. Durch diese Prozedur kann die Auswirkung der Elastizität des Aufbaus auf ein Minimum reduziert werden.

In Bild 3.21 sind die Ergebnisse von 180 durchgeführten Kompaktierungsversuchen zusammengefasst.

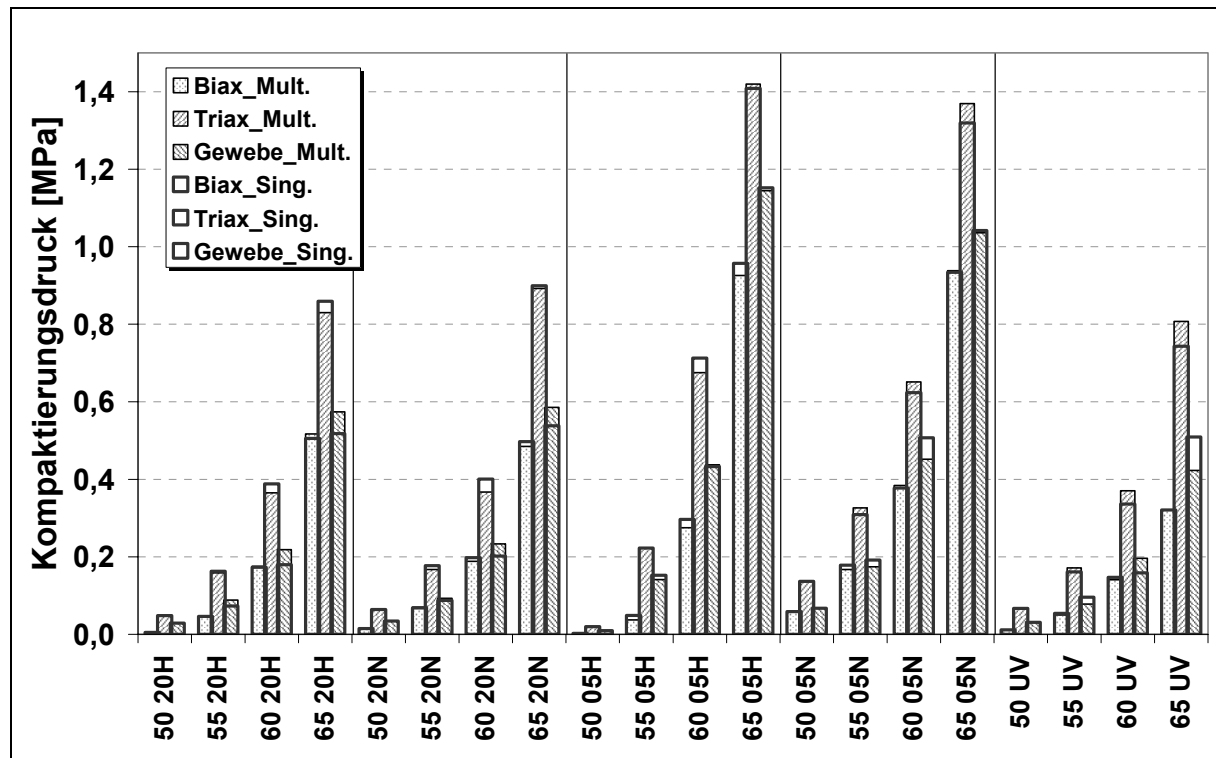


Bild 3.21: Darstellung der erforderlichen Kompaktierungskräfte für die durchgeführten Versuchsreihen. Die Nomenklatur entspricht Bild 3.15

Aus dieser Zusammenfassung der Ergebnisse kann zunächst abgeleitet werden, dass sich kein signifikanter Unterschied zwischen den Ergebnissen der einstufigen (vgl. Bild 3.21 *_Sing.) und der mehrstufigen (vgl. Bild 3.21 *_Mult.) Kompaktierung in Bezug auf den für einen spezifischen Faservolumengehalt benötigten Kompaktierungsdruck ergibt. Dieser Sachverhalt ist im Bezug auf den Materialverbrauch für eine solche Studie von immenser Bedeutung. Während zur Durchführung der einstufigen Versuche 48 Proben notwendig sind, reichen bei mehrstufigen Versuchen bereits 12 Proben aus um dieselbe Anzahl von experimentellen Untersuchungen je vernähtem Halbzeug durchzuführen. Da kein signifikanter Unterschied zwischen den ein- und den mehrstufigen Kompaktierungsergebnissen besteht, relaxiert das Halbzeug zwar in den Haltephasen zwischen den einzelnen Messpunkten, jedoch haben die dabei auftretenden Reorientierungen der Fasern keinen Einfluss auf den erforderlichen Kompaktierungsdruck der nächsthöheren Kompaktierungsebene.

Weiterhin lässt sich feststellen, dass bei einem Vergleich der 20x20 Versuchsergebnisse keine signifikante Auswirkung der beiden Fadenabzugskraftniveaus auf die erforderliche Kompaktierungskraft vorliegt. Bis zu einem Grenzbereich von ca. 55 % Faservolumengehalt lassen sich die mit dem 20x20 Nähmuster vernähten Proben

sogar kaum von den unvernähten Basismaterialien im Kompaktierungskraftverlauf unterscheiden. Oberhalb dieser Grenze steigt der zur Kompaktierung notwendige Druck über das Niveau der unverstärkten Materialien an. Dieser Druckanstieg lässt sich einerseits mit dem durch das Vernähen zunehmenden Flächengewicht der Halbzeugprobe erklären. Andererseits bewirkt die transversale Kompaktierung der „Materialberge“ im Zentrum der aus quadratischen Zellen bestehenden Nähmuster eine Ausdehnung in der Ebene der Halbzeugprobe. Diese Ausdehnung wird im vorliegenden Fall nur durch die in das Halbzeug eingebrachten Nähte behindert. Bezüglich des triaxialen Geleges mit 20x20 Nähmuster ist zu erkennen, dass bei diesem Material die Variation der Fadenabzugskraft im Vergleich zu dem unvernähten Material keine Veränderung des Kompaktierungsdrucks bewirkt. Offensichtlich wird dieses Material durch die Vernähung mit 20x20 Nähmuster in seinem Bestreben der zunehmenden Druckbelastung durch Reorientierung entgegenzuwirken nicht beeinträchtigt.

Stellt man einen Vergleich zwischen den beiden Fadenabzugskraftniveaus bezogen auf das 5x5 Nähmuster an, so zeigt sich ebenfalls, dass das mit hoher Fadenabzugskraft vernähte Material unterhalb des Grenzvolumengehalts von ca. 55 % einen verringerten Kompaktierungsdruck zum Erreichen des Zielfaservolumengehalts benötigt. Ein Vergleich der beiden 5x5 Nähmuster mit den unvernähten Basismaterialien zeigt, dass der erforderliche Kompaktierungsdruck im Fall der 5x5 Nähmuster oberhalb des Grenzfaser volumengehalts überproportional ansteigt. Dieser Anstieg führt beispielsweise bei dem biaxialen Gelege fast zu einer Verdopplung des erforderlichen Kompaktierungsdrucks bei 65 % Zielfaservolumengehalt. Auch in diesem Fall kann neben den Unterschieden zwischen den Kompaktierungsdrücken für hohe und niedere Fadenabzugskraft das generelle Ansteigen des erforderlichen Kompaktierungsdrucks mit der Behinderung der ebenen makroskopischen Ausdehnung der Probe begründet werden. Diese Aussage lässt sich noch untermauern, da die Ergebnisse der 5x5 Nähmuster aufgrund der mit der höheren Anzahl von Stichen im Nähmuster zusammenhängenden Behinderung der ebenen makroskopischen Ausdehnung im Vergleich zu den Ergebnissen der 20x20 Nähmustern wiederum auf höherem Niveau liegen.

Aus der Auswertung dieser Versuche lässt sich der in Bild 3.22 dargestellte Einfluss der Fadenabzugskraft auf den Kompaktierungsdruckverlauf konstruieren.

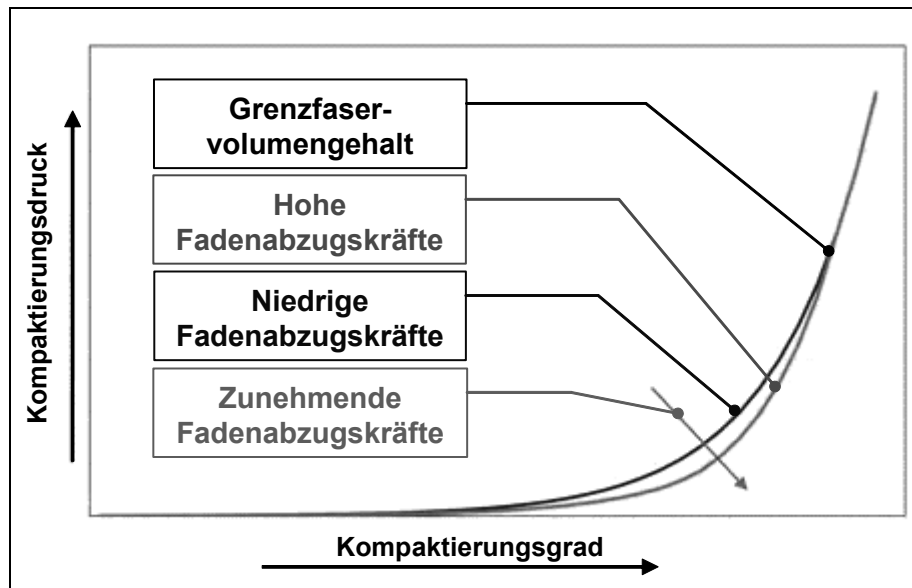


Bild 3.22: Schematische Darstellung der Auswirkung von unterschiedlichen Fadenabzugskräften auf den erforderlichen Kompaktierungsdruck bei gleichem Nähmuster

Eliminiert man, wie in diesem Fall geschehen, den normalerweise ebenfalls noch zur Kompaktierung beitragenden Einfluss der Presserfußkraft, der das Nähgut lokal sehr stark kompaktieren kann, so ist bis zum Erreichen eines Grenzfaser volumengehalts durch die Vernähung eine „Einsparung“ in Bezug auf den erforderlichen Kompaktierungsdruck erreichbar. Der in diesen Versuchen ermittelte Grenzfaser volumengehalt liegt für die untersuchten Materialien zwischen 55 % und 60 %. Es ist anzunehmen, dass der Einsatz einer hohen Presserfußkraft diesen Grenzfaser volumengehaltbereich noch zu höheren Werten verschieben kann, wobei jedoch auf eine mögliche Schädigung des Halbzeugs (Faserbruch) durch die hohe lokale Kompaktierung zu achten ist. Anhand der experimentellen Ergebnisse lässt sich die bereits vermutete Möglichkeit eine Preform durch den Einsatz textiler Nähtechnik vorkompaktieren zu können bestätigen. Dies ist insbesondere im Hinblick auf ein verbessertes Einlegeverhalten von durch die nähtechnische Montage, den „cut and sew approach“, erzeugten Preforms in eine RTM-Werkzeugform von Relevanz. Hier ist es aufgrund der in der Form abgebildeten Endkontur notwendig die elastische Verformung der Preform, das „bulking“, möglichst zu unterdrücken. Ein dadurch bedingter Anstieg der Formschließkräfte im Vergleich zu unvernähten Faserhalbzeugen ist dann zwar unabdingbar, jedoch in der Regel durch die herzustellende Metallform aufnehmbar. Der größere Vorteil, eine minimierte Gesamtzykluszeit durch eine Verkürzung der Werk-

zeugbeschickungszeiten zu erreichen, kann den zusätzlichen Aufwand des Vernähens der Halbzeuge bei einem entsprechenden Produktionsvolumen rechtfertigen.

Das in diesem Kapitel behandelte Kompaktierungsverhalten sowohl von unvernähten und vernähten als auch von unimprägnierten und imprägnierten Faserhalbzeugen zeigt, dass eine quasi identische Beschreibung eines Halbzeugs keinesfalls ein identisches Kompaktierungsverhalten bedeutet. Die hier dargestellten Ergebnisse, insbesondere der zusätzlich vernähten Materialien, dienen als Basis für Arbeiten anderer Forscher, um eine mathematische Beschreibung des Materialverhaltens erstellen zu können. Ein solches Datenfundament ist nach einer durchgeführten Literaturrecherche in dieser Art nicht existent. Weiterhin wird derzeit an der Universität von Auckland von Dr. Piaras Kelly in Zusammenarbeit mit Dr. Simon Bickerton ein Modell erarbeitet, welches, basierend auf den in diesem Kapitel dargestellten Ergebnissen, das Materialverhalten sowohl während der Kompaktierungsphase als auch während der Relaxierungsphase beschreiben kann. Als ein erster Ansatz ist dabei das sehr einfach gestaltete Stufenmodell [52] zu sehen, welches die Kompaktierungsphase und den Einfluss der Imprägnierung numerisch nachempfinden kann.

4 Permeabilitätsbestimmung von flächigen Faserhalbzeugen

Mit der Permeabilität eines Stoffs beschreibt man allgemein die Durchlässigkeit eines porösen Feststoffs für ein Fluid [53]. Die Permeabilitätsbestimmung geht auf den Physiker D'Arcy zurück, der während seiner Konstruktionsarbeiten für das Wassersystem der Stadt Dijon ein Modell zur Beschreibung der Wasserdurchlässigkeit von Sandböden aufstellte [54]. D'Arcy untersuchte diesen Sachverhalt mit Hilfe einer teilweise mit Sand gefüllten Röhre. Er beaufschlagte den Sand mit definierten Mengen an Wasser und stellte fest, dass das Wasser die Sandsäule unterschiedlich schnell durchfließt. D'Arcy fand heraus, dass der Volumenstrom, der die Sandsäule durchdringt, eine Funktion der Porosität bzw. der Größe der Sandkörner und der Druckdifferenz der über dem Sand ruhenden Wassersäule ist. Das Ergebnis seiner Untersuchungen ist in der nach ihm benannten Gleichung (4.1) dargestellt.

$$Q = -\frac{K}{\mu} * A * \frac{\Delta p}{h} \quad (4.1)$$

Hierbei stellt Q den Volumenstrom [m^3/s], K die Permeabilität [m^2], μ die Viskosität des Fluids [$\text{Pa}\cdot\text{s}$], A die Querschnittsfläche der Sandsäule [m^2], Δp die durch die Wassersäule ausgelöste Druckdifferenz oberhalb des Sandes [Pa] und h die Höhe der Sandsäule [m] dar. Advani zeigt in [55] einerseits, dass sich D'Arcys experimentell gefundenes Gesetz unter bestimmten Annahmen auch aus der Navier-Stokes-Gleichung herleiten lässt. Andererseits verdeutlicht er auch die Unterschiede zwischen den in beiden Gleichungen beschriebenen Geschwindigkeiten. So bezieht sich seinen Angaben zu Folge die Navier-Stokes-Gleichung auf die Geschwindigkeit des Fluids in den Poren, wohingegen in der heutigen Form (Gleichung 4.2) von D'Arcys Gesetz in eindimensionaler Form meist die volumengemittelte Geschwindigkeit v als Quotient aus dem Volumenstrom und der effektiven Querschnittsfläche beschrieben ist und die Höhe der Sandsäule durch die Differenzstrecke in einer Koordinatenrichtung ersetzt ist. Die effektive Querschnittsfläche (A_{eff}), die senkrecht zur Fließrichtung steht, ergibt sich aus dem Produkt der entsprechenden Querschnittsfläche der Kavität (A) und der Porosität (Φ) des Kavitätinhalts.

$$g = \frac{Q}{A_{\text{eff}}} = -\frac{K}{\mu} * \frac{\Delta p}{\Delta x} \quad (4.2)$$

Um D’Arcys Gesetz anwenden zu können müssen einige Randbedingungen berücksichtigt werden. Diese Randbedingungen sind im Einzelnen:

- Verwendung von inkompressiblen, newtonischen Fluiden
- Stationäres Fließen (Reynoldszahlen (Re) zwischen 0,1 und 0,75 nach Dullien [56])
- Gravitationseffekte sind vernachlässigbar
- Wandreibungseffekte sind vernachlässigbar
- Der Widerstand, der durch die kontinuierliche Luftverdrängung entsteht, ist vernachlässigbar
- Es findet keine geometrische Veränderung des porösen Mediums statt
- Ausgangszustand ist ein bereits komplett durchtränktes poröses Medium

Zwar werden ganz offensichtlich zumindest die letzten beiden Randbedingungen bei der Anwendung von D’Arcys Gesetz in der Praxis verletzt, da D’Arcys Gesetz nur für den gesättigten Zustand gilt. Dieser Zustand ist jedoch für die praktische Anwendung z.B. im Resin Transfer Molding (RTM) Verfahren irrelevant, da der Injektionsprozess bei kompletter Sättigung des Halbzeugs beendet wird. Trotz dieser Tatsache konnte sich bisher noch kein besseres Modell durchsetzen. Folglich basieren Füllsimulationsprogramme, wie z.B. LIMS [13] oder LCM-FLOT [12], standardmäßig aufgrund seiner Einfachheit auf D’Arcys Gesetz. Die Verwendung solcher Software ist insbesondere bei der immer stärker ansteigenden Komplexität der herzustellenden Bauteile ein unabdingbares Hilfsmittel, um die trotz ihrer Zeit- und Kostenintensivität immer noch vorherrschende „Trial and Error“-Methode zur Werkzeugauslegung z.B. für den Harzinjektionsprozess (RTM) abzulösen.

In der Literatur gibt es Arbeiten, die sich mit den Auswirkungen von Extrema der in Gleichung (4.1) verwendeten Parameter auseinander setzen. Autoren wie z.B. Lekakou [57] kommen dabei zu dem Schluss, dass D’Arcys Gesetz auch in Extremfällen wie z.B. dem Füllen mit $Re > 0,75$ Bestand hat, wohingegen andere Autoren zu einem gegenteiligen Schluss kommen. Jedoch ist in diesem Zusammenhang nicht immer klar, ob die Untersuchungen im gesättigten, stationären Zustand, für den das Gesetz gilt, durchgeführt wurden, wie dies z.B. von Parnas [58] gefordert wird. Ob ein Unterschied zwischen den gemessenen Permeabilitäten im gesättigten und un-

gesättigten Zustand besteht, ist ebenfalls noch nicht eindeutig geklärt. Während [57,59,60,61,62] feststellten, dass der Quotient aus ungesättigten zu gesättigten Permeabilitätskennwerten deutlich kleiner als eins ist, stellten [63,64,65] Werte des Quotienten größer eins fest. Weitere Autoren stellten keinen klar erkennbaren Trend mit Quotientenwerten, die um den Wert eins pendeln, fest [19]. Weiterhin finden sich starke Unterschiede in den Aussagen über die Auswirkungen der Kapillarkräfte auf die Permeabilität. Während Dungan [61] keinen Einfluss der Kapillarkräfte feststellt, ermittelt Han [66] Permeabilitätserhöhungen von bis zu 20% infolge von Kapillarkräften. Ahn [67] stellt in seinen Versuchen durch Kapillarkräfte bedingte Druckdifferenzen von 0,01 bis 0,03 MPa bei einem Faservolumengehalt von 55 % fest. Bei der Verwendung von gängigen Injektionsdrücken zwischen 0,6 und 0,1 MPa stellt die maximale Druckdifferenz von 0,03 MPa zwischen 5 % und 30 % des Injektionsdrucks dar.

Dungan [61] resümiert, dass weder die Faseroberfläche noch die verwendete Flüssigkeit oder die Fließrate signifikanten Einfluss auf die Permeabilitätskennwerte haben. Dies wird von Hammond [68] ebenfalls unterstützt. Sehr wohl Einfluss haben nach Dungan's Meinung jedoch die Faserarchitektur, der Lagenaufbau, transversales Fließen in die einzelnen Faserbündel und die Tatsache, dass eine vollständige Imprägnierung des Faserhalbzeugs nicht direkt hinter der sichtbaren Fließfront stattfindet. Auch Luo [69] findet bei seinen Versuchen keine signifikante Beeinflussung der Permeabilitätskennwerte durch die Verwendung unterschiedlicher Flüssigkeiten. Seiner Ansicht nach geht ein Einfluss -falls vorhanden- in der generell bei Permeabilitätsversuchen bekannten großen Streuung von bis zu 30 % der Experimentalwerte unter. Im Gegensatz dazu stellt Gauvin [70] eine Abweichung der Permeabilitätskennwerte von bis zu 54 % bei ansonsten gleichen Versuchsbedingungen fest. Diese Abweichungen führt er auf die unterschiedlichen verwendeten Flüssigkeiten zurück.

Eine große Anzahl von Veröffentlichungen befasst sich nach wie vor mit der genauen Abbildung des eigentlichen Imprägniervorgangs innerhalb eines Faserhalbzeugs [71, 72,73,74]. Hier wurde insbesondere der sog. „Dual Scale Effect“ [75,76,77,78,79] von Forschern häufig beobachtet und beschrieben. Um diesen Effekt beschreiben zu können muss zunächst eine Unterscheidung der Fließvorgänge vorgenommen wer-

den. Man unterscheidet zwei verschiedene Fließvorgänge, das makroskopische und das mikroskopische Fließen. Als makroskopisches Fließen wird das Fließen in den Zwischenräumen der das Halbzeug darstellenden Faserbündel bezeichnet. Im Gegensatz dazu bezeichnet man das Fließen in den eigentlichen Faserbündeln als mikroskopisches Fließen. Je nach Architektur des Halbzeugs [80], dem gewählten Faservolumengehalt und dem angelegten Injektionsdruck können also in einem Faserhalbzeug die in Bild 4.1 schematisch dargestellten Fließfrontkonfigurationen eintreten. Legt man den Faservolumengehalt und das Faserhalbzeug fest, so lässt sich die in Bild 4.1 a) skizzierte Fließfront durch Anlegen eines sehr hohen Injektionsdrucks provozieren, wohingegen c) durch einen sehr geringen oder gänzlich fehlenden Injektionsdruck eintreten kann [81,82]. Bild 4.1 b) zeigt eine Konfiguration, bei der die durch den Injektionsdruck bedingte Fließgeschwindigkeit außerhalb der Rovings identisch ist mit der durch Kapillarkräfte innerhalb des Rovings angetriebenen Fließfrontgeschwindigkeit. Diese Konfiguration ist als ideal für die Imprägnierung eines Faserhalbzeugs anzusehen, da sie keine Chance bietet Luft hinter der Fließfront einzuschließen. Meist sind jedoch weder Konfiguration b) noch c) aufgrund der damit zum Teil verbundenen Prozesszeiterhöhung wirtschaftlich.

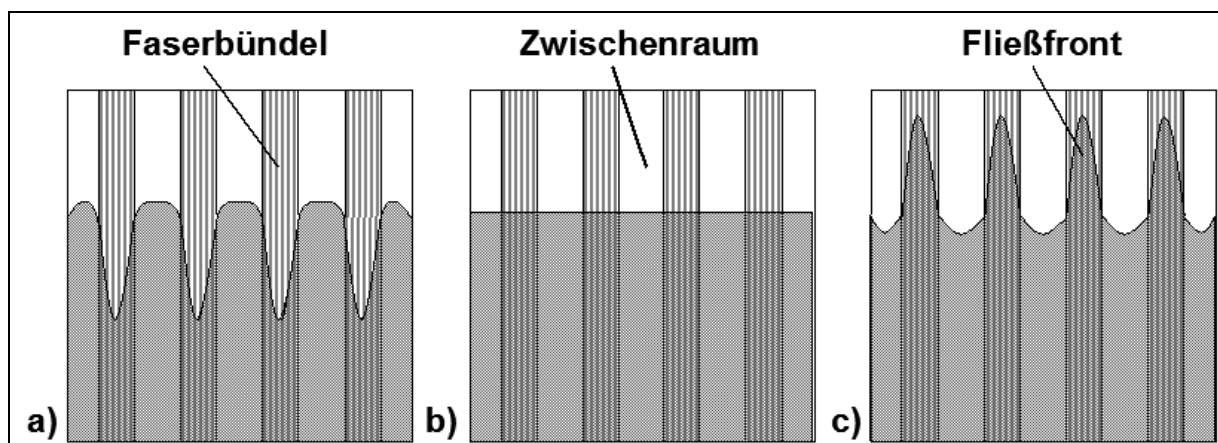


Bild 4.1 : Unterschiedliche Fließfrontausbildungen in Abhängigkeit von der Halbzeugarchitektur, dem Faservolumengehalt und den Prozessparametern. a) Voreilen der Fließfront zwischen den Faserbündeln. b) Identische Fließgeschwindigkeiten. c) Voreilen der Fließfront in den Faserbündeln

Leider ist ein direkter Vergleich der verschiedenen Aussagen nur bedingt möglich, da sich die verwendeten experimentellen Bestimmungsmethoden und Aufbauten, die untersuchten Faserhalbzeuge und die benutzten Flüssigkeiten zum Imprägnieren der

Halbzeuge sehr stark unterscheiden. Auch ist in der Literatur die ungenaue Beschreibung der Versuchsaufbauten und der Prozessparameter zu bemängeln. Aus diesem Umstand heraus leitet sich auch die Forderung nach einem einheitlichen Versuchsaufbau ab, der in einer Norm festgehalten werden muss. Initiativen in dieser Richtung gab es bereits in den USA, wo Parnas [83] neben einer Permeabilitätsdatenbank auch ein Referenzmaterial [84] zur Kontrolle der jeweiligen Messvorrichtungen vorstellte. Eine wichtige Arbeit wurde von Lundström [63] initiiert. Er untersuchte drei verschiedene Messmethoden zur Permeabilitätsbestimmung mit drei Faserhalbzeugen und ebenfalls drei verschiedenen Flüssigkeiten. Um die Auswirkungen der Versuchsdurchführung selbst begutachten zu können wurden Experimente mit einem Versuchsaufbau in drei Instituten durchgeführt. Lundström [63] kommt zu dem Schluss, dass sich zwar je nach angewendetem Messverfahren Unterschiede zwischen den ermittelten Permeabilitätskennwerten einstellen, dass aber weder der Injektionsdruck noch die injizierte Flüssigkeit signifikante Auswirkungen auf die Permeabilitätskennwerte haben. Seinen Beobachtungen zur Folge stellen die Probenvorbereitung und die Versuchsdurchführung durch den jeweiligen Benutzer die signifikantesten Einflüsse auf das Ergebnis dar. Vor diesem Hintergrund ist es von immenser Bedeutung die Versuchsdurchführung und Versuchsauswertung durch größtmögliche Automatisierung benutzerunabhängig zu machen. In Deutschland gibt es bereits seit einigen Jahren einen Arbeitskreis, der sich mit der Erstellung einer Norm befasst, die sowohl die Durchführung der Messung selbst als auch den geeigneten Versuchsaufbau festschreiben soll. Neben den in den Kapiteln 4.2 und 5.1 dieser Arbeit vorgestellten Versuchsaufbauten sind in [85,86] weitere vielversprechende, teilautomatisierte und standardisierbare Versuchsaufbauten zu finden.

4.1 Bisherige Methoden der Permeabilitätsbestimmung

Neben Eingabeparametern wie z.B. dem Injektionsdruck und der Viskosität ist insbesondere die Permeabilität des verwendeten Faserhalbzeuglagenaufbaus der Haupteinflussfaktor, der realitätsnahe Füllsimulationsergebnisse garantiert. Es gibt zur Bestimmung von Permeabilitätskennwerten einerseits modellbasierte Ansätze, andererseits existieren eine Vielzahl von experimentellen Messverfahren.

Numerische Verfahren stützen sich meist auf die Methode der Finiten Elemente und gehen bei der Beschreibung der Morphologie des Faserhalbzeugs von einer wieder-

kehrenden Einheitszelle aus [87,88,89,90,91]. In den vorbezeichneten Quellen wird größtenteils von recht guter Übereinstimmung zwischen Modell und Experiment berichtet. Der Nachteil dieser Modelle ist, dass keines bisher eine Allgemeingültigkeit nachgewiesen hat. Neben diesem generellen Nachweis ist meist eine sehr zeitaufwendige experimentelle Bestimmung der Eingabeparameter erforderlich. Diese Bestimmung wird meist durch das Herstellen von entsprechenden Laminatproben und die mikroskopische Auswertung von Schliffbildern des jeweiligen Laminatsquerschnitts [92] vorgenommen. Liegt keine experimentelle Bestimmung der Parameter zu Grunde, so werden eine theoretische Packungsdichte und der Faserdurchmesser zur Berechnung herangezogen [87]. Solche Modelle können die Realität, d.h. die nichtregelmäßige Struktur der Faserhalbzeuge nur sehr bedingt abbilden. Experimentelle Verfahren zur Bestimmung der Permeabilität hingegen erfassen diese Inhomogenitäten durch eine entsprechende Ergebnisstreuung in den Versuchswiederholungen.

Die in Bild 4.2 dargestellte Übersicht enthält alle relevanten experimentellen Versuchsmethoden kategorisiert nach dem Sättigungszustand des Faserhalbzeugs zum Zeitpunkt der Messung [93].

In den nachfolgenden Kapiteln werden die Messverfahren nach dem Freiheitsgrad der Ausbreitung des Fluids innerhalb der Halbzeugprobe klassifiziert. Dieses Vorgehen wurde ausgewählt, da insbesondere bei eindimensionalen Messverfahren der identische Aufbau sowohl für die Durchführung von ungesättigten als auch von gesättigten Permeabilitätsbestimmungen verwendet werden kann.

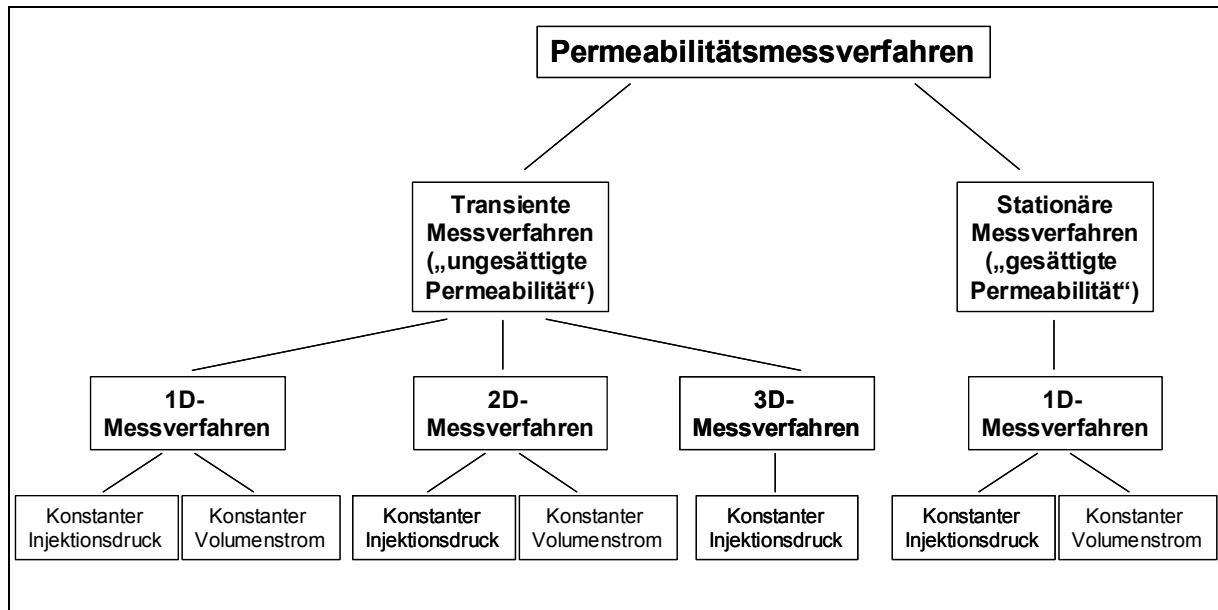


Bild 4.2: Klassifizierung der experimentellen Permeabilitätsmessverfahren

4.1.1 Eindimensionale Messverfahren

Betrachtet man den komplett gesättigten Zustand, so ist derzeit nur das eindimensionale Messverfahren anwendbar. Da zum Messen der gesättigten Permeabilität das Halbzeug stets komplett getränkt sein muss, hat man die Möglichkeit mit demselben Versuchsaufbau zwei Messungen mit einer einzigen Halbzeugprobe durchzuführen; eine ungesättigte Messung und daran anschließend eine gesättigte Messung.

Der am häufigsten für ungesättigte und gesättigte, eindimensionale Permeabilitätsmessungen verwendete Versuchsaufbau [94,95,96,97,98] ist in Bild 4.3 a) skizziert und zeigt den Ablauf einer ungesättigten Permeabilitätsbestimmung. Diese weite Verbreitung ist auf die Einfachheit sowohl in Bezug auf den Aufbau selbst als auch auf die Permeabilitätsberechnung zurückzuführen. Der eindimensionale Versuchsaufbau besteht in der Regel aus einer metallischen Grundplatte, in der die Injektionsöffnungen eingebracht sind, metallischen Abstandsrahmen unterschiedlicher Stärke und einer durchsichtigen Deckplatte zur Beobachtung der sich ausbreitenden Fließfront. In Bild 4.3 a) tritt die Flüssigkeit an der rechten Injektionsöffnung in die Kavität ein und füllt zunächst einen Hohlraum, bevor das eigentliche Faserhalbzeug entsprechend der in der Skizze dargestellten Pfeilrichtung imprägniert wird. Der die Fließfront antreibende Injektionsdruck wird an der Einlassöffnung mittels Druckaufnehmer

bestimmt. Um im gesättigten Zustand die notwendige Aussage über die in der Kavität anliegende Druckdifferenz zu erhalten, wird der Flüssigkeitsdruck zusätzlich in Fließrichtung hinter der Halbzeugprobe im Bereich der Austrittsöffnung bestimmt.

Gleichung (4.3) [99] stellt die Berechnung der eindimensionalen, ungesättigten Permeabilität K für die Randbedingung des konstanten Injektionsdrucks dar.

$$K = \frac{\mu \Phi x_f^2}{\Delta p \cdot 2t} \quad (4.3)$$

Die Viskosität ist als μ bezeichnet, die Porosität als Φ , die Fließfrontposition als x_f , die anliegende Druckdifferenz als Δp und die Injektionsdauer als t . Demgegenüber ist bei Verwendung eines konstanten Volumenstroms zur Ermittlung der eindimensionalen gesättigten Permeabilität die von Gauvin [100] aufgestellte Gleichung (4.4) anzuwenden:

$$K = \frac{\mu Q (x_2 - x_1)}{A_{\text{eff}} (p_1 - p_2)} \quad (4.4)$$

Hierbei stellen in Gleichung (4.4) die mit 1 indizierten Variablen die injektionsseitigen Werte und die mit 2 indizierten Variablen die injektionsfernen Werte dar. Ersetzt man in Gleichung (4.4) x_2 mit x_f , p_1 mit dem Injektionsdruck p_{inj} und setzt p_2 , welcher den Druck an der Fließfrontposition x_f darstellt, und x_1 , der dem Koordinatenursprung entspricht, gleich Null, so erhält man Gleichung (4.5). Diese ist zur Berechnung der ungesättigten Permeabilität bei konstantem Volumenstrom gebräuchlich. A_{eff} bezeichnet hierbei den effektiv durchströmbaren Bereich einer Querschnittsfläche A .

$$K = \frac{\mu Q x_f}{A_{\text{eff}} p_{\text{inj}}} \quad (4.5)$$

Eine interessante Variation dieses eindimensionalen Aufbaus stellt Lundström [101] vor, indem er die konventionelle Messung auf zwei Werkzeuge mit je zwei Kavitäten erweitert. Schematisch ist der Aufbau eines Werkzeugs in Bild 4.3 b) dargestellt. Die beiden notwendigen zentralen Injektionsöffnungen sind hydraulisch gekoppelt. Dieser Aufbau hat den Vorteil, dass in einem Versuch vier Halbzeugproben mit unterschiedlichen Entnahmewinkeln untersucht werden können. Alternativ kann die vierte Kavität auch mit einem Referenzmaterial, z.B. Glaskapillaren eines definierten Durchmessers, mit bekannter oder definierter Permeabilität gefüllt werden und dient der Verifikation. Diese Konfiguration reduziert den Arbeitsaufwand etwas und kann

gleichzeitig die Genauigkeit der Messung im Vergleich zur konventionellen eindimensionalen Messung erhöhen. Jedoch bleibt nach wie vor das Problem, dass die Halbzeugproben entlang der noch unbekanntenen Hauptachsenrichtungen bzw. in einem definierten Winkel dazu entnommen werden müssen. Folglich muss vor der eigentlichen Permeabilitätsbestimmung erst ein Versuch zur Feststellung dieser Richtungen durchgeführt werden. Da die meisten Faserhalbzeuge nur eine statistische Homogenität aufweisen, d.h. insbesondere die Richtungen der Hauptachsen variieren, müssen mehrere Versuche herangezogen werden um die Hauptachsenrichtungen festlegen zu können. Weicht man bei der Probenherstellung von diesen Hauptachsenrichtungen ab, so ist die Grundvoraussetzung der eindimensionalen Strömung nach D'Arcy verletzt. Im eigentlichen Versuch äußert sich diese Abweichung durch eine nicht senkrecht zu den Werkzeuglängsseiten verlaufende Fließfront. Auch stellt der „race-tracking“-Effekt [102,103,104], d.h. das Voreilen der Fließfront an den Kontaktbereichen des Faserhalbzeugs mit den Innenkanten der Kavität, eine je nach Ausprägung inakzeptable Messungenauigkeit dar. Lawrence [104] stellt ein simulationsgestütztes Auswerteverfahren vor, mit dem nach seinen Angaben die Auswirkungen des race-tracking-Effekts behoben werden können.

Alles in allem lässt sich feststellen, dass sich das eindimensionale Verfahren zwar in der Permeabilitätsberechnung einfacher darstellt, jedoch die Problematik des korrekten Ausschneidens der Proben und die erforderliche Abdichtung des Randbereichs zur Vermeidung von race-tracking-Effekten eher gegen die Verwendung dieses Verfahrens sprechen.

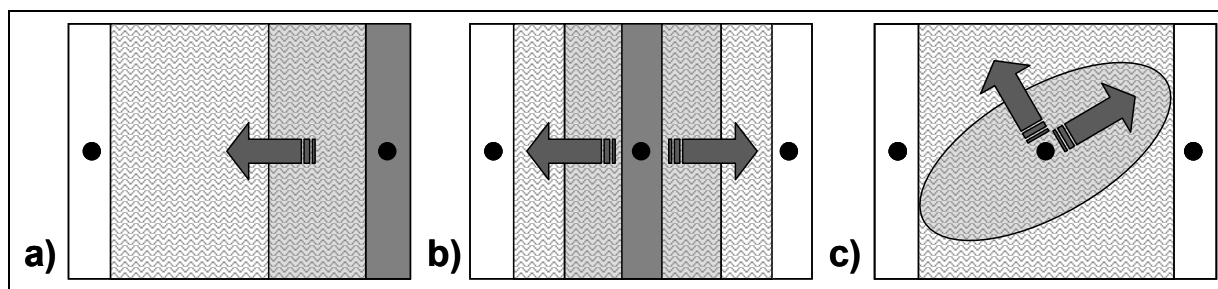


Bild 4.3: Möglichkeiten der experimentellen Durchführung von Permeabilitätsuntersuchungen. Die Pfeile stellen die Fließrichtung des Versuchsfluids dar. a) Konventioneller eindimensionaler Versuchsaufbau. b) Eindimensionaler Versuchsaufbau mit mehreren Kavitäten. c) Konventioneller zweidimensionaler Versuchsaufbau

4.1.2 Zweidimensionale Messverfahren

Im Gegensatz zu den eindimensionalen Messverfahren bietet die Verwendung zweidimensionaler Messverfahren folgende erhebliche Vorteile:

- Vorversuche zur Bestimmung der Hauptachsenrichtungen sind nicht erforderlich
- Durch die Positionierung des Angusspunkts in der Mitte des Faserhalbzeugs kann kein race-tracking-Effekt die Messung beeinflussen
- Ein Experiment liefert beide Hauptachsenpermeabilitätskennwerte, wodurch ein erhebliches Arbeitszeit- und Materialeinsparungspotenzial entsteht
- Bei Verwendung von durchsichtigen Werkzeughälften kann die Homogenität des Faserhalbzeugs während des Imprägnierungsvorgangs optisch beurteilt und ausgewertet werden

Als Nachteile des zweidimensionalen Messverfahrens werden in der Literatur häufig die kompliziertere Fließfrontpositionserfassung und das mathematisch komplexere Auswertungsverfahren genannt. Auch ist die Messung gesättigter Permeabilitäten in diesem Verfahren derzeit nicht möglich.

Der Versuchsaufbau [105] ist bis auf die Lage der Injektionsöffnung mit dem der eindimensionalen Messung identisch. Im Gegensatz zur der eindimensionalen Messung muss das Faserhalbzeug nicht exakt in die Kavität passen, da der Versuch vor dem Erreichen einer der Probenkanten beendet wird. Somit entfällt das von der eindimensionalen Messung her bekannte aufwendige, periphere Abdichten der Form gänzlich. Der Ablauf der Versuchsdurchführung ist in Bild 4.3 c) schematisiert dargestellt. Um eine zweidimensionale Strömung zu ermöglichen wird in die Mitte der Faserhalbzeugprobe ein Loch von definiertem Durchmesser eingebracht. Hierdurch füllt die unter Druck injizierte Versuchsflüssigkeit zunächst diesen Hohlraum aus, bevor die Ausbreitung als reine zweidimensionale Strömung in der Ebene stattfindet.

Besteht das Oberwerkzeug aus durchsichtigem Material, kann der Injektionsverlauf zu jedem Zeitpunkt erfasst werden. Hierdurch können insbesondere lokale Inhomogenitäten identifiziert werden, die z.B. durch fehlende Faserbündel (Rovings) im Halbzeug oder durch zusätzlich in die Halbzeugprobe eingebrachte Nähte verursacht werden können.

In Bezug auf die verwendeten Materialkombinationen für die Kavitätsgestaltung lassen sich die unterschiedlichen Aufbauten zur zweidimensionalen Permeabilitätsbestimmung in zwei Kategorien unterteilen:

- Messverfahren, bei denen die Fließfront optisch bestimmt [106,107,108,95] wird, und
- Messverfahren, welche die Fließfront durch sonstige Sensoren [66,85,86,109] erfassen.

Eine etwas exotischere Variante der Permeabilitätsmessung wird hauptsächlich von Daniel [109] vertreten. In der von ihm propagierten Methode wird der in die Kavität eintretende Luftstrom gemessen und aus dem daraus in der Form entstehenden quasi statischen Druckfeld die Permeabilität berechnet. Das Verfahren ist also generell eher den „gesättigten“ Messverfahren zuzuordnen. Bisher hat diese Form der Permeabilitätsbestimmung sich noch nicht durchsetzen können, da in diesem Fall wiederum eines der Grundprinzipien des Gesetzes von D’Arcy, die Inkompressibilität des Fluids, verletzt wird. Auch sind Bedenken aufgrund des stark verschobenen Viskositätsbereichs zu äußern, da die Differenz der dynamischen Viskosität μ von Luft ($\mu \approx 1,7 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$) und einem durchschnittlichen Harzsystem ($\mu \approx 0,15 \text{ Pa} \cdot \text{s}$) rund fünf Zehnerpotenzen beträgt. In diesem Zusammenhang schlägt Rudd [110] vor, Permeabilitätsmessungen ausschließlich mit den im späteren Produktionsprozess verwendeten Materialien durchzuführen. Nur so könnten seiner Meinung nach flüssigkeitsbedingte Einflüsse von Oberflächenspannung und Viskosität ausgeschaltet werden und folglich die genaueste Beschreibung des Imprägnierverhaltens dieser Flüssigkeits- und Materialkombination für die spätere Prozesssimulation ermittelt werden.

Zur Berechnung der Permeabilitätskennwerte existieren zwei Methoden. Die am häufigsten in der Literatur zitierte Methode wurde von Adams [111] veröffentlicht. Die zweite Methode wurde von Carter [112] aufgestellt und von Weitzenböck [113] verbessert. Weitzenböck [108] vergleicht die unterschiedlichen Methoden und kommt zu dem Schluss, dass die Ergebnisse der beiden Methoden kaum signifikante Abweichungen produzierten. Im Nachfolgenden werden die wichtigsten Schritte der Permeabilitätsbestimmung nach Adams aufgeführt, da diese Methode die Basis beider in dieser Arbeit vorgestellten Softwaremodule darstellt.

Gemäß Adams [111] beschreibt die Differenzialgleichung (4.6) die Bewegung einer ellipsenförmigen Fließfront in einem porösen Medium als Funktion der Zeit:

$$\frac{d\xi_f}{dt} = \frac{K_1 \Delta P}{\Phi \mu R_0^2} \left[\frac{\alpha}{1-\alpha} \right] \left[\frac{1}{(\xi_f - \xi_0)(\cosh^2 \xi_f - \cos^2 \eta)} \right] \quad (4.6)$$

ξ_f stellt die in ein elliptisches Koordinatensystem transferierten Ellipsenhalbachsen dar. Das Äquivalent des Winkels wird im elliptischen Koordinatensystem mit η , entsprechend Bild 4.4, angegeben.

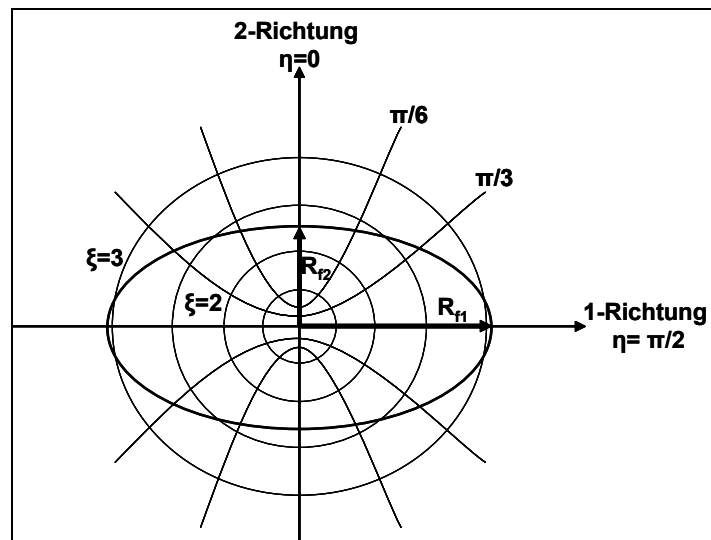


Bild 4.4 : Schematische Darstellung des Referenzkoordinatensystems (1, 2), welchem ein elliptisches Koordinatensystem (ξ , η) überlagert ist

R_0 entspricht dem Einlassradius im Ursprungskordinatensystem, welcher mittels Gleichung (4.7) zu ξ_0 im elliptischen Koordinatensystem transferiert wird:

$$\xi_0 = \ln \left[\frac{1 + \sqrt{\alpha}}{\sqrt{1-\alpha}} \right] \quad (4.7)$$

Hierbei stellt α den in Gleichung (4.8) beschriebenen Quotienten der beiden Hauptpermeabilitätskomponenten K_2 und K_1 dar.

$$\alpha = \frac{K_2}{K_1} \quad (4.8)$$

Unter der Anfangsbedingung, dass zum Zeitpunkt $t=0$ die elliptische Halbachsenlänge der Fließfront gleich dem transformierten Einlassöffnungsradius ist ($\xi_f = \xi_0$), lautet die Lösung der Differenzialgleichung (4.6) nach Adams [111]:

$$F(\xi_f, \eta) = (\xi_f - \xi_0) \left[\frac{\sinh(2\xi_f)}{4} + \frac{\xi_f}{2} \right] - \frac{\cos^2 \eta (\xi_f - \xi_0)^2}{2} + \frac{[\cosh(2\xi_0) - \cosh(2\xi_f)]}{8} +$$

$$\frac{(\xi_0^2 - \xi_f^2)}{4} = \left(\frac{\alpha}{1-\alpha} \right) t \quad (4.9)$$

Werden die Hauptachsenlängen der Ellipse im Hauptachsenkoordinatensystem (R_{f1} und R_{f2}) aus dem Experiment bestimmt, so lassen sich diese über Gleichung (4.10) und (4.11) in die entsprechenden elliptischen Äquivalente überführen:

$$\xi_{f1} = \frac{1}{\sinh} \left[\frac{R_{f1}}{R_0} \left(\frac{1}{\alpha} - 1 \right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (4.10)$$

$$\xi_{f2} = \frac{1}{\cosh} \left[\frac{R_{f2}}{R_0} (1-\alpha)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (4.11)$$

Hierbei bezeichnet die 1-Richtung die Richtung der größeren Permeabilität bzw. die große Hauptachsenrichtung der Fließfrontellipse. Um diese Transformation durchführen zu können, muss zunächst ein Anfangswert für das Anisotropieverhältnis α angenommen werden. Die mit diesem Anfangswert von α bestimmten elliptischen Radienäquivalente werden dann in Gleichung (4.9) eingesetzt. Da die Hauptachsenrichtung 1 mit $\eta=\pi/2$ und die Hauptachsenrichtung 2 mit $\eta=0$ entsprechend Bild 4.4 übereinstimmt, entstehen aus Gleichung (4.9) die folgenden beiden Gleichungen:

$$F_1(\xi_{f1}, \frac{\pi}{2}) = (\xi_{f1} - \xi_0) \left[\frac{\sinh(2\xi_{f1})}{4} + \frac{\xi_{f1}}{2} \right] - \frac{(\xi_{f1} - \xi_0)^2}{2} + \frac{[\cosh(2\xi_0) - \cosh(2\xi_{f1})]}{8} +$$

$$\frac{(\xi_0^2 - \xi_{f1}^2)}{4} = \left(\frac{\alpha}{1-\alpha} \right) t \quad (4.12)$$

$$F_2(\xi_{f2}, 0) = (\xi_{f2} - \xi_0) \left[\frac{\sinh(2\xi_{f2})}{4} + \frac{\xi_{f2}}{2} \right] + \frac{[\cosh(2\xi_0) - \cosh(2\xi_{f2})]}{8} + \frac{(\xi_0^2 - \xi_{f2}^2)}{4}$$

$$= \left(\frac{\alpha}{1-\alpha} \right) t \quad (4.13)$$

Trägt man die experimentell ermittelten Werte F_1 und F_2 über der jeweiligen Zeit t auf, so kann je eine Ausgleichsgerade für F_1 und F_2 ermittelt werden. Ist das Anisotropieverhältnis α nicht korrekt, sind die Steigungen der beiden Ausgleichsgeraden (m_1 und m_2) nicht identisch. Das gesamte Prozedere wird durch Iteration über α so-

lange wiederholt, bis die Summe der Fehlerquadrate der Steigungen minimiert ist. Mit dem korrekten Anisotropieverhältnis α und den bekannten Parametern des Experiments kann nun entsprechend Gleichung (4.14) die erste Hauptachsenpermeabilität K_1 bestimmt werden:

$$K_1 = m \frac{\mu \Phi R_0^2}{\Delta P} \left(\frac{1-\alpha}{\alpha} \right) \quad (4.14)$$

Unter Verwendung der Gleichung des Anisotropieverhältnisses (4.8) kann die zweite gesuchte Hauptachsenpermeabilität K_2 einfach bestimmt werden. Stehen die Hauptachsenwerte fest, so können über Gleichung (4.15) die Permeabilitätskennwerte K_θ zu jedem vorgegebenen planaren Winkel θ errechnet werden.

$$K_\theta = \frac{K_1 K_2}{K_1 \sin^2 \theta + K_2 \cos^2 \theta} \quad (4.15)$$

Dieser Berechnungsablauf für anisotrope Medien kann sogar erfolgreich in ein Tabellenkalkulationsprogramm wie z.B. MS-Excel übertragen werden, wenn das Zusatzmodul „Solver“ mitinstalliert wird. Dieser Solver leistet die iterative Optimierung des Anisotropieverhältnisses, die zur Lösung erforderlich ist.

4.1.3 Dreidimensionale Messverfahren

Um die Fließvorgänge innerhalb komplexerer Strukturen, bei denen sich die injizierte Flüssigkeit nicht nur in der Ebene, sondern auch transversal dazu ausbreitet, beschreiben zu können, bedarf es neben den Permeabilitätstensorkomponenten der Ebene (K_1 und K_2) auch der dritten Hauptkomponente K_3 . In diesem Fall wird D'Arcys Gesetz in dreidimensionaler Form angewendet. Die allgemeine dreidimensionale Form in kartesischen Koordinaten ist in Gleichung (4.16) dargestellt.

$$\begin{bmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \end{bmatrix} = -\frac{1}{\mu} \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{yx} & K_{yy} & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & K_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial p}{\partial x} \\ \frac{\partial p}{\partial y} \\ \frac{\partial p}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

Stimmen die drei Hauptachsen 1, 2 und 3 mit den Richtungen des kartesischen Koordinatensystems überein, so verbleiben im Permeabilitätstensor (Gleichung 4.17) nur die diagonalen Werte K_1 , K_2 und K_3 .

$$\underline{\underline{K}} = \begin{bmatrix} K_1 & 0 & 0 \\ 0 & K_2 & 0 \\ 0 & 0 & K_3 \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

Zur Bestimmung der transversalen Komponente des Permeabilitätstensors gibt es grundsätzlich zwei verschiedene Ansätze.

Der erste Ansatz geht davon aus, dass die ebenen Komponenten K_1 und K_2 des Permeabilitätstensors durch entsprechende Methoden bereits bekannt sind. Es wird daher nur noch die dritte Komponente experimentell bestimmt. Die Versuchsaufbauten bestehen meist aus kreisscheibenförmigen Kavitäten, in die entsprechende Faserhalbzeuglagen eingelegt werden. Die Flüssigkeit durchströmt das Halbzeug in transversaler Richtung. Die Angussgeometrie variiert zwischen einem zentralen Punktanguss oder einem Gitter, welches einem quasi flächigen Anguss entspricht. Zur Feststellung der Fließfrontposition werden einerseits optische Verfahren eingesetzt, andererseits kommen Druck- [114,115,116,117] und Ultraschallsensoren [118] zum Einsatz. Das optische Verfahren, welches aufgrund seines unkomplizierten Aufbaus am häufigsten Verwendung findet, beruht auf der Feststellung der Ankunftszeit der transversalen Fließfront an der durchsichtigen Deckplatte der Kavität in Verbindung mit einer Volumenstrommessung der injizierten Flüssigkeit. Durch den Einsatz von Simulationsprogrammen kann die dritte Komponente des Permeabilitätstensors iterativ ermittelt werden [117], indem die experimentelle Fließzeit als Abbruchkriterium eingesetzt wird.

Der zweite grundlegende Ansatz ist, alle Komponenten des Permeabilitätstensors direkt in einem Experiment zu bestimmen. Die experimentellen Methoden hierzu sehen meist vor, ein dreidimensionales Netz von Liniensensoren [119,120] entweder direkt bei der Halbzeugherstellung, z.B. durch Einweben, oder nachträglich in den zu untersuchenden Halbzeugstapel einzubringen. Durch diese Netzstruktur können Informationen über den dreidimensionalen Verlauf der Fließfront als Funktion der Zeit aufgenommen werden. Allerdings weisen die eingebrachten Sensoren Durchmesser zwischen 0,3 und 0,5 mm auf und sind somit im Vergleich zu üblichen Faserdurchmessern zwischen 0,016 und 0,006 mm durchaus als Störfaktoren zu bezeichnen. Insbesondere die Verfälschung der Messung durch an den Sensoren entlang vorwärtende Fließfronten ist nicht zu unterschätzen.

Nedanov [121] kombiniert beide Ansätze, indem er den zu erwartenden Fließfront-ellipsoiden über eine Koordinatentransformation in eine sphärische Geometrie umwandelt. Da die Ausbreitung in der Ebene entlang der beiden Hauptachsen optisch verfolgt werden kann und die Injektionszeit über das Erreichen der Fließfront an dem dem Injektionspunkt gegenüberliegenden Werkzeugkavität definiert ist, können alle drei Permeabilitätstensorelemente errechnet werden. Jedoch basiert der Aufbau von Nedanov [121] auf einer ebenen Plexiglasplatte, auf der ein Halbzeugstapel unter einer Vakuumfolie evakuiert wird. Das angelegte Vakuum bedingt einerseits die jeweilige Kompaktierung des Halbzeugstapels und andererseits die Progression der Fließfront innerhalb des Halbzeugs. Da aber die unter atmosphärischem Druck einströmende Flüssigkeit in dem imprägnierten Teil des Halbzeugs eine Reduzierung des Kompaktierungsdrucks durch Reduktion des lokalen Druckgradienten bewirkt, ist diese Art der Versuchsdurchführung als höchst fehlerhaft zu betrachten. Durch die Verwendung einer definierten starren Kavität, z.B. durch Verwendung von Abstandsrahmen, lässt sich dieses Fehlerpotenzial jedoch auf einfachste Art eliminieren.

4.2 Permeabilitätsbestimmung mit einer standardisierbaren Permeabilitätsmesszelle

An der Institut für Verbundwerkstoffe GmbH wurde ein Messverfahren entwickelt [122] und patentiert [123], welches unter Verwendung von dielektrischen Liniensensoren die Ausbreitung eines flüssigen Mediums innerhalb einer mit Faserhalbzeuglagen gefüllten Kavität aufnehmen kann. Dieses Messsystem wird zur Bestimmung der ebenen, zweidimensionalen Permeabilität entsprechend Kapitel 4.1.2 eingesetzt. Das in einen Werkzeugträger eingebaute, geöffnete Formwerkzeug mit integrierten kapazitiven Sensoren ist in Bild 4.5 dargestellt.

Das Funktionsprinzip dieser kapazitiven Sensoren entspricht dem eines Plattenkondensators, der seine Kapazität als Funktion des Plattenabstands, des enthaltenen Faserhalbzeugs und der die vorhandene Luft durch den Imprägnierprozess verdrängenden Flüssigkeit verändert.

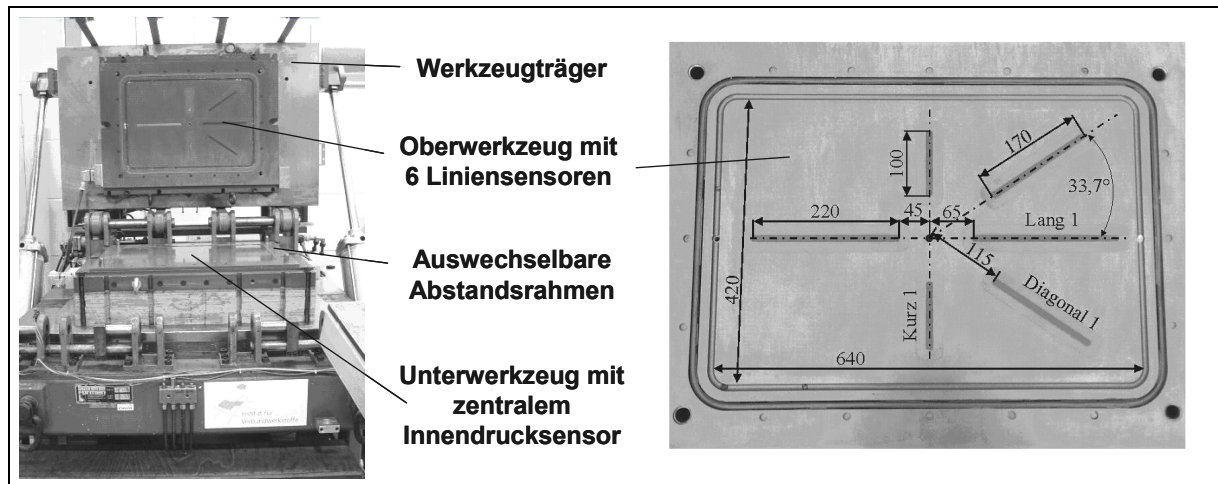


Bild 4.5: Standardisierbare 2D-Permeabilitätsmesszelle basierend auf kapazitiven Liniensensoren

Kissinger [122] stellt für die Kapazität des Sensorsystems folgende Gleichung auf:

$$C_{\text{ges}} = \left[\frac{1}{\frac{\varepsilon_0 (l_{\text{ges}} - l) w}{d_{\text{Luft}}} + \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_{\text{Fl}} l w}{d_{\text{Luft}}}} + \frac{1}{\frac{\varepsilon_0 \varepsilon_{\text{Fasern}} l_{\text{ges}} w}{d_{\text{Fasern}}}} \right]^{-1} + C_{\text{par}} \quad (4.18)$$

Gleichung (4.18) zeigt, dass sich die Gesamtkapazität C_{ges} aus einer Parallelschaltung der Kapazitäten C_{Luft} und $C_{\text{Flüssigkeit}}$ zusammensetzt, welche in Reihe mit der Kapazität der Fasern C_{Faser} geschaltet ist. Die parasitären Kapazitäten C_{Par} , welche durch gekrümmte Feldlinien im Bereich der Sensorränder entstehen, müssen nicht explizit berücksichtigt werden, da sie durch Leermessungen erfasst und in der Kalibrierung des Sensorsystems integriert sind. In Gleichung (4.18) steht ε für die Dielektrizitätskonstante. Subscript 0 entspricht Luft, während die Subscripte Fl und Fasern die Dielektrizitätskonstanten der Flüssigkeit und der Fasern bezeichnen. Der Parameter l_{ges} stellt die Sensorlänge dar, l und w entsprechen der von Flüssigkeit benetzten Sensorstrecke und der Breite des Sensors. Die Konstanten d_{Luft} und d_{Fasern} stellen die idealisierten Schichtdicken der in der Kavität befindlichen Materialien dar. Da Permeabilitätsmessungen bei konstanten Faservolumengehalten durchgeführt werden, haben Kapazitätsänderungen aufgrund unterschiedlicher Kavitätshöhen bzw. unterschiedlicher Kondensatorplattenabständen im Allgemeinen keine Auswirkung auf die eigentliche Fließfrontbestimmung. Sollte sich während eines Versuchs die Kavitätshöhe verändern, was z.B. durch einen Injektionsdruck erreicht

werden könnte, der oberhalb der Werkzeugschließkräfte liegt, so ist dies als spontane Steigungsänderung aller Sensorsignale zu erkennen. Aus Gleichung (4.18) ist dementsprechend ersichtlich, dass lediglich die Änderung der überstrichenen Sensorlänge l für die Fließfrontbestimmung innerhalb der geschlossenen Kavität ausschlaggebend ist.

Bei der Durchführung einer Messung mit diesem System wird der zu untersuchende Halbzeugstapel in die Kavität eingelegt und die Form geschlossen. In diesem Zustand zeigen die Sensorsignale einen konstanten Wert an. Leitet man die Injektion ein, so kann man gemäß Bild 4.6 erkennen, dass die Sensorsignale kontinuierlich mit Zunahme der überstrichenen Sensorlänge ansteigen. Ist die gesamte Sensorlänge mit Flüssigkeit überdeckt, geht das Signal wieder in eine Horizontale über.

Da die Länge des jeweiligen Sensors bekannt ist und Kissinger [122] experimentell verifiziert hat, dass der Zusammenhang zwischen Kapazitätsänderung und überstrichener Sensorlänge linear ist (Bestimmtheitsmaß $R^2 = 0,9943$), kann die Signaldifferenz zwischen den beiden oben beschriebenen Horizontalen (vgl. Bild 4.6) auf die Sensorlänge skaliert werden. Somit stehen nachträglich zu jedem Zeitpunkt der Injektion Informationen über den Fließfrontverlauf entlang der Liniensensoren zur Verfügung.

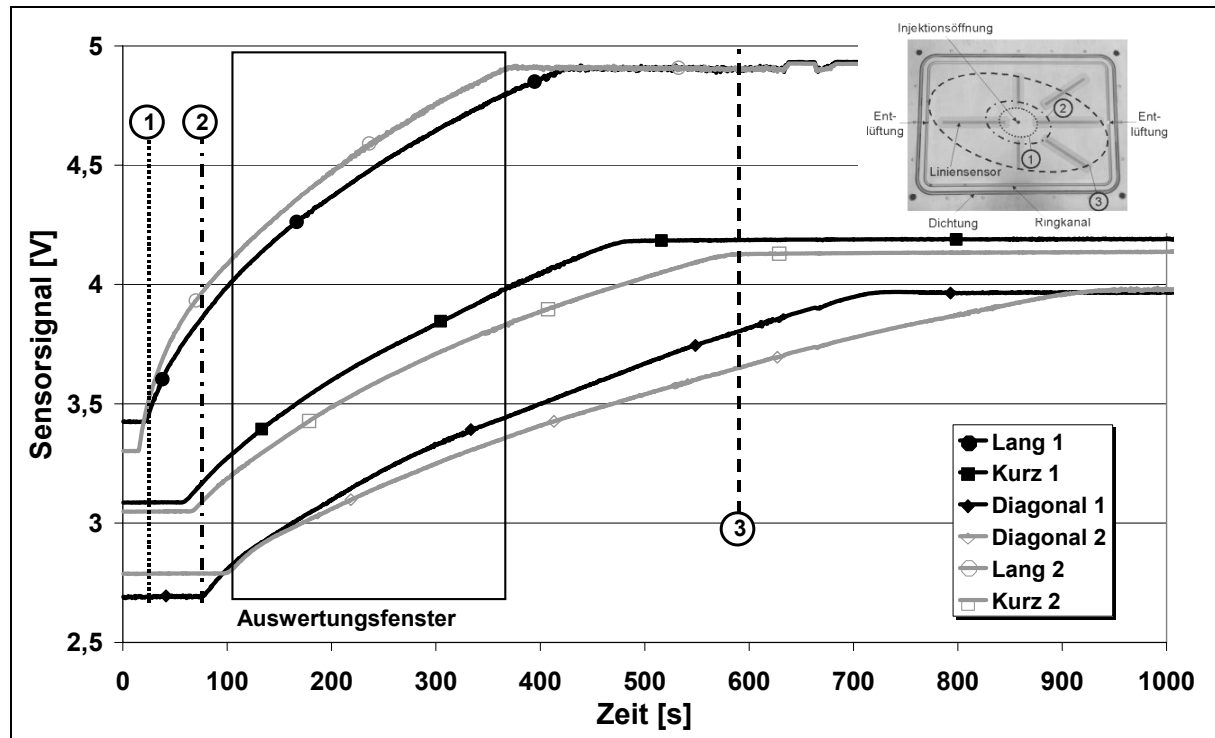


Bild 4.6: Beispiel einer sich im Werkzeug ausbreitenden Fließfront mit daraus resultierenden Sensorsignalen

Um die Qualität der Sensorsysteme im in die Werkzeugoberform integrierten Zustand begutachten zu können, wird die in Bild 4.7 dargestellte Testkavität aus Plexiglas eingesetzt. Die Linearitätsuntersuchungen werden ohne die Präsenz von Faserhalbzeugen ausgeführt, um mögliche Inhomogenitäten ausschließen zu können.

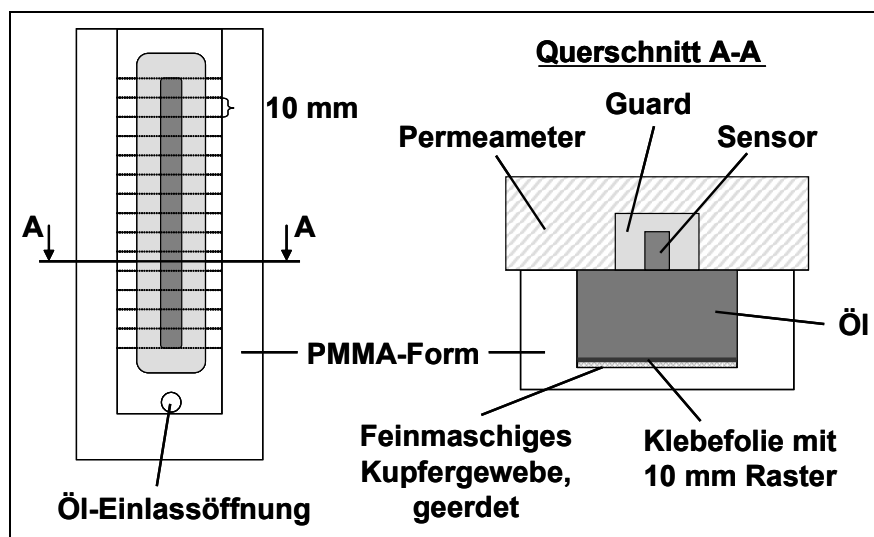


Bild 4.7: Versuchsaufbau zur Ermittlung der Linearität des verwendeten dielektrischen Messaufbaus

Die mit der Testkavität durchgeführten Linearitätsuntersuchungen wurden am Sensor „Kurz 2“ bei aufgeklapptem Werkzeugträger (vgl. Bild 4.5) ausgeführt. In die dem Sensor zugewandte Innenseite der PMMA-Testkavität wird zunächst ein sehr dünnes und feinmaschiges Kupfergewebe eingelegt, welches elektrisch geerdet ist und so als zweite Kondensatorplatte des Messsystems dient. Dieses Gewebe wird mit einer selbstklebenden Kunststoffolie abgedeckt, auf der parallele Linien im Abstand von 10 mm aufgedruckt sind. Die Versuchsdurchführung wird mit der Aktivierung der Messwertaufnahme gestartet, worauf die Kavität des Aufbaus über die Einlassöffnung langsam mit dem Pflanzenöl „Bellasan Reines Pflanzenöl aus Raps“ der Firma Bunge Deutschland GmbH, Mannheim gefüllt wird. Das ausgewählte Pflanzenöl wurde in allen in dieser Arbeit durchgeführten Injektionsversuchen verwendet und besitzt bei Raumtemperatur eine Viskosität von $0,065 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ (vgl. Bild 5.17). Bei Erreichen einer 10 mm Markierung wird der Ölzufuss für einige Sekunden unterbrochen, wodurch sich Plateaus im Sensorsignal ausbilden. Dieser Vorgang wird so lange fortgeführt, bis der komplette Sensor mit Flüssigkeit bedeckt ist. Die Auswertung der während des Versuchs aufgenommenen Bilder wird über das Programm „Vision Assistant“ von National Instruments vorgenommen. Hierbei dient das deutlich sichtbare 10 mm Raster als Skalierung bei der Umwandlung der Bildpunkte in Millimeter. Bild 4.8 a) zeigt die Lage des Koordinatensystems, wobei der Ursprung des Koordinatensystems in y-Richtung mit dem Beginn der Sensorfläche übereinstimmt. Die über die Bildauswertung gefundenen und in Bild 4.8 b) abgebildeten Helligkeitssprünge stellen einerseits die Flüssigkeitsoberfläche, andererseits die Rasterlinien dar. Aufgrund der sehr hohen Auflösung der verwendeten Fire-Wire-Kamera (AVT Marlin F-080C mit Pentax C418DX Objektiv) mit einer Auflösung von 1032×778 Bildpunkten, ist es möglich, jeweils zwei Kanten einer Linie zu definieren. Aus diesen beiden Punkten wird der jeweilige Mittelwert als Punkt auf der Rasterlinie definiert. Das gleiche Verfahren wird bei dem sich an der Innenseite der Kunststoffolie abzeichnenden Meniskus der Flüssigkeitsoberfläche angewandt.

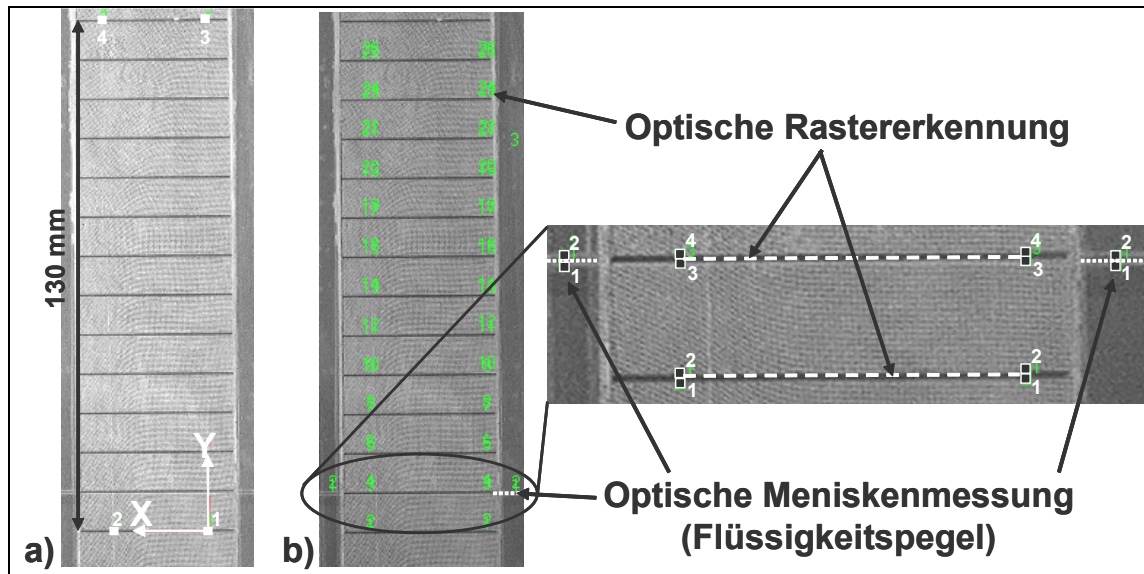


Bild 4.8: a) Kalibrieren der optischen Aufnahme (Umrechnen von Pixeln in mm)
b) Eigentliche Messung (je 4 Punkte des Rasters und des Meniskus)

Bild 4.9 zeigt das Ergebnis dieses Versuchs. Es sind dabei sowohl die Längenwerte, die mit dem optischen Auswerteverfahren aufgenommen wurden, als auch die mit dem dielektrischen Sensorsystem aufgenommenen Längenwerte nebeneinander aufgetragen. Die hierbei maximal festgestellte Abweichung als Differenz der beiden Strecken beträgt 2 mm, wobei sich die aus den Messwerten ermittelte Standardabweichung auf Stichprobenbasis zu 1,2 mm berechnet.

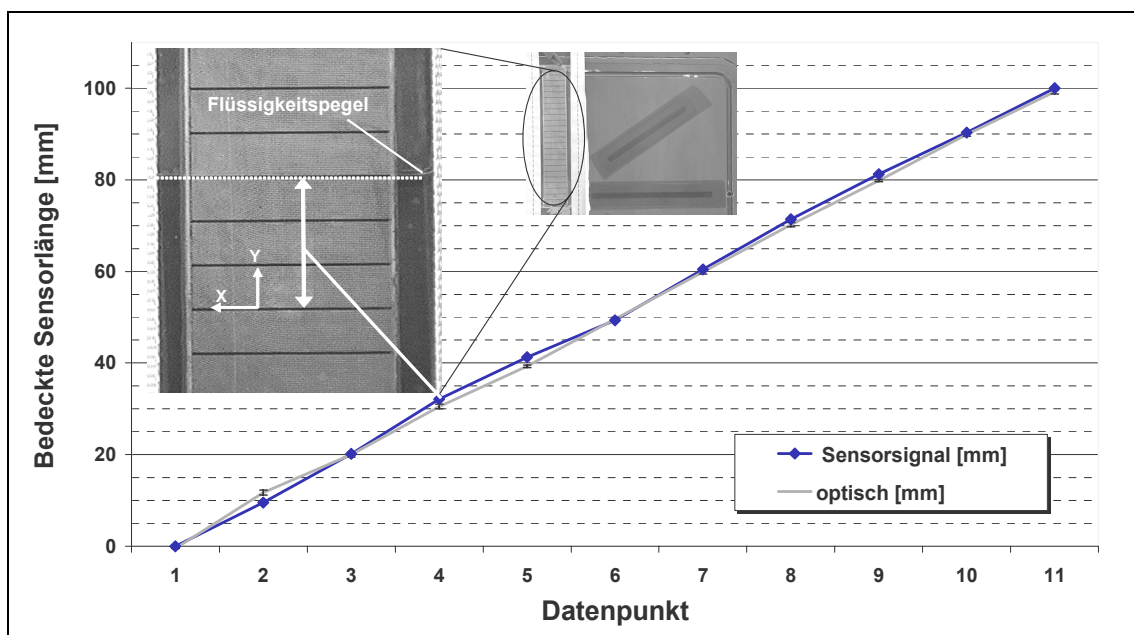


Bild 4.9: Linearitätsuntersuchung des dielektrischen Sensors „Kurz 2“

4.2.1 Analytische Ermittlung der Fließfrontellipsen anhand von Messwerten der dielektrischen Sensoren

Da zur Bestimmung der Permeabilitätskennwerte entsprechend den in Kapitel 4.1.2 dargestellten Gleichungen (4.10) bis (4.14) die Längen der beiden Hauptachsen erforderlich sind, müssen diese aus den Sensorsignalen berechnet werden.

Die einfachste Möglichkeit diese Informationen zu errechnen besteht darin, aus den Sensorsignalen die Gleichung der Fließfrontellipse zu bestimmen und daraus die gesuchten Hauptachsenlängen abzuleiten. Hierzu geht man von der in Gleichung (4.19) abgebildeten allgemeinen Form einer Ellipsengleichung aus, bei der sich das kartesische Koordinatensystem im Ursprung der Ellipse befindet und welche eine Rotation der Hauptachsen der Ellipse um den Ursprung in der Ebene zulässt.

$$ax^2 + by^2 + 2cxy = 1 \quad (4.19)$$

Zur Bestimmung der Koeffizienten a, b und c aus Gleichung (4.19) wird folgendes Gleichungssystem aufgestellt:

$$ax_1^2 + by_1^2 + 2cx_1y_1 = 1 \quad (4.20)$$

$$ax_2^2 + by_2^2 + 2cx_2y_2 = 1 \quad (4.21)$$

$$ax_3^2 + by_3^2 + 2cx_3y_3 = 1 \quad (4.22)$$

Hierbei stellen x_i und y_i die Koordinaten dreier Punkte \bar{P} auf der Fließfrontellipse dar. Da das Werkzeug über sechs integrierte Liniensensoren verfügt, stehen zur Lösung des Gleichungssystems (4.20) bis (4.22) zu jedem Zeitpunkt die in Bild 4.10 dargestellten sechs diskreten Punkte auf der theoretischen Fließfrontellipse zur Verfügung. Aufgrund dieser Überdefinition muss der Bediener des Auswertungsprogramms der standardisierbaren Permeabilitätsmesszelle zwischen verschiedenen Sensortriplets auswählen. Die Auswahl ist dadurch eingeschränkt, dass jeweils nur ein kurzer Sensor (Punkte P1 oder P5), ein langer Sensor (Punkte P3 oder P6) und ein diagonaler Sensor (Punkte P2 oder P4) ausgewählt werden kann. Eine entsprechende Fallunterscheidung ist in der standardisierbaren Permeabilitätsmesszelle integriert. Da das Sensorsystem nur die überstrichene Sensorlänge misst, ergibt sich die Position der Fließfront vom Ursprung aus als Summe der gemessenen Länge und der konstruktiv bedingten Einbaudistanz des jeweiligen Sensors (vgl. Bild 4.5). Diese Gesamtlänge

wird im Folgenden als Strecke P_j bestimmt, wobei das j die jeweilige Sensorposition (1-6) darstellt.

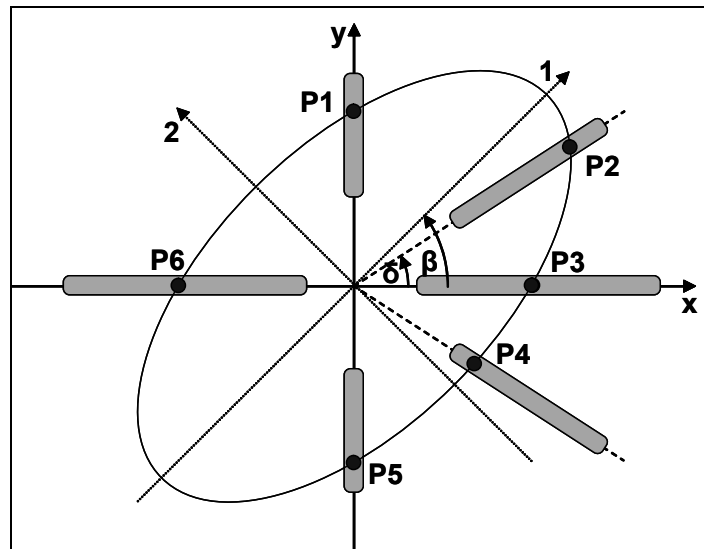


Bild 4.10: Sensorbasierte Punkte auf der theoretischen Fließfrontelliptipse

Unter der Annahme, dass die Punkte P1, P2 und P3 für die Auswertung herangezogen werden, können aus Gleichung (4.20) und (4.22) die Parameter a und b bestimmt werden:

$$\text{Mit } \overline{P1} (0, y_1) \quad b = \frac{1}{\overline{P1}^2} \quad (4.23)$$

$$\text{Mit } \overline{P3} (x_3, 0) \quad a = \frac{1}{\overline{P3}^2} \quad (4.24)$$

Die Komponenten der Strecke $\overline{P2}$ ergeben sich entsprechend Bild 4.10 zu $x_2 = \overline{P2} \cdot \cos(\delta)$ und $y_2 = \overline{P2} \cdot \sin(\delta)$. Der Winkel δ ist für beide diagonalen Sensoren konstruktiv festgelegt und beträgt für P2 von der x-Achse aus $33,7^\circ$ bzw. für P4 $-33,7^\circ$. Unter Einsatz von Gleichung (4.23) und (4.24) in Gleichung (4.21) ergibt sich der letzte Parameter zu:

$$\text{Mit } P2 (\overline{P2} \cdot \cos(\delta), \overline{P2} \cdot \sin(\delta)) \quad c = \frac{1 - \frac{(\overline{P2} \cdot \cos(\delta))^2}{\overline{P3}^2} - \frac{(\overline{P2} \cdot \sin(\delta))^2}{\overline{P1}^2}}{2 \cdot \overline{P2}^2 \cdot \cos(\delta) \cdot \sin(\delta)} \quad (4.25)$$

Löst man Gleichung (4.19) nach x , bzw. y auf, so kann jeder Punkt auf der elliptischen Fließfront bestimmt werden.

$$y_{1,2} = \frac{1}{2 \cdot b} * \left[-2 \cdot c \cdot x \pm 2 \cdot \sqrt{c^2 \cdot x^2 - a \cdot b \cdot x^2 + b} \right] \quad (4.26)$$

$$x_{1,2} = \frac{1}{2 \cdot a} * \left[-2 \cdot c \cdot y \pm 2 \cdot \sqrt{c^2 \cdot y^2 - a \cdot b \cdot y^2 + a} \right] \quad (4.27)$$

Um die Längen der beiden Hauptachsen zu bestimmen, müssen die reellen Eigenwerte von Gleichung (4.19) bestimmt werden. Hierzu wird entsprechend [124] die in Gleichung (4.28) dargestellte Determinante bestimmt und die daraus resultierende quadratische Gleichung (4.29) gelöst.

$$\det \begin{bmatrix} a - \lambda & \frac{c}{2} \\ \frac{c}{2} & b - \lambda \end{bmatrix} = 0 \quad (4.28)$$

$$\lambda^2 - \lambda \cdot (a + b) + a \cdot b - \frac{c^2}{4} = 0 \quad (4.29)$$

Die Lösungen von Gleichung (4.29), die Eigenwerte λ_1 und λ_2 , stellen die beiden Hauptachsen der Ellipse dar:

$$\lambda_{1,2} = \frac{(a + b)}{2} \pm \frac{1}{2} * \sqrt{(a - b)^2 + c^2} \quad (4.30)$$

Über die durch die Eigenvektoren definierte Drehmatrix lässt sich der Drehwinkel β der Drehmatrix entsprechend Bild 4.10 bestimmen.

$$\beta = \frac{\arctan\left(\frac{2 \cdot c}{a - b}\right)}{2} \quad \text{für } a > b \quad (4.31)$$

$$\beta = \frac{\pi - \arctan\left(\frac{2 \cdot c}{a - b}\right)}{2} \quad \text{für } a < b \quad (4.32)$$

4.2.2 Versuchsergebnisse der 2D-Permeabilitätsbestimmung

Die Anwendung der Permeabilitätsmesszelle in der Praxis wird im Nachfolgenden an den bereits aus Kapitel 3.2 bekannten Materialien durchgeführt. Diese Materialien sind in Bild 3.2 dargestellt. Es handelt sich um das biaxiale Glasgelege (Material D), das triaxiale Glasgelege (Material E) und das sehr grobe Rovingglasgewebe (Material A). Bei der Probenvorbereitung werden jeweils drei Materialbahnen direkt von der Rolle auf den Tisch eines CNC-Cutters abgerollt. Der zur Verfügung stehende Cutter

(vgl. Bild 4.11) arbeitet mit einem oszillierenden, um 360° drehbaren Messerkopf, der das mit einer Vakuumfolie abgedeckte und durch das anliegende Vakuum fixierte Schneidgut bearbeitet.

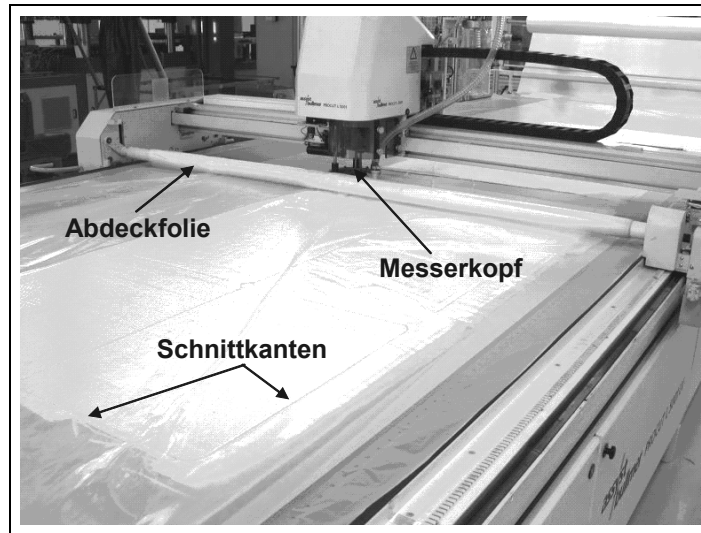


Bild 4.11: Bullmer CNC-Cutter mit drehbarem oszillierendem Messerkopf und optionalem Bohrkopf

Um zu vermeiden, dass die eingebrachten Schnitte die Qualität des fixierenden Vakuums reduzieren, deckt eine zwischen der linken Auflagetischseite und der Traverse des Schneidkopfs angebrachte Abdeckfolienabrolleinrichtung die bereits bestehenden Einschnitte mit einer zusätzlichen Folienbahn ab. Durch die Vakuumfixierung werden hochwertige Schnittqualitäten erzielt, was sich insbesondere im Kantenbereich der verwendeten Halbzeuge bemerkbar macht. Wie in Bild 4.12 im rechten unteren Eckbereich der Probe zu ersehen ist, bildet lediglich das Ende des umlaufenden Schnitts am Punkt des erstmaligen Eintauchens des Messers in das Schneidgut ein punktuelleres Ausfransen des Kantenbereichs. Das für die 2D-Permeabilitätsmessung erforderliche Loch in der Mitte der Probe kann direkt über den am Messerkopf des CNC-Cutters angebrachten Bohrkopf mittels eines Hohlbohrers eingebracht werden.

Die Abstandsrahmen, welche die Kavitätshöhe der Permeabilitätsmesszelle definieren, stehen von 2,45 mm bis 6,45 mm Stärke in 1 mm-Schritten zur Verfügung. Durch Kombinationen aus der eingebrachten Halbzeuglagenanzahl und der verwendeten Kavitätshöhe lassen sich eine Vielzahl von Faservolumengehalten generieren. Jedoch kann es vorkommen, dass der gewünschte Zielfaservolumengehalt

insbesondere bei Vergleichsmessungen mehrerer Materialien nicht immer für alle Materialien einzustellen ist.

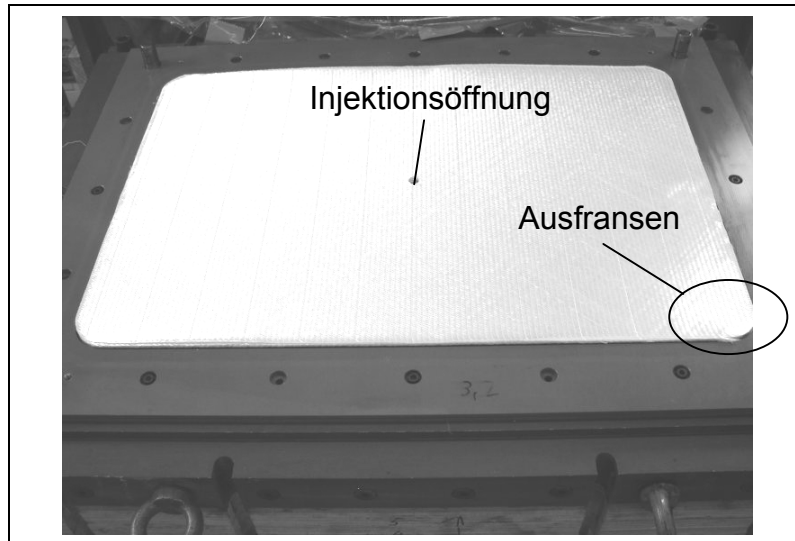


Bild 4.12: Über einen CNC-Cutter ausgeschnittene und in die Kavität der Permeabilitätsmesszelle eingelegte 6-lagige Faserhalbzeugprobe

Für die mit der Permeabilitätsmesszelle durchgeführten Versuche stellt Tabelle 4.1 die Kombinationen aus Lagenanzahl und Kavitätshöhe mit dem daraus resultierenden Faservolumengehalt dar.

Tabelle 4.1: Eingestellte Faservolumengehalte als Kombination aus Halbzeuglagenanzahl und Kavitätshöhe

Material	Halbzeuglagenanzahl	Kavitätshöhe	Faservolumengehalt
Gewebe (A)	4	2,45 mm	53,4 %
	6	3,45 mm	56,8 %
	9	4,45 mm	66,1 %
Biaxiales Gelege (D)	4	3,45 mm	55,3 %
	3	2,45 mm	58,4 %
	6	4,45 mm	64,3 %
Triaxiales Gelege (E)	4	3,45 mm	56,2 %
	3	2,45 mm	59,3 %
	6	4,45 mm	65,4 %

Pro Versuch werden drei Versuchswiederholungen durchgeführt. Während der eigentlichen Versuchsdurchführung werden die Signale aller sechs im Werkzeug integrierten Liniensensoren zusammen mit dem in der Form anliegenden Injektionsdruck und der Versuchszeit aufgezeichnet. Diese aufgezeichneten Informationen werden mit den Benutzereingaben zu Faservolumengehalt, Kavitätshöhe, Viskosität der

Flüssigkeit und dem Einlassradius in der Benutzeroberfläche des Permeabilitätsberechnungsmoduls der Permeabilitätsmesszelle verarbeitet. Gemäß der im vorherigen Kapitel festgelegten mathematischen Beschreibung der Fließfrontellipse (vgl. Gleichung 4.19) können jeweils nur drei Sensoren zur Permeabilitätsbestimmung herangezogen werden. Durch die Randbedingung, dass nur jeweils ein langer Sensor (L1 oder L2), ein kurzer Sensor (K1 oder K2) und ein diagonaler Sensor (D1 oder D2) ausgesucht werden können, ergeben sich acht mögliche Kombinationsvariationen. Das Ergebnis einer Permeabilitätsbestimmung ist exemplarisch an biaxialem Gelege (Material D) für die Hauptachsenpermeabilität K1 in Bild 4.13 und für die Hauptachsenpermeabilität K2 in Bild 4.14 bei jeweils 64,3 % Faservolumengehalt dargestellt.

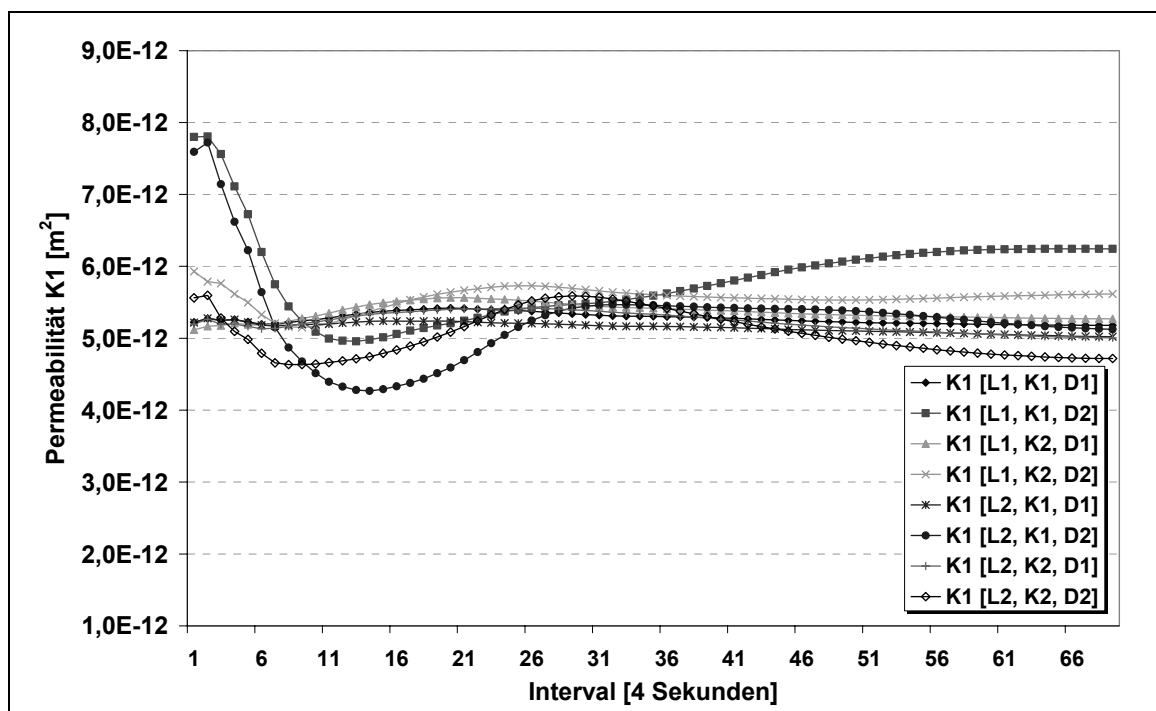


Bild 4.13: Ergebnis der Permeabilitätsbestimmung (K1) an biaxialem Gelege D bei 64 % Zielfaservolumengehalt als Funktion der ausgewählten Sensortriplets. Die Intervallbreite zwischen jedem dargestellten Punkt beträgt 4 Sekunden

Das für die Auswertung ausgewählte Zeitintervall von 4 Sekunden hat zur Folge, dass die erste Berechnung mit den Messwerten der ersten 4 Sekunden ausgeführt wird. Die darauf folgende Berechnung umfasst dann zwei Intervalle zu je 4 Sekunden. Die Anzahl der Berechnungsintervalle ergibt sich aus dem ganzzahligen Quotienten des Auswertungsfensters (vgl. Bild 4.6) und der frei wählbaren Zeitintervall-

breite. Aus Bild 4.13 und Bild 4.14 wird ersichtlich, dass die Permeabilitätskennwerte bei geringer Intervallanzahl stark divergieren.

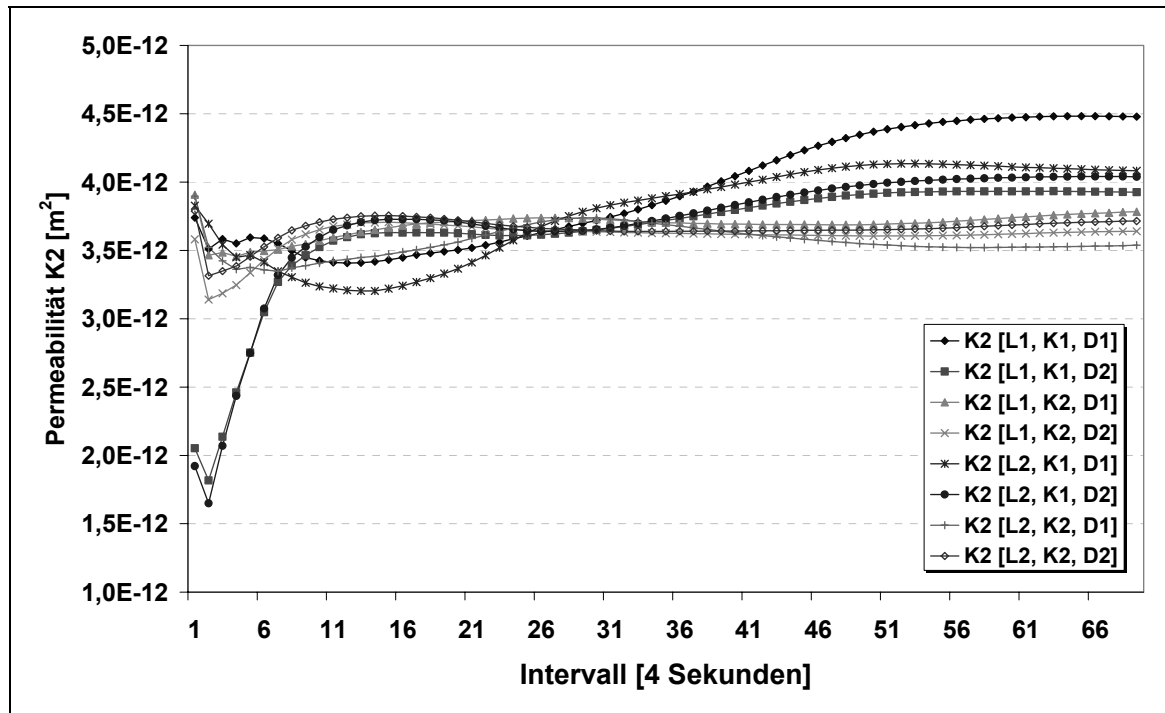


Bild 4.14: Ergebnis der Permeabilitätsbestimmung (K_2) an biaxialem Gelege D bei 64 % Zielfaservolumengehalt als Funktion der ausgewählten Sensortriplets. Die Intervallbreite zwischen jedem dargestellten Punkt beträgt 4 Sekunden

Eine Begründung für diese Diskrepanz kann einerseits in der Tatsache gefunden werden, dass sich zu diesem frühen Zeitpunkt die Fließfront innerhalb des Faserhalbzeugs noch nicht annähernd gleichmäßig entwickelt hat. Andererseits unterscheiden sich in diesem frühen Stadium die berechneten Fließfrontellipsen erheblich voneinander. Betrachtet man Bild 4.13, so zeigt sich, dass die Verwendung der Sensoren K1 und D2 unabhängig von den ausgewählten Sensoren L1 oder L2 zu einem scheinbaren Anstieg der Permeabilität führen, der sich aber über dem zeitlichen Verlauf auf das normale Niveau der anderen Kombinationen einschwingt. Umgekehrt fällt die Hauptachsenpermeabilität K_2 in Bild 4.14 bei besagten Kombinationen scheinbar an. Ab dem etwa fünfundzwanzigsten Intervall kann man davon ausgehen, dass die Fließfront voll entwickelt ist, da die Permeabilitätskennwerte sich einer Horizontalen annähern. Jedoch weicht auch in diesem späten Stadium die Kombination aus den Sensoren L1, K1 und D2 vom sonstigen Trend ab. Dies ist für K_2 nicht der Fall. Hier zeigt sich eher die Sensorkombination L1, K1, D1 als am stärksten abwei-

chend. Nicht immer ergeben die Sensorkombinationen einen eindeutigen Trend. Im Fall des in Bild 4.15 ersichtlichen triaxialen Geleges (Material E) bei 59,3 % Faservolumengehalt kommt es beispielsweise zur Ausbildung von zwei Horizontalen auf unterschiedlichem Niveau. Entscheidend für die Zuordnung zu einer der beiden Gruppen ist die Wahl des Sensors L1 oder L2.

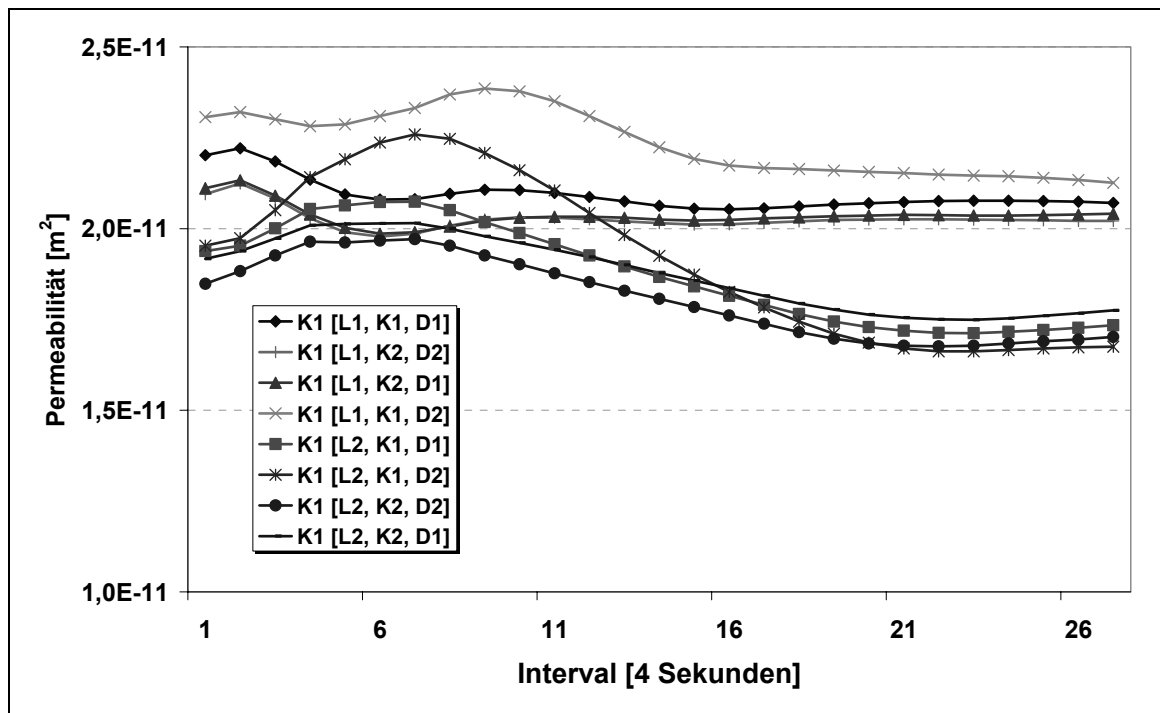


Bild 4.15: Ergebnis der Permeabilitätsbestimmung (K1) an triaxialem Gelege E bei 59,3 % Zielfaservolumengehalt als Funktion der ausgewählten Sensortriplets

Betrachtet man die in Bild 4.16 dokumentierten Ergebnisse für Rovinggewebe (Material A), so ergibt jede Sensorkombination eine eigene Fließfrontkurve mit daraus resultierenden Permeabilitätskennwerten, die nicht konvergieren. Die Ergebnisse schwanken innerhalb einer Bandbreite von rund zwei Zehnerpotenzen. Im Vergleich dazu schwanken die vorher betrachteten Materialien weniger als eine halbe Zehnerpotenz. Auch kommt im Fall des Gewebes die Tatsache erschwerend hinzu, dass das Auswertungsfenster bei diesem Material durch das architekturbedingte Imprägnierverhalten recht klein ist.

Das eigentliche Auswertungsfenster definiert sich als Zeitspanne zwischen dem Zeitpunkt, an dem der letzte Sensor erstmalig Kontakt mit der ihn überstreichenden

Flüssigkeit hat, bis zu dem Zeitpunkt, an dem der erste Sensor komplett von der ihn überströmenden Flüssigkeit benetzt ist (vgl. Bild 4.6).

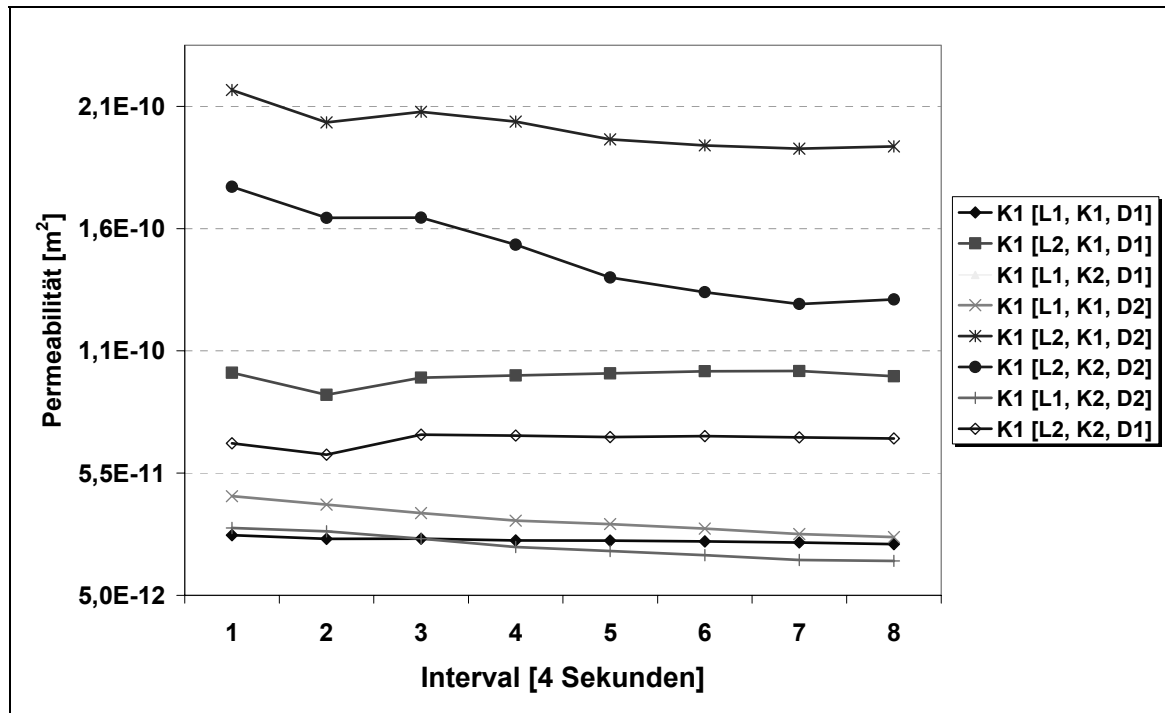


Bild 4.16: Ergebnis der Permeabilitätsbestimmung (K1) an Rovinggewebe A bei 56,8 % Zielfaservolumengehalt als Funktion der ausgewählten Sensortriplets

Die Wahl eines so definierten Auswertungsfensters garantiert, dass alle Sensortriplets zur Berechnung herangezogen werden können. Ein Verlassen des Auswertungsfensters ist manuell möglich, jedoch muss sichergestellt sein, dass die Fließfront noch an keiner Seite der Form angekommen ist. Da dies über die Sensorstrecken hinaus nicht sichergestellt ist, sollte davon nur in Ausnahmen Gebrauch gemacht werden. Die automatische Wahl des Auswertungsfensters verhindert, dass eine Verfälschung der Ausbreitungsellipsen durch einen Sensor, der schon sein Maximum erreicht hat, ermöglicht wird.

Im Fall des Rovinggewebes A zeigt sich jedoch auch ein möglicher Nachteil des automatischen Auswertungsfensters. Im Falle dieses Materials ist die Probeentnahmerichtung um 90 ° bezogen auf eine optimale Probenentnahmerichtung verdreht. Dadurch liegt die Hauptfließrichtung „1“ annähernd parallel zu den kurzen Sensoren (vgl. Bild 4.17). Aufgrund einer solchen Einlegeposition kann sich dieses Auswertungsfenster vereinzelt so stark reduzieren, dass aufgrund der geringen An-

zahl von Messwerten eine Auswertung entweder stark eingeschränkt oder gar unmöglich ist. Im Fall des Rovinggewebes A in Bild 4.17 wird deutlich, dass das Auswertungsfenster nur rund 30 Sekunden umfasst. Da die Hauptachsenrichtungen des Materials nicht im Vorhinein feststehen, kann es zu solchen Auswertungsproblemen kommen. Eine quadratische Werkzeugform mit äquidistant und angussnah platzierten Sensoren minimiert dieses Problem.

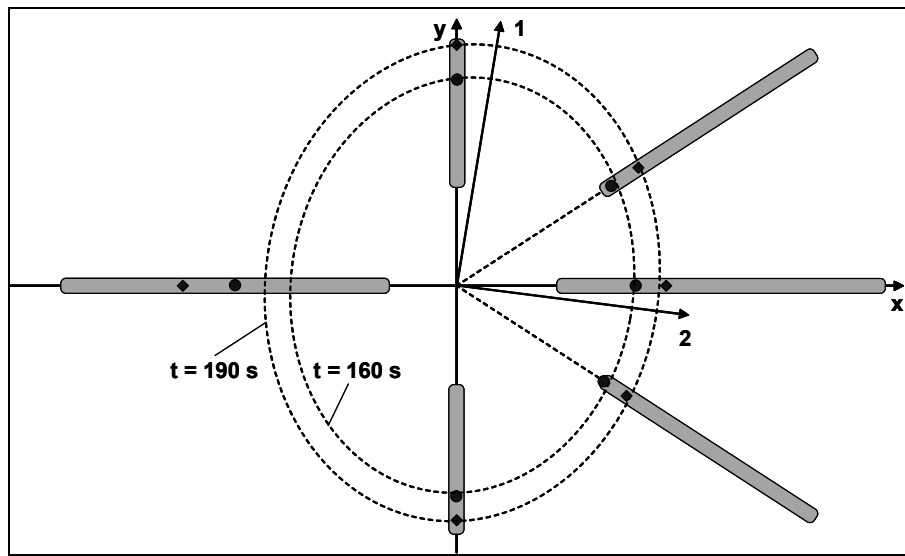


Bild 4.17: Einfluss der Orientierung der Permeabilitätshauptachsen und des Anisotropiegrads des zu untersuchenden Halbzeugs auf die Auswertbarkeit von Permeabilitätsmessungen am Beispiel von Gewebe A

Zieht man alle Permeabilitätsauswertungen der Sensortripletkombinationen eines Versuchs heran und bildet daraus einen Mittelwert, so lassen sich die Abweichungen der Permeabilitätsauswertungen als Standardabweichung zu diesem Mittelwert ausdrücken. Um diese Vorgehensweise zu verdeutlichen, wird wiederum das biaxiale Gelege bei 64 % Faservolumengehalt herangezogen. Aus den Versuchswiederholungen für dieses Material lassen sich die in Bild 4.18 dargestellten Permeabilitätsgraphen für die Hauptachsenpermeabilität K_1 ermitteln. Anhand der Standardabweichungen kann über die Streuung der Ergebnisse der jeweiligen Triplettauswertung auf die Gleichmäßigkeit des Materials zurückgeschlossen werden. Da in den meisten Fällen nicht nur Permeabilitätsuntersuchungen an einem Faservolumengehalt angestellt werden sollen, ist es üblich die Permeabilitätsergebnisse als Funktion des Faservolumengehalts aufzutragen. Hierzu wird der Mittelwert aus den in Bild 4.18 gezeigten Ergebnissen gebildet. Die Standardabweichungen errechnen sich ebenfalls aus den in Bild 4.18 dargestellten Abweichungen.

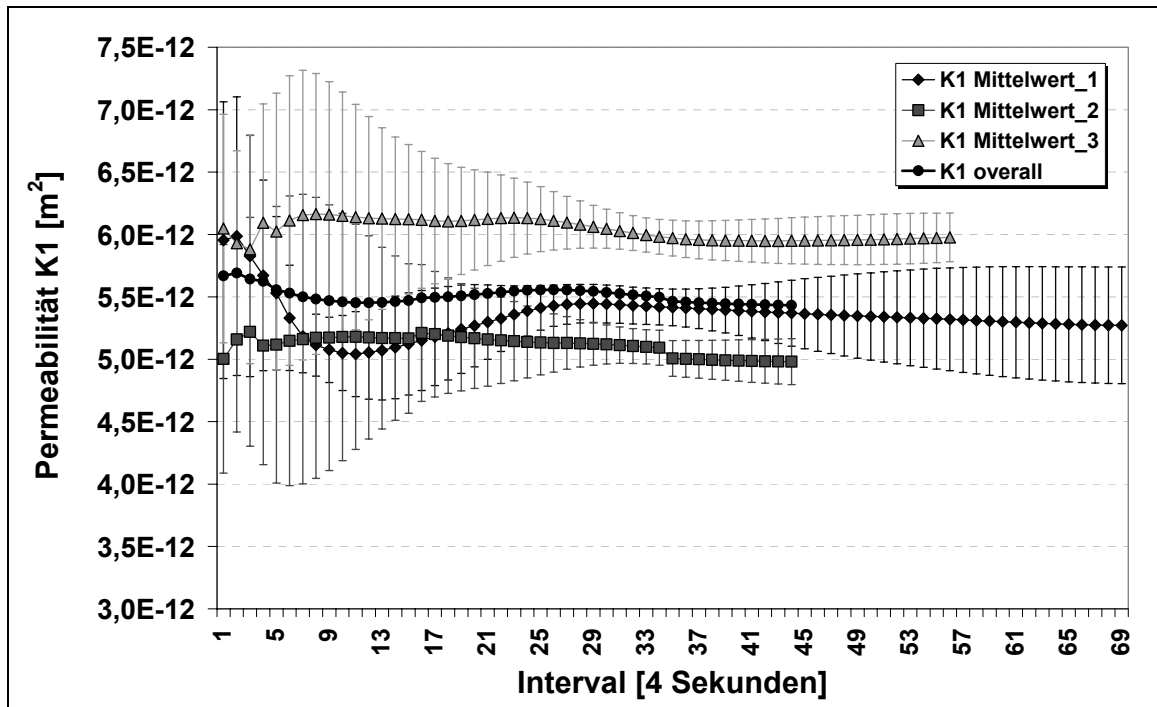


Bild 4.18: Ergebnisse der drei Versuchswiederholungen der Permeabilitätsbestimmung an biaxialem Gelege D bei 64 % Zielfaservolumengehalt. Der Mittelwert wurde aus den 9 möglichen Sensortripletkombinationen eines Versuches ermittelt

Die auf diese Weise zusammengefassten Ergebnisse der drei untersuchten Materialien sind für die Hauptachsenpermeabilität K1 in Bild 4.19 und für K2 in Bild 4.20 festgehalten. In dieser logarithmischen Darstellung der Permeabilität über dem ermittelten Faservolumenbereich stellen sich die Einzelergebnisse in der Regel auf einer Geraden ein. Dieses Verhalten entspricht den Darstellungen in der Literatur. Aus diesem Grund ist es auch zulässig einzelne Permeabilitätskennwerte zu bestimmten Faservolumengehalten durch Interpolieren bzw. Extrapolieren zu bestimmen. Es ist sehr auffällig, dass das Rovinggewebe von diesem Verhalten deutlich abweicht. Auch sind die Standardabweichungen der einzelnen Messpunkte sehr ausgeprägt. Als Begründung kann nur die sehr große Inhomogenität des eigentlichen Faserhalbzeugs in Verbindung mit der daraus resultierenden Möglichkeit eines extrem ausgeprägten Nesting-Effekts herangezogen werden. Die sich bei diesem Material ausbildenden Fließfronten innerhalb des geschlossenen Werkzeugs lassen sich nur als extrem unregelmäßig erahnen. Eine genauere Bestimmung der Fließfrontgeometrie ist aufgrund der begrenzten Sensorinformationen mit diesem Permeameter nicht

möglich. Alternativ können in diesem Fall optische Permeameter zur Unterstützung herangezogen werden.

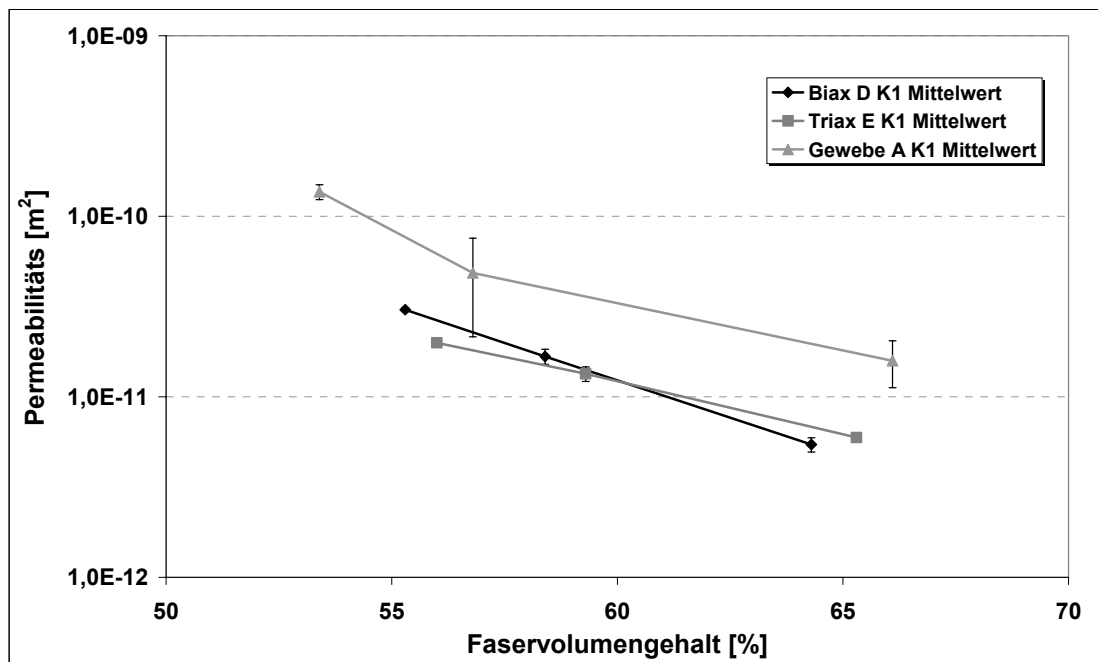


Bild 4.19: Auswertung der Permeabilitätsversuche an unmodifizierten Faserhalbzeugen. Hauptachsenpermeabilität K1 als Funktion des Faservolumengehalts

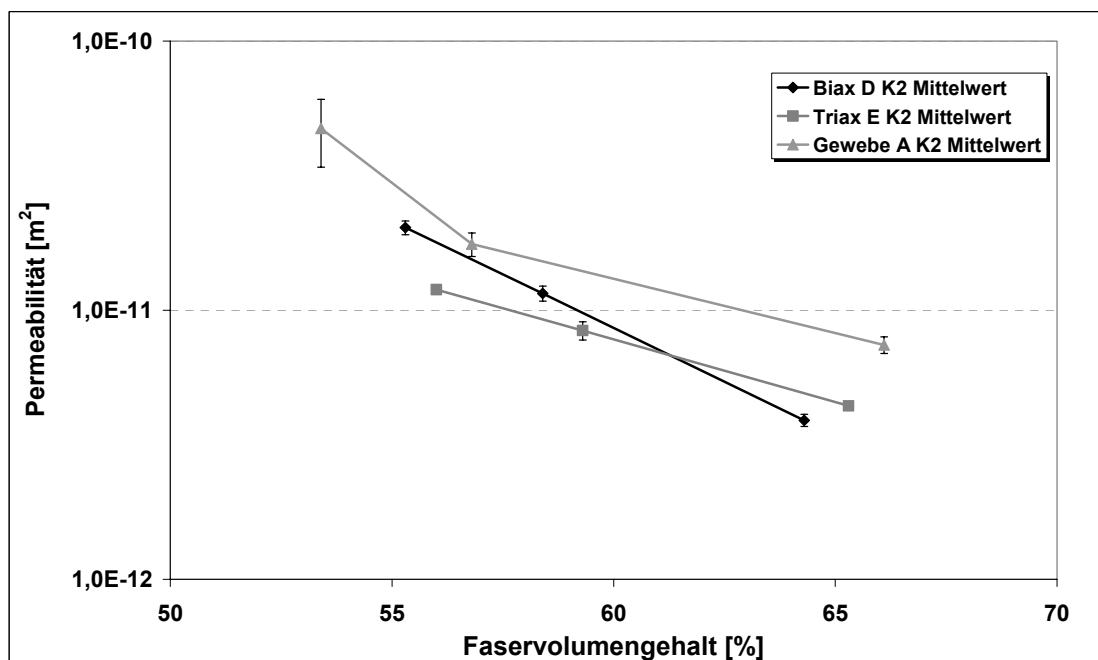


Bild 4.20: Auswertung der Permeabilitätsversuche an unmodifizierten Faserhalbzeugen. Hauptachsenpermeabilität K2 als Funktion des Faservolumengehalts

Aufgrund der durchgeführten Versuche mit unterschiedlichen Faserhalbzeugen kann anhand der Konvergenz der Permeabilitätsberechnungen mit unterschiedlichen Sensortriplets eine erste Aussage bezüglich der Gleichmäßigkeit der sich in der Kavität ausbreitenden Fließfront getroffen werden. Es zeigt sich, dass Materialien mit gleichmäßiger Faserarchitektur, d.h. möglichst keine Abstände zwischen den einzelnen Faserrovings und eine geringe Filamentanzahl des verwendeten Rovings selbst, zu gleichmäßigeren Fließfrontausbreitungen führen. Diese gleichmäßigeren Fließfronten wiederum bedingen eine weitestgehende Unabhängigkeit von der Auswahl des jeweiligen Sensortriplets und resultieren in homogeneren Permeabilitätsberechnungsergebnissen. Zur Permeabilitätsbestimmung solcher Materialien ist die standardisierbare Permeabilitätsmesszelle sehr gut geeignet, da sie eine vom jeweiligen Bediener unabhängige Versuchsauswertung ermöglicht.

5 Entwicklung des kombinierten Permeabilitäts- und Kompaktierungsprüfstands

Da keine in der Praxis einsetzbaren Berechnungsverfahren sowohl für die Permeabilität als auch für die Bestimmung der Kompaktierungskräfte existieren und bisher zwei getrennte experimentelle Messverfahren zum Einsatz kommen um die Permeabilität und das Kompaktierungsverhalten eines Faserhalbzeugs zu untersuchen, wurde der in diesem Kapitel beschriebene Prüfstand entwickelt. Ziel der Entwicklung ist es, mit möglichst wenig Zeit- und Materialaufwand verlässliche Aussagen über die Permeabilität und das Kompaktierverhalten eines Faserhalbzeugs treffen zu können. Weiterhin sollte die Möglichkeit bestehen, die Auswirkungen verschiedenartigster, zusätzlich in ein Halbzeug eingebrachter Hilfsstoffe wie z.B. Nähte [16,17] oder Binderpulver [18,19] auf den Fließfrontverlauf während des Tränkvorgangs verfolgen zu können. Für diese Art der Beobachtungen können die in [65,85,86] beschriebenen sensorbasierten Permeameter aufgrund ihrer Auflösung nicht eingesetzt werden, was am Beispiel des im vorherigen Kapitel beschriebenen Roving-Gewebes deutlich wurde. Die Entwicklung dieses optischen Prüfstands ist dementsprechend nicht als konkurrierendes Verfahren anzusehen, sondern als experimentelle Erweiterung zur Beobachtung und Beschreibung lokaler, beispielsweise an Materialanomalien auftretender Fließfrontveränderungen. Um die Bedienung der Anlage durch jeden Nutzer nach einer kurzen Einweisung sicherstellen zu können, wurde ein hoher Automatisierungsgrad realisiert.

5.1 Aufbau und Bedienung des Prüfstands

Da sowohl Permeabilitätsbestimmungen als auch Kompaktierungsmessungen durchgeführt werden sollen, sind an einen solchen Prüfstand prinzipiell drei Grundbedingungen zu stellen.

Es bedarf zweier, ausreichend dicker, planparalleler Platten, deren Abstand zueinander in einer definierten Weise verändert werden kann, einer Kraftmessdose, welche die notwendige Kraft während der Kompaktierung der Halbzeuge aufnehmen kann, und der Möglichkeit die Fließfrontposition innerhalb des Werkzeugs zu definierten Zeitpunkten bestimmen zu können.

Zwei dieser Voraussetzungen, planparallele Platten, die definiert relativ zueinander bewegt werden können, und eine Kraftmessdose, sind in einer Universalprüfmaschine vorhanden. Die Auswahl einer solchen Maschine als Basis des aufzubauenden Prüfstands erübrigt bzw. vereinfacht konstruktive Probleme wie z.B. einen spielfreien Antrieb, die Wegmessung oder die Durchführung der Kraftmessung. Das Hauptaugenmerk liegt daher auf der Konstruktion des eigentlichen Werkzeugs, welches in Bild 5.1 abgebildet ist. Da das Werkzeug für eine Vielzahl von unterschiedlichen Kavitätshöhen ausgelegt sein sollte, wird auf einen spielfrei beweglichen Zwischenrahmen zurückgegriffen. Die Konstruktion sieht vor, dass der Zwischenrahmen zusammen mit der darauf über ein Schnellspannsystem fixierten Glasplatte auf und ab bewegt werden kann. Zwischen der Glasoberfläche und der Oberfläche des Formeinsatzes bildet sich dabei die eigentliche Kavitätshöhe aus. Um den ungewollten Austritt von Flüssigkeit aus der Kavität zu verhindern, ist eine Silikondichtung in Umfangsrichtung an der Oberkante des Formeinsatzes angebracht. Ebenso ist die Kontaktfläche zwischen Glasplatte und Zwischenrahmen mit einer Silikondichtung versehen.

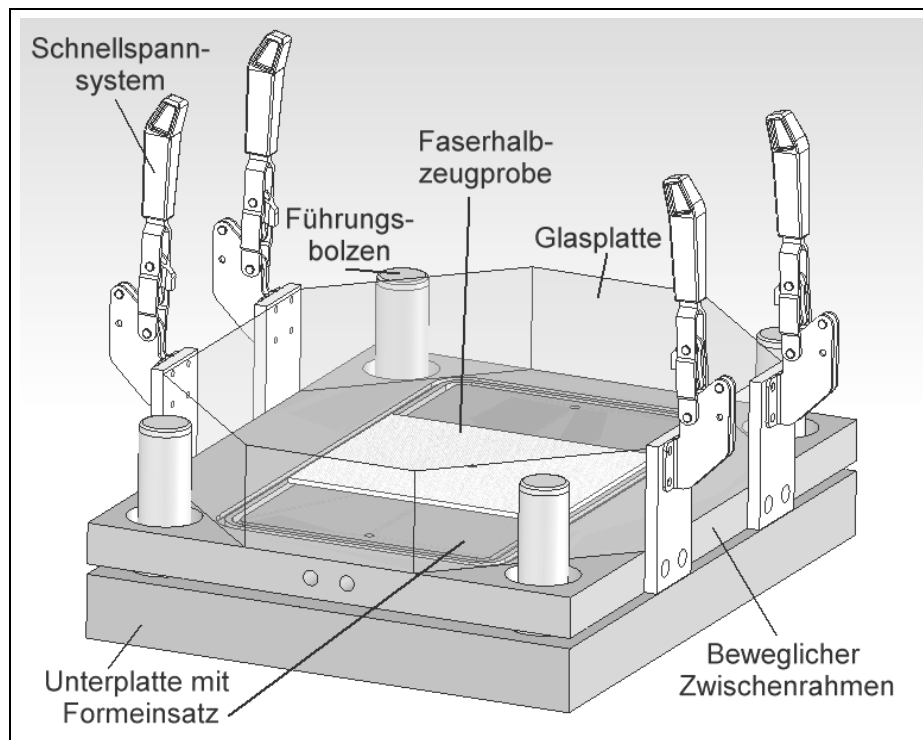


Bild 5.1 : Werkzeug zur Kompaktierungsmessung und optischen Permeabilitätsbestimmung

Auf der in Bild 5.1 dargestellten Glasplatte wird ein Druckturm aus Doppel-T-Profilen aufgebracht, der die Verbindung zwischen der Glasplatte und der Kraftmessdose darstellt. Im oberen Bereich des Druckturms befindet sich die Aufnahme für eine Digitalkamera. Der Druckturm stellt das Bindeglied zwischen der beweglichen Traverse der Instron 4206 Universalprüfmaschine und dem Oberwerkzeug dar.

Die Unterplatte mit dem Formeinsatz ist ebenfalls über zwei Doppel-T-Profile mit der Basis der Instron 4206 Universalprüfmaschine verschraubt. Die verwendeten Profile ermöglichen den für die Permeabilitätsmessung erforderlichen Zugang zu den auf der Unterseite des Werkzeugs befindlichen Ein- und Auslassventilen und den Drucksensoren. Da das Werkzeug auch für eindimensionale Tränkversuche nutzbar sein sollte, befinden sich drei Bohrungen in der Werkzeuggrundplatte, die je nach Versuchsanordnung genutzt werden können. Der gesamte Versuchsaufbau, die Universalprüfmaschine und das darin eingebaute Werkzeug, ist in Bild 5.2 dargestellt.

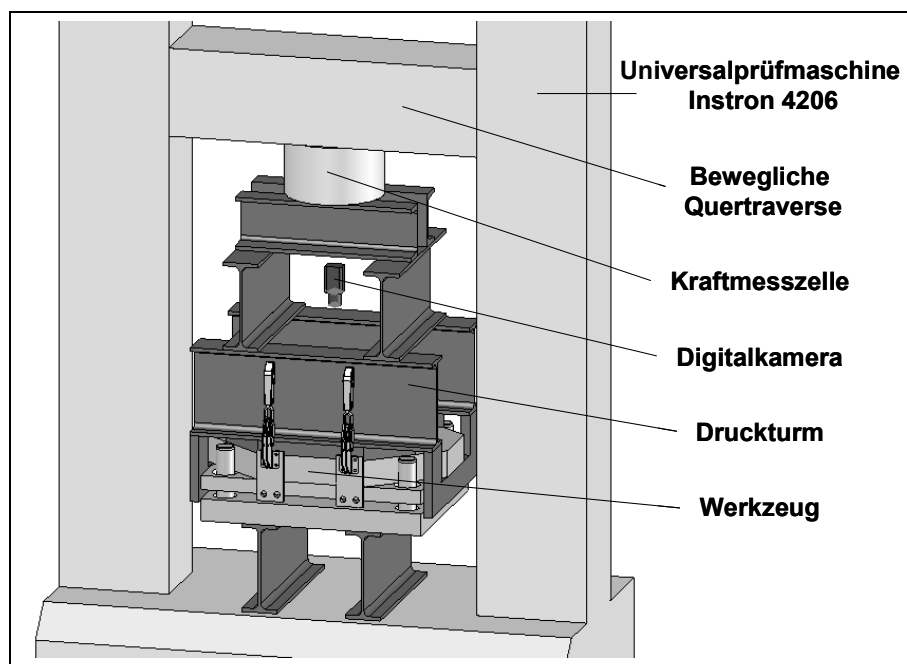


Bild 5.2: Permeabilitätsmesszelle (Universalprüfmaschine mit Werkzeug)

Um ein einfaches Beschicken der Kavität zu gewährleisten, wird die Glasplatte über zwei Glashalter fest mit dem Druckturm verspannt. Zum Einlegen der Faserhalbzuge bewegt man die Quertraverse der Instron in die Einlegeposition, öffnet das Schnellspannsystem und bewegt die Quertraverse nun so lange in die entgegengesetzte Richtung, bis der Einlassspalt ausreichend geöffnet ist.

Im Fall der zu bevorzugenden zweidimensionalen Permeabilitätsmessung wird die zu untersuchende Probe über der mittleren Einlassbohrung zentriert, wobei die beiden verbleibenden Bohrungen als Auslassöffnung genutzt werden. Zur Durchführung einer eindimensionalen Messung wird die mittlere Einlassöffnung dagegen mit einem bündig mit der Oberfläche des Formeinsatzes abschließenden Stopfen versehen. Eine der beiden noch verfügbaren Bohrungen findet in diesem Fall als Einlassöffnung, die andere als Auslassöffnung Verwendung. Nachdem die Probe in der Kavität positioniert ist, bewegt man die Quertraverse wieder in die Einlegeposition und schließt die Schnellspanner. Da die auftretenden Druckkräfte direkt über die Glasplatte in den Versuchsaufbau eingeleitet werden, tragen die Schnellspannsysteme lediglich die Last des beweglichen Zwischenrahmens. Der Versuchsaufbau ist nun für die Versuchsdurchführung vorbereitet. Die im Drucktopf mit einem definierten Überdruck beaufschlagte Messflüssigkeit tritt im Verlauf der Permeabilitätsbestimmung aus der Einlassöffnung aus und breitet sich je nach Anordnung des Versuchsaufbaus entsprechend Bild 4.3 in der Faserhalbzeugprobe aus.

Um die für die Bestimmung der Permeabilität und der Kompaktierung relevanten Daten aufzeichnen zu können, werden neben den der Instron eigenen Sensorsystemen für Kraft (150 kN Kraftmessdose) und Traversenposition vier externe Drucksensoren (Keller Typ PAA-21S/80400) und zwei weitere externe Wegmesseinrichtungen (Heidenhain MT60K) verwendet. Über ein in der Messdatenerfassungssoftware LabVIEW des Herstellers National Instruments erstelltes Programm werden einerseits die Versuchsdaten in Form von Versuchsprotokolldateien festgehalten und andererseits die Berechnungen zur Permeabilitätsbestimmung ausgeführt. Die eigentliche Versuchsdurchführung wird mit dem Start des in Bild 5.4 dargestellten Messdatenerfassungsprogramms eingeleitet. In dieser Maske werden zunächst der Datenpfad und der Dateistamname festgelegt. Weiterhin werden hier die Konvertierungsparameter der einzelnen Sensoren, die Abfrageintervalllänge und der Drucktopfsollwert eingestellt. Ab dem Betätigen der Taste „Daten speichern“ werden die über die analogen Eingänge der Messkarte (National Instruments PCI 6052E) empfangenen Signale umgewandelt und zusammen mit der Versuchszeit in die Protokolldatei geschrieben. Ab diesem Zeitpunkt kann der Kompaktierungsversuch durch Einleitung der kontinuierlichen Quertraversenbewegung der Instron gestartet werden. Aus den während des Kompaktierungs- bzw. Injektionsverlaufs aufgezeichneten Versuchsdaten kann der

Versuchsablauf entsprechend Bild 5.3 rekonstruiert werden. Während der Kompaktierungsphase steigt der auf die Probenfläche bezogene Kompaktierungsdruck bis zum Erreichen der Zielkavitätshöhe an. Das bereits in Kapitel 3.1.1.2 beschriebene Relaxierungsverhalten des Halbzeugs ist deutlich in der ab diesem Zeitpunkt abnehmenden Kompaktierungsdruckkurve zu erkennen. Auch der erneute Anstieg der Kompaktierungsdruckkurve zum Zeitpunkt der Injektion ist zu erkennen. Während der Injektion wird die Kompaktierungsdruckkurve durch zwei gegenläufige Effekte beeinflusst. Zum einen ist dies die Reduzierung des Kompaktierungsdrucks durch die Verminderung der Reibung zwischen den einzelnen Fasern infolge der Benetzung der Faseroberfläche mit der injizierten Flüssigkeit („lubrication effect“ [49,50]). Zum anderen bedingt die sich unter dem Injektionsdruck im Halbzeug ausbreitende Flüssigkeit ein Ansteigen des erforderlichen Kompaktierungsdrucks. Die aus diesen Effekten resultierende Kompaktierungsdruckkurve ist in Bild 5.3 zu sehen. Bei genauer Betrachtung ist erkennbar, dass in der ersten Hälfte des Injektionsvorgangs die Auswirkungen des „lubrication effect“ überwiegen, wobei die zweite Hälfte von den Auswirkungen des Injektionsdrucks dominiert wird. Bei Beendigung des Injektionsvorgangs nähert sich die Kompaktierungsdruckkurve wieder rasch an den theoretischen Druckverlauf des reinen Halbzeugs an.

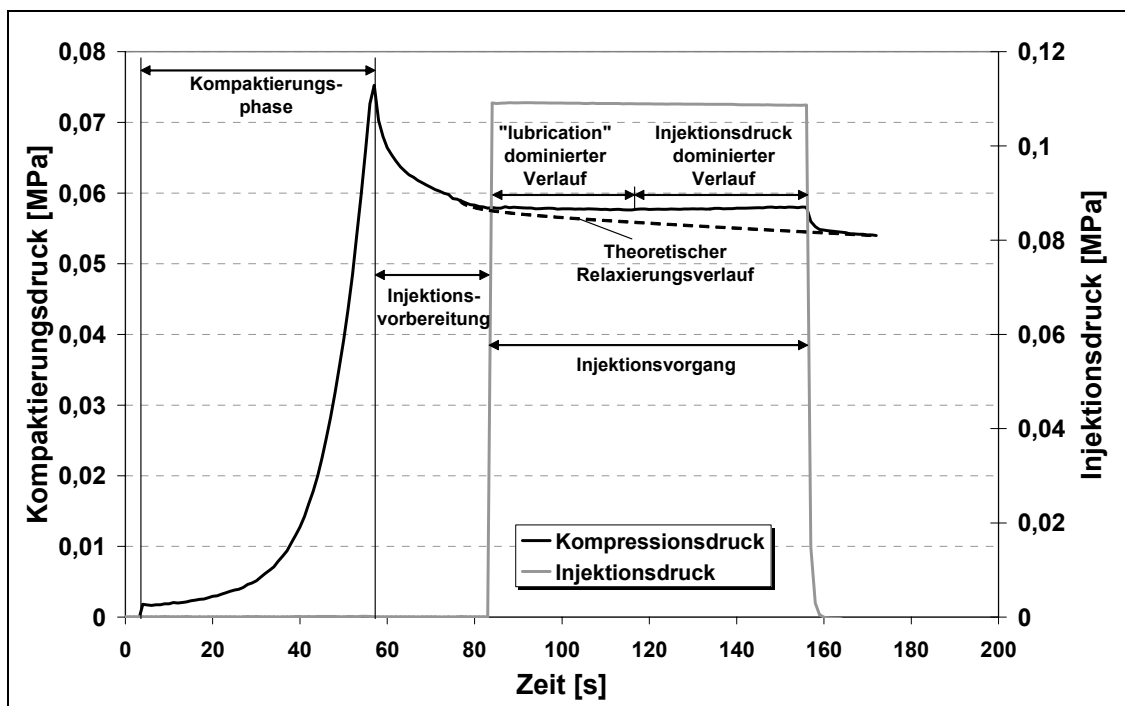


Bild 5.3: Messdatenaufzeichnung während des Kompaktierungs- und Injektionsvorgangs (Faservolumengehalt 50 %)

Die Auswirkungen beider Effekte sind jedoch nur dann deutlich zu erkennen, wenn der Kompaktierungs- und der Injektionsdruck etwa die gleiche Größenordnung aufweisen. Dies ist im Fall von Bild 5.3 gegeben. Während des laufenden Versuchs werden die Bilder der im Druckturm des Versuchsaufbaus befestigten Fire-Wire Digtalkamera abgefragt, mit einem vierstelligen Zeitstempel im Dateinamen versehen und auf der Festplatte gespeichert. Zur Durchführung einer Permeabilitätsmessung wird nach dem Erreichen der Zielkavitätshöhe und dem Start der Bildaufzeichnung das Einlassventil unterhalb des Werkzeugs manuell geöffnet, wodurch die unter definiertem Überdruck stehende Messflüssigkeit beginnt die Faserhalbzeugprobe zu imprägnieren (vgl. Bild 5.3 „Injektionsvorbereitung“).

Nach Beendigung des Imprägniervorgangs wird die Aufzeichnung der Messdaten und der Versuchsbilder innerhalb des in Bild 5.4 dargestellten Aufzeichnungsmoduls gestoppt. Der Benutzer hat nun die Möglichkeit, entweder ein weiteres Kompaktierungs- bzw. Permeabilitätsexperiment durchzuführen oder durch Auswahl des Auswertungsmoduls die Bildauswertung mit nachgeschalteter Permeabilitätsberechnung zu starten. Bei Auswahl des Berechnungsmodus wird der Benutzer in einem interaktiven Prozess nach dem Dateipfad der während des Imprägnierprozesses aufgenommenen Bildern gefragt. Da bei der Versuchsdurchführung das Speichern der Bilder vor dem Öffnen des Einlassventils beginnt, existieren einige „Leerbilder“.

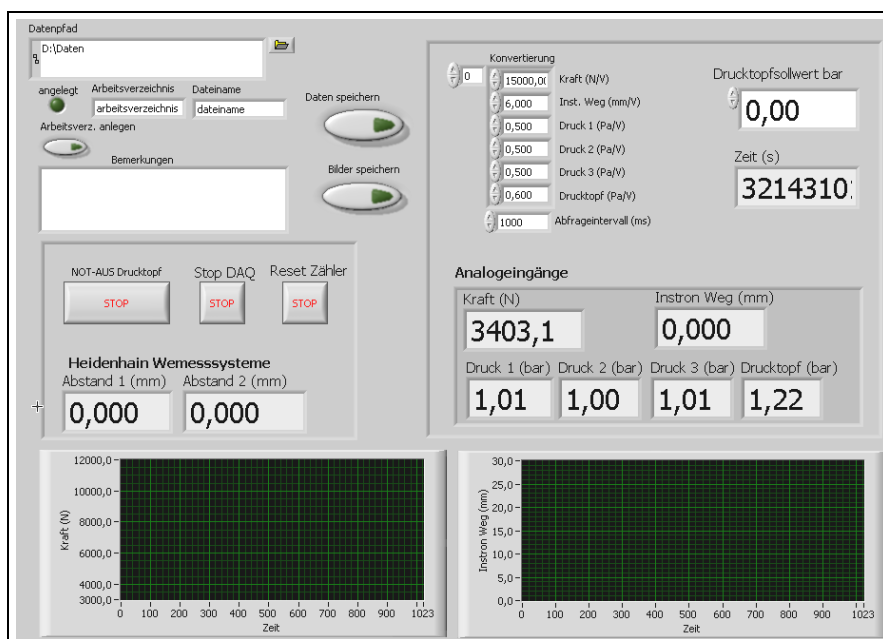


Bild 5.4: Frontpanel der Messdatenerfassung für Permeabilitäts- und Kompaktierungsversuche

Der Benutzer bekommt nun so lange die einzelnen Bilder im angegebenen Verzeichnis angezeigt, bis das erste Versuchsbild, d.h. ein Bild, auf dem eine Fließfront erkennbar ist, dargestellt wird. Dieses Bild wird nun nicht wie die vorangegangenen Leerbilder durch Knopfdruck des Benutzers in einen entsprechenden Ordner verschoben, sondern als Referenzbild markiert. Als nächstes muss der Benutzer folgende Informationen zum Versuchsablauf in die sich öffnende Maske eintragen:

- Pfad des Kalibrierbilds (entsprechend Bild 5.5)
- Druckdifferenz, Kavitätshöhe, Faservolumengehalt, Viskosität, Radius der Einlassöffnung

Nach der Eingabe dieser Daten beginnt das Programm automatisch jedes einzelne Bild im Verzeichnis zu bearbeiten und die Informationen über die Fließfrontellipse, d.h. die Länge der beiden Hauptachsen und den Drehwinkel der großen Hauptachse relativ zum Werkzeugkoordinatensystem, zu bestimmen (Bild 5.5). Jedem bearbeiteten Bild werden die gefundene Ellipse, deren Hauptachsen und das Werkzeugkoordinatensystem überlagert, worauf das Ergebnisbild in einem entsprechenden Unterordner abgespeichert wird. Die ermittelten Daten wie z.B. die Zeit, die absoluten Koordinaten des Ellipsenursprungs und die relativen Koordinaten der vier Hauptachsenendpunkte, die Fläche und der Umfang der Ellipse, der Drehwinkel von Haupt- und Nebenachse zur x-Achse (in Bild 5.5 auf 3-Uhr-Position, positiv in Uhrzeigerrichtung zählend) werden zeilenweise in einer Textdatei für jede ausgewertete Fließfront gespeichert.

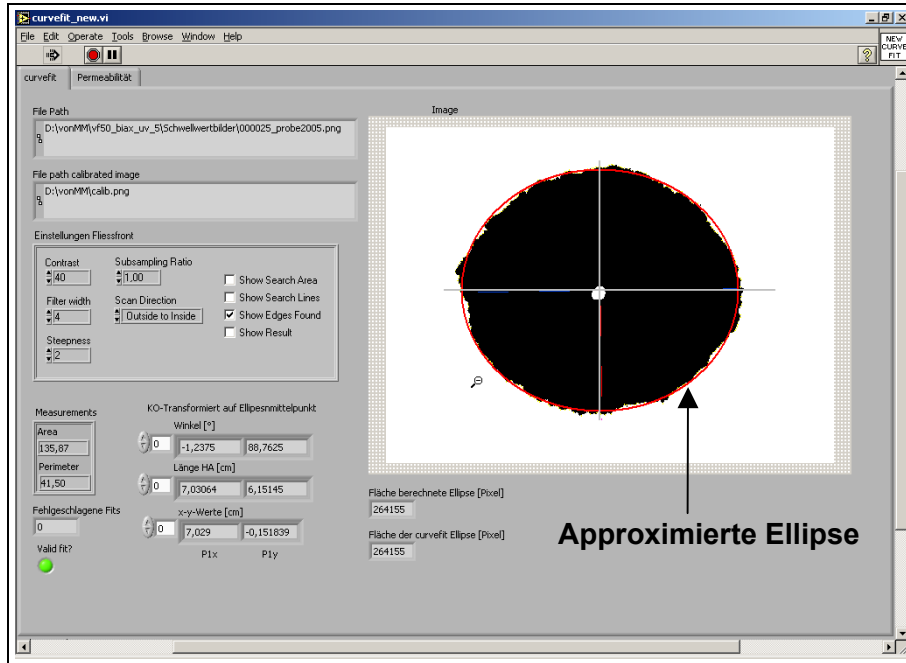


Bild 5.5: Frontpanel der automatischen Bildverarbeitung

Als nächstes steht es dem Benutzer frei, entweder einen weiteren Satz Bilder zu bearbeiten oder direkt die Permeabilitätsberechnung mit den gerade ausgewerteten Bildern zu starten. Bei der Permeabilitätsberechnung kann zwischen einer intervallbasierten Methode und der Auswertung aller zur Verfügung stehenden Messpunkte entsprechend Bild 5.6 gewählt werden. Hierbei entspricht der n-te Iterationsschritt von Modus I dem Wert von Modus II. Zwar zeichnet sich Modus I durch deutlich längere Rechenzeiten aus, jedoch kann auf dem daraus erstellten Konvergenzgraphen die Entwicklung der Permeabilität als Funktion der Zeit und damit des Fließfrontfortschritts dargestellt werden.

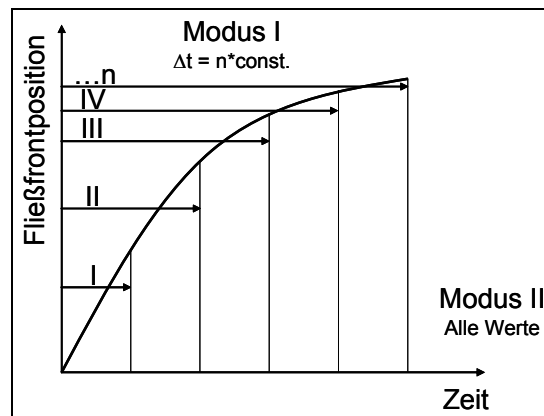


Bild 5.6: Berechnungsmodi des Permeabilitätsprogramms

Das in Bild 5.7 dargestellte Frontpanel der Permeabilitätsberechnung zeigt neben dem zeitlichen Verlauf der beiden Hauptpermeabilitätswerte K_1 und K_2 auch den Verlauf des Drehwinkels über der Zeit. Die als „Permeabilität 1“ und „Permeabilität 2“ angezeigten Werte sind das Ergebnis aller vorhandenen Datenpunkte. Auch wird das Anisotropieverhältnis von K_2 zu K_1 , α , angezeigt.

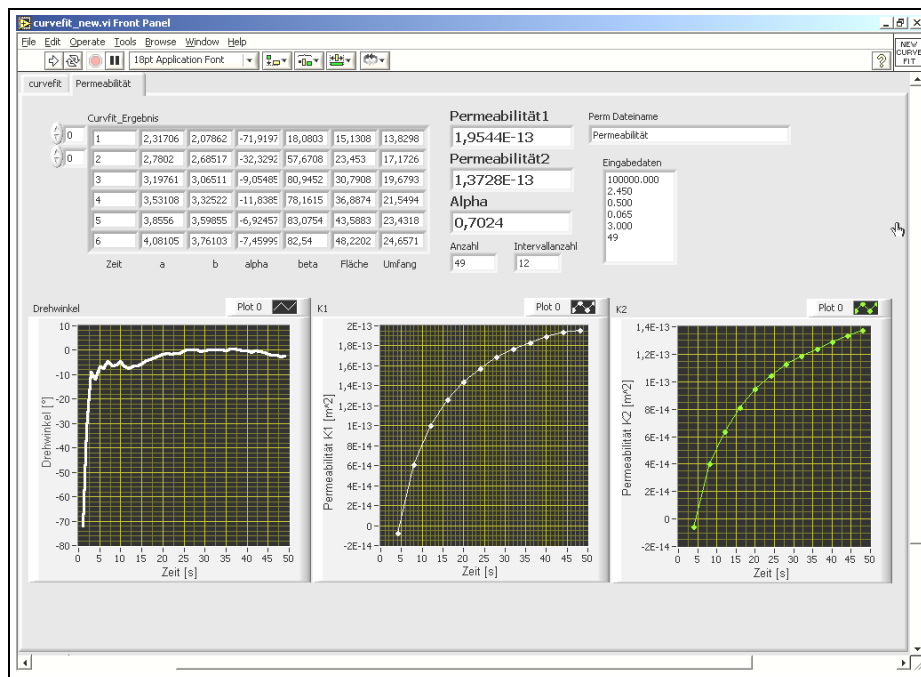


Bild 5.7: Frontpanel des Permeabilitätsberechnungsmoduls

Die Ergebnisse der Berechnung werden in der Textdatei „Permeabilität“ für jedes Berechnungsintervall als Dokumentation abgespeichert. In Abhängigkeit von den Parametern Injektionsdruck, Viskosität und Faservolumengehalt können mit diesem System zwischen 20 und 30 kombinierte Kompaktierungs- und Permeabilitätsmessungen inklusive Reinigung und Auswertung pro Tag ausgeführt werden.

5.2 Betrachtung möglicher Fehlerquellen

Die zur optischen Permeabilitätsberechnung entsprechend der vorliegenden Arbeit erforderlichen Eingangsparameter sind:

- Viskosität des Fluids
- Porosität
- Durchmesser des Zentralangusses
- Hauptachsenlängen der Ellipse (a,b)
- Zeitpunkt der Bestimmung der Hauptachsenlängen

➤ Injektionsdruckdifferenz

Bevor jedoch die eigentliche Berechnung der Permeabilitätskennwerte des zu untersuchenden Materials gestartet werden kann, ist es nötig die möglichen Fehlerquellen des optischen Fließfronterkennungssystems zu thematisieren. Die der Erkennung zugrunde liegenden Prozessschritte und die sich dabei jeweils ergebenden möglichen Fehlerquellen sind schematisch in Bild 5.8 dargestellt.

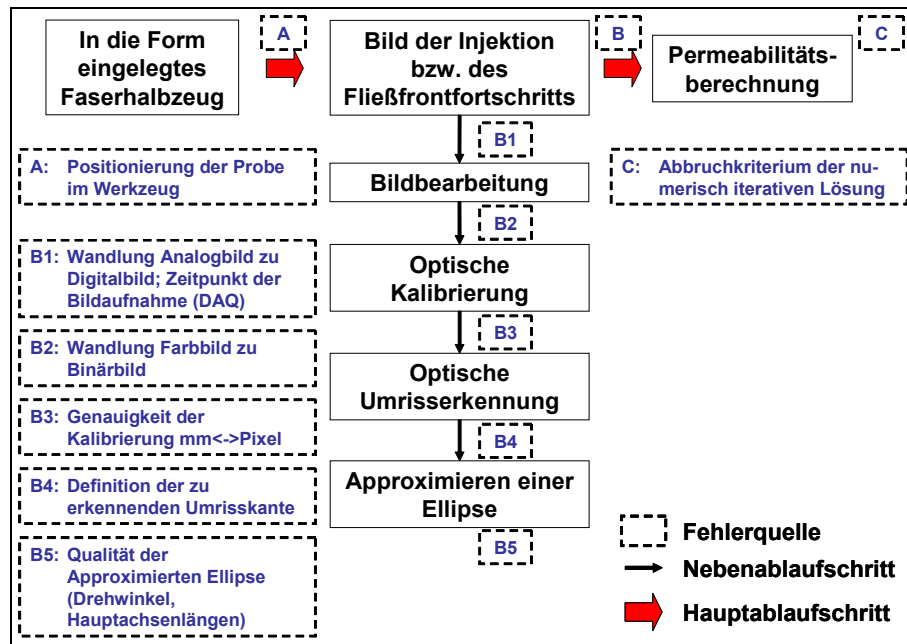


Bild 5.8: Ablauf der optischen Permeabilitätskennwertbestimmung mit möglichen Fehlerquellen

5.2.1.1 Mögliche Fehler bedingt durch das Versuchswerkzeug und die verwendeten Faserhalbzeugproben

Zu Beginn eines Versuchs werden die bereits in Kapitel 3.2 beschriebenen Faserhalbzeugproben eingelegt. Die geringen geometrischen Toleranzen -alle Proben ließen sich exakt in die Kavität des Werkzeugs einlegen und über einen Zentrierdorn mit der werkzeugseitigen Injektionsöffnung zentrieren- lassen keinen relevanten Einfluss auf die Versuchsergebnisse erwarten.

Um die Ausbreitung der Fließfront beobachten zu können wird eine Verbundglasplatte als Oberwerkzeug eingesetzt. Diese Verbundglasscheibe besteht aus vier Sekuritglasscheiben, welche mit Epoxidharz verklebt sind. Die Dicke der Verbundglasscheibe ist von entscheidender Bedeutung, da ihre Durchbiegung je nach Kavitätshöhe signifikante Abweichungen zwischen dem theoretischen Faservolumen-

gehalt und dem realen Faservolumengehalt bedingen kann. Um diesen Unsicherheitsfaktor bestimmen zu können wurden Durchbiegungsversuche mit 5x5 mm vernähtem triaxialem Gelege bei 65 % Faservolumengehalt durchgeführt. Aus Vorversuchen ist bekannt, dass diese Probenkonfiguration zum Erreichen eines bestimmten Faservolumengehalts die höchsten Kompaktierungskräfte pro Flächeneinheit benötigt. Die Kavitätshöhe wird einerseits durch externe Wegaufnehmer (Heidenhain) und andererseits durch während der Versuchsdurchführung in der Form befindliche Plastilinkugeln ermittelt. Die Positionierung der Plastilinkugeln in der Kavität ist in Bild 5.9 zusammen mit den gemessenen Kavitätshöhen dargestellt. Die bei den durchgeführten Versuchen maximal gemessene Durchbiegung bzw. Schiefstellung der Glasplatte wurde mit 0,04 mm festgestellt. Diese Durchbiegung bedingt, dass sich der Faservolumengehalt entlang der langen Seite der Probe im Zielfaservolumenbereich von 50 bis 65 % um 0,5 bis 0,9 % verringert. Aus den in Bild 5.9 eingetragenen Kavitätshöhen lässt sich eine Wiederholungsgenauigkeit unter der Maximalkraft von rund 0,03 mm ableiten. Diese Abweichung ist auf die mit $\pm 0,015$ mm angegebene Wiederholungsgenauigkeit der Instron zurückzuführen. Aufgrund dieser Wiederholungsgenauigkeit erhöht sich die Abweichung bei einem Zielfaservolumengehalt von 65 % auf insgesamt 0,07 mm.

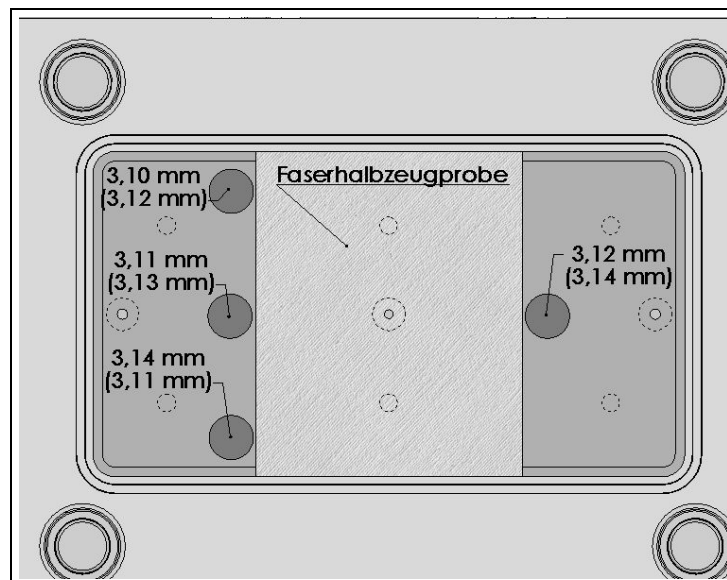


Bild 5.9: Position der Plastilinkugeln während eines Kompaktierungsversuchs mit 85 kN Kompaktierungskraft. Die eingeklammerten Messwerte wurden bei Versuchswiederholungen aufgenommen

Der Anstieg der Abweichung bedingt, dass sich der Faservolumengehalt entlang der langen Seite der Probe im Zielfaservolumenbereich von 50 bis 65 % um maximal 0,9 bis 1,6 % verringern kann.

5.2.1.2 Mögliche Fehler, bedingt durch die Verwendung eines optischen Systems

Um eine effektive optische Auswertung garantieren zu können müssen die Kameraposition und die Fokussierung der Optik während der durchzuführenden Versuche konstant sein. Durch eine direkte und solide Verbindung der Kamerahalterung mit dem Druckturm ist sichergestellt, dass keine Bewegung der Kameraposition relativ zur kavitätsseitigen Oberfläche der Verbundglasplatte (Fokussierebene) stattfindet. Die verwendete Fire-Wire-Kamera (AVT Marlin F-080C mit Pentax C418DX Objektiv) mit einer Auflösung von 1032 x 778 Bildpunkten ergibt bei einem eingestellten Sichtfeld entsprechend den Probenabmessungen von 220 mm x 180 mm eine theoretische Auflösung von rund 0,213 mm bzw. 0,231 mm pro Pixel entlang der jeweiligen Probenrichtung. Da die Versuche mit einer Weitwinkeloptik aufgenommen werden, zeigt sich eine ballige Verzeichnung der aufgenommenen Bilder. Diese kissenförmige Verzeichnung wird über ein Kalibriermuster nachträglich aus dem Bild herausgerechnet. Bei diesem Kalibriervorgang wird auch über die Durchmesser der Punkte des Kalibrierusters und deren Abstand zueinander eine Skalierung von Pixeln in Millimetern berechnet. Diese Skalierung wird einmal zu Beginn der Auswertung durchgeführt und dann in ein „Kalibrierbild“ abgespeichert um so jederzeit die Informationen zur Verfügung zu haben. Bild 5.10 zeigt das Kalibriermuster a) mit Balligkeit, b) mit korrigierter Balligkeit.

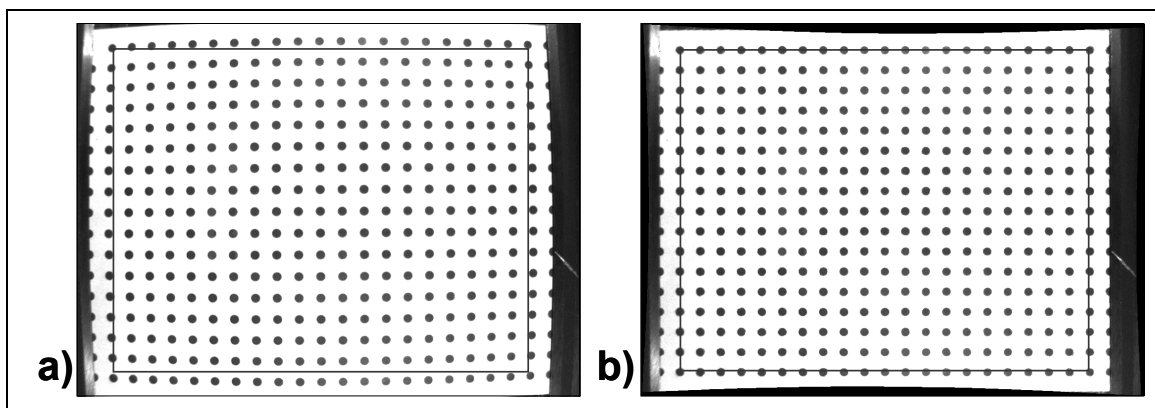


Bild 5.10: Kalibrieren der durch die Optik der Kamera ballig verzeichneten Bilder.
a) kissenförmig verzeichnete Aufnahme des Kalibrierusters,
b) korrigierte Aufnahme

Um die Genauigkeit der Kalibrierung bzw. des optischen Systems zu überprüfen werden an dem in Bild 5.10 dargestellten Muster, ausgehend vom Mittelpunkt bzw. von den Mittellinien, verschiedene Messungen in X bzw. Y-Richtung entsprechend Bild 5.11 ausgeführt.

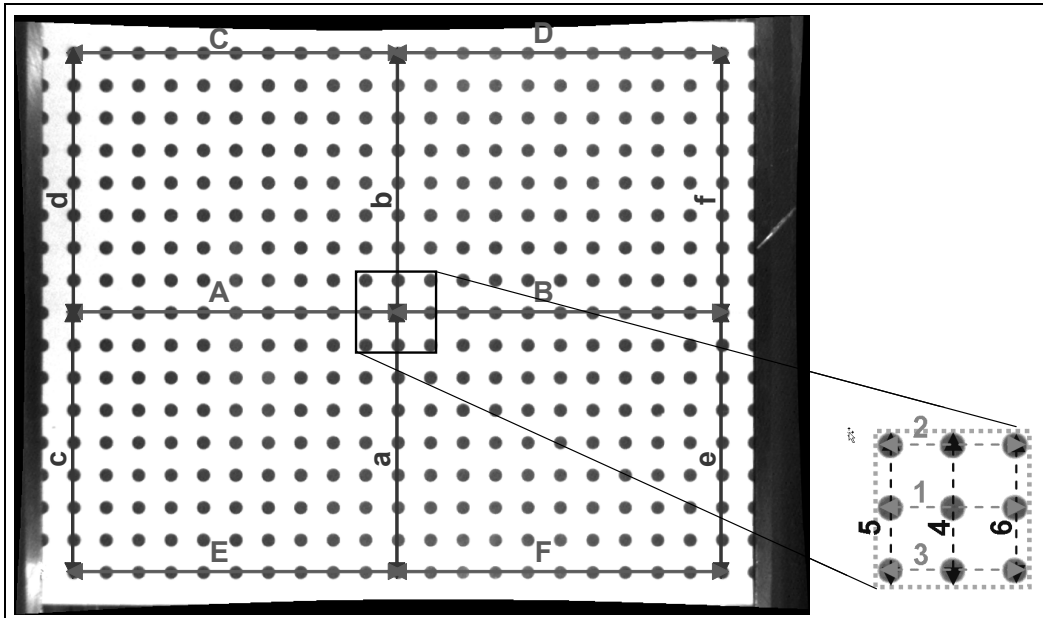


Bild 5.11: Auf dem Kalibriermuster untersuchte Messstrecken. Großbuchstaben und die Ziffern 1-3 stellen die X-Richtung, Kleinbuchstaben und die Ziffern 4-6 stellen die Y-Richtung dar

Vermessen werden an den bezeichneten Positionen Längen von 15 bis 105 mm in X-Richtung und Längen von 15 bis 85 mm in Y-Richtung. Es zeigt sich, dass der relative Fehler mit Zunahme der Messstrecke von anfänglich 2,79% bei 15 mm auf 0,53 % bei 85 mm in Y-Richtung abnimmt. Betrachtet man die zugrunde liegenden Absolutwerte, so stellt man eine Abweichung von rund 0,42 mm bzw. 0,45 mm fest. Im Vergleich dazu werden in X-Richtung bei einer Messstrecke von 15 mm bzw. 105 mm Abweichungen von 0,35 mm bzw. 0,45 mm ermittelt. Diese recht konstanten Abweichungen lassen sich in beiden Achsenrichtungen mit zwei Pixel Auflösungsgenauigkeit definieren. Es muss hinzugefügt werden, dass ausschließlich Maßabweichungen vom Sollmaß in positiver Richtung aufgetreten sind. Die Ergebnisse dieser Messungen sind in Bild 5.12 zusammengestellt.

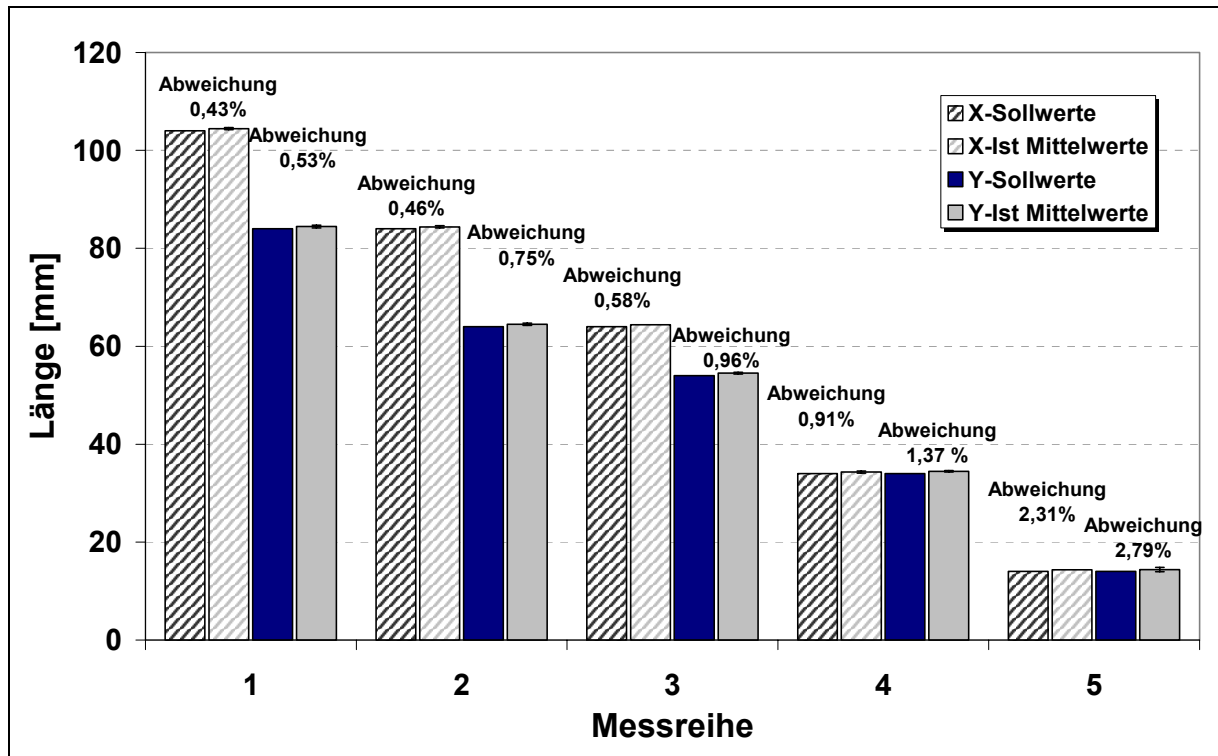


Bild 5.12: Ergebnis der Kontrollvermessungen des Kalibermusters aus Bild 5.11

Um die Fließfrontverläufe innerhalb der verwendeten Glasfaserhalbzeuge optimal erkennen zu können ist es notwendig den Kontrast zwischen imprägnierter und trockener Halbzeugfläche zu optimieren. Aus diesem Grund wurden Vorversuche mit verschiedenen Beleuchtungskonfigurationen durchgeführt. Die Verwendung von zwei seitlich in Höhe der Glasplatten montierten Halogenlampen erwies sich als die beste Möglichkeit um Licht indirekt in die Glasscheibe einzubringen. Ein Vergleich zwischen einer Konfiguration mit direkter Beleuchtung im Vergleich zu einer indirekten Beleuchtung ist in Bild 5.13 dargestellt.

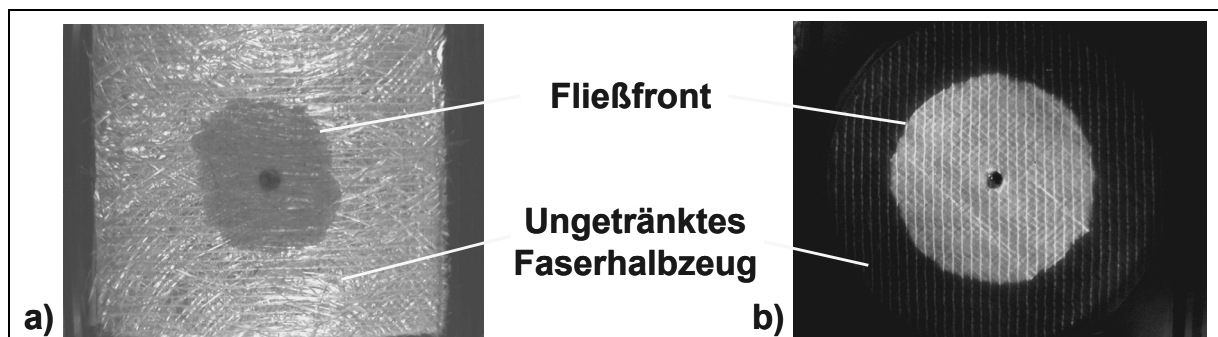


Bild 5.13: Einfluss der Beleuchtungsrichtung auf den erreichbaren Kontrast des Fotos. a) direkte Beleuchtung b) indirekte Beleuchtung

Aufgrund des hohen Kontrasts -die durchtränkte Fläche des Halbzeug beginnt förmlich zu leuchten- ist die Fließfront in Bild 5.13 b) deutlich zu erkennen. Die grünliche Färbung des Bilds kommt bei der indirekten Beleuchtung durch die Tönung des Glases viel deutlicher zum Vorschein als dies bei der direkten Beleuchtung der Fall ist. Um die Qualität der Bilder der Fließfrontverläufe weiter zu steigern wird ein unmittelbar vor dem Beginn der Injektion aufgenommenes Bild von jedem während der Injektion aufgenommenen Bild abgezogen. Dieser Subtraktionsvorgang geschieht, indem der anfängliche Wert jedes einzelnen Pixels von dem entsprechendem Wert des Pixels eines späteren Bildes abgezogen wird. Durch diese Maßnahme können kleine Helligkeitsunterschiede und lokale Reflexionen ausgeschaltet werden (vgl. Bild 5.14 a) und b)). Die in LabVIEW programmierte automatische Auswertungssoftware kann nur mit monochromen Bildern arbeiten, weshalb das ursprüngliche Farbbild angepasst werden muss. Da sich innerhalb der grünen Farbebene der Kontrast im Vergleich zu den anderen Farbebenen am deutlichsten zeigt, wird nur diese Ebene aus dem Farbbild extrahiert, bevor dann schließlich über einen festgelegten Schwellenwert die Konvertierung in ein binäres Bild vollzogen wird. Die Kontur der Fließfront ist nun deutlich zu identifizieren (vgl. Bild 5.14 c)). Bei der Überlagerung von binären Bildern mit den entsprechenden Ursprungsbildern kann ein Rücksprung der Fließfront der binären Bilder im Vergleich zu den Ursprungsbildern um ein bis maximal zwei Pixel festgestellt werden. Dieser Rücksprung ist das Resultat des eingestellten Schwellenwerts. Da sich jedoch die durch die Genauigkeit der Erkennung und die Überführung in ein binäres Bild ausgelösten Maßabweichungen aufheben, wird der Schwellenwert nicht weiter modifiziert.

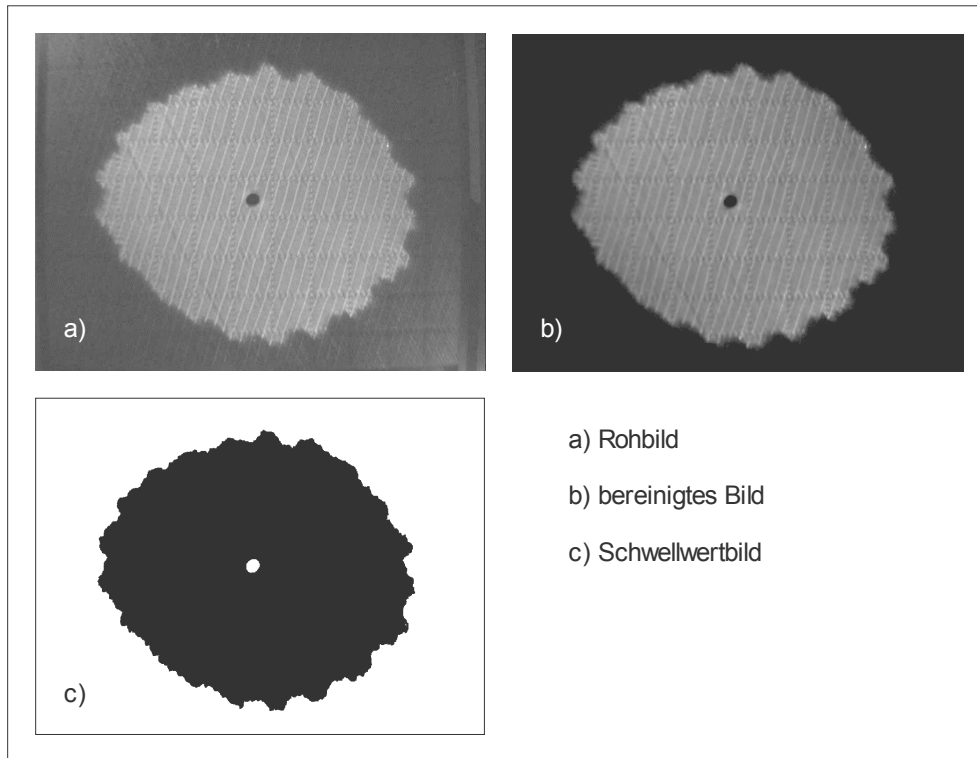


Bild 5.14: Automatisierter Bildbearbeitungsablauf zur Erzielung des maximalen Kontrasts der Fließfront

Die eigentliche Fließfronterkennungsroutine beruht auf einem Netz von Strahlen, das in einem Winkel von 1° um den Mittelpunkt der Injektionsöffnung herum aufgespannt ist. Entlang dieser Strahlen wird jedes Bild vom Mittelpunkt her auf einen Gradienten in der Pixelhelligkeit hin untersucht. Bild 5.15 zeigt den Erkennungsvorgang in schematisierter Form. Der Helligkeitssprung zwischen getränktem und ungetränktem Faserhalbzeug stellt die temporäre Position der Fließfront dar. In Bild 5.15 sind die von der Routine identifizierten Einzelpunkte deutlich sichtbar. Da über das Bild des Kalibrierungsmusters eine Skalierung von Pixeln in Millimeter hinterlegt ist, gibt das Programm die kartesischen Koordinaten jedes einzelnen der 360 Punkte bezogen auf den Mittelpunkt der Injektionsöffnung aus. Eine nachgeschaltete Routine zum Approximieren einer Ellipse basierend auf den 360 Einzelpunkten liefert die gesuchten Ellipseninformationen, die Hauptachsenlängen und den Drehwinkel. Da weder im Handbuch von National Instruments Vision noch auf direkte Anfrage bei National Instruments die genaue Funktionweise dieses Approximierungsalgorithmus in Erfahrung gebracht werden konnte, wurde das Ergebnis anhand von ausgedruckten Ellipsen mit bekannten Hauptachsenlängen und Drehwinkeln verifiziert.

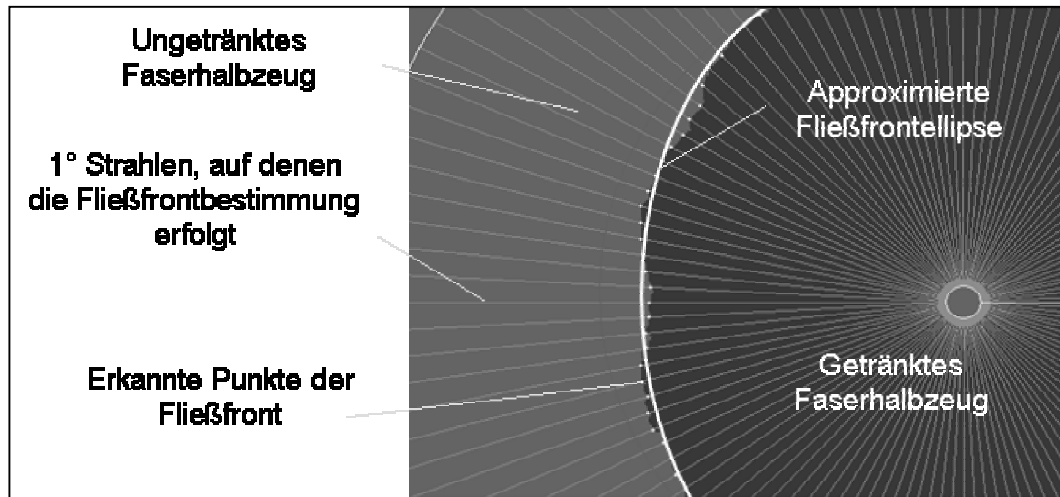


Bild 5.15: Routine zur Erkennung von 360 Einzelpunkten auf der Fließfront

Hierbei ergeben sich wiederum die aus der vorgehenden Bildbearbeitung bekannten, sich negierenden Abweichungen. Auch bei der Bestimmung des Drehwinkels kann keine nennenswerte Abweichung festgestellt werden. Bei der Betrachtung späterer Aufnahmen wurde jedoch klar, dass der Algorithmus nicht nur auf Basis einer nicht-linearen Regression in Bezug auf die Einzelpunkte hin optimiert, sondern dass auch die jeweilige Fläche der Ellipse zur Optimierung herangezogen wird. Dies lässt sich insbesondere bei starken Anomalien der Fließfront beobachten. Hier ist die Pixelfläche der realen Geometrie fast bis auf die letzte Kommastelle identisch mit der Fläche der optimierten Ellipse. Der Algorithmus besitzt auch die Möglichkeit, einzelne Punkte von der Ellipsenapproximierung auszuschließen. Aus diesem Grund ist eine entsprechende Anzeige auf dem Frontpanel der Auswertesoftware (Bild 5.5, „Valid Fit“ und „Anzahl fehlgeschlagener Fits“) angebracht worden, um den Bediener auf diese Tatsache aufmerksam zu machen. Im Verlauf der Auswertung kam es jedoch nie dazu, dass das Programm einen Punkt auf dem Umfang der Ellipse nicht zur Berechnung herangezogen hat.

5.3 Versuchsergebnisse der Permeabilitätsmessungen mit dem kombinierten Permeabilitäts- und Kompaktierungsprüfstand

In den folgenden Unterkapiteln werden exemplarisch die Versuchsergebnisse zweier Materialien, von biaxialem Gelege (Material D) und von triaxialem Gelege (Material E), anhand von Fließfrontbildern und berechneten Permeabilitäten beschrieben.

Da für die zweidimensionale Bestimmung der Permeabilität in der Regel die äußeren Abmessungen der Probe sekundär sind -hier ist lediglich der sich aus dem Flächen-gewicht und der Kavitätshöhe ergebende Faservolumengehalt bzw. die entsprechende Porosität relevant-, ist zunächst die Auswirkung der Gewichtsschwankungen der untersuchten Halbzeugproben auf den Zielfaservolumengehalt zu untersuchen. Legt man die in Bild 3.18 dargestellten Abweichungen des Probengewichts der einzelnen Probensorte zugrunde, so ergeben sich zum Beispiel für das biaxiale Material D bezogen auf den jeweiligen Zielfaservolumengehalt die in Bild 5.16 aufgezeigten Abweichungen von bis zu 2,2%.

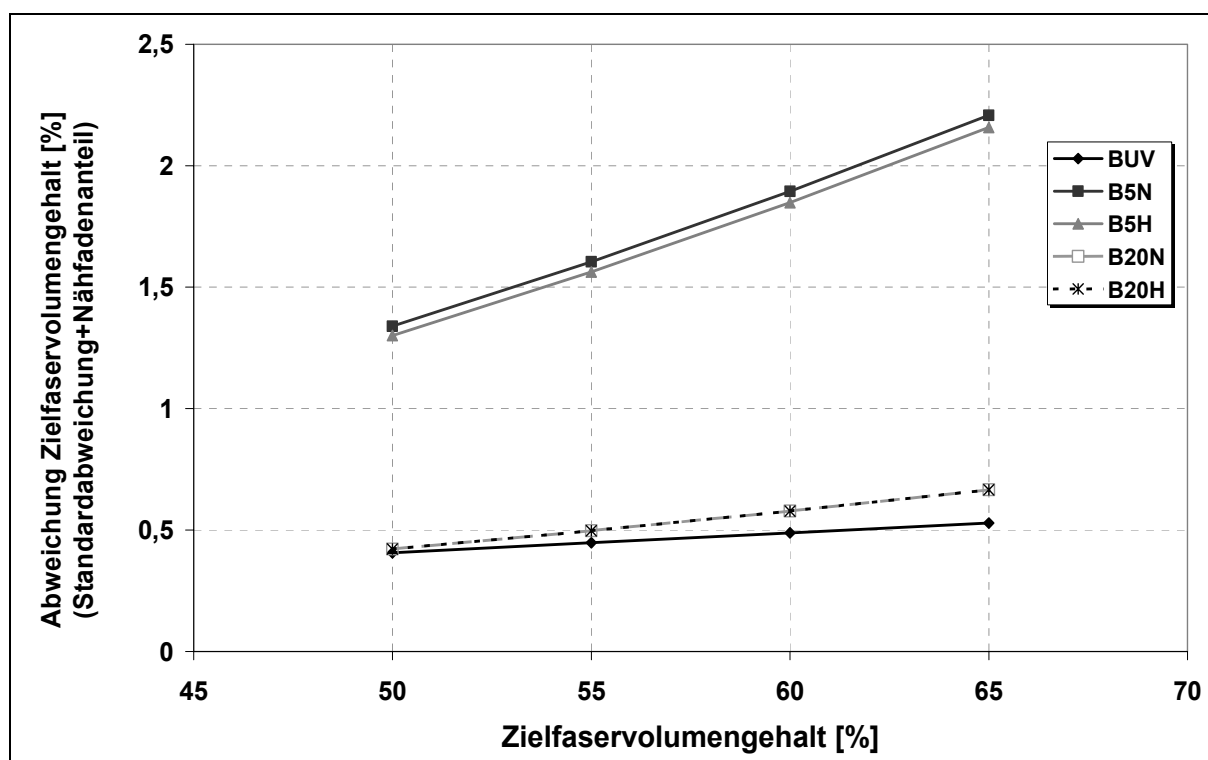


Bild 5.16: Prozentuale Auswirkung des Nähfadenanteils und der Varianz des Halbzeugflächengewichts auf den jeweiligen Zielfaservolumengehalt am Beispiel von Material D

Die Abweichung von 2,2 Volumenprozent bei einem Zielfaservolumengehalt von 65 % setzt sich im Fall des biaxialen Materials D aus rund 2 % für den Fadenanteil des 5x5 Nähmusters und rund 0,2 % Standardabweichung des Probengewichts zusammen. Die reale Porosität dieser Probe beträgt folglich nur rund 32,8 %. Geht man vom reinen Faservolumengehalt aus, beträgt die Porosität der Probe dagegen rund 35 %. Diese Gesamtabweichung vom jeweiligen Zielfaservolumengehalt ist für alle Proben in Tabelle 5.1 zusammengefasst.

Da für die mechanische Auslegung nur das von technischen Fasern (Glas-, Kohlenstofffasern, etc.) eingenommene Kavitätswolumen relevant ist, werden bei allen Versuchen mit vernähten Proben die aus den Zielfaservolumengehalten ermittelten Kavitätshöhen angefahren. Hieraus folgt, dass sowohl für den Kompaktierungsversuch als auch für die Permeabilitätsbestimmung im Falle der vernähten Proben eine Reduzierung der effektiven Porosität auftritt. Dies bedingt, dass die allgemeine Definition der Porosität Φ um den Fadenvolumengehalt erweitert wird:

$$\Phi = 1 - (\text{Faservolumengehalt} + \text{Fadenvolumengehalt}) \quad (5.1)$$

Aus diesem Grund wird bei den Ergebnissen der Permeabilitätsmessung die reale Porosität der Probe, die in Tabelle 5.1 ersichtlich ist, zusätzlich angegeben.

Tabelle 5.1: Prozentuale Gesamtabweichung vom angestrebten Zielfaservolumengehalt für Material D, E und A

	BUV	B5N	B5H	B20N	B20H	TUV	T5N	T5H	T20N	T20H	GUV	G5N	G5H	G20N	G20H
Abweichung vom Zielfaservolumengehalt 50 %	0,41	1,34	1,30	0,42	0,42	0,19	1,31	1,28	0,39	0,44	0,48	1,47	1,49	0,56	0,49
Reale Porosität	49,59	48,66	48,70	49,58	49,58	49,81	48,69	48,72	49,61	49,56	49,52	48,53	48,51	49,44	49,51
Abweichung vom Zielfaservolumengehalt 55 %	0,45	1,60	1,56	0,50	0,50	0,21	1,56	1,53	0,46	0,52	0,53	1,75	1,76	0,65	0,58
Reale Porosität	44,55	43,40	43,44	44,50	44,50	44,79	43,44	43,47	44,54	44,48	44,47	43,25	43,24	44,35	44,42
Abweichung vom Zielfaservolumengehalt 60 %	0,49	1,89	1,85	0,58	0,58	0,23	1,85	1,81	0,54	0,60	0,58	2,05	2,06	0,74	0,66
Reale Porosität	39,51	38,11	38,15	39,42	39,42	39,77	38,15	38,19	39,46	39,40	39,42	37,95	37,94	39,26	39,34
Abweichung vom Zielfaservolumengehalt 65 %	0,53	2,21	2,16	0,67	0,67	0,25	2,15	2,11	0,62	0,69	0,63	2,37	2,39	0,84	0,76
Reale Porosität	34,47	32,79	32,84	34,33	34,33	34,75	32,85	32,89	34,38	34,31	34,37	32,63	32,61	34,16	34,24

Als Fluid zur Durchführung der Permeabilitätsversuche wurde das Speiseöl „Bellasan Reines Pflanzenöl aus Raps“ der Firma Bunge Deutschland GmbH, Mannheim ausgewählt. Neben der geringeren Umweltbelastung im Vergleich zu in der Literatur verwendeten mineralischen Ölen oder Silikonölen besitzt das Speiseöl zudem eine Viskosität, die innerhalb des Bereichs der Harze für Flüssigimprägnierprozesse liegt. Die Viskosität des Pflanzenöls ist wie auch bei anderen quasi-newtonischen Flüssigkeiten von der Temperatur abhängig. Diese Abhängigkeit wurde mit einem Spindelrheometer des Typ DV-II der Firma Brookfield bestimmt. Dabei wurden mit der Spindel „I“, welche die Spindel für niedrigviskose Medien ist, Versuche mit verschiedenen Spindeldrehzahlen (12, 30 und 60 1/min) durchgeführt. Das Ergebnis der durchgeführten Messungen wurde gemittelt und mit der auftretenden Standardabweichung in Bild 5.17 dargestellt.

Alle Versuche zur Bestimmung der Viskosität wurden bei Raumtemperaturen zwischen 21,8 und 29,2 °C durchgeführt. Da die Viskosität bei der Bestimmung der

Permeabilität eine Konstante ist, wird die vorherrschende Raumtemperatur bei jeder Permeabilitätsmessung berücksichtigt. Auf diese Weise wird die Auswirkung von schwankenden Raumtemperaturen auf die Viskosität kompensiert. Bei der Versuchsdurchführung wird lediglich davon ausgegangen, dass sich weder die Temperatur des Werkzeugs noch die Temperatur des Fluids ändern.

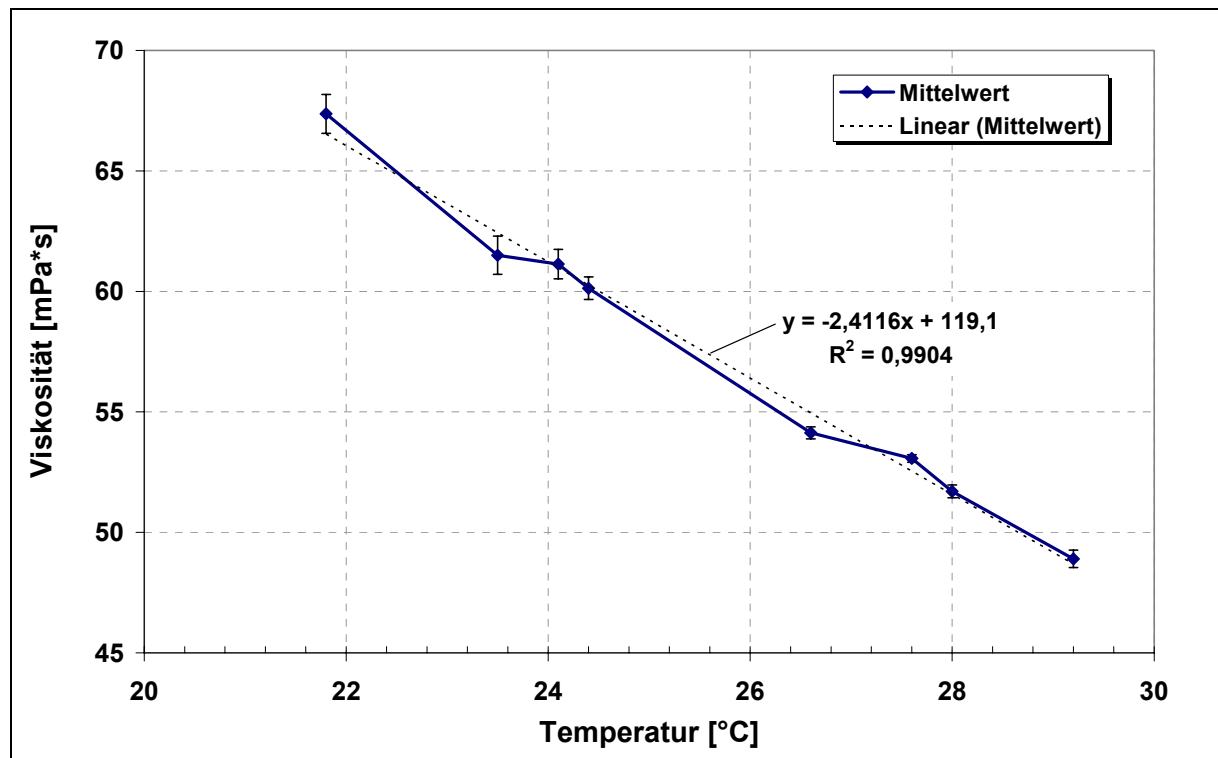


Bild 5.17: Viskositätsverlauf der Harzersatzflüssigkeit Pflanzenöl als Funktion der Raumtemperatur

5.3.1 Versuchsergebnisse der Permeabilitätsmessungen an biaxialen Gelege (Material D)

Eine Auswahl an charakteristischen Fließfrontgeometrien, die sich während der Injektionsphase des biaxialen Geleges (Material D) einstellen, findet sich in Bild 5.18. Vergleicht man die Fließfronten der vernähten Proben mit denen des unvernähten Basismaterials, so kann man eindeutig einen Einfluss der zusätzlich eingebrachten Nähte erkennen. Die Beeinflussung äußert sich sowohl in der Grobgeometrie, d.h. der approximierten Ellipse, als auch in lokalen Unstetigkeiten der Fließfront. Hinsichtlich der Geometrie kann festgestellt werden, dass durch Verwendung einer geringeren Fadenabzugskraft die Geometrie weniger stark beeinträchtigt wird als dies bei den vergleichbaren Proben mit hoher Fadenabzugskraft der Fall ist. Die lokalen Un-

stetigkeiten prägen sich bei einer Vernähung mit 20x20 mm Raster stärker aus als dies bei den 5x5 mm Proben der Fall ist. Aus dieser Tatsache lässt sich ableiten, dass eine identische Beeinflussung ebenfalls bei den Proben des 5x5 mm Rasters stattfindet. Durch die im Vergleich zur 20x20 mm Rasterung starke Reduzierung der räumlichen Nähe der Nähte zueinander kann davon ausgegangen werden, dass die Fließfrontanomalien sich gegenseitig überlagern, wodurch eine gewisse Homogenisierung eintritt.

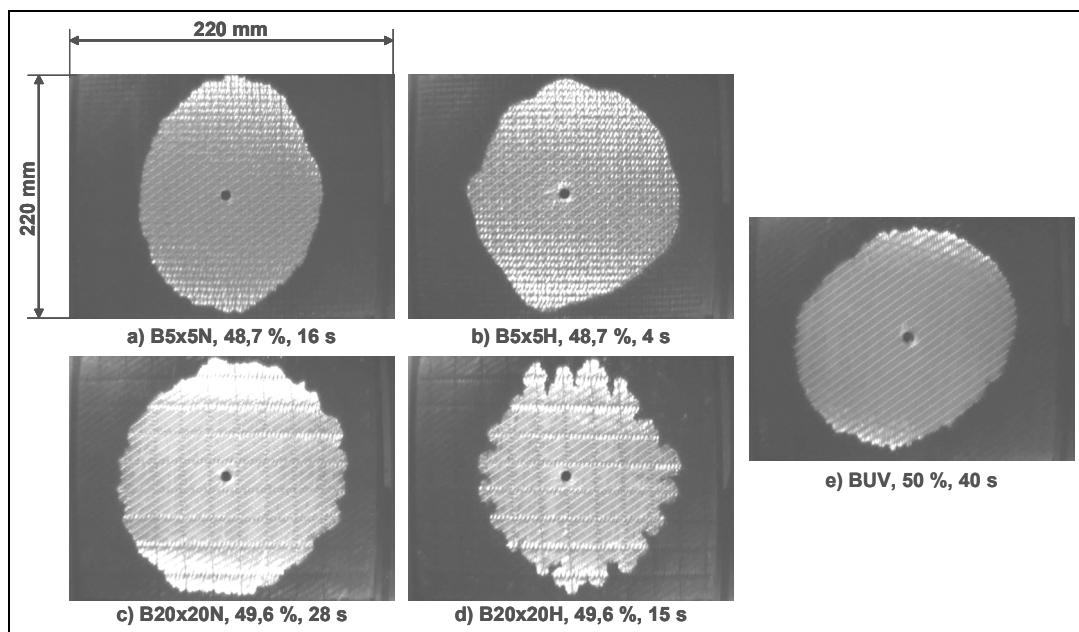


Bild 5.18: Unterschiede in der Ausbildung der Fließfrontverläufe bei biaxialem Gelege D zwischen Proben mit und ohne eingebrachten Nähmustern bei 50% Zielfaservolumengehalt. Die reale Porosität und die Versuchsdauer sind als letzte Zahlen an die Nomenklatur der Proben (vgl. Bild 3.15) angehängt

Vergleicht man die jeweilig zugehörigen Einzelbilder aus Bild 5.18 und Bild 5.19 miteinander, so kann man zunächst feststellen, dass die höhere Kompaktierung auf einen Zielfaservolumengehalt von 65 % augenscheinlich zu einer Isotropisierung der Fließfrontgeometrie führt. Durch die stärkere Kompaktierung kann zwar eine Reduzierung des in Bild 5.18 d) sehr ausgeprägten Voreilens der Fließfront entlang der einzelnen Nähte erreicht werden, dennoch ist die Auswirkung der Nähte auch in Bild 5.19 d) noch klar zu erkennen.

Anhand der gezeigten experimentellen Fließfronten lässt sich für das biaxiale Gelege feststellen, dass die durch die zusätzliche Vernähung eingebrachten Fäden das Ma-

terial lokal stärker kompaktieren können als dies durch die Kavität für den Rest des Halbzeugs erfolgen kann.

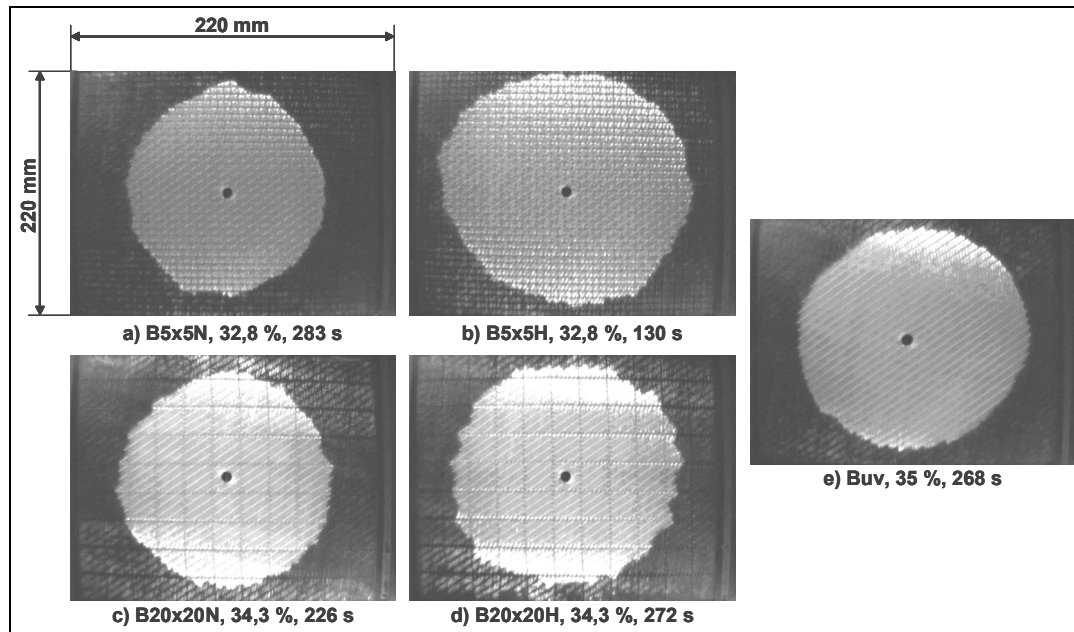


Bild 5.19: Unterschiede in der Ausbildung der Fließfrontverläufe bei biaxialem Gelege D zwischen Proben mit und ohne eingebrachten Nähmustern bei 65 % Faservolumengehalt

Durch die eingestellte Fadenabzugskraft beim nähtechnischen Einbringen des Rassters ist es folglich möglich, durch lokales Einschnüren des Halbzeugs Kanäle höherer Permeabilität zu erzeugen. In diesen Kanälen eilt die injizierte Flüssigkeit der restlichen Fließfront vor. Diese Vermutung lässt sich über entsprechende Schliffbilder von Querschnitten ausgehärteter Lamine belegen. In Bild 5.20 a) ist die Oberfadenabzugskraft niedriger als die Unterfadenabzugskraft, weshalb die Verknotungslage auf der Unterseite des Nähgutes zum Liegen kommt. Wie deutlich zu erkennen ist, schnürt der Faden in Nährichtung das Halbzeug zwischen zwei Stichen stark ein. Es resultiert eine lokale Verdrängung des Faserhalbzeugs, was mit einer Kanalbildung in Nährichtung einhergehen kann, wenn die durch das Schließen des Werkzeugs aufgebrachte Kompaktierung geringer ist als die nähtechnische Kompaktierung. Die Auswirkungen der Kompaktierung des Faserhalbzeugs durch das Schließen des Werkzeugs sind den Auswirkungen einer hohen Presserfußkraft annähernd gleichzusetzen (vgl. Bild 5.20 b)). Das Angleichen der beiden Kompaktierungskräfte und damit die Reduktion des Voreilens der Fließfront entlang der Nähte ist im Injektionsverhalten des biaxialen Geleges beim Vergleich von Bild 5.18 d) mit Bild 5.19 d) zu

erkennen. Eine ideale Einstellung der Kompaktierung sowohl durch die eingebrachten Nähte als auch innerhalb des Werkzeugs ist in Bild 5.20 c) dargestellt. In einer solchen Konfiguration kann sich das Stichloch, und damit der Fließkanal, komplett schließen. Untersuchungen bezüglich der Abhängigkeit der Stichlochgeometrie von ausgewählten Nähparametern können bei [125,126] nachgelesen werden.

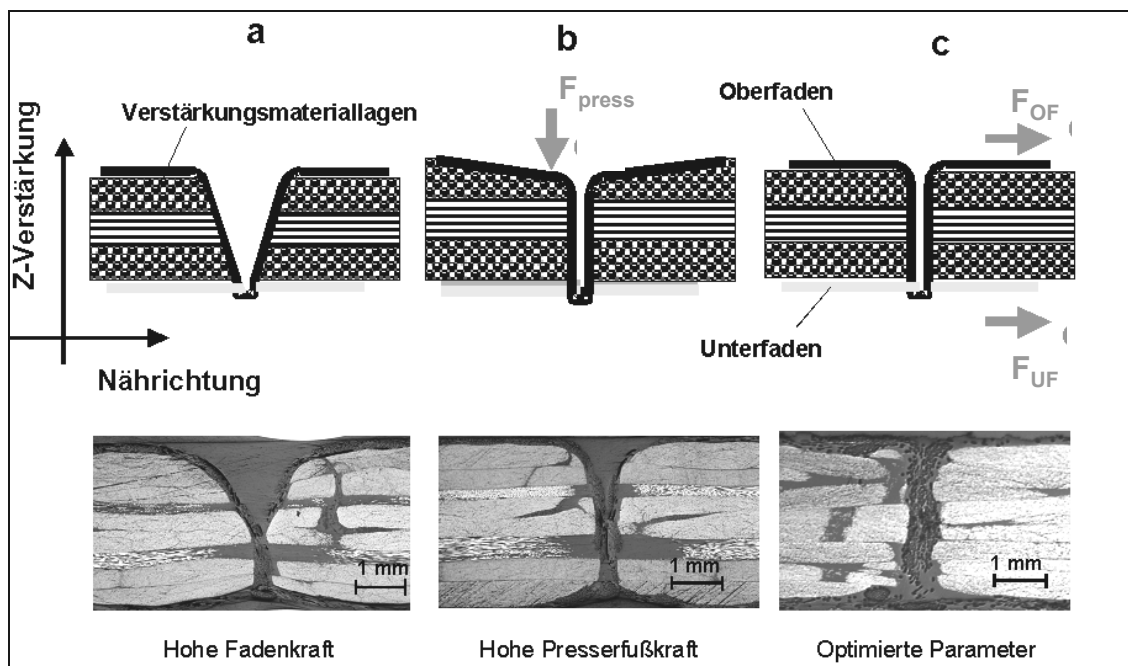


Bild 5.20: Auswirkungen von Faden- und Presserfußkraft auf die Stichloch- und Fließkanalbildung innerhalb des Faserhalbzeugs [51]

Betrachtet man die aus den einzelnen Fließfrontgeometrien errechneten Ergebnisse der in Bild 5.21 und Bild 5.22 dargestellten Permeabilitätsmessungen, so fällt auf, dass sich die Permeabilität der vernähten Proben gegenüber dem unvernähten Referenzmaterial generell erhöht. Weiterhin zeigt sich, dass die höchste Permeabilität bei den mit 5x5 mm und hoher Fadenabzugskraft vernähten Proben zu verzeichnen ist. Während die verbleibenden Materialien in erster Näherung als Gruppe gesehen werden können, sind diese 5x5 mm Proben fast um eine Zehnerpotenz permeabler. Aufgrund der vorher beschriebenen Zusammenhänge zwischen Halbzeugkompaktierung und Nähparametern ist zu erwarten, dass eine erhöhte Permeabilität bei höheren Porositätswerten eintritt. Eine für dieses Verhalten charakteristische Änderung der Steigung im Permeabilitätsverlauf der 5x5 mm Proben im Porositätsbereich von rund 0,47 bis 0,43 belegt dies. Im experimentellen Verlauf zu niedrigeren Porositätswerten sollte sich jedoch aufgrund der immer stärkeren Kompaktierung der Probe innerhalb

des Werkzeugs die Permeabilität an die Werte der anderen Proben annähern und damit den Einfluss der über die Nähte eingebrachten Fließkanäle reduzieren.

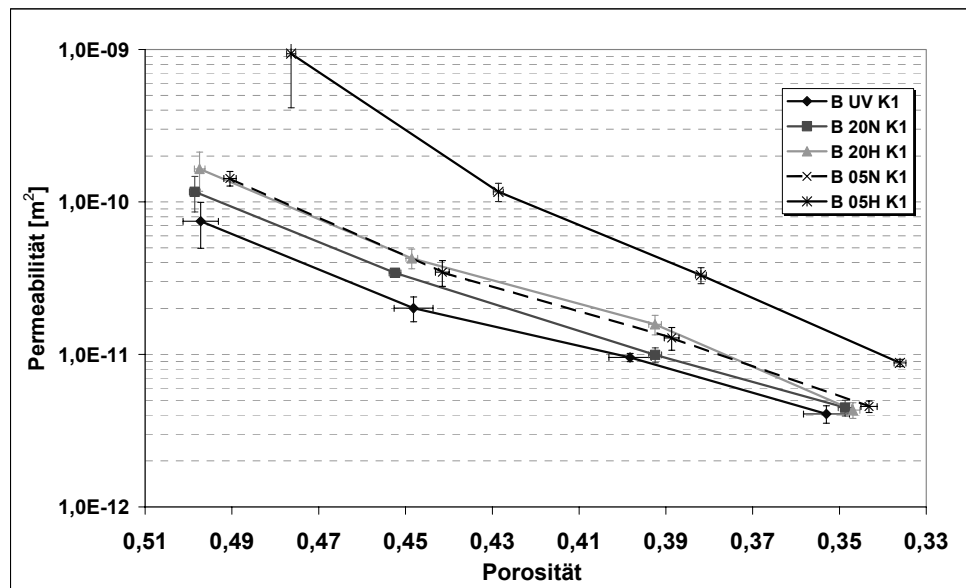


Bild 5.21: Hauptachsenpermeabilität K1 des biaxialen Geleges D als Funktion der Porosität

Dies ist beim biaxialen Gelege nur sehr begrenzt der Fall. Während bei den vernähten Proben die Steigungsänderung im Porositätsbereich zwischen rund 0,50 und 0,44 mit dem Einfluss der Nähte erklärt werden kann, so ist dies bei den unvernähten Proben aufgrund der fehlenden Fließkanäle nicht möglich.

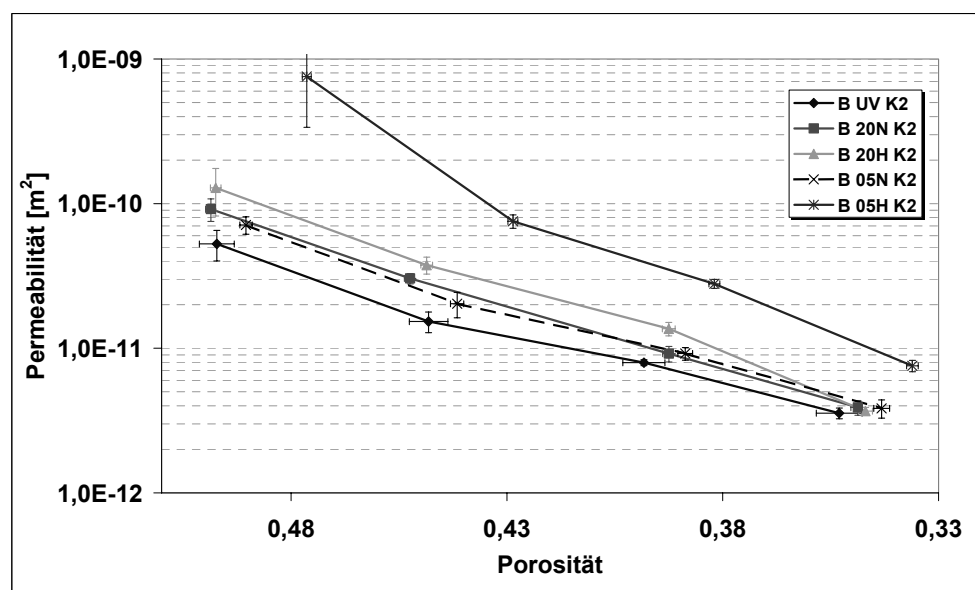


Bild 5.22: Hauptachsenpermeabilität K2 des biaxialen Geleges D als Funktion der Porosität

Betrachtet man in diesem Zusammenhang die während des Kompaktierungs- und Injektionsvorgangs aufgezeichneten Messdaten (vgl. Bild 5.3), so lässt sich für das biaxiale Material D der in Bild 5.23 dargestellte Kompaktierungskraftverlauf erzeugen.

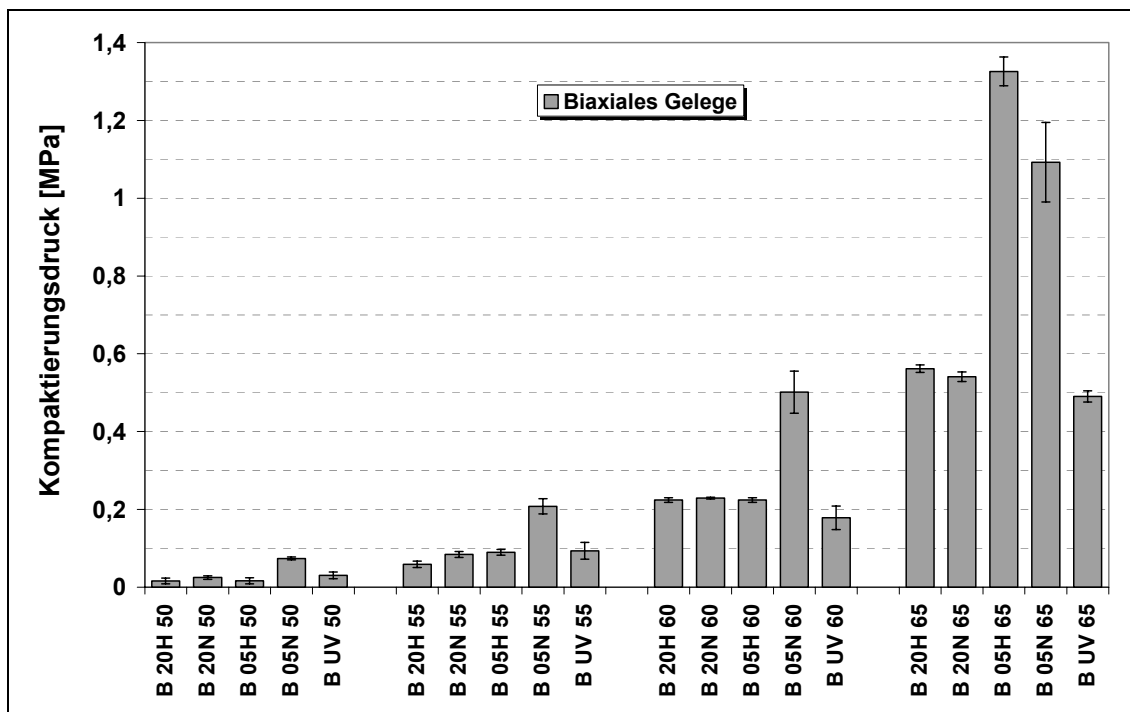


Bild 5.23: Erforderlicher Kompaktierungsdruck zum Erreichen der einzelnen Zielfaservolumenanteile bei biaxialem Gelege D

Hieraus geht hervor, dass insbesondere bei den Messungen bei 50 % Zielfaservolumengehalt der erforderliche Kompaktierungsdruck als gering einzustufen ist. Es ist hierbei allenfalls von einer leichten Berührung der Faseroberfläche mit den Kavitätswänden auszugehen. Da in diesem Fall der anliegende Injektionsdruck der Flüssigkeit mit rund 0,1 MPa zum Teil erheblich höher als der eigentliche Kompaktierungsdruck ausfällt, ist es möglich, dass die in die Kavität injizierte Flüssigkeit eine zusätzliche Kompaktierung des Materialstapels bewirkt. Aufgrund dieser zusätzlichen Kompaktierung kann es wiederum zu einem race-tracking-Effekt entlang der gesamten Faseroberfläche kommen. Die Auswirkungen eines solchen race-tracking-Effekts würden eine scheinbar permeabilitätssteigernde Wirkung haben wie sie in den vorbezeichneten Messungen des biaxialen Geleges D bei niedrigen Faservolumenanteilen erkennbar ist.

Analysiert man nun die in erster Näherung als Gruppe bezeichneten Messwertkurven in Bild 5.21 und Bild 5.22 etwas differenzierter, so lässt sich feststellen, dass eine

Vernähung unabhängig vom Muster bei dem vorliegenden biaxialen Gelege D immer eine Permeabilitätssteigerung auslöst. Dieser Trend lässt sich bei beiden Hauptachsenpermeabilitäten belegen. Für die zweite Hauptachsenpermeabilität K_2 lässt sich zusätzlich feststellen, dass höhere Fadenabzugskräfte im Vergleich zu niedrigeren Fadenabzugskräften ungeachtet des Nähmusters zu einem Anstieg der Permeabilität führen.

5.3.2 Versuchsergebnisse der Permeabilitätsmessungen an triaxialem Gelege (Material E)

Bei der Durchführung der Untersuchungen an dem triaxialen Gelege E zeigen sich zunächst in Bezug auf die während der Injektion ausgebildeten Fließfronten Parallelen mit dem biaxialen Gelege D. Auch in diesem Fall sind die Auswirkungen der mit hoher Fadenabzugskraft eingebrachten Nähte auf den Fließfrontverlauf in Bild 5.24 und Bild 5.25 als unregelmäßiges Voreilen der lokalen Fließfronten zu erkennen. Parallel zum biaxialen Material D verringert sich der Einfluss der Nähte mit zunehmendem Kompaktierungsgrad. Auch ist eine Isotropisierung im Vergleich zu dem jeweiligen unverstärkten Basismaterial erkennbar, welche mit steigendem Kompaktierungsgrad ebenfalls zunimmt.

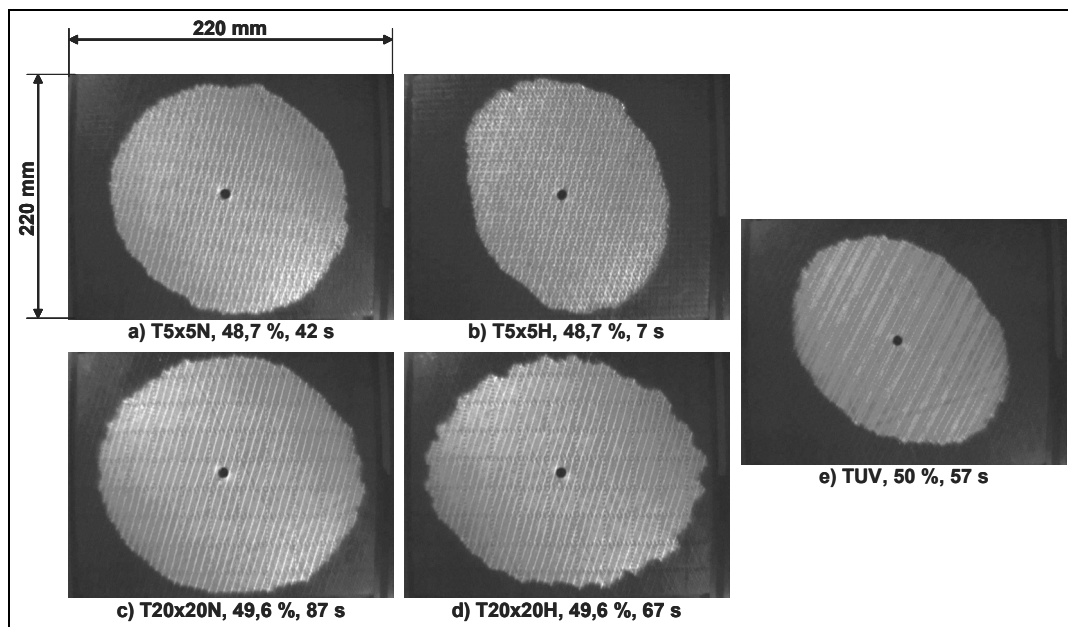


Bild 5.24: Unterschiede in der Ausbildung der Fließfrontverläufe bei triaxialem Gelege E zwischen Proben mit und ohne eingebrachten Nähmustern bei 50 % Zielfaservolumengehalt

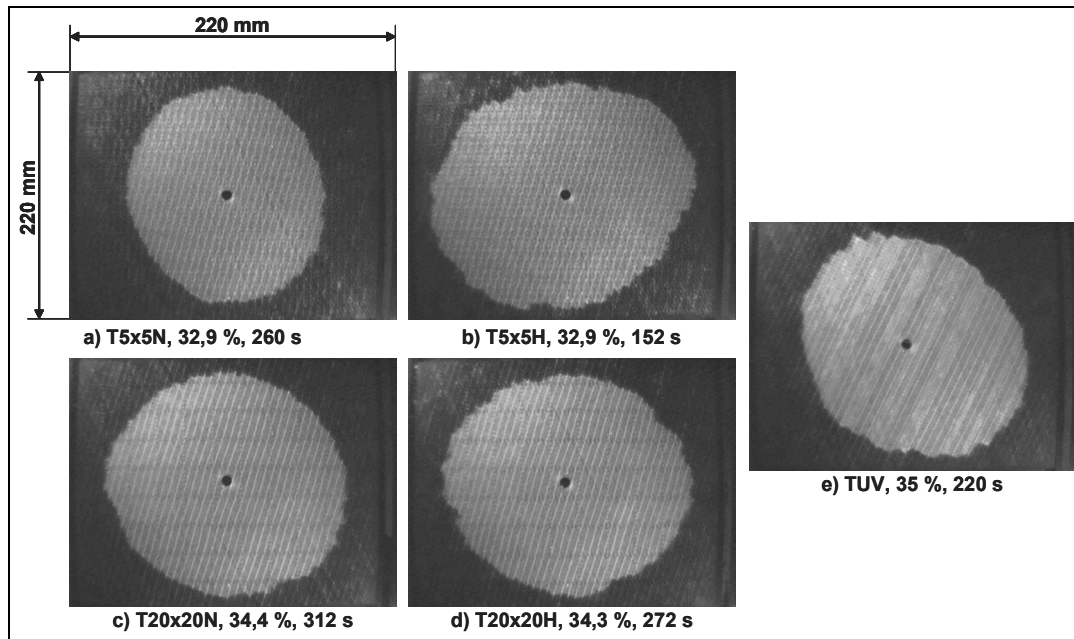


Bild 5.25: Unterschiede in der Ausbildung der Fließfrontverläufe bei triaxialem Gelege E zwischen Proben mit und ohne eingebrachten Nähmustern bei 65 % Zielfaservolumengehalt

Die in Bild 5.26 und Bild 5.27 dokumentierten Ergebnisse der Permeabilitätsberechnungen zeigen, dass auch hier die Vernähung mit einem 5x5mm Nähmuster und hoher Fadenabzugskraft die Permeabilität des Halbzeugs zum Teil erheblich verbessert. Interessanterweise kann bei diesem Faserhalbzeug entlang der in Bild 5.27 gezeigten zweiten Hauptachsenrichtung keine Änderung der Permeabilität durch die eingebrachte Vernähung beobachtet werden. Die Kurven der einzelnen Probenaussparungen können nahezu als identisch bezeichnet werden. Bei der in Bild 5.26 dargestellten ersten Hauptachsenrichtung zeigt sich, dass durch die Vernähung nicht wie im Falle des biaxialen Materials eine Permeabilitätssteigerung erzeugt wird, sondern, wenn überhaupt, eher das Gegenteil eintritt. In diesem Fall ist ganz offensichtlich der Einfluss der durch die Nähte erzeugten Kanälen relativ gering, sodass sich das zusätzliche Fadenmaterial eher als Blockade auswirkt als dass es den Fließvorgang beschleunigt.

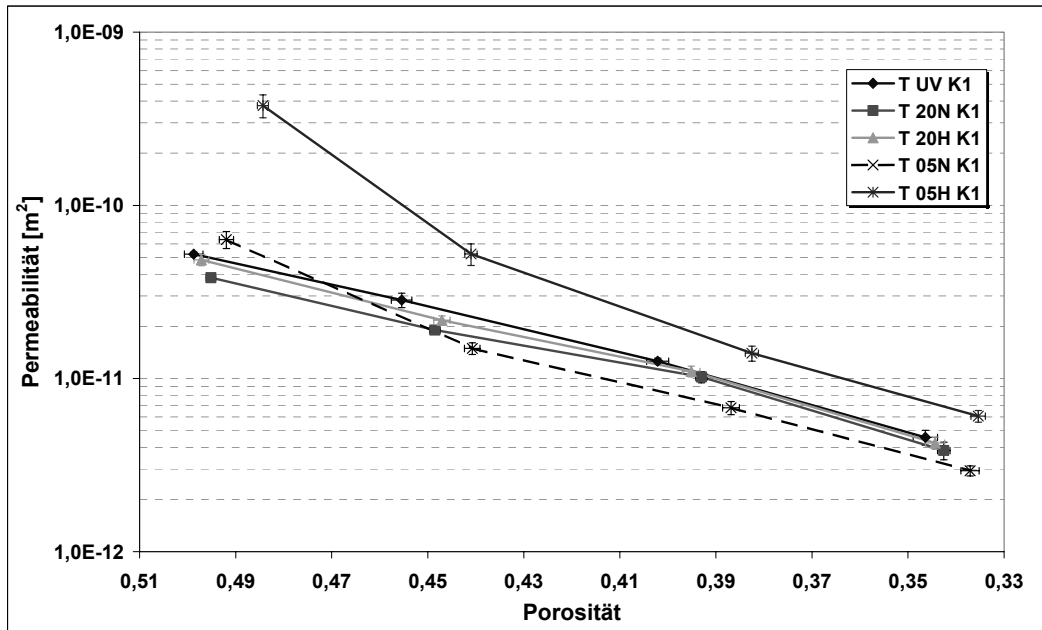


Bild 5.26: Hauptachsenpermeabilitäten K1 des triaxialen Geleges E als Funktion des Faservolumengehalts

Auch tritt der charakteristische Knick zwischen den ersten beiden Messpunkten nur bei den mit 5x5 mm vernähten Proben dieses Materials auf.

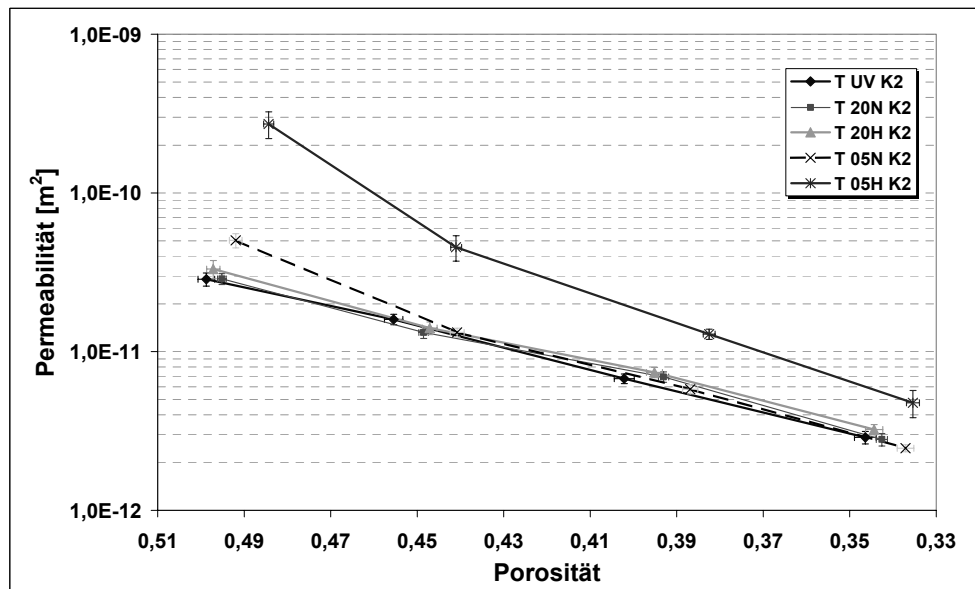


Bild 5.27: Hauptachsenpermeabilitäten K2 des triaxialen Geleges E als Funktion des Faservolumengehalts

Der Blick auf die erforderlichen Kompaktierungskräfte bei triaxialem Material (Bild 5.28) offenbart jedoch, dass das mit 5x5mm Nähmuster und niedriger Fadenabzugs-

kraft vernähte Material deutlich mehr Kompaktierungskraft zum Erreichen des gleichen Zielfaservolumengehalts benötigt als dies bei den restlichen Proben der Fall ist.

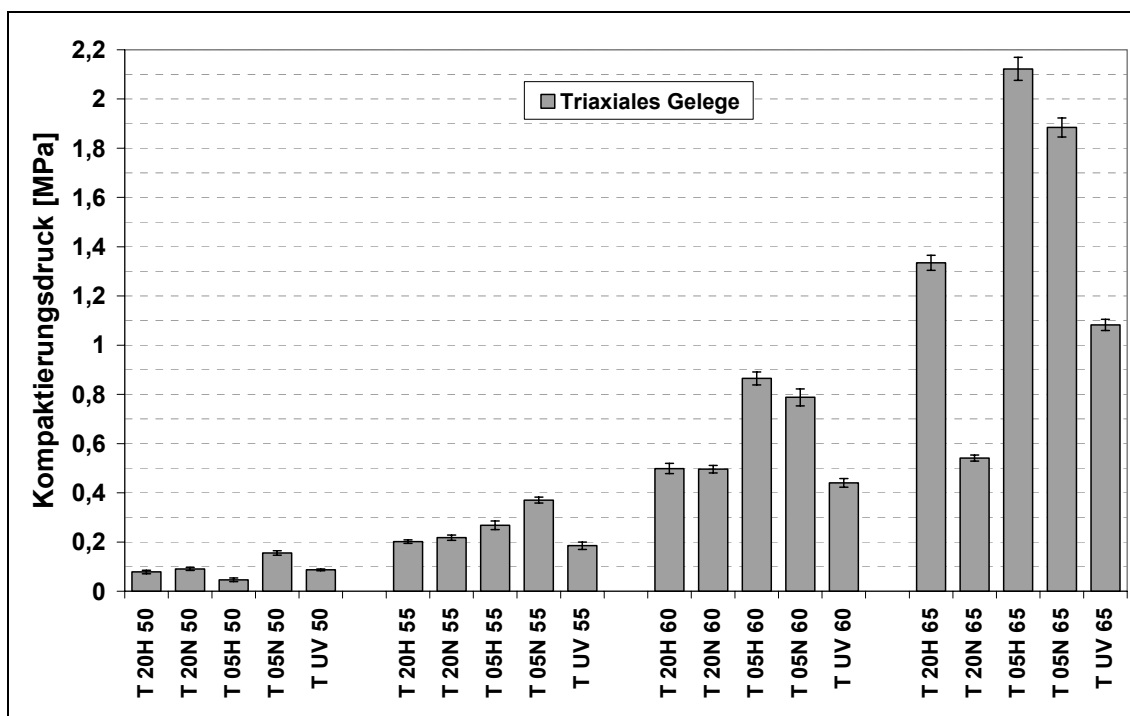


Bild 5.28: Erforderlicher Kompaktierungsdruck zum Erreichen der einzelnen Zielfaservolumengehalte bei triaxialem Gelege E

Ebenfalls liegt der Kompaktierungsdruck dieser Probenausprägung höher als der anliegende Injektionsdruck, wodurch eine zusätzliche Kompaktierung des Materials und damit der race-tracking-Effekt entlang der Oberflächen ausgeschlossen werden kann. Da dieses Phänomen ausschließlich bei den 5x5 Nähmustern auftritt, kann lediglich die räumliche Nähe der einzelnen Nähte zueinander in Verbindung mit dem für dieses Material gewählten Nähwinkel als Ursache identifiziert werden. Bei näherer Betrachtung der vernähten Probenoberfläche wird ersichtlich, dass es bei den 5x5 mm Proben tatsächlich zu einer Verbindung der elliptischen Einstichlöcher kommt (vgl. Bild 5.29). In Bild 5.29 ist zudem deutlich zu erkennen, dass die Größe der Stichlochellipsen mit der höheren Fadenabzugskraft ebenfalls zunimmt.

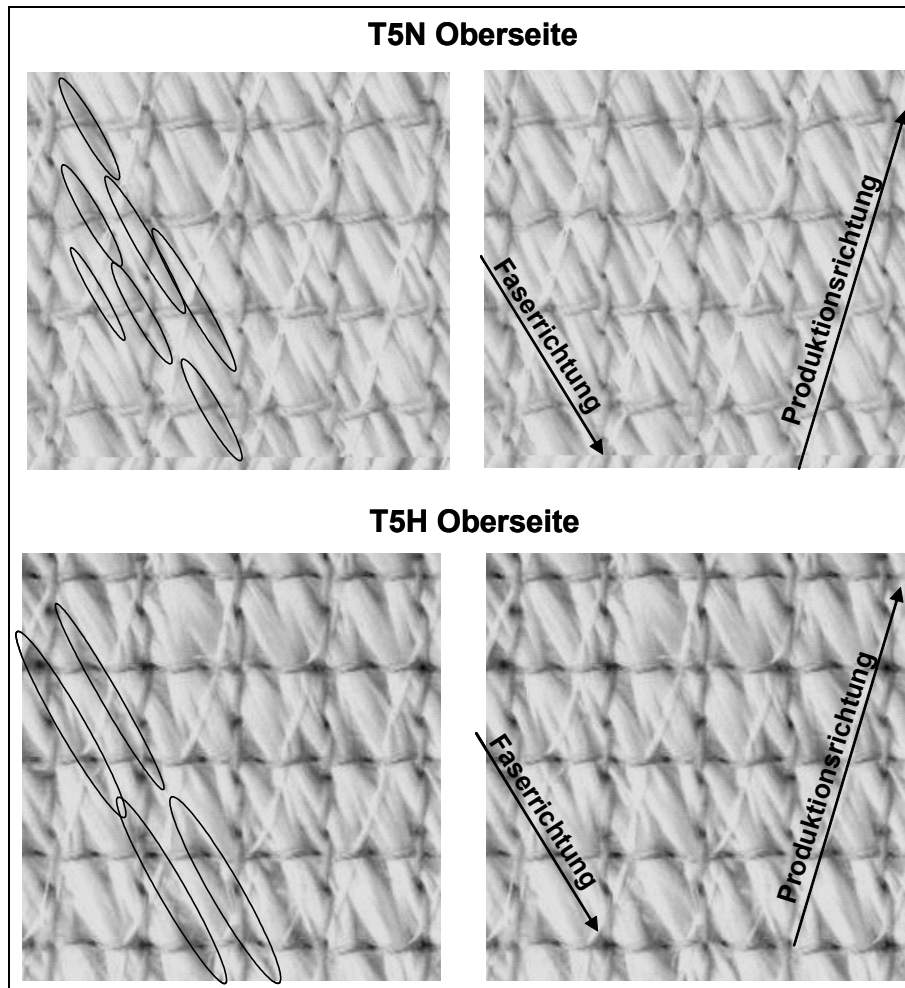


Bild 5.29: Topologische Ausschnitte aus triaxialen Gelegeproben, die mit dem 5x5 mm Nähmuster mit niedriger (T5N) und hoher Fadenabzugskraft (T5H) vernäht wurden

Durch die im Verlauf der Versuche zunehmende Kompaktierung schließen sich offensichtlich die elliptischen Einstichlöcher wieder soweit, dass es zu keinem race-tracking-Effekt mehr kommt, wodurch sich auch die Permeabilitätskennwerte wieder normalisieren. Dieses Verhalten kann anhand der in Bild 5.30 dargestellten Aufnahmen einer Probe des biaxialen Materials D bei unterschiedlichen Zielporositäten belegt werden. Sind die Stichlochellipsen bei einer Porosität von 50 % noch deutlich erkennbar, so sind im Gegensatz dazu bei 65 % fast keine Stichlöcher mehr sichtbar. Auch wird deutlich, dass durch die starke Kompaktierung kaum noch Fließkanäle entlang der einzelnen Nähte existieren. Das Material wirkt als eine homogene Faserfläche, die nur von den Wirk- und Nähnähten durchzogen ist. Folglich ist auch die bei beiden getesteten Gelegen mit zunehmendem Kompaktierungsgrad beobachtete Isotropisierung der beiden Hauptachsenpermeabilitäten nachvollziehbar.

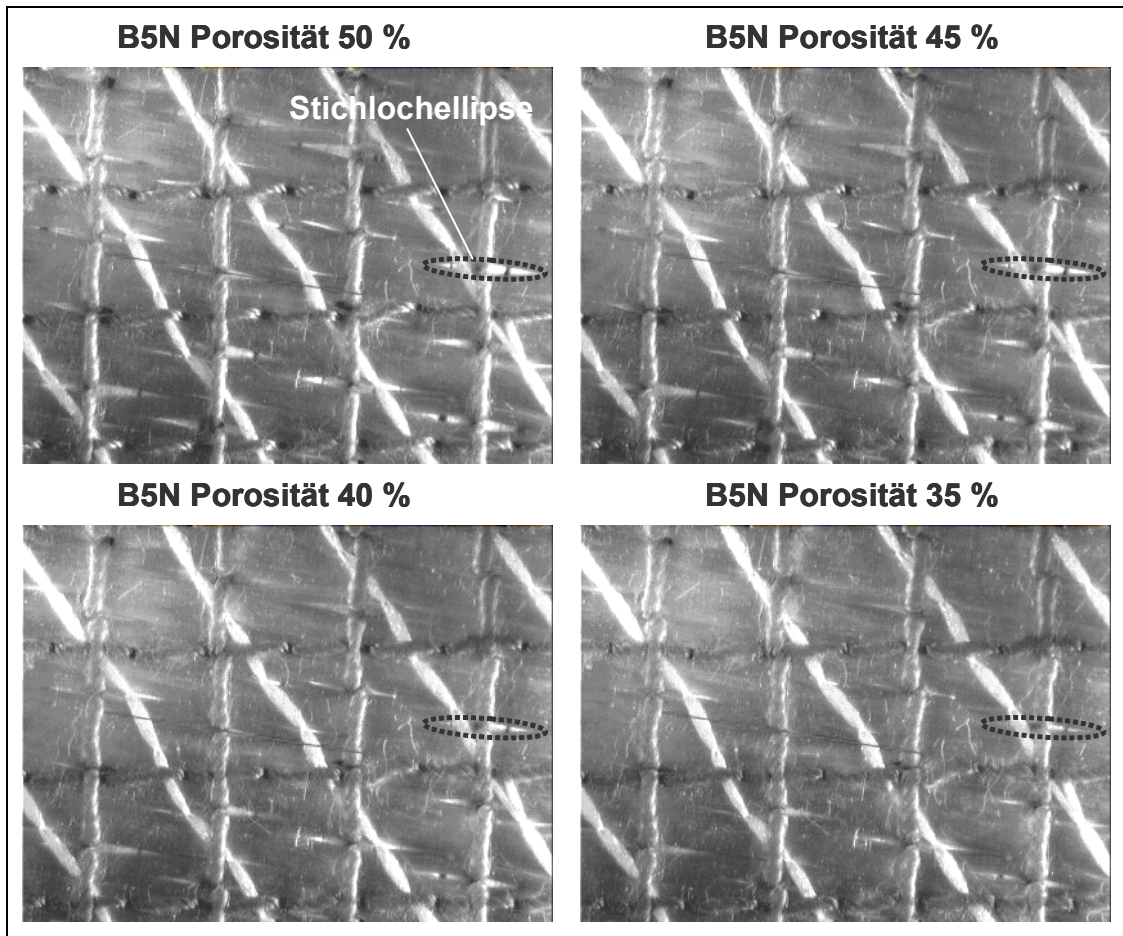


Bild 5.30: Reduzierung der Größe der Stichlochellipsen bei steigender Halbzeugkompaktierung am Beispiel von biaxialem Gelege D vernäht mit 5x5 mm Nähmuster und niedriger Fadenabzugskraft (B5N)

Vergleicht man die Permeabilitätskennwerte der vernähten Halbzeuge mit denen der unvernähten Basismaterialien, so lassen sich die Ergebnisse in Tabelle 5.2 folgendermaßen zusammenfassen.

Tabelle 5.2: Änderung des Permeabilitätskennwerts K1 durch zusätzlich eingebrachte Nähte für die Materialien D, E und A

Faservolumengehalt	Änderung der Permeabilität bezogen auf das Basismaterial [%]											
	Material D				Material E				Material A			
	B20 N	B20 H	B05 N	B05 H	T20 N	T20 H	T05 N	T05 H	G20 N	G20 H	G05 N	G05 H
50%	156,1	221,1	191,3	1259,8	73,1	92,8	121,5	721,4	73,9	77,6	152,8	1055,3
55%	170,6	212,7	172,2	580,1	67,0	76,4	52,6	184,7	121,6	125,4	125,9	628,6
60%	104,0	164,9	134,4	346,5	81,0	87,3	53,8	111,2	67,8	84,3	91,3	209,3
65%	110,0	105,8	111,9	216,1	84,0	92,7	64,2	132,6	85,6	73,6	68,1	114,1

Basierend auf den in Tabelle 5.2 dargestellten Ergebnissen kann sich bei den vorliegenden Faserhalbzeugen durch das Einbringen von Nähmustern, deren Parameter in Tabelle 3.3 definiert sind, die Permeabilität des Basiswerkstoffs zwischen rund 70 und 600 % verändern. Die Werte bei 50% Faservolumengehalt sollten nicht in Be-

tracht gezogen werden, da hier aufgrund der Vorkompaktierung der Halbzeugproben die Kavität nicht komplett ausgefüllt wurde. Bemerkenswert ist, dass bei dem biaxialen Gelege D jedes zusätzliche Vernähen eine Permeabilitätssteigerung bedingt. Im Gegensatz dazu löst die Vernähung des triaxialen Geleges E und des Rovinggewebes A generell eine Herabsetzung der Permeabilität aus. Einzig die Vernähung mit dem 5x5 mm Nähmuster mit hoher Fadenspannung lässt eine signifikante Steigerung der Permeabilität erreichen. Bezieht man diese Permeabilitätssteigerung im einfachsten Fall auf das eindimensionale Fließen gemäß Gleichung 4.3, so ist die prozentuale Steigerung der Permeabilität unter der Annahme ansonsten unveränderter Parameter proportional zu der Steigerung des Fließfrontfortschritts. Diese Ergebnisse belegen, dass die Nähtechnik zur gezielten Veränderung der Permeabilität eines Halbzeugs eingesetzt werden kann. Die eingebrachten Nähte wirken wie ein materialinhärentes Verteilermedium, da sie entlang der Nährichtung ein schnelleres Fließen des imprägnierenden Mediums begünstigen. Kann die Permeabilität in ihrem Betrag gezielt beeinflusst werden, so kann dies auch in Bezug auf die Fließrichtung des imprägnierenden Mediums erreicht werden. Ziel weiterführender Arbeiten in dieser Richtung muss die Erforschung der Einflüsse der einzelnen Nähparameter auf die Permeabilität eines Faserhalbzeugs und deren Modellierung sein.

6 Vergleich der Ergebnisse der kombinierten optischen Kompaktierungs- und Permeabilitätsmesszelle mit den Ergebnissen entsprechender konventioneller Messverfahren

Da sowohl für die Kompaktierungsmessung als auch für die Permeabilitätsbestimmung Messungen mit übereinstimmenden Materialien vorliegen, kann ein direkter Vergleich zwischen den Ergebnissen der optischen Messzelle und der entsprechenden konventionellen Messverfahren angestellt werden. Entsprechend dem Ablauf der Versuchsdurchführung wird zunächst der Vergleich der erzielten Kompaktierungsergebnisse dokumentiert. Daran anschließend werden die Ergebnisse der Permeabilitätsuntersuchungen an unverstärkten Basismaterialien in einem separaten Unterkapitel ausgeführt.

6.1 Vergleich der Ergebnisse der Kompaktierungsuntersuchungen

Die in diesem Kapitel aufgeführten Ergebnisse wurden einerseits mit der kombinierten optischen Kompaktierungs- und Permeabilitätsmesszelle und andererseits mit dem in Bild 3.3 beschriebenen Standard-Versuchsaufbau ermittelt. Grundlage der Vergleichsversuche sind die in ihrer Herstellung in Kapitel 3.2 beschriebenen Proben. Alle Grundmaterialien entstammen dem gleichen Batch. Da die Probenherstellung ebenfalls in einem Arbeitsanlauf für die Gesamtheit aller Proben abgewickelt wurde, kann unter Berücksichtigung der bereits beschriebenen Abweichungen davon ausgegangen werden, dass quasi identische und damit vergleichbare Proben verwendet werden. Die Ergebnisse der Kompaktierungsversuche, die mit den beiden Versuchsaufbauten für das biaxiale Material D ermittelt wurden, sind einander in Bild 6.1 gegenübergestellt.

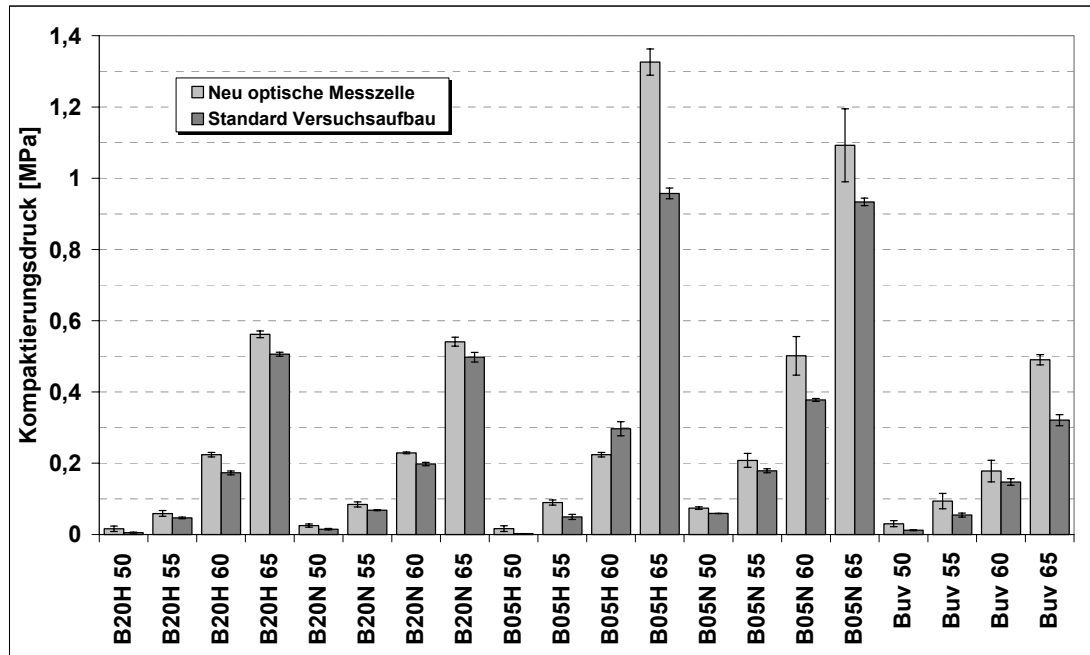


Bild 6.1: Vergleich des erforderlichen Kompaktierungsdrucks zum Erreichen eines definierten Zielfaservolumengehalts bei biaxialem Gelege D in Abhängigkeit des Versuchsaufbaus

Es fällt sofort auf, dass die mit der neuen optischen Messzelle erzielten Ergebnisse im Vergleich zu den Ergebnissen des Standardversuchsaufbaus zwar signifikant höher liegen, jedoch den gleichen Trend aufweisen. Die naheliegende Vermutung, dass die Ursache für die Differenz zwischen den Messungen der beiden Systeme in der Kalibrierung der verwendeten 150 kN Kraftmesszelle zu suchen sind, lässt sich anhand der in Bild 6.2 präsentierten Überprüfung der Kraftmesszelle nicht belegen. Die Bandbreite der Abweichungen der beiden Kraftverläufe beträgt im Bereich von 0 bis 45 kN maximal ± 45 N, was einer Ungenauigkeit von rund ± 10 % Abweichung bei 5 kN und ± 1 % bei 45 kN entspricht. Da jedoch bei den verglichenen Messungen der beiden Versuchsaufbauten nicht die Abweichungen in den niederen Kompaktierungsdruckbereichen am stärksten ausgeprägt sind, sondern die Abweichungen der höheren Druckbereiche, kann die Kraftmesszelle nicht die Ursache der Abweichungen sein.

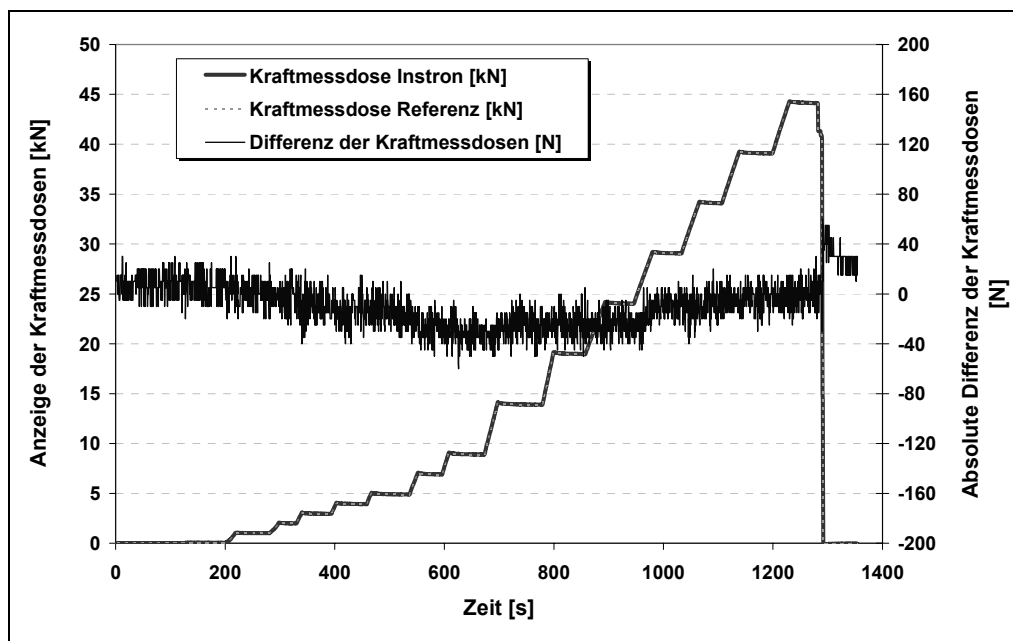


Bild 6.2: Vergleich der verwendeten 150 kN Kraftmessdose der Instron 4206 mit einer geeichten HBM Kraftmessdose

Zum einen liegt die Ursache für diese Diskrepanz darin begründet, dass zum Zwecke der verbesserten Übersicht die in Bild 6.1 dargestellten Ergebnisse über dem theoretischen Zielfaservolumengehalt aufgetragen wurden. Der reale experimentelle Faservolumengehalt entspricht nicht bei allen Messungen exakt diesem angestrebten Zielfaservolumengehalt. Insbesondere bei den höheren Zielfaservolumengehalten ergeben sich aus Kavitätshöhenunterschieden aufgrund des exponentiellen Zusammenhangs zwischen Kavitätshöhe und erforderlichem Kompaktierungsdruck signifikante Abweichungen, ohne dass dies jedoch zu widersprüchlichen Aussagen führt.

Zum anderen kann im Nachhinein als Ursache der Diskrepanz zwischen den in Bild 6.3 dargestellten Ergebnissen auch die nicht optimale Positionierung der Extensiometer am im Bild 3.3 beschriebenen Versuchsaufbau angesehen werden. Da diese Messwertnehmer an der beweglichen Quertraverse befestigt sind, können Abweichungen der Kavitätshöhe nicht wie im Fall der optischen Messzelle durch direkte Messung des Abstands der Ober- zur Unterplatte abgelesen werden. Zusätzlich wurden bei allen Versuchen mit der optischen Messzelle vier Plastilinkugeln innerhalb der Kavität positioniert, um auftretende Abweichungen bzw. Schrägstellungen der Oberplatte zur Unterplatte der Kavität erkennen zu können. Bei Durchführung einer Messung mit dem Standardversuchsaufbau wird im Gegensatz dazu lediglich der

Abstand zwischen den beiden Quertraversen erfasst. Sollten die einzelnen Elemente des zwischen den Traversen montierten Versuchsaufbaus eine gewisse Nachgiebigkeit aufweisen, kann dies mit den externen Aufnehmern nicht oder nur ansatzweise nachvollzogen werden. Auch kann die Schrägstellung der Ober- zur Unterplatte bei dem Standardversuchsaufbau nicht erfasst werden, da hierzu zumindest drei externe Aufnehmer erforderlich sind. Diese Schrägstellung der Platte kann schon als Resultat einer lokal ungleichen Materialverteilung wie zum Beispiel durch die Auswirkungen des in Bild 3.6 beschriebenen „Nesting-Effekts“ zustande kommen. Im Gegensatz dazu wird dieser Schrägstellung bei der neuen optischen Messzelle durch das Verspannen der Oberplatte mit dem auf Axialkugellagern geführten Zwischenrahmen effektiv entgegengewirkt. Mit der optischen Messzelle durchgeführte Leerversuche zeigten, dass zwar während der Bewegung eine Reibungskraftkomponente von maximal 200 N auftritt, diese jedoch sofort bei Stillstand der Anlage den Wert Null annimmt. Diese Reibung entsteht, wenn der bewegliche Zwischenrahmen des Aufbaus (vgl. Bild 5.1) relativ zu der den Formeinsatz umgebenden Silikondichtung bewegt wird. Bei dem in Bild 6.3 illustrierten Vergleich der mit den beiden Versuchsaufbauten erzielten Kompaktierungsdruckkurven wird deutlich, dass ein mit dem aufgewendeten Kompaktierungsdruck zunehmender Versatz der Kavitätshöhe von rund einem Zehntel Millimeter zwischen beiden Kurven existiert. Da jeder Kavitätshöhenwert der neuen optischen Messzelle neben den externen Wegaufnehmern zusätzlich über die sich in der Kavität während des Kompaktierungsvorgangs plastisch verformenden Plastilinkugeln nachvollzogen werden kann, ist diesem Verfahren die geringere Abweichung zuzugestehen. Jedoch kann davon ausgegangen werden, dass bei Optimierung der direkten Kavitätshöhenmessung in Verbindung mit der Aufnahme und Verwendung einer entsprechenden Kalibrierungskurve auch für den Standardversuchsaufbau eine äquivalente Präzision herbeigeführt werden kann. Aus den Ergebnissen der optischen Messzelle ist zu schließen, dass die in Bild 3.21 dargestellten Ergebnisse der vorab durchgeführten Kompaktierungsversuche im Bereich der höchsten Kompaktierungsstufe aufgrund der fehlenden direkten Kontrolle der effektiven Kavitätshöhe nur eingeschränkt als gültig anzusehen sein sollten.

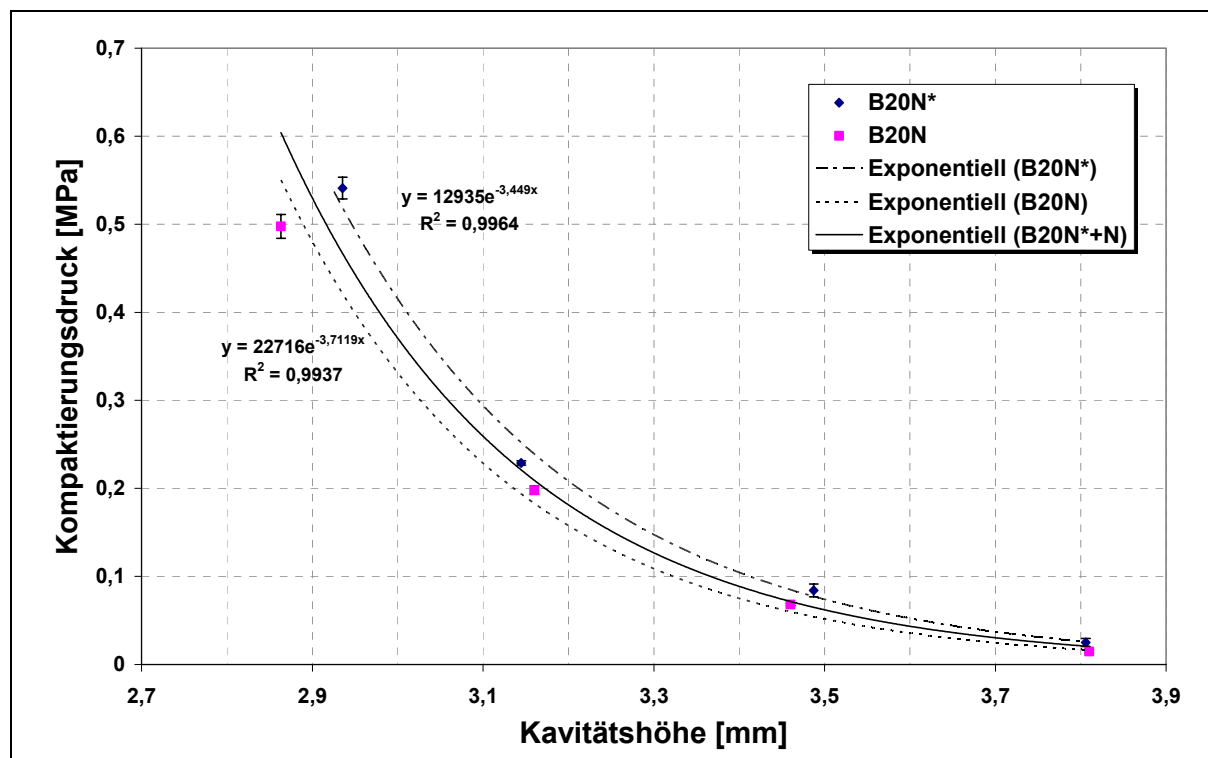


Bild 6.3: Kompaktierungsdruck als Funktion der Kavitätshöhe bei biaxialem Gelege D mit 20x20 mm Nähmuster und niedriger Fadenabzugskraft. Die mit der optischen Messzelle ermittelte Kurve ist mit einem Asterisk versehen (B20N*)

Letztlich kann die in Bild 6.3 dargestellte Diskrepanz zwischen den Ergebnissen der beiden Messverfahren zudem auf die unterschiedlichen Freiheitsgrade der Faserhalbzeugproben während der Kompaktierung zurückgeführt werden. Während bei dem in Bild 3.3 beschriebenen Versuchsaufbau die Faserhalbzeugprobe ohne periphere Behinderung auf den ansteigenden Kompaktierungsdruck mit einer Vergrößerung ihrer Fläche reagieren kann, ist dies bei der neuen optischen Messzelle nur bedingt der Fall. Bei der neuen optischen Messzelle fügen sich die Halbzeugproben in ihrer Breite (180 mm) exakt in den zum Aufbau gehörenden beweglichen Zwischenrahmen ein (vgl. Bild 5.1), während in Längsrichtung der Probe (220 mm) kein Kontakt mit dem Zwischenrahmen besteht. Folglich resultiert aus der Einschränkung der Ausdehnung in Breitenrichtung bei der Versuchsdurchführung eine Druckkomponente, die mit ansteigendem Kompaktierungsgrad zunimmt und der Kompaktierung entgegenwirkt. Im Hinblick auf diese Fakten kann durch den Einbezug aller verfügbaren Messwerte die in Bild 6.3 dargestellte Regressionsgerade „Exponentiell B20N*+N“ ermittelt werden, welche den theoretisch optimalen Zustand in der Praxis

darstellt. Dieser theoretisch optimale Zustand definiert sich durch eine Zuschnittsgröße der Preform, die einerseits das einfache Einlegen in die Kavität erlaubt, andererseits jedoch durch die beim Schließen des Werkzeugs einwirkende Kompaktierung einem möglichen Randeffect (race-tracking) während der Injektion durch eine ausreichende Ausbreitung entgegenwirkt.

Da die Ergebnisse der neuen optischen Messzelle bei gleicher Kavitätshöhe stets etwas höher ausfallen als dies bei der konventionellen Messung der Fall ist, stellt die Verwendung der Ergebnisse der erstgenannten Methode eine konservative Annahme in Bezug auf die erforderliche Schließkraft des Werkzeugträgersystems dar.

Für weitere Arbeiten mit der optischen Messzelle sollte die Bildaufzeichnung nicht wie bisher nach dem Kompaktierungsvorgang eingeleitet werden, sondern mit dem Beginn des Kompaktierungsversuchs. Diese Modifikation erlaubt die optische Bestimmung der ebenen Ausdehnung des Faserhalbzeugs unter transversaler Druckbelastung. Die Möglichkeit die Ausdehnung der Faserhalbzeugprobe durch die Druckbeaufschlagung aufzunehmen erlaubt die Erstellung von Qualitätsrichtlinien, welche die geometrischen Toleranzen einer Preform festlegen. Die Einhaltung dieser Qualitätsrichtlinie führt zu Preforms, die sich beim Einlegevorgang durch das noch vorhandene Untermaß leicht in die Form integrieren lassen, jedoch unter der Druckbelastung des sich schließenden Werkzeugs durch die ebene Dehnung das Auftreten des race-tracking-Effekts vermeiden. Andererseits ist die Dehnung nicht so hoch, dass unnötig hohe Kompaktierungskräfte entstehen.

6.2 Vergleich der Ergebnisse der Permeabilitätsuntersuchungen

In diesem Kapitel werden die Permeabilitätskennwerte der unvernähten Basismaterialien A, D und E, welche einerseits mit der kombinierten optischen Kompaktierungs- und Permeabilitätsmesszelle und andererseits mit dem in Kapitel 4.2 vorgestellten dielektrischen Messverfahren ermittelt wurden, verglichen. Die erzielten Ergebnisse für das Probenmaterial, welches nicht mit zusätzlichen Nähten versehen wurde, sind in Bild 6.4 für die erste Hauptachsenpermeabilität K_1 und in Bild 6.5 für die zweite Hauptachsenpermeabilität K_2 dargestellt. Da bereits in Kapitel 5.3 festgestellt wurde, dass die Permeabilitätswerte des Zielfaservolumengehalts von 50 % aufgrund der nicht zu gewährleistenden ausreichenden Kompaktierung der Halbzeugprobe nur bedingt aussagekräftig sind, wurden diese Daten nicht in die Gegenüberstellung auf-

genommen. Der Vergleich der Permeabilitätskennwerte in Bild 6.4 zeigt zunächst, dass mit der in Kapitel 4.2 vorgestellten standardisierbaren Permeabilitätsmesszelle im Vergleich zu der neuen optischen Messzelle höhere Permeabilitätskennwerte der untersuchten Materialien ermittelt werden.

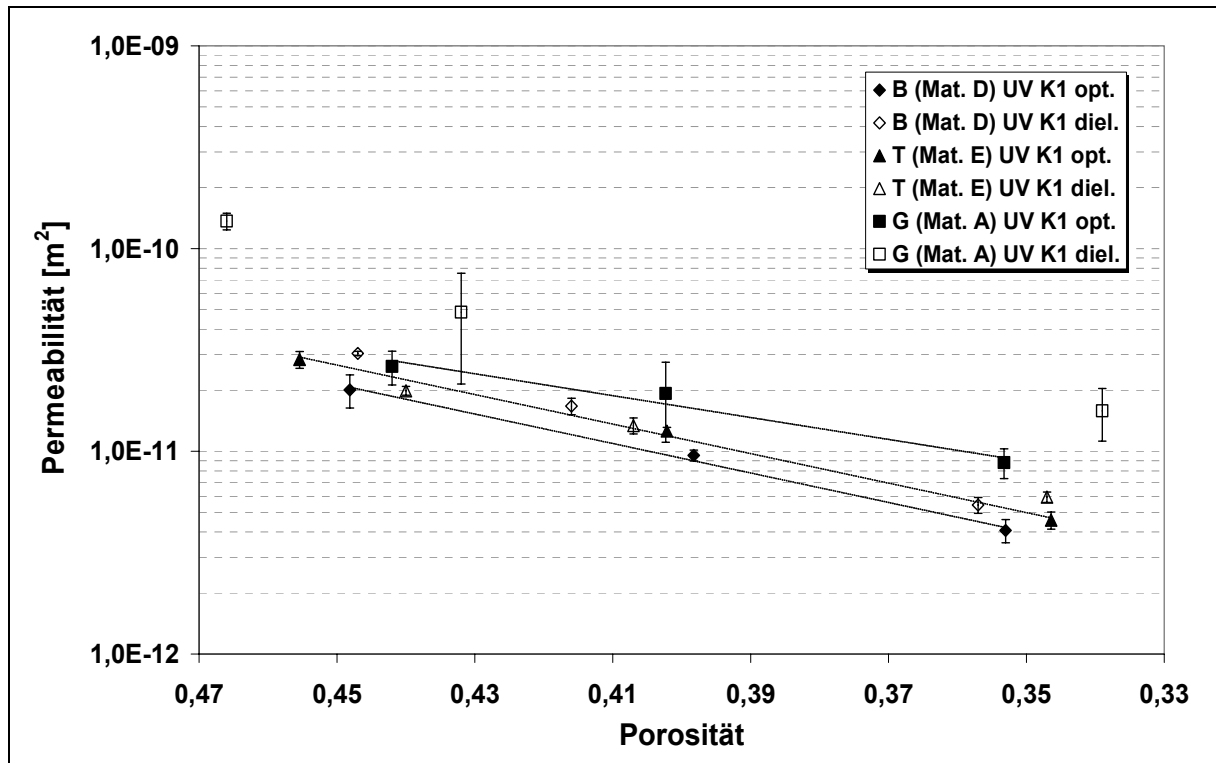


Bild 6.4: Vergleich der Hauptachsenpermeabilität K1 der unvernährten Basismaterialien, welche einerseits mit der neuen optischen (opt.) und andererseits mit der dielektrischen (diel.) Permeabilitätsmesszelle ermittelt wurde

Mit Ausnahme eines Datenpunkts des triaxialen Geleges bei einer Porosität von 0,44 trifft dieser Trend auch bei den in Bild 6.5 dargestellten Hauptachsenpermeabilitätswerten K2 zu. Des Weiteren fällt bei beiden Abbildungen auf, dass sich die Permeabilitätskennwerte des Rovinggewebes bei einer Porosität von ca. 0,465 nicht in den Trend der anderen Materialien einfügen, sondern eine deutlich zu hohe Permeabilität zeigen. Offensichtlich ist die Kavität der dielektrischen Messzelle bei einer Kavitätshöhe von 2,45 mm mit 4 Lagen des Rovinggewebes nicht ausreichend gefüllt, so dass es zu einem teilweisen Voreilen der Fließfront entlang der Oberfläche im Bereich der Sensoren kommt. Ein solches Voreilen würde auch bei nur teilweiser Sättigung des zu untersuchenden Halbzeugs zu einem scheinbaren Permeabilitätsanstieg führen.

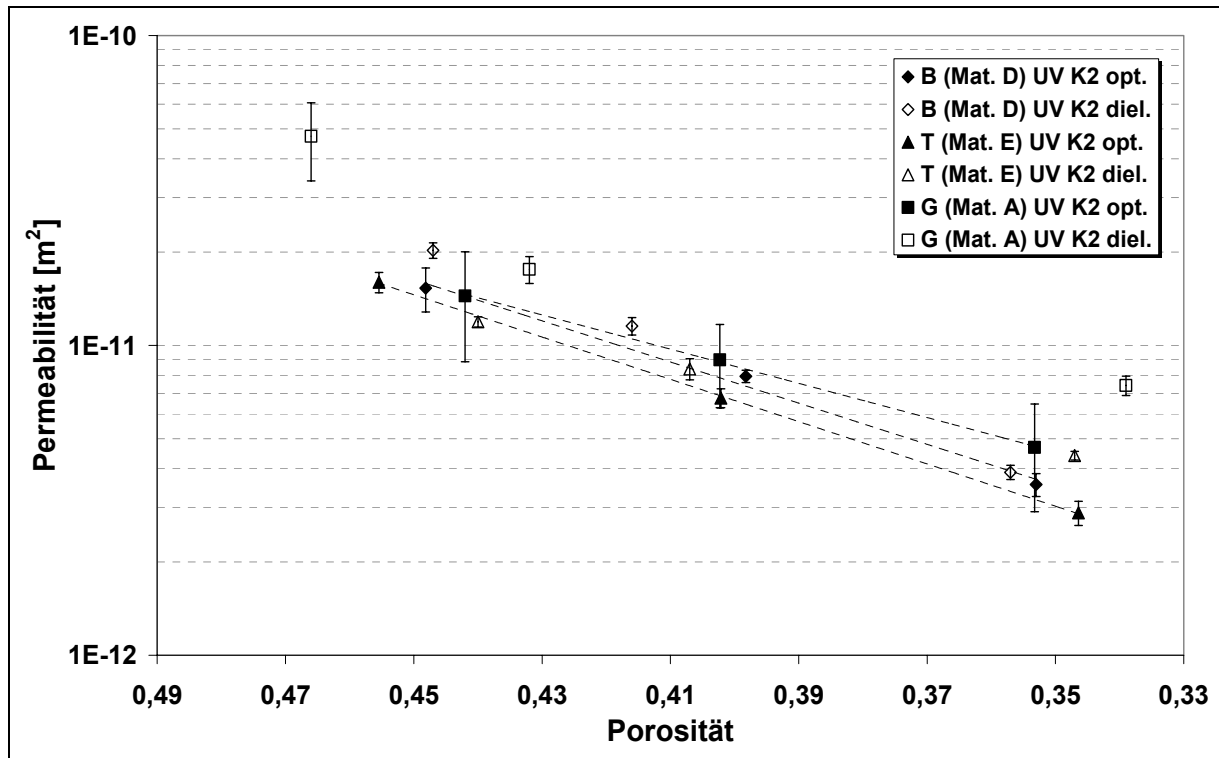


Bild 6.5: Vergleich der Hauptachsenpermeabilität K2 der unvernährten Basismaterialien, welche einerseits mit der neuen optischen (opt.) und andererseits mit der dielektrischen (diel.) Permeabilitätsmesszelle ermittelt wurde

Um die Abweichung zwischen den beiden Messzellen zu quantifizieren, werden zunächst für jedes Material Regressionsgeraden durch die Mittelwerte der mit der optischen Messzelle ermittelten Permeabilitätskennwerte gelegt. Mit den so bestimmten Exponentialgleichungen können über die Porositätswerte der jeweiligen Messpunkte der dielektrischen Messzelle Vergleichswerte berechnet werden. Das Ergebnis dieses Vergleichs ist in Tabelle 6.1 festgehalten. Der Vergleich zeigt, dass die Differenz zwischen den entsprechenden Datenpunkten der beiden Messzellen bezogen auf den Messwert der dielektrischen Messzelle maximal um 72 % abweicht. Die höchsten Abweichungen stellen sich bei dem in seiner Struktur sehr groben Rovinggewebe ein. Die beiden untersuchten Gelege sind nicht nur optisch in ihrer Architektur gleichmäßiger, sondern weisen auch geringere Abweichungen in Bezug auf das verwendete Messverfahren auf. Dementsprechend fallen die Abweichung bei dem biaxialen Gelege mit -0,8 bis 33,2 % und bei dem triaxialen Gelege mit -13,2 bis 34,5 % sehr gering aus.

Tabelle 6.1: Vergleich zwischen mittels neuer optischer und mittels dielektrischer Messmethode ermittelten Permeabilitätskennwerten

Porosität	K1 optisch extrapoliert [m ²]	K1 dielektrisch [m ²]	Abweichung bezogen auf diel. [%]	K2 optisch extrapoliert [m ²]	K2 dielektrisch [m ²]	Abweichung bezogen auf diel. [%]
Biaxiales Gelege	Regressionskoeffizient 99,54 %			Regressionskoeffizient 99,23 %		
0,447	2,03E-11	3,04E-11	33,2	1,56E-11	2,03E-11	23,2
0,416	1,21E-11	1,67E-11	27,7	9,69E-12	1,15E-11	16,1
0,357	4,50E-12	5,43E-12	17,2	3,93E-12	3,90E-12	-0,8
Triaxiales Gelege	Regressionskoeffizient 99,75 %			Regressionskoeffizient 99,98 %		
0,440	2,25E-11	1,99E-11	-13,2	1,25E-11	1,19E-11	-4,4
0,407	1,30E-11	1,34E-11	3,3	7,41E-12	8,40E-12	11,7
0,347	4,74E-12	5,94E-12	20,2	2,89E-12	4,41E-12	34,5
Rovinggewebe	Regressionskoeffizient 99,56 %			Regressionskoeffizient 99,91 %		
0,466	3,77E-11	1,37E-10	72,4	1,98E-11	4,73E-11	58,1
0,432	2,47E-11	4,86E-11	49,1	1,29E-11	1,76E-11	26,9
0,339	7,78E-12	1,58E-11	50,8	3,95E-12	7,43E-12	46,9

Wie bereits in Kapitel 4 erwähnt, stellt Lundström [63] fest, dass die größten Fehlerpotenziale bei der Durchführung von Permeabilitätsversuchen einerseits aus der Probenvorbereitung und andererseits aus der Versuchsdurchführung durch den jeweiligen Nutzer resultieren. Da in dem hier angestellten Vergleich die Probenvorbereitung variiert wurde -die in der neuen optischen Messzelle zu nutzenden Proben wurden mit einem Stanzmesser gewonnen, während die Proben für die dielektrische Messzelle über einen CNC-Cutter ausgeschnitten wurden-, ist ein gewisses Ausmaß der Abweichung auf diese Tatsache zurückzuführen. Der höhere Anteil der Abweichung zwischen den Ergebnissen, die mit den beiden Messzellen ermittelt wurden, basiert jedoch auf der mathematischen Ermittlung der Fließfrontellipsenhalbmesser. Die Definition einer Fließfrontellipse basierend auf lediglich drei diskreten Punkten zeigt bei ungleichmäßigen Fließfronten eindeutig die bereits beschriebenen Nachteile. Dies lässt sich auch daran ablesen, dass die aus den verschiedenen Sensortriplets gewonnenen Permeabilitäten zum Teil massive Abweichungen voneinander zeigen (vgl. Bild 4.15 bzw. Bild 4.16). Die durchgeführte Mittelwertbildung zwischen den einzelnen Sensortriplets vermindert diesen Effekt zwar, jedoch sollte für weitere Arbeiten die maximal verfügbare Anzahl an in der Kavität integrierten Sensoren ge-

nutzt werden, um die Fließfront möglichst realistisch abzubilden. Diesbezüglich stellt die Verwendung des in der neuen optischen Kompaktierungs- und Permeabilitätsmesszelle genutzten Algorithmus auch für die Auswertung der dielektrischen Messzelle eine noch zu quantifizierende Verbesserung dar. Die Unsicherheit bei der Interpretation der Versuchsergebnisse der dielektrischen Messzelle ist einerseits durch die fehlende Aussage über die für eine sinnvolle Messung notwendige Kompaktierung der Halbzeugprobe und andererseits durch die fehlenden Informationen über effektive Kavitätshöhen während der Permeabilitätsmessung bedingt. Hier zeigt sich die Überlegenheit der neuen optischen Messzelle im Vergleich zu der dielektrischen Messzelle. Durch eine Weiterentwicklung der optischen Messzelle kann durch das Einbeziehen der über die Kraftmesszelle aufgenommene Kompaktierungskraft in Verbindung mit der über die optische Auswertung bestimmte Probenfläche der effektive Kompaktierungsdruck bestimmt werden. Dieser Kompaktierungsdruck kann in das Permeabilitätsbestimmungsmodul integriert werden, wodurch der durch die Software zulässige Injektionsdruck nicht oberhalb des aktuellen Kompaktierungsdruckniveaus liegen kann. Durch diese Weiterentwicklung wird das Auftreten von großflächigen race-tracking-Effekten an der Oberfläche der Halbzeugprobe ausgeschlossen.

Eine solche Modifikation führt zur Verringerung der Abweichungen zwischen den beiden in dieser Arbeit verglichenen Permeabilitätsmesszellen und ebnet somit den Weg für zwei sich gegenseitig in ihrem Aufgabengebiet ergänzende, standardisierbare Messzellen.

7 Zusammenfassung

Eine neue optische Kompaktierungs- und Permeabilitätsmesszelle wurde entwickelt und in ihrer Funktionsweise dargestellt. Ein auf der optischen Auswertung von Fließfrontbildern basierender Auswertungsalgorithmus wurde in einem neu geschriebenen Steuerungsprogramm für diese Messzelle umgesetzt. Anhand von experimentellen Untersuchungen wurde die Funktionsweise der neuen Messzelle mit etablierten Messverfahren verglichen. Die dabei ermittelten Defizite der existierenden Methoden wurden aufgezeigt und Lösungsvorschläge präsentiert. Zudem wurden mögliche Vorschläge zur Erweiterung des Funktionshorizonts der optischen Messzelle sowohl in Bezug auf die Durchführung von Kompaktierungs- als auch von Permeabilitätsmessungen aufgezeigt.

Die dielektrische Permeabilitätsmesszelle und die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte optische Kompaktierungs- und Permeabilitätsmesszelle erfordern im Gegensatz zu den noch heute weltweit eingesetzten konventionellen Verfahren außer dem manuellen Einlegen der zu untersuchenden Halbzeuge nur noch eine minimale Interaktion mit dem Bediener. Der daraus resultierende hohe Grad an Automatisierung garantiert die vom jeweiligen Bediener unabhängige vollautomatische Kennwertbestimmung. Obwohl beide in dieser Arbeit vorgestellten Messzellen unterschiedlichen Einsatzbereichen zugeordnet sind, stehen sie in einem komplementären Verhältnis. Die Auswahl der Methode hängt von dem zu untersuchenden Halbzeug, dem zur Imprägnierung verwendeten Fluid und der Zielsetzung ab.

Während das Ziel der dielektrischen Messzelle darin besteht, die Permeabilität eines Halbzeugs in einem produktionsnahen Umfeld zu bestimmen, d.h. unter Einsatz von bis zu 160 °C und unter Verwendung von reaktiven Harzsystemen, zielt die optische Messzelle auf die Untersuchung der Auswirkungen zusätzlicher in ein Halbzeug eingebrachter Stoffe, wie z.B. Nähten. Ein weiteres Aufgabengebiet der neu entwickelten optischen Messzelle liegt in der Bestimmung des Kompaktierungsverhaltens des untersuchten Halbzeugs.

Beide experimentellen Methoden sind in ihrer Form standardisierbar. Das Erreichen eines solchen einheitlichen Standards zur Bestimmung der Permeabilität eines flächigen Halbzeugs ist die Grundvoraussetzung für die Bestimmung der Art und Aus-

wirkung derzeitig festgestellter Einflussfaktoren auf die Permeabilitätskennwerte und stellt die Grundlage für eine Modellierung der Permeabilität von Faserhalbzeugen dar.

Eine Effizienzsteigerung bei der Durchführung der experimentellen Untersuchung wird bei beiden Messzellen durch die automatisierte Versuchsauswertung erreicht. Bei der Verwendung der optischen Kompaktierungs- und Permeabilitätsmesszelle wird zudem durch die Fusion von zwei separaten Versuchen, der Bestimmung des Kompaktierungsverhaltens und der 2D-Permeabilitätsbestimmung, eine wesentliche Steigerung der Effizienz erreicht. Diese Effizienzsteigerung resultiert aus der Reduzierung der Anzahl der durchzuführenden Versuche um 50 % je zu untersuchendem Faserhalbzeug. Die komplette Bestimmung eines Faserhalbzeugs sowohl in Bezug auf die Kompaktierung als auch auf die Permeabilität kann also mit der optischen Messzelle innerhalb eines einzigen Tages vollständig durchgeführt werden.

Der Vergleich der Ergebnisse der beiden Permeabilitätsmesszellen zeigt, dass bereits in der momentan existierenden Konfiguration die Aussagen bezüglich der Permeabilität nicht signifikant voneinander abweichen, solange ein in seiner Architektur gleichmäßiges Halbzeug verwendet wird.

Die in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen zeigten außerdem, dass eine nähtechnische Konfektionierung einerseits eine Vorkompaktierung der Faserhalbzeuge bedingt und andererseits die Permeabilität des vernähten Halbzeugs im Vergleich zum unvernähten Material zwischen 70 und 600 % beeinflussen kann. Die Permeabilitätssteigerung ist maximal, wenn ein niedriger Zielfaservolumengehalt mit einem engen Nähmuster unter Verwendung einer hohen Fadenabzugskraft gewählt wird. Diese Permeabilitätssteigerung lässt die Verwendung von Nähten als materialintegrierte Verteilerkanäle zu, wodurch eine erheblich beschleunigte Verteilung der imprägnierenden Flüssigkeit im Faserhalbzeug zu erreichen ist. Diese beschleunigte Verteilung bewirkt eine höhere Prozessgeschwindigkeit, außerdem lässt sich durch den gezielten Einsatz von Nähten die Richtung der Fließfront beeinflussen.

8 Ausblick

Die derzeit unter Anwendung der dielektrischen Messzelle ermittelten Abweichungen können insbesondere noch für Materialien mit einer gröberen Architektur verringert werden, indem der innerhalb dieser Arbeit für die optische Messzelle entwickelte Auswertungsalgorithmus auch in die dielektrische Messzelle integriert wird.

Die Unsicherheit bei der Interpretation der Versuchsergebnisse der dielektrischen Messzelle, welche auf den fehlenden Aussagen über effektive Kavitätshöhe und ausreichende Kompaktierung der Halbzeugprobe während der Messung beruht, lässt sich nur durch Integration eines Längenmesssystems beheben. Eine ausreichende Kompaktierung kann dagegen bei der dielektrischen Messzelle nicht garantiert werden, da die während der Kompaktierung auftretenden Kompaktierungskräfte nicht aufgenommen werden können.

Eine mögliche Weiterentwicklung der optischen Messzelle kann durch das Einbeziehen des festgestellten Kompaktierungsdrucks in das Permeabilitätsbestimmungsmodul erreicht werden. Hierdurch wird das Festlegen eines maximal zulässigen Injektionsdrucks ermöglicht, der nicht oberhalb des aktuellen Kompaktierungsdruckniveaus liegen darf. Diese Begrenzung wird das Auftreten von großflächigen race-tracking-Effekten an der Oberfläche der Halbzeugprobe, welches zu scheinbaren Permeabilitätszuwächsen führt, ausschließen. Weiterhin besteht durch eine Modifikation des Steuerungsprogramms die Möglichkeit, die ebene Ausdehnung der Halbzeugprobe während des Kompaktierungsvorgangs optisch festzuhalten und zu evaluieren. Diese Informationen bilden die Grundlage der Gestaltung von Qualitätsrichtlinien für die geometrischen Toleranzen nähtechnisch hergestellter Preforms.

9 Referenzen

- [1] http://de.wikipedia.org/wiki/Airbus_A380, Stand 19.1.2006.
- [2] http://flatrock.org.nz/topics/flying/airbus_comes_of_age.htm, Stand 19.1.2006.
- [3] <http://www.hexcel.com/News/Press+Releases/Paris+Airshow.htm>, Stand 19.1.2006.
- [4] <http://seattlepi.nwsourc.com/business/182471%5Fairbusproblem17.html>, Stand 19.1.2006.
- [5] <http://composite.about.com/>, Stand 19.1.2006.
- [6] http://de.wikipedia.org/wiki/Boeing_787, Stand 19.1.2006.
- [7] <http://www.voughtaircraft.com/newsFactGallery/factsheets/programs/787.htm>, Stand 19.1.2006.
- [8] <http://www.lmglassfiber.com/News/Archive/2004>, Stand 4.11.2004
- [9] <http://www.lmglassfiber.com/News/Archive/2004>, Stand 12.5.2004.
- [10] <http://www.kockums.se/SurfaceVessels/visby.html>, Stand 20.1.2006.
- [11] <http://www.naval-technology.com/projects/visby/>, Stand 20.1.2006.
- [12] Trochu, F., Gauvin, R., Gao, D.M., Boudreault, J.F., RTMFLOT- An integrated Software Environment for the Computer Simulation of the Resin Transfer Molding Process, Journal of Reinforced Plastics and Composites, Bd. 13, (1994), No. 3, S. 262-270.
- [13] Simacek, P., Advani, S.G.: Desirable features in mold filling simulations for liquid composite molding processes. Polymer Composites, Bd. 25, (2004), Nr. 4, S. 355-367.
- [14] <http://www.polyworx.com/apz/>, Stand 22.1.2006.
- [15] Stadtfeld, H.C., Wilhelm, M., in Mitschang, P. (Hrsg.): Prozessentwicklung und ganzheitliches Leichtbaukonzept zur durchgängigen, abfallfreien Preform-RTM Fertigung. Bd. 46, Kaiserslautern: IVW-Schriftenreihe, (2004).
- [16] Lundström, T.S.: The permeability of non crimp stitched fabrics. Composites Part A, Bd. 31, (2000), Nr. 12, S. 1345-1353.

- [17] Nordlung, M., Lundström, T.S.: Numerical Study of the Local Permeability of Noncrimp Fabrics. *Journal of Composite Materials*, Bd. 39, (2005), Nr. 10, S. 929-947.
- [18] Brody, J.C., Gillespie, J.W.: Reactive and Non-reactive Binders in Glass/Vinyl Ester Composites. *Polymer Composites*, Bd. 26, (2005), Nr. 3, S. 377-387.
- [19] Estrada, G., Vieux-Pernon, C., Advani, S.G.: Experimental Characterization of the Influence of Tackifier Material on Preform Permeability. *Journal of Composite Materials*, Bd. 36, (2002), Nr. 19, S. 2297-2310.
- [20] Carter-Hranac, K.: Evolving preforms are the core of complex parts. *High Performance Composites*, Bd. 9, (2001), Nr. 5, S. 41-45.
- [21] Moseler, H.J.: Glasfaser-Vorformlinge industriell herstellen. *Kunststoffe*, Bd. 84, (1994), Nr. 6, S. 727-732.
- [22] Jander, M. : P4-Technologie: Programmierter Pulver-Vorform-Prozess. Owens Corning, (1992), Technischer Bericht CNT 21.G/10.92.
- [23] Shih, C-H., Liu, Q., Lee, L.J.: Vacuum Assisted Resin Transfer Molding Using Tackified Fiber Preforms. *Polymer Composites*, Bd. 22, (2001), Nr. 6, S. 721-729.
- [24] Mitschang, P. (Hrsg.): Prozessentwicklung und ganzheitliches Leichtbaukonzept zur durchgängigen, abfallfreien Preform-RTM Fertigung. Bd. 46, Kaiserslautern: IVW-Schriftenreihe, (2004).
- [25] http://www.ksl-lorsch.de/ksl-lorsch/pdf/ksl_composites.pdf, Stand 22.1.2006.
- [26] ALTIN Nähtechnik GmbH: Einseitennähtechnik für Vernähen von Preforms, Single-Side Technology for the Sewing of Preforms. *BW Technics*, Bd. 1, (2000), S. 20-21.
- [27] Breu, C., Geßler, A. in Mitschang, P. (Hrsg.): Prozessentwicklung und ganzheitliches Leichtbaukonzept zur durchgängigen, abfallfreien Preform-RTM Fertigung. Bd. 46, Kaiserslautern: IVW-Schriftenreihe, (2004), S. 153-164.
- [28] <http://www.cyttec.com/business/EngineeredMaterials/Priform.shtm>, Stand 22.1.2006.
- [29] <http://cordis.europa.eu.int/en/home.html>, Stand 22.1.2006.

- [30] Mouritz, A.P., Leong, K.H., Herzberg, I.: A review of the effect of stitching on the in-plane mechanical properties of fiber-reinforced polymer composites. *Composites Part A*, Bd. 28, (1997), Nr. 12, S. 979–991.
- [31] Dransfield, K., Baillie, C., Mai, Y-M.: Improving the delamination resistance of CRP by stitching. A review. *Composite Science and Technology*, Bd. 50, (1994), Nr. 3, S. 305–315.
- [32] Glaessgen, E.H., Raju, I.S., Poe, C.C.: Analytical and Experimental Studies of the Debonding of Stitched and Unstitched Composite Joints. *Journal of Composite Materials*, Bd. 36, (2002), Nr. 23, S. 2599-2622.
- [33] Weimer, C. : Preform-Engineering: Applied sewing technologies to incorporate part and process functions into dry textile reinforcements. *Composite Science and Technology*, Bd. 63, (2003), Nr. 14, S. 2089–2098.
- [34] N.N.: Mit Nadel und Faden: Neue Nähtechnik für Composite-Textilpreforms. www.eurocopter.com/news, Stand 4.2.2005.
- [35] Kim, Y.R., McCarthy, S.P., Fanucci, J.P.: Compressibility and Relaxation of Fiber Reinforcements during Composite Processing. *Polymer Composites*, Bd. 12, (1991), Nr. 1, S. 13-19.
- [36] 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. *Composite Science and Technology*, Bd. 59, (1999), Nr. 7, S. 983–993.
- [37] Robitaille, F. and Gauvin, R.: Compaction of textile reinforcements for composites manufacturing. I: Review of experimental results. *Polymer Composites*, Bd. 19, (1998), Nr. 2, S. 198-216.
- [38] Robitaille, F. and Gauvin, R.: Compaction of textile reinforcements for composites manufacturing. II: Compaction and relaxation of dry and H₂O-saturated woven reinforcements. *Polymer Composites*, Bd. 19, (1998), Nr. 5, S. 543-557.
- [39] Robitaille, F. and Gauvin, R.: Compaction of textile reinforcements for composites manufacturing. III. Reorganization of the fiber network. *Polymer Composites*, Bd. 20, (1999), Nr. 1, S. 48-61.

- [40] Endruweit A., Gehrig S., Ermanni P.: Mechanisms of Hydrodynamically Induced Inplane Deformation of Reinforcement Textiles in Resin Injection Processes. *Journal of Composite Materials*, Bd. 37, (2003), Nr. 18, S. 1675-1692.
- [41] Buntain M. J., Bickerton S.: Compression flow permeability measurement: a continuous technique. *Composites Part A*, Bd. 34, (2003), Nr. 5, S. 445–457.
- [42] Hammami A., Gebart B. R.: Analysis of the Vacuum Infusion Molding Process. *Polymer Composites*, Bd. 21, (2000). Nr. 1, S. 28–40.
- [43] Lekakou, C., Johari M.A.K., Bader M.G.: Compressability and Flow Permeability of Two-Dimensional Woven Reinforcements in the Processing of Composites. *Polymer Composites*, Bd. 17, (1996), Nr. 5, S. 666-672.
- [44] Buntain M. J., Bickerton S.: Prediction of Tooling Forces in Liquid Composite Moulding Processes. *SAMPE Journal*, Bd. 39, (2003), Nr. 1, S. 8-15.
- [45] Robitaille, F. and Gauvin, R.: Compaction of textile reinforcements for composites manufacturing. I. Review of Experimental results. *Polymer Composites*, Bd. 19, (1998), Nr. 2, S. 198-216.
- [46] Bickerton, S., Stadtfeld, H.C., Mitschang, P.: Modeling Tooling Forces Generated During The Resin Transfer Molding Process. *Proceedings of the 24th International SAMPE Europe Conference, Paris, 2003.*
- [47] Chen, B., Chou, T.-W.: Compaction of woven fabric preforms in liquid composite molding process: nesting and multilayer deformation. *Composite Science and Technology*, Bd. 60, (2000), Nr. 12-13, S. 2223–2231.
- [48] Bickerton, S., Buntain, M.J.: The Viscoelastic Compression Behavior of Liquid Composite Molding Preforms. *6th International Conference on Flow Processes in Composite Materials, 15.-16.7.2002, Auckland, New Zealand.*
- [49] Grimsley, B.W., Hubert, P., Song, X., Cano, R.J., Loos, A.C., R. Byron Pipes, R.B.: Flow and Compaction during the Vacuum Assisted Resin Transfer Molding Process. *33rd. International SAMPE Technical Conference, Seattle, WA, 5.-8. November, (2001).*

- [50] Kelly, P.A., Umer, R., Bickerton, S.: Compaction of Dry and Wet Fibrous Materials during Infusion Processes. 36th International SAMPE Technical Conference, San Diego, CA, 15.-18. November, (2004).
- [51] Ogale, A. in Mitschang, P. (Hrsg.): Prozessentwicklung und ganzheitliches Leichtbaukonzept zur durchgängigen, abfallfreien Preform-RTM Fertigung. Bd. 46, Kaiserslautern: IVW-Schriftenreihe, (2004).
- [52] Kelly, P. A., Umer, R., Bickerton, S.: Viscoelastic response of dry and wet fibrous materials during infusion processes. *Composites Part A*, Bd. 37, (2006), Nr. 6, S. 868-873.
- [53] Steenkamer, D. A., Mcknight, S.H., Wilkins, D.J., Karbhari, V.M.: Experimental characterization of permeability and fibre wetting for liquid moulding. *Journal of Materials Science*, Bd. 30, (1995), Nr. 12, S. 3207-3215.
- [54] D'Arcy, H.: *Les fontaines publiques de la ville de Dijon*. V. Dalmont, Paris, 1856.
- [55] Advani, S. G.: *Flow and rheology in polymer composites manufacturing*. New York , USA: Elsevier Science, (1994).
- [56] Dullien, F.A.L.: *Single Phase Flow Through Porous Media and Pore Structure*. *The Chemical Engineering Journal*, Bd. 10, (1975), S. 1-34.
- [57] Lekakou, C., Johari M.A.K., Norman D., Bader M.G.: Measurement techniques and effects on in-plane permeability of woven cloths in resin transfer moulding. *Composites Part A*, Bd. 27, (1996), Nr. 5, S. 401-408.
- [58] Parnas, R.S., Phelan, F.R.: The Effect of Heterogeneous Porous Media on Mold Filling in Resin Transfer Molding. *SAMPE Quarterly*, Bd. 23, (1991), Nr. 2, S. 53-60.
- [59] Williams, J.G., Morris, C.E.M., Ennis, B.C.: Liquid Flow through aligned fiber beds. *Polymer Engineering and Science*, Bd. 14, (1974), Nr. 6, S. 413-419.
- [60] Ahn, S.H., Lee, W.I., Springer, G.S.: Measurement of three-dimensional permeability of fiber preforms using embedded fiber optic sensors. *Journal of Composite Materials*, Bd. 29, (1995), Nr. 6, S. 715-733.

- [61] Dungan, F.D., Sastry, A.M.: Saturated and Unsaturated Polymer Flows: Microphenomena and Modeling. *Journal of Composite Materials*, Bd. 36, (2002), Nr. 13.
- [62] Breard, J., Henzel, Y., Trochu, F., Gauvin, R.: Analysis of Dynamic Flows through Porous Media. Part I: Comparison between Saturated and Unsaturated Flows in Fibrous Reinforcements. *Polymer Composites*, Bd. 24, (2003), Nr. 3, S. 391-408.
- [63] Lundström, T.S., Stenberg, R., Bergström, R., Partanen, H., and Birkeland, P.A.: In plane permeability measurements: a nordic round-robin study. *Composites Part A*, Bd. 31, (2000), S. 29-43.
- [64] Foley, M.F., Gutowski, T.: The effect of process variables on permeability in the flexible resin transfer molding (FRTM) process. 23rd international SAMPE Conference, (1991).
- [65] Stadtfeld, H.C., Erninger, M., Bickerton, S., Advani, S.G.: An experimental method to continuously measure permeability of fiber preforms as a function of fiber volume fraction. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Bd. 21, (2002), Nr. 10, S. 879-899.
- [66] Han, K.K., Lee, C.W., Rice, B.P.: Measurements of the permeability of fiber preforms and applications. *Composite Science and Technology*, Bd. 60, (2000), S. 2435–2441.
- [67] Ahn, K.J., Seferis, J.C.: Simultaneous measurements of permeability and capillary pressure of thermosetting matrices in woven fabric reinforcements. *Polymer Composites*, Bd. 12, (1991), Nr. 3, S. 146-152.
- [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*, Bd. 16, (1997), Nr. 1, S. 50-72.
- [69] Luo, Y., Verpoest, I., Hoes, K., Vanheule, M., Sol, H., Cardon, A.: Permeability measurement of textile reinforcements with several test fluids. *Composites Part A*, Bd. 32, (2001), S. 1497-1504.

- [70] Gauvin, R., Trochu, F.: Key Issues in Numerical Simulation for Liquid Composite Molding Processes. *Polymer Composites*, Bd. 19, (1998), Nr. 3, S. 233-240.
- [71] Rohatgi, V., Patel, N., Lee, L.J.: Experimental Investigation of Flow-Induced Microvoids during Impregnation of Unidirectional Stitched fiberglass Mat. *Polymer Composites*, Bd. 17, (1996), Nr. 2, S. 161-170.
- [72] Binetruy, C., Hilaire, B., Pabiot, J.: The Interactions between Flows occurring inside and outside fabric tows during RTM. *Composites Science and Technology*, Bd. 57, (1997), Nr. 12, S. 587-596.
- [73] Chan, A.W., Morgan, R.J.: Tow Impregnation during Resin Transfer Molding of Bidirectional Nonwoven Fabrics. *Polymer Composites*, Bd. 14, (1993), Nr. 4, S. 335-340.
- [74] Pillai, K.M., Advani, S.G.: Wicking across a Fiber-Bank. *Journal of Colloid and Interface Science*, Bd. 183, (1996), S. 100-110.
- [75] Amico, S., Lekakou, C.: Flow through a two-scale porosity, oriented fiber porous medium. *Transport in Porous Media*, Bd. 54, (2004), No. 1, S. 35-53.
- [76] Simacek, P., Advani, S.G.: A numerical model to predict fiber tow saturation during liquid composite molding. *Composites Science and Technology*, Bd. 63, (2003), No. 12, S. 1725-1736.
- [77] Cushman, J.H., *Dynamics of Fluids in Hierarchical Porous Media*, London: Academic Press, (1990).
- [78] Pillai, K.M., Advani, S.G.: A Model for unsaturated Flow in Woven Fiber Preforms during Mold Filling in Resin Transfer Molding. *Journal of Composite Materials*, Bd. 32, (1998), Nr. 19, S. 1753-1783.
- [79] Lekakou, C., Bader, M.G.: Mathematical modeling of macro- and micro-infiltration in resin transfer molding (RTM). *Composites Part A*, Bd. 29, (1998), S. 29-37.
- [80] Patel, N., Lee, L.J.: Effects of Fiber Mat Architecture on Void Formation and Removal in Liquid Composite Molding. *Polymer Composites*, Bd. 16, (1995), Nr. 5, S. 386-399.

- [81] Molnar, J.A., Trevino, L., Lee, L.J.: Liquid Flow in Molds with Prelocated Fiber Mats. *Polymer Composites*, Bd. 10, (1998), Nr. 6, S. 414-423.
- [82] Patel, N., Lee, L.J.: Modeling of Void Formation and Removal in Liquid Composite Molding: Part I: Model Development and Implementation. *Polymer Composites*, Bd. 17, (1996), Nr. 1, S. 96-103.
- [83] Parnas, R.S., Flynn, K.M., Dal-Favero, M.E.: A Permeability Database for Composite Manufacturing. *Polymer Composites*, Bd. 18, (1997), Nr. 5, S. 623-633.
- [84] Parnas, R.S., Howard, J.G., Luce, T.L., Advani, S.G.: Permeability Characterisation. Part 1: A Proposed Standard Reference Fabric for Permeability. *Polymer Composites*, Bd. 16, (1995), Nr. 6, S. 429-445.
- [85] Stadtfeld, H.C., Weyrauch, F., Mitschang, P.: Standardizeable Permeability Work Cell for fibrous Reinforcements. 7th. International Conference on Flow Processes in Composite Materials, 4.-7.7.2004, Newark (DE), USA.
- [86] Hoes, K., Dinescu, D., Sol, H., Vanheule, M., Parnas, R.S., Luo, Y., Verpoest, I.: New set-up for measurement of permeability properties of fibrous reinforcements for RTM. *Composites Part A*, Bd. 33, (2002), S. 959-969.
- [87] Berdichevsky, A., Cai, Z.: Preform Predictions by Self-Consistent Method and Finite Element Simulation. *Polymer Composites*, Bd. 14, (1993), Nr. 2, S. 132-143.
- [88] Nordlund, M., Lundström, T.S.: Numerical Study of the Local Permeability of Noncrimp Fabrics. *Journal of Composite Materials*, Bd. 39, (2005), Nr. 10, S. 929-947.
- [89] Yu, B., Lee, L.J.: A Simplified In-Plane Permeability Model for Textile Fabrics. *Polymer Composites*, Bd. 21, (2000), Nr. 5, S. 660-685.
- [90] Robitaille, F., Long, A.C., Rudd, C.D.: Geometric modelling of textiles for prediction of composite processing and performance characteristics. *Plastics, Rubber and Composites*, Bd. 31, (2002), Nr. 2, S. 66-75.
- [91] Gokce, A., Advani, S.G.: Permeability Estimation with the Method of Cells. *Journal of Composite Materials*, Bd. 35, (2001), Nr. 8, S. 713-728.

- [92] Patel, N., Lee, L.J.: Modeling of Void Formation and Removal in Liquid Composite Molding: Part II Model Development and Implementation. *Polymer Composites*, Bd. 17, (1996), Nr. 1, S. 104-114.
- [93] Stadtfeld, H.C. in Neitzel, M., Mitschang, P. (Hrsg.): *Handbuch der Verbundwerkstoffe, Werkstoffe, Verarbeitung, Anwendung*. München: Carl Hanser Verlag, (2004).
- [94] Ferland, P., Guittard, D., Trochu, F.: Concurrent Methods for Permeability Measurement in Resin Transfer Molding. *Polymer Composites*, Bd. 17, (1996), Nr. 1, S. 149-158.
- [95] Amico, S., Lekakou, C.: An Experimental study of the permeability and capillary pressure in resin-transfer moulding. *Composites Science and Technology*, Bd. 61, (2001), Nr. 13, S. 1945-1959.
- [96] Gauvin, R., Trochu, F., Lemenn, Y., Diallo, L.: Permeability Measurement and Flow Simulation through Fiber Reinforcement. *Polymer Composites*, Bd. 17, (1996), Nr. 1, S. 34-42.
- [97] Gebart, B.R., Lidström, P.: Measurement of In-Plane Permeability of Anisotropic Fiber Reinforcement. *Polymer Composites*, Bd. 17, (1996), Nr. 1, S. 43-51.
- [98] Weitzenböck, J.R., Shenoj, R.A., Wilson, P.A.: Measurement of Principal Permeability with the Channel Flow Experiment. *Polymer Composites*, Bd. 20, (1999), Nr. 2, S. 321-335.
- [99] Gebart, B.R.: Permeability of Unidirectional Reinforcements for RTM. *Journal of Composite Materials*, Bd. 26, (1992), Nr. 8, S. 1100-1133.
- [100] Gauvin, R., Chibani, M.: A Study of Permeability of Nonwoven Reinforcements in Composite Molding. *SAMPE Quarterly*, Bd. 21, (1990), Nr. 3, S. 52-58
- [101] Lundström, T.S., Gebart, B.R., Sandlund, E.: In-Plane Permeability Measurement on Fiber Reinforcements by the Multi-Cavity Parallel Flow Technique. *Polymer Composites*, Bd. 20, (1999), Nr. 1, S. 146-154.
- [102] Bickerton, S., Advani, S.G.: Characterisation and Modeling of Race-Tracking in Liquid Composite Molding Processes. *Composites Science and Technology*, Bd. 59, (1999), No. 15, S. 2215-2229.

- [103] Devillard, M., Hsiao, K.T., Gokce, A., Advani, S.G.: On-Line Characterisation of Bulk Permeability and Race-Tracking during the Filling Stage in Resin Transfer Molding Process. *Journal of Composite Materials*, Bd. 37, (2003), Nr. 17, S. 1525-1541.
- [104] Lawrence, J.M., Barr, J., Karmakar, R., Advani, S.G.: Characterization of pre-form permeability in the presence of race tracking. *Composites Part A*, Bd. 35, (2004), S. 1393-1405.
- [105] Parnas, R.S., Salem, A.J.: A comparison of the unidirectional and Radial In-Plane Flow of Fluids through Woven Composite Reinforcements. *Polymer Composites*, Bd. 14, (1993), Nr. 5, S. 383-394.
- [106] Young, W.B., Wu, S.F.: Permeability Measurement of Bidirectional Woven Glass Fibers. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Bd. 14, (1995), Nr. 10, S. 1108-1120.
- [107] Shih, C-H., Lee, L.J.: Effect of Fiber Architecture on Permeability in Liquid Composite Molding. *Polymer Composites*, Bd. 19, (1998), Nr. 5, S. 626-639.
- [108] Weitzenböck, J.R., Shenoj, R.A., Wilson, P.A.: Radial Flow Permeability Measurement. Part B: Application. *Composites Part A*, Bd. 30, (1999), S. 797-813.
- [109] Kim, S.K., Opperer, J.G., Kim, D-H., Daniel, I.M.: Determination of In-Plane Permeability of Fiber Preforms by the Gas Flow Method using Pressure Measurements. *Polymer Composites*, Bd. 24, (2003), Nr. 1, S. 34-44.
- [110] Rudd, C.D., Long, A.C., McGeehin, P., Smith, P.: In Plane Permeability Determination for Simulation of Liquid Composite Molding of Complex Shapes. *Polymer Composites*, Bd. 17, (1996), Nr. 1, S. 52-59.
- [111] 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*, Bd. 14, (1988), Nr. 2, S. 203-215.
- [112] Carter E.J., Fell, A.W., Griffin, P.R., Summerscales, J.: Data validation procedures for the automated determination of the two-dimensional permeability tensor of a fabric reinforcement. *Composites Part A*, Bd. 27, (1996), Nr. 4, S. 255-261.

- [113] Weitzenböck, J.R., Sheno, R.A., Wilson, P.A.: A Unified Approach to Determine Principal Permeability of Fibrous Porous Media. *Polymer Composites*, Bd. 23, (2002), Nr. 6, S. 1132-1150.
- [114] Woerdeman, D.L., Phelan, F.R., Parnas, R.S.: Interpretation of 3-D Permeability Measurements for RTM Modeling. *Polymer Composites*, Bd. 16, (1995), Nr. 6, S. 470-480.
- [115] Drapier, S., Pagot, A., Vautrin, A., Henrat, P.: Influence of the stitching density on the transverse permeability of non-crimped new concept (NC2) multiaxial reinforcements: measurements and predictions. *Composites Science and Technology*, Bd. 62, (2002), Nr. 15, S. 1979–1991.
- [116] Enduweit, A., Luthy, T., Ermanni, P.: Investigation of the Influence of Textile Compression on the Out-of-Plane Permeability of a Bidirectional Glass Fiber Fabric. *Polymer Composites*, Bd. 23, (2002), Nr. 4, S. 538-554.
- [117] Wu, C-H., Wang, T.J., Lee, L.J.: Trans-Plane Permeability Measurement and its Applications in Liquid Composite Molding. *Polymer Composites*, Bd. 15, (1994), Nr. 4, S. 289-298.
- [118] Stöven, T.: Beitrag zur Ermittlung der Permeabilität von Flächigen Faserhalbzeugen. Bd. 45, Kaiserslautern: IVW-Schriftenreihe, (2004).
- [119] Nedanov, P.B., Advani, S.G., Walsh, S.W., Ballata, W.O. in American Society of Mechanical Engineers (Hrsg.): *Advances in Aerospace in Materials and Structures*. Nashville, (1999).
- [120] Ahn, S.H., Lee, W.I., Springer, G.S.: Measurement of the Three-Dimensional Permeability of Fiber Preforms using Fiber Optic Sensors. *Journal of Composite Materials*, Bd. 29, (1995), Nr. 6, S. 714-733.
- [121] Nedanov, P.B., Advani, S.G.: A Method to Determine 3D Permeability of Fibrous Reinforcements. *Journal of Composite Materials*, Bd. 36, (2002), Nr. 2, S. 241-254.
- [122] Kissinger, C.: Ganzheitliche Betrachtung der Harzinjektionstechnik – Messsystem zur durchgängigen Fertigungskontrolle. Bd. 28, Kaiserslautern: IVW-Schriftenreihe, (2001).

-
- [123] Deutsches Patent DE 10004146: Anordnung zur Vermessung der Ausbreitung eines Matrixmaterials in elektrisch leitfähigen Verstärkungsstrukturen, München, 2000.
- [124] Merzinger, G., Wirth, T.: Repetitorium der höheren Mathematik. Auflage 1, Hannover: Feldmann, (1991).
- [125] Weimer, C.: Zur nähtechnischen Konfektion von textilen Verstärkungsstrukturen für Faser-Kunststoff-Verbunde. Bd. 31, Kaiserslautern: IVW-Schriftenreihe, (2002).
- [126] Weimer, C., Mitschang, P.: Aspects of the stitch formation process on the quality of sewn multi-textile-preforms. Composites Part A, Bd. 32, (2001), Nr. 10, S. 1477-1484.

Liste der betreuten Studien- und Diplomarbeiten

1. Rudi Velthuis, 2001
Permeability measurements and simulations on non-stitched and stitched non-crimp-fabrics, Diplomarbeit.
2. Martin Floeck, 2004
Nähtechnische Beeinflussung des Kompaktierungsverhaltens von Glasfaserpreforms, Diplomarbeit.
3. Michael Meyer, 2005
Einfluss von Nähten und deren Nähparametern auf die lokale und globale Permeabilität von flächigen Faserhalbzeugen, Diplomarbeit.
4. Michael Dietz, 2005
Untersuchungen zur erreichbaren Formbeständigkeit von nähtechnisch hergestellten Faserhalbzeugvorformlingen, Studienarbeit.