

IVW - Schriftenreihe Band 167

Leibniz-Institut für Verbundwerkstoffe GmbH Kaiserslautern

Jan Eric Semar

**Prozesstechnik für die Herstellung duroplastischer
Faser-Kunststoff-Verbunde
mit interlaminaren Elastomerschichten
mittels Flüssigimprägnierverfahren**

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek

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

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

Verlag: Leibniz-Institut für Verbundwerkstoffe GmbH

Druck: pri-me Printservice & Medienservice
Barbarossastraße 1
67655 Kaiserslautern

D-386

© Leibniz-Institut für Verbundwerkstoffe GmbH, Kaiserslautern 2025

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

Als Manuskript gedruckt. Printed in Germany.
ISSN 1615-021X
ISBN: 978-3-944440-64-4

**Prozesstechnik für die Herstellung duroplastischer
Faser-Kunststoff-Verbunde mit interlaminaren
Elastomerschichten mittels Flüssigimprägnierverfahren**

Vom Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik
der Rheinland-Pfälzischen Technischen Universität Kaiserslautern-Landau
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von

Jan Eric Semar, M.Sc.

aus Kaiserslautern

Tag der mündlichen Prüfung:	17. Juni 2024
Prüfungsvorsitzender	Prof. Dr.-Ing. Paul Geiß
1. Berichterstatter:	PD Dr.-Ing. habil. David May
2. Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Peter Mitschang
3. Berichterstatter:	assoz.Prof. Dr. mont. Ewald Fauster

Vorwort

Diese Dissertation entstand während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter (WiMi) im Programmbereich Verarbeitungstechnik am Leibniz-Institut für Verbundwerkstoffe (IVW). Der Großteil davon zwischen 2019 und 2022, inmitten der COVID-19 Pandemie, was neben den inhärenten Herausforderungen einer Doktorarbeit nochmal einige zusätzliche Stolpersteine mit sich brachte. Ich möchte mich daher bei vielen Menschen bedanken, die mich während dieser Zeit fachlich, moralisch und emotional unterstützt haben:

Zunächst möchte ich hier meinen Doktorvater Prof. Dr.-Ing. David May nennen, der bei meinem Einstieg am IVW gerade das Kompetenzfeld Imprägnier- und Preformtechnologie übernommen und mich als direkter Vorgesetzter immer motiviert, gefördert, unterstützt und Optimismus verbreitet hat. Auch wenn mal etwas nicht nach Plan lief. Ich freue mich sehr, dass er inzwischen als Direktor des Faserinstitut Bremen seinen Weg erfolgreich weiter geht. Auch bei Prof. Dr.-Ing. Peter Mitschang, dem ehemaligen Programmbereichsleiter der Verarbeitungstechnik, der inzwischen im Ruhestand ist, möchte ich mich bedanken. Er hat mich insbesondere in der Anfangszeit bei der Themensuche unterstützt und sich freundlicherweise auch als Mitglied des Prüfungsausschusses zur Verfügung gestellt. Komplettiert wurde dieser durch Prof. Dr.-Ing. Paul Geiß als Ausschussvorsitzender und assoz.Prof. Dr. mont. Ewald Fauster von der Montanuniversität Leoben als externem Gutachter. Beide haben mir an kniffligen Stellen meiner Arbeit einen guten Ratschlag gegeben.

Wissenschaft geht nicht ohne Team und daher möchte ich mich ganz besonders bei meinen Kollegen aus unserer Außenstelle, dem D.A.Z., bedanken, die mich oft mit den richtigen Fragen, guten Ideen oder einem offenen Ohr auf den richtigen Weg gebracht haben. Das betrifft nicht nur meine WiMi-Kollegen Alexander Faaß, Jan Jansen, Florian Kühn, Oliver Rimmel, Tim Schmidt und Björn Willenbacher, sondern auch unseren Laboringenieur Holger Franz und unseren Techniker Volker Disandt, die vor allem bei den Experimenten stets eine große Unterstützung waren.

Nicht ganz so intensiv, aber auch wichtig war der Kontakt zum Rest des Instituts. Hier möchte ich vor allem Dr. Barbara Güttler für ihre Hilfe bei Fragen zur Materialcharak-

terisierung, Anna Dlugaj für ihre Expertise zur Polymerchemie und den restlichen Mitarbeitenden des Programmbereichs Verarbeitungstechnik für ihre Unterstützung danken.

Auch bei den vielen von mir betreuten Studierenden möchte ich mich bedanken. Zum einen für die Unterstützung bei Recherchen und Versuchen, zum anderen: nichts hilft so gut ein Thema zu verstehen, wie es jemand anderem zu erklären. Ich freue mich ganz besonders, dass einige von ihnen der Wissenschaft erhalten geblieben und nun selbst Doktoranden am IVW und anderen Instituten sind.

Ein besonderer Dank geht an Dr. Jens Schaub vom Gummiwerk Kraiburg, der das Elastomer für die Versuche bereitgestellt und mir erklärt hat, wie die Verarbeitung des Materials normalerweise gedacht ist.

Außerhalb meines unmittelbaren beruflichen Umfelds möchte ich mich vor allem bei meinen Freunden Sebastian Zangerle und Eva Walther bedanken. Beide sind bzw. waren Doktoranden im Fachbereich Physik. Unsere regelmäßigen gemeinsamen Mittagessen in der Mensa waren manchmal Erholung, manchmal aber auch Initialzündung für einen neuen Forschungsansatz.

Nicht zuletzt möchte ich meiner Familie danken. Meinen Eltern, die mir den Weg bis hierhin durch ihre Unterstützung in allen Lebensbereichen ermöglicht haben und meiner Frau, die immer für mich da war.

Hüttlingen, Dezember 2024

Jan Eric Semar

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis verwendeter Abkürzungen.....	IV
Verzeichnis verwendeter Formelzeichen.....	V
Kurzfassung.....	VII
Abstract.....	VII
1 Einleitung, Forschungsfrage und Aufbau der Arbeit.....	1
2 Stand der Technik.....	5
2.1 Grundlagen der Faser-Kunststoff-Verbunde.....	5
2.1.1 Verarbeitungsverfahren.....	11
2.1.2 Multifunktionalität von FKV.....	17
2.2 Eigenschaften und Verarbeitung von Elastomeren.....	23
2.3 Fluidströmung in Textilien und Messung der Permeabilität.....	28
2.3.1 Theorie der Fluidströmung in Textilien.....	29
2.3.2 Permeabilitätsmessung an Textilien.....	31
2.4 Perforation.....	34
2.4.1 Grundlagen.....	35
2.4.2 Durchströmung perforierter Flächen.....	37
3 Konzeptentwicklung und Materialauswahl.....	43
3.1 Auswahl des Elastomersystems und Anordnung im Lagenaufbau.....	44
3.2 Prüfung der Materialeigenschaften.....	46
3.3 Prepreg und Autoklavprozess als Referenz.....	47
3.4 Entwicklung der Verarbeitungskonzepte.....	47
3.5 Überlegungen zur Fertigung großer Bauteile.....	51
3.6 Materialauswahl.....	54
4 Verarbeitungsversuche.....	57
4.1 Herstellung der Probeplatten.....	57

4.1.1	Prepreg und Autoklav (Referenz)	57
4.1.2	Isochores RTM	58
4.1.3	Isobares RTM	63
4.1.4	Tabellarische Übersicht der Verarbeitungsversuche	66
4.2	Untersuchungsmethoden	67
4.3	Ergebnisse und Interpretation der Untersuchungen	73
4.4	Zwischenfazit zu den Verarbeitungsversuchen	85
5	Perforation der interlaminaren Schicht.....	87
5.1	Experimentelle Untersuchungen zur Perforation	87
5.1.1	Festlegung des Versuchsraums	87
5.1.2	Versuchsdurchführung	89
5.1.3	Messergebnisse und Auswertung	95
5.2	Simulationen zur Erweiterung des Untersuchungsbereichs	102
5.2.1	Aufbau und Grenzen des Simulationsmodells.....	102
5.2.2	Beschreibung der Simulationsreihen.....	104
5.2.3	Simulationsergebnisse und Auswertung	108
5.3	Zwischenfazit zur Perforation	114
6	Zusammenfassung, Gesamtfazit und Ausblick.....	115
6.1	Zusammenfassung	115
6.2	Gesamtfazit und Ausblick	117
7	Literatur	119
8	Anhang.....	131
8.1	Einfluss des Lochradius auf die Durchflussmenge durch ein Rohr nach dem Gesetz von Hagen-Poiseuille.....	131
8.2	Ergebnisse der Dickenpermeabilitätsmessung.....	132
8.3	Ergebnisse der Validierung des Simulationsmodells	133
8.4	Ergebnisse der Simulation der perforierten Schicht ohne Textil	133

8.5 Simulationsergebnisse zum Einfluss der Textilpermeabilität	134
8.6 Modellgleichung der Simulationen zum Einfluss der Textilpermeabilität	135
8.7 Betreute studentische Arbeiten.....	136
8.8 Sonstige betreute Arbeiten	137
8.9 Publikationen	137
8.9.1 Zeitschriften (mit wissenschaftlicher Qualitätssicherung)	137
8.9.2 Zeitschriften (ohne wissenschaftliche Qualitätssicherung)	137
8.9.3 Symposien- und Konferenzbeiträge (Vorträge)	138
8.9.4 Symposien- und Konferenzbeiträge (Poster).....	138
Lebenslauf	139

Verzeichnis verwendeter Abkürzungen

Kurzform	Beschreibung
ANOVA	Varianzanalyse (von engl. Analysis of Variance)
ARALL	Schichtverbund aus aramidfaserverstärktem Kunststoff und Aluminiumfolien (von engl.: Aramid Reinforced Aluminium Laminate)
CF	Kohlenstofffasern (von engl.: carbon fibers)
CFK	Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
CNT	Kohlenstoffnanoröhren (von engl.: carbon nanotubes)
CRTM	Compression Resin Transfer Molding
DCB	Double Cantilever Beam
DICY	Dicyandiamid
EPDM	Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk
FKV	Faser-Kunststoff-Verbund
FML	Faser-Metall-Laminate, z. B. ARALL und GLARE
FVG	Faservolumengehalt
GF	Glasfasern
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
GLARE	Schichtverbund aus glasfaserverstärktem Kunststoff und Aluminiumfolien (von engl.: Glass Reinforced Aluminium Laminate)
IVW	Leibniz-Institut für Verbundwerkstoffe GmbH
LCM	Flüssigimprägnierverfahren (von engl.: Liquid Composite Molding)
PEI	Polyetherimid
PTFE	Polytetrafluorethylen
RTM	Resin Transfer Molding
SCRIMP	Seemann Composites Resin Infusion Molding Process, eine besondere Variante für Vakuuminfusionsverfahren
SMART Layer	Stanford Multi-Actuator-Receiver Transduction Layer, ein Array von piezoelektrischen Ultraschallsensoren, das auf ein flexibles Trägermaterial aufgebracht ist.
VARI	Vacuum Assisted Resin Infusion
VARTM	Vacuum Assisted Resin Transfer Molding

Verzeichnis verwendeter Formelzeichen

Lateinische Zeichen	Einheit ¹	Beschreibung
A	m^2	Fläche
a	m	Seitenlänge der Einheitszelle der Perforation
BG	%	Bedeckungsgrad (Verbleibende Fläche nach einbringen der Perforation, bezogen auf die Ursprungsfläche)
d	m	Durchmesser
FVG	%	Faservolumengehalt
h	m	Höhe
K_1	m^2	Höchste Permeabilität in der Ebene
K_2	m^2	Niedrigste Permeabilität in der Ebene
K_3	m^2	Permeabilität senkrecht zur Ebene, Dickenpermeabilität
k	$\frac{1}{s * m}$	Zusammengefasster Vorfaktor zur besseren Übersichtlichkeit, vgl. Anhang 8.1
L	m	Länge
\bar{m}	$\frac{kg}{m^2}$	Flächenbezogene Masse
n	---	Anzahl
P	Pa	Druck
p	%	Signifikanzwert bei der statistischen Auswertung
Q	$\frac{m^3}{s}$	Volumenstrom
R_{adj}^2	---	Adjustiertes Bestimmtheitsmaß
r	m	Radius
T_g	K	Glasübergangstemperatur
V_F	m^3	Faservolumen in einem FKV-Bauteil
V_{FKV}	m^3	Gesamtvolumen eines FKV-Bauteils

¹ Es ist jeweils die entsprechende SI-Basiseinheit oder abgeleitete Einheit angegeben. Im Rahmen der Arbeit werden auch Einheitenvorsätze (z. B. MPa für Megapascal) sowie gebräuchliche nicht SI-Einheiten (z. B. 1 bar = 10.000 Pa) genutzt. Ein Prozentzeichen bedeutet, dass es sich um eine dimensionslose Verhältniszahl handelt, die zur besseren Veranschaulichung in der Regel in Prozent angegeben wird.

Griechische Zeichen	Einheit ¹	Beschreibung
α	°	Winkel zwischen der Produktionsrichtung des Textils (0°-Richtung) und der Orientierung der Permeabilität K_1
ε	%	Dehnung
η	$Pa * s$	dynamische Viskosität
ρ	$\frac{kg}{m^3}$	Dichte
σ	Pa	mechanische Spannung

Kurzfassung

Um die Leichtbaugüte von Faser-Kunststoff-Verbunden zu erhöhen, können Zusatzfunktionen in lasttragende Bauteile integriert werden. Ein Beispiel sind interlaminaire Elastomerschichten, die z. B. die Dämpfung verbessern. Während für die Verarbeitung im Prepreg-Prozess Verfahrensanweisungen existieren, fehlten diese noch für Flüssigimprägnierverfahren (LCM) und wurden in dieser Arbeit neu entwickelt. Dabei wurde festgestellt, dass herkömmliche LCM-Verfahren für diese Materialkombination nur bedingt geeignet sind. Vulkanisation und Harzaushärtung sollten möglichst gleichzeitig ablaufen, wofür angepasste Rezepturen, eine sauerstofffreie Verarbeitung und ausreichender Druck während der Vulkanisation erforderlich sind, was beispielsweise durch isobare Verarbeitung erreicht werden kann. Um auch eine vollständige Imprägnierung großer Bauteile zu ermöglichen, ist die Nutzung von LCM-Verfahren mit Imprägnierung in Dickenrichtung hilfreich, wozu eine Perforation der Elastomerschicht erfolgen muss. Es konnte gezeigt werden, dass neben der Gesamtperforationsfläche auch der Lochdurchmesser und die Ebenenpermeabilität der Verstärkungstextilien einen Einfluss auf die Gesamtdickenpermeabilität einer solchen Preform haben.

Abstract

To enhance the lightweight quality of fiber-reinforced polymers, additional functions can be integrated into load-bearing components. One example are interlaminar elastomer layers, which improve damping, for example. While process instructions for prepreg processes exist, none were available for liquid impregnation and have been newly developed. It was found that conventional liquid impregnation processes are not completely suitable. Vulcanization and resin curing should take place simultaneously which requires optimized formulations, oxygen-free processing and sufficient pressure during vulcanization, which can be achieved, for example, by isobaric processing. To enable complete impregnation of large components, the use of liquid impregnation processes with impregnation in the thickness direction is helpful. However, the elastomer layer must be perforated to enable this. It was shown that, in addition to the total perforation area, the hole diameter and the in-plane permeability of the reinforcement textiles have an influence on the total thickness permeability of such a preform.

1 Einleitung, Forschungsfrage und Aufbau der Arbeit

Faser-Kunststoff-Verbunde (FKV) verfügen über hohe dichtebezogene Festigkeit und Steifigkeit und sind daher aus Sicht des Werkstoffleichtbaus sehr attraktiv. Bei FKV werden lasttragende Verstärkungsfasern in eine Kunststoffmatrix eingebettet, die der Stabilisierung und dem Schutz der Fasern dient. Bei der Auslegung von FKV ist zudem eine hohe Variabilität an Werkstoffen, Faserlängen und -orientierungen und Verarbeitungsverfahren möglich, wodurch Bauteile aus FKV im Sinne des konstruktiven Leichtbaus sehr gut an die gewünschte Anwendung angepasst werden können.

Die höchste dichtebezogene Steifigkeit und Festigkeit wird mit FKV erreicht, bei denen die Fasern ohne Unterbrechung durch das ganze Bauteil reichen, so genannte kontinuierliche FKV. Zur Herstellung flächiger Bauteile werden die Verstärkungsfasern dabei in der Regel zunächst zu Textilien verarbeitet, um eine einfachere Handhabung zu erreichen. Die Bauteile werden dann schichtweise aus mehreren Textillagen aufgebaut und klassischerweise durch eine duroplastische Matrix zusammengehalten. Ein sogenanntes „Laminat“ entsteht.

Um die Masse einer Gesamtstruktur weiter zu reduzieren, kann zusätzlich Systemleichtbau betrieben werden. Hierbei übernehmen lasttragende Komponenten durch Funktionsintegration/Multifunktionalisierung Zusatzaufgaben, die ansonsten von separaten Systemen erbracht werden müssten, beispielsweise als thermische Isolation oder Schallschutz. Die betroffenen Komponenten werden dadurch in der Regel schwerer, durch die Einsparung zusätzlicher Bauteile und Verbindungsmittel kann aber global gesehen eine Massenreduktion erreicht werden. Bei schichtweise aufgebauten FKV bietet sich hierzu beispielsweise die Integration zusätzlicher Schichten aus anderen Materialien an, die zwischen den Textillagen platziert werden, sogenannte interlaminare Schichten.

In der Produktion ist die Integration solcher interlaminaren Schichten in einen Lagenaufbau vergleichsweise einfach, da die hierfür notwendigen Hilfsmittel, Werkzeuge und die Ausbildung der Mitarbeiter in der Regel gleich oder ähnlich zu dem sind, was für den Lagenaufbau sowieso benötigt wird. Die interlaminaren Schichten können über das komplette Bauteil oder nur in bestimmten Bereichen aufgebracht werden, sodass eine gezielte Anpassung an die Anwendung möglich ist. Durch die Integration in einen

bestehenden Prozess und die Möglichkeit zur großflächigen Aufbringung können zudem, im Vergleich zu einer nachträglichen Montage separater Systeme, Zeit und Kosten eingespart werden.

Eine besonders interessante Möglichkeit ist die Integration von interlaminaren Elastomerschichten in FKV-Bauteile mit kontinuierlicher Faserverstärkung. Diese könnten beispielsweise die Schadenstoleranz verbessern, Schwingungen und Schallwellen dämpfen oder gezielt die Biegesteifigkeit des Materials senken, während die Zugsteifigkeit in der Ebene erhalten bleibt.

Für die Herstellung flächiger Bauteile mit kontinuierlicher Faserverstärkung und duroplastischer Matrix sind vor allem zwei Verfahrensgruppen relevant: Bei der Prepregverarbeitung sind die Verstärkungstextilien bereits vor dem Zusammenstellen des Lagenaufbaus mit dem Harzsystem getränkt und werden im Anschluss unter Hitze und üblicherweise auch unter Druck ausgehärtet. Die zweite große Gruppe sind die Flüssigimprägnierverfahren (engl.: Liquid Composite Molding, LCM), bei denen trockene Textilien gestapelt und erst dann mit einem flüssigen Harzsystem imprägniert werden, das anschließend aushärtet. Hierbei kann ebenfalls Hitze und Druck genutzt werden. Es gibt aber auch Systeme, die sich drucklos und bei Raumtemperatur verarbeiten lassen.

Für die Fertigung von FKV mit interlaminaren Elastomerschichten im Prepreg-Verfahren gibt es kommerziell erhältliche Materialien und dokumentierte Verarbeitungsprozesse. Für die wichtige Gruppe der Flüssigimprägnierverfahren gibt es diese noch nicht. Im Hinblick auf die Fertigung derartiger Bauteile ergibt sich daher folgende Forschungsfrage:

„Wie können, flächige, kontinuierlich faserverstärkte FKV mit Duroplastmatrix und interlaminaren Elastomerschichten mittels Flüssigimprägnierverfahren hergestellt werden?“

Ziel ist es hierbei, die verwendeten Materialien bestmöglich auszunutzen. Das bedeutet insbesondere, dass besonderes Augenmerk auf die Verbindungsfestigkeit zwischen Elastomer und dem restlichen Verbund gelegt und die Bildung von Fehlstellen durch geeignete Prozessbedingungen verhindert werden muss. Eine weitere Herausforderung ergibt sich daraus, dass das Elastomer undurchlässig für das flüssige Harzsystem ist und daher durch geeignete Angussstrategien oder eine Perforation des Elastomers eine vollständige Imprägnierung des Bauteils sichergestellt werden muss.

Im Stand der Technik (Kapitel 2) erfolgt zunächst eine Übersicht der für die Arbeit relevanten Grundlagen der Faser-Kunststoff-Verbunde, insbesondere im Hinblick auf die verfügbaren Verarbeitungsverfahren sowie unterschiedliche Möglichkeiten der Multifunktionalisierung. Des Weiteren wird die Verarbeitung von Kautschuk zum Elastomer erläutert, wobei nur der für die weitere Arbeit relevante Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk (EPDM) näher vorgestellt wird. Den Abschluss bilden die Grundlagen der Fluidströmung in Textilien sowie durch perforierte Flächen als Basis für die Überlegungen, wie größere Bauteile mit interlaminaer Elastomerschicht gefertigt werden können.

Das erste Hauptkapitel (Kapitel 3) stellt die Konzeptentwicklung dar. Hier werden die genaue Material- und Prozessauswahl, sowie die Versuchsplanung aus dem Stand der Technik abgeleitet und die getroffenen Grundsatzentscheidungen begründet. Insbesondere wird auch erläutert, warum der Nutzung einer perforierten Elastomerschicht der Vorzug über andere Möglichkeiten, zum Beispiel einem zweiseitigen Harzanguss, gegeben wurde.

Kapitel 4 enthält die Planung, Durchführung und Auswertung der Verarbeitungsversuche. Insbesondere wird dargestellt, wie sich verschiedene Verarbeitungsvarianten hinsichtlich Laminatqualität und Verbindungsfestigkeit zwischen Elastomer und umgebendem FKV unterscheiden. Im Prepreg-Verfahren hergestellte Probekörper dienen dabei als Referenz.

In Kapitel 5 wird, als Folge der in der Konzeptentwicklung getroffenen Entscheidung, das Elastomer zu perforieren, die Durchströmung von Textilien mit perforierten interlaminaeren Elastomerschichten behandelt. Hierbei kommen sowohl experimentelle als auch numerische Methoden zum Einsatz.

Den Abschluss bildet die Zusammenfassung in Kapitel 6, die auch das Gesamtfazit und Überlegungen zu zukünftigen Forschungsthemen enthält.

2 Stand der Technik

2.1 Grundlagen der Faser-Kunststoff-Verbunde

Bei Faser-Kunststoff-Verbunden handelt es sich um die Verbindung von lasttragenden Fasern, die die Zug- und Druckkräfte aufnehmen, mit einem die Fasern umschließenden Kunststoff (Matrix), der für die Fixierung und den Schutz der Fasern sorgt sowie die Krafterleitung in die Fasern realisiert [1–3]. Die höchste Festigkeit und Steifigkeit kann dabei mit FKV erzielt werden, bei denen die Fasern in Richtung der angreifenden Kräfte ausgerichtet sind. Die Länge der Fasern hat ebenfalls einen Einfluss: Während die maximale Steifigkeit schon mit Faserlängen im (Sub-)Millimeterbereich erreicht werden kann, sind für die maximale Festigkeit und Schadensresistenz Faserlängen im Zentimeterbereich erforderlich. Die genauen Werte sind abhängig von Faser, Matrix sowie der Schubfestigkeit der Faser-Matrix Grenzfläche [2, 4]. Für hochbelastete Bauteile wird daher oft eine kontinuierliche Faserverstärkung, auch „Endlosfaserverstärkung“ genannt, gewählt, bei der die Fasern das Bauteil in voller Länge durchziehen. Da nur in Ausnahmefällen im Einsatzfall eine einzige, wohldefinierte Lastrichtung vorliegt, kommen in der Praxis zudem selten Bauteile mit nur einer einzelnen (unidirektionalen) Faserorientierung zum Einsatz. Meist werden mehrere Lagen Fasern unterschiedlicher Ausrichtung miteinander kombiniert. Hierdurch sinkt die Leichtbaugüte, da nicht alle Fasern optimal entlang ihrer Orientierung belastet werden, aber es wird ein erheblich toleranteres Verhalten gegenüber mehrachsigen, ggf. unerwarteten, Belastungen erreicht. Nur diese Form und Anwendung von FKV soll im Weiteren betrachtet werden. Da für Festigkeit und Steifigkeit überwiegend die Fasern verantwortlich sind, wird deren Anteil am FKV in der Regel möglichst hoch gewählt. Dies wird durch den Faservolumengehalt (FVG), das Verhältnis des Faservolumens (V_F) zum Gesamtvolumen des FKV (V_{FKV}) beschrieben: [3]

$$FVG = \frac{V_F}{V_{FKV}} \quad (2.1)$$

FKV, die ausschließlich aus Fasern und Matrix bestehen, bezeichnet man als monolithisch. Daneben besteht aber auch die Möglichkeit, FKV-Schichten mit ihrer hohen

Zugsteifigkeit und -festigkeit als Decklagen auf einem Kernmaterial mit geringer Dichte und guter Schubsteifigkeit, beispielsweise Schaumwerkstoffen oder Wabenstrukturen, aufzubringen. Dies wird als Sandwichverbund bezeichnet und dient klassischerweise vor allem der Verbesserung der spezifischen Biegesteifigkeit und der Beulresistenz von FKV. [5, 6]

Fasern und Textilien

In FKV-Bauteilen kommen heutzutage überwiegend Glasfasern (GF) zum Einsatz, die einen guten Kompromiss zwischen Kosten, Dichte und mechanischen Eigenschaften bieten [7]. Wird höchstmögliches Leichtbaupotential gefordert, insbesondere in der Luft- und Raumfahrttechnik, aber z. B. auch in der Medizintechnik oder für hochwertige Sportgeräte, werden Kohlenstofffasern (Carbonfasern, CF) genutzt. Diese haben bessere massenbezogene mechanische Eigenschaften, aber auch einen deutlich höheren Preis. Aramidfasern sind sehr zäh und werden in FKV vor allem zur Verbesserung der Schadenstoleranz eingesetzt, meist als Ergänzung zu GF oder CF, seltener alleine [1]. Andere Fasertypen, wie Natur- oder Basaltfasern, werden derzeit vergleichsweise selten eingesetzt und sollen nicht weiter betrachtet werden. [1, 7]

Einzelne Glasfasern haben üblicherweise Durchmesser zwischen 5 μm und 24 μm [3], Carbonfasern sind mit 5 - 10 μm im Mittel noch dünner [1]. Fasern werden daher im Normalfall nicht singular eingesetzt, sondern zu Bündeln (Rovings) zusammengefasst, die aus einigen hundert bis zu vielen tausend Einzelfasern bestehen. Für die Herstellung von flächigen, endlosfaserverstärkten Bauteilen werden diese Rovings zudem zu Textilien weiterverarbeitet. Wichtigste Vertreter sind hierbei die Gewebe und Gelege (vgl. Abbildung 2.1), sowie die Vliesstoffe.

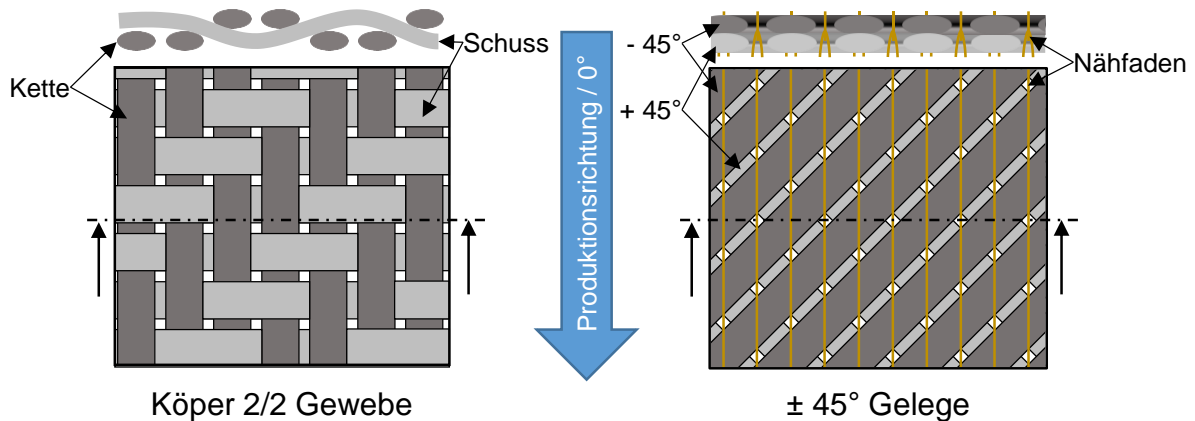


Abbildung 2.1: Schematischer Vergleich eines 2/2 Köpergewebes mit einem vernähten $\pm 45^\circ$ Gelege in Draufsicht und Querschnitt

Gewebe bestehen aus zwei Systemen von Rovings, die im rechten Winkel zueinander stehen. Die Produktionsrichtung wird als 0° -Ausrichtung definiert und die entsprechenden Rovings als „Kette“ bezeichnet, in 90° -Richtung verläuft der „Schuss“. Der Zusammenhalt des Textils wird durch das Überkreuzen von Kette und Schuss erreicht. Da hierdurch die Fasern nicht komplett gestreckt vorliegen, sind die mechanischen Eigenschaften im Vergleich zur reinen Faser vermindert. Schürmann [1] spricht von Einbußen von 5-20 %. Bei der Gewebeerstellung sind verschiedene Bindungsarten möglich. Für FKV-Verstärkungstextilien wird häufig die in Abbildung 2.1 dargestellte 2/2 Köperbindung genutzt. So auch in dieser Arbeit, da diese einen guten Kompromiss zwischen Drapierbarkeit und mechanischen Eigenschaften bietet. Bei Geweben sind typischerweise Faservolumenanteile (FVG) von 35-60 % möglich. [1, 2, 8]

Gelege bestehen aus einer oder mehreren Ebenen von Rovings, die durch eine Vernähung zusammengehalten werden. Die Rovings einer Ebene liegen dabei alle parallel. Die Ebenen sind häufig gegeneinander verdreht (beispielsweise als $\pm 45^\circ$ Gelege, vgl. Abbildung 2.1), um mehrachsige Belastungen aufnehmen zu können. Gegenüber Geweben können durch die gestreckten Fasern höhere Festigkeiten und Steifigkeiten sowie ein FVG von bis zu 70 % erreicht werden. [1]

Im Gegensatz zu Geweben und Gelegen liegen bei Vliesstoffen die Fasern ungeordnet vor. Rovings oder Einzelfasern werden durch Vernadeln oder einen Klebstoff (Binder) in einer wirren Anordnung fixiert. Im Vergleich zu Geweben und Gelegen lassen sich durch die fehlende Faserausrichtung nur geringe Faservolumenanteile (ca. 15-35 %)

erreichen. Die mechanischen Eigenschaften sind dementsprechend eingeschränkt. Allerdings ergeben sich hierdurch auch deutlich mehr und größere Fließwege im Material, die zu einer besseren Durchströmbarkeit bei der Verarbeitung in LCM Verfahren führen. [1]

Matrixkunststoffe

Kunststoffe lassen sich grundsätzlich in Thermoplaste, Duroplaste und Elastomere einteilen. Bei den Thermoplasten ist zudem zwischen amorphen Varianten, bei denen die Molekülketten regellos vorliegen und teilkristallinen Thermoplasten, bei denen die Moleküle abschnittsweise orientiert sind, zu unterscheiden. Thermoplaste zeichnen sich durch ihre Aufschmelzbarkeit aus. Diese ergibt sich aus ihrer Molekülstruktur, vgl. Abbildung 2.2 a und b. Die einzelnen Molekülstränge sind bei Thermoplasten nur durch Verschlaufungen und zwischenmolekulare Kräfte miteinander verbunden. Die Stränge können daher, besonders bei erhöhten Temperaturen, aneinander abgleiten. Dies ist beim Aufschmelzen gewünscht und Grund für die gute Bruchzähigkeit der Thermoplaste, es kann aber auch zu unerwünschtem Kriechen des Materials führen. Bei Duroplasten und Elastomere liegen dagegen Quervernetzungen vor (vgl. Abbildung 2.2 c und d), die ein Aufschmelzen verhindern und plastische Verformungen einschränken. Duroplaste sind engmaschig vernetzt und besitzen dadurch hohe Steifigkeiten, aber auch ein sprödes Versagensverhalten. Elastomere sind dagegen weitmaschig vernetzt und ähneln in den Molekülabschnitten zwischen den Vernetzungspunkten amorphen Thermoplasten. Wird ein Elastomer mechanisch belastet, werden diese Molekülabschnitte gestreckt, was die hohe elastische Verformbarkeit der Elastomere erklärt. Die Rückstellkraft nimmt dabei mit steigender Temperatur zu (Entropieelastizität). [9]

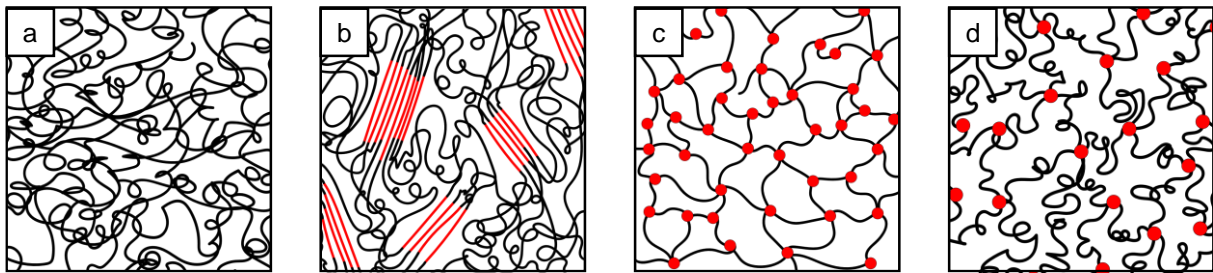


Abbildung 2.2: Schematische Molekülstruktur mit Vernetzungsstellen verschiedener Kunststoffklassen. a: amorphe Thermoplaste, b: teilkristalline Thermoplaste, c: Duroplaste, d: Elastomere, Abbildungen in Anlehnung an [2, 9–12]

Obwohl thermoplastische Kunststoffe als Matrixmaterial für endlosfaserverstärkte Strukturbauteile in den letzten Jahren zunehmend relevant werden, dominieren weiterhin die duroplastischen Kunststoffe den Markt [2, 3, 13]. Elastomere kommen als Matrixmaterial nur in Spezialfällen zum Einsatz. FKV mit Elastomermatrix verfügen über eine hohe Steifigkeit in der Faserebene, aber eine sehr niedrige Biegesteifigkeit. Anwendungsbeispiele sind formvariable aerodynamische Flächen, aktiv verformbare Reflektoren für Antennen, künstliche Muskeln oder torsionssteife, aber biegeeweiche Wellen [14–17]. Deutlich abgrenzen muss man FKV mit Elastomermatrix zudem von Elastomeren mit lediglich lokaler Faserverstärkung, wie sie beispielsweise bei Keilriemen oder Fahrzeugreifen vorkommen [14].

Da Elastomere in dieser Arbeit als interlaminare Zwischenschichten eingesetzt werden, werden sie unter diesem Aspekt detaillierter in Kapitel 2.2 behandelt.

Im Rahmen dieser Arbeit werden nur Epoxidharze als duroplastisches Matrixmaterial verwendet. Epoxidharze finden, aufgrund ihrer sehr guten Festigkeit und Steifigkeit und der Möglichkeit zur lösungsmittelfreien Verarbeitung, heute eine breite Anwendung im Bereich der kontinuierlich verstärkten FKV [3]. Wie alle Duroplaste liegen Epoxidharze dabei zu Beginn des Prozesses als Monomer vor. Das Monomer verfügt dabei über mindestens zwei endständige, sehr reaktionsfähige Epoxidgruppen (vgl. Abbildung 2.3). Die Vernetzung zum Duroplast wird durch die Zugabe eines Härter erreicht, der die Epoxidgruppen der Monomere miteinander verbindet. [9, 13]

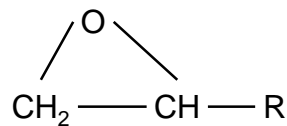


Abbildung 2.3: Valenzstrichformel einer Epoxidgruppe. R ist das Restmolekül. Ein Monomer enthält mindestens zwei endständige Epoxidgruppen, um eine Verkettung der Moleküle zum Polymer zu ermöglichen.

Je nach genauer Konfiguration von Monomer und Härter kann die Viskosität und das Reaktionsverhalten des Harzsystems sowie die Vernetzungsdichte des späteren Polymers eingestellt werden, was wiederum die mechanischen Eigenschaften beeinflusst. Als Härter können verschiedenste aromatische oder aliphatische Amine sowie Anhydride verwendet werden, was eine große Flexibilität in der Rezepturentwicklung ermöglicht und starken Einfluss auf die Verarbeitungseigenschaften, insbesondere die benötigte Aushärtetemperatur und die Reaktionsgeschwindigkeit hat. Sowohl Monomer als auch Härter können bei Raumtemperatur als Flüssigkeit oder Feststoff vorliegen, abhängig von der genauen Molekülkonfiguration. [9, 13]

Da sowohl in der fachlichen Umgangssprache als auch in der Literatur Begrifflichkeiten nicht eindeutig verwendet werden, soll im Rahmen dieser Arbeit folgendes gelten (vgl. Abbildung 2.4): Das Monomer wird auch als Harz oder A-Komponente bezeichnet, der Härter als Vernetzungsmittel oder B-Komponente. Als Harzsystem wird die Gesamtheit der Einzelkomponenten bezeichnet. Wurden die Komponenten vermischt und die erforderliche Reaktionstemperatur erreicht, kommt es zur Polymerisation, die auch Vernetzung oder (Aus-)Härtung genannt wird. Es entsteht der fertige Duroplast/Kunststoff, der bei FKV Anwendungen auch als Matrix bezeichnet wird.

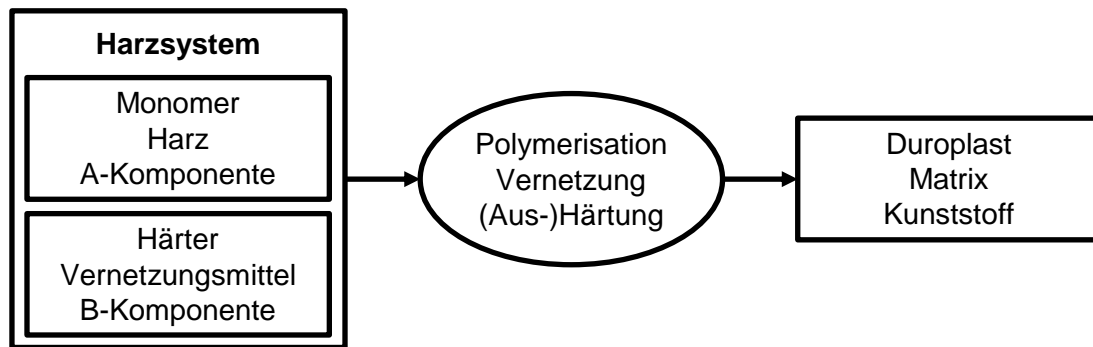


Abbildung 2.4: Prozessablauf und Begrifflichkeiten bei der Duroplasterstellung

2.1.1 Verarbeitungsverfahren

Bei der Verarbeitung von Textilien zu flächigen, endlosfaserverstärkten, duroplastischen FKV gibt es zwei grundlegend unterschiedliche Prozessrouten, die sich jeweils in diverse Untervarianten gliedern lassen: Prepregverfahren, bei denen das Textil als Meterware mit dem Harzsystem imprägniert und erst danach in die gewünschte Form gebracht wird und Flüssigimprägnierverfahren, bei denen das Textil zunächst trocken in eine endkonturnahe Form gebracht und erst im Anschluss mit dem Harzsystem imprägniert wird.

Prepregverfahren

Die Prepregherstellung erfolgt in einem kontinuierlichen Prozess. Dabei wird üblicherweise zunächst eine Schicht des fertig gemischten Harzsystems auf eine Trägerfolie aufgebracht, auf die dann das Textil geführt wird. Den Abschluss bildet eine Abdeckfolie. In einer aus mehreren Walzen bestehenden Walkstrecke wird das Harzsystem dann in das Textil eingearbeitet, welches schließlich aufgerollt und verpackt wird. Um zu verhindern, dass sich das Harzsystem durch Schwerkraft oder Handhabung ungleichmäßig im Material verteilt, darf seine Viskosität nicht zu niedrig sein. Prepregs müssen üblicherweise tiefgekühlt gelagert werden, um eine vorzeitige Vernetzung zu verhindern. Gleichzeitig ist die spätere Aushärtetemperatur verhältnismäßig hoch. Übliche Werte sind beispielsweise 120 °C für Standard- und 180 °C für Hochleistungssysteme [1, 3].

Zur Verarbeitung der Prepregs zu Bauteilen wird das Material auf die benötigte Kontur zugeschnitten, zu mehreren Lagen aufeinandergestapelt und in die gewünschte Form gebracht. Die Aushärtung von Prepregs erfolgt üblicherweise in einem Autoklav. Dabei handelt es sich um einen Ofen, der zusätzlich mit Gasdruck beaufschlagt werden kann. Das Bauteil wird zudem in einem Vakuumsack platziert. Durch das Vakuum im Sack und den Überdruck außerhalb werden die Prepreglagen während der Aushärtung mechanisch kompaktiert und es können hochwertige Lamine mit minimalen Lufteinschlüssen und dadurch besonders guten mechanischen Eigenschaften erzeugt werden. Abbildung 2.5 zeigt den prinzipiellen Aufbau. In der Abbildung sind auch die notwendigen Hilfsmaterialien dargestellt. Diese dienen zum einen dazu die Luft und ggf. überschüssiges Harzsystem flächig aus dem Bauteil entfernen zu können (Absaugkanal, Sauggewebe). Zum anderen sind sie notwendig, um das Bauteil später wieder vom Formwerkzeug und den restlichen Hilfsmaterialien trennen zu können (Trennmittel, Abreißgewebe, Lochfolie, Trennfolie) [1, 18]. Seit einiger Zeit existieren auch Prepregvarianten, für die kein Autoklav nötig ist (Out-of-Autoclave Systeme). Diese sollen hier jedoch nicht weiter berücksichtigt werden, da der Druckaufbau für die Vulkanisation der in dieser Arbeit verwendeten, interlaminaren Elastomerschichten, unbedingt notwendig ist (vgl. Kapitel 2.2).

Aufgrund des Eigenschaftsprofils dieses Verarbeitungsverfahrens (vgl. Tabelle 2.1), werden Prepregs überwiegend bei kleinen bis mittelgroßen Bauteilen und kleinen bis mittleren Seriengrößen eingesetzt, wenn es auf höchste Leistungsfähigkeit und Qualität ankommt. Beispielsweise bei Motorsportfahrzeugen oder in der Medizintechnik. Insbesondere in der Luftfahrt werden auch große Bauteile wie Flügelschalen oder Rumpfsektionen mittels Prepreg und Autoklav hergestellt, was allerdings entsprechend große und teure Anlagen erfordert, weshalb an Alternativen gearbeitet wird [3, 19].

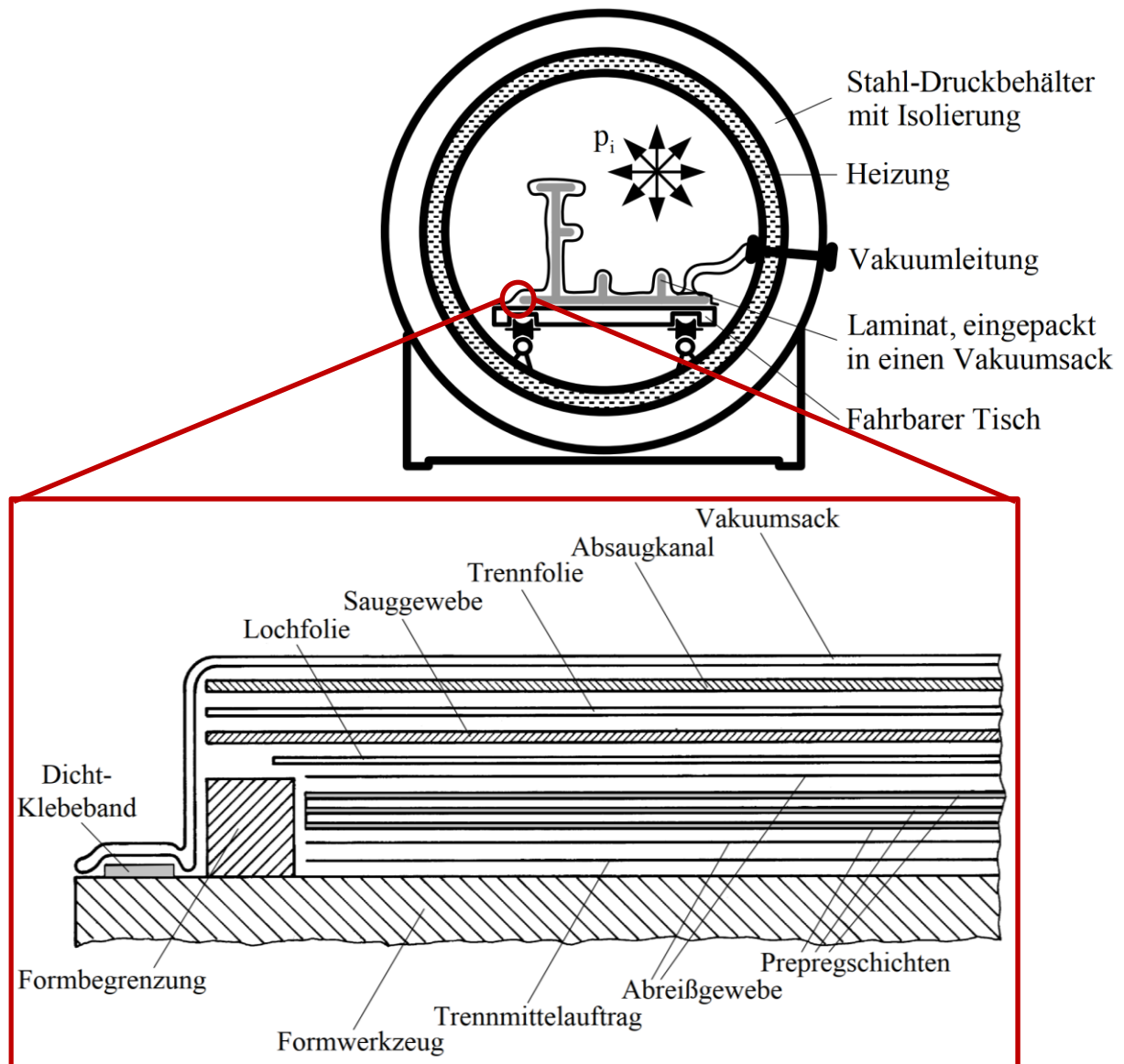


Abbildung 2.5: Prinzipieller Aufbau bei der Autoklavverarbeitung von Prepregs [1]

Tabelle 2.1: Vor- und Nachteile der FKV-Herstellung mittels Prepreg und Autoklav [1]

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> + Hervorragende Bauteilqualität + Harzsystem muss nicht weit fließen 	<ul style="list-style-type: none"> - Hohe Kosten für Material und Anlagen - Viele Einweg-Verbrauchsmittel - Autoklav bestimmt max. Bauteilgröße - Lange Zykluszeit (Stunden) - Tiefkühlagerung, begrenzte Haltbarkeit - Viel Handarbeit

Flüssigimprägnierverfahren

Im Gegensatz zu den Prepregverfahren wird bei den Flüssigimprägnierverfahren (LCM – von Liquid Composite Molding) zunächst mit trockenen Textilien gearbeitet. Diese werden zugeschnitten, in die gewünschte Form drapiert und ggf. fixiert. Die sogenannte Preform entsteht. Erst danach erfolgt die Imprägnierung mit dem Harzsystem. Da das Harzsystem nicht vorgemischt und auf das Textil aufgetragen werden muss, können schnellhärtende Harzsysteme verwendet werden, die bei erhöhten Temperaturen (typischerweise $> 100\text{ °C}$) innerhalb weniger Minuten vollständig vernetzen, was bei Prepregs aufgrund der Lager- und Verarbeitungszeit nicht möglich wäre. Andererseits gibt es auch Harzsysteme, die bei Raumtemperatur oder moderat erhöhter Temperatur verarbeitet werden (z. B. $30 - 80\text{ °C}$) und bis zu mehreren Stunden fließfähig bleiben. Hierdurch können auch sehr große Bauteile gefüllt werden. Da das Harzsystem bei LCM-Verfahren deutlich längere Fließwege im Textil zurücklegen muss als bei der Prepregherstellung, ist eine niedrige Viskosität des Harzsystems und eine gute Durchströmbarkeit der verwendeten Textilien besonders wichtig.

Für die eigentliche Imprägnierung steht eine Vielzahl von LCM-Verfahrensvarianten zur Verfügung [18–20]. An dieser Stelle soll lediglich auf zwei Varianten näher eingegangen werden, da nur diese im Rahmen dieser Forschungsarbeit relevant sind: Die klassische Vakuuminfusion (Vacuum Assisted Resin Infusion, VARI) sowie das Resin Transfer Molding (RTM) mit seinen Untervarianten Vacuum Assisted Resin Transfer Molding (VARTM) und Compression Resin Transfer Molding (CRTM). Da bei den LCM-Verfahren keine einheitliche Nomenklatur besteht (vgl. den Review Artikel zur Untergruppe der Infusionsverfahren von Hindersmann [19]) und verschiedene Autoren teilweise unterschiedliche Bezeichnungen für die gleichen Verfahren, bzw. die gleichen Bezeichnungen für unterschiedliche Verfahren nutzen, sollen die wesentlichen Aspekte und Begriffe für die Nutzung im Rahmen der vorliegenden Arbeit hier definiert werden. Abbildung 2.6 zeigt eine schematische Übersicht der genannten Verfahren.

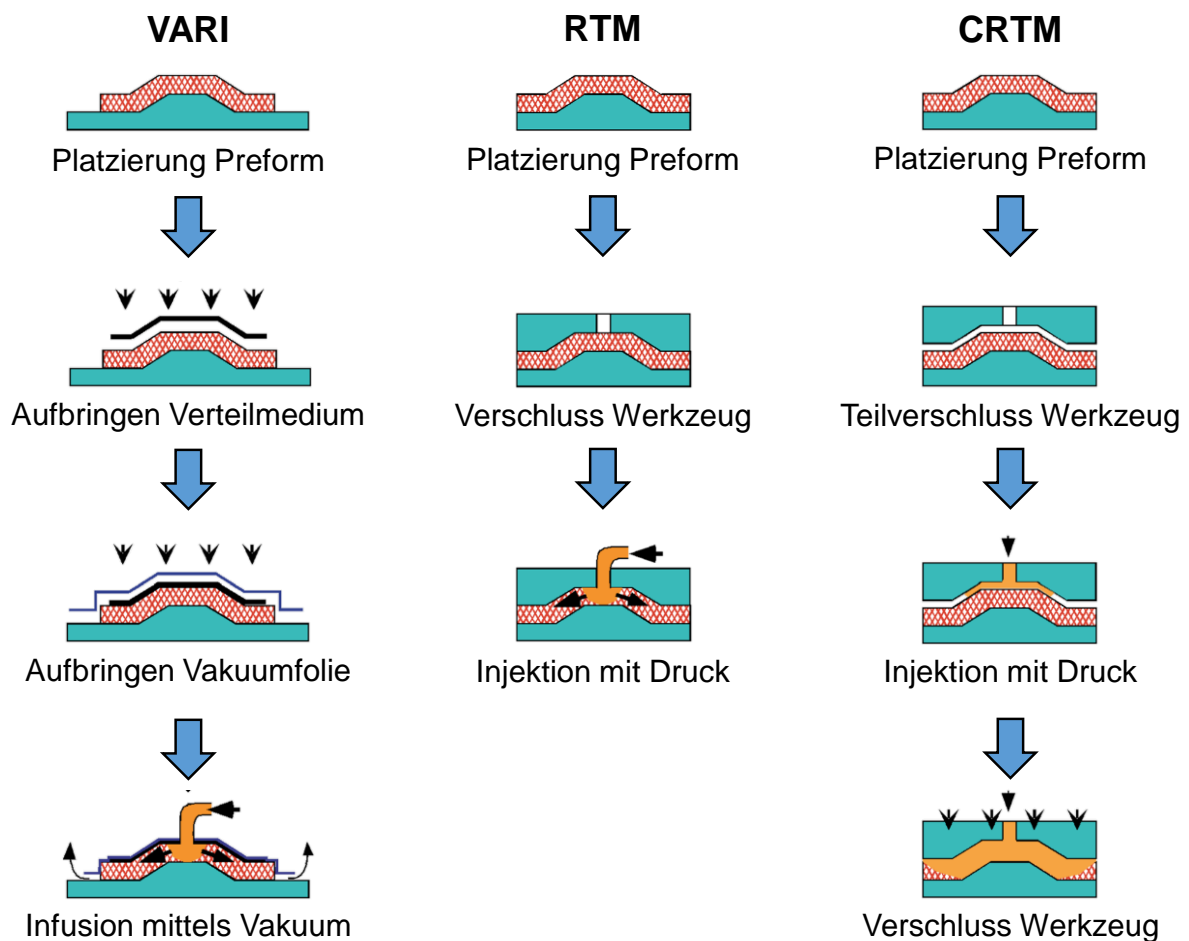


Abbildung 2.6: Verfahrensablauf der drei LCM Varianten VARI, RTM und CRTM. Abbildung aus [21] (modifiziert).

Beim VARI wird die Preform zunächst mit einem Verteilmedium bedeckt und dann mit einer Vakuumfolie versiegelt.² Eine Vakuumpumpe entfernt die Luft aus der Preform und das vorgemischte Harzsystem kann durch den Umgebungsluftdruck einströmen. Durch das Verteilmedium erfolgt eine schnelle Verteilung über die Bauteiloberfläche, sodass das Harzsystem die Preform überwiegend in Dickenrichtung imprägniert und nur kurze Fließwege in der Textilebene erforderlich sind.

² Ursprünglich wurden Vakuuminfusionsverfahren ohne Verteilmedium durchgeführt und die Variante mit Verteilmedium bei Ihrer Entwicklung als Seemann Composites Resin Infusion Molding Process (SCRIMP) bezeichnet [3, 22]. Diese strenge Unterscheidung wird allerdings in neueren Publikationen oft nicht mehr gemacht, da sich die Variante mit Verteilmedium weit verbreitet hat und in der Praxis die bedeutendere ist [19, 21].

Tabelle 2.2: Vor- und Nachteile der FKV-Herstellung mittels VARI

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> + Nahezu beliebig große und komplex geformte Bauteile möglich (z. B. Rotorblätter von Windkraftanlagen und Boote) + Vergleichsweise günstig + Imprägnierung in Dickenrichtung 	<ul style="list-style-type: none"> - Viele Einweg-Verbrauchsmittel - Durch flexible Vakuumfolie keine Injektion mit Überdruck möglich → Lange Zykluszeit - Niedrigviskoses Harzsystem nötig - Niedrigerer FVG und höherer Porengehalt als bei Prepreg + Autoklav - Viel Handarbeit

Beim RTM Verfahren wird anstatt eines Vakuumsacks ein formstabiles Injektionswerkzeug genutzt, das durch einen Zuhaltemechanismus geschlossen wird. Dadurch kann das Harzsystem mit Überdruck in die Preform injiziert werden. Da jedoch kein Verteilmedium genutzt wird, muss das Harz die Preform in der Textilebene durchfließen, sodass lange Fließwege zurückzulegen sind. Dies ist ein wesentlicher, limitierender Faktor für die maximal erreichbare Bauteilgröße. Das VARTM Verfahren entspricht dem RTM Verfahren, nur dass das Injektionswerkzeug zusätzlich evakuiert wird, um Luft einschüsse im Bauteil zu vermeiden. Sekundär erhöht sich dadurch auch die Druckdifferenz zwischen Preform und Injektionsanlage.

Tabelle 2.3: Vor- und Nachteile der FKV-Herstellung mittels (VA)RTM

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> + Schnelle Zykluszeiten möglich (Sekunden bis Minuten) + Gut automatisierbar + Günstig für (Groß-) Serienproduktion 	<ul style="list-style-type: none"> - Lange Fließwege durch Imprägnierung in der Ebene - Teure, formstabile Werkzeuge → ungünstig für Kleinserien und Einzelstücke - Bauteilkomplexität und -größe durch formstabiles Werkzeug, Fließen in der Ebene und Zuhaltkräfte eingeschränkt - Niedrigviskoses Harzsystem nötig - Niedrigerer FVG und höherer Porengehalt als bei Prepreg + Autoklav

Beim CRTM Verfahren kommt wie beim RTM Verfahren ein formstabiles Werkzeug zum Einsatz. Dieses wird jedoch am Anfang des Prozesses nicht vollständig geschlossen. Hierdurch kann sich das injizierte Harzsystem zunächst flächig über die Preform ausbreiten. Das Werkzeug wird dann mittels einer Presse vollständig geschlossen, sodass

das Harzsystem in die Preform gepresst wird und die Imprägnierung überwiegend in Dickenrichtung stattfindet.

Tabelle 2.4: Vor- und Nachteile der FKV-Herstellung mittels CRTM

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> + Schnelle Zykluszeiten möglich (Sekunden bis Minuten) + Gut automatisierbar + Imprägnierung in Dickenrichtung 	<ul style="list-style-type: none"> - Höhere Investitionskosten als bei anderen LCM Verfahren - Prozessführung ist anspruchsvoll - Werkzeugabdichtung ist eine besondere Herausforderung - Bauteilkomplexität und -größe durch formstabiles Werkzeug und Zuhaltekkräfte eingeschränkt

2.1.2 Multifunktionalität von FKV

Unter Multifunktionalität oder Funktionsintegration versteht man die Vereinigung unterschiedlicher Funktionen, die normalerweise von getrennten Systemen erbracht werden, in einem gemeinsamen Bauteil [23]. Multifunktionalität nimmt im Rahmen des Leichtbaus eine bedeutende Rolle ein. Durch die Integration von Zusatzfunktionen in Strukturbauteile nimmt zwar die Masse der einzelne Bauteile zu; durch die Einsparung von zusätzlichen Bauteilen und Verbindungsmitteln kommt es global gesehen jedoch zu einer Gewichtsreduktion [24]. Gibson [23] bezeichnet Faser-Kunststoff-Verbunde generell als multifunktionelle Materialien, da Struktureigenschaften teilweise durch die Fasern, teilweise durch die Matrix bereitgestellt werden. Im engeren Sinne, der hier zu Grunde gelegt werden soll, werden hierunter jedoch nur solche FKV verstanden, die neben Fasern und Matrix weitere Materialien oder Bauteile enthalten, die nicht-mechanische Zusatzfunktionen erbringen. Hierzu gehören beispielsweise Vibrationsdämpfung, Schadenstoleranz, Zustandsüberwachung, Selbstheilung, Aktuatorik oder Energiespeicherung [23]. Klassische Sandwichstrukturen zählen nach dieser Definition nicht zu den multifunktionalen FKV, da hierbei üblicherweise die mechanischen Eigenschaften im Vordergrund stehen und nicht-mechanische Eigenschaften (wie beispielsweise eine verbesserte Wärmedämmung) in der Regel eher als Nebeneffekt zu sehen sind.

Multifunktionalität kann auf verschiedenen Ebenen erreicht werden:

1. Auf mikroskopischer Ebene, typischerweise durch die Zugabe von funktionellen Partikeln zum Harzsystem oder durch spezielle Fasern.
2. Auf makroskopischer Ebene, wobei komplexere Systeme, die deutlich größer als die Fasern sind, fest in das Bauteil integriert werden.
3. Als besondere Unterform der makroskopischen Multifunktionalisierung, die sich deutlich von der Integration diskreter Bauteile unterscheidet, kann die Integration von interlaminaeren Schichten gesehen werden.

Einen Überblick über die vielfältigen Möglichkeiten der Funktionsintegration bei FKV liefern beispielsweise Gibson [23] und Narayana und Burela [25]. Wichtig ist hierbei noch eine Unterscheidung zwischen Verbundwerkstoffen und Werkstoffverbunden. Während Verbundwerkstoffe makroskopisch homogen erscheinen, es aber mikroskopisch nicht sind, handelt es sich bei Werkstoffverbunden makroskopisch erkennbar um unterschiedliche Materialien, die für sich genommen jedoch mikroskopisch homogen sind [26]. Bei mikroskopischer Multifunktionalität liegt demnach weiterhin ein reiner Verbundwerkstoff vor, während interlaminaere Schichten zu einem Werkstoffverbund führen, bei dem einer der Partner wiederum ein Verbundwerkstoff ist.

Mikroskopische Multifunktionalität

Mikroskopische Multifunktionalität wird durch Materialien erreicht, die sich in einer kleineren oder der gleichen Größenordnung bewegen wie die Faserdurchmesser der Verstärkungstextilien. In der Forschung wird beispielsweise ausführlich die Nutzung von (Nano-) Partikeln untersucht, die dem Harz zugegeben werden. Die Nutzung von Kohlenstoffnanoröhrchen (carbon nanotubes, CNT) verbessert die Dämpfung [27, 28] und die thermische [29] und die elektrische Leitfähigkeit [30] von FKV. Elastomerpartikel können ebenfalls die Dämpfungseigenschaften und die Ermüdungsfestigkeit [31] verbessern. Eine große Herausforderung besteht allerdings darin, ein mit Partikeln versehenes Harz in ein Verstärkungstextil einzubringen. Zum einen wird durch die Partikelbeladung die Viskosität des Harzes erhöht, sodass die Wahl des Verarbeitungsverfahrens eingeschränkt wird [32, 33]. Zum anderen wirkt das Verstärkungstextil wie ein Filter, sodass vor allem Partikel mit Größen im Mikrometerbereich kaum in das Textil eindringen können und Fließkanäle zwischen den Verstärkungsfasern verstopfen [33].

Aber auch bei Nanopartikeln kann es bei längeren Fließwegen oder unerwünschter Partikelagglomeration zum Ausfiltern kommen [34].

Einen anderen Weg als die Zugabe von Partikeln gehen Veedu et al. [35]: Hierbei werden „Wälder“ von CNT mittels chemischer Gasphasenabscheidung auf Kohlenstofffasergeweben gezüchtet und diese dann wie klassische Verstärkungstextilien mehrlagig in Flüssigimprägnierverfahren verarbeitet. Im Vergleich zu unbehandelten Textilien konnte hierbei die elektrische und die thermische Leitfähigkeit sowie die Schadenstoleranz des FKV erhöht sowie die thermische Dehnung gesenkt werden. Nachteil bei diesem Prozess ist vor allem die aufwändige Gasphasenabscheidung.

Eine weitere Möglichkeit ist, Sensor- und Aktuatorfasern in das Laminat zu integrieren. Beispielsweise können mit Faser-Bragg-Gittern Temperatur und Dehnung des FKV überwacht werden [36]. Als Aktuatoren kommen unter anderem Fasern aus Formgedächtnislegierungen und -polymeren [37] oder Piezomaterialien [38, 39] zum Einsatz. Der Übergang zur makroskopischen Multifunktionalität ist hierbei fließend, da Sensor- und Aktuatorfasern oft einen deutlich größeren Durchmesser als normale Verstärkungsfasern haben und üblicherweise nicht integraler Bestandteil eines Verstärkungstextils sind, sondern separat aufgebracht werden.

Makroskopische Multifunktionalität

Makroskopische Multifunktionalität findet nicht in der Größenordnung der Faserdurchmesser statt, sondern auf Bauteilebene. Eine oft beschriebene Strategie ist die Nutzung der Kerne von Sandwichstrukturen für zusätzliche Funktionen:

Beispielsweise untersuchten Oei et al. [40] den Einsatz von FKV-Sandwichpaneelen mit Faltkernen und perforierten Deckschichten zur Belüftung und Klimatisierung von Räumen. Lockyer et. al. [41] beschreiben die Integration einer Multifunktionsantenne in die lasttragende Sandwichstruktur der Außenhaut eines Kampfflugzeugs. Ozaki [42] stellt mehrere Anwendungen aus dem Satellitenbau vor: Es wurden Heatpipes und verschiedene elektronische Komponenten in den Wabenkern eines Sandwich-FKV eingebettet, um Platz und Gewicht einzusparen.

In allen hier vorgestellten Fällen erfolgte die Fertigung der multifunktionellen FKV mittels Prepregs und Autoklav, teilweise unter Verwendung zusätzlicher Klebeschichten

zwischen Kern und Decklagen. Eine Fertigung mittels Flüssigimprägnierverfahren ist, je nach Kernmaterial und gewünschter Funktion, herausfordernd bis unmöglich, da das Harzsystem den Kern durchdringen können muss, ihn gleichzeitig aber nicht komplett füllen darf, um unnötiges Gewicht zu vermeiden und/oder die Multifunktionalität nicht zu behindern.

Multifunktionalität durch interlaminare Schichten

Als dritte Variante kann Multifunktionalität durch die Integration von Schichten aus einem anderen Material als dem Verstärkungstextil in den Lagenaufbau des FKV erreicht werden. Charakteristischerweise durchziehen diese Schichten den FKV vollflächig oder zumindest zu einem großen Teil seiner Fläche und sind verhältnismäßig dünn (< 1 mm), was sie von den unter „Makroskopische Multifunktionalität“ vorgestellten Varianten abgrenzt. Eine Schwierigkeit bei der Herstellung derartiger FKV kann darin bestehen, dass diese interlaminaren Schichten undurchlässig für Harz sind und daher auf Verarbeitungsverfahren zurückgegriffen werden muss, die keinen Harzfluss senkrecht zu den Lagen erfordern. Typischerweise wird dies durch die Nutzung von Prepregs und die Verarbeitung in einem Autoklavprozess erreicht. Eine weitere Herausforderung besteht in der flächigen Verbindung zwischen Verstärkungstextil, Matrix und der interlaminaren Schicht. Eine geringe Verbindungsfestigkeit sorgt für eine erhebliche Verringerung von Biege- und interlaminarer Festigkeit des gesamten Verbundes und ist daher kritisch.

Eine im Luftfahrtbereich weit verbreitete Form der Multifunktionalität durch interlaminare Schichten sind die sogenannten Faser-Metall-Lamine (FML), deren bekannteste Vertreter ARALL (Aramid Reinforced Aluminium Laminate) und GLARE (Glass Reinforced Aluminium Laminate) sind [3, 24, 43–45]. Die Entwicklung erfolgte hierbei ausgehend vom Aluminium, dessen Ermüdungsfestigkeit/Rissfortschrittswiderstand, Korrosionsbeständigkeit und Durchbrandwiderstand durch das Einbringen der Faserlagen verbessert werden sollte [1, 45].

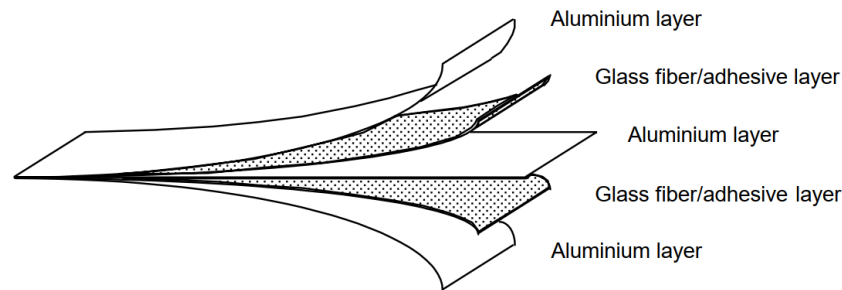


Abbildung 2.7: Beispielhafter Aufbau von GLARE [43]

Handelsübliches ARALL und GLARE besteht aus Prepreg, als unidirektionales Gelege mit Epoxidharzsystem, das mittels Autoklav mit den Aluminiumschichten gefügt wird (vgl. Abbildung 2.7) [44, 45]. Besonderes Augenmerk muss dabei auf die Vorbehandlung der Metallschichten gelegt werden, um eine gute Haftung zwischen Metall- und Faserlagen zu erreichen. Hierfür steht eine Vielzahl mechanischer, chemischer und elektrochemischer Verfahren zur Verfügung [45].

Lin und Chang [46] untersuchten, wie piezoelektrische Ultraschallsensoren zur Strukturüberwachung in FKV eingebracht werden können. Die Platzierung einzelner Sensoren ist aufwändig und schlecht reproduzierbar. Ihre Lösung war, die Sensoren inklusive Anschlussleitungen mittels Fotolithografie auf ein flexibles Trägermaterial zu drucken („Stanford Multi-Actuator-Receiver Transduction Layer“, „SMART-Layer“) und dieses in eine Struktur aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff (CFK) einzubetten (vgl. Abbildung 2.8). Es kam ein Prepreg-System zum Einsatz, das im Autoklav ausgehärtet wurde. Hierbei musste, aufgrund der Undurchlässigkeit des SMART-Layers, ober und unterhalb des Lagenaufbaus Abreiß- und Sauggewebe eingesetzt werden, um Lufteinschlüsse zu vermeiden und einen gleichmäßigen FVG sicherzustellen.

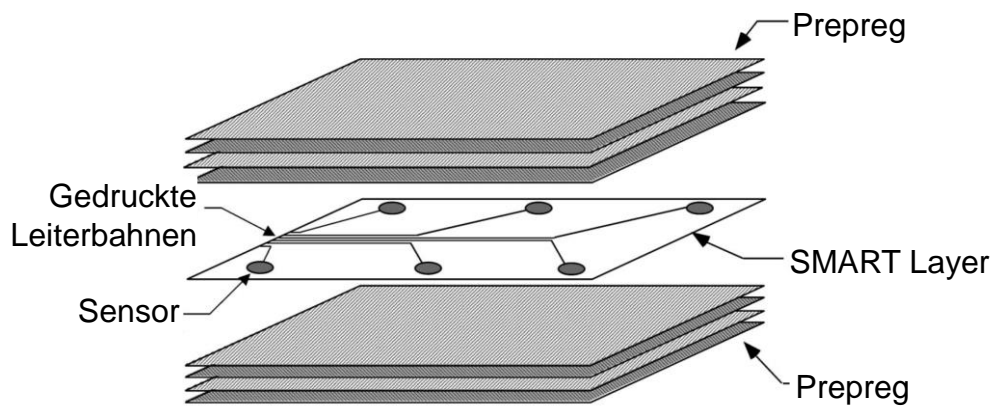


Abbildung 2.8: SMART-Layer von Lin und Chang [46] (Abbildung modifiziert): Ein Netzwerk aus piezoelektrischen Sensoren zur Strukturüberwachung, das auf ein Trägermaterial aufgedruckt und zwischen Prepreg-Lagen eingebettet wird.

Die Verbindungsfestigkeit zwischen SMART-Layer und CFK wurde von Lin und Chang ausführlich untersucht. Zum Einsatz kamen Stirnabzugsversuche nach ASTM C297, zweischnittige Zugscherversuche nach ASTM D3528, Kurzbiegeversuche zur Bestimmung der Scherfestigkeit nach ASTM D2344 sowie ungenormte Impact- und Druckversuche. All dies wurde an vier verschiedenen CF-Epoxy-Prepregsystemen durchgeführt. Hierbei konnte gezeigt werden, dass die Verbindungsfestigkeit zwischen Trägermaterial und Prepreglagen im Allgemeinen sehr gut ist und keine Schwachstelle darstellt. Lediglich bei einem der vier Prepregsysteme zeigte sich bei Impactbelastung eine geringe Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften gegenüber dem Referenzmaterial ohne SMART-Layer.

Pereira et al. [47] beschreiben die Integration von dünnen ($150\ \mu\text{m}$), lithiumbasierten Festkörperakkumulatoren in FKV. Auch hier kamen Prepregs und Autoklavprozess zum Einsatz.

Gibson et al. [48] untersuchten die Integration von interlaminaren Zwischenschichten aus Polyetherimid (PEI) oder Epoxidharz in verschiedenen FKV im Hinblick auf Schwingungsdämpfung und Rissfestigkeit. Auch in diesem Fall wurden Prepregs verwendet. Die Verarbeitung erfolgte auf einer Vakuum-Heißpresse, da kein Autoklav zur Verfügung stand.

Auch zur Nutzung von Elastomerschichten in FKV, auf denen im Rahmen dieser Arbeit der Schwerpunkt liegt, lassen sich einige Beispiele in der Literatur finden. Ziel kann beispielsweise eine verbesserte Schadenstoleranz [49–53], eine Reduktion der Biegesteifigkeit des FKV [53] oder die Dämpfung von Vibrationen und Schallwellen [49, 53–55] sein. Wird die Elastomerschicht an der Oberfläche des FKV angeordnet, kann sie zudem als Erosionsschutz dienen [56–58]. In Metall-FKV Werkstoffverbunden kann das Elastomer auch zwischen Metall und FKV angeordnet werden, um die unterschiedliche Wärmeausdehnung zu kompensieren und Kontaktkorrosion zu vermeiden [50].

Bei den meisten der hier genannten Veröffentlichungen wurden Kautschukmischungen aus der *KRAIBON*-Serie des *Gummiwerks Kraiburg* genutzt, die zusammen mit Prepregs im Autoklavprozess verarbeitet und währenddessen zum fertigen Elastomer vulkanisiert wurden. Bei Liang et al. [54] kam hingegen eine selbst entwickelte Kautschukmischung zum Einsatz, während Greenawald [51] und Kulhavy et al. [55] die verwendeten Kautschukmischungen nicht explizit angeben. Bei der Literaturrecherche konnte keine andere, kommerziell erhältliche Kautschukmischung speziell für die Verwendung mit FKV gefunden werden. Grund hierfür sind vermutlich die Patente, die das *Gummiwerk Kraiburg* an der Technologie hält [59, 60]. Es handelt sich bei *KRAIBON* nicht um eine einzelne Kautschukmischung, sondern um eine Produktfamilie, die auf verschiedene Einsatzbedingungen ausgelegt ist. Welches Produkt genau genutzt wurde, ist in der Literatur nicht immer angegeben. Die Produktfamilie wird zudem aktiv weiterentwickelt, sodass einige der in der Literatur genutzte Produktvarianten heute nicht mehr verfügbar sind oder unter anderem Namen angeboten werden [61].

2.2 Eigenschaften und Verarbeitung von Elastomeren

Bei den Elastomeren handelt es um die dritte große Gruppe von Kunststoffen, neben Duroplasten und Thermoplasten. Basis der Elastomerherstellung sind die Kautschuke. Dabei handelt es sich um natürliche oder synthetisch hergestellte, amorphe Polymere ohne Quervernetzung (strenggenommen demnach Thermoplaste), die eine Glasübergangstemperatur unter 0 °C haben und daher bei Raumtemperatur als viskoelastische Flüssigkeiten hoher Viskosität beschrieben werden können [11]. Kautschuke zeigen dementsprechend ein überwiegend plastisches Verformungsverhalten. Das typische,

elastische Verhalten der Elastomere kommt erst durch eine weitmaschige Quervernetzung (vgl. Abbildung 2.2d) der Polymerketten zu Stande, die sogenannte Vulkanisation [10].

Prozessablauf und Begrifflichkeiten der Elastomerproduktion sind in Abbildung 2.9 dargestellt. Der Kautschuk wird zunächst mit Additiven und dem notwendigen Vernetzungsmittel vermischt (Compounding), wonach man von einer Kautschukmischung spricht. Diese wird dann in die gewünschte Form gebracht und gleichzeitig oder im Anschluss vulkanisiert. Bei der Vulkanisation erzeugt das Vernetzungsmittel chemische Querverbindungen zwischen den langkettigen Kautschukmolekülen. Es entsteht das fertige Elastomer, das auch als „Vulkanisat“ und, sowohl umgangssprachlich als auch in Teilen der Fachliteratur, als „Gummi“ bezeichnet wird. [10, 11]

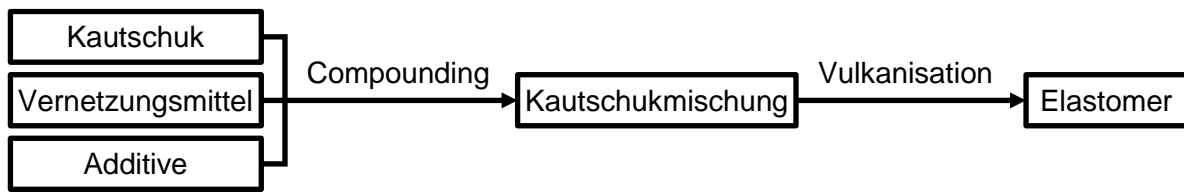


Abbildung 2.9: Prozessablauf und Begrifflichkeiten bei der Elastomerherstellung

Fertig vulkanisierte Elastomere zeichnen sich dadurch aus, dass ihre Glasübergangstemperatur unter ihrer Anwendungstemperatur liegt. Sinkt die Temperatur eines Elastomers unter seine Glasübergangstemperatur, wird er hart und spröde. Durch die Quervernetzung der Moleküle kommt es, anders als bei Thermoplasten, auch bei hohen Temperaturen zu keinem Erweichen oder Fließen. Im Gegenteil, die Rückstellkräfte von Elastomeren nehmen mit steigender Temperatur zu, bis es zur thermischen Zersetzung kommt. Dies bezeichnet man als entropie- oder auch gummielastisches Verhalten und steht im Gegensatz zum energieelastischen Verhalten, das bei idealen kristallinen Festkörpern, in guter Näherung beispielsweise bei Metallen, auftritt. Bei energieelastischen Werkstoffen kommt es bei Belastung zu einer Veränderung der Atomabstände und Bindungswinkel. Die Folge sind eine hohe Steifigkeit (Elastizitätsmodul im Gigapascalbereich), geringe elastische Dehnung (oft < 1 %), Proportionalität

zwischen Belastung und elastischer Dehnung (Hooksches Gesetz) und eine Volumenzunahme bei Zugbelastung (Querdehnungszahl $< 0,5$). Das entropieelastische Verhalten der Elastomere beruht dagegen auf der Verformung der Molekülketten zwischen den Vernetzungsstellen. Diese liegen im unbelasteten Fall in einer ungeordneten Knäuelform vor und verfügen dadurch über eine hohe Entropie. Bei Belastung werden die Segmente orientiert und gestreckt, die Entropie sinkt. Die Rückstellkraft entsteht durch das Bestreben der Ketten, wieder in einen Zustand höherer Entropie zurückzu kehren, was durch eine höhere Umgebungstemperatur verstärkt wird. Entropieelastisches Verhalten geht mit einer geringen Steifigkeit (stark temperaturabhängiges Elastizitätsmodul im Kilo- bis Megapascalbereich), sehr hohen elastischen Dehnungen (100 % - 1000 %), nichtlinearer Spannungs-/Dehnungskurve (Hyperelastizität) und Volumenkonstanz bei Verformung (Querdehnungszahl $\approx 0,5$) einher. [11]

Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk und Additive

Bei Elastomeren handelt es sich grundsätzlich um komplexe Mischungen verschiedenster chemischer Komponenten. Die Basis bildet stets Kautschuk, wobei bereits hierfür eine Vielzahl an Materialien zur Verfügung steht und auch das Mischen unterschiedlicher Kautschuksorten nicht unüblich ist. Röthemeyer und Sommer [11] bieten einen umfassenden Überblick. Im Rahmen dieser Dissertation soll nur der Ausschnitt des Fachgebiets vorgestellt werden, welcher für die späteren Arbeiten relevant ist.

In dieser Arbeit kommt ein Elastomer auf Basis von Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk (EPDM). Es handelt sich um das Material *KRAIBON AA9CFZ* der *Gummiwerk Kraiburg GmbH & Co. KG*. Warum genau dieses Material genutzt wird, ist in Kapitel 3.1 näher erläutert. Da es sich um ein kommerzielles Produkt handelt, ist die genaue Zusammensetzung der Kautschukmischung nicht veröffentlicht. Es handelt sich bei EPDM allerdings um eine weit verbreitete und gut erforschte Kautschukklasse, sodass viele grundlegende Informationen zu Eigenschaften und Verarbeitung der Standardliteratur entnommen werden können.

EPDM wird großtechnisch beispielsweise für Dichtungsprofile, Schläuche, Schwimmbad- und Dachfolien oder Kabelummantelungen eingesetzt. Es handelt sich um eine synthetisch hergestellte Kautschukklasse, die sich nach der Vulkanisation durch gute

Umweltbeständigkeit (UV-Strahlung, Feuchtigkeit, Hitze, Kälte, Alterung) gute Reißfestigkeit und begrenzte chemische Beständigkeit (gut gegen Säuren, Laugen und Alkohole, schlecht gegen Mineralölprodukte) auszeichnet. Die Härte und Elastizität des Elastomers können in einem weiten Bereich durch das Ethylen/Propylen-Verhältnis und durch Zugabe von Additiven eingestellt werden. Die wichtigsten Additive für EPDM sind Ruße. Diese sind der Grund für die schwarze Farbe von Kautschukmischung und Elastomer und beeinflussen stark die mechanischen Eigenschaften, insbesondere Steifigkeit, Härte, Reißfestigkeit, Schwingungsdämpfung und Abriebbeständigkeit. Hinzu kommen beispielsweise Weichmacher und Alterungsschutzmittel. [11, 62]

Vernetzungsmittel für EPDM und Vulkanisation

Für die Vernetzung von EPDM stehen zwei Arten von Vernetzungsmitteln zur Verfügung: Schwefel-Beschleuniger-Systeme und Peroxide. Beide Varianten erfordern grundsätzlich Hitze, wobei der konkrete Temperaturbereich vom genauen Vernetzungsmittel abhängt. Typische Verarbeitungstemperaturen liegen bei 140 - 220 °C, wobei es auch Systeme mit niedrigeren Vernetzungstemperaturen gibt. *KRAIBON AA9CFZ* hat beispielsweise eine Mindestvernetzungs-temperatur von lediglich 110 °C. [11, 63]

Die Schwefelvernetzung ist eine der ältesten und bis heute wichtigsten Vernetzungsmethoden für viele Kautschuke, nicht nur für EPDM, und basiert auf der Schaffung von Schwefelbrücken zwischen den Molekülketten. Die Schwefelbrücken können dabei nur an Doppelbindungen in der Kautschukette andocken. Da EPDM über verhältnismäßig wenige Doppelbindungen verfügt, sind zusätzliche Beschleuniger erforderlich, um akzeptable Vulkanisationszeiten zu erreichen. Dennoch ist die Schwefelvernetzung von EPDM vergleichsweise langsam und es kann zum Ausblühen des Beschleunigersystems kommen [11]. Zudem steigt mit der Anzahl der Vernetzungsstellen die Steifigkeit des Elastomers, welche bei Schwefelvernetzung daher vergleichsweise niedrig ist [12]. Anders als die Peroxidvernetzung ist sie aber unempfindlich gegenüber Luftsauerstoff und wird daher großindustriell häufig eingesetzt. [11, 62]

KRAIBON AA9CFZ verwendet Peroxidvernetzer. Dies wird vom Hersteller nicht explizit angegeben, kann aber aus Beobachtungen bei der Verarbeitung geschlossen werden. Bei der Peroxidvernetzung handelt es sich um einen radikalischen Prozess,

der nicht an Doppelbindungen in der Kautschukette gebunden ist und daher eine engere Vernetzung als die Schwefelvulkanisation erlaubt. Die Peroxide zerfallen ab einer bestimmten, stoffabhängigen Temperatur (Scorch-Temperatur) und bilden dabei Radikale, sodass unterhalb der Scorch-Temperatur nahezu keine Vernetzung stattfindet und die Kautschukmischung bei Raumtemperatur lange lagerfähig ist. Die Zerfallsgeschwindigkeit der Peroxide ist stark temperaturabhängig, wodurch die Temperatur einen sehr großen Einfluss auf die Vulkanisationsdauer hat. Die Menge des Peroxids hat dagegen keinen Einfluss auf die Vulkanisationsdauer, nur auf die Vernetzungsdichte. Die Peroxidvernetzung führt zu mehr und stabileren Vernetzungsstellen als die Schwefelvernetzung und dadurch zu höheren Steifigkeiten und Festigkeiten des Elastomers, besonders bei erhöhten Temperaturen. Allerdings ist die Vernetzungsreaktion bei Peroxiden anfällig gegen Sauerstoff, welcher an die Radikale bindet und diese dadurch inaktiviert. Da hierdurch eine Vernetzung der Molekülketten verhindert wird, muss die Verarbeitung unter Luftabschluss erfolgen. Falls Sauerstoff Zutritt, bleibt das Material durch Untervernetzung auch nach der Vulkanisation weich und klebrig. [11, 12, 62]

Für das Aufbringen der benötigten Vulkanisationstemperatur stehen diverse Verfahren zur Verfügung. Für die sauerstofftolerante Schwefelvulkanisation sind beispielsweise verschiedene Heißluftverfahren üblich. Peroxidvernetzende Systeme werden oft unter Sauerstoffabschluss in Press- oder Spritzgussprozessen verarbeitet. Der grundsätzliche Vulkanisationsverlauf über die Zeit ist bei beiden Vernetzungssystemen aber identisch und in Abbildung 2.10 schematisch dargestellt. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Kautschukmischung zu Beginn des Prozesses Raumtemperatur hat und in eine isotherme, heiße (für die Peroxidvernetzung: oberhalb der Scorch-Temperatur) Verarbeitungsanlage eingebracht wird. Da der Vernetzungsgrad nicht in-situ gemessen werden kann, ist das Schubmodul dargestellt, dessen Verlauf in der Literatur als äquivalent zum Vernetzungsgrad angenommen wird [11]. Zu Beginn des Prozesses erwärmt sich die noch unvernetzte Kautschukmischung, wodurch das Schubmodul zunächst abnimmt. Es kommt zu einer plastischen Fließphase, in der die Formgebung erfolgt und die ersten Vernetzungen entstehen (Anvulkanisation). Diese Verarbeitungs- oder auch Fließzeit endet definitionsgemäß mit dem Erreichen von t_{10} , dem Zeitpunkt zu dem 10 % der Vernetzung erfolgt ist. Ab dann ist im Allgemeinen keine

weitere Formgebung mehr möglich. Der Vernetzungsgrad steigt weiter an (Untervulkanisation), bis zum Erreichen der Vulkanisations- oder Aushärtezeit t_{90} . Die Vulkanisation wird in der Regel bei t_{90} beendet, da die letzten Prozente Vernetzungsgrad keine große Auswirkung auf die Mechanik haben und ein versehentliches Überschreiten der Maximalzeit t_{max} vermieden werden soll (Ausvulkanisation), nach der es zu Degradationen kommt. Dabei ist zu beachten, dass es auch durch die spätere Nutzung des Elastomers bei erhöhten Temperaturen zu einer weiteren Vulkanisation, und damit ggf. zur Degradation, kommen kann.

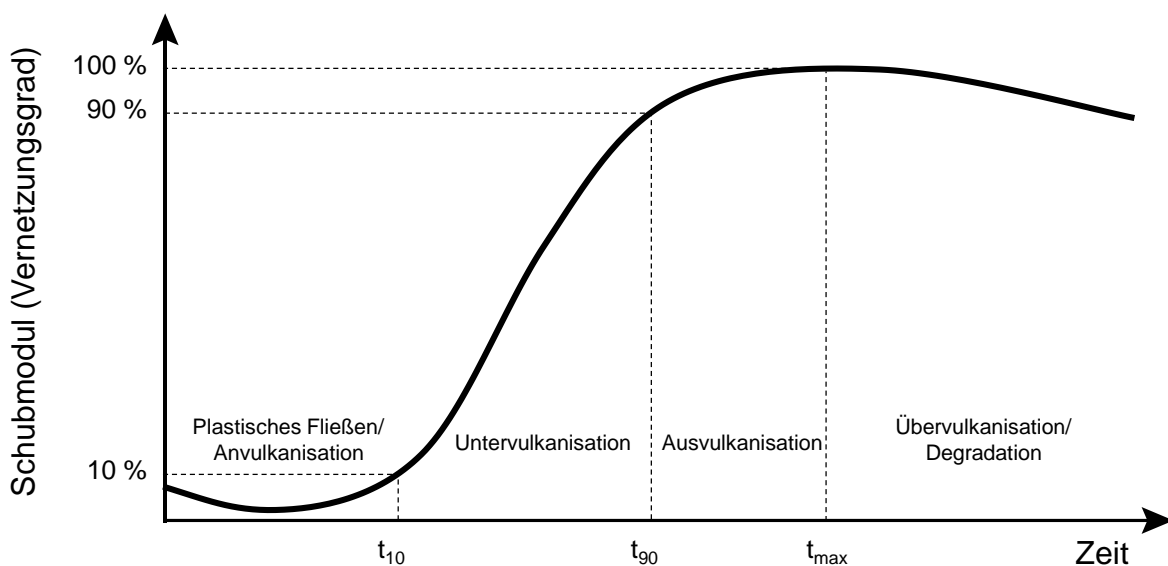


Abbildung 2.10: Schematische Darstellung des Vernetzungsgrades, ausgedrückt durch die Messung des Schubmoduls, in Abhängigkeit von der Vulkanisationszeit bei konstanter Temperatur. Abbildung angelehnt an [11] und [63]

2.3 Fluidströmung in Textilien und Messung der Permeabilität

Da bei der Flüssigimprägnierung das Harzsystem relevante Fließwege im Textil zurücklegen muss, ist eine Betrachtung der Strömungsvorgänge und des Fließwiderstandes für die Prozessauslegung wichtig.

2.3.1 Theorie der Fluidströmung in Textilien

Strömungstechnisch können Verstärkungstextilien von FKV als „poröse Medien“ beschrieben werden, vergleichbar zur Mikrostruktur von Holz, Knochen, Schwämmen oder geschäumten Werkstoffen [64]. Für die makroskopische Beschreibung von Strömungen in porösen Medien wird häufig das Gesetz von Darcy verwendet, vgl. Formel (2.2) [65–68]. Hierbei handelt es sich um eine spezielle Lösung der Navier-Stokes-Gleichung, die Henry Darcy 1856 bei der Untersuchung von Grundwasserströmungen durch poröse Bodenschichten empirisch ermittelt hat [69, 70].

$$Q = - \frac{K * \Delta p * A}{\eta * \Delta L} \quad (2.2)$$

Das Gesetz von Darcy setzt den Volumenstrom Q eines Fluids der Viskosität³ η durch eine Fläche A in Bezug zur durchströmten Länge ΔL und der Druckdifferenz zwischen Anfang und Ende Δp . Hinzu kommt der Proportionalitätsfaktor K , der die Durchlässigkeit des porösen Mediums quantifiziert und Permeabilität genannt wird. Eine höhere Permeabilität bedeutet somit, dass ein poröses Material einer Strömung bei sonst identischen Rahmenbedingungen weniger Widerstand entgegensetzt und sich demnach ein höherer Volumenstrom einstellt. Da es sich beim Gesetz von Darcy um einen Spezialfall der Navier-Stokes-Gleichung handelt, bei dem viele Parameter vernachlässigt werden, gilt sie für reale Medien nur näherungsweise und liefert nur unter bestimmten Bedingungen eine akzeptable Abschätzung [70]:

- Das strömende Fluid muss inkompressibel und newtonsch sein. Dies kann für die bei LCM Verfahren typischerweise verwendeten, niedrigviskosen, duroplastischen Harzsysteme generell angenommen werden [3].
- Kapillareffekte in den Poren werden nicht berücksichtigt, weshalb grundsätzlich nur gesättigte Strömungen betrachtet werden dürften. Willenbacher et al. [72] konnten aber zeigen, dass der Kapillareffekt bei Permeabilitätsmessungen an Verstärkungstextilien üblicherweise vernachlässigbar ist.

³ In der ursprünglichen Variante des Gesetzes von Darcy war die Viskosität nicht enthalten, da Darcy ausschließlich Wasserströmungen untersuchte [69, 71]. Wird das Gesetz jedoch auf unterschiedliche Fluide, beispielsweise verschiedene Harzsysteme, angewendet, ist die Beachtung der Viskosität wichtig. Der Effekt der Viskosität ist ansonsten mit der Permeabilität K vermischt.

- Die Strömung muss stationär und laminar („schleichende Strömung“) sein, da die Trägheitsglieder der Navier-Stokes-Gleichung vernachlässigt werden. Je nach Quelle wird dies für Reynoldszahlen kleiner 1 [67] oder kleiner 10 [73] als gültig angesehen. Michaeli et al. [74] geben für das RTM-Verfahren, das mit vergleichsweise hohen Strömungsgeschwindigkeiten einher geht, Reynoldszahlen um 0,1 an, sodass dies im Normalfall erfüllt ist.
- Kommt es zu einer geometrischen Veränderung des porösen Mediums, beispielsweise aufgrund hydrodynamischer Kompaktierung des Textils, wodurch sich der Faservolumengehalt lokal verändert, ändert sich die gemessene Permeabilität [75].

Die Permeabilität ist in Textilien nicht homogen, sondern, aufgrund der Orientierung der Fasern und der dadurch entstehenden Fließkanäle, richtungsabhängig. Aus diesem Grund ist die Permeabilität K kein Skalar, sondern ein Tensor zweiten Grades, der allerdings durch die Textilsymmetrie auf drei Skalare (K_1 , K_2 und K_3) sowie einen Orientierungswinkel (hier α , gelegentlich wird in der Literatur auch β verwendet) reduziert werden kann (vgl. Abbildung 2.11) [67, 76].

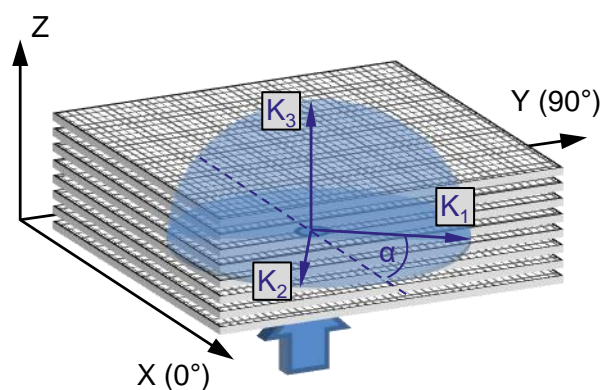


Abbildung 2.11: Darstellung eines Fließellipsoids mit den Permeabilitätsvektoren K_1 , K_2 und K_3 sowie dem Orientierungswinkel α an einem Textilstapel. Der Anguss erfolgt punktförmig in Richtung der Z-Achse im Ursprung des K -Koordinatensystems. Abbildung aus [71] (modifiziert).

K_1 beschreibt dabei die höchste Permeabilität in der Textilebene, K_2 die senkrecht dazu stehende, niedrigste Ebenenpermeabilität und K_3 die Permeabilität in Dickenrichtung. Der Orientierungswinkel α definiert den Unterschied zwischen der Produktionsrichtung des Textils (0° -Richtung) und K_1 . Die entstehende Fließfront lässt sich bei einer punktförmigen Harzinjektion daher als triaxiales Ellipsoid beschreiben, woraus sich bei Betrachtung in der Ebene eine Ellipse ergibt (vgl. Abbildung 2.11).

Die Permeabilitätswerte unterschiedlicher Textilien können über mehrere Dekaden variieren, wobei eine Vielzahl von Parametern einen Einfluss hat. Dominant ist der Effekt des FVG, da bei steigendem FVG weniger freier Raum für Fließkanäle bereitsteht. Der Zusammenhang zwischen FVG und Permeabilität kann im technisch relevanten Bereich als Exponentialfunktion beschrieben werden. Daneben haben aber auch Textilar-chitektur (Rovingdicke, Faserondulation, Nähparameter/Webart, Fehlstellen...), Pre-forming (Lagenanzahl und -orientierung, Fixierung, Scherung...) und indirekt auch Verfahrensbedingungen (Injektionsdruck, Abdichtung/Randeffekte...) einen Einfluss auf die Permeabilität, sodass optisch und mechanisch ähnliche Textilien erhebliche Unterschiede in ihrer Permeabilität aufweisen können. [67, 71, 77–80]

2.3.2 Permeabilitätsmessung an Textilien

Zur praktischen Umsetzung der Permeabilitätsmessung an Textilien existiert umfangreiche Literatur. Einen guten Überblick über die derzeit weltweit genutzten Systeme und deren Vor- und Nachteile bieten diverse Benchmark-Versuchsreihen, die in den letzten Jahren durchgeführt wurden [81–84]. Üblicherweise werden zur Bestimmung der vier Permeabilitätswerte K_1 , K_2 , K_3 und α zwei verschiedene Messsysteme benötigt:

1. Ein Messsystem für die Kennwerte der Ebene (K_1 , K_2 und α). Je nach Verfahren können diese in einem gemeinsamen Versuch bestimmt werden oder es sind mehrere Einzelmessungen mit unterschiedlicher Textilorientierung nötig.
2. Ein Messsystem für die Dickenpermeabilität K_3 .

Messsysteme, die Dicken- und Ebenenpermeabilität gemeinsam in einem einzigen Versuch bestimmen können existieren (siehe z. B. Weitzenböck et al. [85]), sind aber wenig verbreitet.

Bei der Permeabilitätsmessung ist zu beachten, dass hohe Streuungen bei der Wiederholung von Versuchen nicht ungewöhnlich sind. Selbst wenn sie mit demselben Messgerät und durch denselben Bediener durchgeführt werden. In der Benchmark zur Ebenenpermeabilitätsmessungen wurden für die einzelnen Teilnehmer beispielsweise mittlere Variationskoeffizienten von 8 % (Gelege) bzw. 12 % (Gewebe) beobachtet, obwohl beim Studiendesign besonders auf eine größtmögliche Reproduzierbarkeit Wert gelegt wurde [81]. Grund hierfür ist insbesondere der exponentielle Einfluss des Faservolumengehalts auf das Messergebnis, sodass bereits kleine Fehlstellen im Textil oder minimale Faserverschiebungen durch die Handhabung der Preforms erheblichen Einfluss haben können.

Am Leibniz-Institut für Verbundwerkstoffe (IVW) wird seit über 30 Jahren an Systemen zur Permeabilitätsmessung geforscht. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden zwei dieser Systeme genutzt. Das „2D-CapaPerm“ zur Bestimmung der Ebenenpermeabilität und die „HyKoPerm“-Messzelle für die Dickenpermeabilität.

Das 2D-CapaPerm ist in Abbildung 2.12 zu sehen und stellt die vierte Generation der Ebenenpermeabilitätsmessung am IVW dar. Es wurde zusammen mit der Firma *PMB – Präzisionsmaschinenbau Bobertag GmbH* im Rahmen eines Forschungsprojektes entwickelt. Zugrunde liegen umfangreiche Forschungsarbeiten am Institut, unter anderem von Stadtfeld [86] und Rieber [87], die auch das Messprinzip im Detail erläutern. Grundlage ist ein quadratisches RTM-Werkzeug mit einem Punktanguss in der Mitte. Die Höhe der Injektionskavität und damit der Faservolumengehalt kann durch die Nutzung verschieden dicker Rahmen eingestellt werden. Um den Anguss herum sind im Unterwerkzeug sternförmig kapazitive Liniensensoren angeordnet, mit denen die elliptische Fließfrontausbreitung in der Ebene verfolgt wird. Mit Hilfe des Algorithmus von Adams und Rebenfeld [88] kann dann K_1 , K_2 und α berechnet werden. Da sich bei einem Harzsystem als Messfluid durch die Vernetzungsreaktion die Viskosität im Laufe der Messung ändern würde, wird als Ersatzfluid Rapsöl verwendet, das bei 24 °C eine Viskosität von ca. 60 mPa*s aufweist. Damit liegt die Viskosität in einer ähnlichen Größenordnung wie bei gängigen Harzsystemen bei Verarbeitungstemperatur zu Beginn

der Injektion. Rapsöl wurde gewählt, da es ungiftig, gut zu detektieren, günstig und das Messsystem gut vom Öl zu reinigen ist.

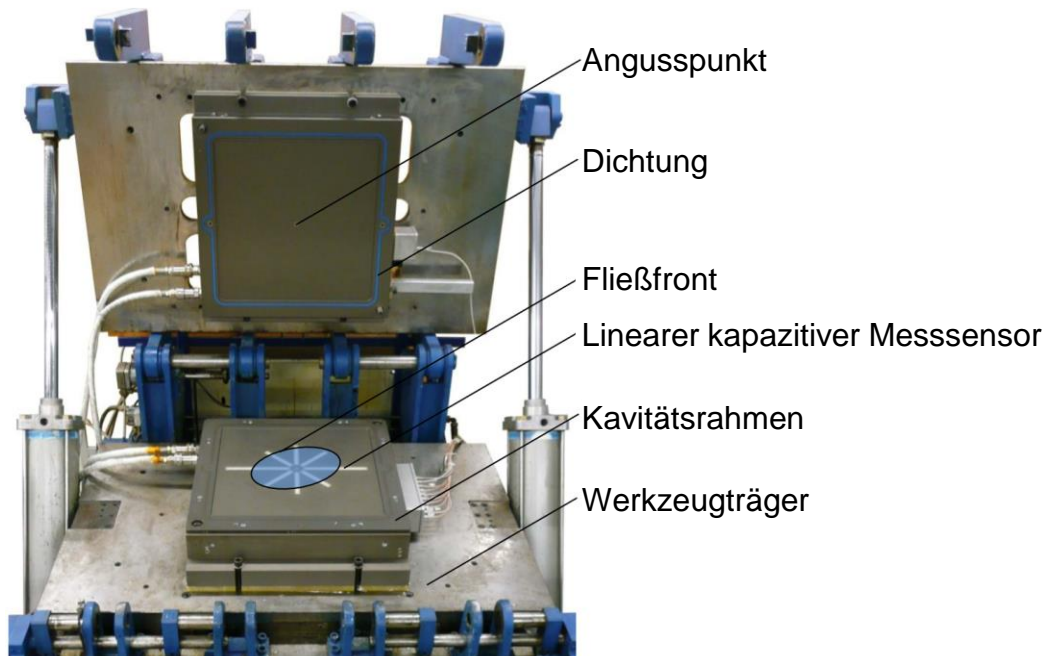


Abbildung 2.12: Das am Institut verfügbare System für die Ebenenpermeabilitätsmessungen („2D-CapaPerm“) [89]

Die HyKoPerm Messzelle wurde von Becker entwickelt [79] und durch Mitarbeiter des IVW in zahlreichen Studien verwendet [65, 75, 77, 78, 82]. Sie ist in Abbildung 2.13 zu sehen. Die Messzelle besteht aus einem Aluminiumgehäuse mit einer elliptischen Kavität (Achsenlängen der einzulegenden Preform: 196 mm x 156 mm), deren Höhe, und damit der FVG der Preform, durch Passscheiben an den Gewindestangen eingestellt werden kann. Die Ober- und Unterseite der Kavität bilden Lochscheiben, die dazu dienen, eine gleichmäßige Verteilung des Messfluides (das gleiche Rapsöl wie beim 2D-CapaPerm) in der Ebene sicherzustellen, sodass die Preform ausschließlich in Dickenrichtung durchströmt wird. Ober- und unterhalb der Lochscheiben befinden sich Kammern zur Beruhigung der Strömung, in denen auch der Druck des Fluids gemessen wird. Vor dem Einlass der Messzelle ist ein Volumenstromsensor angebracht. Auf diese Weise sind alle Parameter des Gesetzes von Darcy (vgl. Formel (2.2)) entweder durch die Messzelle festgelegt oder werden aktiv gemessen, sodass die Dickenpermeabilität berechnet werden kann.

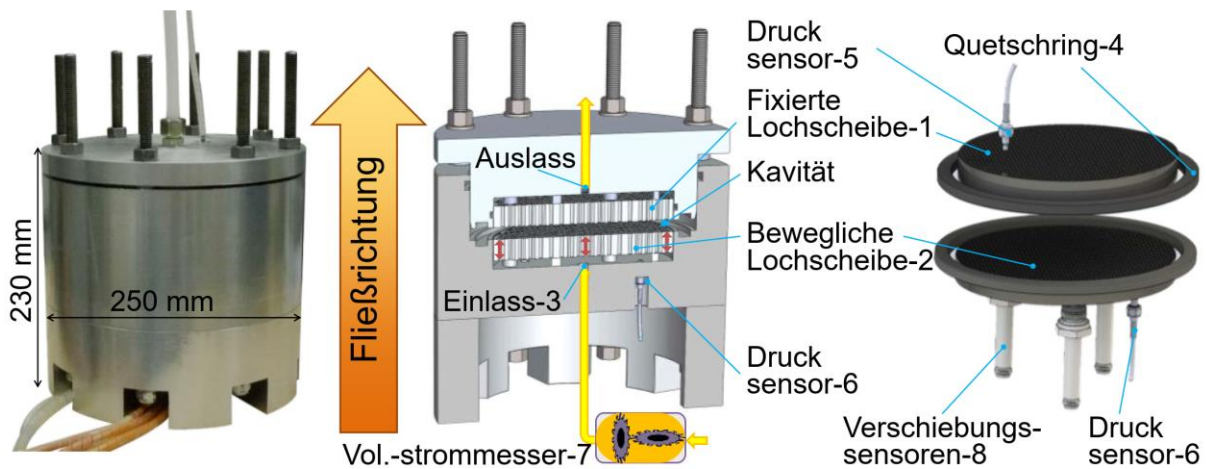


Abbildung 2.13: HyKoPerm Messzelle. Links Außenansicht, in der Mitte als CAD-Halbschnitt mit Funktionsschema, rechts als CAD Darstellung ohne Gehäuse [79].

Eine besondere Herausforderung bei der Messung der Dickenpermeabilität ergibt sich durch die hydrodynamische Kompaktierung des Textils. Durch den Druckverlust, der sich über die Preform einstellt, kommt es zu einer nichtlinearen Veränderung des Faservolumengehalts, wie Becker et al. [65, 77–79] und Willenbacher et al. [75] ausführlich beschreiben. Aus diesem Grund erfolgen Messungen mit der HyKoPerm nicht bei konstantem Injektionsdruck oder konstantem Volumenstrom, sondern der Injektionsdruck wird stufenweise erhöht und der sich einstellende Druckverlust der jeweils gemessenen Dickenpermeabilität und dem ebenfalls messtechnisch erfassten realen FVG gegenübergestellt. Durch die hydrodynamische Kompaktierung sinkt die Dickenpermeabilität grundsätzlich mit steigendem Druckverlust.

2.4 Perforation

Eine Möglichkeit, die vollständige Imprägnierung einer Preform mit eingelegter Elastomerschicht zu ermöglichen, ist die Perforation des Elastomers.

2.4.1 Grundlagen

Unter „perforieren“ versteht man grundsätzlich das Durchlöchern eines Materials mit mehreren gleichartigen Öffnungen in einem festgelegten Muster [90]. Bekannte Anwendungsfälle sind beispielsweise linienförmige Muster als Abreißhilfe bei Briefmarken oder flächige Muster, die ein Durchströmen des Materials erlauben, zum Beispiel zu Belüftungszwecken. Prinzipiell können die einzelnen Öffnungen einer Perforation in beliebiger Form hergestellt und angeordnet werden. Im Weiteren soll aber nur auf die weitverbreiteten, kreisförmigen Perforationen eingegangen und eine gleichmäßige flächige Verteilung betrachtet werden.

Sollen die Lochabstände einer flächigen Perforation regelmäßig sein, muss sich das Perforationsmuster mit Hilfe einer einzelnen Einheitszelle in Form eines gleichseitigen Polygons ausdrücken lassen, aus dem das Muster durch Wiederholung, Verschiebung und ggf. Drehung entsteht. Als Grundform der Einheitszelle kommen dabei nur regelmäßige Dreiecke, Vierecke oder Sechsecke in Frage (vgl. Abbildung 2.14), da nur mit diesen Polygonen eine lücken- und überlappungsfreie Füllung der Ebene möglich ist („platonische Parkettierung“) [91]. Die Perforationsöffnungen werden dann auf den Eckpunkten der Polygone platziert. Die Parkettierung mit Sechsecken kann dabei als Variante der Parkettierung mit Dreiecken aufgefasst werden, wobei die jeweils mittleren Löcher entfallen.

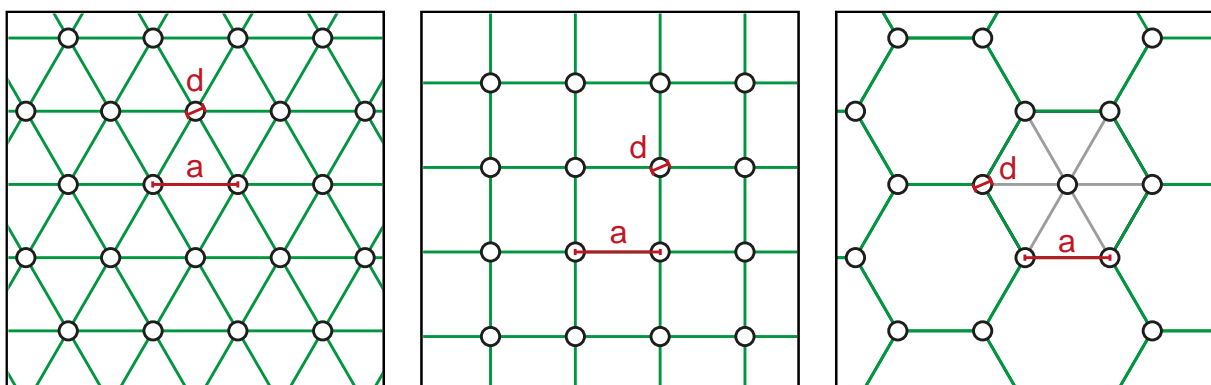


Abbildung 2.14: Perforationsmuster basierend auf den drei platonischen Parkettierungen der Ebene mit gleicher Seitenlänge a und Lochdurchmesser d . Beim Sechseckmuster ist zudem beispielhaft der Zusammenhang zum Dreiecksmuster dargestellt.

Wird eine Fläche perforiert, so ist ein wichtiger Parameter der Bedeckungsgrad BG , der sich aus dem Verhältnis der nach der Perforation verbleibenden Restfläche des Grundmaterials A_{rest} zur Gesamtfläche A_{gesamt} ergibt. Alternativ kann auch die Lochfläche A_{loch} genutzt werden:

$$BG = \frac{A_{rest}}{A_{gesamt}} = 1 - \frac{A_{loch}}{A_{gesamt}} \quad (2.3)$$

In Abhängigkeit von der verwendeten Parkettierung kann mit der Seitenlänge des Einheitszellenpolygons a und dem Lochdurchmesser d der Bedeckungsgrad direkt formuliert werden:

$$BG_{Dreieck} = 1 - \frac{\frac{1}{8} * \pi * d^2}{\frac{\sqrt{3}}{4} * a^2} \quad (2.4)$$

$$BG_{Quadrat} = 1 - \frac{\frac{1}{4} * \pi * d^2}{a^2} \quad (2.5)$$

$$BG_{Sechseck} = 1 - \frac{\frac{1}{2} * \pi * d^2}{\frac{3*\sqrt{3}}{2} * a^2} \quad (2.6)$$

Der technisch minimal mögliche Bedeckungsgrad lässt sich aus den Formeln (2.4) ff. herleiten. Es handelt sich dabei um den Grenzfall, dass der Lochdurchmesser d genauso groß wird wie der Lochabstand a . Ab diesem Punkt handelt es sich nicht mehr um eine durchgehende Fläche mit Löchern, sondern die Löcher gehen tangential ineinander über, sodass die Fläche in einzelne Stücke zerfällt. Dadurch ergibt sich, in Abhängigkeit von der Lochanordnung, folgender minimaler Bedeckungsgrad BG :

$$BG_{Dreieck_{min}} = 1 - \frac{\pi * \sqrt{3}}{6} \approx 9 \% \quad (2.7)$$

$$BG_{Quadrat_{min}} = 1 - \frac{\pi}{4} \approx 21 \% \quad (2.8)$$

$$BG_{Sechseck_{min}} = 1 - \frac{\pi * \sqrt{3}}{9} \approx 40 \% \quad (2.9)$$

2.4.2 Durchströmung perforierter Flächen

In der Literatur sind einige Untersuchungen zur Durchströmung von perforierten Flächen zu finden. Diese Erkenntnisse sind allerdings, aufgrund der anderen Randbedingungen und Forschungsziele, kaum auf die Integration einer perforierten Schicht in einem Textilstapel und den Harzimprägnierprozess übertragbar und widersprechen sich zum Teil auch untereinander. In der Regel wird in der Literatur der Druckverlust untersucht, der sich durch das Einbringen einer perforierten Platte in eine Rohrströmung einstellt. Eine Anwendung, die vor allem in der Lüftungstechnik und der chemischen Industrie relevant ist. Hierbei ist das Ziel häufig die Vermischung und Homogenisierung eines Fluids. Dementsprechend werden überwiegend turbulente Strömungen betrachtet, was zu einer Interaktion von Wirbelsystemen hinter der perforierten Fläche führt und nicht mit den laminaren Strömungen bei der Harzinfusion vergleichbar ist. [40, 92–97] Beispielhaft sollen hier dennoch einige Publikationen vorgestellt werden, da sie eine Grundlage für die spätere Versuchsplanung bilden:

Gan et al. [92] untersuchten den Druckverlust in einem quadratischen Luftkanal, in den eine perforierte Platte eingebracht wurde und verglichen das Ergebnis mit einer Platte mit einem einzelnen, großen Loch. Der Bedeckungsgrad betrug jeweils 50 %. Untersucht wurden turbulente Strömungen mit Reynoldszahlen zwischen $1,6 \cdot 10^5$ und $3,7 \cdot 10^5$. Gan et al. stellten fest, dass der Druckverlust, und damit der Strömungswiderstand, bei der perforierten Platte um etwa 11 % höher war als bei der Platte mit einem Einzelloch. Der Druckverlust am Einzelloch konnte weiter minimiert werden, wenn statt einer dünnen Platte ein dicker Einbau verwendet wurde, dessen Dicke das 1,5-fache des Lochdurchmessers beträgt. Dies steht im Widerspruch zu Idelchik et al. [97], laut denen der Druckverlust in diesem Reynoldszahlbereich ausschließlich vom Bedeckungsgrad abhängen sollte, unabhängig von Lochdurchmesser, Anordnung der Löcher und der Plattendicke.

Malavasi et al. [96] untersuchten die Durchströmung perforierter Platten in einem Wasserrohr mit kreisförmigem Querschnitt. Variiert wurde der Bedeckungsgrad, das Verhältnis zwischen Lochdurchmesser und Plattendicke sowie die Lochanzahl, wodurch sich als abhängige Größe auch der Lochdurchmesser verändert. Da die perforierten Platten wie die Rohrleitung kreisförmig waren, wurden nicht die oben beschriebenen Perforationsmuster für Flächen eingesetzt, sondern verschiedene radiale Muster. Die

Reynoldszahlen lagen im turbulenten Bereich von $1 \cdot 10^4$ bis $6 \cdot 10^5$. Den größten Einfluss auf den Druckverlust hatte wie bei Gan et al. der Bedeckungsgrad. Allerdings führte eine größere Anzahl von Löchern bei gleichem Bedeckungsgrad, und damit ein geringerer Durchmesser der einzelnen Löcher, bei Malavasi et al. zu einem geringeren Druckverlust, was im Widerspruch sowohl zu Gan et al. als auch zu Idelchik et al. steht. Im Einklang mit Gan et al. steht allerdings die Beobachtung, dass dickere perforierte Platten einen geringeren Druckverlust zur Folge haben als dünne Platten. Malavasi et al. weisen in ihrer Arbeit auf diese Unterschiede zur Vorgängerliteratur hin und führen sie auf die Nutzung unterschiedlicher Fluide (kompressible Luft vs. inkompressibles Wasser) und die komplexe Interaktion der turbulenten Einzelströmungen hinter der perforierten Platte zurück.

Oei et al. [40] untersuchten simulativ und experimentell die Durchströmung von FKV-Sandwichplatten mit Faltkernen und perforierten Deckschichten mit Luft zur Gebäudeklimatisierung. Der Schwerpunkt dieser Untersuchung lag dabei allerdings auf dem Wärmeübergang und nicht auf der Perforation. Es wurde nur ein einziges Perforationsmuster (quadratische Anordnung, $d = 4 \text{ mm}$, $BG \approx 97 \%$) verwendet. Die Formeln zur Berechnung der Strömung durch die Perforation basieren auf den Angaben für Strömungen durch einzelne Öffnungen bei Sigloch [98] und gehen von einer inkompressiblen Strömung vernachlässigbarer Trägheit aus. Der Lochdurchmesser wird in diesen Formeln nicht berücksichtigt, nur die Lochfläche. Eine mögliche Interaktion zwischen den Löchern wird nicht betrachtet.

Halimi et al. [99] untersuchten die Herstellung von FKV-Sandwichplatten mit Schaumkern mittels VARI Verfahren. Üblicherweise muss hierbei sowohl ober- als auch unterhalb der Preform Verteilmedium eingesetzt werden, um eine vollständige Tränkung des Textils zu erreichen, da der Schaum undurchlässig für das Harzsystem ist. Halimi et al. perforierten den Schaum stattdessen und verwendeten nur an der Oberseite Verteilmedium (vgl. Abbildung 2.15). Untersucht wurden sechs verschiedene Perforationsmuster (vgl. Abbildung 2.16) mit sehr hohen Bedeckungsgraden zwischen 97,68 % und 99,81 % und ihr Einfluss auf die Imprägnierdauer, die mechanischen Eigenschaften und das Auftreten trockener Stellen im FKV. Die hohen Bedeckungsgrade wurden gewählt, um das Zusatzgewicht der Struktur durch die entstehenden Matrixbrücken zwischen Ober- und Unterseite möglichst gering zu halten.



Abbildung 2.15: Versuchsaufbau von Halimi et al. zur Herstellung von FKV-Sandwichplatten mit perforiertem Schaumkern mittels VARI [99]

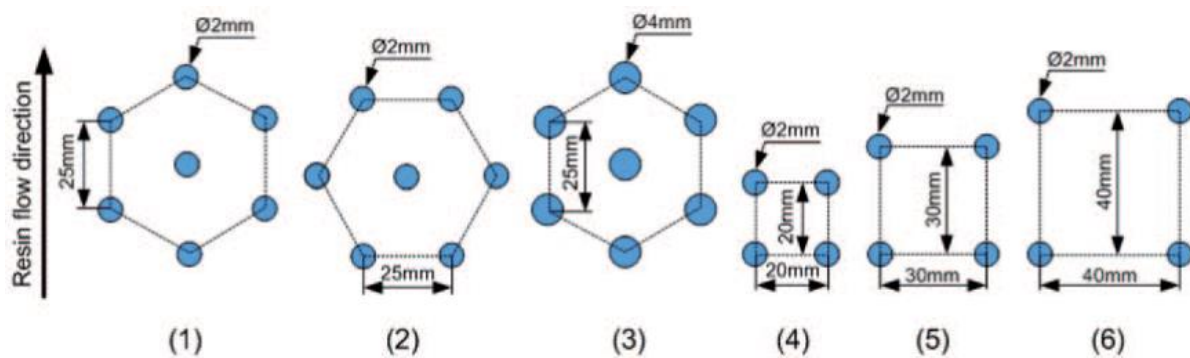


Abbildung 2.16: Die sechs von Halimi et al. untersuchten Perforationsmuster [99]

Es wird nicht erklärt, warum genau diese sechs Perforationsmuster für die Versuche gewählt wurden. Bei den Mustern handelt es sich um Muster auf Dreiecks- und Vierecks-Basis, wobei die Dreiecksmuster fälschlicherweise als Sechseckmuster bezeichnet werden. Lediglich bei Muster 3 wurde ein von den restlichen Versuchen abweichender Lochdurchmesser gewählt, allerdings ohne den Bedeckungsgrad an eines der anderen Muster anzupassen, sodass es nicht möglich ist zu beurteilen, ob die Veränderung des Lochdurchmessers einen signifikanten Einfluss auf das Ergebnis hat. Bei den Mustern auf Dreiecks-Basis wurde zudem untersucht, welchen Einfluss eine Drehung des Musters um 90° in Bezug auf die Hauptfließrichtung des Harzsystems hat (vgl. Abbildung 2.16, 1 und 2). Die Anordnung der Einheitszellen der dreieckigen Muster zum Erstellen der Gesamtperforation ist dabei allerdings ungewöhnlich (vgl.

Abbildung 2.17). Statt eine platonische Parkettierung wie in Abbildung 2.14 zu verwenden, wurde das Muster nur um ganze Vielfache seiner horizontalen und vertikalen Ausdehnung verschoben, sodass ein sekundäres Rautenmuster entsteht.

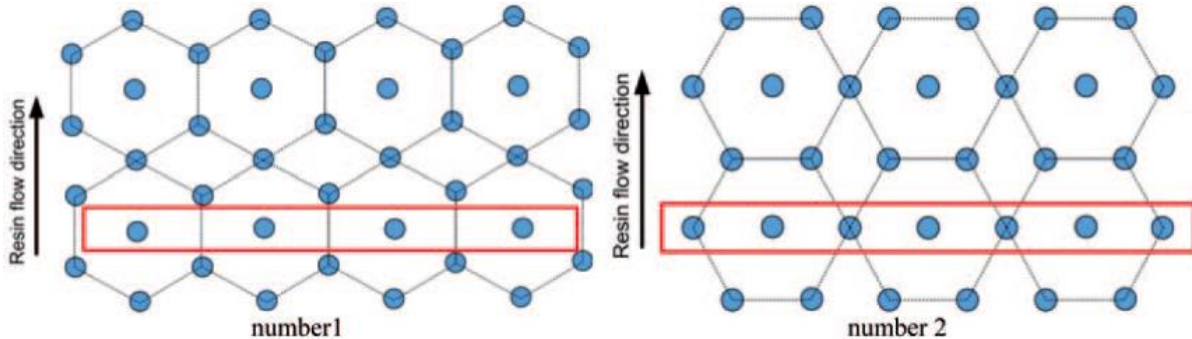


Abbildung 2.17: Anordnung der Muster 1 und 2 aus [99] in Relation zur Fließrichtung des Harzsystems.

Durch die Verwendung einer Glasplatte als Unterwerkzeug konnte gezeigt werden, dass jedes Perforationsloch wie ein eigener Punktanguss für die unteren Textillagen wirkt, was zu einer sehr komplexen Fließfront mit mehrfachen Interaktionen führt. Bei Perforationsmuster 6 (vgl. Abbildung 2.16) kam es zu trockenen Stellen in den Bereichen, die am weitesten von den Löchern entfernt lagen. Mit allen anderen Mustern konnte eine vollständige Imprägnierung erreicht werden. Dabei zeigte sich, dass ein geringerer Bedeckungsgrad zu einer schnelleren Imprägnierung führt. Zudem war die Infusion bei Muster 2 um ca. 10 % schneller als bei Muster 1, obwohl diese sich nur in ihrer Orientierung zur Fließrichtung des Harzsystems unterschieden (vgl. Abbildung 2.17). Halimi et al. führen dies darauf zurück, dass mehr Löcher gleichzeitig von der Fließfront erreicht werden (vgl. rote Kästen in Abbildung 2.17), ohne dies jedoch weiter zu untersuchen oder zu erläutern.

Durch den Autor dieser Arbeit, sowie Projektpartner, wurden im Forschungsprojekt „HyRoS“ unter anderem Untersuchungen zur Integration von perforierten Heizfolien in FKV angestellt [58, 100, 101]. Im Hinblick auf die Durchströmung der Heizfolien wurden Bedeckungsgrade von 75 % und 95 %, Lochdurchmesser von 4,0 mm und 2,5 mm und sowohl eine Dreiecks- als auch eine Vierecksanordnung der Perforation in allen Kombinationsmöglichkeiten untersucht (vollfaktorieller Versuchsplan). Hierbei zeigte sich, dass der Bedeckungsgrad der dominierende Faktor ist. Es ergaben sich auch

Hinweise darauf, dass ein kleinerer Lochdurchmesser bei gegebenen Bedeckungsgrad, und dementsprechend eine größere Lochanzahl, die Durchströmbarkeit verbessert. Dies konnte allerdings nicht zweifelsfrei nachgewiesen werden.

Einen Ansatzpunkt zur theoretischen Betrachtung, ob der Lochdurchmesser einen Einfluss haben könnte, liefert das Gesetz von Hagen-Poiseuille. Hierbei handelt es sich um eine Vereinfachung der Navier-Stokes-Gleichungen für laminare, reibungsbehafete Rohrströmungen inkompressibler Fluide, wobei die Löcher der Perforation in diesem Fall als Rohre betrachtet würden:

$$Q = \frac{\pi * r^4 * \Delta p}{\eta * L} \quad (2.10)$$

Der Volumenstrom Q durch ein Rohr hängt demnach von der Druckdifferenz zwischen Ein- und Auslass Δp , der Rohrlänge L , der Viskosität des Fluids η und der vierten Potenz des Rohrradius r ab. Dadurch sinkt, unter Annahme eines konstanten Bedeckungsgrads, der Volumenstrom mit sinkendem Radius der Löcher. Die genaue Herleitung hierfür kann dem Anhang (Kapitel 8.1) entnommen werden. Das Gesetz von Hagen-Poiseuille gilt jedoch nur, wenn eine voll ausgeprägte Rohrströmung vorliegt und Ein- und Auslass vernachlässigt werden können. Dies bedeutet insbesondere, dass die Rohrlänge deutlich größer als der Radius sein muss. Da diese Forderung bei den vergleichsweise dünnen, interlaminaeren Elastomerschichten der vorliegenden Arbeit nicht erfüllt ist, kann das Gesetz von Hagen-Poiseuille hierbei nicht als gültig angenommen werden.

3 Konzeptentwicklung und Materialauswahl

Wie im Stand der Technik dargelegt wurde, bieten Faser-Kunststoff-Verbunde ein großes Potential für Leichtbau durch Funktionsintegration/Multifunktionalität. Dies wird derzeit allerdings überwiegend nur bei der Verwendung von Prepregmaterial und einer Verarbeitung mittels Autoklavs ausgenutzt. Für die industriell wichtigen LCM-Verfahren gibt es bisher wenige Ansätze. Besonders attraktiv ist die Nutzung interlaminarer Zwischenschichten. In dieser Arbeit wird der Fokus auf interlaminare Elastomerschichten gelegt, da diese, wie im Stand der Technik gezeigt wurde, eine Vielzahl von Anwendungsmöglichkeiten bieten. Einige der im Folgenden angestellten Überlegungen sind allerdings auch auf andere Arten interlaminarer Schichten übertragbar, da sie nicht ausschließlich mit den Werkstoffeigenschaften des Elastomers zu tun haben.

Im Wesentlichen gibt es bei der Integration interlaminarer Elastomerschichten zwei Herausforderungen:

- Es soll ein qualitativ hochwertiges Gesamtmaterial erreicht werden. Das bedeutet insbesondere, dass sowohl FKV als auch Elastomer vergleichbare mechanische Eigenschaften aufweisen wie bei einer Einzelverarbeitung. Hinzu kommt, dass die Verbindungsfestigkeit zwischen Elastomer und FKV kein limitierender Faktor sein soll.
- Bei Flüssigimprägnierverfahren wie dem klassischen RTM, bei denen das Harzsystem ausschließlich oder überwiegend in der Textilebene fließt, ist die erreichbare Bauteilgröße beschränkt. Sollen größere Bauteile gefertigt werden müssen Verfahren genutzt werden, bei denen eine Imprägnierung der Preform in Dickenrichtung erfolgt, wie VARI oder CRTM. Diese können allerdings nicht ohne weiteres angewendet werden, da die Elastomerschicht im Normalfall undurchlässig für das Harzsystem ist.

Mit welchen Konzepten diesen zwei Herausforderungen begegnet werden kann, soll im Folgenden dargestellt werden. Die Material- und Prozessauswahl ist dabei, wie bei

FKV üblich, eng miteinander verzahnt. Die vorliegende Arbeit konzentriert sich darauf, welchen Einfluss die Integration interlaminarer Elastomerschichten auf die Prozessführung bei LCM-Verfahren hat. Es erfolgt keine Eigenentwicklung von Materialien oder die Optimierung des Lagenaufbaus auf eine konkrete Anwendung. Stattdessen wird auf kommerziell erhältliche Materialien sowie einen generischen Lagenaufbau zurückgegriffen.

In diesem Kapitel werden zunächst die grundlegenden Überlegungen und die darauf basierenden Entscheidungen zur Vorgehensweise erläutert. Eine detaillierte Beschreibung der durchgeführten Versuche, Prüfungen und Simulationen erfolgt dann in den Kapiteln 4 und 5.

3.1 Auswahl des Elastomersystems und Anordnung im Lagenaufbau

Als Elastomer kommt *KRAIBON* der *Gummiwerk Kraiburg GmbH & Co. KG* zum Einsatz. Wie im Stand der Technik beschrieben wurde, konnte kein anderes kommerziell erhältliches Elastomer gefunden werden, dass für den interlaminaren Einsatz in FKV geeignet ist.

Bei *KRAIBON* handelt es sich um eine Produktfamilie verschiedener Kautschukmischungen, die entwickelt wurden, um als Zwischenlagen in Epoxidharz-basierten FKV zu dienen. Alle *KRAIBON* Varianten sind für die Verarbeitung mit Prepregs im Autoklavprozess vorgesehen. Die unterschiedlichen *KRAIBON* Varianten sind laut Hersteller auf verschiedene Anwendungen optimiert, beispielsweise auf akustische Dämpfung (*SUT9609/24*), Feuerbeständigkeit (*HHZ9578/64*) oder zum Ausgleich thermischer Dehnungen beim Fügen von FKV und Metall (*SAA9579/52*). Die Kautschukmischung *AA9CFZ* ist besonders für den Impactschutz vorgesehen und wurde für die vorliegende Arbeit ausgewählt, da in Zukunft weitere Forschung in diese Richtung geplant ist. [102]

AA9CFZ ist eine Kautschukmischung auf EPDM-Basis und aufgrund der als Additiv eingesetzten Ruße tiefschwarz. *AA9CFZ* wird als Rollenware in unvulkanisierter Form mit einer Nenndicke von 0,5 mm geliefert. Die tatsächlich gemessene Dicke schwankte zwischen 0,5 und 0,6 mm. Die Vulkanisationszeit t_{90} ist stark temperaturabhängig (vgl.

Tabelle 3.1). Längere Verarbeitungszeiten sind laut Datenblatt bis ungefähr zum fünf-fachen von t_{90} unkritisch. Zusätzlich erfordert die Vulkanisation einen ebenfalls temperaturabhängigen externen Druck, um Porenbildung im Elastomer zu vermeiden.

Tabelle 3.1: Vulkanisationsbedingungen für KRAIBON AA9CFZ gemäß Datenblatt [63]

Temperatur in °C	Minimaler Absolutdruck in bar	Aushärtezeit t_{90} in min
110	1,4	240
120	2,0	64
130	2,7	20
140	3,6	7,3
150	4,8	3,8

Es wird eine einzelne Schicht der Kautschukmischung bzw. des Elastomers in der Mitte des Lagenaufbaus platziert. Eine Platzierung an der Oberfläche des Lagenaufbaus würde zwar die Herstellung großer Bauteile vereinfachen, da LCM-Prozesse mit Harzfluss in Dickenrichtung ohne Modifikation genutzt werden könnten, ist aber für einige Anwendungsfälle unvorteilhaft (z. B. Schutz gegen Impactschäden [50, 51]) oder sogar untauglich (Reduktion der Biegesteifigkeit [53]). Zudem wird das Elastomer durch die Platzierung im Innern des Lagenaufbaus vor Beschädigungen durch mechanische oder chemische Umwelteinflüsse geschützt. Die Verwendung mehrerer Elastomerschichten, direkt aneinander angrenzend oder durch Textillagen voneinander getrennt, ist grundsätzlich denkbar. Dies wurde allerdings in der vorliegenden Arbeit nicht untersucht, da sich hierdurch die Komplexität deutlich erhöht hätte und zunächst grundlegende Erkenntnisse zur Verarbeitung gewonnen werden sollten.

3.2 Prüfung der Materialeigenschaften

Im Hinblick auf die Qualität von FKV mit interlaminarer Elastomerschicht können folgende Forderungen gestellt werden:

- Es sollen keine Delaminationen, Poren, Ablösungen, Textilstellen ohne Harz oder ähnliche Verarbeitungsartefakte auftreten, da diese das Material schwächen.
- Bei der mechanischen Prüfung soll es zu keinem schlagartigen Versagen in der FKV-Elastomergrenzfläche kommen. Stattdessen ist ein Spannungsplateau mit langsamem Versagensfortschritt nach dem Versagensbeginn wünschenswert, da dies eine höhere Gesamtenergieabsorption und damit eine bessere Materialausnutzung bedeutet.
- Kritischer Faktor ist die Verbindungsfestigkeit zwischen Elastomer und dem umgebenden FKV. Bei der Prüfung der Verbindungsfestigkeit sollte die Spannung, bei der es zum Beginn des Versagens kommt, daher möglichst hoch sein.
- Das Versagen soll nicht adhäsiv zwischen Elastomer und FKV erfolgen, sondern kohäsiv im Elastomer. Ein adhäsives Versagen bedeutet, dass die Verbindungsfestigkeit der limitierende Faktor ist und dass das Potenzial der Materialien nicht voll ausgenutzt wird. Ein kohäsives Versagen im FKV ist nicht zu erwarten, da die Datenblattwerte für die Zugfestigkeit der verwendeten Harzsysteme eine Zehnerpotenz über den Werten des verwendeten Elastomers liegen (70 – 90 MPa gegenüber 7,9 MPa).

Zur Bewertung werden im Wesentlichen vier verschiedene Verfahren genutzt:

- Optische Begutachtung der Probepplatten nach der Fertigung
- Entnahme von Querschnittsschliffproben und mikroskopische Untersuchung
- Zerstörende Prüfung der Verbindungsfestigkeit von FKV und Elastomer mit Analyse der Kraft/Weg Kurve
- Beobachtung der Bruchfläche nach der Prüfung mittels Mikroskops

Ziel der Untersuchungen war es, den Einfluss der Verarbeitungsbedingungen auf die Bauteilqualität und die Verbindungsfestigkeit zwischen Elastomer und FKV qualitativ und quantitativ zu beschreiben.

3.3 Prepreg und Autoklavprozess als Referenz

Um eine Vergleichsbasis zu haben, ist die Herstellung von Probekörpern im etablierten Prepreg/Autoklavprozess als Referenz vorgesehen, wie es vom Elastomerhersteller empfohlen wird. Hierbei wird die gelieferte Kautschukmischung unvulkanisiert in den Lagenaufbau integriert und Harzaushärtung und die Vulkanisation finden zeitgleich statt, was als Co-Curing bezeichnet wird. Es wurde bei der Materialauswahl darauf geachtet, dass die Verarbeitungsbedingungen des Prepregs ungefähr den Vulkanisationsbedingungen der Kautschukmischung entsprechen, da in diesem Fall eine besonders gute Verbindungsfestigkeit zwischen FKV und Elastomer erwartet wird [54].

3.4 Entwicklung der Verarbeitungskonzepte

Die Verarbeitungsversuche dienen dazu zu untersuchen, welche Schwierigkeiten sich durch die Änderung des Verarbeitungsverfahrens von FKV mit interlaminaren Elastomerschichten vom Prepreg/Autoklavsystem zur LCM-Verarbeitung ergeben und wie diesen begegnet werden kann

Für die Verarbeitungsversuche wird das RTM-Verfahren als Basis gewählt. Das RTM-Verfahren bietet sich an, da aufgrund des massereichen, geschlossenen Metallwerkzeugs eine gleichmäßige Temperierung sowie ein Druckaufbau in der Preform erreicht werden kann. Zudem ist die Nutzung von Vakuum oder Schutzgas im Prozess möglich und das RTM-Verfahren ist auch in der industriellen Praxis relevant. Dass beim RTM-Verfahren durch den Harzfluss in der Textilebene nur Bauteile begrenzter Größe hergestellt werden können, ist für die durchgeführten Laborversuche keine bedeutende Einschränkung. Bei der Auswertung der Versuche soll aber auch theoretisch darauf eingegangen werden, welche Bedeutung die Beobachtungen für andere LCM-Varianten haben.

Bei der Verarbeitung im RTM-Prozess sind mehrere Varianten möglich, die sich insbesondere im zeitlichen Ablauf von Temperatur und Druck im Werkzeug unterscheiden und dadurch Einfluss auf die Reihenfolge von Harzaushärtung und Vulkanisation haben. Abbildung 3.1 zeigt eine Übersicht der untersuchten Prozessvarianten, die im Folgenden genauer vorgestellt werden.

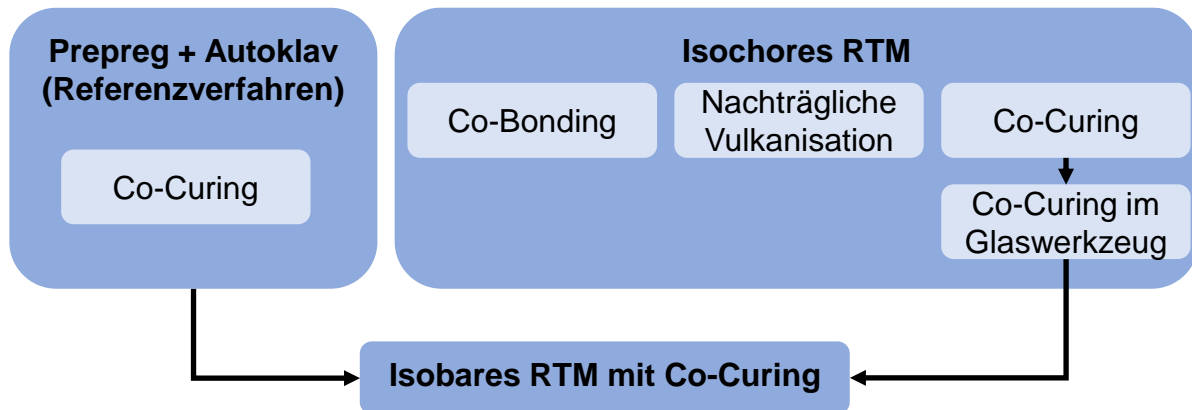


Abbildung 3.1: Überblick der untersuchten Prozessvarianten

Co-Bonding

Die Kautschukmischung wird in einem separaten Heißpressprozess, vor dem Einlegen in die Preform, vulkanisiert. Dieser Heißpressprozess kann optimal an die Vulkanisationseigenschaften angepasst werden. Beispielsweise ist die Nutzung hoher Temperaturen möglich, um eine schnelle Vulkanisation zu erreichen und der benötigte Druck kann problemlos aufgebracht werden (vgl. Tabelle 3.1). Das fertig vulkanisierte Elastomer wird dann in die Preform mit eingebracht und die Prozessführung bei der Harzinjektion kann an die Verarbeitungseigenschaften des Harzsystem angepasst werden. Durch die Harzaushärtung verklebt das Elastomer mit dem umgebenden FKV, was als „Co-Bonding“ bezeichnet wird.

Da hierbei Vulkanisation und Harzaushärtung komplett getrennt sind, ist das Verfahren einfach durchzuführen und potenziell besonders wirtschaftlich.

Nachträgliche Vulkanisation

Wird die unvulkanisierte Kautschukmischung in die Preform mit eingelegt, kann dadurch, dass Harze für LCM-Verfahren überwiegend geringere Verarbeitungstemperaturen bzw. kürzere Verarbeitungszeiten als die Vulkanisation haben, auch eine sequentielle Vernetzung realisiert werden. Nach der Harzinjektion erfolgt zunächst eine Aushärtung des Harzsystems bei niedriger Temperatur. Erst nach der Vernetzung der Matrix wird die Temperatur erhöht, um die Vulkanisation zu starten. Dies kann zugleich der Nachhärtung der Matrix dienen, die bei vielen Harzsystemen erforderlich ist. Hierdurch kann auf eine separate Vulkanisation verzichtet und Harzinjektion und Vulkanisation im selben Prozess durchgeführt werden. Dies ist von der Prozessführung ähnlich einfach wie das Co-Bonding und benötigt keine Heißpresse, belegt allerdings das Injektionswerkzeug länger und limitiert dadurch die Zykluszeit.

Co-Curing

Eine besonders gute Verbindungsfestigkeit zwischen Elastomer und Epoxidharz sollte erreicht werden, wenn Vulkanisation und Aushärtung des Harzes gleichzeitig erfolgen (Co-Curing), sodass eine chemische Vernetzung möglich ist [54]. Die besten Ergebnisse sind zu erwarten, wenn die empfohlene Vulkanisationszeit und -temperatur mit den Aushärtebedingungen des Epoxidharzes weitgehend übereinstimmt, wie dies bei den Prepregs der Fall ist. Harzsysteme mit einer derartigen Aushärtecharakteristik (vgl. Tabelle 3.1) sind für LCM-Verfahren allerdings unüblich. Es werden typischerweise zwei Arten von Harzsystemen für LCM-Verfahren eingesetzt:

- Harzsysteme, die bei Raumtemperatur oder moderat erhöhter Temperatur (< 100 °C) aushärten und Verarbeitungszeiten bis zu mehreren Stunden haben, dienen vor allem der Fertigung großer Komponenten im VARI-Verfahren, bei denen entsprechend lange Fließwege zurückzulegen sind.
- Harzsysteme mit Verarbeitungstemperaturen über 100 °C sind vorwiegend für industrielle (C)RTM-Verfahren gedacht und auf kurze Zykluszeiten im Bereich weniger Minuten optimiert.

Eine wichtige Ausnahme von diesen zwei Arten ist das Harzsystem *HexFlow RTM 6* von *Hexion Inc.*, welches für VARI und RTM-Verfahren zur Produktion von Luftfahrzeugkomponenten vorgesehen ist. Hier werden bei empfohlenen Verarbeitungstemperaturen von 120 °C bis 180 °C Verarbeitungszeiten zwischen 20 min und 3 h erreicht. Zur vollständigen Aushärtung ist allerdings eine Temperatur von 180 °C für mindestens 90 min erforderlich. Dies überschreitet bei weitem die zulässigen Verarbeitungstemperaturen und -zeiten der Kautschukmischung (vgl. Tabelle 3.1), sodass ein Einsatz von *RTM 6* nicht in Frage kommt. Es zeigt aber, dass die Entwicklung von LCM-Harzsystemen, die bei erhöhter Temperatur langsam aushärten und dadurch an die Vulkanisationscharakteristik angepasst sind, grundsätzlich möglich sein sollte.

Für Prepregs entwickelte Harzsysteme können für LCM-Verfahren nicht eingesetzt werden, da diese über eine deutlich höhere Viskosität verfügen. Eine Imprägnierung einer trockenen, mehrlagigen Preform ist dadurch nicht möglich.

Um sich dem Prozess des Co-Curings mit kommerziell erhältlichen Harzsystemen anzunähern wurde untersucht was passiert, wenn die Harzinjektion und die Aushärtung während der Vulkanisation stattfinden.

Da das Co-Curing zwar die technisch vielversprechendste, aber auch die anspruchsvollste der untersuchten Verfahrensvarianten ist, wurde ein spezielles Injektionswerkzeug mit gläsernem Deckel entwickelt, das eine Beobachtung des laufenden Prozesses ermöglicht.

Zudem wurde beim Co-Curing neben dem klassischen RTM-Verfahren, bei dem das Injektionswerkzeug eine feste Kavitätshöhe und damit ein konstantes Volumen hat (isochor), auch untersucht, ob eine isobare Verarbeitung sinnvoll ist. Hierzu wurde ein pneumatischer Werkzeugträger genutzt, der die Preform mit konstantem Pressdruck komprimiert. Hierdurch soll eine externe mechanische Kompression der Kautschukmischung während der Vulkanisation sichergestellt werden, während bei den isochoren Prozessvarianten der erforderliche Vulkanisationsdruck nur als Fluiddruck im Werkzeug, durch Gas oder das flüssige Harzsystem, aufgebracht werden kann. Die isobare Verarbeitung lehnt sich dadurch an die Verarbeitung von Prepregs im Autoklav an, da auch hier der Pressdruck extern auf das Material aufgebracht wird.

3.5 Überlegungen zur Fertigung großer Bauteile

Wird eine undurchlässige interlaminare Schicht in FKV eingebracht, ist die Nutzung von Flüssigimprägnierverfahren, bei denen das Harzsystem das Bauteil (auch) in Dickenrichtung durchfließt, nicht mehr ohne weiteres möglich. Dies ist vor allem für die Fertigung größerer Bauteile relevant, wo eine reine Tränkung des Textils in der Ebene aufgrund zu langer Fließwege nicht möglich ist.

Um dieser Herausforderung zu begegnen, sind grundsätzlich zwei Ansätze möglich: Zum einen kann durch geeignete Injektionswerkzeuge oder -hilfsmittel ein Anguss des Harzsystems von Ober- und Unterseite der Preform realisiert werden, zum anderen kann durch das Einbringen einer Perforation die Durchströmung der interlaminaren Schicht ermöglicht werden. Beides hat Vor- und Nachteile.

Ein zweiseitiger Anguss ist eine naheliegende Lösung, erhöht aber die Komplexität der Injektionswerkzeuge durch die Notwendigkeit zusätzlicher Angusskanäle im Werkzeug und/oder erfordert die beidseitige Nutzung von Fließhilfen, wodurch keine glatten Bauteiloberflächen mehr erzielt werden können (siehe auch Halimi et al. [99]). Die Nutzung mehrerer undurchlässiger interlaminarer Schichten ist in diesem Fall ebenfalls nicht möglich, da die Textillagen zwischen den interlaminaren Schichten unzugänglich bleiben. Hinzu kommt, dass es bei einem zweiseitigen Anguss zu einer Verschiebung und Welligkeit der interlaminaren Schicht und dadurch bedingt zu Abweichungen vom beabsichtigten FVG und der Faserausrichtung kommen kann (vgl. Abbildung 3.2). Dies kann durch Druckunterschiede zwischen den Angüssen oder lokale Unterschiede in der Kompaktierbarkeit des Textils entstehen. Durch die Undurchlässigkeit der interlaminaren Schicht ist kein Ausgleich dieser Störungen möglich. Zusätzlich erhöht sich die Gefahr von Gaseinschlüssen im Bauteil. Insbesondere, wenn keine vakuumunterstützten Injektionsverfahren genutzt werden.

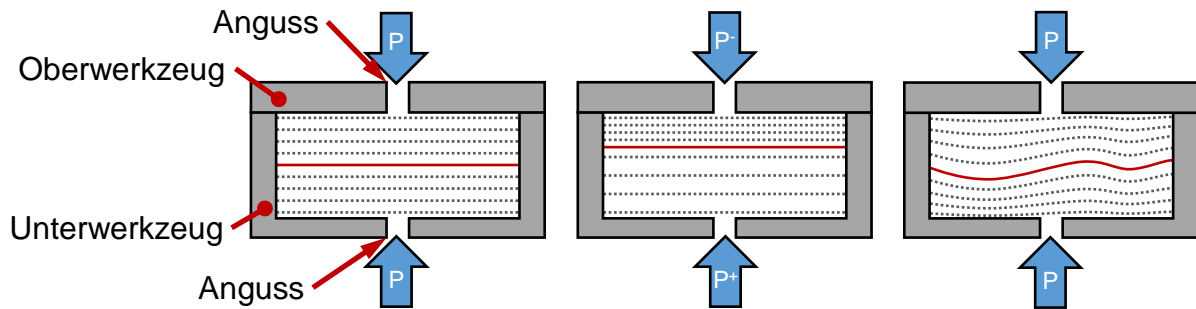


Abbildung 3.2: Schematische Darstellung von Störeinflüssen bei zweiseitigem Anguss. Die interlaminare Schicht ist durchgehend dargestellt, die Textillagen gepunktet. Links: Optimalfall mit gleichmäßigem Druck und idealem Textil. Mitte: Konstanter Druckunterschied zwischen beiden Angüssen (P^+ und P^-). Rechts: lokale Unterschiede in der Kompaktierbarkeit des Textils. Beides kann auch überlagert auftreten.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde stattdessen die Perforation als Lösungsmöglichkeit gewählt. Hierdurch können Standard-Injektionswerkzeuge und -verfahren genutzt werden. Auch die Nutzung mehrerer interlaminarer Schichten ist hierdurch grundsätzlich möglich, wird aber in der vorliegenden Arbeit nicht weiter untersucht.

Bei den Untersuchungen erfolgt eine Beschränkung auf regelmäßige Perforationen mit kreisförmiger Materialentfernung. Dies basiert auf Erfahrungen aus dem Forschungsprojekt HyRoS [101]. Dort wurden Heizfolien als interlaminare Schichten verwendet. Bei einer Perforation mittels Vollnadeln oder geraden Einschnitten ohne Materialentfernung verschlossen sich die Öffnungen während der Harzinjektion, sodass keine ausreichende Durchströmbarkeit gegeben war. Nicht-runde Materialentfernungen sorgen dagegen für eine richtungsabhängige Veränderung der Drapierbarkeit der perforierten Schicht. Das kann für praktische Anwendungen sinnvoll sein, allerdings erschwert es auch die Handhabung des Materials und damit die Reproduzierbarkeit von Messungen, da sich bei Scherung der interlaminaren Schicht die Fläche der Öffnungen und somit der Bedeckungsgrad verändert. Zudem ergibt sich durch die Spannkonzentration in Ecken die Gefahr von Einrissen bei der Handhabung des perforierten Materials. Bei kreisförmigen Perforationen tritt dies nicht auf. Da es, wie im Stand der Technik beschrieben, noch an Grundlagenwissen zum Durchströmungsverhalten von Textilien mit interlaminaren Schichten mangelt, sollen nur regelmäßige Perforationen mit kreisförmiger Materialentfernung betrachtet werden.

Ob der Lochdurchmesser, unabhängig vom Bedeckungsgrad, einen Einfluss auf die Durchströmbarkeit hat ist unklar. Die Literatur ist hierzu widersprüchlich. Versuche unter vergleichbaren Bedingungen (dünne perforierte Schicht zwischen Textillagen, konstanter Bedeckungsgrad, schleichende Strömung) mit verschiedenen Lochdurchmessern im Vergleich konnten bei der Literaturrecherche nicht ermittelt werden. Lediglich die bereits erwähnte eigene Arbeit [100] zur Einbettung perforierter Heizfolien in Laminaten enthält Untersuchungen in diese Richtung. Die Ergebnisse dort waren aber nicht eindeutig und einer der Gründe dafür, diese Thematik genauer zu untersuchen. Es ergaben sich damals Hinweise darauf, dass kleinere Lochdurchmesser die Durchströmbarkeit verbessern könnten.

Die genaue Vorgehensweise der Untersuchungen zur Perforation ist in Kapitel 5 dargestellt. Hierbei wurde zunächst, auf Basis der Literatur, Vorversuchen und theoretischen Überlegungen, der Versuchsraum auf sinnvolle Perforationsparameter eingegrenzt. Dieser wurde dann experimentell untersucht. Im Anschluss an die experimentellen Versuche wurde ein Simulationsmodell aufgebaut, um den Einfluss der Perforation auf die Durchströmung weiter zu untersuchen. Das Simulationsmodell erlaubt es, weitere Parameterkombinationen zu prüfen, die im Experiment nicht zugänglich sind. So können beispielsweise die Textilpermeabilitäten K_1 , K_2 und K_3 unabhängig voneinander verändert werden. Zudem fallen die Schwankungen realer Permeabilitätsmessungen weg. Ziel ist es, die Ergebnisse der Experimente zu verifizieren, die Einflussgrößen der Faktoren genauer zu vergleichen und daraus abzuleiten, wie Preforms mit einer interlaminaeren, perforierten Elastomerschicht grundsätzlich gestaltet sein sollten, um eine bestmögliche Imprägnierbarkeit zu erreichen.

Für die Strömungssimulationen wurde die Software *GeoDict* der Firma *Math2Market GmbH* genutzt. *GeoDict* wird als digitales Materiallabor vermarktet, mit dem insbesondere das Verhalten von Werkstoffen mit unterschiedlichen Phasen auf mikroskopischer Ebene simuliert werden kann. Anwendungen sind beispielsweise Gesteinsphysik, Filter oder Batterie- und Brennstoffzellen. Zur Simulation des Verarbeitungsverhaltens von Verbundwerkstoffen wird *GeoDict* am IVW seit dem Jahr 2013 eingesetzt und auch schon in Veröffentlichungen und Forschungsprojekten genutzt [103, 104]. Daher ist umfangreiche Erfahrung beim Aufbau von Simulationsmodellen und der Wahl der Simulationsparameter vorhanden.

Eine große Herausforderung bei der Strömungssimulation in Textilien ist, dass Strukturen über mehrere Größenordnungen hinweg einen Einfluss haben. Sollen die Einzelfasern und die dazwischen befindlichen, mikroskopischen Fließkanäle direkt simuliert werden, muss das Simulationsmodell sehr fein aufgelöst werden (Größe der Volumenelemente im Mikro- bis Nanometerbereich). Gleichzeitig existieren aber auch größere Fließkanäle zwischen den Rovings oder, bei Gelegen, im Bereich der Vernähungsstellen, sodass die simulierten Teile einer Struktur nicht zu klein sein dürfen, um nicht wichtige Strukturmerkmale zu ignorieren (Milli- bis Zentimeterbereich) [104]. Die relevanten Strukturen überspannen also Größenbereiche von mehreren Dekaden. Aufgrund der verfügbaren Rechen- und Speicherkapazität sind derart umfangreiche und detaillierte Simulationen mit den zur Verfügung stehenden Computersystemen nicht in realistischen Zeiträumen durchführbar. Eine Alternative sind sogenannte „Multiskalenansätze“. Dabei wird zunächst die Permeabilität einer Substruktur durch mikroskopische Simulationen ermittelt. Die so ermittelten Kennwerte werden dann in einem größeren Modell eingesetzt, wobei die vereinfachten Strukturen (bspw. Rovings oder Textillagen) dann selbst als poröse, durchlässige Körper betrachtet werden. Ihnen wird die zuvor ermittelte Permeabilität zugewiesen [105]. Alternativ ist es möglich, Permeabilitätswerte aus physischen Messungen einzusetzen. Dieser Ansatz wurde im Rahmen dieser Forschung gewählt.

Anders als viele bekannte Strömungssimulationsprogramme, wie beispielsweise *Ansys Fluent* oder *OpenFOAM*, arbeitet *GeoDict* ausschließlich mit strukturierten Simulationsnetzen, bei denen jedes einzelne Element würfelförmig ist. Diese Elemente werden *Voxel* (volumetrische Pixel) genannt. Jedem *Voxel* wird ein Material mit entsprechenden Kennwerten zugeordnet.

3.6 Materialauswahl

Da der Schwerpunkt der Arbeit auf der Verarbeitungstechnik und Prozessführung liegen soll, wurden ausschließlich kommerziell erhältliche Produkte und keine Eigenentwicklungen oder Prototypmaterialien von Firmen verwendet. Auf Basis der hiermit gewonnenen Erfahrungen werden im Fazit zu den Verarbeitungseigenschaften in Kapitel 4.4 dann auch Vorschläge für Materialmodifikationen oder -neuentwicklungen unterbreitet.

Als Fasermaterial kam ausschließlich Glas zum Einsatz. Neben der weiten Verbreitung von Glasfasern in der industriellen Anwendung war ein wichtiger Grund hierfür, dass glasfaserbasierte FKV nach einer RTM-Injektion mit Epoxidharz in der Regel transluzent werden. Hierdurch werden die im Verbundwerkstoff liegende Kontaktfläche zwischen FKV und Elastomer sowie eventuell vorhandene Poren, Ablösungen oder Einschlüsse sichtbar.

Prepreg

Für die Referenzversuche mit Prepreg kamen zwei Materialien zum Einsatz. Zum einen ein unidirektionales Glasfasergelege namens *SIGRAPREG G U300-0/NF-E320/35%* mit einem Faserflächengewicht von 300 g/m² und einem Harzmassenanteil von 35 %. Die empfohlene Aushärtezeit bei 120 °C beträgt 50 min und liegt damit ungefähr im Bereich der Vulkanisationszeit des Elastomers.

Das zweite Material besteht aus dem Textil *Texindustria EE380*, das mit dem Epoxidharzsystem *TEXIPREG ER221* imprägniert ist. Beim Textil handelt es sich um ein Köpergewebe aus Glasfasern mit einem Flächengewicht von 375 g/m². Das Material ist in Kett- und Schussrichtung gleich aufgebaut. Das Datenblatt empfiehlt für eine Aushärtezeit von 60 min eine Verarbeitungstemperatur von 125 °C, was ebenfalls nahe den Verarbeitungsbedingungen des Elastomers liegt.

Trockenes Verstärkungstextil

Als Verstärkungstextil für die LCM-Versuche wurde für die meisten Versuche *Hexcel HexForce 01202* verwendet. Hierbei handelt es sich um ein 2/2-Köpergewebe aus Glasfasern mit einem Flächengewicht von 290 g/m², das für die Verwendung mit Epoxidharzen optimiert ist. Dieses Gewebe wird am IVW häufig für Versuchsversuche genutzt und ist zudem dem *TEXIPREG* Prepreg strukturell ähnlich, sodass es als Versuchsmaterial gut geeignet ist.

Bei der isobaren Verarbeitung kam zusätzlich ein Glasfaservlies vom Typ *A200G ES* der Firma *Fibtex* zum Einsatz. Das Flächengewicht beträgt hier 200 g/m². Das Vlies

wurde eingesetzt, da es bei gleichem Kompaktierungsdruck einen wesentlich niedrigeren Faservolumengehalt aufweist als das Gewebe und dadurch sehr viel schneller zu imprägnieren ist.

Für die Untersuchungen zum Einfluss der Perforation wurde als Textilmaterial das $\pm 45^\circ$ -Biaxialgelege *Saertex X-E-444 g/m²* genutzt. Dieses Material wurde auch in Benchmark-Versuchsreihen zur Permeabilitätsmessung verwendet, an denen das IVW teilgenommen hat [81, 82], sodass hierfür verlässliche Kennwerte als Referenz zur Verfügung stehen.

Harzsysteme

Für die Verarbeitungsversuche wurden ausschließlich Epoxidharzsysteme genutzt, um eine bestmögliche Kompatibilität zum Elastomer und den Textilien sicherzustellen, die ebenfalls für die Verwendung mit Epoxidharzen ausgelegt sind. Für die ersten Verarbeitungsversuche wurde *EPIKOTE RIMR 935* zusammen mit dem Härter *EPIKURE RIMH 937* verwendet (im Weiteren verwendete Kurzbezeichnung für dieses Harzsystem: *RIM 935/937*). Beide stammen von der Firma *Hexion Inc.* Es handelt es sich um ein Universal-Epoxidharzsystem für die Flüssigimprägnierung. Es kann bei Raumtemperatur oder bei erhöhten Temperaturen (ca. 80-100 °C, je nach Bauteil und Verfahren) sowohl im VARI als auch im RTM / VARTM / CRTM Verfahren verarbeitet werden.

Da das Co-Curing allerdings aufgrund der Vulkanisationstemperatur der Kautschukmischung höhere Verarbeitungstemperaturen erfordert, wurde hierfür alternativ auch das Epoxidharz *EPIKOTE TRAC 06310* und der zugehörigen Härter *EPIKURE TRAC 06310* (Kurzbezeichnung: *TRAC 06310*), ebenfalls von *Hexion Inc.*, genutzt. Dieses Epoxidharzsystem ist für schnelle RTM-Injektionen bei hohen Temperaturen (bis zu 120 °C) in der Automobilindustrie ausgelegt. Hiermit ist eine Harzinjektion bei Vulkanisationstemperatur möglich, allerdings erfolgt die Harzaushärtung trotzdem noch erheblich schneller als die Vulkanisation.

4 Verarbeitungsversuche

In diesem Kapitel wird zunächst beschrieben, wie die in der Konzeptentwicklung erarbeiteten Verarbeitungsverfahren in konkrete Verarbeitungsversuche umgesetzt wurden. Eine Übersichtstabelle, die alle hergestellten Probestplatten auflistet, kann Kapitel 4.1.4 entnommen werden. Im Anschluss erfolgt die Erläuterung der verwendeten Untersuchungsmethoden sowie die Auswertung der Verarbeitungsversuche.

4.1 Herstellung der Probestplatten

4.1.1 Prepreg und Autoklav (Referenz)

Es wurde je eine Referenzplatte mit dem Gelege- (Prepreg 1) und eine mit dem Gewebeprepreg (Prepreg 2) im Format 380 mm x 480 mm angefertigt. In beiden Fällen wurde eine einzelne, noch unvulkanisierte Lage der Kautschukmischung in der Mitte von acht Lagen Prepreg positioniert. Beim unidirektionalen Gelege (SIGRAPREG G U300-0/NF-E320/35%) erfolgte eine abwechselnde Orientierung der Lagen in 0° und 90° Richtung, sodass ein zur Mittelebene symmetrischer Lagenaufbau entstand:

$$0 / 90 / 0 / 90 / \text{Kautschukmischung} / 90 / 0 / 90 / 0$$

Beim Gewebe (Texindustria EE380/TEXIPREG ER221) wurden alle Textillagen gleich orientiert. Die Produktionsrichtung (0°) lag parallel zur kurzen Seite der Platte:

$$(0/90)_{W,4} / \text{Kautschukmischung} / (0/90)_{W,4}$$

Die Lagenaufbauten wurden jeweils oben und unten mit Abreißgewebe versehen und mittels eines Vakuumsacks auf einer Trägerplatte aus Edelstahl fixiert und kompaktiert. Der Autoklav wurde anschließend mit einer Heizrate von 4 °C/min aufgeheizt. Der Luftdruck im Autoklav wurde proportional zum Temperaturanstieg erhöht. Bei 100 °C wurde ein Druck von 7 bar erreicht, der dann im weiteren Verlauf gehalten wurde. Als Endtemperatur wurde beim Gelege 120 °C erreicht, während beim Gewebe 125 °C verwendet wurde. Dies entspricht den Vorgaben aus dem jeweiligen Datenblatt. Die Endtemperatur wurde für 90 min gehalten und danach mit 2 °C/min abgekühlt. Durch die Abkühlung sank auch der Druck entsprechend. Bei Erreichen von 60 °C wurde der Restdruck abgelassen und die Platten entnommen.

4.1.2 Isochores RTM

Allgemeiner Injektionsaufbau

Der grundsätzliche Aufbau und die Werkzeugbestückung waren bei allen Versuchen mit dem isochoren Werkzeug gleich. Unterschiede gab es in der Temperaturführung, dem Bedrücken des Werkzeugs mit Gas und ob die interlaminare Schicht zu Versuchsbeginn bereits vulkanisiert war oder nicht. Dies ist in den entsprechenden Abschnitten genauer erklärt.

Alle Versuchsplatten mit isochorer Werkzeugkavität wurden in einem RTM Werkzeug mit einer festen Kavitätshöhe von 3 mm hergestellt, das in Abbildung 4.1 auf der linken Seite dargestellt ist. In das Werkzeug wurden 10 Lagen *Hexcel 01202* Gewebe mit einer Lage Elastomer in der Mitte eingelegt (Abbildung 4.1, rechts):

$$(0/90)_{W,5} / \text{Kautschukmischung bzw. Elastomer} / (0/90)_{W,5}$$

Die Harzinjektion erfolgt mittels Punktanguss am Außenrand der Kavität. Da das Lagenpaket kleiner ist als die Kavität (vgl. Abbildung 4.1), bleibt ein umlaufender, 5 mm breiter Spalt zwischen dem Lagenpaket und der Dichtung bestehen, sodass das Harzsystem zunächst ringförmig um die Preform herumfließt und diese dann von außen nach innen tränkt, bis es den mittigen Auslass erreicht. Da das Elastomer undurchlässig ist, könnte es hierbei jedoch zum Einschluss von Gasblasen im Textil kommen. Um dies zu vermeiden, wurde das Elastomer vor dem Zusammenfügen der Lagen mittig mit einem 6 mm großen Loch versehen. Aus dem gleichen Grund befindet sich der Einlass im Unterwerkzeug und der Auslass im Oberwerkzeug. Eventuell eingeschlossene Gasblasen steigen, aufgrund ihrer im Vergleich zum Harzsystem geringeren Dichte, nach oben und bewegen sich dadurch Richtung Auslass. Die Probenplatten sind jedoch klein genug, um eine Imprägnierung in der Textilebene zu ermöglichen, sodass eine flächige Perforation des Elastomers für diese Versuche nicht erforderlich ist.

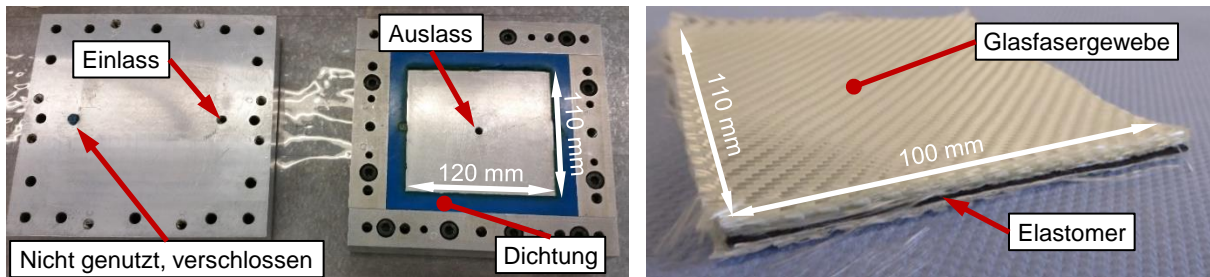


Abbildung 4.1: Aufgeklapptes RTM Injektionswerkzeug mit Unterwerkzeug links und Oberwerkzeug rechts (linkes Bild) und zugehöriger Lagenaufbau (rechtes Bild)

Die gewählte Lagenanzahl führt in Kombination mit der Kavitätshöhe und der Dicke der Elastomerlage zu einem Faservolumengehalt (FVG) von ca. 45 % (bezogen auf den vom Textil eingenommenen Teil der Kavitätshöhe). Das ist für industrielle Anwendungen ein vergleichsweise niedriger Wert, der aber bewusst so gewählt wurde, da die verwendeten Harzsysteme bei den genutzten Verarbeitungstemperaturen sehr schnell aushärten und eine schnelle Imprägnierung daher zwingend erforderlich war. Die Permeabilität des Textils sinkt aber exponentiell mit steigendem FVG und die benötigte Injektionszeit ist antiproportional zur Permeabilität [81].

Zur Beheizung wurde das Werkzeug in einem Industrieofen platziert.

Co-Bonding

Beim Co-Bonding wurde die Kautschukmischung zunächst auf einer Heißpresse vulkanisiert. Auf Basis der Verarbeitungshinweise des Herstellers (vgl. Tabelle 3.1 und [63]) wurden als Pressparameter eine Pressentemperatur von 140 °C, ein Pressdruck von 7 bar und eine Haltezeit von 8:15 min festgelegt. Mindestdruck und -vulkanisationszeit wurden hierdurch sicher eingehalten, ohne in die Nähe der maximalen Vulkanisationszeit zu kommen. Das Elastomer wurde dann wie oben beschrieben mit dem Textil zu einer Preform gestapelt und in das Injektionswerkzeug eingelegt. Das Injektionswerkzeug wurde geschlossen und mittels einer an den Auslass angeschlossenen Vakuumpumpe evakuiert. Es kam also die Prozessvariante des VARTM zum Einsatz. Hierdurch wird der Einschluss von Luft im FKV besonders gut vermieden. Die Nutzung

von Vakuum ist möglich, da das Elastomer bei dieser Prozessvariante bereits vulkanisiert und daher kein Mindestdruck erforderlich ist. Die Harzinjektion erfolgte mit 2 bar, sodass durch das angelegte Vakuum eine effektive Druckdifferenz von 3 bar zwischen Ein- und Auslass entstand.

Als Harz wurde ausschließlich das System *RIM 935/937* genutzt. Um zu prüfen, ob sich ein Einfluss durch unterschiedliche Verarbeitungstemperaturen ergibt, wurde Isochor 1 bei 60 °C Werkzeugtemperatur durchgeführt, Isochor 2 bei 80 °C.

Nachträgliche Vulkanisation

Bei der zweiten Variante wurde die Kautschukmischung vor dem Einlegen in das Werkzeug nicht vulkanisiert. Die Harzinjektion (*RIM 935/937*) erfolgte bei niedriger Temperatur (ca. 40 °C). Auch hier kam das VARTM Verfahren zum Einsatz, ebenfalls mit einer effektiven Druckdifferenz von 3 bar zwischen Ein- und Auslass. Es sollte geprüft werden, ob das geschlossene Werkzeug, insbesondere in Verbindung mit der ausgehärteten Matrix, ausreichend ist, um eine Porenbildung im Elastomer während der Vulkanisation zu verhindern. Nach der vollständigen Aushärtung des Harzes wurde die Temperatur auf 120 °C (Isochor 3) bzw. 140 °C (Isochor 4) erhöht, um die Vulkanisation durchzuführen.

Co-Curing

Eine besonders gute Verbindungsfestigkeit zwischen Elastomer und Epoxidharz sollte erreicht werden, wenn Vulkanisation und Aushärtung des Harzes gleichzeitig erfolgen, sodass eine chemische Vernetzung möglich ist [54]. Die besten Ergebnisse wären zu erwarten, wenn die empfohlene Vulkanisationszeit und -temperatur mit den Aushärtebedingungen des Epoxidharzes weitgehend übereinstimmt, wie dies bei den Prepregs der Fall ist. Wie in der Konzeptentwicklung beschrieben wurde, stand jedoch kein Harzsystem zur Verfügung, welches sich für Flüssigimprägnierverfahren eignet und diese Anforderungen erfüllt.

Um sich diesem Prozess anzunähern, wurde untersucht, was passiert, wenn die Harzinjektion und die Aushärtung während der Vulkanisation stattfinden. Bei den durchgeführten Co-Curing Versuchen müssen zwei Varianten unterschieden werden:

1. Ein Lagenpaket mit unvulkanisierter Schicht wurde in die Form eingelegt und so schnell wie möglich auf 120 °C aufgeheizt, um die Vulkanisation zu starten. Durch den Auslass wurde das Werkzeug dabei mit Druckluft (2 bar Überdruck) beaufschlagt, um den für die Vulkanisation geforderten Mindestdruck zu erreichen. Nach einer Haltezeit von 0 min, 18 min bzw. 36 min (Isochor 5/6/7) bei 120 °C wurde der Ofen auf 80 °C abgekühlt und *RIM 935/937* mit 5 bar injiziert, welches die Druckluft verdrängte. Hierdurch wurde sichergestellt, dass der Gesamtdruck im Werkzeug zu keinem Zeitpunkt unter den Mindestdruck für die Vulkanisation fiel. Gleichzeitig ergab sich auf diese Weise die gleiche effektive Druckdifferenz zwischen Ein- und Auslass wie bei den anderen Versuchen. Die Abkühlung des Ofens war notwendig, da die Aushärtereaktion des Harzes bei höheren Temperaturen so schnell erfolgt, dass die Form ansonsten nicht komplett mit Harz gefüllt werden konnte. Auch nicht bei Nutzung höherer effektiver Druckdifferenzen, was in Vorversuchen getestet wurde. Nach der vollständigen Imprägnierung wurde die Form erneut auf 120 °C erwärmt, um die Vulkanisation abzuschließen. Eine graphische Darstellung des Prozessablaufs ist in Abbildung 4.2 zu sehen.
2. Bei Isochor 8 wurde anstelle von Druckluft Stickstoff zur Druckbeaufschlagung verwendet, um potenzielle Oxidationseffekte im Elastomer zu vermeiden. Durch die Verwendung des *TRAC 06310* Harzsystem konnte die Verarbeitung zudem isotherm bei 120 °C erfolgen. Eine Abkühlung auf 80 °C war nicht mehr notwendig. Die Injektion erfolgte hierbei 30 min nach Erreichen von 120 °C. Damit wurde ungefähr die Hälfte von t_{90} gewählt, um einen Mittelweg zu den anderen Prozessvarianten zu untersuchen. Bei einer langen Haltezeit wäre das Elastomer zum Zeitpunkt der Harzinjektion bereits vollständig vulkanisiert, wie bei Isochor 1/2. Eine kurze Haltezeit führt zu Ergebnissen wie bei Isochor 3/4, da die Vulkanisation fast vollständig nach der Aushärtung des Harzes stattfindet.

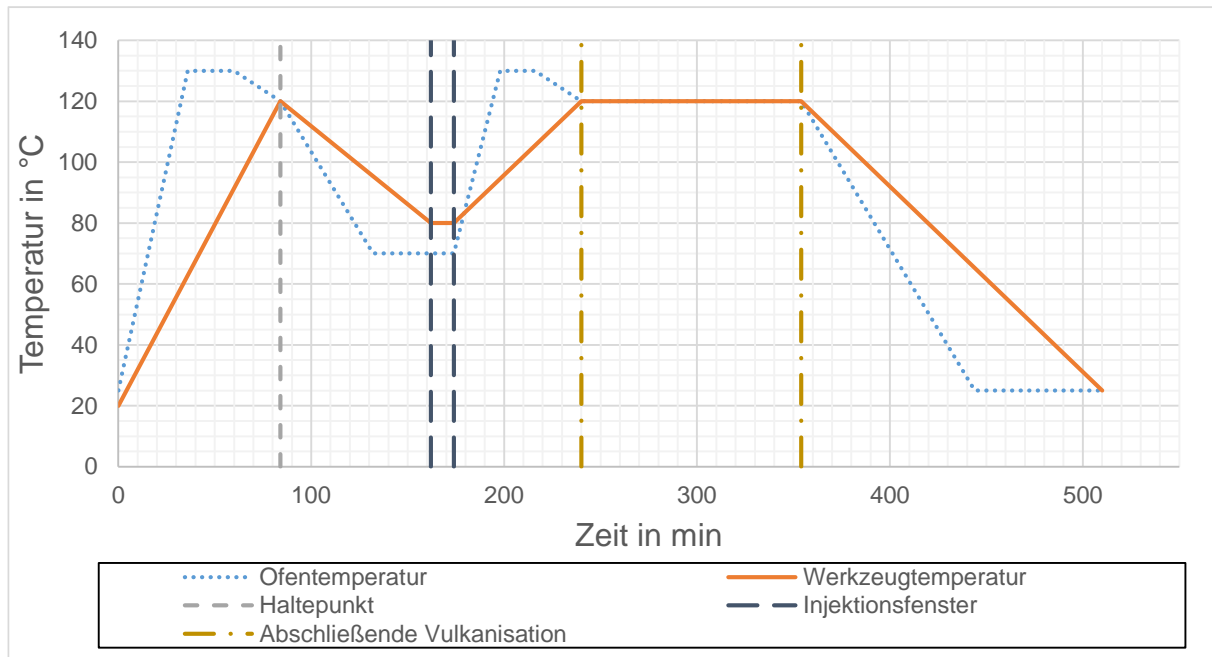


Abbildung 4.2: Schematischer Prozessablauf bei Co-Curing Versuchen (Serie 5/6/7)

Co-Curing im Glaswerkzeug

Um ein besseres Verständnis dafür zu gewinnen, was genau während der Co-Curing Versuche passiert, wurde ein spezielles Injektionswerkzeug mit einem Deckel aus Bor-silikatglas entwickelt. Es ist in Abbildung 4.3 im Halbschnitt dargestellt. Durch die Glasplatte kann die Injektion mit einer Kamera verfolgt werden. Da keine Kamera zur Verfügung stand, die die für die Verarbeitung notwendigen Temperaturen aushält, konnte die Injektion nicht wie beim Werkzeug für die anderen isochoren Versuche in einem Ofen durchgeführt werden. Stattdessen wurde eine Heizplatte zur Erwärmung des Werkzeugs verwendet, weshalb Harzeinlass und –auslass in der Textilebene liegen mussten. Um eine homogene Temperatur im Werkzeug sicherzustellen, wurde es während der Versuche mit einer dicken Haube aus Silikonkautschuk versehen, die in Abbildung 4.3 nicht dargestellt ist. Die Kavität ist kreisrund mit einem Durchmesser von 72 mm und einer Höhe von 3 mm. Material und Injektionsparameter wurden identisch zu Isochor 8 gewählt. Es wurde ein Ringguss realisiert, indem eine Preform mit lediglich 40 mm Durchmesser verwendet wurde. Da das Harzsystem hierdurch um die Preform herumfließen kann, und aufgrund der Temperatur (120 °C) schnell aushärtet, ist eine vollständige Imprägnierung der Preformmitte nicht sichergestellt. Um diesen

Effekt zu mildern wurde der Schlauch, der vom Auslass zur Vakuumpumpe führt, mittels Schlauchklemme verschlossen, sobald das Harzsystem die Preform vollständig umschlossen hat. Hierdurch kann sich ein Druckgradient zwischen Preformmitte und Anguss einstellen. In den Außenbereichen wird, auch unterstützt durch den Kapillareffekt, eine vollständige Imprägnierung erwartet, was für das grundsätzliche Verständnis ausreichend ist.

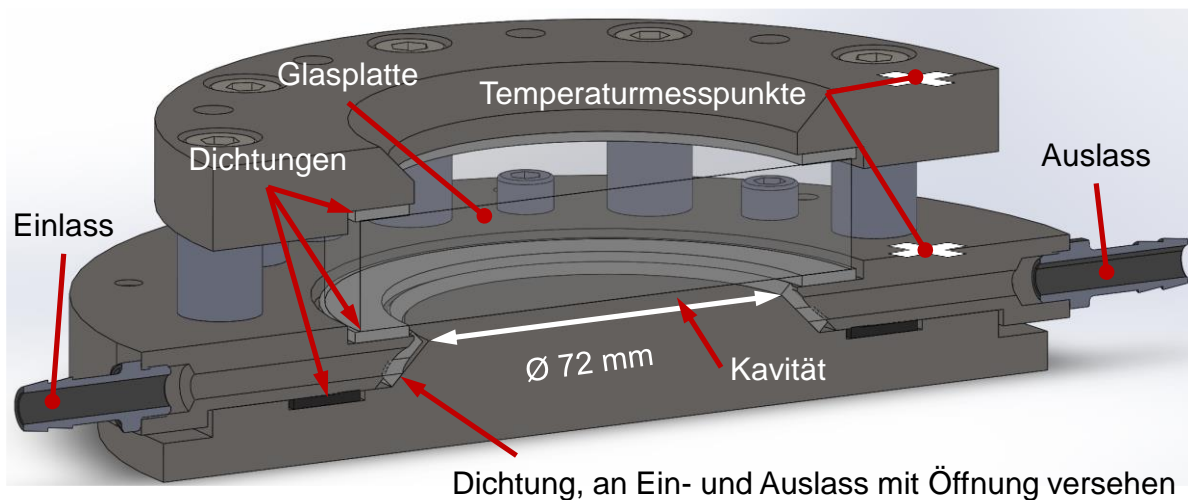


Abbildung 4.3: CAD-Halbschnitt des Glaswerkzeugs zur Beobachtung der Aushärtung

4.1.3 Isobares RTM

Die isobaren Verarbeitungsversuche wurden auf dem gleichen Werkzeugträger durchgeführt wie die Ebenenpermeabilitätsmessungen (vgl. Abbildung 2.12). Hierbei kam ein Werkzeug zur Fertigung von ebenen Platten zum Einsatz (vgl. Abbildung 4.4). Das Werkzeug verfügt über einen auswechselbaren Kavitätsrahmen, um die Kavitätshöhe bei isochoren Prozessen anpassen zu können. Um eine isobare Verarbeitung zu realisieren, wurde der 2 mm Kavitätsrahmen verwendet und ein Lagenaufbau genutzt, bei dem aufgrund der Lagenanzahl ausgeschlossen ist, dass sich das Werkzeug komplett schließen kann. Die Größe der Preform betrug 480 mm x 380 mm.

Bezüglich möglicher Oxidationseffekte wurden zwei Vorgehensweisen überprüft. Bei Isobar 1 wurde auf Schutzgas oder eine Evakuierung verzichtet. Bei Isobar 2 wurde die Preform mit Vakuumdichtband umgeben und eine Vakuumpumpe angeschlossen.

Das Dichtband ist weich und kann sich unterschiedlichen Kavitätshöhen anpassen. Das Werkzeug verfügt üblicherweise, wie das Werkzeug bei den isochoren Versuchen, über einen Ringanguss und einen zentralen, punktförmigen Auslass. Die Nutzung des Ringangusses war bei der isobaren Verarbeitung allerdings nicht möglich, da das Vakuumdichtband dem verwendeten Injektionsdruck (6 bar) nicht standhält. Aus demselben Grund war auch keine Verarbeitung unter Schutzgas möglich. Stattdessen musste ausnahmsweise durch den Auslass injiziert werden. Um sicherzustellen, dass das Harzsystem in alle Schichten der Preform eindringen kann, wurde in diese mittig ein Loch von 12 mm Durchmesser gestanzt. Nach mehreren Vorversuchen zur Eingrenzung der Prozessparameter wurden zwei Platten im isobaren Verfahren gefertigt.

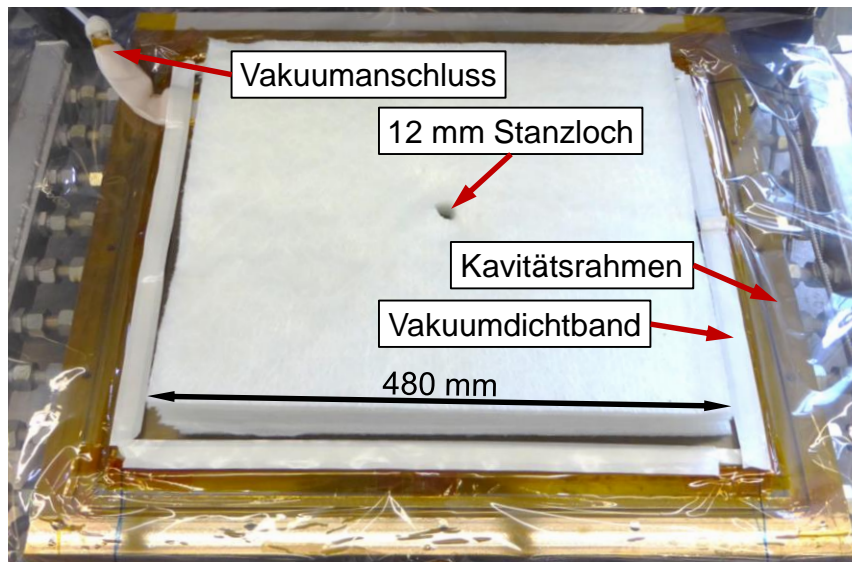


Abbildung 4.4: Versuchsaufbau (Deckel geöffnet) beim zweiten isobaren Injektionsversuch mit Glasfaservlies.

Für beide Platten wurde das *TRAC 06310* Harzsystem verwendet und ein Co-Curing mit isothermer Temperaturführung angestrebt. Bei der ersten Platte kam, wie bei den isochoren Versuchen, das Gewebe *Hexcel HexForce 01202* mit folgendem Lageraufbau zum Einsatz:

$(0/90)_{w,7}$ / Kautschukmischung / $(0/90)_{w,7}$

Es musste jedoch eine niedrigere Verarbeitungstemperatur von 110 °C gewählt werden. Durch die reduzierte Temperatur sollte dem Harzsystem mehr Zeit für die Imprägnierung der Fasern gegeben werden, da durch den Punktanguss im Vergleich zum Ringanguss die zur Imprägnierung benötigte Zeit ansteigt und die Preform zudem deutlich größer ist als bei den isochoren Versuchen. Beim zweiten Versuch wurde das Glasfaservlies *A200G ES* bei 110 °C Verarbeitungstemperatur genutzt, um eine schnellere Harzausbreitung zu ermöglichen, da der Vliesstoff eine erheblich höhere Permeabilität hat als das Gewebe. Auch hierbei wurden 14 Lagen Textil mit einer mittleren Lage der Kautschukmischung eingesetzt. Wie bei der Versuchsreihe Isochor 8 wurde die Harzinjektion nach ca. 50 % von t_{90} durchgeführt, um vergleichbare Bedingungen zu erzeugen. Bei 110 °C ergeben sich somit 120 min.

4.1.4 Tabellarische Übersicht der Verarbeitungsversuche

Tabelle 4.1: Tabellarische Übersicht der Verarbeitungsversuche. Beim Elastomer handelt es sich in allen Fällen um *Kraibon AA9CFZ*

Versuch	Harzsystem	Textil	Lagenaufbau	Kavitätshöhe FVG	Prozessvariante	Temperatur Ofen/Werkzeug	Atmosphäre im Werkzeug
Isochor 1	RIM 935/937	Hexcel 01202	(0/90) _{w,5} /Elastomer/(0/90) _{w,5}	3 mm 45%	Co-Bonding	60 °C	Vakuum
Isochor 2	RIM 935/937	Hexcel 01202	(0/90) _{w,5} /Elastomer/(0/90) _{w,5}	3 mm 45%	Co-Bonding	80 °C	Vakuum
Isochor 3	RIM 935/937	Hexcel 01202	(0/90) _{w,5} /Elastomer/(0/90) _{w,5}	3 mm 45%	Vulkanisation nach Injektion	120 °C	Vakuum
Isochor 4	RIM 935/937	Hexcel 01202	(0/90) _{w,5} /Elastomer/(0/90) _{w,5}	3 mm 45%	Vulkanisation nach Injektion	140 °C	Vakuum
Isochor 5	RIM 935/937	Hexcel 01202	(0/90) _{w,5} /Elastomer/(0/90) _{w,5}	3 mm 45%	Co-Curing 0 min	120 °C / 80 °C	Druckluft 2 bar Überdruck
Isochor 6	RIM 935/937	Hexcel 01202	(0/90) _{w,5} /Elastomer/(0/90) _{w,5}	3 mm 45%	Co-Curing 18 min	120 °C / 80 °C	Druckluft 2 bar Überdruck
Isochor 7	RIM 935/937	Hexcel 01202	(0/90) _{w,5} /Elastomer/(0/90) _{w,5}	3 mm 45%	Co-Curing 36 min	120 °C / 80 °C	Druckluft 2 bar Überdruck
Isochor 8	TRAC 06310	Hexcel 01202	(0/90) _{w,5} /Elastomer/(0/90) _{w,5}	3 mm 45%	Co-Curing 30 min	120 °C	Stickstoff 2 bar Überdruck
Glaswerkzeug	TRAC 06310	Hexcel 01202	(0/90) _{w,5} /Elastomer/(0/90) _{w,5}	3 mm 45%	Co-Curing 30 min	120 °C	Stickstoff 2 bar Überdruck
Isobar 1	TRAC 06310	Hexcel 01202	(0/90) _{w,7} /Elastomer/(0/90) _{w,7}	nicht definiert	Co-Curing 120 min	110 °C	Umgebungsluft
Isobar 2	TRAC 06310	Fibtex A200G ES	Vlies ₇ /Elastomer/Vlies ₇	nicht definiert	Co-Curing 120 min	110 °C	Vakuum

4.2 Untersuchungsmethoden

Optische Begutachtung

Durch die Verwendung von Glasfasern als Textilmaterial wurden die im RTM-Verfahren hergestellten Probplatten transluzent, sodass eine optische Bewertung auch in der Tiefe des Materials und insbesondere in der Grenzfläche zwischen FKV und Elastomer möglich wurde. Bei den Referenzproben aus Prepreg wird der FKV nicht durchscheinend, sodass hier keine Aussage möglich ist.

Zur Dokumentation der Befunde erwiesen sich ein Fotoapparat und ein Flachbettscanner als geeignet. Panoramaaufnahmen mittels Mikroskops waren unbrauchbar, da die glatte Oberfläche der Platten spiegelt und es zu Bildartefakten kommt.

Schliffbilder

Die Anfertigung von Schliffbildern ist ein Standardverfahren bei der Untersuchung von FKV. Hiermit können Poren und andere Unregelmäßigkeiten im Material gefunden werden, in diesem speziellen Fall insbesondere im Elastomer. Hierzu wurden mittels Säge an mehreren Stellen der FKV-Platten Proben von ca. 10 mm x 20 mm entnommen und mit Epoxidharz in einen Probenträger eingebettet. Die Proben wurden dann in mehreren Schritten mit Schleifpapier immer feinerer Körnung (bis P4000) geschliffen. Üblicherweise werden die Proben danach poliert, um eine möglichst glatte Oberfläche und damit eine gute Bildqualität im Mikroskop zu erreichen. In Vorversuchen hatte sich jedoch gezeigt, dass die Diamantpartikel der Politur in das Elastomer eindringen und sich dort festsetzen, was die Proben unbrauchbar macht. Deshalb wurde auf das Polieren verzichtet und die etwas schlechtere Bildqualität in Kauf genommen.

Verbindungsfestigkeit

Zur Prüfung der Verbindungsfestigkeit von Materialien stehen eine Vielzahl genormter und ungenormter Versuche zur Verfügung, die sich unter anderem hinsichtlich Probengeometrie, Belastungsrichtung, apparativem und personellem Aufwand und ermittelten Kennwerte erheblich unterscheiden. Im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit wurden folgende besondere Anforderungen an das mechanische Prüfverfahren für die Verbindungsfestigkeit gestellt:

- Es soll die kontinuierliche Überwachung des Materials erlauben, beispielsweise in Form einer Spannungs-Dehnungs-Kurve, und nicht nur einen einzelnen Messpunkt pro Probe liefern.
- Die Prüfung soll nach dem ersten Kraftabfall weitergehen, um auch das Nachversagensverhalten beurteilen zu können.
- Es muss eine vollständige Trennung des Probekörpers erfolgen, um die Trennfläche optisch begutachten zu können.

Die Auswahl einer geeigneten Prüfmethode zur Quantifizierung der Verbindungsfestigkeit war eine besondere Herausforderung und soll hier knapp erläutert werden:

Die im Datenblatt des Elastomers angegebenen Festigkeits- und Bruchdehnungswerte (7,9 MPa und 157 %) wurden in einem Zugversuch nach DIN 53504 (nationale Variante von ISO 37) ermittelt und beziehen sich auf die Eigenschaften des Elastomers in der Ebene, sodass der Versuch nicht zur Bestimmung der Verbindungsfestigkeit zwischen Elastomer und FKV geeignet ist. [106, 107]

Im Bereich der Verbundwerkstoffe sind Dreipunktbiegeversuche mit kurzen Proben zur Bestimmung der scheinbaren interlaminaren Scherfestigkeit nach ISO 14130 oder ASTM D2344 üblich. Diese funktionieren allerdings nur mit steifen Materialien und liefern keine gültigen Ergebnisse, wenn ein Elastomer eingebettet ist, da hierdurch die Biegesteifigkeit des Verbundes deutlich sinkt. Zudem findet keine vollständige Trennung des Materials statt. [108, 109]

Als sinnvoll erwies es sich, das Elastomer analog zu einer Klebeschicht zwischen zwei FKV-Deckschichten zu betrachten. Im Bereich der Klebetechnik gibt es einige Prüfverfahren, die vielversprechend sind, allerdings haben auch diese Einschränkungen in Bezug auf die zu untersuchende Materialkombination. Abziehversuche, wie sie z. B. in ISO 28510-1 oder ISO 8510-2 beschrieben werden, wären nur möglich, wenn das Elastomer auf der Außenseite des FKV angebracht wäre, da hierzu das abziehende Material flexibel sein muss [110]. Einschnittige Zugscherprüfungen (vgl. Abbildung 4.5), z. B. nach EN 1465 oder ISO 11003-2, würden die oben formulierten Anforderungen grundsätzlich erfüllen [111]. Da die Probekörper aber aus den vollflächigen RTM- bzw. Autoklavplatten herausgearbeitet werden müssen, stellt die Probenvorbereitung

eine Herausforderung dar: Es müsste lokal, bspw. durch Sägen oder Fräsen, Material mit sehr hoher Genauigkeit in Dickenrichtung abgetragen werden, um genau die Grenzschicht zu treffen. Dabei ist zu beachten, dass die Dicke der einzelnen Laminatschichten aufgrund des Kompaktierungsverhaltens der Textilien und des Elastomers schwanken kann. Mit hoher Genauigkeit einen Schnitt bis zu einer definierten Tiefe einbringen zu können, löst das Problem damit nur bedingt. Im Forschungsprojekt HyRoS wurden vom Autor dieser Arbeit Versuche mit einer ähnlichen Probengeometrie wie in ISO 11003-2 durchgeführt, wobei Heizfolien, ähnlich wie in der vorliegenden Arbeit das Elastomer, in FKV eingebettet wurden [58, 100]. Dabei zeigte sich, dass das Einbringen der notwendigen Einschnitte anspruchsvoll und schlecht reproduzierbar ist, was viele ungültige Versuche zu Folge hatte.



Abbildung 4.5: Beispiele für genormte, einschnittige Zugscherversuche. [112]

Weiterhin ist anzumerken, dass es bei einschnittigen Zugscherprüfungen zu einer Überlagerung von Schäl-, Schub- und Zugbelastung im Inneren des Elastomers, sowie zu Spannungsspitzen an den Rändern kommt, was die Auswertung derartiger Versuche schwierig macht. Um den Einfluss der Schubbelastung zu vergrößern müssten die FKV Schichten möglichst steif (und damit dick) ausgeführt werden, was aber wiederum die Schwankung der Schichtdicken erhöhen würde und ggf. Schwierigkeiten im Hinblick auf eine vollständige Imprägnierung mit sich bringt [112]. Aus diesem Grund wurden derartige Versuche verworfen.

In der näheren Auswahl kamen Versuche, die auf dem Prinzip des Double Cantilever Beam (DCB) basieren, beispielsweise in Anlehnung an ISO 25217 oder ISO 15024 [113–116]. Abbildung 4.6 zeigt eine schematische Darstellung einer Probe nach ISO 25217, die üblicherweise zur Bestimmung des Rissfortschrittsverhaltens von Klebstoffen genutzt wird. Hierzu wird in der zu prüfenden Schicht ein Rissinitiator, beispielsweise eine dünne Folie aus Polytetrafluorethylen (PTFE), eingebracht. Die Belastung

erfolgt durch aufgeklebte Metallblöcke, die mit Bolzen in die Prüfmaschine eingespannt werden. Proben nach ISO 15024 sehen ähnlich aus, dienen allerdings der Bestimmung der interlaminaren Festigkeit von unidirektionalen FKV. DCB-Versuche wurden aus zwei Gründen verworfen: Zum einen müssen die Proben recht lang sein, um ein stabiles Rissverhalten auszubilden (≥ 125 mm). Die Herstellung größerer Proben als die oben beschriebenen 100 mm x 110 mm war allerdings nicht möglich, da sie aufgrund der schnellen Aushärtung der Harzsysteme beim Co-Curing mit der vorhandenen Injektionsausrüstung nicht komplett zu imprägnieren gewesen wären. Zum anderen ist für DCB-Versuche der Rissinitiator essenziell. Bei Verwendung einer einzelnen Elastomerschicht hätte er aber in der Mitte dieser Schicht eingebracht werden müssen, was nicht möglich ist.

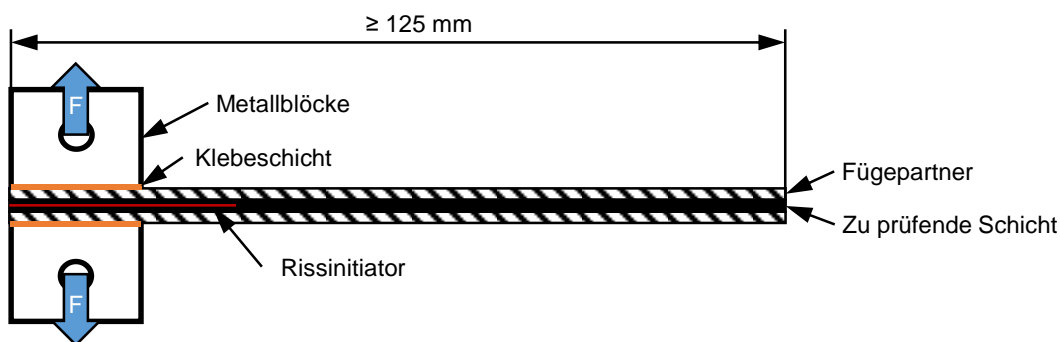


Abbildung 4.6: Schematische Darstellung eines DCB-Test nach ISO 25217

Ausgewählt wurden letztendlich Stirnabzugsversuche in Anlehnung an DIN EN 15870 (europäische Variante von ISO 6922) [117]. Diese dienen üblicherweise der Charakterisierung von Stumpfklebungen unter Zugbelastung und weisen eine gewisse Ähnlichkeit zu DCB-Versuchen auf. Allerdings beschränkt sich die Probengröße auf die Größe der Metallblöcke und es wird kein Rissinitiator verwendet. Laut Habenicht [112] bewirkt diese Prüfmethode gut definierte Spannungsverhältnisse in der Probe, sodass die Adhäsions- und Kohäsionseigenschaften gut beurteilt werden können. Abbildung 4.7 zeigt die tatsächlich verwendete Probengeometrie. DIN EN 15870 lässt sowohl Proben mit rundem als auch quadratischem Querschnitt zu. Die Entscheidung fiel zugunsten einer quadratischen Geometrie, da sich diese besser aus den hergestellten Platten

herauspräparieren ließ. Die Versuche sind dadurch sehr ähnlich zu den Versuchen die Lin und Chang bei ihren Versuchen zu den SMART-Layern durchgeführt haben [46].

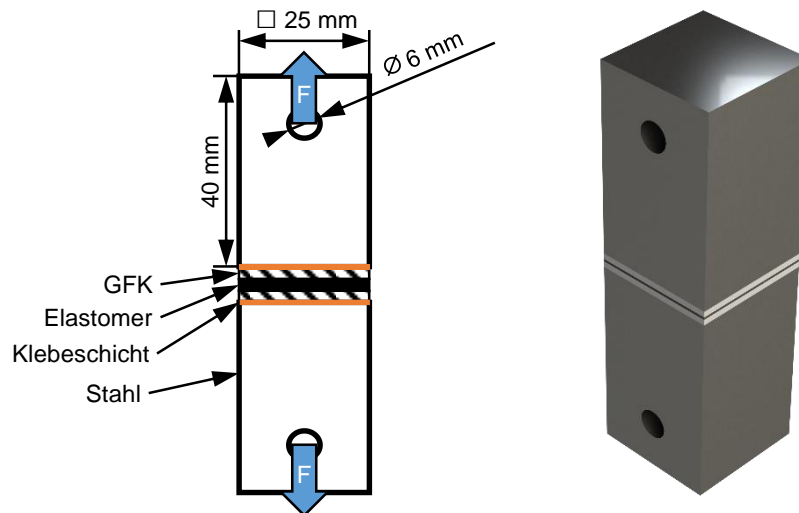


Abbildung 4.7: Probengeometrie des ausgewählten Stirnabzugsversuchs. Links als schematische Darstellung, rechts ein maßstabsgerechtes Rendering eines Probekörpers

Die Stirnabzugsversuche werden auf einer Universalprüfmaschine des Herstellers *Zwick Roell* durchgeführt. Die Einspannung der Metallklötze erfolgt mittels eines Aufbaus, der üblicherweise für DCB-Prüfungen verwendet wird. Hierbei werden Bolzen durch die Bohrungen gesteckt, die wiederum mittels Gelenken an der Fahrtraverse mit Kraftmessdose und am Rahmen der Universalprüfmaschine befestigt sind. Die Gelenke dienen dazu, eventuelle Winkelfehler auszugleichen und damit Schälkräfte zu minimieren. Es wurde eine Vorkraft von 15 N und eine Prüfgeschwindigkeit von 1 mm/min verwendet. Geprüft wurden sechs bis acht Probekörper pro Verarbeitungsvariante.

Zur Verklebung der Stahlklötze auf dem FKV wurde *Scotch-Weld EPX DP490*, ein Strukturklebstoff auf Epoxidbasis verwendet. Dieser stellt keine Schwachstelle dar, was durch Vorversuche überprüft wurde. Hierzu wurden zwei Stahlklötze direkt miteinander verklebt und mit 9 kN (entspricht 14,5 MPa in der Klebefläche) belastet, was die maximale Betriebslast der verwendeten Kraftmessdose ist. Hierbei kam es zu keinem Versagen der Klebung.

Weitere Vorversuche dienten der Festigkeitsprüfung der verschiedenen FKV-Varianten (Prepreg und RTM) und ihrer Kompatibilität mit dem Klebstoff. Auch hier konnte bei 9 kN / 14,5 MPa kein Versagen beobachtet werden.

Wünschenswert wäre es gewesen, mit dem ausgewählten Testverfahren auch die Festigkeit des Elastomers allein gegenüber einer Belastung in Dickenrichtung zu bestimmen, da der Datenblattwert wie oben beschrieben in einem Zugversuch in der Elastomerebene ermittelt wurde. Da die Kautschukmischung mittels Kalanders in ihre folienartige Lieferform gebracht und dabei verstreckt wird, kommt es zu einer Orientierung der Kautschukmoleküle in der Ebene, wodurch ein unterschiedliches Verhalten bei Belastung in der Ebene und senkrecht dazu wahrscheinlich erscheint [11]. Zudem wird die Verformung des Elastomers beim Stirnabzugsversuch durch die angrenzenden FKV-Schichten behindert, sodass es durch die Volumenkonstanz des Elastomers zu hohen inneren Spannungen kommt. Eine Prüfung des reinen Elastomers im Stirnabzugsversuch war jedoch nicht möglich, da es nicht gelang, das Elastomer zufriedenstellend mit den Metallklötzen zu verbinden und ein kohäsives Versagen in der Elastomerschicht zu bewirken. Neben dem epoxidharzbasierten *Scotch-Weld EPX DP490* wurde hierzu auch der Acrylatklebstoff *ScotchWeld EC1500* getestet, der laut *Gummiwerk Kraiburg* gut für die Verklebung des Elastomers mit Metall geeignet sein sollte. Es kam jedoch stets zu einem adhäsiven Versagen zwischen Elastomer und Klebstoff bei relativ kleinen Spannungen und sehr hoher Streuung (0,1 – 3,4 MPa). Höhere Versagensspannungen (um 4 MPa) wurden erreicht, wenn die Kautschukmischung direkt auf die Metallklötze aufvulkanisiert wurde. Auch hierbei kam es aber zu reinem Adhäsivversagen, sodass dieser Wert als Untergrenze für die Elastomerfestigkeit senkrecht zur Produktionsebene gelten muss.

Bruchflächenanalyse

Die Analyse der Bruchflächen der Probekörper für die Verbindungsfestigkeit erfolgt mittels Panoramaaufnahmen im Digitalmikroskop. Da die Bruchflächen matt und nicht glänzend sind, wie die Oberflächen der Probeplatten, gab es hierbei keine störenden Spiegelungen.

4.3 Ergebnisse und Interpretation der Untersuchungen

Prepreg Referenz

Abbildung 4.8 und 4.9 zeigen die Ergebnisse der Stirnabzugsversuche der im Autoklav hergestellten Prepreg-Proben. Diese entsprechen weitgehend dem gewünschten Verhalten. Eine optische Begutachtung der Grenzschicht zwischen Elastomer und FKV war bei diesen Versuchen nicht möglich, da der FKV nicht transparent wird. Die Schliffbilder sind unauffällig und zeigen keine Poren, Ablösungen oder ähnliches. Das Elastomer weist eine leichte Welligkeit auf, da es sich der Struktur der Textilien angepasst hat. Das Spannungs-Dehnungs-Diagramm zeigt ein deutliches Spannungsmaximum beim Beginn des Versagens, an das sich eine Plateauphase anschließt, die schließlich bei weiter ansteigender Dehnung zu einem höheren Spannungsmaximum führt, an das sich das endgültige Versagen mit einem starken Abfall anschließt. Hierbei ist auffällig, dass bei Prepreg 1 deutlich höhere Dehnungen auftreten als bei Prepreg 2, wo allerdings die Spannung zu Versagensbeginn etwas höher ist. Bei der Betrachtung der Bruchflächen ist zu erkennen, dass das Versagen überwiegend kohäsiv im Elastomer erfolgt. Lediglich am Rand der Probe sind Bereiche mit adhäsivem Versagen zu erkennen, insbesondere bei Prepreg 2. Diese sind möglicherweise auf eine leichte Vorschädigung der Probekörper beim Heraussägen aus den Platten zurückzuführen.

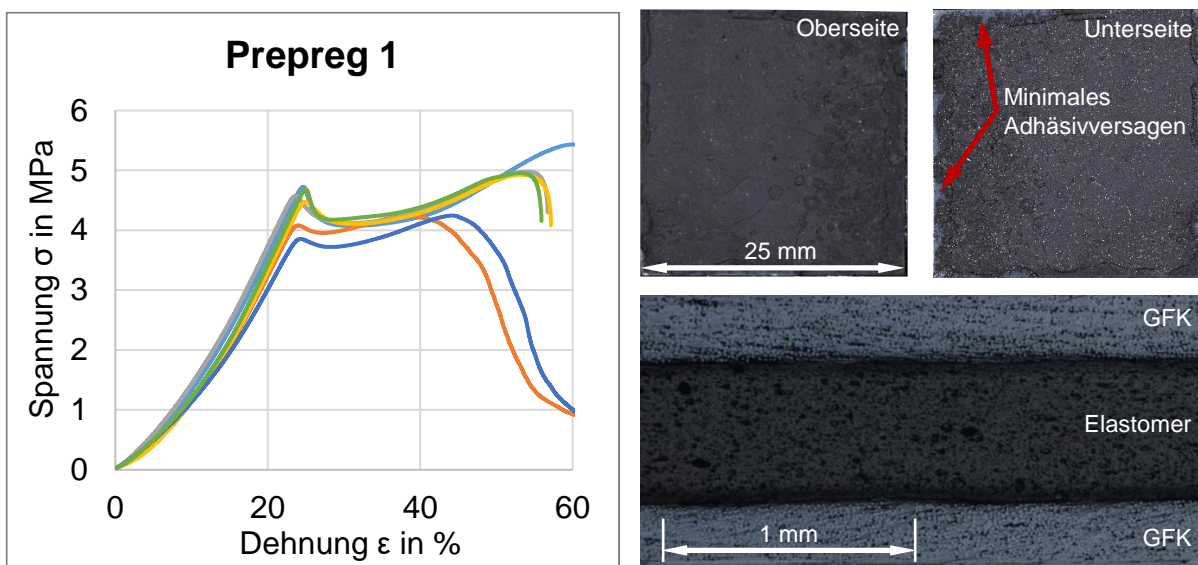


Abbildung 4.8: Zusammenfassung der Ergebnisse der Versuchsreihe Prepreg 1. Spannungs-Dehnungs-Diagramm auf der linken Seite, oben rechts beide Seiten der Bruchfläche, unten rechts Schliffbild.

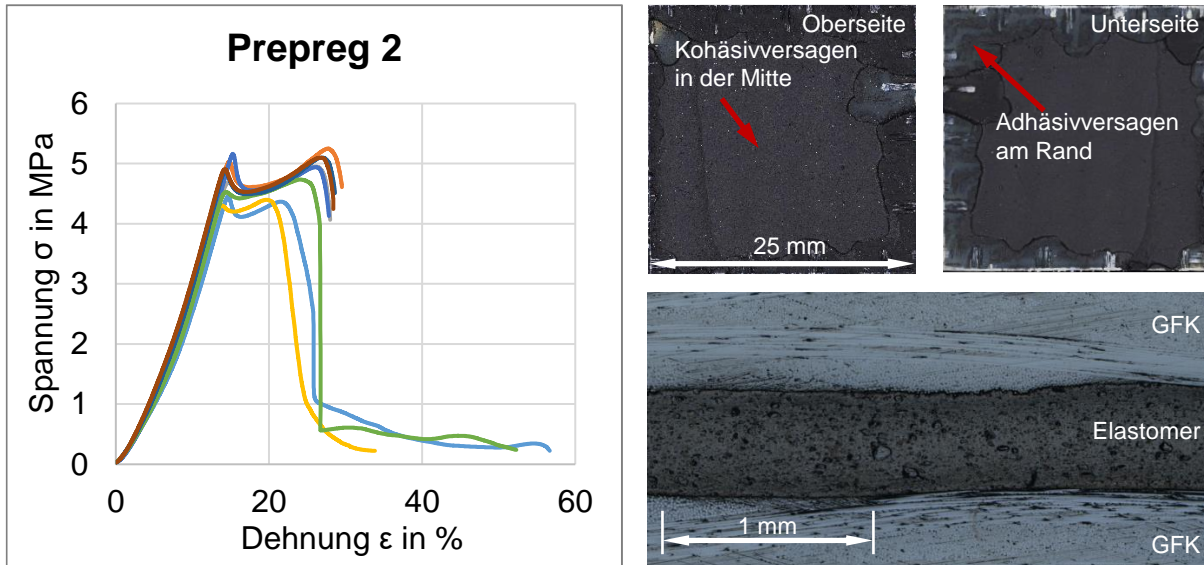


Abbildung 4.9: Zusammenfassung der Ergebnisse der Versuchsreihe Prepreg 2

Isochore Verarbeitung

Betrachtet man die Ergebnisse der im isochoren Werkzeug hergestellten Proben und vergleicht sie mit der Referenz, zeigt sich, dass die Verarbeitungsmethode einen großen Einfluss auf die Materialeigenschaften hat.

Die gemessene Verbindungsfestigkeit, definiert als erstes Maximum der Spannungs-Dehnungs-Kurve, unterscheidet sich kaum zwischen den einzelnen Versuchsreihen und liegt überwiegend im Bereich zwischen 4 und 5 MPa (Abbildung 4.10). Auch die Prepreg-Proben liegen in diesem Bereich. Einzige Ausnahme ist Versuchsreihe 7, bei der die Verbindungsfestigkeit deutlich niedriger liegt. Es wurden überwiegend also höhere Festigkeiten erreicht als beim direkten Aufvulkanisieren des Elastomers auf die Metallklötze (um 4 MPa). Der Datenblattwert des Elastomers (7,9 MPa) wurde, wie erwartet, nicht erreicht. Die starke Ähnlichkeit der gemessenen Verbindungsfestigkeiten ist unerwartet, da das Versagensverhalten und die Menge der Poren/Delaminationen in den Materialien deutlich unterschiedlich sind, wie in den folgenden Abschnitten genauer erläutert wird und in Abbildung 4.11 zu sehen ist. Ob die gemessenen Absolutwerte verlässlich und für eine weitere Analyse sinnvoll sind, muss daher kritisch hinterfragt werden. Um der Ursache dieses Verhaltens auf den Grund zu gehen wurden mechanische Simulationen der Probekörper durchgeführt bei denen sich zeigte, dass

es zu Spannungsspitzen in den Ecken kommt, die möglicherweise als Rissinitiator wirken. Ähnliches tritt laut Literatur jedoch bei den anderen oben vorgestellten Prüfmethoden ebenfalls auf. Da sich in den Spannungs-Dehnungs-Kurven der Versuchsreihen (vgl. Abbildung 4.12) aber deutlich unterscheidbare Versagensmuster zeigen, können die Versuche dennoch zumindest qualitativ für den angestrebten Zweck eines Vergleichs untereinander und zur Referenz genutzt werden.

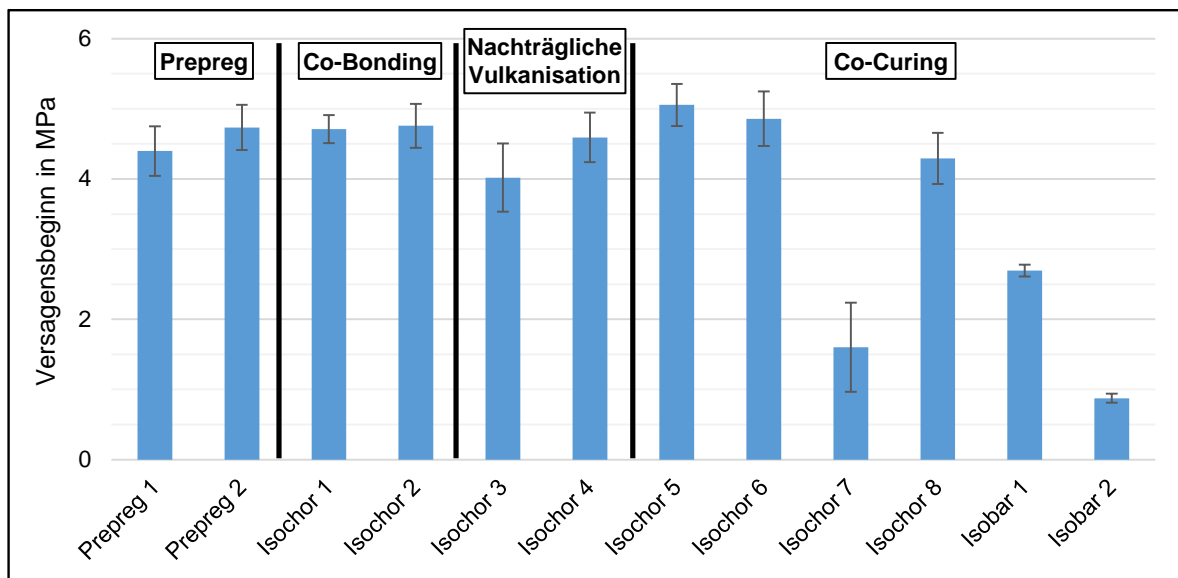


Abbildung 4.10: Vergleich der Verbindungsfestigkeit der verschiedenen Versuchsreihen. Die Fehlerbalken beschreiben jeweils die Standardabweichung

Beim Co-Bonding (Isochor 1 und 2) erfolgte das Versagen vollständig adhäsiv zwischen dem Elastomer und dem FKV. Bis auf zwei Proben bei Isochor 1 erfolgte das Versagen stets abrupt, ohne Spannungsplateau. Es gibt keinen signifikanten Unterschied zwischen den Ergebnissen der beiden Versuchsreihen, sodass die Aushärtungstemperatur des Harzsystems keine Rolle zu spielen scheint. Im Querschnitt ist ein porenfreies, homogenes und flaches Elastomer zu sehen, dass sich nicht der Textilstruktur anpasst, sondern das Textil dem Elastomer. Dies ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass die Vulkanisation vor dem Preforming abgeschlossen war und es dadurch nicht zu einer plastischen Verformung des Elastomers kommen konnte. Der kleine Delaminationsbereich am Rand der RTM-Platte, der im Bild oben links in Abbildung 4.11 zu sehen ist, wurde von der Prüfung ausgeschlossen.

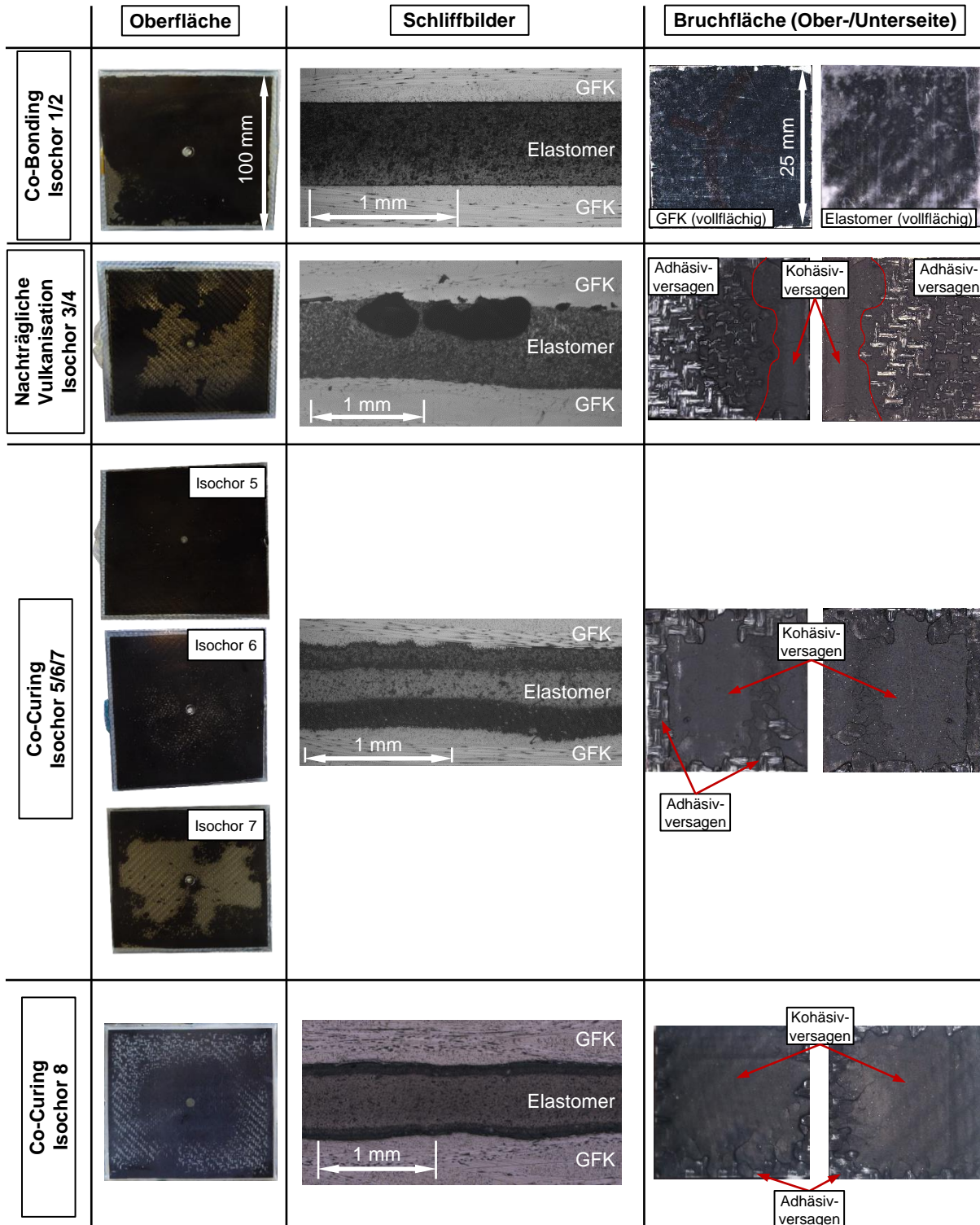
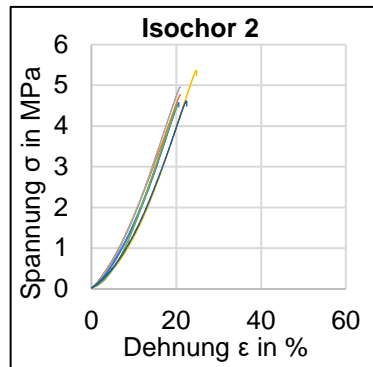
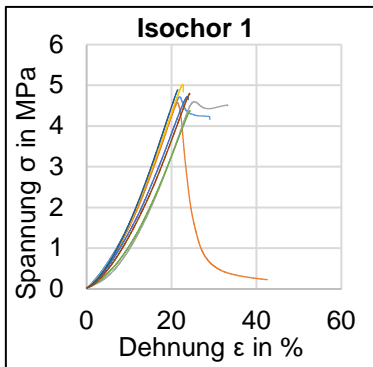
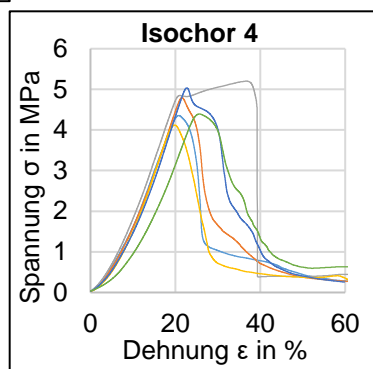
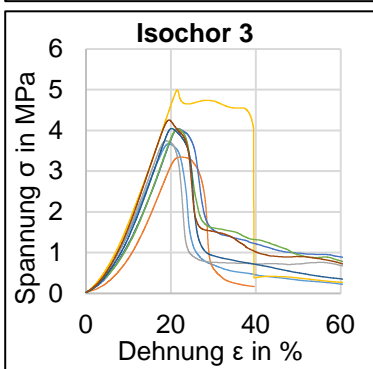


Abbildung 4.11: Ansichten der Plattenoberflächen nach dem RTM Prozess, Schliffbilder und Bruchflächen nach den Stirnabzugsversuchen. Es wurden jeweils repräsentative Aufnahmen gewählt. Bei den Versuchsreihen 5/6/7 sind die Schliffbilder und die Bruchflächen sehr ähnlich, während sich die Oberflächenansichten deutlich unterscheiden.

Co-Bonding



Nachträgliche Vulkanisation



Co-Curing

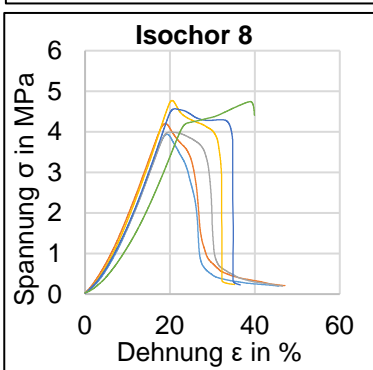
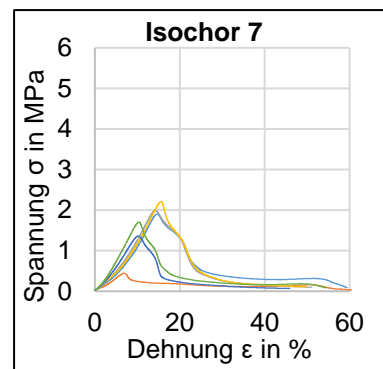
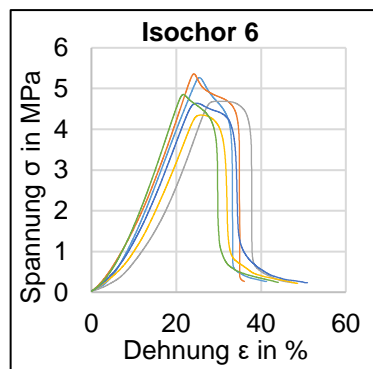
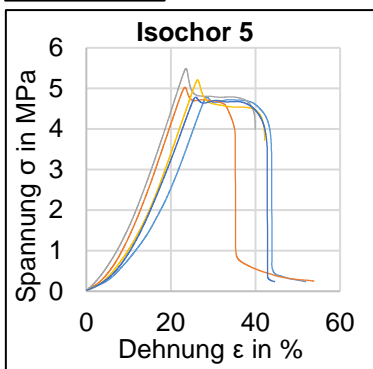


Abbildung 4.12: Spannungs-Dehnungs-Diagramme der Stirnabzugsversuche

Die Imprägnierung mit anschließender Vulkanisation (Isochor 3/4) führt zu einem porösen Elastomer. Außerdem sind über weite Teile der RTM-Platten Delaminationen zwischen Elastomer und FKV sichtbar, sodass der Delaminationsbereich nicht von den mechanischen Prüfungen ausgeschlossen werden konnte. Im Vergleich zu Isochor 3 scheint sich die höhere Vulkanisationstemperatur bei Isochor 4 leicht positiv auf die Verbindungsfestigkeit auszuwirken. Dies ist jedoch aufgrund der Streuung der Messwerte und der angesprochenen Einschränkung des Messverfahrens nicht eindeutig. Die Versagensarten sind gemischt. Insgesamt überwiegt adhäsives Versagen zwischen Elastomer und FKV, einige Proben weisen aber auch Bereiche mit kohäsivem Versagen auf. Im Gegensatz zu den Versuchen mit Co-Bonding (Isochor 1 und 2) verbleibt nach dem ersten Versagen eine gewisse Restfestigkeit, doch gibt es bei den meisten Proben kein ausgeprägtes Plateau. Die Poren im Elastomer sind höchstwahrscheinlich darauf zurückzuführen, dass während der Vulkanisation kein äußerer Druck aufgebracht wurde. Das massive Werkzeug und das ausgehärtete FKV reichen in Verbindung mit der Wärmeausdehnung des Elastomers offensichtlich nicht aus, um genügend Druck aufzubauen, um Porenbildung im Elastomer zu vermeiden. Dies ist möglicherweise auch der Grund für das gemischte Versagensverhalten: In Bereichen ohne Poren erfolgt das Versagen makroskopisch kohäsiv, während das Material scheinbar adhäsiv versagt, wo die Poren die Grenzfläche schwächen.

Die Ergebnisse der Co-Curing Versuche mit *RIM 935/937* und variothermer Prozessführung sind je nach Haltezeit sehr unterschiedlich. Isochor 5 mit der kürzesten Haltezeit liefert die vielversprechendsten Ergebnisse. Die Spannungs-Dehnungs-Kurve weist ein deutliches Plateau auf, und das Versagen erfolgt überwiegend kohäsiv. Während bei Isochor 5 nur minimale Delamination zwischen Elastomer und FKV auftreten, wird dies bei Isochor 6 und insbesondere Isochor 7 deutlicher. Während das Versagen bei Isochor 5 und 6 überwiegend kohäsiv im Elastomer erfolgt, weist Isochor 7 überwiegend adhäsives Versagen auf. Die Schliffbilder zeigen, dass das Elastomer in allen drei Versuchsreihen porenfrei ist, aber die Farbe variiert über die Dicke, was zu drei deutlich unterscheidbaren Schichten im Inneren des Elastomers führt. Dies ist vermutlich auf die Nutzung von Luft zur Druckerzeugung zurückzuführen, die, wie im Stand der Technik beschrieben, bei peroxidvernetzenden Elastomersystemen die Vulkanisation inhibiert, was insbesondere bei Isochor 7 (1,6 MPa) auffällig ist, die am längsten der Luft ausgesetzt war, bevor das Harzsystem injiziert wurde.

Der modifizierte Co-Curing Prozess in Versuchsreihe 8 zeigt ein gemischtes Resultat. Durch die Verwendung von Stickstoff zur Druckbeaufschlagung konnten Oxidationseffekte vermieden werden. Es waren auch keine makroskopischen Poren zu beobachten. Während die Mitte der Platte einwandfrei aussieht, zeigen sich im äußeren Bereich Fehlstellen, die jedoch anders aussehen als bei den vorherigen Versuchen. Es handelt sich eher um punktuelle als um flächige Fehlstellen. Um dieses ungewöhnliche Aussehen der RTM-Platte besser zu verstehen, wurde ein Stück der Platte mittels Mikrocomputertomographie (μ CT) untersucht. Abbildung 4.13 zeigt einen Ausschnitt der μ CT-Aufnahme im Bereich der Grenzschicht zwischen Elastomer und FKV. Es zeigt sich, dass es sich bei den beobachteten Fehlstellen um mikroskopisch kleine Poren (ca. 10 – 200 μ m) handelt.

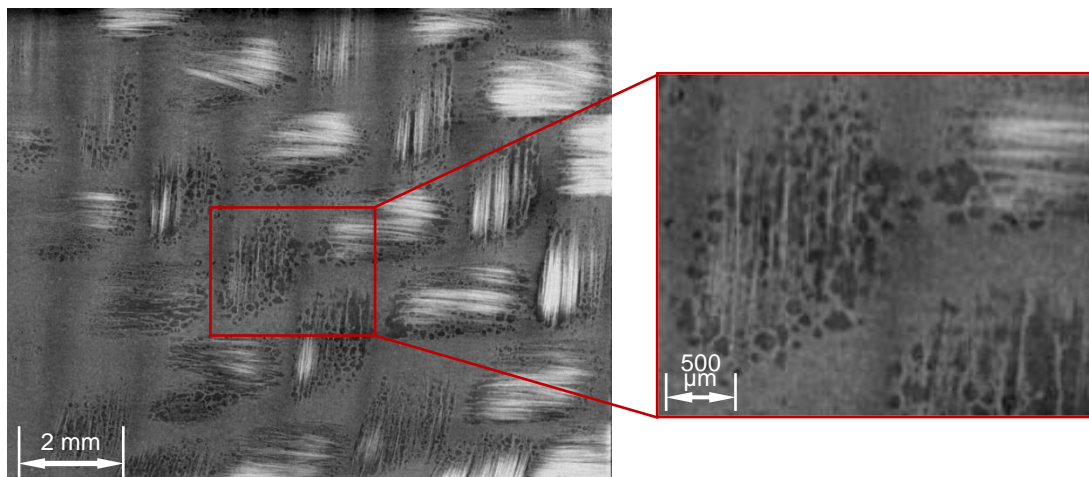


Abbildung 4.13: μ CT-Aufnahme der Fehlstellen aus Isochor 8. Dargestellt ist die Grenzschicht zwischen Elastomer und FKV.

Wie diese Mikroporen entstanden sind, konnte zunächst nicht ermittelt werden. Zu Beginn wurde angenommen, dass die schnelle Imprägnierung etwas Stickstoff eingeschlossen haben könnte oder dass es sich, wie bei Isochor 3 und 4, um Elastomerporen durch zu geringen Druck während der Vulkanisation handelt. Die Tatsache, dass diese Poren jedoch nur in der Grenzfläche zwischen dem Elastomer und dem FKV zu finden sind und dass sie sich eher am äußeren Rand der Platte befinden, sprach jedoch gegen diese Theorien.

Glaswerkzeug

Um die bei Isochor 8 entstandenen Poren genauer verstehen zu können, wurde der Versuch im Glaswerkzeug durchgeführt. Dem lag die Vermutung zu Grunde, dass das Schrumpfen des Epoxidharzes bei der Aushärtung zu einer punktuellen Ablösung führen könnte. Insbesondere sollte mit dem Versuch überprüft werden, ob die Poren schon beim Aushärten des Harzes oder erst später, z. B. durch die fortschreitende Vulkanisation oder die Abkühlung des Werkzeugs am Prozessende entstehen. Abbildung 4.14 zeigt die Aufnahmen der Kamera im Zeitverlauf. Ca. 5 s nach Öffnen des Injektionsschlauchs erreicht das Harzsystem die Preform und beginnt diese von außen nach innen zu imprägnieren. Im Bild, das nach 7 s aufgenommen wurde, ist gut die Fließfront im Textil zu erkennen, die von allen Seiten in die Preform eindringt. Daher wurde in diesem Moment der Auslass geschlossen. Im bereits imprägnierten Bereich scheint die schwarze, zu diesem Zeitpunkt teilvulkanisierte Elastomerschicht durch das Textil durch. Nach 120 s ist die Preform nahezu vollständig imprägniert und zeigt ein homogenes Erscheinungsbild. Lediglich in der Mitte der Preform zeigt sich durch eine weißliche Verfärbung, dass die Imprägnierung hier, wie erwartet, nicht vollständig stattfinden konnte. Das Harzsystem ist zu diesem Zeitpunkt, aufgrund der hohen Temperatur des Werkzeugs (120 °C), nicht mehr fließfähig. Außerhalb der Preform ist eine kleine Pore zu erkennen, was in den reinen Kunststoffbereichen am Rand von Harzinjektionen nicht ungewöhnlich ist. Nach 500 s, während die vollständige Vernetzung des Epoxidharzes läuft, sind weitere Poren im reinen Kunststoff zu erkennen. Die ursprüngliche Pore ist zudem gewachsen, was auf den Schrumpf des Kunststoffs während der Polymerisation zurückzuführen ist. Nach ca. 570 s zeigen sich jedoch plötzlich auch Fehlstellen auf der Preform, die sich innerhalb von gut 40 s auf einen Großteil der Fläche ausbreiten und den Poren/Ablösungen bei Isochor 8 sehr ähnlichsehen. Es ist somit sehr wahrscheinlich, dass es sich bei den beobachteten Fehlstellen um eine Folge des Harzschrumpfes handelt und die Verbindungsfestigkeit zwischen teilvulkanisiertem Elastomer und Kunststoff zu diesem Zeitpunkt nicht ausreicht, um deren Bildung zu verhindern. Insbesondere kann damit ausgeschlossen werden, dass die spätere Abkühlung oder Schäden beim Entnehmen des FKV aus dem Injektionswerkzeug Ursache der beobachteten Fehlstellen ist.

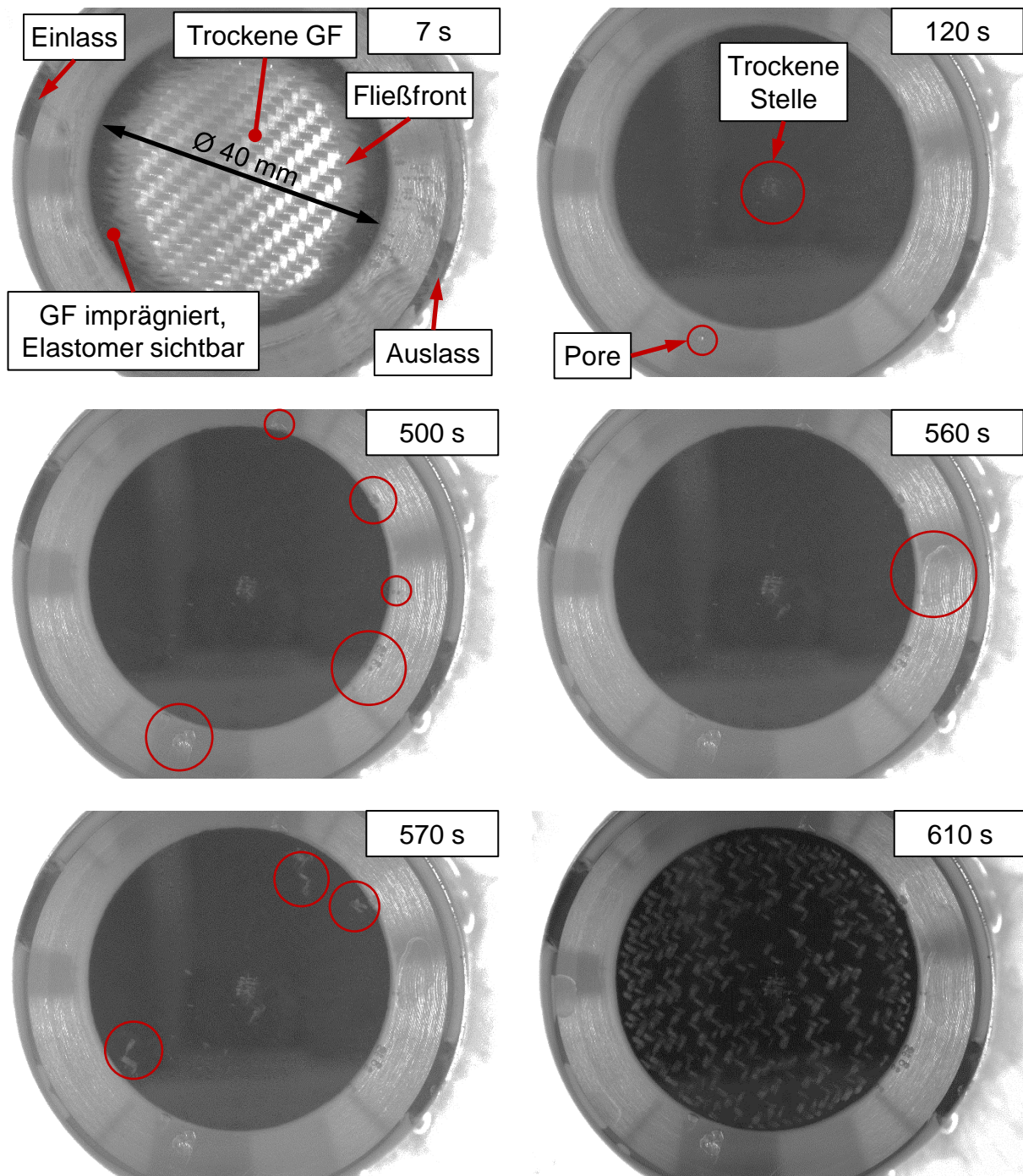


Abbildung 4.14: Zeitverlauf der Injektion im Glaswerkzeug, mit sichtbarer Bildung von Poren und Ablösungen. Die Zeitangabe bezieht sich auf den Beginn der Harzinjektion.

Isobare Verarbeitung

Trotz der aufgrund der Vorversuche auf 110 °C reduzierten Verarbeitungstemperatur und dem Wechsel des Textils bei Isobar 2 gelang es im isobaren Prozess nicht, die Preforms vollständig zu imprägnieren, wie in Abbildung 4.15 zu erkennen ist. Hierdurch kann man bei Isobar 1 allerdings gut erkennen, dass die Permeabilität im verwendeten Gewebe stark anisotrop ist, was einen erheblichen Einfluss darauf hat, welche Bereiche der Preform bei einem Punktanguss imprägniert werden und wo trockene Stellen entstehen können. Hierdurch zeigt sich auch die Notwendigkeit einer Perforation des Elastomers und eines flächigen Harzangusses, wenn die Bauteile eine gewisse Größe überschreiten, welche wiederum von der Aushärtengeschwindigkeit und der Fließgeschwindigkeit des Harzsystems im Textil abhängt.

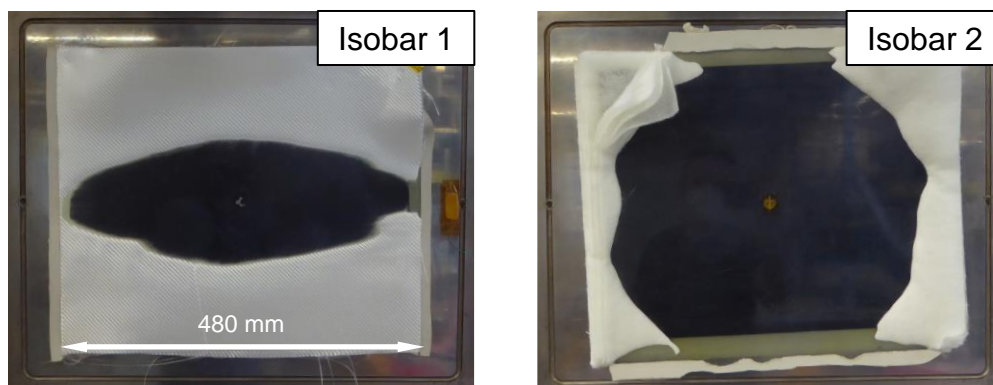


Abbildung 4.15: Platten von Isobar 1 und 2 nach dem Prozessende im geöffneten Werkzeugträger

Anders als bei den meisten anderen Versuchen wirken die vollständig imprägnierten Bereiche homogen und es gibt keine von außen erkennbaren Fehlstellen. Aus diesem Grund wurden auch gute Festigkeiten erwartet. Dies hat sich jedoch nicht bestätigt, wie in Abbildung 4.16 und Abbildung 4.17 zu erkennen ist. Die Spannungen bei Versagensbeginn liegen deutlich niedriger als bei den anderen Versuchsreihen. Lediglich Isochor 7 versagt früher als Isobar 1, Isobar 2 zeigt die geringsten Werte überhaupt (vgl. auch Abbildung 4.10).

Der Spannungsverlauf über die Dehnung entspricht bei Isobar 1 eigentlich dem gewünschten Verhalten. Wie bei den Prepregversuchen zeigt sich ein deutliches Nachversagensverhalten. Dennoch kommt es überwiegend zu adhäsivem Versagen zwischen Elastomer und FKV. Die Schliffbilder sind unauffällig. Weder sind Poren zu erkennen, noch eine deutliche Farbdifferenzierung im Elastomer wie bei Isochor 5, 6 und 7. Dennoch liegt die Vermutung nahe, dass die im Textil eingeschlossene Luft die Vulkanisation inhibiert und für die niedrige Versagensspannung verantwortlich ist.

Bei Isobar 2 zeigen sich durch den Wechsel von einem Gewebe auf einen Vliesstoff ein neuer, unerwarteter Effekt, der wahrscheinlich die Ursache für die sehr geringe Versagensspannung ist: Es gibt keine abgrenzbare Reinelastomerschicht mehr. Das Textil drückt sich in das Elastomer hinein, im Schliffbild lassen sich keine Einzelschichten mehr erkennen und auch bei Betrachtung der Bruchfläche ist keine Unterscheidung zwischen adhäsivem und kohäsivem Versagen möglich, da das Elastomer komplett von Fasern durchzogen ist. Es ist im mittleren Bereich der Platte gewissermaßen ein FKV mit Elastomermatrix entstanden. Bei einem derartigen Verbundwerkstoff treten jedoch andere Phänomene auf als bei einem Werkstoffverbund zwischen glasfaserverstärktem Kunststoff und Elastomer. Unter anderem müssten die Fasern entsprechend behandelt sein, um eine gute Haftung zum Elastomer erreichen zu können.

Zusätzlich zeigen sich im Elastomer zahlreiche Poren. Diese können durch zwei Mechanismen entstehen, die vermutlich zusammenwirken: Das Elastomer hat auch in seiner Verarbeitungsphase (bis zum Erreichen von t_{10}) eine um Größenordnungen höhere Viskosität als das Harzsystem. Dadurch können die Fasern zwar ins Elastomer gedrückt werden, das Elastomer umschließt aber nicht unbedingt jede Einzelfaser komplett und so können abgeschlossene Hohlräume entstehen, die bei der späteren Harzinjektion nicht gefüllt werden. Der zweite Mechanismus beruht auf dem angelegten Vakuum, um eine sauerstofffreie Verarbeitung zu ermöglichen. Durch die isobare Verarbeitung sollte erreicht werden, dass der Druck auf die Elastomerschicht unabhängig vom Fluidruck vor und während der Injektion (und damit auch einem Vakuum) oder vom Matrixschumpf erhalten bleibt. Dies funktioniert jedoch nur, wenn das Elastomer von beiden Seiten komprimiert wird, wie dies bei Isobar 1 der Fall ist, da das Elastomer kaum ins Gewebe eindringt. Bei Isobar 2 wirkt jedoch kein äußerer Druck auf die Elastomerschicht mehr, da die Glasfasern die Kräfte aufnehmen können.

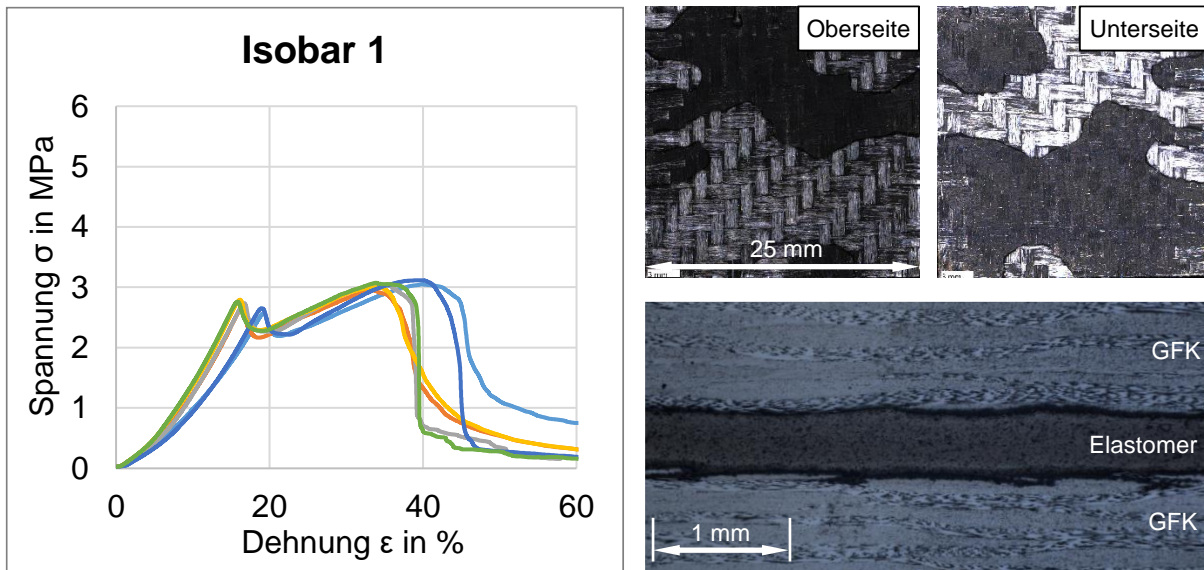


Abbildung 4.16: Zusammenfassung der Ergebnisse der Versuchsreihe Isobar 1. Spannungs-Dehnungs-Diagramm auf der linken Seite, oben rechts beide Seiten der Bruchfläche, unten rechts Schraffurbild.

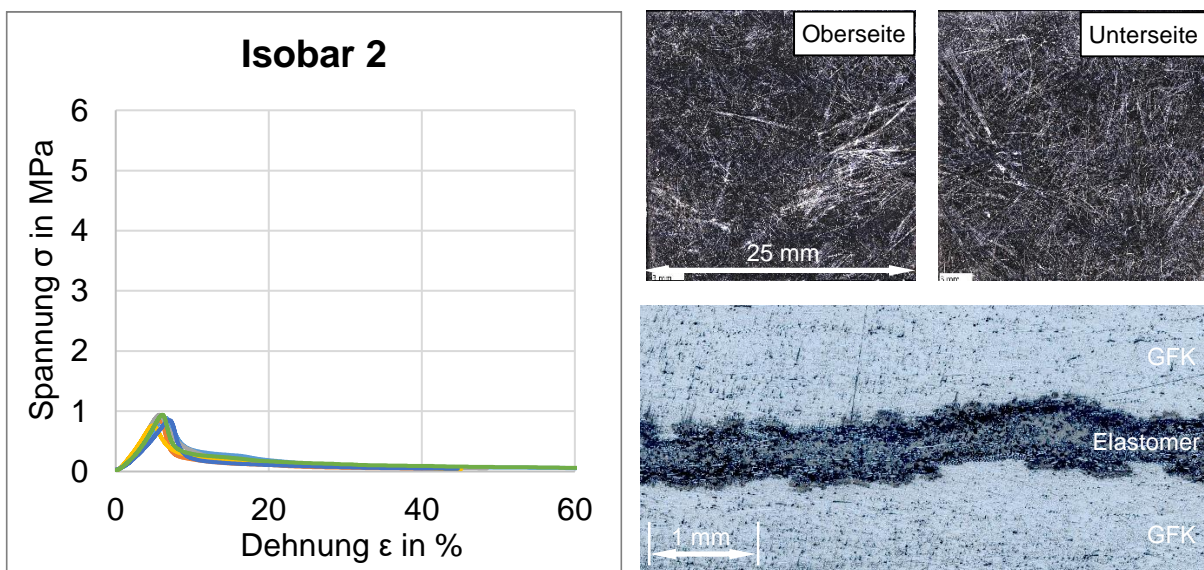


Abbildung 4.17: Zusammenfassung der Ergebnisse der Versuchsreihe Isobar 2. Spannungs-Dehnungs-Diagramm auf der linken Seite, oben rechts beide Seiten der Bruchfläche, unten rechts Schraffurbild.

4.4 Zwischenfazit zu den Verarbeitungsversuchen

Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass eine Produktion von flächigen, kontinuierlich faserverstärkten FKV mit Duroplastmatrix und interlaminaren Elastomerschichten grundsätzlich möglich ist. Mit den verfügbaren Materialien konnten jedoch keine komplett zufriedenstellenden Ergebnisse erreicht werden. Hierfür gibt es im Wesentlichen drei Gründe:

- Der erforderliche Druck auf die Kautschukmischung während der Vulkanisation
- Die Sauerstoffempfindlichkeit von Elastomersystemen mit Peroxidvernetzung
- Der große Unterschied zwischen Vulkanisationszeit der Kautschukmischung und der Aushärtezeit der verwendeten Harzsysteme bei gleicher Temperatur

Co-Bonding kann für Bauteile mit untergeordneter Bedeutung bereits mit den vorhandenen Materialien eine sinnvolle Lösung sein. Es traten hierbei keine relevanten Verarbeitungshindernisse auf und da Vulkanisation und Harzprägnierung vollständig voneinander getrennt sind und somit unter jeweils optimalen Bedingungen durchgeführt werden können, ist eine wirtschaftliche und reproduzierbare Fertigung möglich. Allerdings zeigen die durchgeführten Versuche ein schlagartiges Versagen zwischen Elastomer und FKV, was für strukturelle Anwendungen unvorteilhaft ist.

Ein Prozessablauf mit nachträglicher Vulkanisation erscheint bei einem peroxidvernetzenden Elastomer, wie es hier verwendet wurde, wenig sinnvoll. Bei den durchgeführten Versuchen kam es zu starker Porenbildung im Elastomer, da infolge des Harzschrumpfes während der Harzaushärtung zum Zeitpunkt der Vulkanisation kein externer Druck mehr auf das Elastomer ausgeübt wird. Zudem ist das Verfahren wirtschaftlich unattraktiv, da eine lange Gesamtprozesszeit benötigt wird und in dieser Zeit das Injektionswerkzeug nicht anderweitig genutzt werden kann.

Co-Curing ist für strukturelle Anwendungen prinzipiell vielversprechend, aufgrund der oben genannten Gründe aber auch herausfordernd und mit den aktuellen Materialien nicht zufriedenstellend durchzuführen. Eine Druckbeaufschlagung mit Inertgas in einem isochoren Injektionswerkzeug erwies sich als nur bedingt sinnvoll. Zwar konnte hierdurch unerwünschter Sauerstoffzutritt verhindert werden, da das Harzsystem aber erheblich schneller aushärtet und dabei schrumpft, als die Kautschukmischung vulkanisiert, geht der benötigte Druck verloren und es bilden sich Ablösungen zwischen Elastomer und FKV.

Bei den isobaren Versuchen zeigt sich ein differenziertes Bild. Bei der Nutzung von Gewebe als Verstärkungstextil konnten Ablösungen zwischen Elastomer und FKV sowie Poren im Elastomer durch den isobaren Prozess verhindert werden. Diese Prozessvariante könnte daher großes Potential haben. Dennoch war die erreichte Verbindungsfestigkeit nicht gut, was sich wahrscheinlich auf die Sauerstoffempfindlichkeit der Vulkanisation zurückführen lässt und angepasste Anlagentechnik und Injektionswerkzeuge für eine sauerstofffreie Verarbeitung erfordert. Die Nutzung eines Vliesstoffs als Verstärkungsmaterial direkt angrenzend an das Elastomer ist nicht sinnvoll.

Die Nutzung eines schwefelvernetzenden statt eines peroxidvernetzenden Kautschuksystems würde die Sauerstoffempfindlichkeit und den benötigten Vulkanisationsdruck reduzieren und könnte dadurch die Verarbeitung vereinfachen. Dabei sind jedoch auch die Nachteile schwefelvernetzender Systeme zu berücksichtigen, insbesondere die geringere Vernetzungsdichte bei Kautschuken mit geringem Doppelbindungsanteil (wie das bisher genutzte EPDM) und die längere Prozessdauer [11]. Für LCM-Verfahren, bei denen prinzipbedingt kein Überdruck möglich ist (beispielsweise VARI), sollte dies dennoch in Erwägung gezogen werden.

Im Sinne einer bestmöglichen Verbindung zwischen Harz und Elastomer wäre es vorteilhaft, für die Injektion ein Harzsystem zu nutzen, das bei der Aushärtung ein ähnliches Temperatur-/Zeitverhalten zeigt wie das Elastomer. Viele Prepregharzsysteme erfüllen diese Vorgabe, sind aufgrund ihrer hohen Viskosität aber nicht für Flüssigimprägnierverfahren geeignet. Im Rahmen von Vorversuchen wurde eine Kombination von *RIM 935* mit dem pulverförmigen Hochtemperaturhärter Dicyandiamid (DICY) getestet, der auch für Prepregs verwendet wird. Hiermit konnte das gewünschte Temperatur-/Zeitverhalten und eine akzeptable Viskosität erreicht werden. Der Schmelzpunkt von DICY liegt aber bei ca. 210 °C [118], sodass es im Temperaturfenster der Vulkanisation der verwendeten Kautschukmischung pulverförmig bleibt. Das Verstärkungstextil wirkt bei der Harzinjektion dann wie ein Filter, der das Eindringen der Härterpartikel behindert, sodass lediglich wenige Millimeter der Preform imprägniert werden konnten. Alternative Härter sind denkbar, beispielsweise auf Basis ionischer Flüssigkeiten, erfordern aber umfangreichere Entwicklungsarbeit.

5 Perforation der interlaminaeren Schicht

In diesem Kapitel wird beschrieben, welchen Einfluss das Einbringen einer perforierten Schicht in eine textile Preform auf die Durchströmbarkeit hat. Die Basis hierfür bilden experimentelle Untersuchungen, die durch Strömungssimulationen ergänzt werden.

5.1 Experimentelle Untersuchungen zur Perforation

5.1.1 Festlegung des Versuchsraums

Die Kautschukmischung wurde vor den Versuchen nicht vulkanisiert, da die Versuche zur Verarbeitung gezeigt haben, dass Co-Curing für strukturelle Anwendungen prinzipiell die vielversprechendste Strategie ist.

Zur praktischen Durchführung der Perforation wurden Stanzmesser verwendet. Hiermit konnten minimale Lochdurchmesser von 2,0 mm realisiert werden. Kleinere Stanzmesser (1,5 mm, 1,0 mm und 0,8 mm) wurden getestet, aber diese wurden durch die plastische Verformung der Kautschukmischung beim Stanzen verstopft. Deutlich kleinere Lochdurchmesser könnten durch Laserperforation erreicht werden. Beispielsweise nennt die Firma *MLT - Micro Laser Technology GmbH*, die Laserperforationsanlagen für das Verpackungswesen herstellt, auf ihrer Website realisierbare Lochdurchmesser zwischen 40 μm und 800 μm [119]. Derart kleine Löcher erscheinen jedoch aus zwei Gründen für die geplante Anwendung nicht sinnvoll: Zum einen ist aufgrund des Gesetzes von Hagen-Poiseuille zu erwarten, dass bei Lochdurchmessern in der Größenordnung der Schichtdicke der Kautschukmischung (0,5 mm) die Durchströmbarkeit wieder schlechter wird. Zum anderen ist die Kautschukmischung plastisch verformbar und wird durch die Kompaktierung beim Schließen des Injektionswerkzeugs zumindest geringfügig komprimiert. Hierdurch ist zu erwarten, dass es zu einer Verkleinerung des Lochdurchmessers kommt und bei besonders kleinen Löchern möglicherweise auch zu einem vollständigen Verschluss, sodass gar keine Durchströmung mehr stattfinden kann. Als maximaler Lochdurchmesser wurde aufgrund der vorherigen Erfahrungen bei HyRoS [100, 101] und Halimi et al. [99] 4,0 mm genutzt.

Die minimal möglichen Bedeckungsgrade sind im Stand der Technik hergeleitet (vgl. Formel (2.7) bis (2.9)). Praktisch sinnvoll sind Bedeckungsgrade in der Nähe des Minimums für interlaminaere Schichten aber nicht. Zum einen wird das Material durch die

dünnen Stege zwischen den Löchern dann sehr empfindlich gegenüber Beschädigungen bei der Handhabung. Zum anderen soll die interlaminaere Schicht in der praktischen Anwendung einen Zweck erfüllen, beispielsweise Impactschutz oder Geräuschdämmung, der in der Regel durch die Perforation geschmälert werden wird. Sehr hohe Bedeckungsgrade führen hingegen zu sehr großen Einheitszellen (vgl. Abbildung 5.1), sodass die Gefahr besteht, dass die Fließwege in der Ebene zu lang werden und das Harzsystem aushärtet, bevor es das ganze Material tränken konnte, was auch bei Halimi et al. [99], in Vorversuchen des HyRoS Projekts [100, 101] und bei den durchgeführten isobaren Verarbeitungsversuchen (vgl. Kapitel 4.3) beobachtet werden konnte. Auf Basis dieser Erfahrungen und Überlegungen wurde der zu untersuchende Bedeckungsgradbereich auf 85 % bis 98 % festgelegt. Die Anordnung der Perforation erfolgt in einem quadratischen Muster und die perforierte Kautschukmischung wird mittig in den Textilstapel eingebracht.

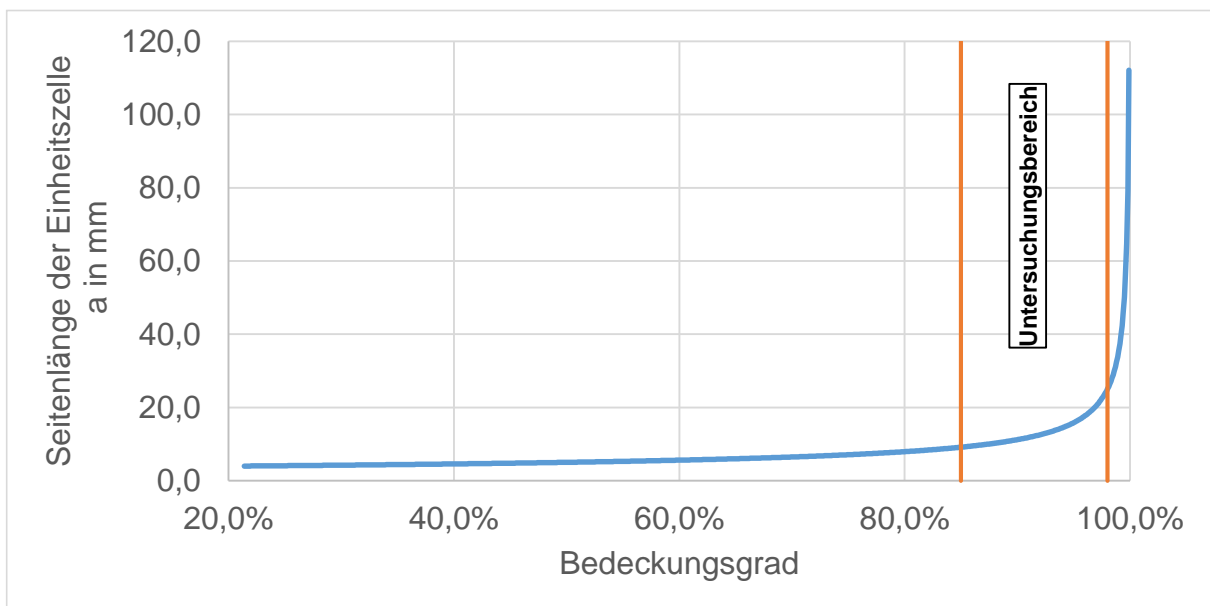


Abbildung 5.1: Seitenlänge der Einheitszelle a in Abhängigkeit vom Bedeckungsgrad für ein quadratisches Perforationsmuster mit 4,0 mm Lochdurchmesser. Darstellung vom minimalen Bedeckungsgrad (21,4 %) bis 99,9 %.

5.1.2 Versuchsdurchfuehrung

Auswahl der MessgröÙe

Als MessgröÙe zur Bewertung der Durchströmbbarkeit kommen grundsätzlich mehrere Möglichkeiten in Frage. Bei der Durchströpfung von Lochblenden wird üblicherweise die Differenz des Totaldrucks vor und hinter der Blende als MessgröÙe verwendet (vgl. Kapitel 2.4.2). Alternativ kann der sich einstellende Massen- oder Volumenstrom bei einem gegebenen Eingangsdruck verwendet werden.

Bei der Durchströpfung von porösen Medien wird hingegen üblicherweise die Permeabilität nach dem Gesetz von Darcy verwendet, vgl. Kapitel 2.3.1. Da bei der vorliegenden Fragestellung alle Randbedingungen zur Verwendung des Gesetzes von Darcy vorliegen, wird auch hier die Permeabilität als MessgröÙe zu Grunde gelegt.

Dickenpermeabilitätsmessung

Zur Dickenpermeabilitätsmessung kam die im Stand der Technik beschriebene Messzelle „HyKoPerm“ zum Einsatz. Da sowohl für Einstellungen der Messzelle, als auch für die darin eingelegte Preform, zahlreiche Varianten denkbar sind, soll zunächst erläutert werden, wie die genutzte Konfiguration ausgewählt wurde.

Die Basis der Dickenpermeabilitätsmessung ist wie beschrieben das Gesetz von Darcy, vgl. Formel (2.2). Für den Faservolumengehalt einer reinen Textilpreform (ohne interlaminaere Zwischenschicht), welcher starken Einfluss auf die Permeabilität hat, gilt zudem:

$$FVG = \frac{n * \bar{m}}{\rho_{Faser} * h} \quad (5.1)$$

Die Lagenanzahl n , die Kavitätshöhe h , die Dichte der Fasern ρ_{Faser} und die flächenbezogenen Masse des Textils \bar{m} können demnach nicht unabhängig voneinander verändert werden.

Durch das Messsystem und die Auswahl von Textil und Messfluid sind einige der Parameter bereits festgelegt. Für andere bestehen Begrenzungen aufgrund der Beschränkungen des Messsystems. Tabelle 5.1 zeigt einen entsprechenden Überblick.

Tabelle 5.1: Relevante Parameter der Dickenpermeabilitätsmessung mit möglichem Wertebereich und Erläuterung des Wertebereichs

Parameter	Technisch möglicher Bereich	Erläuterung für Bereichsgrenzen
Volumenstrom Q	ca. 35 – 1500 ml/min	Messbereich des Volumenstromsensors
Druckdifferenz Δp	ca. 0,5 – 6 bar	Der tatsächlich auftretende Druckverlust ist abhängig vom Fließwiderstand der Preform und dem angelegten Injektionsdruck, der maximal 6 bar betragen kann.
Fläche A	$\approx 960 \text{ cm}^2$	Festgelegt durch die Kavität der Messzelle
Viskosität η	um 60 mPa*s	Viskosität des Rapsöls bei 24 °C: Änderungen durch abweichende Messtemperatur sind berücksichtigt.
Kavitätshöhe ⁴ h	ca. 2 – 5 mm, in 0,05 mm Schritten	Erfahrungswerte, und auch realistische Bauteildicken. Kleine Kavitätshöhen erhöhen die Streuung der Messwerte, da Abweichungen prozentual stärkeren Einfluss haben. Größere Kavitätshöhen können zu Schwierigkeiten bei der Abdichtung der Messzelle führen.
Faservolumengehalt FVG	ca. 46 – 60 %	Sinnvoller Wertebereich für das ausgewählte Textil [81].
Lagenanzahl n	> 3	Eine zu geringe Lagenanzahl führt erfahrungsgemäß zu großen Streuungen der Messwerte, da minimale Abweichungen in der Textilstruktur großen Einfluss auf die gemessene Permeabilität haben.
flächenbezogene Textilmasse \bar{m}	444 g/m ²	Festgelegt durch Textilauswahl
Dichte der Fasern ρ_{Faser}	2,55 g/cm ³	Festgelegt durch Textilauswahl

Bei der Festlegung der Parameter musste zudem bedacht werden, dass neben den Messungen mit perforierten Schichten auch Referenzmessungen ohne interlaminaere Schicht durchgeführt werden sollten. Damit diese miteinander vergleichbar sind, muss der FVG in den Textilbereichen der Preform identisch sein. Das bedeutet, dass die Kavitätshöhe bei Versuchen mit interlaminaerer Zwischenschicht um die Dicke der Zwischenschicht erhöht werden muss. Die Nenndicke liegt bei 0,50 mm. Tatsächlich gemessen wurden Dicken zwischen 0,51 und 0,59 mm. Daher wurde der Mittelwert der Messungen (0,55 mm) für die Berechnung der Kavitätshöhen zu Grunde gelegt. Zwar wird es, wie oben beschrieben, zu einem gewissen Einpressen des Textils in die Kaut-

⁴ Die Kavitätshöhe h entspricht in diesem Fall der durchströmten Länge ΔL im Gesetz von Darcy

schukmischung kommen, die Schliffbilder bei den Verarbeitungsversuchen zeigen allerdings, dass dieser Effekt gering ist. Zudem ist er bei allen Messungen mit interlaminarer Schicht gleich, da stets die gleiche Kavitätshöhe und Lagenanzahl des Textils verwendet wird, sodass die Messungen untereinander vergleichbar sind. Zusätzlich können durch den Einfluss der hydrodynamischen Kompaktierung auf den FVG nur Messpunkte verglichen werden, bei denen der gleiche Druckverlust vorliegt.

Basierend auf den beschriebenen Randbedingungen wurden Vorversuche durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass die Dickenpermeabilität bei den Proben ohne interlaminare Schicht teilweise mehr als eine Dekade höher liegt als bei Proben mit. Es war daher eine Herausforderung, Kavitätshöhe h , Faservolumengehalt FVG und Lagenanzahl n so zu wählen, dass der Volumenstrom bei allen Versuchen im zulässigen Messbereich blieb. Die Druckdifferenz in den eigentlichen Versuchen wurde bewusst niedrig gewählt (0,5 bar). Hiermit sollte die hydrodynamische Komprimierung des Lagenaufbaus geringgehalten werden. Für die Auswahl der Lagenanzahl und der Kavitätshöhe war neben dem erforderlichen Fließwiderstand auch die Überlegung relevant, dass nicht zu wenige Lagen zwischen dem Einlauf der Messzelle und der perforierten Schicht liegen sollten, um eine Beeinflussung des Strömungsbildes durch Interferenzeffekte der beiden Lochmuster zu minimieren. Becker [79] zeigte, dass man für die Lochplatten der Messzelle nach ca. 1 mm Fließstrecke im Textil davon ausgehen kann, dass sich die Strömung homogenisiert hat. Dies würde eine Mindestkavitätshöhe von 2 mm zuzüglich der Dicke der interlaminaren Schicht ergeben. Zur Sicherheit, wurde hier nochmal ein Zuschlag angesetzt und eine Kavitätshöhe von 4,00 mm für die Versuche mit und 3,45 mm für die Versuche ohne perforierte Schicht gewählt.

Tabelle 5.2: Gewählte Parameter für die Dickenpermeabilitätsmessung

Parameter	Wert ohne interlaminare Schicht	Wert mit interlaminarer Schicht
Druckdifferenz Δp	0,5 bar	0,5 bar
Kavitätshöhe h	3,45 mm	4,00 ⁵ mm
Faservolumengehalt FVG	50,5 %	50,5 %
Lagenanzahl n	10	10 + mittige Elastomerschicht

⁵ Um in den Textilbereichen den gleichen Faservolumengehalt zu erreichen wie bei den Proben ohne interlaminare Schicht, muss die Kavitätshöhe um die Dicke des Elastomers erhöht werden.

Perforation

Da für die Untersuchung der Perforationsparameter auf die Permeabilität eine Vielzahl an unterschiedlichen Perforationsvarianten zu fertigen war, erwies sich eine manuelle Fertigung am sinnvollsten. Hierzu wurden die benötigten Muster als Zeichnungen in einem CAD-Programm erstellt, in Originalgröße ausgedruckt und als Schablonen auf der Kautschukmischung fixiert. Die Löcher wurden dann mittels Lochstanzen und einem Hammer eingebracht. Hierbei kamen Lochstanzen der Firma *WWR Zerspanungstechnik GmbH* zum Einsatz. Es gibt eine Vielzahl von unterschiedlichen Varianten von Lochstanzen, die je nach Einsatzzweck gewählt werden können. Ein wesentlicher Unterschied ist, ob die Lochstanze über eine Innen- oder Außenfase verfügt. In dieser Arbeit wurden Lochstanzen vom Typ 6D, mit Außenfase und einer seitlichen Entleerungsöffnung und vom Typ 7A, mit Innenfase und Federauswerfer, genutzt (vgl. Abbildung 5.2). Der Grund für die Nutzung dieser zwei Arten von Lochstanzen war, dass die Lochstanzen mit Außenfase aufgrund ihrer seitlichen Entleerung weniger leicht verstopfen und der Stanzrest nicht an der ursprünglichen Stelle liegen bleibt. Bei den Lochstanzen mit Innenfase und Auswerfer wurde dafür aufgrund der zylindrischen Außenkontur ein genaueres Einhalten des gewünschten Lochdurchmessers erwartet.

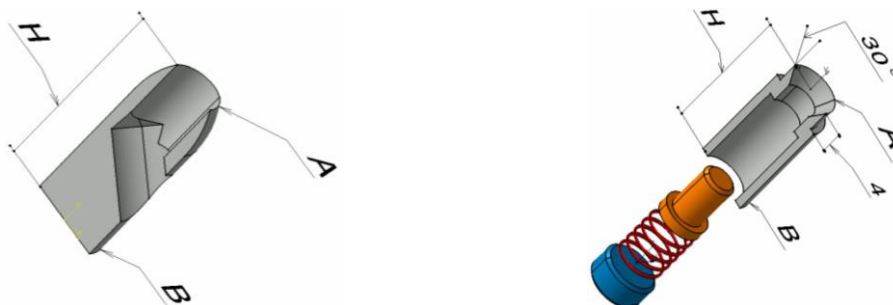


Abbildung 5.2: Explosionsdarstellung der verwendeten Lochstanzen im Halbschnitt. Links Typ 6D mit Außenfase und seitlicher Entleerung. Rechts Typ 7A mit Innenfase und Federauswerfer. [120]

Neben den in den theoretischen Vorarbeiten bereits als relevant identifizierten Perforationsparametern Bedeckungsgrad BG und Lochdurchmesser d zeigten sich bei Vorversuchen auch Hinweise darauf, dass die Art der Lochstanze (Außenfase/Innenfase)

bei gleichem Durchmesser einen Einfluss auf die gemessene Permeabilität hat, obwohl eine Überprüfung der Lochstanzen keine signifikanten Abweichungen von den Nennmaßen ergab. Daher wurde auch dieser Parameter mit in den Versuchsplan übernommen.

Versuchsplan

Zur strukturierten Analyse der Versuche, insbesondere vor dem Hintergrund der üblicherweise großen Messunsicherheiten bei Dickenpermeabilitätsmessungen, wurden Methoden der statistischen Versuchsplanung und -auswertung genutzt [121]. Zum Einsatz kam dabei die Software *Design Expert* (Version 12) der Firma *StatEase*. Die statistische Versuchsplanung erlaubt es, aus einer gegebenen Anzahl von Versuchen möglichst viel Information zu gewinnen. Insbesondere ist es möglich zu analysieren, welche der untersuchten Faktoren einen statistisch signifikanten Einfluss auf die Zielgröße haben sowie deren relative Effektstärke zu quantifizieren. Ein wichtiger Grundsatz ist dabei, dass es nicht effizient ist, pro Versuch immer nur einen einzelnen Faktor zu verändern und viele Wiederholungen derselben Faktorstufenkombination durchzuführen. Stattdessen werden möglichst viele Faktorstufenkombinationen untersucht (wobei es durch die Art Versuchsplans gewisse Einschränkungen gibt) und die jeweiligen Versuche nur wenige Male oder gar nicht wiederholt. Dies mag den Anschein erwecken, dass Ausreißer durch Materialfehler oder fehlerhafte Einstellung der Versuchsparameter nicht zu erkennen sind. Tatsächlich erlaubt es die spätere statistische Auswertung jedoch sehr gut, derartige Fehler zu erkennen und ggf. gezielt einzelne Wiederholungsmessungen durchzuführen ohne den kompletten Versuchsplan mehrfach durchführen zu müssen. Gleichzeitig ermöglicht dieses Vorgehen das Erkennen von Wechselwirkungen zwischen Faktoren. Als Wechselwirkung bezeichnet man, wenn die Effektgröße eines Faktors davon abhängt, auf welchen Wert ein anderer Faktor eingestellt ist. [121, 122]

Um den Einfluss von Bedeckungsgrad, Lochdurchmesser und Fasenart zu beurteilen wurde ein vollfaktorieller Versuchsplan vom Typ 2^3 verwendet. Das bedeutet, dass von jedem dieser drei Faktoren (Exponent = 3) zwei Stufen (Basis = 2) ausgewählt und dann alle möglichen Kombinationen getestet wurden. Als Faktorstufen wurden die

oben beschriebenen Grenzen des Versuchsraums (Bedeckungsgrad 85 % und 98 %, Lochdurchmesser 2,0 mm und 4,0 mm), sowie die beiden Fasenarten gewählt.

Vollfaktorielle Versuchspläne mit zwei Stufen je Faktor sind ein Standardverfahren der statistischen Versuchsplanung und bilden die Grundlage vieler weiterführender Verfahren [121, 122]. Sie eignen sich insbesondere dafür herauszufinden, welche Faktoren grundsätzlich relevant sind und ermöglichen es, sämtliche Wechselwirkungen zu erkennen [121–123]. Da die Anzahl der Versuche aber exponentiell mit der Zahl der Faktoren ansteigt, sind sie nur für Modelle mit wenigen Faktoren geeignet. Zudem kann, da nur zwei Stufen pro Faktor gewählt werden, maximal ein lineares Beschreibungsmodell für die Zielgröße gewählt werden. Eventuell auftretende nichtlineare Zusammenhänge sind nicht erkennbar. Dem kann durch die Ergänzung von Mittelpunktversuchen entgegengewirkt werden. Hierbei wird dem Versuchsplan noch ein Versuch hinzugefügt, dessen Faktorstufenkombination der numerischen Faktoren mittig zwischen den beiden regulären Faktorstufen liegt. Im vorliegenden Fall ergibt sich für den Mittelpunktversuch hierdurch ein Bedeckungsgrad von 91,1 % und ein Lochdurchmesser von 3,0 mm. Da es sich bei der Fasenart jedoch um einen qualitativen und keinen numerischen Faktor handelt, bei dem kein Mittelwert möglich ist, müssen dem Versuchsplan zwei Mittelpunktversuche hinzugefügt werden: Einer für jede Fasenart. Somit ergibt sich eine Versuchsanzahl von $2^3 + 2 = 10$ Versuchen. Um die statistische Aussagekraft zu erhöhen wurde jeder Versuch zweimal durchgeführt. Das Hinzufügen weiterer Faktorstufen ist bei dieser Art von Versuchsplan nicht sinnvoll [121].

Die Versuche wurden in drei Blöcke aufgeteilt, die jeweils an einem Tag durchgeführt wurden. Die ersten zwei Blöcke umfassten je eine komplette Durchführung des vollfaktoriellen Plans, der dritte Block alle Mittelpunktversuche. Innerhalb jedes Blocks wurde die Reihenfolge der Versuche zufällig gewählt, um gegebenenfalls auftretende systematische Fehler erkennen zu können [121]. Der Aufbau des Versuchsplans ist zum besseren Verständnis in Abbildung 5.3 grafisch dargestellt. Die Anzahl der Faktoren legt die Dimensionalität des Versuchsraums fest. In diesem Fall wird also ein dreidimensionaler Versuchsraum verwendet.

Zusätzlich wurden drei Referenzmessungen ohne interlaminare Schicht vorgenommen.

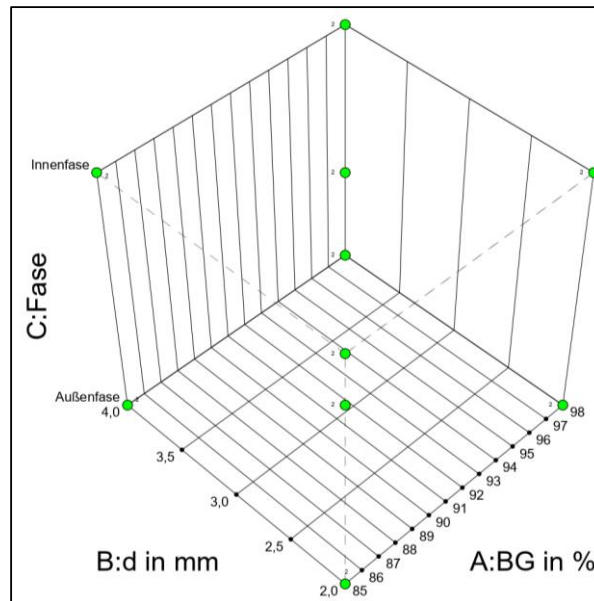


Abbildung 5.3: Grafische Darstellung des dreidimensionalen Versuchsraums mit den vollfaktoriellen Eckpunkten und den zusätzlichen Mittelpunktsversuchen. Jeder Versuch wurde zweimal durchgeführt.

5.1.3 Messergebnisse und Auswertung

Die numerischen Messergebnisse können Anhang 8.2 entnommen werden. Eine grafische Darstellung der Messwerte ist in Abbildung 5.4 zu sehen. Auf eine Abbildung der Referenzmessungen ohne perforierte Schicht wurde hierbei verzichtet, da diese mit einem Mittelwert von $3,75 \mu\text{m}^2$ deutlich höher liegen und die Übersichtlichkeit der Darstellung negativ beeinflussen würden. In der Literatur werden Permeabilitätswerte von Textilien üblicherweise in Exponentialschreibweise in der Basiseinheit m^2 angegeben. Da die Messwerte je nach Textil und Faservolumengehalt über mehrere Dekaden variieren können bringt die Verwendung von Einheitenpräfixen wie mm^2 oder μm^2 in der Regel keine Vereinfachung. Für die Auswertung der Ergebnisse in *Design Expert* erwies es sich aber als zweckmäßig, die Permeabilität in μm^2 anzugeben, da es ansonsten zu Fehlern in der Diagrammdarstellung durch die endliche Genauigkeit der numerischen Repräsentation kam.

Die Messungen sind im Diagramm in der ersten Stufe nach Bedeckungsgrad, dann nach Lochdurchmesser und schließlich nach Fasenart der Lochstanze sortiert. Hierdurch lässt sich deutlich erkennen, dass die gemessene Permeabilität mit steigendem Bedeckungsgrad abnimmt, was der Erwartung entspricht. Bemerkenswert ist, dass bei

gleichem Lochdurchmesser und Bedeckungsgrad die Versuche mit Außenfase stets eine größere Permeabilität aufweisen als die mit Innenfase. Es lag daher nahe, dass sich die entstandene Lochgeometrie unterscheiden muss. Es wurde erwartet, dass sich bei den Lochstanzen mit Außenfase eine der Fase entsprechende, kegelförmige Senkung des Lochs ergibt, während die Löcher von Lochstanzen mit Innenfase im Wesentlichen zylindrisch sein sollten. Um dies zu prüfen, wurden die gestanzten Löcher unter dem Mikroskop verglichen (vgl. Abbildung 5.5). Hierbei zeigte sich, dass der tatsächliche Lochdurchmesser bei Lochstanzen mit Außenfase nur minimal vom Nennwert abweicht (Mittelwert: +1,1 %, größte gemessene Abweichung +3,3 %), während er bei Lochstanzen mit Innenfase stets deutlich kleiner als der Nennwert ist (Mittelwert: -11,9 %, größte Abweichung: -18,1 %). Eine Überprüfung der Lochstanzen selbst brachte keine Erklärung hierfür, es wurden maximale Abweichungen vom Nennwert von $\pm 0,04$ mm (entspricht bei 2 mm Nenndurchmesser $\pm 2,0$ %) gemessen. Der Unterschied muss daher aus dem Stanzvorgang und der dabei stattfindenden Materialverdrängung resultieren.

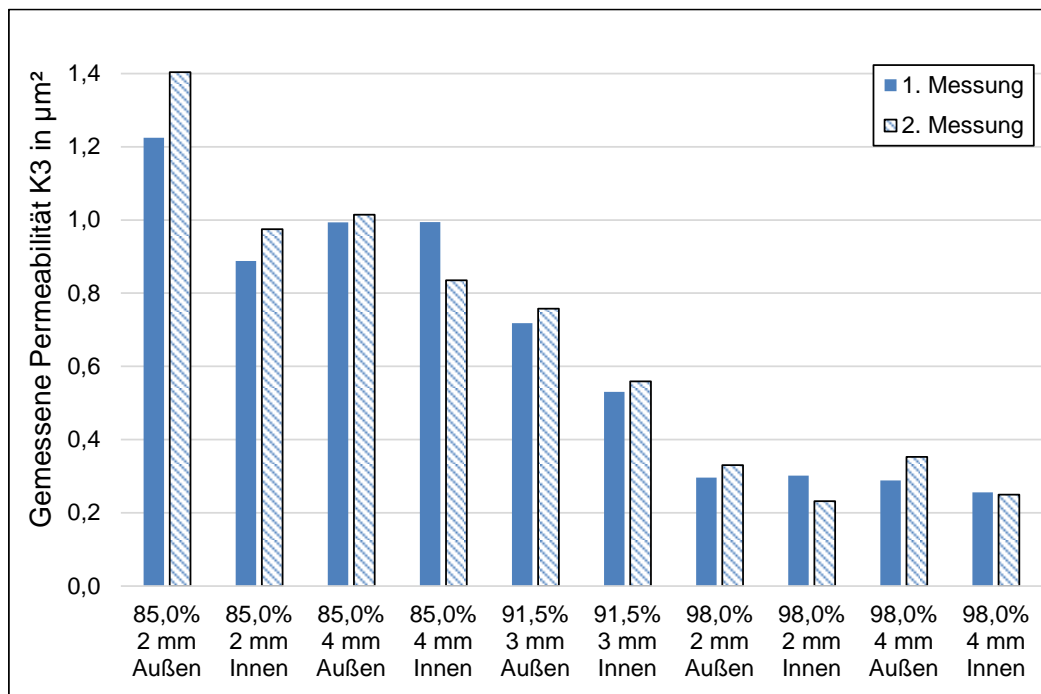


Abbildung 5.4: Dickenpermeabilität mit unterschiedlich perforierten Zwischenschichten. Die Beschriftung gibt von oben nach unten den Bedeckungsgrad, den Lochdurchmesser und die Art der Fase an der Lochstanze an.

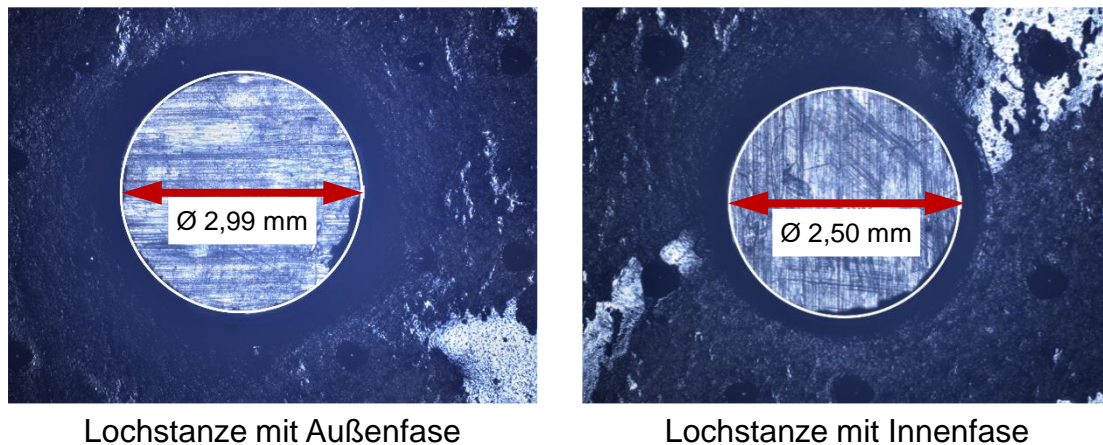


Abbildung 5.5: Vergleich von Löchern, die mit Stanzen mit 3,0 mm Nenndurchmesser, aber unterschiedlicher Fasenart angefertigt wurden.

Als Ursache hierfür konnte der Federauswerfer bei der Lochstanze mit Innenfase ausgemacht werden. Dieser steht über das Stanzmesser hinaus und verdrängt beim Stanzvorgang das Material zunächst nach außen, bevor die Schneide das verformte Material trennt. Beim Entfernen des Stanzmessers wird das Material wieder entspannt und kehrt zurück in Richtung Mitte, wodurch sich das entstandene Loch verkleinert.

Ob auch der Lochdurchmesser, bei gleichem Bedeckungsgrad und gleicher Stanzenart, einen signifikanten Einfluss auf die gemessene Permeabilität hat, ist nicht auf den ersten Blick zu erkennen. Das gleiche gilt für mögliche Wechselwirkungen zwischen den Parametern und ob die erkannten Einflüsse die gemessene Permeabilität linear beeinflussen oder ob ein nichtlinearer Zusammenhang vorliegt. Hierüber kann jedoch die statistische Auswertung der Versuche Aufschluss geben.

Wichtigstes Hilfsmittel ist hierbei die Varianzanalyse (Analysis of Variance, ANOVA) nach Fisher [124], deren Anwendung von Siebertz et al. [122] ausführlich erläutert und von der genutzten Software weitgehend automatisiert durchgeführt wird. Abbildung 5.6 zeigt die entsprechende Tabelle.

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
Model	2,52	7	0,3595	101,71	< 0,0001	significant
A-Bedeckungsgrad	2,27	1	2,27	641,18	< 0,0001	
B-Durchmesser	0,0279	1	0,0279	7,89	0,0158	
C-Fase	0,1215	1	0,1215	34,37	< 0,0001	
AB	0,0256	1	0,0256	7,25	0,0196	
AC	0,0320	1	0,0320	9,04	0,0109	
BC	0,0186	1	0,0186	5,26	0,0407	
ABC	0,0248	1	0,0248	7,01	0,0213	
Residual	0,0424	12	0,0035			
Lack of Fit	0,0035	2	0,0018	0,4509	0,6494	not significant
Pure Error	0,0389	10	0,0039			
Cor Total	2,56	19				

Abbildung 5.6: ANOVA der Permeabilitätsmessungen, wie sie von *Design Expert* dargestellt wird. Design Expert ordnet den Faktoren in alphabetischer Reihenfolge Buchstaben zu und gibt die Wechselwirkungen mittels Buchstabenkombination (AB, AC, BC, ABC) an.

Wichtig für die Beurteilung, ob ein Faktor statistisch signifikant ist, ist der p-Wert. Dieser gibt an, wie wahrscheinlich es ist, dass der Faktor eigentlich nicht relevant ist, aber irrtümlicherweise als relevant angenommen wird. Dementsprechend gilt: Je kleiner der p-Wert, desto höher die Wahrscheinlichkeit, dass der entsprechende Faktor tatsächlich einen Einfluss auf die beobachtete Zielgröße hat. In der Regel wird bei einem p-Wert kleiner als 0,05 davon ausgegangen, dass ein kausaler Zusammenhang zwischen Faktor und Zielgröße vorliegt [122]. Diese übliche Grenze wird auch hier angesetzt. Im vorliegenden Fall werden alle drei Faktoren (Bedeckungsgrad, Lochdurchmesser und Fasenart) als deutlich signifikant erkannt. Zusätzlich sind auch alle vorhandenen Wechselwirkungen signifikant.

Der Lack of Fit beschreibt, wie gut das gewählte mathematische Modell zu den Messdaten passt. Der Lack of Fit sollte nicht signifikant sein, was bei einem p-Wert von 0,6494 erfüllt ist. Durch die Ergänzung der Mittelpunktversuche kann auch überprüft werden, ob sich der Zusammenhang zwischen den Faktoren und der Zielgröße durch ein lineares Modell zufriedenstellend beschreiben lässt oder weitere Versuche nötig sind, um einen nichtlinearen Zusammenhang abzubilden. Hierfür bietet *Design Expert* einen „Curvature Check“. Bei diesem ergab sich ein p-Wert von 0,5062 (deutlich nicht-signifikant), was bedeutet, dass auch die Mittelpunktmessungen gut zum linearen

Modell passen und im Untersuchungsbereich keine nichtlinearen Zusammenhänge erkennbar sind.

Wie groß der relative Einfluss der einzelnen Faktoren auf die Zielgröße ist, kann mittels der normierten Effektstärke bestimmt werden. Diese ist in Abbildung 5.7 dargestellt. Der Betrag der normierten Effektstärke gibt an, wie groß der Einfluss im Verhältnis zu den anderen Faktoren ist. Dem dominanten Faktor wird dabei ein Wert von ± 1 zugewiesen. Das Vorzeichen bestimmt die Richtung des Einflusses. Ist die normierte Effektstärke positiv, so steigt die Zielgröße an, wenn der Faktor erhöht wird. Bei einem negativen Wert steigt die Zielgröße bei sinkendem Faktorwert. Beim nicht numerischen Faktor „Fasentyp“ ist die Außenfaser als unterer Wert definiert, wodurch sich das negative Vorzeichen der Effektstärke erklärt.

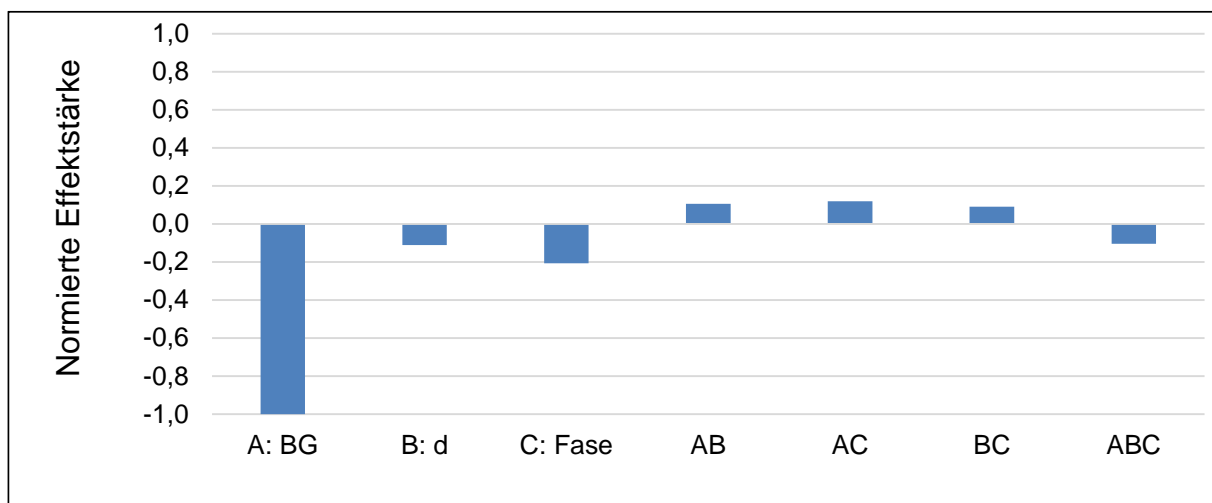


Abbildung 5.7: Normierte Effektstärke der Einflussfaktoren Bedeckungsgrad, Lochdurchmesser und Fasentyp sowie ihrer Wechselwirkungen auf die Gesamtdickenpermeabilität eines Textilstapels mit eingebetteter, perforierter Schicht.

Oben konnte gezeigt werden, dass sich der Einfluss der Fasentyp letztendlich auf einen veränderten Lochdurchmesser bei Beibehaltung des Lochabstands, und dadurch einen vom Sollwert abweichenden Bedeckungsgrad, zurückführen lässt. Daher ist es folgerichtig, dass die Fasentyp in der statistischen Auswertung eine Wechselwirkung mit den beiden anderen Faktoren aufweist. Um diesen Effekt aus der Betrachtung her-

auszunehmen, wurde eine zusätzliche Auswertung vorgenommen, bei der nur die Teilmenge der Versuche untersucht wurde, bei denen die Perforationen mit Lochstanzen mit Auenfase berücksichtigt wurden. Hierdurch entfallen auch alle Wechselwirkungen, die die Fasenart enthalten. Wie in Abbildung 5.8 zu erkennen ist, ändert sich am grundsätzlichen Verhältnis der Effektstärken dadurch wenig. Abbildung 5.9 zeigt die graphische Darstellung des statistischen Modells. Die zugehörige Modellgleichung lautet:

$$K_{3,gesamt} = 0,7379 - 0,4211 * BG - 0,0758 * d + 0,0794 * BG * d \quad (5.2)$$

Da es sich hierbei um eine empirische Gleichung handelt, ist darauf zu achten, die Zahlenwerte für Gesamtdickenpermeabilität, Bedeckungsgrad und Lochdurchmesser in den richtigen Einheiten einzusetzen (μm^2 , % und mm).

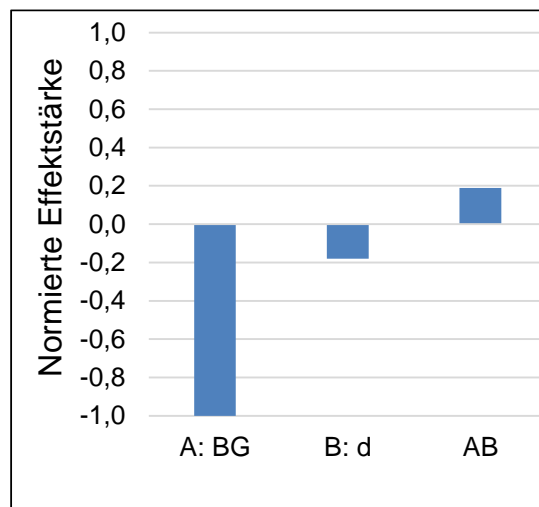


Abbildung 5.8: Normierte Effektstärke der Einflussfaktoren, wenn nur Versuche beachtet werden, bei denen die Perforation mittels Lochstanze mit Auenfase erfolgt ist.

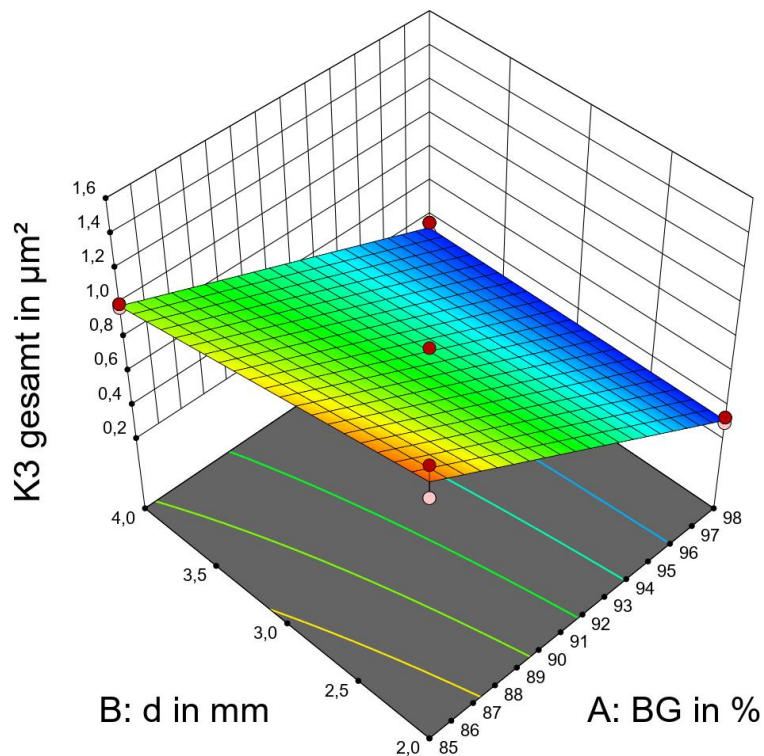


Abbildung 5.9: Graphische Darstellung des Zusammenhangs zwischen Bedeckungsgrad, Lochdurchmesser und der Gesamtpermeabilität (nur Perforationen mit Außenfaser). Die Fläche stellt das Beschreibungsmodell aufgrund der statistischen Auswertung dar, die Punkte markieren die tatsächlichen Messwerte. Dunkelrote Punkte liegen dabei oberhalb des durch das Modell vorhergesagten Wertes, rosafarbene darunter.

Die Bedeutung der Wechselwirkung zwischen Bedeckungsgrad und Lochdurchmesser lässt sich besonders gut in der Darstellungsweise von Abbildung 5.10 erkennen. Während der Lochdurchmesser bei hohen Bedeckungsgraden in der durchgeführten Versuchsreihe keinen messbaren Einfluss auf die Gesamtdickenpermeabilität hat, liegt der Unterschied bei niedrigen Bedeckungsgraden bei ca. 35 %.

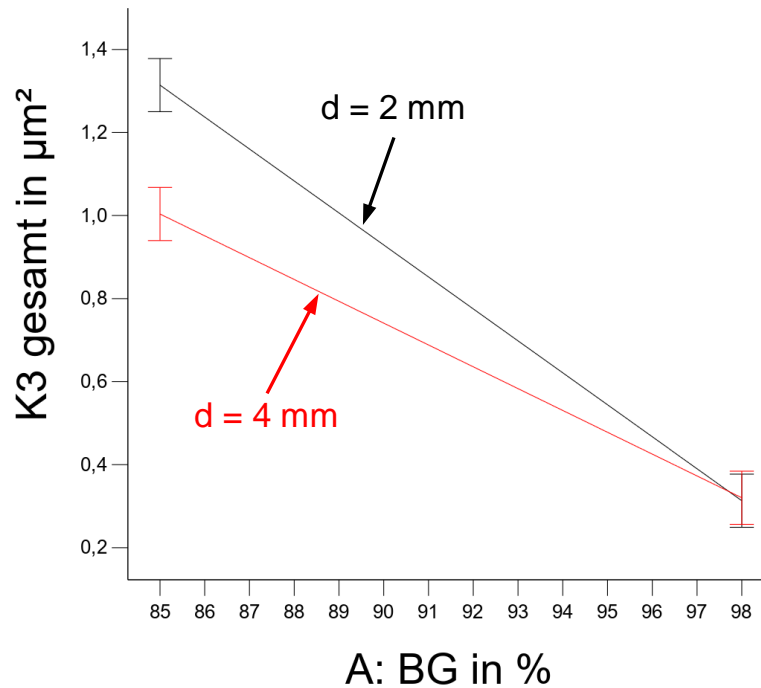


Abbildung 5.10: Verlauf der Gesamtdickenpermeabilität über den Bedeckungsgrad in Abhängigkeit vom Lochdurchmesser (nur Perforationen mit Lochstanze mit Außenfase)

5.2 Simulationen zur Erweiterung des Untersuchungsbereichs

5.2.1 Aufbau und Grenzen des Simulationsmodells

Das Simulationsmodell ist in Abbildung 5.11 im Halbschnitt dargestellt, um das Perforationsloch im Innern erkennen zu können. Das Textil ist als homogener Block modelliert, dem die richtungsabhängigen Permeabilitäten K_1 , K_2 und K_3 zugewiesen werden. K_1 ist dabei parallel zur X-Achse des Modells ausgerichtet. Grund hierfür ist, dass nicht die Eigenschaften unterschiedlicher Textilarchitekturen oder Faseranordnungen untersucht werden sollen, sondern das Zusammenspiel von Textilpermeabilität und der Perforation auf die Gesamtpermeabilität des Lagenpakets. Die Vereinfachung ermöglicht es, die Permeabilitätswerte unabhängig voneinander zu variieren und mit demselben Modell neben der Nachbildung der realen Experimente auch Extremfälle wie isotrope und stark anisotrope Permeabilitätsverteilungen zu untersuchen.

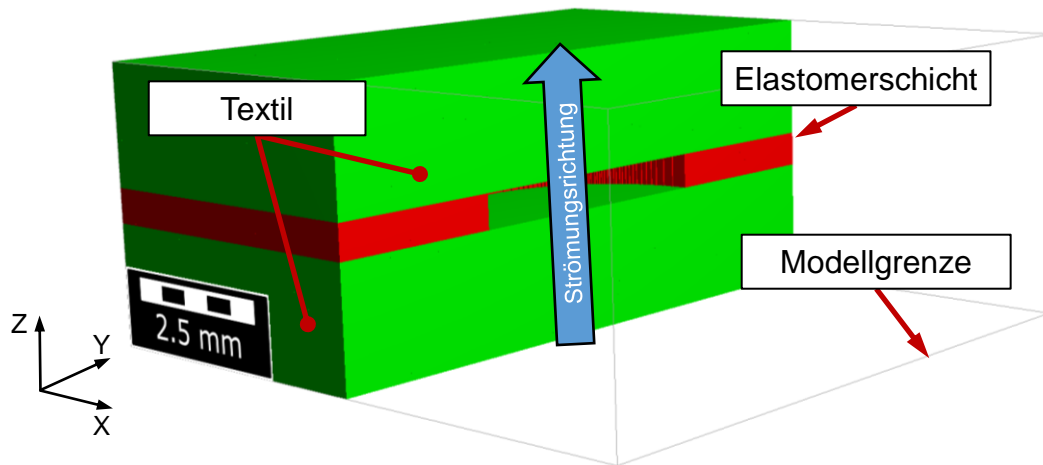


Abbildung 5.11: Halbschnitt des Simulationsmodells. Dargestellt ist ein Bedeckungsgrad von 85 % und ein Lochdurchmesser von 4 mm

Die perforierte Zwischenschicht wird als undurchlässiges Material mit einem zentralen Loch simuliert. Aufgrund der symmetrischen Perforation genügt es, eine einzelne Einheitszelle des Perforationsmusters zu simulieren. Die Strömungsbedingungen an den Modellgrenzen werden so festgelegt, als ob sich das Modell in die Unendlichkeit wiederholen würde (periodische Randbedingung).

Das Modell berücksichtigt keine Verformung des Lageraufbaus und dadurch auch keine Veränderung der Permeabilitäten oder des Lochdurchmessers durch mechanische oder hydrodynamische Kompaktierung. Die simulierten Gesamtpermeabilitätswerte sind daher unabhängig vom Volumenstrom durch das Material bzw. dem sich einstellenden Druckverlust. Auch dass es in der Realität dazu kommt, dass sich einzelne Rovings des Textils teilweise in den Lochquerschnitt hineindrücken, kann mit diesem Modell nicht detailliert abgebildet werden. Um generelle Aussagen über die Bedeutung der untersuchten Einflussfaktoren tätigen zu können, ist jedoch ein derart vereinfachtes Modell vorteilhaft. Experimente oder komplexere Simulationen, in denen Einzelfasern oder Rovings berücksichtigt werden, würden Schwankungen der Ergebnisse davon abhängig machen, wie genau Rovings im Verhältnis zur Perforation liegen. In der Realität gleichen sich derartige Schwankungen aber über die gesamte perforierte Fläche aus, da nicht nur eine einzelne Einheitszelle vorliegt.

Tabelle 5.3 zeigt, welche Parameter für alle Simulationen identisch waren. Das folgende Unterkapitel geht dann auf die durchgeführten Simulationsreihen und die jeweils variierten Parameter ein.

Tabelle 5.3: Simulationsparameter, die in allen Simulationen identisch gewählt wurden

Parameter	Wert
Druckdifferenz über Preform	0,5 bar ⁶
Viskosität Fluid	60 mPa*s
Dichte Fluid	914,8 kg/m ³
Solver	Simple FFT Solver mit Stokes-Gleichung [125]
Voxelgröße	25 μ m
Dicke der Textilblocke	jeweils 1,75 mm
Dicke der perforierten Schicht	0,5 mm
Orientierung K_1	Parallel zur X-Achse des Modells
Randbedingung Modellkanten	Periodische Fortsetzung [125]

5.2.2 Beschreibung der Simulationsreihen

Insgesamt wurden drei Simulationsreihen durchgeführt, die aufeinander aufbauen und jeweils das Verständnis vertiefen sollen:

1. Validierung des Simulationsmodells durch Nachsimulation der Experimente
2. Simulation der perforierten Schicht ohne Textil
3. Simulation unterschiedlicher Permeabilitäten

Validierung des Simulationsmodells

In einer ersten Simulationsreihe wurden die durchgeführten Messungen nachgestellt, um das Simulationsmodell grundsätzlich zu verifizieren. Lochdurchmesser und Bedeckungsgrad wurden daher entsprechend der Nennwerte in den Versuchen gewählt.

Da bei der Auswertung der Messungen gezeigt werden konnte, dass beide Arten von Lochstanzen zu annähernd zylindrischen Löchern führen (vgl. Kapitel 5.1.3), wurden nur solche simuliert. Als zusätzlicher Faktor wurde dafür untersucht, welchen Einfluss es hat, ob das Innere des Loches als freies Strömungsgebiet modelliert oder als mit Textil gefüllt angesehen wird. Dies soll berücksichtigen, dass es in der Realität zu einem leichten Einsinken der Fasern in die Perforationslocher kommt.

⁶ Ausgenommen die Simulationen ohne Textil, siehe weiter unten.

Die Permeabilitäten, die dem Textil zugewiesen wurden, sind in Tabelle 5.4 zu sehen. Für die Ebenenpermeabilität (K_1 und K_2) wurden die Daten genutzt, die am IVW im Rahmen der Ebenenpermeabilitätsbenchmark [81] ermittelt wurden. Der Permeabilitätswert in Dickenrichtung stammt aus den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Messungen ohne interlaminaere Schicht.

Tabelle 5.4: Genutzte Permeabilitätswerte zur Validierung des Simulationsmodells

Parameter	Wert
K_1	42,79 μm^2
K_2	31,83 μm^2
K_3	3,752 μm^2

Simulation der perforierten Schicht ohne Textil

Um zu vergleichen, welchen Einfluss die Perforationsparameter auf die Dickenpermeabilität der perforierten Schicht allein haben und ob es hierbei Unterschiede zu einer interlaminaeren Schicht gibt, wurden die Simulationen auch ohne Textil durchgeführt. Da der Fließwiderstand der perforierten Schicht allein sehr viel niedriger ist als der sich einstellende Gesamtwiderstand eines Lagenaufbaus mit integrierter perforierter Schicht, konnte nicht mit der oben genannten Druckdifferenz von 0,5 bar simuliert werden, da dies zu sehr hohen Fließgeschwindigkeiten und dementsprechend einer turbulenten Strömung geführt hätte. Es wurde daher statt einer Druckdifferenz ein konstanter Volumenstrom von 1 ml/min vorgegeben, wodurch eine schleichende Strömung sichergestellt und das Gesetz von Darcy daher angewendet werden konnte. Die maximale Reynolds-Zahl lag, je nach Perforation, zwischen $1,5 \cdot 10^{-4}$ und $6,4 \cdot 10^{-4}$.

Untersuchung des Einflusses der Textilpermeabilität

Basierend auf den Experimenten und den vorangegangenen Simulationen wurde simulativ untersucht, welchen Einfluss eine Veränderung der Textilpermeabilität auf die Gesamtdickenpermeabilität des Aufbaus hat. Die untersuchten Wertebereiche können Tabelle 5.5 entnommen werden. Bei der Auswahl der Werte erfolgte eine Orientierung

an den gemessenen Permeabilitätswerten aus den bereits erwähnten Benchmark-Versuchsreihen [81–84] sowie der Arbeit von Rieber [87]. Auf diese Weise wurde sichergestellt, dass die Simulationen realistische Permeabilitäten von Gelegen und Geweben bei unterschiedlichen Faservolumengehalten umfassen. Während für K_1 explizite Werte gewählt wurden, wurden K_2 und K_3 nur indirekt als Verhältnis zu K_1 definiert. Hierdurch konnte bei der automatisierten Erstellung des Versuchsplans sichergestellt werden, dass K_2 , gemäß seiner Definition, niemals größer als K_1 sein kann. Zudem konnte auf diese Weise untersucht werden, welchen Einfluss eine isotrope oder stark anisotrope Permeabilität hat. Bei Vorversuchen zeigte sich, dass die Simulationen oft nicht konvergieren, wenn die Dickenpermeabilität des Textils K_3 größer wird als die niedrigste Ebenenpermeabilität K_2 . Daher wurde *Design Expert* vorgegeben, den Versuchsraum entsprechend zu beschneiden sodass gilt:

$$\frac{K_1}{K_2} \leq \frac{K_1}{K_3} \quad (5.3)$$

Diese Bedingung ist für übliche, reale Preforms erfüllt, da durch den lagenweisen Aufbau erheblich mehr und größere Fließkanäle in der Ebene vorliegen als in Dickenrichtung [77] und stellt daher für die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf reale Materialien keine relevante Einschränkung dar.

Tabelle 5.5: Untersuchte Einflussfaktoren und ihr Wertebereich

Faktorname	Parameter	Wertebereich
A	K_1	25 μm^2 – 75 μm^2
B	$\frac{K_1}{K_2}$	1,0 – 10,0
C	$\frac{K_1}{K_3}$	1,0 – 40,0
D	Lochdurchmesser d	2,0 mm – 4,0 mm
E	Bedeckungsgrad BG	85,0 % – 98,0 %

Anders als bei den vorherigen Simulationen kam kein klassischer Versuchsplan auf Basis eines faktoriellen Designs zum Einsatz, sondern es wurde ein D-optimaler Plan genutzt [121, 126]. Dieser bietet den Vorteil, dass nichtlineare Zusammenhänge erkannt sowie Bereiche des Versuchsraums abgeschnitten werden können, wie dies hier erforderlich war. Nachteilig ist, dass derartige Versuchspläne weniger anschaulich und mathematisch komplexer sind, weshalb eine spezialisierte Software zur Erstellung und Auswertung notwendig ist. Insgesamt wurden in dieser Simulationsreihe 40 Einzelsimulationen durchgeführt. 30 dieser Simulationen dienen der eigentlichen Modellerstellung. Modellpunkte werden von der Versuchsplanungssoftware zunächst vorwiegend am Rand des Versuchsraums platziert und sobald dieser ausreichend abgedeckt ist auch im Innenbereich. Eine graphische Darstellung des Versuchsplans ist in Abbildung 5.12 zu finden. Da die Anzahl der Faktoren die Dimensionalität des Versuchsraumes festlegt, wäre eigentlich eine fünfdimensionale Darstellung notwendig. Da dies auf Papier nicht möglich ist, wurde die vierte und fünfte Dimension (d und BG) mittels Farbe und der Aufteilung auf zwei separate Diagramme realisiert. Die Farben geben dabei Bedeckungsgrad und Lochdurchmesser jeweils nur ungefähr an, da der Versuchsplanungsalgorithmus zwar vorwiegend Werte nahe der Ränder und des Mittelpunkts der jeweiligen Faktoren wählt, aber nicht unbedingt exakt. Die exakten Zahlenwerte des Versuchsplans können Anhang 8.5 entnommen werden. Fünf Simulationen dienen der Lack-of-Fit Betrachtung. Diese werden bei der Modellerstellung nicht berücksichtigt, sondern später in das erstellte Modell eingefügt und dienen dazu zu überprüfen, ob das Modell auch Punkte, die nicht Teil der Modellgleichung, sind angemessen beschreibt. Bei den letzten fünf Simulationen handelt es sich um Wiederholungen von Modellpunkten. Diese sind bei der vorliegenden Art Simulation, die keine stochastischen Elemente enthält, eigentlich unnötig, für die Auswertung des Versuchsplans allerdings zwingend erforderlich.

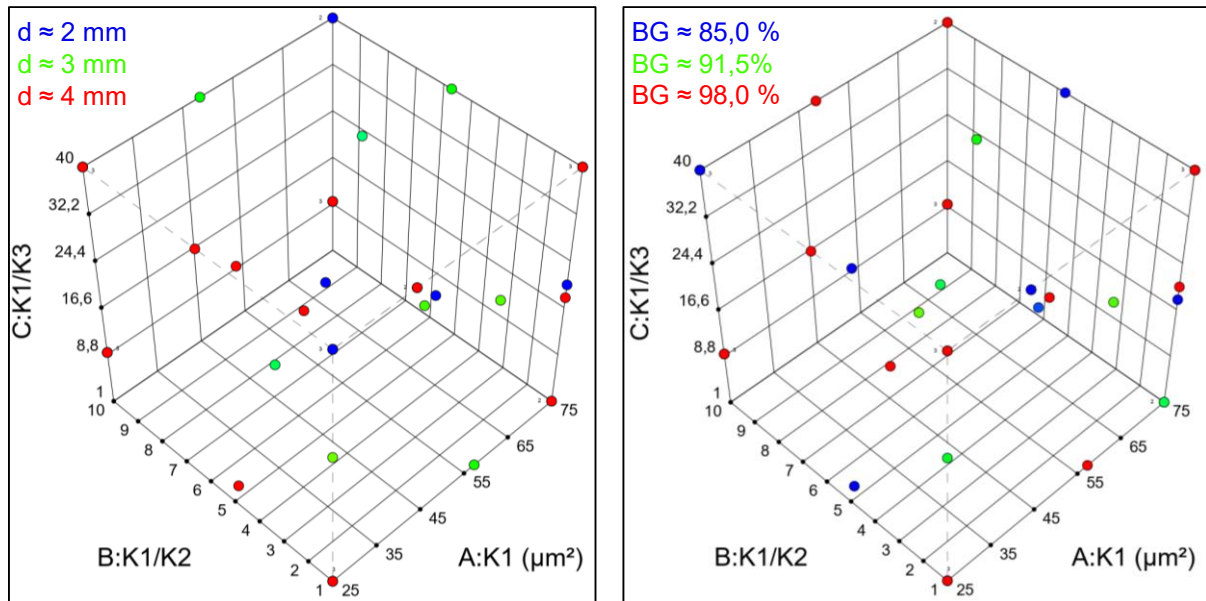


Abbildung 5.12: Simulationsplan zur Untersuchung des Einflusses der Textilpermeabilität. Die Achsen sind in beiden Abbildungen identisch und geben die Textilpermeabilität an, die Farben zeigen links den Lochdurchmesser und rechts den Bedeckungsgrad. Kleine Zahlen an den Versuchspunkten zeigen an, wenn bei derselben Textilpermeabilität mehrere Simulationen (mit unterschiedlichem d oder BG) durchgeführt wurden

5.2.3 Simulationsergebnisse und Auswertung

Validierung des Simulationsmodells

Die Zahlenwerte der Simulationen sind Anhang 8.3 zu entnehmen. Aufgrund des gewählten Modellaufbaus sollte eine Wiederholung der Simulationen zu exakt demselben Ergebnis führen, sodass Wiederholungen grundsätzlich nicht sinnvoll sind. Denkbar wären jedoch kleine Abweichungen aufgrund der numerischen Lösung der zu Grunde liegenden Differentialgleichungen. Dies wurde exemplarisch an den Mittelpunktssimulationen ($BG = 91,5\%$, $d = 3\text{mm}$, Loch textilgefüllt / leer) überprüft. Die Mittelpunktssimulationen wurden jeweils dreimal durchgeführt, auch an verschiedenen Computern. Dabei konnten keine Abweichungen der numerischen Lösung festgestellt werden.

Stellt man die Ergebnisse der Simulation den experimentellen Messungen gegenüber (vgl. Abbildung 5.13) so fällt auf, dass der Verlauf der Gesamtdickenpermeabilität über die verschiedenen Bedeckungsgrade und Lochdurchmesser qualitativ vergleichbar ist.

Bei den Absolutwerten gibt es Unterschiede zwischen Simulation und Experiment, was aber im Hinblick auf die starke Idealisierung des Simulationsmodells zu erwarten war. Die Unterschiede zwischen Simulation und Messung liegen zudem auch in einer ähnlichen Größenordnung wie die Streuung unterschiedlicher Messsysteme zueinander (vgl. [82]), sodass für die grundsätzliche Anwendbarkeit des Simulationsmodells keine Bedenken bestehen.

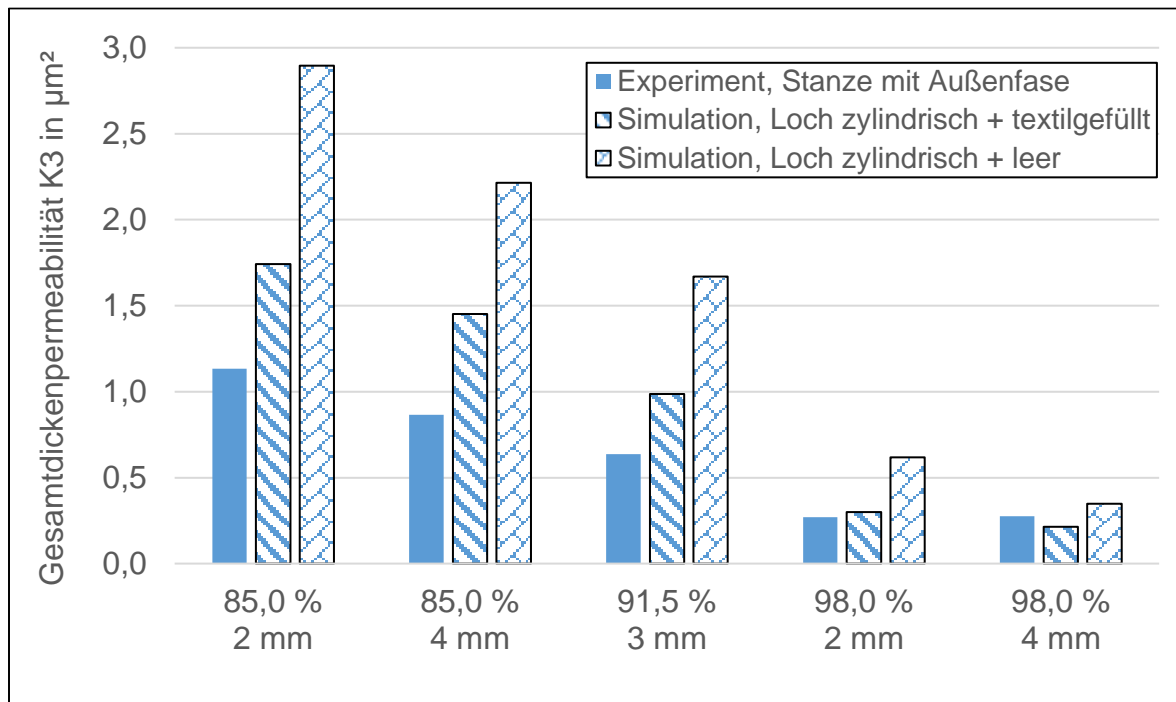


Abbildung 5.13: Vergleich der gemessenen Gesamtdickenpermeabilität und der Nachsimulation

Simulation der perforierten Schicht ohne Textil

Die Zahlenwerte der Simulationsergebnisse sowie die Modellgleichung, die die in Abbildung 5.14 zu sehende Fläche beschreibt, können Anhang 8.4 entnommen werden. Abbildung 5.14 zeigt das Ergebnis grafisch. Wird die perforierte Folie alleine simuliert, fallen im Vergleich zu den Versuchen und deren Nachsimulation einige wichtige Unterschiede auf: Zum einen sind die Permeabilitätswerte, wie in der Simulationsbeschreibung erläutert und erwartet, um mehrere Größenordnungen höher. Der Faktor mit dem größten Einfluss ist weiterhin der Bedeckungsgrad, die normierte Effektstärke des Lochdurchmessers ist aber ebenfalls sehr deutlich signifikant ($p < 0,0001$ %). Sein Effekt ist zudem im Vergleich zu den Messungen und ihren Nachsimulation, bei denen

die perforierte Schicht von Textil umgeben ist, umgekehrt. Ein größerer Lochdurchmesser führt hier zu einer höheren Permeabilität (vgl. Abbildung 5.15). Dies passt zu den grundsätzlichen Aussagen des Gesetzes von Hagen-Poiseuille, auch wenn dieses, wie erläutert, im vorliegenden Fall eigentlich nicht anwendbar ist, da der Lochdurchmesser deutlich größer als die Dicke der perforierten Schicht ist. Grund hierfür ist wahrscheinlich der Einfluss der Ebenenpermeabilität des Textils, wenn die perforierte Schicht darin eingebettet ist. Wird die perforierte Schicht für sich allein betrachtet, kann das Fluid in horizontaler Richtung unbehindert zum nächsten Loch strömen. Dort angekommen ist der Fließwiderstand durch das Loch umso höher, je geringer der Lochdurchmesser ist. Wird die perforierte Schicht allerdings in einem Textilstapel platziert, ist der Fließwiderstand in der Ebene nicht mehr vernachlässigbar. Prozessbestimmender Faktor wird dadurch der Fließweg, den das Fluid in der Ebene im Textil zurücklegen muss. Und dieser wird, bei konstantem Bedeckungsgrad, durch die Wahl kleinerer Lochdurchmesser kürzer.

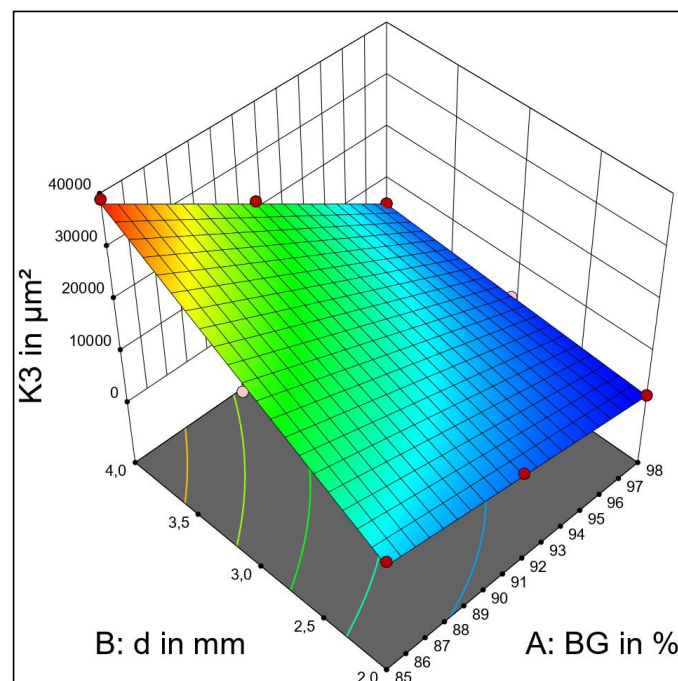


Abbildung 5.14 Simulierte Dickenpermeabilität der perforierten Schicht ohne Textil in Abhängigkeit von Bedeckungsgrad und Lochdurchmesser

Den Ergebnissen ist auch zu entnehmen, dass eine Wechselwirkung zwischen Lochdurchmesser und Bedeckungsgrad vorliegt. Dies ist in Abbildung 5.14 anschaulich daran zu erkennen, dass sich bei 85 % Bedeckungsgrad der Lochdurchmesser deutlich stärker auf die gemessene Permeabilität auswirkt als bei 98 %. Dies passt ebenfalls zur oben getroffenen Aussage. Je größer die Lochfläche relativ gesehen ist, desto stärker wirkt sich ihre Aufspaltung aus.

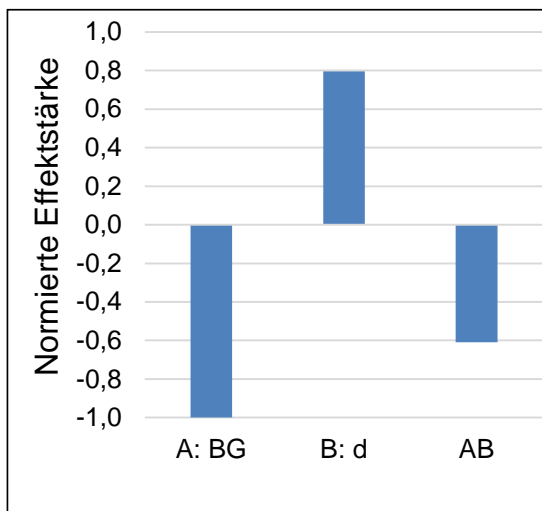


Abbildung 5.15:

Normierte Effektstärke der Einflussfaktoren, bei alleiniger Simulation der Lochfolie

Untersuchung des Einflusses der Textilpermeabilität

Aufgrund der Sechsdimensionalität des Ergebnisraums (fünf Einflussfaktoren und Gesamtdickenpermeabilität als Zielgröße) ist eine graphische Auswertung der Ergebnisse nicht möglich. Daher muss sich auf die mathematisch/statistische Auswertung beschränkt werden. Die numerischen Simulationsergebnisse sowie die Modellgleichung können Anhang 8.5 und 8.6 entnommen werden.

Die minimale in der Simulationsreihe aufgetretene Gesamtpermeabilität $K_{3,gesamt}$ lag bei $0,0420 \mu\text{m}^2$, die maximale bei $24,2893 \mu\text{m}^2$, also fast beim sechshundertfachen. Dies stellt für die Auswertung eine Herausforderung dar, da eine der Grundannahmen der statistischen Versuchsplanung ist, dass die Standardabweichung der Versuche im ganzen Versuchsraum konstant ist, was bei derartigen Unterschieden allerdings im Regelfall nicht gegeben ist [121]. In den meisten Fällen kann dies durch eine Transformation der Zielgröße gelöst werden [122]. Im vorliegenden Fall wird daher nicht der Einfluss der Faktoren auf $K_{3,gesamt}$ ausgewertet, sondern auf $\log_{10}(K_{3,gesamt})$. *Design*

Expert stellt für die Auswahl der Transformationsfunktion ein Box-Cox-Diagramm zur Verfügung, dessen Empfehlung zur Verwendung einer Logarithmusfunktion gefolgt wurde [122, 127, 128].

Zur Bestimmung der signifikanten Faktoren stehen bei *Design Expert* verschiedene Methoden zur teilautomatisierten Modellauswahl zur Verfügung [129]. Alle der vorhandenen Methoden wurden genutzt, da es vorkommen kann, dass diese zu unterschiedlichen Modellen führen. Dies war hier jedoch nicht der Fall, mit allen Methoden wurden dieselben Faktoren als signifikant erkannt ($p < 0,05$). Das Modell ist demnach stabil.

Abbildung 5.16 zeigt links die ANOVA Tabelle und rechts die normierten Effektstärken.

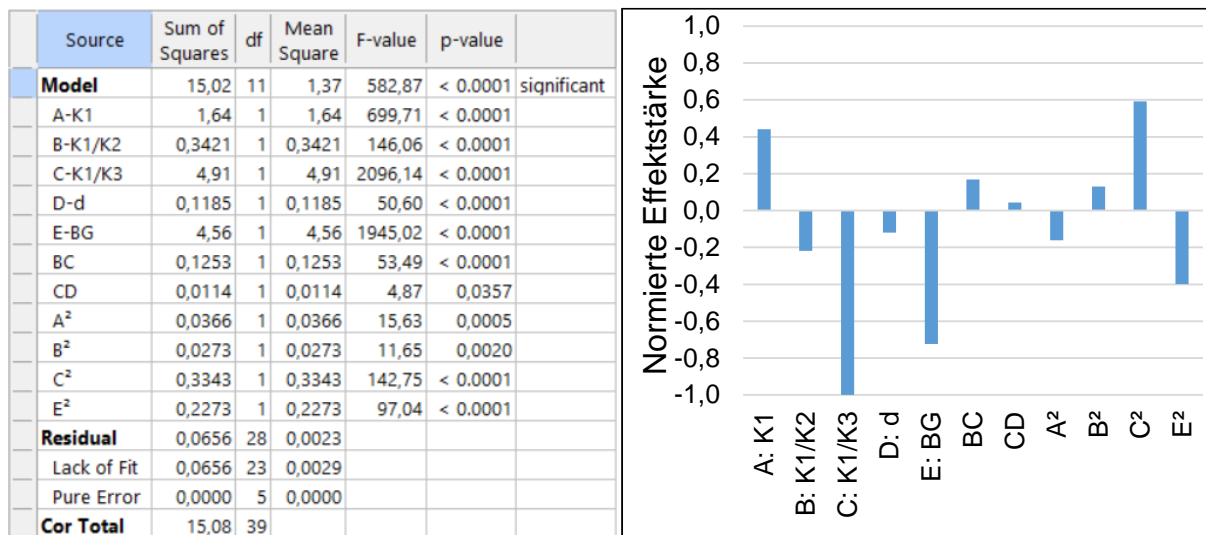


Abbildung 5.16: ANOVA und normierte Effektstärken bei den Simulationen zur Untersuchung des Einflusses der Textilpermeabilität

Zunächst fällt auf, dass alle der untersuchten Hauptfaktoren als hoch signifikant erkannt werden ($p < 0,0001$). Bei den Wechselwirkungen sind lediglich zwei signifikant:

Die Wechselwirkung zwischen $\frac{K_1}{K_2}$ und $\frac{K_1}{K_3}$, für die ebenfalls $p < 0,0001$ gilt sowie die

Wechselwirkung zwischen $\frac{K_1}{K_3}$ und Lochdurchmesser, die allerdings mit $p = 0,0357$

deutlich weniger signifikant ist und auch nur eine geringe normierte Effektstärke aufweist.

Nichtlineare Terme, namentlich Quadrate, treten für die drei Permeabilitätsfaktoren

K_1 , $\frac{K_1}{K_2}$ und $\frac{K_1}{K_3}$ sowie für den Bedeckungsgrad auf. Während also bei den prakti-

schen Versuchen mit konstanter Textilpermeabilität ein lineares Modell zur Beschreibung der Verhältnisse angemessen genau war, ist dies im nun erheblich größeren Modellraum nicht mehr der Fall und nichtlineare Effekte müssen berücksichtigt werden. Die Wechselwirkung zwischen Bedeckungsgrad und Lochdurchmesser wird dagegen nicht mehr als signifikant eingestuft. Dies spricht dafür, dass diese Wechselwirkung nur in dem vorher betrachteten Wertebereich relevant ist und bei Betrachtung der größeren Zusammenhänge nicht mehr deutlich ins Gewicht fällt.

Interessant ist die Signifikanz der Ebenenpermeabilität. Um diese zu verstehen ist es sinnvoll, sich die Stromlinien einer Simulation mit deutlich anisotroper Permeabilität anzuschauen, wie in Abbildung 5.17. Die Farbe der Stromlinien stellt dabei die Fließgeschwindigkeit dar (blau: langsam – rot: schnell). Obwohl $\frac{K_1}{K_3} = 22,88$ und somit die Ebenenpermeabilität des Textils um ein Vielfaches höher ist als seine Dickenpermeabilität, laufen die Stromlinien zunächst bis nahe an die interlaminaere Schicht heran. Dort werden sie abgelenkt und folgen der Schicht bis zum Erreichen der Perforation. Die Fluidteilchen müssen demnach teilweise eine erhebliche Wegstrecke in der Textilebene zurücklegen. Hieraus ergibt sich auch die Signifikanz des Lochdurchmessers: Bei gleichem Bedeckungsgrad sinkt bei kleineren Löchern die mittlere Wegstrecke eines Fluidteilchens in der Ebene und dementsprechend der Fließwiderstand.

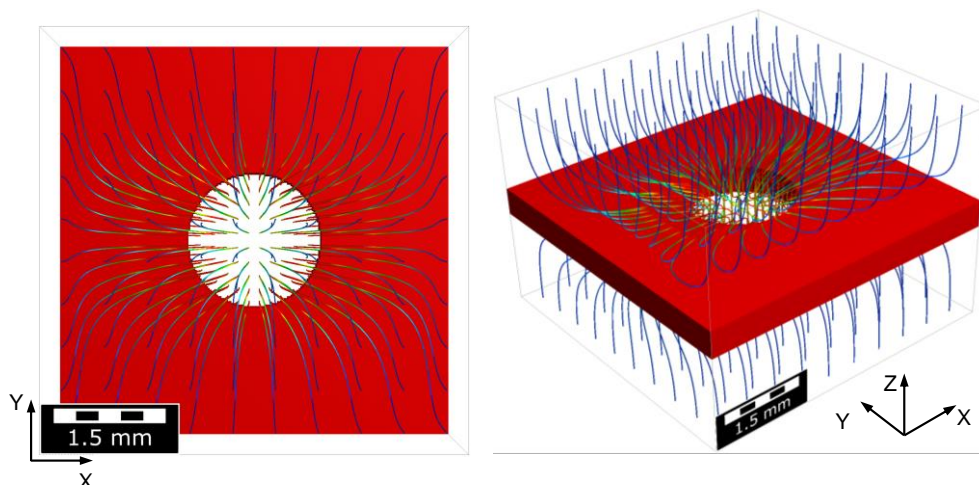


Abbildung 5.17: Stromlinien im Textil (Textil ausgeblendet). Simulationsparameter:

$$K_1 = 48,5 \mu\text{m}^2, \frac{K_1}{K_2} = 5,5, \frac{K_1}{K_3} = 22,88, d = 2 \text{ mm}, BG = 90,52 \%$$

5.3 Zwischenfazit zur Perforation

Möchte man die Gesamtdickenpermeabilität einer Preform mit einer eingebetteten, perforierten Schicht einer Kautschukmischung bei einem vorgegeben Textilaufbau erhöhen, so ist die größte Stellschraube der Bedeckungsgrad. Je mehr Material durch die Perforation entfernt wird, desto besser wird die Durchströmbarkeit. Da die interlaminare Schicht jedoch eine Funktion hat, die durch die Perforation gegebenenfalls behindert wird, wird man aus Anwendungssicht in der Regel einen möglichst hohen Bedeckungsgrad anstreben. Es ist daher ein Kompromiss nötig, der individuell durch Experimente oder Füllsimulationen bestimmt werden muss und von vielen Parametern abhängt, beispielsweise dem Viskositätsverlauf des Harzsystems, dem Injektionsdruck, der Permeabilität des Textilaufbaus und der Angussstrategie.

Sowohl in den Experimenten als auch in den Simulationen zeigte sich, dass die Gesamtdickenpermeabilität einer derartigen Preform auch dadurch erhöht werden kann, dass kleinere Perforationsdurchmesser bei gleichem Bedeckungsgrad gewählt werden. Der Effekt ist geringer als eine Veränderung des Bedeckungsgrades, sollte aber, wenn keine anwendungsbezogenen Gründe dagegensprechen, ausgenutzt werden. Werden die Löcher in Relation zur Dicke der perforierten Schicht so klein, dass das Gesetz von Hagen-Poiseuille Gültigkeit erlangt, ist jedoch wieder mit einer abfallenden Gesamtdickenpermeabilität zu rechnen.

Kann auch der Lagenaufbau des Textils angepasst werden, ergeben sich weitere Möglichkeiten die Gesamtdickenpermeabilität zu erhöhen. Da das Harzsystem, um die interlaminare Schicht zu durchdringen, jeweils zum nächstgelegenen Loch strömen muss, spielt die Ebenenpermeabilität der verwendeten Textilien eine relevante Rolle. Insbesondere die der unmittelbar an die interlaminare Schicht angrenzenden Textillagen. Der Lagenaufbau sollte daher so konzipiert werden, dass dort Textilien mit möglichst hoher und möglichst isotroper Ebenenpermeabilität zum Einsatz kommen.

Auch wenn die Untersuchungen zur Perforation ausschließlich mit interlaminaren Schichten aus einer Kautschukmischung durchgeführt wurden, sollten sich die grundlegenden Erkenntnisse auch auf andere interlaminare Schichten übertragen lassen, da es sich überwiegend um geometriebedingte Effekte handelt.

6 Zusammenfassung, Gesamtfazit und Ausblick

6.1 Zusammenfassung

Ziel der vorliegenden Arbeit war es zu untersuchen, welche Prozesstechnik notwendig ist, um flächige, kontinuierlich faserverstärkte FKV mit Duroplastmatrix und einer interlaminaren Elastomerschichten mittels LCM-Verfahren herzustellen. Zum Einsatz kamen dabei ausschließlich kommerziell erhältliche Materialien, um zu prüfen, ob mit am Markt vorhandenen Produkten zufriedenstellende Ergebnisse möglich oder Neuentwicklungen erforderlich sind. Die Referenz bildeten dabei FKV mit interlaminarer Elastomerschicht, die mittels Prepreg und Autoklav hergestellt wurden. Für diese Prozessvariante ist das verwendete Elastomer material eigentlich gedacht.

Im Rahmen der Vorbetrachtungen ergaben sich zwei wesentliche Forschungsschwerpunkte: Zum einen die Prozessführung bei der Herstellung derartiger FKV, insbesondere der zeitliche Ablauf zwischen Vulkanisation der Elastomerschicht und der Aushärtung des Duroplasts. Zum anderen die Imprägnierbarkeit größerer Strukturen durch die eigentlich harzundurchlässige Elastomerschicht hindurch.

Bei der Prozessführung zeigte sich, dass klassische Flüssigimprägnierverfahren mit isochorer Werkzeugkavität (RTM und VARTM) und drucklose Verfahren wie VARI für die Verarbeitung der zur Verfügung stehenden Materialsysteme nicht gut geeignet sind. Hierfür gibt es im Wesentlichen drei Gründe:

- Der erforderliche Druck auf die Kautschukmischung während der Vulkanisation
- Die Sauerstoffempfindlichkeit von Elastomersystemen mit Peroxidvernetzung
- Der große Unterschied zwischen Vulkanisationszeit der Kautschukmischung und der Aushärtezeit der verwendeten Harzsysteme bei gleicher Temperatur

Lediglich wenn das Elastomer vor der Weiterverarbeitung im Harzinjektionsprozess in einem separaten Schritt auf einer Presse vulkanisiert wurde, konnten gute Laminatqualitäten erreicht werden (Co-Bonding). Es ergab sich in diesen Fällen allerdings ein ungünstiges, weil schlagartiges und rein adhäsives, Versagensverhalten zwischen

Elastomer und FKV. Alle anderen Verarbeitungsversuche in einem isochoren Werkzeug, bei denen die Vulkanisation während oder nach der Harzaushärtung stattfanden, führten zu Poren im Elastomer oder zu Ablösungen zwischen Elastomer und FKV. Der Grund hierfür ist, dass der benötigte Druck im Werkzeug durch die im Vergleich zur Vulkanisation schnelle Aushärtung des Harzsystems und den damit verbundenen Schrumpfung nicht aufrechterhalten werden konnte.

Bessere Ergebnisse hinsichtlich des Porengehalts konnten bei einer isobaren Verarbeitung erreicht werden. Das Injektionswerkzeug wurde hierbei nicht auf eine feste Dicke eingestellt, sondern mit einem konstanten Druck geschlossen gehalten. Hierdurch wird sichergestellt, dass der Mindestdruck auf das Elastomer während der Vulkanisation trotz des Schrumpfens des Harzes erhalten bleibt. Eine Verarbeitung unter Sauerstoffabschluss war mit den zur Verfügung stehenden Anlagen allerdings nicht möglich und ist vermutlich der Grund dafür, dass trotz des geringen Porengehalts keine gute Verbindungsfestigkeit erreicht werden konnte.

Der äußere Druck führt zudem zu einem erhöhten Faservolumengehalt und dadurch einer stark verringerten Permeabilität der Preform, wodurch keine vollständige Imprägnierung möglich war. Um diesen Effekt zu reduzieren, aber trotzdem das RTM-Verfahren, bei dem es zu keinem nennenswerten Harzfluss in Dickenrichtung kommt, beizubehalten, wurde ein Vliesstoff anstelle eines Gewebes als Verstärkungstextil eingesetzt. Dieser Ansatz, um eine bessere Permeabilität sicherzustellen, brachte allerdings neue Schwierigkeiten mit sich: Das Elastomer drang in den Vliesstoff ein und es gab keine festen Grenzen zwischen Elastomer und FKV mehr, was die Verbindung schwächte und zu neuen Poren führte.

Generell können große Preforms mit interlaminaren, undurchlässigen Schichten mit Flüssigimprägnierverfahren, bei denen das Harzsystem nur in der Ebene fließt, nur unzureichend imprägniert werden, da die Fließwege irgendwann zu lang werden. Imprägnierverfahren, bei denen das Harzsystem die Preform in Dickenrichtung durchströmt sind in diesen Fällen eine mögliche Lösung. Hierfür muss die interlaminare Schicht allerdings perforiert werden. Es wurde daher experimentell sowie simulativ untersucht, wie eine Perforation und das umgebende Textil gestaltet sein sollten. Hierzu kamen Methoden der statistischen Versuchsplanung und -auswertung zum Einsatz.

Als Messgröße zur Beurteilung der Durchströmbarkeit wurde die Gesamtdickenpermeabilität einer Preform mit mittig eingebrachter Elastomerschicht gewählt. Die Elastomerschicht wurde mit runden Perforationen in einem gleichmäßigen, quadratischen Muster versehen. Mit Hilfe experimenteller Untersuchungen konnte zunächst gezeigt werden, dass der Bedeckungsgrad, also der verbleibende Anteil an Elastomer nach der Perforation, den größten Einfluss auf die Gesamtdickenpermeabilität hat. Wie zu erwarten, führte ein geringerer Bedeckungsgrad zu einer höheren Gesamtpermeabilität. Der Lochdurchmesser hat jedoch ebenfalls einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss. Kleinere Lochdurchmesser (getestet wurde bis 2,0 mm) führten zu einer höheren Gesamtdickenpermeabilität. Der Grund hierfür ist, dass der Lochabstand bei gegebenem Bedeckungsgrad bei kleineren Lochdurchmessern sinkt und dadurch die Strömung eine geringere Wegstrecke zurücklegen muss, um das nächste Loch zu erreichen. Aus diesem Grund hat auch die Ebenenpermeabilität der umgebenden Textilien einen deutlichen Einfluss auf die Gesamtdickenpermeabilität, wie mit Hilfe der durchgeführten Simulationen gezeigt werden konnte.

6.2 Gesamtfazit und Ausblick

Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass mit den derzeit zur Verfügung stehenden Fertigungsverfahren und Materialien das gewünscht Ziel nur teilweise erreicht werden konnte. Dennoch können zahlreiche Empfehlungen ausgesprochen und Anregungen für die weitere Forschung gegeben werden:

- Bauteile, bei denen das schlagartige Versagen zwischen FKV und Elastomer akzeptabel ist, können bereits mit den vorhandenen Materialien unproblematisch mittels Co-Bonding gefertigt werden.
- Im Hinblick auf eine besonders gute Verbindungsfestigkeit zwischen Elastomer und FKV ist Co-Curing die vielversprechendste Lösung, wobei eine Angleichung von Vulkanisations- und Harzaushärtezeit durch die Entwicklung angepasster Harzsystem- bzw. Elastomerrezepturen erforderlich ist. Denkbar ist die Nutzung von Hochtemperaturhärtern, wie sie bei Prepregs zum Einsatz kommen. Insbesondere für Verfahren, bei denen kein Druck aufgebracht werden kann (z.B. VARI) sollte die Nutzung von Schwefelvernetzern für die Vulkanisation untersucht werden.

- Sollen weiterhin Kautschukmischungen mit Peroxidvernetzung zum Einsatz kommen und das Co-Curing Verfahren angewendet werden, muss eine sauerstofffreie Verarbeitung und ein ausreichender Druck auf das Elastomer während der Vulkanisation sichergestellt sein. Hier kann eine isobare Prozessführung mit gasdichten Werkzeugen (Vakuum oder Schutzgas) eine Lösung sein.
- Bei einer isobaren Prozessführung, oder generell bei größeren Bauteilen, ist auf die Durchströmbarkeit der Preform besonderes Augenmerk zu legen. Dies kann beispielsweise durch die gezielte Nutzung von Vliesstofflagen in der Preform realisiert werden, die neben ihrer Wirkung als Verstärkungstextil auch gleichzeitig als interne Fließhilfe dienen. Es muss allerdings sichergestellt werden, dass das Elastomer nicht in den Vliesstoff eindringen kann. Dies kann beispielsweise dadurch realisiert werden, dass für direkt an das Elastomer angrenzende Lagen ein Gewebe verwendet wird.
- Sollen Imprägnierverfahren mit einem Harzfluss in Dickenrichtung genutzt werden, muss sichergestellt werden, dass das Harzsystem alle Textilbereiche erreichen kann. Dies kann beispielsweise durch eine Perforation der interlamina- ren Schicht realisiert werden. Hierbei ist auch die Nutzung mehrerer interlami- narer Schichten denkbar.
- Wird die interlamina- re Schicht perforiert, sollte der Bedeckungsgrad so klein wie möglich gewählt werden, um eine möglichst gute Durchströmbarkeit zu errei- chen. Da dies in der Regel die gewünschte Funktion der interlamina- ren Schicht beeinträchtigen wird, ist es erforderlich durch Vorversuche oder Simulationen einen Kompromiss beim Bedeckungsgrad zu finden.
- Weniger stark als der Bedeckungsgrad wirkt sich der Lochdurchmesser auf die Durchströmbarkeit aus. Kleinere Löcher sind hierbei vorteilhaft, so lange ihr Durchmesser noch deutlich größer als die Dicke der interlamina- ren Schicht ist (vgl. Gesetz von Hagen-Poiseuille).
- Auch die Ebenenpermeabilität der Textilschichten hat einen Einfluss auf die Ge- samtdickenpermeabilität einer Preform mit eingebetteter, perforierter Schicht. Je höher die Permeabilität in der Ebene ist, desto weniger wird der Fluidstrom zum nächsten Loch behindert, was wiederum die Gesamtdickenpermeabilität der Preform erhöht.

7 Literatur

- [1] H. Schürmann, *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden*, 2. Aufl. Berlin: Springer, 2007.
- [2] D. May, *Integrierte Produktentwicklung mit Faser-Kunststoff-Verbunden*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2020.
- [3] M. Neitzel, P. Mitschang und U. Breuer, Hg., *Handbuch Verbundwerkstoffe: Werkstoffe, Verarbeitung, Anwendung*, 2. Aufl. München: Hanser, 2014.
- [4] J. L. Thomason, „The influence of fibre length and concentration on the properties of glass fibre reinforced polypropylene: 5. Injection moulded long and short fibre PP“, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Jg. 33, Nr. 12, S. 1641–1652, 2002, doi: 10.1016/S1359-835X(02)00179-3.
- [5] B. Castanie, C. Bouvet und M. Ginot, „Review of composite sandwich structure in aeronautic applications“, *Composites Part C: Open Access*, Jg. 1, S. 100004, 2020, doi: 10.1016/j.jcomc.2020.100004.
- [6] J. R. Vinson, „Sandwich Structures“, *Applied Mechanics Reviews*, Jg. 54, Nr. 3, S. 201–214, 2001, doi: 10.1115/1.3097295.
- [7] E. Witten und V. Mathes, „Der Markt für Glasfaserverstärkte Kunststoffe (GFK) 2020: Marktentwicklungen, Trends, Ausblicke und Herausforderungen“, AVK–Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e. V., Nov. 2020.
- [8] *Textil- und Modelexikon*, 8. Aufl. Frankfurt am Main: Deutscher Fachverlag, 2006.
- [9] H. Domininghaus, P. Elsner, P. Eyerer und T. Hirth, *Kunststoffe: Eigenschaften und Anwendungen*, 7. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer, 2008. [Online]. Verfügbar unter: <http://site.ebrary.com/lib/alltitles/docDetail.action?docID=10223740>
- [10] C. Hopmann und W. Michaeli, *Einführung in die Kunststoffverarbeitung*, 7. Aufl. s.l.: Carl Hanser Fachbuchverlag, 2015.
- [11] F. Röthemeyer, *Kautschuk-Technologie: Werkstoffe, Verarbeitung, Produkte*, 2. Aufl. München, Wien: Hanser, 2006.
- [12] R. A. Orza, „Investigation of peroxide crosslinking of EPDM rubber by solid-state NMR“, 1. Jan. 2008.

- [13] F.-L. Jin, S.-Y. Lee und S.-J. Park, „Polymer matrices for carbon fiber-reinforced polymer composites“, *Carbon letters*, Jg. 14, Nr. 2, S. 76–88, 2013, doi: 10.5714/CL.2013.14.2.076.
- [14] M. Koschmieder, „Verarbeitung und Eigenschaften von Faserverbundkunststoffen mit Elastomermatrix“. Dissertation, RWTH Aachen, Aachen, 2001.
- [15] J. Kirn, T. Lorkowski und H. Baier, „Development of flexible matrix composites (FMC) for fluidic actuators in morphing systems“, *Int Jnl of Struct Integrity*, Jg. 2, Nr. 4, S. 458–473, 2011, doi: 10.1108/17579861111183948.
- [16] H. Anuar und A. Zuraida, „Improvement in mechanical properties of reinforced thermoplastic elastomer composite with kenaf bast fibre“, *Composites Part B: Engineering*, Jg. 42, Nr. 3, S. 462–465, 2011, doi: 10.1016/j.compositesb.2010.12.013.
- [17] J. Hoffmann, „Charakterisierung faserverstärkter Elastomere für formvariable Strukturflächen“. Dissertation, Technische Universität München, 2012.
- [18] S. G. Advani und E. M. Sozer, *Process modeling in composites manufacturing*. Boca Raton, London, New York: CRC Press, 2010. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.taylorfrancis.com/books/9780429166235>
- [19] A. Hindersmann, „Confusion about infusion: An overview of infusion processes“, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Jg. 126, S. 105583, 2019, doi: 10.1016/j.compositesa.2019.105583.
- [20] J. Summerscales und T. J. Searle, „Low-pressure (vacuum infusion) techniques for moulding large composite structures“, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, Jg. 219, Nr. 1, S. 45–58, 2005, doi: 10.1243/146442005X10238.
- [21] P. Simacek und S. G. Advani, „Simulating three-dimensional flow in compression resin transfer molding process“, *Revue Européenne des Éléments Finis*, Jg. 14, 6-7, S. 777–802, 2005, doi: 10.3166/reef.14.777-802.
- [22] G. Marsh, „Putting SCRIMP in context“ (en), *Reinforced Plastics*, Jg. 41, Nr. 1, S. 22–26, 1997, doi: 10.1016/s0034-3617(97)84296-8.
- [23] R. F. Gibson, „A review of recent research on mechanics of multifunctional composite materials and structures“, *Composite Structures*, Jg. 92, Nr. 12, S. 2793–2810, 2010, doi: 10.1016/j.compstruct.2010.05.003.

- [24] B. Klein, *Leichtbau-Konstruktion: Berechnungsgrundlagen und Gestaltung*, 8. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2009.
- [25] J. Narayana und R. G. Burela, „A review of recent research on multifunctional composite materials and structures with their applications“, *Materials Today: Proceedings*, Jg. 5, Nr. 2, S. 5580–5590, 2018, doi: 10.1016/j.matpr.2017.12.149.
- [26] W. W. Seidel und F. Hahn, Hg., *Werkstofftechnik: Werkstoffe - Eigenschaften - Prüfung - Anwendung; mit 381 Bildern sowie zahlreichen Tabellen, Beispielen, Übungen und Testaufgaben*, 8. Aufl. Carl Hanser Fachbuchverlag, 2010.
- [27] N. A. Koratkar *et al.*, „Characterizing energy dissipation in single-walled carbon nanotube polycarbonate composites“, *Appl. Phys. Lett.*, Jg. 87, Nr. 6, S. 63102, 2005, doi: 10.1063/1.2007867.
- [28] X. Zhou, E. Shin, K. W. Wang und C. E. Bakis, „Interfacial damping characteristics of carbon nanotube-based composites“, *Composites Science and Technology*, Jg. 64, Nr. 15, S. 2425–2437, 2004, doi: 10.1016/j.compscitech.2004.06.001.
- [29] M. J. Biercuk, M. C. Llaguno, M. Radosavljevic, J. K. Hyun, A. T. Johnson und J. E. Fischer, „Carbon nanotube composites for thermal management“, *Appl. Phys. Lett.*, Jg. 80, Nr. 15, S. 2767–2769, 2002, doi: 10.1063/1.1469696.
- [30] W. Bauhofer und J. Z. Kovacs, „A review and analysis of electrical percolation in carbon nanotube polymer composites“, *Composites Science and Technology*, Jg. 69, Nr. 10, S. 1486–1498, 2009, doi: 10.1016/j.compscitech.2008.06.018.
- [31] C. M. Manjunatha, A. C. Taylor, A. J. Kinloch und S. Sprenger, „The Tensile Fatigue Behavior of a GFRP Composite with Rubber Particle Modified Epoxy Matrix“, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Jg. 29, Nr. 14, S. 2170–2183, 2010, doi: 10.1177/0731684409344652.
- [32] S. Ganguli, A. K. Roy und D. P. Anderson, „Improved thermal conductivity for chemically functionalized exfoliated graphite/epoxy composites“, *Carbon*, Jg. 46, Nr. 5, S. 806–817, 2008, doi: 10.1016/j.carbon.2008.02.008.
- [33] D. Lefevre, S. Comas-Cardona, C. Binetruy und P. Krawczak, „Coupling filtration and flow during liquid composite molding: Experimental investigation and simulation“, *Composites Science and Technology*, Jg. 69, Nr. 13, S. 2127–2134, 2009, doi: 10.1016/j.compscitech.2009.05.008.

- [34] O. Akinyede, J. Sankar, R. Mohan und A. Kelkar, „Investigation of Particulate Filtration of Alumina Nano-Particles in VARTM Processing of Hybrid Composites“ in *ASME 2007 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, Seattle, Washington, USA, 2007, S. 157–162, doi: 10.1115/IMECE2007-41225.
- [35] V. P. Veedu *et al.*, „Multifunctional composites using reinforced laminae with carbon-nanotube forests“ (eng), *Nature materials*, Jg. 5, Nr. 6, S. 457–462, 2006, doi: 10.1038/nmat1650.
- [36] M. W. Nielsen *et al.*, „Life cycle strain monitoring in glass fibre reinforced polymer laminates using embedded fibre Bragg grating sensors from manufacturing to failure“, *Journal of Composite Materials*, Jg. 48, Nr. 3, S. 365–381, 2014, doi: 10.1177/0021998312472221.
- [37] D. Ratna und J. Karger-Kocsis, „Recent advances in shape memory polymers and composites: a review“, *J Mater Sci*, Jg. 43, Nr. 1, S. 254–269, 2008, doi: 10.1007/s10853-007-2176-7.
- [38] D. Brei und B. J. Cannon, „Piezoceramic hollow fiber active composites“, *Composites Science and Technology*, Jg. 64, Nr. 2, S. 245–261, 2004, doi: 10.1016/S0266-3538(03)00259-8.
- [39] Y. Lin und H. A. Sodano, „Fabrication and Electromechanical Characterization of a Piezoelectric Structural Fiber for Multifunctional Composites“, *Adv. Funct. Mater.*, Jg. 19, Nr. 4, S. 592–598, 2009, doi: 10.1002/adfm.200800859.
- [40] M. Oei, Y. Klett, N. Harder, D. Flemming und O. Sawodny, „Modelling the Flow and Heat Transfer Characteristics of Perforated Foldcore Sandwich Composites for Application in Room Air Conditioning“, S. 1269–1274, doi: 10.1109/COASE.2019.8842913.
- [41] A. J. Lockyer *et al.*, „Development of a structurally integrated conformal load-bearing multifunction antenna: overview of the Air Force Smart Skin Structures Technology Demonstration Program“, S. 55–64, doi: 10.1117/12.240429.
- [42] T. Ozaki, „Advanced Composite Parts and Structures for Space Satellites“ in *SAMPE 2008*, Long Beach.
- [43] T. Beumler, *Flying GLARE: A contribution to aircraft certification issues in strength properties in non-damaged and fatigue damaged GLARE structures*. Delft: Delft University Press, 2004.

- [44] A. Salve, R. Kulkarni und A. Mache, „A Review: Fiber Metal Laminates (FML's) - Manufacturing, Test methods and Numerical modeling“, *IJETS*, Jg. 3, Nr. 2, S. 71–84, 2018, doi: 10.15282/ijets.6.2016.1.10.1060.
- [45] T. Sinmazçelik, E. Avcu, M. Ö. Bora und O. Çoban, „A review: Fibre metal laminates, background, bonding types and applied test methods“, *Materials & Design*, Jg. 32, Nr. 7, S. 3671–3685, 2011, doi: 10.1016/j.matdes.2011.03.011.
- [46] M. Lin und F.-K. Chang, „The manufacture of composite structures with a built-in network of piezoceramics“, *Composites Science and Technology*, Jg. 62, 7-8, S. 919–939, 2002, doi: 10.1016/S0266-3538(02)00007-6.
- [47] T. Pereira, Z. Guo, S. Nieh, J. Arias und H. T. Hahn, „Embedding thin-film lithium energy cells in structural composites“, *Composites Science and Technology*, Jg. 68, 7-8, S. 1935–1941, 2008, doi: 10.1016/j.compscitech.2008.02.019.
- [48] R. F. Gibson, Y. Chen und H. Zhao, „Improvement of Vibration Damping Capacity and Fracture Toughness in Composite Laminates by the Use of Polymeric Interleaves“, *Journal of Engineering Materials and Technology*, Jg. 123, Nr. 3, S. 309–314, 2001, doi: 10.1115/1.1370385.
- [49] Gummiwerk Kraiburg GmbH & Co. KG, „Rubber improves composites“, *Composite Solutions*, Jg. 9, S. 70, März 2015.
- [50] M. Stoll, „Behavior of Fiber-Metal-Elastomer-Hybrid-Laminates“. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, 2018.
- [51] E. C. Greenawald, „Microwave NDE of impact damaged fiberglass and elastomer layered composites“ in *26th Annual review of progress in quantitative non-destructive evaluation*, Montreal (Canada), 25-30 July 1999, S. 1263–1268, doi: 10.1063/1.1306185.
- [52] D. Düring, L. Weiß, D. Stefaniak, N. Jordan und C. Hühne, „Low-velocity impact response of composite laminates with steel and elastomer protective layer“, *Composite Structures*, Jg. 134, S. 18–26, 2015, doi: 10.1016/j.compstruct.2015.08.001.
- [53] D. Vink, „Prothesenfuß stellt großen Sprung in Verbundwerkstofftechnologie dar“, *GAK Gummi Fasern Kunststoffe, Fachmagazin für die Polymerindustrie*, Jg. 65, Nr. 12, S. 752–753, 2012.
- [54] S. Liang, Y. Xiu und H. Wang, „A research on sound insulation characteristics and processing of the embedded and co-cured composite damping structures“,

- Journal of Composite Materials*, Jg. 47, Nr. 9, S. 1169–1177, 2013, doi: 10.1177/0021998312446182.
- [55] P. Kulhavy, M. Petru und M. Syrovatkova, „Possibilities of the Additional Damping of Unidirectional Fiber Composites by Implementation of Viscoelastic Neoprene and Rubber Layers“, *Shock and Vibration*, Jg. 2017, S. 1–15, 2017, doi: 10.1155/2017/4163485.
- [56] J. E. Semar und D. May, „Textile-Integrated Elastomer Surface for Fiber Reinforced Composites“, *KEM*, Jg. 809, S. 53–58, 2019, doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.809.53.
- [57] P. J. Slikkerveer, M. H. A. van Dongen und F. J. Touwslager, „Erosion of elastomeric protective coatings“, *Wear*, Jg. 236, S. 189–198, 1999, doi: 10.1016/S0043-1648(99)00268-9.
- [58] L. Ischtschuk *et al.*, „Multifunktionales Hybridmaterial zum Schutz von Rotorblättern“, *Lightweight Design*, Nr. 4, S. 18–25, 2019.
- [59] J. Schaube und P. Maier, „Composite Structure from Thermosetting Resins and Elastomers, Method for Producing the same and use of said Composite Structure,“ EP 1 893 405 B1.
- [60] J. Schaube, J. Zahn und F. Plenk, „Composite Components and Heat-Curing Resins and Elastomers,“ EP 2 419 272 B1, Feb 22, 2012.
- [61] Gummiwerk Kraiburg GmbH & Co. KG, „KRAIBON Katalog 2021“, 2021.
- [62] J. W. M. Noordermeer, „Ethylene-Propylene Elastomers“ in *Encyclopedia of polymer science and technology*, Hoboken, NJ: Wiley Interscience, 2004, doi: 10.1002/0471440264.pst125.
- [63] Gummiwerk Kraiburg GmbH & Co. KG, „Processing information for Kraibon AA9CFZ“, 2015.
- [64] A. Kneer, *Numerische Untersuchung des Wärmeübertragungsverhaltens in unterschiedlichen porösen Medien*. KIT Scientific Publishing, 2014.
- [65] D. Becker und P. Mitschang, „Measurement System for On-Line Compaction Monitoring of Textile Reaction to Out-of-Plane Impregnation“, *Advanced Composite Letters*, Jg. 23, Nr. 2, S. 32–36, 2014.
- [66] M. Danzi, F. Klunker und P. Ermanni, „Experimental validation of through-thickness resin flow model in the consolidation of saturated porous media“, *Journal of*

- Composite Materials*, Jg. 51, Nr. 17, S. 2467–2475, 2017, doi: 10.1177/0021998316671574.
- [67] S. Drapier, „Influence of the stitching density on the transverse permeability of non-crimped new concept (NC2) multiaxial reinforcements: measurements and predictions“, *Composites Science and Technology*, Jg. 62, Nr. 15, S. 1979–1991, 2002, doi: 10.1016/S0266-3538(02)00127-6.
- [68] M. Brusckke und S. G. Advani, „A finite element/control volume approach to mold filling in anisotropic porous media“, *Polymer composites*, Jg. 11, Nr. 6, S. 398–405, 1990.
- [69] H. Darcy, *Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon. Libraire des Corps Impériaux des Ponts et Chaussées et des Mines*, 1856.
- [70] S. P. Neuman, „Theoretical derivation of Darcy's law“, *Acta Mechanica*, Jg. 25, 3-4, S. 153–170, 1977, doi: 10.1007/BF01376989.
- [71] D. May, *Prozessentwicklung für Faser-Kunststoff-Verbunde: Studien zu Verarbeitungseigenschaften von Halbzeugen als Basis einer ganzheitlichen Forschungsmethodik*. Zugl.: Kaiserslautern, Techn. Univ., Habil., 2022. Kaiserslautern: Leibniz-Institut für Verbundwerkstoffe GmbH, 2022, ISBN: 978-3-944440-45-3.
- [72] B. Willenbacher, D. May und P. Mitschang, „Out-of-plane capillary pressure of technical textiles“, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Jg. 124, S. 105495, 2019, doi: 10.1016/j.compositesa.2019.105495.
- [73] J. Bear, *Dynamics of fluids in porous media*, 1972. Aufl. New York: Dover, 1988.
- [74] W. Michaeli, V. Hammes und K. Kirberg, „Process Simulation in the RTM Technique“, *Kunststoffe-German Plastics*, Jg. 79, Nr. 8, S. 739–742, 1989.
- [75] B. Willenbacher, D. May und P. Mitschang, „Metrological determination of inhomogeneous hydrodynamic compaction during unsaturated out-of-plane permeability measurement of technical textiles“, *Advanced Manufacturing: Polymer & Composites Science*, Jg. 5, Nr. 2, S. 51–54, 2019, doi: 10.1080/20550340.2019.1598049.
- [76] A. C. Liakopoulos, „Darcy's coefficient of permeability as symmetric tensor of second rank“, *International Association of Scientific Hydrology. Bulletin*, Jg. 10, Nr. 3, S. 41–48, 1965, doi: 10.1080/02626666509493405.

- [77] D. Becker, J. Broser und P. Mitschang, „An experimental study of the influence of process parameters on the textile reaction to transverse impregnation“, *Polym. Compos.*, Jg. 37, Nr. 9, S. 2820–2831, 2016, doi: 10.1002/pc.23479.
- [78] D. Becker, M. Brzeski, D. Linster und P. Mitschang, „Preform compaction and deformation during through-the-thickness impregnation“ in *ICCM19 - 19th International Conference on Composite Materials*, Montreal, Kanada, 2013.
- [79] D. Becker, *Transversales Imprägnierverhalten textiler Verstärkungsstrukturen für Faser-Kunststoff-Verbunde*. Zugl.: Kaiserslautern, Techn. Univ., Diss., 2015. Kaiserslautern: Inst. für Verbundwerkstoffe, 2015, ISBN: 978-3-944440-13-2.
- [80] D. May, B. Willenbacher, J. Semar, K. Sharp und P. Mitschang, „Out-of-plane permeability of 3D woven fabrics for composite structures“, *The Journal of The Textile Institute*, Jg. 136, Nr. 2, S. 1047–1053, 2019, doi: 10.1080/00405000.2019.1682759.
- [81] D. May *et al.*, „In-plane permeability characterization of engineering textiles based on radial flow experiments: A benchmark exercise“, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Jg. 121, S. 100–114, 2019, doi: 10.1016/j.compositesa.2019.03.006.
- [82] A. Yong *et al.*, „Out-of-plane permeability measurement for reinforcement textiles: A benchmark exercise“, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Jg. 148, S. 106480, 2021, doi: 10.1016/j.compositesa.2021.106480.
- [83] R. Arbter *et al.*, „Experimental determination of the permeability of textiles: A benchmark exercise“, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Jg. 42, Nr. 9, S. 1157–1168, 2011, doi: 10.1016/j.compositesa.2011.04.021.
- [84] N. Vernet *et al.*, „Experimental determination of the permeability of engineering textiles: Benchmark II“, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Jg. 61, S. 172–184, 2014, doi: 10.1016/j.compositesa.2014.02.010.
- [85] J. R. Weitzenböck, R. A. Shenoii und P. A. Wilson, „Measurement of three-dimensional permeability“, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Jg. 29, 1-2, S. 159–169, 1998, doi: 10.1016/S1359-835X(97)00049-3.
- [86] H. Stadtfeld, *Entwicklung einer Messzelle zur Bestimmung von Kompaktierungs- und Permeabilitätskennwerten bei flächigen Faserhalbzeugen*. Zugl.: Kaiserslautern, Techn. Univ., Diss., 2006. Kaiserslautern: Inst. für Verbundwerkstoffe, 2006.

- [87] G. Rieber, *Einfluss von textilen Parametern auf die Permeabilität von Multifilamentgeweben für Faserverbundkunststoffe*. Zugl.: Kaiserslautern, Techn. Univ., Diss., 2011. Kaiserslautern: Inst. für Verbundwerkstoffe, 2011.
- [88] K. L. Adams und L. Rebenfeld, „In-Plane Flow of Fluids in Fabrics: Structure/Flow Characterization“, *Textile Research Journal*, Jg. 57, Nr. 11, S. 647–654, 1987, doi: 10.1177/004051758705701104.
- [89] M. Arnold, *Einfluss verschiedener Angusssszenarien auf den Harzinjektionsprozess und dessen simulative Abbildung*. Zugl.: Kaiserslautern, Techn. Univ., Diss., 2014. Kaiserslautern: Inst. für Verbundwerkstoffe, 2014.
- [90] D. K. Allen und L. Alting, *Manufacturing processes reference guide*, 1. Aufl. New York: Industrial Press, 1994.
- [91] B. Grünbaum und G. C. Shephard, „Tilings by Regular Polygons“, *Mathematics Magazine*, Jg. 50, Nr. 5, S. 227, 1977, doi: 10.2307/2689529.
- [92] G. Gan und S. B. Riffat, „Pressure loss characteristics of orifice and perforated plates“, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Jg. 14, Nr. 2, S. 160–165, 1997, doi: 10.1016/S0894-1777(96)00041-6.
- [93] H. Salvarli, „Bend and orifice plate interactions and their influence on the pressure losses in internal flow systems“. Dissertation, Brunel University, Uxbridge, 1980.
- [94] J. Stichlmair und A. Mersmann, „Dimensionierung von Bodenkolonnen für die Absorption und Rektifikation“, *Chemie Ingenieur Technik*, Jg. 49, Nr. 2, S. 106–117, 1977, doi: 10.1002/cite.330490204.
- [95] W. Wuest, „Strömung durch Schlitz- und Lochblenden bei kleinen Reynolds-Zahlen“, *Ingenieur-Archiv*, Jg. 22, Nr. 6, S. 357–367, 1954.
- [96] S. Malavasi, G. Messa, U. Fratino und A. Pagano, „On the pressure losses through perforated plates“, *Flow Measurement and Instrumentation*, Jg. 28, S. 57–66, 2012, doi: 10.1016/j.flowmeasinst.2012.07.006.
- [97] I. D. Idelchik, G. R. Malyavskaya, O. G. Martynenko und E. Fried, *Handbook of Hydraulic Resistance: Coefficients of Local Resistance and of Friction*, 2. Aufl. Moscow/Leningrad, 1986.
- [98] H. Sigloch, Hg., *Technische Fluidmechanik*, 6. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008.

- [99] F. Halimi, M. Golzar, P. Asadi und M. H. Beheshty, „Core modifications of sandwich panels fabricated by vacuum-assisted resin transfer molding“, *Journal of Composite Materials*, Jg. 47, Nr. 15, S. 1853–1863, 2013, doi: 10.1177/0021998312451763.
- [100] J. E. Semar, D. May und P. Mitschang, „Evaluation of different perforation patterns for laminate-integrated heating foils in wind turbine rotor blades“ in *ECCM18 - 18th European Conference on Composite Materials*, Athen, Griechenland, 2018.
- [101] L. Ischtschuk *et al.*, „Gemeinsamer technischer Abschlussbericht zum Verbundprojekt HyRoS 0325937(A-F)“.
- [102] Gummiwerk Kraiburg GmbH & Co. KG, „Kraibon - Standard Compounds“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.kraiburg-rubber-compounds.com/wp-content/uploads/PI-KRAIBON-Standardmischungen_ENG_2019web.pdf. Zugriff am: 23. Juni 2022.
- [103] T. Schmidt, F. Schimmer, A. Widera, D. May, N. Motsch und C. Bauer, „A Novel Simulative-Experimental Approach to Determine the Permeability of Technical Textiles“, *KEM*, Jg. 809, S. 487–492, 2019, doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.809.487.
- [104] O. Rimmel und D. May, „Modeling transverse micro flow in dry fiber placement preforms“, *Journal of Composite Materials*, Jg. 54, Nr. 13, S. 1691–1703, 2020, doi: 10.1177/0021998319884612.
- [105] M. Karaki, R. Younes, F. Trochu und P. Lafon, „Progress in Experimental and Theoretical Evaluation Methods for Textile Permeability“, *Journal of Composites Science*, Jg. 3, Nr. 3, 2019, doi: 10.3390/jcs3030073.
- [106] *Rubber, vulcanized or thermoplastic - Determination of tensile stress-strain properties: Elastomere oder thermoplastische Elastomere - Bestimmung der Zugfestigkeitseigenschaften*, ISO 37:2017-11, Internationale Organisation für Normung (ISO), Nov. 2017.
- [107] *Prüfung von Kautschuk und Elastomeren – Bestimmung von Reißfestigkeit, Zugfestigkeit, Reißdehnung und Spannungswerten im Zugversuch*, DIN 53504, Deutsches Institut für Normung e. V. (DIN).

- [108] *Fibre-reinforced plastic composites - Determination of apparent interlaminar shear strength by short-beam method*, ISO 14130:1997, Internationale Organisation für Normung (ISO).
- [109] *ASTM D2344: Standard Test Method for Short-Beam Strength of Polymer Matrix Composite Materials and Their Laminates*, ASTM D2344, ASTM International.
- [110] *Adhesives – Peel test for a flexible-bonded-to-rigid test specimen assembly – Part 1: 90° peel; German version*, DIN EN 28510-1:2014, Deutsches Institut für Normung e. V. (DIN), Jul. 2014.
- [111] *Adhesives — Determination of tensile lap-shear strength of bonded assemblies*, EN 1465:2009, Europäisches Komitee für Normung (CEN).
- [112] G. Habenicht, *Kleben*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009.
- [113] *Adhesives — Determination of the mode I adhesive fracture energy of structural adhesive joints using double cantilever beam and tapered double cantilever beam specimens*, ISO 25217, Internationale Organisation für Normung (ISO).
- [114] *Fibre-reinforced plastic composites — Determination of mode I interlaminar fracture toughness, G_{IC} , for unidirectionally reinforced materials*, ISO 15024, Internationale Organisation für Normung (ISO).
- [115] A. Biel und U. Stigh, „An analysis of the evaluation of the fracture energy using the DCB-specimen“, *Archives of Mechanics*, Jg. 59, 4-5, S. 311–327, 2007.
- [116] R. Dimitri, P. Cornetti, V. Mantič, M. Trullo und L. de Lorenzis, „Mode-I debonding of a double cantilever beam: A comparison between cohesive crack modeling and Finite Fracture Mechanics“, *International Journal of Solids and Structures*, Jg. 124, S. 57–72, 2017, doi: 10.1016/j.ijsolstr.2017.06.007.
- [117] *Adhesives – Determination of tensile strength of butt joints (ISO 6922:1987 modified); German version*, DIN EN 15870:2009, Deutsches Institut für Normung e. V. (DIN).
- [118] Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung, *GESTIS-Stoffdatenbank: Cyanguanidin/Dicyandiamid*. [Online]. Verfügbar unter: <https://gestis.dguv.de/data?name=016220> (Zugriff am: 28. Dezember 2022).
- [119] MLT - Micro Laser Technology GmbH, *MLT Systeme für die Laserperforation*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.microlasertech.com/de/produkte/laser_perforationssysteme/ (Zugriff am: 28. Dezember 2022).

- [120] WWR Zerspanungstechnik GmbH, „Datenblätter mit Maßangaben - Standard Lochstanzen“.
- [121] W. Kleppmann, *Versuchsplanung: Produkte und Prozesse optimieren*, 9. Aufl. München: Hanser, 2016.
- [122] K. Siebertz, D. van Bebbber und T. Hochkirchen, *Statistische Versuchsplanung: Design of Experiments (DoE)*, 2. Aufl. Berlin, Germany: Springer Vieweg, 2017.
- [123] StatEase, *Dokumentation zu Design Expert 12: Randomized Factorial Designs*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.statease.com/docs/v12/designs/factorial-randomized/> (Zugriff am: 15. Januar 2023).
- [124] R. A. Fisher, *Statistical Methods for Research Workers*. Edinburgh: Oliver and Boyd, 1925. [Online]. Verfügbar unter: <http://psychclassics.yorku.ca/Fisher/Methods/index.htm>
- [125] L. Cheng und A. Wiegmann, „FlowDict User Guide: GeoDict release 2020“, 2019.
- [126] M. J. Anderson und P. J. Whitcomb, „Practical Aspects for Designing Statistically Optimal Experiments“, *JSSA*, Jg. 2, Nr. 3, 2014, doi: 10.17265/2328-224X/2014.03.001.
- [127] StatEase, *Dokumentation zu Design Expert 12: Response Transformations*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.statease.com/docs/v12/contents/analysis/response-transformations/> (Zugriff am: 15. Januar 2023).
- [128] StatEase, *Dokumentation zu Design Expert 12: Box Cox Plot*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.statease.com/docs/v12/screen-tips/analysis-node/diagnostics/box-cox/> (Zugriff am: 15. Januar 2023).
- [129] StatEase, *Dokumentation zu Design Expert 12: Automatic Model Selection*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.statease.com/docs/v12/designs/automatic-selection/> (Zugriff am: 15. Januar 2023).

8 Anhang

8.1 Einfluss des Lochradius auf die Durchflussmenge durch ein Rohr nach dem Gesetz von Hagen-Poiseuille

An dieser Stelle soll gezeigt werden, warum nach dem Gesetz von Hagen-Poiseuille wenige große Löcher theoretisch zu einer besseren Durchströmung der Perforation führen sollten als viele kleine. Hierzu soll der Unterschied zwischen einer Strömung durch ein einzelnes Loch der Lochfläche A mit dem Radius r_1 und einer Gruppe von n Löchern mit dem Radius r_n , die in der Summe ebenfalls die Lochfläche A haben, untersucht werden. Es gilt:

$$A = \pi * r_1^2 = n * \pi * r_n^2$$

Daraus ergibt sich:

$$r_n = \frac{r_1}{\sqrt{n}}$$

Durch Einsetzen in das Gesetz von Hagen-Poiseuille (siehe Gleichung (2.10)) ergibt sich dann für die Volumenströme für das Einzelloch Q_1 und für die Lochgruppe Q_n , wobei π , Δp , η und l in beiden Fällen identisch sind und daher zur besseren Übersichtlichkeit als Vorfaktor k zusammengefasst werden können:

$$Q_1 = \frac{\pi * r_1^4 * \Delta p}{\eta * L} = k * r_1^4$$

$$Q_n = \frac{\pi * r_n^4 * \Delta p}{\eta * L} = \frac{\pi * \left(\frac{r_1}{\sqrt{n}}\right)^4 * \Delta p}{\eta * L} = k * \frac{r_1^4}{n^2}$$

Somit ergibt sich:

$$Q_n = \frac{Q_1}{n^2}$$

Bei ansonsten gleichen Bedingungen sinkt nach dem Gesetz von Hagen-Poiseuille also der Volumenstrom quadratisch mit der Anzahl der Löcher, auf die die Querschnittsfläche aufgeteilt wird.

8.2 Ergebnisse der Dickenpermeabilitätsmessung

Versuchsblock	Versuchsnummer	Faktor A: BG	Faktor B:d	Faktor C:Art der Fase	K3
		%	mm	---	μm^2
Referenz	Ref. 1	---	---	---	3,634
Referenz	Ref. 2	---	---	---	3,894
Referenz	Ref. 3	---	---	---	3,728
1	1	85	2	Außen	1,225
2	12	85	2	Außen	1,403
1	3	85	2	Innen	0,888
2	10	85	2	Innen	0,975
1	2	85	4	Außen	0,993
2	11	85	4	Außen	1,014
1	4	85	4	Innen	0,994
2	14	85	4	Innen	0,835
3	17	91,5	3	Außen	0,718
3	20	91,5	3	Außen	0,757
3	18	91,5	3	Innen	0,530
3	19	91,5	3	Innen	0,559
1	8	98	2	Außen	0,296
2	13	98	2	Außen	0,330
1	5	98	2	Innen	0,301
2	15	98	2	Innen	0,232
1	7	98	4	Außen	0,288
2	16	98	4	Außen	0,352
1	6	98	4	Innen	0,256
2	9	98	4	Innen	0,250

Referenz: Messungen des Textils, ohne perforierte Elastomerschicht

Die Messungen erfolgten alle bei einer Druckdifferenz Δp von 0,5 bar.

Zur besseren Übersichtlichkeit wurden die Messungen nach Bedeckungsgrad (*BG*) Lochdurchmesser (*d*) und der Art der Fase der verwendeten Lochstanze sortiert. Die Spalte Versuchsnummer gibt die Reihenfolge der tatsächlichen Versuchsdurchführung an, die, wie bei statistischer Versuchsplanung üblich, randomisiert wurde. Dabei wurden die Versuche in vier Blöcke unterteilt. Zunächst wurden die Referenzmessungen durchgeführt. Darauf folgten die Messungen des vollfaktoriellen 2^3 Versuchsplans (Block 1), die wiederholt wurden (Block 2). Den Abschluss bilden die Mittelpunktversuche, die ebenfalls wiederholt wurden (Block 3).

8.3 Ergebnisse der Validierung des Simulationsmodells

Simulationsnummer	Faktor A: BG	Faktor B: d	Faktor C: Lochfüllung	Ergebnis: K3 gesamt
	%	mm	---	μm^2
7	85,0	2,0	leer	2,8952
1	85,0	2,0	textilgefüllt	1,7419
2	85,0	4,0	leer	2,2141
4	85,0	4,0	textilgefüllt	1,4519
9	91,5	3,0	leer	1,6698
10	91,5	3,0	textilgefüllt	0,9877
3	98,0	2,0	leer	0,6187
8	98,0	2,0	textilgefüllt	0,2998
5	98,0	4,0	leer	0,3488
6	98,0	4,0	textilgefüllt	0,2148

Zur besseren Übersichtlichkeit wurden die Simulationsergebnisse nach Bedeckungsgrad (BG) Lochdurchmesser (d) und danach sortiert, ob das Loch als leer oder als textilgefüllt simuliert wurde. Die Spalte Simulationsnummer gibt die Reihenfolge der tatsächlichen Simulationsdurchführung an, die, wie bei statistischer Versuchsplanung üblich, randomisiert wurde. Auch wenn dies bei den durchgeführten Simulationen eigentlich keinen Einfluss auf das Ergebnis haben darf, da es sich um deterministische Simulationen handelt.

8.4 Ergebnisse der Simulation der perforierten Schicht ohne Textil

Simulationsnummer	Faktor A: BG	Faktor B:d	K3
	%	mm	μm^2
1	85,0	2,0	10128
5	85,0	3,0	22015
3	85,0	4,0	38942
7	91,5	2,0	5732
9	91,5	3,0	12495
8	91,5	4,0	22085
2	98,0	2,0	1349
6	98,0	3,0	2955
4	98,0	4,0	5169

Modellgleichung (Einheiten wie in Tabelle!):

$$K_3 = -1,304 * 10^{-5} + 1303,96 * BG + 96119,19 * d - 961,25 * BG * d$$

8.5 Simulationsergebnisse zum Einfluss der Textilpermeabilität

Diese Tabelle zeigt die Simulationsergebnisse zum Einfluss der Textilpermeabilität auf die Gesamtdickenpermeabilität. Die Sortierung erfolgt aufsteigend nach den Faktoren. Die Simulationsnummer gibt die Reihenfolge der Durchführung an. Der Punkttyp sagt aus, ob es sich um einen regulären Modellpunkt, einen „Lack-of-Fit“ Punkt zur Modellüberprüfung oder eine Simulationswiederholung handelt.

Simulationsnummer	Punkttyp	Faktor A	Faktor B	Faktor C	Faktor D	Faktor E	Ergebnis K3 gesamt
		K1 µm ²	K1/K2 ---	K1/K3 ---	d mm	BG %	
17	Modellpunkt	25,00	1,00	1,00	2,00	85,00	8,1526
21	Modellpunkt	25,00	1,00	1,00	2,00	98,00	1,1276
19	Modellpunkt	25,00	1,00	1,00	4,00	98,00	0,8149
20	Modellpunkt	25,00	1,00	23,23	3,22	90,98	0,3366
10	Modellpunkt	25,00	1,00	40,00	2,00	85,00	0,3232
15	Modellpunkt	25,00	1,00	40,00	2,00	98,00	0,0635
40	Wiederholung	25,00	1,00	40,00	2,00	98,00	0,0635
29	Modellpunkt	25,00	4,62	4,62	4,00	85,00	1,5764
30	Modellpunkt	25,00	5,73	40,00	4,00	98,00	0,0420
25	Modellpunkt	25,00	10,00	10,00	2,00	98,00	0,1600
5	Modellpunkt	25,00	10,00	10,00	2,95	89,68	0,6350
23	Modellpunkt	25,00	10,00	10,00	4,00	98,00	0,1138
8	Modellpunkt	25,00	10,00	40,00	2,00	85,00	0,2952
37	Wiederholung	25,00	10,00	40,00	2,00	85,00	0,2952
14	Modellpunkt	25,00	10,00	40,00	4,00	85,00	0,2494
32	Lack of Fit-Punkt	35,00	4,96	18,55	2,84	98,00	0,1262
2	Modellpunkt	40,75	1,00	40,00	4,00	85,00	0,4741
38	Wiederholung	40,75	1,00	40,00	4,00	85,00	0,4741
28	Modellpunkt	47,25	10,00	40,00	2,99	98,00	0,0861
33	Lack of Fit-Punkt	47,50	6,18	16,60	4,00	92,77	0,5372
6	Modellpunkt	48,50	5,50	22,88	2,00	90,53	0,6978
9	Modellpunkt	52,50	10,00	10,00	4,00	85,00	1,6592
22	Modellpunkt	56,25	1,00	1,00	3,05	98,00	2,0516
35	Lack of Fit-Punkt	62,25	1,45	24,79	3,17	92,48	0,6631
34	Lack of Fit-Punkt	72,00	5,59	5,59	3,13	85,98	3,9481
18	Modellpunkt	75,00	1,00	1,00	2,00	85,00	24,2893
1	Modellpunkt	75,00	1,00	1,00	4,00	90,53	11,5213
4	Modellpunkt	75,00	1,00	19,53	4,00	85,00	1,6425
11	Modellpunkt	75,00	1,00	21,67	2,00	98,00	0,3193
27	Modellpunkt	75,00	1,00	40,00	2,00	90,27	0,7281
24	Modellpunkt	75,00	1,00	40,00	4,00	98,00	0,1496
36	Wiederholung	75,00	1,00	40,00	4,00	98,00	0,1496
3	Modellpunkt	75,00	5,50	40,00	3,01	85,00	0,8400
12	Modellpunkt	75,00	5,63	5,63	2,00	98,00	0,7765
31	Lack of Fit-Punkt	75,00	8,79	24,48	2,77	91,63	0,7966
26	Modellpunkt	75,00	10,00	10,00	2,00	85,00	2,9830
39	Wiederholung	75,00	10,00	10,00	2,00	85,00	2,9830
13	Modellpunkt	75,00	10,00	10,00	4,00	98,00	0,3406
16	Modellpunkt	75,00	10,00	40,00	2,00	98,00	0,1601
7	Modellpunkt	75,00	10,00	40,00	4,00	90,40	0,5167

8.6 Modellgleichung der Simulationen zum Einfluss der Textilpermeabilität

Die Modellgleichung ist zur besseren Übersicht tabellarisch dargestellt.

Es gilt:

$$\text{Zielgröße} = \text{Konstante} + \text{Vorfaktor 1} * \text{Faktor 1} + \text{Vorfaktor 2} * \text{Faktor 2} + \dots$$

$$\log_{10}(K_{3,gesamt}) = -36,47075 +$$

Vorfaktor	Faktor
0,023349	K_1
-0,085284	$\frac{K_1}{K_2}$
-0,071205	$\frac{K_1}{K_3}$
-0,089588	d
0,868018	BG
0,001037	$\frac{K_1}{K_2} * \frac{K_1}{K_3}$
0,001219	$\frac{K_1}{K_3} * BG$
-0,000139	$(K_1)^2$
0,00344	$\left(\frac{K_1}{K_2}\right)^2$
0,000836	$\left(\frac{K_1}{K_3}\right)^2$
-0,00507	$(BG)^2$

Folgende Einheiten sind beim Einsetzen von Zahlenwerten zu verwenden:

$$K_{3,gesamt} \quad \mu\text{m}^2$$

$$K_1: \quad \mu\text{m}^2$$

$$\frac{K_1}{K_2} \quad \text{Einheitenloses Verhältnis}$$

$$\frac{K_1}{K_3} \quad \text{Einheitenloses Verhältnis}$$

$$d \quad \text{mm}$$

$$BG \quad \%$$

8.7 Betreute studentische Arbeiten

Sopp, Fabian: Experimentelle Studie zur Imprägnierung von Glasfasergelegen mit einer Elastomermatrix, Bachelorarbeit, IVW-Bericht 16-070, 2016

Enderlein, Marie: Entwicklung eines Modells zur Temperaturverteilung in Rotorblättern von Windenergieanlagen bei Verwendung einer elektrischen Rotorblattheizung, Diplomarbeit, IVW-Bericht 17-028, 2017

Lichtner, Patrick: Entwicklung eines Sensorkonzepts für ein geregeltes RTM-Werkzeug, Masterarbeit, IVW-Bericht 17-041, 2017

Maire, Eva: Experimentelle und numerische Untersuchung der Durchströmung von technischen Textilien mit eingebetteten Folien, Diplomarbeit, IVW-Bericht 17-062, 2017

Ritter, Alexandra: Imprägnierung von Glasfasergelegen mit einer Elastomermatrix und Bestimmung der Schälfestigkeit, Studienarbeit, IVW-Bericht 18-038, 2018

Haustov, Vitali: Fließsimulation der Harzausbreitung in einem RTM Werkzeug mit geregelter Harzinjektion, Masterarbeit, IVW-Bericht 18-040, 2018

Bozkurt, Leyla: Herstellung und Untersuchung eines erosionsbeständigen Glasfaserhalbzeugs zum Schutz von Windenergieanlagen, Studienarbeit, IVW-Bericht 19-024, 2019

Kissel, Florian: Untersuchung der Industrieanforderungen an nachhaltige Verstärkungsfasern und Harzsysteme für den Bau- und Transportsektor, Projektarbeit, IVW-Bericht 19-037, 2019

Horten, Simon: Studie zum Imprägnierverhalten und den mechanischen Eigenschaften von nachhaltigen Faser-Kunststoff-Verbunden, Bachelorarbeit, IVW-Bericht 19-051, 2019

Jungbluth, Simon: Untersuchung der Festigkeit von Faser-Kunststoff-Verbunden mit integrierten Elastomerschichten, Projektarbeit, IVW-Bericht 19-061, 2019

Conradt, Mario: Untersuchung der Permeabilität textiler Preforms mit eingebetteten, perforierten Elastomerschichten, Studienarbeit, IVW-Bericht 20-005, 2020

Weber, Christian: Einfluss der Verarbeitungsparameter auf die Impact-Eigenschaften von Faser-Kunststoff-Verbunden mit integrierten Elastomerschichten, Diplomarbeit, IVW-Bericht 20-020, 2020

Wolf, Marvin: Simulation der Durchströmung von Textilien mit eingebetteten, perforierten Schichten, Bachelorarbeit, IVW-Bericht 20-032, 2020

Müller, Martin: Versuchsstandaufbau und Bestimmung der Sättigungsdampfdruckkurve von ϵ -Caprolactam. Masterarbeit, IVW-Bericht 22-037, 2022

8.8 Sonstige betreute Arbeiten

Hirse Korn, Nikolay: Recherche und Bewertung von beheizbaren Druckschläuchen für eine Caprolactam-Injektionsanlage. Projektarbeit Technikerschule, IVW-Bericht 21-021, 2021

Scholti, Marcel: Konzeptentwicklung eines Mischkopfes für eine Injektionsanlage. Projektarbeit Technikerschule, IVW-Bericht 21-022, 2021

8.9 Publikationen

8.9.1 Zeitschriften (mit wissenschaftlicher Qualitätssicherung)

May, David; Willenbacher, Björn; Semar, Jan; Sharp, Keith; Mitschang, Peter: "Out-of-plane permeability of 3D woven fabrics for composite structures", *The Journal of The Textile Institute*, Jg. 136, Nr. 2, S. 1047-1053, 2019, doi: 10.1080/00405000.2019.1682759

Semar, Jan Eric; May, David: "Textile-Integrated Elastomer Surface for Fiber Reinforced Composites", *Key Engineering Materials (KEM)*, Jg. 809, S. 53-58, 2019, doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.809.53

Semar, Jan Eric; May, David; Mitschang, Peter: "Evaluation of different bonding strategies for glass fibre-reinforced epoxy resin with embedded elastomer layers", *Plastics, Rubber and Composites*, Jg. 51, Nr. 8, S. 454-461, 2022, doi: 10.1080/14658011.2022.2111512

8.9.2 Zeitschriften (ohne wissenschaftliche Qualitätssicherung)

Semar, Jan Eric: „Nachhaltige Verbundwerkstoffe mit Brandschutzeigenschaften“, *CVCnews (Commercial Vehicle Cluster)*, 1/2019

Ischtschuk, Lars; Ohlendorf, Jan-Hendrik; Grosspietsch, Thomas; Semar, Jan Eric; Brinck, Michael; Hogeback, Tim; Bärtl, Christina: "Multifunktionales Hybridmaterial zum Schutz von Rotorblättern", *Lightweight Design*, 4/2019

Heilos, Katharina; Große, Anna; Semar, Jan Eric, Goethals, Frederik: „Flammhemmende, nachhaltige Verbundwerkstoffe“, *AVK Composites Report*, 2/2020

8.9.3 Symposien- und Konferenzbeiträge (Vorträge)

Semar, Jan Eric; Duhovic, Miro; Derdas, Christos; May, David: “Material Characterization and Infusion Simulation of Highly Reactive Resin Systems” *ESI Forum Germany*, 2017

Semar, Jan Eric; May, David; Mitschang, Peter: “Evaluation of different perforation patterns for laminate-integrated heating foils in wind turbine rotor blades”, *18th European Conference on Composite 2018 (ECCM18)*

May, David; Rimmel, Oliver; Schmidt, Tim; Semar, Jan Eric; Mitschang, Peter: “Faser + Polymer = Verbundwerkstoff? – Lösungen für eine schnelle und gute Imprägnierung”, *23. Nationales SAMPE Symposium*, 2018

May, David; Semar, Jan Eric; Rimmel, Oliver; Schmidt, Tim: “Know your Textile! – Auf dem Weg zur standardisierten und effizienten Permeabilitätsmessung”, *1. RTM Anwenderforum*, 2019

Semar, Jan Eric; May, David; Goergen, Christian; Mitschang, Peter: “Tiefziehfähige Textilien auf Basis von rCF-Stapelfasergarnen” *Composites United Themenwoche: Nachhaltigkeit – Verwertung von CFK-Abfällen entlang der Abfallhierarchie*, 2020

Semar, Jan Eric; May, David; Mitschang, Peter: “Evaluation of different bonding strategies for glass-fiber reinforced epoxy resin with embedded elastomer layers”, *International Conference on Manufacturing of Advanced Composites (ICMAC)*, 2021

Semar, Jan Eric; May, David; Mitschang, Peter: “Development of a Modular, Research-Oriented RTM Injection System for In-Situ Polymerizing Thermoplastics”, *23. Symposium Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde – Verbund 2022*, 2022

8.9.4 Symposien- und Konferenzbeiträge (Poster)

Semar, Jan Eric; May, David: “Textile-Integrated Elastomer Surface for Fiber Reinforced Composites”, *DGM-Symposium Verbundwerkstoffe 2019*

Semar, Jan Eric; May, David; Heilos, Katharina; Große, Anna; Goethals, Frederik; Mitschang, Peter “Flame Retardant Sustainable Composites for Transport and Building Sector”, *Symposium – Brandsicherheit und Gefährdungspotential im Kontext neuartiger innovativer Bauweisen und Produkte (InnoMat Brandschutztag)*, 2019

Semar, Jan Eric; May, David; Heilos, Katharina; Große, Anna; Goethals, Frederik; Mitschang, Peter “Flame Retardant Sustainable Composites for Transport and Building Sector (aktualisierte Fassung)”, *30 Years IVW – Anniversary Colloquium*, 2021

Lebenslauf

Name Jan Eric Semar
Nationalität Deutsch

Berufliche Tätigkeit

Seit 01/2024 Entwicklungsingenieur für Klebprozesse, Carl Zeiss SMT GmbH, Oberkochen
01/2023 – 12/2023 Betreuung des Schwerpunkts „Leichtbau und Neue Materialien“ IMG – Innovations-Management GmbH, Transferinitiative RLP, Kaiserslautern
12/2015 – 08/2022 Wissenschaftlicher Mitarbeiter im Bereich Verarbeitungstechnik Leibniz-Institut für Verbundwerkstoffe GmbH, Kaiserslautern
10/2012 – 03/2015 Hilfwissenschaftler Institut für Flugzeugbau, Universität Stuttgart

Praktika

04/2012 – 06/2012 Fachpraktikum EADS Innovation Works – The Future of Flying, Ottobrunn
08/2009 Grundpraktikum HegerGuss, Enkenbach-Alsenborn
05/2009 – 07/2009 Grundpraktikum General Dynamics European Land Systems, Kaiserslautern

Studium und Schule

10/2009 – 10/2015 Studium der Luft- und Raumfahrttechnik (B.Sc. & M.Sc.) Universität Stuttgart. Vertiefungsrichtungen:

- Materialien, Werkstoffe und Fertigungsverfahren in der LRT
- Entwurf, Auslegung und Bau von Luft- und Raumfahrzeugen

08/2000 – 03/2009 Allgemeine Hochschulreife Gymnasium am Rittersberg, Kaiserslautern